

کنترل آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل

امیررضا زراتی

عضو هیئت علمی دانشکده عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سید محمد عزیزی

فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۷۸/۱۰/۸، تاریخ تصویب ۸۰/۳/۵)

چکیده

آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل همه ساله خسارات زیادی به پل‌ها در سراسر جهان وارد می‌سازد و از این رو مطالعه بر روی کاهش میزان آب‌شستگی حائز اهمیت است. در این مطالعات نصب یک طوق بر روی پایه‌هایی با مقطع مستطیل به عنوان یک روش ساده و ارزان برای کاهش عمق آب‌شستگی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این آزمایشها نشان دادند که نصب یک نیم طوق با پهنای نصف عرض پایه در ۱۰ درصد عمق آب زیر بستر تا ۴۰ درصد و نصب یک نیم طوق بزرگتر با پهنائی برابر عرض پایه در روی بستر تا حدود ۸۰ درصد از میزان آب‌شستگی می‌کاهد. نصب طوق کوچکتر ۱۰ درصد عمق بالاتر از یک طوق کوچک دیگر که خود روی بستر نصب شده است حدود ۱۶ درصد دیگر از میزان آب‌شستگی خواهد کاست.

واژه های کلیدی: هیدرولیک پل، کنترل آب‌شستگی، طوق، پایه پل

مقدمه

اهمیت پل در برقراری راههای ارتباطی بر کسی پوشیده نیست. همه ساله هزاران پل در سراسر جهان در اثر آب‌شستگی در اطراف پایه‌های آنها تخریب شده و یا خسارت می‌بینند [۱]. تخریب و خسارات وارده بر پلها علاوه بر ضررهای مالی از آنجا که اغلب در هنگام سیل رخ می‌دهد به علت قطع راههای ارتباطی، کمک به مناطق سیل‌زده را مختل نموده و از این نظر عواقب اجتماعی نیز بدنبال دارد. کنترل و محافظت اطراف پایه‌های پل در مقابل آب‌شستگی خواهد توانست از وارد آمدن این خسارات پیشگیری نماید و از این رو تحقیق و مطالعه بر روی این موضوع حائز اهمیت زیادی می‌باشد.

انواع آب‌شستگی

سه نوع آب‌شستگی در محل یک پل ممکن است

بوجود آید:

الف- آب‌شستگی عمومی

این آب‌شستگی هنگامی رخ می‌دهد که کل بستر رودخانه در بازه‌ای که پل در آن قرار دارد به عللی در حال پایین رفتن باشد.

ب- آب‌شستگی در اثر تنگ‌شدگی

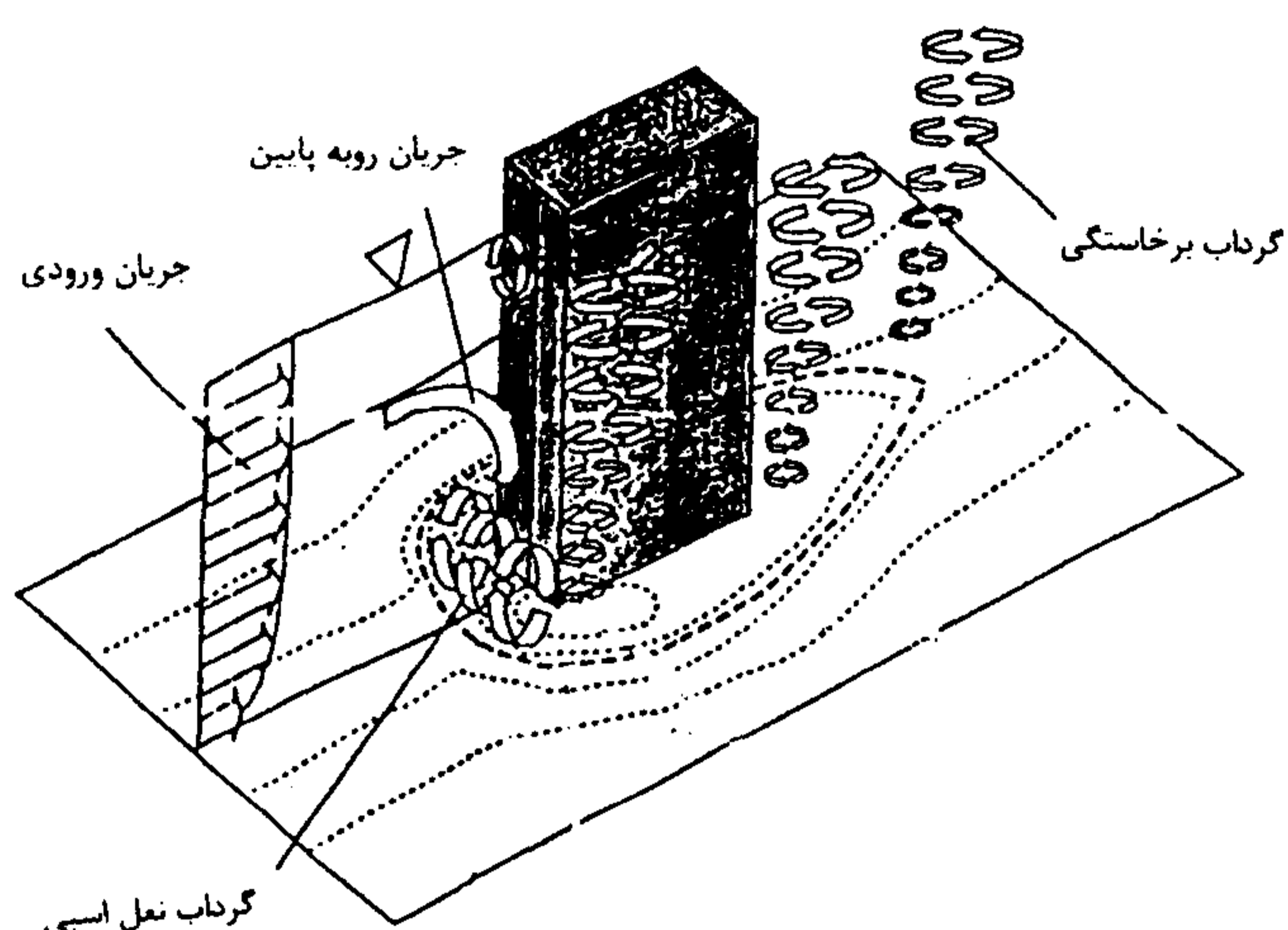
معمولا برای کاهش طول پل عرض رودخانه در محل احداث پل کم می‌شود. کاهش عرض رودخانه منجر به افزایش سرعت و ایجاد آب‌شستگی در محل پل می‌شود.

ج- آب‌شستگی موضعی

این آب‌شستگی ناشی از برخورد مستقیم آب به پایه‌های پل و در نتیجه جدا شدن مصالح اطراف پایه و حمل آنها به پایین دست می‌باشد.

آب‌شستگی ایجاد شده در محل یک پل می‌تواند مجموع هر سه نوع آب‌شستگی فوق باشد. پی‌های

به پایین به داخل این حفره نفوذ کرده و به طرف بالا دست می‌چرخد و گردابی را بوجود می‌آورد. با پدید آمدن این گرداب عمل حفر گودال تسریع شده و با گود شدن آن و ریزش دیوارهای اطراف گستره آن نیز بیشتر می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: الگوی جریان در اطراف یک پایه با مقطع مستطیل.

چرخش جریان در دور پایه نیز باعث افزایش موضعی سرعت و تمرکز تنش در دو طرف پایه می‌شود و در نتیجه دو شیار در دو طرف پایه حفر می‌گردد که این دو شیار خود به حمل مصالح کنده شده در جلو پایه و در نتیجه عمیق‌تر شدن حفره آب‌شستگی کمک می‌کند. چرخش آب در داخل گودال جلو پایه به دو طرف پایه نیز کشیده می‌شود و در مجموع گردابی را ایجاد می‌نماید که در پلان به نعل اسب شبیه است و از آنرو به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند (شکل ۱). امتداد گرداب نعل اسبی در پایین دست پایه به آشفته‌گی جریان می‌پیوندد.

از طرفی جریان برخورد کرده به پایه در کناره آن از پایه جدا می‌شود و به این دلیل گردابهایی تشکیل می‌شود که محور آنها عمود بر بستر رودخانه می‌باشد و به آنها گردابه‌های برخاستگی^۱ می‌گویند. این گردابه‌ها در کناره‌ها و پایین دست پایه بوجود آمده به صورت چرخشهایی در سطح آب قابل مشاهده می‌باشند و نیز مانند یک گردباد ذرات بستر را جدا کرده در معرض جریان قرار می‌دهند. به این ترتیب گردابه‌های برخاستگی به حمل مصالح کنده شده از جلو و اطراف پایه به سمت پایین دست کمک می‌کنند و خود نیز گودالی حفر

پایه‌های پل باید در زیر حداکثر تراز آب‌شستگی قرار گیرد در غیر این صورت زیر پی‌ها خالی شده و پل خسارت می‌بیند و روشن است که پی‌های عمیق‌تر پرهزینه‌تر نیز می‌باشد.

کنترل آب‌شستگی عمومی به مطالعات ساماندهی رودخانه برمی‌گردد. آب‌شستگی در اثر تنگ‌شدگی نیز در کل مقطع پل اتفاق می‌افتد و ضمن داشتن اثر تخفیف دهنده بر روی بالازدگی آب در محل پل به سختی می‌توان از آن پیشگیری نمود و معمولاً محاسبه شده و پذیرفته می‌شود.

آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌ها اتفاق می‌افتد (و البته کناره‌های پل که آنها را نیز می‌توان به صورت یک پایه داخل آب در نظر گرفت). اگر بتوان این نوع آب‌شستگی را به حداقل رساند مسلماً می‌توان هزینه احداث پی‌های عمیق را کاهش داد و یا از تخریب پلهایی که پی آنها در معرض آب‌شستگی قرار دارند جلوگیری کرد. این مقاله حاصل مطالعاتی است که در زمینه کاهش و جلوگیری از آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل انجام شده است.

مکانیزم آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل

برای کنترل آب‌شستگی ابتدا لازم است مکانیزم آن مورد مطالعه قرار گیرد.

محققین زیادی در مورد الگوی جریان و مکانیزم آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل مطالعه کرده‌اند [۲، ۳، ۴]. می‌توان مکانیزم آب‌شستگی و الگوی جریان در اطراف یک پایه را به صورت زیر خلاصه نمود:

پس از برخورد جریان آب به دماغه پایه به تناسب سرعت جریان روی پایه فشار ایجاد می‌شود و از آنجا که سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب بیشتر می‌شود فشار بیشتری نیز در ترازهای بالاتر روی پایه ایجاد می‌گردد و به این ترتیب یک گرادیان فشار روی پایه از بالا به پایین پدید می‌آید که خود باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلو پایه می‌شود. این جریان رو به پایین در برخورد به بستر رودخانه ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. با حفر بستر در جلو پایه جریان رو

آب شستگی که در جلو پایه اتفاق می افتد وجود دارد (مثلاً نگاه کنید به مرجع ۳). یکی از روابط معروف در این زمینه رابطه زیر می باشد [۴]:

$$\frac{y_{smax}}{b} = 2.3K\sigma.Ks.K_{\infty}.Ksi.Kd$$

$$\frac{y_{smax}}{b} = 2/3 K\sigma \cdot Ks \cdot K_{\infty} \cdot Ksi \cdot Kd \quad (1)$$

که در این رابطه b عرض (در مورد پایه با مقطع مستطیل شکل) و یا قطر پایه (در مورد پایه استوانه‌ای) و $K\sigma$ ، Ks ، K_{∞} ، Ksi و Kd به ترتیب ضرایب تصحیح غیریکنواختی دانه‌ها، شکل پایه، زاویه برخورد آب به پایه، عمق جریان و اندازه مصالح بستر می باشند. برای هر کدام از این ضرایب تصحیح جداول و منحنی‌هایی ارائه شده است [۲]. در صورتی که اثر کلیه این عوامل بر آب شستگی ناچیز باشد مطابق این رابطه حداکثر عمق آب شستگی $2/3$ برابر عرض پایه می باشد.

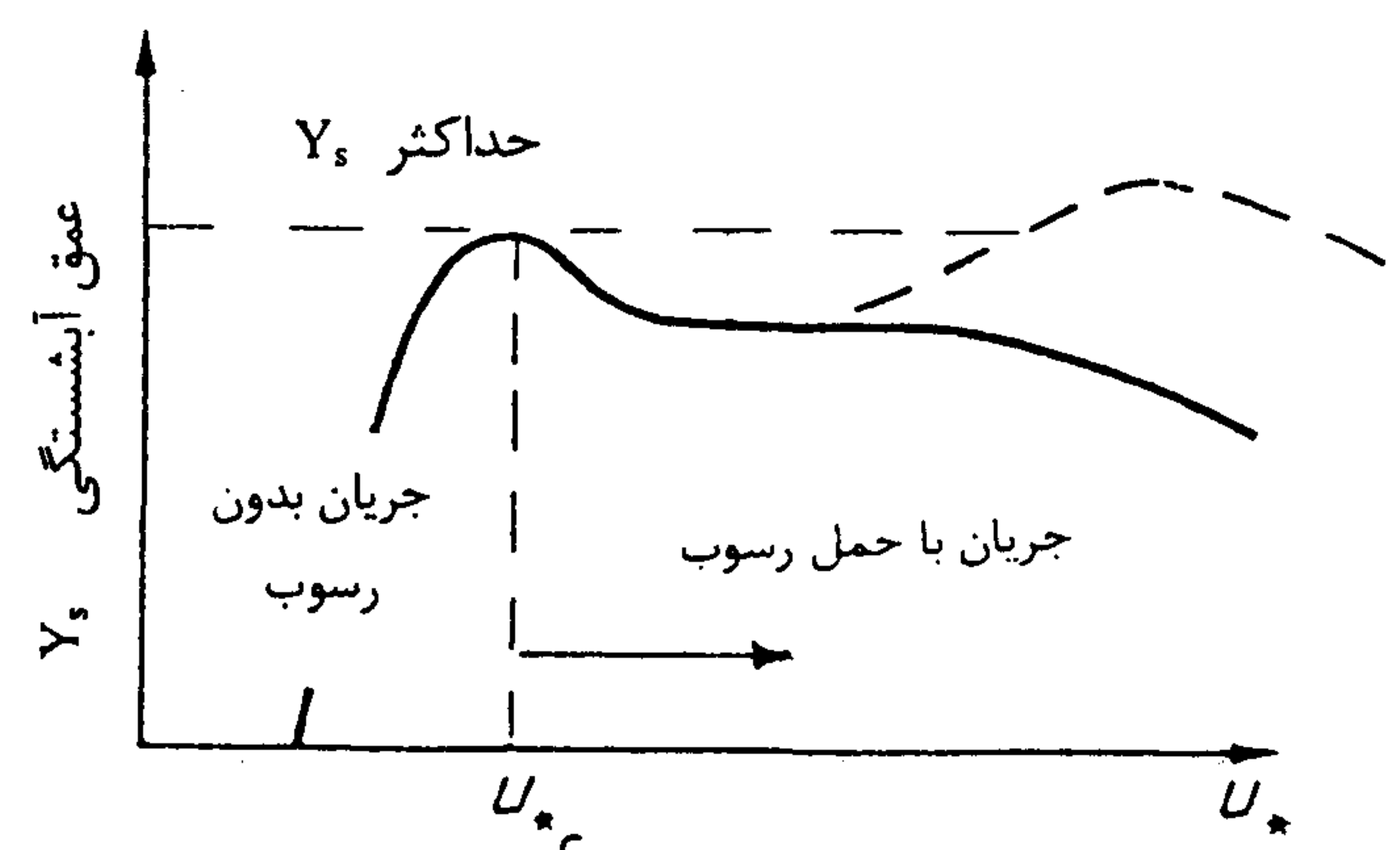
روشهای جلوگیری و کنترل آب شستگی

روشهای مختلفی برای جلوگیری و یا کاهش آب شستگی در اطراف پایه‌های پل پیشنهاد شده است که می توان آنها را به دو دسته ۱- مستقیم و ۲- غیرمستقیم تقسیم کرد. در روش مستقیم مقاومت بستر در مقابل تنشهای وارده افزوده می گردد. این کار با تعویض مصالح اطراف پایه با مصالح مقاومتر انجام می شود. معمولترین مصالح مورد استفاده سنگ می باشد و روابط متعددی نیز برای محاسبه قطر لازم برای سنگ با توجه به دبی طراحی ارائه شده است [۵]. در روش غیرمستقیم با عوض کردن الگوی جریان در اطراف پایه نیروهای مخرب کاهش داده می شوند [۶، ۷، ۸]. معمولترین راه نیز در این روش استفاده از یک طوق در روی پایه برای جلوگیری از برخورد جریان رو به پایین با بستر رودخانه در جلو پایه می باشد (شکل ۳).

برای استفاده از سنگ باید منابع قرضه در دسترس باشد ضمن اینکه سنگ در دبی بیشتر از دبی طراحی و همچنین در اثر آب شستگی عمومی و آب شستگی در اثر تنگ شدگی از جای خود حرکت کرده و کارائی خود را از دست می دهد. در مقابل طوق می تواند

می نمایند. حفر گودال آب شستگی توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک نماید. در اینجا عمق حفره آب شستگی به تعادل رسیده و ثابت می گردد.

مشاهدات نشان می دهند [۲] که آب شستگی در اطراف پایه‌ها هنگامی آغاز می شود که تنش روی ذرات بستر در مقطع بالادست پایه به نصف تنش بحرانی آنها برسد. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که وجود پایه باعث افزایش موضعی تنش روی ذرات بستر به میزان دو برابر می شود. با افزایش تنش از این مقدار عمق و در نتیجه گستره حفره آب شستگی در اطراف پایه بیشتر می شود تا جایی که تنش روی ذرات بستر در بالا دست محل پایه به تنش بحرانی برسد. در این حال حداکثر عمق حفره آب شستگی بوجود می آید. اگر تنش از این مقدار نیز بیشتر شود بستر رودخانه در بالادست پل نیز به حرکت می افتد و رسوبی که از بالادست به محل پل می رسد داخل حفره آب شستگی ریخته عمق آن را کاهش می دهد (شکل ۲). لازم به ذکر است که در بررسی مکانیزم آب شستگی، فرض شده که بستر از مصالح دانه‌ای تشکیل شده است. مکانیزم آب شستگی بستر تشکیل شده از مصالح چسبنده متفاوت بوده و مطالعه‌ای در این مورد در اطراف پایه‌های پل انجام نشده است.



شکل ۲: تغییرات حداکثر عمق آب شستگی با تنش برشی در بالا دست پایه [۲].

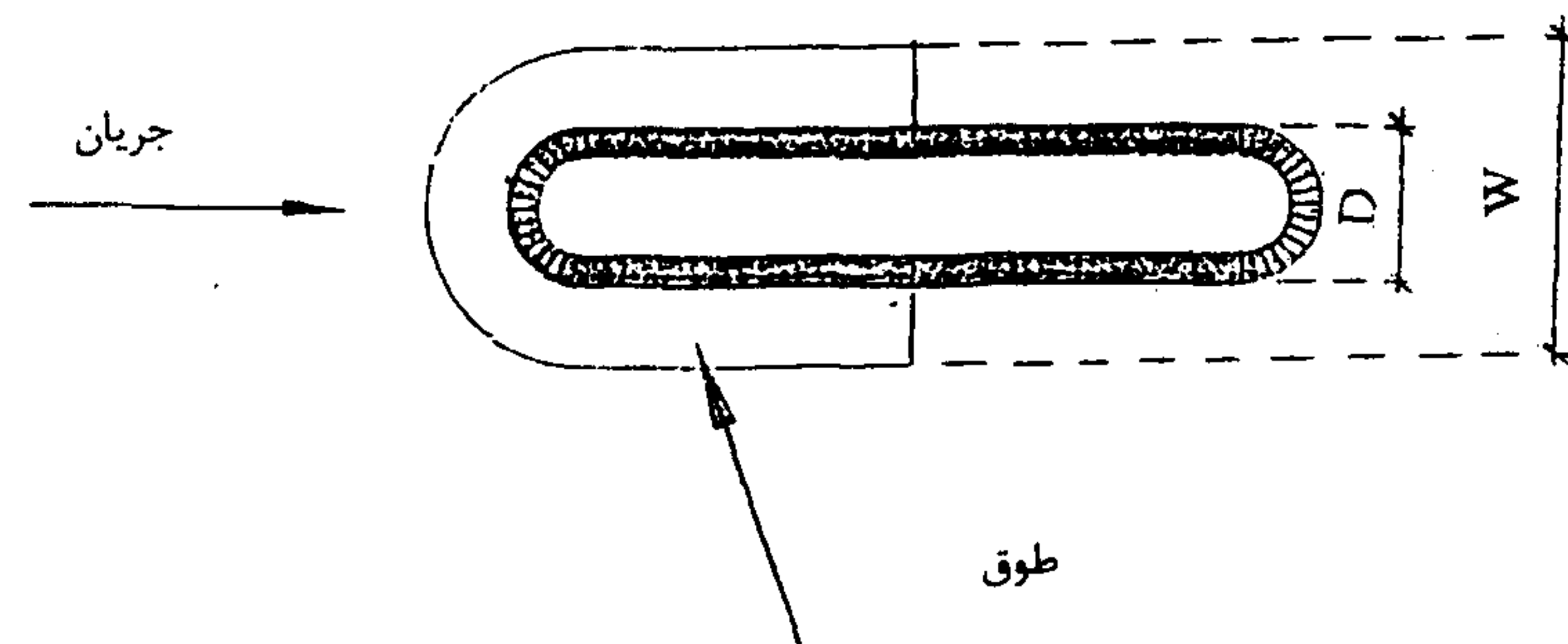
روابط پیش‌بینی حداکثر عمق آب شستگی

روابط متعددی برای پیش‌بینی حداکثر عمق

حرکت ذرات بستر در بالادست پایه) عوامل موثر بی‌بعد در میزان آب‌شستگی عبارتند از: W/D ، نسبت پهنای موثر طوق به پهنای پایه (شکل ۳) و y_d/y_o ، نسبت تراز نصب طوق به عمق آب.

با توجه به تجارب مهم بدست آمده در استفاده از طوق روی پایه‌های استوانه‌ای تصمیم گرفته شد آزمایشهای مشابهی روی پایه‌های با مقطع مستطیل انجام گیرد [۹] و تاثیر طوق در کاهش آب‌شستگی در پایه‌های مستطیلی بدست آید. شرح آزمایشهای انجام شده و نتایج بدست آمده در بخشهای بعدی آمده است.

بسیار ارزان تمام شود و در اثر آب‌شستگی عمومی فقط کارائی آن کم می‌شود که این نیز با جابجا کردن طوق قابل جبران است.



شکل ۳: نحوه قرارگیری طوق بر روی پایه (پلان).

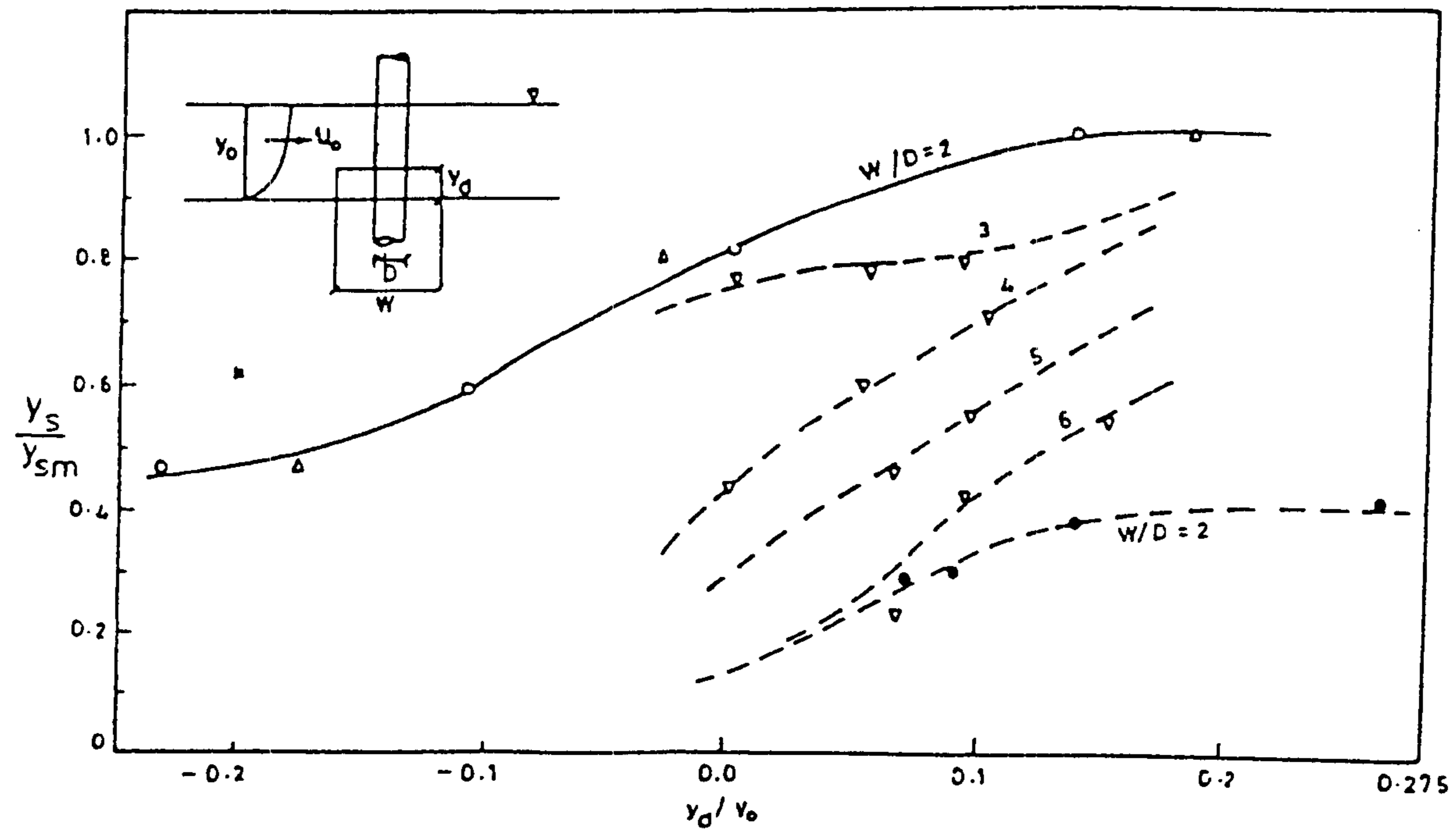
شرح مدل فیزیکی

آزمایشها در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۷۵ متر و عمق ۰/۸ متر انجام گرفت. یک دریچه در پایین دست فلوم پایاب را تنظیم کرده و یک سرریز مثلثی در بالادست میزان دبی ورودی را نشان می‌داد. کف فلوم بجز در یک محدوده که شروع آن در ۶/۵ متری از ابتدای فلوم قرار داشت و منطقه مورد آزمایش بود به ارتفاع ۰/۲۵ متر با مصالح بنائی بالا آورده شده و روی مصالح بنائی با ملات ریز ماسه سیمان اندود شد تا زبری آن تقریباً برابر یک میلی‌متر یعنی اندازه مصالحی شود که برای پر کردن منطقه مورد آزمایش انتخاب شده بود (شکل ۵).

در مرحله اول آزمایشها هدف بدست آوردن عمق آب و دبی جریان به صورتی بود که ذرات بستر را به آستانه حرکت برساند. علت نیز آن بود که در آستانه حرکت ذرات در بالادست محل پایه، حداکثر عمق آب‌شستگی رخ می‌داد (بخش ۳). از طرفی با توجه به عرض پایه (که در ادامه همین بحث به آن اشاره شده است) عمق آب باید از حد مشخصی بیشتر می‌بود تا تاثیر آن روی آب‌شستگی ناچیز باشد [۲]. با توجه به این محدودیتها با انجام چند سعی و خطا عمق و دبی آستانه حرکت ذرات بستر از روش شیلدز بدست آمد. سپس مصالح انتخاب شده در جای خود در مدل ریخته شد (بدون نصب پایه) و عمق و دبی آستانه حرکت با مشاهده حرکت ذرات روی مدل تلفیق گردید. پس از انجام چندین آزمایش دبی ۵۰ لیتر در ثانیه و عمق ۰/۱۹ متر به

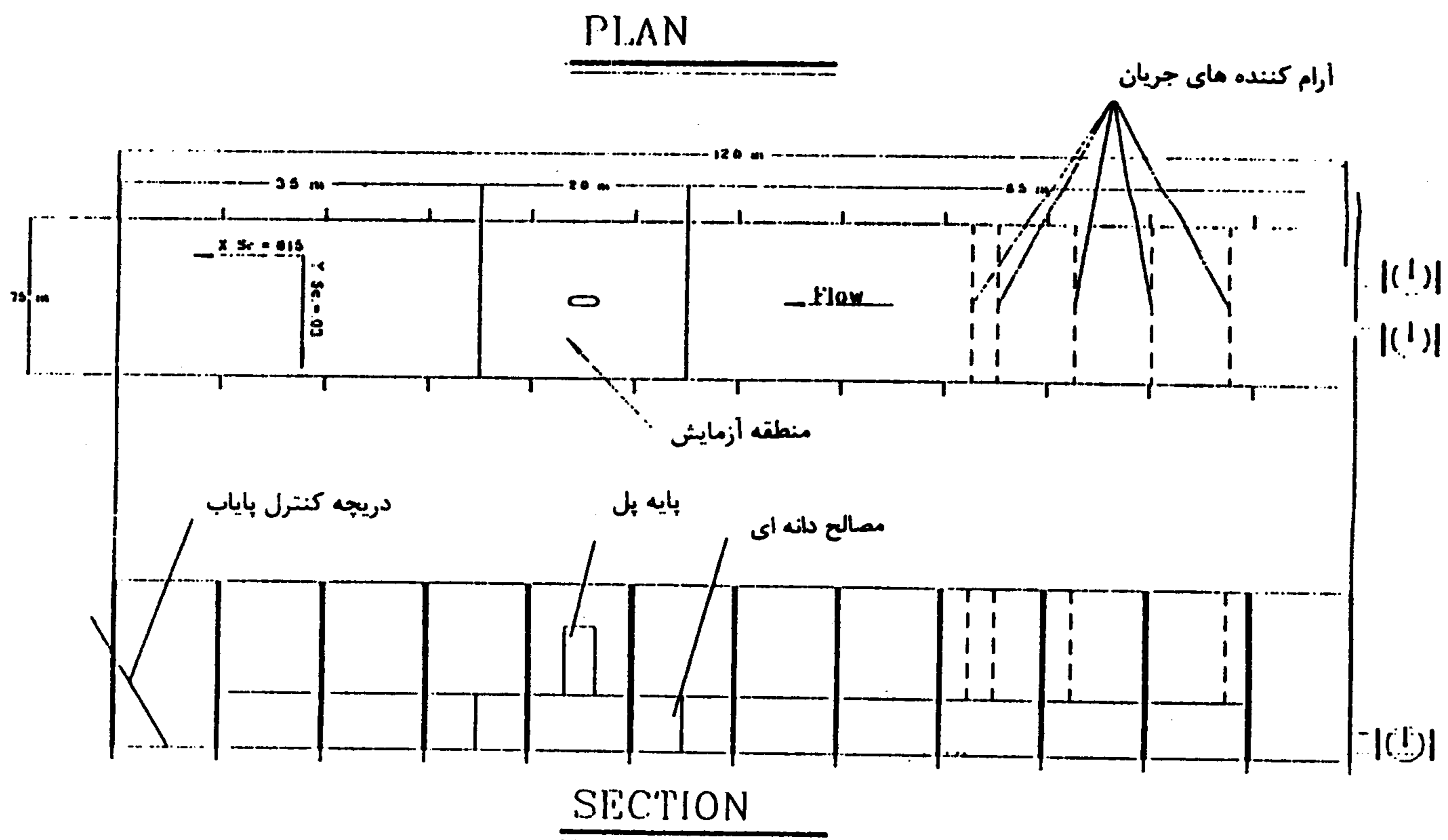
استفاده از طوق برای کاهش آب‌شستگی

مطالعات انجام شده در مورد استفاده از طوق بر روی پایه‌های استوانه‌ای شکل نشان داده‌اند که طوق می‌تواند در کاهش میزان آب‌شستگی بسیار موثر باشد [۶]. شکل (۴) کل یافته‌های آزمایشگاهی در مورد تاثیر طوق در کاهش آب‌شستگی روی پایه‌های استوانه‌ای را خلاصه کرده است. در این شکل $y_s/y_{s,max}$ نسبت حداکثر آب‌شستگی مشاهده شده پس از نصب طوق به آب‌شستگی بدون طوق است. همانگونه که از این شکل مشخص است هر چه طوق بزرگتر و تراز آن پایین‌تر باشد موثرتر است. علت نیز آنست که طوق در حقیقت جلو جریان رو به پایین را گرفته و مانع تشکیل یک گرداب نعل اسبی قوی می‌گردد. هر چه طوق بزرگتر باشد جریان رو به پایین بیشتر از پایه دور می‌شود و مستهلک می‌گردد و هر چه طوق پایین‌تر باشد جریان کمتری به زیر طوق نفوذ کرده و جریان رو به پایین ضعیف‌تری ایجاد می‌شود. بهترین وضعیت برای طوق هنگامی است که طوق کمی زیر بستر قرار داده شود. البته در این صورت فاصله طوق تا بستر رودخانه سرعت شسته شده و جزو عمق آب‌شستگی محسوب می‌شود. بدین ترتیب با ثابت بودن شرایط هیدرولیکی جریان (تمام آزمایشها در شرایط آستانه



DESCRIPTION	SOLID PIER WITH COLLAR			PIER GROUP
INVESTIGATOR	TANAKA AND YANO(1967) ▽	ETTEMA (1980) ○	CHIEW (1992) Δ	VITTAL et.al. (1994) ●

شکل ۴: نمودار بازدهی طوق در کاهش آب شستگی روی پایه های استوانه ای [۷].



شکل ۵: برش و پلان فلوم آزمایشگاهی.

آستانه حرکت به آرامی در فلوم برقرار گردید. در این آزمایش مشاهده شد که آبشستگی از جلو پایه حد فاصل دماغه تا زاویه $45^\circ \pm$ نسبت به محور طولی پایه شروع می‌شود. مواد شسته شده از جلو پایه در دو طرف آن پشته‌ای تشکیل می‌دهند که کم‌کم به طرف پایین دست حرکت می‌کند. با رسیدن این پشته‌ها به انتهای پایه که در این آزمایشها ۱۰ دقیقه به طول می‌انجامد کار حفر و حمل مصالح جلو و اطراف پایه توسط گرداب نعل اسبی، جریان در دو طرف پایه و گردابه‌های برخاستگی سرعت یافته و با عمیق‌تر شدن حفره آبشستگی دیوارهای آن ریزش کرده حفره به اطراف نیز گسترش می‌یافت. سرعت عمیق شدن حفره آبشستگی ابتدا زیاد بوده و بتدریج کم می‌شد. این آزمایش در زمانهای مختلف تا ۱۵ ساعت انجام شد و نتایج مویده آن بود که ۹۵٪ آبشستگی در ۴ ساعت اول رخ می‌دهد. حداکثر عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده در جلو پایه نیز همخوانی کاملاً خوبی با معادله ۱ داشت و الگوی آبشستگی نیز کاملاً متقارن بود. این مشاهدات نشان می‌داد که تنظیم فلوم درست بوده و طرح مدل کامل می‌باشد. شکل (۷) الگوی آبشستگی در اطراف پایه را به صورت خطوط همتراز نشان می‌دهد. اعداد روی شکل عمق آبشستگی به میلی‌متر می‌باشند. پس از این مرحله طوق با ابعاد مختلف و در ترازهای متفاوت بر روی پایه نصب گردید تا عملکرد آن در کاهش میزان آبشستگی مورد مطالعه قرار گیرد.

انجام آزمایش با وجود طوق

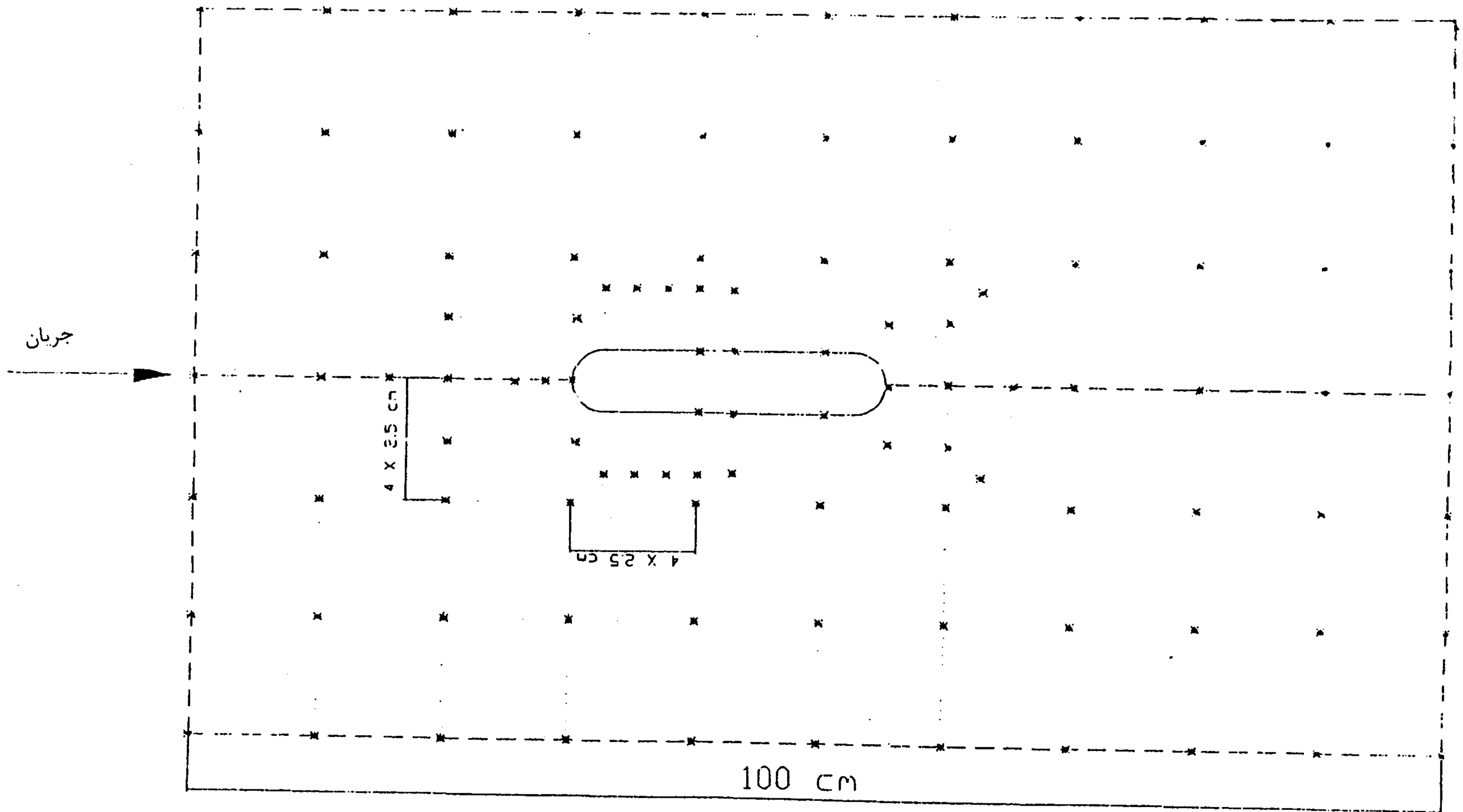
طوق استفاده شده در این آزمایشها از دو قسمت تشکیل شده بود. اول دماغه طوق و دوم دنباله که روی هم شکلی شبیه U بوجود می‌آورد (شکل ۳). قسمت دماغه طوق وظیفه اصلی را به عنوان مانعی در مقابل جریان رو به پایین و تضعیف گرداب نعل اسبی عهده‌دار بود. دنباله طوق نیز می‌توانست به دور شدن گردابه‌های برخاستگی از پایه کمک کرده و حرکت رسوبات را به طرف پایین دست در دو طرف پایه محدود نماید. به این ترتیب دنباله طوق تا نصف طول پایه امتداد داده شد. عرض طوق از فاکتورهای موثر در کارائی طوق محسوب

عنوان شرایط آستانه حرکت انتخاب شد (شیب سطح آب در این آزمایش $10^{-4} * 4/25$ اندازه‌گیری شد) و کلیه آزمایشهای بعدی با وجود پایه با همین دبی و عمق انجام گردید.

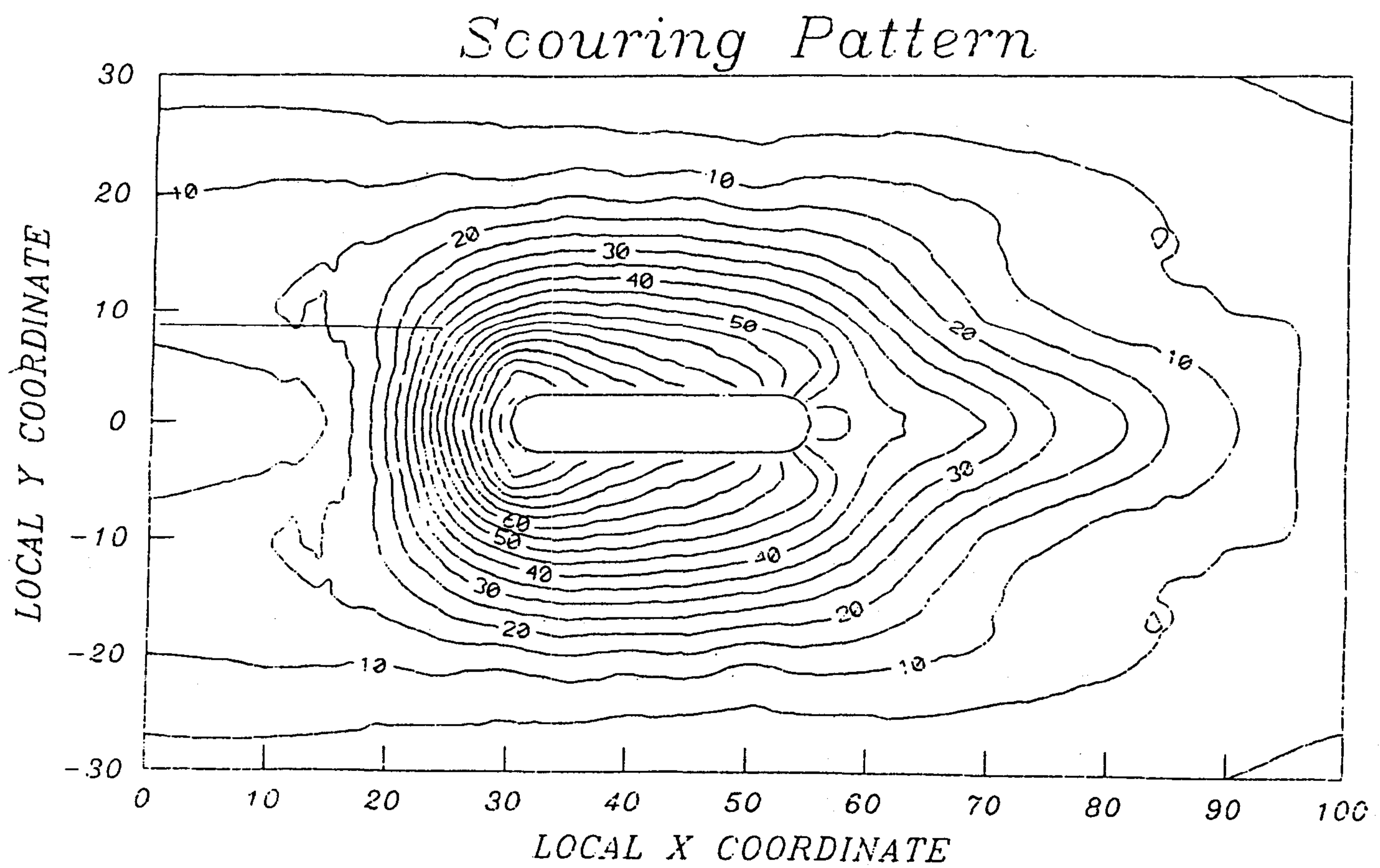
برای انجام آزمایشهای مورد نظر پایه‌ای با مقطع مستطیلی به عرض ۵ سانتیمتر و طول ۲۵ سانتیمتر از جنس پرسپکس ساخته شد. عرض پایه بیشترین مقدار ممکن انتخاب شده بود به نحوی که اثر دیواره‌های اطراف بر روی آبشستگی ناچیز باشد (اگر فاصله پایه‌های کناری از ۶/۲۵ برابر قطرشان بیشتر شود تاثیری بر روی آبشستگی یکدیگر نخواهد داشت [۲]) و طول پایه به صورتی که یک پایه واقعی را نشان دهد (نسبت عرض به طول برابر یک به پنج). انتها و دماغه پایه نیز به صورت نیم‌دایره شکل داده شد. اندازه مصالح بستر نیز با توجه به عرض پایه بزرگترین مقداری انتخاب شد که اثری روی میزان آبشستگی نداشته باشد که این مقدار برابر ۱ میلی‌متر بود. از طرفی مطابق با مراجع موجود [۲ و ۴] انحراف معیار هندسی مصالح (جذر نسبت d_{84} به d_{16} مصالح) باید کمتر از ۱/۲ می‌بود تا دانه‌بندی مصالح تاثیری روی میزان آبشستگی نمی‌گذاشت. دانه‌بندی مصالح نیز براساس همین معیار صورت گرفت. مطابق مراجع فوق‌الذکر در صورتیکه عمق جریان از ۳/۵ برابر عمق پایه بیشتر باشد تاثیری روی میزان آبشستگی نخواهد داشت که این معیار نیز در اینجا رعایت شده است. در آزمایشهای بعدی پایه در منطقه مورد نظر قرار داده شد. پس از هر مرحله آزمایش و عبور آب از محل پایه و ایجاد آبشستگی، برای اندازه‌گیری میزان آبشستگی جریان آب قطع شده به کمک یک عمق‌سنج که روی یک قاب نصب شده و در عرض و طول فلوم براحتی حرکت می‌کرد در نقاط زیادی حفره آبشستگی برداشت می‌شد (شکل ۶). دقت این عمق‌سنج یک دهم میلی‌متر بود.

آزمایش روی پایه بدون وجود طوق

در مرحله مقدماتی، مدل پایه در منطقه مورد آزمایش در راستای جریان قرار گرفت و دبی و عمق



شکل ۶: نقاط برداشت تراز بستر در اطراف پایه.



شکل ۷: الگوی آب شستگی در اطراف پایه پس از ۴ ساعت (اعداد عمق آب شستگی به میلیمتر می باشند) جریان از چپ به راست.

می‌شود. رسوبات حمل شده از این منطقه در پایین دست پایه پشته‌ای بوجود می‌آوردند. رسوبات حمل شده از جلو پایه نیز پشته‌هایی در زیر دنباله طوق بوجود می‌آوردند که با وجود پوشش طوق بر روی آنها تا ۱/۵ ساعت در مقابل جریان مقاومت می‌کردند. در صورتیکه در زمانی که طوق وجود نداشت پشته‌های کناری در مدت ۱۰ دقیقه شسته می‌شدند (بخش ۸). به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت وجود طوق باعث به تاخیر افتادن آب‌شستگی نیز می‌شود. با حرکت این پشته‌ها از جای خود آب‌شستگی در جلو پایه نیز تسریع شده تا رسیدن به تعادل ادامه می‌یافت. با توجه به تسریع آب‌شستگی پس از خالی شدن زیر طوق با انجام یک آزمایش ۱۲ ساعته مشاهده شد که بیشتر عمق آب‌شستگی در این آزمایشها نیز در ۴ ساعت اول رخ می‌دهد و پس از آن تغییر در عمق آب‌شستگی بسیار کم و نامحسوس است. البته روند افزایش عمق آب‌شستگی بصورت بسیار کم ممکن است ساعتها ادامه بیابد [۶]. در این آزمایشها به منظور مقایسه با نتایج آزمایشهای بدون طوق در یک طول زمانی مشابه و با توجه به نتایج آزمایش ۱۲ ساعته کلیه آزمایشها با وجود طوق نیز در مدت ۴ ساعت انجام گرفت.

الف- آزمایش با طوق کوچکتر ($W/D = 2$)

آزمایش با طوق کوچکتر در سه تراز ۱۰ درصد عمق بالای بستر، روی بستر و ۲۰ درصد عمق زیر بستر انجام گردید. نتایج این آزمایشها نشان داد که وجود این طوق در تراز ۱۰ درصد عمق بالای بستر فقط ۱۰ درصد از میزان حداکثر آب‌شستگی می‌کاهد. نصب این طوق در روی بستر تا ۲۰ درصد و در ۲۰ درصد عمق زیر بستر تا ۴۰ درصد کاهش در حداکثر میزان آب‌شستگی را نشان می‌دهد. در مقایسه با پایه‌های استوانه‌ای (شکل ۴) می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد این طوق روی پایه‌های مستطیل شکل مشابه پایه‌های استوانه‌ای می‌باشد. الگوی آب‌شستگی بدست آمده در این آزمایشها در شکل‌های (۸) تا (۱۰) ارائه شده است.

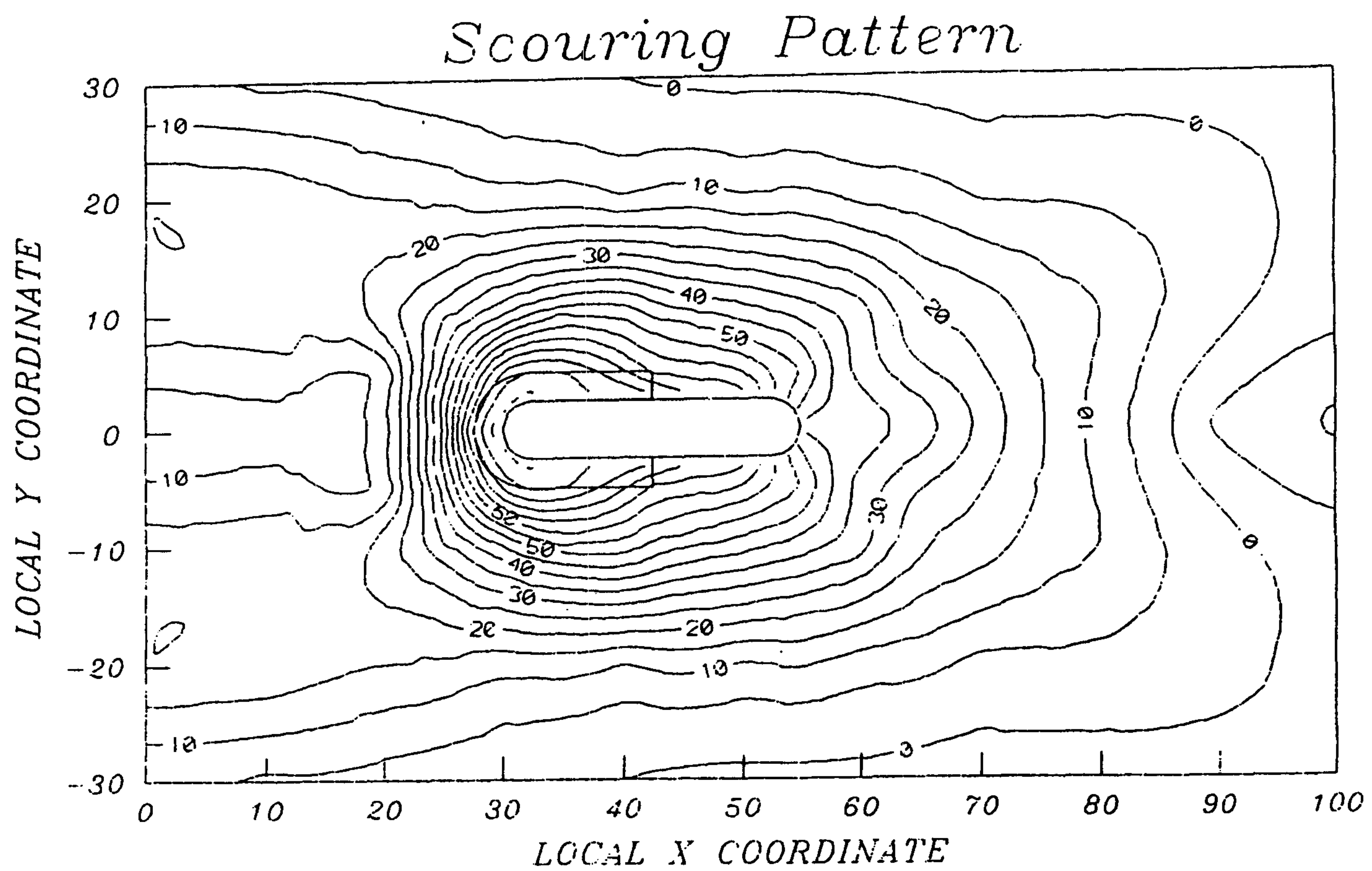
می‌شود. هر چه طوق عریض‌تر باشد می‌تواند جریان را از پایه دورتر و قدرت تخریب آن را پایین بیاورد. در این مطالعات دو طوق یکی با عرضی برابر نصف عرض پایه و دومی با عرضی برابر عرض پایه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. بدین ترتیب مجموع عرض پایه و طوق (W) با طوق کوچکتر به دو برابر عرض پایه (D) و با طوق بزرگتر به سه برابر عرض پایه می‌رسید (شکل ۳). ضخامت طوق باید حداقل ممکن باشد تا مقاومتی در مقابل جریان ایجاد نکند جنس طوق نیز فقط از نظر پایداری سازه‌ای خود آن اهمیت دارد.

تراز طوق نیز در میزان کاهش آب‌شستگی نقش مهمی دارد. هر چه طوق پایین‌تر نصب شود جریان کمتری از زیر طوق به پایه برخورد کرده جریان رو به پایین ضعیفتری ایجاد می‌شود و در نتیجه آب‌شستگی نیز کمتر خواهد بود. در این مطالعات طوق کوچکتر و طوق بزرگتر در ترازهای مختلف نصب شده میزان کاهش آب‌شستگی در هر تراز بدست آمد. هدف از اندازه‌گیری میزان آب‌شستگی با وجود طوق در ترازهای بالا مطالعه عملکرد و کارایی طوق در زمانی بود که به دلیل آب‌شستگی عمومی و یا در اثر تنگ‌شدگی زیر طوق خالی شده و طوق بالاتر از تراز بستر قرار بگیرد.

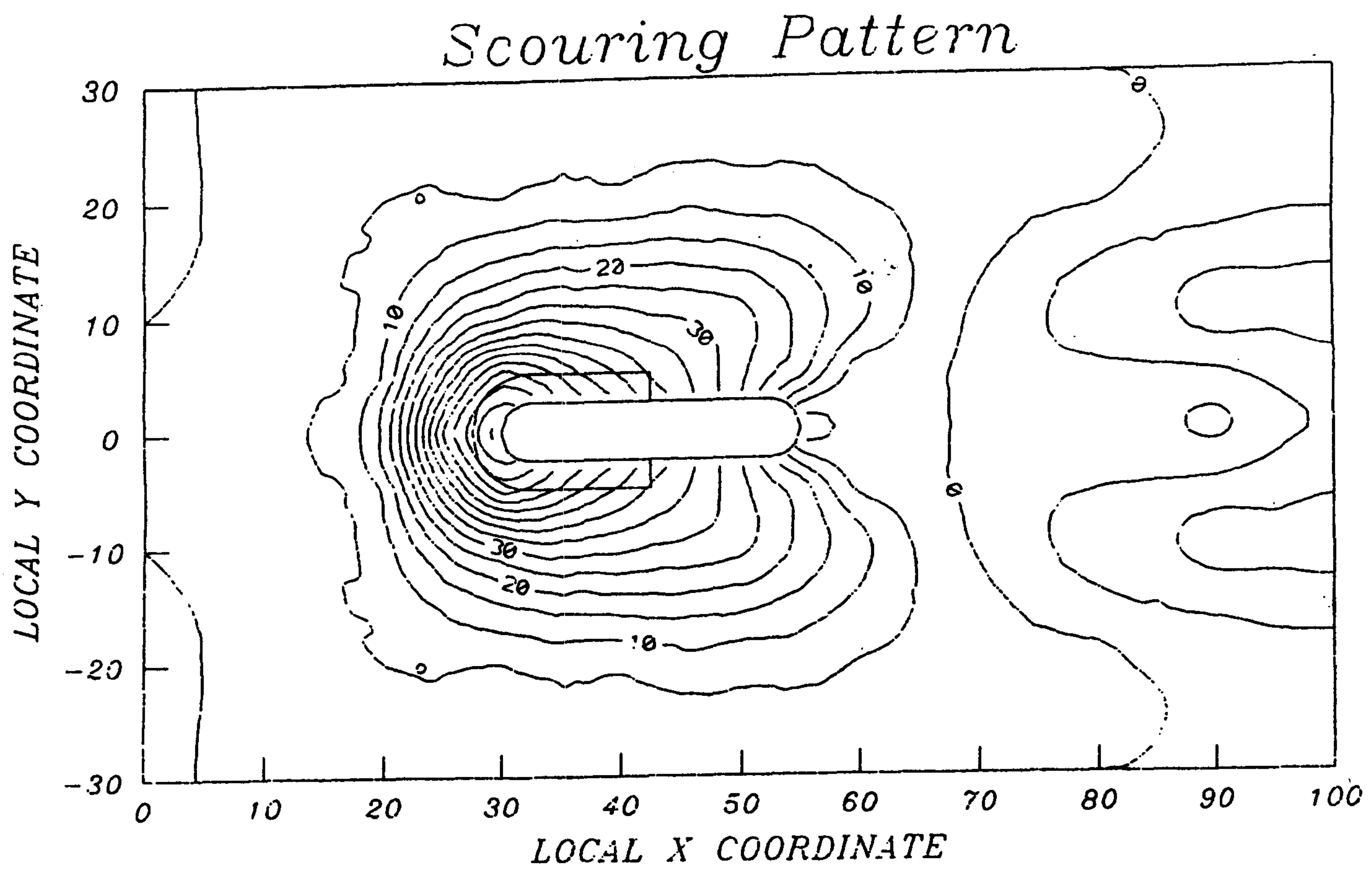
نحوه آب‌شستگی در اطراف پایه پس از نصب طوق

با وجود طوق بر روی پایه گرداب‌های برخاستگی قوی‌تری در اطراف پایه بوجود می‌آید به صورتی که این گردابها گاهی ذرات بستر را تا ۱۵ سانتیمتر بالا می‌آوردند. نکته قابل توجه دیگر آن بود که با وجود طوق اولین نشانه‌های آب‌شستگی به جای جلو پایه در کناره‌های آن و در خارج از محدوده طوق بوجود می‌آید. این آب‌شستگی سپس به زیر طوق در کناره‌ها و جلو پایه گسترش می‌یافت. در حقیقت ابتدا گستره آب‌شستگی بوجود می‌آید و سپس حفره آب‌شستگی عمیق می‌شد. بدون وجود طوق ابتدا حفره آب‌شستگی عمیق شده و سپس با ریزش دیواره‌های آن حفره گسترده می‌شد.

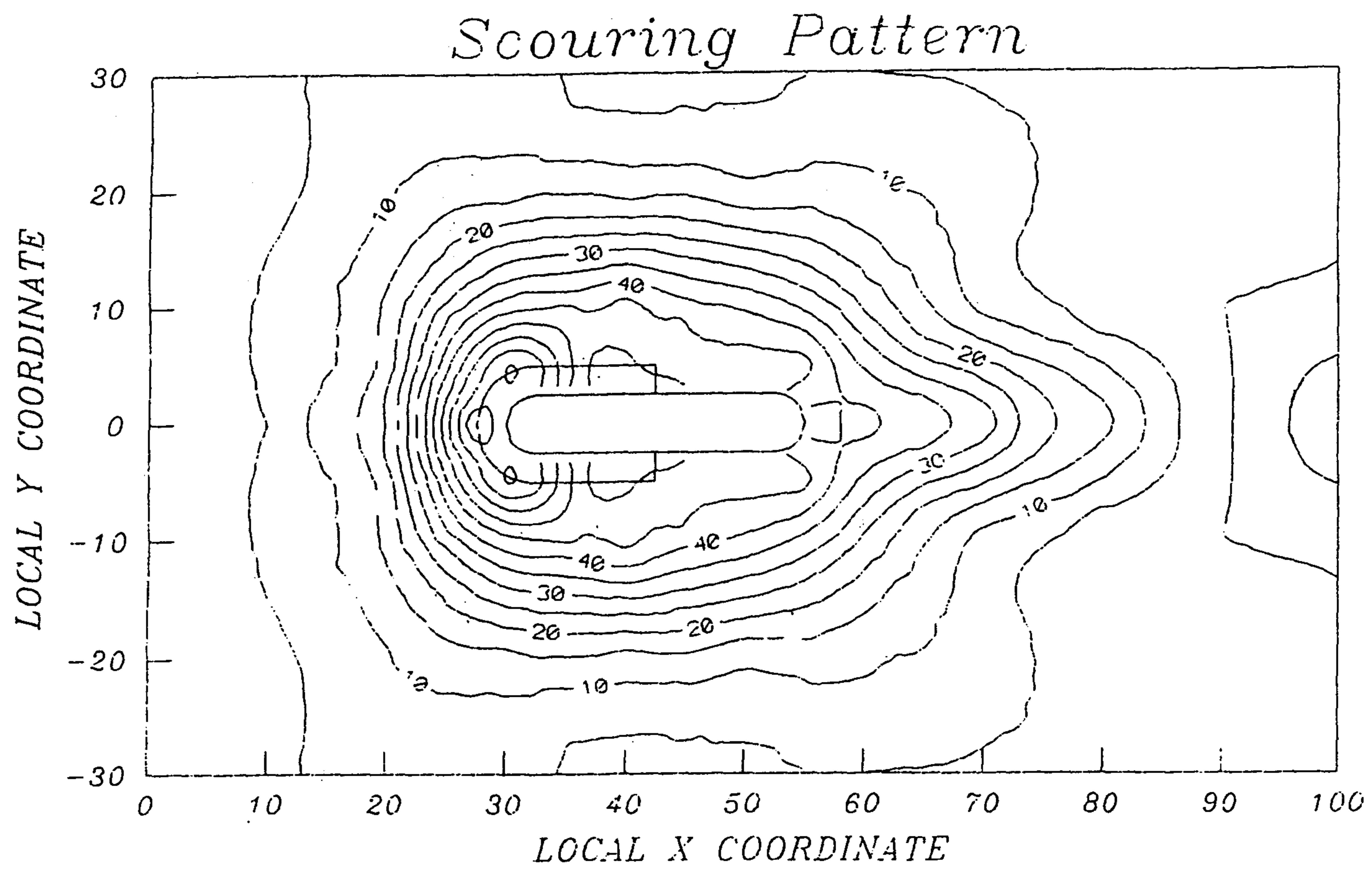
بدین ترتیب ابتدا ناحیه پایین دست در کناره پایه که در خارج از پوشش طوق قرار داشت دچار آب‌شستگی



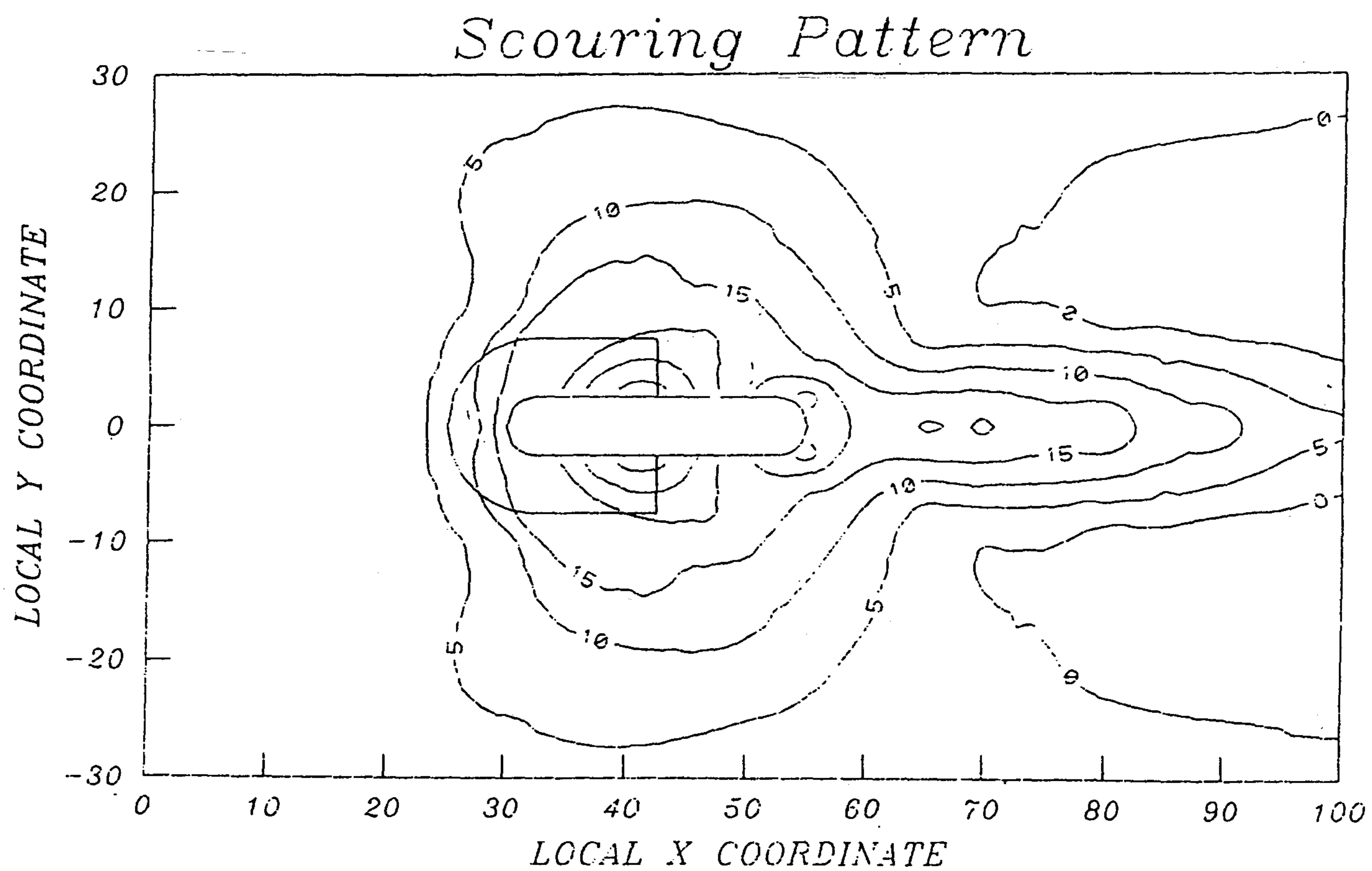
شکل ۸: الگوی آب شستگی در اطراف پایه پس از ۴ ساعت با طوقی به عرض نصف عرض پایه در تراز ۱۰ درصد عمق بالای بستر (اعداد عمق آب شستگی به میلیمتر می باشند) جریان از چپ به راست.



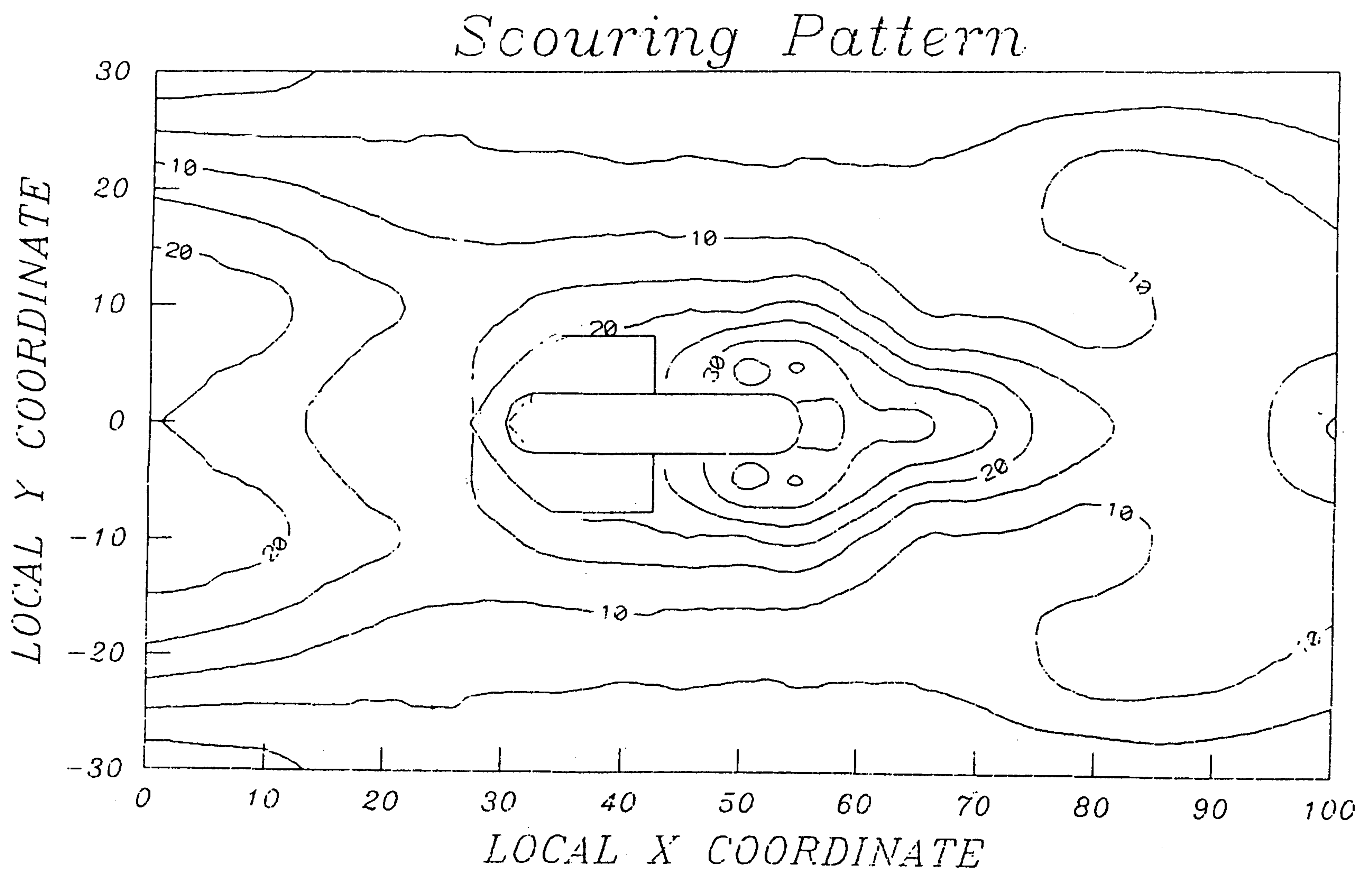
شکل ۹: الگوی آب شستگی در اطراف پایه پس از ۴ ساعت با طوقی به عرض نصف عرض پایه در تراز بستر (اعداد عمق آب شستگی به میلیمتر می باشند) جریان از چپ به راست.



شکل ۱۰: الگوی آب شستگی در اطراف پایه پس از ۴ ساعت با طوقی به عرض نصف عرض پایه در تراز ۲۰ درصد عمق زیر بستر (اعداد عمق آب شستگی به میلیمتر می باشند) جریان از چپ به راست.



شکل ۱۱: الگوی آب شستگی در اطراف پایه پس از ۴ ساعت با طوقی به عرض پایه در تراز بستر (اعداد عمق آب شستگی به میلیمتر می باشند) جریان از چپ به راست.



شکل ۱۲: الگوی آب شستگی در اطراف پایه پس از ۴ ساعت با طوقی به عرض پایه در ۱۰ درصد عمق زیر بستر (اعداد عمق آب شستگی به میلی‌متر می‌باشند) جریان از چپ به راست.

در دو آزمایش فوق مؤید این نکته است که تراز بهینه نصب طوق در همان محدوده قرار دارد. نتیجه مهم دیگری که با توجه به شکل (۴) می‌توان گرفت آن است که عملکرد طوق با پهنایی برابر عرض پایه در روی پایه‌های با مقطع مستطیلی شکل از پایه‌هایی با مقطع دایره بهتر می‌باشد. الگوی آب‌شستگی بدست آمده در این آزمایشها در اشکال (۱۱) و (۱۲) آمده است.

ج- آزمایش با دو طوق کوچک ($W/D=2$)

در این آزمایش هدف پاسخ به این سؤال بود که آیا می‌توان با دو طوق کوچکتر در دو تراز مختلف بازدهی بهتری در کاهش آب‌شستگی داشت. برای این آزمایش دو طوق کوچک یکی در تراز بستر و دومی ۱۰ درصد عمق

ب- آزمایش با طوق بزرگتر ($W/D=3$)

دو آزمایش با این طوق انجام شد یکی با تراز طوق در سطح بستر و دوم با نصب طوق ۱۰ درصد عمق زیر تراز بستر. نتایج این آزمایشها نشان داد که افزایش ابعاد طوق در کاهش آب‌شستگی اثر مهمی دارد. نصب طوق در ترازهای فوق‌الذکر تا ۷۹ درصد از میزان حداکثر آب‌شستگی را نسبت به پایه بدون حفاظ در مدت مشابه کاهش می‌دهد. همچنین این آزمایشها نشان می‌دهند که پایین‌تر بردن طوق کمکی به کاهش آب‌شستگی نخواهد کرد و تراز بهینه نصب طوق جایی بین تراز بستر و ۱۰ درصد عمق زیر بستر است. زیرا پایین بردن طوق از طرفی به کاهش آب‌شستگی در زیر طوق می‌انجامد و از طرفی فاصله بالای طوق و تراز بستر خود جزو آب‌شستگی محسوب می‌شود. تغییر نکردن درصد کاهش آب‌شستگی

زیر بستر برای نصب طوق وجود دارد که در آن عمق، حداکثر کاهش آبشستگی نتیجه خواهد شد.

۲- وجود طوق باعث به تاخیر افتادن آبشستگی می‌شود. همچنین با وجود طوق ابتدا حفره آبشستگی در سطح گسترده شده و سپس عمیق می‌شود.

۳- نصب یک طوق با عرضی برابر نصف عرض پایه به شکل U وقتی ۱۰ درصد عمق بالاتر از بستر، روی بستر و یا ۲۰ درصد عمق زیر بستر نصب شود به ترتیب حدود ۱۰ درصد، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد حداکثر آبشستگی در جلو پایه را کاهش خواهد داد.

۴- نصب یک طوق با عرضی برابر عرض پایه وقتی روی بستر و یا ۱۰ درصد عمق زیر بستر نصب شود حدود ۸۰ درصد آبشستگی را نسبت به پایه بدون حفاظ در مدت مشابه کاهش می‌دهد.

۵- نصب یک طوق دوم در ترازوی بالاتری می‌تواند به کاهش بیشتر آبشستگی کمک کند.

۶- کارائی طوق روی پایه‌هایی با مقطع مستطیلی در حد و یا بهتر از پایه‌های استوانه‌ای می‌باشد. انجام این آزمایشها نشان دادند که طوق می‌تواند وسیله‌ای مطمئن و ارزان برای کنترل آبشستگی در اطراف پایه‌ها باشد.

در آخر، آزمایشهای بسیار طولانی مدت (در حدود یک هفته) برای یافتن حداکثر ممکن عمق آبشستگی با وجود طوق توصیه می‌گردد. همچنین نصب طوق در روی پایه‌های پل و مشاهده میزان آبشستگی پس از عبور چند سیل به شناخت عملکرد طوق کمک شایانی خواهد نمود.

بالاتر از بستر نصب گردید. پس از پایان آزمایش و اندازه‌گیری حداکثر عمق آبشستگی مشاهده شد که وجود طوق بالاتر توانسته است ۱۶/۵ درصد دیگر عمق آبشستگی را کاهش دهد. البته باید گفت که طوق بزرگتر در تراز بستر می‌تواند بسیار موثرتر از دو طریق کوچک در دو تراز مختلف باشد.

خلاصه نتایج

طوق وسیله‌ای ساده و ارزان برای کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل می‌باشد. نصب طوق هم روی پایه‌هایی که در حال ساخت و هم روی پایه‌های اجرا شده به سادگی امکان‌پذیر است و نسبت به سنگ‌چین در اطراف پایه‌ها دارای دوام بیشتری بوده دبی طراحی نیز برای آن مطرح نمی‌باشد. اگر احتمال آبشستگی عمومی در مسیر رودخانه وجود داشته باشد سنگ‌چین نیز به همراه آن شسته خواهد شد ولی فقط تراز طوق تغییر خواهد کرد و با پایین رفتن بستر و قرار گرفتن طوق در تراز بالاتر از آن کارائی آن کاسته خواهد شد که آن نیز با پایین بردن تراز طوق قابل جبران خواهد بود. در این مطالعات کارائی یک نیم طوق روی پایه‌هایی با مقطع مستطیل مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج گرفته شده از این مطالعات به شرح زیر می‌باشد:

۱- هر چه طوق پایین‌تر نصب شود درصد کاهش آبشستگی بیشتر خواهد بود. البته هر چه طوق پایین‌تر از بستر برده شود فضای روی آن نیز جزو آبشستگی محسوب می‌شود و بنابراین می‌توان گفت عمقی بهینه در

مراجع

- 1 - Johnson, P. A. and Dock, D. A. (1998). "Probabilistic bridge scour estimates." *J. of Hydr. Eng.*, Am. Soc. of Civil Eng., Vol. 124, No. 7, PP. 750-754.
- 2 - Breusers, N. H. C. and Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring*, 2nd hydraulic structures design manual, IAHR, Publ. Balkema.
- 3 - Garde, R. J. and Ranga Raju, K. G. (1987). *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- 4 - Raudkivi, A. J. (1998). *Loose boundary hydraulics*, 4th edition, Pergamon.

- ۵ - زرانی، ا. ر. و عزیزی، م. "بررسی روشهای کنترل و کاهش آب شستگی پایه‌های مستطیلی شکل پلها." اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی (۱۳۷۶).
- 6 - Chiew, Y. M. (1992). "Scour protection at bridge piers." *J. of Hydr. Eng., Am. Soc. of Civil Eng., Vol. 118, No. 9, PP. 1260-1269.*
- 7 - Ettma, R. (1980). Scour at bridge piers, *Report No. 216*, University of Auckland, School of Engineering.
- 8 - Tanaka, S. and Yano, M. (1967). "Local Scour around a circular cylinder." *Proc. 12th IAHR Congress, 3, 1933-201.*
- ۹ - عزیزی، م. "مطالعه روشهای جلوگیری از آب شستگی در اطراف پایه‌های پل." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تابستان (۱۳۷۵).
- 10 - Vittal, N., Kothari, U. C. and Haghghat, M. (1994). "Clear water scour around bridge pier group." *J. of Hydr. Eng., Am. Soc. of Civil Eng., Vol. 120, No. 11, PP. 1309-1318.*

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Wake Vortex