بررسی عملکرد طوقه‌های محافظ در کاهش عمق آبشستگی حول پایه استوانه ای قائم ثابت

رضا یزدانی[۱]، علیرضا مجتهدی[۲]، محمدعلی لطف اللهی یقین[۳]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه های دریایی، دانشگاه تبریز؛ reza.yazdani288@yahoo.com
[۲] استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز؛ mojtahedi@tabrizu.ac.ir
[۳] استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز؛ lotfollahi@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
آبشستگی
تنش برشی بستر
روش حجم محدود
طوقه
مدل فیزیکی

چکیده

امروزه توربین‌های بادی با پایه ثابت دریایی در صنعت تولید برق به وسیله انرژی های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مسائل مهم در پایداری این سازه‌ها، بررسی مسئله آبشستگی ناشی از جریانهای دریایی حول پایه می‌باشد. از سازه های محافظ آبشستگی میتوان به طوقه ها اشاره کرد. در این تحقیق برای اولین بار، الگوی توزیع تنش برشی بستر حول پایه برای ارتفاع‌های مختلف طوقه نسبت به بستر، از طریق نرم افزار FLUENT به دست آمده، از طرفی دیگر آزمایشهایی بر روی مدل پایه بدون محافظ و پایه‌های طوقه دار در آزمایشگاه هیدرولیک انجام شده و نمودارهای پیشرفت زمانی آبشستگی، مقدار عمق تعادلی آبشستگی و الگوی حفره آبشستگی اطراف پایه برای حالات مختلف طوقه به دست آمده است. در آخر نتایج تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی با هم مقایسه شده، ضمن نشان دادن همسو بودن رابطه بین تنش برشی بستر و عمق آبشستگی تعادلی، مشخص گردید که طوقه های نزدیک بستر عملکرد مطلوبتری در محافظت از پایه دارند.

Investigation of the Protective Collars Effect on the Scour Depth around Fixed Offshore Vertical Pier

Reza Yazdani[1], Ali Reza Mojtahedi[2], Mohamad Ali Lotfollahi Yaghin[3]

[1] *Master of offshore engineering, University of Tabriz*
[2] *Assistant professor of civil engineering, University of Tabriz*
[3] *Professor of civil engineering, University of Tabriz*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 6 Feb. 2014
Accepted: 13 Jan. 2015
Available online: 11 Mar. 2015

Keywords:
Bed shear stress
Collar
Finite volume method
Physical model
Scour

ABSTRACT

Nowadays, the power industry with fixed offshore wind turbines through the renewable energies is one of the progressing industries. The installation of scour protection structures is done against the scouring process. The collars are one of the protective structures. In this study, distribution of the bed shear stress around the pier is investigated via the FLUENT software. The results have been observed based on the relative heights of the collar to the substrate. On the other hand, in a hydraulics laboratory, some experiments have been done on a physical model with and without the protective structures. The charts of the scour depths, the equilibrium scour depths and the patterns of the scour hole around the pier have been obtained for different test scenarios. Finally, comparing of results of the numerical analysis and experimental results showed that there was direct relationship between bed shear stress and the equilibrium scour depths as well as the collars with less height from substrate had proper effect on protection of pier.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

۱ - مقدمه

سونامی۱۱مارس ژاپن بسیاری از کشورهای دنیا را برآن داشت تا برروی استفاده بهینه از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید و باد سرمایه‌گذاری کنند. از جمله تکنولوژی‌های مطرح برای تولید برق، تکنولوژی استفاده از انواع توربین‌های بادی دریایی می‌باشد. نوع پرکاربرد این توربینها که برای شرایط خلیج فارس نیز مناسب هستند، توربین های با پایه ثابت دریایی می‌باشند. با فاصله گرفتن از ساحل، به دلیل امکان استفاده از فضای بیشتر برای نصب توربین‌های بادی و نیز شرایط بهتر وزش باد (سرعت و تداوم وزش باد)، امکان ایجاد مزارع توربین‌های بادی میسر می‌شود. هر مزرعه توربین بادی می‌تواند شامل صدها توربین باشد. ضمنا دور بودن توربین‌ها از ساحل مانع ایجاد مناظر نامطلوب در سواحل خواهد شد.

یکی از مسائلی که در پایداری توربین بادی با پایه ثابت دریایی باید به آن توجه داشت، بررسی مسئله آبشستگی حول پایه می‌باشد.آبشستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان، از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگری است.وقتییک پایه توربین در دریا و در مسیر جریان آب نصب می‌شود، بلافاصله الگوی جریان در اطراف پایه تغییر می‌کند،یعنی سرعت موضعی جریان و آشفتگی جریان و در نتیجه نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در اطراف پایه افزایشیافته و آبشستگی موضعی به وجود می‌آید. در حقیقت در بررسی مسئله آبشستگی با یک مسئله اندرکنش سازه، جریان و رسوب مواجه هستیم. بدین شکل که وجود سازه باعث تغییر الگوی جریان اطراف سازه شده وبه تبع آن تغییر الگوی جریان باعث افزایش نرخ انتقال رسوب حول سازه می‌گردد و این افزایش نرخ انتقال رسوب، به عنوان تهدیدی برای پایداری سازه تلقی می‌شود. عمق آبشستگی به عنوان

پارامتری مهم برای تعیین میزان آبشستگی به وجود آمده اطراف پایه بیان می‌شود[۱]. اهمیت تعیین عمق آبشستگی از آن جهت است که بیانگر میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف پایهتوربین می‌باشد. روش‌های مختلفی برای حفاظت از پایه در برابر آبشستگی وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به نصب طوقه‌های محافظ حول پایه اشاره کرد.

طوقه یک صفحه نازک تخت است که در ترازهای مختلف و به صورت عمود بر پایه نصبمی‌شود. هدف از قرار دادن طوقه در اطراف پایه حفاظت از بستر در برابر آبشستگی جریان رو به پایین و فعالیت گردابه‌ها است.طوقه به صورت یک سپر محافظ برای بستر، در مقابل جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل اسبی عمل کرده و اثر فرسایشی این عوامل را تا حد زیادی خنثی می‌کند. در ناحیه پایین طوقه، قدرت جریان رو به پایین و درنتیجه گرداب نعل اسبی کاهش می‌یابد[۲].

درگاهی، کومار و همکاران، زراتی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی پدیده آبشستگی حول پایه پل‌های استوانه‌ای شکل پرداختند. به طور خلاصه نتیجه به دست آمده از کار این محققین نشان می‌دهد که افزایش قطر طوقه (قطر بهینه برای طوقه، ۳برابر قطر پایه می‌باشد) و همچنین کاهش فاصله طوقه از بستر باعث کاهش عمق آبشستگی جلوی پایه می‌شود [۳,۴,۵].

در مورد کارهای انجام شده در بررسی پدیده آبشستگی حول پایه‌های استوانه‌ای شکل دریایی می‌توان به کارهای سامر و فردسو، سامر وهمکاران، هانسن و همکارانو زینک و همکاران اشاره کرد[۶,۷,۸,۹]. سومر و فردسو طی چند دهه اخیر تحقیقات دنباله دار ارزشمندی در ارتباط با مباحث هیدرودینامیک و انتقال رسوب حول سازه های استوانه ای شکل انجام داده اند که این نتایج در غالب کتابهای ارزشمندی نظیر ارائه شده اند [۱۰,۱۱,۱۲].

در این تحقیق از یک طرف نقش طوقه‌های محافظ در کاهش تنش برشی بستر، به وسیله تحلیل عددی انجام گرفته توسط نرم افزار FLUENT بررسی شده و از طرف دیگر نقش این طوقه‌ها در کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه به وسیله انجام آزمایش های آبشستگی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ملاحظه می‌شود که با کم شدن فاصله طوقه از بستر، تنش برشی بستر و عمق آبشستگی جلوی پایه کاهش می‌یابند. سپس با مقایسه بین عمق آبشستگی و تنش برشی بستر، هم سو بودن تغییرات این دو پارامتر نشان داده خواهد شد.

۲- بررسی عددی تاثیر طوقه بر نحوه توزیع تنش برشی حول پایه

۲-۱- تنظیم پارامترهای مدل به روش حجم محدود

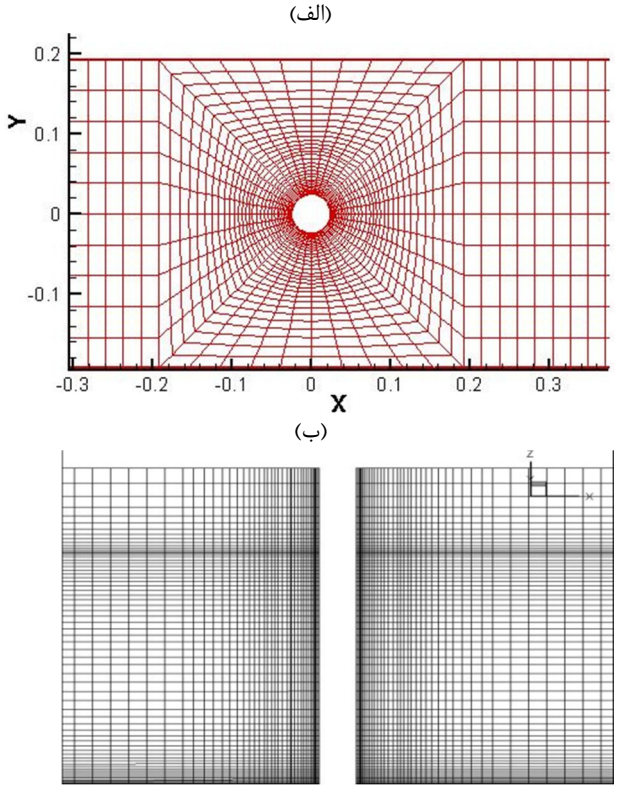
تحلیل جریان در FLUENT بر پایه روش حجم محدود که یک روش کارآمد در حل مسائل CFD میباشد، انجام می شود. FLUENT با حل معادلات ناویر- استوکس که شامل معادله پیوستگی و ممنتم می باشد به تحلیل جریان حول پایه می پردازد. در تحقیق حاضر، نتایج تحلیل عددی با نتایج کار آزمایشگاهی هانسن و همکاران[۸] مقایسه خواهد شد. آن‌ها آزمایش‌های خود را در فلوم آبی به طول ۲۲ متر، عرض ۷۷ سانتی‌متر و ارتفاع یک متر انجام دادند اما برای کم کردن تعداد مش‌ها و در نتیجه زمان لازم برای انجام تحلیل، کانالی به طول ۱/۵ متر، عرض ۳۸/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب داخل کانال ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و پایه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر در وسط کانال مدل شده است. شبکه‌بندی این مدل توسط نرم‌افزار پیش‌پردازنده GAMBIT صورت پذیرفته و برای این‌منظور از شبکه‌های منشوری استفاده شده است. به جهت تحلیل دقیق الگوی جریان، مطابق شکل ۱، مش‌ها در سه موقعیت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

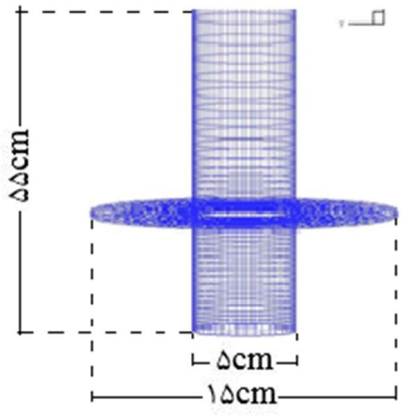
اطراف پایه، سطح مشترک آب و هوا و همچنین نزدیک بستر، ریزتر انتخاب شده‌اند. لازم به توضیح است که مدلسازی عددی در این تحقیق به صورت در نظر گرفتن دو فاز آب و هوا بوده و نتیجه گیریهای لازم با استفاده از خروجیهای تنش برشی بر مبنای پارامترهای هیدرودینامیکی می باشند. بنابراین مشاهدات مستقیم مرتبط با بحث بستر متحرک و فرایند آبشستگی (نظیر حرکت آغازین ذرات) بر مبنای کارهای آزمایشگاهی انجام گرفته است.

مسئله در کانالی با تعداد مش‌های ۸۸۰۰۰، ۱۰۸۰۰۰، ۱۱۰۰۰۰ و ۱۲۷۰۰۰ مورد تحلیل قرار گرفت و مشخص شد که پس از ریز کردن مش‌ها از مقدار ۱۱۰۰۰۰ به بعد، مقدار ماکزیمم تنش برشی روی بستر، تغییر قابل‌توجهی نمی‌کند.



شکل ۱- نحوه مش بندی در پلان و نمای جانبی اطراف پایه (الف): مش‌های ریز شده اطراف پایه، (ب): مش‌های ریزشده در ارتفاع

برای محافظت از پایه در مقابل آبشستگی از یک طوقه دایروی هم مرکز با پایه و به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده و با توجه به ارتفاع قرارگیری طوقه نسبت به بستر، ۹ حالت پایه محافظت شده در نظر گرفته شده است. طوقه در ارتفاع‌های صفر، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵، ۵ و ۷/۵ سانتی‌متری نسبت به بستر قرار گرفته است. با اضافه شدن طوقه به مدل ساخته شده، مطابق شکل ۲، مش‌ها در ارتفاع در اطراف طوقه نیز ریزتر شده‌اند.بسته به موقعیت قرارگیری طوقه، تعداد مش‌های هر مدل نسبت به مدل دیگر کمی متفاوت می‌باشد.



شکل ۲- هندسه پایه محافظت شده به وسیله طوقه در تحلیل عددی

در نرم افزار FLUENT، مسئله مورد نظر به صورت یک سیستم دوفازی تعریف می‌شود که شامل یک فاز جریان پایای آب در زیر لایه‌ای از هوا می‌باشد. برای تحلیل این مسئله باید از سیستم حجم سیال استفاده گردد. به طور اختصار می‌توان گفت که طرح ضمنی مدل VOF برای نوع حل‌گر و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد برای مدل کردن آشفتگی جریان مورد استفاده قرار گرفته اند. همچنین مدل VOF با لحاظ کردن شرایط کانال باز و همچنین در نظر گرفتن نیروهای حجمی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

در تعریف شرایط ورودی جریان باید یک گروه ورودی تعریف نمود، سپس شرایط مختص ورودی‌های جداگانه آب و هوا را برای هر کدام تعریف کرد. بدین منظور، هر دو ورودی آب و هوا از نوع ورودی فشار تعریف می‌شوند. در تنظیمات مربوط به جریان ورودی باید دو پارامتر شدت آشفتگی I و قطر هیدرولیکی D_h طبق روابط زیر محاسبه شوند:

$$I = 0.16(Re)^{-1/8} = 4.7\% \quad (۱)$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (۲)$$

سپس در ادامه در قسمت Multiphase با اختصاص دادن ارتفاع سطح آزاد آب به اندازه ۴۰ سانتی‌متر و همچنین سرعت جریان ورودی به اندازه ۳۵ سانتی‌متر بر ثانیه، تنظیمات ورودی جریان آب به اتمام می‌رسد. در تعریف شرایط خروجی جریان نیز باید یک گروه خروجی تعریف نمود، هر دو خروجی آب و هوا از نوع خروجی فشار تعریف می‌شوند. همچنین دیواره بالایی کانال از نوع شرط مرزی تقارن لحاظ می‌شود. روش‌های گسسته سازی معادلات با توجه به راهنمای نرم افزار و همچنین شرایط حل، در منوی solution به قرار زیر تعیین شدند: فشار: PRESTO!، مومنتم: Second Order Upwind، کسر حجمی: Modified HRIC و معادلات آشفتگی: Second Order Upwind. لازم به ذکر است

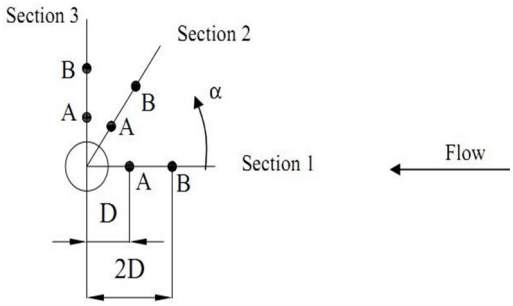
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

که به منظور رسیدن به جواب‌های دقیق، معیار همگرایی در حل همه معادلات، عدد ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است[۱۳].

۲-۲- صحت سنجی مدل عددی

در سال ۲۰۰۸ مارتین هانسن و همکاران آزمایش‌های خود را در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دانمارک انجام دادند. این آزمایش‌ها مربوط به بررسی مسئله آبشستگی حول پایه یک توربین بادی با پایه ثابت واقع در دریای شمال بود. عمق آب و نیز شرایط محیطی به گونه‌ای بود که آن ها توانستند از اثرات امواج بر روی آبشستگی اطراف پایه توربین صرف نظر کنند. اندازه‌گیری سرعت جریان در سه مقطع مطابق شکل ۳ انجام پذیرفته است. با توجه به نتایج مربوط به سرعت، در مقاطع مختلف نتایج مربوط به تنش برشی بستر مطابق جدول ۱ به دست آمده است [۸].



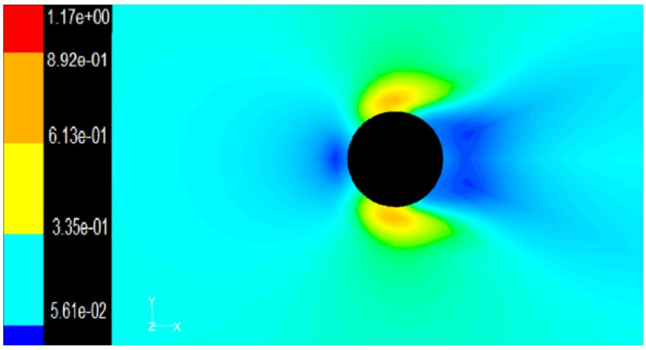
شکل ۳- اندازه گیری سرعت در مقاطع نشان داده شده[۸]

جدول ۱- تنش برشی بستر در مقاطع مختلف مربوط به آزمایش های [۸]

زاویه نسبت به جهت جریان	موقعیت	تنش برشی (پاسکال)
مقطع ۱	A	۰/۵۸۵
α = ۰	B	۰/۷۶۵
مقطع ۲	A	۰/۹۹
α = ۵۵	B	۰/۹۳۶
مقطع ۳	A	۱/۴۱
α = ۹۰	B	۱/۱۳۴

با توجه به مقادیر تنش برشی در مقاطع مختلف، مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم تنش برشی در موقعیت ۹۰ درجه نسبت به جهت جریان و برابر ۱/۴۱ پاسکال به دست آمده است. از طرفی در مدل عددی تهیه شده در تحقیق حاضر، مقدار ماکزیمم تنش برشی اطراف پایه در تعداد مش ۱۱۰۰۰۰، مطابق شکل ۴ در موقعیت ۹۰ درجه نسبت به جهت جریان و برابر ۱/۱۷۱ پاسکال می‌باشد. مطابق با شکل ۳ و همچنین جدول ۱، علاوه بر مقطع ۱، مقادیر مربوطه برای مقاطع ۲ و ۳ نیز موجود بوده و مورد ارزیابی قرار گرفته اند که در کلیه این مقاطع نیز خطا در حد قابل قبول قرار داشته اند.

این شرایط نشان دهنده انطباق مناسب نتایج به دست آمده از مدل عددی تهیه شده با نتایج آزمایشگاهی [۸] می‌باشد.

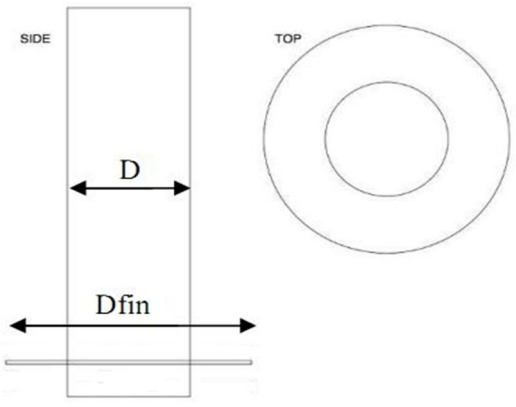


شکل ۴- توزیع تنش برشی روی بستر

۳- بررسی تجربی مکانیسم آبشستگی با استفاده از مدل فیزیکی پایه و طوقه

۳-۱- تجهیزات آزمایشگاهی و چیدمان مدل

آزمایش‌های تحقیق حاضر در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و عمق ۰/۸۵ متر به انجام رسیده است. آب در بالادست به وسیله یک پمپ با توان حداکثر ۷۰ لیتر بر ثانیه وارد فلوم می‌شود. محل مورد آزمایش جعبه ماسه‌ای به طول ۲ متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که با ماسه با قطر متوسط دانه ۰/۷۲ میلی‌متر با سطح کاملا مسطح و بدون شیب پر شده است. مدل مورد آزمایش درست در وسط این جعبه ماسه‌ای تعبیه می‌شود. در کلیه آزمایش‌ها ارتفاع آب داخل فلوم ۲۰ سانتی‌متر درنظر گرفته شده است. مطابق شکل ۵، پایه از جنس پلی‌اتیلن و به قطر ۵ سانتی‌متر و طوقه از جنس پلکسی‌گلس و به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۵- پلان و نمای جانبی پایه طوقه دار

۳-۲- تشابه هیدرولیکی مدل عددی با شرایط آزمایشگاه

در این تحقیق در انتخاب مدل عددی، تطابق شرایط جریان بالادست مدل عددی و فیزیکی، معیار اصلی انتخاب قرار گرفت. بدین ترتیب شرایط طوری در نظر گرفته شد تا اعداد فرود و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

رینولدز پایه در هر دو مدل یکسان به دست آید. در کلیه آزمایش‌ها با توان ۵۲ لیتر بر ثانیه پمپ و نیز تنظیم دریچه خروجی، عمق مورد نظر ۲۰ سانتی‌متر برای ارتفاع آب تامین شده است. با در دست داشتن دبی جریان و نیز ابعاد فلوم، سرعت جریان مختل نشده در بالادست پایه $0.26\ ^{m}/_{S}$ به دست می آید. با در دست داشتن سرعت جریان در بالادست، خصوصیات دیگر جریان، همچون عدد فرود و عدد رینولدز پایه به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.h}} = \frac{0.26}{\sqrt{9.81 \times 0.2}} = 0.18 \quad (۳)$$

$$Re_D = \frac{V.D}{\vartheta} = \frac{0.26 \times 0.05}{10^{-6}} = 13000 \quad (۴)$$

همچنین برای مدل عددی مقادیر به صورت زیر می‌باشد:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.h}} = \frac{0.35}{\sqrt{9.81 \times 0.4}} = 0.177 \quad (۵)$$

$$Re_D = \frac{V.D}{\vartheta} = \frac{0.35 \times 0.05}{10^{-6}} = 17500 \quad (۶)$$

در کلیه روابط، V سرعت جریان در بالادست، h عمق جریان در بالادست، b عرض فلوم و ϑ ویسکوزیته سینماتیکی آب می‌باشد.
اعداد فرود در هر دو مدل با هم مساوی بوده و در هر دو مدل جریان بالادست، جریان زیربحرانی می‌باشد. هر دو مقدار برای عدد رینولدز پایه در محدوده $300 < Re_D < 3 \times 10^5$ می‌باشد بنابراین الگوی تشکیل گردابه‌ها و نیز جدایش جریان در هر دو مدل یکسان خواهد بود.
با توجه به شرایط بالا، می‌توان رابطه‌ای بین تنش برشی به دست آمده از مدل عددی (نرم افزار FLUENT) و عمق تعادلی آبشستگی به دست آمده از مدل فیزیکی (آزمایش ها) به دست آورد. در ادامه مقایسه نتایج به دست آمده از هر دو مدل صحت وجود این رابطه را اثبات خواهد کرد.
برای صحت سنجی آزمایش‌ها نیز عدد اشتروهال گردابه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در محدوده اعداد رینولدز مربوط به آزمایش‌ها، عدد اشتروهال باید حدود ۰/۲ به دست آید. عدد اشتروهال به صورت زیر به دست می‌آید:

$$St = \frac{f_v D}{V} = \frac{1.04 \times 0.05}{0.26} = 0.2 \quad (۷)$$

در این رابطه f_v فرکانس گردابه‌ها می‌باشد. در حین انجام آزمایش، با استفاده از تزریق ماده رنگی بر روی سطح جریان و پردازش تصاویر به دست آمده توسط یک دوربین دیجیتالی، مقادیر f_v محاسبه می‌گردد. در شکل ۶ نمونه‌ای از این تصاویر در گام‌های زمانی ۰/۱ ثانیه نشان داده شده‌اند. سپس این تصاویر در toolbox برنامه Matlab و با استفاده از دستورات مربوط به زیربرنامه Image processing به صورت شکل ۷ پردازش می‌شوند. با استفاده از این تصاویر مقدار فرکانس گردابه‌ها ۱/۰۴ به دست می‌آید.

(الف)

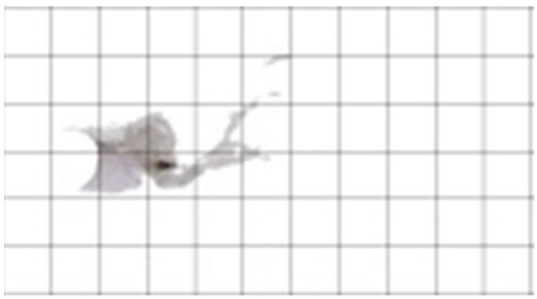


(ب)

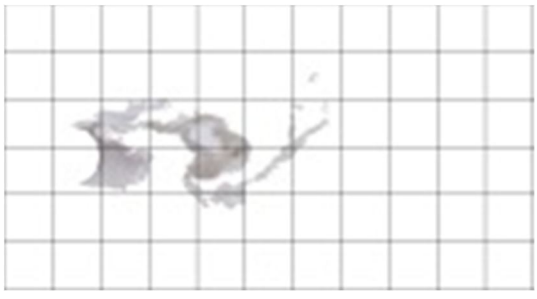


شکل ۶- شناسایی الگوی جریان با استفاده از تزریق ماده رنگی در لحظات (الف): t = 0.1 sec، (ب) t = 0.4 sec

(الف)



(ب)



شکل ۷- به دست آوردن طول گردابه ها با استفاده از تصاویر اسکیل شده در لحظات (الف): t = 0.1 sec، (ب) t = 0.4 sec

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

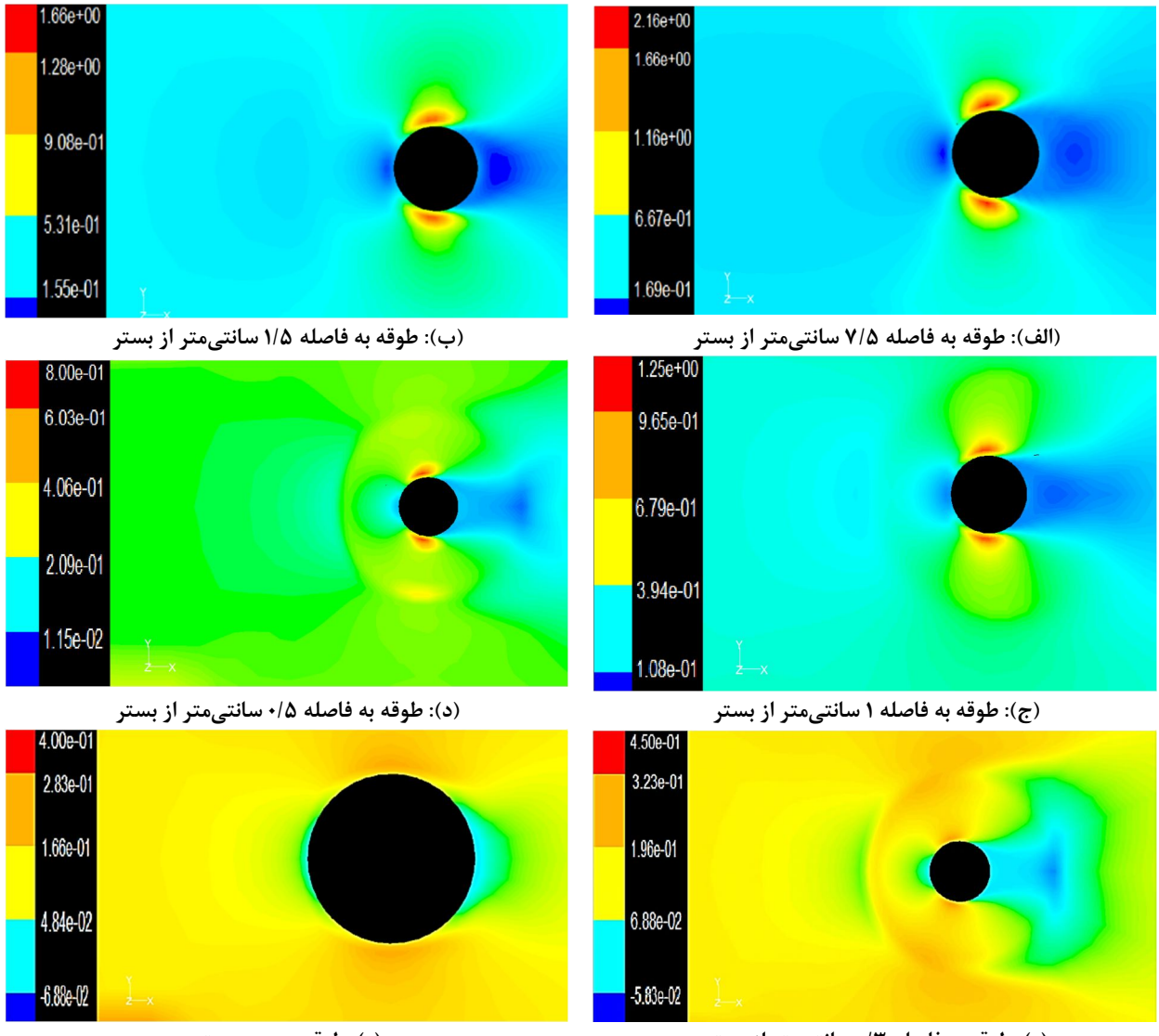
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

۴- بحث و نتایج

۴-۱- ارزیابی عملکرد طوقه در توزیع تنش برشی بستر

همان‌گونه که از شکل ۸ مشخص است، با نزدیک شدن طوقه به بستر الگوی توزیع تنش برشی در اطراف پایه، نسبت به پایه بدون محافظ تغییر می‌کند. بدین صورت که از مقدار تنش برشی ماکزیمم اطراف پایه کاسته شده، ضمناً تنش ماکزیمم در یک نقطه متمرکز نبوده و در محدوده‌ای به اندازه قطر طوقه در اطراف پایه پخش می‌شود. همچنین یکی از نتایج مهمی که می‌توان از مقایسه شکل‌های الگوی توزیع تنش برشی بستر به دست آورد، تاثیر ملموس در حالت طوقه‌های با فواصل کمتر از یک سانتی‌متر می‌باشد. یعنی در فواصل کمتر از یک سانتی‌متر الگوی توزیع تنش برشی بستر با شدت بیشتری از حالت پایه بدون محافظ فاصله می‌گیرد. برای طوقه‌های با فواصل ۷/۵ ، ۵ ، ۳/۵ و ۲/۵ سانتی‌متری حضور طوقه تاثیر قابل توجهی بر روی مقدار ماکزیمم تنش برشی بستر ندارد (درحدود ۳ الی ۱۰ درصد) ولی در طوقه با فاصله ۱ سانتی‌متری این تاثیر به حدود ۴۱٪ می‌رسد. این مقدار در حالت طوقه روی بستر به ۸۱٪ نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل‌های توزیع تنش برشی بر روی بستر برای فاصله‌های مختلف طوقه از بستر، مقدار ماکزیمم این کمیت در حالت‌های مختلف در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که D، قطر پایه، dfb، فاصله طوقه از بستر و τ_0، تنش برشی ماکزیمم پایه بدون محافظ می‌باشد. نتایج جدول ۲ به صورت نمودار شکل ۹ نیز ارائه شده است.



(الف): طوقه به فاصله ۷/۵ سانتی‌متر از بستر

(ب): طوقه به فاصله ۱/۵ سانتی‌متر از بستر

(ج): طوقه به فاصله ۱ سانتی‌متر از بستر

(د): طوقه به فاصله ۰/۵ سانتی‌متر از بستر

(ه): طوقه به فاصله ۰/۳ سانتی‌متر از بستر

(و): طوقه بر روی بستر

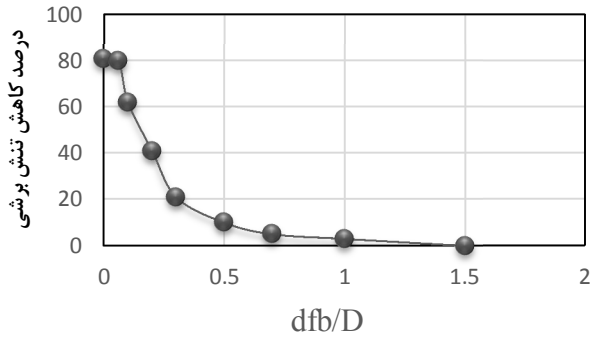
شکل ۸-توزیع تنش برشی بستر در حالت های مختلف طوقه با استفاده از حل مدل عددی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

جدول ۲- نتایج حاصل از مدل عددی برای میزان تاثیرگذاری حالت‌های مختلف طوقه بر روی تنش برشی بستر

dfb/D	۰	۰/۰۶	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۱	۱/۵
τ_{max}	۰/۴	۰/۴۲	۰/۸۱	۱/۲۵۷	۱/۶۶۳	۱/۸۹۸	۲/۰۲	۲/۰۵۵	۲/۱۵۹
τ_{max}/τ_0	۰/۱۹	۰/۲	۰/۳۸	۰/۵۹	۰/۷۹	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۷	۱/۰۲
میزان تاثیر طوقه(٪)	۸۱	۸۰	۶۲	۴۱	۲۱	۱۰	۵	۳	۰

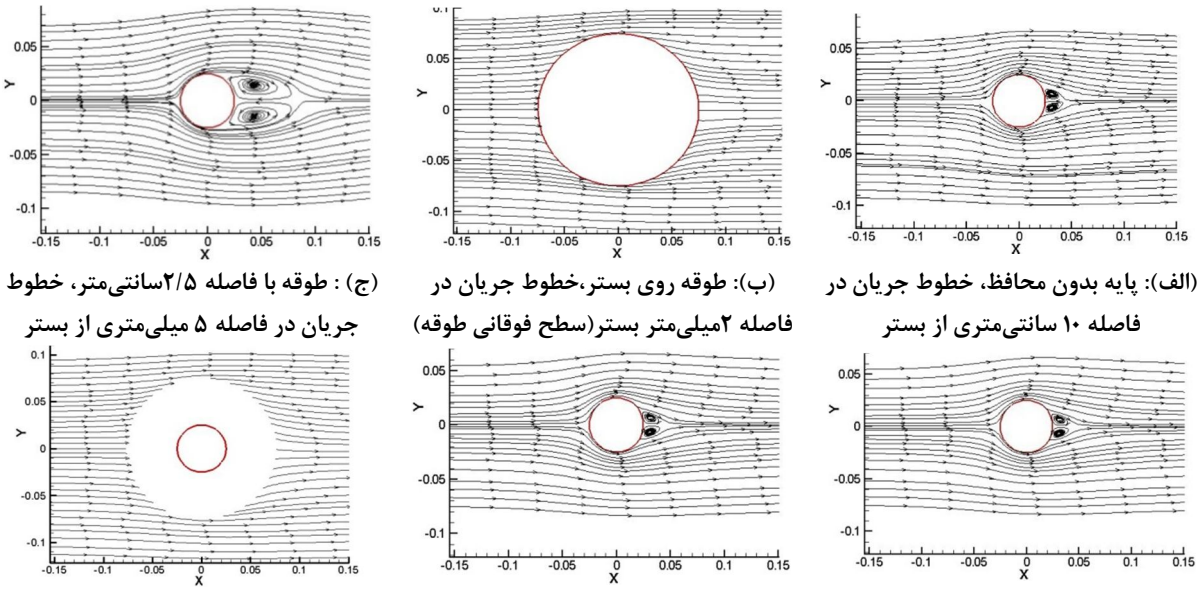


شکل ۹- کاهش تنش برشی بستر در حالت‌های مختلف فاصله طوقه از بستر

۴-۲- ارزیابی تاثیر طوقه بر الگوی جریان

فایل خروجی از FLUENT در محیط نرم افزار tecplot فراخوانی شده و خطوط جریان در ارتفاع‌های مختلف از بستر رسم می‌شوند. ارتفاع‌های انتخاب شده به گونه‌ای هستند که بتوان قضاوت درستی از عملکرد طوقه‌ها در تضعیف تشکیل و رشد گردابه‌های حول پایه انجام داد.

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با حرکت از سطح آزاد آب به سمت بستر، در فاصله سطح آزاد تا سطح فوقانی طوقه، الگوی تشکیل گردابه‌ها در تمامی حالات با شرایط پایه بدون محافظ مشابهت دارد. در مجاورت سطح فوقانی و همچنین سطح زیرین طوقه، جریان عبوری بدون تشکیل گردابه‌ای از روی طوقه جدا می‌شود. اما در زیر طوقه بسته به ارتفاع طوقه از بستر، روند شکل‌گیری گردابه‌ها در حالت‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. بدین صورت که در حالت‌هایی که فاصله طوقه از بستر کمتر از یک سانتی‌متر باشد، گردابه‌ای در زیر طوقه تشکیل نمی‌شود. و این همان دلیل کمتر بودن تنش برشی بستر می‌باشد. ولی با زیادتر شدن فاصله طوقه از بستر گردابه‌ها در زیر طوقه تشکیل شده و باعث افزایش تنش برشی بستر می‌شوند.



(الف): پایه بدون محافظ، خطوط جریان در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از بستر

(ب): طوقه روی بستر،خطوط جریان در فاصله ۲میلی‌متر بستر(سطح فوقانی طوقه)

(ج) : طوقه با فاصله ۲/۵سانتی‌متر، خطوط جریان در فاصله ۵ میلی‌متری از بستر

(د): طوقه‌های با فواصل ۵و۷/۵ سانتی‌متر، خطوط جریان در ۲سانتی‌متری بستر

(ه): همه حالات طوقه، خطوط جریان در فاصله ۱۰سانتی‌متری از بستر

(و): همه حالات طوقه، خطوط جریان در لبه تحتانی طوقه

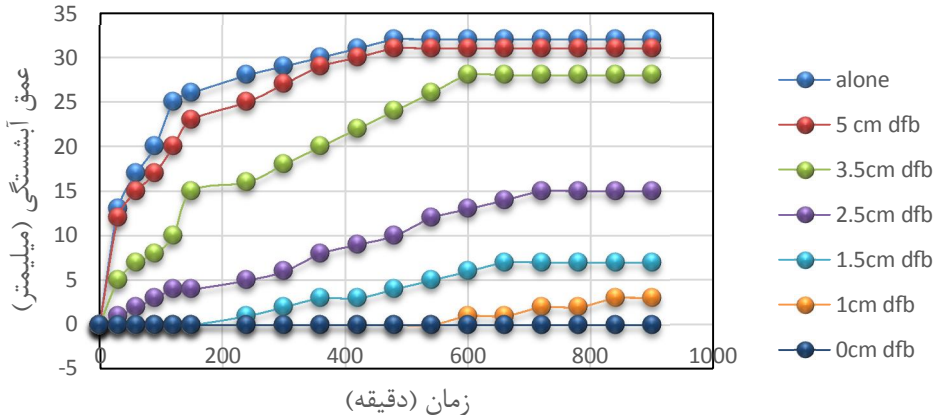
شکل ۱۰-خطوط جریان در موقعیت‌های مختلف طوقه و در فواصل مختلف از بستر (ابعاد بر حسب متر)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

۴-۳- نتایج حاصل از آزمایش های مدل فیزیکی

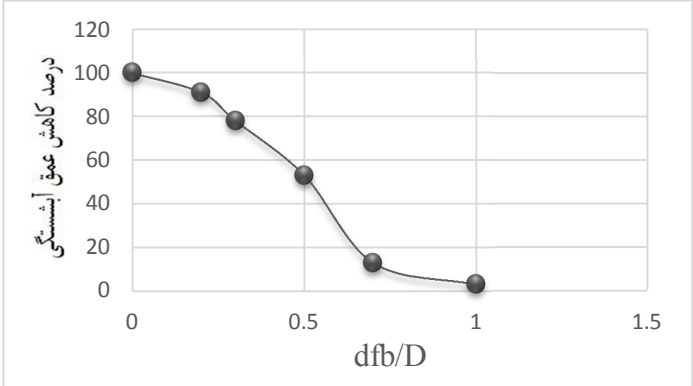
در این تحقیق، آزمایش اول برای به دست آوردن زمان لازم برای رسیدن به عمق آبشستگی تعادلی، در حالت پایه بدون محافظ، ۱۶ ساعت به طول انجامید. سپس با ترسیم منحنی تغییرات عمق آبشستگی نسبت به زمان، زمان تعادل از روی منحنی، به دست آمد. از ساعت هشتم به بعد ملاحظه شد که عمق آبشستگی جلوی پایه تغییر محسوسی نمی‌کند و از این ساعت به بعد عمق آبشستگی جلوی پایه در مقدار ۳۲ میلی‌متر ثابت می‌ماند. بنابراین مدت زمان ۸ ساعت به عنوان زمان رسیدن به عمق آبشستگی تعادلی در نظر گرفته شد. در حالت‌هایی که فاصله طوقه از بستر زیاد می‌باشد، رفتار پایه به رفتار پایه بدون محافظ نزدیک بوده،بخش اصلی آبشستگی در ساعات اولیه آزمایش رخ می‌دهد و عمق آبشستگی در همان ۸ ساعت به تعادل می‌رسد. با نزدیک شدن طوقه به بستر، رفتار پایه از حالت پایه بدون محافظ فاصله می‌گیرد. یعنی در ساعات اولیه آزمایش، آبشستگی محسوسی گزارش نمی‌شود و بدین علت زمان رسیدن به تعادل افزایش می‌یابد. یعنی زمان بیشتری لازم است تا عمق آبشستگی جلوی پایه به مقدار تعادلی خود برسد. در برخی از حالات با وجود گذشت ۸ ساعت از شروع آزمایش، هنوز در جلوی پایه آبشستگی اتفاق نیفتاده است. نتایج این آزمایش ها در نمودارهای شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین نتایج مربوط به تاثیر حضور طوقه ها در حالت های مختلف بر روی عمق آبشستگی تعادلی جلوی پایه در جدول ۳ و نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این جدول S_{eq} و S_{alone} به ترتیب عمق آبشستگی تعادلی برای حالات مختلف طوقه و عمق آبشستگی تعادلی در حالت پایه بدون محافظ می باشند.



شکل ۱۱- نمودار پیشرفت زمانی آبشستگی برای حالت‌های مختلف فاصله طوقه از بستر (dfb)

جدول ۳- میزان تاثیر طوقه در کاهش عمق آبشستگی تعادلی جلوی پایه برای حالت های مختلف فاصله طوقه از بستر

dfb(cm)	۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۱	۰
dfb/D	۱	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۲	۰
S_{eq}	۳۱	۲۸	۱۳	۷	۳	۰
S_{eq}/S_{alone}	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۰۹	۰
میزان تاثیر طوقه(٪)	۳	۱۳	۵۳	۷۸	۹۱	۱۰۰



شکل ۱۲- نمودار میزان تاثیر طوقه در کاهش عمق آبشستگی جلوی پایه برای حالت های مختلف فاصله طوقه از بستر (dfb)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]



(الف): پایه بدون محافظ

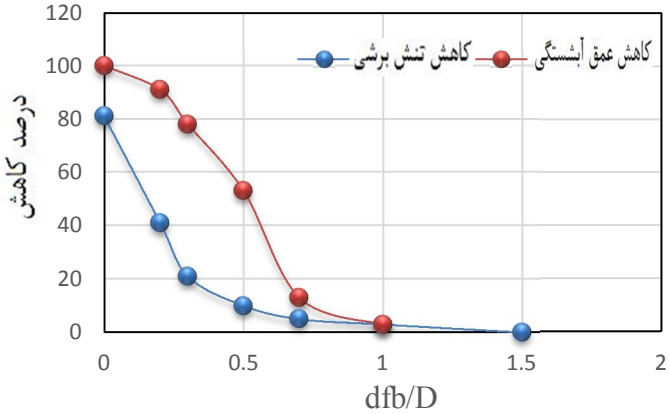
(ب): طوقه به فاصله ۵سانتی‌متر



(ج): طوقه به فاصله ۱/۵ سانتی‌متر

(د): طوقه به فاصله ۱ سانتی‌متر

شکل ۱۳- الگوی حفره آبشستگی تشکیل شده اطراف پایه



شکل ۱۴- درصد کاهش تنش برشی و عمق آبشستگی برای حالت‌های مختلف فاصله طوقه از بستر

پس از اتمام هر آزمایش تصاویری نظیر اشکال نشان داده شده در شکل ۱۳، به منظور مقایسه خطوط جریان با شکل حفره آبشستگی، فراهم شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود با نزدیکتر شدن طوقه به بستر، عمق آبشستگی در جلوی پایه کاهش می‌یابد. اما به دلیل اینکه در این حالات جدایش جریان از روی طوقه در فاصله کمی از بستر اتفاق می‌افتد، جریان جداشده از روی طوقه باعث ایجاد حفره‌های آبشستگی در پشت پایه و در طرفین آن می‌شود. به طوری که این حفره‌ها در حالت طوقه روی بستر بیشترین عمق را دارند، چون در این حالت جریان جداشده از روی طوقه دقیقا بر روی بستر جریان دارد و این حفره‌ها درست در طرفین طوقه و در نقطه جدایش جریان از روی طوقه تشکیل می‌شوند. در ضمن در پشت پایه هم به دلیل این جدایش جریان ناهمواری‌های متقارنی در طرفین کناری پایه مشاهده می‌شود. این ناهمواری‌ها بیشتر در طوقه‌های نزدیک بستر مشاهده شده و تا فاصله ۵۰ سانتی‌متری پایه در پایین دست پایه امتداد یافته‌اند. همچنین نتایج فوق تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از الگوی خطوط جریان اطراف پایه و نیز الگوی توزیع تنش برشی بستر حاصل از مدل عددی، دارند. شکل ۱۴ نیز نشان می دهد که کاهش تنش برشی ماکزیمم حول پایه، کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه را نتیجه خواهد داد.

۵- نتیجه‌گیری

از تحلیل مدل عددی تهیه شده بر پایه روش حجم محدود به وسیله نرم افزار FLUENT و همچنین انجام آزمایش های آبشستگی بر روی مدل فیزیکی، نتایج زیر به دست آمده است.

میزان کاهش تنش برشی بستر و نیز کاهش عمق آبشستگی جلوی پایه، در حالت‌های مختلف ارتفاع طوقه نسبت به بستر، به ترتیب در جداول ۲ و ۳ و اشکال ۹ و ۱۲ نشان داده شده است. داده‌های به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]

دست آمده بیان کننده این مطلب می‌باشد که با نزدیک شدن طوقه به بستر میزان تنش برشی و در نتیجه عمق آبشستگی جلوی پایه کاهش می یابد.

شکل ۱۴ همسو بودن رفتار تنش برشی ماکزیمم با عمق آبشستگی تعادلی در جلوی پایه را نشان می‌دهد. یعنی کاهش تنش برشی ماکزیمم حول پایه، کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه را نتیجه خواهد داد.

در ضمن مقایسه خطوط جریان برای حالات مختلف فاصله طوقه از بستر و همچنین شکل حفره آبشستگی حول پایه، تاثیر طوقه بر توزیع تنش برشی بستر و کاهش عمق آبشستگی را نشان می‌دهد.با توجه به اینکه در طوقه های با فاصله کمتر از یک سانتی متر نسبت به بستر، در زیر طوقه گردابه ای تشکیل نمی شود، در جلوی پایه آبشستگی رخ نمی دهد. اما با نزدیک شدن طوقه به بستر به دلیل اینکه جریان در فاصله کمی نسبت به بستر از روی طوقه جدا می شود، در پشت پایه و در نقاط جدایش جریان از روی پایه، افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش آبشستگی مشاهده می شود. به دلیل پرهزینه بودن انجام کارهای آزمایشگاهی می‌توان با مقایسه تنش برشی‌های به دست آمده از تحلیل‌های عددی، عمق آبشستگی تعادلی در حالات مختلف فاصله طوقه از بستر را پیش‌بینی نمود. بدین صورت که می‌توان تعدادی آزمایش انجام داد و برای بقیه حالات از مقایسه تنش برشی‌های به دست آمده از تحلیل‌های عددی، عمق آبشستگی را پیش‌بینی نمود. با توجه به نتایج به دست آمده، طوقه ها در کاهش تنش برشی بستر و در نتیجه آبشستگی جلوی پایه عملکرد مطلوبی از خود به نمایش گذاشته اند. با در نظر گرفتن مزیت های دیگری چون مصرف کم مصالح، راحتی نصب و... می توان گفت طوقه ها سازه های محافظی با عملکرد مطلوب و در عین حال اقتصادی در مقابل آبشستگی می باشند.

۶- مراجع

1- Haddorp, R., (2005), *Predictability of Scour at Large Pile due to Waves and Currents*, Diploma Thesis, Delft University of Technology.

2- Chiew, Y.M., (1992), *Scour protection at bridge piers,* Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No.9, pp.1260-1269.

3- Dargahi, B., (1990), *Controlling mechanism of local scouring*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.116, No.10, pp.1197-1214.

4- Kumar, V., Ranga Raju, K.G. and Vittal, N., (1999), *Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.125, No.12, pp.1302-1305.

5- Zarrati, A.M., Gholami, H. and Mashahir, M.B., (2004), *Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers*, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.42, No.1, pp.97-103.

6- Sumer, B.M. and Fredsøe, J., (2001), *Wave Scour around a Large Vertical Circular Cylinder,* Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.

7- Sumer, M., Hatipoglu, F. and Fredsøe, J., (2007), *Wave scour around a pile in sand, medium dense, and dense silt,* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.

8- Hansen, M.O.L., Johansen, N., Simon, J.M. and Danyluk, R., (2008), *Scour Prevention Devices for Large Offshore Wind Turbine Mono pile Foundations,* Creative Offshore Challenge 2008.

9- Zanke, U., Roland, A., and Diab, R., (2011), *Equilibrium scour depths around piles in noncohesive sediments under currents and waves,* Journal of Coastal Engineering, Vol.58, pp.986–991.

10- Sumer, B.M. and Fredsøe, J., (2006), *Hydrodynamics around cylindrical structures,* Advanced series on ocean engineering, Volume 26, Word Scientific.

11- Sumer B.M. and Fredsøe, J., (2002), *The mechanics of scour in the marine environment,* Advanced series on ocean engineering, Volume 17, Word Scientific.

12- Fredsøe, J. and Deigaard R., (1992), *Mechanics of coastal sediment transport,* Advanced series on ocean engineering, Volume 3, Word Scientific.

13- Fluent 6.3.26. User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, USA.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.3.8]