

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.1.9.1

درصد همانندی: ۲۷٪

## کنترل آبشستگی مقابل اسکله با کمک دماغه منحرف کننده منحنی شکل

مرتضی بختیاری<sup>۱\*</sup>، محسن سلیمانی بابرصاد<sup>۲</sup>، عباس صفائی<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.  
bakhtiari@kmsu.ac.ir

<sup>۲</sup> گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.  
mohsen.solb@gmail.com

<sup>۳</sup> مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.  
a.safaei1991@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

### چکیده

اصلی ترین عامل تخریب اسکله‌ها، آبشستگی موضعی اطراف آن‌ها می‌باشد. برای کنترل این پدیده، مطالعات بسیاری انجام شده و راهکارهایی جهت حفاظت از اسکله‌ها ارائه شده است. راهکارهای حفاظت از اسکله‌ها به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند، یکی از روش‌هایی که به صورت غیرمستقیم با کمک اصلاح خطوط جریان اطراف اسکله می‌تواند عمق آبشستگی را کاهش دهد، تغییر زاویه دماغه اسکله است. در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی تأثیر تغییر شکل دماغه اسکله با راستای جریان بررسی شد. از این رو اسکله با دماغه قوسی شکل و شعاع قوس‌های ۵۲/۲۸، ۲۰/۲۰، ۱۲/۰۹ و ۱۱/۰۶ سانتی متر در شرایط آب زلال بررسی شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد در بهترین حالت، اسکله با کمترین شعاع به میزان ۱۱/۰۶ توانست، در سرعت‌های نسبی تا ۹۵ درصد سرعت آستانه حرکت ذرات، بهترین عملکرد را داشته باشد.

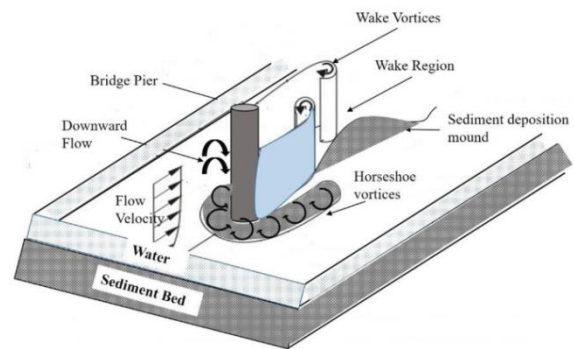
**کلمه‌های کلیدی:** آبشستگی، اسکله، شعاع قوس دماغه، آستانه حرکت

## ۱. مقدمه

آبشستگی موضعی یکی از عوامل اصلی در تخریب اسکله‌ها می‌باشد. معمولاً تخریب اسکله‌ها نه به دلایل سازه‌ای، بلکه به دلیل در نظر نگرفتن تأثیر عوامل هیدرولیکی در طراحی آن‌ها می‌باشد [۱]. با قرارگیری پایه پل در مسیر حرکت آب، جریان سه‌بعدی پیچیده‌ای اطراف پایه و بعداز آن شکل می‌گیرد که موضوع تحقیق بسیاری از محققان بوده است. جریان سه‌بعدی پیچیده با گذشت زمان، باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها می‌شود. عمق ناشی از فرسایش بستر نسبت به بستر اولیه را عمق آبشستگی گویند [۲]. در صورت طراحی نادرست عمق آبشستگی و پیش‌بینی کم‌عمق پی، آسیب جدی و حتی فروریختن عرشه پل درست زمانی که بیشترین نیاز به پل برای کمک‌رسانی و حمل‌ونقل می‌باشد، رخ می‌دهد. آبشستگی را به سه دسته آبشستگی موضعی، ناشی از تنگ‌شدگی مقطع و کلی طبقه‌بندی می‌کنند. از سوی دیگر، با توجه به حرکت رسوبات در جریان‌های رودخانه‌ای، آبشستگی به دو دسته (۱) آبشستگی آب زلال<sup>۱</sup> (۲) آبشستگی بستر زنده<sup>۲</sup> دسته‌بندی می‌شود. در آبشستگی آب زلال به علت عدم حرکت رسوبات بالادست پایه پل، حداکثر مقدار عمق حفره آبشستگی به وجود می‌آید. در آبشستگی بستر متحرک به دلیل حمل رسوبات از بالادست به پایین دست، بخشی از حفره آبشستگی با این رسوبات پر شده و عمق حفره آبشستگی کاهش می‌یابد [۳]. آبشستگی آب زلال زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت جریان طبیعی در مجرا کمتر از سرعت آستانه حرکت ذرات بستر باشد. چنانچه سرعت جریان در مجرا قبل از رسیدن به مانع، از سرعت آستانه حرکت ذرات بستر بیشتر شود، آبشستگی بستر زنده مشاهده خواهد شد [۴]. پژوهشگران مطالعات بسیاری را برای شناخت این پدیده انجام داده‌اند. دو عامل اساسی در پیدایش گودال آبشستگی یکی، برخورد جریان رو به پایین<sup>۳</sup> به پایه و دیگری جدا شدن جریان از پایه پل است [۵-۱۵]. به نظر شن، جریان رو به پایین عامل اصلی شکل‌گیری گرداب نعل اسبی<sup>۴</sup> است. این گرداب در دو طرف پایه امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب را به وجود می‌آورد [۱۶]. همچنین جانسون نشان

داد که نرخ فرسایش در چاله آبشستگی به‌طور مستقیم به اندازه سرعت جریان رو به پایین بستگی دارد [۱۷]. هنگام برخورد آب به پایه پل، سرعت جریان به فشار دینامیک تبدیل می‌شود. از آنجا که سرعت از سطح آب به طرف کف کم می‌شود فشار دینامیک روی پایه نیز از بالا به پایین کم شده و این گرادیان فشار باعث ایجاد جریان رو به پایین می‌شود. این جریان پس از برخورد به بستر به جهت‌های مختلف پراکنده می‌شود و زمین را نیز حفر می‌کند. مقداری از این جریان که رو به سمت بالا بازگشت می‌کند در برخورد به جریان عمومی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود و مجدداً به پایه برخورد می‌کند و در داخل حفره کنده‌شده گرداب نعل اسبی را تشکیل می‌دهد. این گرداب در دو طرف پایه امتداد می‌یابد و شکلی شبیه به نعل اسب به حفره آبشستگی می‌دهد. گرداب‌های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه پل فعال هستند و سبب گود کردن جلو پایه می‌شوند [۱۸]. لازم به ذکر است که شدت گردابه نعل اسبی برای پایه‌هایی دارای مقطع آیرودینامیکی بسیار کمتر است [۱۹]. گرداب‌های برخاستگی<sup>۵</sup> در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل ایجاد می‌شوند. این نوع سیستم گردابی مانند یک گرداب عمل می‌کند و رسوبات را از کف به سمت بالا حرکت می‌دهد و به عبارت دیگر جهت حرکت این سیستم گردابی رو به بالا می‌باشد [۲۰]. گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه فعال هستند، این گرداب‌ها محورشان تقریباً عمود بر کف بوده و در صورت عدم وجود گرداب‌های نعل اسبی، حفره‌ای در پشت پایه به وجود می‌آورند. قدرت گردابه‌های برخاستگی با فاصله گرفتن از پایین دست پایه کاهش می‌یابند و دلیل نشست مواد رسوبی که درست در پایین دست پایه اتفاق می‌افتد، همین مطلب است [۲۱]. شکل ۱ صورت کلی گرداب‌های نعل اسب و برخاستگی را در اطراف پایه پل استوانه نشان می‌دهد.

زوایای کوچک‌تر از ۳۰ درجه ناحیه جریان برگشتی به صورت معکوس، پشت پایه‌های استوانه‌ای مشاهده شد و با افزایش زاویه شیب پایه از ۳۰ درجه تا ۶۰ درجه ناحیه جریان برگشتی حذف شده و خطوط جریان مانند حالت بدون ناحیه جداشدگی اطراف پایه رفتار می‌کنند. وافقی و همکاران، در پژوهشی تأثیر کج‌شدگی پایه استوانه‌ای شکل با تغییر در زاویه تا ۲۱ درجه در صفحه عمود بر جریان جهت بررسی حداکثر عمق حفره آبخستگی را بررسی کردند [۲۶]. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال توسط پایه‌هایی با قطر ۴ و ۵ سانتی‌متر انجام شد، بررسی نتایج آن‌ها نشان داد که با کج شدن پایه به سمت پایین دست کاهش عمق آبخستگی اتفاق افتاد، به گونه‌ای که در برابر هر یک درجه افزایش کج‌شدگی حدود یک درصد کاهش عمق آبخستگی نسبت به پایه قائم اتفاق افتاده است. موسایی و همکاران، الگوی آبخستگی ناشی از استقرار پایه‌های دوتایی همگرا و واگرا و هم‌راستا را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با تغییر موقعیت پایه‌ها از زاویه ۹۰ درجه به زاویه ۶۰ و ۱۲۰ درجه برای حالت واگرا آبخستگی به ترتیب ۴ و ۵۵ درصد کاهش یافت. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که عرض چاله آبخستگی در زوج پایه‌های واگرا در حدود ۵ درصد بیشتر از حالت همگرا است [۲۷]. در یک تحقیق آزمایشگاهی با استفاده از تک‌پایه کج مستقر در مسیر مستقیم به عرض ۶۰ سانتی‌متر به بررسی الگوی آبخستگی پرداختند. آن‌ها از تک‌پایه با زاویه انحراف نسبت به محور عمودی استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که زاویه انحراف پایه باعث تغییر شکل چاله آبخستگی می‌شود [۲۸]. اسماعیلی و همکاران در یک پژوهش تأثیر موقعیت آستانه بر توسعه زمانی عمق چاله آبخستگی گروه پایه کج با پی را بررسی کردند [۲۹]. این آزمایش‌ها با تغییر محل قرارگیری آستانه و با گروه پایه‌ای متشکل از دو پایه کج مستطیلی با ابعاد ۲/۵ در ۳/۵ سانتی‌متر و زاویه مایل ۲۸ درجه انجام شد. نتایج نشان داد که برای کلیه ترازهای کارگذاری پی، به‌طور متوسط مقدار عمق لحظه‌ای آبخستگی با استقرار آستانه جلویی ۲۲ درصد، آستانه میانی، ۱۸ درصد و آستانه انتهایی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد؛ اما از مواردی که تاکنون محققان



شکل ۱. گرداب‌ها و الگوی آبخستگی در اطراف اسکله

از آنجا که پارامترهای بسیاری در شکل‌گیری پدیده آبخستگی مؤثر هستند، مدل‌سازی عددی آن به علت پیچیدگی این پدیده بسیار دشوار است. از این رو، در حال حاضر به صورت عمومی بررسی این پدیده در آزمایشگاه و با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی انجام می‌شود. اثر شیب، کجی و زاویه پایه‌های پل روی عمق حفره آبخستگی توسط برخی از پژوهشگران داخلی و خارجی بررسی شده است که می‌توان به برخی از این تحقیقات اشاره کرد. سومر و همکاران پژوهشی در رابطه با تأثیر شیب سازه مخروطی شکل بر تنش برشی بستر اطراف سازه بر روی بستری ثابت و سه شیب مختلف با زوایای ۴۵، ۰ و ۶۰ درجه انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تنش برشی بستر با افزایش زاویه سازه، کاهش می‌یابد و نیز اشاره داشتند که گردابه نعل اسبی در حالت مخروطی شکل همچنان وجود دارد، اما طول و شدت آن در مقایسه با سازه استوانه‌ای شکل کاهش می‌یابد [۲۲]. همچنین سنوسی و حبیب، تأثیر دماغه شیب‌دار و گرد شده را بر آبخستگی پایه پل بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با شیب‌دار شدن دماغه، عمق آبخستگی کاهش می‌یابد [۲۳]. بوزکوس و یلدیز، نیز تأثیر شیب جانبی پایه‌های پل در کاهش آبخستگی موضعی پیرامون آن‌ها را بررسی کردند [۲۴]. نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان داد با کاهش قطر پایه در نزدیکی سطح آب، از فرسایش نسبی بستر پیرامون آن کاسته می‌شود. کای و همکاران، جریان عبوری از دو پایه استوانه‌ای شیب‌دار در مجاورت یکدیگر را به صورت عددی بررسی کردند [۲۵]. آن‌ها شیب پایه‌ها در مدل عددی را در بازه صفر تا ۶۰ درجه در نظر گرفتند و نتایج نشان داد که جریان محوری به شدت متأثر از زاویه شیب پایه‌ها می‌باشد که برای

در نظر گرفتن  $\rho, U, d$  به عنوان متغیرهای تکراری و با داشتن ۱۰ پارامتر متغیر، ۷ پارامتر بدون بعد استخراج شد که عبارت اند از:

$$F = f_2(\text{Re}, Fr, \frac{U}{U_c}, \frac{d_s}{d}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{y}{d}, \frac{B}{d}) \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $\text{Re}$  عدد رینولدز و  $Fr$  عدد فرود جریان هستند. با توجه به معادله به دست آمده در رابطه ۲، از عدد رینولدز به علت آشفته بودن جریان و نسبت های عمق نسبی جریان  $\frac{y}{d}$ ، قطر نسبی ذرات بستر  $\frac{d_{50}}{d}$  به علت ثابت بودن در کلیه آزمایش ها صرف نظر شد و به دلیل بسیار کوچک بودن محدوده عدد فرود از سرعت جریان به سرعت آستانه نسبی ذرات بستر  $\frac{U}{U_c}$  جهت تحلیل و تفسیر نمودارها استفاده شد و در نهایت معادله ۲ به شکل معادله ۳ خلاصه شد.

$$\frac{d_s}{d} = f_2(Fr, \frac{U}{U_c}) \quad (3)$$

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل ابعادی، کلیه نتایج تحقیق بر اساس پارامترهای بی بعد رابطه ۳ ترسیم و تحلیل شد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

### امکانات آزمایشگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده صنعت آب و برق اهواز، مجهز به یک فلوم گانت<sup>۶</sup> به طول ۱۰ متر و به ارتفاع ۵۰ سانتی متر و عرض کف فولادی ۳۱ سانتی متر با شیب متغیر و با جداری از جنس شیشه که امکان مشاهده جریان و پدیده ها را فراهم می ساخت انجام شد. کانال مجهز به دبی سنج الکترومغناطیس با دقت  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه و یک سرریز مستطیلی در پایین دست فلوم جهت تنظیم عمق آب می باشد. جریان آب را در یک سامانه چرخشی از سه مخزن به هم پیوسته تعبیه شده در زیر فلوم، هر کدام به ظرفیت ۱۰۰۰ لیتر توسط پمپی با حداکثر دبی ۵۱ لیتر بر ثانیه انتقال می دهد و کنترل دبی با شیر کنار گذر انجام می گرفت. به منظور انجام آزمایش ها، کف کانال با سکوهایی از جنس پی وی سی به صورت کاذب به ارتفاع ۱۴ سانتی متر و عرضی برابر با عرض کف فلوم بالا آورده شد و روی سکوها به منظور

کمتر به آن توجه کرده اند، بحث قرارگیری پایه با دماغه های زاویه دار در برابر جریان آب می باشد. از آنجا که با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت در مهندسی عمران، احتمال اجرای این گونه سازه ها در موقعیت های مکانی و یا معماری خاص وجود دارد (به عنوان نمونه شکل ۲) و با توجه به اینکه امروزه با توسعه فناوری های ساخت اسکله ها، شاهد تنوع بیشتری در شکل هندسی اسکله ها هستیم، بنابراین در تحقیق حاضر اثر پارامتر تغییر شکل دماغه اسکله و اجرای قوسی دماغه بر حداکثر عمق حفره آبستگي در اطراف اسکله با شدت جریان مختلف در شرایط آب زلال، بررسی شد.



شکل ۲. پل هشتم با پایه های مایل ساخته شده در شهر اهواز، ایران

### ۲. مواد و روش ها

#### تحلیل ابعادی

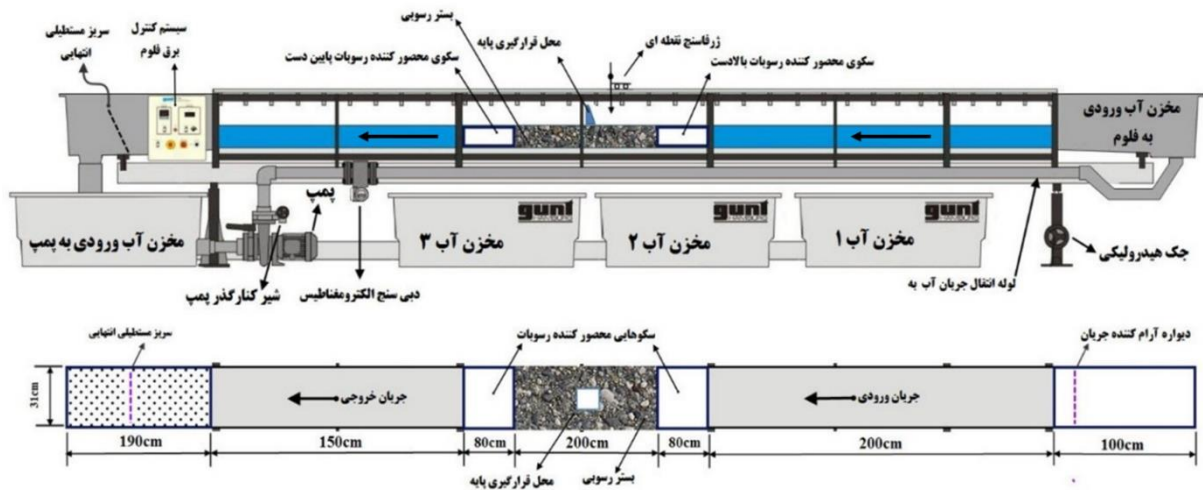
در این پژوهش، پارامترهای مؤثر بر پدیده آبستگي موضعی استخراج شد و سپس به روش باکینگهام بی بعد سازی صورت گرفت. پارامترهای مؤثر بر عمق آبستگي در این تحقیق مطابق رابطه (۱) ارائه شده اند.

$$F = f_1(d, d_{50}, d_s, y, U_c, U, g, \rho, \mu, B) \quad (1)$$

در این رابطه:  $d_s$  عمق آبستگي،  $d$  عرض اسکله،  $y$  عمق جریان،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوبی،  $U$  سرعت جریان،  $U_c$  سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\mu$  لزجت آب و  $B$  عرض فلوم می باشد. با اعمال روش تحلیل ابعادی به روش باکینگهام با

از ابتدای فلوم در نظر گرفته شد و به منظور جلوگیری از تلاطم جریان ورودی از یک توری مشبک پس از محل ورودی آب به فلوم استفاده شد. شکل ۳ مشخصات طرح واره فلوم مورد استفاده را نشان می دهد.

یکسان سازی زبری ها با رسوبات به کار رفته در آزمایش پوشانده شد. شیب کف فلوم صفر و از یک ارابه تسطیح جهت مسطح کردن مصالح بستر استفاده شد و با متر لیزری از تراز بودن سطح اطمینان حاصل شد. برای توسعه کامل جریان، محل انجام آزمایش با طول ۲ متر و در فاصله ۳ متری



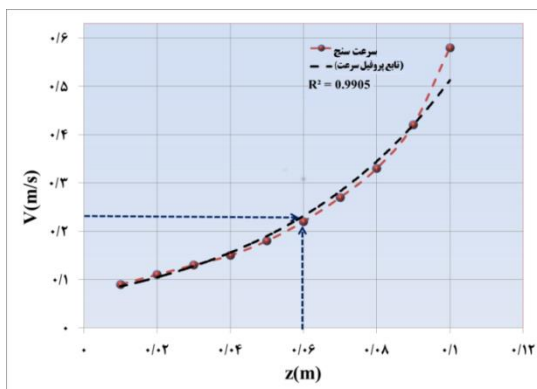
شکل ۳. پلان فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی

موضوع شرط  $(\frac{d}{d_{50}} > 25 \sim 25)$  را مطرح کرده اند [۳۰]. در این تحقیق نیز، این نسبت با توجه به نمودار دانه بندی ذرات برابر است با  $33/68$  که معیارهای فوق را ارضا می کند. برای جلوگیری از تشکیل شکل بستر<sup>۷</sup> (ریپل) طبق توصیه راودکیوی و اتما، اندازه متوسط ذرات رسوبی بایستی از  $0/7$  میلی متر بیشتر باشد [۳۰]. بنابراین  $d_{50}$  ذرات رسوبی برابر  $0/95$  میلی متر انتخاب شد تا حداکثر مقدار آبهستگی به دست آید و هم از ایجاد پشته های کوچک جلوگیری شود. از آنجاکه غیریکنواختی رسوبات به علت ایجاد پدیده سپری<sup>۸</sup> شدن چاله آبهستگی باعث کاهش آبهستگی موضعی نهایی می شود، بنابراین در صورتی که انحراف معیار هندسی رسوبات  $\delta_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$  کمتر از  $1/5$  باشد شرط یکنواختی ذرات برقرار می شود و اثر غیریکنواختی رسوبات بر آبهستگی موضعی از بین می رود [۲]. در این رابطه  $d_{84}$  و  $d_{16}$  به ترتیب قطر ذراتی است که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن ها ریزتر است. در این تحقیق از ماسه طبیعی رودخانه با دانه بندی یکنواخت ( $\delta_g = 1.36$ ) و چگالی نسبی  $G_s = 2.64$  و قطر متوسط ذرات  $0/95$  میلی متر انتخاب شد که خصوصیات آن در

از آنجاکه گام اول برای رسیدن به عمق ماکزیمم آبهستگی تعیین مقادیر و پارامترهای مجاز و مؤثر بر عمق آبهستگی می باشد، بنابراین برای دستیابی به این منظور پارامترهای مؤثر با در نظر گرفتن معیارهای متعددی انتخاب شدند. به منظور حذف اثر دیواره های کانال بر آبهستگی موضعی، طبق نظر چیو و ملویل، عرض پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد  $\frac{d}{b} \geq 10$  و بر اساس نظر راودکیوی و اتما، نسبت عرض کانال به قطر پایه باید بزرگ تر از  $6/25$  باشد [۳ و ۳۰]. با توجه به این معیارها، مدل اسکله از جنس پی وی سی و با عرض  $3/1$  سانتی متر استفاده شد. برای ثابت ماندن اسکله درون رسوبات، مدل اسکله بر روی صفحه افقی از جنس پی وی سی متصل شد. در فاصله یک متری از ابتدای محدوده دو متری رسوبات قرار داده شد. قطر متوسط ذرات رسوبی باید به گونه ای باشد که حداکثر مقدار عمق آبهستگی ایجاد شود و همچنین عمق آبهستگی تعادلی تحت تأثیر اندازه ذرات رسوبی قرار نگیرد [۳۱]. برای این موضوع شرط  $d \frac{d}{d_{50}} > 25$  عرض اسکله و  $d_{50}$  اندازه متوسط ذرات رسوبی توسط ملویل مطرح شد. راودکیوی و اتما نیز برای این

مقدار را  $0/22$  متر بر ثانیه نشان داد؛ بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، این سرعت به‌عنوان مبنای سرعت آستانه حرکت ذرات در نظر گرفته شد. در نتیجه با توجه به معیارهای فوق و محاسبه سرعت آستانه حرکت، با در نظر گرفتن عمق جریان برابر با  $10$  سانتی‌متر و شرط  $U/U_c = 0/96$  در آزمایش‌ها برقرار شد. جدول ۱ شرایط جریان حاکم بر آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. برای تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، یک آزمایش طولانی به مدت  $10$  ساعت بر روی پایه شاهد انجام گرفت. مشاهده شد که در  $7$  ساعت اول تقریباً  $98\%$  آبهستگی رخ می‌دهد. بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، زمان تعادل  $7$  ساعت در نظر گرفته شد. ضمناً به‌منظور بررسی تأثیر این حفاظت بر میزان آبهستگی، از درصد کاهش عمق آبهستگی مطابق رابطه ۷ استفاده شد که در این رابطه  $d_s$  و  $d_{sm}$  به ترتیب عمق آبهستگی و عمق آبهستگی اسکله در حالت شاهد است.

$$R\% = \left( \frac{d_{sm} - d_s}{d_{sm}} \right) \times 100 \quad (7)$$



شکل ۴. مقایسه پروفیل سرعت به‌دست آمده از دستگاه سرعت‌سنج و رابطه‌نمایی

معیارهای ذکر شده صدق می‌کند. در تمام آزمایش‌ها عمق آب  $10$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد، عمق جریان آب در فلوام آزمایشگاهی یکی از کمیت‌هایی است که اگر به‌درستی انتخاب نشود حداکثر مقدار عمق آبهستگی تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. طبق مطالعات چیو و ملویل چنانچه عمق جریان  $d_0$  از  $3$  برابر قطر اسکله  $d$  بیشتر باشد، عمق جریان اثری بر میزان آبهستگی نخواهد داشت [۳]. در این پژوهش این نسبت  $3/1$  در نظر گرفته شده است تا عمق آبهستگی تحت تأثیر عمق جریان قرار نگیرد. ملویل و چیو عنوان کردند برای تعیین عمق جریان، حداکثر تنش برشی باید در شرایط آب زلال تعیین شود [۳۱]. زمانی که سرعت جریان در محدوده  $0.3U_c < U < U_c$  باشد آبهستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد و اگر سرعت متوسط جریان  $U$  بیشتر از سرعت آستانه حرکت  $U_c$  باشد آبهستگی در شرایط بستر زنده صورت می‌پذیرد. در این تحقیق، مدل برای حالت آبهستگی آب زلال طراحی شد. لذا سرعت آستانه حرکت به دو روش محاسباتی و مشاهدات آزمایشگاهی تعیین شد. به این صورت که سرعت بحرانی جریان با برقراری عمق ثابت و افزایش تدریجی دبی جریان در چند مرحله و چندین تکرار محاسبه شد. ملویل برای تعیین سرعت برشی بحرانی به‌ازای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز و دمای آب  $20$  درجه سلسیوس روابط زیر را ارائه نمود، که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می‌باشد [۳۲].

$$\text{for } \rightarrow 0.1\text{mm} < d_{50} < 1\text{mm} \quad (4)$$

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4}$$

$$\text{for } \rightarrow 0.1\text{mm} < d_{50} < 100\text{mm} \quad (5)$$

$$U_{*c} = 0.305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1}$$

و برای سرعت بحرانی از رابطه توزیع لگاریتمی سرعت استفاده نمود:

$$U_c = 5.75 \log\left(5.53 \frac{y}{d_{50}}\right) \times U_{*c} \quad (6)$$

با استفاده از روابط فوق سرعت آستانه حرکت برای رسوبات برابر با  $0/183$  متر بر ثانیه محاسبه شد؛ اما مشاهدات آزمایشگاهی در دامنه‌ای از عمق‌ها و سرعت‌های مختلف این

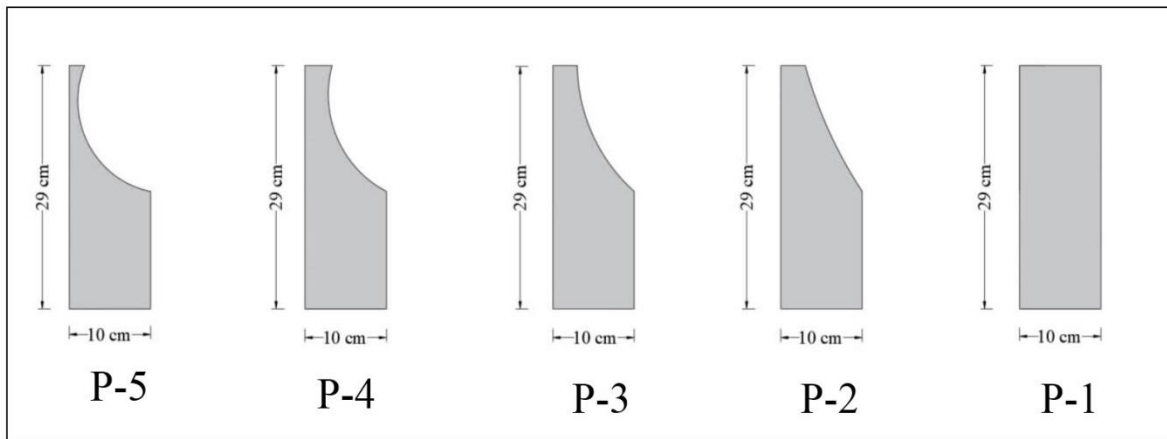
### مشخصات مدل‌ها

مجهز به CNC انجام شد. مشخصات مدل‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

در این پژوهش از پنج مدل مختلف اسکله از جنس پی‌وی‌سی با شعاع قوس‌های (۵۲/۲۸، ۲۰/۲۰، ۱۲/۰۹ و ۱۱/۰۶) استفاده شد. ساخت مدل با استفاده از دستگاه تراش

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها

$U/U_c$	$U$ (m/s)	عمق جریان (m)	دبی جریان ( $m^3/hr$ )	Fr	زاویه برخورد
$0.62 < U/U_c < 0.96$	$0.16 < U < 0.24$	۰/۱	$18 < Q < 28$	$0.161 < U/U_c < 0.242$	$0 < \alpha < 10.2$
۰/۹۶	۰/۲۴	۰/۱	۲۸	۰/۲۴۲	(۰، ۱۸، ۴۸، ۷۹، ۱۰۲)
۰/۸۶	۰/۲۲	۰/۱	۲۵	۰/۲۲۲	
۰/۷۹	۰/۲۰	۰/۱	۲۳	۰/۲۰۱	
۰/۶۲	۰/۱۶	۰/۱	۱۸	۰/۱۶۱	



شکل ۵. طرح‌واره مدل اسکله‌های استفاده شده در آزمایش‌ها

### ۳. نتایج و بحث

#### الف. آزمایش شاهد

در ابتدا به منظور تعیین مدت زمان انجام آزمایش‌ها (زمان تعادل آبشستگی)، همان‌طور که قبلاً اشاره شد یک آزمایش به مدت ۱۰ ساعت بروی پایه شاهد ( $\alpha = 90^\circ$ ) انجام گرفت که هدف، مشاهده جریان گردابی، نحوه حرکت ذرات و اندازه‌گیری عمق آبشستگی برای مقایسه با حالت‌های بعدی می‌باشد. بدین منظور تغییرات عمق آبشستگی در واحد زمان ثبت شد که نتایج نشان داد پس از برخورد جریان آب به اسکله، جریان‌های پایین‌رونده آغاز شده و پس از آنکه عمق چاله بیشتر شد گرداب‌های نعل اسبی آغاز به کار کردند و

باعث جابه‌جایی بیشتر ذرات و حفر عمیق‌تر چاله آبشستگی شدند. سرعت فرایند آبشستگی در لحظات اولیه بیشتر بوده و با افزایش توسعه حفره آبشستگی با گذشت ۷ ساعت از شروع آزمایش، نرخ آبشستگی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. در تمامی سرعت‌های نسبی مورد آزمایش، بر اثر تشکیل گرداب‌های ناشی از برخورد آب با دماغه، رسوبات اطراف اسکله حرکت کرده و حفره آبشستگی در جلو و اطراف اسکله تشکیل شد و با دور شدن از اسکله به سمت پایین دست، ذرات ریزدانه فرسایش یافته و به صورت پشته‌ای رسوبی و در دو سمت به صورت نسبتاً متقارن در پشت اسکله امتداد یافته و انباشته شدند. همچنین مشاهده شد که عمق آبشستگی در جلو اسکله مقدار حداکثر را داشته و با دور

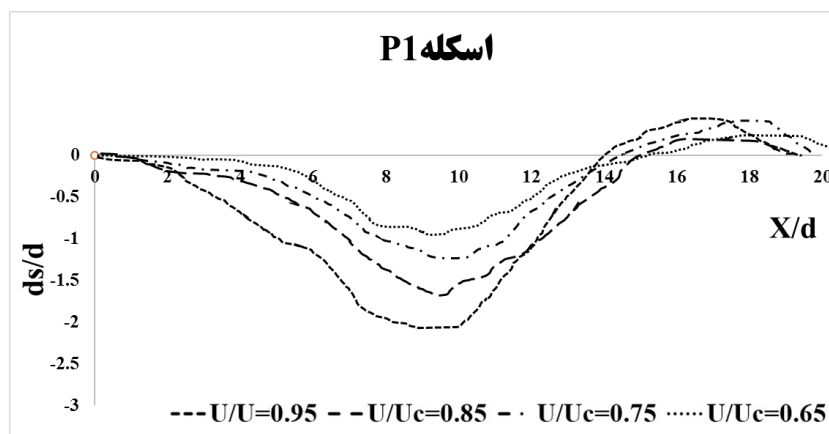
**ب. تأثیر شعاع دماغه روی عمق آبشستگی**

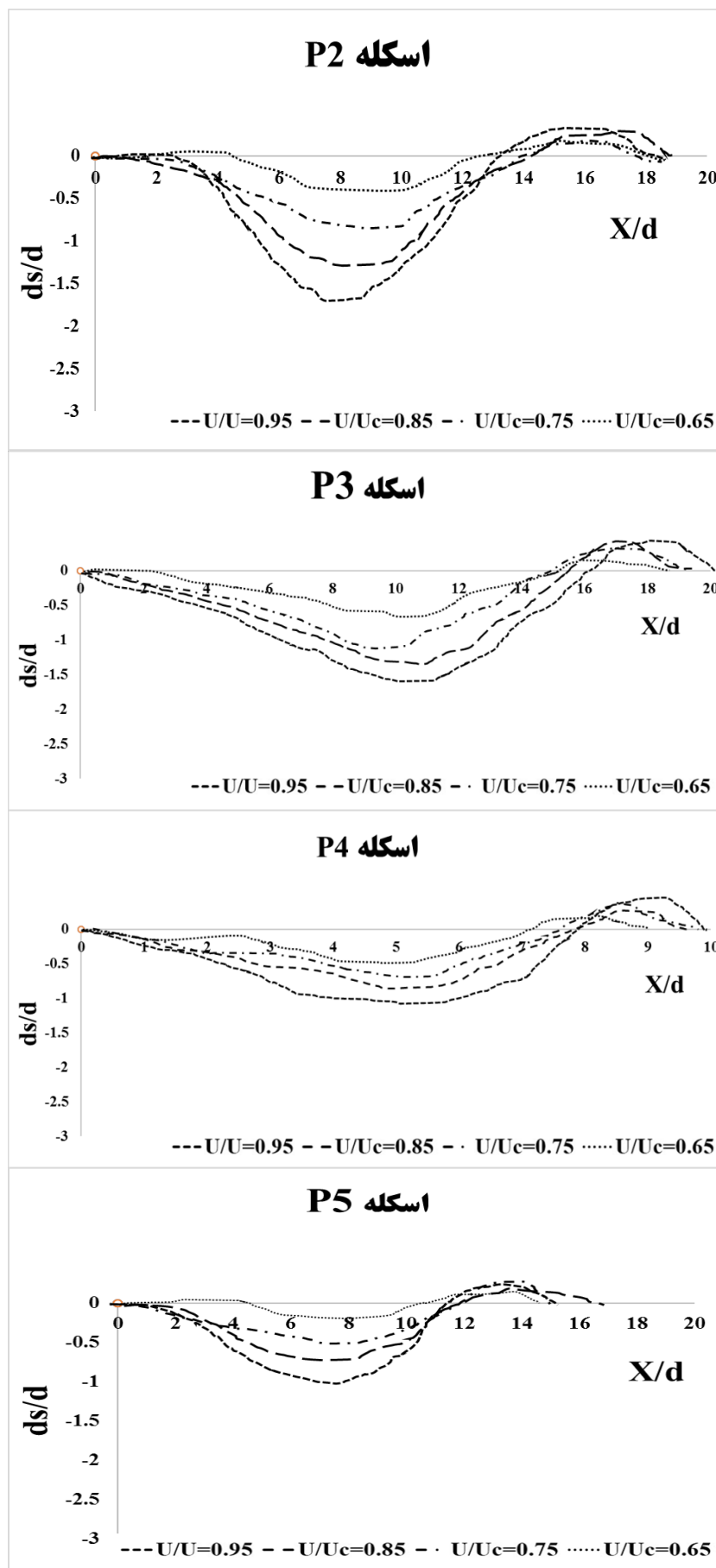
با توجه به شکل ۷ توسعه پروفیل طولی حفره آبشستگی پیرامون اسکله به ازای سرعت‌های مختلف (که به صورت پارامتر بدون بعد  $\frac{U}{U_c}$  نشان داده شده است) ارائه شده است. در این شکل‌ها با تغییر شعاع دماغه به دلیل انحراف بخشی از خطوط جریان و عدم چرخش آن‌ها به سمت بستر، باعث می‌شود پتانسیل منطقه پرفشاری که در حالت اسکله شاهد ایجاد شده، نسبت به حالتی که اندازه شعاع دماغه کاهش می‌یابد تقلیل یابد و این امر سبب می‌شود که گرادیان فشار بالادست و پایین دست اسکله به دلیل شکل هندسی قوس دار اسکله کاهش یافته و باعث کمتر شدن توان جریان پایین رونده و به سبب آن کاهش توان جریان‌های نعل اسبی که عامل اصلی توسعه حفره آبشستگی هستند، می‌گردد. در حقیقت تغییر شعاع دماغه اسکله که یک روش اصلاحی غیرمستقیم الگوی جریان اطراف اسکله می‌باشد، باعث شده است بخشی از خطوط جریان به سمت پایین دست اسکله منحرف شده و نقشی در ایجاد کانون پرفشار جلوی اسکله نداشته باشند و باعث تضعیف این کانون و کاهش گرادیان فشار بالادست و پایین دست که عامل اصلی ایجاد جریان‌های پایین رونده، نعل اسبی و برخاستگی می‌گردد، شده است. با توجه به شکل ۷ هرچه شعاع قوس کاهش می‌یابد عمق آبشستگی نیز کاهش می‌یابد.

شدن از اسکله مقدار آن در اطراف اسکله کاهش می‌یابد. در شکل ۶ تصویر تشکیل حفره و پشته رسوبی آبشستگی در مدل‌های P<sub>2</sub> و P<sub>4</sub> به عنوان نمونه نشان داده شده است. در ادامه نیز پروفیل طولی تراز بستر برای مقایسه با یکدیگر ترسیم شده‌اند. با توجه به شکل‌ها و پروفیل‌های بستر، تغییر شعاع دماغه باعث می‌شود الگوی جریان اطراف پایه تغییر کند.



شکل ۶. تصویر توسعه آبشستگی پیرامون مدل‌های P<sub>2</sub> و P<sub>4</sub>

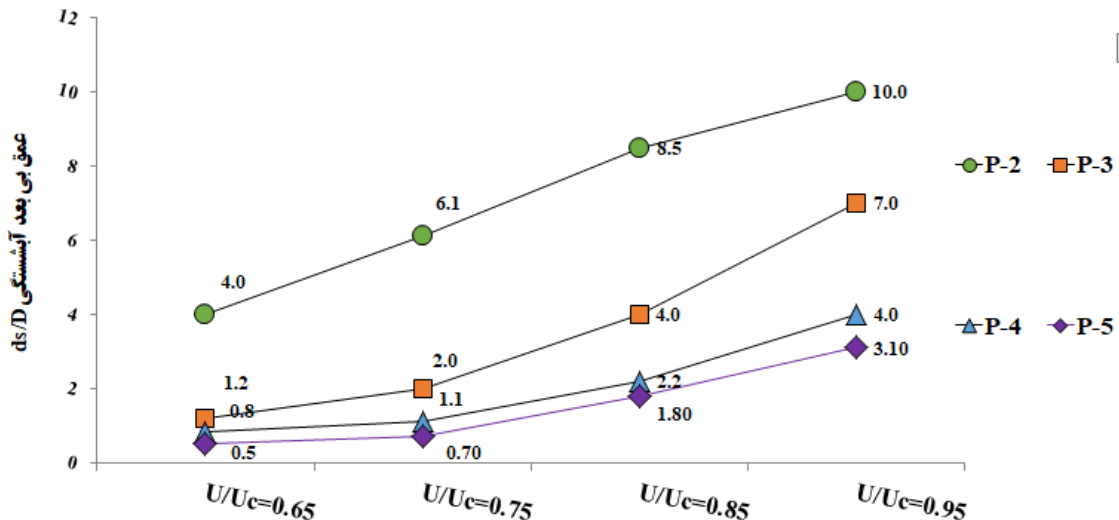




شکل ۷. توسعه پروفیل طولی حفره آبشستگی پیرامون اسکله

به تغییرات سرعت عملکرد یکسانی داشته و نرخ افزایش آبخستگی برای  $U/U_c$  از ۰/۶۵ تا ۰/۹۵ بسیار کند بوده و عملاً آبخستگی به خوبی کنترل شده است؛ اما برای اسکله‌های P2 و P3 با افزایش شعاع دماغه اسکله میزان آبخستگی با افزایش سرعت جریان افزایش می‌یابد.

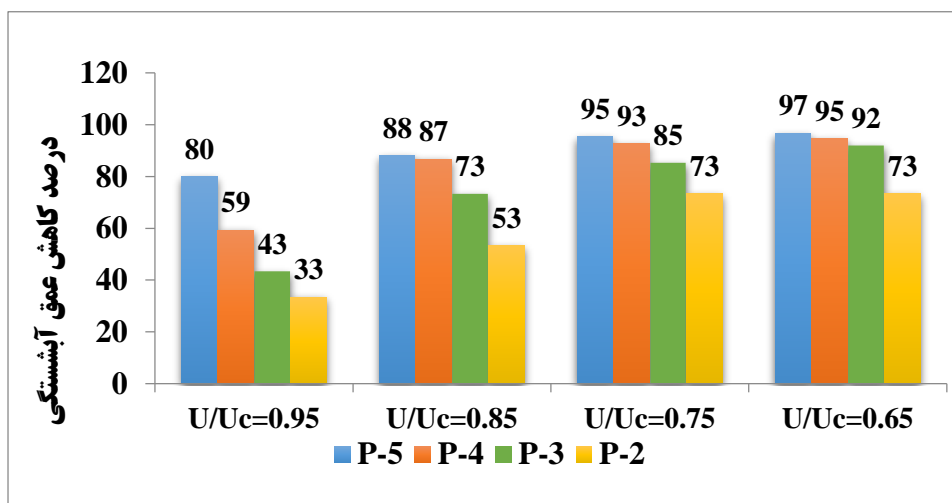
در شکل ۸ نمودار تغییرات بدون بعد عمق آبخستگی در برابر پارامتر سرعت نسبی جریان به ازای شعاع‌های مختلف اسکله نشان داده شده است. در این نمودار با افزایش پارامتر بدون بعد سرعت ( $U/U_c$ ) عمق آبخستگی برای تمام اسکله‌ها افزایش یافته‌اند. با توجه به شکل، اسکله‌های P4 و P5 نسبت



شکل ۸. نمودار تغییرات عمق آبخستگی در پارامتر بدون بعد سرعت نسبی به ازای زوایای برخورد جریان با اسکله

می‌دهد که گویای این است که در سرعت‌های کمتر از ۶۰ درصد سرعت آستانه حرکت ذرات، مقدار درصد کاهش عمق آبخستگی برای این اسکله بیش از ۹۵ درصد است. همچنین در پارامتر  $U/U_c=0/95$  که بحرانی‌ترین حالت و نزدیک‌ترین مقدار به آستانه حرکت ذرات می‌باشد اسکله P5 درصد کاهش ۸۰، P4=۵۹، P3=۴۳ و P2=۳۳ درصد را نشان می‌دهند.

در شکل ۹ مقدار درصد کاهش عمق آبخستگی اسکله‌های P2، P3، P4 و P5 نسبت به اسکله P1 (اسکله شاهد) در برابر سرعت نسبی  $U/U_c$  ترسیم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود با تغییر شعاع اسکله از ۵۲/۲۸ به ۱۱/۰۶ درصد عمق آبخستگی نسبت به اسکله P1 (اسکله شاهد) کاهش می‌یابد و بیشترین درصد آن برای اسکله P5 در تمام حالت‌ها مشاهده شد. این اسکله P5 در پارامتر  $U/U_c=0/65$  درصد کاهش آبخستگی نزدیک به ۹۷ درصد را نشان



شکل ۹. درصد کاهش عمق آبخستگی اسکله‌های پل نسبت به تغییر سرعت نسبی به ازای زوایای برخورد جریان مختلف

در جدول شماره ۲ نتایج تحقیق حاضر با سایر محققان بررسی شد. با توجه به نتایج و مقایسه با محققان پیشین استفاده از دماغه قوسی شکل آبشستگی مقابل اسکله را به خوبی کنترل نموده است.

جدول شماره ۲. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج دیگر پژوهشگران در شرایط آب زلال

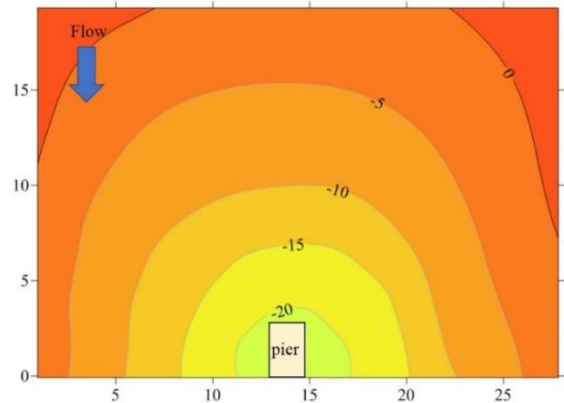
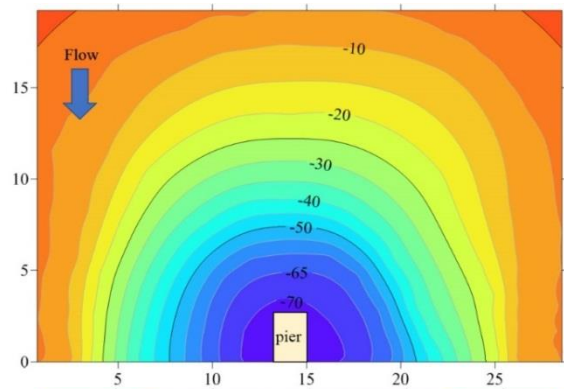
نام پژوهشگر	موقعیت قرارگیری آستانه و کابل	درصد کاهش عمق آبشستگی (%)
سلیمانی بابرصاد، صفائی (۲۰۲۱) (۸)	پایه شیب دار با زاویه ۷۰ درجه	۴۸
موسائی و همکاران (۲۰۱۸) (۱۲)	پایه شیب دار زاویه ۱۲۰ درجه	۵۵
تحقیق حاضر برای اسکله P-2	اسکله با شعاع قوس ۲۰/۲۰	۳۳
تحقیق حاضر برای اسکله P-3	اسکله با شعاع قوس ۱۲/۰۹	۴۳
تحقیق حاضر برای اسکله P-4	اسکله با شعاع قوس ۱۱/۰۶	۵۹
تحقیق حاضر برای اسکله P-5	اسکله با شعاع قوس ۱۰۲	۸۰

#### ۴. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، برای کاهش عمق آبشستگی اطراف اسکله‌ها، با استفاده از تغییر شکل و قوس دار کردن دماغه اسکله در برخورد با جریان، از پنج شکل اسکله P1، P2، P3، P4 و P5 که نمونه شاهد با زاویه برخورد جریان با دماغه ۹۰ درجه و بقیه اسکله‌ها با تغییر قوس شعاع دماغه در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که:

۱. با کاهش شیب دماغه از اسکله P1 (نمونه شاهد) به اسکله P5 عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.
۲. با کمتر شدن زاویه برخورد جریان با اسکله به دلیل انحراف بخشی از خطوط جریان و عدم چرخش آن‌ها به سمت بستر، باعث می‌شود پتانسیل منطقه پرفشاری که در حالت اسکله P1 (اسکله شاهد) ایجاد شده، نسبت به

در ادامه با استفاده از نرم افزار Surfer توپوگرافی بستر برای P1 و P5 در سرعت نسبی حداکثر ترسیم شد. شکل ۱۰ توپوگرافی بستر را نشان می‌دهند. با توجه به شکل، حفره آبشستگی اسکله P1 در پلان دارای ابعاد زیاد و حفره آبشستگی عمیق، ولی اسکله P5 در پلان دارای گستردگی کم نسبت به اسکله P1 (نمونه شاهد)، چاله آبشستگی آن عمق کمی دارد. همچنین با توجه به شکل‌ها اطراف اسکله P5 حفره آبشستگی و پشته رسوبی ایجاد شده به دلیل کاهش اغتشاشات اطراف اسکله، دارای تقارن و نظم بیشتری نسبت به اسکله شاهد می‌باشد. تراکم خطوط نشان می‌دهند برای اسکله P5 که شیب چاله آبشستگی تند بوده و عمق آن زیاد می‌باشد. در بحث گستره آبشستگی در عرض هر دو اسکله سطح بستر را تغییر داده‌اند اما در اسکله‌ای که شکل اسکله تغییر کرده است و مقاومت آن در برابر جریان کاهش پیدا کرده است بستر کمتر تحت تأثیر آبشستگی قرار گرفته است. در این راستا نشان می‌دهد که با تغییر شکل دماغه اسکله تغییر مسیر خطوط جریان رخ داده است و این امر باعث شده برخورد خطوط جریان با بستر کاهش یابد.



شکل ۱۰. توپوگرافی بستر برای اسکله‌های P1 و P5 در شرایط  $U/U_c=0.95$

jet cross-section. Canadian Journal of Civil Engineering. 2024 Mar 5;51(9):1004-12.

[6] Farooq R, Azimi AH, Tariq MA, Ahmed A. Effects of hooked-collar on the local scour around a lenticular bridge pier. International Journal of Sediment Research. 2023 Feb 1;38(1):1-1.

[7] Eskafi P, Shoushtari MM, Babarsad MS, Pourmohammadi MH, Dahanzade B. Experimental Study of the Simultaneous Effect of the Shape and Longitudinal Angle of the Bridge Pier on Scour. Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN. 2022 Oct 23;2423:7833.

[8] Solimani Babarsad M, Safaei A. Experimental Study of Scour Around Pier with Inclined Head. Water Resources Engineering. 2021 Apr 21;14(48):53-72.

[9] Akhlaghi E, Babarsad MS, Derikvand E, Abedini M. Assessment the effects of different parameters to rate scour around single piers and pile groups: a review. Archives of Computational Methods in Engineering. 2020 Jan;27(1):183-97.

[10] Guan D, Chiew YM, Wei M, Hsieh SC. Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier. International journal of sediment research. 2019 Apr 1;34(2):118-24.

[11] Guan D, Hsieh SC, Chiew YM, Low YM. Experimental study of scour around a forced vibrating pipeline in quiescent water. Coastal Engineering. 2019 Jan 1;143:1-1.

[12] Moosaei M, Vaghefi M, Meraji SH. Experimental investigation of scour pattern due to the location of twin convergent and divergent bridge piers parallel to flow in different locations of a 180 degree bend. 2018;33(4):61-70

[13] Zampieri P, Zanini MA, Faleschini F, Hofer L, Pellegrino C. Failure analysis of masonry arch bridges subject to local pier scour. Engineering Failure Analysis. 2017 Sep 1;79:371-84.

[14] Ettema R, Constantinescu G, Melville BW. Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch. Journal of Hydraulic Engineering. 2017 Sep 1;143(9):03117006.

[15] Safaei A, Choramin M, Khajavi S, Parmoon AA, Arezoo AA. Analyzing the affective parameters on the amount of bridge scour in the vicinity of the rough collar in laboratory model. WALIA Journal. 2015; (4):17-21.

[16] Shen HW, Schneider VR, Karaki S. Local scour around bridge piers. Journal of the Hydraulics Division. 1969;95(HY6):1919-40.

[17] Johnson PA. Advancing bridge-pier scour engineering. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice. 1991 Jan;117(1):48-55.

حالتی که زاویه دماغه کاهش می‌یابد تقلیل یابد و باعث کمتر شدن توان جریان پایین‌رونده و به سبب آن ضعیف شدن توان جریان‌های نعل اسبی که عامل اصلی توسعه حفره آبشستگی هستند، می‌شود.

۳. اسکله P5 در پارامتر  $U/U_c=0/62$ ، درصد کاهش عمق آبشستگی بیش از ۹۵ درصد را نشان می‌دهد که گویای این است که در سرعت‌های کمتر از ۶۰ درصد سرعت آستانه حرکت ذرات، مقدار درصد کاهش عمق آبشستگی برای این اسکله بیش از ۹۵ درصد است. در پارامتر  $U/U_c=0/96$  که بحرانی‌ترین حالت و نزدیک‌ترین مقدار به آستانه حرکت ذرات می‌باشد اسکله P5 درصد کاهش ۸۰ درصد، P4=۵۹، P3=۴۳ و P2=۳۳ درصد را نشان می‌دهند که عملکرد بهتری نسبت به بقیه اسکله‌ها دارد. حفره آبشستگی و پشته رسوبی ایجادشده اطراف اسکله P5 به دلیل کاهش اغتشاشات اطراف اسکله، تقارن و نظم بیشتری نسبت به اسکله شاهد دارد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و سازمان آب و برق خوزستان برای در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی در انجام این پژوهش تقدیر و تشکر می‌شود.

### منابع

- [1] Shirole AM, Holt RC. Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. Transportation Research Record. 1991 Mar 10;1290(3950):39-50.
- [2] Sh M. Evaluation of pier scour reduction using combination of collars, slots and threading method. Water Resources Engineering. 2018 Aug 23;11(37):41-52.
- [3] Chiew YM, Melville BW. Local scour around bridge piers. Journal of hydraulic research. 1987 Jan 1;25(1):15-26.
- [4] Breusers HN, Nicollet G, Shen HW. Local scour around cylindrical piers. Journal of hydraulic research. 1977 Jul 1;15(3):211-52.
- [5] Babarsad MS, Safaei A, Balachandar R. Investigation of dredging pattern due to changes in

[31]Melville BW, Chiew Y-M. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1999;125(1):59-65.

[32]Melville BW. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1997;123(2):125-36.

### پی نوشتها

1. Clear water scour
2. Live bed scour
3. Down flow
4. Horseshoe vortex
5. Wake vortex
6. Gunt (HAMBURG-Fabrication No:204716)
7. Ripple
8. Armoring

[18]Solimani Babarsad M, Hojatkhah A, Safaei A, Aghamajidi R. Laboratory investigation of deflector structure effect on bridge pier scouring. *Irrigation Sciences and Engineering*. 2020 Dec 21;43(4):91-104.

[19]Safaei A, Solimani Babarsad M, Aghamajidi R, Hojatkhah A. Laboratory Study of Deflector Structure's Shapes on Bridge Pier Scouring. *Journal of Hydraulics*. 2022 Mar 21;17(1):15-33.

[20]Safaei A, Solimani Babarsad M, Aghamajidi R, Eftekhari P. Experimental study effect of the flexible collar on bridge pier scouring depth. *Irrigation Sciences and Engineering*. 2021 Jun 22;44(2):53-66.

[21]Solimani Babarsad M, Safaei A, Aghamajidi R. Laboratory study of cable and sill protection on scouring pattern around the bridge pier. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2021 Apr 21;52(2):523-38.

[22]Sumer B, Fredsøe J, Christiansen N, Hansen S. Bed shear stress and scour around coastal structures. *Coastal Engineering* 1994. 1995:1595-609.

[23]Sanoussi A, Habib E. Local scour at rounded and sloped face piers with skew angles. *Proceedings of the International Conference on Building technology*. 2010;D(41):439-61.

[24]Bozkus Z, Yildiz O. Effects of inclination of bridge piers on scouring depth. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004 Aug;130(8):827-32.

[25]Liu C, Gao YY, Qu XC, Wang B, Zhang BF. Numerical simulation on flow past two side-by-side inclined circular cylinders at low Reynolds number. *China Ocean Engineering*. 2019 Jun;33(3):344-55.

[26]Vaghefi M, Akbari M, Fiouz AR. An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2016 May;20:1582-93.

[27]Moosaei M, Vaghefi M, Meraji SH. Experimental investigation of scour pattern due to the location of twin convergent and divergent bridge piers parallel to flow in different locations of a 180 degree bend. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(4), 61-70.

[28]Vaghefi M, Ghodsian M, Salimi S. The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour. *Sadhana*. 2016;41:75-86.

[29]Esmaeili VM, Sadati SS, Fazloulou R. Experimental investigation of the bed sill effect on the temporal evolution of local scour hole around an inclined pier group on a foundation. *Journal of Hydraulic*. 2015;10(2):13-25.

[30]Raudkivi AJ, Ettema R. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1983;109(3):338-50.