

تعیین مکان شکل‌گیری چاله در آبراه سینوسی

منصور ابوالقاسمی¹، مسعود قدسیان^{2*}، سیدعلی ایوب زاده³، محمود شفاعی بجزستان⁴

1- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس و کارشناس مؤسسه تحقیقات آب،

2- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

3- استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

4- دانشگاه شهیدچمران، دانشکده مهندسی علوم آب

* تهران، صندوق پستی 143 - 14115

ghods@modares.ac.ir

چکیده - مصالح رسوبی بستر در بازه‌های قوسی شکل، به دلیل وقوع جریان حلزونی ناشی از شرایط انحنا، تحت تأثیر این جریان از ساحل قوس خارجی به سمت قوس داخلی رانده شده و بنابراین دستیابی به جریان با میزان رسوب کمتر در ساحل قوس خارجی برای اهداف عملی انحراف جریان آب امکان‌پذیر است. همچنین به دلیل فرسایشی که در قوس خارجی به وقوع می‌پیوندد، عمق آب در این ناحیه افزایش یافته و بار بستر، در عمق بیشتری از سردهانه آبراه حرکت خواهد کرد، لذا در مکانی از قوس که در آن، جریان ماریچی به بلوغ کامل یا به حداکثر قدرتش رسیده باشد، شرایط فوق تشدید یافته و محل مناسبتری برای جانمایی آبراه است. در این تحقیق، موقعیت این مکان بر روی مدلی با مقطع دوزنقه‌ای در آبراه سینوسی با تزریق پیوسته رسوب (بار بستر) بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که موقعیت شکل‌گیری چاله و نیز سایر پارامترهای مربوط، تابعی از عدد فرود جریان ورودی قوس است. موقعیت بلوغ جریان حلزونی یا مکان بیشترین فرسایش، با افزایش عدد فرود، از نواحی پایین‌دست به بالادست جریان در قوس منتقل می‌شود.

کلید واژگان: مدل فیزیکی، کنترل رسوب، آبراه جانبی، خم رودخانه، چاله فرسایشی.

1- مقدمه

به حداقل مقدار ممکن برسد. استفاده از سازه‌های انحراف رسوب و جانمایی مناسب دهانه آبراه در قوس خارجی رودخانه، برخی از روشهای کاهش رسوب ورودی آبراه است.

وجود خم، به تحمیل نیروی گریز از مرکز به ذرات سیال منجر می‌شود، از آنجاکه مقدار این نیرو (mv^2/r) متناسب با توان دوم سرعت است و علاوه بر آن با توجه به کاهش سرعت جریان در عمق، مقدار این نیرو در مقطع عرضی آبراه متفاوت می‌شود، بطوریکه مقدار نیروی فوقانی بیشتر از تحتانی می‌شود. تأثیر این نیرو موجب

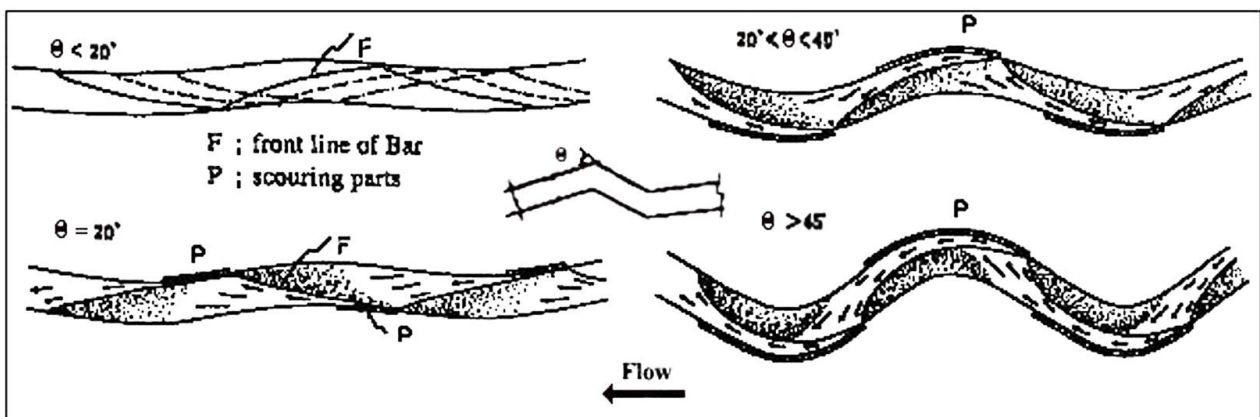
رسوب ورودی آبراه - به دلیل کاهشی که در سرعت جریان در محدوده آن در مقایسه با سرعت جریان رودخانه حاصل می‌شود - بویژه در شبکه‌های توزیع و انتقال و در بالادست سازه‌های کنترل و تنظیم آب، موجب رسوبگذاری در این نواحی می‌شود. ادامه این روند به بروز مشکلات بهره‌برداری از این تأسیسات منجر خواهد شد و ممکن است به قطع جریان آب نیز منتهی شود. از طرفی لایروبی و تخلیه رسوبات، مشکلات اجرایی و هزینه‌های بالایی را دربر دارد. از این‌رو در طراحی آبراه‌های جانبی سعی می‌شود تا رسوبات ورودی آبراه

مختلف در ادامه آورده شده است. Yamamoto (1989) بررسی‌هایی را بر روی الگوی جریان، رسوب و شکل‌گیری توده‌های ماسه‌ای در قوسهای مختلف انجام داده است (شکل 1). او نشان داد که در قوس‌ها با زوایای مختلف مرکزی (θ)، همواره تمرکز جریان به سمت قوس خارجی بوده و دامنه تأثیر یا گستردگی چاله با افزایش این زاویه، به بالادست رأس قوس توسعه پیدا می‌کند، در این شکل، ناحیه تحت تأثیر جریان حلزونی با حرف P معرفی شده و F پیشانی توده ماسه‌ای در بستر را نشان می‌دهد.

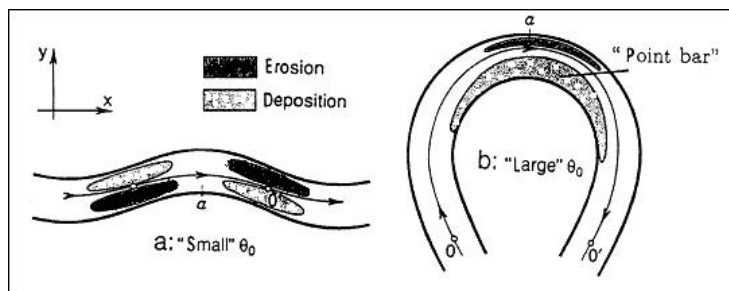
بررسیهای Lien et al. (1999) نشان می‌دهد که مکان وقوع حداکثر قدرت جریان چرخشی یا ناحیه بلوغ کامل آن با حداکثر انحنای قوس اختلاف فازی دارد و بعد از آن تشکیل می‌شود و در این ناحیه، حداکثر عمق فرسایش ایجاد خواهد شد.

نتایج تحقیقات da Silva and Yalin (1997) بر روی محل وقوع نواحی انباشت تله ماسه‌ای و نیز چاله در دو نوع قوس پیچان‌رودی ملایم و بسیار تند در شکل 2 ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود محل شکل‌گیری چاله در قوس تند در محدوده رأس قوس شروع شده و بعد از آن نیز توسعه یافته است.

بالارفتن تراز سطح آب در قوس خارجی نسبت به تراز سطح آب در ساحل داخلی قوس شده و جریان چرخشی را در مقطع به وجود می‌آورد (Raudkivi, 1998). ترکیب این جریان با جریان اصلی (طولی) رودخانه، سبب پیدایش جریان حلزونی شکل می‌شود که از بالادست ساحل قوس خارجی شروع شده و به سمت ساحل قوس داخلی حرکت می‌کند. این جریان، فرسایش در ساحل قوس خارجی و رسوب‌گذاری در ساحل قوس داخلی را در پی دارد (Scheuerlin, 1984)، حداکثر سرعت جریان در نزدیکی ساحل قوس خارجی و بستر رودخانه شکل می‌گیرد که موجب افزایش تنش برشی و فرسایش در این ناحیه شده (Raudkivi, 1998)، و لذا با توجه به فرسایش در قوس خارجی، عمق آب در این ناحیه افزایش یافته و بار بستر در عمق بیشتری از دهانه آبرگیر حرکت خواهد کرد و در نتیجه ذراتی از بار بستر که به صورت جهشی به حالت تعلیق در می‌آیند، امکان ورود کمتری به آبرگیر خواهند داشت. با توجه به شرایط مطلوبی که رژیم هیدرولیکی رودخانه در قوس خارجی ایجاد می‌کند لازم است مکانی را که جریان حلزونی به بلوغ کامل می‌رسد شناسایی کنیم. در این مکان انحراف جریان با حداقل رسوب و نیز با حداکثر دبی حاصل خواهد شد. مروری بر نتایج تحقیقات انجام شده در خم‌های



شکل 1 ارتباط ناحیه تأثیرگذار جریان حلزونی با شعاع انحنای رودخانه (Yamamoto, 1989)



شکل 2 موقعیت فرسایش و رسوبگذاری در رودخانه‌های پیچان‌رودی (da Silva and Yalin, 1997)

مرکزی چاله نیز به سمت پایین منتقل شده است. با تغییر هندسه خم (پیچان‌رود سوم یا ME-3) که با افزایش شعاع خم به میزان 60 درصد انجام شده، چاله در عمق 2- مطابق شکل به پایین دست منتقل شده است.

در ادامه تحقیقات ایشان بر روی خمی نامنظم، نتایج شامل الگوی سرعت و محل شکل‌گیری چاله، در شکل 4 ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود، چاله بعد از رأس قوس اول در این پیچان‌رود شکل گرفته است.

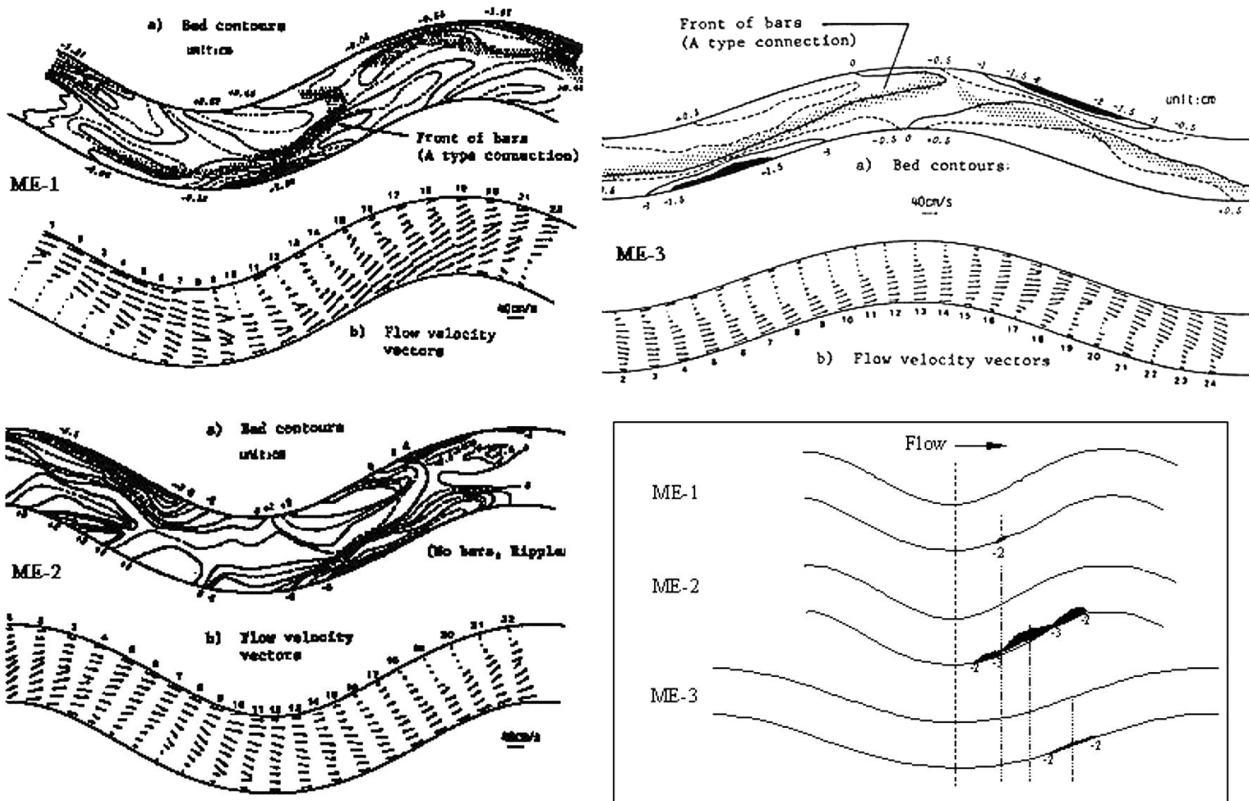
نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی (Blancaert 2002) در خم 120 درجه با بستر متحرک، شکل‌گیری دو چاله را نشان می‌دهد که چاله عمیقتر، در ناحیه رأس قوس به بعد به وقوع پیوسته است.

مطالعات شفافی بجستان و نظری (1379) در قوس 90 درجه نشان می‌دهد که به ازای اعداد فرود جریان ورودی، موقعیت حداکثر چاله در زاویه 60 درجه نسبت به شروع قوس به دست می‌آید.

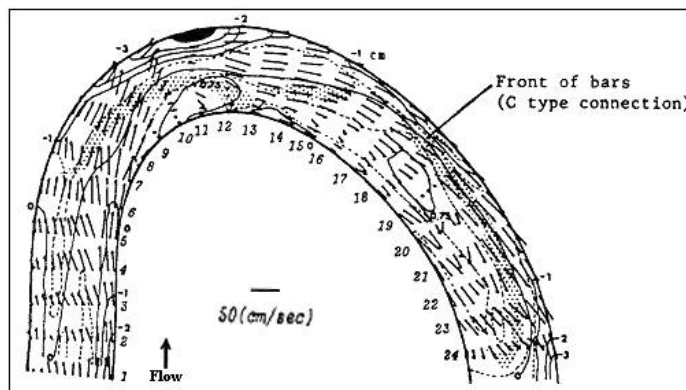
Razvan (1989) موقعیتی را که در آن جریان حلزونی به حداکثر قدرت خود رسیده است مناسب‌ترین مکان برای جانمایی آبگیر می‌داند زیرا در این محل حداکثر عمق چاله ایجاد می‌شود. این مکان در شرایطی که شعاع انحنا بزرگتر از 3 تا 4 برابر عرض سطح آب و نسبت انحراف آب کمتر از 0/3 الی 0/4 باشد، در محلی پایین‌تر از حداکثر انحنا در سه‌چهارم زاویه مرکزی قوس پیشنهاد شده است (شکل 5).

Berge (1990) تحقیقاتی را بر روی خم 180 درجه با هدف برداشت داده‌های آزمایشگاهی از الگوی سرعت و تغییرات توپوگرافی بستر و مقایسه این نتایج با خروجی مدل ریاضی که توسط ایشان تهیه شده بود، انجام داد. بررسی‌های ایشان نشان داد که دو چاله در دو طرف رأس قوس ایجاد می‌شود. چاله اول در محدوده 30 تا 90 درجه و چاله بعدی در زاویه 120 درجه شکل می‌گیرد. علاوه بر این، عمق فرسایش چاله اول 30 درصد بیشتر از چاله دوم و مکان وقوع حداکثر مقدار سرعت جریان در قوس، به اندازه دو برابر عرض سطح آب از چاله اول، جلوتر است. تحقیقات دیگری توسط صالحی نیشابوری و اقبالزاده (1377) بر روی خمی با زاویه 180 درجه انجام شد و نتایج نشان می‌دهد که چاله عمیقتر در زاویه 165 درجه و چاله با عمق کمتر در زاویه 120 درجه ایجاد می‌شود و از زاویه 90 درجه به بعد، خط قعر به نزدیک جدار خارجی منتقل می‌شود.

بررسی نتایج تحقیقات آزمایشگاهی Hasegava (1983) درخصوص تأثیر تغییر دبی و هندسه (شعاع) خم بر توپوگرافی بستر و الگوی جریان در پیچان‌رودی منظم نشان می‌دهد که در دو پیچان‌رود کاملاً یکسان (شکل 3، پیچان‌رودهای اول و دوم یا ME-1 و ME-2)، با افزایش دبی در پیچان‌رود دوم به دو برابر، چاله آن در رقوم 2- توسعه بسیار زیادتری پیدا کرد و عمق چاله نیز تعمیق بیشتری یافته و به 3- می‌رسد، علاوه بر آن وضعیت



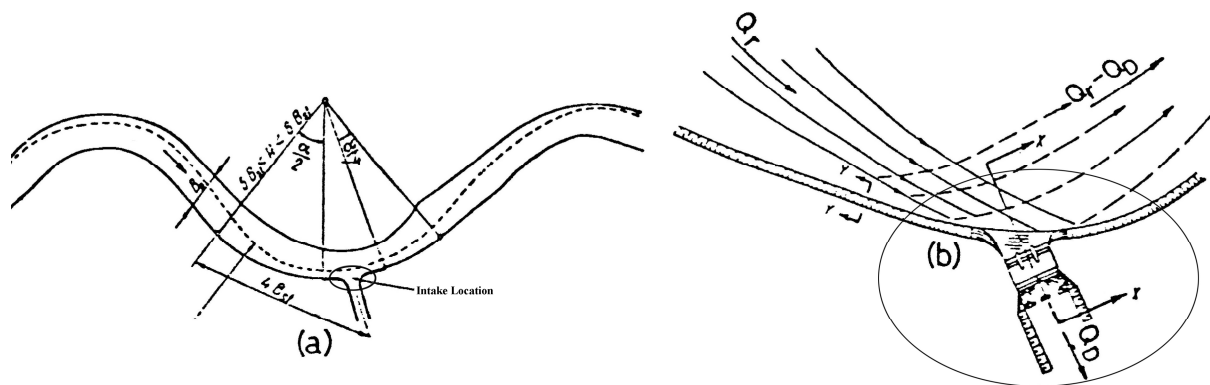
شکل 3 تأثیر تغییر در دبی و شعاع انحنا بر شکل‌گیری بستر و موقعیت چاله (Hasegava, 1983)



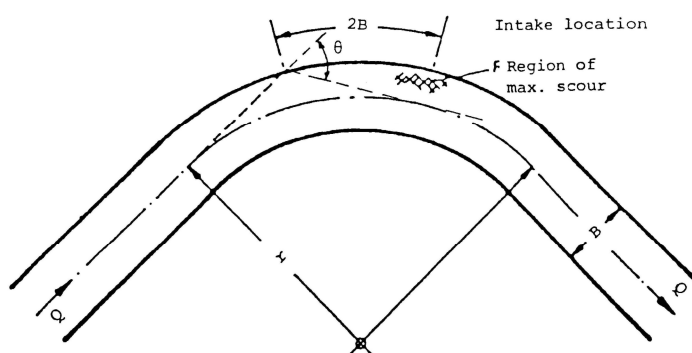
شکل 4 توزیع سرعت و موقعیت چاله در پیچان رود نامنظم (Hasegava, 1989)

با ساحل (در ناحیه مستقیم رودخانه قبل از خم) مطابق با شکل 6، توسط ایشان ارائه شده است. بر طبق یافته‌های ایشان، توسعه یافتگی جریان ثانویه بعد از زاویه θ بر طبق رابطه زیر شکل می‌گیرد:

مکان حداکثر عمق چاله توسط Raudkivi (1993) مطالعه و ملاحظه شد که موقعیت آن به شعاع انحنا و زبری بستر بستگی داشته و در حدود 30 تا 70 درجه پس از رأس قوس است. موقعیت چاله به اندازه دو برابر عرض رودخانه پایین‌تر از محل تلاقی خط وسط جریان



شکل 5 موقعیت جانمایی آبگیر در خم (Razvan, 1989)



شکل 6 برآورد موقعیت عمیقترین نقطه چاله در خم (Raudkivi, 1993)

مشخصه‌های جریان بر شکل‌گیری چاله و تعیین محل عمیقتر آن در آبراه سینوسی تحت شرایط هیدرولیکی مختلف است.

$$(1) \theta = 1.5 \frac{C}{\sqrt{g}} \frac{y_0}{r}$$

که در آن C ضریب شزی، y_0 عمق جریان، r شعاع قوس و θ زاویه توسعه یافتگی جریان برحسب رادیان است.

باتوجه به مطالب فوق، پیش‌بینی محل وقوع چاله در قوس خارجی می‌تواند به انتخاب محل بهینه استقرار سر دهانه آبگیر کمک کند. به منظور پیش‌بینی این محل، Raudkivi (1993) و Razvan (1989) مکان ثابتی را که متأثر از هندسه قوس باشد برای این محل معرفی کردند. نتایج تحقیق Hasegava (1983) نشان داد که در هندسه‌ای ثابت از آبراه سینوسی، جریان موجب تغییر توپوگرافی بستر و موقعیت چاله می‌شود. با توجه به ابهاماتی که در ارتباط با اثر جریان بر موقعیت چاله در آبراه سینوسی وجود دارد، لازم است تحقیقاتی در این زمینه انجام شود. لذا هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر

2- روش تحقیق

2-1- طراحی مدل

برای شبیه‌سازی واقعی هر پدیده و رفتار سنجی آن در شرایطی نزدیک به شرایط حاکم در طبیعت، لازم است نسبت ابعادی مورد نظر در مدل منظور شود. تحقیقاتی که در زمینه مدل‌سازی ریاضی و فیزیکی جریان ثانویه در خم توسط Booij (2002) انجام شده، نشان می‌دهد که بیشترین تحقیقات انجام شده در زمینه انحناهایی انجام شده که جریان از شرایط واقعی در طبیعت فاصله گرفته است، لذا در تحقیق حاضر سعی شد تا ابعاد خم‌های

طول مستقیم پیچان‌رود (طول O1O3) برابر $21/3$ طول بازه مستقیم بین دو قوس یا طول تبدیل (FG یا II) برابر $4/9$ متر طول موج انحنا یا طول پیچان‌رود λ^* (طول آبراه از E تا K) برابر $27/3$ متر با توجه روابط و توصیه‌ها داریم:

$$\frac{r}{B} = 2, r = 5 \Rightarrow B = 2.5$$

$$\frac{\lambda}{B} = \frac{21.3}{2.5} = 8.5$$

و ضریب سینوسی بودن (پیچشی) برابر است با:

$$\frac{\lambda^*}{\lambda} = \frac{27.3}{21.3} = 1.28$$

با توجه به اینکه ضریب سینوسی بودن قوس انتخابی کمتر از $1/5$ است قوس انتخاب شده جزو آبراه‌های سینوسی طبقه‌بندی می‌شود.

مقطع انتخاب شده در این مدل دوزنقه‌ای است که شیب عرضی آن با الگوگرفتن از تندترین شیب‌ها در مقاطع عرضی پیچابه‌های رودخانه کارون، برابر $1/5$ انتخاب شد.

با توجه به اطلاعات فوق، پلان مدل در فضایی به ابعاد 30×40 متر در سالن رودخانه مؤسسه تحقیقات آب، به شرح شکل 7، طراحی و اجرا شد. جریان از ناحیه بالادست در محل A به مدل وارد می‌شود، در محل B جریان ورودی توسط سرریز لبه تیز به عرض 2 متر اندازه‌گیری می‌شود. مقطع دوزنقه‌ای کانال از مقطع C شروع می‌شود که موقعیت استقرار اولیه دستگاه تزریق رسوب در همین مقطع بوده است. نقطه شروع قوس اول مقطع D و انتهای این قوس و شروع بازه مستقیم مقطع F، شروع قوس دوم مقطع G و انتهای آن مقطع I است.

انتخابی متأثر از روابط رژیم تعادلی رودخانه‌ها در نواحی پیچان‌رودی باشد و در ضمن در دسته‌بندی انواع غالب رودخانه‌ها در نواحی دشتی نیز قرار گیرد. برای رسیدن به این هدف، ابعاد مدل با توجه به شرایط هندسی رودخانه کارون در ناحیه پایین‌دستی و استفاده از روابط تجربی محققان به شرح ذیل دست آمده است. مهمترین روابطی که برای تعیین پارامترهای پیچان‌رود ارائه شده عبارتند از (Gregory, 1977):

$$(2) \frac{\lambda}{B} \cong 10$$

$$(3) \frac{r}{B} \cong 2$$

یا (Nalder (1997) نشان می‌دهد که:

$$(4) \frac{\lambda}{B} = 7 \text{ to } 11$$

در این روابط، r شعاع دایره، B عرض سطح آب و λ طول مستقیم پیچان‌رود یا طول خط واصل مراکز دو دایره بیرونی در یک موج کامل سینوسی است.

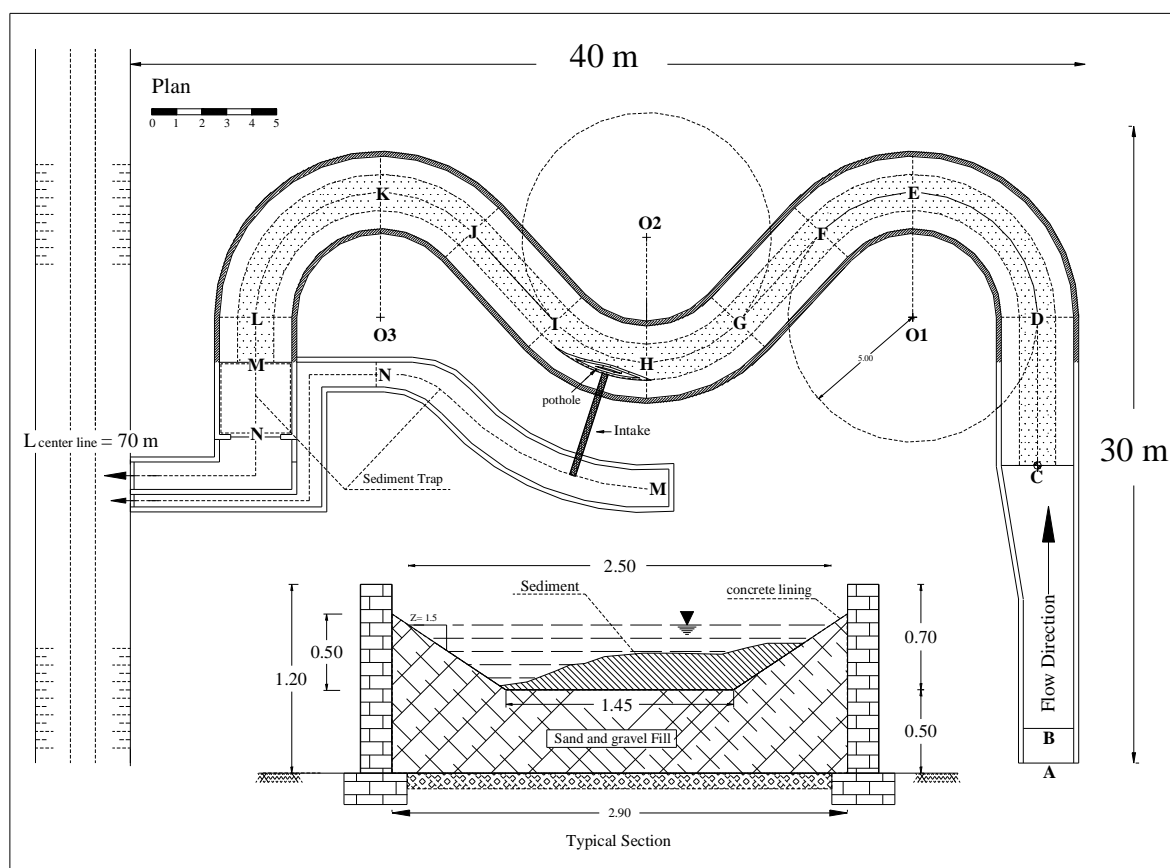
براساس مشاهدات Leopold et al. (1964) چنانچه

نسبت $\frac{\lambda}{B}$ کمتر از 10 باشد، انحنا قوس، موجب ایجاد جریان پیچان‌رود آزاد و بدون تأثیرپذیری از جریان بالادست می‌شود (Kassem and Chaudhry, 2002). در رودخانه‌های پیچان‌رودی نسبت شعاع به عرض در محدوده زیر قرار دارند، البته بیشتر مقادیر در محدوده 2 تا 3 است.

$$(5) 1.5 < \frac{r}{B} < 4.5$$

با توجه به روابط تجربی فوق و مشخصات خم‌های رودخانه کارون (در دشت)، ابعاد در پلان و نسبت‌های مربوطه مدل در مقیاسی در حدود 1:80 نسبت به نمونه اصلی به شرح زیر انتخاب شد (شکل 7).

شعاع قوس‌ها 5 متر (دوایر O1، O2 و O3) و زاویه مرکزی قوس میانی $94/34$ درجه



شکل 7 پلان و مقطع مدل فیزیکی آبراه سینوسی

$$U_* = \sqrt{gRS} \quad (7)$$

که در آن Re^* عدد رینولدز ذره، R شعاع هیدرولیکی، S شیب سطح آب، d_{65} اندازه ذره 65 درصد ریزتر و U لزجت سینماتیکی سیال است.

2-3- مصالح بستر و دانه بندی آن

با توجه به اینکه ذرات رسوب باید در طول مدل (در مسیر انحنا و مستقیم) و در محدوده دبی‌های آزمایشی، به صورت باریستری حرکت کند، لازم است آزمایشهایی برای تعیین محدوده‌ای از قطر مصالح که بتواند در طیف گسترده دبی از 120 تا 300 لیتر در ثانیه، همواره این شرایط را حفظ کنند، صورت گیرد. لذا با توجه به ابعاد گسترده مدل و حجم بالای مصالح مورد نیاز تصمیم گرفته شد که با استفاده از ماسه طبیعی تولید شده در کارخانه‌های شن و

قوس سوم از مقطع J شروع شده و تا مقطع L ادامه می‌یابد. در مقطع N دریچه‌ای بادبزی برای تنظیم شیب سطح آب تعبیه شده است. جریان عبوری از مدل در انتها به مخزن زیرزمینی تخلیه و توسط پمپ، آب به مدل بازگردانده می‌شود. رسوبات در حوضچه‌ای که در حدفاصل مقاطع M تا N قرار دارد، تله‌اندازی و بازیافت می‌شود.

2-2- شرایط هیدرولیکی

برای اینکه جریان حاصل در مدل قابل انطباق با نمونه اصلی در طبیعت باشد، رژیم جریان در مدل نیز باید در ناحیه زبر یا شرایط اغتشاش کامل قرار داشته باشد، معیار مربوط عبارت است از (Prezedwojski et al., 1995):

$$Re^* = \frac{U_* d_{65}}{\nu} > 70 \approx 100 \quad (6)$$

تفاوت خواهد کرد، لذا مدت زیادی لازم است تا بستر منطبق با دبی جدید، الگوی مربوط به خودش را به وجود آورد، برای کاهش زمان و حصول نتیجه سریع‌تر و دقیق‌تر، تصمیم گرفته شد بعد از هر آزمایش، عوارض حاصل در کف کانال در طول مسیر، صاف شود و آزمایش با رسوبات موجود در بستر و در دبی‌های بالاتر انجام شود. کلیه آزمایشها با تزریق پیوسته رسوب انجام شده است.

آزمایشهای دسته اول با استفاده از مصالح شماره 1 انجام شد. تزریق رسوب در این آزمایشها، از ابتدای قطع دوزنقه‌ای انجام شد (شکل 8، ایستگاه شماره 1) اما به دلیل اینکه در مسیر انحناء، قدرت حمل رسوب زیادتر از مسیر مستقیم است، در حد فاصل مقطع 11 تا 14 ذرات رسوب، انباشته می‌شد و نیز پدیده تسلیح بستر یا تثبیت بستر در برابر فرسایش به وقوع پیوست و در نتیجه موجب بروز اختلافی در شیب سطح آب در طول بازه می‌شد.

برای برطرف ساختن این مشکل و نیز کاهش حجم رسوب مورد نیاز، محل تزریق رسوب به مقطع 36 (ایستگاه 2) منتقل و آزمایشهای دسته دوم با استفاده از مصالح شماره 2 انجام شد، تخلیه رسوب در این ایستگاه به دلیل نزدیکی به مقطع کنترل که بر مبنای اطلاعات آن، عدد فرود جریان محاسبه می‌شود و نیز تأثیری که تخلیه رسوب در این محل بر الگوی جریان و رسوب ورودی به قوس می‌گذارد، موجب بروز خطا در نتایج شد، زیرا الگوی جریان و شکل بستر در عرض کانال ورودی به قوس یکنواخت نیست. نتایج تحقیقات Varma and Rao (1995) نیز مؤید این موضوع است (شکل 9).

ماسه بدون اعمال تغییر در دانه‌بندی آن (مصالح شماره 1، جدول 1) آزمایش‌های کنترلی با هدف اطمینان از وجود بار بستر در مدل انجام شود. نتایج آزمایشها نشان داد که فقط ذرات سیلت و ریزتر از آن خارج از این شرایط است، بنابراین دانه‌بندی انتخابی از نظر بار بستر بودن در محدوده دبی انتخابی تأیید شد. به منظور رعایت کردن معیار یکنواختی ذرات، لازم است انحراف معیار ذرات σ_g ، که از معادله (8) به دست می‌آید کمتر از $1/3$ باشد. لذا بخش عمده‌ای از مصالح به روش الک کردن، جدا و بقیه استفاده شد. مصالح حاصل، در طبقه‌بندی شن ریز قرار می‌گیرد (مصالح شماره 2، جدول 1). مشخصات و پارامترهای هندسی دو نوع مصالح مورد استفاده، در جدول 1 ارائه شده است.

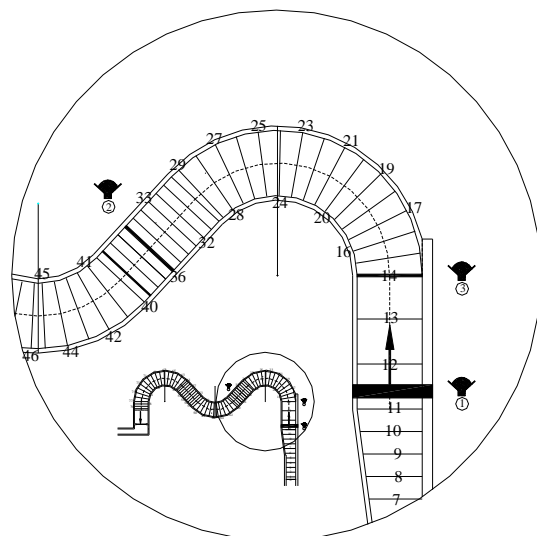
$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} < 1.3 \quad (8)$$

به منظور تسریع در شکل‌گیری مقطع تعادلی بستر رودخانه، بهتر است لایه‌ای از رسوبات در کل بستر به صورت یکنواخت پهن و اجازه داده شود که جریان با عبور از روی آن با فرسایش و رسوبگذاری، توپوگرافی را براساس شرایط جریان و هندسه قوس، شکل دهد. ضخامت اولیه لایه رسوبی با هدف تسریع در تعادل بستر برابر 25 سانتی متر انتخاب شد. بدیهی است که با تزریق رسوب و ادامه آزمایش، شکل بستر و ضخامت رسوب در طول و عرض آبراه منطبق با شرایط هیدرولیکی آن آزمایش (دبی جریان انتخابی و مقدار رسوب تزریقی) شکل خواهد گرفت. تجربیات در آزمایشهای بعدی نشان داد که با تغییر دبی، الگوی رسوبگذاری و فرسایش بستر

جدول 1 مشخصات قطر مصالح بار بستر (به میلی‌متر) و پارامترهای هندسی آن در دودسته آزمایشها

نوع مصالح انتخابی	D10	D30	D50	D60	D90	Cu	Cz	σ_g
مصالح شماره 1	0/94	1/82	2/50	2/80	4/40	2/98	2/37	1/82
مصالح شماره 2	2/45	2/97	3/42	3/65	4/50	1/49	1/31	1/29

بستگی دارد زیرا در دبی‌های بالا، قدرت حمل رسوب در طول بازه افزایش یافته و بستر سریعتر شکل مورد نظر را پیدا خواهد کرد. مدت زمان آزمایش از 8 تا 32 ساعت است. همزمان با جریان، تزریق رسوب به صورت پیوسته انجام شد. بعد از حصول تعادل نسبی، اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز نظیر عمق آب در مقاطع مختلف بویژه در مقطع کنترل (مقطع 38 بالادست قوس دوم) و پایین دست این قوس (انتهای بازه مستقیم) به منظور محاسبه شیب و بررسی الگوی (کیفی) جریان انجام می‌شد. معیار تعادل نسبی، عدم تغییر شیب سطح آب و عدم تغییر در مکان چاله در آزمایشها در روزهای متوالی است.



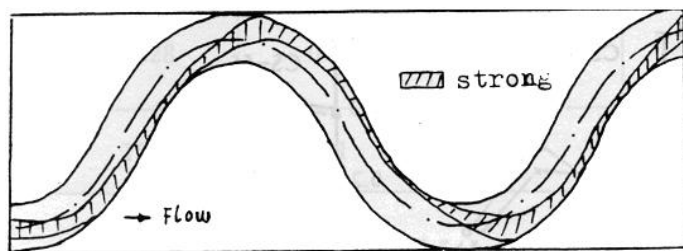
شکل 8 مکانهای تزریق رسوب پیچان‌رودی (Varma and Rao, 1995)

بعد از تخلیه آب، توپوگرافی بستر از مقطع کنترل تا انتهای بازه مستقیم (بعد از قوس میانی) در محل مقاطع عرضی که به فاصله حدود 0/5 متر (در محور آبراه) از یکدیگر قرار دارند، برداشت می‌شد و موقعیت چاله نیز براساس این مقاطع شناسایی و با انتقال بر روی نقشه مدل، زاویه آن اندازه‌گیری می‌شد. با اندازه‌گیری سطح مقطع جریان در مقطع کنترل، سرعت جریان با توجه به دبی و سپس عدد فرود محاسبه می‌شد. محدوده دبی از 120 تا 300 لیتر در ثانیه و محدوده عدد فرود از 0/31 تا 0/66 به دست آمده است. با محاسبه عدد رینولدز ذره در مقطع عرضی 38، کنترل لازم (رابطه 6) انجام شد. حداقل عدد رینولدز ذره در آزمایشها برابر 144 به دست آمد.

لذا مکان تزریق رسوبات به مقطع 14 (ایستگاه 3) منتقل شد. در این ایستگاه به دلیل وجود جریان حلزونی در قوس اول، قدرت حمل مناسبی برای رسوبات وجود دارد، ضمن اینکه به قدر کافی از قوس دوم فاصله داشته و الگوی جریان و شکل بستر در بالادست قوس مورد مطالعه به شرایط طبیعی خود که مسیر جریان اصلی از قوس اول به قوس دوم به صورت اریب (نامتقارن در عرض) حرکت می‌کند، نزدیکتر خواهد بود.

2-4- نحوه انجام آزمایشها

با تخلیه رسوبات بر روی بستر و صاف کردن آن، دبی مورد نظر از بالادست رها می‌شد، مدت زمان انجام آزمایش برای شکل‌گیری بستر، به دبی و قدرت جریان



شکل 9 مسیر اصلی حرکت بار بستر و جریان اصلی در رودخانه

3- تجزیه و تحلیل نتایج

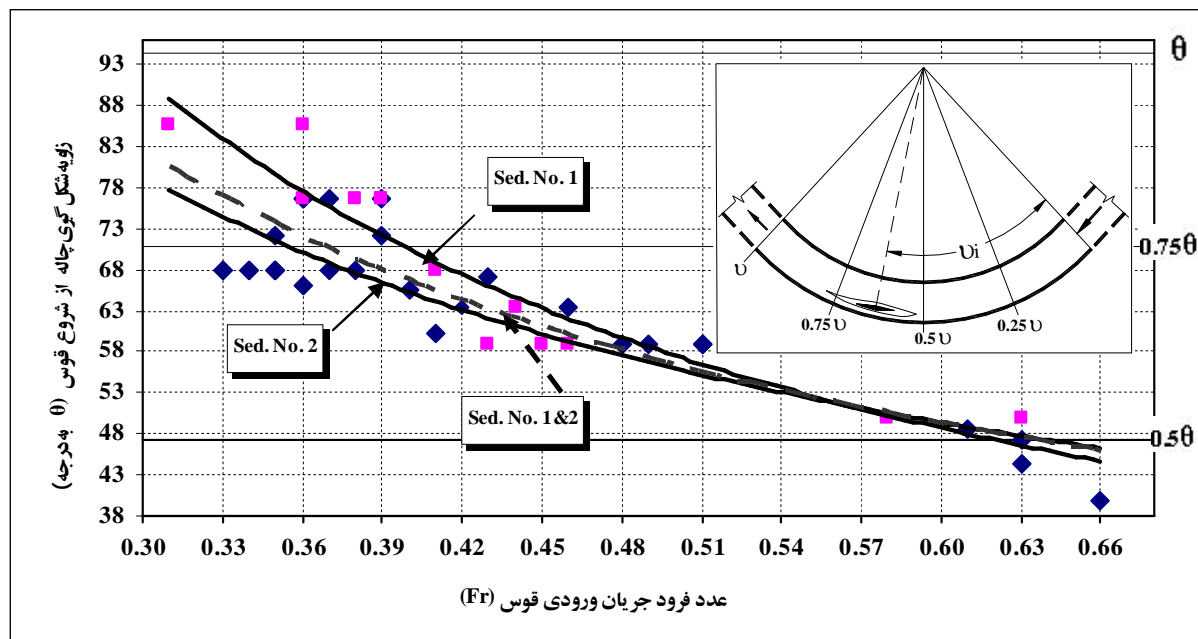
جریان طولی (اصلی) آبراه با ورود به قوس، تحت تأثیر جریان عرضی ناشی از قوس قرار می‌گیرد. شکل‌گیری بستر و الگوی جریان در این ناحیه متأثر از مشخصه‌های هندسی قوس (مانند شعاع انحناء و زبری)، شرایط جریان بالادست و مشخصه‌های جریان ورودی مانند سرعت و عمق جریان قبل از قوس است. در هندسه‌ای قوسی شکل، در ساحل قوس خارجی آن فرسایش و شکل‌گیری چاله، در این ناحیه را شاهد خواهیم بود و در ساحل داخلی آن رسوبگذاری به وقوع خواهد پیوست. با توجه به اینکه در این تحقیق هندسه قوس ثابت است، عامل اصلی در تغییرات بستر و شکل‌گیری چاله، الگوی جریان در بالادست و پارامترهای جریان ورودی به قوس است. در ادامه تأثیر پارامترهای جریان که توسط عدد فرود ورودی به قوس بیان می‌شود با مشخصه‌های چاله و شکل بستر ارزیابی شده است.

صلب نرسیده نشان می‌دهد که در مکان بیشترین تعمیق چاله، پروفیل بستر در این محل با فاصله بیشتری از ساحل قوس خارجی شکل گرفته و بیان دیگر، چاله در این محل نیز عرضتر است، لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که موقعیت شکل‌گیری چاله بزرگتر با رسیدن فرسایش به بستر صلب با حالتی که به بستر صلب نرسیده، تفاوتی نخواهد داشت و می‌توان نتایج را در یک نوع دسته‌بندی تحلیل کرد. در این تحقیق دو نوع مصالح به‌عنوان باربستری (شماره‌های 1 و 2، جدول 1) انتخاب شده که نتایج حاصل و جمع‌بندی این آزمایشها در شکل 10 ارائه شده است. محور افقی این شکل معرف عدد فرود و محور قائم، زاویه شکل‌گیری چاله از شروع قوس برحسب درجه است. نقاط مربع شکل، مربوط به نتایج حاصل از مصالح شماره 1 و نقاط لوزی شکل، مربوط به مصالح شماره 2 است. با تلفیق نتایج این دو دسته، منحنی خط‌چین وسط حاصل می‌شود.

3-1- محل توسعه یافتگی جریان حلزونی

جریان حلزونی در ناحیه قوس خارجی موجب فرسایش و مانع از تجمع رسوبات بستر در این ناحیه می‌شود و نیز رسوبات بستر را همراه با جریان به سمت قوس داخلی منتقل می‌کند. بررسی پروفیل‌های عرضی بستر در قوس، در طی آزمایشهای مختلف نشان می‌دهد که در مقطعی (عرضی) از آبراه، حداکثر فرسایش در ساحل قوس خارجی و حداکثر رسوبگذاری در ساحل مقابل آن به وجود آمده است. این محل، مکان بروز و وقوع حداکثر قدرت جریان حلزونی است. تحلیل نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که موقعیت این مکان، تابع عدد فرود جریان ورودی قوس است. لازم است ذکر شود که در تعدادی از آزمایشها عمق فرسایش در چاله به کف صلب آبراه رسیده که تشخیص و تعیین موقعیت بلوغ کامل جریان حلزونی در این حالات، براساس مکان بزرگترین عرض چاله انجام شده است. بررسی نتایج برای حالتی که فرسایش به بستر

با توجه به شکل 10 مشخص می‌شود که به ازای هر مقدار عدد فرود، موقعیت چاله بزرگتر در مصالح شماره 2 در بالادست مکان شکل‌گیری چاله در ازای مصالح 1 خواهد بود و به بیان دیگر با ریزتر شدن قطر متوسط مصالح، چاله به نواحی پایین‌دست جریان منتقل شده است. طیف وسیعی از چاله‌ها، در محدوده‌ای گسترده از اعداد فرود، از حدود $0/37$ تا $0/63$ در ربع سوم قوس (از $0/5$ تا $0/75$ زاویه مرکزی قوس، θ) شکل گرفته است. در خارج از این قسمت، تعداد محدودی از چاله‌ها در بالادست رأس قوس به‌وجود آمده که عدد فرود آنها در محدوده $0/63$ تا $0/66$ است. سایر موارد در ربع چهارم قوس شکل گرفته که عدد فرود آنها بین $0/31$ تا $0/37$ بوده است. از میان دیگر نتایج حاصل می‌توان به تفرق نتایج و حصول دو منحنی برای دو نوع مصالح در اعداد فرود کمتر از حدود $0/5$ اشاره کرد.



شکل 10 رابطه عدد فرود جریان ورودی با زاویه شکل‌گیری مکان چاله عریضتر (مصالح 1 و 2 و تلفیق آن)

شروع و انتهای چاله در شرایطی است که عمق فرسایش، به بستر صلب آبراه رسیده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که چاله‌ها از ابتدای ربع دوم قوس شروع شده و انتهای آن تا بعد از قوس نیز ادامه یافته است، به بیان دیگر شروع چاله‌ها در محدوده ربع اول قوس شکل نگرفته، زیرا جریان حلزونی بعد از ورود به قوس، شروع به شکل‌گیری کرده و تأثیر آن از ناحیه ربع دوم قوس به بعد مشهود می‌شود. محور عمودی سمت راست معرف موقعیت نواحی زاویه مرکزی قوس است. شروع ربع دوم با 0.25θ ، رأس قوس با 0.5θ ، انتهای ربع سوم با 0.75θ و انتهای قوس با θ مشخص شده است.

3-3-3- زوایای شیب عرضی چاله در محل حداکثر عرض

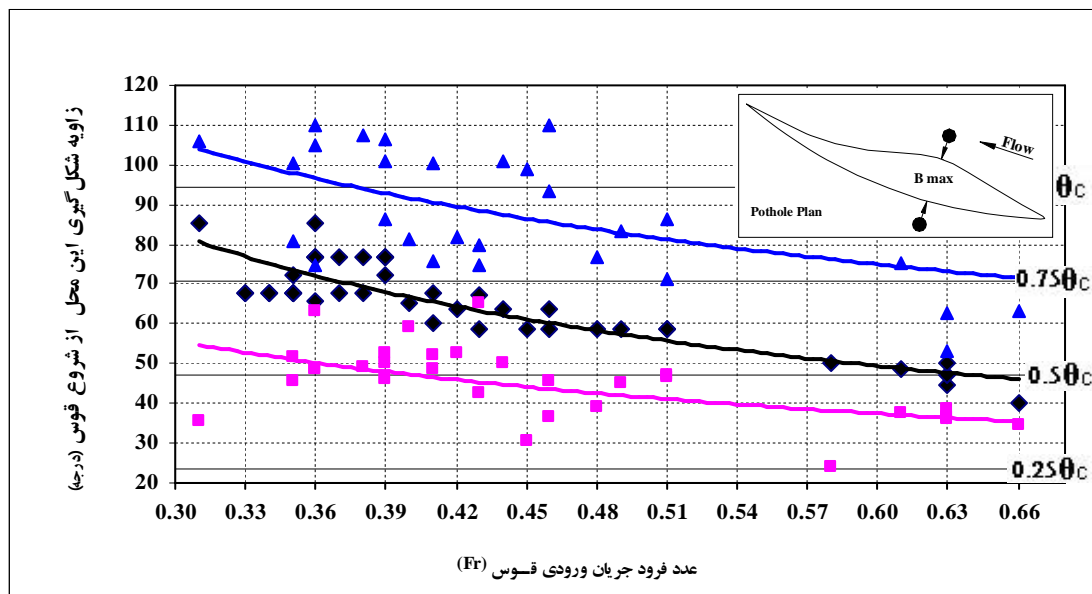
شیب پروفیل عرضی بستر در محل عریضتر چاله نیز تابعی از عدد فرود است.

از این حد به بعد، اغتشاش جریان به قدری توسعه یافته که دانه‌بندی بر پدیده تأثیر ناچیزی گذاشته و تقریباً رفتار دو نوع مصالح یکسان شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر دانه‌بندی مصالح استفاده شده در اعداد فرود کمتر از $0/5$ ، اهمیت بیشتری دارد.

با استفاده از این شکل می‌توان موقعیت توسعه‌یافتگی جریان حلزونی یا شکل‌گیری چاله بزرگتر را که محل مناسبی برای استقرار آبگیر است به ازای اعداد فرود از $0/31$ تا $0/66$ به دست آورد.

3-2-3- موقعیت شروع و انتهای چاله

با توجه به رفتار نسبتاً نزدیک دو نوع مصالح، نتایج حاصل از این دونوع مصالح، به صورت تلفیقی ارائه خواهد شد. در شکل 11، موقعیت شروع چاله (منحنی LB)، محل چاله بزرگتر (منحنی LM که در شکل 10 نیز ارائه شد) و انتهای چاله (منحنی LE)، برای کلیه نتایج ارائه شده است. لازم است ذکر شود که نتایج حاصل برای



شکل 11: رابطه عدد فرود با زاویه شکل گیری شروع، مکان عریضتر و انتهای چاله (در مصالح 1 و 2)

نتایج حاصل را نشان می‌دهد که برای مصالح 1 و در شرایطی به دست آمده که فرسایش به بستر صلب آبراه رسیده است. با افزایش عدد فرود این نسبت یا حداکثر عرض چاله کاهش یافته است، زیرا با افزایش سرعت جریان، قدرت طولی جریان در آبراه افزایش یافته و عرض مربوطه را در چاله کاهش می‌دهد با کاهش سرعت طولی، جریان عرضی موجب تعریض بیشتر فرسایش در چاله خواهد شد.

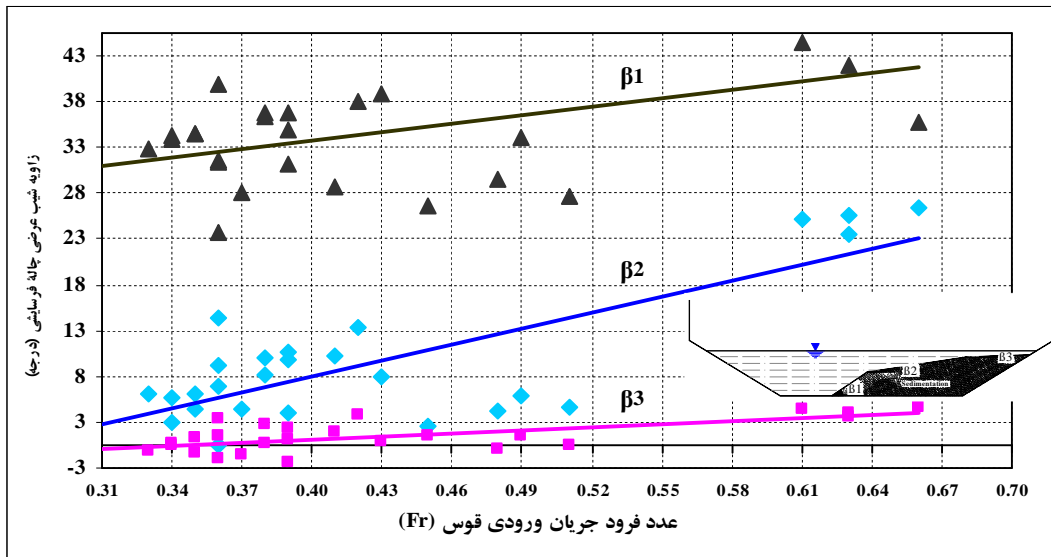
3-5- عمق چاله

در آزمایشهایی که در آنها فرسایش در چاله به بستر صلب نرسیده، حداکثر عمق فرسایش نسبت به سطح اولیه بستر برای مصالح 2 در شکل 14، ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود، عمق فرسایش موضعی جریان کاهش یافته است. با کاهش عدد فرود، جریان حلزونی قویتر شده و فرسایش موضعی را تشدید کرده است.

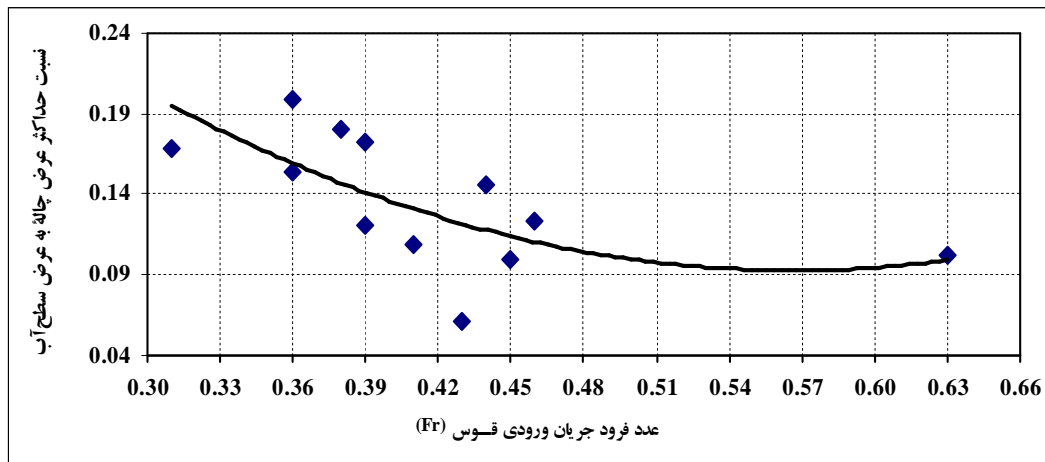
پروفیل چاله از سه شیب کلی تشکیل می‌شود، شیب اول که در مجاور چاله است تندتر بوده (خط β_1 ، شکل 12، مربوط به علائم مثلثی) و دو شیب دیگر (خطوط β_2, β_3) بترتیب مربوط به علائم لوزی و مستطیلی در شکل 12) ملایمتر هستند. نتایج حاصل برای دو نوع مصالح در این شکل ارائه شده است و مربوط به شرایطی است که عمق فرسایش، به بستر صلب آبراه رسیده است. با افزایش عدد فرود، مؤلفه طولی جریان در ناحیه قوس خارجی افزایش یافته و زوایای مربوطه را افزایش می‌دهد، بعکس با کاهش عدد فرود، تأثیر جریان عرضی زیادتیر و شیب عرضی ملایمتر خواهد شد. اثرپذیری زاویه شیب قسمت دوم (β_2) نسبت به عدد فرود، بیشتر از دو شیب دیگر است. شدت تغییرات شیب قسمت دوم نسبت به شیب قسمت سوم حدود 5 برابر و نسبت به شیب قسمت اول حدود 2 برابر است.

3-4- عرض چاله

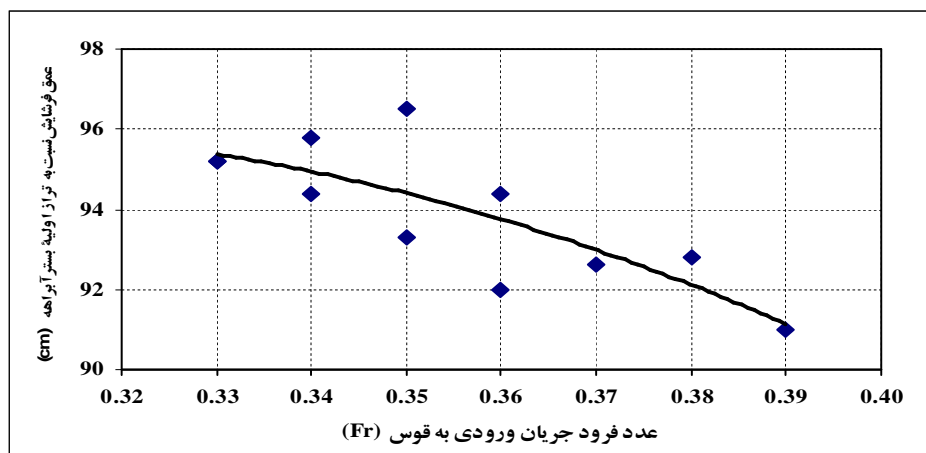
نسبت (بدون بعد) حداکثر عرض چاله به عرض سطح آب نیز تابعی از عدد فرود است. شکل 13 نمونه‌ای از



شکل 12 رابطه عدد فرود جریان با زاویای شیب عرضی چاله در ناحیه حداکثر عرض (در مصالح 1 و 2)



شکل 13 رابطه عدد فرود با نسبت حداکثر عرض چاله به عرض سطح آب (در مصالح 1)



شکل 14 رابطه عدد فرود با عمق فرسایش نسبت به سطح بستر اولیه آن در محل عمیق چاله (در مصالح 2)

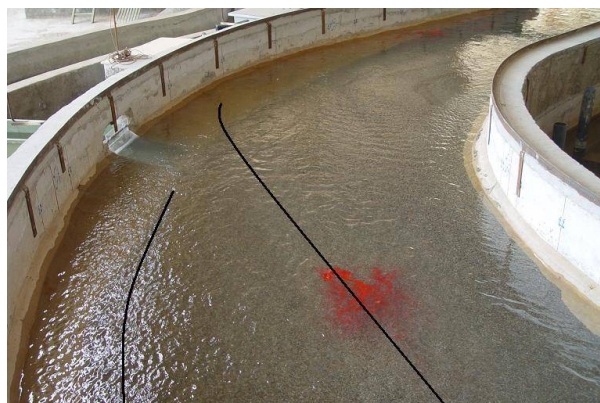
3-6- الگوی جریان و شکل بستر

بررسی الگوی جریان و شکل بستر در مسیر پیچان رود نشان می‌دهد که الگوی جریان و تغییرات بستر در عرض آبراه و نیز در طول مسیر یکنواخت نیست. جریان ورودی از قوس اول از ناحیه ساحل قوس خارجی به صورت اریب به قوس دوم وارد می‌شود و به همین صورت بصورت میان‌بر به قوس سوم نیز منتقل می‌شود، این نتایج توسط (Varma and Rao (1995، نیز مشاهده شده است (شکل 9). این الگوی نامتقارن در جریان، موجب تغییر در الگوی حمل رسوب بر روی بستر می‌شود. جریان ورودی قوس دوم را می‌توان به دو ناحیه تقسیم کرد (شکل 15). جریان اصلی که از نیمه عرض مقطع در ساحل راست و در بالادست به سمت قوس دوم نزدیک می‌شود، دارای پتانسیل بالایی برای حمل رسوب بوده و موجب انتقال بخش عمده‌ای از رسوبات آبراه از چاله قوس اول به سمت چاله قوس دوم خواهد شد. جریان دوم که ضعیفتر از جریان اول است از ساحل چپ به سمت چاله حرکت می‌کند. محل تلاقی جریان اصلی به ساحل قوس دوم، محلی است که چاله با عرض حداکثر یا عمق بیشتر ایجاد می‌شود و محل مناسبی برای جانمایی آبگیر می‌باشد. امتداد جریان دوم به شروع چاله منتهی می‌شود.

4- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پارامترهای هندسی چاله، به عدد فرود جریان ورودی قوس وابسته است. در این تحقیق همبستگی عدد فرود برای دو نوع مصالح بار بستری نسبت به موقعیت شروع چاله، انتها و محل چاله بزرگتر (محل تعمق چاله یا بزرگترین عرض چاله)، شیب پروفیل عرضی چاله، عرض آن و عمق چاله نسبت به بستر اولیه در محدوده اعداد فرود بین 0/31 تا 0/66 بدست آمده است.

در بررسی مکان شکل‌گیری چاله بزرگتر مشاهده می‌شود که موقعیت بلوغ جریان حلزونی تابعی از عدد فرود جریان ورودی به قوس است. با افزایش عدد فرود، موقعیت این مکان در قوس، به بالادست جریان منتقل می‌شود، به طوری که در اعداد فرود بزرگتر از حدود 0/6، محل چاله بزرگتر در مکانی بالاتر از رأس قوس شکل خواهد گرفت و در اعداد فرود کمتر از 0/37 به ربع چهارم قوس مرکزی منتقل می‌شود. طیف وسیعی از چاله‌های بزرگتر، در محدوده‌ای گسترده از اعداد فرود از حدود 0/37 تا 0/63 در ربع سوم قوس شکل خواهند گرفت. با استفاده از شکل 10 می‌توان موقعیت توسعه یافتگی جریان حلزونی یا شکل‌گیری چاله بزرگتر را که محل مناسبی برای استقرار آبگیر است، به ازای اعداد فرود از 0/31 تا 0/66 به دست آورد.



شکل 15 الگوی جریان، رسوبگذاری و فرسایش در محدوده پیچ دوم

افزایش سرعت جریان، قدرت طولی جریان در آبراه افزایش یافته و عرض مربوط را در چاله کاهش می‌دهد. با کاهش سرعت طولی، اثر جریان عرضی، موجب تعریض بیشتر فرسایش در چاله خواهد شد.

مشاهدات نشان می‌دهد که الگوی جریان نزدیک شده به قوس، حالت نامتقارن نسبت به عرض دارد. جریان قویتر از قوس اول به صورت اریب به قوس دوم منتقل شده و در محل برخورد به قوس دوم چاله بزرگتر را شکل می‌دهد. جریان ضعیفتر به ابتدای چاله منتهی می‌شود. بیشتر رسوبات آبراه توسط جریان قوی از قوس اول به قوس دوم حمل می‌شود.

5- منابع

- [1] صالحی نیشابوری، ع و اقبال زاده، ا (1377). بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس. ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه سال 1381 دانشگاه شهید چمران اهواز. ص 567-574.
- [2] شفاعی بجستان، م و سهراب نظری زاده (1379)، تاثیر زاویه آگیری بر میزان رسوب ورودی در خم 90 درجه " مجله علمی کشاورزی، جلد 22 شماره 1، دانشگاه شهید چمران اهواز صفحات 47-66.
- [3] Gregory, K.J., (1977), River channel changes. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto. pp. 251-252.
- [4] Przedwojski B., Blazejewski R. and Pilarczyk K.W. (1995). River Training Techniques. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, pp 70 - 90.
- [5] Razvan, E. (1989), River Intake and Diversion Dams. Elsevier Science Publishing Company Inc. New York, NY. 10010, USA.
- [6] Raudkivi, A. J. (1993), Sedimentation, Exclusion and Removal of Sediment from

طول چاله (فاصله بین شروع و پایان چاله) با عدد فرود نیز همبستگی دارد، مشاهده می‌شود که شروع چاله در ربع دوم زاویه مرکزی و انتهای آن تا بعد از قوس نیز ادامه دارد، زیرا جریان حلزونی بعد از ورود به قوس، شروع به شکل‌گیری کرده و تأثیرات آن از ناحیه ربع دوم قوس به بعد مشهود می‌شود.

از میان دیگر تأثیرات می‌توان به همبستگی عدد فرود با شیب عرضی چاله در محل چاله بزرگتر اشاره کرد. پروفیل عرضی چاله از سه شیب کلی تشکیل می‌شود. شیب اول (مجاور چاله) نسبت به افق تندتر و دو شیب دیگر ملایمتر است. با افزایش عدد فرود، تمرکز مؤلفه طولی جریان در ناحیه قوس خارجی افزایش یافته و زوایای مربوطه را افزایش می‌دهد، تأثیر زاویه شیب خط دوم به عدد فرود بیشتر از شیب دو خط دیگر است. با کاهش عدد فرود، جریان عرضی در آبراه تقویت شده و شیب عرضی بستر را ملایمتر می‌سازد.

یکی دیگر از مقایسه‌ها، بررسی نسبت حداکثر عرض چاله به عرض سطح آب در ازای تغییر عدد فرود است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود، این نسبت کاهش یافته و به بیان دیگر حداکثر عرض چاله کاهش خواهد یافت. زیرا با افزایش سرعت جریان، قدرت طولی جریان در آبراه افزایش یافته و عرض مربوط را در چاله کاهش می‌دهد و با کاهش سرعت طولی، اثر جریان عرضی موجب تعریض بیشتر فرسایش در چاله خواهد شد.

نتایج فوق برای حالتی است که فرسایش در چاله، به بستر صلب آبراه رسیده است.

بررسی نتایج در چاله‌هایی که فرسایش در آنها به بستر صلب نرسیده، نشان می‌دهد که حداکثر عمق فرسایش نسبت به سطح اولیه بستر تابعی از عدد فرود است. با افزایش عدد فرود، عمق فرسایش موضعی کاهش یافته است و بعکس با کاهش عدد فرود، جریان حلزونی قویتر شده و فرسایش موضعی را تشدید کرده است، زیرا با

- [12] Hasegawa, K.(1983), A Study on Flow and Bed Topographies in Meandering Channel, Proc. of JSCE, No.338.
- [13] Kassem, A.A. and Chaudhry, M.H. (2002), Numerical Modeling of Bed Evolution in Channel Bends, Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 128, No. 5. ASCE, pp. 507-514.
- [14] Lien, H.C., Hsieh, T.Y., Yang, J.C. and Yeh, K.C. (1999), Bend Flow Simulation Using 2D Depth-Averaged Model. Journal of Hydraulic Engineering, Vol: 125, No. 10, ASCE. pp. 1097-1108.
- [15] Nalder G. (1997), Aspects of flow in meandering channels, IPENZ Transaction, Vol. 24. No. 1/GEN pp.41-48
- [16] da Silva, A.M.F. and Yalin, M.S.(1997). Laboratory Measurements in Sine-Generated Meandering Channels. International Journal of Sediment Research. Vol. 12, No. 1, pp 16-28.
- [17] Berge, M.A (1990), Flow Processes in A Curved Alluvial Channel, Ph.D. Thesis, Iowa University, USA, 365 pages.
- Diverted Water, IAHR Hydraulic Structures, Design Manual pp. 63-87.
- [7] Scheuerlin, H, (1984). Die Wasserentnahme. Ernst and Sohn. Germany. pp. 105.
- [8] Yamamoto, k. (1989). General Description on Features of Alluvial River. Public Works Research Institute, Ministry of Construction of Japan.
- [9] Varma, C.V.J. and Rao, A.R.G. (1995), Management of Sediment, Sixth International Symposium River Sedimentation. A.A. Balkema Publishers, New Dehli, India.
- [10] Blanckaert, K. (2002), Analysis of Coherent Flow Structures in a Bend Based on Instantaneous-Velocity Profiling, Third International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering EPFL, Lausanne, Switzerland, pp. 51-58.
- [11] Booij R. (2002), Modeling of Secondary Flow Structure in River Bends, River Flow 2002, Bousmar D. & Zech Y.(eds.). Swets&Zeitlinger, Lisse, The Netherlands. pp. 127-133.