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

علیرضا مسجدی[۱*]، حسین کاظمی[۲] و امین مرادی[۲]

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

## چکیده

**در این تحقیق برای بررسی عمق آبشستگی در اطراف پایه پل در قوس رودخانه، آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی با قوس ۱۸۰ درجه با Rc/B= ۴/۷ 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 ثابت۱۲ سانتی‌متر پدیده آبشستگی 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 آبشستگی هنگام نصب پایه استوانه‌ای در طول قوس متفاوت بوده و در موقعیت ۶۰ درجه بیشترین آبشستگی در اطراف پایه ایجاد می‌شود. هم‌چنین با افزایش دبی جریان در کلیه موقعیت‌ها، عمق آبشستگی نیز افزایش یافت.**

**واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، پایه پل، قوس ۱۸۰ درجه، جریان ثانویه، آبشستگی 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



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]

**مقدمه**

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پر کارترین 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 آبشستگی 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 آبشستگی ایفا می‌نمایند. حفر گودال آبشستگی توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می‌یابد تا حجم آب درون حفره آبشستگی زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک کند. در این حالت عمق آبشستگی 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 آبشستگی پایه پل در آبراهه مستقیم انجام داده‌اند.

آیپن و درینکر (۷) توزیع سرعت در قوس منظم و با مقطع ذوزنقه‌ای 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 $60^{\circ}$ سرعت حداکثر به طرف قوس خارجی حرکت می‌کند.

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 آبشستگی 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.

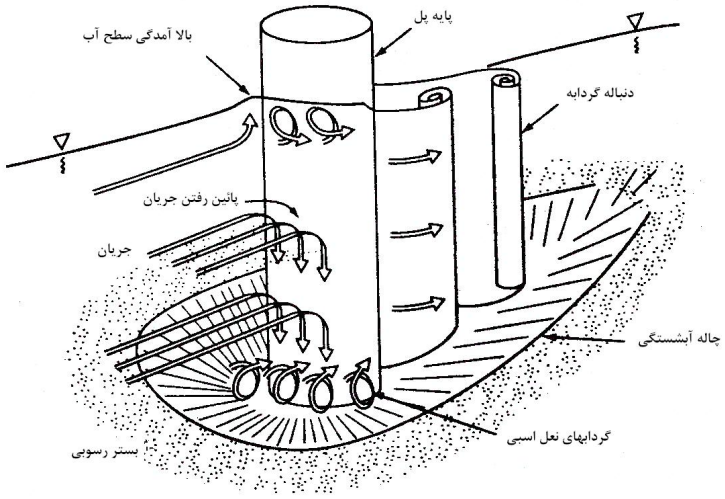
امامی و همکاران (۱) آزمایش‌هایی روی آبشستگی اطراف پایه استوانه‌ای درون قوس ۱۸۰ درجه در حالت آب زلال انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با افزایش دبی عمق حداکثر آبشستگی در زمان تعادل و نیز ابعاد حفره افزایش می‌یابد. هم‌چنین پشته حاصل از آبشستگی در اثر افزایش دبی گسترده‌تر شده و به دیواره داخلی نزدیک‌تر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

بر اساس مطالعات انجام شده توسط ریچادسون و دیویس (۱۴)، رادکیوی و اتما (۱۲) و لاگاس و ریچاردسون (۸) پدیده آبشستگی 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 آبشستگی اطراف پایه استوانه‌ای در موقعیت‌های مختلف در قوس ۱۸۰ درجه شد (۲).



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]




**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 ۱۸۰ درجه، شعاع مرکزی Rc=۲/۸m و عرض B = ۰/۶m انجام شد. انحنای نسبی قوس $Rc/B = ۴/۷$ بوده که قوس را در رده قوس‌های ملایم قرار می‌دهد. کانال مستقیم ورودی به طول ۹/۱ متر به یک کانال با قوس ۱۸۰ درجه متصل می‌گردد. این کانال قوسی شکل توسط کانال مستقیم دیگری به طول ۵/۵ 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 چیو و ملویل (۵) قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد. هم‌چنین راودکیوی و اتما (۱۲) پیشنهاد کردند که نسبت قطر پایه به عرض کانال باید حداقل ۶/۲۵: ۱ باشد بنابراین برای مدل کردن پایه، استوانه‌ای به قطر ۶۰ میلی‌متر از جنس پلاستیک مورد استفاده شد.

به توصیه راودکیوی و اتما (۱۲) برای جلوگیری از تشکیل ریپل قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. هم‌چنین برای حذف اثر اندازه رسوبات روی عمق آبشستگی نسبت قطر پایه به متوسط ذرات نباید کمتر از ۵۰ باشد (۵). در همین راستا راودکیوی و اتما (۱۲) این نسبت را ۳۰–۲۵ پیشنهاد نمودند. با توجه به این موارد یک لایه از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با قطر متوسط معادل ۲ میلی‌متر و انحراف استاندارد معادل ۱/۷ انتخاب و در لایه‌ای به ضخامت تقریبی ۲۰ سانتی متر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

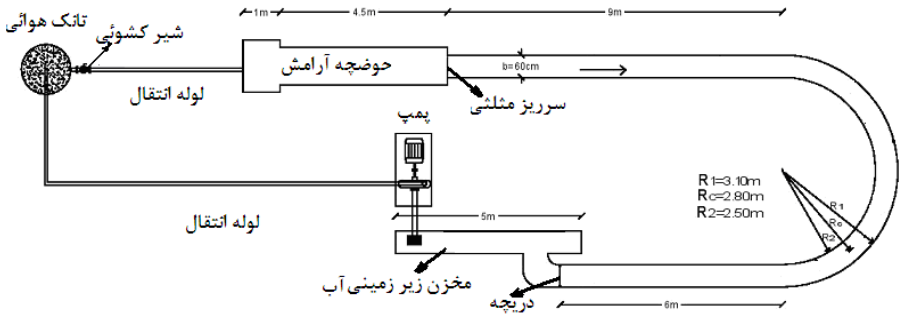
الیوتو و هاگر (۱۱) برای جلوگیری از آثار زبری، عمق آب را بیشتر از ۲۰ میلی‌متر پیشنهاد نمودند که در کلیه آزمایش‌ها عمق آب ثابت و برابر ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی شد بنابراین به منظور جلوگیری از فرسایش و انتقال رسوبات در بالادست پایه استوانه‌ای، سرعت متوسط جریان کمتر از سرعت بحرانی $(u < u_c)$ در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی تأثیر دبی روی آبشستگی ۴ دبی ۲۴، ۲۸، ۳۰ و ۳۲ لیتر بر ثانیه برای آزمایش بر روی پایه پل در شرایط زیر بحرانی در موقعیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شد که توسط سرریز مثلثی ۶۰



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]




**شکل ۲. پلان کانال قوسی شکل**

درجه در ابتدای ورودی فلوم اندازه‌گیری شدند. این دبی‌ها به ترتیب سرعت نسبی $(u/u_c)$ ۰/۷۵، ۰/۸۶، ۰/۹۳و۱ را دارا بودند.

برای محاسبه زمان تعادل آزمایش‌ها، یک آزمایش طولانی به مدت ۱۰ ساعت بر روی پایه پل با دبی‌های۳۲، ۳۰، ۲۸و ۲۴ لیتربر ثانیه در موقعیت ۶۰ درجه انجام شد. با توجه به شکل ۳ دیده شد که در ۳ ساعت اول تقریباً ۹۰ درصد آبشستگی 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 میلی متر، 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 برداشت۲ 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 آبشستگی با سرعت بسیار بالا آغاز گردید. با شکل‌گیری حفره آبشستگی رسوب‌های برخاسته از حفره به سمت پایین دست منتقل شدند.

پس از مدتی از شروع آزمایش، رسوبات برخاسته از حفره آبشستگی 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 آبشستگی تحت تأثیر جریان ثانویه به سمت جداره داخلی منتقل می‌شود و تعداد دو و یا بیشتر شیار کوچک در جداره داخلی تشکیل شد (شکل۴).

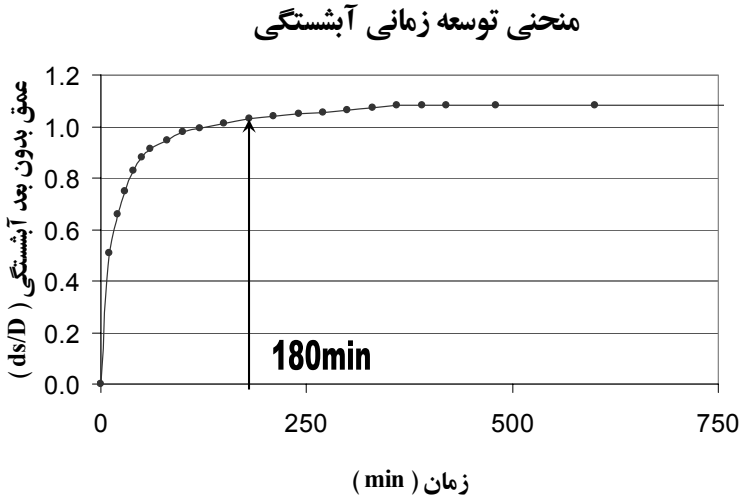
### ۱. تأثیر موقعیت پایه برآبشستگی اطراف آن

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

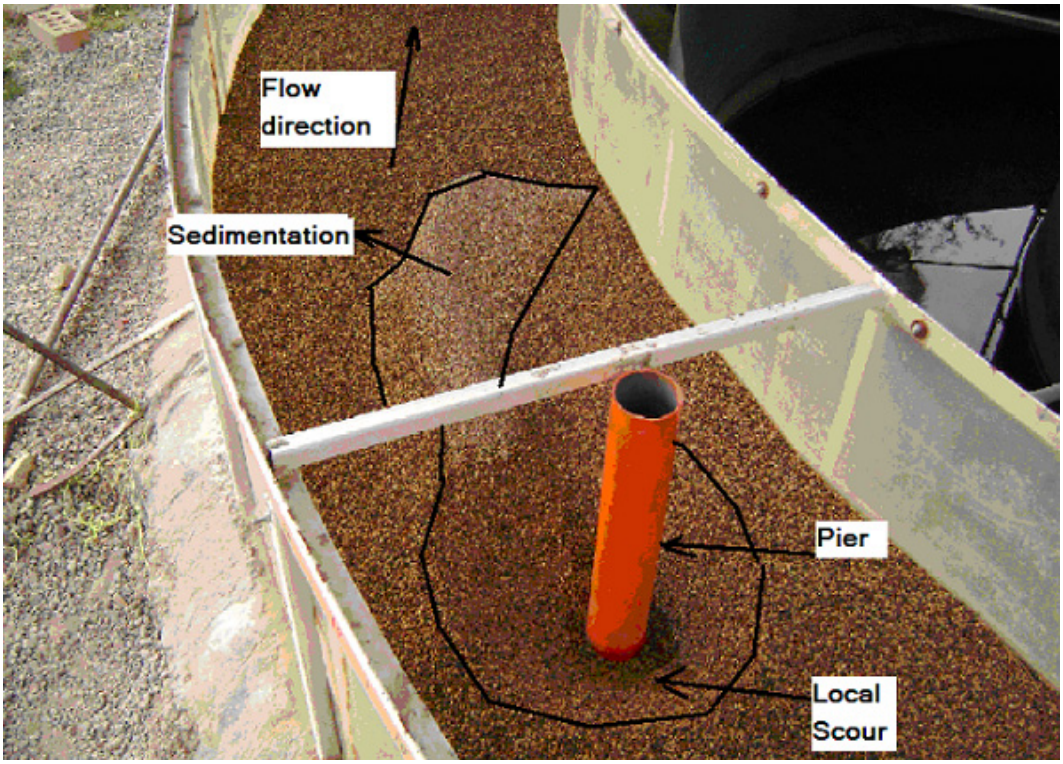


[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]




**شکل ۳. زمان تعادل درموقعیت۶۰ درجه با دبی‌های مختلف**



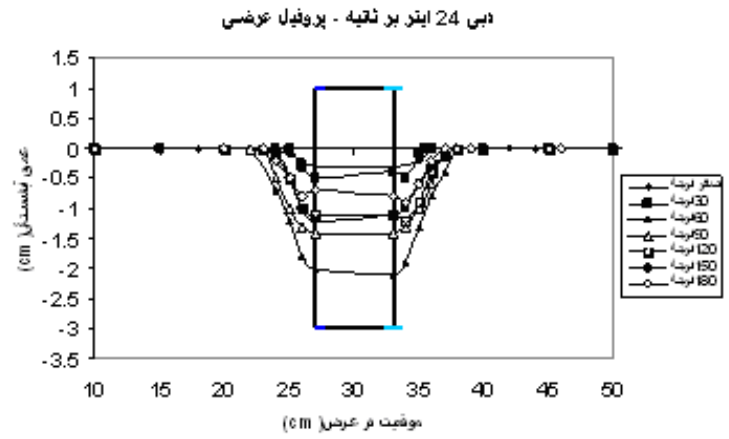

**شکل ۴. فرو افتادگی و رسوب‌گذاری در پایین دست پایه به دلیل انحراف جریان**

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 ۲۴، ۸ ، ۳۰ و ۳۲ لیتر بر ثانیه که دارای حداکثر آبشستگی است نشان 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، ۳۰ و صفر درجه

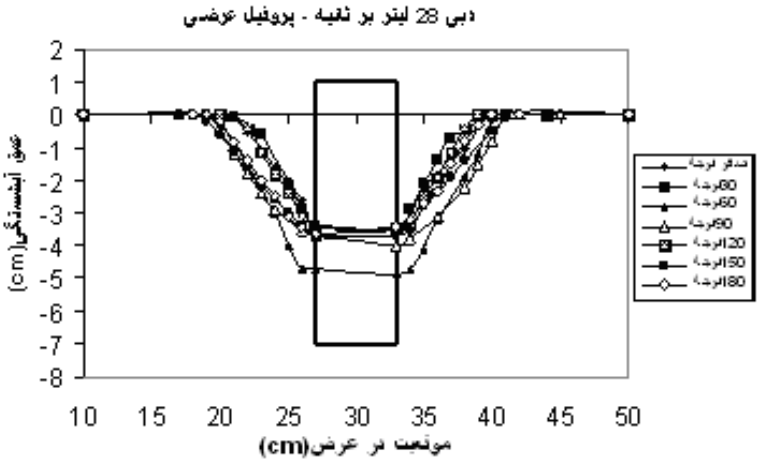


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

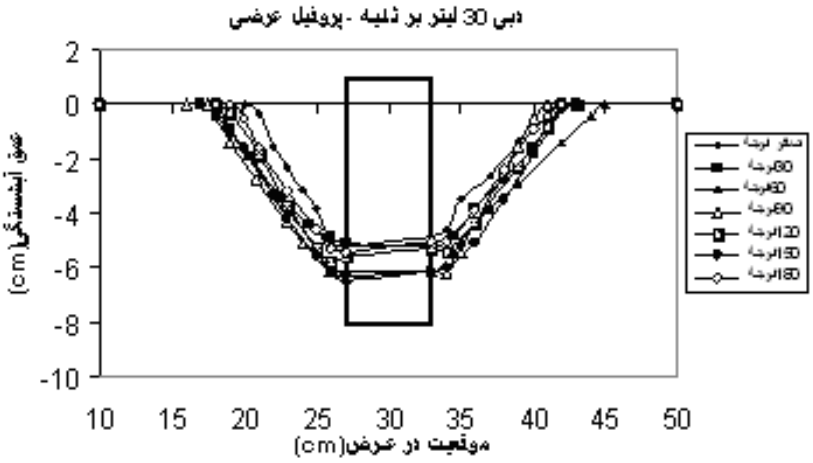
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]




(الف)




(ب)

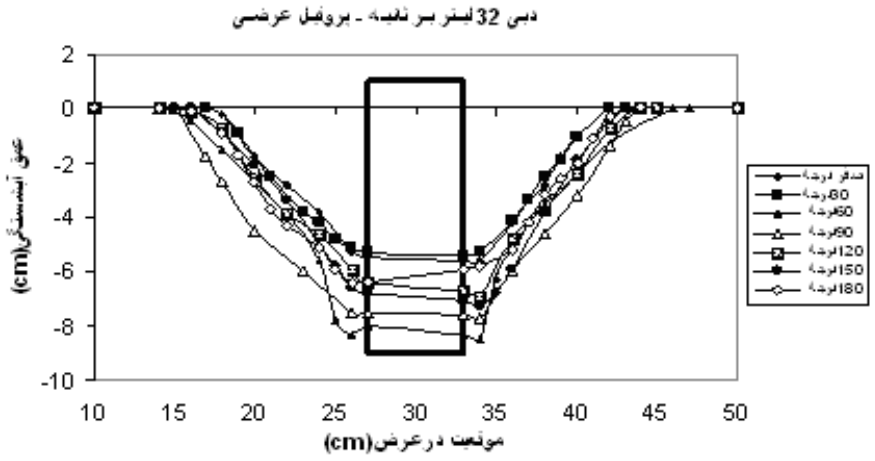



(ج)



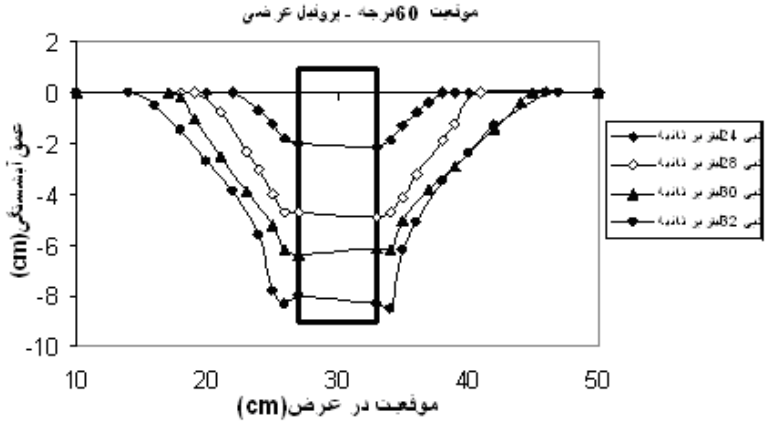
[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]

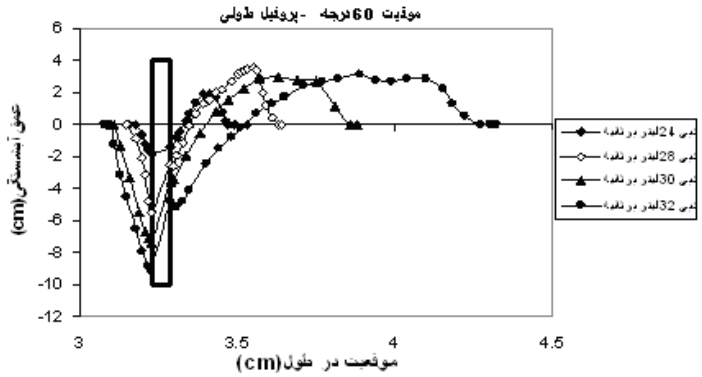



(د)

**شکل۵ . پروفیل عرضی حداکثر عمق آبشستگی در موقعیت‌های مختلف و دبی‌های ۲۴، ۲۸، ۳۰ و ۳۲ لیتر بر ثانیه**




(الف)



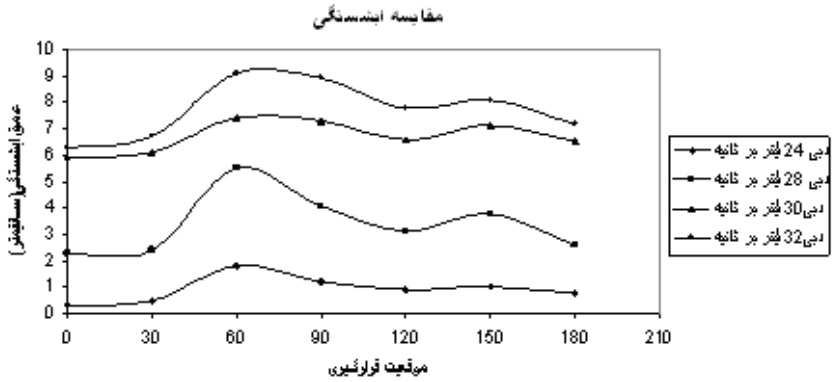

(ب)

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



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]




**شکل ۷. تغییرات آبشستگی نسبی دماغه پایه پل در موقعیت و دبی‌های مختلف**

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**

شکل۶ پروفیل‌های طولی و عرضی پایه استوانه‌ای در موقعیت ۶۰ درجه با حداکثر آبشستگی برای چهار دبی ۲۴ ، ۳۰، ۲۸ 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 آیین 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 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. متغییرهای 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 نتاج نشان داد حداکثر عمق آبشستگی



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]

در هنگام نصب یک پایه استوانه‌ای با قطر ۶۰ میلی‌متر در موقعیت ۶۰ درجه در قوس ۱۸۰ درجه ایجاد شد.

**سپاسگزاری**

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 گندشمین، 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 sress 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. 4th 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.

[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.1.3 ]