شبیه سازی پدیده آبشستگی در اطراف خطوط لوله تحت اثر جریان‌های جزر و مدی

داریوش حسینی [۱] ، حبیب حکیم زاده [*۲] رضا غیاثی [۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز، d_hosseini@sut.ac.ir
[۲] استاد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز، hakimzadeh@sut.ac.ir
[۳] دانشیار، دانشکده فنی دانشگاه تهران، rghiassi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

کلمات کلیدی:
آبشستگی،
جریان جزر و مدی،
جریان یک سویه
خط لوله
شبیه سازی عددی

چکیده

جزر و مد به صورت مداوم باعث تغییر تراز آب در دریاهای آزاد می‌گردد و با توجه به استمرار و حاکمیت جریانهای ناشی از جزر و مد در محل خلیج ها، تنگه ها و خورها، لزوم بررسی پدیده های مرتبط با انتقال رسوب و آبشستگی در اطراف سازه‌های واقع در نواحی فوق بیش از پیش روشن می‌گردد. در این پژوهش با شبیه سازی عددی میدان جریان و انتقال رسوب، پدیده آبشستگی در زیر خطوط لوله ناشی از جریان‌های رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفته و به ازای مقادیر سرعت حدی معادل آستانه حرکت دانه‌های رسوب، عمق و تعداد سیکل جزر و مد جهت رسیدن به تعادل، مشخصات پروفیل آبشستگی ترسیم شده است. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش عمق و سطح گودال آبشستگی ناشی از جریان جزر و مدی به دلیل تغییرات متناوب جهت جریان نسبت به آبشستگی ناشی از جریان تنها بوده و شکل نهایی پروفیل آبشستگی متأثر از فرآیند گردابه فکنی است.

Simulation of scour beneath pipeline due to tidal currents

D. Hosseini[1], H. Hakimzadeh[2*], R. Ghiasi[3]

[1] Phd student, Sahand university of technology Tabriz; d_hosseini@sut.ac.ir
[2] Phd Professor, Sahand university of technology Tabriz; hakimzadeh@sut.ac.ir
[3] Phd Associate Professor, Tehran university, Faculty of engineering; rghiassi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 08 Sep 2022
Accepted: 15 Jul 2023

Keywords:
Scour
Tidal currents
Unidirectional current
Pipeline
Numerical simulation

ABSTRACT

Tides continuously change the water level in seas, and due to the continuity and dominance of currents caused by tides in bays, straits and estuaries, it is necessary to investigate the phenomena related to sediment transport and scouring in the surroundings of the structures located in the above areas will be illuminated more than before. In this research, by numerical simulation of the flow field and sediment transport, the scouring phenomenon under the pipelines caused by bidirectional currents has been investigated, and according to the values of movement threshold speed, depth and number of tidal cycles to reach equilibrium, the characteristics of the scouring profile has been drawn. The obtained results indicate an increase in the depth and surface of the scour pit caused by the tidal current due to the alternating changes in the flow direction compared to the scour caused by the unidirectional current, and the vortex shedding process affects the final shape of the scour profile.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

۱ - مقدمه

با گسترش صنایع و رشد سریع نیاز به سوختهای فسیلی از جمله نفت خام و گاز طبیعی، مخازن موجود در خشکی‌ها از چندی پیش دیگر پاسخ گو نبوده و منابع موجود در دریاها مورد توجه قرار گرفته است. در نیمه دوم قرن بیستم فنون استخراج منابع هیدروکربوری از لایه‌های زیرین بستر دریا گسترش یافته و بهره برداری از میدان-های موجود در فراساحل آغاز گردید[۱]. چالش دیگر پیش رو، انتقال منابع نفت و گاز استخراج شده در احجام قابل توجه و به صورت مداوم به پالایشگاه‌ها و محل های مصرف است. روشهای متداول جهت انتقال عبارتند از کشتی های تانکر و خطوط لوله که خطوط لوله به دلیل مزایای فراوانی که دارند در اولویت نخست قراردارند که از جمله این مزیتها عبارتند از: تأثیر ناچیزی بر محیط زیست دارند، در آبهای بسته نظیر دریای خزر یا کم عمق (خلیج‌ها و خورها) که استفاده از تانکرها محدودیت دارد استفاده از خطوط لوله جهت انتقال منابع هیدروکربنی امری اجتناب ناپذیر است، همچنین با توجه به این که خطوط لوله بر روی بستر دریا واقع شده‌اند در برابر حوادث و تصادف‌ها از امنیت بیشتری برخوردارند. از لحاظ اقتصادی نیز استفاده از خطوط لوله در بلند مدت به صرفه‌تر است [۲].

سه عامل مهم تأثیر گذار بر هیدرودینامیک دریاها عبارتند از: جزر و مد، امواج و تغییرات چگالی آب. هرکدام از آنها مقیاس زمانی مختص به خود را دارند. جرز و مد عموماً به صورت روزانه یا نیم روزانه هستند. جریانهای ناشی از امواج تحت تأثیر مشخصات باد بوده و تغییرات روزانه آن اندک و اغلب در هنگام طوفان شدت آنها چشمگیر است و جریانهای ناشی از چگالی تغییرات فصلی دارند. رفتار جزر و مد را می‌شود به صورت یک موج ثقلی در نظر گرفت که باعث تغییرات تناوبی تراز آب دریا می‌شود و جریان جزر ومدی، جریانی غالباً افقی است که حاصل جزر و مد است. هنگامی که امواج جزر و مدی به سواحل و خورها می‌رسند، دامنه آنها می‌تواند در اثر هجوم آب، تنگ شدن آبراه و ایجاد رزنانس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. طبق بررسی‌های انجام شده جهت استفاده از انرژی جزر و مد برای تولید برق، سرعت جریان جزر و مدی در تنگه ها قابل توجه بوده به عنوان مثال در تنگه هرمز معادل ۱ متر بر ثانیه بوده و بیشترین مقدار سرعت جریان در محدوده بندر پهل (بین جزیره قشم و سرزمین ایران) به حدود ۱،۸ متر بر ثانیه می‌رسد. بنابراین جریان‌های جزر و مدی بسیار قوی بوده و لذا تأثیرات زیادی بر فرآیند های هیدرودینامیک و مرفودینامک داشته و هنگام اندرکنش با موانع، پتانسیل ایجاد تغییرات در فرآیندهای مرتبط با انتقال رسوب و تغییر تراز بستر دریا را دارند[۳]. از جمله این فرآیندها می‌توان به آبشستگی محلی در اطراف سازه‌های موجود در محیط دریا اشاره نمود. بررسی و مطالعه پدیده آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله تحت اثر جریان یک سویه از دهه پایانی قرن بیستم آغاز گردید و در ادامه برای امواج و ترکیب این دو توسعه یافت. سامر، فردسو و چیو [۴و۵] پژوهش‌های شاخصی را در مورد نحوه شروع و ادامه آبشستگی، همچنین پارامترهای مؤثر انجام دادند در ادامه بروس [۷] ، لی و چن[۸] نیز با استفاده از مدل عددی این پدیده را مورد مطالعه قراردادند.

جدول (۱): پیشینه مطالعات آبشستگی انجام شده ناشی از جریان

پژوهشگر	تاریخ	خلاصه پژوهش
Vanbeek[9]	۱۹۹۰	عمق آبشستگی زیر لوله تحت اثر جریان مطالعه شد.
Ebrahim[6]	۱۹۸۶	با مدلسازی فیزیکی در شرایط آب زلال و بستر فعال روابطی عمق آبشستگی ناشی از جریان ارائه نمودند.
Mao[6]	۱۹۸۶	نقش گردابه‌ها در آبشستگی زیر لوله بررسی گردید.
Chew[6]	۱۹۹۰	با استفاده از مدل فیزیکی فرمول‌هایی برای محاسبه عمق آبشستگی ناشی از جریان ارائه نمودند.
Brors[7]	۱۹۹۹	آبشستگی در زیر لوله با مدلسازی عددی بررسی شد
Sumer[5,4]	۲۰۰۱	شروع آبشستگی زیر لوله تحت اثر جریان و موج با استفاده از مدل فیزیکی مطالعه گردید.
Cheng& Li[8]	۱۹۹۹	پدیده آبشستگی ناشی از جریان را با مدلسازی عددی و مقایسه نتایج با مطالعات تجربی بررسی نمودند.
Lee[10]	۲۰۰۲	بر مبنای مدلسازی عددی و تجربی آبشستگی لوله در ترنچ تحلیل شد.
Rahayu[11]	۲۰۱۷	آبشستگی در اطراف لوله بر بستر و ترنچ مطالعه شد.
Fei [12]	۲۰۰۶	آبشستگی در زیر لوله در خلیج هانژو و فرآیند دفن خود به خودی آن به صورت تجربی بررسی شد.
حسینی، همکاران [۲]	۱۳۸۵	از مدل فیزیکی جهت بررسی پدیده آبشستگی ناشی از جریان در اطراف لوله های دریایی نمودند.
Yew [13]	۲۰۰۷	پروفیل آبشستگی در زیر لوله ناشی از امواج و جریان و ترکیب موج و جریان بررسی گردید.
Bai [14]	۲۰۱۳	آبشستگی در زیر لوله با بستر سیلتی بررسی شد.
Yang [15]	۲۰۱۳	پدیده آبشستگی تحت اثر جریان در اطراف لوله با دهانه آزاد بررسی گردید.
Zhanga [16]	۲۰۱۵	توسعه پروفیل آبشستگی و مقیاس زمانی آن تحت جریان متغییر تدریجی بررسی گردید.
میرعلیزاده[۱۷]	۱۳۹۲	آبشستگی در اطراف لوله ساید بایساید مطالعه گردید.
اسراری، [۱۸]	۲۰۲۱	الگوی آبشستگی اطراف لوله‌های مرکب مطالعه شد.
موسوی، [۱۹]	۱۳۸۴	عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله بررسی شد.
Chen [20]	۲۰۰۹	چکیده مطالعات پیشین آبشستگی ارائه شده است
گلپرورفرد[۲۱].	۲۰۰۵	بر مبنای مدل عددی پروفیل آبشستگی ناشی از جریان در اطراف لوله ارائه گردید.

در سالهای بعد مطالعه این پدیده مورد توجه پژوهشگران کشور ما قرار گرفت که از جمله می‌توان به کارهای انجام شده توسط حسینی و همکاران[۲]، میرعلیزاده و همکاران [۱۷] و یگانه بختیاری و همکاران[۲۱و۱۹] اشاره نمود. در جدول شماره ۱ فهرستی از کارهای انجام شده در این مورد ارائه گردیده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

با استفاده از مدلسازی عددی و فیزیکی پژوهش های متعددی جهت روشن شدن ابعاد این پدیده انجام داده‌صصص.اند که اهم موضوعات آنها عبارتند از: نحوه آغاز آبشستگی و چگونه‌گی توسعه پروفیل مربوطه، عمق حداکثر آبشستگی، زمان رسیدن به تعادل و پارامترهای مؤثر بر این پدیده[۶]. لازم به ذکر است که جریان یک سویه تنها برای رودخانه ها صدق می نماید لیکن در محیط دریاها، جریان‌های جزر و مدی که دارای الگوی رفت و برگشتی می‌باشند حاکمیت داشته و از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشند که با توجه به پیچیدگی آنها نسبت به جریان منفرد، به دلیل متغییر بودن جهت، سرعت و عمق آنها نسبت به زمان، آبشستگی موضعی ناشی از جریانهای جزر و مدی نیز دارای ابعاد و جزئیاتی متفاوت در مقایسه با آبشستگی ناشی از جریان منفرد بوده و نیازمند تحقیقات جداگانه‌ای می‌باشد.

در سالهای اخیر با توجه به گسترش استفاده از توربین‌های بادی در سواحل اروپا، پدیده آبشستگی ناشی از جزر و مد در اطراف شمع‌ها و پایه‌های قائم آنها مورد توجه محققین قرار گرفت. ایشان با استفاده از مدل‌های فیزیکی و عددی آبشستگی ناشی از جریان های جزر و مدی را مورد مطالعه قرار دادند که پیشینه پژوهش‌های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): سابقه مطالعات آبشستگی ناشی از جزر ومد پیرامون پایه‌ها.

پژوهشگر	مرجع	خلاصه پژوهش
Porter	[۲۲]	با استفاده از مدل فیزیکی آبشستگی ناشی از جزر و مد را در اطراف شمع قائم مورد مطالعه قرار داد.
Schendel	[۲۳]	با استفاده از مدل آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از جریان جزر و مدی در اطراف شمع قائم بررسی شد.
Yao	[۲۴]	مدلسازی فیزیکی آبشستگی ناشی از جریان یک سویه و جریان جزر و مدی در اطراف شمع قائم ارائه نمودند.
Vasquez	[۲۵]	آبشستگی ناشی از جزر و مد در اطراف شمع ها با شبیه سازی عددی بررسی شده است.

دستاوردهای محققین حاکی از آن است که ابعاد گودال آبشستگی ناشی از جزر و مد در اطراف پایه‌های قابل ملاحظه می‌باشد[۲۲]. با توجه به اینکه در جریان جزر و مدی عمق، سرعت و جهت جریان به صورت متناوب تغییر می‌کند، بسیاری از پژوهشگران جهت مدلسازی پدیده آبشستگی در اطراف پایه‌های قائم از فرض پله‌ای بودن استفاده نموده به عبارت دیگر جریان را به صورت رفت و برگشتی با عمق ثابت اعمال نموده‌اند[۲۵].

همانطور که در مورد پایه‌های قائم مطرح شد بررسی‌های دقیق انجام شده روی خطوط لوله در حال بهره‌برداری نشان دهنده آبشستگی محلی ایجاد شده در مجاورت لوله تحت اثر جریان رفت و برگشتی ناشی از موج یا جزر و مد می‌باشد[۲۶]. آبشستگی باعث جدایی خط لوله از بستر می‌شود و عملکرد سازه‌ای لوله مشابه تیری دو سر ساده است. با گسترش گودال آبکند، دهانه آزاد خط لوله به مرور افزایش یافته که بارهای نوسانی ناشی از گردابه فکنی باعث خستگی و در نهایت گسیختگی آن می‌گردند. در جریان‌های جزر و مدی سرعت و جهت جریان همچنین عمق آب متغیر است به همین دلیل انتظار می‌رود روند گسترش آبشستگی متفاوت از جریان یک سویه باشد. با توجه به تأثیر غالب جریان‌های جزر و مدی نسبت به جریانهای ناشی از امواج در محل خلیج‌ها و خورها و مستمر بودن آنها در این مناطق پدیده‌های مرتبط با انتقال رسوب و از جمله آبشستگی متأثر از این جریان‌ها باشد. در این پژوهش سعی شده با شبیه سازی عددی (به ازای مقادیر سرعت حدی، عمق و تعداد سیکل‌های جزر و مد جهت رسیدن به تعادل نسبی) آبشستگی در زیر خطوط لوله ناشی از جریان‌های جزر و مدی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با آبشستگی ناشی از جریان یک سویه مقایسه شده است.

۲ - معادلات اساسی حاکم

اهمیت کاربرد دینامیک سیالات محا سباتی و ا ستفاده از مدلهای عددی جهت تحلیل و مدلسازی پدیده آبشستگی بیش از دو دهه ا ست که آغاز گردیده و طی این مدت پیشرفتهای مطلوبی دا شته ا ست. [۲۷] پدیدهٔ آبشستگی فرآیندی ا ست که ناشی از اندرکنش خط لوله، بستر فرسایش پذیر و جریان می‌باشد. بنابراین تحلیل آن نیازمند شناخت دو سری معادلات ا ست، معادلات حاکم بر جریان آب و معادلات انتقال رسوب[۲۸]. به دلیل وابسته بودن معادلات انتقال رسوب به مؤلفه‌های سرعت جریان، لازم است ابتدا معادلات حاکم بر جریان حل و سپس برا ساس م شخصات هیدرودینامیکی به دست آمده برای ناحیه مطالعاتی، معادلات انتقال رسوب حل گردند. در پدیده آبشستگی به دلیل بزرگ بودن عدد رینولدز جریان آ شفته همراه با گردابه‌هایی در پیرامون سازه ا ست بنابراین جهت مدلسازی آن باید از مدل‌های آ شفتگی ا ستفاده نمود. ا صولاً در این روش با حل عددی معادلات رینولدز و بهره بردن از مدلهای آشفتگی مرتبه بالا میدان جریان اطراف خط لوله محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه به ماهیت پدیده آبشستگی، معادلات حاکم به دو دسته تقسیم می شوند: (۱) معادلات حاکم بر جریان آب و (۲) معادله انتقال رسوب. که در اینجا به صورت خلاصه به بیان هریک از آنها پرداخته می شود.

معادلات جریان: در این بخش معادلات N-S متوسط گیری شده رینولدز حل می شوند. این معادلات عبارتند از:

(۱) معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

(۲) معادله مومنتوم

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \upsilon \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} + \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1\right) cg\delta_{i3}$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

در معادلات بالا u_i مولفه‌های سرعت جریان در جهت محورهای مختصات، p فشار و ρ چگالی سیال (آب) می باشند

معادله بقای جرم رسوب

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\left(u_j-w_s\delta_{j3}\right)\frac{\partial c}{\partial x_j}=-\frac{\partial \overline{c'u'_j}}{\partial x_j} \qquad (۳)$$

شارهای مومنتوم و رسوب مرتبط با گرادیانهای تقریب‌های بوسینسک می‌باشند.

$$\overline{u'_iu'_j}=\upsilon_T\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}k \qquad (۴)$$

که در آنها υ_T ویسکوزیتهٔ آشفتگی و k =انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد.

$$k=\frac{1}{2}\overline{u'_ku'_k} \qquad (۵)$$

برای بستن دستگاه معادلات بالا مدل k-ε مد نظر قرار می‌گیرد. این مدل شامل دو معادلهٔ اضافی می‌باشد یکی برای k و دیگری برای εنرخ استهلاک [۲۹]

(۶)

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\upsilon_T}{\sigma_c}\cdot\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+P+G-\varepsilon$$

(۷)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\upsilon_T}{\sigma_c}\cdot\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+\left(C_{\varepsilon 1}P-C_{\varepsilon 2}P+C_{\varepsilon 3}\max(0,G)\right)\frac{\varepsilon}{k}$$

$$\upsilon_T=\frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \qquad (۸)$$

G,P به ترتیب بیان کنندهٔ عبارتهای مربوط به گرادیان سرعت جریان و تمرکز رسوب معلق:

$$P=\upsilon_T\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (۹)$$

$$G=\left(\frac{\rho_s}{\rho_f}-1\right)cg\frac{\upsilon_T}{\sigma_c}\frac{\partial c}{\partial x_3} \qquad (۱۰)$$

نرخ انتقال رسوب به صورت باربستر در واحد عرض (با توجه به پارامتر پایداری بستر θ و d قطر متوسط دانه های رسوب) از رابطه نیلسون به صورت زیر به دست می آید

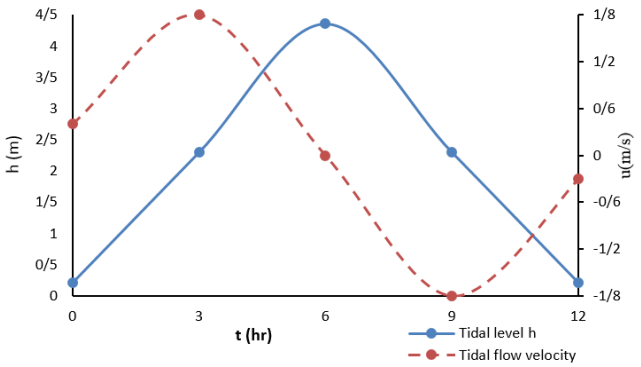
$$q_0=12\sqrt{g\left(\rho_s/\rho_f-1\right)d^3}\left(\theta-\theta_{cr}\right)\theta^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۱)$$

g=9.81 و $s=\rho_s/\rho_f$ چگالی نسبی رسوب می‌باشند.

اهمیت استفاده از مدل نیلسون به این دلیل است که نتایج به دست آمده از مدل عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته و زمان همگرایی حل عدد نیز کوتاه‌تر می‌باشد.

۳-مقیاس مدل عددی

هدف از انجام این پژوهش توصیف و تبیین مراحل فرآیند آبشستگی اطراف خطوط لوله فراساحلی ناشی از جریان جزر و مدی است بنابراین در خصوص انتخاب پارامترهای مشخصه مدل (اندازه لوله، سرعت و عمق جریان) رعایت تناسب منطقی بین پارامترهای میدانی (واقعی) و مدل اهمیت دارد. اگر چه جریان آشفته می باشد لیکن نظر به اینکه در این مسئله نیروهای غالب، ثقل و اینرسی می‌باشند جهت تناسب از عدد فرود استفاده شده است[۱۵]. در خلیج فارس سرعت جریان ناشی از جزر و مد از ۰/۶ m/s در حوالی تنگه هرمز تا حدود ۲ m/s در خور خوران و خور موسی ماهشهر متغییر است. بیشینه سرعت جریان درخور موسی واقع در ماهشهر ۲ و در خور خوران (کانال قشم) ۱/۸ متر بر ثانیه می‌باشد البته مقادیر سرعت جریان در هنگام جزر بیشتر از زمان وقوع مد می‌باشد به عنوان مثال در خور خوران کمینه سرعت هنگام مد حادث شده و معادل ۰/۹ متر بر ثانیه و بیشینه سرعت هنگام جزر ۱/۸ متر بر ثانیه می‌باشد. جهت مطالعه موردی کانال قشم (خور خوران) که دامنه جزر و مد و سرعت جریان در این محدوده قابل توجه می‌باشد انتخاب شده است. در شکل ۱ نمودار تغییرات زمانی تراز آب و سرعت جریان جزر و مدی در خور خوران طی یک دوره دوازده ساعته در شرایط مه کشند ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمودار سرعت جریان حدود ۹۰ درجه با نمودار تغییرات تراز اختلاف فاز داشته و هنگامی که تراز آب به تراز متوسط (MTL) رسیده و جهت جریان معکوس می‌گردد مقدار سرعت حداکثر بوده و در بیشینه تراز مد (HHWL) و کمینه تراز جزر (LLWL) مقدار سرعت نزیک به صفر می‌باشد. در محدوده خور خوران عمق متوسط آب ۱۵ متر و جزر و مد به صورت نیم روزانه (با دوره بازگشت ۱۲ ساعته) می‌باشد.



شکل ۱- نمودار تغییرات تراز آب و سرعت جریان جزرو مد خورخوران

خطوط لوله موجود در خلیج فارس که وظیفه انتقال نفت و گاز از میادین فراساحلی به ساحل همچنین انتقال آب از سرزمین مادر به جزایر دارند دارای قطر داخلی ۴۲ تا ۵۶ اینچ و ضخامت پوشش روی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

آنها حدود ۱۰ سانتیمتر هستند و در محدوده خور خوران چندین خط لوله جهت انتقال گاز استحصال شده از میادین قشم به سرزمین مادر همچنین یک خط لوله جهت انتقال آب از سرزمین مادر به جزیره قشم احداث و تحت بهره برداری می‌باشند. مقیاس هندسی مدل نسبت به اندازه واقعی ۱:۳۰ در نظر گرفته شده، بنابراین مقادیر پارامترهای متناظر مدل با توجه به پارامتر واقعی خور خوران و اعمال قانون عدد فرود مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول (۳): تناسب پارامترهای منتخب برای مدل با توجه واقعیت

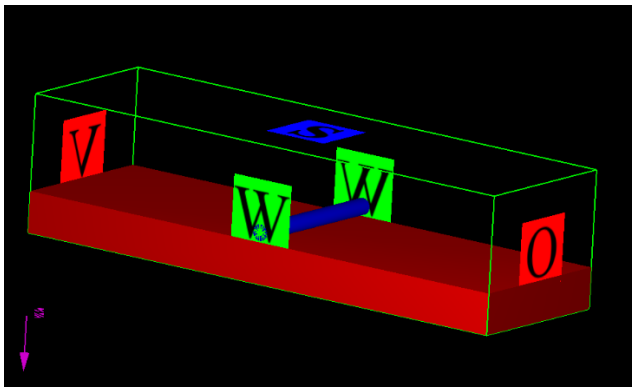
پارامتر	اندازه واقعی		اندازه در مدل مقیاس (۱:۳۰)	
عمق آب	۱۵	m	۵۰	cm
قطر خارجی لوله	۱۶۵	cm	۶	cm
سرعت جریان	۱/۰-۸/۹	m/s	۱۵-۳۰	cm/s
بیشینه دامنه جز و مد	۴/۲		۱۴	
کمینه دامنه جزر و مد	۲/۱	m	۷	cm

۴-حل معادلات حاکم و شبیه سازی عددی

در این پژوهش مدلی رایانه‌ای ارائه شده است که مراحل مختلف فرآیند آبشستگی ناشی از جریان جزر و مدی در زیر خط لوله که شامل: شروع آبشستگی، فرسایش تونلی، فرسایش گردابی، گسترش آبشستگی و جابجایی رسوب در اثر معکوس شدن جهت جریان و دیگر فرآیندهای مربوط به انتقال رسوب را مدل می‌نماید. اطلاعات ورودی عبارت از سرعت جریان و عمق آب، قطر لوله و مشخصات مصالح رسوب. نتایج عبارتند از : مشخصات جریان پیرامون لوله (سرعت، فشار) و عمق و عرض پروفیل آبشستگی در پایان هر سیکل جزر یا مد. با توجه به هدف تعریف شده سعی شده است که در مرحله نخست روند تغییرات پروفیل آبشستگی و سایر پارامترهای مربوطه به ویژه عمق آبشستگی طی سیکل های جزر و مد بررسی شده و توالی اشکال پروفیل ثبت شده در سیکل‌های متمادی ثبت شده و نتایج با مطالعات انجام شده در مورد جریان یک سویه مقایسه گردند.

نخستین گام در شبیه سازی عددی، گسسته سازی معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله جهت تبدیل آنها به معادله‌های جبری بر روی نقاط شبکه می‌باشد. برای حل چنین معادلاتی روش‌های عددی مختلفی وجود دارد که شامل روشهای تفاضل محدود، المان محدود و حجم محدود می باشند. در میدان‌های هندسی پیچیده روش‌های حجم محدود بر روش‌های تفاضل محدود برتری دارند. به عبارت دیگر روش های حجم محدود انعطاف بیشتری را در انتخاب حجمهای تجزیه شده در اختیار محاسب می‌گذارند [۲]. در روش حجم محدود چون معادله‌های انتگرالی مستقیماً در میدان فیزیکی به کار می‌روند برای میدان‌های پیچیده و شبکه‌های بدون ساختار مشکل همگرایی ندارند. در این مدل عددی با توجه به موارد فوق همچنین به دلیل وضعیت نسبتاً پیچیده هندسی شرایط مرزی لوله و تراز متغییر بستر دریا، از روش حجم محدود جهت حل معادلات به دست آمده استفاده شده است.

نرم افزار Flow3D (v11.1) قابلیت تحلیل دو بعدی یا سه بعدی میدان جریان را به روش حجم محدود با استفاده از المانهای متعامد داراست. با توجه به قابلیتهای محاسباتی و امکانات گرافیکی نرم افزار یاد شده و توانایی آن برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات، شبیه سازی عددی در محیط نرم افزار فوق انجام شده است. در این نرم افزار تولید شبکه به دو روش کارتزین و استوانه‌ای صورت می-گیرد و این امکان وجود دارد که با توجه به اهمیت هر بخش، تعداد و اندازه مش‌هایی که برای تولید میدان حل مورد نیاز می باشد ریزتر (پر اهمیت) و یا درشت تر (کم اهمیت) در نظر گرفته شود. جهت مش بندی کانال محاسباتی را به چند محدوده کوچکتر تقسیم نموده سپس تعداد مش‌هایی که در هر بخش باید ایجاد شوده تعریف شده آنگاه نرم افزار به صورت هوشمند شبکه را ایجاد نموده به نحوی که در مجاوت مرز لوله و بستر رسوبی تمرکز مشها بیشتر از سایر نقاط می‌باشد. نظر به اینکه ابعاد مش بر روی دقت نتایج و همگرایی روش حل نیز مؤثر است بنابراین در جهت های متعامد دستگاه مختصاتی، ضریب شکل مش (نسبت بعد مش‌ها) نباید بیش از ۲۰٪ اختلاف داشته باشد که در مدل عددی ارائه شده حداکثر مقدار آن به ۹٪ محدود شده است.



شکل ۲- کانال محاسباتی جریان و شرایط مرزی

در شکل شماره ۲ محدوده محاسباتی همراه با شرایط مرزی مسئله نشان داده شده است. جهت مقایسه نتایج با تحقیقات تجربی که در فلوم آزمایشگاهی انجام شده‌اند کانال محاسباتی به شکل مستطیل به عرض ۶۰ سانتیمتر، طول ۲ متر و با عمقهای ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر (برای دو مدل numeric2 , numric1) می‌باشد و لوله به قطر ۶۰ میلیمتر بر روی لایه ای از رسوب به ضخامت ۱۰ سانتیمتر در وسط کانال قرار دارد. ابعاد کانال به نحوی انتخاب شده است که شرایط مرزی کمترین اثر را روی میدان جریان نزدیک لوله داشته و جریانی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

یکنواخت در مرزهای ورودی و خروجی وجود خواهد داشت. شرایط مرزی محدوده محاسباتی به صورت زیر تعریف شده است:

-ابتدا و انتهای کانال به صورت تناوبی مرز ورودی و مرز خروجی

-دیواره های طرفین کانال و سطوح لوله مرز دیوار غیر لغزشی

-برای سطح آب از شرط مرزی تقارن استفاده شده است.

-جهت شروع فرآیند آبشستگی باید جریان امکان عبور از زیر لوله را داشته باشد به همین دلیل گپ اولیه ای بین لوله و رسوب بستر در نظر گرفته شده که اندازه آن معادل ابعاد یک سلول مش می‌باشد.

-بستر از جنس رسوب فرسایش پذیر با مشخصات زیر:

جدول (۳): مشخصات رسوب بستر

نوع رسوب	d_{50} mm	چگالی نسبی	زاویه ایستایی
ماسه	0/78	2/65	38

در طبیعت جزر و مد به صورت موجی با طول موج بلند می‌باشند که در زمانهای مختلف عمق آب و سرعت جریان تحت تأثیر آن تغییر می‌نماید[۲۹]. در جریان جزر و مدی پارامتری‌های جریان نظیر عمق آب، سرعت و جهت جریان متغیر است. پژوهشگرانی که آبشستگی ناشی از جریان جزر و مدی پیرامون پایه‌های قائم را مورد مطالعه قرار داده‌اند معمولاً اثر هریک از پارامترها را به صورت جداگانه اعمال نموده و نتایج را ثبت نموده‌اند. در این پژوهش جهت مدلسازی عددی پدیده آبشستگی با انجام فرضیاتی معقول، تأثیر پارمترهای فوق بر روند تغییرات پروفیل آبشستگی به صورت جداگانه بررسی شده است. به این منظور مشخصات اساسی جریان که شامل رفت و برگشتی بودن، سرعت و عمق می‌باشد مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به آنالیز ابعادی انجام شده، که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است عمق متوسط مدل عددی متناظر با شرایط واقعی معادل ۵۰ سانتیمتر بوده و دامنه بیشینه جزر و مد معادل ۱۴ سانتیمتر است بنابراین تأثیر عمق جریان بر پدیده در قالب دو مدل عددی جداگانه بر مبنای دو عمق متفاوت ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر متناظر با بیشینه تراز مد و کمینه تراز جزر ولی با سرعت ثابت بررسی شده است. مهمترین وجه تمایز جریان جزر و مدی نسبت به جریان یک سویه، طبیعت رفت و برگشتی آن است که در پایان هر نیم سیکل جهت جریان معکوس خواهد شد. به این منظور در مدل‌های عددی مطابق شکل ۲ فرض می‌شود که سرعت جریان به صورت پله‌ای بوده یعنی به ازای عمق و سرعت جریان ثابت تنها جهت جریان در نیم سیکل‌های متناوب معکوس می‌شود. همچنین با توجه به محاسبات مربوط به آنالیز ابعادی و اعمال قانون عدد فرود جهت تناسب مدل و واقعیت مدت زمان هر سیکل کامل ۸۰۰ ثانیه محاسبه شده که ۴۰۰ ثانیه جهت جریان از سمت راست به چپ و در ۴۰۰ ثانیه بعد جهت جریان معکوس می‌شود.

۴- سرعت جریان متناظر آستانه حرکت و شرایط واقعی

جهت بررسی دقیق آبشستگی موضعی ایجاد شده در زیر لوله ناشی از جریان جزر و مدی فرض شده است که آبشستگی در شرایط آب زلال حادث می‌شود بنابراین تعیین سرعت جریان معادل آستانه حرکت دانه‌های رسوب اهمیت ویژه‌ای دارد. تحت اثر جریان طبیعت حرکت دانه‌های رسوبی تصادفی است به همین دلیل تعیین معیاری دقیق برای آنکه در چه شرایطی جنبش و جهش دانه‌های رسوب شروع می‌شود پیچیده بوده و بستگی به دیدگاه و فرضیات پژوهشگران در این خصوص دارد.

در گام نخست سرعت بحرانی با توجه به نمودار شیلدز اصلاح شده یا روابط ون راین بر اساس پارامتر تنش برشی بحرانی بدون بعد θ_c =۰/۰۳ محاسبه شده است. مقدار سرعت بحرانی متوسط با توجه به رابطه Colebrook -White به صورت زیر محاسبه شده است.

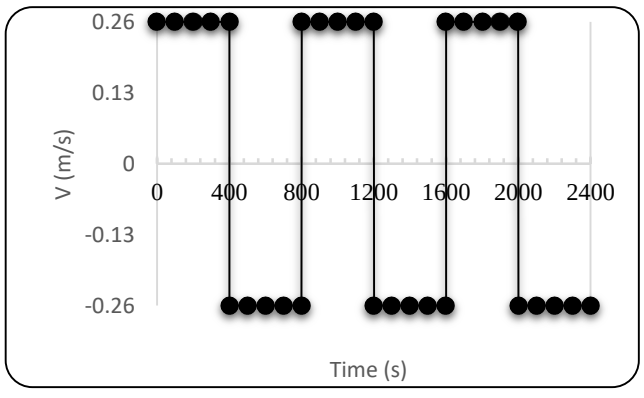
$$\frac{U}{U_f} = 8.6 + 2.5\,ln(\frac{D}{2.5k_b}) \qquad (۱۲)$$

که U= سرعت متوسط جریان آب در کانال است، $U_f =$ سرعت اصطکاکی در روی بستر D= قطر لوله و $k_b =$ زبری بستر می‌باشد که معادل $2.5d_{50}$ در نظر گرفته شده است

$$\theta = \frac{U_f^2}{g(s-1)d_{50}} \qquad (۱۳)$$

با توجه به روابط فوق سرعت معادل آستانه حرکت U=28 cm/s به دست می‌آید.

در گام بعدی سرعت حدی معادل آستانه حرکت با سرعت حداکثر موجود در واقعیت مقایسه می‌شود. بر اساس نتایج جدول ۳ که بر اساس تناسب ابعادی مدل و واقعیت مقیاس ارائه شده است بیشینه سرعت در مدل معادل U=30 cm/s محاسبه شده است که به سرعت آستانه‌ای نزدیک می‌باشد. جهت اطمینان از حاکم بودن شرایط آب زلال در میدان جریان، سرعت جریان معادل ۲۶ cm/s منظور شده است. بدیهی است که اعمال تنش برشی حداکثر متناظر سرعت جریان حدی فوق باعث شدیدترین شکل آبشستگی نسبت به مقادیر کمتر سرعت جریان در سایر حالات خواهد شد.

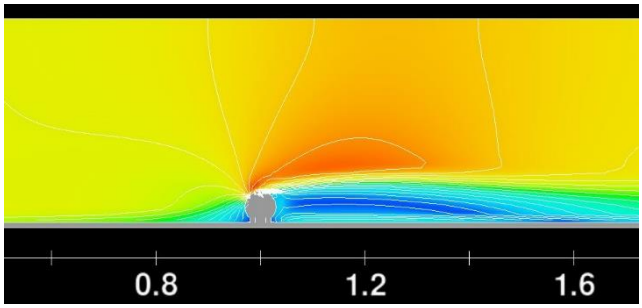


شکل ۳- فرض پله ای جهت مدل نمودن سرعت جریان جزر و مدی

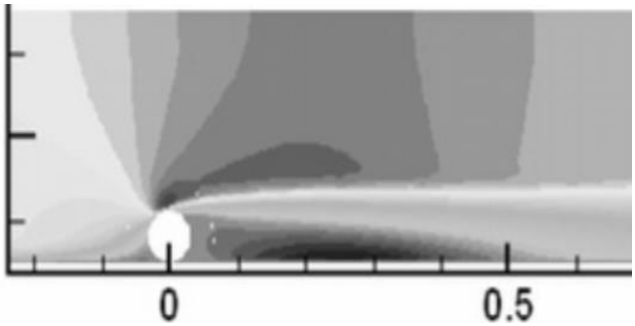
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

۵- صحت سنجی مدل عددی

ارزیابی و صحت سنجی نتایج به دست آمده از مدل عددی با توجه به داده‌های تجربی به دست آمده از کارهای آزمایشگاهی و یا مقایسه آنها با سایر مدل‌های عددی توسعه یافته توسط دیگر پژوهشگران و نهایتاً، کالیبره نمودن مدل عددی ازجمله مهمترین بخشهای تحقیقات مبتنی بر شبیه سازی عددی می‌باشد. در این پژوهش ارزیابی مدل عددی جهت اطمینان از نتایج آن به دو روش انجام شده است. نخست جهت راستی آزمایی نتایج مربوط به هیدرودینامیک مدل عددی با نتایج تجربی تحقیقات عمرانی و همکاران [۳۰] مقایسه شده است. براساس نتایج ایشان که حاصل تحقیق تجربی و شبیه سازی عددی بررسی جدایش جریان در اطراف لوله‌ای به قطر ۶ سانتیمتر که در فلومی به طول ۲ متر و عمق ۴۰ سانتیمتر قرار دارد، طول گردابه پایین دست لوله معادل ۴۵ سانتیمتر محاسبه شده است و در این جا طول گردابه برابر ۴۷ سانتیمتر به دست آمده است که تطابق خوبی میان نتایج عددی پژوهش حاضر و نتایج تجربی وجود دارد.



شکل ۴- میدان جریان اطراف لوله در مدل عددی حاضر



شکل ۵- میدان جریان اطراف لوله در مدل عددی عمرانی[۳۰]

در روش دوم جهت صحت سنجی، نتایج حل عددی مبنای مقایسه عمق گودال آبشستگی ایجاد شده زیر لوله تحت اثر جریان یک سویه می‌باشد. به این منظور عمق آبشستگی به دست آمده برای مدل عددی لوله منفرد تحت جریان دائمی با سه مورد از نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین مطابق جدول ۳ مقایسه شده است.

از این جدول ملاحظه می‌شود که درصد اختلاف بین نتایج مدل عددی و مدلهای فیزیکی کمتر از ۷٪ بوده که رضایت بخش می‌باشد.

جدول (۳): مقایسه نتایج مدل عددی با پژوهش‌های قبلی

پژوهشگر	روش مدلسازی	قطر لوله cm	S/D
حسینی[۲]	مدل فیزیکی	6	0.39
میرعلیزاده[۱۵]	مدل فیزیکی	5	0.40
اسراری[۱۷]	مدل عددی	6	0.42
پژوهش حاضر	مدل عددی	6	0.427

۶- نتایج به دست آمده از مدل عددی

پس از حصول اطمینان از نتایج هیدرودینامیکی و رسوبی مدل عددی که برای شرایط مربوط به جریان یک سویه به دست آمده است در مرحله نهایی شرایط مربوط به جریان جزر و مدی در مدل اعمال گردید. شدت آبشستگی محلی در اطراف خط لوله ناشی از افزایش تنش برشی وارد بر بستر بوده که خود تابعی از سرعت جریان می‌باشد. سرعت جریان در مدل عددی اندکی کمتر از سرعت معادل آستانه حرکت بوده و آبشستگی در شرایط آب زلال اتفاق می‌افتد. واضح است که با اعمال مقادیر سرعت کمتر از ابعاد پروفیل آبشستگی کاهش یافته همچنین هنگامی سرعت جریان از سرعت معادل آستانه حرکت فراتر رود شرایط بستر فعال حادث شده و در سرتاسر کانال محاسباتی فرآیند انتقال رسوب رخ می‌دهد که نتایج مربوط به آبشستگی موضعی در اطراف لوله را تحت تأثیر قرار خواهد داد. در جدول‌های شماره ۴ و ۵ نتایج شبیه سازی عددی برای دو عمق بیشه مد و کمینه جزر برای سه سیکل کامل ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده برای دو پارامتر با اهمیت پروفیل آبشستگی یعنی عمق و عرض گودال در پایان هر نیم سیکل ملاحظه می‌شود که تغییرات پارامترهای فوق در سیکل اول و دوم بسیار شدید بوده به گونه‌ای که در پایان سیکل دوم بیش از ۹۰٪ مقدار معادل تعادل را محقق شده است ولی در ادامه روند تغییرات خیلی کند شده به سمت مقدار حدی معادل شرایط تعادل میل می‌نماید.

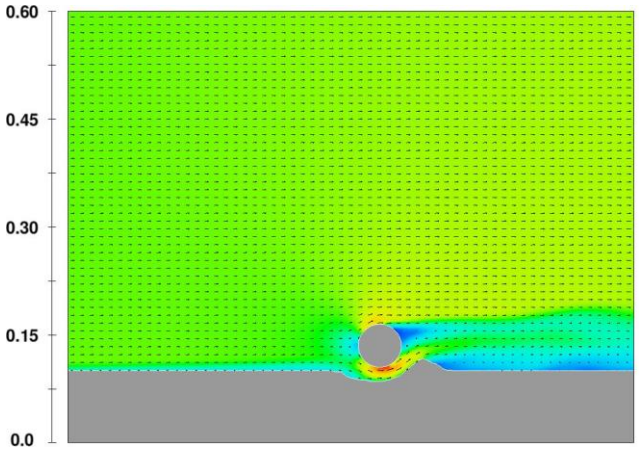
جدول (۴): نتایج مدل عددی numeric1 برای سه سیکل کامل

زمان	sec	400	800	1200	1600	2000	2400
عرض آبشستگی W	mm	199	245	266	287	300	311
W/W_{max}	درصد	64	79	86	92	96	100
عمق آبشستگی S	mm	25/7	27/5	28/3	29	30	31
S/S_{max}	درصد	83	89	91	94	97	100

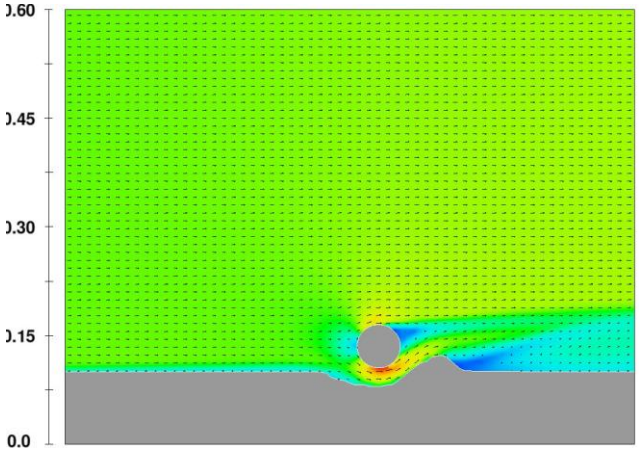
جدول (۵): نتایج مدل عددی numeric2 برای سه سیکل کامل

زمان	sec	400	800	1200	1600	2000	2400
عرض آبشستگی W	mm	205	249	273	295	311	316
W/W_{max}	درصد	65	79	86	93	98	100
عمق آبشستگی S	mm	28	30/5	31/2	32	32/2	33
S/S_{max}	mm^2	85	92	95	97	98	100

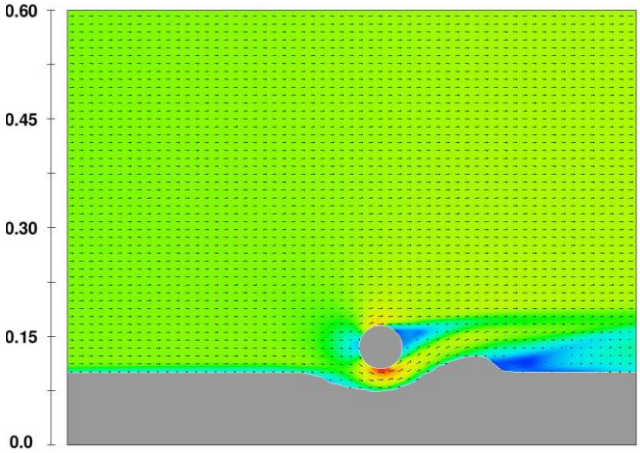
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]



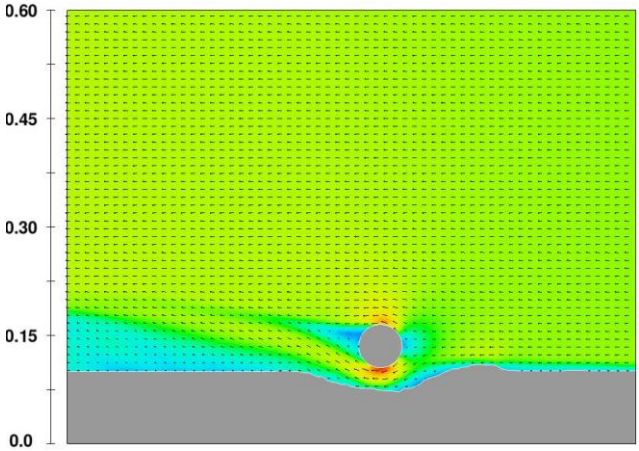
شکل ۶- پروفیل آبشستگی برای t=50 s



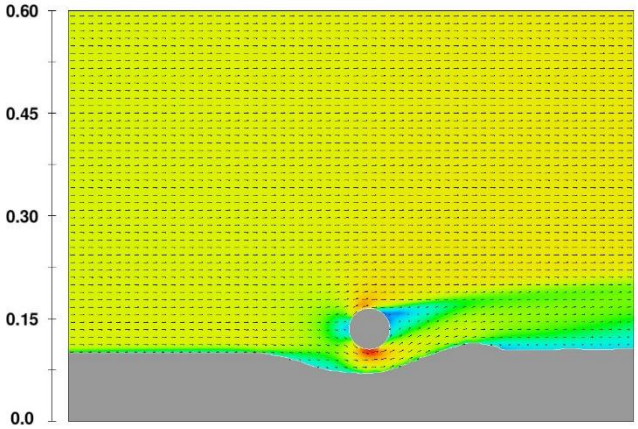
شکل ۷- پروفیل آبشستگی برای t=100 s



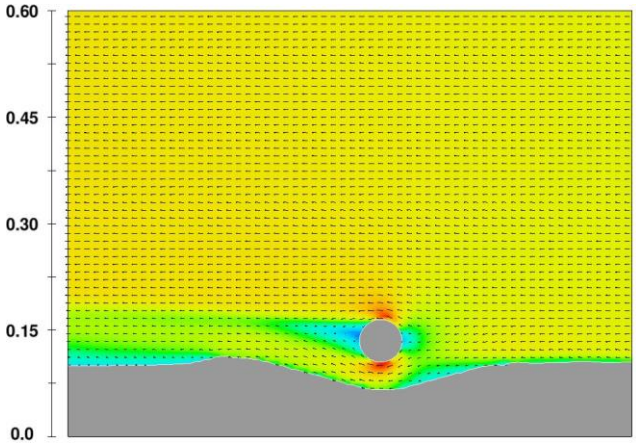
شکل ۸- پروفیل آبشستگی برای t=400 s



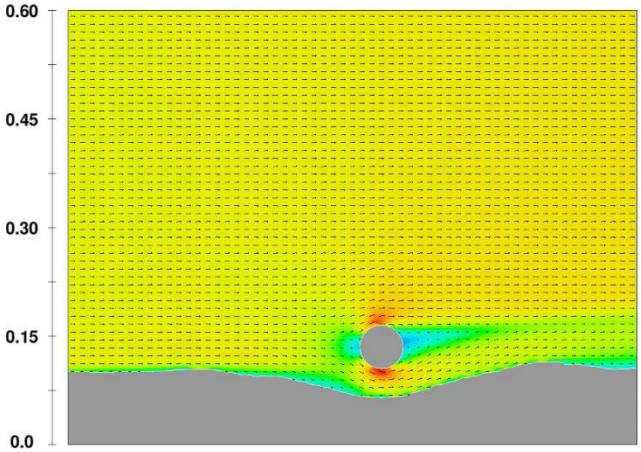
شکل۹- پروفیل آبشستگی برای t=800 s (سیکل اول)



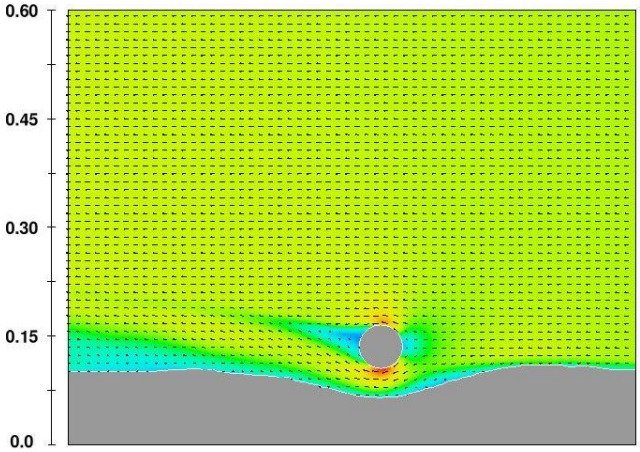
شکل۱۰- پروفیل آبشستگی برای t=1200 s (سیکل دوم)



شکل۱۱- پروفیل آبشستگی برای t=1600 s



شکل۱۲- پروفیل آبشستگی برای t=2000 s



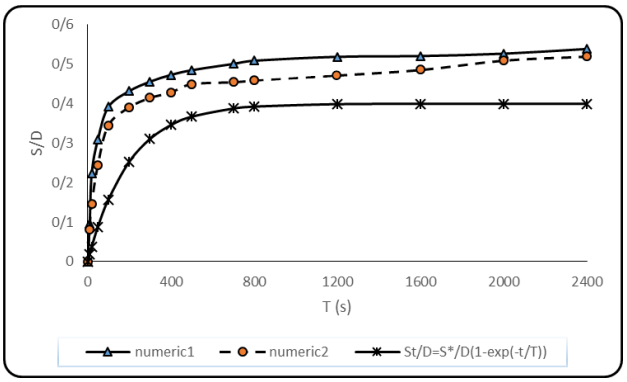
شکل۱۳- پروفیل آبشستگی برای t=2400 s (سیکل سوم)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

در شکل‌های ۳ تا ۱۰تصاویر مربوط به پروفیل آبشستگی محاسبه شده توسط مدل عددی که ناشی از اعمال سه سیکل کامل جزر و مد می‌باشد ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در پایان سیکل سوم جزر و مد تغییرات محسوسی در پروفیل آبشستگی رخ نداده و عملاً فرآیند آبشستگی به حالت تعادل رسیده و گودال مربوطه به فرم نهایی خود می‌رسد.

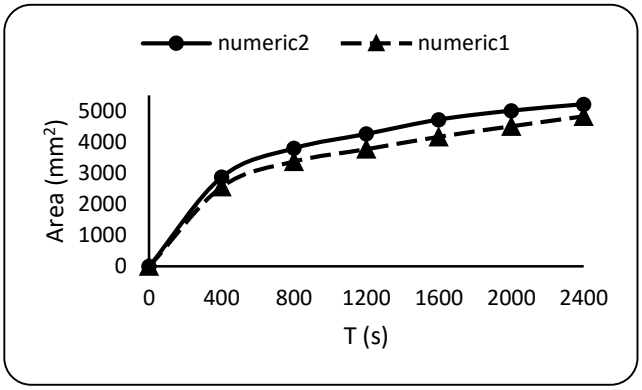
۴ –بررسی کمی پارامترهای آبشستگی ناشی از جزر و مد

در تصاویر ارائه شده از روند سه سیکل جزر و مد می‌توان دریافت که تغییرات پروفیل آبشستگی در جهت قائم در نیم سیکل نخست بسیار شدید بوده و در پایان نیم سیکل اول گودال آبشستگی دارای شیب ملایم در بالادست و شیب تند در پایین دست می‌باشد که مشابه ویژگی‌های پروفیل آبشستگی ناشی از جریان است اما در ادامه که جهت جریان معکوس می‌شود به تدریج از ارتفاع تپه ماسه در پایین دست کاسته شده و شکل گودال رفته رفته به سمت متقارن شدن میل می‌کند.

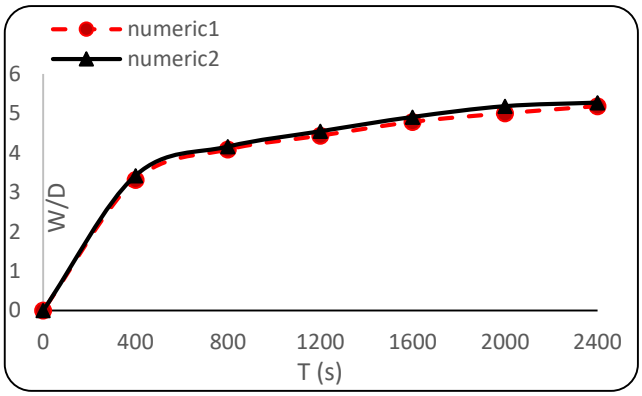


شکل۱۴- تغییرات زمانی عمق نسبی آبشستگی

در شکل ۱۴ نمودار تغییرات عمق نسبی آبشستگی در سه سیکل کامل جزومدی برای عمق‌های (numeric2) ۴۰ و (numeric1) ۶۰ سانتیمتر تحت سرعت جریان ۲۶ سانتیمتر بر ثانیه با نتایج بدست آمده از فرمول تجربی برای جریان یک سویه مقایسه شده و مشاهده می شود عمق آبشستگی حالت تعادل برای جریان جزر و مدی تقریباً ۳۳٪ بیشتر از جریان یک سویه می‌باشد.



شکل۱۵- روند تغییرات مساحت گودال آبشستگی



شکل۱۶- روند تغییرات عرض گودال آبشستگی

با توجه به شکل‌های ارائه شده از روند آبشستگی و نمودار ۱۵ و ۱۶ می توان چنین تفسیر نمود که در شروع فرآیند آبشستگی، تحت اثر فرسایش تونلی تغییرات پروفیل بستر قابل توجه می‌باشد به گونه‌ای که در نیم سیکل نخست بیش از دو سوم و در پایان سیکل اول معادل ۷۶٪ از عمق آبشستگی نهایی محقق می‌شود در پایان سیکل دوم ۹۳٪ از عمق آبشستگی نهایی حادث شده است. به عبارت دیگر فشردگی جریان، ناشی از حضور لوله که موجب افزایش بزرگای تنش برشی موضعی وارد بر رسوبات بستر شده است، با خالی شدن زیر لوله طی سیکل‌های اول و دوم به شرایط پیش از حضور لوله بر می‌گردد. بنابراین روند تغییرات نمودار عمق نسبی آبشستگی نسبت به زمان تأیید می‌نماید که فرض اولیه مبنی بر اعمال جریان جزر و مدی طی سه سیکل کامل جهت رسیدن به حالت تعادل فرآیند آبشستگی به طور نسبی صحیح بوده است.

اگر چه در سیکل‌های دوم و سوم تغییرات عمق آبشستگی ناچیز است لیکن پروفیل آبشستگی به صورت طولی گسترش یافته به نحوی که حجم رسوبات خالی شده از زیر لوله قابل توجه بوده و مساحت گودال آبشستگی گسترش می‌یابد. این مرحله حاکی از حاکم شدن پدیده گردابه فکنی بر روند پیشرفت طولی شکل پروفیل آبشستگی بوده و معکوس شدن جهت جریان نیز باعث تشدید اثر گردابه‌ها در این مرحله می‌شود.

در نمودارهای شماره ۱۵ و۱۶ روند گسترش طولی و مساحت گودال آبشستگی در بازه های زمانی از سه سیکل کامل جزر و مدی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد سیکل‌های جزر و مد تحت اثر عملکرد گردابه‌ها، عرض گودال آبشستگی و مساحت آن به طور محسوسی افزایش می‌یابد. مساحت گودال در پایان نیم سیکل نخست تنها ۳۸٪ از مساحت گودال در پایان سیکل سوم می‌باشد. در حالی که عمق بیشینه گودال به دلیل فرآیند فرسایش تونلی تا پایان سیکل نخست محقق شده است لیکن گسترش طولی گودال در سیکل‌های دوم و سوم قابل توجه بوده و مساحت گودال در پایان سیکل سوم اندکی کمتر از دو برابر سیکل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

اول می‌باشد. گسترش عرضی گودال آبشستگی از آن جهت اهمیت دارد که باعث می شود که در صنایع فراساحلی با گذشت زمان هزینه مربوط به نگهداری از خط لوله و بازسازی و ترمیم گودال ناشی از آبشستگی ایجاد شده در بستر آن به نحو قابل ملاحظه ای افزایش یابد.

۵ - نتیجه گیری

جریانهای جزر و مدی به صورت مداوم و مستمر در طول شبانه روز در دریاهای آزاد وجود داشته و در خلیج ها، تنگه ها و آبراه‌های باریک، رژیم جریان غالب بوده و بسیار نیرومند می‌باشند. با توجه به مطالب ارائه شده اهم نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح ذیل هستند:

۱- در جریان یک سویه عمق گودال آبشستگی در زیر خط لوله اغلب متأثر از فرآیند فرسایش تونلی می باشد اما در جریان جزر و مدی به دلیل معکوس شدن متناوب جهت جریان، مرحله گردابه فکنی شدیدتر بوده و عمق گودال آبشستگی نسبت به جریان یک سویه بیش از یک سوم افزایش داشته که حاکی از شدیدتر بودن فرآیند آبشستگی ناشی از جزر و مد نسبت به جریان یک سویه است.

۲- در سیکل نخست، بخش عمده‌ای از عمق نهایی آبشستگی محقق شده لیکن در سیکل های دوم و سوم تحت اثر فرآیند گردابه فکنی عرض و مساحت پروفیل آبشستگی به شدت افزایش می‌یابد.

۳- گودال آبشستگی ناشی جریان جزر و مدی بر خلاف جریان یک سویه تقریباً متقارن بوده و شیب آن در هر دوسمت (بالادست و پایین دست) ملایمتر می‌باشد.

۴- پروفیل طولی آبشستگی در جریان یک سویه طی مدت زمان مشخصی به حالت تعادل می رسد اما در جریان جزر و مدی پس از تعداد سیکل‌های مشخصی (در این پژوهش سه سیکل) پروفیل آبشستگی متناظر حالت تعادل حاصل می‌شود. یعنی در جریان جزر و مدی علاوه بر مدت زمان برقرای جریان، تعداد سیکلهای مربوطه نیز اهمیت دارد. در شرایط واقعی عملاً طی چند شبانه روز پس از استقرار خط لوله بر بستر ماسه‌ای دریا بخش قابل توجهی از عمق معادل حالت تعادل اتفاق خواهد افتاد بنابراین تمهیدات لازم جهت محافظت از خط لوله در مقابل آبشستگی باید بلافاصله پس از عملات لوله گذاری انجام شود.

۵-به ازای سرعت جریان ثابت با کاهش عمق جریان، شدت آبشستگی ناشی از جریان رفت و برگشتی جزر و مد بیشتر شده و شرایط مربوط به حال تعادل در تعداد سیکل کمتری محقق می‌شود لیکن در شرایط آب عمیق آبشستگی به تدریج و طی مدت زمان طولانی‌تر به حالت تعادل می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گیری نمود که در نواحی کم عمق‌تر فرسایش ناشی از جز و مد بیشتر خواهد بود.

۶ – مراجع

1. H. Motamedi, Director of Discovery of National Iranian Oil Company, An overview of the history of hydrocarbon discoveries in Iran. "In Persian"
2. D. Hosseini and H. Hakimzadeh, R. Ghiassi (2007), “Investigation of local scour process around pipelines using the numerical and physical models”, Journal of marine Eng.,Vol. 3, No. 5, pp 37-52,"In Persian"
3. B. M. Sumer, C. Truelsen, T. Sichmann and J. Fredsoe (2001), “Onset of scour below pipelines and selfburial.” Coast. Engrg, ASCE, Vol. 42, No. 4, pp 313-335.
4. B. M. Sumer (2004), “Physical and mathematical modelling of scour.” Proc., 2th ICSE, Singapore.
5. B. M. Sumer and J. Fredsoe (1999), “Scour around marine structures.” Advances in coastal and ocean Engrg, Vol. 4, pp 200-245.
6. B. M. Sumer and J. Fredsoe (2002), “The mechanics of scour in the marine environment.” World Scientific, Vol. 17, pp 5-136.
7. B. Brors (1999), “Numerical modeling of flow and scour at pipelines.” J. Hyd. Engrg, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp 511-525.
8. F. Li and L. Cheng. (1999), “Numerical model for local scour under pipeline.” J. Hydraulics Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 4, 400-406.
9. F.A. Vanbeek and H.G. Wind (1990), “Numerical modelling of erosion and sedimentation around offshore pipelines” Coastal Engineering, 14 pp 107-128.
10. C. Jo, Lee, Y. S. Shin, S. G. Hong and Min, K. H. (2002), “Numerical and experimental study of offshore pipeline stability in trench.” J. Wtrway., Port, Coast. And Oc. Engrg, ASCE, Vol.128, No.6, pp 258-270.
11. N. D. Rahayu, A. Wisudawan and H. Ikhwani (2017), “Experimental study of pipeline scouring on seabed in-trench conditions under regular wave motion” International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 8, Issue 10, pp. 659–666, Article ID: IJCIET_08_10_069.
12. Y. Fei , G. J. Ning , J. Kizhikkilod, T. S. Le and D. Zhao, (2004), “The Hangzhou bay pipel in crossing project-use of spoiler to initiate pipeline self-burial and re-initiate future re-burial.” Proc., 2th ICSE, Singapore.
13. K. Yew (2007) “Three dimensional scour along pipeline” PHD Thesis UWA.
14. Z. Bai, R. Lv and R. Meng (2013) “Experimental investigation on scour around marine pipeline in silt bed by jet trenching” Applied Mechanics and Materials Vols 256-259 pp 1956-1959.
15. B. Yang, T. Yang, J. L. Ma and J. S. Cui (2013) “ The experimental study on local scour around a circular pipe under vortex-induced vibration in steady

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]

flow" Journal of Marine Science and Technology, Vol. 21, No. 3, pp. 250-257
16. Z. Zhang and B. Shi (2014)"Numerical simulation of local Scour around underwater pipeline" EJGE Vol. 45, No. 6, pp. 8893–8903.
17. M. Mir Alizadeh, M. Lotfollahi Yaqin, A. Hosseinzadeh Delir, H. Hakimzadeh, Habib (2012). "Investigating the scouring process problem around marine pipelines by considering the impervious sheet under the pipeline". Omran Modares Journal (2017), Volume 13 Issue 3, Page 125-132. "In Persian"
18.S. Asrari, H. Hakimzadeh (2021), "Investigation on the local scoure beneath piggyback pipelines under clear-water conditions, China oceanEng. , Vol 35, No. 3, P. 422-431.
19. M. Mousavi, A.Yaganeh Bakhtiari (2004). "Scour depth prediction around submarine pipelines under the influence of flow", 7th International Congress of Civil Engineering, Tarbiat Modares University. "In Persian"
20. C. Chen and J. Zhang (2009)" A reviow on scour modeling below pipeline" Pipelines 2009 ASCE, pp. 1019-1028
21. M. Golparvar Fard, A. Yeganeh-Bakhtiary and L. Cheng (2005) "Numerical simulation of stedy current below offshore pipeline near plane boundary" International Journal of Civil Engineering, Vol. 3, No.1
22. K. E. Porter (2012), "Seabed scour around marine structures in mixed and layered sediments" Phd Thesis. Univ. College London.
23. A. Schendel, A. Hildebrandt, T. Schlurmann (2016) "Experimental study on the progression of scour around a monopile in unidirectional and tidal currents" Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16) Ottawa, Canada,
24. W. Yao, H. An, S. Draper, L. Cheng, M. Zhao, J. S. Jesudoss and G. Tang (2016), "Experimental study of local scour around piles in tidal current" 20th Australasian Fluid Mechanics Conference Perth, Australia.
25. J. A. Vasquez and B. W. Walsh (2009), "CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow" 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment.
26. D. R. Fuhrman , C. Baykal, B. M. Sumer, N. Jacobsen, J. Fredsøe (2014) "Numerical simulation of wave-induced scour and backfilling processes beneath submarine pipelines" Coastal Engineering 94 pp10–
27. B.M. Sumer (2007) "Mathematical modelling of scour" Journal of Hydraulic Research Vol. 45, No. 6, pp. 723–735
28. Z. Zhang and B. Shi (2016)" Numerical simulation of local scour around underwater pipeline based on FLUENT software" Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 9, No. 2, pp. 711-718.
29. W. Rodi (1993), "Turbulence models and their application in hydraulics." IAHR Monographs.
30. S. Omrani and H. Hakimzadeh. (2009) "Numerical and experimental investigation of flow separation phenomenon around smi-buried pipelines due to steady currents" Journal of marine Eng.,Vol. 4, No. 8, pp 65-76,"In Persian"
31. Z. Zhang, Y. Yang (2015) "Numerical study on onset condition of scour below offshore pipeline under reversing tidal flow" EJGE VOL. 20 pp 11660-11671.
32. J. M. Harris, R. Whitehouse and T. Benson (2010), "The time evaluation of scour around offshore structures" HR Wallingford ICSE Volume 163, pp3-
33. A.W. Nielsen and E.A. Hansen (2007), "Time-varing wave and current-induced scour around offshore wind turbins" Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE2007.
34. D. Myrhaug, P. Fu and M. C. Ong (2017), "Scour below pipelines due to random waves alone and random waves plus currents on mild slopes" Ocean Systems Engineering, Vol. 7, No. 3, pp 275-298.
35. J. Sutherland and R. J. S. Whitehouse (1998), "Scale effect on the physical modeling of sea bed scour" HR Wallingford, Report TR 64.
36. J.M. Nunez Rattia, J.R. Percival, B. Yeager, S. Neethling & M.D. Piggott. (2016) "Numerical simulation of scour below pipelines using flexible mesh methods" 8th ICSE, OXFORD, UK,
37. F. Gao, B. Yang, Y. Wu, S. Yan (2006)"Steady current induced seabed scour around a vibrating pipeline" Applied Ocean Research 28 pp 291–298.
38. H. Jiang, L. Cheng, H. An (2016) Numerical modeling of local scour below a pipeline in currents Proceeding of the Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece,
39. B. E. Larsen, D. R. Fuhrman, B. M. Sumer (2016)"Simulation of wave-plus-current scour beneath submarinepipelines" Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.
40. M.Saber, K. M. Saqr, A. A. Hassan and M. A. Kotb (2017)" Numerical simulation of the flow around a subsea pipeline with different protection methods" J Engineering for the Maritime Environment, Vol. 231(1) 188–199.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.1.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.1]