

## بررسی آزمایشگاهی تاثیر انحنای نسبی کانال بر آبستگي بستر در خم 90 درجه

سیدکمال الدین موسوی<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد هیدرولیک، پژوهشکده مهندسی آب و دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

ghods@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: خرداد 1386، پذیرش مقاله: اردیبهشت 1388)

**چکیده** - بیشتر رودخانه‌ها تمایل به ماریچی شدن و فرسایش ساحل خارجی خود را در محل قوسها دارند. به منظور حفظ پایداری سواحل رودخانه‌ها می‌توان از روشهای ساماندهی رودخانه استفاده کرد. یکی از مسائل قابل توجه در مهندسی رودخانه، آبستگي و تغییرات توپوگرافی بستر رودخانه در محل قوس است. پارامترهای مختلفی بر این پدیده مؤثرند. در این تحقیق برای شناسایی و بررسی تأثیر پارامترهای دبی جریان، عمق نسبی جریان و انحنای نسبی کانال بر ابعاد حفره آبستگي، آزمایشهایی طراحی و اجرا شد که نتایج به دست آمده، ارائه می‌شود.

**کلید واژگان:** خم 90 درجه، توپوگرافی بستر، عمق آبستگي، طول آبستگي و عرض آبستگي.

### ۱- مقدمه

اظهار داشته‌اند که بیشینه تنش برشی در تیزترین محل خم روی می‌دهد اما روزوسکی<sup>۱</sup> بر اساس مشاهدات صحرایی ملاحظه کرد که بیشینه فرسایش در کنار مقعر، در موقعیت حداکثر انحنای نیست بلکه در پایین دست آن (حدود 1/5 برابر عرض آبراهه) روی می‌دهد [1]. وی شیب عرضی بستر را به نسبت عمق جریان و شعاع انحنای مرتبط کرد.

مطالعه در زمینه آبستگي از حدود 150 سال پیش شروع شده اما بدلیل پیچیدگیهای خاص آن، هنوز یکی از موضوعات مورد علاقه محققان هیدرولیک است. محققان نشان داده‌اند که تأثیر جریانهای ثانویه بر آبستگي، بسیار مهم و قابل تأمل است و لذا مطالعه در زمینه آبستگي با تحقیق در زمینه ساز و کار جریان ثانویه و توزیع تنش برشی و ابعاد حفره آبستگي ادامه دارد. بیشتر محققان

1. Rozovski (1957)

اودگارد<sup>1</sup> براساس داده های صحرایی چنین نتیجه گرفت که شیب جانبی بستر با نسبت عمق جریان به شعاع انحناء ( $D/r$ ) متناسب است. وی همچنین نشان داد که وزن ذرات رسوب و نیروی برشی، برخی از عوامل مهم و موثر بر حرکت عرضی رسوب است [2و3]. وی همچنین برای توزیع سرعت جریان و قطر ذرات بستر روابطی را ارائه کرد.

تورن<sup>2</sup> رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبستگي ( $d_{se}$ ) براساس نسبت شعاع انحناء به عرض مقطع ( $\frac{r}{w}$ ) به دست آورد [4].

$$\frac{d_{se}}{D} = 1.07 - \text{Log}\left(\frac{r}{w} - 2\right) \quad 2 \text{ p } \frac{r}{w} \text{ p } 22 \quad (1)$$

ایکیدا و نیشیمورا<sup>3</sup> مدل ریاضی را برای شبیه سازی جریان سه بعدی و توپوگرافی بستر در کانال سینوسی شکل ارائه و نتایج آنرا با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه و مشاهده کردند که حداکثر عمق آبستگي در زاویه 60 درجه از ابتدای خم اتفاق می افتد [5].

بگین<sup>4</sup> نشان داد که نیروی وارد شده بر واحد سطح ساحل خارجی در خم، به ضریب انحناء و ضریب انحناء نیز به انحناء نسبی ( $\frac{r}{w}$ ) بستگی دارد. او براساس داده های صحرایی مشاهده کرد که حداکثر فرسایش کنار

خارجی برای  $\frac{r}{w} \approx 3$  روی می دهد [6].

ین و هو<sup>5</sup> مدلی را برای شبیه سازی توپوگرافی بستر در خم رودخانه ها ارائه دادند. ایشان نتایج کارهای تحلیلی برای

خم 90 درجه با مقطع مستطیلی را با نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی برای مسیری سینوسی با مقطع دوزنقه ای مقایسه کردند. آنان نتیجه گرفتند که فرایند تکامل بستر در خم رودخانه ها در صورتی که جریان دائمی باشد و ذرات رسوب یکنواخت فرض شوند، به صورت نمایی با زمان متناسب است و نسبت تناسب نیز به شرایط جریان، هندسه خم و اندازه ذرات رسوب بستگی دارد [7].

ماینورد<sup>6</sup> براساس مقادیر مشاهداتی آبستگي در خم های با بستر شنی، رابطه زیر را ارائه نمود [8]:

$$\frac{D_{max}}{D} = 1.8 - 0.051\left(\frac{r}{w}\right) + 0.0084\left(\frac{w}{D}\right) \quad (2)$$

در این رابطه  $D_{max}$  حداکثر عمق جریان (در ساحل خارجی) و  $D$  میانگین عمق جریان است. محدوده اعتبار رابطه (2)  $1.5 \leq \frac{r}{w} \leq 10$  و  $20 \leq \frac{w}{D} \leq 125$  است.

واتاناب و همکاران<sup>7</sup> رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبستگي ارائه دادند [9]:

$$\frac{d_{se}}{D} = A + B\left(\frac{w}{r}\right) \quad (3)$$

که  $A$  ,  $B$  تابعی از عرض مقطع، عمق جریان و شیب بستر است.

1. Odgaard (1982)
2. Thorne (1983)
3. Ikeda & Nishimura (1986)
4. Begin (1986)
5. Yen & Ho (1990)

6. Maynard (1996)
7. 1990( Watanabe, Hasegawa and Houjyou)

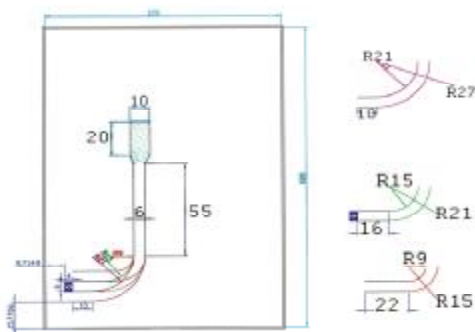
که در این رابطه  $Fr_{d_{50}} = \frac{Q}{wD\sqrt{\Delta r_s g d_{50}}}$  عدد فرود

ذرات و  $\Delta r_s = \frac{r_s - r}{r}$  چگالی نسبی می باشد.

نحوه وابستگی بین پارامترهای معادله (5) را به کمک داده‌های آزمایشگاهی می‌توان به دست آورد.

### 3- نحوه انجام آزمایشها

آزمایشهای موردنظر در فلوم با عرض 60 و ارتفاع 70 سانتی‌متر که بستر آن با ماسه یکنواخت به قطر میانگین  $d_{50}=1/4$  میلی‌متر پوشیده شده بود و در انتهای مسیر مستقیم 5/5 متری خود قوس 90 درجه دارد طراحی و اجرا شد. فلوم موردنظر طوری طراحی شد که امکان تغییر شعاع انحنای آن و استفاده از شعاع‌های انحنای 1/8، 1/2 و 2/4 متر وجود داشته باشد [12]. شکل 1 طرحواره فلوم را نشان می‌دهد.



شکل 1 طرحواره فلوم (ابعاد به دسی‌متر)

نحوه انجام آزمایشها بدین صورت بود که ابتدا دریچه پروانه‌ای تعبیه شده در پایین‌دست فلوم را بالا آورده و اجازه می‌دهیم که جریان به آرامی به فلوم وارد شده و بدون ایجاد آبستگی، بر بستر جاری شود تا سطح آب

هرزبربر و اشلیس<sup>1</sup> آزمایشهایی را در فلوم آزمایشگاهی 90 درجه، برای تعیین تأثیر زبری دیوار بر فرایند آبستگی طراحی و اجرا کردند [10].

قدسیان و موسوی به بررسی آزمایشگاهی آبستگی در یک قوس 90 درجه پرداختند و رابطه ای برای حداکثر عمق آبستگی ارائه دادند.

در این مقاله، نتایج آزمایشهای انجام شده به منظور بررسی اثر برخی پارامترهای مهم (عمق و سرعت جریان و شعاع انحنای قوس) بر ابعاد حفره آبستگی در خم 90 درجه ارائه شده است [11].

### 2- تحلیل ابعادی

بر اساس تحقیقات صورت گرفته در زمینه آبستگی بستر، پارامترهای زیر بعنوان پارامترهای مؤثر بر عمق، طول و عرض آبستگی  $(d_s, l_s, W_s)$  مطرح است:

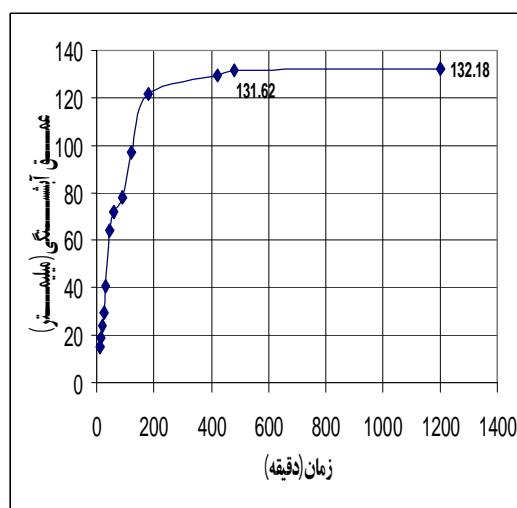
$$(d_s, l_s, W_s) = f(Q, D, d, r, W, \rho, \rho_s, g) \quad (4)$$

در این رابطه  $Q$  دبی جریان،  $D$  عمق جریان ورودی به خم است که در بالادست خم و در مسیر مستقیم اندازه‌گیری می‌شود،  $d$  قطر میانگین مصالح،  $r$  شعاع انحنای کانال،  $w$  عرض مقطع جریان،  $r$  چگالی آب،  $r_s$  چگالی رسوبها و  $g$  شتاب ثقل است.

با استفاده از تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون بعد زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{D}, \frac{l_s}{D}, \frac{W_s}{D}, \frac{l_s}{d_s}, \frac{W_s}{d_s}, \dots = f\left(\frac{r}{W}, \frac{D}{W}, Fr_{d_{50}}\right) \quad (5)$$

1. 2003 (Hersberber & Schlesis)



شکل ۲ تغییرات زمانی مقدار عمق آبشستگی به ازای دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۶

بالا آید. اندازه‌گیری دبی توسط روزنه استاندارد و کالیبره شده‌ای که در مسیر جریان قرار گرفته، انجام شد. برای اندازه‌گیری عمق جریان از دستگاه سطح سنج نقطه ای دیجیتالی و برای اندازه‌گیری پروفیل بستر از دستگاه اندازه‌گیر پروفیل بستر استفاده شد. پس از تنظیم دبی، عمق موردنظر توسط دریچه‌ای تنظیم می‌گشت و سپس آزمایش شروع می‌شد. در پایان آزمایشها، تغییرات عرضی سطح آب توسط دستگاه سطح‌سنج نقطه‌ای دیجیتالی و پروفیل بستر توسط دستگاه اندازه‌گیر پروفیل بستر اندازه‌گیری می‌شد.

جدول (۱) محدوده پارامترها در آزمایشات انجام شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱ محدوده پارامترها

محدوده	پارامتر
۱۵-۴۵	دبی جریان (Lit/sec)
۰/۴ - ۰/۶	عدد فرود جریان (Fr)
۳، ۲ و ۴	انحنای نسبی (r/w)
۰/۱ - ۰/۲۶	نسبت عمق به عرض (D/w)
۰/۷۲-۰/۹۹	نسبت تنش برشی متوسط به تنش برشی بحرانی

#### 4- نتایج آزمایشات

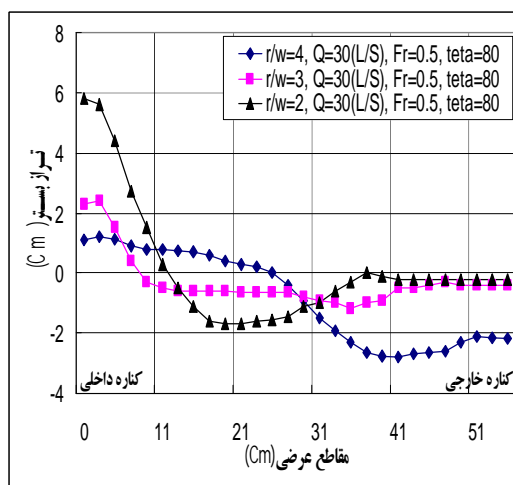
به‌منظور تعیین زمان آزمایش، تعدادی آزمایش بلند مدت انجام شد. نمونه‌ای از نتیجه این آزمایشها در شکل (2) آورده شده است. روشن است که پس از حدود 8 ساعت از شروع آزمایشها، آبشستگی تقریباً به حالت تعادل رسیده طوری که، 99/6% آبشستگی 20 ساعته (حداکثر عمق آبشستگی)، رخ داده و لذا زمان 8 ساعت به‌عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شده است.

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در هر سه انحنای نسبی، به‌ازای عدد فرود ثابت، با افزایش دبی جریان مقدار عمق آبشستگی و ارتفاع تپه رسوبی افزایش می‌یابد. همچنین در دبی‌های بالا، تأثیر عدد فرود جریان مشخص‌تر است. به‌علاوه در هر سه انحنای نسبی به‌ازای دبی ثابت جریان، آبشستگی و ارتفاع تپه رسوبی با افزایش عمق جریان افزایش می‌یابد. طول حفره آبشستگی نیز با افزایش دبی و عدد فرود جریان بیشتر می‌شود. با افزایش دبی و عدد فرود جریان، مصالح از زاویه بالادست‌تر شروع به حرکت می‌کند و محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی در محدوده 60-90 درجه‌ای از ابتدای قوس و در بیشتر موارد در محدوده 80-90 درجه‌ای است. حداکثر ارتفاع رسوبگذاری در زوایای بعد از 50 درجه تشکیل می‌شود. آزمایشها نشان داد که با افزایش دبی و عدد فرود جریان، مصالح از فاصله بیشتری از دیوار به طرف آن متمایل می‌شوند.

## 1-4- تأثیر انحنای نسبی بر پروفیل عرضی

## بستر

در شکل‌های (3) و (4) تأثیر انحنای نسبی کانال بر ابعاد و جاب‌جایی حفره آبستگي و تپه رسوبي به‌ازای دبی 30 لیتر بر ثانیه و عدد فرود 0/5 در زاویه 40 درجه و 80 درجه قوس مشاهده می‌شود. در هر دو شکل ملاحظه می‌شود که با کم شدن انحنای نسبی، بر ارتفاع تپه رسوبي در نزدیکی دیوار داخلی افزوده می‌شود. علاوه بر این، عمق آبستگي در نقاط میانی کانال با کم شدن انحنای نسبی بیشتر می‌شود اما در مجاورت دیوار خارجی چنین نیست. این نتیجه در مقطع 80 درجه به‌دلیل انحراف جریان بطرف دیواره داخلی، با حرکت جریان به پایین دست، مشهودتر است.

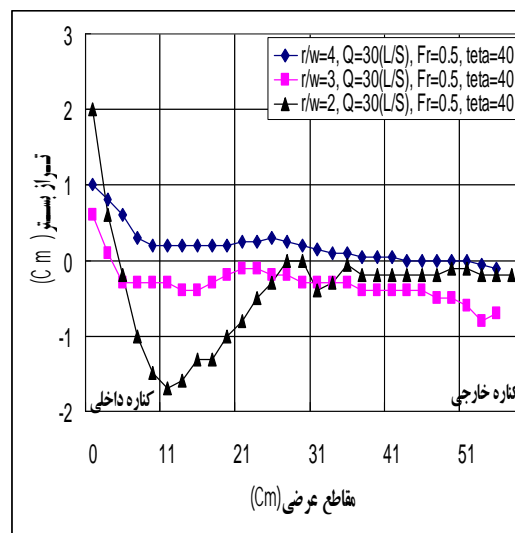


شکل 4 تغییرات پروفیل عرضی بستر در مقطع 80 درجه برای انحنای نسبی 3، 2 و 4 به‌ازای دبی 30 لیتر بر ثانیه، عدد فرود 0/5

## 2-4- تأثیر انحنای نسبی و عدد فرود ذرات بر عمق آبستگي

بررسی پارامترهای بدون بعد حاصل از تحلیل ابعادی نشان داد که در بیشتر موارد، عدد فرود ذرات، بهتر از عدد فرود جریان، با پارامترهای بی بعد شده حفره آبستگي، همخوانی نشان می‌دهد.

همچنین بررسی نتایج آزمایشها نشان داد که بی بعد کردن عمق آبستگي با عمق جریان  $d_s/D$ ، رابطه بدون بعد مناسب و منطقی تشکیل می‌دهد. شکل (5)، تغییرات  $d_s/D$  را برحسب  $Fr_{d_{50}}$  برای انحنای نسبی 3، 2 و 4 نشان می‌دهد. روشن است که افزایش عدد فرود ذرات، برای تمامی حالتها، افزایش عمق آبستگي را به‌دنبال دارد، که این ناشی از افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش تنش برشی اعمال شده به بستر است. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که به‌ازای نسبت  $D/w$  برابر یا کمتر از 0/15، انحنای نسبی کمتر از



شکل 3 تغییرات پروفیل عرضی بستر در مقطع 40 درجه برای انحنای نسبی 3، 2 و 4 به‌ازای دبی 30 لیتر بر ثانیه و عدد فرود 0/5

$$e = \frac{\left(\frac{d_s}{D}\right)_c - \left(\frac{d_s}{D}\right)_m}{\left(\frac{d_s}{D}\right)_m} 100 \quad (7)$$

میانگین خطای  $E$  برای تمامی داده‌های آزمایشگاهی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{100}{N} \sum_1^N \left| \frac{\left(\frac{d_s}{D}\right)_c - \left(\frac{d_s}{D}\right)_m}{\left(\frac{d_s}{D}\right)_m} \right| \quad (8)$$

که در آن  $N$  تعداد داده‌های آزمایشگاهی و  $c$  و  $m$  به ترتیب نشانگر مقادیر محاسباتی و مشاهداتی است. میانگین خطای  $E$  با استفاده از روابط به دست آمده توسط تون (معادله 1) و ماینورد (معادله 2) و رابطه (6) در جدول 2 مقایسه شده است. روشن است که رابطه (6) خطای کمتری در مقایسه با روابط قبلی داشته و از دقت خوبی برخوردار است.

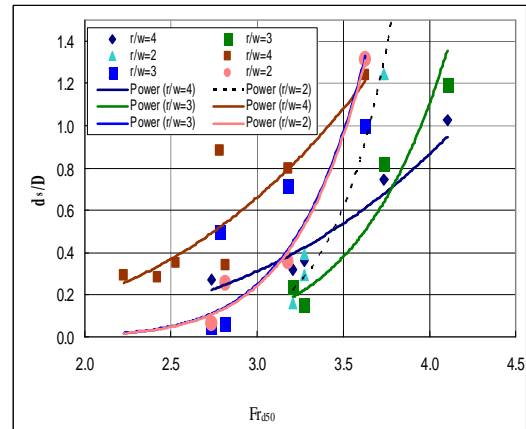
جدول 2 درصد میانگین خطای  $E$  برای عمق نسبی آبشستگی

مطالعه حاضر (معادله 6)	رابطه تون (معادله 1)	رابطه ماینورد (معادله 2)
25/8	197	182

### 3-4- تأثیر انحنای نسبی و عدد فرود ذرات بر طول حفرة آبشستگی

به منظور بررسی اثر انحنای نسبی بر طول حفرة آبشستگی، ابتدا پارامترهای بدون بعد مؤثر بر طول حفرة آبشستگی

3 تأثیر معناداری بر عمق آبشستگی ندارد. با بررسی بیشتر داده‌ها و مطابق معادله (5) مشخص شد که پارامتر نسبت عمق جریان به عرض مقطع  $D/w$  نیز بر عمق آبشستگی مؤثر است. بنابراین می‌توان گفت که  $d_s/D$  تابعی از  $Fr_{d_{50}}$  و  $r/w$  است.



شکل 5 تغییرات عمق نسبی آبشستگی بر حسب عدد فرود ذرات و انحنای نسبی

با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، بهترین رابطه برای محاسبه عمق آبشستگی بر حسب عدد فرود ذرات، انحنای نسبی و عمق نسبی به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{d_s}{D} = 1.61 * 10^{-5} Fr_{d_{50}}^{5.34} \left(\frac{r}{w}\right)^{0.82} \left(\frac{D}{w}\right)^{-1.68} \quad (6)$$

عمق آبشستگی نسبی محاسباتی  $(d_s/D)_c$  با عمق آبشستگی نسبی اندازه‌گیری شده  $(d_s/D)_m$  مقایسه شد و خطای حاصل  $\varepsilon$  به صورت زیر به دست آمد:

رابطه زیر بین نسبت طول حفره آبستگي به عمق حفره آبستگي، عدد فرود ذرات و انحنای نسبی به دست آمد:

$$\frac{l_s}{d_s} = 1700 Fr_{d_{50}}^{-2.87} \left(\frac{r}{w}\right)^{-0.4} \quad (9)$$

خطای میانگین ناشی از رابطه فوق برای داده‌های آزمایشگاهی برابر 26/5 درصد به دست آمد.

ارتباط بین طول آبستگي و عمق جریان، با استفاده از

داده‌های آزمایشگاهی به صورت تغییرات  $\frac{l_s}{D}$  بر

حساب  $Fr_{d_{50}}$  و  $\frac{r}{w}$  به صورت زیر به دست آمد:

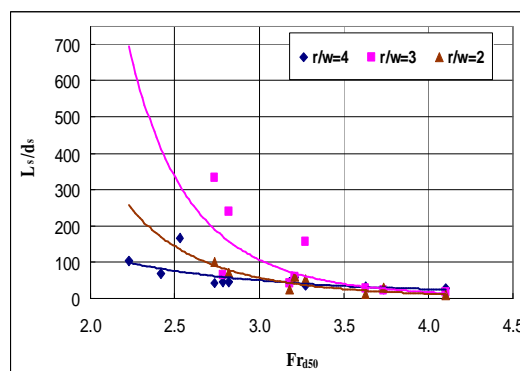
$$\frac{l_s}{D} = 5.6 Fr_{d_{50}}^{-0.14} \frac{r}{w} \quad (10)$$

میانگین خطای ناشی از رابطه فوق برای داده‌های آزمایشگاهی برابر 33/2 درصد به دست آمد.

#### 4-4- تأثیر انحنای نسبی و عدد فرود ذرات بر عرض حفره آبستگي

در این قسمت به بررسی اثر انحنای نسبی و عدد فرود ذرات بر عرض حفره آبستگي می‌پردازیم. بررسی داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در این مورد نیز عدد فرود ذرات با عرض نسبی آبستگي همخوانی مناسبی نشان می‌دهد. علاوه بر این مشخص شد که نسبت  $D/w$  بر عرض آبستگي اثرگذار نیست. تغییرات نسبت عرض به عمق آبستگي  $W_s/d_s$  بر حسب عدد فرود ذرات  $Fr_{d_{50}}$  برای نسبت‌های انحنای نسبی برابر 3 و 2 و 4 در شکل (7) نشان داده شده است.

که از تحلیل ابعادی به دست آمده بودند بررسی و مشاهده شد که عدد فرود ذرات با طول نسبی آبستگي، همخوانی مناسبی را نشان می‌دهد. به علاوه بررسی داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که پارامتر  $D/w$  اثر قابل توجهی بر طول حفره آبستگي ندارد. شکل (6) تغییرات نسبت طول به عمق آبستگي  $l_s/d_s$  را بر حسب عدد فرود ذرات  $Fr_{d_{50}}$  برای نسبت انحنای نسبی برابر 2، 3 و 4 نشان می‌دهد.



شکل 6 تغییرات طول نسبی حفره آبستگي بر حسب عدد فرود ذرات برای مقادیر مختلف انحنای نسبی

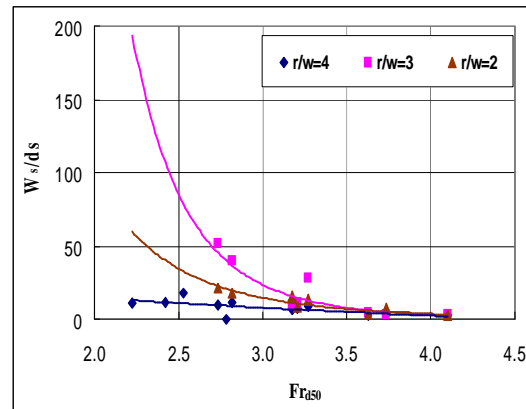
این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ذرات، نسبت  $l_s/d_s$  کاهش می‌یابد. تأثیر  $Fr_{d_{50}}$  به ترتیب برای انحنای نسبی 2، 3 و 4 بیشتر است یعنی از انحنای نسبی 2 تا 3، نسبت  $l_s/d_s$  بیشتر می‌شود. اما از انحنای نسبی 3 تا 4، این نسبت کم می‌شود. به ازای عدد فرود ذرات بزرگتر از حدود 3/5، نسبت  $l_s/d_s$  متأثر از انحنای نسبی نخواهد بود. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی،

$$\frac{W_s}{D} = 3.5 Fr_{d50}^{-0.07} \left( \frac{r}{w} \right)^{-0.06} \quad (12)$$

خطای میانگین ناشی از رابطه فوق برای داده‌های آزمایشگاهی برابر 32/2 درصد به دست آمد. در شکل‌های 8 و 9 نمونه‌ای از پروفیل بستر به ازای دبی 45 لیتر بر ثانیه و عدد فرود 0/5 برای انحنای نسبی 4 نشان داده شده است. در این شکل خطوط هم‌تراز ممتد بیانگر رسوبگذاری و خطوط هم‌تراز منقطع آبشستگی را نشان می‌دهد که به سانتی‌متر است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که بیشتر آبشستگی و رسوبگذاری در زاویه‌های 80-90 درجه رخ می‌دهد. با مقایسه این دو شکل نتیجه می‌شود که با کم شدن انحنای نسبی، عرض حفره آبشستگی و طول حفره آبشستگی بیشتر می‌شود اما ارتفاع تپه رسوبی در مجاورت دیوار خارجی کمتر می‌شود. ارتفاع تپه رسوبی نیز با کم شدن انحنای نسبی کم می‌شود.

#### 4- نتیجه گیری

به عنوان نتیجه حاصل از این آزمایشها می‌توان گفت:  
1- در هر سه انحنای نسبی، با افزایش دبی جریان، عمق آبشستگی و ارتفاع تپه ایجاد شده بر اثر رسوبگذاری افزایش می‌یابد.



شکل 7 تغییرات عرض نسبی حفره آبشستگی بر حسب عدد فرود ذرات برای مقادیر مختلف انحنای نسبی

شکل (7) نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ذرات، نسبت  $W_s/d_s$  کاهش می‌یابد. تأثیر  $Fr_{d50}$  به ترتیب بر انحنای نسبی 3، 2 و 4 بیشتر است یعنی از انحنای نسبی 2 تا 3، نسبت  $W_s/d_s$  بیشتر شده و از انحنای نسبی 3 تا 4، این نسبت کم می‌شود. به علاوه به ازای عدد فرود ذرات بزرگتر از حدود 3/5، نسبت  $W_s/d_s$  متأثر از انحنای نسبی نخواهد بود. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، بهترین رابطه‌ای که بین نسبت عرض حفره آبشستگی به عمق حفره آبشستگی، عدد فرود ذرات و انحنای نسبی وجود دارد، به قرار زیر به دست آمد:

$$\frac{W_s}{d_s} = 350 Fr_{d50}^{-2.67} \left( \frac{r}{w} \right)^{-0.8} \quad (11)$$

خطای میانگین ناشی از رابطه فوق برای داده‌های آزمایشگاهی برابر 27/5 درصد به دست آمد.

ارتباط بین عرض آبشستگی و عمق جریان، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بصورت تغییرات  $\frac{W_s}{D}$  بر حسب  $Fr_{d50}$  و  $\frac{r}{w}$ ، بصورت رابطه زیر به دست آمد:



2- در دبی‌های کم، اثر عدد فرود جریان در افزایش عمق آبشستگی و ارتفاع تپه رسوبی کمتر است درحالی‌که در دبی‌های بالا، اثر عدد فرود بیشتر می‌شود.

3- با افزایش دبی و عدد فرود جریان، هم تعداد تپه‌های رسوبی بیشتر می‌شود و هم بر سرعت آنها افزوده می‌شود و تپه‌ها در مدت زمان کمتری از قوس خارج می‌شوند.

4- در بیشتر آزمایشها محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش دبی و عدد فرود جریان و با گذشت زمان، به سمت پایین دست منتقل می‌شود. محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی در موقعیت حدود 60-90 درجه از ابتدای قوس و در بیشتر موارد در محدوده زاویه 80-90 درجه است.

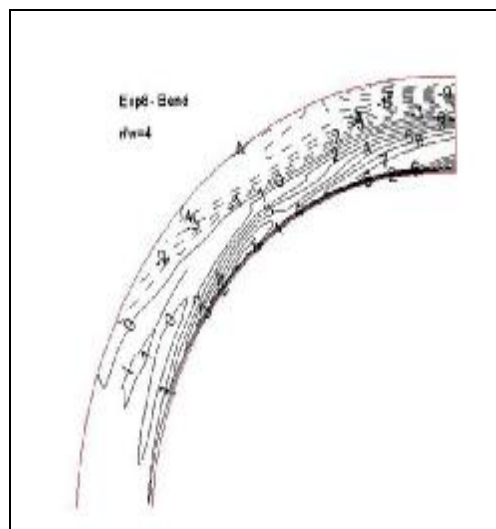
5- با کم شدن انحنای نسبی، حفره آبشستگی به سمت وسط مقطع و تپه رسوبگذاری به طرف دیوار داخلی حرکت می‌کند. به علاوه عمق حفره آبشستگی در ساحل خارجی نیز کاهش می‌یابد.

6- در بیشتر آزمایشها با کاهش انحنای نسبی، عمق آبشستگی افزایش می‌یافت.

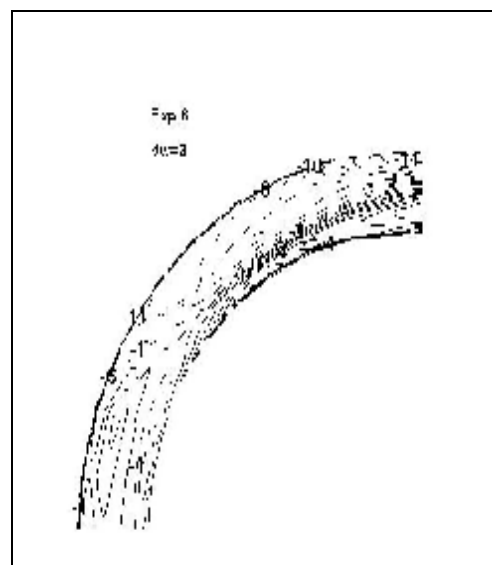
7- روابط جدیدی برای تخمین ابعاد حفره آبشستگی در خم 90 درجه ارائه شد.

## 5- مراجع

- [1] Rozovskii, I. L., "Flow of Water in Bend of Open Channel", Academy of science of the Ukraine SSR, Institute of hydrology and hydraulic engineering, (1957).
- [2] Odgaard A.J., "Transverse Bed Slope in Alluvial Channel Bends", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 107, No.12, (1981), pp. 166-169.
- [3] Odgaard A.J., "Bed Characteristics in Alluvial Channel Bends", *Journal of*



شکل 8 پروفیل بستر به‌ازای دبی 45 لیتر بر ثانیه و عدد فرود 0/5 در انحنای نسبی 4



شکل 9 پروفیل بستر به‌ازای دبی 45 لیتر بر ثانیه و عدد فرود 0/5 در انحنای نسبی 3

- [9] Watanabe, Y., Hasegawa, K. and Houjyou, K., "Influence of Hydraulic Factors on River Bed Scour", *Journal of Hydro science and Hydraulic Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. 8, No. 2, (1990) pp.53-63.
- [10] Hersberger D. S. and Schleiss A. J., "Influence of the Wall Macro-Roughness on the Scour Process in Curved Channels", *Proceedings of the XXX IAHR Congress*, Theme C, Thessaloniki, Greece, 24-29 August 2003, pp. 333-340.
- [11] Ghodsian, M. and Mousavi, S. K., "Experimental Study on Bed Scour in a 90° Channel Bend", *International journal of Sediment Research*, Vol. 21, No. 4, (2006), pp. 321-328.
- [۱۲] موسوی، سید کمال الدین، " بررسی آزمایشگاهی تاثیر شعاع انحنای کانال بر آبستگي بستر در یک خم 90 درجه "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، 1382، 120.
- Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 108, No.11, (1982), pp. 1268-1281.
- [4] Thorne, C. R., "Prediction of Near-bank Velocity and Scour Depth in Meander Bends for Design of Riprap Revetments", Riprap workshop, Fort Collins, Colorado, (1993), pp 980-1007.
- [5] Ikeda S. and Nishimura, T., "Flow and Bed Profile in meandering Sand-silt Rivers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No.7, (1986), pp 562-579.
- [6] Ze'ev B. Begin, "Curvature Ratio and Rate of River Bend Migration", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 10, (1986), pp. 904-908.
- [7] Chin-lien Yen and Shin Ya Ho, "Bed Evolution in Channel Bends", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 4, (1981), pp. 544-562.
- [8] Maynard, S.T, "Toe Scour Estimation in Stabilized Bend ways", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No.8, (1996 ), pp. 460-464.