

## شبیه سازی پدیده آبشستگی در اطراف خطوط لوله تحت اثر جریان های جزر و مدی

داریوش حسینی<sup>۱</sup>، حبیب حکیم زاده<sup>۲\*</sup>، رضا غیاثی<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز، d\_hosseini@sut.ac.ir<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز، hakimzadeh@sut.ac.ir<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده فنی دانشگاه تهران، rghiassi@ut.ac.ir

## چکیده

جزر و مد به صورت مداوم باعث تغییر تراز آب در دریاهای آزاد می گردد 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 سازه های واقع در نواحی فوق بیش از پیش روشن می گردد. در این پژوهش با شبیه سازی عددی میدان جریان و انتقال رسوب، پدیده آبشستگی در زیر خطوط لوله ناشی از جریان های رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفته و به ازای مقادیر سرعت حدی معادل آستانه حرکت دانه های 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.

## اطلاعات مقاله

ناریخچه 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

## Simulation of scour beneath pipeline due to tidal currents

D. Hosseini<sup>1</sup>, H. Hakimzadeh<sup>2\*</sup>, R. Ghiasi<sup>3</sup><sup>1</sup> Phd student, Sahand university of technology Tabriz; d\_hosseini@sut.ac.ir<sup>2</sup> Phd Professor, Sahand university of technology Tabriz; hakimzadeh@sut.ac.ir<sup>3</sup> 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.

## ۱ - مقدمه

با گسترش صنایع و رشد سریع نیاز به سوخته های فسیلی از جمله نفت خام و گاز طبیعی، مخازن موجود در خشکی ها 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 لایه های 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 پالایشگاه ها 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 قرار دارند که از جمله این مزیتها عبارتند از: تأثیر ناچیزی بر محیط زیست دارند، در آبهای بسته نظیر دریای خزر یا کم عمق (خلیج ها 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 شده اند در برابر حوادث و تصادف ها از امنیت بیشتری برخوردارند. از لحاظ اقتصادی نیز استفاده از خطوط لوله در بلند مدت به صرفه تر است [۲].

سه عامل مهم تأثیر گذار بر هیدرو دینامیک دریاها عبارتند از: جزر و مد، امواج و تغییرات چگالی آب. هر کدام از آنها مقیاس زمانی مختص به خود را دارند. جزر 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 می شود به صورت یک موج ثقیلی در نظر گرفت که باعث تغییرات تناوبی تراز آب دریا می شود و جریان جزر و مدی، جریانی غالباً افقی است که حاصل جزر و مد است. هنگامی که امواج جزر و مدی به سواحل و خورها می رسند، دامنه آنها می تواند در اثر هجوم آب، تنگ شدن آبراه و ایجاد رزنانس به طور قابل ملاحظه ای افزایش یابد. طبق بررسی های 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 می رسد. بنابراین جریان های جزر و مدی بسیار قوی بوده و لذا تأثیرات زیادی بر فرآیند های هیدرو دینامیک 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 می توان به آبشستگی محلی در اطراف سازه های موجود در محیط دریا اشاره نمود. بررسی و مطالعه پدیده آبشستگی موضعی

در اطراف خطوط لوله تحت اثر جریان یک سو به از دهه پایانی قرن بیستم آغاز گردید و در ادامه برای امواج و ترکیب این دو توسعه یافت. سامر، فردسو و چو [۴ و ۵] پژوهش های 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 قرار دادند.

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 روابلی عمق آبشستگی ناشی از جریان ارائه نمودند. |
| Mao[6]             | ۱۹۸۶  | نقش گردابه ها در آبشستگی زیر لوله بررسی گردید.                                                |
| Chew[6]            | ۱۹۹۰  | با استفاده از مدل فیزیکی فرمول هایی 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& [8]Li       | 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 ترنج تحلیل شد.                                  |
| Rahayu[11]         | ۲۰۱۷  | آبشستگی در اطراف لوله بر بستر و ترنج مطالعه شد.                                               |
| Fei [12]           | ۲۰۰۶  | آبشستگی در زیر لوله در خلیج هانزو 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 سیلانی بررسی شد.                                                  |
| Yang [15]          | ۲۰۱۳  | پدیده آبشستگی تحت اثر جریان در اطراف لوله با دهانه آزاد بررسی گردید.                          |
| Zhang [16]         | ۲۰۱۵  | توسعه پروفیل آبشستگی و مقیاس زمانی آن تحت جریان متغیر تدریجی بررسی گردید.                     |
| میرعلیزاده [۱۷]    | ۱۳۹۲  | آبشستگی در اطراف لوله ساید بایساید مطالعه گردید.                                              |
| اسراری، [۱۸]       | ۲۰۲۱  | الگوی آبشستگی اطراف لوله های مرکب مطالعه شد.                                                  |
| موسوی، [۱۹]        | ۱۳۸۴  | عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله بررسی شد.                                                        |
| [20] Chen          | ۲۰۰۹  | چکیده مطالعات پیشین آبشستگی ارائه شده است                                                     |
| گلپورفرد [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 می توان به کارهای انجام شده توسط حسینی و همکاران [۲]، میرعلیزاده و همکاران [۱۷] و یگانه بختیاری و همکاران [۲۱ و ۱۹] اشاره نمود. در جدول شماره ۱ فهرستی از کارهای انجام شده در این مورد ارائه گردیده است.

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 محاسباتی و استفاده از مدل‌های عددی جهت تحلیل و مدلسازی پدیده آبشستگی بیش از دو دهه است که آغاز گردیده و طی این مدت پیشرفت‌های مطلوبی داشته است. [۲۷] پدیده آبشستگی فرآیندی است که ناشی از اندرکنش خط لوله، بستر فرسایش پذیر و جریان می‌باشد. بنابراین تحلیل آن نیازمند شناخت دو سری معادلات است، 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 بر اساس مشخصات هیدرودینامیکی به دست آمده برای ناحیه مطالعاتی، معادلات انتقال رسوب حل گردند. در پدیده آبشستگی به دلیل بزرگ بودن عدد رینولدز جریان آشفته همراه با گردابه‌هایی در پیرامون سازه است بنابراین جهت مدلسازی آن باید از مدل‌های آشفتگی استفاده نمود. اصولاً 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 می‌شوند: (۱) معادلات حاکم بر جریان آب و (۲) معادله انتقال رسوب. که در اینجا به صورت خلاصه به بیان هریک از آنها پرداخته می‌شود.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱) \text{ معادله پیوستگی}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \quad (۲) \text{ معادله مومنتم}$$

$$\nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) c g \delta_{i3}$$

با استفاده از مدلسازی عددی و فیزیکی پژوهش‌های متعددی جهت روشن شدن ابعاد این پدیده انجام داده‌صص.اند که اهم موضوعات آنها عبارتند از: نحوه آغاز آبشستگی و چگونگی 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 رودخانه‌ها صدق می‌نماید لیکن در محیط دریاها، جریان‌های جزر و مدی که دارای الگوی رفت و برگشتی می‌باشند حاکمیت داشته و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند که با توجه به پیچیدگی آنها نسبت به جریان منفرد، به دلیل متغیر 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 جریان‌های 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 و مد پیرامون پایه‌ها.

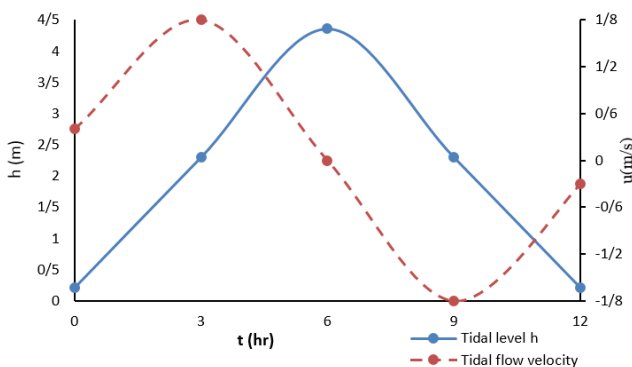
| پژوهشگر  | مرجع | خلاصه پژوهش                                                                                    |
|----------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Porter   | [۲۲] | با استفاده از مدل فیزیکی آبشستگی ناشی از جزر و 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 شمع‌ها 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

### 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 می باشد 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 متغیر است. بیشینه سرعت جریان در خور موسی واقع در ماهشهر ۲ و در خور خوران (کانال قشم) ۱/۸ متر بر ثانیه می باشد البته مقادیر سرعت جریان در هنگام جزر بیشتر از زمان وقوع مد می باشد 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 می باشد. جهت مطالعه موردی کانال قشم (خور خوران) که دامنه جزر و مد و سرعت جریان در این محدوده قابل توجه می باشد 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 می شود 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 می گردد مقدار سرعت حداکثر بوده و در بیشینه تراز مد (HHWL) و کمینه تراز جزر (LLWL) مقدار سرعت نزدیک به صفر می باشد. در محدوده خور خوران عمق متوسط آب ۱۵ متر و جزر و مد به صورت نیم روزانه (با دوره بازگشت ۱۲ ساعته) می باشد.



شکل ۱- نمودار تغییرات تراز آب و سرعت جریان جزر و مد خور خوران

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

در معادلات بالا  $u_i$  مولفه های سرعت جریان در جهت محورهای مختصات،  $p$  فشار و  $\rho$  چگالی سیال (آب) می باشند معادله بقای جرم رسوب

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u_j - w_s \delta_{j3}) \frac{\partial c}{\partial x_j} = - \frac{\partial c' u'_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

شارهای مومنتوم و رسوب مرتبط با گرادیانهای تقریبی های بوسینسک می باشند.

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4)$$

که در آنها  $\nu_T$  ویسکوزیته آشفته گی و  $k$  انرژی جنبشی آشفته گی می باشد.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_k u'_k} \quad (5)$$

برای بستن دستگاه معادلات بالا مدل  $k-\epsilon$  مد نظر قرار می گیرد. این مدل شامل دو معادله اضافی می باشد یکی برای  $k$  و دیگری برای  $\epsilon$  نرخ استهلاک [۲۹]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_c} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P + G - \epsilon \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = & - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_c} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \\ & + (C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} P + C_{\epsilon 3} \max(0, G)) \frac{\epsilon}{k} \\ \nu_T = & \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$P = \nu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$G = \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) c g \frac{\nu_T}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial x_3} \quad (10)$$

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

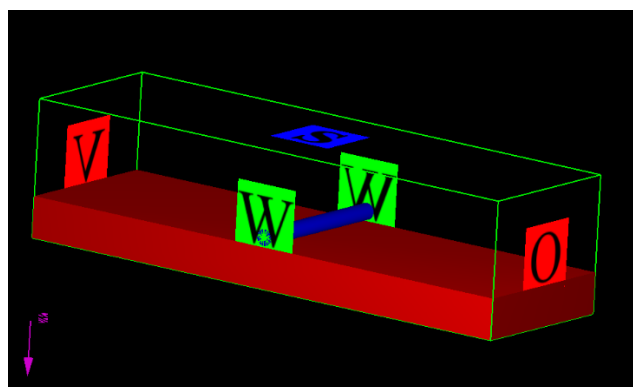
$$q_0 = 12 \sqrt{g(\rho_s/\rho_f - 1) d^3} (\theta - \theta_{cr}) \theta^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

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

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 کوتاه تر می باشد.

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 متغیر 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 کارترزین و استوانه‌ای صورت می‌گیرد 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 شده تعریف شده آنگاه نرم افزار به صورت هوشمند شبکه را ایجاد نموده به نحوی که در مجاورت 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 numeric1, numeric2) 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

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

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

#### 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 سو به 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 روش‌های 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

#### 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 می شود بنابراین تعیین سرعت جریان معادل آستانه حرکت دانه های رسوب اهمیت ویژه ای دارد. تحت اثر جریان طبیعت حرکت دانه های رسوبی تصادفی است به همین دلیل تعیین معیاری دقیق برای آنکه در چه شرایطی جنبش و جهش دانه های رسوب شروع می شود پیچیده بوده و بستگی به دیدگاه و فرضیات پژوهشگران در این خصوص دارد.

در گام نخست سرعت بحرانی با توجه به نمودار شیلدرز اصلاح شده یا روابط ون راین بر اساس پارامتر تنش برشی بحرانی بدون بعد  $\theta_c = 0.03$  محاسبه شده است. مقدار سرعت بحرانی متوسط با توجه به رابطه Colebrook-White به صورت زیر محاسبه شده است.

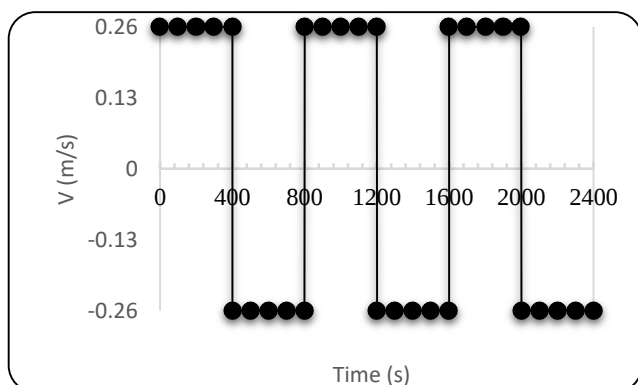
$$\frac{U}{U_f} = 8.6 + 2.5 \ln\left(\frac{D}{2.5k_b}\right) \quad (12)$$

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

$$\theta = \frac{U_f^2}{g(s-1)d_{50}} \quad (13)$$

با توجه به روابط فوق سرعت معادل آستانه حرکت  $U=28 \text{ cm/s}$  به دست می آید.

در گام بعدی سرعت حدی معادل آستانه حرکت با سرعت حداکثر موجود در واقعیت مقایسه می شود. بر اساس نتایج جدول ۳ که بر اساس تناسب ابعادی مدل و واقعیت مقیاس ارائه شده است بیشینه سرعت در مدل معادل  $U=30 \text{ cm/s}$  محاسبه شده است که به سرعت آستانه ای نزدیک می باشد. جهت اطمینان از حاکم بودن شرایط آب زلال در میدان جریان، سرعت جریان معادل  $26 \text{ cm/s}$  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

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 می باشد.  
-بستر از جنس رسوب فرسایش پذیر با مشخصات زیر:

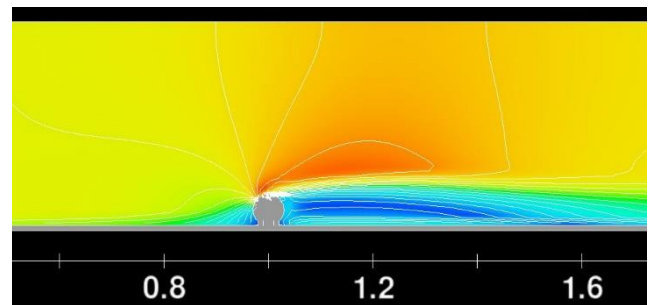
جدول (۳): مشخصات رسوب بستر

| نوع رسوب | $d_{50} \text{ mm}$ | چگالی نسبی | زاویه ایستایی |
|----------|---------------------|------------|---------------|
| ماسه     | 0/78                | 2/65       | 38            |

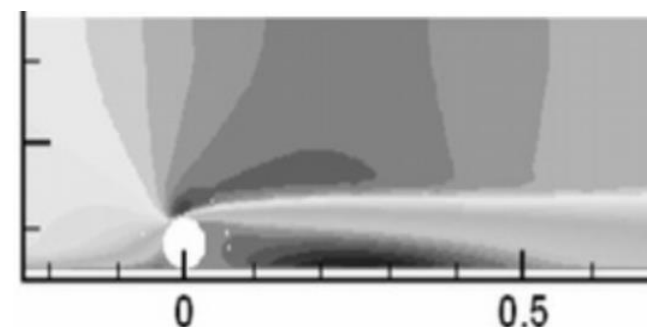
در طبیعت جزر و مد به صورت موجی با طول موج بلند می باشند که در زمانهای مختلف عمق آب و سرعت جریان تحت تأثیر آن تغییر می نماید [۲۹]. در جریان جزر و مدی پارامتری های جریان نظیر عمق آب، سرعت و جهت جریان متغیر است. پژوهشگرانی که آبشستگی ناشی از جریان جزر و مدی پیرامون پایه های قائم را مورد مطالعه قرار داده اند معمولاً اثر هریک از پارامترها را به صورت جداگانه اعمال نموده و نتایج را ثبت نموده اند. در این پژوهش جهت مدلسازی عددی پدیده آبشستگی با انجام فرضیاتی معقول، تأثیر پارامترهای 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 می باشد 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 مدل های عددی مطابق شکل ۲ فرض می شود که سرعت جریان به صورت پله ای بوده یعنی به ازای عمق و سرعت جریان ثابت تنها جهت جریان در نیم سیکل های متناوب معکوس می شود. 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 می شود.

## 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 از جمله 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 سوپه 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

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

## ۶- نتایج به دست آمده از مدل عددی

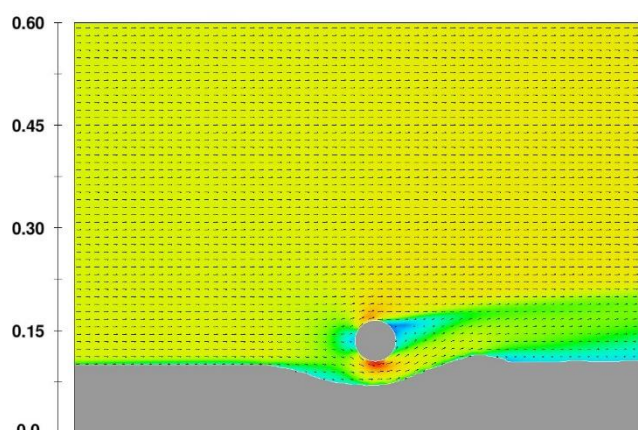
پس از حصول اطمینان از نتایج هیدرودینامیکی و رسوبی مدل عددی که برای شرایط مربوط به جریان یک سوپه به دست آمده است در مرحله نهایی شرایط مربوط به جریان جزر و مدی در مدل اعمال گردید. شدت آبشستگی محلی در اطراف خط لوله ناشی از افزایش تنش برشی وارد بر بستر بوده که خود تابعی از سرعت جریان می‌باشد. سرعت جریان 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

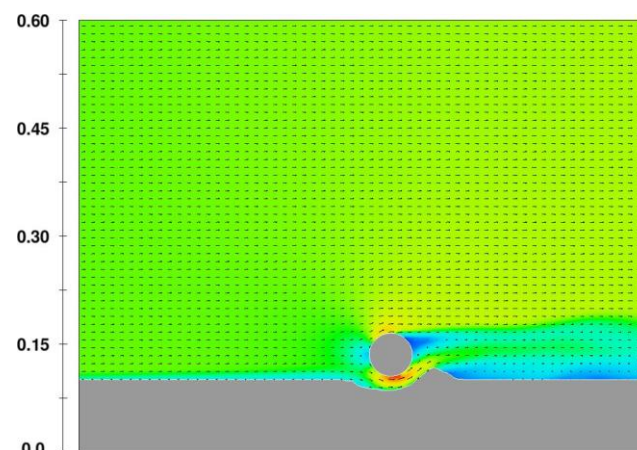
| زمان                    | sec | 400  | 800  | 1200 | 1600 | 2000 | 2400 |
|-------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| عرض آبشستگی W           | mm  | 199  | 245  | 266  | 287  | 300  | 311  |
| درصد W/W <sub>max</sub> |     | 64   | 79   | 86   | 92   | 96   | 100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

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

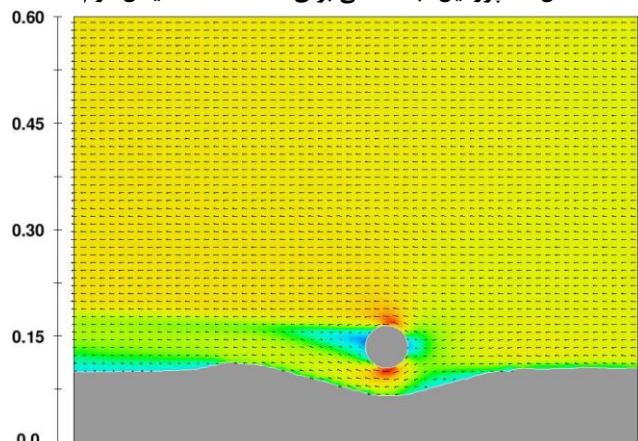
| زمان                    | sec             | 400 | 800  | 1200 | 1600 | 2000 | 2400 |
|-------------------------|-----------------|-----|------|------|------|------|------|
| عرض آبشستگی W           | mm              | 205 | 249  | 273  | 295  | 311  | 316  |
| درصد W/W <sub>max</sub> |                 | 65  | 79   | 86   | 93   | 98   | 100  |
| عمق آبشستگی S           | mm              | 28  | 30/5 | 31/2 | 32   | 32/2 | 33   |
| S/S <sub>max</sub>      | mm <sup>2</sup> | 85  | 92   | 95   | 97   | 98   | 100  |



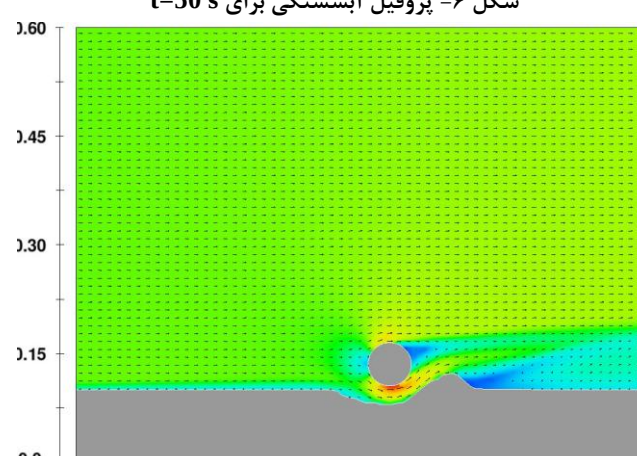
شکل ۱۰- پروفیل آبستگی برای  $t=1200$  s (سیکل دوم)



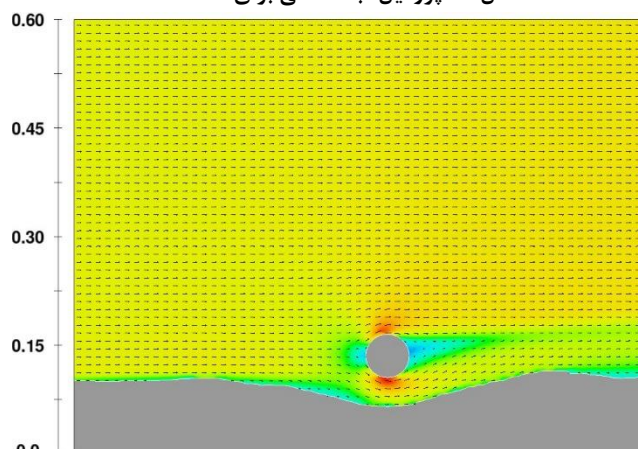
شکل ۶- پروفیل آبستگی برای  $t=50$  s



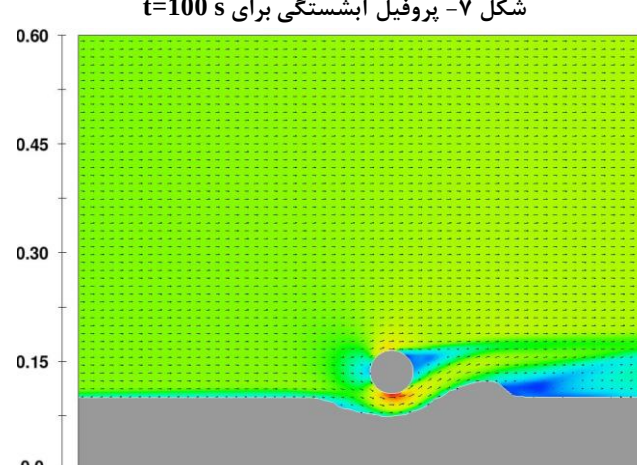
شکل ۱۱- پروفیل آبستگی برای  $t=1600$  s



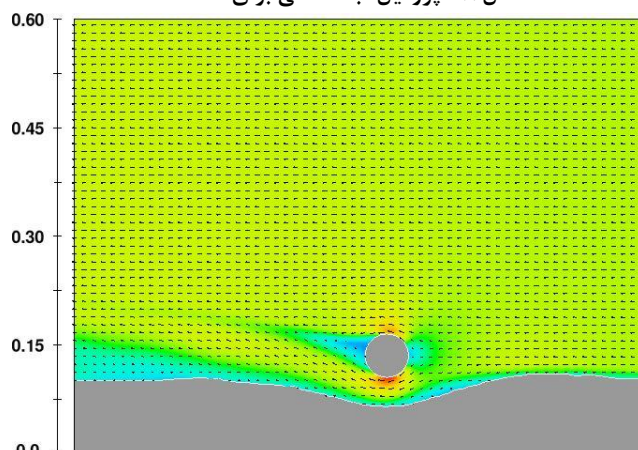
شکل ۷- پروفیل آبستگی برای  $t=100$  s



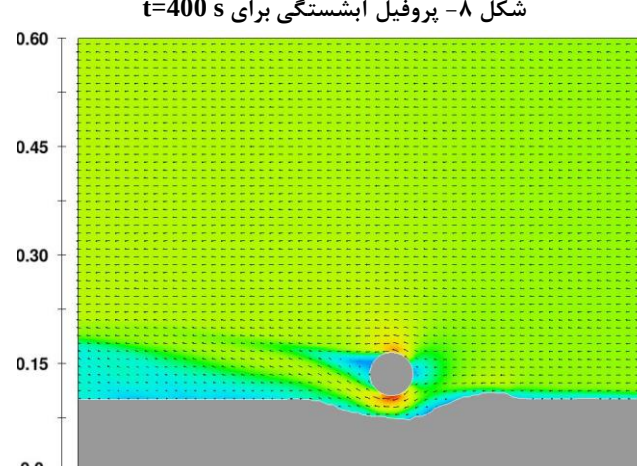
شکل ۱۲- پروفیل آبستگی برای  $t=2000$  s



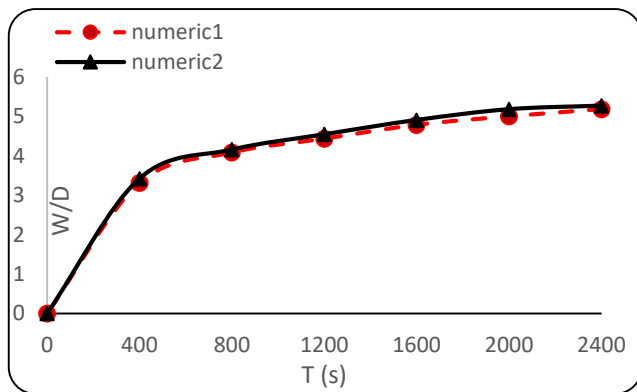
شکل ۸- پروفیل آبستگی برای  $t=400$  s



شکل ۱۳- پروفیل آبستگی برای  $t=2400$  s (سیکل سوم)



شکل ۹- پروفیل آبستگی برای  $t=800$  s (سیکل اول)



شکل ۱۶- روند تغییرات عرض گودال آبشستگی

با توجه به شکل‌های ارائه شده از روند آبشستگی و نمودار ۱۵ و ۱۶ می‌توان 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.

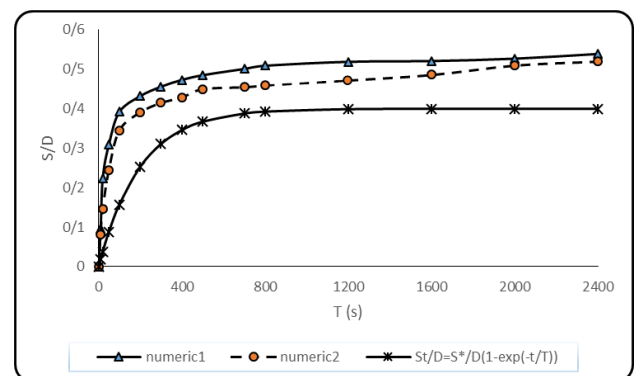
اگر چه در سیکل‌های دوم و سوم تغییرات عمق آبشستگی ناچیز است لیکن پروفیل آبشستگی به صورت طولی گسترش یافته به نحوی که حجم رسوبات خالی شده از زیر لوله قابل توجه بوده و مساحت گودال آبشستگی گسترش می‌یابد. این مرحله حاکی از حاکم شدن پدیده گردابه فکنی بر روند پیشرفت طولی شکل پروفیل آبشستگی بوده و معکوس شدن جهت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

در نمودارهای شماره ۱۵ و ۱۶ روند گسترش طولی و مساحت گودال آبشستگی در بازه‌های زمانی از سه سیکل کامل جزر و مدی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود 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

در شکل‌های ۳ تا ۱۰ تصاویر 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.

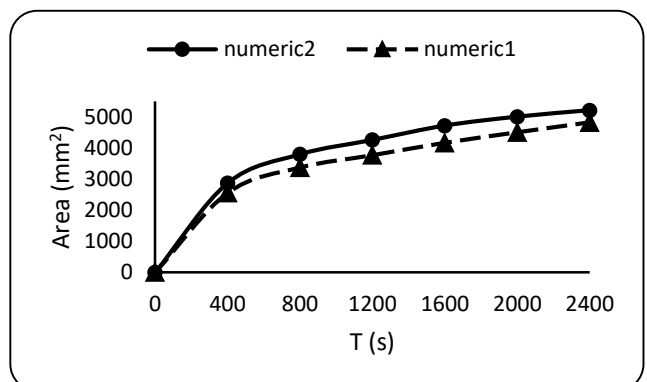
#### ۴- بررسی کمی پارامترهای آبشستگی ناشی از جزر و مد

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.



شکل ۱۴- تغییرات زمانی عمق نسبی آبشستگی

در شکل ۱۴ نمودار تغییرات عمق نسبی آبشستگی در سه سیکل کامل جزر و مدی 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 می‌شود عمق آبشستگی حالت تعادل برای جریان جزر و مدی تقریباً ۳۳٪ بیشتر از جریان یک سویه می‌باشد.



شکل ۱۵- روند تغییرات مساحت گودال آبشستگی

## 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. Ikhwan (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

اول می باشد. گسترش عرضی گودال آبهستگی 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 آبهستگی 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 دریاها و آزاد وجود داشته و در خلیج ها، تنگه ها و آبراههای باریک، رژیم جریان غالب بوده و بسیار نیرومند می باشند. 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 آبهستگی 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 آبهستگی نسبت به جریان یک سویه بیش از یک سوم افزایش داشته که حاکی از شدیدتر بودن فرآیند آبهستگی ناشی از جزر و مد نسبت به جریان یک سویه است.

۲- در سیکل نخست، بخش عمده ای از عمق نهایی آبهستگی محقق شده لیکن در سیکل های دوم و سوم تحت اثر فرآیند گردابه فکنی عرض و مساحت پروفیل آبهستگی به شدت افزایش می یابد.

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

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

۵- به ازای سرعت جریان ثابت با کاهش عمق جریان، شدت آبهستگی ناشی از جریان رفت و برگشتی جزر و مد بیشتر شده و شرایط مربوط به حال تعادل در تعداد سیکل کمتری محقق می شود لیکن در شرایط آب عمیق آبهستگی به تدریج و طی مدت زمان طولانی تر به حالت تعادل می رسد. بنابراین می توان نتیجه گیری نمود که در نواحی کم عمق تر فرسایش ناشی از جزر و مد بیشتر خواهد بود.

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 semi-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-varying wave and current-induced scour around offshore wind turbines" *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 submarine pipelines" *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.
- 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 scour beneath piggyback pipelines under clear-water conditions, *China ocean Eng.* , 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 review on scour modeling below pipeline" *Pipelines 2009 ASCE*, pp. 1019-1028
21. M. Golparvar Fard, A. Yeganeh-Bakhtiari and L. Cheng (2005) "Numerical simulation of steady 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