محافظت از خطوط لوله فراساحلی با اضافه نمودن یک تیغه‌ی طولی نفوذ ناپذیر به زیر لوله

علیرضا محمدی[۱] ، حبیب حکیم‌زاده[۲]*

[۱]کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند؛ a_mohammadi@sut.ac.ir
[۲]استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند؛ hakimzadeh@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
خطوط لوله فراساحلی
آبشستگی
تیغه طولی
مدل فیزیکی
مدل عددی

چکیده

در این مقاله به منظور کاهش آبشستگی در اطراف خطوط لوله فراساحلی، تعدادی آزمایش تجربی جهت بررسی تاثیر اضافه شدن یک تیغه‌ی طولی نفوذناپذیر به زیر لوله انجام شده است هدف از انجام این تحقیق، کاهش دادن گرادیان هیدرولیکی زیر لوله بوده است تا حدی که مقدار آن از گرادیان هیدرولیکی بحرانی فاصله گرفته و از اینرو وقوع آبشستگی را به تاخیر انداخته یا به کلی از آن جلوگیری کند. مدل‌های فیزیکی این مطالعه شامل سه لوله با قطر های متفاوت می‌باشند. هر کدام از لوله ها با شش عرض نسبی مختلف تیغه آزمایش شده اند. همچنین تعدادی شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار Flow 3D انجام پذیرفت که در آن شرایط مرزی یکسانی با مدلهای فیزیکی بکار برده شد. در هر دو بررسی تجربی و عددی ابتدا نمونه ی شاهد که همان لوله بدون حفاظ است مورد آزمایش قرار گرفته است. سپس تیغه‌ای در عرض‌های نسبی متفاوت ۰/۰۵، ۰/۱۰ ، ۰/۱۵ ، ۰/۲۰ ، ۰/۲۵ و ۰/۵۰ به لوله اضافه شده و عملکرد آن در مقابل آبشستگی مورد آزمایش و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصله از مدل فیزیکی و شبیه سازی عددی همخوانی مناسبی با یکدیگر داشتند و نشان دهنده کاهش چشمگیر آبشستگی در زیر لوله بعد از یک عرض نسبی مشخص تیغه مورد استفاده بوده است.

Protection of Offshore Pipelines with Adding a Longitudinal Blade beneath the Pipe

Alireza Mohammadi[1], Habib Hakimzadeh[2*]

[1]Msc. In Marine Structures, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology , a_mohammadi@sut.ac.ir
[2]Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, hakimzadeh@sut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 25 Feb. 2015
Accepted: 21 Feb. 2016

Keywords:
Offshore Pipelines
Scour
Longitudinal blade
Experimental model
Numerical model

ABSTRACT

A number of experiments have been carried out in the current paper to investigate the effect of adding a longitudinal impermeable blade beneath the offshore pipelines on decreasing the scour around them. The main aim of this study was to reduce the hydraulics gradient beneath the pipe so that its magnitude recedes from the critical hydraulics gradient and therefore delays the onset of scour phenomenon or stops its process at all. Three pipes of different diameters were selected for the physical models of this study. Each pipe was tested using six blades with different relative widths. Also, a series of numerical simulations have been done using Flow3D software in which the similar boundary conditions as used for the physical models were applied. In both experimental and numerical investigations the reference sample that was an unprotected pipeline was first tested. Then blades with different relative widths (e.g, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.50) were added to the beneath of the pipeline and their performances were tested and analyzed against scour. The experimental and numerical results were in good agreement and they indicate a remarkable reduction in scour depth when a blade with the distinctive relative width was sticked to the pipeline.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]

۱- مقدمه

نیاز روز افزون بشر به منابع انرژی از جمله سوخت‌های فسیلی سبب گسترش روز افزون صنایع فراساحلی گردیده است. از طرفی برای انتقال فراورده‌های سکوهای فراساحلی به خشکی نیاز به مکانیزمی ایمن و اقتصادی کاملاً محسوس می‌باشد. در مقایسه با روش‌های دیگر نظیر استفاده از تانکرها و نفتکش‌ها، استفاده از خطوط لوله مزایای فراوانی دارد که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود: الف- تاثیر اندک آلودگی زیست محیطی آن‌ها، ب- امکان استفاده در مناطق بسته ای که عبور نفتکش‌ها با مشکلاتی همراه است، پ- امنیت بالاتر آنها به دلیل قرار گیری در بستر دریا، ت- عدم قطع شدن عملیات پالایش به دلیل ورود حجم مشخصی از سیال به طور ثابت، ث- صرفه‌ی اقتصادی این خطوط نسبت به دیگر روش‌ها.

با توجه به مواردی که در بالا اشاره گردید، امروزه خطوط لوله‌ی فراساحلی به صورت گسترده‌ای برای انتقال منابع هیدروکربنی، آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود منابع نفتی در خلیج فارس و دریای خزر باعث پیشرفت روز افزون علوم ساخت و طراحی تأسیسات دریایی در کشور ما شده است. به‌علاوه مسائل مربوط به انتقال آب شیرین به جزایر خلیج فارس و کشورهای حاشیه‌ی جنوبی آن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

بررسی‌های دقیق انجام شده روی خطوط لوله‌ی در حال بهره‌برداری نشان می‌دهد که آبشستگی ایجاد شده در زیر آن‌ها تحت اثر جریان (جریان تنها یا حرکت رفت و برگشتی ناشی ازموج یا اثر همزمان این دو) پدیدار می‌شود. آبشستگی در زیر خطوط لوله باعث ایجاد حفره‌ای نسبتا بزرگ می‌گردد و در نتیجه‌ی آن، لوله از بستر جدا شده و طول آزاد لوله افزایش می‌یابد. در این حالت نیروهای هیدرودینامیکی که پیش از آن تاثیر چندانی روی لوله نداشتند به طور قابل توجهی لوله را تحت تاثیر قرار می‌دهند و گردابه‌های ایجاد شده باعث نوسان لوله و در نهایت سبب گسیختگی لوله تحت اثر خستگی می‌گردد.

با استناد به تحقیقات چیو در سال ۱۹۹۱ آبشستگی ناشی از جریان یک سویه، بحرانی‌تر از آبشستگی ناشی از جریان رفت و برگشتی است[۱]. در مناطق فراساحلی نیز عملاً موج بستر زیر لوله را حس نمی‌کند و از سوی دیگر رودخانه‌های طویلی که در کشور وجود دارند در بسیاری از موارد با شبکه‌های وسیع انتقال نفت خام، گاز طبیعی و آب و فاضلاب همراه شده‌اند. این موارد همگی اهمیت مطالعه‌ی آبشستگی یک سویه را بازگو می‌کنند.

تخریب لوله‌ها علاوه بر خسارات اقتصادی تاثیرات زیست محیطی سنگینی را بر طبیعت تحمیل می‌کند و از این رو محافظت این خطوط در برابر فرسایش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای محافظت این خطوط در برابر فرسایش روش‌هایی ارائه شده است که عبارتند از: الف- ایجاد ترانشه، ب- مهار بندی خطوط لوله، پ- پوشش این خطوط به صورت مصنوعی یا به واسطه افزایش پتانسیل دفن خود به خود.

از بین روش‌های مذکور، ایجاد ترانشه و مهاربندی این خطوط به بستر، کاری مشکل و هزینه‌بر می‌باشد در حالی که انجام عملیاتی روی لوله که آبشستگی را به تاخیر انداخته و یا پتانسیل دفن خود به خود لوله را افزایش دهد، بطور معمول آسانتر و اقتصادی‌تر خواهد بود.

در سال ۱۹۷۳ کجلدسن و همکارانش برای اولین بار به صورت آزمایشگاهی آبشستگی زیر خطوط لوله را مورد بررسی قرار دادند[۲]. در سال ۱۹۸۶، ابراهیم و نالری مدل کجلدسن را با دخالت دادن عمق جریان تصحیح کردند که حاصل تحقیقات آن‌ها توسعه‌ی دو معادله برای شرایط آب زلال و بستر فعال بود[۳]. مونکادا و آگوییره در سال ۱۹۹۹ این آزمایش را گسترش داده و علاوه بر عمق حفره‌ی آبشستگی طول آن را نیز مورد بررسی قرار دادند[۴]. در سال ۲۰۰۵ یک بررسی جامع از مدل‌سازی عددی جریان و آبشستگی در اطراف خطوط لوله ناشی از جریان توسط لیانگ و چنگ انجام گرفته است. این پژوهشگران برای شبیه سازی آشفتگی جریان در مدل هیدرودینامیک از مدل‌سازی های متوسط زمانی و مکانی استفاده نمودند و برای محاسبه بار رسوب هر دو صورت انتقال بار بستر و معلق را در شبیه‌سازی لحاظ نمودند [۵ و ۶]. در سال ۲۰۰۸ نیز دی و سینگ با در نظر گرفتن عدد فرود به عنوان یکی از عوامل موثر، تحقیقاتی در حالت آب زلال انجام دادند [۷]. در سال ۲۰۰۹، لیانگ چنگ و همکارانش مطالعاتی برای محاسبه پروفیل آبشستگی انجام دادند. این تحقیقات در دو مورد توسعه‌ی یک مدل فیزیکی برای توضیح آبشستگی سه بعدی و ارائه‌ی مدلی برای پیش بینی روند آبشستگی انجام شد[۸]. در سال ۲۰۱۱ محققی به نام یازا به بررسی عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله دریایی تحت اثر موج پرداخت[۹]. در سال ۲۰۱۲، یانگ و همکارانش روشی به کار بردند که توانست سرعت آبشستگی را در حد چشم‌گیری کاهش دهد. آنها با اضافه نمودن یک ورق شکل پذیر در زیر لوله مقدار گرادیان هیدرولیکی در بالا دست و پایین دست لوله را کاهش داده و موفق به مهار نسبی آبشستگی شدند [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ هنگ جون با شبیه‌سازی عددی به بررسی جریان و آبشستگی ناشی از جریان در اطراف لوله‌ای با تیغه اضافه شده بر روی آن پرداخت [۱۱]. چنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ تحقیقات خود را با اعمال اثر همزمان موج و جریان تکمیل نمودند. آنها دریافتند که روند آبشستگی موج تنها با افزایش عدد کولگان- کارپنتر (KC) و پارامتر شیلدز افزایش و با افزایش عمق دفن شدگی کاهش می‌یابد[۱۲].

در تحقیق حاضر سعی بر این بوده است که بطور تجربی و عددی،

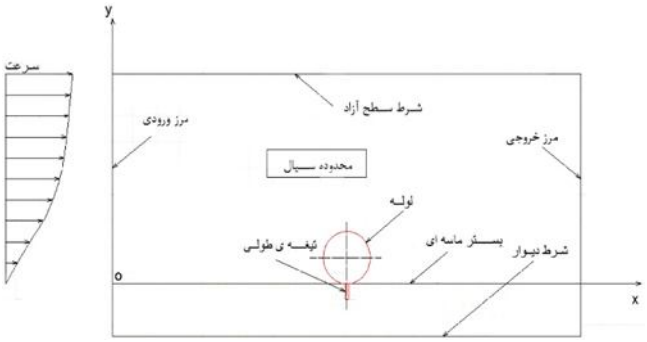
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]

با الصاق یک تیغه‌ی طولی نفوذناپذیر در زیر خط لوله، گرادیان هیدرولیکی و نیز نیروی تراوش کاهش یافته و به تبع آن توانایی حفره‌زایی نیز کاهش یابد و بدین ترتیب شروع پدیده آبشستگی به تاخیر افتاده و یا انجام نشود.

۲- مدل آزمایشگاهی

به طور عموم هدف از انجام مطالعات آزمایشگاهی در این نوع تحقیقات، بررسی دقیق فیزیک پدیده و ابعاد پروفیل آبشستگی می‌باشد. در این مطالعه بر روی سه لوله با قطرهای متفاوت آزمایشات آبشستگی در یک فلوم آزمایشگاهی تحقیقات هیدرولیک انجام گرفته است. شکل ۱ شمای کلی چیدمان را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح شماتیک مساله مورد بررسی در این پژوهش

۲-۱- کانال آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشات این پژوهش، از یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۲متر، عرض۱/۰۲متر، عمق ۰/۸ متر و شیب بسترصفر درجه استفاده شده است. دیواره و کف کانال آزمایشگاهی از شیشه سکوریت با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده به گونه‌ای که آب داخل آن قابل رؤیت بوده است. شکل ۲ تصویری از کانال آزمایشگاهی مورد نظر را نشان می‌دهد. یک دستگاه پمپ، آب را از مخازن موجود در پایین دست کانال گرفته و آن را به قسمت بالادست و ورودی کانال می‌رساند. همچنین جهت ملایم‌سازی جریان آب از تلاطم‌گیر توری به همراه بلوک‌های بتونی که در قسمت ورودی کانال قرار داده شده، استفاده گردیده است.

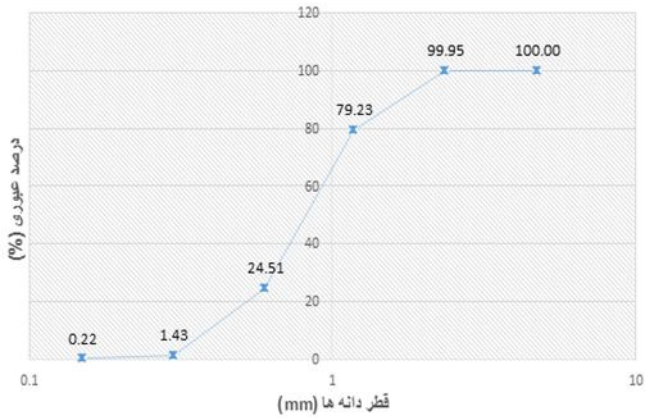


شکل ۲- کانال آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش

همچنین برای ملایم کردن جریان آب با الهام گرفتن از کانال آزمایشگاهی ژنگ و همکاران[۱۰] در بالادست و پایین دست بخش اصلی آزمایش جهت جلوگیری از تغییرات ناگهانی عمق جریان از سکوهای شیشه‌ای سکوریت به طول ۲ متر و عرض ۱/۰۲ متر و ضخامت ۱سانتی‌متر استفاده شده است.

۲-۲- مشخصات رسوبات

مصالح بستر شامل ماسه غیرچسبنده‌ای است که اندازه میانگین ذرات ۰/۷۸ میلی‌متر و چگالی نسبی دانه‌ها ۲/۶۵ می‌باشد. براساس نظر بروسرز و رودکیوی در صورتی که اندازه میانگین ذرات بزرگتر از ۰/۷ میلی‌متر باشد در بستر ناهمواری و موجک ایجاد نمی‌شود. همچنین برای ممانعت از قفل و بست دانه‌ها به یکدیگر، انحراف معیار هندسی آنها نزدیک به مقدار یک و برابر ۱/۳ انتخاب شده است. نمودار دانه‌بندی مصالح بستر در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی مصالح بستر

محفظه حاوی رسوب (محل آزمایش) در فاصله ۴ متری از بالادست کانال قرار داشته و به طول ۱/۸ متر و عمق ۱۵ سانتی متر بوده است. دانستن شرایط هیدرولیکی در زمانی که ذرات رسوب شروع به حرکت می‌کنند، در بررسی آبشستگی آب زلال بسیار حائز اهمیت است. مقادیر پارامترهای آستانه حرکت مصالح بستر بر اساس دیدگاه تنش برشی بحرانی و با استفاده از دیاگرام شیلدز مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس پارامتر شیلدز بحرانی که نماینده بی‌بعدی از تنش برشی است برابر با مقدار ۰/۰۳ محاسبه شد.

۲-۳- مشخصات جریان

در مورد همه آزمایش ها عمق جریان برابر ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا بتواند ضابطه‌ی مربوط به عمق آب را در مورد تمامی لوله‌های مورد آزمایش که بصورت $۱/۷۲ \leq y/D \leq ۷/۶۹$ تعریف شده، برقرار نماید. عمق جریان آب با استفاده از سرریز انتهای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]

کانال تنظیم و از روی نوارهای مدرجی که در کناره های بخش مورد آزمایش چسبانده شده بود، کنترل می‌شد. همچنین برای حصول به حداکثر عمق آبشستگی در شرایط آب زلال، تمامی آزمایش‌ها تحت شدت جریان ۹۰٪ انجام شده است.

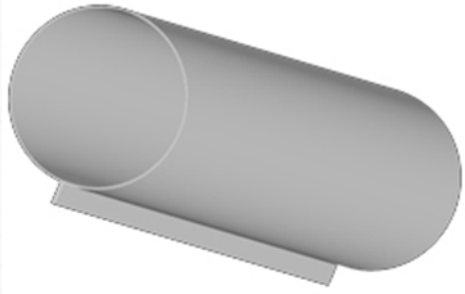
جدول ۱ مشخصات جریان بطور خلاصه آورده شده است. عمق جریان آب با استفاده از سرریز انتهای کانال تنظیم و از روی نوارهای مدرجی که در کناره های بخش مورد آزمایش چسبانده شده بود، کنترل می‌شد. همچنین برای حصول به حداکثر عمق آبشستگی در شرایط آب زلال، تمامی آزمایش‌ها تحت شدت جریان ۹۰٪ انجام شده است.

جدول ۱- مشخصات جریان مورد استفاده در آزمایشها

شدت جریان	دبی(لیتر بر ثانیه)	سرعت متوسط (متر بر ثانیه)	عمق جریان (سانتی متر)	عدد فرود جریان کانال
٪۹۰	۴۰/۵	۰/۲۶۲	۱۵	۰/۲۱۷

۲-۴- مشخصات مدل‌ها

مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل ۳ لوله با قطرهای متفاوت به عنوان نمونه‌های شاهد و برای هر کدام از آنها ۷ عرض مختلف تیغه در نظر گرفته شده بود که در مجموع ۲۱ آزمایش انجام گرفته است. دو هدف عمده از این بررسی مد نظر بوده است که عبارت بودند از: الف-تاثیر تیغه طولی زیر لوله در فرآیند آبشستگی، ب- یافتن عرض بهینه‌ی تیغه. بنابراین در هر مورد آزمایشی، ابعاد حفره‌ی آبشستگی و توپوگرافی بستر اندازه‌گیری و با نمونه‌های شاهد متناظر مقایسه می‌شدند. عرض نسبی تیغه‌ها (عرض تیغه به قطر لوله) برای هر کدام از لوله ها به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۰/۱۰ ، ۰/۱۵ ، ۰/۲۰ ، ۰/۲۵ و ۰/۵۰ در نظر گرفته شده است. نقشه‌های مدل‌های مورد آزمایش ابتدا در نرم افزار *AutoCAD* ترسیم گردید و برای ساخت آن‌ها از دستگاه لیزر با دقت ۰/۱ میلی‌متر کمک گرفته شد. سپس تیغه‌ی بریده شده توسط لیزر بوسیله‌ی چسب *PVC* به لوله‌ها متصل گردید. جنس تیغه‌ی زیرین به گونه‌ای انتخاب شد که با جنس لوله همخوانی کاملی داشته باشد تا گویای شرایط واقعی نمونه‌های اصلی باشد. در شکل ۴ شمای کلی نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۴- شمای کلی محل قرارگیری تیغه‌ی زیرین

۲-۵- روش انجام آزمایشها

در حالت عمومی روش انجام آزمایش‌ها به شکل زیر بوده است: در ابتدا دریچه‌ی انتهایی به طور کامل بسته و سپس آب به صورت کاملا آرام از دو جهت وارد کانال می‌گردید (آب مصرفی در تمامی آزمایش‌ها، آب شیر بوده است). دبی جریان‌های ورودی ابتدایی و انتهایی به گونه‌ای تنظیم شده بود که هر دو با یک سرعت کانال را پر نموده و از شسته شدن ماسه‌ها جلوگیری گردد. پس از رسیدن آب به ارتفاع مورد نظر جریان ورودی از پایین دست قطع می شود. برای ثابت نگه داشتن لوله و حذف اثرات ارتعاشات ناشی از جریان، طرفین لوله توسط چسب به دیواره محکم شده بود. پس از قرارگیری لوله و رسیدن عمق آب به تراز مورد نظر، با تنظیم دبی جریان و دریچه‌ی انتهایی سرعت مورد نظر در کانال پیاده‌سازی شد. با توجه به سرعت آب در کانال و حضور لوله در مسیر جریان پس از گذشت زمانی اندک مخلوطی از ماسه و آب از زیر لوله به بیرون پرتاب می‌شود (شکل ۵). در ادامه‌ی آن فرسایش نسبتا زیادی در زیر لوله رخ داده و گودال نسبتا بزرگی در زیر لوله شکل می‌گیرد. همزمان با تشکیل این گودال تلی از ماسه در پایین دست لوله ایجاد می شود. سرانجام پس از گذشت زمانی نه چندان کوتاه (۸ ساعت برای هر آزمایش) آبشستگی به مرحله‌ی تعادل نسبی خود رسیده و تغییر محسوسی در ابعاد پروفیل آبشستگی مشاهده نمی‌شود. در این مرحله از آزمایش زمان ثبت نتایج فرا رسیده و ابعاد این حفره توسط عمق‌سنج و خط‌کش‌هایی که بر روی جداره-ی کانال نصب گردیده بودند در جهت‌های افقی و قائم برداشت می‌گردید. برداشت‌ها با فاصله‌ی یک سانتی‌متر از یکدیگر انجام گردیدند (در نقاطی که تغییرات زیاد بوده است این فاصله به نصف و کمتر نیز کاهش یافت).



شکل ۵- لحظه‌ی خروج رسوبات از زیر لوله و شروع آبشستگی

در پایان هر آزمایش ابتدا دریچه‌ی انتهایی به صورت کامل بسته شده و سپس پمپ خاموش می‌شود تا تحت اثر کاهش عمق و افزایش سرعت ماسه‌ها شسته نشوند. پس از پایان هر آزمایش سطح تغییر یافته ی ماسه‌ها توسط یک ماله‌ی فلزی صاف شده و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]

مقداری از آنها جهت آزمایش مجدد دانه‌بندی برداشت می‌گردد. پس از انجام آزمایش دانه‌بندی در صورت تغییر در دانه‌بندی اصلاح مربوطه اعمال شده و آزمایش بعدی شروع می‌گردد. این مرحله تنها به جهت بالا بردن دقت آزمایش انجام گردید و در تمامی موارد به دلیل شسته شدن مصالح ریز منحنی دانه‌بندی کمی به سمت راست متمایل شده بود که قبل از شروع آزمایش بعدی با اضافه نمودن مقدار محاسبه شده‌ای از مقادیر دانه‌ها، منحنی دانه‌بندی اصلاح گردید.

۲-۶- نتایج آزمایشگاهی

با توجه به این که یکی از اهداف این بررسی یافتن عرض حدی برای تیغه و بررسی ابعاد حفره‌ی آبشستگی در عرض‌های کمتر از عرض حدی بوده است، از اینرو در ابتدا به بررسی عرض حدی پرداخته و نتایج مربوط به آن ارائه می‌گردد.

۲-۷- نتایج مربوط به لوله با قطر ۳/۱ سانتیمتر

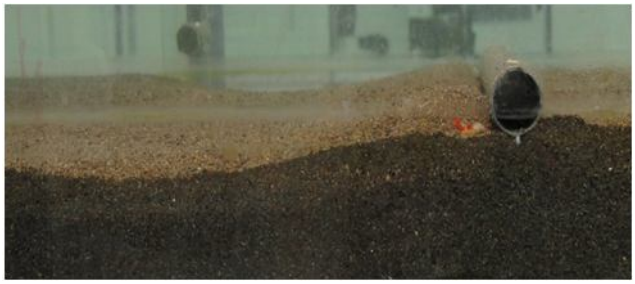
پس از انجام آزمایشات مربوط به نمونه شاهد هر گروه، انتخاب عرض نسبی تیغه‌ها به ترتیب از کوچک‌ترین مقدار (۰/۰۵) شروع شده و در ادامه تیغه‌های با عرض نسبی بیشتر مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایشات گروه نخست با ثابت بودن اعداد فرود و شیلدز، با در نظر گرفتن قطر لوله مورد آزمایش این گروه برای عدد رینولدز جریان اطراف لوله حدود ۸۰۰۰ انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش عرض نسبی تیغه‌ها تا مقدار حدی ۰/۲، فرآیند آبشستگی در زیر لوله ادامه یافته ولی در مقدار حدی مذکور متوقف می‌شود و برای عرض‌های نسبی بیشتر از مقدار حدی نیز، همان رفتار مربوط به مقدار حدی تکرار می‌شود. به عبارت دیگر، در عرض تیغه‌های کمتر از مقدار حدی مصالح زیر لوله در اثر نیروهای وارده از طرف آب شسته شدند ولی پس از آن روند آبشستگی متوقف شده و پروفیل‌های عرضی یکسانی برای نسبت‌های بالاتر حاصل می‌شود. از اینرو در ادامه تنها نتایجی ارائه می‌گردد که عرض نسبی تیغه در آن‌ها کمتر از ۰/۲ بوده است. همچنین تصاویر برداشت شده در انتهای هر آزمایش برای عرض‌های نسبی مختلف تیغه‌ها در شکلهای ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده اند.



شکل ۶- تصویر مربوط به نمونه شاهد برای لوله ۳/۱ سانتی‌متر



شکل۷- تصویر مربوط به عرض نسبی ۰/۱۵ تیغه در لوله ۳/۱ سانتی‌متر

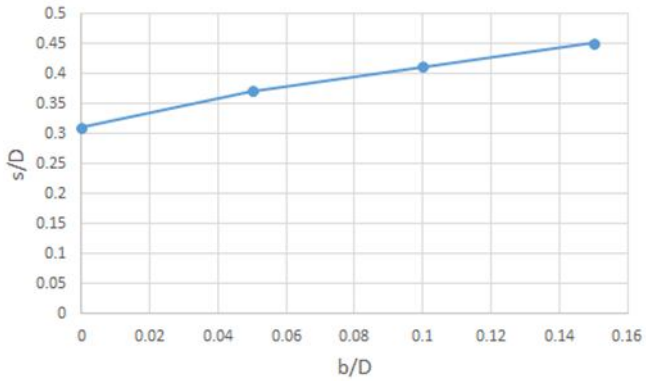


شکل ۸- تصویر مربوط به عرض نسبی ۰/۲ تیغه در لوله ۳/۱ سانتی‌متر

با بررسی این تصاویر مشاهده می شود که عمق آبشستگی در مورد لوله‌ی ترکیب شده با تیغه به عرض نسبی ۰/۱۵ نسبت به نمونه شاهد این گروه افزایش یافته و در زیر لوله‌ی مجهز به تیغه با عرض نسبی ۰/۲ هیچگونه آبشستگی بوجود نیامده است.

۲-۷-۱- عمق آبشستگی در زیر لوله

نتایج مربوط به این گروه از داده‌ها که شامل مقایسه‌ی حالت لوله‌ی بدون تیغه با شرایط عرض‌های نسبی کمتر از مقدار حدی است، در شکل ۹ ارائه شده‌اند.

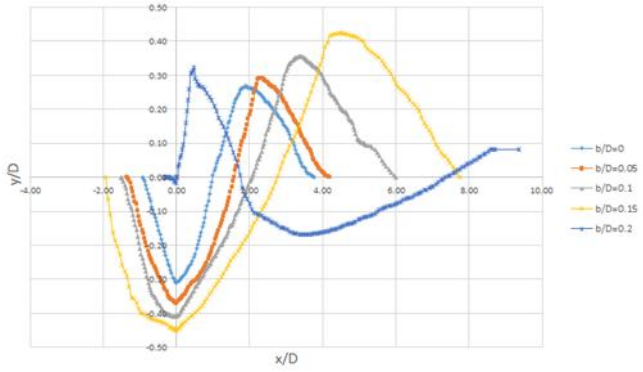


شکل ۹- تغییرات عمق نسبی آبشستگی در مقابل عرض نسبی تیغه برای لوله با قطر ۳/۱ سانتی‌متر

در ادامه پروفیل عرضی آبشستگی با توجه به برداشت‌هایی که پیش از این بدانها اشاره شد، ترسیم گردیده و به صورت شکل ۱۰ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]



شکل ۱۰- پروفیل نهائی آبشستگی در عرض‌های نسبی مختلف تیغه برای لوله با قطر ۳/۱ سانتی‌متر

از روی نتایج شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که دراین حالت با افزایش عرض تیغه‌ی زیرین عمق آبشستگی تا مرحله‌ای افزایش یافته است که عرض مورد نظر به مقدار حدی خود یعنی ۰/۲ قطر لوله برسد. تحلیل نتایج این حالت و درصد تغییرات حاصل نسبت به نمونه‌ی شاهد در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- حداکثر عمق آبشستگی و تغییرات نسبت به نمونه‌ی شاهد

ردیف	عرض نسبی	عمق آبشستگی(cm)	درصد تغییرات
۱	۰	۰/۹	۰
۲	۰/۰۵	۱/۱	۱۹/۳۵
۳	۰/۱۰	۱/۲	۳۲/۲۵
۴	۰/۱۵	۱/۳	۴۵/۱۶
۵*	۰/۲۰	۲۹	-
۶*	۰/۲۵	۲۹	-
۷*	۰/۵۰	۲۹	-

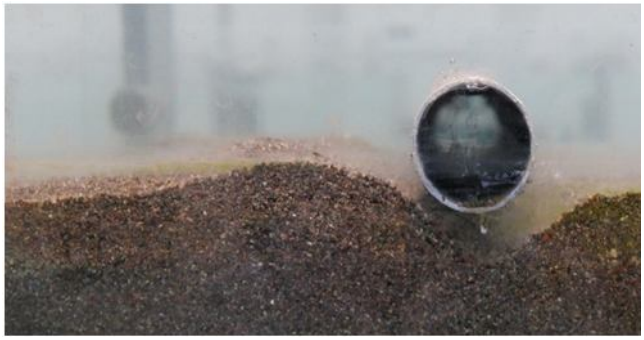
*در این موارد به دلیل عدم وقوع آبشستگی طول تاثیر لوله در پایین دست ارائه می‌گردد.

۲-۸- نتایج مربوط به لوله با قطر ۴ سانتیمتر

آزمایشات گروه دوم بار دیگر با ثابت بودن اعداد فرود و شیلدز، با در نظر گرفتن قطر لوله مورد آزمایش این گروه برای عدد رینولدز جریان اطراف لوله حدود ۱۰۰۰۰ انجام گرفت. تصاویر برداشت شده در انتهای هر آزمایش برای عرض‌های نسبی مختلف تیغه‌ها در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌اند. بار دیگر با بررسی این تصاویر ملاحظه می‌شود که عمق آبشستگی در مورد لوله‌ی ترکیب شده با تیغه به عرض نسبی ۰/۱۵ نسبت به نمونه شاهد این گروه افزایش یافته و در زیر لوله مجهز به تیغه با عرض نسبی ۰/۲ هیچگونه آبشستگی حاصل نشده است.



شکل ۱۱- تصویر مربوط به نمونه شاهد برای لوله ۴ سانتی‌متر



شکل۱۲- تصویر مربوط به عرض نسبی ۰/۱۵ تیغه در لوله ۴ سانتی‌متر



شکل ۱۳- تصویر مربوط به عرض نسبی ۰/۲ تیغه در لوله ۴ سانتی‌متر

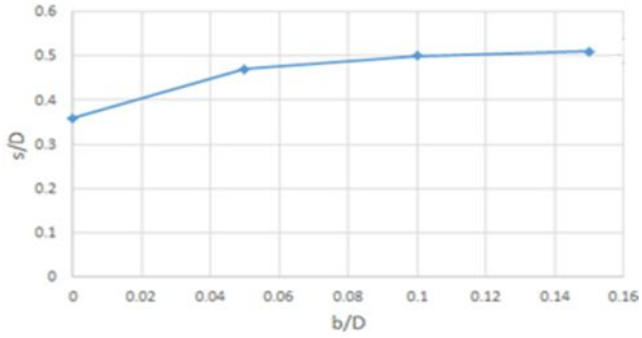
برای این گروه لوله نیز همان آزمایش‌های گروه نخست تکرار شده و نتایج به صورت زیر ارائه می‌گردند.

۲-۸-۱-عمق آبشستگی در زیر لوله

نتایج مربوط به این گروه از داده‌ها نیز که شامل مقایسه‌ی نمونه شاهد این گروه با حالت‌های تیغه‌دار با عرض‌های نسبی کمتر از مقدار حدی است، در شکل ۹ ارائه شده‌اند.

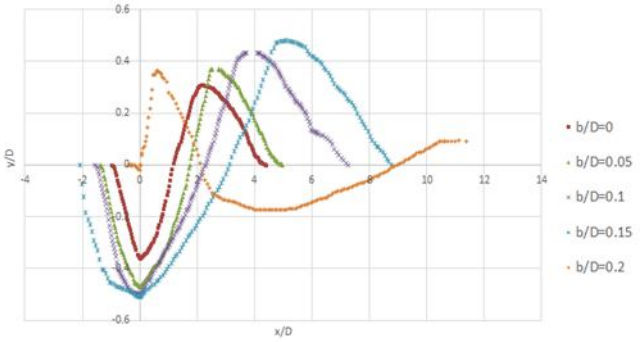
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]



شکل ۱۴- تغییرات عمق نسبی آبشستگی در مقابل عرض نسبی تیغه برای قطر لوله ۴ سانتی‌متر

نتایج پروفیل‌های عرضی برداشت شده از این گروه نیز برای عرض-های نسبی متفاوت تیغه‌ها به صورت گرافیکی در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۵- پروفیل عرضی آبشستگی در عرض‌های نسبی مختلف تیغه برای قطر لوله ۴ سانتی‌متر

با بررسی نمودارهای شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که نتایج این گروه آزمایشی شباهت‌های بسیاری با نتایج متناظر گروه نخست داشته و در آنها در مورد لوله تیغه‌دار با عرض نسبی ۰/۲، جریان توانائی شستن مصالح را نداشته و رسوبات از پایین دست به سمت لوله حرکت می‌کنند. عمق نهایی آبشستگی و مقایسه‌ی آن با نمونه شاهد این گروه نیز به صورت جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳- حداکثر عمق آبشستگی و تغییرات نسبت به نمونه‌ی شاهد

ردیف	عرض نسبی	عمق آبشستگی(*cm*)	درصد تغییرات
۱	۰	۱/۴	۰
۲	۰/۰۵	۱/۸	۳۰/۵۵
۳	۰/۱۰	۲	۳۸/۸۸
۴	۰/۱۵	۲	۴۱/۶۶
۵*	۰/۲۰	۴۴/۵	-
۶*	۰/۲۵	۴۴/۵	-
۷*	۰/۵۰	۴۴/۵	-

*در این موارد به دلیل عدم وقوع آبشستگی طول تاثیر لوله در پایین دست ارائه می‌گردد.

۲-۹- نتایج مربوط به لوله با قطر ۴/۹۵ سانتیمتر

سرانجام آزمایشات گروه سوم با ثابت ماندن اعداد فرود و شیلدز و با در نظر گرفتن قطر لوله مورد آزمایش این گروه برای عدد رینولدز جریان اطراف لوله حدود ۱۳۰۰۰ انجام گرفت. برای این گروه لوله نیز، آزمایشات مشابه گروه‌های نخست و دوم تکرار شده و نتایج آنها به شکل زیر ارائه شده‌اند. همچنین تصاویر برداشت شده در انتهای هر آزمایش برای عرض‌های نسبی مختلف تیغه‌ها در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده‌اند.



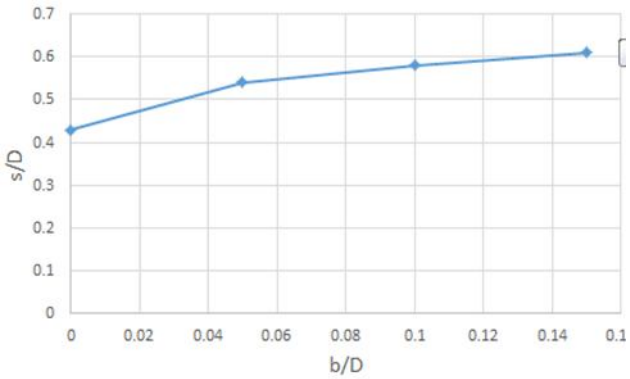
شکل ۱۶- تصویر مربوط به عرض نسبی ۰/۱۵ تیغه در لوله ۴/۹۵ سانتی‌متر



شکل۱۷- تصویر مربوط به عرض نسبی ۰/۲ تیغه در لوله ۴/۹۵ سانتیمتر

۲-۹-۱- عمق آبشستگی در زیر لوله

نتایج مربوط به این گروه داده ها نیز که شامل مقایسه‌ی نمونه شاهد این گروه با حالت‌های تیغه‌دار با عرض‌های نسبی کمتر از مقدار حدی ۰/۲ است، در شکل ۹ ارائه شده‌اند.

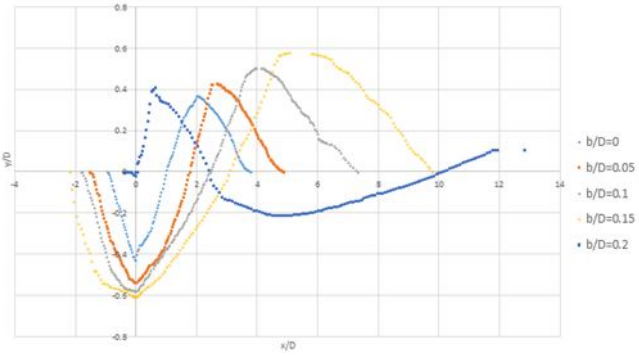


شکل ۱۸- تغییرات عمق نسبی آبشستگی در مقابل عرض نسبی تیغه برای قطر لوله ۴/۹۵ سانتی‌متر

نتایج عددی برداشت‌های انجام شده در مورد پروفیل‌های عرضی در حالات مختلف نیز به صورت گرافیکی در شکل ۱۹ ارائه گردیده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]



شکل۱۹- پروفیل عرضی آبشستگی در عرض‌های نسبی مختلف تیغه برای قطر لوله ۴/۹۵ سانتی‌متر.

عمق نهایی آبشستگی و مقایسه‌ی آن با نمونه شاهد این گروه نیز به صورت جدول ۴ محاسبه گردیده است.

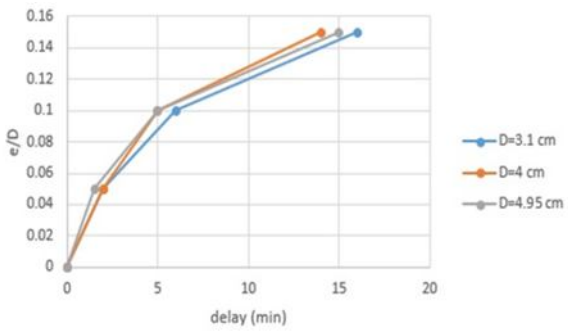
جدول ۴- حداکثر عمق آبشستگی و تغییرات نسبت به نمونه‌ی شاهد

ردیف	عرض نسبی	عمق آبشستگی(*cm*)	درصد تغییرات
۱	۰	۲/۱	۰
۲	۰/۰۵	۲/۶	۳۰/۵۵
۳	۰/۱۰	۲/۸	۳۸/۸۸
۴	۰/۱۵	۳	۴۱/۶۶
۵*	۰/۲۰	۶۳/۵	-
۶*	۰/۲۵	۶۳/۵	-
۷*	۰/۵۰	۶۳/۵	-

*در این موارد به دلیل عدم وقوع آبشستگی طول تاثیر لوله در پایین دست ارائه می‌گردد.

۲-۱۰- نتایج تاخیر شروع آبشستگی

در عرض‌های تیغه‌ی کمتر از حالت حدی، شروع آبشستگی با اندکی تاخیر انجام می‌یابد. حداکثر تاخیر مربوط به تیغه‌ی با عرض نسبی ۰/۱۵ در مورد لوله گروه نخست می باشد و مقدار آن ۱۶ دقیقه حاصل شده است. نتایج نشان دهنده‌ی تاخیر ایجاد شده در شروع فرآیند آبشستگی در شکل ۲۰ ارائه شده است.



شکل ۲۰- نتایج نمونه‌های مختلف برای تاخیر در شروع آبشستگی

۲-۱۱- مقایسه حداکثر مقدار آبشستگی در زیر لوله با روابط تجربی دیگران

در این قسمت مقادیر عددی بدست آمده از آزمایشات با مقادیر محاسبه شده از روابط سایر محققین مقایسه و به صورت جدول ۵ ارائه می‌گردد.

جدول ۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج سایر محققین[۱۳].

قطر لوله و حداکثر مقدار آبشستگی آزمایشگاهی (cm)	نام محققین	مقدار محاسبه شده (cm)	درصد اختلاف با مدل آزمایشگاهی
۳/۱ (۰/۹)	Kjeldson et al.	۰/۶۷۳	۲۵
	Bijker and leeuwestein	۱/۱۲	-۲۴
	Macada and Aguirre	۰/۹۰۱	-۰/۱۱
	Mousavi et al.	۱/۰۲	-۱۳
۴ (۱/۴)	Kjeldson et al.	۱/۳۷	۲/۱۴
	Bijker and leeuwestein	۱/۷۹	-۲۷
	Macada and Aguirre	۱/۵۴	-۱۰
	Mousavi et al.	۱/۳۱	۶
۴/۹۵ (۲/۱)	Kjeldson et al.	۱/۸۵	۱۱/۹
	Bijker and leeuwestein	۲/۷	-۲۸
	Macada and Aguirre	۲/۲۲	-۴/۷۶
	Mousavi et al.	۲/۶	-۲۳/۸

از روی مقایسه نتایج آزمایشات این تحقیق با روابط تجربی سایر پژوهشگران در جدول ۵ مشاهده می‌شود که قدر مطلق میانگین اختلافات برای لوله‌های با قطر ۳/۱ ، ۴ و ۴/۹۵ سانتی‌متر به ترتیب ۱۵/۵۲ ، ۱۱/۲۸ و ۱۷/۱۱ درصد می‌باشد که می‌تواند مقدار قابل قبولی محسوب گردد.

۳- نتایج عددی

شبیه سازی عددی صورت گرفته در این تحقیق با استفاده از نرم افزار محاسباتی FLOW-3D بوده است. این نرم افزار یکی از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]

مدل‌های عددی توانمند در زمینه‌ی دینامیک سیالات محسوب می‌شود که توسعه و پشتیبانی آن توسط *Flow Science Inc* صورت گرفته است.

۳-۱- معادلات حاکم

معادلات مورد استفاده در این نرم افزار شامل معادله ی پیوستگی، ممنتم در سه جهت اصلی برای مدل هیدرودینامیک می باشد. در کنار این معادلات، آشفتگی جریان نیز می تواند با کاربرد یکی از مدل های آشفتگی لحاظ شده در نرم افزار شامل مدل صفر معادله-ای طول اختلاط پرانتال، مدل تک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ هدررفت آن در دو ویرایش استاندار و گروهی اصلاح شده و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام پذیرد. انتقال مواد رسوبی نیز می‌تواند به دو صورت بار بستر و معلق با استفاده از معادلات متناظر بار بستر و معادله انتقال پخش انجام گیرد. محاسبه تغییرات تراز بستر نیز با استفاده از معادله موازنه جرم انجام می‌یابد. امروزه به دلیل استفاده گسترده از این نرم افزار و آشنا بودن اغلب پژوهشگران با معادلات حاکم [۱۱]، در این قسمت تنها به نحوه مدل‌سازی موارد آزمایشی انجام گرفته در این تحقیق پرداخته شده و نتایج شبیه‌سازی بدست آمده از کاربرد نرم افزار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial(\alpha_f p_f)}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha_f \rho_f u_j)}{\partial x_j}=\frac{\partial(\rho_f \overline{\alpha_f' u_j'})}{\partial x_j} \quad (۱)$$

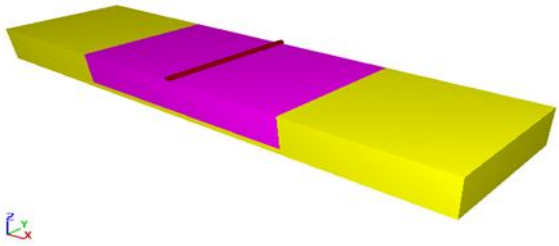
$$\frac{\partial(\alpha_s p_s)}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha_s \rho_s u_{sj})}{\partial x_j}=-\frac{\partial(\rho_s \overline{\alpha_s' u_{sj}'})}{\partial x_j} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial(\alpha_f p_f u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha_f \rho_f u_i u_j)}{\partial x_j}=-\alpha_f \rho_f g \delta_{ij}-\alpha_f \frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\alpha_f p_f \vartheta_f\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{\partial(\rho_f \overline{\alpha_f' u_j'})}{\partial x_j}-f_i \quad (۳)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s u_{si})}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha_s \rho_s u_{si} u_{sj})}{\partial x_j}=-\alpha_f \rho_f g \delta_{ij}-\alpha_s \frac{\partial p}{\partial x_i}-\frac{\partial(\alpha_s \rho_f \overline{u_{si}' u_{sj}'})}{\partial x_j}+\frac{\partial \gamma_{ij}^s}{x_j}+f_i \quad (۴)$$

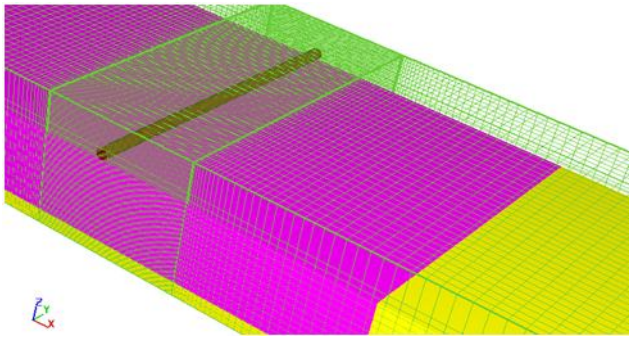
۳-۲- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی در نرم افزار مذکور شامل چند بخش و مرحله است که در حالت عمومی شامل زمان شبیه‌سازی، تعداد و نوع سیال مورد نظر، مشخصات رسوب و انتخاب نوع مدل آشفتگی است. ایجاد هندسه‌ی مساله مورد نظر و تولید شبکه آن در این مرحله تعریف می‌گردد (شکل ۲۱). همچنین جهت کاهش زمان محاسبات، بخش قابل توجهی از طول میانی کانال آزمایشگاهی برابر ۴ متر شبیه-سازی شده است.



شکل ۲۱- شمای کلی مساله مورد بررسی در نرم افزار

در مرحله ی دوم پس از ترسیم کامل تمامی اجزاء، به مرحله‌ی شبکه‌بندی راه یافته می‌شود. برای شبکه‌بندی این مساله از یک بلوک محاسباتی استفاده گردیده است ولی بواسطه‌ی زمان بری زیاد انجام محاسبات، این بلوک به چند صفحه تبدیل گردیده است که به صورت شکل۲۲ نشان داده می‌شود.

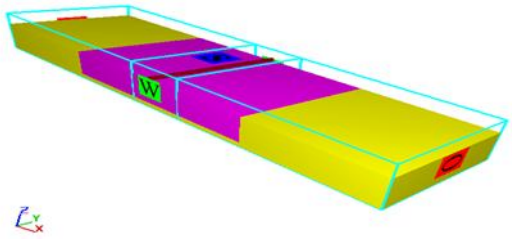


شکل ۲۲- شبکه بندی انجام گرفته روی مدل

صفحات به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نرمال آنها تنها در جهت x بوده است و بدین صورت صفحه‌ی اول در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری قبل از لوله و صفحه‌ی دوم در فاصله‌ی ۳۰ سانتیمتری بعد از لوله تعبیه شده است. تعداد شبکه‌ها در فاصله‌ی بین این دو صفحه ۱۰۰ عدد در جهت x، ۴۰ عدد در جهت y و ۶۰ عدد در جهت z در نظر گرفته شده است. در خارج از این محدوده در جهت z و y همان تعداد شبکه، ولی جهت کاهش حجم محاسبات تعداد شبکه ها در جهت x ۱۰۰ عدد در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی میدان محاسباتی بدین صورت بوده است که برای مرز بالادست، شرط مرزی سرعت به مقدار ۰/۲۶۲ متر بر ثانیه و برای مرز پایین دست شرط مرزی خروجی جریان تعریف گردید. برای دیواره‌ها و بستر کانال از شرط مرزی دیوار و برای سطح آزاد از شرط مرزی تقارن استفاده گردید (شکل). در مورد پژوهش حاضر، حل کننده-ی فشار به صورت ضمنی و تنش های ویسکوز به صورت صریح گسسته‌سازی شده‌اند. در گسسته‌سازی معادلات ممنتم نیز مرتبه‌ی نخست آنها در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]



شکل ۲۳- شرایط مرزی تعریف شده

۳-۳- حساسیت سنجی شبکه‌بندی

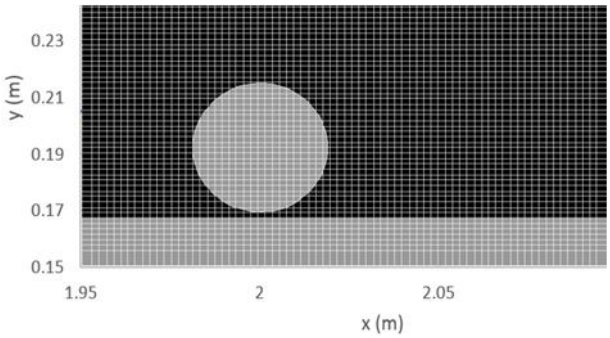
قبل از انجام هر شبیه‌سازی عددی ابتدا باید شبکه مورد نظر تولید و ابعاد آنها انتخاب شوند. ابعاد شبکه‌ها باید به گونه‌ای انتخاب گردند که قابلیت نشان دادن تمامی جزئیات مدلسازی را داشته باشند. در بخش عددی این پژوهش، با توجه به انتخاب قطر گروه دوم آزمایش‌ها که ۴ سانتیمتر بوده است، حداقل ابعاد شبکه باید بسیار کمتر از این مقدار انتخاب شود. همچنین به دلیل کوچک بودن ضخامت تیغه‌ی زیرین (در حدود ۳ میلیمتر) هر یک از ابعاد شبکه باید از این مقدار نیز کوچکتر و یا حداکثر به همان اندازه باشند. همانگونه که در بخش قبلی اشاره شد جهت بالا بردن سرعت محاسبات می توان ابعاد شبکه را در محدوده‌هایی از میدان محاسباتی کوچک یا بزرگ نمود. در این مورد ابعاد شبکه پس از سعی و خطاهایی به صورت سه محدوده در جهت طولی، یک محدوده در جهت عرضی و دو محدوده در جهت ارتفاعی انتخاب گردید به این صورت که ابعاد شبکه‌ها در نزدیکی لوله در جهت طولی ۰/۲۵ سانتیمتر، در جهت عرضی ۱ سانتیمتر و در جهت ارتفاعی (عمق آب) ۰/۲۵ سانتیمتر و در نقاط دیگر میدان محاسباتی این ابعاد به تدریج به مقدار ۵ سانتیمتر افزایش پیدا کردند. همچنین با توجه به سه بعدی بودن محیط محاسباتی و وجود موانع نسبتاً پیچیده در مقابل جریان، مدل‌های آشفتگی دو معادله ای مورد توجه قرار گرفتند که پس از اجرای شبیه‌سازی‌های مشابه روی نمونه‌ی شاهد با مدل‌های مختلف این گروه، مدل دو معادله ای RNG برای سایر شبیه سازی‌ها انتخاب گردید.

۳-۴- نتایج بدست آمده

در ابتدا، قبل از هر کاری نرم افزار را برای لوله‌ی ۴ سانتیمتر و بدون هر گونه تیغه، کالیبره کرده و سپس مابقی حالات مورد تحلیل قرار گرفتند. با توجه به زمان شبیه‌سازی، نمونه هایی که در بخش عددی مورد تحلیل قرار داده شدند عبارت بودند از:- لوله‌ی ۴ سانتیمتری با عرض نسبی تیغه‌های ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰.

۳-۴-۱-نتایج برای نمونه شاهد

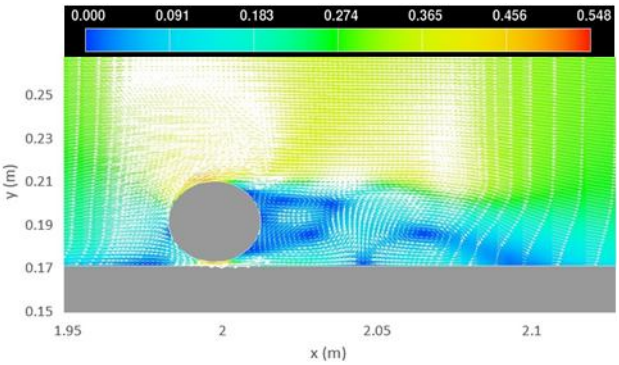
شبکه‌بندی اولیه برای نمونه‌ی شاهد ۴ سانتی‌متری به صورت شکل ۲۴ محاسبه و انجام شده است.



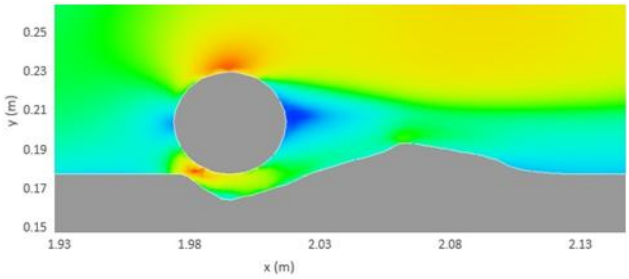
شکل۲۴- شبکه بندی مورد استفاده در نزدیکی لوله

فاصله ی لوله از بستر در حالت اصلی صفر می‌باشد اما در این حالت به جهت ایجاد یک تحریک اولیه به اندازه‌ی یک بعد سلول شبکه در این ناحیه فاصله از بستر در نظر گرفته شده است.

بردارهای سرعت و بزرگی آنها نیز در زمانهای متفاوت به صورت شکل‌های ۲۵ و ۲۶ استخراج گردیده است. همچنین در این شکلها مقیاس رنگی ارائه شده در مورد مقادیر سرعت برای زمان ۱۰ ثانیه، بطور کم و بیش برای زمان ۳۶۰۰ ثانیه نیز قابل استفاده است.



شکل ۲۵- بردارهای سرعت در نزدیکی لوله در زمان ۱۰ ثانیه



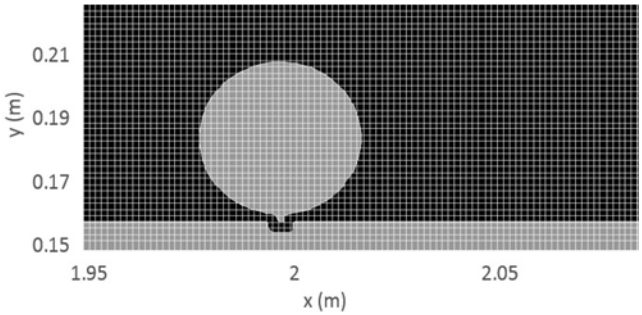
شکل ۲۶- شکل نهائی پروفیل آبشستگی در زمان ۳۶۰۰ ثانیه

۳-۴-۲- نتایج حاصله برای عرض نسبی ۰/۰۵

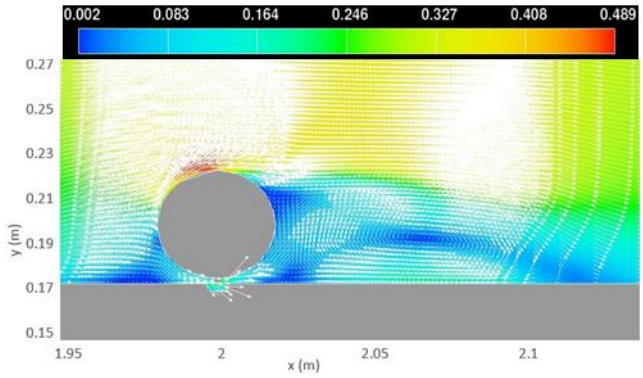
شبکه بندی و نتایج حاصل از اجرای نرم افزاری این نمونه نیز همانند نمونه ی شاهد این گروه به صورت شکل‌های ۲۷ تا ۲۹ استخراج گردیده است. همانگونه که برای نمونه شاهد ذکر گردید در عمل فاصله‌ی لوله از بستر صفر و تیغه نیز در بستر ماسه ای فرو رفته است. اما در شبکه بندی این حالت نیز برای ایجاد یک تحریک اولیه، در هر دو قسمت به اندازه‌ی یک بعد سلول شبکه فاصله از بستر در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

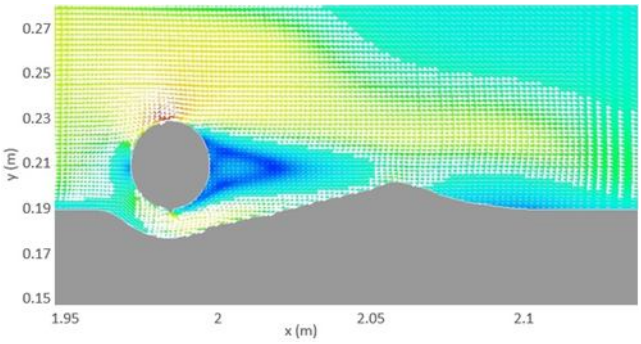
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]



شکل ۲۷- شبکه بندی مورد استفاده در نزدیکی لوله



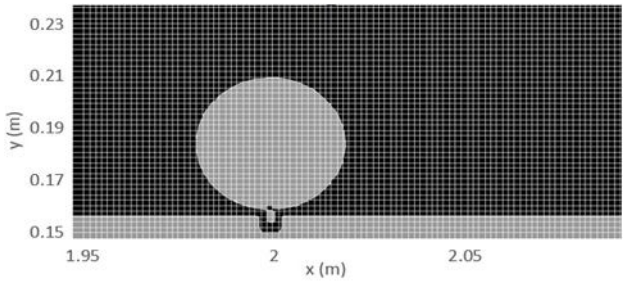
شکل ۲۸- بردارهای سرعت در نزدیکی لوله در در زمان ۱۰ ثانیه



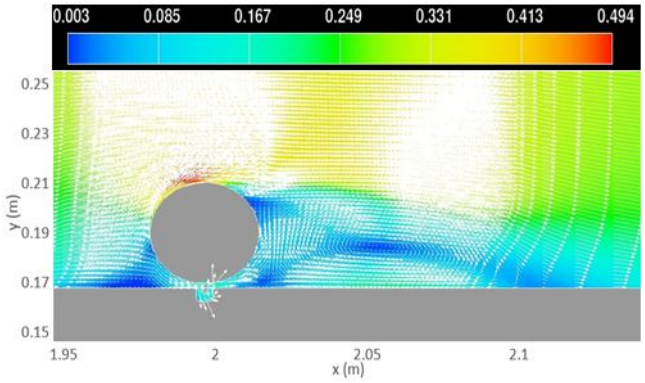
شکل ۲۹- شکل نهائی پروفیل آبشستگی و بردارهای سرعت در زمان ۳۶۰۰ ثانیه

۳-۴-۳- نتایج برای نمونه با عرض نسبی ۰/۱۰

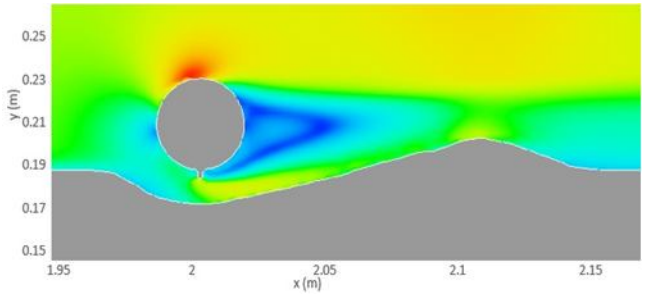
شبکه‌بندی صورت گرفته برای این حالت از آزمایش‌ها در شکل ۳۰ و نتایج حاصله برای این نمونه از گروه دوم نیز به صورت شکل‌های ۳۱ و ۳۲ محاسبه و نشان داده شده‌اند.



شکل ۳۰- شبکه‌بندی مورد استفاده در نزدیکی لوله



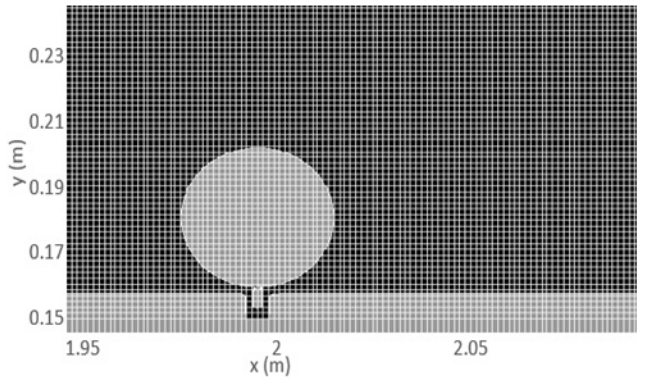
شکل ۳۱- بردارهای سرعت در نزدیکی لوله در در زمان ۱۰ ثانیه



شکل ۳۲- پروفیل نهائی آبشستگی در زمان ۳۶۰۰ ثانیه

۳-۴-۴-نتایج برای نمونه با عرض نسبی ۰/۱۵

این نمونه همان‌طور که در نتایج آزمایشگاهی بیان گردید نمونه‌ی مرزی محسوب شده و گام بعد از آن یعنی عرض نسبی ۰/۲۰ حالت حدی این شبیه‌سازی‌ها به حساب می‌آید (شکل ۳۳).

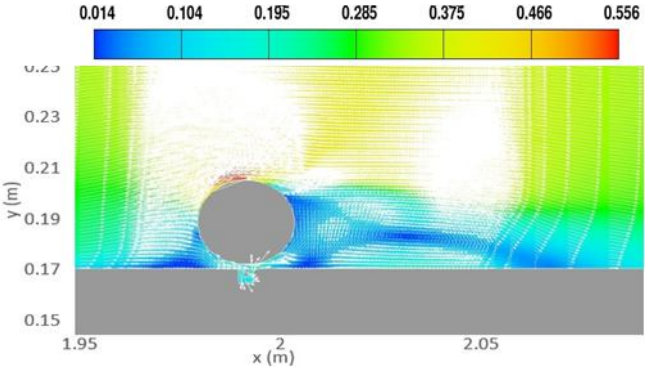


شکل ۳۳- شبکه بندی مورد استفاده در نزدیکی لوله

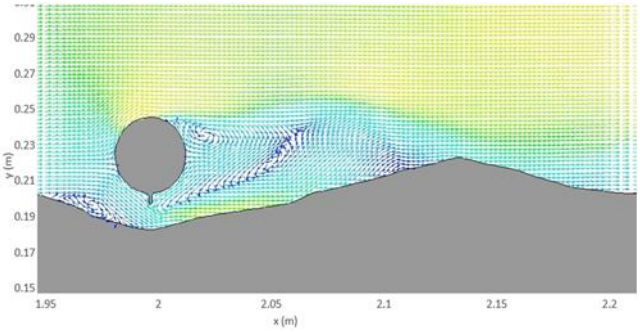
نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها نیز در شکل‌های ۳۴ و ۳۵ نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]



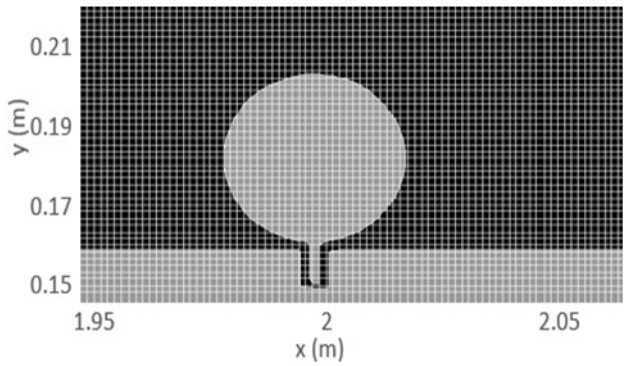
شکل ۳۴- بردارهای سرعت در نزدیکی لوله در زمان ۱۰ ثانیه



شکل ۳۵- پروفیل نهائی آبشستگی در زمان ۳۶۰۰ ثانیه

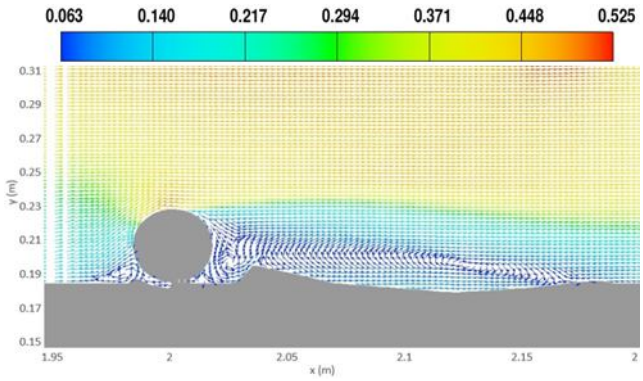
۳-۴-۵- نتایج برای عرض نسبی تیغه ی ۰/۲۰

برای این حالت نیز شبکه بندی در شکل ۳۶ نشان داده است. همانطوری که در نتایج تجربی ارائه گردید در این حالت زیر لوله شسته نمی‌شود و پروفیل آبشستگی به صورتی در می‌آید که تقریبا مماس بر قسمت فوقانی لوله می‌گردد (در انتهای شبیه‌سازی یعنی پس از گذشت هشت ساعت آزمایش). نتایج حاصله از نرم افزار FLOW 3D نیز به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد (شکل ۳۷).



شکل ۳۶- شبکه بندی مورد استفاده در نزدیکی لوله

با اندکی توجه در نتایج این بخش می‌توان دریافت که در قسمت بالادست لوله، جریان آب توانسته مقداری از مصالح زیر لوله را فرسایش و انتقال دهد به صورتی که این آبشستگی تقریبا به شکل یک نوار باریک تا قسمت مرکزی لوله کشیده شده است ولی عمق گودال در این محل به دلیل وجود تیغه‌ی طولی بسیار اندک است.



شکل ۳۷- پروفیل آبشستگی در انتهای شبیه‌سازی در زمان ۳۶۰۰ ثانیه

از روی نتایج عددی مربوط به این گروه آزمایشی ملاحظه می‌شود که وجود یک تیغه در زیر لوله همان طور که در نتایج آزمایشگاهی نیز بیان گردید، باعث تغییراتی در پروفیل آبشستگی می‌گردد به گونه‌ای که با افزایش بعد این تیغه مقدار آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. این روند تا رسیدن عرض تیغه به مقدار حدی ادامه دارد. هر مقدار که عرض تیغه افزایش پیدا می‌کند به دلیل فاصله گرفتن از مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی شروع آبشستگی به تاخیر می‌افتد اما عمق تعادلی آبشستگی و ابعاد حفره‌ی آبکند به دلیل افزایش سطح انسداد جریان افزایش می‌یابد. با رسیدن عرض تیغه به مقدار حدی ۰/۲۰، فاصله از گرادیان هیدرولیکی به حدی می‌رسد که دیگر جریان توانائی شستن زیر لوله را نداشته و آبشستگی تقریباً متوقف می‌شود. همچنین نتایج عددی در این حالت نشان دادند که گردابه‌ها در دو موقعیت مکانی و به دو شکل بوجود آمدند. نوع اول آن در بالا دست لوله ایجاد می‌گردد و تلاش می‌کند زیر لوله را خالی کند و نوع دوم آن در پایین دست ایجاد می شود که خود دارای دو جهت است یکی به طرف لوله که مصالح را شسته و لوله را مدفون می کند و دیگری از همان مرز مشترک مصالح را به پایین دست انتقال داده و باعث ایجاد حفره‌ای U شکل می‌گردد. سرانجام نتایج عددی بیانگر این مطلب است که بطور طبیعی الگوی جریان حاصل شده در این حالت در قسمت پایین دست لوله‌ها بدلیل عدم وجود حفره آبشستگی به طور کلی متفاوت از سه حالت قبلی این گروه بوده و وجود یک گردابه در ناحیه بالادست نیز مشهود می‌باشد.

۴- مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به گروه دوم آزمایشها با نتایج تجربی متناظر مقایسه می‌گردند (جدول ۶). این مقایسه‌ها برای یک ساعت نخست شبیه‌سازی و به ترتیب برای فواصل زمانی ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه‌ای انجام شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]

جدول ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی

عرض نسبی تیغه	مدت زمان (دقیقه)	عمق آبشستگی درمدل عددی (mm)	عمق آبشستگی درمدل تجربی (mm)	درصد اختلاف مدل عددی و تجربی
۰/۰۰	۱۰	۷	۵	٪۲۸
	۱۵	۹	۷	٪۲۲
	۳۰	۱۰	۹	٪۱۸
	۶۰	۱۱	۱۰	٪۱۰
۰/۰۵	۱۰	۱۱	۸	٪۲۷
	۱۵	۱۵	۱۳	٪۱۳
	۳۰	۱۶	۱۵	٪۷
	۶۰	۱۷	۱۶	٪۵
۰/۱۰	۱۰	۱۲	۹	٪۲۵
	۱۵	۱۶	۱۴	٪۱۲.۵
	۳۰	۱۸	۱۶	٪۱۱.۱
	۶۰	۱۸.۵	۱۸	٪۲.۷
۰/۱۵	۱۰	۱۴	۱۰	٪۲۸
	۱۵	۱۷	۱۶	٪۵.۸
	۳۰	۱۹	۱۸	٪۵
	۶۰	۱۹.۵	۱۹	٪۲.۶
۰/۲۰*	۱۰	۱۵۰	۱۲۵	٪۱۶.۶
	۱۵	۲۴۵	۲۳۰	٪۶.۱
	۳۰	۳۱۵	۳۰۴	٪۳.۵
	۶۰	۳۵۴	۳۵۰	٪۱.۱

*در این موارد با توجه به داده های قبلی مبنی بر شسته نشدن زیر لوله، طول تاثیر لوله در پایین دست مد نظر می باشد.

همان طور که از روی جدول ۶ مشاهده می‌گردد در ابتدای شبیه-سازی به دلایلی از جمله مراحل راه اندازی و توسعه‌ی اولیه، مقادیر بدست آمده از نرم افزار به صورت قابل توجهی (۲۸ درصد برای نمونه‌ی شاهد، ۲۷ درصد برای عرض نسبی ۰/۰۵ تیغه، ۲۵ درصد برای عرض نسبی ۰/۱ تیغه، ۲۸ درصد برای عرض نسبی ۰/۱۵ تیغه و ۱۶ درصد برای تیغه‌ی با عرض نسبی ۰/۲۰) با مقادیر تجربی اختلاف وجود دارند. اما این مقدار با گذشت زمان، توسعه‌ی مدل و پیشروی آبشستگی به مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نزدیک می‌گردد، به این صورت که برای نمونه‌ی شاهد پس از یک ساعت اختلاف ۱۰ درصد و برای نمونه‌ی با عرض نسبی تیغه‌ی ۰/۰۵ با گذشت یک ساعت تنها ۵ درصد اختلاف باقی می‌ماند. انتظار می‌رود با ادامه‌ی این فرایند طی ساعات بعد از آن نیز اختلاف این مقادیر به حداقل برسد. حال آنکه برای نمونه‌ی با عرض نسبی تیغه‌ی ۰/۲۰ پروفیل آبشستگی با اختلاف بسیار ناچیزی با مقادیر آزمایشگاهی خود تا یک ساعت اولیه اجرا گردید و این رخداد گواه بر این دارد که با افزایش مقدار عرض نسبی، شرایط نرم افزاری با شرایط طبیعی همخوانی بهتری پیدا می‌نماید. احتمال دیگری نیز در این موضوع دور از انتظار نیست و آن اینکه ممکن است بعد از گذشتن یک ساعت، اختلاف در جهت منفی افزایش یابد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

تا کنون ایده‌های مختلفی برای محافظت مستقیم و یا غیرمستقیم از خطوط لوله فراساحلی ارائه گردیده است که از جمله‌ی روشهای مستقیم می‌توان به پوشاندن روی لوله با مصالحی که قابلیت شسته شدن آنها بسیار کم باشد، اشاره کرد. همچنین استفاده از روشهای غیر مستقیم مانند اضافه نمودن تیغه در قسمت فوقانی لوله در به تعویق انداختن آبشستگی و یا توقف نسبی آن موثر بوده است. اما روش ارائه شده در این بررسی نیز می‌تواند یکی از روشهای بسیار موثر و کارآمد بشمار آید و در صورت استفاده صحیح از آن با صرف مصالح کمتر، افزایش مقاومت در برابر آبشستگی تا حدی بالا می-رود که دیگر جریان نمی‌تواند زیر لوله را فرسایش دهد. نتیجه اینکه احتمال وقوع پدیده‌ی رگاب بسیار ضعیف شده و لوله بر اثر جابجایی‌های ناشی از جریان گسیخته نخواهد شد. با توجه به نتایج عددی و آزمایشگاهی این تحقیق می‌توان دریافت که وجود یک تیغه در زیر لوله تا حدی زیادی از وقوع پدیده‌ی رگاب ممانعت بعمل آورده و در ادامه لوله را در مقابل پدیده‌ی آبشستگی محافظت می‌نماید. نتایج تجربی و عددی این تحقیق به صورت زیر جمع بندی می‌شوند.

- نمونه‌های آزمایشگاهی در یک ساعت نخست آزمایش ۶۰ تا ۷۰ درصد از آبشستگی نسبی کل خود را بوجود آوردند در حالیکه این مقدار در مورد نتایج عددی بین ۶۵ تا ۷۲ درصد می‌باشد.
- با افزایش عرض نسبی تیغه‌ی زیرین لوله، پدیده‌ی رگاب اندکی با تاخیر روی داده ولی عمق آبشستگی نهایی افزایش یافت تا این که عرض مذکور به مقدار حدی خود رسیده و پروفیل آبشستگی به کلی تغییر شکل داد. حداکثر عمق آبشستگی لوله‌های با قطر ۳/۱ و ۴ و ۴/۹۵ سانتی‌متر به ترتیب ۴۵، ۴۲ و ۴۱ درصد نسبت به نمونه-ی شاهد متناظر افزایش یافته بود.
- مدل‌های با عرض نسبی تیغه‌ی ۰/۱۵ حداکثر آبشستگی را دارا بوده‌اند. به این صورت که برای یک لوله هرچه عرض نسبی تیغه‌ی زیرین افزایش یابد عمق آبشستگی افزایش یافته و شیب دیواره‌های حفره‌ی آبشستگی به طور چشم‌گیری تیزتر می‌گردد.
- نتایج تجربی نشان دادند که با انتخاب یک عرض نسبی یکسان برای لوله‌ی با قطر بالاتر عمق آبشستگی بیشتری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]

حاصل می‌گردد.

- برای تیغه‌های با عرض نسبی ۰/۲۰ مقدار حداکثر آبشستگی در پایین دست لوله رخ داده و موقعیت آن حدود ۳ برابر قطر لوله با آن فاصله دارد.
- شیب حفره‌ی آبشستگی در بالادست لوله در همه‌ی نمونه‌ها تقریبا ثابت و اندکی کمتر از زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح می‌باشد.
- نتایج شبیه‌سازی عددی در دقایق اولیه با نتایج متناظر آزمایشگاهی اختلاف نسبتاً زیادی داشت اما با گذشت زمان و رسیدن به زمان یک ساعته‌ی شبیه‌سازی، این مقدار اختلاف به حداقل خود رسید.
- نتایج عددی نشان دادند که گردابه‌ها در مورد عرض نسبی تیغه ۰/۲۰ در دو موقعیت و به دو شکل بوجود آمدند. نوع اول آن در بالادست لوله ایجاد می‌گردد و تلاش می‌کند زیر لوله را خالی کند و نوع دوم آن در پایین دست ایجاد می‌شود که خود دارای دو جهت است یکی به طرف لوله که مصالح را شسته و لوله را مدفون می‌کند و دیگری از همان مرز مشترک مصالح را به پایین دست انتقال داده و باعث ایجاد حفره‌ای U شکل می‌گردد.

۶- منابع

1- Chiew, Y., (1991), *Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines*, Journal Hydraulic Engineering, 117(4), p. 452-466.

2- Kjeldsen, S. P., Gjørsvik, O., Bringaker, K. G., and Jacobsen, J., (1973), *Local scour near offshore pipelines,* Proc., 2nd International Conference on POAC, p. 308-331.

3- Ibrahim, A. and Nalluri, C., (1986), *Scour prediction around marine pipelines*, Proc.5th International Symp.on Offshore Mechanic and Arctic Engineering, Tokyo, Japan, p. 679-684.

4- Moncada-M, A. T. and Aguirre-Pe, J., (1999), *Scour below pipeline in river crossings*, Journalof Hydraulic. Engineering, ASCE, 125(9), p. 953-958.

5- Liang, D. and Cheng, L. (2005), *Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents, Part I. Flow simulation*, Journal of Coastal Engineering, 52, p. 25-42.

6- Liang, D., Cheng, L., and Li, F. (2005), *Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents, Part II. Scour simulation*, Journal of Coastal Engineering, 52, p. 43-62.

[7] Dey, S. and Sing, N. (2008), *Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134(5), p. 588-600.

8- Cheng, L., Yeow, K., Zhang, Z. and Teng, B., (2009), *Three-dimentional scourbelow pipelines in steady currents*, Journal of Coastal Engineering, 56, p. 577-590.

9- Yasa, R., (2011), *Prediction of the scour depth under submarine pipeline in wave condition*, Journal of Coastal Research, 64, p. 627-630.

10- Yang, L., Guo, Y., Shi, B., Kuang, C., Xu, W. and Cao, S., (2012), *Study of Scour around Submarine Pipeline with a Rubber Plate or Rigid Spoiler in Wave Conditions*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 138(6), p. 484-490.

11- Zhu, H., Qi, X., Lin, P., and Yang, Y., (2013), *Numerical simulation of flow around a submarine pipe with a spoiler and current-induced scour beneath the pipe*, Journal of Applied Ocean Research, 41, p. 87-100.

12- Cheng, L., Kervin, Y., Zhipeng, Y., and Fungjun, L., (2014), *3D scour below pipelines under waves and combined waves and currents*, Coastal Engineering, 83, p. 137-149.

13- Chen, C. and Zhang, J., (2009), *A review on scour modeling below pipelines*, Proc. Of Pipelines 2009, ASCE, p. 1019-1028.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.7.3]