

Research Paper

Experimental Study of Scour Around Pier with Inclined Head

Mohsen Solimani Babarsad^{1*}, Abbas Safaei²

1. Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

2. Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Received: 2019.9.10

Revised: 2019.11.24

Accepted: 2019.12.7

Use your device to scan and read
the article online



DOI: [10.30495/wej.2021.4589](https://doi.org/10.30495/wej.2021.4589)

Keywords:

Scour, Bridge Pier, Head Angle, Incipient Motion

Abstract

Introduction: The leading cause of damages on bridge is local scouring around piers. Many studies were carried out to control and reduce this phenomenon and suggested more solution methods to protect bridge piers. Protection is divided into direct and indirect methods. In this study, to reduce scouring depth around the pier, an indirect method is used by changing the pier's head angle in a flow direction.

Materials and Methods: An experimental study on clear-water at a different angle of piers head under steady flow is presented. Experiments were used to assess the ability to change the head angle of piers to protect them. Toward this end, five angles (α) 90, 85, 80, 75, 70-degree with the flow direction were considered. The bed material size d_{50} was 0.9 mm and all experiments were done in Gunt hydraulic standard flume.

Findings: The results showed that the pier with a 70-degree attack angle could reduce the scour depth more than others. This happens due to diverting part of streamlines to downstream, and it can have a 36 per cent reduction overall.

Conclusion: The scouring depth and sediment point bar created around the pier with an inclined head compared with the control pier ($\alpha=90$ -degrees) have less scouring depth due to minor deviation of flow streamlines and reduction of disturbances around the pier.

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

***Corresponding author:** Mohsen Solimani Babarsad

Address: Department of water sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Tell: 00989169099784

Email: Mohsen.solb@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Local scouring is one of the main factors in the destruction of bridge piers in rivers. Usually, the destruction of bridges is not due to structural reasons but due to not considering the influence of hydraulic factors in the design of bridges. By placing the bridge pier in direction of the stream, a complex three-dimensional flow is formed around the pier and after that, which has been the subject of research by many researchers. The complex three-dimensional flow over time causes a pit to be dug around the pier. The depth caused by the bed's erosion compared to the original bed is called the scour depth. Methods of reducing the depth of local scour are divided into two categories: 1-Increasing the strength of bed materials around the piers by using more resistant materials, the most common of which is the use of riprap and gabion in the riverbed. 2-Reducing the strength of the main erosion factors such as downward flow and horseshoe vortex by methods such as using a collar, creating a slit, blade, submerged Vane or changing the basic geometric shape is used. In the present study, the effect of the parameter of changing the angle of the bridge pier head on the maximum depth scouring hole around the pier under clear water conditions were investigated.

Materials and Methods

The experiments were performed in the hydraulic laboratory of Water and Power Industry University, equipped with a flume with a length of 10 meters and a height of 50 cm and steel floor width of 31 cm with variable slope. The flume is equipped with an electromagnetic flowmeter with an accuracy of ± 0.1 liters per second and a rectangular weir downstream of the flume to adjust the water depth. In this study, natural river sand with uniform grain size ($\delta_g = 1.36$), relative density $G_s = 2.64$ and the average particle diameter of 0.95 mm was used. In all experiments, water depth was considered 10 cm. In this research, five different models of PVC pier with angle's

head ($\theta = 0, 5, 10, 15$ and 20 -degrees) was It should be noted that the angle of flow with the pier's head is calculated as $\alpha = 90 - \theta$, which used to describe and analyze the pictures.

Findings

In the present study, to reduce the scouring depth around the bridge pier, deformation and inclining pier head in contact with the flow field were used. Four pier shapes, P2, P3, P4 and P5, were compared with the control pier P1 (with $\alpha = 90$ -degrees). The results showed that by reducing the head's slope from pier P1 (control pier) to pier P5, scouring depth decreases. For Pier P5 in the parameter ($U/U_c = 0.62$), the percentage of scouring depth reduction is close to 96 percent, which indicates that at velocities less than 60 percent of the particle's incipient motion, the rate of scouring depth reduction for this pier is more than 95%. In the parameter $U/U_c = 0.96$, which is the most critical state and the value closest to the particle incipient motion, the pier P5 shows a decrease of 47%, P4 = 38, P3 = 36, and P2 = 34%, which the p5 has better performance than other piers.

Discussion

By reducing the head angle of the bridge pier, part of the flow lines does not deviate towards the bed, which reduces the potential of the high-pressure zone created at the pier at a 90-degree head, to the situation where the nose angle decreases. Reduces the upstream and downstream pressure gradients of the pier and reduces the downward flow's power, thus reducing the horseshoe vortexes' power (which is the leading cause of scouring cavity development). This reduction in compressive potential reduces the flow velocity of the back vortices and, ultimately, reduces their ability to transport sediment downstream. By changing the head's angle from 90 to 70-degrees, the sediment ridge approaches the pier and shows that the rising currents have lost the ability to carry sediments downstream. Changing the head's angle, which is an indirect method of correcting the flow pattern around the pier,

has caused part of the flow streamlines to deviate downstream of the pier and play no role in scouring.

Conclusion

The scouring depth and sediment point bar created around the pier with an inclined head compared with the control pier ($\alpha=90$ -degrees) have less scouring depth due to minor deviation of flow streamlines and reduction of disturbances around the pier.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All subjects full fill the informed consent.

Funding

The authors have funded the research.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Mohsen Solimani Babarsad; Methodology and data analysis: Mohsen Solimani Babarsad, Abbas Safaei; Supervision and final writing: Abbas Safaei.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی اطراف پایه پل با دماغه مایل

محسن سلیمانی بابرصاد^{۱*}، عباس صفائی^۲

۱. گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲. مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

چکیده

مقدمه و هدف: اصلی‌ترین عامل تخریب پایه پل‌ها، آبشستگی موضعی اطراف آنها می‌باشد. جهت کنترل این پدیده، مطالعات بسیاری انجام شده، و راهکارهایی جهت حفاظت از پایه پل‌ها ارائه گردیده است. راهکارهای حفاظت از پایه‌های پل به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌گردند، یکی از روش‌هایی که بصورت غیرمستقیم با کمک اصلاح خطوط جریان اطراف پایه پل، می‌تواند عمق آبشستگی را کاهش دهد تغییر زاویه دماغه پل می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق بصورت آزمایشگاهی به بررسی تاثیر تغییر زاویه دماغه پایه پل با راستای جریان پرداخته شد. از این رو زاویه راستای برخورد جریان با دماغه پایه (α) ۹۰، ۸۵، ۸۰، ۷۵، ۷۰ درجه در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی آزمایش‌ها عمق آب ۱۰ سانتیمتر، قطر متوسط ذرات $d_{50}=0.95 \text{ mm}$ و جهت بررسی اثر هیدرولیک جریان، سرعت‌های نسبی متفاوت در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: در بهترین حالت، پایه پل با زاویه برخورد ۷۰ درجه توانست، در سرعت‌های کمتر از ۶۰ درصد سرعت آستانه حرکت ذرات، ۹۵ درصد و در سرعت‌های تا ۹۵ درصد سرعت آستانه حرکت ذرات، به طور متوسط ۳۶ درصد عمق آبشستگی را نسبت به پایه شاهد کاهش دهد.

بحث و نتیجه‌گیری: با کاهش زاویه برخورد جریان با پایه به دلیل انحراف بخشی از خطوط جریان و عدم چرخش آنها به سمت بستر، باعث می‌گردد پتانسیل منطقه پرفشاری که در حالت پایه شاهد ایجاد گردیده، نسبت به حالتی که زاویه دماغه کاهش می‌یابد تقلیل یابد، و باعث کمتر شدن توان جریان پایین رونده و به سبب آن ضعیف شدن توان جریان‌های نعل اسبی، که عامل اصلی توسعه حفره آبشستگی هستند، گردد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۱۹

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۹/۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۶

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI: [10.30495/wej.2021.4589](https://doi.org/10.30495/wej.2021.4589)

واژه‌های کلیدی:

آبشستگی، پایه پل، زاویه دماغه، آستانه حرکت

* نویسنده مسئول: محسن سلیمانی بابرصاد

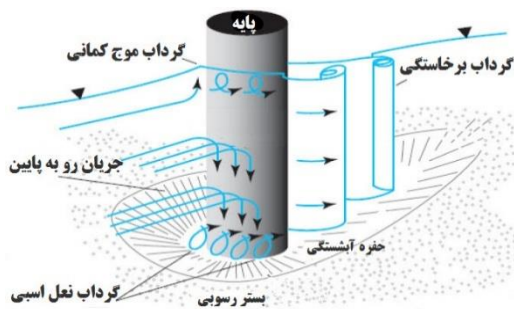
نشانی: گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

تلفن: ۰۹۱۶۹۰۹۹۷۸۴

پست الکترونیکی: Mohsen.solb@gmail.com

مقدمه

جریان عمومی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود و مجدد به پایه برخورد می‌کند و در داخل حفره کنده شده گرداب نعل‌اسبی را تشکیل می‌دهد. این گرداب در دو طرف پایه امتداد می‌یابد و شکلی شبیه به نعل اسب به حفره آبشستگی می‌دهد. گرداب‌های نعل‌اسبی بیشتر در جلو پایه پل فعال هستند و سبب گود کردن جلو پایه می‌گردند (۱۶). لازم به ذکر است که شدت گرداب نعل‌اسبی برای پایه‌هایی دارای مقطع آیرودینامیکی بسیار کمتر است (۲). گرداب‌های برخاستگی^۵ در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل ایجاد می‌شوند. این نوع سیستم گردابی مانند یک گردباد عمل می‌کند و رسوبات را از کف به سمت بالا حرکت می‌دهد و بعبارت دیگر جهت حرکت این سیستم گردابی رو به بالا می‌باشد (۱۷). گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه فعال هستند، این گرداب‌ها محورشان تقریباً عمود بر کف بوده و در صورت عدم وجود گرداب‌های نعل‌اسبی حفره‌ای در پشت پایه بوجود می‌آورند. قدرت گرداب‌های برخاستگی با فاصله گرفتن از پایین‌دست پایه کاهش می‌یابد و دلیل نشست مواد رسوبی که درست در پایین دست پایه اتفاق می‌افتد، همین مطلب است (۱۸). شکل ۱ صورت کلی گرداب‌های نعل‌اسبی و برخاستگی را در اطراف پایه پل استوانه‌ای نشان می‌دهد. روش‌های کاهش عمق آبشستگی موضعی به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ۱- بالا بردن مقاومت مواد بستر در اطراف پایه‌ها با استفاده از مواد مقاوم‌تر که رایج‌ترین آن استفاده از سنگچین و گابیون در بستر رودخانه است. ۲- کاهش قدرت عوامل اصلی فرسایش از جمله جریان روبه پایین و گرداب نعل‌اسبی توسط روش‌هایی نظیر استفاده از طوق، ایجاد شکاف، پره، صفحه مستغرق یا تغییر در شکل هندسی پایه نظیر نصب دماغه گردماهی و یا زاویه‌دار کردن پایه و... بکارگرفته می‌شود.



شکل ۱- گرداب‌ها و الگوی آبشستگی در اطراف پایه

استوانه‌ای شکل

از آنجا که پارامترهای بسیاری در شکل‌گیری پدیده آبشستگی مؤثر هستند، مدل سازی عددی آن بعلت پیچیدگی این پدیده بسیار دشوار می‌باشد. از این رو، در حال حاضر بصورت عمومی بررسی این پدیده در آزمایشگاه و با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی انجام می‌شود. اثر

آبشستگی موضعی یکی از عوامل اصلی در تخریب پایه‌های پل در رودخانه‌ها می‌باشد. معمولاً تخریب پل‌ها نه به دلایل سازه‌ای، بلکه به دلیل در نظر نگرفتن تأثیر عوامل هیدرولیکی در طراحی پل‌ها می‌باشد (۱) با قرارگیری پایه پل در مسیر حرکت آب، جریان سه‌بعدی پیچیده‌ای اطراف پایه و بعد از آن شکل می‌گیرد که موضوع تحقیق بسیاری از محققین 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 کم عمق پی، آسیب جدی و حتی فروریختن عرشه پل درست زمانی که بیشترین نیاز به پل جهت کمک‌رسانی و حمل و نقل می‌باشد، رخ می‌دهد. آبشستگی را به سه دسته آبشستگی موضعی، ناشی از تنگ‌شدگی مقطع و کلی طبقه‌بندی می‌کنند.

ازسوی دیگر، با توجه به حرکت رسوبات در جریان‌های رودخانه‌ای، آبشستگی به دو دسته (۱) آبشستگی آب زلال^۱ (۲) آبشستگی بستر زنده^۲ دسته‌بندی می‌گردد. در آبشستگی آب زلال به علت عدم حرکت رسوبات بالادست پایه پل، حداکثر مقدار عمق حفره آبشستگی بوجود 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 گردد، آبشستگی بستر زنده مشاهده خواهد شد بروسرز و رادکیوی (۴). پژوهشگران مختلف نظیر اخلاقی (۵)، چیو (۶)، ملو یل (۷)، گان (۸)، زایپر (۹)، اتما (۱۰)، پاندی (۱۱)، ایلماز (۱۲) و صفائی (۱۳) مطالعات

بسیاری را برای شناخت این پدیده انجام داده‌اند. دو عامل اساسی در پیدایش گودال آبشستگی یکی برخورد جریان رو به پایین^۳ به پایه و دیگری جدا شدن جریان از پایه پل می‌باشند. و به نظر سینگ (۱۴) جریان رو به پایین عامل اصلی شکل‌گیری گرداب نعل‌اسبی^۴ می‌باشد. این گرداب در دو طرف پایه امتداد یافته و شکلی شبیه نعل‌اسب را بوجود می‌آورد. همچنین جانسون (۱۵) نشان داد که نرخ فرسایش در چاله آبشستگی به طور مستقیم به اندازه سرعت جریان رو به پایین بستگی دارد. 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 می‌گردد. این جریان پس از برخورد به بستر به جهات مختلف پراکنده می‌شود و زمین را نیز حفر می‌کند. مقداری از این جریان که رو به سمت بالا بازگشت می‌کند در برخورد به

4. Horseshoe vortex

5. Wake vortex

1. Clear water scour

2. Live bed scour

3. Down flow

ورکی و همکاران (۲۵) در یک پژوهش تأثیر موقعیت آستانه بر توسعه زمانی عمق چاله آبشستگی گروه پایه کج با پی را مورد بررسی قرار دادند، 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، بطور متوسط مقدار عمق لحظه‌ای آبشستگی با استقرار آستانه جلویی ۲۲ درصد، آستانه میانی، ۱۸ درصد و آستانه انتهایی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. اما از مواردی که تاکنون کمتر مورد توجه محققین قرار داشته، بحث قرارگیری پایه با دماغه زویه‌دار در برابر جریان آب می‌باشد. از آنجا که با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت در مهندسی عمران، احتمال اجرای اینگونه سازه‌ها در موقعیت‌های مکانی و یا معماری خاص وجود دارد (بعنوان نمونه شکل ۲) و با توجه به اینکه امروزه با توسعه فناوری‌های ساخت پل‌ها، شاهد تنوع بیشتری در شکل هندسی پایه پل می‌باشیم، بنابراین در تحقیق حاضر اثر پارامتر تغییر زاویه دماغه پایه پل بر حداکثر عمق حفره آبشستگی در اطراف پایه با شدت جریان مختلف در شرایط آب زلال، مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲- پل هشتم با پایه‌های مایل ساخته شده در شهر اهواز، ایران

مواد و روش‌ها تحلیل ابعادی

در این پژوهش، پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی موضعی استخراج گردید و سپس به روش باینکینگام بی‌بعد سازی صورت گرفت. پارامترهای موثر بر عمق آبشستگی در این تحقیق مطابق رابطه (۱) ارائه شده اند.

$$d_s = f_1(d, d_0, d_{50}, U_c, U, g, \rho, \mu, L, b, \alpha) \quad (1)$$

که در این رابطه: d_s عمق آبشستگی، d عرض پایه، d_0 عمق جریان، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی، U سرعت جریان، U_c سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر، g شتاب ثقل، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزجت آب، L طول کلی آبشستگی از محل قرارگیری پایه تا انتهای پشته رسوبی، α زاویه راستای برخورد جریان با دماغه پایه و b عرض فوم می‌باشد. با اعمال روش تحلیل ابعادی به روش باینکینگام با در نظر گرفتن

شیب، کجی و زاویه پایه‌های پل روی عمق حفره آبشستگی توسط برخی از پژوهشگران داخلی و خارج از کشور مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان به برخی از این تحقیقات اشاره کرد. سومر^۱ و همکاران (۱۹) پژوهشی در رابطه با تأثیر شیب سازه مخروطی شکل بر تنش برشی بستر اطراف سازه بر روی بستری ثابت و ۳ شیب مختلف با زوایای ۰، ۴۵ 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 گرداب نعل‌اسبی در حالت مخروطی شکل همچنان وجود دارد، اما طول و شدت آن در مقایسه با سازه استوانه‌ای شکل کاهش می‌یابد. همچنین سینیسی^۲ و حبیب تأثیر دماغه شیب‌دار و گرد شده را بر روی آبشستگی پایه پل مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با شیب‌دار شدن دماغه، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. بوزکش و یلدیز^۳ (۲۰) نیز به بررسی تأثیر شیب جانبی پایه‌های پل در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون آنها پرداختند. نتیجه تحقیقات آنها نشان داد که با کاهش قطر پایه در نزدیکی سطح آب، از فرسایش نسبی بستر پیرامون آن کاسته می‌شود. کای و همکاران (۲۱) جریان عبوری از دو پایه استوانه‌ای شیب‌دار در مجاورت یکدیگر را بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند آنها شیب پایه‌ها در مدل عددی را در بازه صفر تا ۶۰ درجه در نظر گرفتند و نتایج نشان داد که جریان محوری شدت متأثر از زاویه شیب پایه‌ها می‌باشد، که برای زوایای کوچکتر از ۳۰ درجه ناحیه جریان برگشتی بصورت معکوس، پشت پایه‌های استوانه‌ای مشاهده شد و با افزایش زاویه شیب پایه از ۳۰ درجه تا ۶۰ درجه ناحیه جریان برگشتی حذف گردیده و خطوط جریان مانند حالت بدون ناحیه جدشدگی اطراف پایه رفتار می‌کنند. واقفی و همکاران (۲۲) طی پژوهشی به بررسی تأثیر کج شدگی پایه استوانه‌ای شکل با تغییر در زاویه تا ۲۱ درجه در صفحه عمود بر جریان جهت بررسی حداکثر عمق حفره آبشستگی پرداختند. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال توسط پایه‌هایی با قطر ۴ و ۵ سانتی متر انجام شد، بررسی نتایج آنها نشان داد که با کج شدن پایه به سمت پایین دست کاهش عمق آبشستگی اتفاق افتاد، بگونه‌ای که در برابر هر یک درجه افزایش کج شدگی حدود یک در صد کاهش عمق آبشستگی نسبت به پایه قائم اتفاق افتاده است. موسائی و همکاران (۲۳) الگوی آبشستگی ناشی از استقرار پایه‌های دوتایی همگرا و واگرا و هم را ستار با صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با تغییر موقعیت پایه‌ها از زاویه ۹۰ درجه به زاویه ۶۰ و ۱۲۰ درجه برای حالت واگرا آبشستگی به ترتیب ۴ و ۵۵ درصد کاهش یافت، همچنین نتایج آنها نشان داد که عرض چاله آبشستگی در زوج پایه‌های واگرا در حدود ۵ درصد بیشتر از حالت همگرا می‌باشد. واقفی و همکاران (۲۴) در یک تحقیق آزمایشگاهی با استفاده از تک پایه کج مستقر در مسیر مستقیم به عرض ۶۰ سانتیمتر به بررسی الگوی آبشستگی پرداختند. آنها از تک پایه با زاویه انحراف نسبت به محور عمودی استفاده کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که زاویه انحراف پایه باعث تغییر شکل چاله آبشستگی می‌شود. اسماعیلی

3. Bozkus & Yildiz

1. Sumer

2. Sanoussi

امکانات آزمایشگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده صنعت آب و برق اهواز، مجهز به یک فلوم گانت^۱ 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 پدیده‌ها را فراهم می‌ساخت انجام شد. کانال مجهز به دی سنج الکترومغناطیس با دقت ± 0.1 لیتر بر ثانیه و یک سرریز مستطیلی در پایین دست فلوم جهت تنظیم عمق آب می‌باشد. جریان آب را در یک سیستم چرخشی از سه مخزن بهم پیوسته تعبیه شده در زیر فلوم، هر کدام به ظرفیت ۱۰۰۰ لیتر توسط پمپی با حداکثر دبی ۵۱ لیتر بر ثانیه انتقال می‌دهد و کنترل دبی توسط شیر کنارگذر انجام می‌گردد. به منظور انجام آزمایش‌ها، کف کانال توسط سکوهایی از جنس پی وی سی بصورت کاذب به ارتفاع ۱۴ سانتی متر و عرضی برابر با عرض کف فلوم بالا آورده شد. و روی سکوها به منظور یکسان سازی زبری‌ها با رسوبات بکار رفته در آزمایش پوشانده شد. شیب کف فلوم صفر و از یک ارباه تسطیح جهت مسطح کردن مصالح بستر استفاده گردید و توسط مترلیزری از تراز بودن سطح اطمینان حاصل گردید. برای توسعه کامل جریان، محل انجام آزمایش دارای طول ۲ متر و در فاصله ۳ متری 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 گردید. شکل ۳ مشخصات شماتیک فلوم مورد استفاده را نشان می‌دهد.

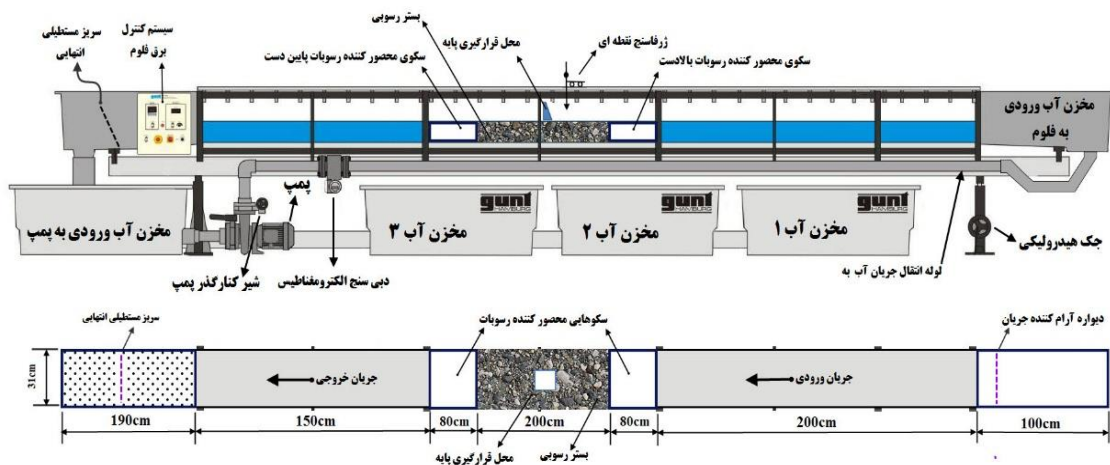
ρ, μ, d بعنوان متغیرهای تکراری و با داشتن ۱۰ پارامتر متغیر، تعداد ۷ پارامتر بدون بعد استخراج گردیده که عبارتند از:

$$d_s = f_2(Re, Fr, \frac{U}{U_c}, \frac{d_0}{d}, \frac{d}{d_{50}}, \frac{L}{d}, \alpha) \quad (2)$$

در رابطه فوق، Re عدد رینولدز و Fr عدد فرود جریان می‌باشند. با توجه به معادله بدست آمده در رابطه ۲، از عدد رینولدز بعلاوه آشفته بودن جریان، و نسبت‌های عمق نسبی جریان $\frac{d_0}{d}$ ، قطر نسبی ذرات بستر $\frac{d}{d_{50}}$ بعلاوه ثابت بودن در کلیه آزمایش‌ها صرفنظر گردید و بدلیل 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 گردید. و نهایتاً معادله ۲ به شکل معادله ۳ خلاصه شد.

$$d_s = f_3(\frac{U}{U_c}, \alpha) \quad (3)$$

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



شکل ۳- پلان فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی

پی وی سی و با عرض $3/1$ سانتی متر استفاده شد. جهت ثابت ماندن پایه درون رسوبات، مدل پایه بر روی صفحه افقی از جنس پی وی سی متصل گردید، و در فاصله ۱ متری از ابتدای محدوده ۲ متری رسوبات قرار داده شد. قطر متوسط ذرات رسوبی باید به گونه‌ای باشد که حداکثر مقدار عمق آبهستگی ایجاد شود و همچنین عمق آبهستگی تعادلی تحت تاثیر اندازه ذرات رسوبی قرارنگیرد ملویل (۲۷). برای این موضوع شرط $\frac{d}{d_{50}} > 25$ که d عرض پایه و d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی

از آنجا که گام اول برای رسیدن به عمق ماکزیمم آبهستگی تعیین مقادیر و پارامترهای مجاز و مؤثر بر عمق آبهستگی می‌باشد، لذا برای دستیابی به این منظور پارامترهای مؤثر با در نظر گرفتن معیارهای متعددی انتخاب شدند. به منظور حذف اثر دیواره‌های کانال بر آبهستگی موضعی، طبق نظر چیو و ملویل (۳) عرض پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد و براساس نظر رادکیوی و اتما (۲۶) نسبت عرض کانال به قطر پایه باید بزرگتر از $6/25$ باشد. باتوجه به این معیارها، مدل پایه از جنس

^۱. Gunt(HAMBURG-Fabrication No:204716)

دبی جریان در چند مرحله و چندین تکرار محاسبه گردید. ملویل (۲۷) برای تعیین سرعت بر شی بحرانی به ازای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز و دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس روابط زیر را ارائه نمود، که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می‌باشد.

$$FOR \rightarrow 0.1mm < d_{50} < 1mm$$

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (4)$$

$$FOR \rightarrow 1mm < d_{50} < 100mm$$

$$U_{*c} = 0.305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \quad (5)$$

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

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

با استفاده از روابط فوق سرعت آستانه حرکت برای رسوبات برابر با ۰/۱۸۳ متر بر ثانیه محاسبه شد. اما مشاهدات آزمایشگاهی در دامنه‌ای از عمق‌ها و سرعت‌های مختلف این مقدار را ۰/۲۲ متر بر ثانیه نشان داد. بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، این سرعت به عنوان 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 ۱۰ 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 ۱۰ ساعت بر روی پایه شاهد $\alpha = 90^\circ$ انجام گرفت. با توجه به نمودار شکل ۴ مشاهده شد که در ۷ ساعت اول تقریباً ۹۸٪ آبشستگی رخ می‌دهد. لذا در کلیه آزمایش‌ها، زمان تعادل ۷ ساعت در نظر گرفته شد. ضمناً به منظور بررسی تاثیر شیب دماغه بر میزان آبشستگی، از در صد کاهش عمق آبشستگی مطابق رابطه ۷ استفاده گردید که در این رابطه ds_m و ds به ترتیب عمق آبشستگی و عمق آبشستگی پایه در حالت شاهد می‌باشد.

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

است، توسط ملویل مطرح شد. رادکیوی و اتما (۲۶) نیز برای این موضوع شرط $(\frac{d}{d_{50}} > 20 \sim 25)$ را مطرح کرده‌اند. در این تحقیق نیز، این نسبت با توجه به نمودار دانه بندی ذرات برابر ۳۳/۶۸ می‌باشد که معیارهای فوق را ارضا می‌کند. جهت جلوگیری از تشکیل شکل بستر^۱ (ریپل) طبق توصیه رادکیوی و اتما (۲۶) اندازه متوسط ذرات رسوبی بایستی از ۰/۷ میلی متر بیشتر باشد. بنابراین d_{50} ذرات رسوبی برابر ۰/۹۵ میلی متر انتخاب شد تا حداکثر مقدار آبشستگی بدست آید و هم از ایجاد پشته‌های کوچک جلوگیری شود. از آنجا که غیریکنواختی رسوبات باعث ایجاد پدیده سپری^۲ شدن چاله آبشستگی باعث کاهش آبشستگی موضعی نهایی می‌شود، لذا در صورتی که

$$\text{انحراف معیار هندسی رسوبات } \delta_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$$

یکنواختی ذرات برقرار می‌شود و اثر غیریکنواختی رسوبات بر آبشستگی موضعی از بین می‌رود (۲). که در این رابطه d_{84} و d_{16} به ترتیب قطر ذراتی است که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آنها 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 ۰/۹۵ میلی متر انتخاب شد، که خصوصیات آن در معیارهای ذکر شده صدق می‌کند.

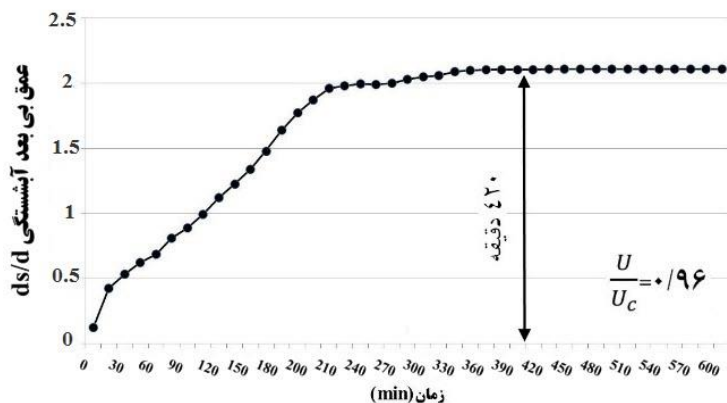
در تمام آزمایش‌ها عمق آب ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد، عمق جریان آب در فلوم آزمایشگاهی یکی از کمیت‌هایی است که اگر به درستی انتخاب نشود حداکثر مقدار عمق آبشستگی تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. طبق مطالعات چپو (۲۸) چنانچه عمق جریان d_0 از ۳ برابر قطر پایه d بیشتر باشد، عمق جریان اثری بر میزان آبشستگی نخواهد داشت. در این پژوهش این نسبت ۳/۱ در نظر گرفته شده است تا عمق آبشستگی تحت تأثیر عمق جریان قرار نگیرد. ملویل و چپو (۲۹) عنوان کردند برای تعیین عمق جریان، حداکثر تنش بر شی باید در شرایط آب زلال تعیین گردد. زمانی که سرعت جریان در محدوده $U_c < U < 0.3U_c$ باشد آبشستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد و اگر سرعت متوسط جریان U بیشتر از سرعت آستانه حرکت U_c باشد آبشستگی در شرایط بستر زنده صورت می‌پذیرد. در این تحقیق، مدل برای حالت آبشستگی آب زلال طراحی شد. لذا سرعت آستانه حرکت به دو روش محاسباتی و مشاهدات آزمایشگاهی تعیین گردید. به این صورت که سرعت بحرانی جریان با برقراری عمق ثابت و افزایش تدریجی

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها

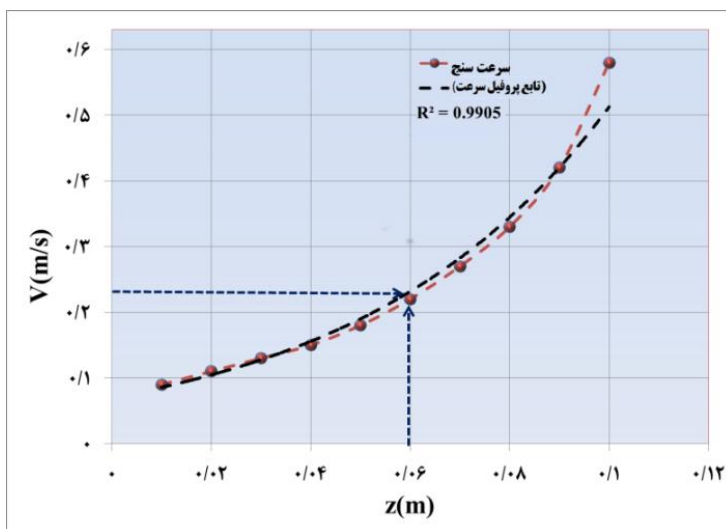
U/U _c	U (m/s)	عمق جریان (m)	دبی جریان (m ³ /hr)	Fr	زاویه برخورد
0.62 < U/U _c < 0.96	0.16 < U/U _c < 0.24	d ₀	18 < Q < 28	0.161 < Fr < 0.242	70 < α < 90
0.96	0.24	0.1	28	0.242	
0.86	0.22	0.1	25	0.222	
0.79	0.20	0.1	23	0.201	70, 75, 80, 85, 90
0.62	0.16	0.1	18	0.161	

2. Armoring

1. Ripple



شکل ۴- نمودار توسعه زمانی آبشستگی در آزمایش شاهد

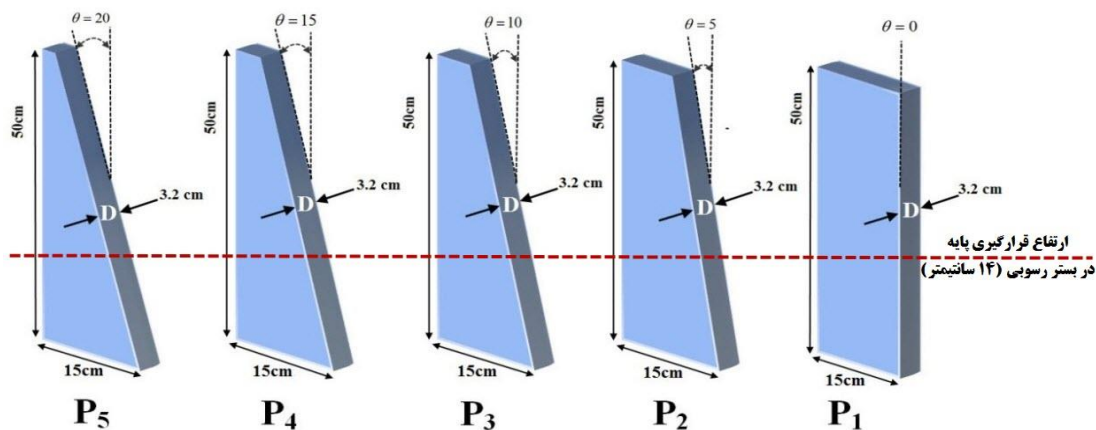


شکل ۵- مقایسه پروفیل سرعت بدست آمده از دستگاه سرعت سنج و رابطه نمایی

مشخصات مدل ها

به CNC انجام شد. مشخصات مدل‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که زاویه برخورد جریان با پایه بصورت $\alpha = 90 - \theta$ محاسبه می‌گردد که جهت محاسبات و تحلیل نمودارها از آن استفاده شده است.

در این پژوهش از ۵ مدل مختلف پایه از جنس پی وی سی با زوایای $(\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ)$ که زاویه پایه با محور عمود بر جریان را نشان می‌دهد، استفاده شد. ساخت مدل با استفاده از دستگاه تراش مجهز



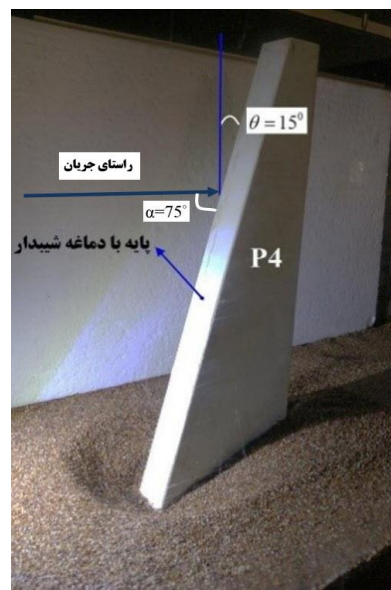
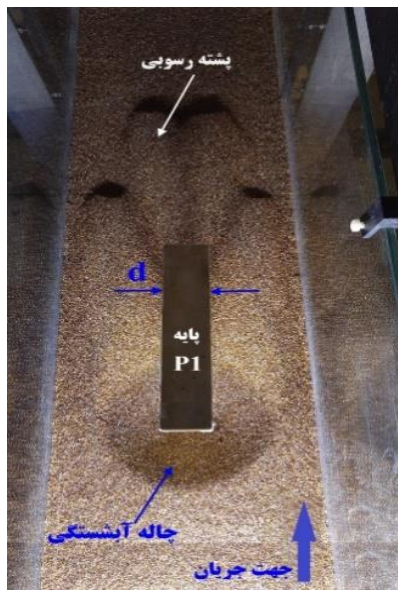
شکل ۶- تصویر شماتیک مدل پایه های مایل استفاده شده در آزمایش ها

نتایج و بحث

الف) آزمایش شاهد (پایه با زاویه ۹۰ درجه)

در ابتدا به منظور تعیین مدت زمان انجام آزمایش ها (زمان تعادل آبستگی)، همانطور که قبلاً اشاره شد یک آزمایش به مدت ۱۰ ساعت بر روی پایه شاهد ($\alpha = 90^\circ$) انجام گرفت که هدف، مشاهده جریان گردابی، نحوه حرکت ذرات و اندازه گیری عمق آبستگی جهت مقایسه با حالت های بعدی می باشد. بدین منظور تغییرات عمق آبستگی در واحد زمان ثبت گردید، که نتایج نشان داد پس از برخورد جریان آب به دماغه پایه، جریان های پایین رونده آغاز شده و پس از آنکه عمق چاله بیشتر شد گرداب های نعل اسبی

آغاز به کار کردند و باعث جابه جایی بیشتر ذرات و حفر عمیق تر چاله آبستگی شدند. سرعت فرآیند آبستگی در لحظات اولیه بیشتر بوده و با افزایش توسعه حفره آبستگی با گذشت ۷ ساعت از شروع آزمایش، نرخ آبستگی بطور قابل توجهی کاهش یافت. در تمامی سرعت های نسبی مورد آزمایش، بر اثر تشکیل گرداب های ناشی از برخورد آب با دماغه، رسوبات اطراف پایه حرکت کرده و حفره آبستگی در جلو و اطراف پایه تشکیل شد و با دور شدن از پایه به سمت پایین دست، ذرات ریزدانه فرسایش یافته و بصورت پشتهای رسوبی و در دو سمت به صورت نسبتاً متقارن در پشت پایه امتداد یافته و انباشته شدند.



شکل ۷- تصویر توسعه آبستگی پیرامون مدل های P1 و P4

روابط تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران دیگر مقایسه گردید، که در ادامه جدول ۲ قابل مشاهده است. نتیجه این تحقیق به مقادیر بدست آمده از روابط تجربی لارسن و تاچ (۳۰)، ملویل (۱۷) آرونچلام (۳۱)، شن (۳۲) و نیل (۳۳) بسیار نزدیک بوده و با نتایج مربوط به روابط تجربی نورمن (۳۴)، ریچاردسون (۳۵) اختلاف اندکی دارد. ولی همانگونه که از روی نتایج عددی جدول مذکور مشاهده می شود، اختلاف نتایج این تحقیق با رابطه تجربی ارائه شده توسط گاینکتی چشمگیر است و به مقداری بیش از ۳۰ درصد می رسد.

همچنین مشاهده شد که عمق آبستگی در جلو پایه مقدار حداکثر را داشته و با دور شدن از پایه مقدار آن در اطراف پایه کاهش می یابد. در شکل ۷ تصویر تشکیل حفره و پشته رسوبی آبستگی در مدل های P1 و P4 به عنوان نمونه نشان داده شده است. در ادامه نیز پروفیل عرضی و طولی تراز بستر جهت مقایسه با یکدیگر ترسیم گردیده اند. با توجه به شکل ها و پروفیل های بستر، تغییر زاویه دماغه باعث می گردد الگوی جریان اطراف پایه تغییر یابد. همچنین برای کنترل عملکرد سیستم آزمایشی، نتایج حاصل از این تحقیق با مدل P1 شاهد ($\alpha = 90^\circ$) با نتایج حاصل از بکارگیری

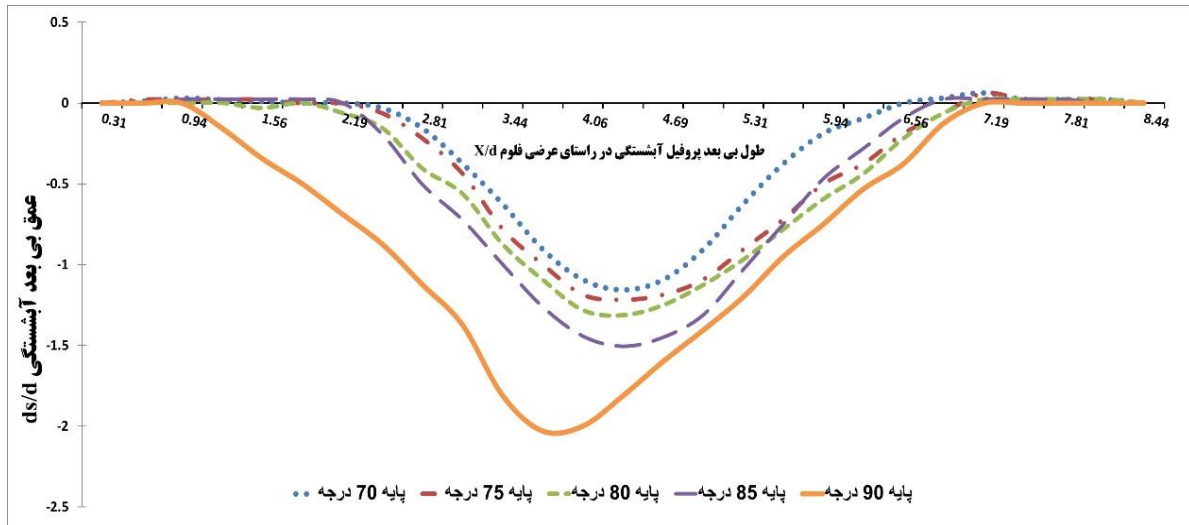
جدول ۲- مقایسه عمق آبستگی مدل P1 با برخی روابط تجربی موجود

پژوهشگر	آرونچلام (۱۹۶۵)	نورمن (۱۹۷۵)	ملویل (۱۹۸۸)	لارسن و تاچ (۱۹۵۶)	ریچاردسون (۲۰۰۱)	شن (۱۹۶۹)	جین (۱۹۸۱)	نیل (۱۹۶۴)	گاینکتی (۱۹۸۶)	پژوهش حاضر
عمق آبستگی تعادلی d_s (mm)	۶/۱	۴/۲	۷/۶	۶/۸	۵/۷	۶/۳	۵/۸	۶/۸	۹/۱	۶/۷
درصد اختلاف	۹%	۳۷%	۱/۵%	۱/۴%	۱۵%	۶%	۱۳%	۱/۵%	۳۵%	-

(ب) تاثیر زاویه شیب پایه روی عمق آبشستگی

در شکل ۸ توسعه عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه در سرعت نسبی $U/U_c = 0.96$ که نزدیکترین حالت به آستانه حرکت ذرات

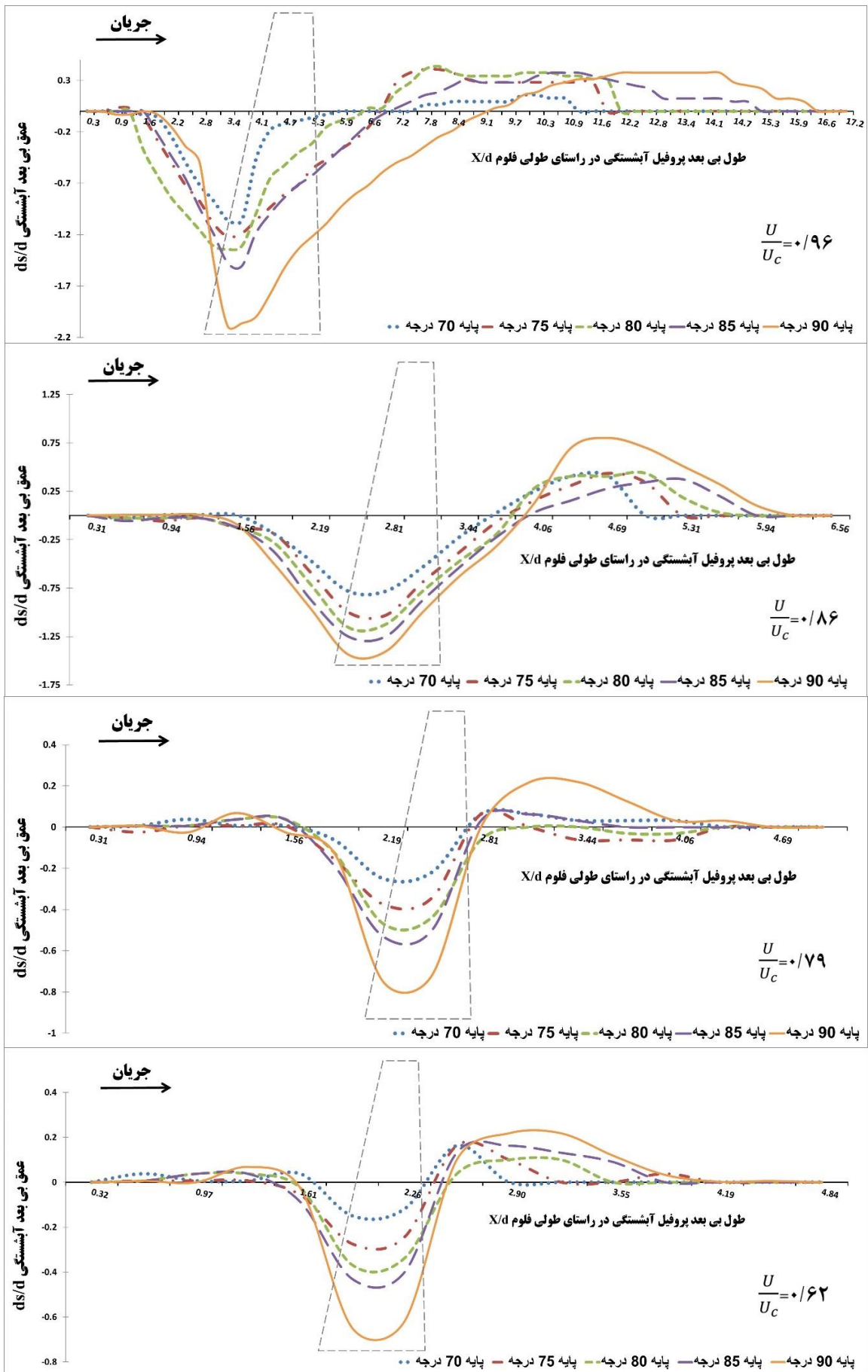
می باشد، نشان داده شده است. همچنین این کاهش با توجه به شکل، با تغییر زاویه دماغه و کاهش آن از ۹۰ تا ۷۰ درجه، توسعه آبشستگی کاهش داشته و این تغییر باعث کاهش اغتشاش جریان متأثر از پایه پل می گردد.



شکل ۸- توسعه پروفیل عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه در $U/U_c = 0.96$

پتانسیل فشاری، باعث کاهش سرعت جریان گرداب‌های برخاستگی پشت پایه و به تبع آن، کاهش توان آنها در انتقال رسوبات به پایین دست می گردد، همانطور که در شکل‌ها مشخص است با تغییر زاویه دماغه از ۹۰ به ۷۰ درجه پشته رسوبی به پایه نزدیک می گردد و نشان می دهد جریان‌های برخاستگی توان حمل رسوبات به ناحیه دورتر پایین دست را از دست داده اند. در حقیقت تغییر زاویه دماغه، که یک روش اصلاحی غیرمستقیم الگوی جریان اطراف پایه می باشد، باعث گردیده است بخشی از خطوط جریان به سمت پایین دست پایه منحرف شده و نقشی در ایجاد کانون پرفشار جلوی پایه نداشته باشند و باعث تضعیف این کانون و کاهش گرادبان فشار بالادست و پایین دست، که عامل اصلی ایجاد جریان‌های پایین رونده، نعل اسبی و برخاستگی می باشد، شده است.

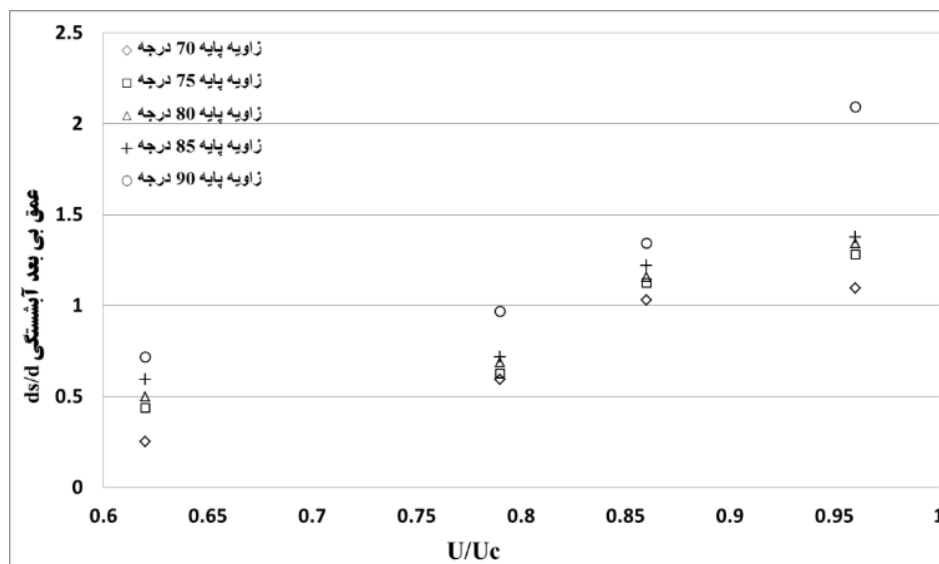
با توجه به شکل ۹ توسعه پروفیل طولی حفره آبشستگی پیرامون پایه به ازای سرعت‌های مختلف (که به صورت پارامتر بدون بعد U/U_c نشان داده شده است) ارائه گردیده است. در این شکل‌ها با کاهش زاویه دماغه به دلیل انحراف بخشی از خطوط جریان و عدم چرخش آنها به سمت بستر، باعث می شود پتانسیل منطقه پرفشاری که در حالت پایه با زاویه ۹۰ درجه (پایه شاهد) ایجاد گردیده، نسبت به حالتی که زاویه دماغه کاهش می یابد تقلیل یابد. و این امر سبب می گردد که گرادبان فشار بالادست و پایین دست پایه به دلیل شکل هندسی زاویه دار پایه 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، می گردد. همچنین این کاهش



شکل ۹- توسعه پروفیل طولی حفره آیشستگی پیرامون پایه

جدول ۳- خلاصه شرایط و نتایج آزمایش‌ها بر روی مدل پایه‌ها

زاویه θ درجه	مدل پایه	زاویه α درجه	Fr	U (m/s)	$\frac{U}{U_c}$	Q (m ³ /hr)	d_s (cm)	$\frac{d_s}{d}$	$d_s/d(\%)$	L/d(%)
۲۰	P ₅	۷۰	۰/۱۶۱	۰/۱۶	۰/۶۲	۱۸	۰/۰۸	۰/۲۵	۴۸	۴۲
۲۰	P ₅	۷۰	۰/۲۰۱	۰/۲۰	۰/۷۹	۲۳	۱/۹	۰/۵۹۳	۲۳	۴۳
۲۰	P ₅	۷۰	۰/۲۲۲	۰/۲۲	۰/۸۶	۲۵	۳/۳	۱/۰۳۱	۳۹	۵۰
۲۰	P ₅	۷۰	۰/۲۴۲	۰/۲۴	۰/۹۶	۲۸	۳/۵	۱/۰۹۴	۹۶	۷۸
۱۵	P ₄	۷۵	۰/۱۶۱	۰/۱۶	۰/۶۲	۱۸	۱/۴	۰/۴۳۸	۳۹	۳۸
۱۵	P ₄	۷۵	۰/۲۰۱	۰/۲۰	۰/۷۹	۲۳	۲	۰/۶۲۵	۱۶	۳۶
۱۵	P ₄	۷۵	۰/۲۲۲	۰/۲۲	۰/۸۶	۲۵	۳/۶	۱/۱۲۵	۳۵	۳۳
۱۵	P ₄	۷۵	۰/۲۴۲	۰/۲۴	۰/۹۶	۲۸	۲	۱/۲۸۱	۳۹	۶۷
۱۰	P ₃	۸۰	۰/۱۶۱	۰/۱۶	۰/۶۲	۱۸	۴/۱	۰/۵۰	۳۶	۳۳
۱۰	P ₃	۸۰	۰/۲۰۱	۰/۲۰	۰/۷۹	۲۳	۱/۶	۰/۶۸۸	۱۴	۲۱
۱۰	P ₃	۸۰	۰/۲۲۲	۰/۲۲	۰/۸۶	۲۵	۲/۲	۱/۱۵۶	۲۹	۲۵
۱۰	P ₃	۸۰	۰/۲۴۲	۰/۲۴	۰/۹۶	۲۸	۳/۷	۱/۳۴۴	۳۰	۵۶
۵	P ₂	۸۵	۰/۱۶۱	۰/۱۶	۰/۶۲	۱۸	۴/۳	۰/۵۹۴	۳۴	۱۰
۵	P ₂	۸۵	۰/۲۰۱	۰/۲۰	۰/۷۹	۲۳	۱/۹	۰/۷۱۸	۹	۱۴
۵	P ₂	۸۵	۰/۲۲۲	۰/۲۲	۰/۸۶	۲۵	۲/۳	۱/۲۱۹	۲۶	۸
۵	P ₂	۸۵	۰/۲۴۲	۰/۲۴	۰/۹۶	۲۸	۳/۹	۱/۳۷۵	۱۷	۲۲
۰	P ₁	۹۰	۰/۱۶۱	۰/۱۶	۰/۶۲	۱۸	۴/۴	۰/۷۱۸	-	-
۰	P ₁	۹۰	۰/۲۰۱	۰/۲۰	۰/۷۹	۲۳	۲/۳	۰/۹۶۹	-	-
۰	P ₁	۹۰	۰/۲۲۲	۰/۲۲	۰/۸۶	۲۵	۳/۱	۱/۳۴۴	-	-
۰	P ₁	۹۰	۰/۲۴۲	۰/۲۴	۰/۹۶	۲۸	۴/۳	۲/۰۹۳	-	-

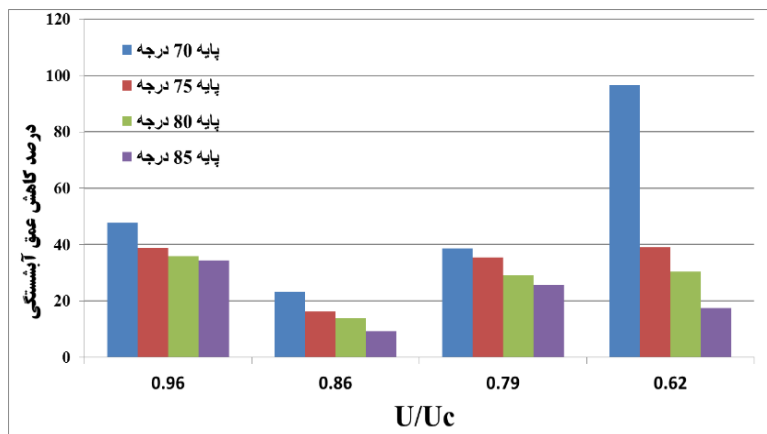


شکل ۱۰- نمودار تغییرات عمق آبشستگی در پارامتر بدون بعد سرعت نسبی به ازای زوایای برخورد جریان با پایه

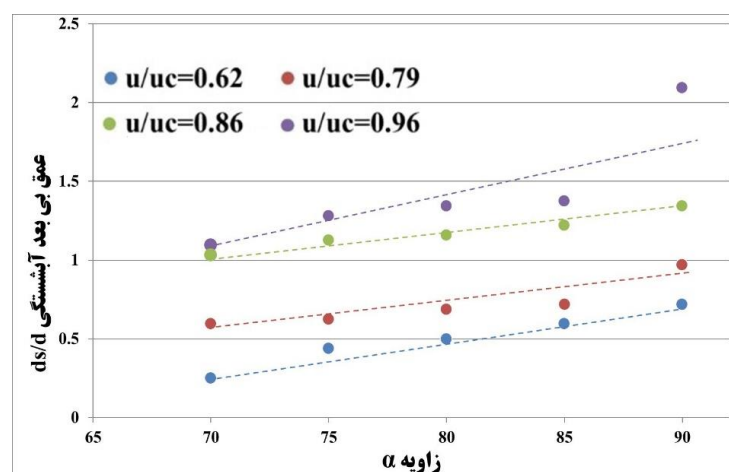
در شکل ۱۰ نمودار تغییرات بدون بعد عمق آبستگي در برابر پارامتر سرعت نسبي جریان به ازای زوایای مختلف برخورد جریان با پایه نشان داده شده است. در این نمودار با افزایش پارامتر بدون بعد سرعت (U/U_c) عمق آبستگي برای تمام پایه‌ها افزایش یافته اما این افزایش برای پایه شاهد به نسبت پایه‌های مایل متفاوت است. آبستگي در سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی ($U/U_c=0/96$) با نرخ تقریباً ثابتی از نمونه شاهد تا زاویه برخورد ۷۰ درجه کاهش می‌یابد، اما در سرعت نسبی بحرانی $0/96$ آبستگي با اختلاف زیادی برای نمونه شاهد افزایش یافته که این دستاورد خوبی برای پایه‌های با دماغه مایل می‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد پایه‌های با دماغه مایل در شرایط جریان بحرانی عملکرد مناسب‌تری دارند و با کاهش شیب این عملکرد بهبود می‌یابد.

شکل ۱۱ مقدار درصد کاهش عمق آبستگي پایه‌های P1، P2، P3، P4 و P5 نسبت به پایه P1 (پایه شاهد) در برابر سرعت نسبی U/U_c

ترسیم گردیده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود با تغییر زاویه شیب دماغه از ۹۰ به ۷۰ درجه درصد عمق آبستگي نسبت به پایه P1 (پایه شاهد) کاهش می‌یابد و بیشترین درصد آن برای پایه P5 در تمام حالت‌ها مشاهده گردید. این پایه P5 در پارامتر $U/U_c=0/62$ درصد کاهش آبستگي نزدیک به ۹۶ درصد را نشان می‌دهد که گویای این است که در سرعت‌های کمتر از ۶۰ درصد سرعت آستانه حرکت ذرات، مقدار درصد کاهش عمق آبستگي برای این پایه بیش از ۹۵ درصد است. در بقیه پارامترهای U/U_c مقدار درصد کاهش پارامتر عمق آبستگي برای پایه‌های P1، P2، P3، P4 و P5 کمتر از ۵۰ درصد است و نرخ کاهش درصد آبستگي از زاویه برخورد ۷۰ به ۸۵ درجه روند تقریباً ثابتی دارد. همچنین در پارامتر $U/U_c=0/96$ که بحرانی‌ترین حالت و نزدیک‌ترین مقدار به آستانه حرکت ذرات می‌باشد پایه P5 درصد کاهش ۴۷ درصد، $P4=38$ ، $P3=36$ و $P2=34$ درصد را نشان می‌دهند.



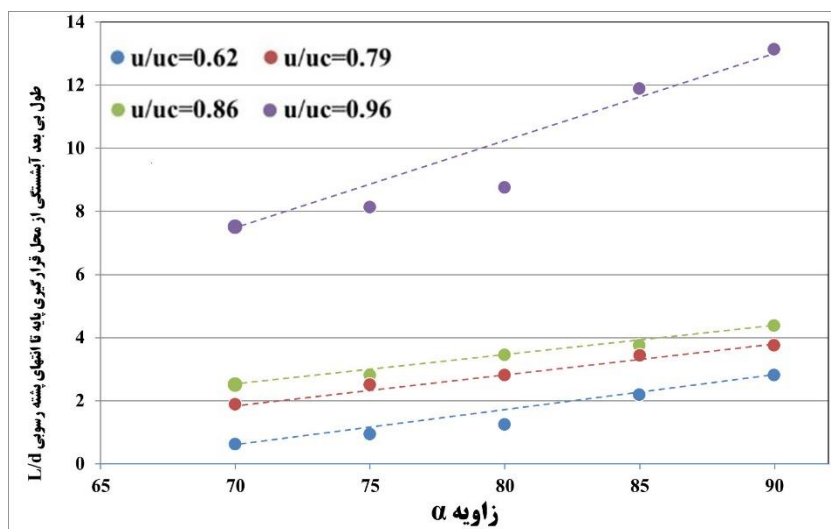
شکل ۱۱-درصد کاهش عمق آبستگي پایه‌های پل نسبت به تغییر سرعت نسبی به ازای زوایای برخورد جریان مختلف



شکل ۱۲-تغییرات عمق بدون بعد آبستگي در زوایای مختلف به ازای تغییرات سرعت نسبی

نمونه شاهد از $d/ds=0/96$ به $d/ds=2/09$ جهش داشته ولی پایه‌های با دماغه مایل روند تقریباً یکسانی در کنترل عمق آبشستگی را نشان می‌دهند. در تمامی پارامترهای بدون بعد U/Uc پایه P5 دارای کمترین مقدار پارامتر عمق آبشستگی می‌باشد.

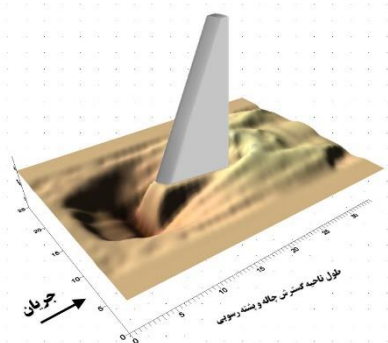
با توجه به شکل ۱۲، پارامتر بدون بعد عمق آبشستگی (ds/d) برای پایه P1 (پایه شاهد) به ازای تمامی پارامترهای بدون بعد سرعت نسبی (U/Uc) بیشتر از بقیه پایه‌ها بوده و این مساله با افزایش پارامتر سرعت نسبی تا $U/Uc=0/86$ بصورت تدریجی می‌باشد، اما در $U/Uc=0/96$ که نزدیک به شرایط بحرانی و آستانه حرکت است.



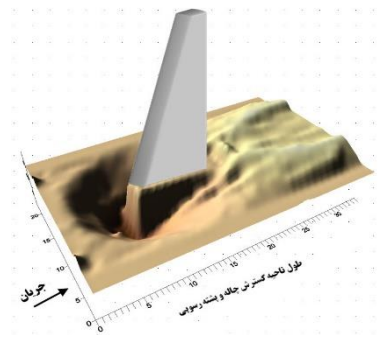
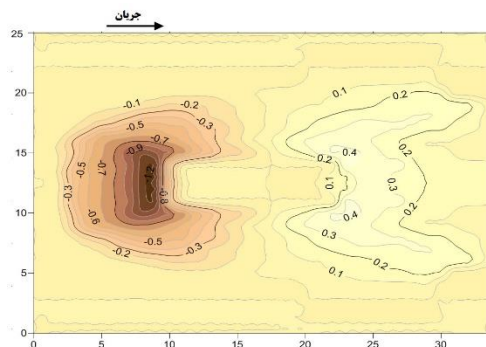
شکل ۱۳- تغییرات طول بدون بعد آبشستگی به ازای تغییرات سرعت نسبی

سرعت‌ها مربوط به پایه P5 بوده، که در سرعت نسبی نزدیک آستانه حرکت ذرات $U/Uc=0/96$ برابر ۴۲ درصد می‌باشد. در ادامه با استفاده از نرم افزار Surfer توپوگرافی بستر برای کلیه پایه‌ها در سرعت نسبی حداکثر ترسیم گردید. شکل‌های ۱۴ تا ۱۸ توپوگرافی بستر را نشان می‌دهند. با توجه به شکل، حفره آبشستگی پایه P1 در پلان دارای ابعاد کم ولی حفره آبشستگی عمیق، ولی پایه P5 در پلان دارای گستردگی بیشتر نسبت به پایه P1 (نمونه شاهد) ولی چاله آبشستگی آن به نسبت پایه شاهد عمق کمی دارد. همچنین با توجه به شکل‌ها اطراف پایه P5 حفره آبشستگی و پشته رسوبی ایجاد شده به دلیل کاهش اغتشاشات اطراف پایه، دارای تقارن و نظم بیشتری نسبت به پایه شاهد می‌باشد. براساس تجزیه و تحلیل ابعادی انجام شده، به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بدون بعد مؤثر بر حداکثر عمق آبشستگی، و روند تغییرات آنها، جهت ارائه یک رابطه ریاضی برای پیش بینی عمق آبشستگی، از برازش غیرخطی استفاده شد. و رابطه مربوطه با استفاده از نرم افزار آماری Spss21 پس از تحلیل با ضریب تعیین $(R^2=0.852)$ ، مطابق رابطه ۸ استخراج گردید:

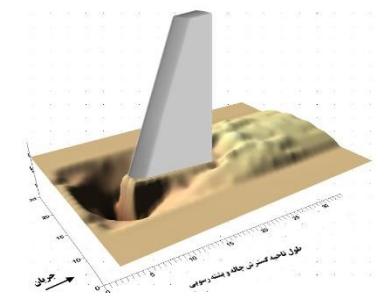
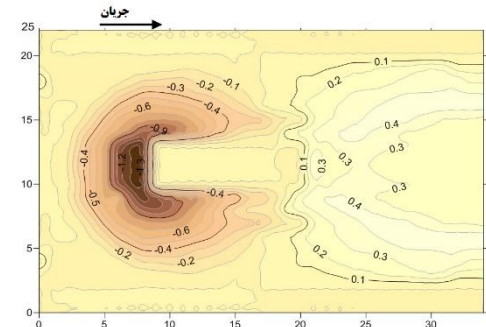
با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۳ تغییرات پارامتر طول بدون بعد آبشستگی به ازای تغییرات سرعت نسبی برای پایه‌های مختلف را نشان می‌دهد، با توجه به شکل، در پارامتر سرعت نسبی از $0/62$ تا $0/86$ نرخ افزایش طول بدون بعد آبشستگی L/d ، برای همه پایه‌ها تدریجی بوده، اما در پارامتر $U/Uc=0/96$ برای تمامی پایه‌ها به دلیل نزدیک شدن به شرایط بحرانی و آستانه حرکت، این پارامتر جهش داشته است. اما برای پایه‌های P3 تا P5 مقدار L/d در محدوده $L/d=8$ می‌باشد در حالیکه برای پایه‌های P1 و P2 این مقدار به بیش از $L/d=12$ می‌رسد که نشان می‌دهد در جریان‌های نزدیک آستانه حرکت، پایه‌هایی که به زاویه برخورد قائم نزدیک‌تر هستند، طول آبشستگی بیشتری را رقم می‌زنند. براساس جدول ۵ ستون $L/d(\%)$ درصد اختلاف طول بی‌بعد آبشستگی پایه‌ها نسبت به شاهد ارائه گردیده است. بر این اساس بیشترین اختلاف در $U/Uc=0/62$ مربوط به پایه P5 با ۷۸ درصد طول بی‌بعد آبشستگی کمتر نسبت به شاهد و به ترتیب ۶۷، ۵۶ و ۲۲ درصد برای پایه‌های P4، P3 و P2 می‌باشد. همچنین با افزایش میزان سرعت نسبی U/Uc از $0/62$ تا $0/96$ میزان درصد اختلاف با نمونه شاهد کاهش می‌یابد اما بیشترین اختلاف در تمامی



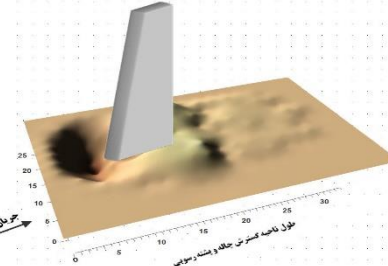
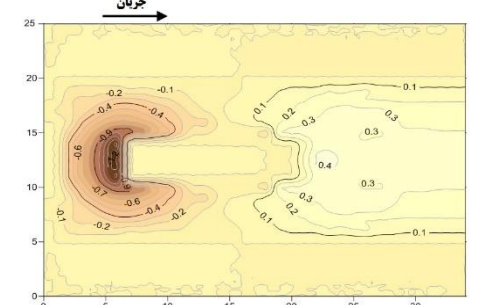
شکل ۱۴- تصویر توپوگرافی آبشستگی اطراف پایه پل با زاویه برخورد ۷۰ درجه



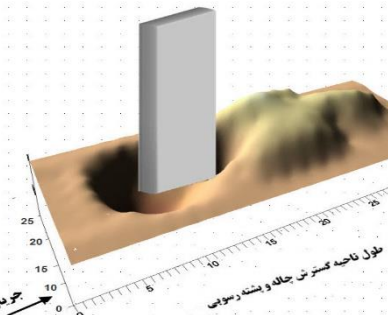
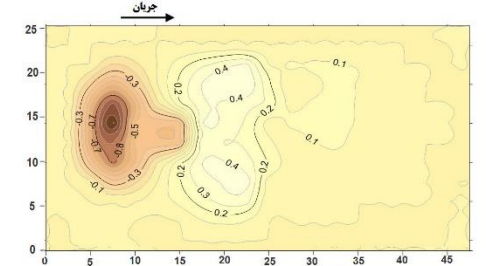
شکل ۱۵- تصویر توپوگرافی آبشستگی اطراف پایه پل با زاویه برخورد ۷۵ درجه



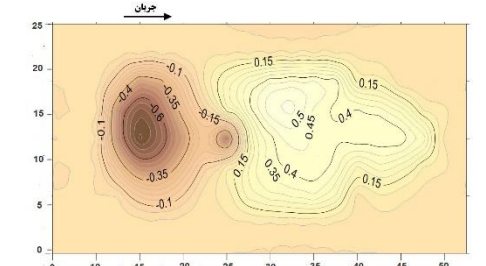
شکل ۱۶- تصویر توپوگرافی آبشستگی اطراف پایه پل با زاویه برخورد ۸۰ درجه



شکل ۱۷- تصویر توپوگرافی آبشستگی اطراف پایه پل با زاویه برخورد ۸۵ درجه



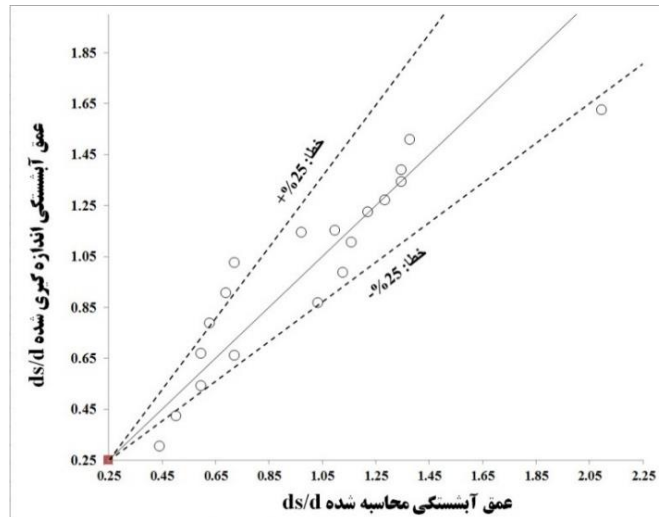
شکل ۱۸- تصویر توپوگرافی آبشستگی اطراف پایه پل با زاویه برخورد ۹۰ درجه



را در سطح خطای $\pm 25\%$ ترسیم گردید.

$$\frac{d_s}{d} = 2.840 \frac{U}{U_c} + 1.361\alpha - 3.235 \quad (8)$$

به منظور نشان دادن میزان دقت رابطه ۸، مقادیر عمق بی بعد محاسبه شده توسط رابطه ۸ در مقابل مقادیر عمق بی بعد آبشستگی که در آزمایشگاه بدست آمده است، ترسیم گردید. شکل ۱۹ دقت این رابطه



شکل ۱۹-مقایسه عمق بی بعد آبشستگی اندازه گیری شده در مقابل محاسبه شده از فرمول

نتیجه گیری

پایه P5 درصد کاهش ۴۷ درصد، P4=۳۸، P3=۳۶ و P2=۳۴ درصد را نشان می‌دهند. که عملکرد بهتری نسبت به بقیه پایه‌ها دارد. (۴) با توجه به در صد اختلاف طول بی بعد آبشستگی پایه‌ها نسبت به شاهد، بیشترین اختلاف در $U/U_c = 0/62$ مربوط به پایه P5 با ۷۸ درصد طول بی بعد آبشستگی کمتر نسبت به شاهد و به ترتیب ۶۷، ۵۶ و ۲۲ درصد برای پایه‌های P4، P3 و P2 می‌باشد. همچنین با افزایش میزان سرعت نسبی U/U_c از $0/62$ تا $0/96$ میزان در صد اختلاف با نمونه شاهد کاهش می‌یابد، اما بیشترین اختلاف در تمامی سرعت‌ها مربوط به پایه P5 بوده که در سرعت نسبی نزدیک آستانه حرکت ذرات $U/U_c = 0/96$ برابر ۴۲ درصد می‌باشد. (۵) حفره آبشستگی و پشته رسوبی ایجاد شده اطراف پایه P5 به دلیل کاهش اغتشاشات اطراف پایه، دارای تقارن و نظم بیشتری نسبت به پایه شاهد می‌باشد. (۶) با کاربرد برآزش غیرخطی چند متغیره رابطه‌ای جهت محاسبه مقدار پارامتر بدون بعد عمق آبشستگی ارائه گردید. که دقت این رابطه در سطح خطای $\pm 25\%$ ترسیم شد. لازم به ذکر است، رابطه بدست آمده در محدوده زوایای دماغه پایه پل و شرایط این پژوهش در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، رابطه بدست آمده در محدوده زوایای دماغه پایه پل و شرایط این پژوهش در نظر گرفته شده است.

در تحقیق حاضر، جهت کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه پل‌ها، با استفاده از تغییر شکل و مایل کردن دماغه پایه در برخورد با جریان، از پنج شکل پایه P1، P2، P3، P4 و P5 که نمونه شاهد با زاویه برخورد جریان با دماغه ۹۰ درجه و بقیه پایه‌ها با کاهش ۵ درجه‌ای برای هر پایه تا زاویه برخورد ۷۰ درجه نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که:

- (۱) با کاهش شیب دماغه از پایه P1 (نمونه شاهد) به پایه P5 عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.
- (۲) با کمتر شدن زاویه برخورد جریان با پایه پل به دلیل انحراف بخشی از خطوط جریان و عدم چرخش آنها به سمت بستر، باعث می‌شود پتانسیل منطقه پرفشاری که در حالت پایه P1 (پایه شاهد) ایجاد گردیده، نسبت به حالتی که زاویه دماغه کاهش می‌یابد تقلیل یابد، و باعث کمتر شدن توان جریان پایین رونده و به سبب آن ضعیف شدن توان جریان‌های نعل اسبی که عامل اصلی توسعه حفره آبشستگی هستند، گردد.
- (۳) پایه P5 در پارامتر $U/U_c = 0/62$ ، درصد کاهش عمق آبشستگی نزدیک به ۹۶ درصد را نشان می‌دهد که گویای این است که در سرعت‌های کمتر از ۶۰ درصد سرعت آستانه حرکت ذرات، مقدار در صد کاهش عمق آبشستگی برای این پایه بیش از ۹۵ درصد است. در پارامتر $U/U_c = 0/96$ که بحرانی ترین حالت و نزدیک ترین مقدار به آستانه حرکت ذرات می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: محسن سلیمانی بابرصاد؛ روش شناسی و تحلیل داده‌ها: محسن سلیمانی بابرصاد، عباس صفائی؛ نظارت و نگارش نهایی: عباس صفائی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

Reference

1. Shirole A, Holt R. Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. Transportation Research Record. 1991;1290:3950. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1290vol1/1290-005.pdf>
2. Shafaei BM, Asghari PSA. Evaluation of pier scour reduction using combination of collars, slots and threading method. Water Resources Engineering. 2018;11(37):41-52. http://wej.miau.ac.ir/article_3057.html?lang=en
3. Chiew Y-M, Melville BW. Local scour around bridge piers. Journal of hydraulic research. 1987;25(1):15-26. <https://DOI.org/10.1080/00221688709499285>
4. Breusers H, Nicollet G, Shen H. Local scour around cylindrical piers. Journal of Hydraulic Research. 1977;15(3):211-52. <https://DOI.org/10.1080/00221687709499645>
5. 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;27(1):183-97. <https://DOI.org/10.1007/s11831-018-09304-w>
6. Chiew Y-M, Guan D, Wei M, Hsieh S-C. Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier. International journal of sediment research. 2019;34(2):118-24. <https://DOI.org/10.1016/j.ijsrc.2018.07.001>
7. Melville BW, Yang Y, Macky GH,

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

مطالعه حاضر فرم‌های رضایت نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

حامی مالی

هزینه‌های مطالعه حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شد.

- bridge piers in close proximity under clear-water and live-bed flow regime. Water. 2019;11(8):1530. <https://DOI.org/10.3390/w11081530>
8. Guan D, Hsieh S-C, Chiew Y-M, Low YM. Experimental study of scour around a forced vibrating pipeline in quiescent water. Coastal Engineering. 2019;143:1-11. <https://DOI.org/10.1016/j.coastalen.2018.10.010>
9. 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;79:371-84. <https://DOI.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.028>
11. Ettema R, Constantinescu G, Melville BW. Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch. 2017. [https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001330](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001330)
12. Pandey M, Sharma P, Ahmad Z, Singh UK. Evaluation of existing equations for temporal scour depth around circular bridge piers. Environmental Fluid Mechanics. 2017;17(5):98195. <https://DOI.org/10.1007/s10652-017-9529-9>
13. Yilmaz M, Yanmaz AM, Koken M. Clear-water scour evolution at dual bridge piers. Canadian Journal of Civil Engineering. 2017;44(4):298307. <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/cjce-2016-0053>
14. Safaei A, Choramin M, Khajavi S, Parmoon AA, Arezoo AA. Analyzing the affective parameters on the amount of

- collar in laboratory model. WALIA journal. 2015(4):17-21.<http://waliaj.com/archive/2015-2/special-issue-4-2015/>
15. Tseng MH, Yen CL, Song CC. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. International journal for numerical methods in fluids. 2000;34(3):20727.[https://DOI.org/10.1002/1097-0363\(20001015\)34:3<207::AID-FLD31>3.0.CO;2-R](https://DOI.org/10.1002/1097-0363(20001015)34:3<207::AID-FLD31>3.0.CO;2-R)
 16. Johnson PA. Advancing bridge-pier scour engineering. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice. 1991;117(1):48-55.
 17. Zarrati A, AR, Rezaei MJ, B Mashahir M, Zokaei M. Effect of collars and bars in reducing the local scour around cylindrical bridge piers. International Journal of Engineering. 2009;22(4):33342.http://www.ije.ir/article_71812.html
 18. Melville B, Sutherland A. Design method for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 1988;114(10):1210-226.[https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:10\(1210\)](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210))
 19. Ettema R, Melville BW, Barkdoll B. Scale effect in pier-scour experiments. Journal of Hydraulic Engineering. 1998;124(6):639-42.[https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:6\(639\)](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:6(639))
 20. Sumer B, Fredsøe J, Christiansen N, Hansen S. Bed shear stress and scour around coastal structures. Coastal Engineering 1994/1995. p. 1595-609.
 21. Bozkus Z, Yildiz O. Effects of inclination of bridge piers on scouring depth. Journal of Hydraulic Engineering. 2004;130(8):827-32.[https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:8\(827\)](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:8(827))
 22. Cai L, Gao Y-y, Qu X-c, Wang B, Zhang B-f. Numerical simulation on flow past two side-by-side inclined circular cylinders at low Reynolds number. China Ocean Engineering. 2019;33(3):34455.<https://DOI.org/10.1007/s13344-019-0033-5>
 23. Vaghefi M, Eghbalnik L, Golbaharhaghighi MR. The Effect of Flow Conditions on Bed Topography in a 180 Degree Bend Containing 6-Inclined-Vertical Pier Groups in a Vane Perpendicular to the Flow. Modares Civil Engineering journal. 2019;19(4):1-16.<https://mcej.modares.ac.ir/article-16-28029-en.html>
 24. Moosaei M, Vaghefi M, Meraji S. 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. 2018;33(4):61-70.<https://DOI.org/10.24200/J30.2018.1264>
 25. 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;20(4):1582593.<https://DOI.org/10.1007/s12205-015-1560-0>
 26. Esmaeili vm, sadati ss, Fazloulia 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 Hydraulics. 2015;10(2):1325.<https://DOI.org/10.30482/JHYD.2015.12973>
 27. Raudkivi AJ, Ettema R. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of hydraulic engineering. 1983;109(3):338-50.[https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))
 28. Melville BW. Pier and abutment scour: integrated approach. Journal of hydraulic Engineering. 1997;123(2):12536.[https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:2\(125\)](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:2(125))
 29. Chiew Y-M. Mechanics of riprap failure at bridge piers. Journal of hydraulic engineering. 1995;121(9):63543.[https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:9\(635\)](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:9(635))
 30. Melville BW, Chiew Y-M. Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 1999;125(1):59-65.[https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:1\(59\)](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59))



31. Laursen EM, Toch A. Scour around bridge piers and abutments. State Library of Iowa. 1956;4:12536.<http://publications.iowa.gov/id/eprint/20237>
32. Arunachalam K. Scour around bridge piers. Journal of the Indian Roads Congress. 1965;2:189-210.https://archive.org/stream/scouraroundbridg00grho/scouraroundbridg00grho_djvu.txt
33. Shen HW, Schneider VR, Karaki S. Local scour around bridge piers. Journal of the Hydraulics Division. 1969.<https://trid.trb.org/view/98453>
34. Neill CR. RIVER-BED SCOUR: A REVIEW FOR BRIDGE ENGINEERS. Canadian Good Roads Association Technical Publication.1964.<https://trid.trb.org/view/97055>
35. Norman VW. Scour at selected bridge sites in Alaska. US Geological Survey, Water Resources Division. 1975;75(32-75).<https://DOI.org/10.3133/wri7532>
36. Richardson EV, Davis SR. Evaluating scour at bridges. National Transportation Library.2001.<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50281>