



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۳ | خرداد ۱۴۰۱ (ص ۵۷۰-۵۵۹)

[DOI:https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.322331.668967](https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.322331.668967)

(مقاله علمی - پژوهشی)

Numerical Modelling of the Effect of Bridge Piers Shape on Bed Shear Stress

HAMID FATAHI¹, MIRALI MOHAMMADI^{2*}

1. Department of Civil Engineering, (Water & Hydraulic Structures), Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.
2. Department of Civil Engineering (Hydraulics & River Engineering Mechanics), Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

(Received: May. 7, 2021- Revised: March. 7, 2022- Accepted: March. 14, 2022)

ABSTRACT

Bridge piers, which are constructed across the rivers, are always prone to the erosion and scouring phenomena. Bed shear stress is one of the main factors of scouring around bridge piers in which there is a direct relationship between bed shear stress and scouring. In the present research work, firstly the laboratory results of cylindrical bridge piers were used for validation of the model, and then the effect of bridge pier's shape on bed shear stress and other effective parameters were studied by numerical modeling and applying Flow-3D software. The cylinder pier experienced the highest amount of bed shear stress. In contrast, the case lenticular shape showed 26% reduction with cylinder shape occurs. The results show that different pier shapes have a perceptible effect on reducing the maximum amount of bed shear stress. This function affects streamlines around the bridge piers, and the formation, length, and power of wake and horseshoe vortices. So that, streams having $-0.1m/s$ behind the cylinder affected the length of $0.2m$ but in lenticular shape, 40% decrease appears. Additionally, the piers with a forehead causes a stronger down-flow. In those sections, because of the presence of horseshoe vortex, streamlines shift to the upstream, so that the negative velocity figures occur in this region.

Keywords: Bridge Pier, Bed Shear Stress, Horseshoe Vortex, Flow-3D.

مدل سازی عددی تأثیر شکل پایه‌های پل بر روی تنش برشی بستر

حمید فتاحی^۱، میرعلی محمدی^{۲*}

۱. گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۲. گروه هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳)

چکیده

پایه پل‌های بنا شده در عرض رودخانه‌ها، همواره مستعد پدیده‌های فرسایش و آبشستگی هستند. تنش برشی بستر یکی از عوامل اساسی در آبشستگی در اطراف پایه پل‌هاست که رابطه‌ای مستقیم میان آن‌ها وجود دارد. در تحقیق حاضر، ابتدا برای صحت‌سنجی مدل از نتایج آزمایشگاهی پایه پل استوانه‌ای شکل استفاده شد و در ادامه به مطالعه تأثیر شکل پایه‌های پل بر روی تنش برشی در کف بستر و سایر پارامترهای مؤثر با مدل سازی عددی و نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. شکل مقاطع پایه‌ها تغییر قابل توجهی در تنش برشی بیشینه را نشان داد. بیشترین تنش برشی در اطراف پایه استوانه‌ای رخ می‌دهد و مقطع عدسی شکل بهترین عملکرد در کاهش تنش برشی بستر را با کاهش ۲۶٪ داشته است. این عملکرد بر روی خطوط جریان در اطراف مقاطع و مشخصاً نحوه تشکیل، طول و قدرت گردابه‌های برخاستگی و نعل اسبی تأثیرگذار بوده است. به گونه‌ای که جریان با سرعت ۰/۱- متر بر ثانیه در مقطع استوانه‌ای، طول ۰/۲ متری را در پشت پایه تحت تأثیر قرار داده است ولی در مقطع عدسی شکل کاهش ۴۰٪ سرعت‌های منفی نسبت به استوانه‌ای را در پشت پایه مشاهده نشان می‌دهد. در مجموع، مقطعی که دارای پیشانی در مقابل عبور جریان بودند، جریان پایین رونده قوی‌تری در پیشانی پایه را سبب شدند. در این مقاطع در بستر جریان به دلیل حضور گردابه‌های نعل اسبی، جریان به سمت بالادست حرکت می‌کند که موجب وقوع سرعت‌های منفی قوی‌تری در این ناحیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پایه پل، تنش برشی بستر، گردابه نعل اسبی، FLOW-3D

مقدمه

دلیل جداسازی جریان از پایه پل در طول پایه، یک لایه مرزی در جداره پایه و در انتهای سطح تماس جریان با پایه در جهت مخالف جریان تشکیل می‌شود. گردابه‌های برخاستگی تشکیل شده در طرفین پایه، در پشت آن به یکدیگر رسیده و با ایجاد مکش، ذرات بستر را در معرض جریان قرار می‌دهند (Mutlu & Sumer & Fredsøe, 2006). مهم‌ترین عامل در مطالعه مشخصات جریان اطراف موانع در داخل بستر، تنش برشی جداره می‌باشد. تنش برشی حاصل از جریان در بستر سبب فرسایش می‌شود و در نهایت ایمنی سازه‌های احداث شده بر روی بستر رودخانه را تهدید می‌کند (Bouabdellah et al., 2013).

(Peggy & Sterling, 1992) برای محاسبه تنش برشی در

بستر پایه پل استوانه‌ای، رابطه (۱) را ارائه داده‌اند:

$$\tau = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(12.27 \frac{V_0}{k_s}\right)\right]^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن پارامترهای نظیر سرعت (V)، عمق جریان (V_0)

و همچنین قطر متوسط ذرات رسوبی (k_s) تأثیرگذار است.

(Wei et al., 1997) عدد رینولدز (Re) را نیز در فرمول

استخراجی خود تأثیر دادند به این صورت که این فرمول برای

راه‌ها از جمله شریان‌های حیاتی در یک کشور هستند و پل‌ها نیز یکی از مهم‌ترین سازه‌های معمول در مسیر راه‌های ارتباطی به‌شمار می‌آیند که در صورت خرابی آنها، به‌ویژه در مواقع بحرانی مانند وقوع سیلاب، شریان‌های حیاتی ارتباطی قطع شده و مشکلات فراوانی را موجب می‌شوند. پدیده آبشستگی یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌ها در سازه‌های هیدرولیکی است و یکی از پارامترهای اساسی در آبشستگی، تنش برشی ناشی از جریان عبوری در کف جریان می‌باشد (Mohammadi, 2001 & 2020). وقتی تنش برشی ایجاد شده بیشتر از تنش برشی بحرانی یا حداکثر تنشی که ذرات قبل از حرکت می‌توانند تحمل کنند باشد، ذرات شروع به حرکت می‌کنند که لحظه شروع حرکت ذرات بسیار حائز اهمیت می‌باشد که این پدیده به آستانه حرکت ذرات رسوبی (*incipient motion*) موسوم است.

به سبب برخورد جریان به پایه و انحراف آن به‌صورت جریان پایین رونده، گردابه نعل اسبی تشکیل می‌شود. بر اساس تحقیقات انجام یافته مهم‌ترین عامل ایجاد حفره آبشستگی، به خصوص در جلوی پایه، تشکیل گردابه نعل اسبی است (Kalalei, 2012). به

میزان ۱۵٪ داشته است. (Sadat Jafari & Ayubzadeh, 2016) با بررسی تنش برشی اطراف گروه پایه کج با استفاده از مدل عددی Flow-3D با قرارگیری شالوده در سه تراز به این نتیجه رسیدند که بیشترین تنش برشی کل در بستر جریان در شرایط کارگذاری شالوده در تراز بستر، که در این شرایط جریان مستقیماً به پایه ها برخورد می کند، رخ داده است ولی در این حالت سطح رویین شالوده مانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه ها به بستر می شود و در نتیجه کاهش آبشستگی داریم. (Guemou et al., 2018) آبشستگی بستر مقاطع استوانه ای و دو-سو-گرد را با استفاده از مدل گردابه های جداسازی شده و با به کارگیری روش حجم محدود، در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی کردند. این شبیه سازی نشان داد که در مقطع دو-سو-گرد تنش برشی در محل اتصال پایه پل به بستر، به میزان ۱۰ تا ۱۲ درصد نسبت به مقطع استوانه ای کاهش داشته است. اثر طوقه بر آبشستگی موضعی اطراف پایه پل دوکی شکل توسط (Taheri & Ghomeshi, 2019) بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد هر چه طول طوقه افزایش یابد، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می یابد و حفره آبشستگی در جلوی پایه نیز کوچک تر می شود. با کاهش عدد فرود جریان و تضعیف جریان های گردابه ای در اطراف پایه، عملکرد طوقه افزایش یافت. در تراز سطح بستر طوقه بهترین عملکرد را با راندمان ۱۰۰٪ در کاهش آبشستگی داشت. (Majedi, Asl et al., 2020) با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان SVM، برنامه ریزی بیان ژن (GEP) و مدل رگرسیون غیرخطی آبشستگی پایه های پل براساس مشخصات هندسی پایه پل را بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که SVM نتایج نزدیکی به واقعیت را پیش بینی نموده است.

با مرور تحقیقات گذشته مشاهده گردید که اکثر مطالعات در زمینه پایه پل با مقطع استوانه ای شکل می باشد، بنابراین در تحقیق حاضر الگوی هیدرودینامیک جریان در اطراف پایه های پل با مقطع مختلف با استفاده از نرم افزار Flow-3D مدل سازی شد. سپس نتایج تأثیر شکل پایه های پل بر روی تنش برشی در کف بستر و سرعت جریان در بالادست و پایین دست پایه پل بررسی و مقایسه گردید.

مواد و روش ها

در این مقاله برای شبیه سازی از داده های مدل آزمایشگاهی محققین (Ferdous & Nallamuthu, 1988) استفاده شد و صحت سنجی نتایج خروجی با مقایسه پروفیل های خروجی نرم افزار با نتایج متناظر آزمایشگاهی صورت گرفت. مطابق شکل (۱)، آزمایش ها در فلومی به طول ۲۰ متر و به عرض ۱/۲۲ متر انجام

شرایط جریان با عمق بیشتر از دو برابر قطر پایه ($y/D > 2$) در پایه استوانه ای صدق می کند.

$$\tau_{max} = 0.094\rho V^2 \left[\frac{1}{\log Re} - \frac{1}{10} \right] \quad (\text{رابطه ۲})$$

(Mohammadi, 2008) با مقایسه تنش برشی بستر در نوک

و انتهای پایه های مستطیلی گردگوشه در اثر دبی و شیب های مختلف کانال آزمایشگاهی، بیشترین تنش برشی وارد بر بستر را در نوک پایه برداشت کرد و این نتیجه حاصل شد که در پشت پایه تنش برشی کاهش چشم گیری پیدا می کند، که این نتیجه حتی در شیب های تند نیز صادق بوده است.

(Salaheldin et al., 2004) با استفاده از مدل سه بعدی

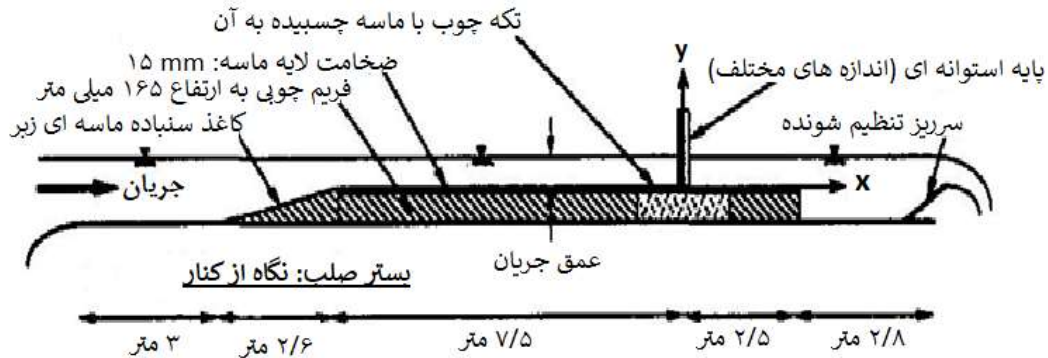
نرم افزار فلوئنت، آبشستگی و تنش برشی حول پایه استوانه ای در آب زلال را بررسی کردند. مدل های مختلف آشفتگی $k-\epsilon$ در این شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت و نسبت به اندازه گیری های آزمایشگاهی این شبیه سازی منطقه بزرگتری را مستعد آبشستگی نشان داد. (Besharati & Hakimzadeh, 2010)، از بررسی انواع پایه های مخروطی با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و تحلیل عددی فلوئنت دریافتند که سرعت های قائم در پاشنه بالادست پایه و همچنین حداکثر سرعت افقی جریان در مجاورت پایه که از عوامل تأثیرگذار بر تنش برشی بیشینه و آبشستگی بستر این ناحیه می باشد، کاهش می یابد. (Hassanzadeh et al., 2011)، اثر اشکال مختلف پایه پل از جمله مقاطع دایره ای، دوکی، بیضی، مستطیلی، مربعی و مستطیلی گرد گوشه بر الگوی جریان اطراف آن به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار فلوئنت شبیه سازی کردند. نتایج حاصل نشان داد با افزایش طول مقطع از طول گردابه های تشکیل شده در اطراف پایه ها کاسته شده است. همچنین تأثیر این مقاطع بر تنش برشی بستر بیان نمود مقاطعی که در آن ها خطوط جریان تغییرات اندکی را تجربه کرده اند، تنش برشی کمتری نیز داشته اند. در تحقیق دیگری (Bouabdellah et al., 2013) تأثیر شکل پایه های آیرودینامیکی (پایه های مستطیلی با گوشه های گرد در ابتدا و انتها) بر شدت جریان های پایین رونده و تنش برشی بستر در مقایسه با پایه های دایره ای شکل را مورد توجه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در ازای عرض مقطع ثابت پل؛ مقطع گرد گوشه در پیشانی، مقدار تنش برشی در محل اتصال بین پایه و بستر در بالادست را نسبت به مقطع دایره ای شکل بهتر کاهش می دهد.

(Rashki et al., 2013) با بررسی الگوی جریان و تنش

برشی اطراف پایه طوقه دار در مقایسه با پایه پل ساده، به این نتیجه رسیدند که جاگذاری طوقه در ترازهای منفی نزدیک بستر بهترین عملکرد را داشته که در این حالت مقدار تنش برشی بستر اطراف پایه طوقه دار نسبت به پایه ساده کاهش چشم گیری و به

مشاهده نتایج تنش برشی از داده‌های C2R مقاله مرجع که بیانگر حالت بستر صلب می‌باشد، استفاده گردید.

ذرات رسوبی با قطر متوسط (d_{50}) برابر با ۱/۸۴ میلی متر و با ضخامت ۰/۲ متر در بستر کانال استفاده شده است. برای



شکل ۱- مقطع طولی مدل فیزیکی (Ahmed & Rajaratnam, 1998)

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی شبیه‌سازی جریان (Ahmed & Rajaratnam, 1998)

شماره آزمایش	وضعیت بستر	d_{50} (mm)	τ_c (Pa)	r (mm)	Q (L/s)	y_0 (mm)	U_0 (m/s)	Fr (-)	τ_{00} (Pa)
C2R	صلب	۱/۸۴	۱/۲۱۴	۴۴/۵	۶۵	۱۸۲	۰/۲۹۲۷	۰/۲۲	۰/۴۵۸۴

سیال یا VOF در مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد است (Qasem Zadeh, 2018).

به طور کلی معادله پیوستگی جرم به صورت رابطه (۳)

است:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این رابطه V_f کسر حجمی جریان، ρ دانسیته جرمی سیال، عبارت پخش آشفتگی و R_{SOR} منبع جرم هستند. مؤلفه‌های سرعت جریان (u, v, w) در جهات (x, y, z) یا (r, θ, z) هستند. A_x ، A_y و A_z برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهات x ، y و z است و مقدار ضریب R بستگی به نوع سیستم مختصات دارد به طوری که در مختصات کارتزین، R برابر یک و ξ برابر صفر است. در مختصات استوانه‌ای ξ برابر یک است.

معادلات حرکت برای مؤلفه‌های سرعت جریان (u, v, w) در سه جهت مختصات یا به عبارت دیگر معادلات ناویه-استوکس به صورت روابط (۴)، (۵) و (۶) بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \xi \frac{A_y v^2}{x V_f} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} (u - u_w - \delta u_s) \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \xi \frac{A_y u v}{x V_f} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} (v - v_w - \delta v_s) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} (w - w_w - \delta w_s) \quad (\text{رابطه ۶})$$

ناشی از لزجت، (b_x, b_y, b_z) افت جریان در محیط‌های دارای

در جدول (۱) τ_c تنش برشی بحرانی شیلدرز، Fr عدد فرود

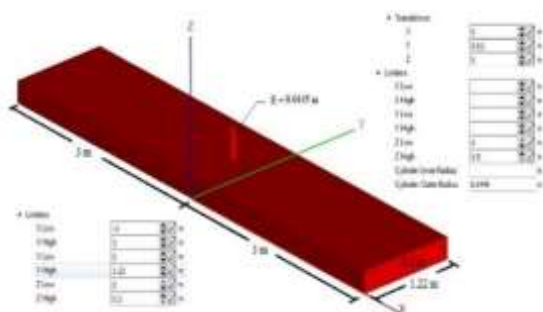
جریان ورودی و τ_{00} تنش برشی بستر اندازه‌گیری شده در اثر جریان ورودی با بکارگیری لوله پراوتل می‌باشد. همه این پارامترها در حالت بدون حضور پایه در بستر جریان برداشت شده است تا حضور آن تأثیری بر پارامترها نداشته باشد.

مدل عددی FLOW-3D

FLOW-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان را دارد. معادلات حاکم در این مدل، معادلات معروف ناویه-استوکس و معادله بقای جرم (پیوستگی) است و برای حل آشفتگی جریان نیز از پنچ روش مختلف استفاده می‌شود. شبکه حل در این مدل متشکل از سلول‌های مکعب مستطیلی است. شاید این نوع شبکه در نگاه اول به عنوان یک محدودیت مطرح شود، در صورتی که اولاً به دلیل تولید آسان این نوع شبکه، نظم مناسب و نیاز به حافظه کمتر در آن و ثانیاً به دلیل به کارگیری دو ابزار مفید VOF و FAVOR در مدل FLOW-3D، شبکه حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود. یکی از قابلیت‌های این برنامه در زمینه آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش حجم

شتاب‌های (G_x, G_y, G_z) شتاب‌های بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های

آزمایشگاهی در جهت کاهش زمان شبیه سازی، مدل سازی شده است. سایر شرایط مرزی مورد استفاده جهت معرفی مدل مورد نظر به نرم افزار قابل ملاحظه می باشد که شرط ورودی از نوع دبی با ارتفاع مشخص سیال و دیواره ها از نوع Wall و شرط خروجی از نوع Specified Pressure با ارتفاع $0/381$ متر سیال برای تأمین ارتفاع تعریف شده از سیال در کانال فلوم که برای این منظور در مقاله مرجع از یک سرریز واقع در انتهای فلوم مطابق شکل (۱) استفاده شده است.

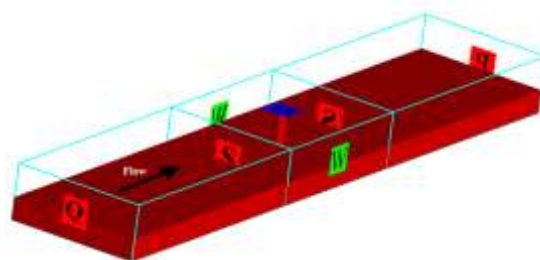


شکل ۲- شرایط مرزی و ابعاد مدل شبیه سازی شده در FLOW-3D

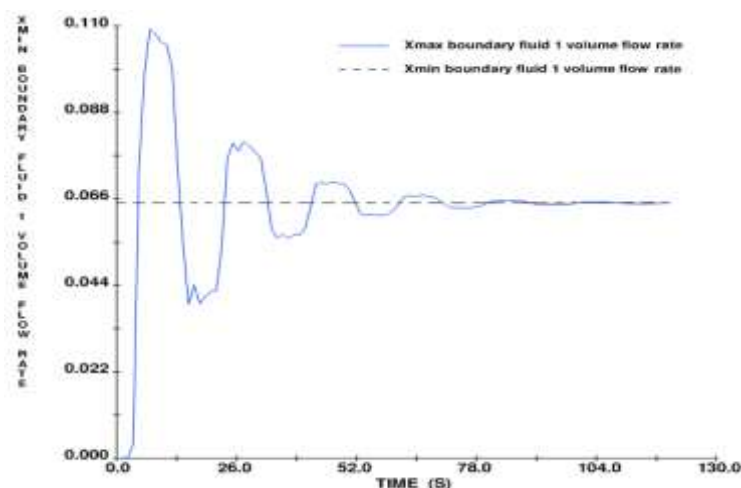
در کناره پل در حالت موج، با اندازه های بسیار ریز تا بسیار درشت صحت سنجی صورت گرفته است. با ریزتر کردن اندازه مش ها تا $0/01 - 0/02$ متر بر دقت نتایج خروجی افزوده می شود ولی بعد از آن ریزتر کردن ابعاد مش ها تأثیری بر نتایج خروجی ندارد. با توجه به شکل (۴)، نتایج دو اندازه مش نهایی کاملاً بر یکدیگر منطبق است با این تفاوت که مش ها با اندازه $0/01 - 0/015$ متر با داشتن نتایج یکسان با نتایج اندازه مش های $0/01 - 0/02$ متر، زمان شبیه سازی را بسیار افزایش می دهد.

خلل و فرج و عبارت آخر سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است. که در آن: $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ مؤلفه های سرعت جزء منبع است. $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ مؤلفه های سیال در سطح منبع نسبت به خود آن است.

شرایط مرزی و همچنین ابعاد میدان حل مطابق شکل (۲) در نرم افزار پیاده شده است. به دلیل پر اهمیت بودن نتایج خروجی در اطراف پایه های پل ها از مش بندی ریزتر در اطراف آن ها استفاده گردید. قابل ذکر است ۶ متر از طول ۲۰ متری فلوم



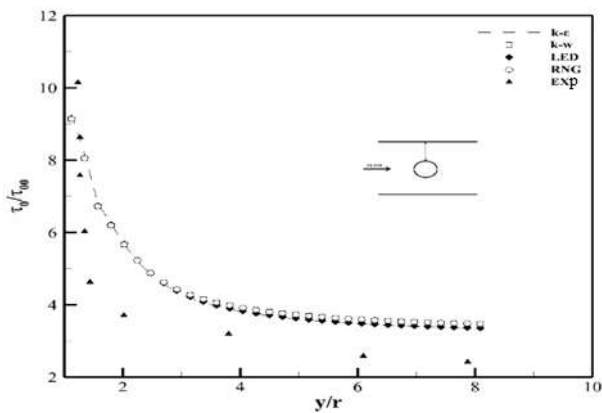
همان طور که بیان شد ۶ متر از طول ۲۰ متری فلوم آزمایشگاهی برای کاهش زمان شبیه سازی، استفاده شد. حال باید اطمینان حاصل کرد که جریان ورودی در طول کانال شبیه سازی "توسعه یافته" باشد. براساس شکل (۳)، حجم خروجی جریان در نهایت با حجم ورودی یکسان می شود و می توان گفت که جریان در کانال شبیه سازی "توسعه یافته کامل" می باشد. در این تحقیق از مش بندی تو-در-تو برای ریزتر کردن مش بندی در اطراف پایه پل استفاده شده است و برای به دست آوردن اندازه مش های بهینه، از ۵ اندازه برای محاسبه تنش برشی



شکل ۳- نمودار حجم ورودی و خروجی جریان به کانال شبیه سازی

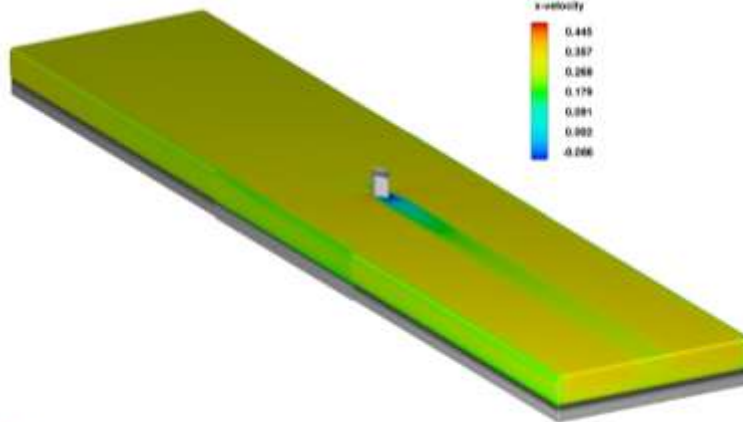
داده‌هاست.

شکل (۵) سرعت طولی جریان در ارتفاع بی بعد شده سیال، که در آن ارتفاع مشخص از سیال و $z_0 = 0.182$ عمق کل سیال می‌باشد، در نقطه $x/r = -2.5$ و $y = 0.61 m$ ، در مدل‌های مختلف حل آشفتگی جریان را با اطلاعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد. براساس این نمودارها سرعت طولی جریان در نزدیکی بستر بسیار کاهش می‌یابد و رفته رفته با حرکت به سمت سطح آب بر سرعت جریان افزوده می‌شود.

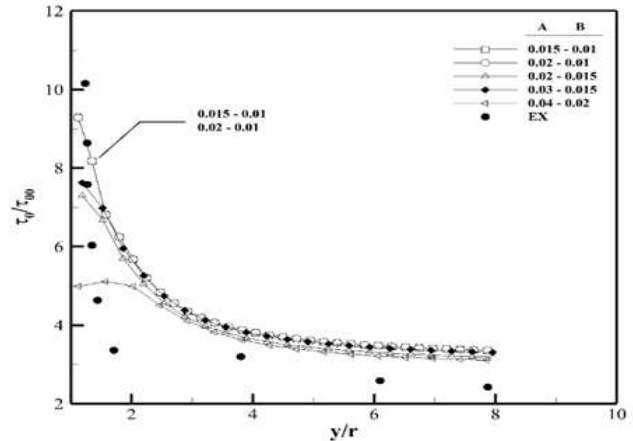


شکل ۵- سرعت طولی جریان در عمق مدل‌های حل آشفتگی مختلف، $y=0.61m$; $x/r=-2.5$

همچنین در شکل (۶) نمایی از وضعیت سرعت‌های جریان عبوری در امتداد مسیر جریان از اطراف پایه پل مستطیلی شکل گردگوشه برای مدل آشفتگی برتر (RNG) ارائه شده که نشان از تغییرات سرعت در اطراف پایه پل است.



شکل ۶- کانتور سرعت جریان عبوری از پایه پل با مقطع مستطیلی گردگوشه



شکل ۴- تأثیر ابعاد مش بندی بر نتایج خروجی

برای واسنجی مدل از روابط خطا: (۱) درصد خطا (%E) و (۲) متوسط مجذور مربعات خطا (RMSE) مطابق جدول (۲) استفاده شده است. باید توجه کرد که هر چقدر مقادیر محاسبه شده برای این دو پارامتر به صفر نزدیک تر باشند، نشان از دقت بیشتر مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی دارد.

جدول ۱- روابط خطای مورد استفاده جهت واسنجی مدل

معادله	نام معادله
$\%E = \frac{\sum_{i=1}^N X_{mi} - X_{pi} }{\sum_{i=1}^N X_{mi}} \times 100$	درصد خطا (%E)
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{mi} - X_{pi})^2}{N}}$	متوسط مجذور مربعات خطا (RMSE)

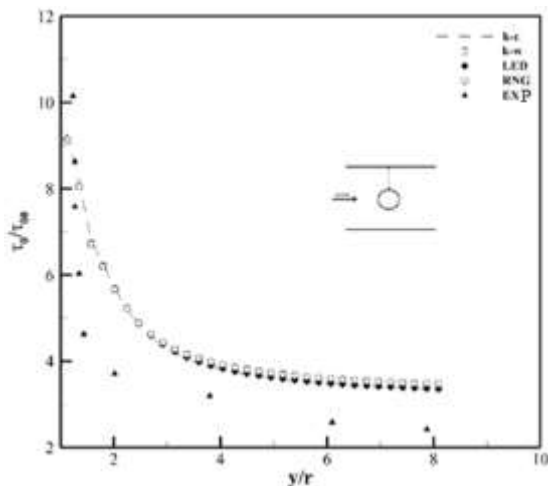
در روابط جدول بالا X_p مقادیر برآورد شده توسط مدل عددی، X_m مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه و N ، تعداد

برشی به ازای هر مدل آشفتگی نسبت به اطلاعات آزمایشگاهی

در جدول (۳) مجذور مربعات خطای محاسبه شده تنش

نشان می‌دهد. بر اساس نتایج برداشت شده، مدل حل آشفتگی $k - \varepsilon$ دارای خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌های حل آشفتگی است.

در این تحقیق نتایج تنش برشی مهم‌تر است، پس سعی شده مدل آشفتگی که دارای حساسیت بالاتری روی این پارامتر است انتخاب شود و لذا مدل حل آشفتگی $k - \varepsilon$ برای شبیه‌سازی مراحل پیشرو انتخاب شد. جدول (۵) مقایسه بین نتایج چهار پارامتر اساسی در پژوهش حاصل از شبیه‌سازی با به‌کارگیری مدل حل آشفتگی $k - \varepsilon$ و نتایج فلوم آزمایشگاهی صورت گرفته را نشان می‌دهد. این نتایج تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهند و مقدار خطا بسیار کم می‌باشد که در نتیجه می‌توان به نتایج خروجی از شبیه‌سازی اطمینان داشت.



شکل ۷- حداکثر تنش برشی کنار پایه در حالت اولیه برخورد موج با پایه، $x/r=0$

محاسبه شده است. بر اساس این جدول مدل‌های حل آشفتگی $k - \varepsilon$ و RNG مقدار خطای کمتری دارند. همچنین با توجه به مطالعات عددی انجام شده بر روی الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل مانند مطالعات (Salaheldin et al., 2004) و (Ghaderi & Abbasi, 2019) نتایج مربوط به مدل‌های حل آشفتگی $k - \varepsilon$ و RNG همگرایی بهتری از خود نشان داده و نتایج نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی دارد.

جدول ۳- مجذور مربعات خطای محاسبه شده تنش برشی به ازای هر مدل آشفتگی

مدل حل آشفتگی	RMSE
$k - \varepsilon$	۰/۰۱۸
$k - w$	۰/۰۲۵
LED	۰/۰۲۱
RNG	۰/۰۱۶

بلافاصله بعد از جاری شدن جریان در کانال، موجی از جریان به سمت پایه حرکت می‌کند و برخورد آن با پایه، حداکثر مقدار تنش برشی در کناره پایه را سبب می‌شود. بیشینه نسبت برداشت شده است. در این رابطه τ_0 ، تنش برشی در محل برداشت و τ_{00} ، تنش برشی کف در حالت بدون حضور پایه می‌باشد. این نسبت در شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های حل آشفتگی مختلف، مطابق شکل (۷) محاسبه شده است.

جدول (۴) بیشینه مقدار تنش برشی بی‌بعد در هر مدل حل آشفتگی و خطای هر کدام نسبت به نتیجه آزمایشگاهی را

جدول ۴- درصد خطای محاسبه شده بیشینه تنش برشی به ازای هر مدل آشفتگی

مدل حل آشفتگی	τ_0/τ_{00}	درصد خطا %E
آزمایشگاهی (Exp.)	۱۰	-
$k - \varepsilon$	۹/۳	۷
$k - w$	۹/۱۴	۸/۶
LED	۹/۱۵	۸/۵
RNG	۹/۱۴	۸/۶

جدول ۵- صحت سنجی پارامترهای عدد فرود، عمق، سرعت و تنش برشی جریان در کف کانال

پارامتر	مقدار آزمایشگاهی	مقدار شبیه‌سازی
Fr	۰/۲۲۱	۰/۲۲۲
عمق جریان (m)	۰/۱۸۲	۰/۱۸۲
U_0 (m/s)	۰/۲۹۳	۰/۲۹۵
τ_{00} (Pa)	۰/۴۵۸	۰/۴۰۵

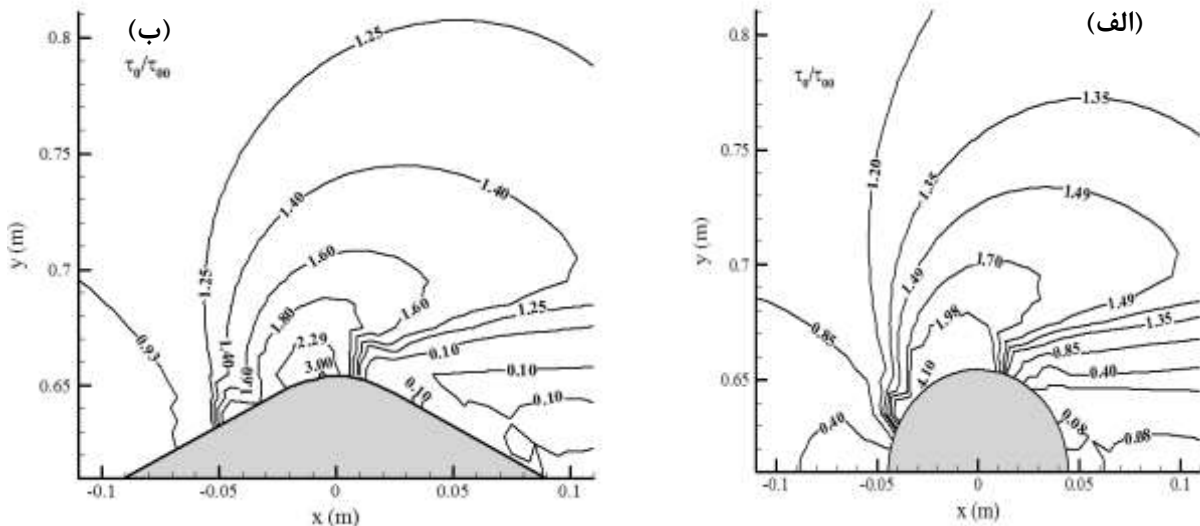
استوانه‌ای و عدسی شکل ارائه شده است. شکل (۸-الف) مقطع استوانه‌ای شکل دارای بیشترین و (۸-ب) مقطع عدسی شکل

نتایج و بحث

در شکل (۸) تنش برشی جریان در کف کانال در دو مقطع

انجام شده در زمینه آبستگي برای مقطع استوانه‌ای، شروع این پدیده در محدوده زوایای ۷۵ تا ۸۲ درجه از محور مرکزی کانال اتفاق می‌افتد. براساس خروجی‌های تنش برشی، حداکثر مقدار تنش برشی نیز در همین محدوده محاسبه شده است. با حرکت در عرض پایه و دور شدن از پایه مقدار تنش برشی کاسته می‌شود و این به دلیل کاسته شدن از تمرکز جریان در این نقاط است. تنش برشی حداکثر بی بعد شده در مقطع عدسی شکل کاهش قابل توجهی نسبت به مقاطع دیگر داشته است. کاهش تقریباً ۲۶ درصدی نسبت به مقطع استوانه‌ای نشان از عملکرد قابل قبول آن دارد. بعد از برخورد جریان با مقطع، رفته رفته تنش برشی افزایش می‌یابد و در نقطه‌ای که برگشت جریان به بیشترین مقدار خود می‌رسد، تنش برشی بیشینه اتفاق می‌افتد. در پشت پایه به دلیل وجود جریان‌های برگشتی و برخاستگی تنش برشی به کمترین مقدار خود می‌رسد.

کمترین تنش برشی را داشته‌اند. حال آنکه در مقطع عدسی شکل ابتدای تیز مقطع باعث هدایت بهتر و ملایم جریان به سمت پایین دست می‌شود و آن می‌تواند عاملی در جهت کاهش بیشینه تنش برشی شود. در مقاطع پایه دارای پیشانی، به دلیل اغتشاش ایجاد شده در نوک پایه، در کناره‌های مقطع برگشت جریان بیشتری رخ می‌دهد که همین امر سبب افزایش تنش برشی در این نواحی می‌شود. تنش برشی بیشینه در اکثر مقاطع، در قسمتی از مقطع رخ می‌دهد که مقطع بیشترین عرض از کانال را اشغال کرده است و این مقدار در پایه‌هایی که دارای پیشانی هستند، افزایش می‌یابد. لذا ایجاد یک اصلاح در نوک پایه به صورتی که به هدایت بهتر جریان به سمت پایین دست مقطع کمک کند، می‌تواند در کاهش تنش برشی تأثیر گذار باشد. بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی بیشینه تنش برشی در مقاطع مختلف نشان داد که بیشترین تنش برشی در مقطع استوانه‌ای به دست می‌آید. براساس آزمایش‌های




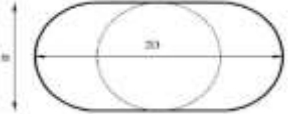

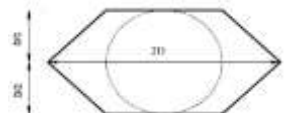
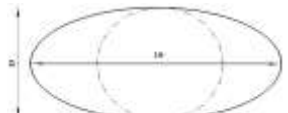

شکل ۸- تنش برشی جریان در کف کانال در دو مقطع: (الف) استوانه‌ای و (ب) عدسی شکل

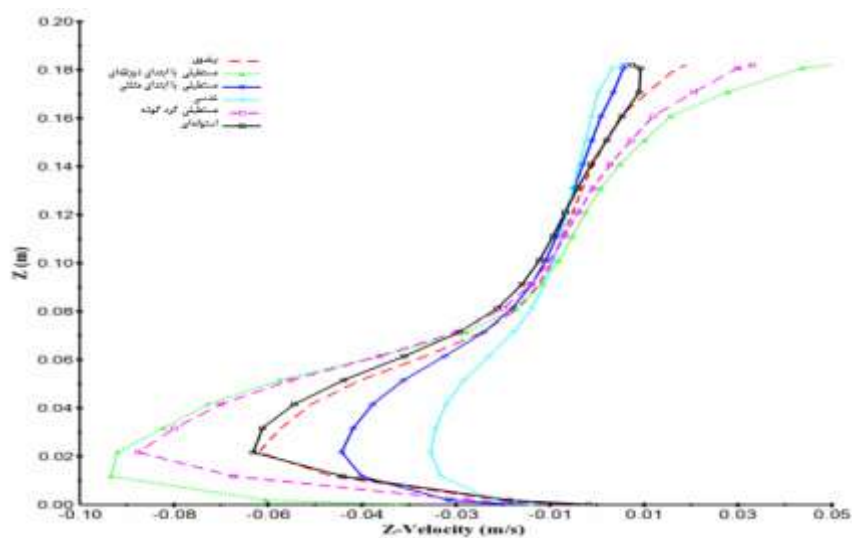
نتایج مربوط به مقادیر سرعت‌های افقی جریان در جلوی پایه‌های پل در مقاطع مختلف در شکل (۱۰) آورده شده است. جریان در برخورد با مقاطع پایه‌های پل با نوک پهن باعث ایجاد جریان‌های پایین رونده قوی‌تری می‌شوند و از این رو در بستر کانال جریان‌های برگشتی به سمت بالادست مطابق شکل (۱۰) ایجاد می‌شوند. در این نوع مقاطع، سرعت افقی طبق جدول (۷) دارای مقادیر بیشتری نسبت به سایر مقاطع می‌باشند. در نوک پایه همه مقاطع به جز دوکی شکل و عدسی شکل، سرعت جریان قبل از برخورد جریان با پایه دچار افت شدید شده و به عدد m/s ۰/۴۶ تقلیل می‌یابد. در مقاطع دوکی، عدسی و بیضوی محدوده با سرعت منفی در جلوی پایه دیده نمی‌شود به این معنی که جریان پایین رونده در این مقاطع ضعیف است. سرعت جریان

در جدول (۶) بیشترین تنش برشی در هر مقطع و کاهش هر کدام نسبت به مقطع استوانه‌ای آورده شده است. در مقاطع با پیشانی مثلثی شکل، جریان به آرامی از کنار مقطع عبور می‌کند و برگشت در نوک پایه اتفاق نمی‌افتد، بنابراین جریان پایین رونده بسیار ضعیفی اتفاق می‌افتد. ولی در مقاطع دارای پیشانی، خطوط جریان در نوک پایه دچار یک اغتشاش می‌شود که باعث ایجاد جریان پایین رونده و متعاقباً از برخورد خطوط جریان با کف بستر، گردابه‌های نعل اسبی قوی‌تری تشکیل می‌شوند. بنابراین در مقاطع با پیشانی، در کف بستر شاهد جریانی در مسیر مخالف جریان اصلی هستیم که همان گردابه‌های نعل اسبی هستند و بعد از تشکیل، مقداری به سمت بالادست جریان حرکت می‌کنند. که این موارد را در شکل (۹) و جدول (۶) می‌توان مشاهده نمود.

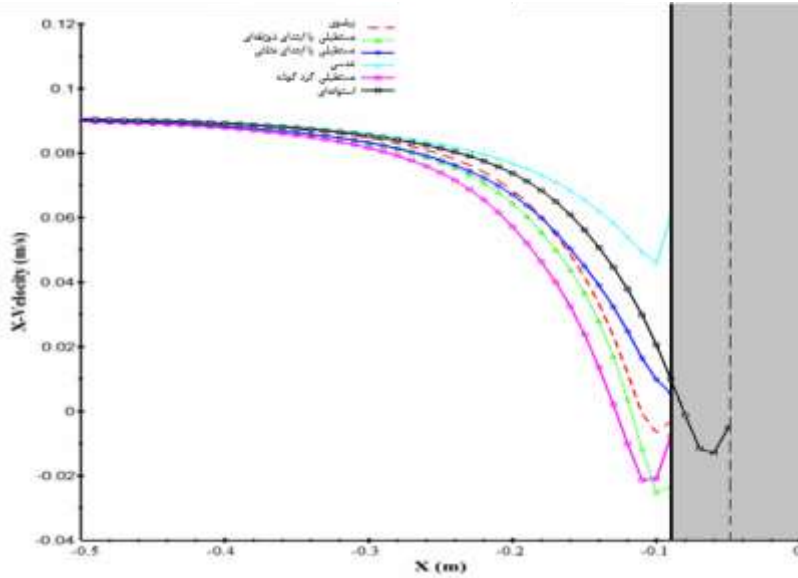
برگشتی در جلوی پایه در مقاطع با نوک های دوزنقه ای و گرد گوشه بیش از سایر مقاطع بوده و در جدول نیز (۷) آمده است.

جدول ۲- مقادیر سرعت جریان نسبی قائم در نوک پایه، بیشینه تنش برشی بی بعد و نسبت تغییرات در مقاطع مختلف

شکل مقطع پایه پل	بیشینه تنش برشی بی بعد $max(\tau_0/\tau_{00})$	کاهش نسبت به مقطع استوانه ای (%)	سرعت جریان نسبی قائم در نوک پایه
	۴/۱۰	صفر	-۰/۰۶۴
	۳/۳۷	۱۷/۸	-۰/۰۸۸
	۳/۱۱	۲۴	-۰/۰۹۵
	۳/۱۷	۲۲/۶	-۰/۰۴۸
	۳/۰۷	۲۵	-۰/۰۶۴
	۳/۰۴	۲۵/۸	-۰/۰۲



شکل ۹- سرعت قائم جریان (V_z) در نوک پایه مقاطع



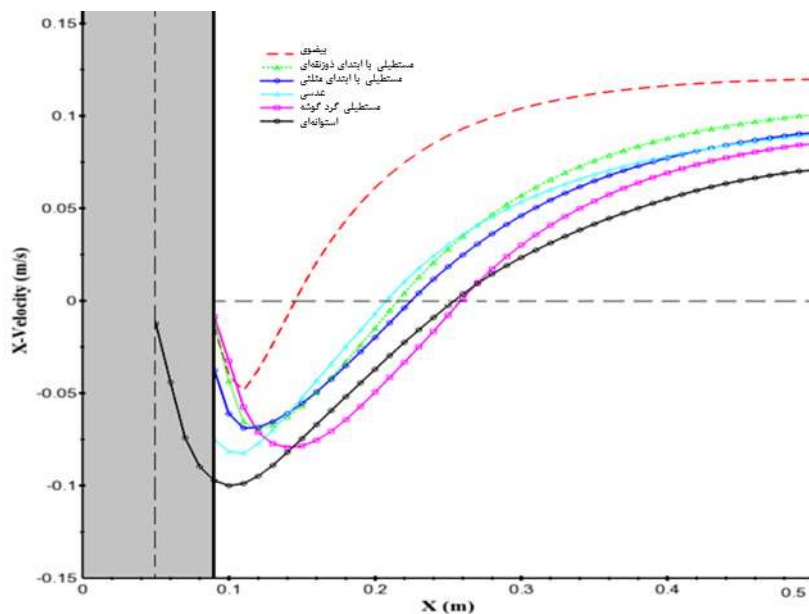
شکل ۱۰- سرعت افقی جریان (V_x) در نوک پایه در مقاطع مختلف

جدول ۷- مقدار سرعت افقی جریان در نوک پایه‌ها و در بستر جریان

شکل مقطع	سرعت افقی در نوک پایه
بیضوی (Elliptical)	-۰/۰۰۶
مستطیلی با ابتدای دوزنقه‌ای (Trapezoidal)	-۰/۰۲۵
عدسی (Lenticular)	-۰/۰۴۶
مستطیلی با ابتدای مثلثی (Triangular)	۰/۰۰۶
مستطیلی گرد گوشه (Oblong)	-۰/۰۲۱
استوانه‌ای (Cylinder)	-۰/۱۳

برخاستگی در مقطع گردگوشه طول بیشتری از جریان را تحت تأثیر قرار داده است. مقاطع عدسی، نوک مثلثی و نوک دوزنقه‌ای به تقریب عملکرد یکسانی را نشان می‌دهند.

در پشت پایه قوی‌ترین گردابه‌های برخاستگی تشکیل شده مربوط به مقطع دوکی شکل است (شکل ۱۱). طول تأثیر این گردابه‌ها نیز در این مقطع بزرگ‌تر است. بعد از آن گردابه‌های



شکل ۱۱- سرعت افقی جریان (V_x) در پشت پایه‌ها و در بستر جریان

جدول ۸- مقدار سرعت افقی جریان در پشت پایه ها و در بستر جریان

شکل مقطع پایه	حداقل سرعت در پشت پایه (m/s)	حداکثر طول تحت تأثیر (m)
بیضی (Elliptical)	-۰/۰۵	۰/۰۵۵
مستطیلی با ابتدای دوزنقه‌ای (Trapezoidal)	-۰/۰۷	-۰/۱۲۵
عدسی (Lenticular)	-۰/۰۸	۰/۱۱۹
مستطیلی با ابتدای مثلثی (Triangular)	-۰/۰۷	۰/۱۳۵
مستطیلی گرد گوشه (Oblong)	-۰/۰۸	۰/۱۶۹
استوانه‌ای (Cylinder)	-۰/۱	۰/۲

(Nallamuthu, 1988) تطابق بهتری دارد.

۴- تنش برشی در همه اشکال مقاطع پایه‌ها در قسمتی از مقطع اتفاق می‌افتد که دارای بیشینه برگشت جریان است. در این ناحیه، انحراف جریان در اثر برخورد با پایه باعث افزایش موضعی تنش برشی در اطراف پایه‌ها می‌شود. در مقطعی که نوک پایه تا این قسمت دارای شیب ملایم است، تنش برشی کاهش چشم‌گیری دارد. در پایه با نوک عدسی شکل کاهش ۲۶ درصدی و در مقطع بیضی کاهش ۲۵ درصدی نسبت به مقطع استوانه‌ای به ثبت رسید.

۵- جریان‌های پایین‌رونده قوی‌تری در جلوی پایه مقطعی که دارای پیشانی سد کننده مسیر جریان هستند، تشکیل می‌شود. طوری که بعد از برخورد جریان اصلی با قسمت جلوی پایه در این مقطع، جریان پایین رونده به سمت بستر حرکت می‌کند که پس از برخورد با کف کانال جریان قسمتی از آن به سمت بالادست پایه حرکت می‌کند و سبب تشکیل گردابه‌های نعل اسبی می‌شود که این قسمت را با سرعت‌های منفی در نتایج خروجی از نرم‌افزار می‌توان مشاهده نمود. مقاطع مستطیل با نوک دوزنقه‌ای و مستطیل گردگوشه به دلیل داشتن پیشانی بزرگ دارای جریان‌های پایین رونده قوی‌تری بودند. این نوع جریان‌ها در مقاطع دوکی، عدسی، بیضی و مستطیلی با نوک مثلثی مشاهده نشدند.

۶- در پشت پایه‌ها ناحیه‌ای شامل سرعت‌های حداقل تشکیل می‌شود که همان ناحیه تحت تأثیر گردابه‌های برخاستگی است که در مقاطع مختلف طول‌های متفاوتی را درگیر می‌کنند. در این ناحیه نیز همانند ناحیه تحت تأثیر گردابه‌های نعل اسبی، سرعت‌های منفی در جهت طولی که بیانگر حرکت جریان به سمت بالادست است، تشکیل می‌شود. مقطعی که در پشت آن‌ها مانعی در مقابل جریان برگشتی از ناحیه سکون را ندارند، سرعت‌های منفی بزرگتری تحمیل می‌شوند و طول بیشتری نیز درگیر این گردابه‌ها می‌شود. این گردابه‌ها در مقطع استوانه‌ای شکل با سرعت -۰/۱ متر بر ثانیه و طول مؤثر ۰/۲۰ متر در پشت پایه بیشینه تأثیر و در مقطع بیضی با سرعت -۰/۰۵ متر بر ثانیه

جدول (۸) بیشینه سرعت‌های حداقل در پشت پایه‌ها را بیان می‌کند. بر اساس آن در مقطع استوانه‌ای حداقل سرعت -۰/۱ متر بر ثانیه ثبت شده است. مقطع بیضی با مقدار -۰/۰۵ متر بر ثانیه کاهش ۵۰ درصدی نسبت به مقطع استوانه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین در مقطع استوانه‌ای گردابه‌های برخاستگی، طول ۰/۲ متر بعد از پایه را تحت تأثیر قرار داده‌اند. مقطع بیضی با ثبت طول ۰/۰۵۵ متر، کاهش چشم‌گیری نسبت به مقطع استوانه‌ای را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده برای تنش برشی جداره کف و سرعت جریان در نزدیکی تک پایه پل میانی می‌باشد و برای حالت بیش از یک پایه پل به دلیل بروز تداخل گردابه‌های ناشی از خطوط جریان، نیازمند بررسی سرعت جریان و تنش برشی حاصل از آن بوده و ضروری است در تحقیقات آینده مد نظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی در این تحقیق، خلاصه نتایج به شرح زیر بیان می‌شود:

۱- مقایسه نتایج حاصل از مدل فیزیکی و شبیه‌سازی عددی بیان می‌کند نرم‌افزار FLOW-3D قابلیت مناسبی برای مدل‌سازی پدیده آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها را دارد. در تحقیق حاضر از قابلیت این بسته نرم‌افزاری برای محاسبه تنش برشی استفاده گردید که نتایج حاصل از مدل با داده‌های آزمایشگاهی تطابق نسبتاً بالایی را بدست داده است.

۲- با مقایسه نتایج مربوط به مدل‌های حل آشفتگی جریان، مشاهده شد که در بحث تنش برشی، مدل $k - \epsilon$ تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در اکثر موارد صحت‌سنجی‌ها، خروجی‌های این مدل با خروجی‌های مربوط به مدل آشفتگی RNG دارای اختلاف اندکی بوده است.

۳- با تمرکز در مقاطع مختلف جاسازی شده در بستر جریان، مشاهده می‌شود بیشینه تنش برشی در زوایای ۷۵ تا ۸۲ درجه از محور مرکزی کانال در نوک دماغه پایه استوانه‌ای اتفاق می‌افتد که با نتایج تحقیقات پیشین مانند (Ferdous &



آقای احمد فردوس (Ahmed Ferdous) بهره گرفته شده است. بدین وسیله نویسندگان مقاله از زحمات ایشان تشکر می‌نمایند.
"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

و طول مؤثر ۰/۰۵۵ متر کمینه تأثیر را داشته است.

سپاس‌گزاری

در به ثمر رسیدن این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی و مشاوره

REFERENCES

- Besharati Givi, M. H., and Hakimzadeh, H. (2010). 3D Numerical Investigation of Flow pattern and Bed Shear Stress Around Conical Piers. *Marine Engineering Journal*, 6(11), 63-70 [In Farsi].
- Bouabdellah, G., Seddini, A., and Ghenim, A. (2013). Numerical Investigations of the Bridge Pier Shape Influence on the Bed Shear Stress. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 5685-5698.
- Ferdous, A., and Nallamuthu, R. (1988). Flow Around Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, 288-300.
- Guemou, B., Seddini, A., and Ghenim, A. N. (2018). Scour around Bridge Piers: Numerical Investigation of the Longitudinal Biconcave Pier Shape. *Periodical Polytechnica Mechanical Engineering*, 62(4), 298-304.
- Ghaderi, A., and Abbasi, S. (2019). CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar. *Sādhanā*, 44(10), 1-12.
- Hassanzadeh, Y., Hakimzadeh, H., and Ayari, S. (2011). Study the Effects of Bridge Pier Shape on the Flow Pattern Using the Fluent Software. *Iran-Water Resources Research*, 7(4), 95-105 [In Farsi].
- Kalalei, F. (2012). Numerical Simulation of the Flow Pattern Around the Sloping Base of the Bridge. *Master Thesis, Azad University of Tehran* [In Farsi].
- Mohammadi, M. (2020). *Applied Hydraulics* (1th ed.). Urmia University Publications. [In Farsi].
- Mohammadi, M. (2001). Boundary shear stress around bridge piers. In *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges* (pp. 1-8).
- Mohammadi, M. (2008). Boundary Shear Stress around Bridge Piers. *American Journal of Applied Sciences*, 5(11), 1547-1551. doi: 10.3844/ajassp.2008.1547.1551
- Mutlu Sumer, B., and Fredsøe, J. (2006). *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. World Scientific.
- Majedi-Asl, M., Daneshfaraz, R., Fuladipناه, M., Abraham, J., Bagherzadeh, M. (2020). Simulation of bridge pier scour depth base on geometric characteristics and field data using support vector machine algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 7(2), 137-143. doi: 10.22126/arww.2021.5747.1189
- Peggy A, J., and Sterling Jones, J. (1992). Shear Stress at Base of Bridge Pier. *transportation research record*, 14-18.
- Qasem Zadeh, F. (2018). *Simulation Hydraulic Problems in Flow-3D*. Tehran: Noavar [In Farsi].
- Rashki, M., Sadri, E., and Akbari, G. H. (2013). Investigation of Flow Pattern and Shear Stress Around Arched Base in Comparison with Simple Bridge Base. *Seventh National Congress of Civil Engineering*. Zahedan, Iran [In Farsi].
- Sadat Jafari, M., and Ayubzadeh, S. A. (2016). Simulation of Flow Pattern Around Inclined Bridge Group Pier Using Flow-3D Software. *Journal of Water and Soil*, 30(6), 1860-1873 [In Farsi].
- Salaheldin, T. M., Imran, J., and Hanif Chaudhry, M. (2004). Numerical Modeling of Three-Dimensional Flow Field Around. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 130(2), 91-100.
- Taheri, Z., and Ghomeshi, M. (2019). Experimental Investigation of the Effect of Collar on Local Scour around Oblong Shaped Bridge Pier. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(5), 833-842. doi: 10.22060/ceej.2018.13888.5518
- Wei, G., Chen, H., Ting, B., Gudavalli, S., and Perugu, S. (1997). Numerical Simulation to study Scour Rate in Cohesive Soils. *Research report to the*.