

مقاله علمی-پژوهشی

## بررسی عددی تأثیر پره‌های نفوذپذیر در بالادست جریان‌های رودخانه‌ای بر کنترل آبشستگی موضعی پایه‌های پل

میرعلیرضا میرقاسم پور<sup>۱</sup>، سعید عباسی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

### چکیده

این پژوهش با هدف کاهش آبشستگی موضعی پایه‌های پل، تأثیر پره‌های نفوذپذیر را بر این پدیده مورد بررسی قرار داده است. مدل عددی به کار گرفته شده در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار Flow3D و با داده‌های آزمایشگاهی یک مدل هیدرولیکی معتبر اعتبارسنجی گردید که با میانگین اختلاف ۱۴/۵۲ درصد، قابلیت اطمینان آن در شبیه‌سازی دقیق شرایط واقعی را تأیید می‌کند. برخلاف مطالعات پیشین، این پژوهش به‌طور همزمان، تأثیر هندسه پایه، آرایش و فاصله نسبی پره‌ها را تحلیل مقایسه‌ای کرده است. نتایج حاصله حاکی از آن است که پایه‌های با مقطع مربعی آسیب‌پذیری بیشتری در برابر فرسایش نسبت به پایه‌های با مقطع دایره‌ای دارند. مهمترین دستاورد این تحقیق، شناسایی پیکربندی بهینه دو ردیف پره همگرا در بالادست پایه است. این پیکربندی با تضعیف و انحراف گردابه‌ها، منجر به کاهش عمق آبشستگی در پایه با مقطع دایره‌ای به میزان ۵۲/۲ درصد و در پایه با مقطع مربعی به میزان ۴۰ درصد شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پایه‌های پل، پره‌های نفوذپذیر، حفاظت سازه‌های هیدرولیکی، کنترل آبشستگی، مدل‌سازی عددی

### مقدمه

تنش‌های برشی، ذرات رسوب را از بستر جدا کرده و حفره‌ای عمیق در اطراف فونداسیون ایجاد می‌کنند. این فرآیند دینامیکی شامل چهار مرحله‌ی اصلی (ابتدایی، توسعه، تثبیت و تعادل) است که در نهایت به حداکثر عمق آبشستگی می‌رسد. این عمق به پارامترهای مختلفی از جمله سرعت و عمق جریان، ابعاد پایه و ویژگی‌های رسوب بستر وابسته است. در پاسخ به این چالش، روش‌های سنتی متعددی مانند استفاده از سنگ‌چین، پوشش‌های بتنی و دیواره‌های هدایت‌کننده به کار گرفته شده‌اند. با این حال، این روش‌ها اغلب با محدودیت‌هایی نظیر هزینه‌ی بالا، پیچیدگی در اجرا، نیاز به نگهداری مداوم و تأثیرات منفی زیست‌محیطی همراه هستند. برای مثال سنگ‌چین در برابر جریان‌های پرسرعت ممکن است کارایی لازم را نداشته باشد و خود نیز دچار آبشستگی و دفن شود. بنابراین، نیاز مبرمی به توسعه‌ی راهکارهای جایگزین، با عملکرد هیدرودینامیکی مؤثرتر، سازگاری بیشتر با محیط زیست و هزینه‌ی اجرایی معقول‌تر احساس می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از پره‌های نفوذپذیر در بالادست پایه‌ی پل، به عنوان یک راهکار نوآورانه و دارای پتانسیل بالا، توجه جامعه مهندسی را به خود جلب کرده است. این سازه‌ها با ایجاد یک

توسعه‌ی روزافزون زیرساخت‌های حمل‌ونقل و وابستگی حیاتی جوامع به شبکه‌های ارتباطی پایدار، اهمیت طراحی و نگهداری ایمن پل‌های رودخانه‌ای را دوچندان ساخته است. یکی از جدی‌ترین تهدیدات برای پایداری این سازه‌ها، پدیده آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ها است. پدیده آبشستگی، ناشی از برهم‌کنش پیچیده بین جریان آشفته، شکل هندسی سازه و ویژگی‌های بستر رودخانه، عامل اصلی بیش از ۶۰ درصد خرابی‌های پل‌های رودخانه‌ای است. این پدیده نه تنها خسارات مالی هنگفتی را به بار می‌آورد، بلکه مخاطرات جدی برای ایمنی عمومی ایجاد می‌کند. مکانیزم این پدیده شامل تشکیل گردابه‌های نعل‌اسبی در بالادست پایه و گردابه‌های برخاستگی در پشت آن است که با افزایش شدید

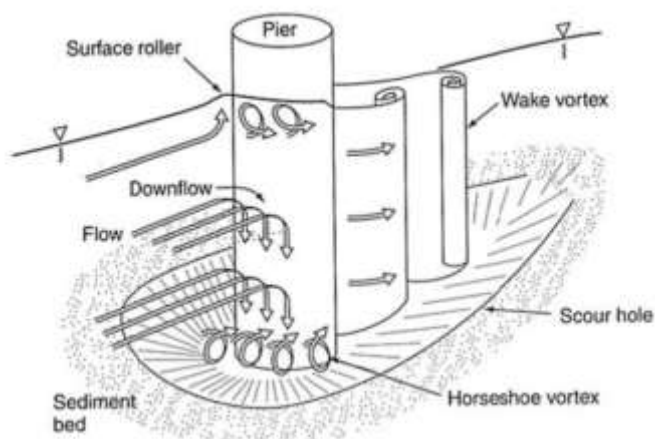
۱- کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

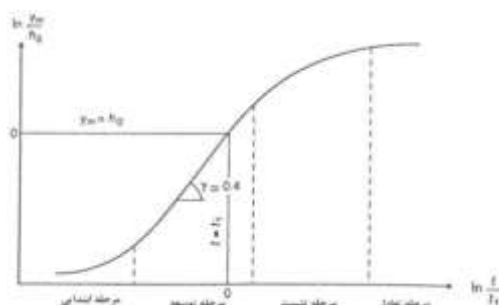
(\* نویسنده مسئول: Email: Abbasi.Saeed@znu.ac.ir)

گردابه‌های مخرب می‌شود. علاوه بر این، نفوذپذیری آبشکن‌ها باعث می‌شود که بخش عمده‌ای از انرژی جریان به صورت تدریجی مستهلک شده و از تمرکز ناگهانی تنش‌ها جلوگیری شود.

مقاومت هیدرولیکی جزئی، جریان را به‌طور هوشمندانه هدایت کرده و با کاهش انرژی موضعی، تنش‌های برشی اطراف پایه را تقلیل می‌دهند. ویژگی کلیدی این پره‌ها، توانایی عبور کنترل‌شده‌ی جریان از میان آن‌هاست که باعث کاهش جدایش جریان و تضعیف



شکل ۱- فرآیند آبشستگی اطراف پایه‌ی پل توسط جریان‌های گردابی



شکل ۲- مراحل توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی

است. این رویکرد عددی، امکان بررسی طیف گسترده‌ای از سناریوها را فراهم می‌آورد که انجام آن‌ها به صورت آزمایشگاهی زمان‌بر و پرهزینه خواهد بود. هدف اصلی پژوهش حاضر، پر کردن شکاف تحقیقاتی فوق با تحلیل جامع و مقایسه‌ای اثر پره‌های نفوذپذیر در آرایش‌های ترکیبی بر آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های دایره‌ای و مربعی است.

ژائو و همکاران عملکرد پره‌های نفوذپذیر را در کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های با مقطع دایره‌ای در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار داده‌اند (Zhao et al., 2018). یانگ و همکاران به تحلیل پدیده‌های آبشستگی در اطراف پایه‌های پل و تأثیر عوامل مختلف بر آن پرداخته‌اند (Yang et al., 2019). همچنین، پژوهش ریگو و همکاران به بررسی تجربی تأثیر نسبت مستغرق بودن پره‌های مستغرق دوتایی بر تغییرات توپوگرافی بستر و ارزیابی زمانی حداکثر آبشستگی در یک قوس ۱۸۰ درجه‌ای با گروه پایه‌های پل می‌پردازد

با وجود پتانسیل بالای این راهکار، مطالعات پیشین نشان می‌دهد که فقدان چارچوب‌های جامع طراحی و عدم قطعیت در عملکرد هیدرودینامیکی این پره‌ها تحت سناریوهای مختلف، مانع از گسترش عملی آن‌ها در پروژه‌های واقعی شده‌است. به‌طور خاص، یک بررسی جامع و مقایسه‌ای در خصوص تأثیر همزمان سه پارامتر کلیدی شکل هندسی پایه (دایره‌ای و مربعی)، آرایش ترکیبی پره‌ها (یک ردیفه، دو ردیفه، همگرا و واگرا) و فاصله نسبی بهینه پره‌ها که برای ارائه دستورالعمل‌های طراحی دقیق حیاتی است، در تحقیقات گذشته مغفول مانده است.

در چنین شرایطی، مدل‌سازی عددی سه‌بعدی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تحلیل و ارزیابی کارایی پره‌های نفوذپذیر مطرح می‌شود. استفاده از نرم‌افزار پیشرفته‌ای مانند D3Flow، که قابلیت مدل‌سازی اندرکنش پیچیده‌ی جریان-رسوب-سازه و تغییر شکل بستر را با دقت بالا داراست، افق‌های جدیدی را در این زمینه گشوده

(Rigot et al., 2021).

شده‌است.

### معادلات حاکم

معادلات حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و مومنوم است که در FLOW-3D از حل آن‌ها برای محاسبات هیدرولیکی جریان استفاده می‌کند. رابطه‌ی (۱)، معادله‌ی پیوستگی و رابطه‌ی (۲) معادله‌ی حجم جریان را نشان می‌دهد. روابط (۳) تا (۵) نیز معادلات مومنوم در مختصات کارتزین را نشان می‌دهند. نرم افزار با حل عددی معادلات دیفرانسیل با روش حجم محدود این معادلات را آنالیز می‌کند.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} \quad (1)$$

$$V_F \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (AUF) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y w v}{x V_F} = -\frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_y + f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z \quad (5)$$

که در این معادلات  $V_F$  مقدار نسبت حجم باز به جریان،  $\rho$  دانسیته‌ی سیال،  $(u, v, w)$  سرعت در راستای  $(x, y, z)$  و  $RSOR$  تابع چشمه می‌باشد.  $(A_x A_y A_z)$  مقادیر نسبت مساحت،  $(G_x, G_y, G_z)$  شتاب ثقل،  $(f_x, f_y, f_z)$  شتاب‌های لزجت  $(b_x, b_y, b_z)$  افت‌های جریان در محیط متخلخل به ترتیب در جهات  $(x, y, z)$  می‌باشند. در نرم افزار FLOW-3D از دو روش عددی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود که عبارتند از روش حجم سیال VOF که برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش کسر مساحت-حجم مانع یا FAVOR که برنامه از این روش برای مدل‌سازی سطوح و احجام صلب مانند مرزهای هندسی استفاده می‌کند. برای محاسبات بخش رسوبی، بار معلق و بار بستر به طور جداگانه محاسبه می‌شود. بار رسوبی معلق توسط حل معادله‌ی انتقال-انتشار مطابق رابطه‌ی (۶) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + W_s \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

که در آن  $U_i$  میانگین سرعت رینولدز جریان،  $W$  سرعت سقوط ذرات رسوبی،  $x$  بعد فضای عمومی،  $z$  اندازه در جهت عمودی و  $\Gamma$  ضریب اغتشاش می‌باشد. ضریب اغتشاش برابر با ویسکوزیته‌ی جریان گردابی است که از مدل‌های آشفتگی مختلف قابل محاسبه

رادیچه و همکاران، در یک مطالعه به بررسی آزمایشگاهی استفاده از پره‌های متصل به خود پایه پل پرداختند. نتایج نشان داد که این پره‌های متصل توانستند حداکثر عمق آبستگي را تا ۳۵ درصد و حجم گودال آبستگي را تا ۲۷ درصد کاهش دهند (Radicheh et al., 2024). اصف‌الاسلام و همکاران، در یک پژوهش به بررسی تأثیر آرایش خطی ستون‌های قربانی در جلوی پایه پل پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فاصله نصب این ستون‌ها بسیار تعیین‌کننده است. در فواصل نزدیک به پایه، افزایش تعداد ستون‌ها به افزایش عمق آبستگي می‌انجامد، در حالی که در فواصل دورتر، تعداد بیشتر ستون‌ها به کاهش فزاینده آبستگي منجر می‌شود (Asefulislam et al., 2024). ژانگ و همکاران، در یک مطالعه عددی به بررسی عملکرد ترکیبی طوق و پره‌ها در کاهش آبستگي پرداختند. در این تحقیق یک مدل CFD سه‌بعدی برای شبیه‌سازی اندرکنش دو سازه با میدان جریان توسعه داده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این ترکیب با مختل کردن جریان رو به پایین و گردابه نعل اسبی، عملکرد بسیار مؤثری دارد و این پژوهش به بهینه‌سازی ابعاد و موقعیت این دو سازه نسبت به یکدیگر پرداخت (Zhang et al., 2022). لی و همکاران، بهینه‌سازی طراحی پره‌های مستغرق را با استفاده از یک مدل عددی ترکیبی با الگوریتم ژنتیک مطالعه کردند. هدف این پژوهش، یافتن بهترین ترکیب از تعداد، ارتفاع، طول و زاویه پره‌ها برای دستیابی به حداکثر کاهش آبستگي با حداقل حجم مصالح بود. نتایج یک آرایش بهینه با ۳ پره با ارتفاع متغیر و زاویه ۳۵ درجه را پیشنهاد داد. این آرایش بهینه توانست عمق آبستگي را تا ۸۰ درصد کاهش دهد و همزمان هزینه مصالح را تا ۲۰ درصد کاهش داد (Li et al., 2022). تحقیقات گذشته (مانند پژوهش‌های پالانی و جوتیپراکاسم (Palani and Jothiprakasam, 2010) و یانگ و همکاران (Yang et al., 2019) بر کارایی پره‌های نفوذپذیر در تضعیف گردابه‌ها و کاهش عمق آبستگي تأکید کرده‌اند. همچنین، اعتبار مدل‌های عددی در شبیه‌سازی دقیق این پدیده (مانند پژوهش‌های دوان و همکاران (Duan et al., 2012)، حکیم و سامی (Hakim and Samy 2022) و ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) تأیید شده است. مطالعات متمرکز بر بهینه‌سازی (مانند پژوهش رحمانی (Rahmani et al., 2016). نیز نشان‌دهنده اهمیت تنظیم دقیق پارامترهای هندسی برای دستیابی به حداکثر کارایی است. با این حال، یک تحلیل سیستماتیک که به‌طور همزمان، (۱) مقایسه کارایی پره‌ها برای دو هندسه پایه دایره‌ای و مربعی را انجام دهد، (۲) آرایش‌های ترکیبی دو ردیفه همگرا و واگرا را ارزیابی کند، و (۳) فاصله نسبی بهینه پره‌ها را متناسب با شکل پایه تعیین نماید، در منابع قبلی فاقد سابقه مستقیم بوده است. لذا، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف‌ها و ارائه رهنمودهای طراحی جامع‌تر، طراحی

### مشخصات فیزیکی و شرایط ورودی مدل

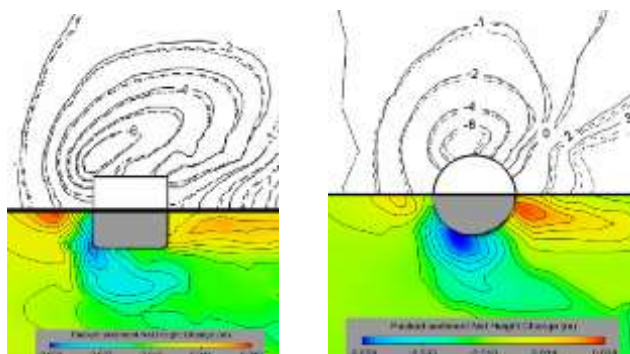
شبیه‌سازی در شرایط آب زلال انجام شد و مشخصات مدل‌سازی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به شرح زیر است:

ابعاد فلوم: فلوم دارای طول ۱۰ متر، عرض ۱/۲۱ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر است. بستر از رسوبات یکنواخت با قطر متوسط ذرات ۰/۰۰۰۸۵ متر و چگالی ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تشکیل شده‌بود. ضخامت لایه رسوبی در کف کانال ۰/۲ متر در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی‌ها برای دو هندسه اصلی پایه پل شامل پایه با مقطع دایره‌ای با قطر ۰/۱۶۵۱ متر و پایه با مقطع مربعی به ضلع ۰/۱۶۵۱ متر انجام پذیرفت.

### شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

شبیه‌سازی‌های عددی برای هر دو نوع پایه (دایره‌ای و مربعی) انجام شد. پس از اجرای شبیه‌سازی و رسیدن به شرایط پایدار، نتایج مربوط به حداکثر عمق آبشستگی در اطراف هر پایه استخراج و با داده‌های حاصل از آزمایش‌های فیزیکی مقایسه گردید.



شکل ۳- تغییرات بستر رسوبی پس از فرآیند آبشستگی در اطراف پایه با مقطع دایره‌ای و مربعی (بالا: مدل آزمایشگاهی پایین: مدل عددی)

(MAE) به ترتیب ۰/۰۱۰۸ متر و ۰/۰۱۰۵ متر محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی عمق آبشستگی حداکثر است. این اعتبارسنجی اطمینان می‌دهد که مدل عددی می‌تواند به درستی فرآیندهای فیزیکی حاکم بر پدیده آبشستگی را بازنمایی کند. نتایج کمی مقایسه‌ای در جدول ۱ خلاصه شده است:

### مواد و روش‌ها

سناریوهای مدل‌سازی برای بررسی جامع تأثیر پره‌های نفوذپذیر بر پدیده آبشستگی موضعی طراحی شده‌اند. این سناریوها بر اساس ترکیبی از چهار پارامتر کلیدی تعریف شده‌اند. در این پژوهش، دو نوع هندسه پایه شامل دایره‌ای و مربعی در نظر گرفته شده‌است. همچنین، فاصله پره‌ها از لبه بالادست پایه در سه حالت ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵

است. به منظور محاسبه‌ی بار بستر، FLOW-3D دو مدل جدید مبتنی بر "رابطه نیلسن" و "رابطه ون راین" را به مدل قبلی خود که "رابطه مایر پیتر و مولر" بود، اضافه کرده است. در مقاله حاضر برای محاسبه بار بستر از مدل مایر پیتر و مولر استفاده گردید.

### صحت‌سنجی

مرحله‌ی حیاتی اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های معتبر آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. این اقدام نه تنها دقت مدل را تأیید می‌کند، بلکه اعتبار نتایج حاصل از آن را برای تحلیل سناریوهای بعدی نیز تضمین می‌نماید. در این پژوهش، مدل عددی توسعه‌یافته با نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده در مقاله معتبر (۲۰۱۲). Khosronejad et al مقایسه شده‌است. این مقاله به طور جامع پدیده آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل با اشکال مختلف (لوزی، استوانه‌ای و مربعی) را بررسی کرده و داده‌های دقیقی را برای اعتبارسنجی فراهم آورده است.

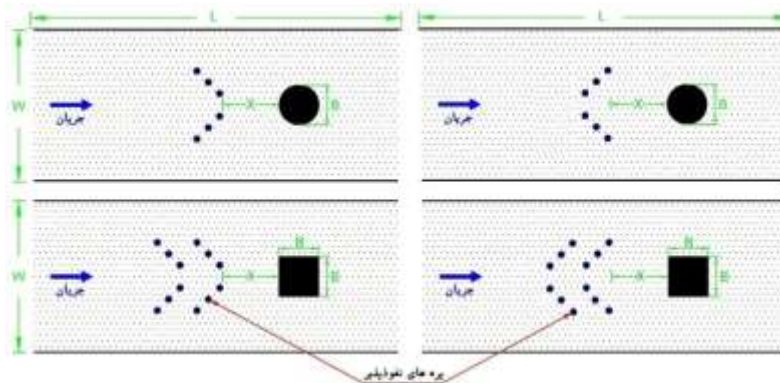
همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، موقعیت حداکثر عمق آبشستگی و حداکثر ارتفاع پشته رسوبی در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. بررسی تطابق بین نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل شبیه‌سازی‌شده از دقت بالایی برخوردار است. میانگین اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در هر دو حالت ۱۴/۵۲ درصد است که این میزان انطباق برای یک مدل عددی در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی، قابل قبول ارزیابی می‌شود. این نتیجه، توانایی مدل در شبیه‌سازی دقیق پدیده آبشستگی موضعی و همچنین اعتبار روش‌شناسی انتخاب‌شده برای تحلیل سناریوهای بعدی پژوهش را تأیید می‌نماید. علاوه بر این، شاخص‌های کمی عملکرد مدل شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط قدر مطلق خطا

شده‌است. با ترکیب این پارامترها، مجموعه‌ای از سناریوهای مدل‌سازی ایجاد شده است تا تأثیر پره‌های نفوذپذیر بر پدیده آبستگي به طور جامع تحليل شود.

برابر قطر یا طول ضلع پایه مورد بررسی قرار گرفته است. از نظر تعداد، دو حالت یک ردیف پره (۶ میله) و دو ردیف پره (۱۲ میله) استفاده شده است. علاوه بر این، زاویه قرارگیری پره‌ها نسبت به جهت جریان اصلی در دو حالت همگرا کننده و واگرا کننده تنظیم

جدول ۱- حداکثر عمق آبستگي در مدل آزمایشگاهی و عددی و درصد خطا

درصد خطا	نتایج مدل عددی (متر)	نتایج آزمایشگاهی (متر)	مقطع پایه پل
۱۱/۹۴	۰/۰۵۹	۰/۰۶۷	دایره‌ای
۱۷/۱۱	۰/۰۶۳	۰/۰۷۶	مربعی



شکل ۴- نمونه‌ای از سناریوهای طراحی شده، چپ: همگرا راست: واگرا

مدت ۲۰۰۰ ثانیه پردازش شدند تا زمان لازم برای رسیدن به شرایط پایدار تعیین شود. تحلیل روند تغییرات عمق آبستگي نشان داد که بیش از ۸۰ درصد تغییرات نهایی در ۵۰۰ ثانیه ابتدایی رخ می‌دهد. بنابراین، زمان ۵۰۰ ثانیه به عنوان زمان بهینه و کافی برای شبیه‌سازی تمامی مدل‌ها و ثبت پدیده اصلی آبستگي در نظر گرفته شد. شرایط اولیه در کل دامنه مدل به صورت یکنواخت با مقادیر مرز ورودی تنظیم شد تا فرآیند شبیه‌سازی از یک حالت نزدیک به تعادل آغاز شود.

### مشخصات مدل‌سازی

تمامی شبیه‌سازی‌ها در سیستم واحدهای بین‌المللی (SI) انجام شده است. سیال مورد استفاده آب زلال با دمای ۲۰ درجه سلسیوس و شتاب گرانش ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی پدیده آشفتگی، از مدل RNG استفاده گردید که انتخاب این مدل به دلیل توانایی بالاتر آن در شبیه‌سازی جریان‌های گردابه‌ای پیچیده در اطراف پایه‌ها بسیار مؤثر است. تمامی پارامترهای هندسی، هیدرولیکی و رسوبات به صورت دقیق در جداول ۲ تا ۵ ارائه شده‌اند. سه مدل از ۲۶ سناریوی طراحی شده به صورت تصادفی برای

جدول ۲- پارامترهای هندسی کانال و تکیه‌گاه پل

مقادیر	واحد	نماد	پارامتر
۴/۰۵	متر	L	طول مدل
۱/۰۵	متر	W	عرض مدل
۰/۳۳	متر	H	ارتفاع مدل
۰/۲۱	متر	B	قطر پایه استوانه‌ای
۰/۲۱	متر	B	اضلاع پایه با مقطع مربعی
۰/۱۵	متر	t	ضخامت رسوب

جدول ۳- پارامترهای هندسی پره‌های نفوذپذیر

پارامتر	واحد	نماد	مقادیر
قطر میله‌ها	متر	D	۰/۰۲۳
تعداد میله‌ها*	---	n	۱۲ و ۶
زاویه قرارگیری نسبت به جریان (همگرا)	درجه	$\theta$	۴۵
زاویه قرارگیری نسبت به جریان (واگرا)	درجه	$\theta$	۴۵
فاصله بین پره نفوذپذیر و پایه پل	متر	X	۲/۵B و ۱/۵B و ۰/۵B

\* فواصل میله‌ها برابر قطر میله فرض شده است. بعبارت دیگر نفوذپذیری ۵۰٪ منظور شده است.

جدول ۴- پارامترهای شرایط هیدرولیکی جریان

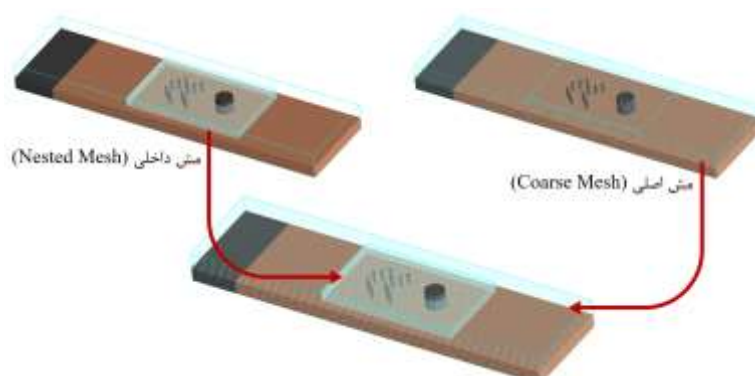
پارامتر	واحد	نماد	مقادیر
سرعت جریان	متر بر ثانیه	V	۰/۵
دبی	مترمکعب بر ثانیه	Q	۰/۰۲۶
عمق جریان	متر	y	۰/۰۵
عدد فرود	---	$F_r$	۰/۷۱۴
عدد رینولدز	---	$R_e$	۲۵۰۰۰

جدول ۵- پارامترهای رسوبات

پارامتر	واحد	نماد	مقادیر
قطر رسوبات	متر	$D_s$	۰/۰۰۱
چگالی رسوبات	مترمکعب بر ثانیه	$\rho_g$	۱۸۰۰

کمک می‌کند. برای اطمینان از استقلال نتایج از اندازه شبکه، یک تحلیل حساسیت انجام شد. نتایج نشان داد که کاهش اندازه سلول‌ها از ۱/۵ سانتی‌متر به ۱ سانتی‌متر در ناحیه داخلی، تغییر عمق آبستگي را کمتر از ۱ درصد ایجاد می‌کند. لذا شبکه فوق به‌عنوان مش بهینه انتخاب شد.

شبکه محاسباتی به صورت چندگانه (Multi-block) با دو سطح مش بندی تعریف شد تا دقت در مناطق حساس افزایش یابد. مش اصلی با ابعاد سلول‌های مکعبی  $3 \times 3 \times 3$  سانتی‌متر کل دامنه را پوشش می‌دهد، در حالی که مش داخلی با ابعاد  $1/5 \times 1/5 \times 1/5$  سانتی‌متر در نواحی اطراف پایه و پره‌ها، به حل دقیق‌تر معادلات



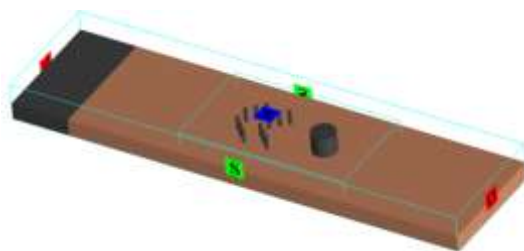
شکل ۵- ترکیب مش اصلی و مش داخلی

انتخاب شد. در خروجی از شرط (Outflow) استفاده شد؛ این شرط برای اطمینان از خروج آزادانه جریان و عدم بازتاب موج به داخل دامنه مدل‌سازی به کار رفت. در دیواره‌های جانبی (Symmetry)

شرایط مرزی: در ورودی از شرط (Specified Velocity) با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه با ارتفاع جریان ۰/۰۵ متر استفاده گردید؛ این شرط برای شبیه‌سازی شرایط جریان کاملاً توسعه‌یافته در ورودی

گرفته شود. کف کانال با شرط دیوار (Wall) صلب مدل‌سازی شدند.

شرط مرزی متقارن استفاده شد تا اثرات ویسکوزیته دیواره‌ها حذف شده و شرایط جریان در راستای عرضی، متقارن و بدون مرز در نظر



شکل ۶- شرایط مرزی

که در آن  $\rho$  چگالی آب،  $\rho_g$  چگالی رسوبات،  $\nu$  ویسکوزیته آب،  $Q$  دبی جریان آب،  $v$  سرعت جریان آب،  $y$  عمق جریان،  $g$  شتاب گرانش،  $D_s$  قطر متوسط ذرات،  $D$  قطر میله‌ها،  $B$  قطر پایه‌ی پل،  $X$  فاصله پره محافظ نفوذپذیر از پایه‌ی پل،  $\Theta$  زاویه سری پره‌های نفوذپذیر،  $W$  عرض کانال،  $L$  طول کانال،  $S_0$  شیب کانال،  $d_s$  عمق تعادل آبشستگی،  $n$  تعداد ردیف پره نفوذپذیر تعریف شده اند. با بکار بردن تئوری باکینگهام، پارامترهای ثابت از رابطه حذف شده و برای عمق حداکثر آبشستگی خواهیم داشت:

$$d_s = f(\Theta, n, X/B) \quad (۸)$$

### نتایج و بحث

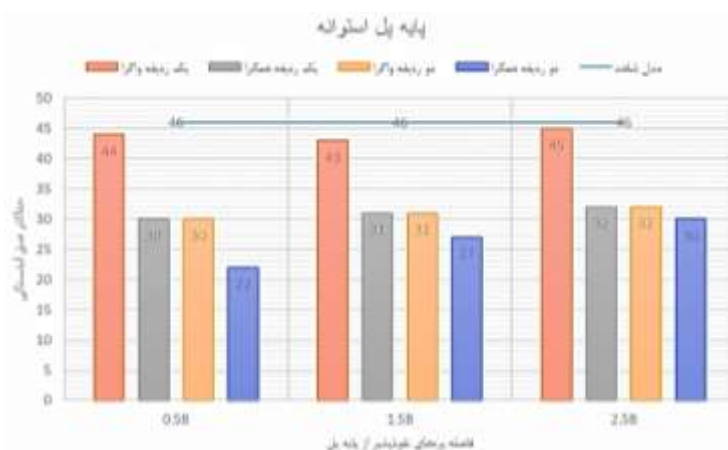
نتایج حداکثر عمق آبشستگی پایه با مقطع دایره‌ای در شکل ۷ و تغییرات شکل بستر رسوبی در این حالت در شکل ۸ نشان داده شده‌است.

### آنالیز ابعادی

در تحلیل پدیده‌های پیچیده در مهندسی، از جمله پدیده آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل‌ها، استفاده از تحلیل ابعادی برای کاهش تعداد متغیرهای مؤثر و ارائه روابط تعمیم یافته ضروری است. تحلیل ابعادی بر این اصل استوار است که هر رابطه فیزیکی بین کمیت‌های ابعادی می‌تواند به یک رابطه بین گروه‌های بدون بعد تبدیل شود. این گروه‌ها، که از ترکیب کمیت‌های اولیه به دست می‌آیند، مستقل از سیستم واحدها هستند. تئوری باکینگهام به عنوان یکی از روش‌های اصلی و شناخته شده برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در پژوهش حاضر که بحث روش‌های کنترل آبشستگی پایه پل‌ها در آن مطرح است، کمیت‌های مهم عبارت‌اند از: مشخصات کانال، شرایط جریان، ماهیت رسوبات، قطر میله‌ها و فواصل آنها که ارتباط میان پارامترهای فوق و عمق آبشستگی به صورت زیر می‌باشد:

$$d_s = f(Q, \rho, \rho_g, \nu, v, y, g, D_s, D, S_d, B, \Theta, L, W, S_0, S, X, n) \quad (۷)$$



شکل ۷- نتایج حداکثر عمق آبشستگی پایه با مقطع دایره‌ای

حالت یک ردیف همگرا داشت و حداکثر کاهش عمق آبستگي آن ۳۴/۸ درصد بود.

– دو ردیف پره همگرا: این سناریو بهترین عملکرد مطلق را با کاهش ۵۲/۲ درصد در عمق آبستگي به همراه داشت و حداکثر عمق را به ۲۲ میلی‌متر رساند. نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی بهینه برای پایه‌های دایره‌ای، شامل دو ردیف پره همگرا در فاصله ۰/۵B از پایه است.

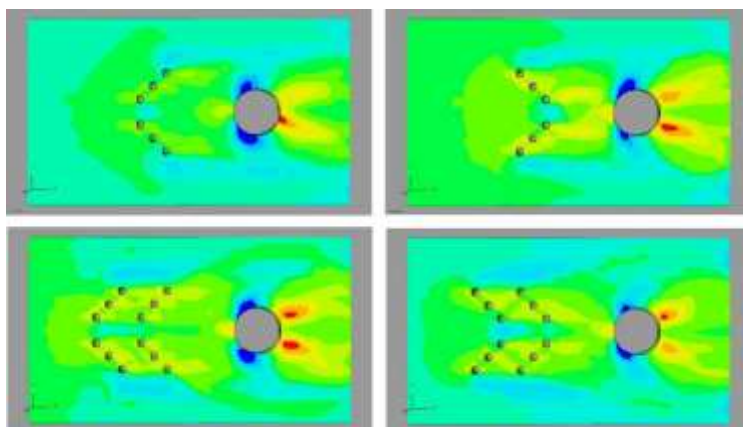
نتایج حداکثر عمق آبستگي پایه با مقطع مربعی در شکل ۹ و تغییرات شکل بستر رسوبی در این حالت در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

در حالت شاهد (بدون پره)، حداکثر عمق آبستگي در این مدل ۴۶ میلی‌متر بود که به عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌سازی برای آرایش‌های مختلف پرها به شرح زیر است:

– یک ردیف پره واگرا: این آرایش تأثیر محدودی در کاهش آبستگي داشت و حداکثر کاهش آن به ۶/۵ درصد رسید. این نتایج نشان می‌دهد که این نوع آرایش برای تضعیف گردابه‌های فرساینده در این هندسه کافی نیست.

– یک ردیف پره همگرا: این آرایش کاهش چشمگیری (حداکثر ۳۴/۸ درصد) در عمق آبستگي ایجاد کرد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر آن در هدایت جریان و کاهش فرسایش است.

– دو ردیف پره واگرا: این آرایش عملکردی مشابه با بهترین



شکل ۸- تغییرات بستر رسوبی پایه با مقطع دایره‌ای در آرایش‌های مختلف پره‌های نفوذپذیر



شکل ۹- نتایج حداکثر عمق آبستگي پایه با مقطع مربعی

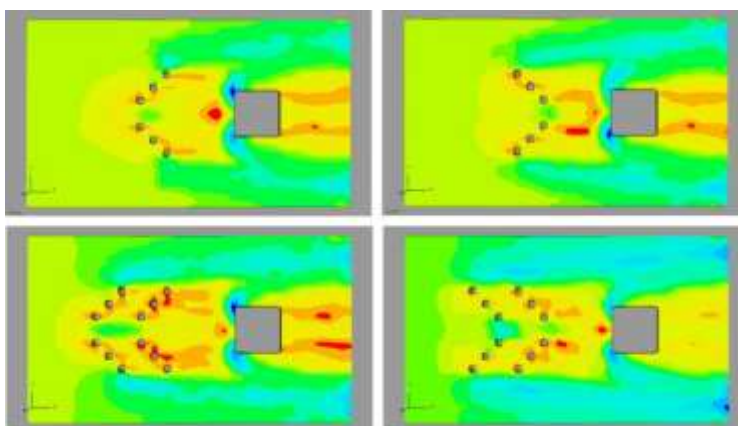
مختلف پرها به شرح زیر است:

– یک ردیف پره واگرا: این آرایش کاهش قابل توجهی (حداکثر ۳۲ درصد) در عمق آبستگي ایجاد کرد که در فاصله ۲/۵B

در حالت شاهد (بدون پره)، حداکثر عمق آبستگي در این مدل ۵۰ میلی‌متر بود که نشان می‌دهد این نوع پایه به دلیل گوشه‌های تیز، مستعد فرسایش بیشتری است. نتایج مدل‌سازی برای آرایش‌های

- دو ردیف پره همگرا: این پیکربندی بهینه‌ترین حالت در این مجموعه بود که با کاهش ۴۰ درصد در عمق آبستتگی، حداکثر عمق را به ۳۰ میلی‌متر رساند. نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی بهینه برای پایه‌های مربعی، شامل دو ردیف پره همگرا در فاصله ۲/۵B از پایه است.

عملکرد مؤثری داشت.  
- یک ردیف پره همگرا: عملکرد این آرایش در مقایسه با واگرا اندکی ضعیف‌تر بود و حداکثر کاهش عمق آن ۲۶ درصد بود.  
- دو ردیف پره واگرا: این آرایش بهبودی در عملکرد نسبت به حالت تک ردیف به همراه نداشت و حداکثر کاهش آن ۲۲ درصد بود.



شکل ۱۰- تغییرات بستر رسوبی پایه با مقطع مربعی در آرایش‌های مختلف پره‌های نفوذپذیر

جریان شدیدتر و ناحیه جریان آشفته گسترده‌تر است که به فرسایش بیشتری منجر می‌شود. این یافته با نتایج اعتبارسنجی که عمق آبستتگی بیشتری را در این نوع پایه نشان می‌دهد، مطابقت دارد. در مقابل، شکل آیرودینامیکی تر پایه با مقطع دایره‌ای، جدایی جریان را به تدریج و با شدت کمتری ایجاد می‌کند. نصب پره‌های نفوذپذیر الگوی جریان را اصلاح می‌کند. این پره‌ها با کاهش سرعت جریان نزدیک به بستر و پخش آن به اطراف، انرژی گردابه‌ها را تضعیف کرده و تنش برشی را کاهش می‌دهند. این مکانیسم باعث کاهش عمق آبستتگی می‌شود و کارایی پره‌ها را در محافظت از بستر تأیید می‌کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که هندسه پایه نقش مهمی در انتخاب بهینه آرایش پره‌ها دارد. آرایش یک ردیف واگرا در پایه‌های مربعی (۳۲ درصد کاهش) عملکرد بسیار بهتری نسبت به پایه‌های دایره‌ای (۶/۵ درصد کاهش) دارد. در مقابل، آرایش یک ردیف همگرا در پایه‌های دایره‌ای (۳۴/۸ درصد کاهش) مؤثرتر از پایه‌های مربعی (۲۶ درصد کاهش) بود. با این حال، آرایش دو ردیف همگرا به عنوان بهینه‌ترین حالت در هر دو هندسه شناخته شد، با این تفاوت که در پایه‌های دایره‌ای کاهش ۵۲/۲ درصد و در پایه‌های مربعی کاهش ۴۰ درصد را به همراه داشت.

این پژوهش نشان داد که آرایش دو ردیف پره همگرا مؤثرترین پیکربندی برای کاهش عمق آبستتگی در هر دو نوع پایه است. مکانیسم این آرایش شامل هدایت دوگانه جریان به دور از پایه و

بحث و تحلیل مکانیزم‌های فیزیکی عملکرد پره‌ها: یافته‌های این پژوهش، به‌ویژه در زمینه تفاوت فاصله بهینه برای دو هندسه، ابعاد جدیدی در طراحی ارائه می‌دهد. در پایه‌های دایره‌ای، که گردابه‌ی نعل‌اسبی در فاصله نزدیک‌تری از پایه تشکیل می‌شود، فاصله بهینه ۰/۵B بهترین عملکرد را داشت. پره‌ها در این فاصله نزدیک، با اختلال مستقیم در جریان رو به پایین و مهار اولیه گردابه، مانع از تشکیل کامل آن می‌شوند. در مقابل، پایه‌های مربعی به دلیل لبه‌های تیز، جریان را به سرعت جداسازی کرده و یک گردابه‌ی نعل‌اسبی بزرگ‌تر و قوی‌تر اما در فاصله دورتری از پایه تشکیل می‌دهند. لذا، بهترین عملکرد با آرایش دو ردیف همگرا در فاصله ۲/۵B به دست آمد. این فاصله دورتر، به پره‌ها اجازه می‌دهد تا جریان را قبل از رسیدن به منطقه جدایش اصلی و تشکیل گردابه‌ی قوی، به شکل مؤثری هدایت کرده و انرژی آن را مستهلک سازند. عملکرد برتر آرایش همگرا در هر دو هندسه، به دلیل متمرکز کردن جریان به سمت مرکز کانال و کاهش گرادیان فشار در بالادست پایه است که از لحاظ فیزیکی منطبق بر نتایج پژوهش‌های اخیر است. یافته‌های ما بر اهمیت تنظیم دقیق پارامترهای هندسی تأکید می‌کند و به‌طور مؤثر شکاف مطالعاتی در زمینه مقایسه عملکرد پره‌ها بر روی اشکال مختلف پایه را پر می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در پایه با مقطع مربعی، به دلیل وجود گوشه‌های تیز، جدایی

- Simulation of the Flow and Local Scour around a Cylindrical Bridge Pier with and Without a Collar. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(11), 931-945.
- Kumar, P., et al. 2023. Comparison of I-type and T-type groins for bridge pier scour. *Journal of Water Resources Engineering*. 45(1): 1-10.
- Li, J., Y. and Ouyang, Z. C. Li 2022. Optimization of submerged vane design using a hybrid numerical model with a genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 148(5): 04022026.
- Palani, S., R. and Jothiprakasham 2010. Experimental study on the effect of submerged permeable plates on the reduction of local scour around a cylindrical bridge pier. *Journal of Hydraulic Research*. 48(4): 481-490.
- Radicheh, S., et al. 2024. Experimental investigation of the use of pier-attached vanes for scour reduction. *Journal of Hydraulic Research*, 62(1): 1-12.
- Rahmani, M., Zarrati, S. and Ebrahimi. A. R. 2016. Effect of permeability of permeable groins on scour reduction at bridge piers. *International Journal of Sediment Research*, 31(2), 118-126.
- Rigot, J., Santos, V. L. and Silva, M. H. S. V. 2021. Experimental study on the effect of submergence ratio of double submerged groins on bed topography changes in a 180 meander. *Journal of Hydraulic Research*. 59 (1): 1-17.
- Yang, Y., M. S. Hossain, P. M. L. Li 2019. Experimental investigation on the effect of submerged vanes on flow field and scour around a cylindrical pier using PIV technique. *Journal of Hydraulic Research*. 57(4): 543-556.
- Zhang, L., et al. ۲۰۲۲. Numerical study of the combined performance of collars and vanes in scour reduction. *International Journal of Sediment Research*. 37(5): 578-591.
- پراکنده‌سازی مؤثر انرژی گردابه‌ها است. همچنین، مهم‌ترین دستاورد این تحقیق این بود که مشخص شد که انتخاب فاصله بهینه پرها به شدت به هندسه پایه بستگی دارد، به طوری که در پایه‌های دایره‌ای، فاصله نزدیک ۰/۵B و در پایه‌های مربعی، فاصله دورتر ۲/۵B بهترین عملکرد را داشتند.

## منابع

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۰. راهنمای روش‌های محاسبه آبستگي موضعی. نشریه شماره ۵۴۹. انتشارات دفتر نظام فنی اجرایی، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا و دفتر نظام فنی اجرایی.

نشریه ۵۱۶، "راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای"، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، تهران، ایران، ۱۳۸۸.

Asefulislam, M., et al. ۲۰۲۴. Effect of linear arrangement of sacrificial piles on local scour at bridge piers. *Journal of Water and Environmental Engineering*, 39(1):30-41.

Chofu, K., et al. ۲۰۲۲. Validation of the Flow<sup>3D</sup> numerical model for scour simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(7):04022029.

Duan, J. G., Constantinescu, M. E. and Smith, D. L. 2012. Three-dimensional numerical simulation of local scour around a vertical cylinder using a two-phase model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10), 875-885.

Hakim, A. and Samy, P. 2022. Performance of permeable groins with different permeabilities under unsteady flow conditions. *Journal of Hydraulic Research*, 60(4): 601-615.

Khosronejad, A. and Ebrahimi, K. 2012. Large Eddy

## Numerical Investigation of the Effect of Upstream Permeable Vanes on the Control of Local Scour around Bridge Piers

M.A. Mirghasempour<sup>1</sup>, S. Abbasi<sup>2\*</sup>

Received: Sep. 17, 2025

Accepted: Oct. 25, 2025

### Abstract:

This research, with the goal of reducing local scour of bridge piers, has investigated the effect of permeable vanes on the scouring reduction. The numerical model used in this study, employing Flow3D software and validated with laboratory data from a reliable hydraulic model, confirmed its reliability for accurate simulation of real conditions with an average discrepancy of 14.52%. In contrast to the previous studies, this research simultaneously conducted a comparative analysis of the effect of pier geometry, vane arrangement, and relative spacing. The resulting findings indicate that square-sectioned piers have greater vulnerability to erosion compared to circular-sectioned piers. The most important achievement of this research is the identification of the optimal configuration as a two-row converging vane arrangement upstream of the pier. This configuration, by attenuating and diverting the vortices, led to a scour depth reduction of 52.2% around the circular-sectioned pier and 40% in that of the square-sectioned pier.

**Keyword:** Bridge piers, Hydraulic structure protection, Numerical modeling, Permeable vanes, Scour control,

---

1- M.Sc. in Water engineering and Hydraulic structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

(\* - Corresponding Author Email: Abbasi.Saeed@znu.ac.ir)