



شبیه‌سازی عددی پدیده آب‌شستگی اطراف پایه استوانه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی با رویکردی ویلری-لاگرانژی

تینا ابراهیمی^۱، مهدی حمیدی^{۱*}، علی رحمانی فیروزجانی^۱، احسان خواصی^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل، بابل، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۴-۱۲

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۸-۱۸

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۹-۱۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۱۰-۰۹

کلمات کلیدی:

آب‌شستگی

پایه استوانه‌ای

مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی

ویلری-لاگرانژی

این فوم

خلاصه: حضور پایه در مسیر جریان آب باعث ایجاد یک جریان سه‌بعدی پیچیده در اطراف پایه می‌شود که می‌تواند منجر به آب‌شستگی پیرامون پایه گردد. در این تحقیق مدل‌سازی مناسب پدیده آب‌شستگی پایه استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم و داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از آزمایشگاه انجام شد. به این منظور از دو مدل برای شبیه‌سازی پدیده آب‌شستگی استفاده گردید. در این دو مدل عددی تاثیر کوپلینگ و مدل پسا بر پروفیل بستر بررسی شد. مدل اول با روش غیرکوپل و مدل پسا کروی و مدل دوم با روش کوپل شده و با تغییر مدل پسا کروی به غیرکروی انجام گردید. در مدل اول میزان خطا قابل توجه بوده است ولی در مدل دوم نتایج دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار عمق آب‌شستگی در مقطع عرضی در مدل عددی دوم و آزمایشگاهی با ۶ درصد اختلاف بر هم منطبق‌اند. در فاز دوم به منظور بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر کاهش آب‌شستگی، از سه مدل عددی که شامل پایه ساده و پایه همراه با طوقه در دو تراز مختلف می‌باشد، استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که طوقه در تراز ۳/۵ و ۴ می‌توانند به ترتیب ۴۹/۲ درصد و ۲۹/۷ درصد از بیشترین عمق آب‌شستگی بکاهند.

۱- مقدمه

از آب‌شستگی به تراز اصلی فونداسیون پایه می‌رسد. با توسعه این پدیده و شکل‌گیری آب‌شستگی، پایداری و امنیت کلی پل در خطر خواهد بود. جریان سه‌بعدی اطراف یک پایه به علت جدایش و تشکیل گردابه‌های چندگانه بسیار پیچیده می‌باشد. این پیچیدگی به علت وجود اندرکنش دینامیکی بین جریان و مرز متحرک در طول گسترش گودال آب‌شستگی نیز تشدید می‌شود. پیش‌بینی دقیق الگوی آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل به شدت وابسته به تحلیل ساختار جریان و مکانیزم حرکت رسوبات داخل گودال و خارج آن می‌باشد [۲].

اهمیت استفاده از پل‌ها به عنوان کلید اساسی در حمل و نقل بسیار آشکار است. هر ساله پل‌های فراوانی به علت آب‌شستگی^۱ اطراف پایه‌های خود فرو می‌پاشند. ریزش پل‌ها می‌تواند آسیب‌های جدی جانی و مالی به همراه داشته باشد. بنابراین مطالعه آب‌شستگی پل‌ها نقش مهمی را در سلامت آن‌ها ایفا می‌کند [۱]. هنگامی که پدیده آب‌شستگی محلی اتفاق افتد، یک گودال آب‌شستگی اطراف پایه پدیدار می‌شود. عمق آب‌شستگی محلی در جریان‌ات شدید، توسعه می‌یابد و اگر به درستی پیش‌بینی نشود، تراز پایین گودال ناشی

به‌طور خلاصه، سرعت در جریان نزدیک‌شونده در بالادست پایه به سمت صفر میل می‌کند و این امر باعث افزایش در فشار می‌گردد.

1 Scouring

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Hamidi@nit.ac.ir

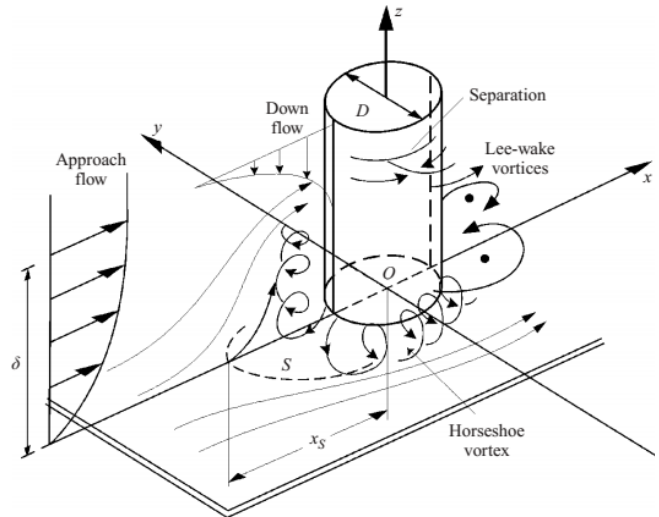


در کناره‌های پایه به هم می‌پیوندند. همچنین یک جریان پایین‌رونده ناشی از کاهش سرعت جریان در جلوی پایه تشکیل می‌شود. اگر بستر فرسایش‌پذیر باشد، تمامی تغییرات یاد شده منجر به افزایش انتقال رسوب و در نتیجه آب‌شستگی محلی اطراف پایه می‌گردد. با توسعه آب‌شستگی محلی و تبدیل آن به آب‌شستگی گسترده در اطراف پایه پایداری آن کاهش یافته و فروریزش آن محتمل می‌گردد [۳].

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی نظیر استفاده از پوشش سنگ‌ریزه‌ای^۵، ایجاد شکاف در پایه، استفاده از گروهی از ستون‌های کوچک در جلوی پایه و همچنین استفاده از طوقه‌ها برای کنترل آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی روش‌های کاهش آب‌شستگی را می‌توان به دو دسته روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم تقسیم‌بندی نمود. روش‌های مستقیم که مبتنی بر افزایش مقاومت بستر بوده و معمولاً با قرارگیری سنگ‌چین اطراف پایه‌ها ایجاد می‌گردند. اما در روش‌های غیرمستقیم به منظور کاهش تنش برشی وارد بر بستر، الگوی جریان در اطراف پایه تغییر داده می‌شود. این روش می‌تواند نسبت به روش قبل، مقرون به‌صرفه باشد [۱].

محققان در سرتاسر دنیا به‌طور گسترده مشکل آب‌شستگی محلی را از دیدگاه‌های مختلف و تحت شرایط متفاوت مورد مطالعه قرار داده‌اند. با توجه به نظرات محققین مهم‌ترین دلیل نگرانی در مورد پایداری فونداسیون پل‌ها و در نتیجه ناپایداری آن‌ها وقوع آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل می‌باشد [۴]. ملویل و رادکیوی [۵] در سال ۱۹۷۷ مطالعات آزمایشگاهی خود را به بررسی آب‌شستگی در پایه‌ها اختصاص دادند و به بررسی الگوی جریان آب، توزیع شدت آشفتگی، و توزیع تنش برشی در مرزها روی بستر متحرکی از رسوبات برای حالت‌های مختلف آب‌شستگی پرداختند. تحقیقات انجام شده توسط درگاهی [۶] در سال ۱۹۹۰ جزئیات بیشتری را شامل می‌شود. وی با مطالعه آزمایشگاهی آب‌شستگی پیرامون پایه استوانه‌ای نتیجه گرفت که مکانیزم آب‌شستگی با جدایش سه‌بعدی لایه مرزی بالادست و ریزش گردابه‌ای در پشت استوانه همراه است. همچنین نشان داد که با اتصال طوقه به پایه نمی‌توان به طور کامل از تشکیل گردابه‌ها جلوگیری کرد.

دنگ و پیگوت [۷] در سال ۱۹۹۲ به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی



شکل ۱. گردابه‌های ایجاد شده اطراف پایه [۳]
Fig. 1. Vortices formed around the pier

از آن‌جا که سرعت جریان از سطح جریان به سمت بستر کاهش می‌یابد، فشار هیدرودینامیک وارد بر پایه نیز از سطح جریان به سمت بستر کاهش می‌یابد. این گرادیان فشار باعث تشکیل جریان پایین‌رونده همانند یک جت قائم می‌گردد (شکل ۱). زمانی که این جریان پایین‌رونده به بستر برسد، حفره‌ای در جلوی پایه تشکیل می‌دهد و با چرخش به سمت بالا، تحت تاثیر جریان بالادست، یک سیستم گردابی پیچیده‌ای تشکیل می‌شود. این گردابه با گذشتن از کنار پایه، به سمت پایین دست توسعه می‌یابد. به علت شباهت این گردابه با نعل اسب، به آن گردابه نعل اسبی^۱ می‌گویند. گردابه نعل اسبی تا زمانی که تنش برشی روی بستر کمتر از تنش برشی بحرانی گردد، حفره را گسترش می‌دهد. جداشدگی جریان در پشت پایه باعث ایجاد گردابه‌های برخاستی^۲ می‌گردد. این گردابه‌ها ناپایدار بوده و در نهایت منجر به بلند شدن رسوبات بستر و تشکیل حفره آب‌شستگی می‌گردند [۱].

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت هنگامی که یک پایه استوانه‌ای عمودی روی بستر در مسیر جریان دائمی قرار می‌گیرد، مطابق شکل ۱ ابتدا یک گردابه نعل اسبی در جلوی پایه پل تشکیل می‌گردد و پس از آن یک الگوی جریان گردابه‌ای در قالب ریزش گردابه‌ای^۳ در پشت پایه^۴ ایجاد می‌شود و در نهایت خطوط جریان

- 1 Horseshoe Vortex
- 2 Wake Vortices
- 3 Vortex Shedding
- 4 Lee-Side

حجمی سیال^۳ برای ردیابی سطح آزاد بین آب و هوا و روش شبکه متحرک برای اصلاح دامنه محاسباتی شبیه‌سازی در نرم‌افزار اپن‌فوم توسعه دادند. آن‌ها هم‌چنین مدل $k - \epsilon$ و مدل ارائه شده توسط انگلوند و فردسو در سال ۱۹۷۶ را برای مدل انتقال رسوب بار بستر، انتخاب کردند. نتایج شبیه‌سازی برای میدان جریان و پروفیل‌های آب‌شستگی با اندازه‌گیری‌ها در تطابق خوبی بود. با این حال، در مدل آن‌ها برای محدودسازی شیب بستر در حفره آب‌شستگی، مکانیزم لغزش ماسه‌ای لحاظ نشد.

آقایی و حکیم‌زاده [۱۳] در سال ۲۰۱۰ یک مدل عددی سه‌بعدی به منظور شبیه‌سازی جریان آشفته اطراف یک پایه استوانه‌ای را بررسی کردند. در این شبیه‌سازی از دو نوع مدل آشفته‌گی استفاده شده است. مدل اول با استفاده از معادلات استاندارد $k - \epsilon$ و مدل دوم با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. نتایج شبیه‌سازی حاصل از این دو مدل با هم مقایسه گردیده و با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط رولاند و همکاران و درگاهی اعتبارسنجی شد. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد شدت و طول گردابه‌ها بسیار وابسته به مدل آشفته‌گی مورد استفاده می‌باشد و به علت خاصیت دوره‌ای بودن ریزش‌های گردابه‌ای، مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با دقت بیشتری می‌تواند میدان جریان و گردابه‌های نعل اسبی و برخاستی را شبیه‌سازی کند. ولی با این حال مدل $k - \epsilon$ نیز تخمین مناسبی از گسترش حفره آب‌شستگی ارائه می‌دهد.

راموس و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی عددی جریان اطراف یک پایه در دو حالت بستر ثابت و بستر تعادلی با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم^۴ پرداختند. حالت اول مربوط به شروع فرآیند آب‌شستگی بوده و حالت دوم هندسه بستر پس از رسیدن به عمق تعادل آب‌شستگی که در آزمایشگاه به‌دست آمده را بررسی می‌کند. در این مدل میدان سرعت و گردابه‌ها، تنش برشی بستر و ضریب پسا روی پایه با استفاده از مدل آشفته‌گی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۵ بررسی می‌گردد. در نهایت نتایج حاصل از نرم‌افزار اپن‌فوم با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت به‌دست آمده از پژوهش راموس مقایسه شد.

خسرونژاد و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۲ به شبیه‌سازی‌های

جریان آشفته غیرقابل تراکم اطراف یک ایرفویل که در آن مشخصه‌های اصلی گردابه نعل اسبی مورد مطالعه قرار گرفت، پرداختند. کار آن‌ها یکی از نخستین تحقیقات انجام شده در این زمینه بر پایه معادلات میانگین‌گیری شده ناویر استوکس^۱ در دینامیک سیالات محاسباتی بوده است. ریچاردسون و پانچانگ [۸] در سال ۱۹۹۸ جریان سه‌بعدی حول یک پایه استوانه‌ای حاوی گودال ناشی از آب‌شستگی را شبیه‌سازی کردند. با این حال، با مقایسه این تحقیق با نتایج عددی حاصل از ملویل و رادکیوی علاوه بر تطابق کمی و کیفی مناسب، اختلافاتی مشاهده گردید که می‌تواند با تغییرات مناسب در پارامترهای مدل عددی اصلاح گردد.

اولسن و ملاین [۹] در سال ۱۹۹۳ برای اولین بار شبیه‌سازی جریان را با مدل‌سازی آب‌شستگی در پایه استوانه‌ای ترکیب کردند. آن‌ها برای حل معادلات ناویر-استوکس از روش احجام محدود و از مدل آشفته‌گی $k - \epsilon$ استفاده کردند. نتایج عددی تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت. از آنجایی که از ترم‌های گذرا^۲ در مدل عددی چشم‌پوشی شده است، ممکن است این مدل قادر به مدل‌سازی دقیق پدیده آب‌شستگی در شرایط مختلف نباشد.

موزامیل و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۴ به مطالعات آزمایشگاهی خصوصیات اصلی گردابه نعل اسبی طی فرآیند آب‌شستگی پرداختند و نتیجه گرفتند که شکل گردابه نعل اسبی به عدد رینولدز پایه وابسته است. گردابه در رینولدزهای پایین (کوچکتر از ۵۰۰۰)، دایره‌ای بوده و با افزایش رینولدز بیضوی شکل می‌گردند [۱۱]. رولاند و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۵ به شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی جریان و آب‌شستگی حول پایه استوانه‌ای پرداختند. آن‌ها با استفاده از رویکرد اوپلری-اوپلری و مدل آشفته‌گی $k - \omega$ اثر سه پارامتر ضخامت لایه مرزی، عدد رینولدز و زبری بستر روی گردابه نعل اسبی را بدون در نظرگیری سطح آزاد، بررسی نمودند. همچنین به ازای مقادیر مختلف از این سه پارامتر تنش برشی در بستر محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل عددی تمامی خصوصیات اصلی فرآیند آب‌شستگی را به خوبی مدل می‌کند.

لیو و گارسیا [۱۲] در سال ۲۰۰۸ یک مدل عددی برای شبیه‌سازی آب‌شستگی حول پایه‌های پل با استفاده از روش کسر

3 Volume of Fluid

4 OpenFOAM

5 Large Eddy Simulation (LES)

1 Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

2 Transient

بررسی مرور بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، اغلب شبیه‌سازی‌هایی که تاکنون برای مطالعه آب‌شستگی پایه‌های پل انجام گرفته است با استفاده از دیدگاه اوپلری-اوپلری می‌باشد که در آن‌ها هر دو فاز سیال و رسوب پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش به منظور احتساب خاصیت ذاتی گسسته بودن رسوبات، شبیه‌سازی آب‌شستگی پیرامون پایه استوانه‌ای به روش اوپلری-لاگرانژی و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ در نرم‌افزار این‌فوم مدل می‌شود. نتایج مدل‌سازی با تغییر نوع کوپلینگ و مدل پسا بررسی می‌شود. به این منظور اثرات در نظرگیری کوپلینگ چهار طرفه و تغییرات مدل پسا در نتایج مدل عددی بررسی شده و با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. در این راستا از نتایج مدل آزمایشگاهی مربوط به پدیده آب‌شستگی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شده است، استفاده می‌گردد. پس از آن در فاز دوم با قرار دادن طوقه در فواصل مختلف از بستر، تاثیر حضور طوقه و تراز نصب آن در کاهش آب‌شستگی پایه استوانه‌ای بررسی می‌گردد و پروفیل بستر در ترازهای مختلف طوقه با حالت پایه بدون طوقه مقایسه می‌شود

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

۲-۱- روش حل عددی و معادلات حاکم

مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی آب‌شستگی از حل‌گر هیدرودینامیک برای حل میدان جریان و حل‌گر ریخت‌شناسی برای انتقال رسوبات استفاده می‌کند. حل‌گر هیدرودینامیک با عدد کورانت معادل $0/8$ معادلات ناویر استوکس را برای میدان جریان حل می‌کند. جریان‌ات حاوی رسوب را می‌توان یک جریان دو فاز در نظر گرفت که شامل فاز سیال و فاز رسوبات می‌باشد. یا می‌توان آن را به صورت تک‌فاز در نظر گرفت. در مقایسه با مدل‌های تک‌فاز، رویکرد دو فاز به علت تفسیر بهتر اندرکنش‌های جریان با رسوب، رسوب با رسوب و جریان با سازه، مقبولیت بیشتری دارد. مدل‌های دو فاز به سه گروه اوپلر-اوپلر، اوپلر-لاگرانژ و مدل‌های تماماً لاگرانژ تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های اوپلر-اوپلر، هر دو فاز سیال و جامد پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و معادلات پیوستگی و مومنتوم برای هر دو فاز در یک قالب اوپلری حل می‌گردد. در مدل‌های اوپلری کمیت‌ها عموماً بر پایه میانگین‌گیری سلولی محاسبه می‌شوند و در مدل کردن

عددی و آزمایشگاهی آب‌شستگی ایجاد شده توسط شکل‌های مختلفی از پایه‌های پل با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ با رویکرد اوپلری-اوپلری، پرداختند. مدل‌سازی انتقال رسوب مشابه با تحقیق انجام شده توسط خسرونژاد و همکاران در سال ۲۰۱۱ بود. مطالعه آن‌ها نشان داد که ضخامت لبه پایه، یک تاثیر مهمی در پیش‌بینی مدل شبیه‌سازی شده دارد. بایکال و همکاران [۱۶-۱۸] در سال ۲۰۱۵ و بایکال و همکاران در سال ۲۰۱۷ با مدلی عددی مشابه کار فورمن و همکاران در سال ۲۰۱۴، جریان و آب‌شستگی پیرامون یک پایه عمودی در معرض جریان همراه با امواج و فرآیند انباشته سازی رسوبات در پشت پایه ناشی از آب‌شستگی را با رویکرد اوپلری-اوپلری بررسی نمودند. نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی رولاند و همکاران، سومر و همکاران در سال ۱۹۹۷ و سومر و همکاران در سال ۲۰۱۲ مقایسه شد تا مدل اعتبارسنجی گردد و تاثیرات بار معلق، مشخصات جریان ناپایدار مثل گردابه نعل اسبی و گردابه برخاستی روی آب‌شستگی مورد بحث قرار گرفت.

عبدالعزیز و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۰ از نرم‌افزار فلوتریدی^۱ برای شبیه‌سازی میدان جریان و از یک مدل انتقال رسوب برای شبیه‌سازی رسوب استفاده نمود. اثرات شیب بستر و مکانیزم لغزش ماسه‌ای نیز در نظر گرفته شد. آن‌ها تطابق خوبی با داده‌های میدان جریان و عمق آب‌شستگی نتیجه گرفتند اما شیب در پایین دست تپه بیشتر تخمین زده شده است. لی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۴ یک مدل سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم ارائه نمودند. مدل آن‌ها یک مدل سه فاز بوده و سطح آزاد نیز در آن لحاظ شده است. این پژوهش با بررسی استوانه افقی و عمودی و گسترش آب‌شستگی حاصل از آن انجام گرفت. اندرکنش بین فاز سیال، فاز رسوبات و سازه‌ها توسط مدل به خوبی محاسبه شد.

شیم و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۶ به شبیه‌سازی عددی اطراف پایه پل به روش اوپلری-لاگرانژی با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در نرم‌افزار این‌فوم پرداختند. به منظور اعتبارسنجی، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج توزیع سرعت ذرات در مدل عددی و آزمایشگاهی بر هم منطبق بوده ولی اندازه سرعت ذرات با خطا همراه بوده است. در این تحقیق دامنه محاسباتی کوچک بوده و زمان اجرا نیز بسیار کوتاه بوده است.

1 Flow3D

$$\bar{F}_{Particle} = \bar{F}_D + \bar{F}_P + \bar{F}_g + \bar{F}_n + \bar{F}_t \quad (4)$$

که در آن F_D نیروی پسا وارده از فاز سیال به ذره، F_p نیروی فشاری، F_g نیروی وزن و شناوری، F_n نیروی تماسی نرمال و F_t نیروی تماسی مماسی وارد بر ذرات می‌باشند. حدود ۸۰ درصد از کلیه نیروهای وارده به ذرات به نیروی پسا اختصاص دارد. لذا این نیرو مهم‌ترین نیروی وارده به ذرات است و طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۴]:

$$\bar{F}_D = C_D \frac{\pi D_p^2}{8} \rho_f (\bar{U} - \bar{U}_p) |\bar{U} - \bar{U}_p| \quad (5)$$

که در آن D_p قطر ذره، ρ_f چگالی سیال و ضریب پسا می‌باشد. نیروی وزن و شناوری برابر است با [۲۳]:

$$\bar{F}_g = m_p \bar{g} \left(1 + \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \quad (6)$$

که در آن ρ_p چگالی ذره می‌باشد. نیروی ناشی از گرادیان فشار برابر است با [۲۳]:

$$\bar{F}_P = \frac{1}{6} \pi D_p^3 \bar{\nabla} P \quad (7)$$

۲-۲- مدل‌سازی نیروهای تماسی

برای مدل‌سازی برخورد یا تماس می‌توان از دو مدل کره سخت^۳ و یا مدل کره نرم^۴ استفاده کرد. مدل کره نرم با استفاده از المان‌های مکانیکی مانند فنر و میراگر مدل‌سازی می‌شود. در مدل کره نرم کل فرآیند برخورد یا تماس با انتگرال‌گیری عددی از معادلات حرکت حل می‌گردد. این مدل نسبت به مدل کره سخت زمان محاسباتی خیلی بالاتری دارد اما کاربرد مدل کره نرم وسیع‌تر از مدل کره سخت می‌باشد. در این پژوهش برای مدل‌سازی لاگرانژی ذرات رسوب از روش کره نرم استفاده شده است. در این روش مطابق شکل ۲ به جای سر و کار داشتن با تغییر شکل، ذرات در تماس با هم تحت تاثیر نیروهای خارجی وادار به هم‌پوشانی می‌شوند. مسیر هم‌پوشانی δ شامل دو مولفه می‌باشد: مولفه نرمال δ_n و مولفه مماسی δ_t [۲۵]. طبق روابط موجود در فصل پنجم مرجع [۲۵]، مدل نیرو را

تغییر شکل‌های پیچیده ضعیف هستند. در مدل‌های تماماً لاگرانژی، خاصیت ذاتی گسسته بودن رسوب با دقت بیشتری لحاظ می‌گردد. مدل‌های لاگرانژی نیازمند منابع محاسباتی قوی هستند. با انتخاب روش‌های اوپلری-لاگرانژی، با صرفه‌جویی در هزینه‌های محاسباتی می‌توان خواص ذاتی ذرات رسوب را نیز در نظر گرفت [۱۶ و ۲۰]. در این پژوهش، بررسی دو فازی (فاز پیوسته سیال و فاز گسسته ذرات) با رویکردی اوپلری-لاگرانژی صورت گرفته و اثر سطح آزاد (فاز هوا) در نظر گرفته نشده است. به این منظور، ابتدا حلگر استاندارد پیمپل فوم^۱ در نسخه ۴ نسخه استاندارد این فوم انتخاب شد. این حلگر یک حلگر گذرا برای جریان‌ات آشفته غیرقابل تراکم است و با توسعه برنامه، کتابخانه اینترمدیت^۲ به این حلگر برای بررسی حرکت رسوبات با رویکرد لاگرانژی اضافه گردید و در غالب حلگر اصلاح شده‌ای با نام pimpleLPTdenseFoam تدوین شد. معادلات حاکم بر فاز پیوسته سیال شامل معادلات پیوستگی و معادلات میانگین‌گیری شده ناویر استوکس می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \cdot \bar{\nabla}(\bar{U}) = -\frac{1}{\rho} \bar{\nabla} p + \bar{R}_p + \bar{\nabla} \cdot \tau \quad (2)$$

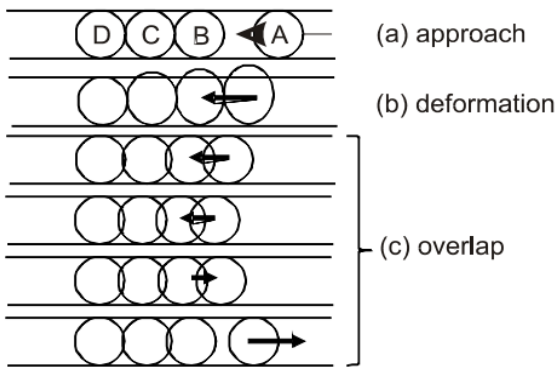
که در آن U سرعت سیال، τ تنش برشی سیال و R_p ترم مربوط به اندرکنش بین ذرات و سیال (تبادل مومنتوم با فاز ذرات) می‌باشد که از نیروهای پسا ذرات برای هر سلول محاسبه می‌گردد. در رویکرد اوپلری-لاگرانژی، معادلات بقا برای فاز سیال حل می‌گردد، درحالی‌که در فاز حاوی ذرات معادلات حرکت نیوتن برای یافتن مسیر حرکت ذرات حل می‌شود. با حل معادله زیر، مسیر حرکت ذرات محاسبه می‌گردد [۲۳]:

$$m_p \frac{d\bar{U}_p}{dt} = \bar{F}_{particle} \quad (3)$$

که در آن m_p جرم ذره، U_p سرعت ذره و $F_{particle}$ برآیند نیروهای وارد بر ذره می‌باشد. تعادل نیرو برای یک ذره کروی موجود در سیال لزج به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۴]:

3 Hard Sphere Model
4 Soft Sphere Model

1 PimpleFoam
2 Intermediate



شکل ۲. هم‌پوشانی ذرات در مدل کره نرم [۲۵]

Fig. 2. Particle overlap in the soft sphere model

می‌توان به مولفه‌های جدا برای نیروی مماسی و نرمال تقسیم کرد که در آن فنر، میراگر و سایر المان‌های مکانیکی بین ذره i و ذره j جایگذاری شده است. اثرات فنر، میراگر و لغزنده اصطکاکی روی حرکت ذره توسط پارامترهای سختی فنر k ، ضریب میرایی η ، ضریب اصطکاک f ، بیان می‌شود. مولفه نرمال نیروی تماسی F_n وارده بر ذره i از برآیند نیروهای ایجاد شده توسط فنر و میراگر به دست می‌آید. براساس قضیه تماس هرتزین^۱، در کره‌های سه‌بعدی نیروی نرمال با توان $\frac{3}{2}$ جابه‌جایی تغییر می‌کند. بنابراین نیروی F_n وارده بر ذره i با رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$\vec{F}_n = (-k_n \delta_n^{3/2} - \eta_{nj} \vec{G} \cdot \vec{n}) \vec{n} \quad (8)$$

در رابطه فوق δ_n جابه‌جایی ذره ناشی از نیروی نرمال، G بردار سرعت ذره i نسبت به ذره j ، $(G = V_i - V_j)$ و n بردار یکه در جهت خط واصل مراکز دو ذره می‌باشد. مولفه مماسی نیروی تماسی نیز طبق رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$\vec{F}_t = -k_t \vec{\delta}_t - \eta_{ij} \vec{G}_{ct} \quad (9)$$

که در آن k_t و η_{ij} به ترتیب سختی و ضریب میرایی در جهت مماسی می‌باشند. G_{ct} سرعت لغزش نقطه تماس است و طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$\vec{G}_{ct} = \vec{G} - (\vec{G} \cdot \vec{n}) \vec{n} + a_i \vec{\omega}_i \times \vec{n} + a_j \vec{\omega}_j \times \vec{n} \quad (10)$$

که در آن a_i و a_j به ترتیب شعاع ذره i و j و ω سرعت زاویه‌ای ذره می‌باشند [۲۵].

۳-۲- انتخاب مدل آشفتگی

انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای شبیه‌سازی آب‌شستگی پایه‌های پل از ضروریات تحقیق در مورد این پدیده می‌باشد. از آن‌جا که گرادبان فشار معکوس قوی منجر به تشکیل گردابه نعل اسبی می‌گردد، رولاند و همکاران مدل $k-\omega$ را به علت عملکرد بهتر آن در جریانات لایه مرزی با گرادبان فشار معکوس قوی، به عنوان مدل آشفتگی در شبیه‌سازی آب‌شستگی پیشنهاد کرده‌اند. در مطالعات پیشین سه نسخه از مدل‌های $k-\omega$ موجود است که

1 Hertzian Contact Theory

شامل مدل اصلی $k-\omega$ مربوط به ویلکاکس^۲، مدل $k-\omega_{BSL}$ و مدل $k-\omega_{SST}$ ^۳ می‌باشند. دو مدل آخر مورد بحث توسط منتر در سال ۱۹۹۳ برای بهبود مدل اصلی ویلکاکس توسعه یافت تا برای جریان‌های با گرادبان فشار معکوس دقت بیشتری حاصل شود. نتایج نهایی تحقیقات منتر نشان می‌دهد، با استفاده از مدل $k-\omega_{SST}$ دقیق‌ترین نتایج برای شبیه‌سازی این پدیده حاصل می‌گردد. در حالی که در مدل $k-\varepsilon$ نتایج ضعیف‌تری نسبت به هر سه مدل $k-\omega$ در جریانات با گرادبان فشار معکوس، حاصل گردیده است. به همین دلیل در این تحقیق مدل $k-\omega_{SST}$ که در آن اثرات قوی فشار معکوس وجود دارد، برای شبیه‌سازی این رویداد انتخاب شده است. علت اصلی تشکیل گردابه نعل اسبی در جلوی پایه نیز همین اثر قوی فشار معکوس می‌باشد. در مدل $k-\omega$ کمیت k همان انرژی جنبشی آشفتگی و کمیت ω نیز اتلاف مشخصه انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد [۳].

۴-۲- تعریف مدل عددی و آزمایشگاهی

در این پژوهش از حلگر اوبلری-لاگرانژی در نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم برای شبیه‌سازی مساله مورد بحث استفاده شده است. مطابق شکل ۴ شبیه‌سازی‌ها در یک دامنه‌ای که متشکل از چاله‌ای با ابعاد 0.34×0.15 و 0.03×0.15 متر و کانالی مستطیلی به ابعاد 0.55×0.15 و 0.04×0.15 متر که به ترتیب طول، عرض و ارتفاع را بیان می‌کند، می‌باشد. چاله

2 Wilcox

3 Baseline Model

4 Shear-Stress Transport

[۲۶]:

$$O.E = \frac{\sum_{j=1}^n |\varphi_{ref}^j - \varphi^j|}{\sum_{j=1}^n |\varphi_{ref}^j|} \quad (11)$$

که در آن φ_{ref}^j مقدار مرجع کمیت مورد نظر (جواب ریزترین شبکه) در گره j ام و φ^j مقدار آن کمیت (سرعت) در شبکه مورد نظر می‌باشد. تغییرات درصد خطا با افزایش تعداد شبکه در جدول ۱ و نمودار حاصل از آن در شکل ۳ نشان داده شده است:

مطابق شکل دامنه عددی شامل ۲۳۰۰۰ سلول دارای درصد خطای قابل قبولی به منظور انتخاب شبکه‌بندی مناسب می‌باشد که در آن به علت تقارن در صفحه $Z = 0$ نصف دامنه مدل می‌شود. شبکه‌بندی سازمان‌یافته بوده و با نزدیک شدن به دیواره‌ها و پایه ریزتر می‌گردند (شکل ۴).

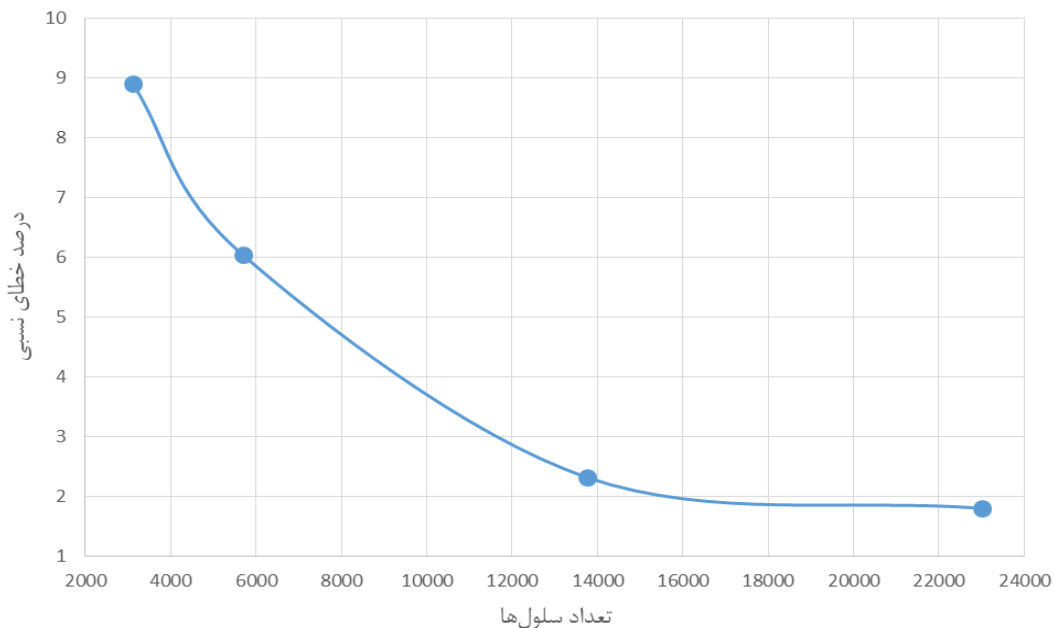
به منظور اعمال شرایط مرزی، برای مرز بالای دامنه محاسباتی از شرط مرزی تقارن که در آن کلیه گرادیان‌های عمود بر مرز صفر بوده و هیچ جریانی از آن عبور نمی‌کند، استفاده شده است. همچنین در کلیه دیواره‌ها و در سطح پایه استوانه‌ای برای میدان سرعت شرط مرزی عدم لغزش، برای k و ω از توابع دیواره برای سایر کمیت‌ها از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شده است. شرط مرزی ورودی، سرعت ثابت و شرط مرزی همرفتی برای خروجی محدوده مدل‌سازی

شامل ۱۳۲۱۰۰ ذره به قطر ۲/۴ میلی‌متر، چگالی ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ 5×10^5 پاسکال و نسبت پواسون معادل ۰/۴۵ می‌باشد. عمق رسوب برابر با ۳ سانتی‌متر و ارتفاع آب گذرنده از روی آن ۴ سانتی‌متر می‌باشد. چگالی آب 10^3 کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سینماتیکی 1×10^{-6} مترمربع بر ثانیه می‌باشد. استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر در وسط کانال قرار گرفته است.

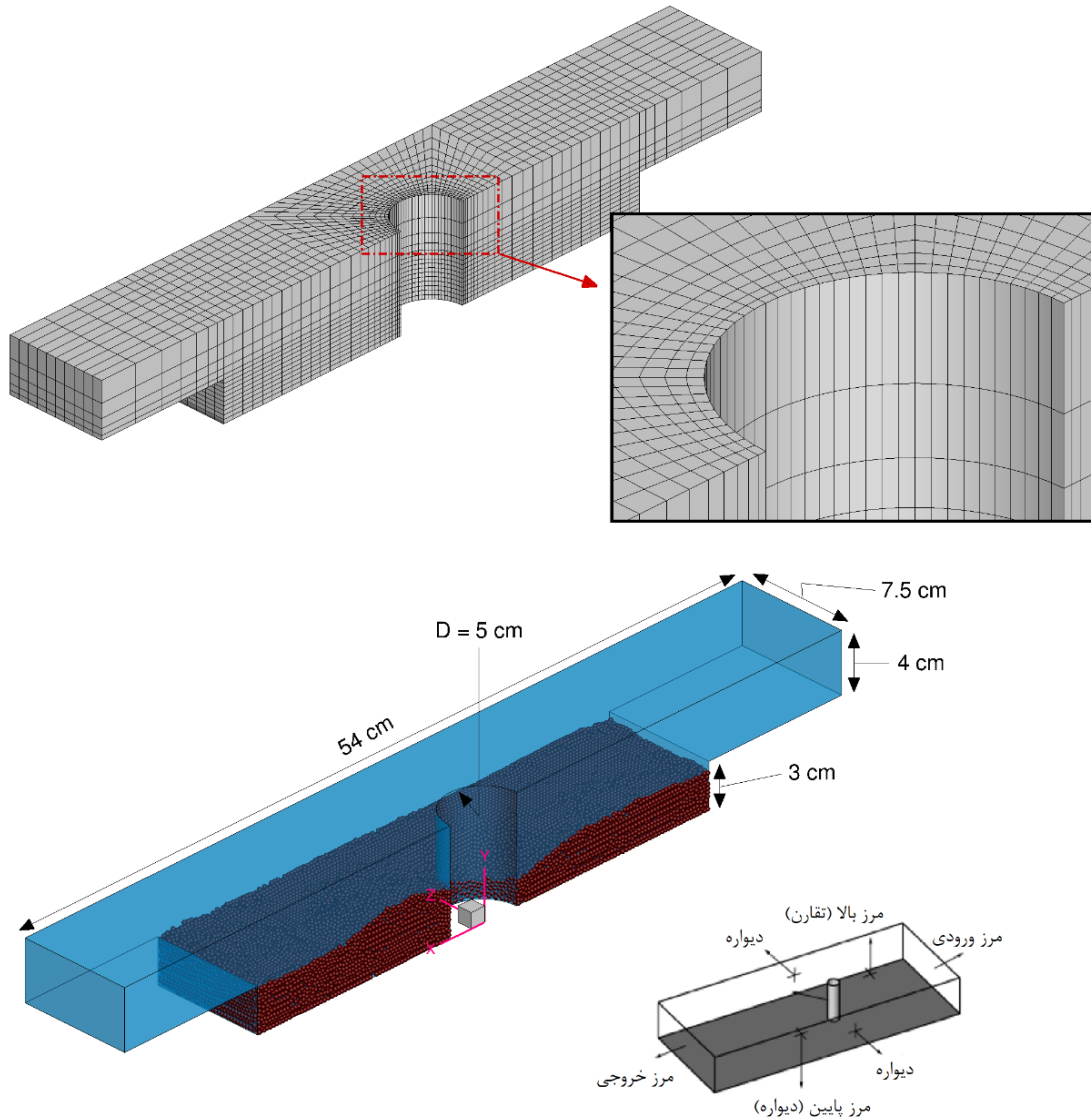
به منظور بررسی حساسیت‌سنجی پاسخ‌ها نسبت به گسسته‌سازی دامنه محاسباتی و انتخاب شبکه‌بندی مناسب، پروفیل سرعت در صفحه $X = 0$ در چهار شبکه‌بندی متفاوت با پاسخ‌ها در ریزترین شبکه‌بندی مقایسه و خطای نسبی طبق رابطه زیر محاسبه شده است

جدول ۱. تغییرات درصد خطای نسبی با افزایش تعداد سلول‌ها
Table 1. The table of changes in the percentage of relative error by increasing cell number

تعداد سلول‌ها	۳۱۲۰	۵۶۸۸	۱۳۷۶۰	۲۳۰۰۰
درصد خطای نسبی	۸/۹۰۵۲۲۹	۶/۰۴۵۷۵۲	۲/۳۱۴۸۱۵	۱/۷۹۷۳۸۶



شکل ۳. نمودار کاهش درصد خطای نسبی با افزایش تعداد سلول‌ها
Fig. 3. The diagram of reduction in the percentage of relative error by increasing cell number



شکل ۴. هندسه و نحوه شبکه‌بندی دامنه حل عددی
 Fig. 4. The geometry and mesh of the numerical computational domain

پایه ساده مدل شده است. سرعت جریان ورودی به کانال ۰/۳ متر بر ثانیه می‌باشد. در فاز دوم، پایه ساده و پایه با حضور طوقه در ترازهای مختلف با سرعت ورودی ۰/۵ متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده است. به منظور بررسی اثر تراز نصب طوقه در عمق آب‌شستگی، مدل‌های پایه با طوقه‌هایی به قطر ۱۰ سانتی‌متر در ارتفاع‌های ۳/۵ و ۴ سانتی‌متر از کف دامنه محاسباتی شبیه‌سازی گردید. همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش مدل آشفتگی $k-\omega_{SST}$ به علت عملکرد بهتر اینگونه مدل‌ها در جریان‌های لایه مرزی با گرادیان فشار معکوس قوی، به عنوان مدل آشفتگی انتخاب گردیده است.

در نظر گرفته شده است. همچنین به علت تقارن در فیزیک مسئله و برای صرفه‌جویی در هزینه‌های محاسباتی نصف دامنه مورد اشاره شبیه‌سازی شده است. از آنجایی‌که رسوبات درون چاله محاصره شده‌اند، تنها با دیواره در تماس می‌باشند و طبق شرط مرزی ریباند^۱ ذرات با برخورد به دیواره با ۹۷ درصد انرژی اولیه خود، برمی‌گردند [۲۳].

مدل عددی بررسی شده در این پژوهش شامل دو فاز مجزا می‌باشد. در فاز اول به منظور اعتبارسنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی،

1 Rebound

بر ساعت بوده که سرعت جریان ورودی برای عرض ۶۰ سانتی‌متری کانال و عمق ۴ سانتی‌متری جریان را برابر با ۰/۳ متر بر ثانیه به‌دست می‌دهد. پایه‌ای استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر در مسیر جریان و در مرکز آن قرار گرفته است. شکل ۵ محدوده بررسی شده در این آزمایش را نشان می‌دهد که مشابه دامنه مورد استفاده در مدل‌سازی عددی می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

در مدل آزمایشگاهی پس از انجام آزمایش و تشکیل حفره آب‌شستگی تعادلی با بررسی مقطع عرضی گذرنده از مرکز پایه (صفحه $X = 0$) عمق آب‌شستگی به فواصل نیم سانتی‌متری توسط سوزن مدرج قرائت شد. دقت سوزن مدرج ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. در نهایت عمق بیشینه تعادلی آب‌شستگی برابر ۱/۵ سانتی‌متر مشاهده و ثبت گردید. شکل ۶ مدل آزمایشگاهی را پس از اتمام آزمایش نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل مشخص است، حفره حاصل از پدیده آب‌شستگی اطراف پایه تشکیل گردید. شکل ۷ پروفیل عرضی سطح بستر در مقطع عبوری از مرکز استوانه (صفحه $X = 0$) را در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، تا فاصله ۲/۷ سانتی‌متری از کنار پایه، بستر تحت تاثیر قرار گرفته و آب‌شسته

مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقاله در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته و بهره‌برداری شده است. در این آزمایش از رسوبات با ماسه‌های رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۱۲، یعنی ذراتی با قطرهای بین ۱/۶ تا ۲/۴ میلی‌متر استفاده شده است. دبی ورودی به کانال برابر ۲۶ مترمکعب



شکل ۵. مدل آزمایشگاهی قبل شروع جریان
Fig. 5. The experimental model before the flow starts



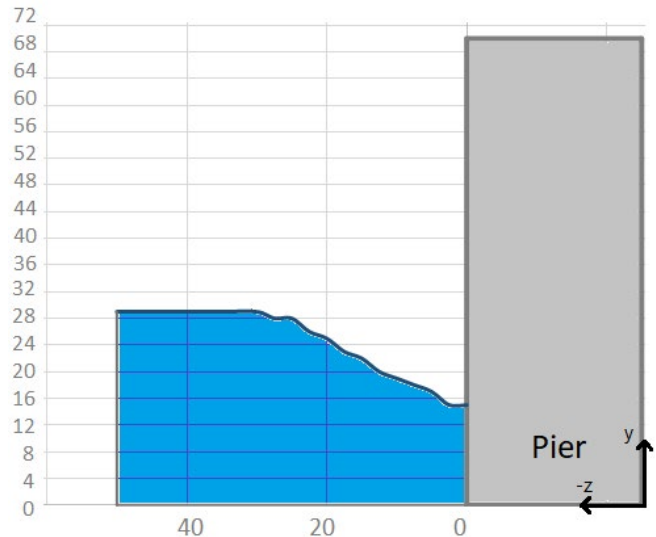
شکل ۶. حفره حاصل از آب‌شستگی در جلو پایه و انباشته شدن رسوب در پشت آن
Fig. 6. Scour hole in front of the pier and backfilling on the back of the pier

کوپلینگ بین فاز سیال و فاز ذرات در نظر گرفته نمی‌شود. این به آن معنی است که ذرات اثری روی جریان نخواهند گذاشت و رفتار جریان حول استوانه به گونه‌ای است که انگار رسوبی در کف دامنه وجود ندارد ولی جریان روی ذرات اثر گذاشته و باعث آب‌شستگی آن می‌شود. همچنین در این مدل از مدل پسا کروی استفاده شده است. یعنی کلیه ذرات رسوب برای شبیه‌سازی کروی فرض گردیده اند.

نحوه چیدمان ذرات قبل شروع جریان به صورت شطرنجی می‌باشد. این چیدمان منجر به نشست اولیه ذرات می‌گردد که در نتیجه آن پس از نشست اولیه به اندازه ۷ میلی‌متر، عمق رسوبات کمتر از ۳ سانتی‌متر می‌شود. به منظور بالا بردن دقت شبیه‌سازی عددی، ابتدا ۴ سانتی‌متر از ذرات کروی به صورت شطرنجی چیده شده و در حالی که جریانی از روی آن‌ها عبور نمی‌کند، به آن‌ها اجازه نشست اولیه داده می‌شود و پس از این نشست، ذراتی که تراز کمتر از ۳ سانتی‌متر دارند جدا شده و در مدل اصلی قرار داده می‌شود. به این ترتیب در مدل عددی، چاله اطراف استوانه، توسط ذراتی که نشست اولیه ناشی از وزن خود را تجربه نموده‌اند، پر شده است. برای انجام عملیات فوق، از کد نوشته شده در فرترن استفاده شده است.

شکل ۸ کانتور سرعت افقی جریان در مجاورت پایه دایروی در حالت پایدار را نشان می‌دهد. در این شکل جهت جریان در کانال از راست به چپ می‌باشد. با نزدیک شدن به جلوی پایه سرعت جریان روند نزولی داشته و به مقداری منفی می‌رسد. در نتیجه جریان برگشتی ایجاد شده که در نهایت مطابق شکل ۹ منجر به تشکیل گردابه نعل اسبی می‌گردد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با شرایط ذکر شده دارای تطابق مناسب با داده‌های آزمایشگاهی نمی‌باشد. مقایسه پروفیل حاصل از مدل عددی با آزمایشگاهی بیانگر این است که شیب حفره آب‌شستگی در مدل عددی کمتر از مدل آزمایشگاهی می‌باشد. یعنی رسوبات از فاصله دورتری از پایه شروع به شسته شدن می‌کنند. در این مدل عددی کل فاصله موجود از کناره پایه تا دیواره که برابر ۵ سانتی‌متر می‌باشد، تحت تاثیر آب‌شستگی ناشی از حضور پایه استوانه‌ای قرار گرفته است که این مساله با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی ندارد. اختلاف بیشترین عمق آب‌شستگی در کنار پایه در دو مدل عددی و آزمایشگاهی برابر با ۵ میلی‌متر (۳۳ درصد اختلاف) می‌باشد. بنابراین مدل نیاز به اصلاح داشته و به این



شکل ۷. پروفیل بستر آب‌شسته حاصل از مدل آزمایشگاهی در صفحه $X=0$ (میلی‌متر)

Fig. 7. Scoured bed profile obtained from the experimental model on the plane of $x=0$ (mm)

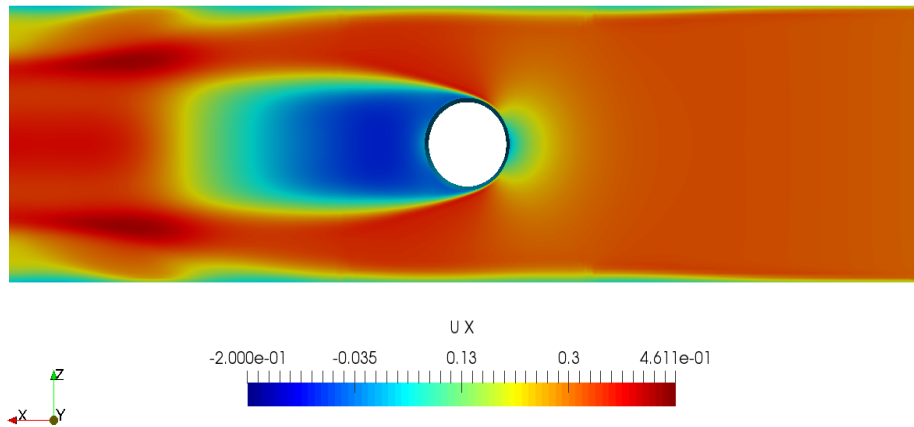
می‌شود.

برای پیش‌بینی الگوهای فاز گسسته می‌توان بر مبنای یک میدان جریان فاز پیوسته ثابت (یک روش غیر کوپل) استفاده کرد و یا می‌توان اثر فاز گسسته روی فاز پیوسته را لحاظ نمود (روش کوپل شده). در روش دوم، الگوی جریان فاز پیوسته از فاز گسسته تاثیر می‌پذیرد و بالعکس [۲۷]. همچنین مدل پسا یکی از پارامترهای تاثیرگذار در رفتار ذرات و شسته شدن آن‌ها می‌باشد. در فاز اول مدل عددی تاثیر کوپلینگ و مدل پسا طی دو شبیه‌سازی بررسی شده و نتایج حاصل از آن‌ها با مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. یکی از مفاهیم مهم در آنالیز جریانات چندفازی، کوپلینگ است. اگر جریان یک فاز بر فاز دیگر اثر بگذارد در حالی که اثر معکوسی وجود نداشته باشد، جریان کوپلینگ یک‌طرفه^۱ نام دارد. اگر یک اثر متقابل بین جریانات هر دو فاز وجود داشته باشد، جریان کوپلینگ دوطرفه^۲ می‌باشد [۲۵].

۳-۱- نتایج مدل عددی فاز اول

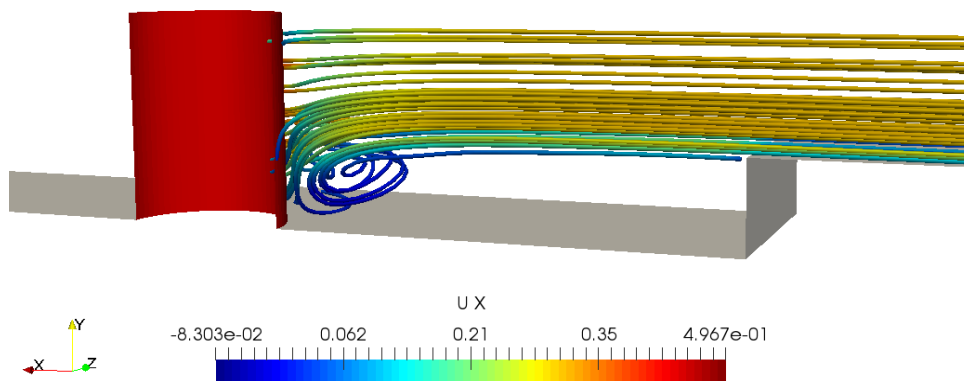
در مدل اول اثر سیال بر روی ذره و اندرکنش (برخورد) بین ذرات در محاسبات لحاظ می‌گردد ولی به منظور کاهش هزینه محاسباتی،

1 One-Way Coupled
2 Two-Way Coupled



شکل ۸. کانتور سرعت افقی جریان (متر بر ثانیه)

Fig. 8. The contour of horizontal flow velocity (m/s)

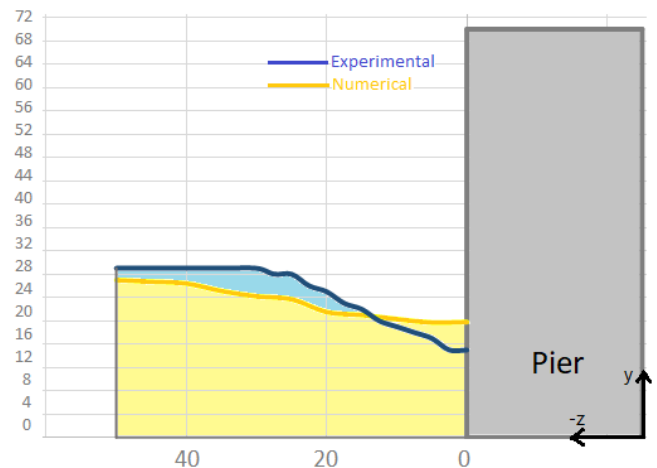


شکل ۹. تشکیل گردابه نعل اسبی در جلوی پایه

Fig. 9. Horseshoe vortex forming in front of the pier

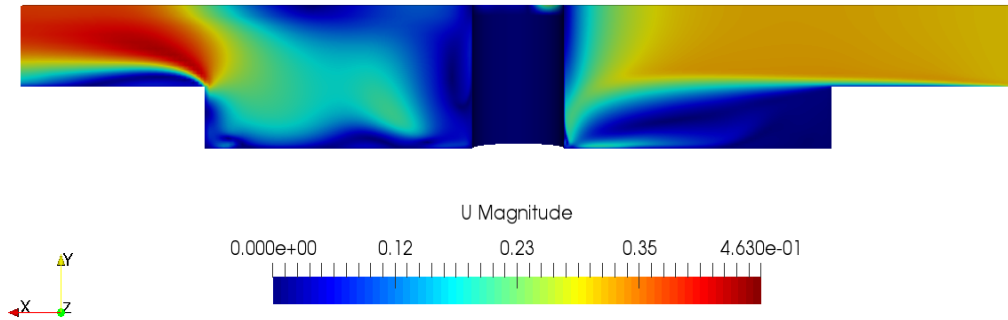
منظور ابتدا کوپلینگ چهار طرفه و سپس مدل پسا غیر کرووی به مدل اضافه می‌گردد.

در مدل دوم از کوپلینگ چهار طرفه برای شبیه‌سازی آب‌شستگی استفاده شده است. یعنی اثر سیال بر روی ذره، اثر ذره روی سیال و اندرکنش بین ذرات در شبیه‌سازی لحاظ می‌گردد. به منظور بهبود نتایج مدل‌سازی عددی و تطابق بیشتر با نتایج آزمایشگاهی، مدل پسا از مدل کرووی به مدل غیر کرووی تغییر یافت. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب کانتور سرعت در حالت غیر کوپل و کوپل شده را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۱ در روش غیر کوپل، حضور ذرات در داخل چاله هیچ اثری بر رفتار سیال نمی‌گذارد. در نتیجه گردابه‌های جریان در داخل رسوبات نیز حضور دارند و فاز گسسته ذرات نمی‌تواند باعث کاهش سرعت فاز پیوسته گردد. در نهایت با مقایسه این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کوپل شده اینرسی سیال بالا می‌رود



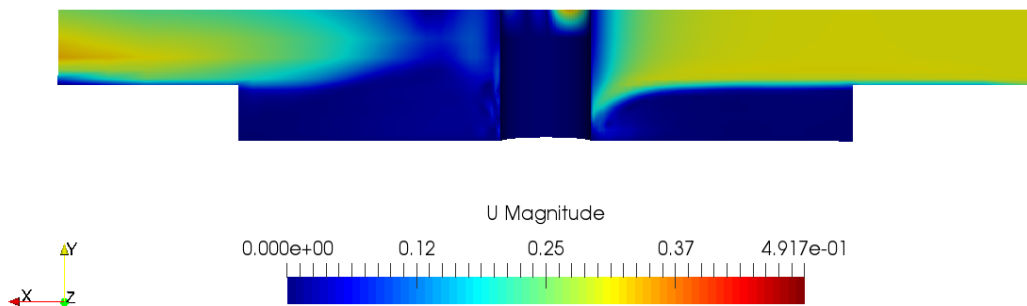
شکل ۱۰. مقایسه پروفیل بستر آب‌شسته مدل عددی غیر کوپل با مدل آزمایشگاهی در صفحه $X = 0$ (میلی‌متر)

Fig. 10. The comparison of scoured bed profile in an uncoupled numerical model with the experimental model on the plane of $x=0$ (mm)



شکل ۱۱. کانتور سرعت در روش غیرکوپل در صفحه $Z=0$ (متر بر ثانیه)

Fig. 11. The contour of velocity in the uncoupled approach on the plane of $z=0$ (m/s)



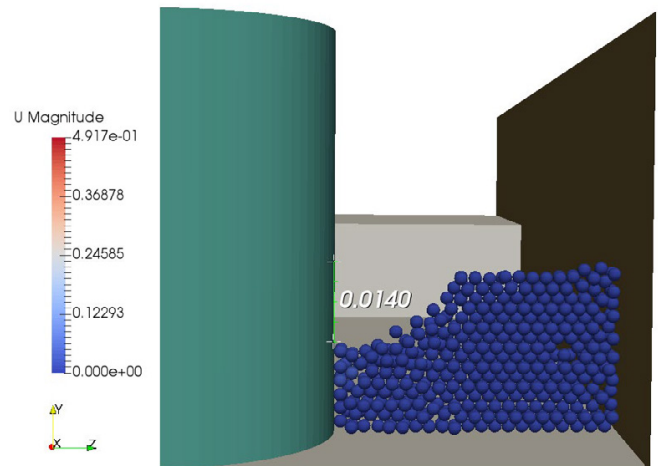
شکل ۱۲. کانتور سرعت در روش کوپل شده در صفحه $Z=0$ (متر بر ثانیه)

Fig. 12. The contour of velocity in the coupled approach on the plane of $z=0$ (m/s)

باعث می‌شوند که میدان سرعت جریان در چاله به سمت صفر میل کند که منطبق بر فیزیک مسئله می‌باشد.

شکل ۱۳ مقطع عرضی بستر را پس از آب‌شستگی در حالت پایدار نشان می‌دهد. رسوبات در جلو و کناره‌های پایه شسته شده و به پشت آن منتقل شده‌اند. مطابق شکل سرعت ذرات به علت پایداری به صفر رسیده‌اند. در این شکل حفره آب‌شستگی در کناره پایه به خوبی قابل تشخیص می‌باشد.

در نهایت در شکل ۱۴ نتایج پروفیل عرضی حاصل از این مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. در این مدل تا فاصله ۲/۳ سانتی‌متری از کنار پایه، بستر تحت تاثیر قرار گرفته و آب‌شسته می‌شود. اختلاف بیشترین عمق آب‌شستگی در کنار پایه در دو مدل عددی و آزمایشگاهی برابر با ۱ میلی‌متر (۶ درصد اختلاف) می‌باشد که در مقایسه با حالت بدون کوپلینگ دقت بهتری را نشان می‌دهد. شیب حفره آب‌شستگی در مدل عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم دارند. در نتیجه این مدل دارای دقت کافی بوده و تطابق خوبی با نتایج



شکل ۱۳. پروفیل بستر و سرعت ذرات در مقطع عرضی (صفحه $X=0$) پس از آب‌شستگی (متر بر ثانیه)

Fig. 13. Scoured bed profile and particle velocity on the cross-section (the plane of $x=0$) (m/s)

و در محل حضور ذرات گردابه تشکیل نمی‌گردد. این به آن معنی است که در شکل ۱۲ برخلاف شکل ۱۱، ذرات چیده شده در کف

اطراف پایه در پشت پایه جمع شده و با گذشت زمان به سمت پایین (جهت $+X$) دست حرکت می‌کند.

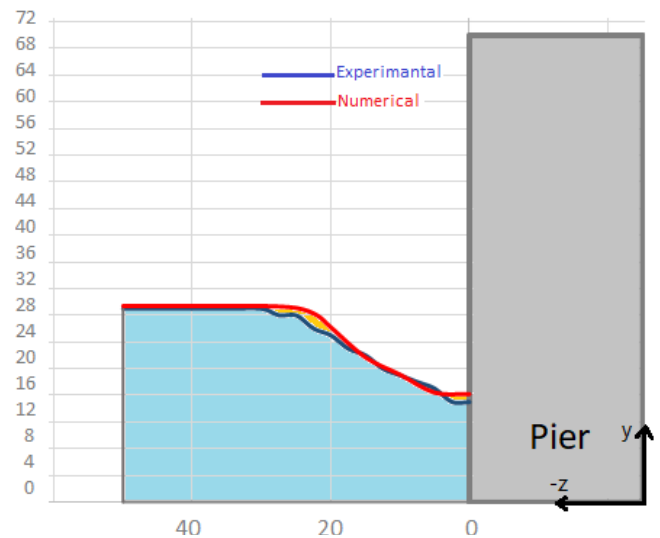
۳-۱- نتایج مدل عددی فاز دوم

در این فاز به منظور بررسی اثر طوقه در کاهش آبشستگی پیرامون پایه، حفره حاصل از آبشستگی در دو مدل پایه طوقه‌دار با مدل پایه بدون طوقه مقایسه می‌گردد. شکل ۱۶ کانتور فاصله ذرات از کف دامنه و پروفیل بستر آبشسته در مقطع عرضی گذرنده از مرکز پایه (صفحه $X = 0$) در حالت پایه ساده و پایه با حضور طوقه در دو تراز مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد حضور طوقه باعث کاهش عمق بیشینه آبشستگی می‌شود و با افزایش تراز طوقه، آبشستگی افزایش می‌یابد. در نتیجه طوقه در تراز پایین‌تر عملکرد بهتری در کاهش آبشستگی دارد.

جزئیات دقیق‌تر از مقطع عرضی در حالت‌های مختلف از طوقه و پایه ساده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. منحنی مشکی نشان‌دهنده پروفیل سطح بستر در حالتی است که آبشستگی حول پایه ساده و بدون طوقه می‌باشد. در این حالت بیشینه عمق آبشستگی برابر با $18/5$ میلی‌متر است. منحنی نارنجی رنگ مربوط به پروفیل بستر در حالت طوقه نصب شده در ارتفاع $3/5$ است که در آن بیشینه عمق آبشستگی $9/4$ میلی‌متر می‌باشد. این بدان معناست

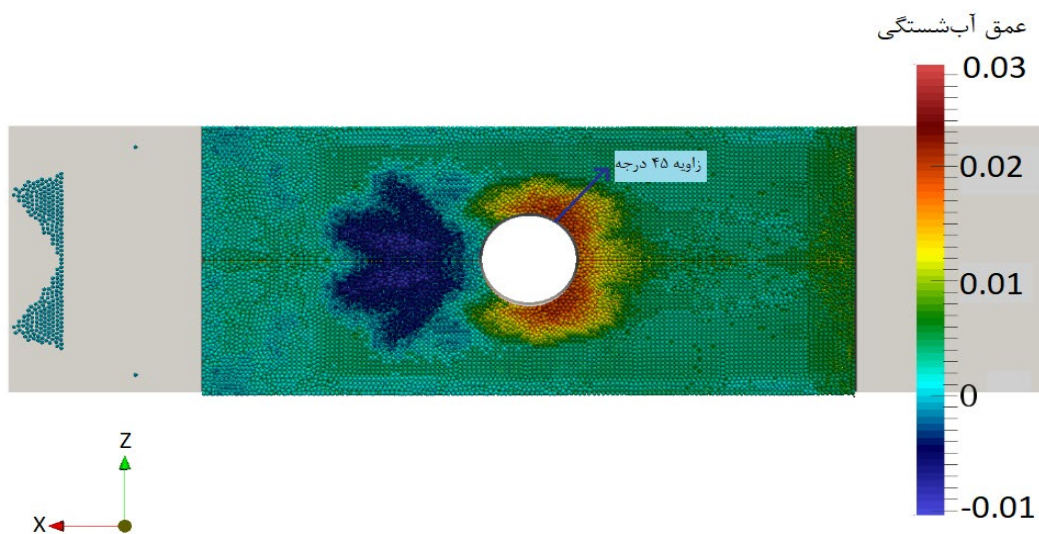
آزمایشگاهی دارد.

شکل ۱۵ فاصله کلیه ذرات را از سطح بستر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است بیشترین میزان آبشستگی در زاویه 45 درجه از لبه جلویی پایه اتفاق می‌افتد. همچنین در پایین دست پایه با کم شدن اثر گردابه‌های برخاستی، ذرات شسته شده از



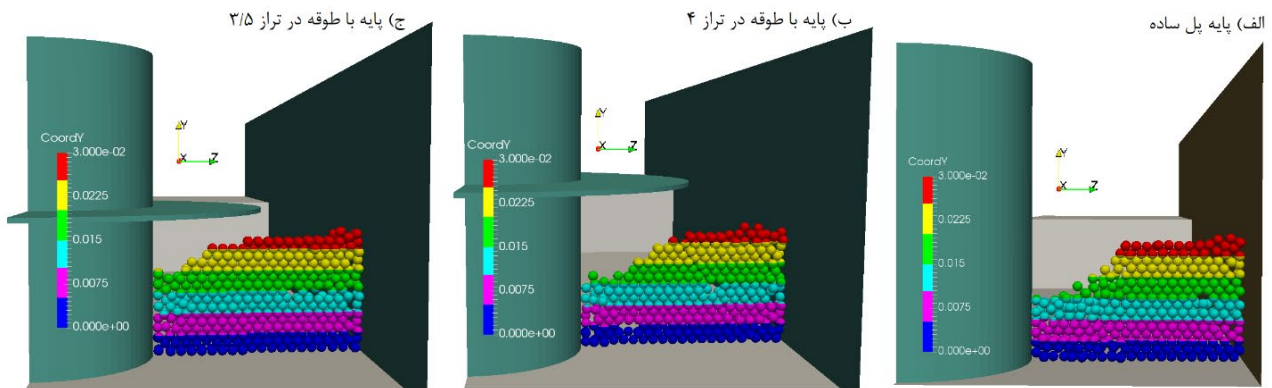
شکل ۱۴. مقایسه پروفیل بستر آبشسته مدل عددی کوپل شده با مدل آزمایشگاهی در صفحه $X = 0$ (میلی‌متر)

Fig. 14. The comparison of scoured bed profile in a coupled numerical model with the experimental model on the plane of $x=0$ (mm)



شکل ۱۵. کانتور فاصله ذرات از سطح بستر (متر)

Fig. 15. The contour of particle distance from the bed surface (m)

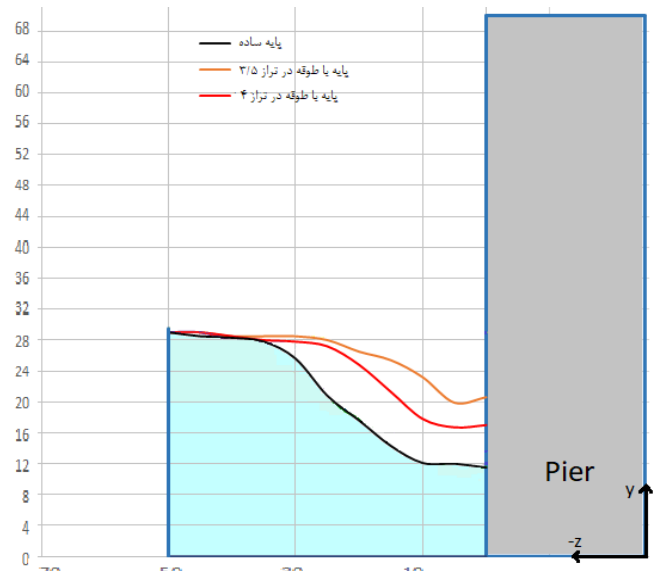


شکل ۱۶. مقطع عرضی آب‌شستگی و کانتور فاصله ذرات از کف دامنه در حالت. الف) پایه ساده، ب) پایه با طوقه در تراز ۴ و ج) پایه با طوقه در تراز ۳/۵
 Fig. 16. The scouring cross-section and the contour of particle distance from the bottom of the domain in a) simple pier, b) pier with collar at level 4 and c) pier with collar at level 3.5

۱۳ میلی‌متر می‌باشد که ۲۹/۷ درصد از بیشترین عمق آب‌شستگی کاهش داده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی پدیده آب‌شستگی اطراف یک پایه استوانه‌ای عمودی که در مسیر جریان قرار دارد، از یک حلگر سه‌بعدی توسعه یافته در نرم‌افزار این‌فوم به نام `pimpleLPTdenseFoam` استفاده می‌شود. به دلیل عملکرد بهتر مدل آشفتگی $k-\omega_{SST}$ در جریان‌های با گرادیان فشار معکوس، این مدل آشفتگی در این تحقیق به کار رفته است. مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقاله در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شده است. برای دستیابی به یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی پدیده آب‌شستگی پایه استوانه‌ای در فاز اول مدل‌سازی، دو سناریو در قالب دو مدل با رویکرد اوپلری-لاگرانژی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در سناریو اول اثر فاز گسسته روی فاز پیوسته لحاظ نشده است و در آن از پسا کروی استفاده شده است. نتایج این مدل دارای تطابق مناسب با نتایج آزمایشگاهی نمی‌باشد. بنابراین در سناریو دوم به منظور بالا بردن دقت شبیه‌سازی، کوپلینگ چهار طرفه و مدل پسا غیرکروی استفاده گردید. در سناریو دوم با روش کوپل شده و با تغییر مدل پسا کروی به غیرکروی، نتایج مناسبی حاصل گردید که دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشند.



شکل ۱۷. مقایسه پروفیل بستر آب‌شسته پایه ساده با پایه طوقه‌دار در صفحه $X=0$ (میلی‌متر)

Fig. 17. The comparison of scoured bed profile in a simple pier with piers having a collar on the plane of $x=0$ (mm)

که طوقه در فاصله نیم سانتی‌متر از بستر ماسه‌ای، می‌تواند تا ۴۹/۲ درصد از بیشترین عمق آب‌شستگی بکاهد. منحنی قرمز رنگ مربوط به طوقه در تراز ۴ یا به عبارت دیگر طوقه در فاصله ۱ سانتی‌متری از بستر رسوبات است که در این حالت بیشینه عمق آب‌شستگی

U سرعت، m/s

علائم یونانی

δ_n جابه‌جایی نرمال ذره، m

δ_t جابه‌جایی مماسی ذره، m

η ضریب میرایی، N.s/m

τ تنش برشی، N/m²

ω_i سرعت زاویه‌ای، rad/s

ρ چگالی، kg/m³

φ کمیت مورد نظر

زیرنویس

n مولفه نرمال

t مولفه مماسی

منابع

- [1] A.R. Zarrati, H. Gholami, M. Mashahir, Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers, *Journal of Hydraulic Research*, 42(1) (2004) 97-103.
- [2] T. Esmaili, A. Dehghani, A. Zahiri, K. Suzuki, 3D Numerical simulation of scouring around bridge piers (Case Study: Bridge 524 crosses the Tanana River), *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58 (2009) 1028-1032.
- [3] A. Roulund, B.M. Sumer, J. Fredsøe, J. Michelsen, Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *Journal of Fluid Mechanics*, 534 (2005) 351-401.
- [4] A. Zarrati, M. Nazariha, M. Mashahir, Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2) (2006) 154-162.
- [5] B.W. Melville, A.J. Raudkivi, Flow characteristics in local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Research*, 15(4) (1977) 373-380.
- [6] B. Dargahi, Controlling mechanism of local scouring, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(10) (1990) 1197-1214.
- [7] G. Deng, J. Piquet, Navier-Stokes computations of horseshoe vortex flows, *International journal for*

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار عمق آب‌شستگی تعادلی در مقطع عرضی در مدل عددی دوم و آزمایشگاهی به‌طور قابل قبولی (۶ درصد اختلاف) بر هم منطبق‌اند. شیب حفره آب‌شستگی در مدل عددی و آزمایشگاهی نیز تطابق خوبی با هم دارند. نتایج مدل عددی همچنین نشان می‌دهد که بیشترین میزان آب‌شستگی در زاویه ۴۵ درجه از لبه جلویی پایه اتفاق می‌افتد. فاز دوم مدل‌سازی عددی آب‌شستگی نیز به منظور بررسی اثر طوقه در کاهش آب‌شستگی پیرامون پایه استوانه‌ای انجام گردیده است. در این فاز ابتدا پایه ساده بدون طوقه و سپس پایه با حضور طوقه در دو تراز مختلف شبیه‌سازی شده است. به منظور بررسی اثر تراز نصب طوقه در کاهش عمق آب‌شستگی، مدل‌های پایه طوقه‌دار با ارتفاع‌های ۳/۵ و ۴ سانتی‌متر از کف دامنه محاسباتی شبیه‌سازی گردید. حضور طوقه باعث کاهش عمق بیشینه آب‌شستگی می‌شود. نتایج نشان داده است که طوقه در تراز پایین‌تر عملکرد بهتری در کاهش آب‌شستگی دارد و با بالا رفتن طوقه، بیشینه عمق و شعاع حفره حاصل از آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

E مدول الاستیسیته، N/m²

f ضریب اصطکاک

C_D ضریب پسا

D_p قطر ذره، m

F_g نیروی وزن و شناوری، N

F_D نیروی پسا، N

F_n نیروی تماسی نرمال، N

F_p نیروی فشاری، N

F_t نیروی تماسی مماسی، N

G بردار سرعت نسبی، m/s

k سختی فنر، N/m

m_p جرم ذره، kg

n بردار یکه

P فشار، N/m²

R_p ترم اندرکنش بین ذرات و سیال، m/s²

- Fredsøe, Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2033) (2015) 20140104.
- [19] S. Abdelaziz, M.-D. Bui, P. Rutschmann, Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet, *River Flow 2010*, (2014) 1597-1604.
- [20] Y. Li, D.M. Kelly, M. Li, J.M. Harris, Development of a new 3D Euler-Lagrange model for the prediction of scour around offshore structures, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34) (2014) 31.
- [21] J. Shim, G. Duan, H. Jo, Simulating Sediment Transport around a Bridge Pier Using Open FOAM Software, in: 16th World Environmental and Water Resources Congress 2016: Hydraulics and Waterways and Hydro-Climate/Climate Change, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016, pp. 362-369.
- [22] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, Pearson education, 2007.
- [23] A. Lopez, LPT for erosion modeling in OpenFOAM, in, 2014.
- [24] R. Kasper, J. Turnow, N. Kornev, Numerical modeling and simulation of particulate fouling of structured heat transfer surfaces using a multiphase Euler-Lagrange approach, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115 (2017) 932-945.
- [25] J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, C.T. Crowe, Y. Tsuji, *Multiphase flows with droplets and particles*, CRC press, 2011.
- [26] H. Tofighian, E. Amani, M. Saffar-Avval, Parcel-number-density control algorithms for the efficient simulation of particle-laden two-phase flows, *Journal of Computational Physics*, 387 (2019) 569-588.
- [27] A. Fluent, *ANSYS fluent theory guide 15.0*, ANSYS, Canonsburg, PA, (2013).
- numerical methods in fluids, 15(1) (1992) 99-124.
- [8] J.E. Richardson, V.G. Panchang, Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(5) (1998) 530-540.
- [9] N.R. Olsen, M.C. Melaen, Three-dimensional calculation of scour around cylinders, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(9) (1993) 1048-1054.
- [10] M. Muzzammil, T. Gangadharai, A. Gupta, An experimental investigation of a horseshoe vortex induced by a bridge pier, in: *Proceedings of the institution of civil engineers-water management*, Thomas Telford Ltd, 2004, pp. 109-119.
- [11] M. Vaghefi, M. Ghodsian, S. Salimi, The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour, *Sadhana*, 41(1) (2016) 75-86.
- [12] X. Liu, M.H. García, Three-dimensional numerical model with free water surface and mesh deformation for local sediment scour, *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 134(4) (2008) 203-217.
- [13] Y. Aghaee, H. Hakimzadeh, Three dimensional numerical modeling of flow around bridge piers using LES and RANS, in: *River Flow 2010*, pp. 211-218.
- [14] P. Cunha Ramos, J.P. Pêgo, R. Maia, Numerical simulation of the flow around a pier using OpenFOAM, in: *3rd IAHR Europe Congress*, 2014.
- [15] A. Khosronejad, S. Kang, F. Sotiropoulos, Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers, *Advances in Water Resources*, 37 (2012) 73-85.
- [16] L. Zhou, *Numerical modelling of scour in steady flows*, Doctoral dissertation, Université de Lyon, 2017.
- [17] C. Baykal, B.M. Sumer, D.R. Fuhrman, N.G. Jacobsen, J. Fredsøe, Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves, *Coastal Engineering*, 122 (2017) 87-107.
- [18] C. Baykal, B.M. Sumer, D.R. Fuhrman, N.G. Jacobsen, J.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم
 T. Ebrahimi, M. Hamidi., A. Rahmani Firoozjaee, E. Khavasi, *Numerical Investigation of Scour Around a Cylindrical Pier in Laboratory Scale Using Euler-Lagrange Approach*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(Special Issue 1) (2021) 411-426.

DOI: 10.22060/mej.2019.16679.6418

