

بررسی عددی کاهش آب‌شستگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای با استقرار گروه زوج صفحات مستغرق

مهران صادقلو^۱ و مهدی حمیدی^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی؛ و دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۲

چکیده

احداث پل و سازه‌های هیدرولیکی در مسیر جریان رودخانه‌ها، آب‌شستگی را در اطراف پایه‌های پل در پی دارد. طراحی و برداشتن گام‌هایی به‌منظور کاهش آب‌شستگی، از موارد ضروری در مطالعات این حوزه است. در این پژوهش، از گروه زوج صفحات مستغرق برای کاهش آب‌شستگی پایه پل استفاده شده است. مدل‌های عددی در نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی و حساسیت‌سنجی ابعاد مش، مدل‌های آشفتگی و زمان تعادل آب‌شستگی در مدل عددی بررسی شده‌اند. برای صحت‌سنجی مدل عددی، نتایج تحلیل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و مقادیر خطاهای نسبی تعیین گردیدند. بیشینه خطای ۱۰ درصد نشان از عملکرد مناسب مدل عددی در تخمین مقادیر بیشینه آب‌شستگی دارد. برای آنکه گروه زوج صفحات مستغرق به شکلی مناسب طراحی شوند، اثر زاویه استقرار، موقعیت و ارتفاع صفحات بر مقادیر بیشینه آب‌شستگی و الگوی جریان پیرامون پایه پل بررسی گردیدند. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که موقعیت صفحات در حالت 0D, 1D, 2D با زاویه استقرار (0) ۳۰ درجه مناسب‌ترین حالت است که تا حدود ۳۲ درصد مقادیر بیشینه آب‌شستگی (d_{smax}) را کاهش می‌دهد. همچنین، افزایش ارتفاع صفحات بیش از ارتفاع بستر رسوبی، موجب کاهش روند کاهشی مقادیر بیشینه آب‌شستگی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

الگوی جریان، زاویه استقرار صفحات مستغرق، کاهش آب‌شستگی، مدل آشفتگی، FLOW-3D

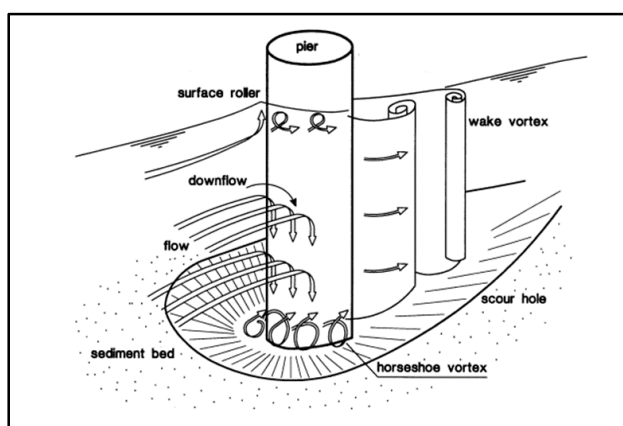
مقدمه

زمان شود که خسارات مالی و جانی را در پی دارد (Koohsari & Hamidi, 2022). عبور آب رودخانه از پایه پل، جریان آب را متلاطم می‌کند که مجموعه‌ای از جریان‌های گردابه‌ای پیرامون پایه پل به‌وجود می‌آید (شکل ۱). این جریان‌های گردابی عامل اصلی آب‌شستگی هستند که با گذشت زمان حفره آب‌شستگی را شکل می‌دهند. پس از برخورد جریان

پل از مهم‌ترین زیرساخت‌های عمرانی در خطوط ارتباطی و حمل‌ونقل کشورها به‌شمار می‌رود. مطالعات نشان می‌دهد که آب‌شستگی حول پایه پل از پدیده‌های مهم در بسترهای رودخانه‌ای است که همه ساله، به‌ویژه هنگام وقوع سیل، می‌تواند موجب تضعیف سازه پایه و گاهی فروپاشی آن طی گذشت

می‌شود که تنش برشی اعمالی بر ذرات بستر از تنش برشی بحرانی کمتر شود. جریان شتاب‌دهنده در دو طرف پایه پل دو شکاف در بستر رودخانه به‌وجود می‌آورد که فرآیند انتقال رسوبات خارج‌شده از حفره آب‌شستگی را در بالادست پایه پل آسان می‌کند (Zarrati *et al.*, 2004).

آب با پایه پل، فشار موضعی در اطراف پایه به‌وجود می‌آید که سبب تغییر جریان رودخانه در اطراف پایه‌های پل می‌شود. این جریان گردابه‌ای به گردابه نعل‌اسبی^۱ موسوم است و بستر رودخانه را در بالادست پایه پل حفر می‌کند و حفره آب‌شستگی را تشکیل می‌دهد (Raudkivi, 1998). گردابه نعل‌اسبی زمانی باعث توسعه حفره آب‌شستگی



شکل ۱- الگوی جریان در اطراف پایه پل (Raudkivi, 1998)

Fig. 1- Flow pattern around the bridge pier (Raudkivi, 1998)

صفحات مستغرق سازه‌هایی هستند با نسبت طول به ارتفاع کم که الگوی جریان را تغییر می‌دهند. از صفحات مستغرق نخستین بار در اوایل سال ۱۹۳۰ در کشورهایی مانند پاکستان، بنگلادش و هند با نام صفحات کینگ^۲ استفاده شد. این صفحات را می‌توان به‌صورت منفرد یا گروهی با زاویه‌های متفاوت نسبت به جهت جریان در کف رودخانه به‌کار گرفت اما افزایش بیش از حد صفحات از لحاظ اقتصادی توجیه ندارد ضمن اینکه مشکلاتی را برای حمل و نقل وسایل آبی ایجاد می‌کند. این صفحات با ایجاد جریان گردابه‌ای باعث تغییر در رژیم بار بستر و جابه‌جایی محل تجمع رسوبات و آب‌شستگی می‌شوند. به دلیل اختلاف فشار در اطراف صفحه، جریان از ناحیه پرفشار به طرف بالای آن و از ناحیه کم‌فشار به طرف پایین آن

برای کاهش آب‌شستگی دو دسته راهکار اجرا می‌شود. در دسته اول با افزایش مقاومت بستر رسوبی در اطراف پایه‌های پل تا حدودی آب‌شستگی کاهش می‌یابد. استفاده از سنگ‌چین^۲ و گابیون که در آن الگوی جریان اطراف پایه‌های پل بدون تغییر می‌ماند ولی مقاومت بستر رسوبی در برابر فرسایش افزایش می‌یابد در این دسته قرار می‌گیرند. در دسته دوم الگوی جریان اطراف پایه‌ها تغییر می‌کند و از تنش برشی در بستر رسوبی کاسته می‌شود و در نتیجه عمق حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد (Zarrati *et al.*, 2004). این کار با استفاده از نصب طوق، صفحات یا شکاف امکان‌پذیر خواهد بود. با توجه به هزینه کمتر راهکارهای محافظتی دسته دوم، به‌کارگیری آنها نسبت به دسته اول اقتصادی‌تر خواهد بود (Ebrahimi *et al.*, 2004).

1- Horse-Shoe Vortex
3- King's Vanes

2- Riprap

حرکت می‌کند و باعث ایجاد گردابه و گردش جریان در اطراف صفحه می‌گردد. عملکرد صفحات مستغرق براساس چرخش ثانویه در جهت خلاف جریان ثانویه اصلی است. اثربخشی صفحات مستغرق در کاهش اثر جریان ثانویه خم کانال نشان می‌دهد که آنها می‌توانند جایگزین مناسبی برای سنگ‌چین و دیگر انواع سازه‌های حفاظتی از رودخانه در کاهش فرسایش باشند (Odgaard & Kennedy, 1983). قربانی و کلز (Ghorbani & Kells, 2008) روی تأثیر صفحات مستغرق بر آبشستگی به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند و با در نظر گرفتن آرایش‌های مختلف صفحه مستغرق با ارتفاع صفحه و عمق جریان متفاوت در عدد فرود ثابت به ارزیابی این پدیده پرداختند. این محققان از نتایج مطالعات خود دریافتند که بیشترین کاهش در آبشستگی برای صفحه مستغرق در زاویه $8/5$ درجه و عمق جریان 20 سانتی‌متر برای پایه استوانه‌ای نسبت به حالت شاهد رخ می‌دهد. در حالت استفاده از دو صفحه مستغرق، عمق آبشستگی به میزان $87/7$ درصد در زاویه $18/5$ درجه و عمق جریان 15 سانتی‌متر کاهش می‌یابد. شجاعی و همکاران (Shojaee *et al.*, 2012) با مطالعه آزمایشگاهی کاربرد صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه استوانه‌ای شکل، صفحات مستغرق را با آرایش و زاویه‌های مختلف بررسی کردند و دریافتند که استفاده از شش صفحه مستغرق با زاویه‌های مختلف بهترین وضعیت را برای کاهش آبشستگی دارد. پرچمی و همکاران (Parchami *et al.*, 2017) با مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شکل صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل از صفحاتی با طول برابر با قطر پایه و هم‌تراز با بستر استفاده و عملکرد صفحات مستغرق مستطیلی تخت، محدب، مقعر، محدب - مقعر، مقعر - محدب، مشبک و زاویه‌دار را ارزیابی کردند و دریافتند که بیشترین میزان کاهش آبشستگی در حالت صفحات تخت با آرایش نوک‌تیز بوده‌است. امامقلی‌زاده و نوحانی

با بررسی عددی کاهش آبشستگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای... (Emamgholizadeh, & Nohani, 2017) آزمایشگاهی عملکرد استقرار پره‌های مستغرق در کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌های جانبی پل با دماغه گرد مشاهده کردند که حضور پره‌های مستغرق با آرایش دو ردیفه موجب کاهش قابل توجهی در کاهش آبشستگی تا حدود 70 درصد می‌شود و موجب دور شدن حفره آبشستگی از دماغه تکیه‌گاه جانبی و نزدیک شدن به خط مرکزی کانال خواهد شد. خادمی و همکاران (Khademi *et al.*, 2014) مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان در اطراف تکیه‌گاه پل را با و بدون حضور صفحات مستغرق در مدل آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند که نصب صفحه مستغرق در گوشه بالادست تکیه‌گاه با زاویه 40 درجه عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه را کاهش می‌دهد. سالوادور و همکاران (Salvador *et al.*, 2008) به شبیه‌سازی عددی پدیده‌های پیرامون دو پایه با مقطع هندسی استوانه به قطر 2 سانتی‌متر و ارتفاع 5 سانتی‌متر و فاصله 4 سانتی‌متر از هم در نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. این محققان در این مطالعه از سیستم مختصات کارتزین و مدل آشفتگی LES استفاده کردند. در تحلیل عددی ایشان با مدل آشفتگی LES گردابه‌هایی در بین دو پایه مشاهده می‌شود که به خوبی با خروجی‌های آزمایشگاهی تطابق دارد. پازویک و استیلگر (Pasiok & Stilger, 2010)، حرکت ذرات رسوب و الگوی جریان پیرامون پایه پل را با استفاده از مدل آشفتگی LES در نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند. در این شبیه‌سازی عددی تمامی ذرات رسوب دارای قطر یکسان بودند. هدف تحقیق این محققان بررسی حرکات ذرات رسوبی در فرآیند حرکت جریان و ایجاد حفره آبشستگی بوده‌است. نتایج تحقیق نشان داد حرکات ذرات به‌شدت وابسته به گردابه‌های نعل اسبی ایجادشده در اثر برخورد جریان با پایه پل است. آنها پس از مشاهده خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی به این

شرایط ناهم‌پوشانی صفحات کمترین و در شرایط هم‌پوشانی ۱۰۰ درصد صفحات بیشترین مقادیر را دارد.

مطالعات در مورد آب‌شستگی پیرامون پایه پل تا به امروز اغلب در زمینه آب‌شستگی پایه‌های پل، تنها و به طور خاص اقدامات کاهش آن به صورت آزمایشگاهی بوده‌است و مطالعات جامع در این زمینه با مدل‌سازی عددی صورت نگرفته است. با توسعه روزافزون رایانه‌ها، علاقه‌مندی به مطالعه این پدیده در چارچوب عددی بیشتر شده‌است. هم‌چنین، بیشتر مطالعات عددی در حالت پایه پل تنها بوده‌است و پژوهش‌های اندکی در حوزه راهکارهای کاهش آب‌شستگی و به طور خاص صفحات مستغرق باتوجه به پیچیدگی‌های تحلیل الگوی جریان صورت گرفته است و اغلب پژوهش‌ها به بررسی الگوی جریان و آب‌شستگی در پیرامون پایه پل بدون حضور صفحات پرداخته است. از این‌رو، در این تحقیق مطالعه آب‌شستگی پایه پل در حضور صفحات مستغرق با آرایش‌های مختلف در مدل عددی FLOW-3D نسخه 10.0.1 در دستور کار قرار گرفته‌است.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

برای صحت‌سنجی مدل عددی از آزمایش‌های شاهد (Koohsari & Hamidi, 2022) بدون حضور صفحات مستغرق و در حالت پایه پل تنها استفاده شده‌است.

مشخصات مدل آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده‌است. در تمامی آزمایش‌ها قطر پایه پل ۵ سانتی‌متر و متوسط اندازه دانه رسوب ۰/۸۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است.

نتیجه رسیدند که مدل آشفتگی LES در مدل کردن جریان متلاطم پیرامون پایه پل دقت خوبی دارد. محمدیون و همکاران (Mohammadiun *et al.*, 2018) با بررسی عددی عملکرد صفحات مستغرق به صورت منفرد و گروهی در پتانسیل آب‌شستگی و رسوب‌گذاری جریان کانال با استفاده از مدل آشفتگی RSM، ابتدا صحت‌سنجی عددی را با یک مدل آزمایشگاهی اجرا کردند و پس از آن به ارائه ابعاد و زوایای مناسب به منظور کاهش آب‌شستگی توسط صفحات مستغرق پرداختند و دریافته‌اند که استفاده از صفحه مستغرق منفرد با ارتفاع ۰/۳ متر و زاویه ۲۰ درجه موجب بهبود الگوهای جریان و کاهش مناسب آب‌شستگی در بستر کانال می‌شود؛ این محققان استفاده نکردن از صفحه با ارتفاع بیشتر از ۰/۵ متر و زاویه استقرار بزرگ‌تر از ۴۰ درجه را توصیه کرده‌اند. امیری و طیبی (Amiri & Tayyebi, 2018) آب‌شستگی پیرامون پایه پل را با مدل SSIIM در حضور گروه زوج صفحات مستغرق با آرایش ۶ تایی عمود بر جریان آب بررسی کردند و دریافته‌اند که با نزدیک شدن زوج صفحات اول به پایه و افزایش طول صفحات مستغرق، بیشینه عمق آب‌شستگی تا ۸۹ درصد کاهش می‌یابد. رویانی و همکاران (Royani *et al.*, 2021) با بررسی عددی تغییرات نیمرخ بستر اطراف پایه پل مستطیلی با نرم‌افزار FLOW-3D و نیز اثر صفحات مستغرق بر الگوی آب‌شستگی دریافته‌اند که در حضور صفحات مستغرق، تنش در بالادست پایه حدود ۹۹ درصد کاهش می‌یابد و در پایین دست پایه حدود ۹۷ درصد. عبدی و همکاران (Abdi *et al.*, 2022) با بررسی هیدرودینامیک جریان اطراف پایه پل با حضور صفحات مستغرق در قوس ۱۸۰ درجه با مدل عددی SSIIM نشان دادند قدرت جریان ثانویه در

جدول ۱- تنظیمات مدل آزمایشگاهی

Table 1- Experimental model setup

شماره آزمایش	دبی (لیتر بر ثانیه)	عدد فرود	عمق جریان (متر)	سرعت جریان (متر بر ثانیه)	سرعت آستانه حرکت (متر بر ثانیه)
Test number	Discharge (lit/s)	Froude number	Flow depth (m)	Flow velocity (m/s)	Incipient motion velocity (m/s)
1	1.4	0.26	0.02	0.1167	0.2568
2	2.8	0.37	0.025	0.1867	0.2685
3	4.2	0.43	0.03	0.2333	0.278

معادله‌های حاکم

برای شبیه‌سازی آب‌شستگی در مدل عددی FLOW-3D از معادله‌های پیوستگی و ناویر-استوکس برای حرکت سیال تراکم ناپذیر و رابطه انتقال رسوب استفاده می‌شود که در ادامه معرفی می‌شوند.

رابطه پیوستگی

فرم کلی رابطه پیوستگی به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

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

که در آن،

V_F = حجم آزاد به سمت جریان؛ ρ = چگالی سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ t = زمان (ثانیه)؛ u, v, w و x, y, z = مؤلفه‌های سرعت به ترتیب در راستای x, y و z (متر بر ثانیه)؛ A_x, A_y, A_z = مساحت کسری محیط به جریان به ترتیب در جهت‌های x, y و z ؛ R = ضریب مربوط به مختصات به صورت کارتزین و یا استوانه‌ای است. اولین عبارت در سمت راست رابطه پیوستگی مربوط به انتشار تلاطم و به صورت رابطه ۲ قابل تعریف است:

مدل عددی

در این تحقیق از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است که مدل عددی توانمندی است بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی^۱ می‌باشد. از این نرم‌افزار همچنین برای مدل‌سازی سه‌بعدی جریان پیرامون سازه‌های هیدرولیکی و آب‌شستگی ناشی از جریان آشفته در اطراف پایه پل استفاده شده است. معادله‌های حاکم در این نرم‌افزار، معادله‌های اندازه حرکت و پیوستگی هستند و برای حل جریان آشفته پیرامون پایه، از حلگرهای مختلفی استفاده می‌شود. به دلیل توانایی بالای این نرم‌افزار در مدل‌سازی عددی جریان سیالات، خروجی‌های قابل قبولی در این زمینه در ادبیات فنی موضوع گزارش شده است. این مدل عددی برای حل هندسه موردنظر از شبکه‌بندی مستطیلی استفاده می‌کند. در هر سلول، مقادیر متوسط جریان مانند سرعت و فشار در زمان‌های مختلف در مرکز سلول محاسبه و ذخیره می‌شوند. این برنامه برای حل میدان جریان در سطوح و اجسام صلب از روش نسبت سطح به حجم مانع^۲ (FAVOR) و برای حل جریان سیال در سطح آزاد از روش اصلاح شده نسبت حجم^۳ (VOF) استفاده می‌کند (Flow3D Help, Ver. 10.0.1).

1- Computational Fluid Dynamics

2- Fractional Area/Volume Obstacle Representation

3- Volume of Fluid

معادله‌های انتقال رسوب

به‌طور کلی رسوبات به دو دسته تقسیم می‌شوند: رسوبات معلق و رسوبات متراکم. رسوبات معلق به دلیل غلظت پایین، همراه با سیال حرکت می‌کنند. رسوبات متراکم توسط کاربرد مدل‌سازی و نرم‌افزار تعریف می‌شوند و عامل حرکت آنها وجود تنش برشی جریان در کف کانال است. رابطه انتقال هر گونه نام از رسوبات معلق، بدون در نظر گرفتن توابع VOF و FAVOR به‌صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}c_{s,i}) = 0 \quad (۷)$$

که در آن،

$c_{s,i}$ = غلظت رسوب معلق (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ و
 u = سرعت متوسط مخلوط رسوب و سیال (متر بر ثانیه). چگالی رسوبات از سیال اطرافش بیشتر است، از این رو ذرات رسوبی در داخل سیال منحرف خواهند شد. شدت این انحراف بستگی به تعادل بین نیروهای شناوری و دراک دارد. بنابراین، می‌توان رابطه تعادل مومنتم را برای هر ذره رسوب و مخلوط سیال و رسوب (با صرف‌نظر کردن از توابع VOF و FAVOR) به‌صورت رابطه ۸ نوشت:

$$\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}c_{s,i}) = 0 \frac{\partial u_{s,i}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_{s,i} = -\frac{1}{\rho_{s,i}} \nabla P + F - \frac{K_i}{f_{s,i} \rho_{s,i}} u_{r,i} \quad (۴)$$

که در آن،

$u_{s,i}$ = سرعت ذره i ام رسوبات (متر بر ثانیه)؛ $\rho_{s,i}$ = جرم مخصوص مواد رسوبی (کیلوگرم بر متر مکعب)؛

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{\rho} A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{\rho} A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{\rho} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_{\rho} A_x}{x} \quad (۲)$$

عبارت دوم در سمت راست رابطه ۱ بیانگر منشأ چگالی است و به‌صورت رابطه ۳ قابل‌تعریف است (Biabani et al., 2019 & 2021):

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (۳)$$

معادله‌های ناویر-استوکس

فرم کلی معادله‌های ناویر-استوکس در حالت سه‌بعدی به‌صورت معادله‌های ۴، ۵ و ۶ است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \zeta \frac{A_y V^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (۴)$$

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

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

که در آنها،

G_x ، G_y و G_z = مربوط به شتاب حجمی (متر بر مجذور ثانیه)؛ f_x ، f_y و f_z = شتاب‌های ناشی از جریان‌های لزج (متر بر مجذور ثانیه)؛ و b_x ، b_y و b_z = شامل روابط مربوط به افت در محیط‌های متخلخل (Biabani et al., 2019 & 2021)

و نوسان‌ها سرعت را با حاصل ضرب بزرگی L و تنش برشی متوسط مقیاس می‌کند. این کمیت‌ها برای ارائه لزوجت گردابی سینماتیکی مدل LES به صورت رابطه ۱۱ هم ترکیب می‌شوند:

$$v_T = (cL)^2 \cdot \sqrt{e_{ij}e_{ij}} \quad (11)$$

هندسه مدل عددی

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار 3D-Max برای تولید هندسه استفاده شده است که با استفاده از فرمت Stl در مدل عددی FLOW-3D فراخوانی می‌شود. در نرم‌افزار FLOW-3D برای تشخیص رسوبات، از دو هندسه بهره‌گیری می‌شود: مدل هندسی اول شامل دیواره و کف کانال، پایه پل استوانه‌ای و صفحات مستغرق است و هندسه دوم متشکل است از بستر رسوبی (شکل ۲- الف و ب). نوع اول مدل‌های عددی شامل کانال به همراه پایه پل تنها برای صحت‌سنجی مدل آزمایشگاهی و نوع دوم مدل‌های عددی متشکل است از کانال، پایه پل و گروه زوج صفحات مستغرق در نرم‌افزار 3D-Max در ارتفاع‌های برابر با ضخامت رسوب (۱۰ سانتی‌متر) و ارتفاع ۱۱ و ۱۲ سانتی‌متر (ضخامت رسوب به علاوه یک سوم و دو سوم ارتفاع آب بالای رسوب) و در طول دو برابر قطر پایه (2D) و در زاویه‌های استقرار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت جریان و در سه موقعیت 0D، 1D، 2D و 1D، 2D، 3D و 2D، 3D، 4D و ضخامت یک میلی‌متر مدل‌سازی شده است (شکل ۳).

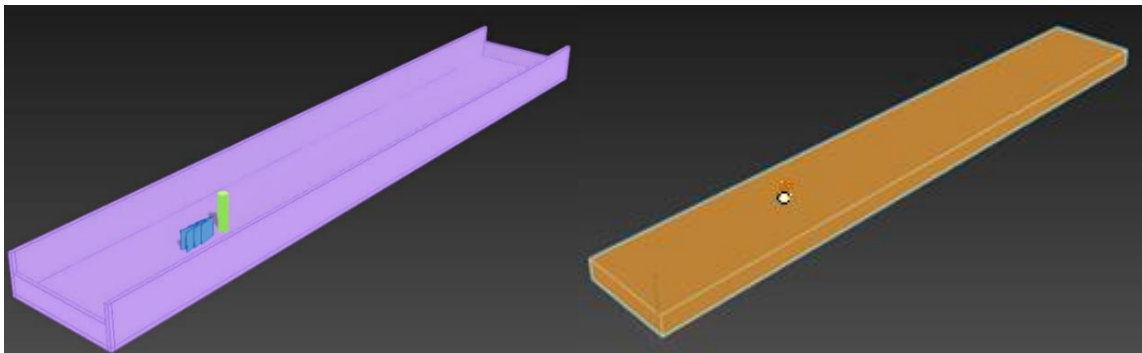
$f_{s,i}$ = کسر حجمی ذره i ام رسوبات؛ K = تابع درگ، F = مجموع نیروی حجمی و نیروی لزوجت (نیوتن)؛ و $u_{s,i}$ = سرعت نسبی (متر بر ثانیه) که از رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$u_{r,i} = u_{s,i} - u_f \quad (9)$$

مدل آشفتگی

در نرم‌افزار FLOW-3D پنج مدل برای شبیه‌سازی آشفتگی موجود است که عبارت‌اند از: مدل طول اختلاط پرناتل، مدل یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG)، و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES). ایده اساسی مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ این است که تمام ساختارهای تلاطم که با استفاده از شبکه محاسباتی قابل محاسبه هستند، به‌طور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی تقریب زده شوند که قابل محاسبه نیستند. در مدل LES، اثرهای آشفتگی، که خیلی کوچک‌اند و قابل محاسبه نیستند، با لزوجت آشفتگی، که متناسب است با مقیاس طول ضربدر معیاری از نوسان‌های سرعت در آن مقیاس، نمایش داده شوند. اسموگینسکی^۱ از یک میانگین هندسی ابعاد سلول شبکه برای مقیاس طول استفاده می‌کند (FLOW-3D, user manual (Version 10.1):

$$L = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

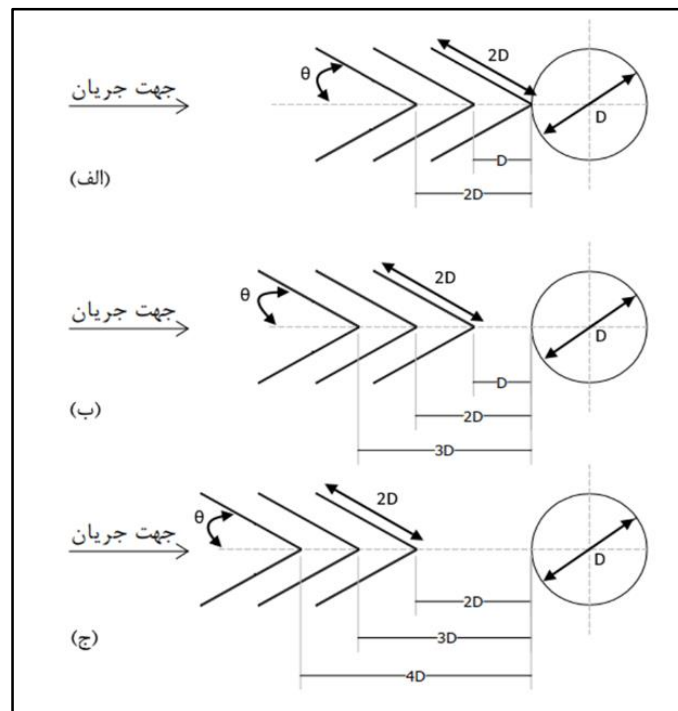


(ب)

(الف)

شکل ۲- مدل هندسی شبیه‌سازی شده در 3D-Max (الف) کانال، پایه پل و صفحات مستغرق (ب) بستر رسوبی

Fig. 2- Geometry of simulated model in 3D-Max (a) channel, bridge pier and submerged vanes (b) sediment bed



شکل ۳- نمای بالایی قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق در زاویه‌های استقرار مختلف (θ) و فاصله‌های (الف) 0D,1D,2D (ب)

(ج) 1D,2D,3D از پایه پل

Fig. 3- Up view position of group of two submerged vanes in different position degrees (θ) and distances from bridge pier (a) 0D,1D,2D (b) 1D,2D,3D (c) 2D,3D,4D

نظر گرفتن سطح آزاد در شبیه‌سازی از حالت تقارن^۴ استفاده شده‌است.

مدل‌سازی رسوبات

تعریف و شبیه‌سازی بستر رسوبی در نتایج حاصل مربوط به عمق حفرة آب‌شستگی بسیار

شرایط مرزی

در این شبیه‌سازی در ورودی مرز بلوک، از شرط مرزی سرعت ورودی^۱، در مرز خروجی از شرط مرزی جریان خروجی^۲، تمامی دیواره‌ها و کف کانال از حالت دیواره^۳ و برای قسمت بالای هندسه و در

1- Specified Velocity
3- Wall

2- Outflow
4- Symmetry

تعیین‌کننده است. تمامی مشخصات استفاده- شده مربوط به ذرات در حالت عددی، پارامترهایی است که در مدل آزمایشگاهی استفاده شده است. باتوجه به منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی، میزان قطر متوسط ذرات رسوبی ۰/۸۲ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی استاندارد رسوبات نیز ۱/۲۶ محاسبه شد. تمامی ذرات رسوب در نرم‌افزار به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده‌اند و از یک قطر واحد پیروی می‌کنند. در جدول ۲ تمامی مشخصات رسوب تعریف شده در نرم‌افزار FLOW-3D آمده است.

جدول ۲- مشخصات ذرات رسوبی در مدل عددی

Table 2- Characteristics of sediment particles in numerical model

متوسط اندازه دانه رسوب (میلی‌متر)	چگالی دانه رسوب (کیلوگرم بر مترمکعب)	ضریب درگ	ضریب بار بستر	زاویه سکون (درجه)
Average sediment particle size (mm)	Density of sediment particle (kg/m ³)	Drag coefficient	Bed load coefficient	Angle of repose (°)
0.82	2650	0.5	8	30

بیشینه عمق حفرة آب‌شستگی برای ابعاد مختلف مش با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و تغییرات درصد خطای نسبی در جدول ۳ ارائه شده‌است. همان طور که مشاهده می‌شود، با کوچک‌تر کردن اندازه مش خطای نسبی کاهش می‌یابد و پس از اندازه مش ۰/۸۵ میلی‌متر، تغییرات بیشینه عمق آب‌شستگی تقریباً روند ثابتی دارد. از این رو اندازه مش ۰/۸۵ میلی‌متر برای شبیه‌سازی سایر مدل‌ها استفاده می‌شود.

حساسیت‌سنجی ابعاد مش

اندازه مناسب مش در دستیابی به نتایج عددی بسیار اهمیت دارد؛ به همین سبب کاهش اندازه ابعاد مش‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که نتایج خروجی به ثبات رسیده باشد و کاهش ابعاد تأثیری بر نتایج نداشته باشد. به‌منظور بررسی حساسیت مدل عددی به ابعاد مش، تمامی پردازش‌ها برای دبی ۰/۰۴۲ متر مکعب بر ثانیه اجرا شد که سرعت جریان ۰/۲۳ متر بر ثانیه و عدد فرود جریان ۰/۴۳ بوده است.

جدول ۳- تغییرات درصد خطای نسبی بیشینه عمق حفرة آب‌شستگی با اندازه و تعداد مش

Table 3- Variation of relative error of maximum scour hole depth with mesh sizes and numbers

اندازه مش (میلی‌متر)	تعداد مش (عدد)	خطای نسبی (درصد)
Mesh size (mm)	Mesh number	Relative error (%)
2	35200	83
1.7	51948	80
1.4	95850	78
1.1	209960	74
1.05	211472	69
1	240375	61
0.95	293658	50
0.9	363087	28
0.85	440625	11
0.8	584337	10.8
0.75	655690	10.7
0.7	803985	10.6

نتایج و بحث

مقایسه مدل آشفتگی

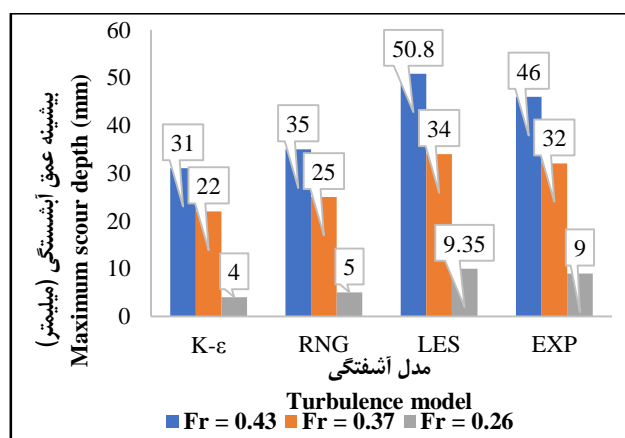
برای شبیه‌سازی آشفتگی در مدل عددی FLOW-3D، از مدل‌های آشفتگی تعریف‌شده در این نرم‌افزار استفاده می‌شود. این مدل‌های آشفتگی برای مدل‌سازی‌های عددی پدیده‌های هیدرولیکی شامل مدل‌های آشفتگی RNG، $k-\varepsilon$ و LES است. با مقایسه نتایج این سه مدل آشفتگی با داده‌های آزمایشگاهی، مشاهده شد که مدل LES در عدد فرودهای پایین تا حدود ۰/۵ نسبت به دو مدل RNG و $k-\varepsilon$ در تخمین بیشینه عمق آب‌شستگی دقت بیشتری دارد (جدول ۴). در شکل ۴، مقادیر بیشینه عمق حفره آب‌شستگی برای مدل‌های مختلف آشفتگی ارائه شده‌است.

برای کالیبراسیون مدل عددی در این تحقیق، مدل‌های مختلف آشفتگی، تکامل زمانی عمق آب‌شستگی و صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی (Koohsari & Hamidi, 2022) مقایسه شدند. برای آنکه اثر زوج صفحات مستغرق بر آب‌شستگی بستر بررسی شود، موقعیت، زاویه استقرار و ارتفاع گروه زوج صفحات مستغرق به‌عنوان متغیرهای مدل عددی در نظر گرفته شدند و اثرهای آنها بر بیشینه عمق آب‌شستگی ارزیابی شد.

جدول ۴- تغییرات درصد خطای نسبی بیشینه عمق حفره آب‌شستگی با مدل آشفتگی در عدد فرودهای مختلف

Table 4- Variation of relative error of maximum scour hole depth with turbulence models in different Froude numbers

مدل آشفتگی Turbulence Model	خطای نسبی (درصد) Relative error (%)		
	$Fr=0.26$	$Fr=0.37$	$Fr=0.43$
$k-\varepsilon$	55.55	31.25	32.61
$k-\varepsilon$ RNG	44.44	21.87	23.91
LES	3.89	6.25	10.43

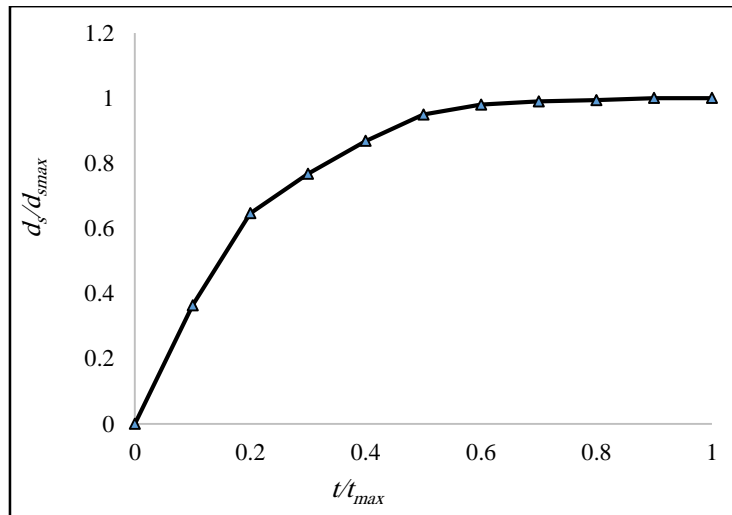
شکل ۴- اثر نوع مدل آشفتگی بر بیشینه عمق حفره آب‌شستگی ($Fr=0.26$ ، 0.37 و 0.43)Fig. 4- Effect of turbulence model type on maximum depth of scour hole ($Fr=0.26, 0.37, 0.43$)

زمان آبشستگی تعادلی

درصد زمان، حدود ۴۰ درصد آبشستگی رخ داده است. در مدل عددی به دلیل هزینه محاسباتی بالا در مدت تحلیل، عملاً استفاده از چنین زمانی برای پردازش مقدور نیست. بنابراین، پردازش برای حالتی مشخص در زمان‌های مختلف ارزیابی و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

براساس جدول ۵، با توجه به ثابت شدن تقریبی مقادیر آبشستگی پس از ۵۰۰ ثانیه، این زمان برای پردازش مدل عددی در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق، آزمایش‌ها در عدد فرود ۰/۴۳ تا زمان ۵ ساعت اجرا و مشاهده گردید که از زمان ۳/۵ ساعت مقادیر بیشینه آبشستگی تقریباً ثابت مانده و تغییرات محسوسی در عمق حفره آبشستگی حاصل نشده است. تغییرات بیشینه عمق آبشستگی پس از ۳/۵ ساعت کمتر از ۱ میلی‌متر بوده است، از این رو زمان ۳/۵ ساعت برای اجرای آزمایش‌ها انتخاب شد. در شکل ۵، منحنی زمانی آبشستگی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پس از گذشت ۱۰



شکل ۵- منحنی زمانی بیشینه عمق حفره آبشستگی (Fr=۰/۴۳)

Fig. 5- Time evolution of maximum depth of scour hole (Fr=0.43)

جدول ۵- تغییرات بیشینه عمق حفره آبشستگی با زمان

Table 5- Variation of maximum scour hole depth with time

زمان (ثانیه) Time (s)	بیشینه عمق حفره آبشستگی (میلی‌متر) Maximum depth of scour hole (mm)
300	40
400	47.12
500	50.8
600	51.2
700	51.3

صحت‌سنجی مدل عددی
 در این پژوهش، برای حصول اطمینان از درست بودن شبیه‌سازی، بیشینه عمق آب‌شستگی حاصل از تحلیل عددی با اندازه مش ۰/۸۵ میلی‌متر، مدل آشفنگی LES و زمان آب‌شستگی تعادلی ۵۰۰ ثانیه با داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۶ مقایسه و ارزیابی و خطای نسبی ارائه شد.

جدول ۶- بیشینه عمق حفرة آب‌شستگی در مدل‌سازی عددی و درصد خطای نسبی آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی

Table 6- maximum scour hole depth in numerical modeling and relative error of it compared with experimental data

شماره مدل Model number	دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (lit/s)	بیشینه عمق حفرة آب‌شستگی (میلی‌متر) Maximum depth of scour hole (mm)		خطای نسبی RE (%)
		مدل آزمایشگاهی Experimental model	مدل عددی Numerical model	
		1	1.4	
2	2.8	32	34	6.25
3	4.2	46	50.8	10.43

(D قطر پایه پل)، نسبت به پایه پل قرار گرفته‌اند. باتوجه به نتایجی که در بخش‌های پیشین حاصل شد، تمامی تحلیل‌ها تحت جریان با عدد فرود ثابت ۰/۴۳ مدل آشفنگی LES، ابعاد سلول ۰/۰۸۵ متر و زمان پردازش ۵۰۰ ثانیه صورت‌گرفته‌است. جدول ۷ مشخصات مدل شامل موقعیت قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق و نیز زاویه استقرار صفحات را نمایش می‌دهد. در هر موقعیت قرارگیری، شش صفحه مستغرق به صورت V شکل و به‌طور متقارن در زاویه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به هم قرار داده شده‌اند. در این جدول میزان عمق آب‌شستگی و کاهش آن نیز نسبت به حالتی ارائه شده‌است که صفحات مستغرق حضور ندارند.

باتوجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که در آزمایش با دبی‌های ۱/۴، ۲/۸ و ۴/۲ لیتر بر ثانیه، میزان خطای نسبی به‌ترتیب ۳/۸۸، ۶/۲۵ و ۱۰/۴۳ درصد است که افزایش خطای نسبی می‌تواند به علت اختلاف در میزان سرعت نزدیک‌شونده به پایه‌ها باشد، نتایج همچنین مناسب بودن مدل عددی را در شبیه‌سازی فرآیند آب‌شستگی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

اثر زاویه استقرار گروه زوج صفحات مستغرق و فاصله آن از پایه بر کاهش آب‌شستگی

در تمامی مدل‌ها، شش صفحه مستغرق به‌طور متقارن نسبت به جهت جریان به‌ترتیب در موقعیت‌های 0D,1D,2D, 1D,2D,3D, 0D,1D,2D,3D,4D و 2D,3D,4D

جدول ۷- مقادیر بیشینه عمق حفره آبشستگی با قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق در بالادست پایه استوانه‌ای در موقعیت و زاویه‌های استقرار مختلف ($Fr=0,43$)

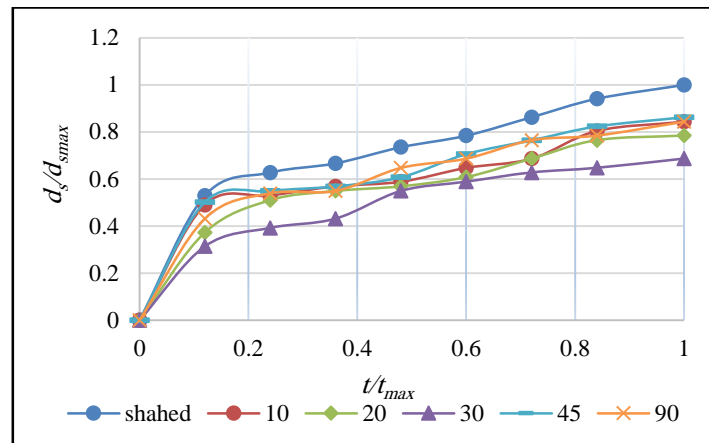
Table 7- Maximum scour hole depth with position of group of two submerged vanes in downstream of cylindrical pier in different location and position degrees

شماره مدل Model number	موقعیت صفحات مستغرق Location of submerged vanes	زاویه استقرار (درجه) Position angle (°)	بیشینه عمق حفره آبشستگی (میلی‌متر) Maximum depth of scour hole (mm)	کاهش آبشستگی (درصد) Scour reduction (%)
-	-	-	51	-
4	0D,1D,2D	10	43	15.69
5		20	40	21.57
6		30	35	31.37
7		45	44	13.73
8		90	43	15.69
9		10	44	13.73
10	1D,2D,3D	20	43	15.69
11		30	37	27.45
12		45	48	5.88
13		90	45	11.76
14		10	39	23.53
15		20	43	15.69
16	2D,3D,4D	30	37	27.45
17		45	49	3.92
18		90	44	13.73

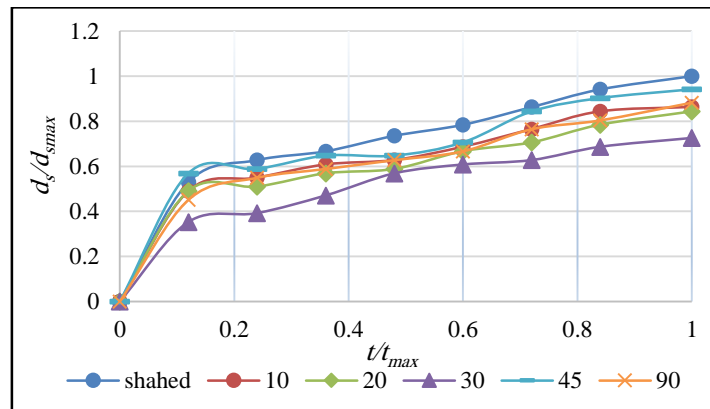
صفحات مستغرق و زاویه‌های برخورد نسبت به جهت جریان دانست. مناسب‌ترین موقعیت قرارگیری صفحات در حالت 0D,1D,2D است و کمترین تأثیر را موقعیت قرارگیری در حالت 2D,3D,4D داراست که با کاهش فاصله صفحات از بالادست کانال به سمت پایه پل، نقطه جدایی لایه مرزی به سمت پایه پل جابه‌جا می‌شود، در نتیجه، ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد.

از این‌رو با کاهش فاصله صفحات نسبت به پایه پل، شدت تنش برشی برای کندن رسوبات بستر در اطراف پایه پل کاهش و در نتیجه میزان تأثیر صفحات مستغرق و محافظت آنها از بستر فرسایش‌پذیر در برابر پدیده آبشستگی افزایش می‌یابد.

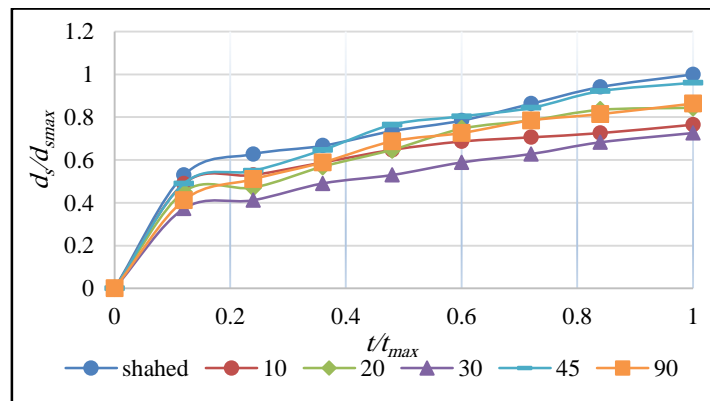
در جدول ۷ مشاهده می‌شود که حضور صفحات مستغرق در تمامی حالت‌ها باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود، اما با توجه به موقعیت‌های متفاوت قرارگیری صفحات این میزان کاهش یکسان نیست. از شکل ۶ (الف تا ج) مشاهده می‌شود سرعت آبشستگی در ابتدای شبیه‌سازی بسیار زیاد است به‌گونه‌ای که در ۶۰ ثانیه اول شبیه‌سازی حدود ۴۵ درصد از کل مقادیر آبشستگی در تمامی حالات ایجاد می‌شود، اما با گذشت زمان سرعت تغییرات کاهش پیدا می‌کند. با افزایش زاویه استقرار صفحات تا ۳۰ درجه، میزان کاهش عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. اما با افزایش آن از ۳۰ درجه، این روند کاهش می‌یابد و از روند مشخصی پیروی نمی‌کند که دلیل آن را می‌توان برهم‌کنش موقعیت گروه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- تکامل زمانی حفره آب‌شستگی بی‌بعد با قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق با زاویه‌های مختلف استقرار در موقعیت‌های (الف) 0D,1D,2D (ب) 1D,2D,3D (ج) 2D,3D,4D از پایه پل

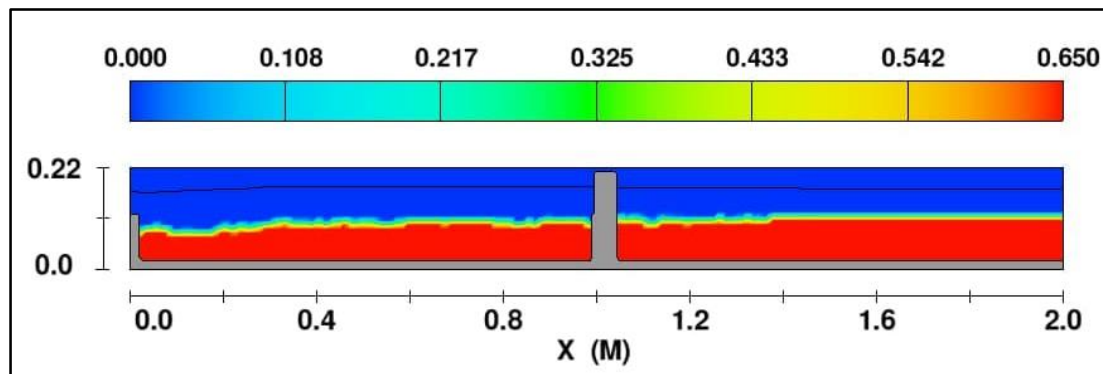
Fig. 6- Time evolution of dimensionless scour hole with group of two submerged vanes with different position degrees in location of (a) 0D,1D,2D (b) 1D,2D,3D (c) 2D,3D,4D from the bridge pier

برخورد با دماغه پایه پل، باتوجه‌به اینکه سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب بیشتر می‌شود، فشار بیشتری نیز در ترازهای بالاتر روی

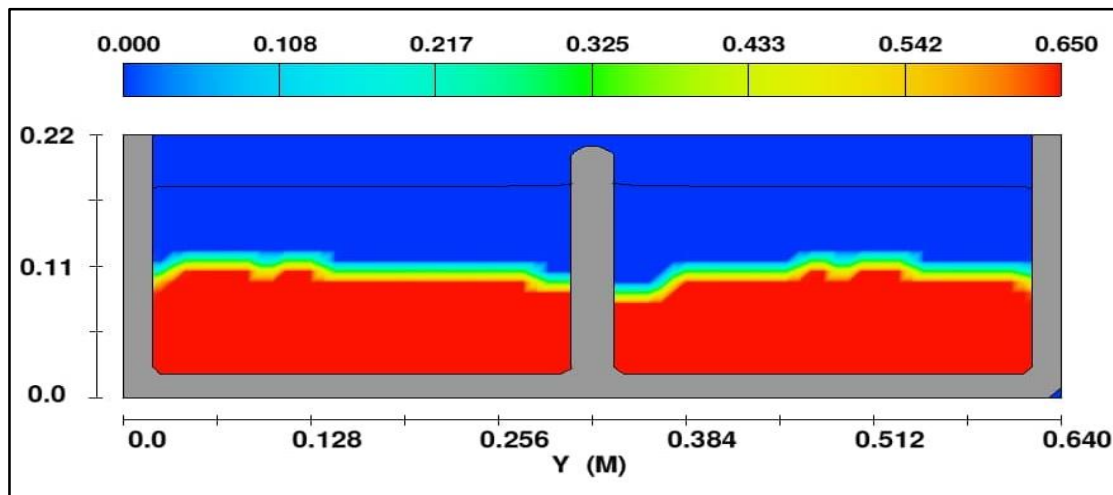
شکل ۷ حفره آب‌شستگی در اطراف پایه پل را برای گروه زوج صفحات مستغرق با زاویه ۳۰ درجه در موقعیت 0D,1D,2D نشان می‌دهد. جریان پس از

به داخل حفره خواهد شد که به ایجاد جریانی گردابی می‌انجامد، و به تدریج در دو طرف پایه امتداد می‌یابد و شکلی شبیه به نعل اسب پدید می‌آورد. ذرات جدا شده از بستر بر اثر جریان عمومی کانال به پایین دست حمل می‌شوند. حفر گودال توسط گردابه‌های نعل اسبی آن قدر ادامه می‌یابد که انرژی گردابه‌ها مستهلک شود، در این حالت، عمق آب‌شستگی به تعادل می‌رسد.

پایه ایجاد می‌شود که به این ترتیب یک گرادیان فشار روی پایه پل از بالا به پایین به وجود می‌آید و این موجب می‌شود تا جریان رو به پایین در بالادست پایه ایجاد شود که پس از برخورد به بستر رسوبی باعث حفر بستر خواهد شد. مقداری از جریانی که به سمت بالا حرکت می‌کند در برخورد با جریان کانال به اجبار در جهت آن حرکت می‌کند که پس از برخورد مجدد با پایه پل، باعث چرخش جریان و بازگشت آن



(الف)



(ب)

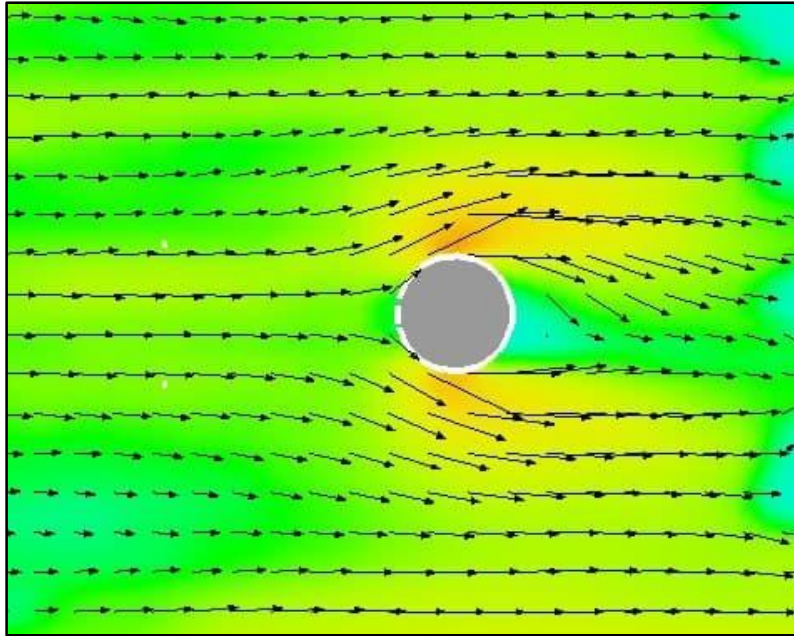
شکل ۷- حفره آب‌شستگی شکل گرفته با قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق با زاویه ۳۰ درجه در موقعیت 0D,1D,2D از پایه پل (الف) نیم‌رخ طولی (ب) نیم‌رخ عرضی

Fig. 7- Scour hole in case with group of two submerged vanes with position degrees of 30° at location of 0D,1D,2D from the bridge pier (a) longitudinal profile (b) transverse profile

نمای بالا نشان داده شده است. باتوجه به تشکیل ناحیه مرزی کم فشار در پایین دست پایه، مشاهده

در شکل ۸ خطوط جریان و نحوه جدایی جریان در اطراف پایه پل و ایجاد گردابه‌های نعل اسبی از

می‌شود که کمترین میزان سرعت در این ناحیه رخ داده است. با مشاهده الگوی جریان می‌توان نتیجه گرفت که سرعت در بالادست پایه منفی است و در این منطقه جریان‌های چرخشی و گرداب‌های نعل اسبی شکل می‌گیرند که یکی از دلایل تشکیل حفره آب‌شستگی است.



شکل ۸- خطوط جریان در حالت قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق با زاویه ۳۰ درجه در موقعیت 0D,1D,2D از پای پل

Fig. 8- Streamlines in case with group of two submerged vanes with position degrees of 30 at location of 0D,1D,2D from the bridge

شد که در آن D، قطر پایه پل است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با خروجی‌های حاصل از حالت مدفون گروه صفحات مستغرق (ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) مقایسه شد. در جدول ۸، مشخصات مدل شامل موقعیت قرارگیری گروه صفحات مستغرق، ارتفاع صفحات و نیز زاویه استقرار صفحات در موقعیت 0D,1D,2D ارائه شده‌است. در این جدول مقادیر بیشینه عمق آب‌شستگی گروه صفحات مستغرق با ارتفاع ۱۰، ۱۱ و ۱۲ سانتی‌متر در بالادست پایه استوانه‌ای نشان داده شده‌است.

اثر ارتفاع گروه زوج صفحات مستغرق بر کاهش آب‌شستگی

در این بخش به بررسی تأثیر ارتفاع گروه زوج صفحات مستغرق با زاویه ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه در موقعیت 0D,1D,2D از پایه پل به صورت متقارن نسبت به پایه و ارتفاع صفحات ۱۱ سانتی‌متر (ضخامت رسوب به‌علاوه یک سوم ارتفاع آب بالای بستر رسوبی) و ۱۲ سانتی‌متر (ضخامت رسوب به‌علاوه دو سوم ارتفاع آب بالای بستر رسوبی) بر کاهش عمق آب‌شستگی اطراف پایه پل پرداخته

جدول ۸- مقادیر بیشینه عمق حفره آبشستگی در حالت تغییر ارتفاع گروه زوج صفحات مستغرق با زاویه‌های استقرار مختلف در موقعیت 0D,1D,2D از پایه پل (Fr=۰,۴۳)

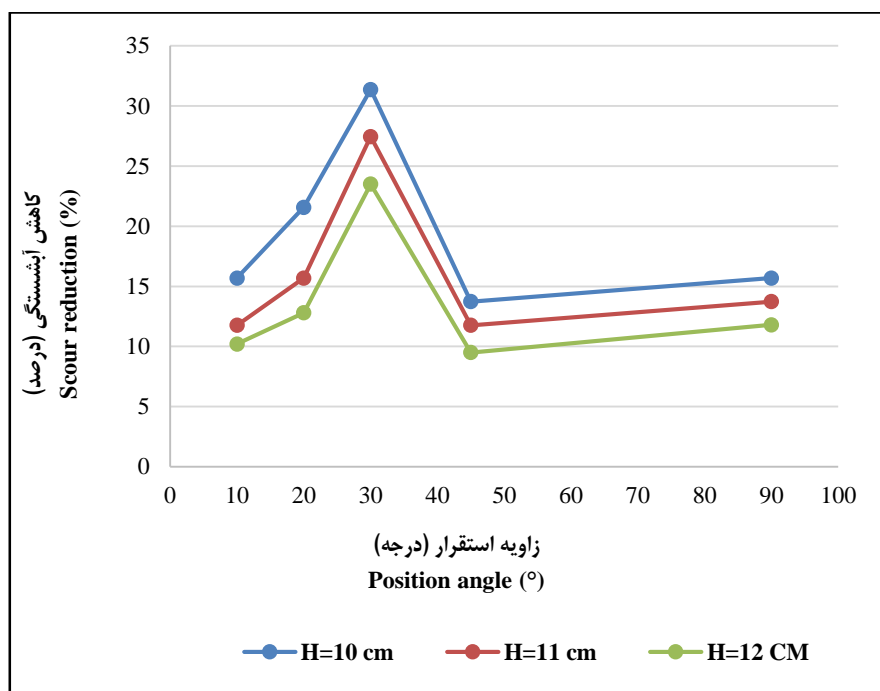
Table 8- Maximum scour hole depth variation of height of group of two submerged vanes with different position degrees in location of 0D,1D,2D from bridge pier (Fr=0.43)

شماره مدل Model number	ارتفاع صفحات مستغرق (سانتی‌متر) Height of submerged vanes (cm)	موقعیت صفحات مستغرق Location of submerged vanes	زاویه استقرار (درجه) Position degree (°)	بیشینه عمق حفره آبشستگی (میلی-متر) Maximum depth of scour hole (mm)	کاهش آبشستگی (درصد) Scour reduction (%)
-	-	-	-	51	-
4			10	43	15.69
5			20	40	21.57
6	10	0D,1D,2D	30	35	31.37
7			45	44	13.73
8			90	43	15.69
19			10	45	11.76
20			20	43	15.69
21	11	0D,1D,2D	30	37	27.45
22			45	45	11.76
23			90	44	13.73
24			10	45.8	10.2
25			20	44.5	12.8
26	12	0D,1D,2D	30	39	23.5
27			45	46.2	9.5
28			90	45	11.8

در این حالت، کاهش آبشستگی در بالادست پایه پل رخ می‌دهد اما از راندمان کاهشی این صفحات کاسته می‌شود.

شکل ۹ نشان می‌دهد که زاویه استقرار زوج صفحات مستغرق تأثیر زیادی در کاهش عمق آبشستگی دارد. هم‌چنین در این حالت اگر صفحات در زاویه ۳۰ درجه قرار داشته باشند، بیشترین میزان کاهش آبشستگی رخ می‌دهد اما این کاهش نسبت به زمانی که ارتفاع صفحات برابر با ضخامت بستر رسوبی است، کمتر است.

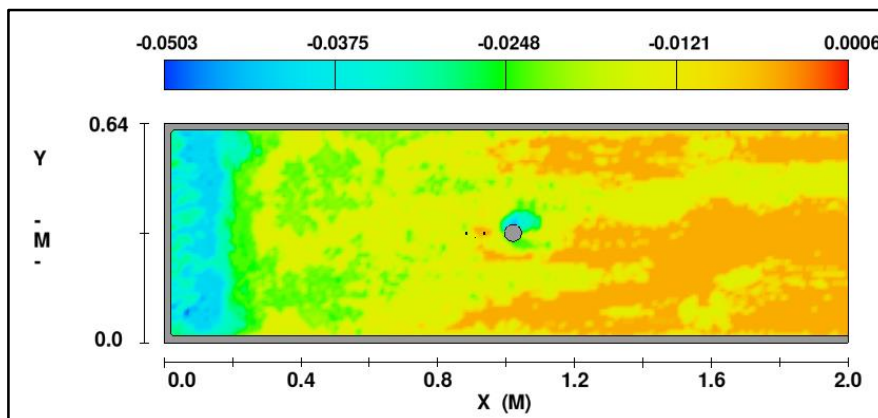
در جدول ۸ مشاهده می‌شود که صفحات مستغرق با داشتن ارتفاعی بیشتر از ضخامت بستر رسوبی هنگام برخورد جریان آب در کانال با آنها، مانند مانع عمل می‌کنند. برخورد جریان کانال با صفحات به دلیل ایجاد اختلاف فشار هیدرودینامیک در دو طرف صفحه و نیز ایجاد جریان رو به پایین، در بالادست صفحات آبشستگی موضعی ایجاد می‌شود. با افزایش ارتفاع صفحات، شدت برخورد جریان با صفحه افزایش و در نتیجه میزان عمق آبشستگی در بالادست صفحات نیز افزایش می‌یابد.



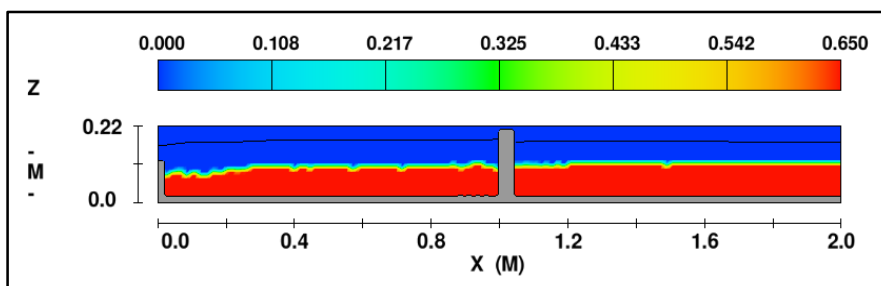
شکل ۹- اثر ارتفاع گروه زوج صفحات مستغرق بر کاهش عمق آب‌شستگی با زاویه‌های استقرار مختلف در موقعیت 0D,1D,2D از پایه پل
 Fig. 9- Effect of height of group of two submerged vanes with different position degrees in location of 0D,1D,2D from bridge pier on scour depth reduction

می‌توان این‌گونه استنباط کرد که سرعت در بالادست پایه منفی است و در این منطقه جریان‌های چرخشی شکل می‌گیرد که سرانجام به حفر بستر رسوبی می‌انجامد که با توجه به نتایج شدت جریان هنگام برخورد با صفحات نسبت به زمانی که ارتفاع صفحات برابر با بستر رسوبی است افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش حفره آب‌شستگی در بالادست صفحات و منحرف شدن رسوبات به پایین‌دست پایه پل می‌شود، در این حالت میزان حفره آب‌شستگی نسبت به حالت ذکر شده افزایش می‌یابد.

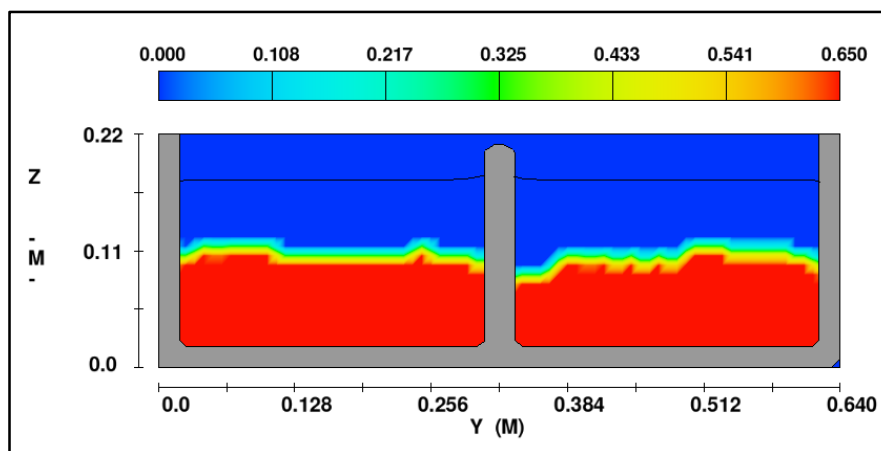
شکل ۱۰ (الف، ب و ج) حفره آب‌شستگی را به ترتیب از نمای بالا، نیم‌رخ طولی و نیم‌رخ عرضی در اطراف پایه پل در حضور گروه زوج صفحات مستغرق با زاویه ۳۰ درجه در موقعیت 0D,1D,2D در حالتی نشان می‌دهد که ارتفاع صفحات برابر با ۱۱ سانتی‌متر است. جریان در بالادست پایه رو به پایین می‌شود که پس از برخورد به بستر رسوبی باعث حفر بستر خواهد شد. در شکل ۱۱ الگوی جریان پیرامون پایه پل و چگونگی تشکیل گردابه‌های نعل اسبی از نمای بالا نشان داده شده‌است. با توجه به شکل و چگونگی الگوی جریان



(الف)



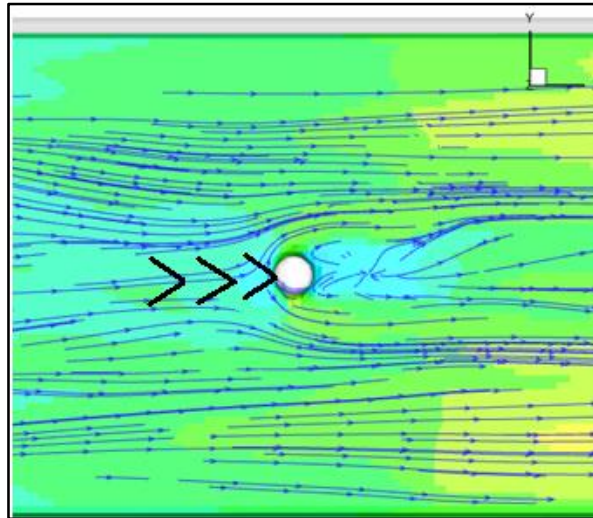
(ب)



(ج)

شکل ۱۰- حفرة آب‌شستگی شکل گرفته با قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق به ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر با زاویه ۳۰ درجه در موقعیت 0D,1D,2D از پایه پل (الف) نمای بالا (ب) نیمرخ طولی (ج) نیمرخ عرضی

Fig. 10- Scour hole in case with group of two submerged vanes by height of 11 cm with position degrees of 30 at location of 0D,1D,2D from the bridge pier (a) up view (b) longitudinal profile (c) transverse profile



شکل ۱۱- منحنی خطوط جریان در حالت قرارگیری گروه زوج صفحات مستغرق به ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر با زاویه ۳۰ درجه در موقعیت 0D,1D,2D از پایه پل

Fig. 11- Streamlines in case with group of two submerged vanes by height of 11 cm with position degrees of 30° at location of 0D,1D,2D from the bridge pier

در جدول ۹ مقایسه‌ای شده است بین نتایج مقادیر این میزان کاهش مرتبط با موقعیت و تعداد صفحات و شرایط هیدرولیکی جریان است. به‌دست آمده از این پژوهش با نتایج برخی از مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیشین. در این جدول مشاهده می‌شود که زاویه ۳۰ درجه برای نصب گروه زوج صفحات حالتی بهینه است که بیشترین میزان کاهش آب‌سستگی را به‌دست می‌دهد. تفاوت در

مقادیر این میزان کاهش مرتبط با موقعیت و تعداد صفحات و شرایط هیدرولیکی جریان است. براساس نتایج این پژوهش نزدیک کردن گروه زوج صفحات به پایه پل (موقعیت 0D,1D,2D) بهترین حالت برای کاهش مقادیر آب‌سستگی است.

جدول ۹- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج برخی از مطالعات پیشین

Table 9- Comparison of present study data with some the other studies

مطالعه Study	نوع مدل Model type	زاویه استقرار بهینه (درجه) Optimal position degree (°)	بیشینه کاهش آب‌سستگی (درصد) Maximum scour reduction (%)
Ghorbani & Kells, 2008	آزمایشگاهی	30	87
Shojaee <i>et al.</i> , 2012	آزمایشگاهی	30	51
Khademi <i>et al.</i> , 2014	آزمایشگاهی	40	89
Parchami <i>et al.</i> , 2017	آزمایشگاهی	20	42
Mohammadiun <i>et al.</i> , 2018	عددی	20-30	-
Present study	عددی	30	32

نتیجه‌گیری

ایجادشده در بالادست و اطراف پایه پل منتقل می‌شوند. در تمامی موقعیت‌ها، با افزایش زاویه استقرار زوج صفحات مستغرق، ناحیه عرضی بیشتری تحت تأثیر زوج صفحه قرار گرفته است و نیروی درگ قوی‌تری به آنها وارد می‌شود. قرارگیری صفحات در موقعیت 0D, 1D, 2D با زاویه استقرار ۳۰ درجه بیشترین اثر کاهش بر مقادیر بیشینه آبشستگی (d_{smax}) را به مقدار حدود ۳۲ درصد دارد. همچنین، عملکرد گروه زوج صفحات مستغرق زمانی که افزایش ارتفاع داشتند کاهش یافت به دلیل آنکه صفحات مستغرق با داشتن ارتفاعی بیشتر از ضخامت بستر رسوبی، هنگام برخورد جریان آب در کانال با آنها مانند مانع عمل می‌کنند. با افزایش ارتفاع صفحات شدت برخورد جریان با صفحه افزایش و در نتیجه میزان عمق آبشستگی در بالادست صفحات افزایش می‌یابد و به‌رغم کاهش آبشستگی در بالادست پایه پل، از عملکرد این صفحات کاسته می‌شود.

مدل عددی در نرم‌افزار FLOW-3D با اندازه-های مش، مدل‌های آشفتگی و زمان تحلیل‌های مختلف شبیه‌سازی و اندازه شبکه ۰/۰۰۸۵ متر، مدل آشفتگی LES و زمان تحلیل ۵۰۰ ثانیه انتخاب شد. مقدار عمق حفرة آبشستگی ۵۰/۸ میلی‌متر به‌دست آمد که با خطای بیشینه ۱۰ درصدی تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. تأثیر استفاده از گروه زوج صفحات مستغرق در موقعیت‌های مکانی و زاویه‌های استقرار مختلف ارزیابی عددی شد. این شبیه‌سازی‌ها برای سه ارتفاع صفحات برابر با ضخامت بستر رسوبی، ارتفاع صفحات برابر با مجموع ضخامت بستر رسوبی به‌علاوه یک سوم و دو سوم ارتفاع آب بالای تراز رسوبی، صورت پذیرفت. نتایج نشان داده است که در تمامی حالت‌ها کاهش عمق آبشستگی به‌دست آمده است. حضور صفحات باعث ایجاد آبشستگی موضعی در اطراف خود صفحه می‌شود و ذرات شسته‌شده توسط جریان به حفرة

مراجع

- Abdi, Ch., Vaghefi, M. & Safarpour, Y. (2022). Numerical simulation of the flow pattern around a single bridge pier with upstream of submerged vanes in sharp 180-degree bend with an alluvial bed under the influence of submerged vanes and the bridge pier. *Modares Civil Engineering journal*, 22(6), 88-98 (In Persian).
- Amiri, T. & Ahmadi, P. (2018). *Numerical study of the effect of group submerged vanes on the bridge pier scour using SSIIM software*. In 17th National Hydraulic Conference. Sep. 4-6. University of Shahrekord, Iran.
- Biabani, S., Hamidi, M. & Neyfa, B.N. (2019). Numerical simulation of the chute convergence effects on forming the transverse wave in flood evacuation systems. *Journal of Hydraulics*, 14(3), 67-84 (In Persian).
- Biabani, S., Hamidi, M. & Neyfa, B.N. (2021) Numerical simulation of the pier geometry effects on forming the transverse wave in converged spillways. *International Journal of Modern Physics C*. 32(01), 2150003
- Ebrahimi, T., Hamidi, M., Rahmani, F.A. & Khavasi, E. (2021). Numerical investigation of scour around a cylindrical pier in laboratory scale using Euler-Lagrange approach. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 53(Special Issue 1), 411-426 (In Persian).
- Emamgholizadeh, S. & Nohani, E. (2017). Application of the submerged vanes on reduction of local scour around the bridge abutment with rounded nose. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 113-128 (In Persian).

- Flow-3D, user manual (Version 9.3), Flow Science In, 2008.
- Ghorbani, B. & Kells, J. (2008). Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 610-619.
- Khademi, Kh., Shafae, M.B. & Ghomeshi, M. (2014). Flow pattern investigation at bridge abutment with and without installed submerged vane. *Irrigation Sciences and Engineering*. 37(1), 33-42 (In Persian).
- Koohsari, A. & Hamidi, M. (2022). Experimental study of the effect of mining materials downstream of bridge pier on scour profile with optimizing distance approach. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28 (3), 1-25 (In Persian).
- Mohammadiun, S., Salehi, S.A.N., Parhizkar, H. & Vahabi, H. (2018). Numerical evaluation of submerged vanes application in sedimentation and erosion potential of open-channel junctions flow. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 50(3), 567-578 (In Persian).
- Odgaard, J.A. & Kennedy, J.F. (1983). Bed riverbank protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 1161-117.
- Palau-Salvador, G., Stoesser, T. & Rodi, W. (2008). LES of the flow around two cylinders in tandem. *Journal of Fluids and Structures*. 24, 1304-1312.
- Parchami, L., Asghari, S.A.P. & Shafai, M.B. (2017). Experimental investigation of submerged vanes shape effect on bridge pier scouring. *Water and Soil Science*. 27(1), 29-41 (In Persian).
- Pasiok, R. & Stilger-Szydło, E. (2010). Sediment particles and turbulent flow simulation around bridge piers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 10, 67-79.
- Raudkivi, A.J. (1998). Loose boundary hydraulics. Rterdaom: Press the Netherlands.
- Raudkivi, A.J. & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109.
- Royani, P., Hosseini, S.H., Azhdary, Kh. & Emamgholizadeh, S. (2021). Numerical investigation of flow pattern, bed profile and shear stress around the rectangular bridge pier using Flow 3D. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 15(5), 1153-1171 (In Persian).
- Shojaee, P., Farsadizadeh, D., Hoseinzadeh, A.D., Salmasi, F. & Ghorbani, M.A. (2012). Application of submerged vanes at cylindrical bridge pier as a scour countermeasure. *Water and Soil Science*. 22(1), 91-109 (In Persian).
- Zarrati, A.R. Gholami, H. & Mashahir, M.B. (2004). Application of collar to control scouring around rectangular piers. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 97-103.

Numerical Investigation of the Cylindrical Bridge Pier Scour Reduction by Installing a Group of Two Submerged Vanes

M. Sadeqlu and M. Hamidi*

* Corresponding Author: Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. Email: hamidi@nit.ac.ir

Received: 6 February 2022, Accepted: 22 May 2022

Introduction

The construction of hydraulic structures such as bridge piers in river beds changes the hydrodynamics of the flow and is associated with the scouring phenomenon. This process has been investigated by many researchers with numerical and laboratory methods. The implementation of scouring reduction measures has also been considered in addition to investigating this phenomenon, due to the destructive changes of scouring on the morphology and the river bed shape. In general, these measures are divided into two general categories, direct and indirect, which the use of submerged vanes is one of these reduction measures. Based on less attention to this scour reduction measure; in this study, the effect of a group of two submerged vanes on reducing scour around the cylindrical bridge pier with a numerical approach of the FLOW-3D model is investigated. Dimensional analysis showed that the position angle of the vanes, the location, and the height of the vanes are effective parameters. According to the results, the installation of submerged vanes in all cases reduces scour and the position angle of 30 degrees, in location 0D,1D,2D, and the height of the vanes equal to the sedimentary bed leads to the greatest reduction of scour.

Methodology

In this research, the flow-3d numerical model has been utilized to analyze the scouring phenomenon around the cylindrical bridge pier. In order to validate the numerical model, first, the sensitivity of the mesh dimensions was performed and the 8.5 mm mesh size was selected. Then the analysis of the geometric model for the bridge pier was conducted with different turbulence models $k-\epsilon$, $k-\epsilon$ RNG, and LES, and the numerical results were compared with experimental data. It was found that the numerical results of the LES model are the most consistent with the experimental data, so this turbulence model has been used for the conditions of bridge pier with submerged vanes. Different times for scour hole development were investigated to determine the processing time of the numerical model and the computational cost, and finally, it was observed that the scour equilibrium time of 500 seconds is suitable for numerical analysis, and after this time the maximum scour values remain almost constant.

Results and Discussion

By increasing the position angle of the two submerged vanes up to 30 degrees, the amount of scour depth decreases. But by increasing it by 30 degrees, this trend decreases and does not follow a specific trend. The most suitable position of the group of two submerged vanes is in 0D,1D,2D location, and the location of 2D,3D,4D has the least effect, which reduces the distance between the vanes from the upstream of the channel to the bridge pier, the separation point of boundary layer moves to the bridge pier, thus reducing the thickness of the boundary layer. Therefore, by reducing the distance between the vanes and the bridge pier, the intensity of shear stress to dig bed sediments around the bridge pier is reduced and as a result, the effect of submerged vanes and their protection from erodible bed against scouring phenomenon increases.

It was found that the presence of submerged vanes in all cases reduces the maximum scour depth, but this amount of reduction is not the same due to the different positions of the vanes. Observing the flow pattern, it can be concluded that the velocity upstream of the pier is negative and rotational flows are formed in this region, which are the horseshoe vortices that are one of the reasons for the formation of scouring holes.

Conclusions

In all cases of installation of submerged vanes before bridge pier, scour depth was reduced because the presence of vanes caused local scouring around the vane itself and the washed sediment particles were transported by the flow to the scour hole created upstream around the bridge pier. On the other hand, in all locations, by increasing the position angle of the two submerged vanes, the transverse area is more affected by the two vanes, and a stronger drag force is applied to them. In other words, the resistance to current increases, the flow moves away from the bridge pier, and also fewer bed particles are transported around the bridge pier. As the height of the vanes increases, the intensity of the flow colliding with the vanes increases, and as a result, the amount of scouring depth upstream of the vanes increases, and despite the reduction of scouring upstream of the bridge pier, the performance of these vanes decreases.

Acknowledgement

The authors of the article thank Mr. Ali Mahdian Khalili for his great help during this research.

Keywords: Flow pattern, Position angle of submerged vanes, Scour reduction, Turbulence model, FLOW-3D.