

## اثر موقعیت پایه پل استوانه‌ای بر عمق آبستگي در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه‌ها

علیرضا مسجدی<sup>۱\*</sup>، حسین کاظمی<sup>۲</sup> و امین مرادی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۲۴)

### چکیده

در این تحقیق برای بررسی عمق آبستگي در اطراف پایه پل در قوس رودخانه، آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی با قوس ۱۸۰ درجه با  $Rc/B=4/7$  و از جنس پلاکسی گلاس انجام پذیرفت. بدین منظور با قرار دادن یک پایه استوانه‌ای به قطر ۶ سانتی‌متر در فلوم با ۴ دبی و عمق ثابت ۱۲ سانتی‌متر پدیده آبستگي حول پایه در حالت آب زلال بررسی شد. برای مصالح کف فلوم از ماسه طبیعی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر عمق آبستگي هنگام نصب پایه استوانه‌ای در طول قوس متفاوت بوده و در موقعیت ۶۰ درجه بیشترین آبستگي در اطراف پایه ایجاد می‌شود. هم‌چنین با افزایش دبی جریان در کلیه موقعیت‌ها، عمق آبستگي نیز افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: آبستگي موضعی، پایه پل، قوس ۱۸۰ درجه، جریان ثانویه، آبستگي آب زلال

۱. استادیار مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

۲. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: drmasjedi2007@yahoo.com

## مقدمه

بویج (۳) یک مدل عددی برای قوس ۱۸۰ درجه به روش گردابه‌های بزرگ برای یک خم بسیار ملایم ارائه داد. نتایج این تحقیق نشان داد جریان ثانویه باعث می‌شود که حداکثر سرعت بیشتر از حالت عادی به بستر نزدیک شود و همین پدیده باعث افزایش آبستگي موضعی در محل دیواره خارجی می‌شود.

صفرزاده و گندشمین (۲) تحقیقی در خصوص الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه، توزیع سرعت طولی و عرضی، نحوه شکل‌گیری جریان ثانویه و قدرت آن و تنش برشی بستر و دیواره انجام داد. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد بیشترین توزیع سرعت در زاویه ۶۰ درجه به دلیل قدرت بالای جریان‌های ثانویه ایجاد می‌گردد.

امامی و همکاران (۱) آزمایش‌هایی روی آبستگي اطراف پایه استوانه‌ای درون قوس ۱۸۰ درجه در حالت آب زلال انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با افزایش دبی عمق حداکثر آبستگي در زمان تعادل و نیز ابعاد حفره افزایش می‌یابد. هم‌چنین پشته حاصل از آبستگي در اثر افزایش دبی گسترده‌تر شده و به دیواره داخلی نزدیک‌تر می‌شود.

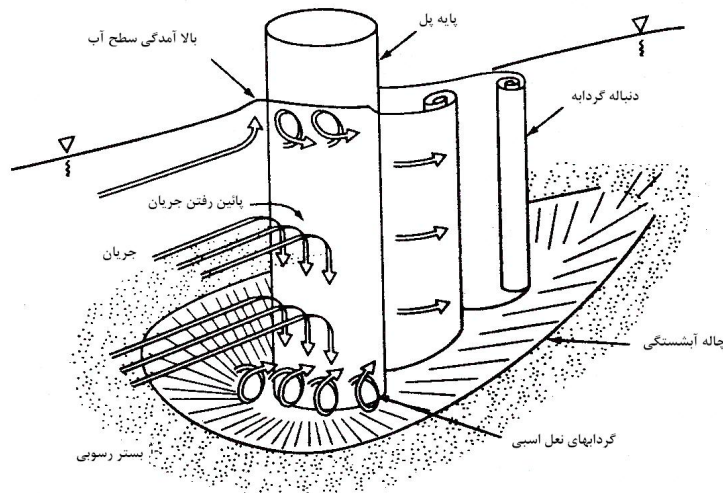
بر اساس مطالعات انجام شده توسط ریچاردسون و دیویس (۱۴)، رادکیوی و اتما (۱۲) و لاگاس و ریچاردسون (۸) پدیده آبستگي در اطراف پایه تحت تأثیر عواملی از جمله هندسه مجرا، دبی جریان، عمق جریان، قطر پایه، شتاب ثقل خصوصیات مصالح بستر، زاویه قرارگیری پایه نسبت به جریان، شکل پایه و خواص سیال قرار دارد. اصولاً پل‌ها در بازه‌ای از رودخانه احداث می‌شوند که رودخانه پایدارتر باشد. در این مسیر، ممکن است به علت محدودیت‌های احداث راه و یا عدم پایداری رودخانه در بازه‌های مستقیم، اقدام به احداث پل در قوس رودخانه شود. به دلیل تفاوت در الگوی جریان در موقعیت‌های مختلف در قوس ۱۸۰ درجه، در این تحقیق اقدام به بررسی اثر الگوی جریان در آبستگي اطراف پایه استوانه‌ای در موقعیت‌های مختلف در قوس ۱۸۰ درجه شد (۲).

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکارترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند که در راه‌سازی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. هر ساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از این پل‌ها درست زمانی که بیشترین نیاز به آنها وجود دارد، تخریب می‌شوند. یکی از مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها آبستگي موضعی اطراف پایه‌ها در قوس رودخانه است.

بر اساس مطالعات انجام گرفته دو عامل مهم باعث فرسایش در اطراف پایه پل می‌شود. یکی برخورد جریان به پایه و دیگری جدا شدن جریان از پایه. در اثر برخورد جریان به پایه گرداب‌های نعل اسبی شکل می‌گیرد. به اعتقاد محققین گرداب نعل اسبی اساسی‌ترین نقش را در فرآیند آبستگي ایفا می‌نمایند. حفره گودال آبستگي توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می‌یابد تا حجم آب درون حفره آبستگي زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک کند. در این حالت عمق آبستگي به حالت تعادل می‌رسد (۱۳). شکل ۱ نمونه‌ای از جریان آشفته و گرداب‌هایی را که باعث آب شستگی موضعی و حفره می‌گردند را نشان می‌دهد.

پیچیدگی شرایط الگوی جریان در قوس همراه با پیچیدگی جریان حول پایه استوانه‌ای شرایط الگوی جریان حول پایه در قوس را بیشتر می‌سازد. راودکیوی و اتما (۱۲)، چیو و ملویل (۵)، دارگاهی (۶)، بریوسرس و راودکیوی (۴)، الیوتو و هاگر (۱۱) و ملویل و چیو (۹) و تحقیقاتی درباره آبستگي پایه پل در آبراهه مستقیم انجام داده‌اند.

آپین و درینکر (۷) توزیع سرعت در قوس منظم و با مقطع دوزنقه‌ای را بررسی کردند. مشاهدات آنها نشان داد که حداکثر سرعت با توجه به مشخصه‌های مدل فیزیکی آنها در کناره داخلی ورودی رخ می‌دهد و سپس توزیع سرعت در عمق به سمت یکنواخت شدن میل می‌کند و در زاویه ۶۰° سرعت حداکثر به طرف قوس خارجی حرکت می‌کند.



شکل ۱. الگوی جریان و حفره آبشستگی موضعی اطراف یک پایه پل استوانه‌ای

## مواد و روش‌ها

به منظور بررسی آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس رودخانه، یک مدل فیزیکی تهیه شد. آزمایش‌ها در یک فلوم شیشه‌ای قوسی شکل با زاویه مرکزی  $180^\circ$  درجه، شعاع مرکزی  $Rc=2/8m$  و عرض  $B=0/6m$  انجام شد. انحنای نسبی قوس  $Rc/B=4/7$  بوده که قوس را در رده قوس‌های ملایم قرار می‌دهد. کانال مستقیم ورودی به طول  $9/1$  متر به یک کانال با قوس  $180^\circ$  درجه متصل می‌گردد. این کانال قوسی شکل توسط کانال مستقیم دیگری به طول  $5/5$  متر به دریچه کنترل عمق جریان و سپس مخزن خروجی متصل شد (شکل ۲). کلیه آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی واقع در زمین دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز انجام شد.

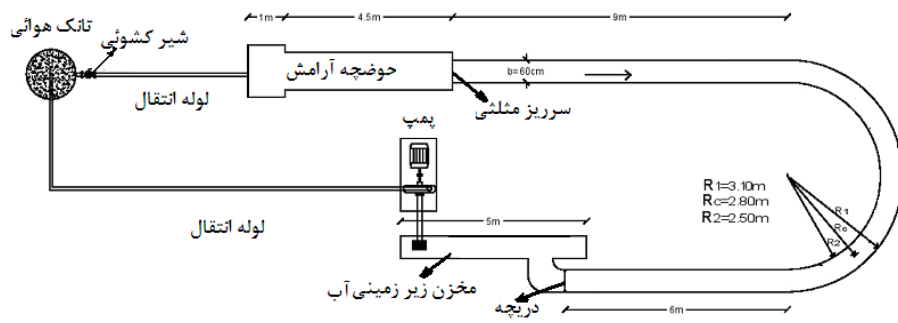
در کلیه آزمایش‌ها برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی، طبق توصیه‌های چپو و ملویل (۵) قطر پایه نباید از  $10\%$  درصد عرض کانال بیشتر باشد. هم‌چنین راودکیوی و اتما (۱۲) پیشنهاد کردند که نسبت قطر پایه به عرض کانال باید حداقل  $6/25$ : ۱ باشد بنابراین برای مدل کردن پایه، استوانه‌ای به قطر  $60$  میلی‌متر از جنس پلاستیک مورد استفاده شد.

به توصیه راودکیوی و اتما (۱۲) برای جلوگیری از تشکیل

ریپل قطر متوسط ذرات باید از  $0/7$  میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. هم‌چنین برای حذف اثر اندازه رسوبات روی عمق آبشستگی نسبت قطر پایه به متوسط ذرات نباید کمتر از  $50$  باشد (۵). در همین راستا راودکیوی و اتما (۱۲) این نسبت را  $30-25$  پیشنهاد نمودند. با توجه به این موارد یک لایه از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با قطر متوسط معادل  $2$  میلی‌متر و انحراف استاندارد معادل  $1/7$  انتخاب و در لایه‌ای به ضخامت تقریبی  $20$  سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

الیوتو و هاگر (۱۱) برای جلوگیری از آثار زبری، عمق آب را بیشتر از  $20$  میلی‌متر پیشنهاد نمودند که در کلیه آزمایش‌ها عمق آب ثابت و برابر  $12$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی شد بنابراین به منظور جلوگیری از فرسایش و انتقال رسوبات در بالادست پایه استوانه‌ای، سرعت متوسط جریان کمتر از سرعت بحرانی ( $u < u_c$ ) در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی تأثیر دبی روی آبشستگی  $4$  دبی  $24$ ،  $28$ ،  $30$  و  $32$  لیتر بر ثانیه برای آزمایش بر روی پایه پل در شرایط زیر بحرانی در موقعیت‌های صفر،  $30$ ،  $60$ ،  $90$ ،  $120$ ،  $150$  و  $180$  درجه در نظر گرفته شد که توسط سرریز مثالی  $60$



شکل ۲. پلان کانال قوسی شکل

توپوگرافی بستر در اطراف پایه استوانه‌ای در موقعیت‌ها و دبی‌های مختلف برداشت شد. به منظور بررسی دقیق تغییرات ایجاد شده در بستر در امتداد عرضی فاصله نقاط برداشت ۲ سانتی‌متر و در امتداد طولی با توجه به موقعیت ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در مجموع کل نقاط برداشت شده برای ۲۴ آزمایش در طول تمام آزمایش‌ها جهت تشکیل شبکه توپوگرافی بستر و جزئیات آن ۱۶۰۰ نقطه بود.

### نتایج و بحث

در کلیه آزمایش‌ها پس از تنظیم دبی و عمق جریان، بلافاصله در اطراف پایه گردابه‌ها تشکیل و آبستنگی با سرعت بسیار بالا آغاز گردید. با شکل‌گیری حفره آبستنگی رسوبات بر خاسته از حفره به سمت پایین دست منتقل شدند.

پس از مدتی از شروع آزمایش، رسوبات برخاسته از حفره آبستنگی به محدوده‌ای رسیدند که تأثیر پایه بر آن محدوده کاهش یافته و اثر گردابه‌های نعل اسبی پشت پایه ناچیز می‌شد. در این وضعیت رسوبات انتقالی از حفره آبستنگی تحت تأثیر جریان ثانویه به سمت جداره داخلی منتقل می‌شود و تعداد دو و یا بیشتر شیار کوچک در جداره داخلی تشکیل شد (شکل ۴).

#### ۱. تأثیر موقعیت پایه بر آبستنگی اطراف آن

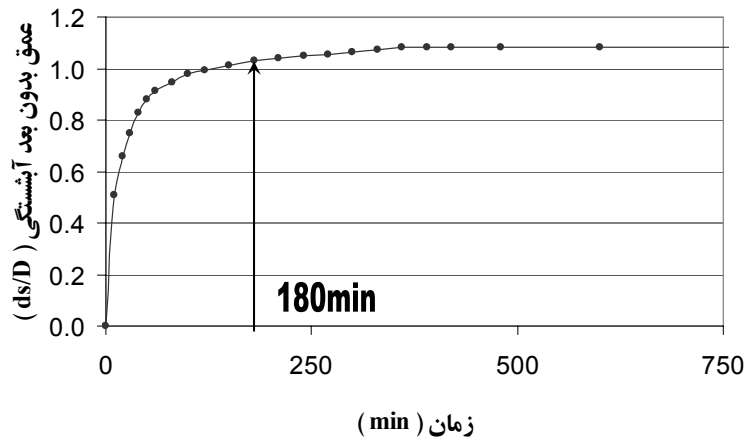
در موقعیت‌های مختلف در قوس، نصب پایه پل در موقعیت‌های مختلف هم بر توپوگرافی بستر و هم بر حداکثر

درجه در ابتدای ورودی فلوم اندازه‌گیری شدند. این دبی‌ها به ترتیب سرعت نسبی  $(u/u_c)$  ۰/۷۵، ۰/۸۶، ۰/۹۳ و ۱ را دارا بودند. برای محاسبه زمان تعادل آزمایش‌ها، یک آزمایش طولانی به مدت ۱۰ ساعت بر روی پایه پل با دبی‌های ۳۰، ۲۸ و ۲۴ لیتر بر ثانیه در موقعیت ۶۰ درجه انجام شد. با توجه به شکل ۳ دیده شد که در ۳ ساعت اول تقریباً ۹۰ درصد آبستنگی در دبی‌های مختلف رخ می‌دهد که با نتایج ملویل و چیو مطابقت داشت (۱۰). بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، زمان آزمایش ۳ ساعت در نظر گرفته شد.

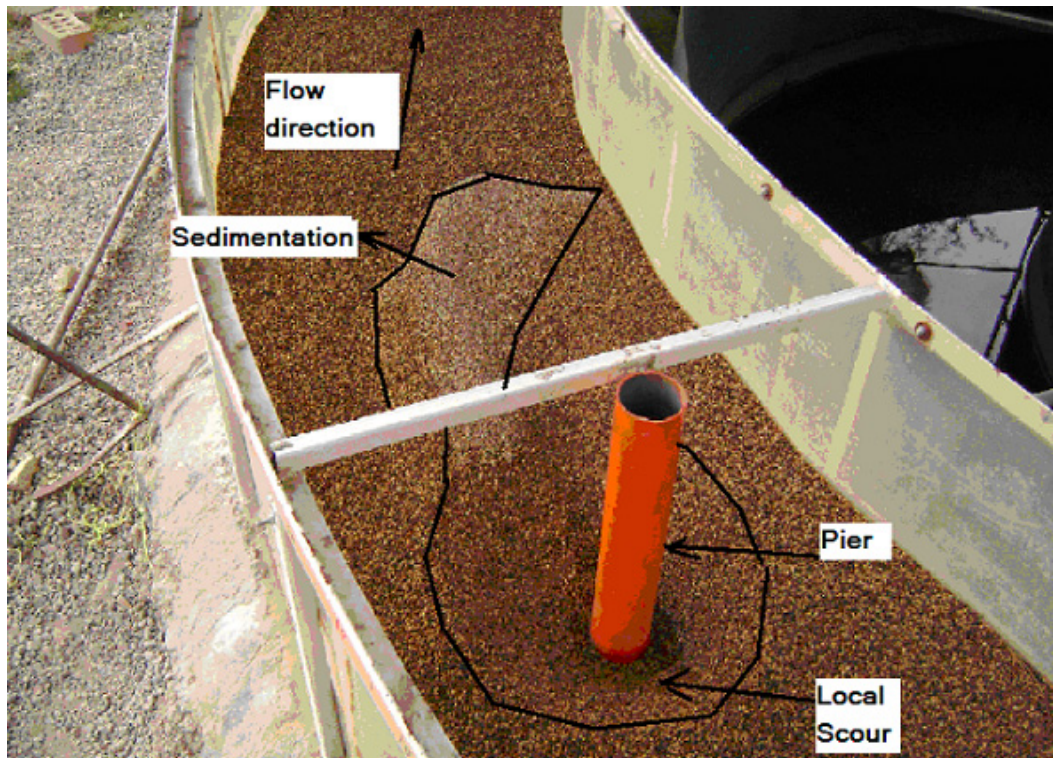
برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا پایه استوانه‌ای در موقعیت مورد نظر نصب شد. سپس رسوبات کف، توسط ارابه متحرک به طور یکسان در جهت طولی و عرضی در فلوم در سراسر فلوم گسترانده شد. پیش از راه اندازی پمپ، دریچه انتهایی بسته و سپس آب زلال به آرامی به درون کانال هدایت شد. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از مرطوب شدن رسوبات بعد از گذشت چند ساعت، پمپ با دبی کمی راه‌اندازی شد و به آرامی توسط شیر فلکه اصلی روی لوله ورودی به حوضچه آرامش، دبی به میزان مورد نظر رسانده شد. با تنظیم دقیق و هم‌زمان شیر فلکه و دریچه پایین دست عمق جریان ۱۲ سانتی‌متر و دبی مورد نظر حاصل شد.

پس از گذشت ۳ ساعت، پمپ خاموش شد و آب موجود در کانال به آرامی زه‌کشی شد تا تأثیری روی توپوگرافی بستر ایجاد نشود. پس از گذشت چند ساعت و تخلیه کامل آب از درون کانال، به وسیله عمق‌سنج با دقت صدم میلی‌متر،

### منحنی توسعه زمانی آبشستگی



شکل ۳. زمان تعادل در موقعیت ۶۰ درجه با دبی‌های مختلف

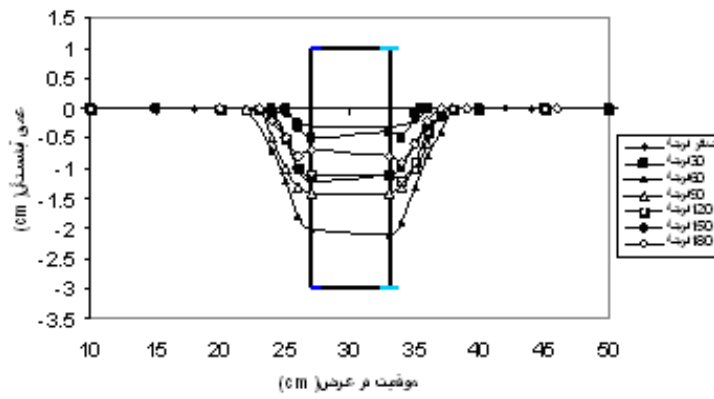


شکل ۴. فرو افتادگی و رسوب‌گذاری در پایین دست پایه به دلیل انحراف جریان

می‌دهند. پروفیل‌های عرضی نشان می‌دهند حداکثر عمق آبشستگی هنگام نصب پایه استوانه‌ای در طول قوس مختلف بوده و بیشترین مقادیر عمق آبشستگی در کلیه دبی‌ها به ترتیب در موقعیت‌های ۶۰، ۹۰، ۱۵۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۳۰ و صفر درجه

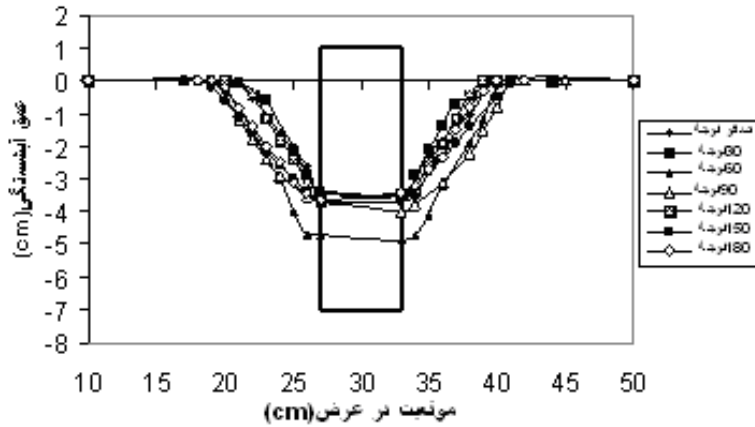
آبشستگی در اطراف آبشکن تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشت. شکل ۵ پروفیل‌های عرضی تک پایه استوانه‌ای در موقعیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه برای دبی‌های ۸، ۳۰ و ۳۲ لیتر بر ثانیه که دارای حداکثر آبشستگی است نشان

دبی 24 لیتر بر ثانیه - پروفیل عرضی



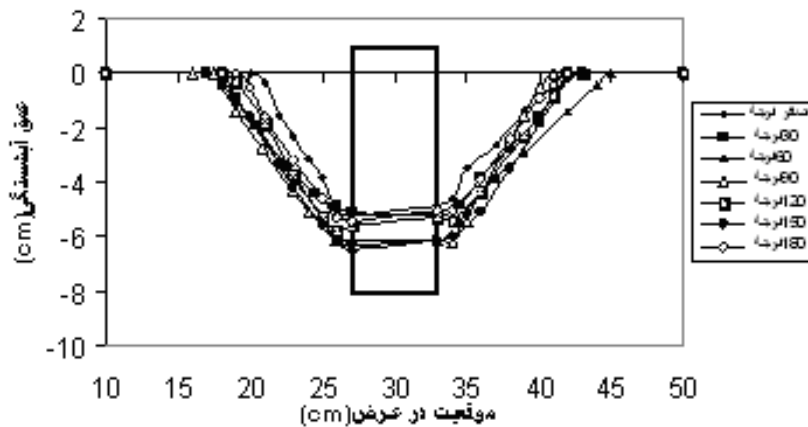
(الف)

دبی 28 لیتر بر ثانیه - پروفیل عرضی

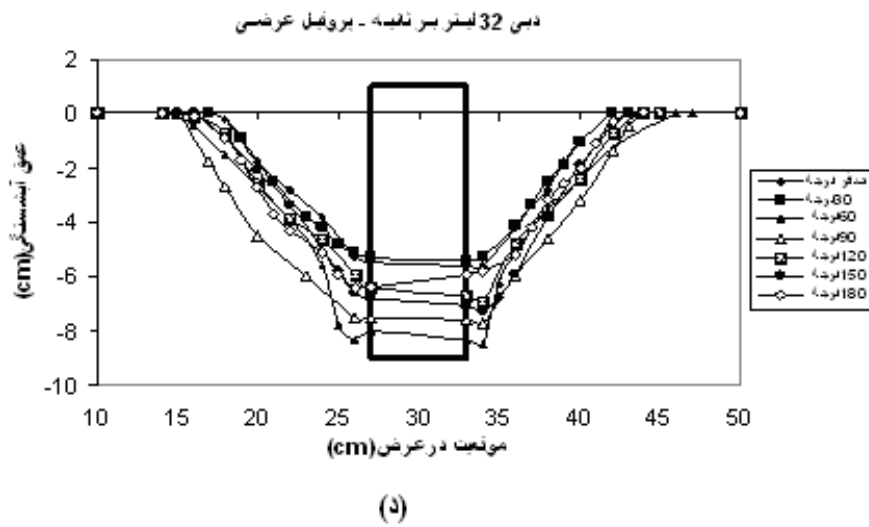


(ب)

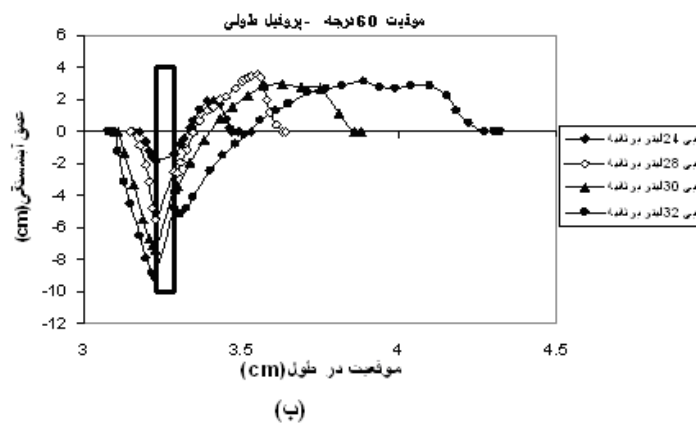
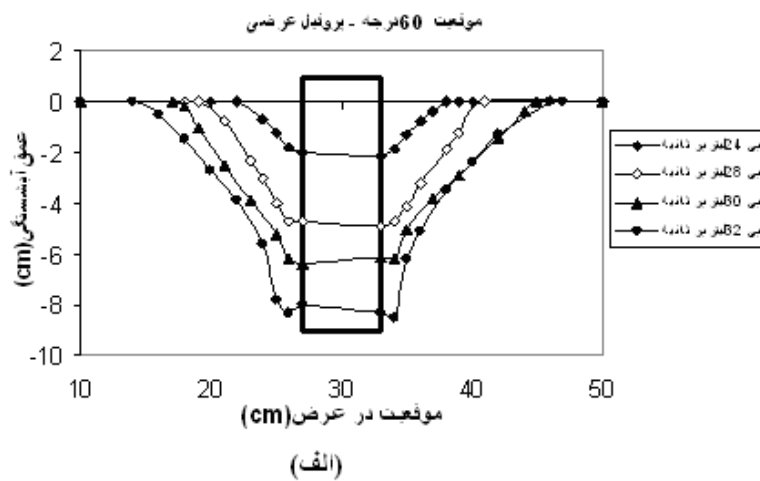
دبی 30 لیتر بر ثانیه - پروفیل عرضی



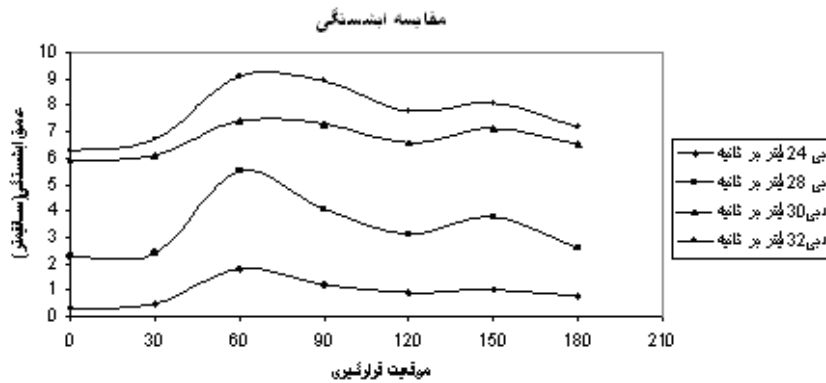
(ج)



شکل ۵. پروفیل عرضی حداکثر عمق آبستگی در موقعیت‌های مختلف و دبی‌های ۲۴، ۲۸، ۳۰ و ۳۲ لیتر بر ثانیه



شکل ۶. پروفیل‌های طولی و عرضی حداکثر آبستگی در موقعیت ۶۰ درجه با دبی‌های مختلف



شکل ۷. تغییرات آبشستگی نسبی دماغه پایه پل در موقعیت و دبی های مختلف

بیشترین عمق آبشستگی در این موقعیت شد.

### ۳. تغییرات عمق آبشستگی نسبت به دبی جریان و موقعیت پایه استوانه‌ای در قوس

به منظور بررسی هم‌زمان اثر دبی جریان و موقعیت پایه استوانه‌ای در قوس تغییرات عمق آبشستگی برحسب موقعیت پایه استوانه‌ای در قوس برای چهار دبی جریان آزمایش و ترسیم شد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن با دبی جریان و نیز موقعیت پایه استوانه ای ارتباط مستقیم داشته و با افزایش زاویه استقرار پایه و نیز افزایش دبی عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت در کلیه آزمایش‌ها بیشترین میزان آبشستگی در موقعیت ۶۰ درجه بوده که بیان کننده قدرت بالای جریان‌های ثانویه در این موقعیت است (۱، ۲ و ۷).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها برای تعیین آبشستگی در پایه استوانه‌ای، مستقر در قوس ۱۸۰ درجه انجام گرفت. متغیرهای مؤثر در این تحقیق موقعیت پایه در قوس و دبی جریان بود. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش دبی جریان، آبشستگی بیشینه زیاد شده و آبشستگی در اطراف پایه در طول قوس مختلف است. هم‌چنین نتایج نشان داد حداکثر عمق آبشستگی

اتفاق افتاد. تحقیقات انجام شده توسط بویج (۳)، صفرزاده (۲) و امامی و همکاران (۱) نشان دادند که توزیع سرعت و قدرت جریان‌های ثانویه در طول قوس ۱۸۰ درجه مختلف بوده که در نتیجه آن عمق آبشستگی نیز در طول قوس مختلف خواهد شد.

### ۲. تغییرات عمق آبشستگی نسبت به دبی جریان در قوس

شکل ۶ پروفیل‌های طولی و عرضی پایه استوانه‌ای در موقعیت ۶۰ درجه با حداکثر آبشستگی برای چهار دبی ۲۴، ۳۰، ۳۰ و ۳۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت شکل کلی توپوگرافی بستر برای هر چهار دبی تقریباً شبیه یکدیگر بوده ولی ابعاد و عمق چاله آبشستگی با کاهش دبی جریان، کاهش و طول پشته رسوبی در پایین دست پایه استوانه‌ای، به دلیل قدرت بالای گرداب‌های برخاستگی، با افزایش دبی افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین پروفیل عرضی نیز نشان می‌دهد که بین عمق آبشستگی و دبی جریان در مسیر قوسی شکل رابطه مستقیمی وجود دارد و با افزایش دبی جریان، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی آپین و درینکر (۷)، صفرزاده (۲) و امامی و همکاران (۱) در خصوص الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه نشان داد بیشترین توزیع سرعت در زاویه ۶۰ درجه به دلیل قدرت بالای جریان‌های ثانویه ایجاد می‌شود که در نتیجه باعث ایجاد

### سپاسگزاری

در هنگام نصب یک پایه استوانه‌ای با قطر ۶۰ میلی‌متر در موقعیت ۶۰ درجه در قوس ۱۸۰ درجه ایجاد شد. از همکاری مسئولین محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به منظور قرار دادن امکانات، تسهیلات و کمک‌های مالی در این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

### منابع مورد استفاده

۱. امامی، ی.، م. میر باقری، ا. ا. دهقانی و م. قدسیان. ۱۳۸۵. "آبشستگی اطراف پایه استوانه‌ای شکل در یک قوس ۱۸۰ درجه. هفتمین سمینار بین‌المللی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲. صفرزاده گندشمن، ا. ۱۳۸۳. شبیه‌سازی الگوی جریان در آبگیری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
3. Booij, R. 2003. Measurements and large eddy simulations of some curved flumes. *J. Turbul.* 4:1-17.
4. Breusers, H.N.C. and A.J. Raudkivi. 1991. Scouring, *Hydraulic Structure Design Manual*. No.2, IAHR, Balkema, PP. 143.
5. Chiew, Y.M. and B.W. Melville. 1987. Local scour around bridge piers. *J. Hydraul. Res.* 25(1): 15-26.
6. Dargahi, B. 1987. Controlling mechanism of local scouring. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 116 (10):1197-1214.
7. Ippen, A.T. and P. Drinker. 1962. Boundary shear stress in curved trapezoidal channels. *J. Hydraul. Div.* 88(HY5).
8. Lagasse, P.F. and E.V. Richardson. 2001. ASCE compendium of stream stability and bridge scour papers. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 127(7): 531-533.
9. Melville, B.W. and Y.M. Chiew. 1999. Time scale for local scour depth at bridge piers. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 125(1):59-65.
10. Melville, B.W. and S.E. Coleman. 2002. *Bridge Scour*. Water Resour. Pub. LLC, Colorado, USA.
11. Oliveto, G. and W.H. Hager. 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 128 (9): 811-820.
12. Raudkivi, A.J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 109(3):339-350.
13. Raudkivi, A.J. 1998. *Loose Boundary Hydraulics*. 4<sup>th</sup> ed., Rotterdam, Brookfield, Balkema, VT. 496 p.
14. Richardson, E.V. and S.R. Davies. 1995. Evaluating scour at bridges. Rep. No. FHWAIP- 90-017 (HEC 18), Federal Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.