

Seismic assessment of an offshore gas pipeline along the Persian Gulf coastline and analysis of its reliability, considering soil-pipe interaction

Maasoumeh Kokama¹, Mohammad Reza Emami Azadi², Nazila Kardan^{3*}

- 1- MsC, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

ABSTRACT

In recent years, there has been a significant increase in the use of offshore pipelines in the Persian Gulf, driven by the growing demand for energy and the exploration and utilization of oil and gas resources in the sea. However, with this increase in offshore pipeline usage, it has become crucial to ensure their safety and assess their vulnerability to seismic events. The focus of this research is to conduct a numerical modeling of non-buried offshore gas pipelines using SAP2000 V.14 software. The study investigates the effects of seismic wave propagation and the response of offshore pipelines under different soil conditions, considering both free and fixed end conditions. The analysis includes pipelines lying on the sea bed and those with open mouths. Furthermore, a seismic reliability analysis of the pipeline is performed using OpenSees software. The aim is to determine the reliability index (β) and the annual failure probability of the marine pipeline based on the FORM (First Order Reliability Method), SORM (Second Order Reliability Method), and FOSM (First Order Second Moment) reliability analysis methods. The analysis is conducted for different seismic limit states, including the Design Level Earthquake (DEQ), Operational Level Earthquake (SEQ), Maximum Level Earthquake (MEQ), and Maximum Probable Earthquake (MPE). The results highlight that when the pipeline has a free opening, the maximum displacement caused by seismic movements is observed. Specifically, the maximum seismic displacements of the pipeline in the open mouth state are approximately four times higher compared to when the pipeline is lying on the sea bed. In terms of the design of a marine pipeline with a free opening and fixed end state, it is considered reliable for operational purposes when the annual probability of marine pipeline failure related to service conditions is less than or equal to 0.01, and the seismic reliability index β is greater than or equal to 2. In conclusion, this research provides valuable insights into the behavior of offshore pipelines during seismic events and emphasizes the importance of considering seismic wave propagation and response in the design and assessment of marine pipelines. The findings can be instrumental in improving the safety and reliability of offshore pipelines in the Persian Gulf and other similar regions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 November 2023
Revise Date: 23 January 2024
Accept Date: 18 April 2024

Keywords:

Sea pipeline
Seismic Reliability Analysis
Persian Gulf
Seismic load
Opensees

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.425356.3275>

*Corresponding author: Nazila Kardan
Email address: n.kardan@azaruniv.ac.ir

ارزیابی لرزه‌ای خط لوله گاز فراساحل در ساحل خلیج فارس و تحلیل قابلیت اعتماد آن با لحاظ نمودن اندرکنش خاک و لوله

معصومه کوکما^۱، محمدرضا امامی آزادی^۲، نازیلا کاردان^{۳*}

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از لوله‌های فراساحل در خلیج فارس افزایش زیادی داشته است. این افزایش، نیاز رو به رشد برای انرژی و پیشرفت در ساخت و استفاده از منابع نفت و گاز در دریاها می‌باشد. با افزایش استفاده از لوله‌های فراساحل، ضرورت بررسی ایمنی و احتمال خرابی این لوله‌ها هنگام وقوع زلزله بیش‌ازپیش گردیده است. در این پژوهش، مدل‌سازی عددی خطوط لوله گاز فراساحلی غیر مدفون با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 V.14 مورد توجه قرار گرفته و اثر انتشار موج لرزه‌ای و پاسخ‌های لوله‌های دریایی با شرایط انتهایی آزاد و ثابت بر روی بافت‌های مختلف خاک به دو حالت خوابیده روی بستر دریا و دهانه آزاد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله با استفاده از نرم‌افزار OpenSees جهت یافتن شاخص قابلیت اعتماد (β) و احتمال خرابی سالانه خط لوله دریایی بر اساس روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد FORM، SORM و FOSM برای حالات حدی مختلف لرزه‌ای به ترتیب زلزله سطح طراحی (DEQ)، زلزله سطح بهره‌برداری (SEQ)، زلزله سطح حداکثر (MEQ) و بیشینه زلزله محتمل (MPE) انجام و بررسی شده است. نتایج نشان داد در حالت دهانه آزاد به علت آزاد بودن دهانه لوله به طول ۸۰ متر، جابجایی ناشی از حرکات لرزه‌ای زمین حداکثر است. بیشینه جابجایی‌های لرزه‌ای خط لوله در حالت دهانه آزاد در مقایسه با حالت خوابیده خط لوله بر روی بستر دریا، در حدود ۴ برابر می‌باشد. به لحاظ طراحی خط لوله دریایی با دهانه آزاد با حالت انتهایی ثابت، وقتی از لحاظ بهره‌برداری قابل اعتماد می‌باشد که احتمال خرابی سالانه لوله دریایی مربوط به شرایط سرویس کوچک‌تر یا مساوی ۰/۰۱ و شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای β بزرگ‌تر یا مساوی ۲ باشد. همچنین می‌توان جمع‌بندی نمود خطوط لوله گاز فراساحلی تحت تأثیر قوی زلزله قرار می‌گیرند و انتقال موج لرزه‌ای در خاک و لوله تأثیر مهمی در رفتار و پاسخ لوله‌ها دارد. همچنین، تحلیل قابلیت اعتماد نشان می‌دهد که خطر خرابی سالانه خطوط لوله دریایی قابل کنترل است و با انتخاب مناسب روش تحلیل قابلیت اعتماد، می‌توان به طراحی ایمن و پایدار خطوط لوله گاز فراساحلی در خلیج فارس کمک کرد. این مطالعه ارزشمند می‌تواند به بهبود امنیت و پایداری خطوط لوله گاز فراساحلی در خلیج فارس کمک کند و دانشمندان و متخصصان عمران و لرزه‌شناسی را در ارزیابی و طراحی این سازه‌ها یاری نماید.

کلمات کلیدی: خط لوله فراساحل، لرزه‌ای، مدل‌سازی عددی، تحلیل قابلیت اعتماد.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.425356.3275	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.425356.3275	۱۴۰۲/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۰۱/۳۰	۱۴۰۳/۰۱/۳۰	۱۴۰۲/۱۱/۰۳	۱۴۰۲/۰۹/۰۶
نازیلا کاردان n.kardan@azaruniv.ac.ir					* نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

ذخایر نفت و گاز که در زیر بستر دریا قرار گرفته‌اند، منجر به توسعه سازه‌های فراساحل و تسهیلات حمایتی از فعالیت‌های صنعت نفت و گاز شامل اکتشاف، حفاری، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل نفت و گاز شده‌اند. سازه‌های دریایی روی فلات قاره یا نزدیکی فلات قاره به اشکال مختلف و برای تأمین بسیاری از اهداف ساخته می‌شوند [۱]. تولید نفت و گاز فراساحل و چاه آب‌های عمیق به وسیله خطوط لوله زیردریایی و تجهیزات نصب شده زیر دریا توسط ابزارهای بسیار دقیق، مناسب، معقول، اقتصادی و در مقیاس بزرگ انتقال یکسره را به خارج نسیبیت فراساحل یا خشکی به صورت منظم فراهم آورده است [۲].

یکی از مشکلات عمده که در استفاده از خط لوله و نصب تجهیزات زیردریایی وجود دارد ناپایداری ناشی از موج است. وقتی خط لوله زیر دریا یا در بستر دریا نصب می‌شود ارتباط پیچیده بین لوله- خاک و بارهای هیدرودینامیکی به وجود می‌آید. به عنوان مثال می‌توان به بارگذاری موج، محدود شدن حرکت جانبی خط لوله، ایجاد اندرکنش بین بارگذاری موج، وزن مستغرق خط لوله و مقاومت خاک اشاره نمود. با از دست رفتن مقاومت کافی خاک، پایداری بالا و پایین خط لوله کاهش خواهد یافت که در نهایت منجر به شکستن خط لوله می‌شود [۳]. اثر بارهای محیطی ناشی از موج، جریان، باد و فعالیت‌های ژئولوژیک از فاکتورهای کنترل کننده در طراحی سازه‌های فراساحل می‌باشد [۴]. آنچه نیاز به بررسی بیشتر است، ایمنی و احتمال خرابی این لوله‌ها هنگام وقوع زلزله است که باید پاسخ خط لوله‌های فراساحل غیر مدفون در اثر انتشار موج ناشی از زلزله و تغییر شکل دائمی زمین بررسی می‌شود.

در سال‌های اخیر استفاده از لوله‌های فراساحل در خلیج فارس افزایش زیادی داشته است. این افزایش، نیاز رو به رشد برای انرژی و پیشرفت در ساخت و استفاده از منابع نفت و گاز در دریاهای می‌باشد. با افزایش استفاده از لوله‌های فراساحل، ضرورت بررسی ایمنی و احتمال خرابی این لوله‌ها هنگام وقوع زلزله بیش از پیش گردیده است.

در زمینه تحلیل پایداری لوله‌های فراساحل، پژوهش‌های مختلفی در زمینه‌های مختلف نظیر تأثیر مقاومت جانبی و مقاومت محوری خاک اطراف لوله [۵-۱۲]، فاصله پویایی [۱۳]، گسیختگی برشی خاک بستر اطراف لوله‌های مدفون [۱۴-۱۵]، روانگرایی خاک اطراف خط لوله مدفون ناشی از موج [۱۶-۲۲] انجام یافته است. در زمینه بارهای وارد بر خطوط لوله غیر مدفون محققینی نظیر [۲۳-۳۴] مطالعات بسیاری انجام داده‌اند. همچنین چن و ونگ پژوهشی در زمینه ارزیابی لرزه‌ای خط لوله گاز فراساحلی در ساحل خلیج فارس انجام دادند، با این تفاوت که عدم قطعیت در پژوهش ایشان مورد توجه قرار نگرفته است [۳۵]. لی و ونگ نیز تأثیر اندرکنش خاک و لوله را بر پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله گاز فراساحلی مورد ارزیابی قرار دادند [۳۶].

در زمینه عدم قطعیت نیز پژوهش‌های مختلفی انجام یافته است. راکوویتز و فیسلر [۴] با ارائه ایده متغیرهای نرمال معادل به ازای هر متغیر غیر نرمال، محدودیت توزیع‌های آماری متغیرها در مسئله را نیز برطرف نمودند. مطالعات اولیه در این زمینه به وسیله فردنتال [۴] منتشر شد. ایشان روش‌های احتمالاتی و آماری‌ای که در برگیرنده طبیعت ضریب ایمنی بود را ارائه نمود. گزارش روشی از پیشرفت این موضوع در کتابی که به وسیله مدسن و همکاران در سال ۱۹۸۶ تألیف شده، ارائه شده است. ماتیس (۱۹۹۷) در مطالعه بر روی دینامیک تیرهایی با پارامترهای تصادفی که به وسیله‌ی گوپتا و منهور (۲۰۰۰) و آدیکار و منهور (۲۰۰۰) انجام شد محدودیت‌هایی به عنوان میدان‌های تصادفی به سیستم اعمال شده را ارائه نمود. در مطالعه‌ای که به وسیله براون و فری (۱۹۹۶) روی ترکیب تکنیک‌های Substructuring با تحلیل‌های احتمالاتی انجام شد، دشواری‌های موجود در تعیین صحیح خواص آماری متغیرهای ابتدایی نظیر هندسه، سختی و جرم آشکار شد. این مؤلفین روشی جایگزین پیشنهاد کردند که در آن خواص دینامیکی اندازه‌گیری شده Substructureها به صورت کمیت‌های تصادفی در نظر گرفته شده بودند [۳]. لی و ژانگ [۳۷] و اسمیت و جان [۳۸] تحلیل قابلیت اعتماد خطوط لوله گاز با طول کم را تحت بارهای لرزه‌ای بررسی نمودند.

در حال حاضر روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول و دوم به خوبی توسعه یافته‌اند و دارای قابلیت به کارگیری توابع عملکرد غیرخطی و متغیرهای تصادفی غیر گوسی قابل وابسته هستند. این روش‌ها مسائل تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها را به مسئله بهینه‌سازی

غیرخطی که ابزارهای زیادی برای حل این مسئله در نوشته‌های ریاضی وجود دارد، تبدیل می‌کنند. این روش‌ها عموماً نیازمند تعریفی صریح از تابع حدی و توانایی محاسبه بردار گرادین آن هستند. نتیجه عمده روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول، تعریف شاخص قابلیت اعتماد است که مسئله دشوار ارزیابی یک انتگرال چندبعدی بر روی یک میدان نامنظم را کنار می‌گذارد. روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول در فضای نرمال استاندارد تعابیر هندسی ساده‌ای که برای مهندسیین نیز جذاب است را پیشنهاد می‌کند. با این وجود انتقال به فضای نرمال استاندارد برای به کارگیری روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول ضروری نیست اما با انجام ندادن این کار از مزیت تعابیر هندسی شاخص قابلیت اعتماد و نقطه طراحی صرف نظر می‌شود. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای غلبه بر مسئله وجود نقاط بحرانی متعدد در کاربردهای روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول صورت گرفته است. به همین دلیل در حال حاضر اهدافی مبنی بر توسعه بیشتر ابزارهای محاسباتی مرتبط با این موضوع تبیین شده است. همچنین به کارگیری روش‌های FORM و SORM در صورتی که احتمال خرابی شامل نواحی منفصل باشد بی‌اعتبار می‌باشد. در ضمن روش‌های FORM و SORM می‌توانند برای بررسی رفتار خطی و غیرخطی استاتیکی سازه‌ها به کار گرفته شوند. روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه دوم دارای مبانی نظری قوی هستند که به وسیله این خاصیت می‌توان احتمال دقیق خرابی برای حوزه‌های ایمنی بزرگ را به دست آورد.

در آنالیز قطعی خط لوله غیر مدفون، تنها یک مقدار به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود، از این رو عدم قطعیت درباره‌ی مقادیر ورودی این پارامترها وجود دارد. معمولاً استفاده از طرح پیشنهادی (استفاده از یک ضریب ایمنی) بر ساده‌سازی آنالیزها و بر عدم قطعیت متغیرها غالب شده است؛ بنابراین برای روش تحلیل قطعی پایداری خط لوله‌ها برخی محدودیت‌ها وجود دارد. پس برای رسیدن به یک طرح اقتصادی و به حداکثر رساندن قابلیت اعتماد طرح، محاسبات دقیق لوله- خاک-هیدرودینامیک بایستی انجام شود و یک طرح احتمالاتی مناسب پیشنهاد شده بایستی در نظر گرفته شود.

در پژوهش حاضر، خطوط لوله گاز فراساحلی غیر مدفون در ساحل خلیج فارس با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 V.14 مدل‌سازی شده و اثر انتشار موج لرزه‌ای و پاسخ‌های لوله‌های دریایی با شرایط انتهایی آزاد بر روی سه نوع بافت خاک بستر، رس ماسه‌دار، ماسه رس‌دار و ماسه متراکم، همچنین با شرایط انتهایی ثابت برای خط لوله روی بستر ماسه متراکم به دو حالت خوابیده روی بستر دریا و دهانه آزاد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله با استفاده از نرم‌افزار OpenSees جهت یافتن شاخص قابلیت اعتماد (β) و احتمال خرابی سالانه خط لوله دریایی (PF₁) بر اساس روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد FORM، SORM و FOSM برای حالات حدی مختلف لرزه‌ای به ترتیب زلزله سطح طراحی (DEQ)، زلزله سطح بهره‌برداری (SEQ)، زلزله سطح حداکثر (MEQ) و بیشینه زلزله محتمل (E) انجام و بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل‌سازی عددی

در تحقیق حاضر از نرم‌افزار SAP2000 V.14 جهت انجام تحلیل مدل‌ها و برای تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. در این مدل‌سازی، مدل‌سازی خطوط لوله غیر مدفون (نیمه مدفون) عمدتاً بر روی آب‌های عمیق متمرکز شده است که در آن اثر بارهای حاکم بر طراحی سازه‌های دریایی، اثر بارهای محیطی ناشی از موج، بارهای هیدرودینامیکی جریان و باد و نیز اثر زلزله در طراحی مدنظر قرار گرفته است. بر اساس تحقیقات کرشنام و همکاران [۳۴] رفتار خط لوله‌های تحت بارگذاری زلزله به بزرگی زلزله، خصوصیات بستر دریا، هندسه و خصوصیات لوله قبل از زلزله بستگی دارد از آنجایی که شکل خط لوله هنگام نصب مستقیم می‌باشد، در طول زمان در اثر تنش‌های حرارتی و فشار درونی، شکل لوله عوض می‌گردد [۴]. در آنالیز پایداری خط لوله بر روی بستر، اغلب پارامترها شامل توصیف شرایط پیرامونی خط لوله‌ها است. این پارامترها شامل پارامترهای لوله، پارامترهای خاک، محیط پیرامون اقیانوس، پارامترهای مدل‌سازی بارهای هیدرودینامیکی و پارامترهای مربوط به محل و نحوه قرارگیری خط لوله دریایی است.

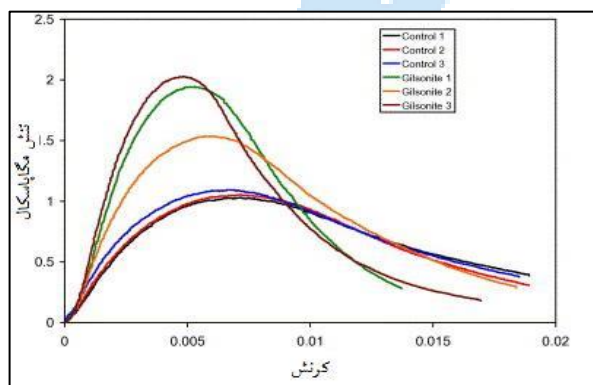
۲-۲- مشخصات سازه‌ای خط لوله

برای مدل‌سازی، لوله از جنس API 5L X60 انتخاب شده است. تنش مشخصه حداقل جاری شدن آن (SMYS¹) برابر با ۴۱۴ مگا پاسکال و تنش مشخصه حداقل کششی (SMTS²) برابر ۵۱۷ مگا پاسکال می‌باشد. مدول الاستیسیته لوله ۲۰۷۰۰۰ مگا پاسکال و مقدار ضریب پواسون ۰/۳ می‌باشد. از منحنی تنش- کرنش رامبرگ آسگود جهت تعریف فولاد استفاده شده است (شکل ۱). رابطه رامبرگ- آسگود عبارت است از [۳۹]:

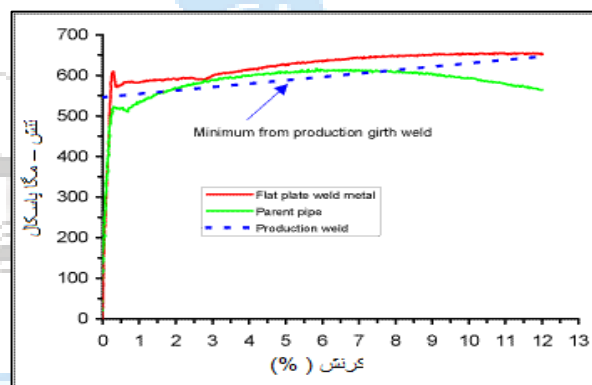
$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_i} \left[1 + \frac{\alpha}{(r+1)} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_c} \right)^r \right] \quad (1)$$

که برای لوله API 5L X60 مقادیر پارامترهای رامبرگ- آسگود برابر $r = 38.26$ و $\alpha = 38.26$ و $\sigma_a = 414 \text{ MPa}$ است.

قطر خارجی لوله مورد مطالعه ۳۰ اینچ یا ۷۶۲ میلی‌متر بوده، ضخامت دیواره آن ۱۷/۵ میلی‌متر و برای پایداری خط لوله در بستر دریا در مقابل نیروهای ناشی از جریان و موج (بارهای هیدرودینامیکی) از پوشش بتنی به ضخامت ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. وزن واحد حجم پوشش بتنی با احتساب جذب آب معادل ۰/۵٪ وزن حجمی خود در حالت بهره‌برداری، برابر $2572/5 \text{ kgf/m}^3$ و ضریب پواسون آن ۰/۲ می‌باشد. برای جلوگیری از خوردگی لوله فولادی، از یک پوشش ضد خوردگی ما بین لوله فولادی و پوشش بتنی از جنس آنمال آسفالت به ضخامت ۳ میلی‌متر و وزن واحد حجم 1400 kgf/m^3 با مدول الاستیسیته ۹۰۰ مگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۳ استفاده شده است [۶]. از منحنی تنش- کرنش زیر برای آنمال آسفالت استفاده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- منحنی تنش- کرنش پوشش آسفالت لوله فراساحل.



شکل ۱- منحنی تنش-کرنش لوله API 5L X60 [۸].

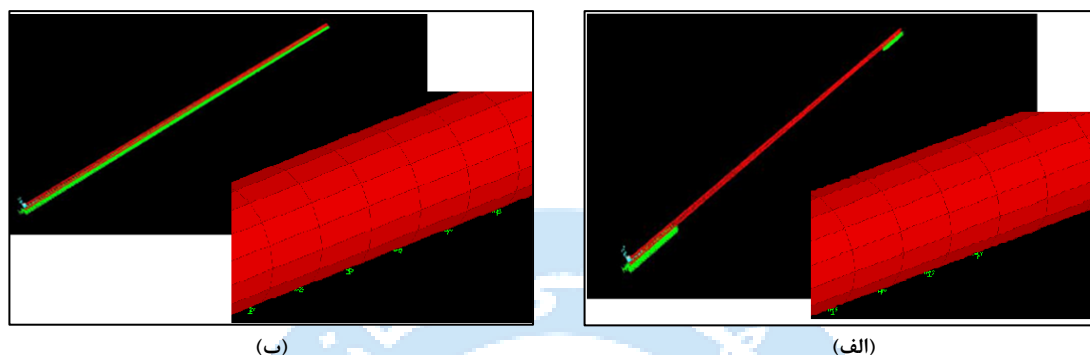
فشار داخلی طرح ناشی از فشار سیال درون لوله (فشار گاز) برای خط لوله با شرایط انتهایی آزاد ۱۵ مگا پاسکال و برای خط لوله با شرایط انتهایی ثابت ۷/۵ مگا پاسکال می‌باشد. جهت مدسازی الامان محدود فقط ۱۰۰ متر از طول مشخصه خط لوله انتخاب شده است و مدل بستر دریا برای آن قسمت شبیه‌سازی می‌شود. جهت آنالیز دقیق، خط لوله شبیه‌سازی شده به شبکه‌های ۰/۵ متری مش‌بندی می‌گردد. در حالت اولیه خط لوله به صورت کاملاً مستقیم بدون هیچ‌گونه خمیدگی بوده ولیکن در مرحله تحلیل تقریباً شکل بستر دریا را به خود می‌گیرد.

¹ Specified Minimum Yield Strength (SMYS)

² Specified Minimum Tension Strength (SMTS)

۲-۳- مدل خط لوله

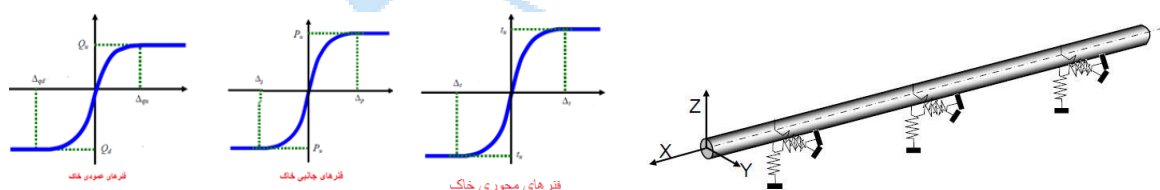
مدل سه بعدی بستر دریا و خط لوله بر اساس داده‌های توپوگرافی محل خلیج فارس شبیه‌سازی می‌شود. مدل لوله برای دو حالت دهانه آزاد و خوابیده بر روی بستر دریا در شکل ۳ آورده شده است. در مورد لوله‌گذاری در کف دریا ممکن است لوله بصورت خوابیده بر بستر و یا در بخشی از خط لوله، بصورت نیمه مدفون در نظر گرفته شود. وجود دهانه آزاد بستگی به توپوگرافی بستر دریا داشته و اکثر موارد در طول خطوط لوله گذاری در بستر دریا ممکن است رخ بدهد. فلذا در این بررسی، هر دو حالت لوله مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۳- (الف) مدل‌سازی خط لوله به صورت دهانه آزاد (ب) مدل‌سازی خط لوله به صورت خوابیده روی بستر دریا.

۲-۴- مدل‌سازی اندرکنش خاک- خط لوله

برای لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه لازم است از فنرهای پالستیک چندخطی^۳ استفاده شود. منحنی ماکزیمم نیروی فنر و جابجایی مربوطه همچنین سختی دینامیکی فنرها در سه جهت محوری، جانبی و قائم برای هر سه نوع بافت خاک، بر اساس آیین‌نامه‌های DNV^۴ و ALA^۵ به دست آمده است [۸ و ۴۰]. در دهانه آزاد طولی می‌توان سختی دینامیکی محوری و جانبی را یکسان در نظر گرفت. عمق مدفون‌شدگی در همه حالت‌ها یک سوم قطر لوله در نظر گرفته شده است (شکل ۴).



شکل ۴- مدل‌سازی اندرکنش لوله - خاک با فنرهای محوری، جانبی و قائم و منحنی نیرو- جابجایی فنرها.

۲-۵- مشخصات ژئوتکنیکی خاک منطقه

با توجه به داده‌های ژئوتکنیکی منطقه خلیج فارس مسیر خط لوله مورد مطالعه نشان می‌دهد که سه گونه بافت خاک موجود می‌باشد. بافت خاک رس ماسه‌دار، ماسه رس‌دار و ماسه متراکم. هر کدام از این بافت‌ها در مدل جداگانه هم برای حالت دهانه آزاد و هم

^۳ Plastic Multi linear

^۴ American Lifelines Alliance

^۵ Det Norske Veritas

برای حالت خوابیده بر روی بستر دریا با شرایط انتهایی آزاد و ثابت بررسی شده‌اند. در جدول ۱ اطلاعات ژئوتکنیکی خاک مسیر آورده شده است.

۲-۶- انتخاب شتاب‌نگاشت طرح جهت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

با توجه به سایت خط لوله از رکورد زلزله Naghan با مدت دوام ۵ ثانیه و بیشینه شتاب (g) ۰/۷۶۹ در سه جهت طولی، جانبی و قائم استفاده شده است. شتاب‌نگاشت زلزله در شکل ۵ آورده شده است.

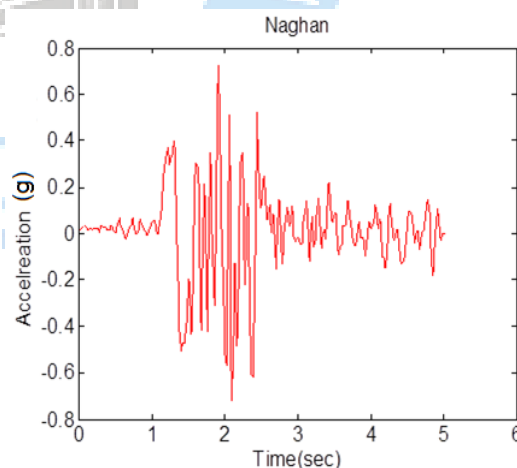
۲-۷- مدل‌سازی بارهای هیدرودینامیکی

عوامل عمده‌ای که بر پایداری جانبی خط لوله فراساحل که متکی بر کف دریاست اثر می‌گذارند شرایط محیطی (شامل امواج، جریان‌ها و جهت جریان ورودی)، عمق آب و زبری کف دریا می‌باشند. بارهای هیدرودینامیکی که بر روی خط لوله‌ی فراساحل اعمال می‌شوند معمولاً برای یک لوله در تماس با کف دریا محاسبه شده‌اند. در مدل‌سازی لوله مدفون‌شدگی وجود ندارد ولی در عمل ممکن است هنگام لوله‌گذاری مدفون‌شدگی قابل ملاحظه‌ای را تجربه کنند. خط لوله اثر قابل ملاحظه‌ای در برآورد بارهای هیدرودینامیکی اعمالی روی خط لوله دارد. ضخامت رشد آبریزان (مثل جلبک‌ها) روی سطح لوله در طی کارکرد لوله باعث تغییر زبری لوله می‌شوند و در نتیجه متغیر زبری لوله به عوامل عمق آب، شکل بستر دریا، میانگین درجه حرارت آب و عمر استفاده از سازه بستگی دارد.

در شرایط محیطی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، ارتفاع موج مشخصه برابر ۸ متر، پیوند موج مشخصه ۱۰ ثانیه، سرعت جریان در سطح آب ۱/۵ متر بر ثانیه، سرعت جریان در بستر دریا برابر ۰ و عمق آب برابر ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. چگالی آب دریا نیز برابر 1027 kg/m^3 می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات خاک محل.

نوع خاک			مشخصه
ماسه	ماسه رس‌دار	رس	
۰/۷	۰/۷	۰/۶	ضریب اصطکاک جانبی
۰/۷	۰/۷	۰/۶	ضریب اصطکاک طولی
۲۲	۱۸	۲۰	وزن واحد حجم مخصوص خاک (kN/m^3)
۰	۰	۲۵	مقاومت برشی زهکشی نشده (kPa)
۴۰	۲۹	۰	زاویه اصطکاک داخلی (deg)
۱۲	۸	۱۰	وزن مخصوص مستغرق خاک (kN/m^3)
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۴۵	ضریب پواسون
۰/۵۰	۰/۱۸۰	۱	نسبت تخلخل خاک
٪۱/۵	٪۲	٪۰/۱۸	ضریب میرایی ویسکوز خاک



شکل ۵- مؤلفه شتاب‌نگاشت زلزله ناغان استفاده شده در سه جهت طولی، عرضی و قائم.

نیروی درگ و لیفت اعمالی روی خط لوله با استفاده از مدل تحلیل فوریه پیشنهاد شده توسط سورنسن و همکاران [۴۴] جهت اعمال نیروهای هیدرودینامیکی از ضرایب معادله Morison و یا ضرایب مدل تحلیلی فوریه استفاده شده است. ضریب لیفت برابر ۰/۹، ضریب درگ برابر ۰/۷ و ضریب اینرسی برابر ۳/۲۹ وارد شده است [۴۰-۴۷].

۲-۸- تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله

طراحی مهندسی معمولاً بهینه‌سازی ماکزیمم ایمنی و حداقل هزینه است. هر یک از خواص سیستم سازه‌ای یا بارگذاری را می‌توان به‌عنوان نقطه‌ای در فضای محدود شده به‌وسیله متغیرهای $\{x_i\}_{i=1}^n$ تفسیر کرد. ضابطه خرابی محلی از طریق یک تابع حدی $g(x)$ تعریف می‌شود به طوری که نواحی $g(x) > 0$ و $g(x) < 0$ در فضای $\{x_i\}_{i=1}^n$ به ترتیب نشان دهنده نواحی ایمن و غیر ایمن هستند. سطح $g(x) = 0$ سطح حدی است که نواحی ایمن و غیر ایمن را از هم جدل می‌سازد. در این حالت احتمال خرابی P_{F1} به صورت زیر تعریف شده و شناخته می‌شود [۳۹]:

$$P_{F1} = \int_{g(x)} P_x(x) dx \quad (2)$$

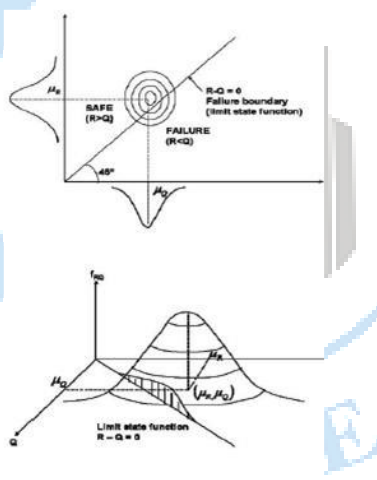
که تابع چگالی بردار احتمالاتی بردار n بعدی متغیرهای تصادفی $\{x_i\}_{i=1}^n$ است. در شکل ۶ مسئله قابلیت اعتماد نمایش داده شده است.

در روش FORM از اطلاعات ممان‌های اول و دوم آمار (میانگین و واریانس) استفاده می‌شود. نسل اول این روش صرفاً با در نظر گرفتن ممان‌های آماری و بدون توجه به توزیع متغیرها، قابلیت اطمینان را محاسبه می‌کند. SORM احتمال شکست را با تخمین درجه دوم، سطوح شکست غیرخطی و همچنین در نظر گرفتن توزیع دلخواه محاسبه می‌نماید.

ارزیابی دقیق P_{F1} از معادله (۱) هنگامی که $g(x)$ تابعی خطی از x به فرم زیر باشد ممکن است:

$$g(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (3)$$

متغیرهای تصادفی $\{x_i\}_{i=1}^n$ همگی نرمال هستند. بردار میانگین μ و ماتریس کوواریانس C در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۶- مفهوم اساسی تحلیل قابلیت اعتماد.

- روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول FORM و SORM

در این مورد می‌توان نشان داد که:

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_i a_j C_{ij}}} \quad (5)$$

⁶ Annular Probability of Failure

چنین استنباط می‌شود که β پارامتری منفرد است که خواص متغیرهای تصادفی $\{x_i\}_{i=1}^n$ مورد نیاز برای تعیین احتمال خرابی را در قالب یک پارامتر بیان می‌کند؛ بنابراین β را می‌توان به‌عنوان شاخصی از قابلیت اعتماد سیستم بیان کرد.

- روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول-لنجر دوم FOSM

کرنل [۴۰] مسئله غیرخطی بودن $g(x)$ در پارامترهای x و دوبه‌دو مستقل بودن متغیرهای تصادفی نرمال را مطرح کرد. با این فرض که $g(x)$ قابل مشتق‌گیری در همسایگی میانگین خویش است. $g(x)$ به‌وسیله بسط تیلور مرتبه اولش حول μ جایگزین شده است. بر پایه این مطالعه شاخص قابلیت اعتماد $FOSM^7$ را می‌توان به‌صورت زیر تعیین کرد.

$$\beta_{FOSM} = \frac{g(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(x_i)}{\partial x_i} E(X_i - \mu_i)}{\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\partial g(x_i)}{\partial x_i} \frac{\partial g(x_j)}{\partial x_j} COV(X_i, X_j) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

چنانچه مشاهده می‌شود این شاخص تابعی از میانگین و کوواریانس $\{x_i\}_{i=1}^n$ است و در نتیجه روش توصیف قابل اعتماد از طریق این شاخص روش مرتبه اول لنجر دوم MVFOSM نامیده می‌شود.

- روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه دوم SORM

ایده اصلی SORM جایگزینی تابع حدی $g(x)$ به‌وسیله بسط تیلور مرتبه دومش حول نقطه x^* قابل بیان می‌باشد:

$$g(x) = g(x^*) + (x - x^*)^T g_x(x^*) + \frac{1}{2} (x - x^*)^T G_x(x^*) (x - x^*) \quad (7)$$

در اینجا $g_x(x^*)$ بردار گرادیان تابع حدی و $G(x)$ نیز ماتریس مشتق‌های مرتبه دوم $g(x)$ است که منتج به یک سطح خرابی سهموی می‌شود و عمل در دست اقدام شامل ارزیابی انتگرال احتمالاتی multi-normal روی این سطح می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، تحلیل اثر زلزله بر روی خط لوله برای سه نوع وضعیت خاک بستر، رس ماسه‌دار [رس]، ماسه رس‌دار [ماسه] و ماسه متراکم انجام شده است. این تحلیل‌ها همگی برای زلزله حد بهره‌برداری (SEQ^8) ، زلزله حد طراحی (DEQ^9) ، زلزله بیشینه طراحی (MEQ^{10}) و زلزله حداکثر محتمل طراحی (MPE^{11}) انجام شده است. ترکیب حالت‌های فوق‌الذکر به‌صورت جدول ۲ خواهد بود.

جدول ۲- حالت‌های مختلف مدل‌سازی.

دهانه آزاد	خوابیده روی بستر دریا	حالت خط لوله
		شرایط انتهایی لوله
روی بستر رس ماسه‌دار	روی بستر رس ماسه‌دار	آزاد-آزاد
روی بستر ماسه رس‌دار	روی بستر ماسه رس‌دار	
روی بستر ماسه متراکم	روی بستر ماسه متراکم	ثابت-ثابت
روی بستر ماسه متراکم	روی بستر ماسه متراکم	

⁷ First Order Second Moment (FOSM)

⁸ Serviceability Earthquake (SEQ)

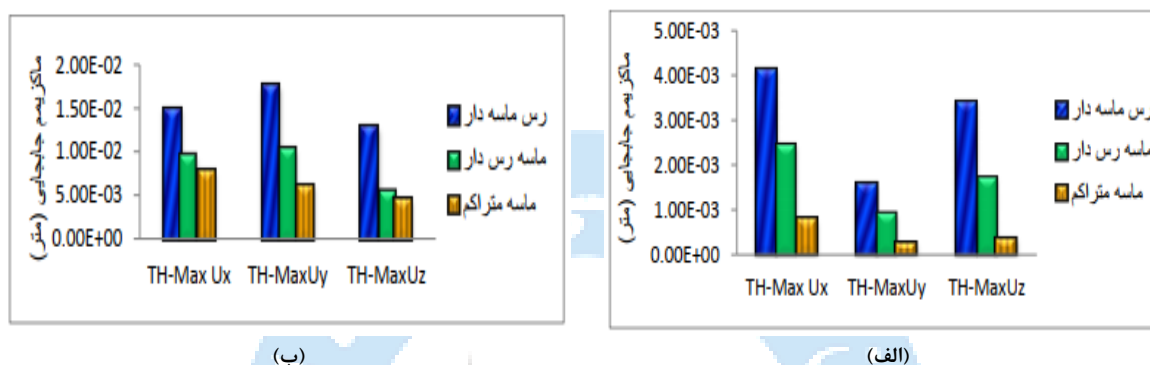
⁹ Design Earthquake (DEQ)

¹⁰ Maximum Earthquake (MEQ)

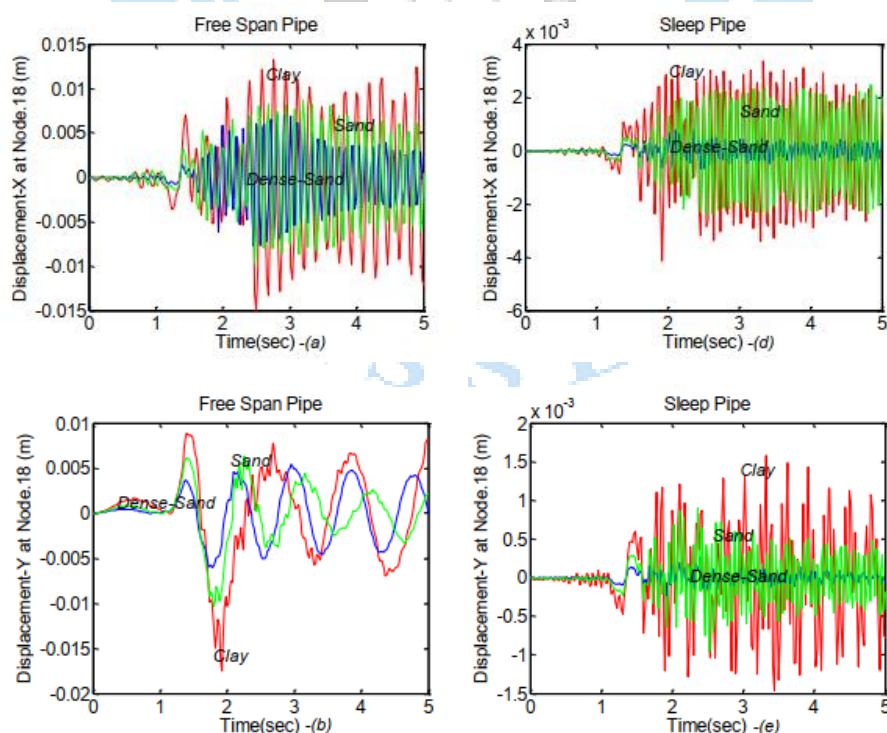
¹¹ Maximum Probable Earthquake (MPE)

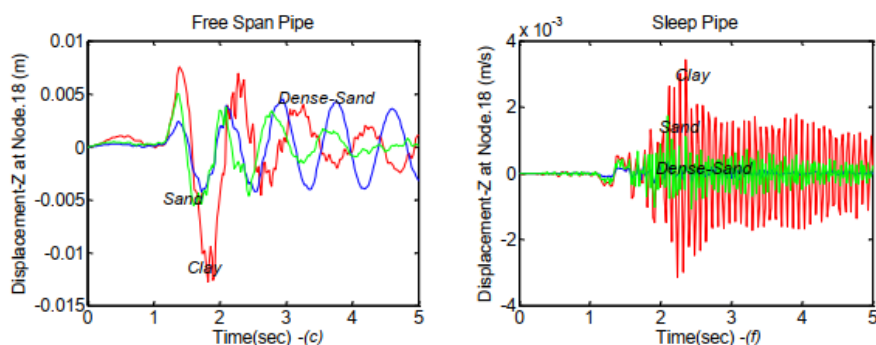
۳-۱- پاسخ جابجایی PGD

در اثر اعمال شتاب‌نگاشت زلزله ناغان در سه جهت طولی، عرضی و قائم، خط لوله در طول خود تحت کرنش‌های خمشی، فشاری و کششی قرار می‌گیرد. در ادامه پاسخ‌های مدل المان محدود (جابجایی، سرعت و شتاب) برای نقاط ابتدایی (گره ۱۸) و میانه خط لوله (گره ۱۶۰۹) برای هر سه نوع بافت خاک محل، با شرایط انتهایی آزاد-آزاد و در حالت دهانه آزاد و خوابیده روی بستر دریا آورده شده است. در شکل ۷ پاسخ جابجایی گره ۱۸ برحسب زمان وقوع زلزله در سه جهت طولی، عرضی و قائم آورده شده است. قابل ذکر است نمودار قرمز نشان دهنده پاسخ رس ماسه‌دار، رنگ سبز نشان دهنده پاسخ ماسه رس‌دار و رنگ آبی نشان دهنده پاسخ ماسه متراکم است. در شکل ۸ پاسخ جابجایی گره ۱۸ در حالت دهانه آزاد، خوابیده روی بستر دریا و انتهایی آزاد بر روی سه نوع بستر ارائه شده است. در جدول ۳ نیز خلاصه نتایج ارائه شده است.



شکل ۸- بیشینه پاسخ جابجایی (PGD) گره ۱۸ در حالت (الف) خوابیده روی بستر دریا (ب) دهانه آزاد.





شکل ۷- پاسخ جابجایی گره ۱۸ (الف) a, b و c به ترتیب پاسخ جابجایی در جهت x, y و z در حالت دهانه آزاد و (ب) d, e و f به ترتیب پاسخ جابجایی در جهت x, y و z در حالت خوابیده روی بستر دریا.

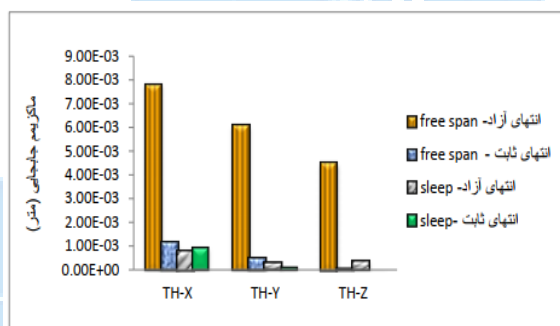
جدول ۳- بیشینه پاسخ جابجایی گره ۱۸ و گره ۱۶۰۹ در حالت خوابیده روی بستر دریا و دهانه آزاد.

بیشینه جابجایی			نوع بستر	حالت	گره
TH-Max U_z	TH-Max U_y	TH-Max U_x			
3.7×10^{-3}	1.9×10^{-3}	4.1×10^{-3}	رس ماسه‌دار	خوابیده روی بستر دریا	گره ۱۸
2.1×10^{-3}	1.3×10^{-3}	2.8×10^{-3}	ماسه رس‌دار		
0.61×10^{-3}	0.38×10^{-3}	0.95×10^{-3}	ماسه متراکم		
1.35×10^{-2}	1.7×10^{-2}	1.5×10^{-2}	رس ماسه‌دار		
8×10^{-3}	1.2×10^{-2}	1.1×10^{-2}	ماسه رس‌دار	دهانه آزاد	گره ۱۸
4.5×10^{-3}	6.5×10^{-3}	7.1×10^{-3}	ماسه متراکم		
3.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	4.2×10^{-3}	رس ماسه‌دار		
2.2×10^{-3}	1.1×10^{-3}	2.8×10^{-3}	ماسه رس‌دار		
0.6×10^{-3}	0.5×10^{-3}	0.8×10^{-3}	ماسه متراکم	خوابیده روی بستر دریا	گره ۱۶۰۹
1.8×10^{-1}	2.5×10^{-1}	3.1×10^{-2}	رس ماسه‌دار		
1.1×10^{-1}	1.5×10^{-1}	2.5×10^{-2}	ماسه رس‌دار		
1.5×10^{-1}	1.4×10^{-1}	1.8×10^{-2}	ماسه متراکم		
				دهانه آزاد	گره ۱۶۰۹

از شکل ۸ استنتاج می‌شود پاسخ جابجایی ماسه متراکم به دلیل سختی بیشتر و تخلخل کمتر بستر نسبت به ماسه و رس در هر سه جهت طولی، عرضی (جانبی) و قائم (عمودی) و در هر دو حالت خوابیده بر روی بستر دریا و حالت دهانه آزاد نشان داده شده، کمتر می‌باشد. در حالت دهانه آزاد، دامنه و پریود ارتعاشات جهت عرضی و قائم نسبت به ارتعاش جهت طولی بزرگ‌تر است. در حالت دهانه آزاد، دامنه و پریود ارتعاشات نسبت به حالت خوابیده بر روی بستر دریا، به علت آزاد بودن دهانه لوله، بزرگ‌تر است. در حالت خوابیده بر روی بستر دریا، حداکثر جابجایی گره ۱۸ در هر سه نوع بافت خاک در جهت طولی نسبت به قائم و جانبی، به علت آزاد بودن انتهایها، بزرگ‌تر است. در حالت دهانه آزاد به علت آزاد بودن دهانه لوله، جابجایی‌های ناشی از حرکات لرزه‌ای زمین حداکثر است، همچنین بیشینه جابجایی‌ها در حالت دهانه آزاد نسبت به حالت خوابیده بر روی بستر دریا، قابل توجه (تقریباً ۴ برابر) هستند. پاسخ جابجایی گره ۱۶۰۹ در حالت خوابیده بر روی بستر دریا، تفاوت محسوسی با پاسخ جابجایی گره ۱۸ وجود ندارد. ولیکن در حالت دهانه آزاد دامنه و فرکانس ارتعاشات لوله در جهت جانبی و قائم به‌ویژه در ماسه متراکم به علت اثر بزرگنمایی دینامیکی بستر دریا، نسبت به گره ۱۸ افزایش یافته است.

در ادامه به بررسی نتایج حاصل از تحلیل خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم در دو حالت دهانه آزاد و خوابیده بر روی بستر دریا با شرایط انتهایی آزاد-آزاد و ثابت-ثابت پرداخته شده است.

در همه حالت‌ها دامنه پاسخ جابجایی نواحی تکیه‌گاهی انتهایی ثابت در مقایسه با شرایط انتهایی آزاد کم و در جهت قائم نزدیک صفر و تقریباً تبدیل به خط مستقیم شده است. در همه حالت‌ها به‌جز حالت دهانه آزاد با شرایط انتهایی آزاد، پیروید ارتعاش جهت جانبی و قائم کوچک و فرکانس ارتعاشات بالاست. در شکل ۹ بیشینه پاسخ جابجایی (PGD) گره ۱۸ در سه جهت طولی، جانبی و قائم ناشی از انتشار موج زلزله، به‌عنوان نمونه آورده شده است. بیشینه پاسخ جابجایی خط لوله با شرایط انتهایی آزاد در جهت طولی رخ داده است. دلیل آن هم این است که در این حالت به خط لوله اجازه جابجایی داده شده است. در گره ۱۶۰۹، در حالتی که خط لوله کاملاً بر روی بستر دریا خوابیده است دامنه پاسخ جابجایی خط لوله با شرایط انتهایی ثابت در مقایسه با حالت انتهایی آزاد، به‌ویژه در جهت جانبی و قائم بزرگ‌تر است. در صورتی که در حالت دهانه آزاد دامنه و پیروید پاسخ جابجایی خط لوله با شرایط انتهایی آزاد در مقایسه با حالتی که انتهاها ثابت است، افزایش یافته است (برعکس حالت خوابیده بر روی بستر دریا) همچنین در این حالت، دامنه و پیروید پاسخ جابجایی در مقایسه با گره ۱۸ افزایش نشان می‌دهد. بیشینه پاسخ جابجایی میانه خط لوله در هر سه جهت در حالتی که خط لوله به‌صورت دهانه آزاد است، اتفاق افتاده است. در خط لوله به‌صورت دهانه آزاد، وقتی انتهای لوله آزاد است، بیشینه پاسخ جابجایی وسط خط لوله، در جهت قائم رخ می‌دهد ولیکن در صورتی که انتهای لوله ثابت است، بیشینه پاسخ جابجایی وسط خط لوله، در جهت جانبی اتفاق می‌افتد.



شکل ۹- بیشینه پاسخ جابجایی (PGD) گره ۱۸ خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم.

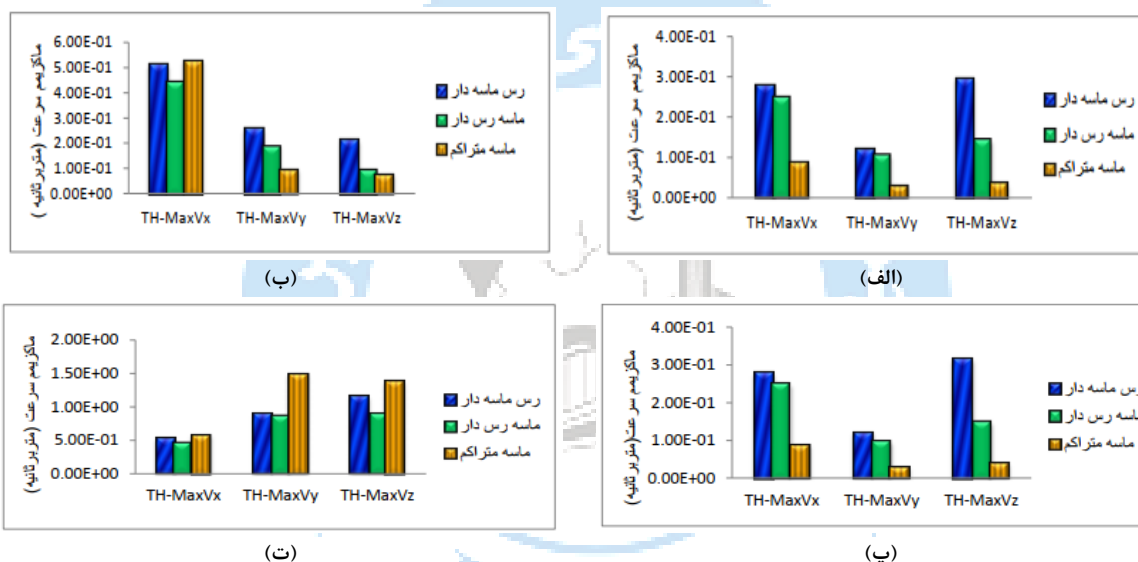
۲-۳- پاسخ سرعت PGV

در جدول ۴ پاسخ بیشینه سرعت گره ۱۸ و ۱۶۰۹ در دو حالت خوابیده روی بستر دریا و دهانه آزاد ارائه شده است. در حالت خوابیده بر روی بستر دریا و در سه جهت طولی، جانبی و قائم دامنه ارتعاش سرعت در خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم به دلیل سختی زیاد بستر و تخلخل کمتر بستر نسبت به ماسه و رس به ترتیب کوچک می‌باشد. ولیکن پیروید و فرکانس پاسخ سرعت در سه جهت و برای هر سه نوع بافت خاک تقریباً یکسان می‌باشد. در حالت دهانه آزاد، دامنه ارتعاش سرعت جهت طولی دامنه و پیروید ارتعاش برای هر سه نوع بافت خاک یکسان بوده ولی در جهت جانبی و قائم پیروید ارتعاش، نسبت به ارتعاش طولی بزرگ‌تر است.

دامنه تغییرات پاسخ سرعت در حالت دهانه آزاد نسبت به حالت خوابیده بر روی بستر دریا، به دلیل آزاد بودن دهانه لوله، بزرگ‌تر است. جهت روشن‌تر شدن مطلب، چارت‌های مربوط به مقادیر حداکثر پاسخ سرعت (PGV) برای گره‌های ۱۸ و ۱۶۰۹ در شکل ۱۰ آورده شده است. بیشینه پاسخ سرعت بر روی بستر ماسه متراکم نسبت به ماسه و رس کمتر است. مقادیر بیشینه پاسخ سرعت جهت جانبی نسبت به طولی و قائم کمتر است. در حالت دهانه آزاد، بیشینه پاسخ سرعت جهت طولی بر روی بستر ماسه متراکم نسبت به رس و ماسه بزرگ‌تر است.

جدول ۴- پاسخ بیشینه سرعت (m/s) گره ۱۸ و ۱۶۰۹ در حالت خوابیده روی بستر دریا و دهانه آزاد.

گره	حالت	نوع بستر	بیشینه سرعت		
			TH-Max V _x	TH-Max V _y	TH-Max V _z
گره ۱۸	خوابیده روی بستر دریا	رس ماسه‌دار	3.0×10^{-1}	1.2×10^{-1}	3.1×10^{-1}
		ماسه رس‌دار	2.8×10^{-1}	1.1×10^{-1}	1.5×10^{-1}
		ماسه متراکم	0.9×10^{-1}	0.5×10^{-1}	0.6×10^{-1}
	دهانه آزاد	رس ماسه‌دار	5.1×10^{-1}	2.9×10^{-1}	2.4×10^{-1}
		ماسه رس‌دار	4.8×10^{-1}	2.2×10^{-1}	1.5×10^{-1}
		ماسه متراکم	5.2×10^{-1}	1.3×10^{-1}	1.1×10^{-1}
گره ۱۶۰۹	خوابیده روی بستر دریا	رس ماسه‌دار	2.9×10^{-1}	1.4×10^{-1}	3.3×10^{-1}
		ماسه رس‌دار	2.6×10^{-1}	1.1×10^{-1}	1.9×10^{-1}
		ماسه متراکم	0.9×10^{-1}	0.4×10^{-1}	0.6×10^{-1}
	دهانه آزاد	رس ماسه‌دار	5.0×10^{-1}	10×10^{-1}	14×10^{-1}
		ماسه رس‌دار	0.4×10^{-1}	10×10^{-1}	9×10^{-1}
		ماسه متراکم	5.1×10^{-1}	15×10^{-1}	14×10^{-1}



شکل ۱۰- بیشینه پاسخ سرعت (PGV) (الف) گره ۱۸ در حالت خوابیده روی بستر دریا (ب) گره ۱۸ در حالت دهانه آزاد (پ) گره ۱۶۰۹ در حالت خوابیده روی بستر دریا (ت) گره ۱۶۰۹ در حالت دهانه آزاد.

در گره میانی (گره ۱۶۰۹) در حالت دهانه آزاد، دامنه سرعت ارتعاشات بر روی بستر ماسه متراکم در سه جهت به‌ویژه در جهت جانبی و قائم خیلی بالاست، دلیل اول اینکه بستر در نواحی تکیه‌گاهی، نسبت به رس و ماسه، سخت می‌باشد (اثر بزرگنمایی دینامیکی بستر). دوم اینکه، خط لوله در دهانه‌ی به طول ۸۰ متر آزاد می‌باشد. با مقایسه پاسخ سرعت در حالت خوابیده بر روی بستر دریا در گره‌های ۱۸ و ۱۶۰۹ مشاهده می‌شود چندان تفاوتی بین پاسخ سرعت‌ها وجود ندارد.

در حالت دهانه آزاد بیشینه پاسخ سرعت طولی میانه لوله نسبت به ابتدای لوله افزایش خیلی اندکی داشته است اما در جهت جانبی و قائم افزایش حداکثر پاسخ سرعت طولی میانه لوله نسبت به ابتدای لوله زیاد می‌باشد به‌ویژه در ماسه متراکم به جهت سختی دینامیکی بستر و تخلخل کمتر در نواحی تکیه‌گاهی افزایش خیلی زیادی را نشان می‌دهد.

۳-۳- پاسخ شتاب PGA

همانند پاسخ جابجایی و سرعت دامنه ارتعاش شتاب ماسه متراکم (به جز در حالت دهانه آزاد در جهت طولی) در مقایسه با شتاب جهت جانبی و قائم کمتر است. ولیکن مقادیر شتابها به ویژه در حالت دهانه آزاد زیاد است (حدود ۴g) که بیشتر از بیشینه شتاب محتمل طراحی بوده و نشانگر این است که در پاسخ شتاب نسبت به شتاب ساختگاه پدیده تشدید رخ داده است.

بیشینه پاسخ شتاب عمودی خط لوله بر روی بستر رسی در حالت خوابیده بر روی بستر دریا، همچنین بر روی بستر ماسه‌ای در جهت طولی به لحاظ دینامیکی، پدیده تشدید رخ داده است. ولیکن در جهت جانبی مقدار حداکثر شتاب تقریباً برابر بیشینه شتاب محتمل می‌باشد. ناگفته نماند که مقدار ماکزیمم شتاب مجاز طبق آیین‌نامه‌های ALA¹² و DNV¹³ در حالت بهره‌برداری برابر ۰/۰-۱۵/۲g می‌باشد. برای دیگر حالت‌های طراحی، حداکثر مقدار مجاز ۱-۱/۲۵g می‌باشد. از آنجایی که امکان دارد در پاسخ شتاب نسبت به شتاب ساختگاه تشدید رخ دهد، لذا معمولاً طراحی خطوط لوله دریایی بر مبنای مقادیر بیشینه جابجایی و سرعت انجام می‌گیرد.

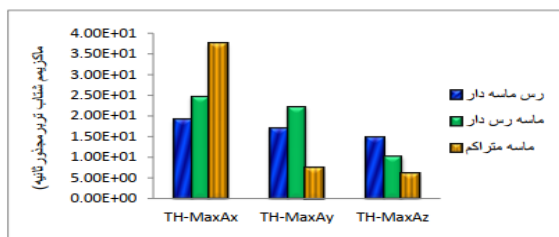
برای گره ۱۸ در حالت دهانه آزاد بر روی بستر ماسه متراکم، در جهت طولی بیشینه پاسخ شتاب خیلی بیشتر از شتاب مجاز آیین‌نامه شده است. لذا در حالت کلی، در حالت دهانه آزاد بر روی هر سه نوع بافت خاک و در سه جهت طولی، جانبی و قائم بیشینه پاسخ شتاب بزرگ‌تر یا مساوی پاسخ شتاب طراحی است. بیشینه پاسخ شتاب میانه لوله در حالت دهانه آزاد، افزایش یافته است و دلیل آن نیز کاملاً واضح است. از پاسخ شتاب میانه خط لوله (گره ۱۶۰۹) چنین استنباط می‌شود در حالت خوابیده بر روی بستر دریا، مانند ناحیه تکیه‌گاهی خط لوله (گره ۱۸)، دامنه ارتعاش شتاب جهت طولی و جانبی بر روی بستر ماسه نسبت به رس و ماسه متراکم بزرگ‌تر بوده ولی دامنه ارتعاش شتاب جهت قائم بستر رسی بزرگ‌تر است. در حالت دهانه آزاد، در هر سه جهت، دامنه ارتعاش شتاب خط لوله بر روی ماسه متراکم بیشتر بوده ولیکن پریود ارتعاش جهت طولی کمتر است، همچنین در با مقایسه ابتدای خط لوله پریود و دامنه ارتعاشات افزایش چشمگیری به خصوص بر روی ماسه متراکم مشاهده می‌شود.

از شکل ۱۱ نتیجه می‌شود بیشینه پاسخ شتاب گره ۱۸ با گره ۱۶۰۹ همانند بیشینه پاسخ سرعت و جابجایی در حالت خوابیده بر روی بستر دریا، تفاوت محسوسی وجود ندارد.

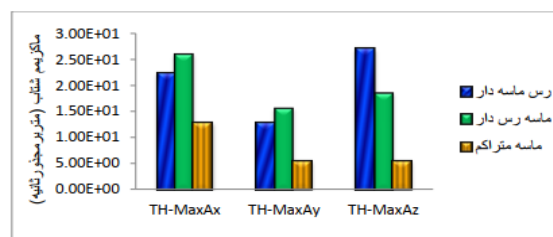
در حالت دهانه آزاد، بیشینه پاسخ شتاب گره ۱۶۰۹ در قیاس با گره ۱۸ به اندازه خیلی اندک افزایش یافته‌اند و علت اصلی این افزایش، آزاد بودن دهانه خط لوله است. دقیقاً مثل تیر یک دهنه دو سر آزاد رفتار می‌کند. نتایج حاصل از بیشینه پاسخ جابجایی و سرعت برای بیشینه پاسخ شتاب نیز صادق بوده و بیشینه پاسخ شتاب میانه خط لوله در هر سه جهت در حالتی که خط لوله به صورت دهانه آزاد است، اتفاق افتاده است. در خط لوله به صورت دهانه آزاد، وقتی انتهای لوله آزاد است، بیشینه پاسخ شتاب وسط خط لوله همانند بیشینه پاسخ جابجایی و سرعت، در جهت قائم رخ می‌دهد ولیکن در صورتی که انتهای لوله ثابت است، بیشینه پاسخ شتاب وسط خط لوله، در جهت جانبی اتفاق می‌افتد.

¹² American Lifelines Alliance (ALA)

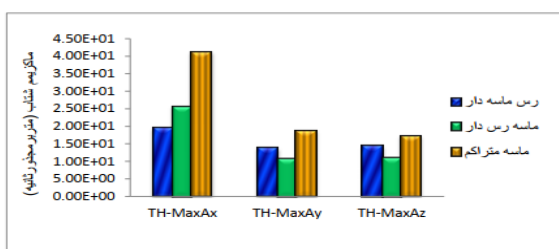
¹³ Det Norske Veritas (DNV)



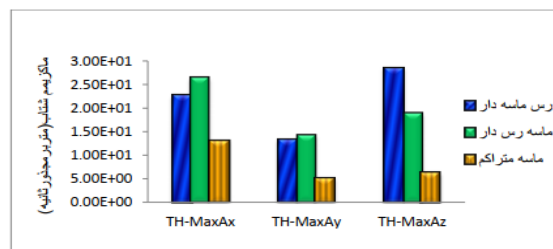
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۱- بیشینه پاسخ شتاب (PGA) (الف) گره ۱۸ در حالت خوابیده روی بستر دریا (ب) گره ۱۸ در حالت دهانه آزاد (پ) گره ۱۶۰۹ در حالت خوابیده روی بستر دریا (ت) گره ۱۶۰۹ در حالت دهانه آزاد.

۳-۴- نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه

تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای برای سطوح خطر ذیل بر اساس دستورالعمل ATC-40 و در برخی حالت‌ها، یک سطح خطر بر اساس دستورالعمل بهسازی ایران انجام گرفته است.

- سطوح خطر بر اساس دستورالعمل ATC-40

لرزه سطح طراحی (DEQ): زلزله طراحی سطحی از لرزش‌های زمین است که احتمال وقوع زلزله‌ای بزرگ‌تر از آن در مدت ۵۰ سال عمر مفید ساختمان برابر ۱۰ درصد می‌باشد؛ به عبارت دیگر دوره بازگشت چنین زلزله‌ای ۴۷۵ سال می‌باشد.

لرزه سطح بهره‌برداری (SEQ): زلزله سطح بهره‌برداری احتمالاتی به صورت زلزله‌ای با احتمال وقوع ۵۰ درصد در ۵۰ سال می‌باشد که دوره بازگشت چنین زلزله‌ای ۷۵ سال می‌باشد. در دستورالعمل ATC-40 این سطح زلزله، عموماً در حدود ۱/۲ سطح زلزله طراحی معرفی شده است.

لرزه سطح حداکثر (MEQ): زلزله سطح حداکثر با روش تعیینی به عنوان حداکثر سطح زلزله‌ای که از یک منطقه با شرایط زمین‌شناسی مشخص انتظار می‌رود اطلاق می‌شود. چنین زلزله‌ای بیانگر سطحی از لرزش‌های زمین است که احتمال وقوع زلزله‌ای بزرگ‌تر از آن در مدت ۵۰ سال برابر ۵ درصد می‌باشد.

- سطوح خطر بر اساس دستورالعمل بهسازی ایران

سطح خطر ۱ یا BSE-1: این سطح خطر بر اساس ۱۰ درصد احتمال رویداد در مدت ۵۰ سال و دوره بازگشت ۴۷۵ سال می‌باشد (مطابق با زلزله سطح طراحی DEQ در دستورالعمل ATC-40).

سطح خطر ۲ یا BASE-2: این سطح خطر بر اساس ۲ درصد احتمال رویداد در مدت ۵۰ سال که معادل دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است تعیین می‌شود. از این سطح خطر تحت عنوان بیشینه زلزله محتمل (MPE) یا بزرگ‌ترین زلزله قابل باور (MCE) نیز یاد می‌شود.

سطح خطر انتخابی (یا زلزله با هر احتمال رویداد در مدت ۵۰ سال): این سطح خطر برای موارد خاص و با ملاحظات ویژه، مناسب می‌باشد.

۳-۴-۱- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله با حالت انتهایی آزاد

در حالت کلی جهت بررسی احتمال خرابی سالانه لوله دریایی بر اساس PGD و PGV توابع حدی زیر در نظر گرفته شده است.

برای حالت PGD:

$$g_1(x_i) = PGD(EX.L = 2\%) - PGD_{max}$$

$$g_2(x_i) = PGD(EX.L = 5\%) - PGD_{max}$$

$$g_3(x_i) = PGD(EX.L = 10\%) - PGD_{max}$$

$$g_4(x_i) = PGD(EX.L = 50\%) - PGD_{max}$$

برای حالت PGV:

$$g_1(x_i) = PGV(EX.L = 2\%) - PGV_{max}$$

$$g_2(x_i) = PGV(EX.L = 5\%) - PGV_{max}$$

$$g_3(x_i) = PGV(EX.L = 10\%) - PGV_{max}$$

$$g_4(x_i) = PGV(EX.L = 50\%) - PGV_{max}$$

از میان انواع بارگذاری‌هایی که مهندسیین بایستی برای طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌ها در نظر بگیرند، تغییر شکل‌های ناشی از بارگذاری لرزه‌ای بوده و این امر به جهت عدم قطعیت‌های بزرگ موجود در پاسخ‌های سازه‌ای و نیروهایی که به وجود می‌آوردند، به نوبه خود بسیار چالش‌برانگیز هستند. زمان وقوع زلزله، مقدار آن، ویژگی‌های سطح گسیختگی، میرایی، تشدید موج زلزله و در نهایت رفتار سازه، پاسخ دینامیکی و ظرفیت آن برای مقابله با خرابی را نمی‌توان به‌طور قطعی مشخص نمود. جهت منظور نمودن این عدم قطعیت‌ها و تأثیرات مربوط به آنها بر روی طراحی و عملکرد سازه‌ای، نیازمند روش‌های احتمالاتی و آماری می‌باشد. در جدول ۵ محدوده‌های جابجایی، سرعت و شتاب برای سطوح لرزه‌ای مختلف ارائه شده است.

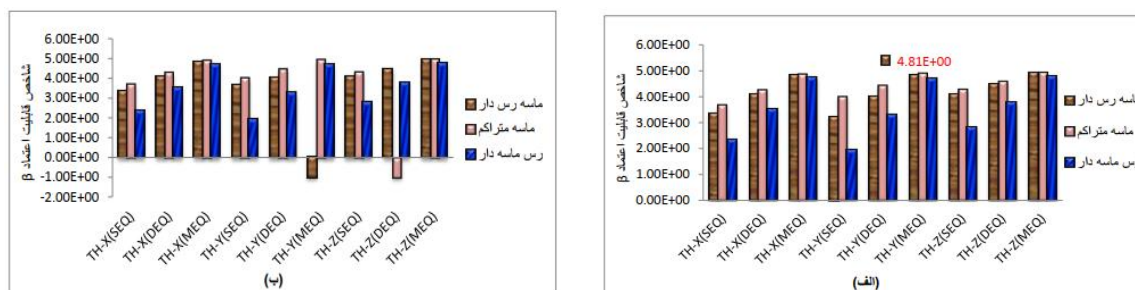
جدول ۵- محدوده‌های PGD، PGV و PGA برای سطوح لرزه‌ای مختلف.

MPE (2 %)	MEQ (5 %)	DEQ (10 %)	SEQ (50 %)	EQ
25-75	15-27	2.9-5.5	2-3	PGD (cm)
65-110	36-44	15-22	8-10	PGV (cm/s)
1.0-1.25	0.65-0.80	0.35-0.40	0.15-0.2	PGA (g)

جدول ۵ بر اساس آنالیزهای شکنندگی لرزه‌ای در مورد ساختگاهی در ناحیه سواحل جنوبی (ساحل خلیج فارس - بندرعباس) به دست آمده است. توابع شکنندگی توزیع‌های احتمالاتی نیستند که از آنها برای به دست آوردن احتمال خرابی اجزای المان‌ها یا یک سیستم برای حالت خرابی معین شده به‌صورت تابعی از یک پارامتر تقاضای قابل پیش‌بینی استفاده می‌شود. معمولاً توابع شکنندگی را به‌صورت توابع توزیع تجمعی لگ نرمال که دارای مقدار میانگین θ و انحراف معیار یا پراکندگی لگاریتمی β هستند بیان می‌کنند. بیان ریاضی چنین تابع شکنندگی به‌صورت زیر است:

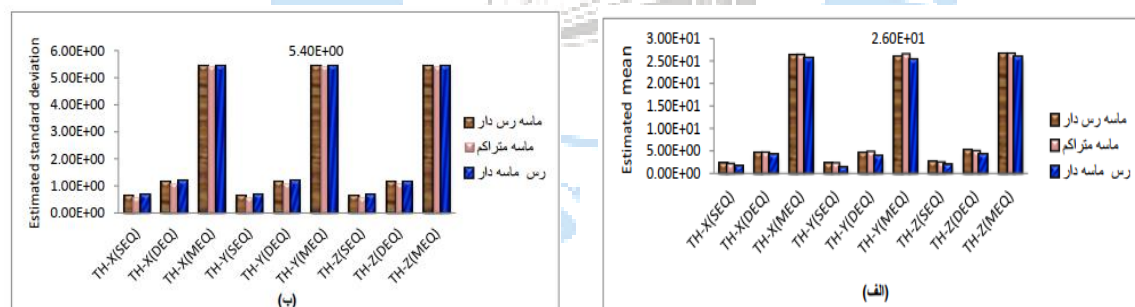
$$F_i(D) = \phi \left[\frac{\ln\left(\frac{D}{\theta_i}\right)}{\beta_i} \right] \quad (8)$$

$F_i(D)$ تابع احتمال خرابی جز m بر حسب تابعی از پارامتر تقاضای D ، تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد، θ_i میانگین توزیع احتمالاتی و β_i انحراف معیار است. θ و β برای هر یک از اجزاء و حالات خرابی مربوطه با استفاده از یکی از روش‌های تجربی یا شبیه‌سازی به دست می‌آیند. شکل ۱۲ نتایج شاخص قابلیت اعتماد را برای گره ۱۸ خط لوله در حالت انتهای آزاد نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نتایج شاخص قابلیت اعتماد (الف) FORM-PGD (ب) SORM-PGD گره ۱۸ خط لوله در حالت دهانه آزاد.

با مشاهده شکل ۱۲ به دست می‌آید که شاخص قابلیت اعتماد در چارت‌های (الف) همه مثبت هستند ولی در چارت‌های (ب) شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله بر روی بستر ماسه‌ای در جهت جانبی برای زلزله سطح حداکثر، منفی شده است. شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم در جهت قائم برای زلزله سطح طراحی، منفی شده است که نشانگر این است که با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای SORM، احتمال خرابی خط لوله در حالت‌های فوق وجود خواهد داشت. اساساً بر اساس روش FORM صرفاً با در نظر گرفتن ممان‌های اول و دوم آمار (میانگین و واریانس) و بدون توجه به توزیع متغیرها، قابلیت اطمینان، محاسبه می‌شود در حالی که SORM احتمال شکست را با تخمین درجه دوم، سطوح شکست غیرخطی، همچنین با در نظر گرفتن توزیع دلخواه محاسبه می‌کند پس دقت روش SORM بالاتر است.

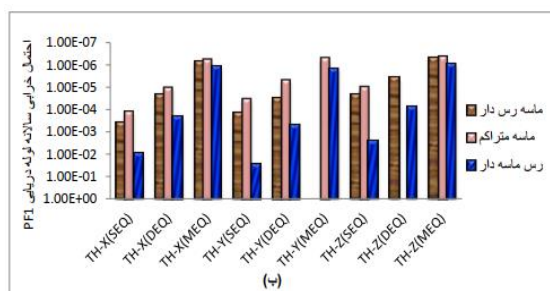


شکل ۱۳- نتایج FOSM-PGD (الف) میانگین (ب) انحراف معیار استاندارد گره ۱۸ خط لوله در حالت دهانه آزاد.

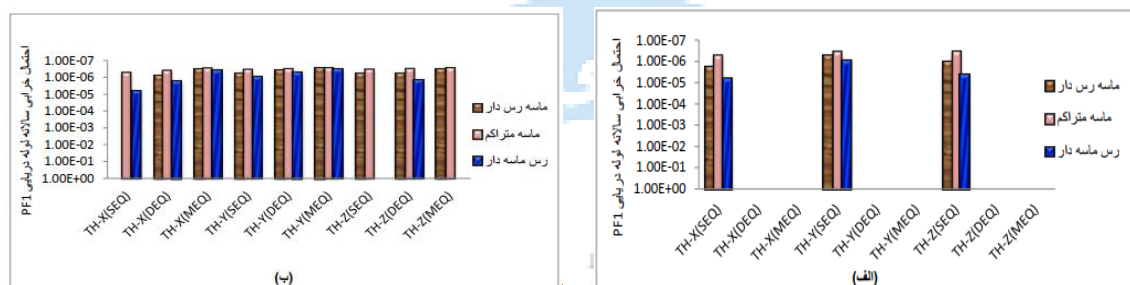
با استفاده از نتایج تحلیل قابلیت اعتماد FOSM-PGD شکل ۱۳ برای خط لوله در وضعیت دهانه آزاد بر روی بستر ماسه‌ای و در حالت TH-Y(MEQ) می‌توان شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای β را به دست آورد $(\beta_{FOSM} = \frac{26}{5.4} = 4.8148)$. همانطوری که از نتایج FORM-PGD شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود، شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای FORM و FOSM تقریباً برابر هستند.

نتایج احتمال خرابی سالانه خط لوله، شکل ۱۴-الف و ۱۴-ب در سه جهت طولی، جانبی و قائم برای حالت حدی زلزله حداکثر طراحی (MEQ) صفر می‌باشند، بدین معنی که احتمال خرابی سالانه خط لوله در این حالت‌ها وجود نخواهد داشت.

نتایج شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای (β) و احتمال خرابی سالانه خط لوله دریایی (PF_i) گر ۱۸ در دو حالت خوابیده بر روی بستر دریا و دهانه آزاد و برای بافت‌های متفاوت خاک بستر، تقریباً یکسان و مشابه می‌باشد.

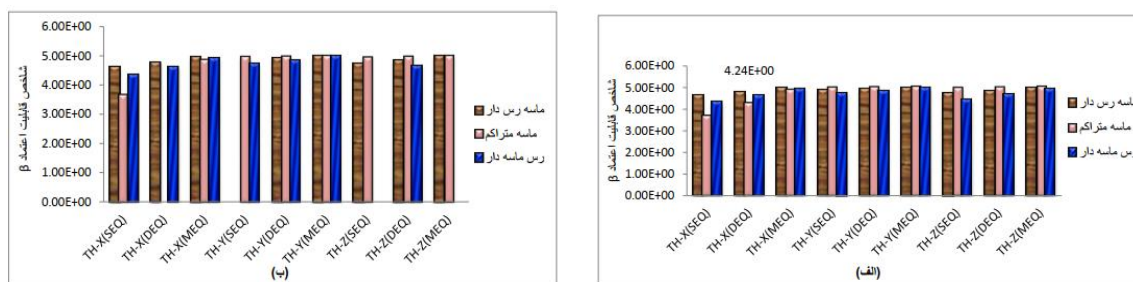


شکل ۱۴- نتایج احتمال خرابی سالانه لوله دریایی (الف) FORM-PGD (ب) SORM-PGD گر ۱۸ خط لوله در حالت دهانه آزاد.



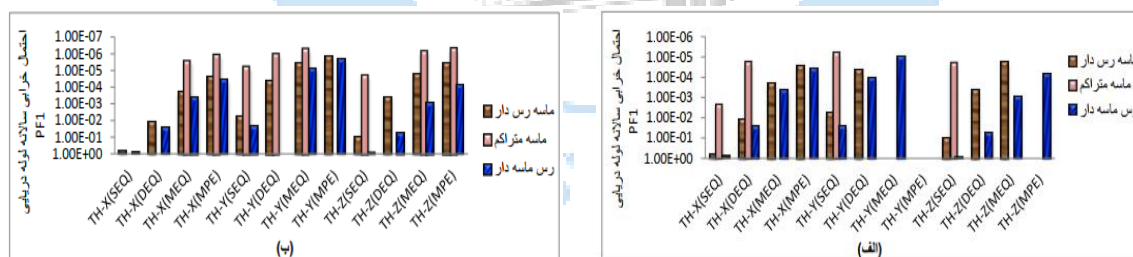
شکل ۱۵- نتایج احتمال خرابی سالانه لوله دریایی (الف) FORM-PGD (ب) SORM-PGD گر ۱۸ خط لوله در حالت خوابیده روی بستر دریا.

از تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای فوق چنین نتیجه می‌شود که احتمال خرابی نواحی تکیه‌گاهی هم در حالت دهانه آزاد و هم برای خط لوله خوابیده بر روی بستر دریا و برای تمام حالات حدی زلزله، صفر و یا خیلی نزدیک به عدد صفر می‌باشند. می‌توان نتیجه گرفت که احتمال خرابی خطوط لوله که به صورت خوابیده بر روی بستر دریا قرار گرفته‌اند، وجود نداشته و قابلیت اعتماد طراحی این خطوط لوله‌ها بیشتر می‌باشد. جهت اطمینان، نتایج FORM-PGD برای این حالت آورده می‌شود. از نتایج پاسخ لرزه‌ای خط لوله در گر ۱۶۰۹ حالت دهانه آزاد (با توجه به جدول ۶ و بیشینه جابجایی ۱۶ سانتیمتر)، پیداست احتمال خرابی میانه خط لوله در حالت دهانه آزاد بر روی بستر ماسه متراکم و رسی بیشتر است و منجر به شکست خط لوله خواهد شد و علت آن می‌تواند اثر بزرگنمایی دینامیکی بستر (پدیده تشدید) و سختی بستر باشد. برای گر میانی خط لوله دهانه آزاد، احتمال خرابی برای خط لوله بر روی بستر رسی، به دلیل نرمی و انعطاف‌پذیری بستر، همچنین برای خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم، به علت سختی بستر و اثر بزرگنمایی دینامیکی (پدیده تشدید)، نزدیک یک بوده و این بدان معنی است که برای خط لوله در جهت جانبی و قائم در حالت‌های حدی زلزله سطح بهره‌برداری (SEQ) و زلزله سطح طراحی (DEQ) احتمال خرابی وجود دارد.



شکل ۱۶- نتایج شاخص قابلیت اعتماد (الف) FORM-PGD (ب) SORM-PGD گره ۱۶۰۹ خط لوله در حالت خوابیده روی بستر دریا.

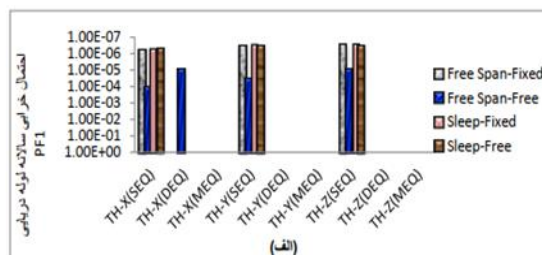
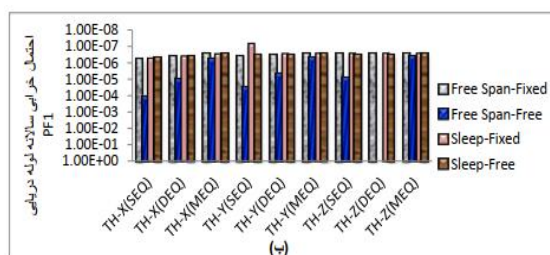
شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای بر اساس روش FORM (شکل ۱۶) برای همه حالت‌های طراحی لرزه‌ای، مثبت است ولی بر اساس روش SORM در جهت طولی خط لوله خوابیده بر روی بستر ماسه متراکم برای زلزله سطح طراحی، برای خط لوله خوابیده بر روی بستر ماسه‌ای در جهت جانبی در زلزله سطح بهره‌برداری و برای خط لوله خوابیده بر روی بستر رسی در جهت قائم در زلزله سطح سرویس هم در سطح زلزله حداکثر، مقادیر β وجود ندارند. این بدان معناست که در این حالت‌ها، همگرایی عددی حاصل نشده است. جهت پی بردن به صحت مقادیر FORM که بر اساس روش SORM همگرایی عددی حاصل نشده‌اند، می‌توان از نمودارهای FOSM استفاده نمود. برای مثال در حالت TH-X DEQ برای خط لوله خوابیده بر روی بستر ماسه متراکم، مقدار β برابر $\beta_{FOSM} = \frac{4.72}{1.11} = 4.2522$ به دست می‌آید که این مقدار تقریباً برابر مقدار شاخص قابلیت لرزه‌ای FORM شکل ۱۵ می‌باشد. احتمال خرابی خط لوله خوابیده بر روی بستر دریا، در نواحی تکیه‌گاهی هم در میانه خط لوله صفر و یا نزدیک به عدد صفر است به‌ویژه هنگامی که خط لوله بر روی بستر سخت، ماسه متراکم، قرار دارد. جهت بحث و بررسی بیشتر پایداری خط لوله، به نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای ناشی از PGV پرداخته می‌شود. در شکل ۱۷ احتمال خرابی سالانه لوله دریایی برای دو حالت FORM-PGV و SORM-PGV گره ۱۶۰۹ خط لوله در حالت خوابیده روی بستر دریا ارائه شده است.



شکل ۱۷- احتمال خرابی سالانه لوله دریایی برای دو حالت (الف) FORM-PGV و (ب) SORM-PGV گره ۱۶۰۹ خط لوله در حالت خوابیده روی بستر دریا.

۳-۴-۲- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله با حالت انتهایی ثابت

در این بخش به بررسی نتایج تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم با حالت انتهایی ثابت پرداخته خواهد شد. برای مقایسه بیشتر، حالت دهانه آزاد و خوابیده بر روی بستر دریا برای حالت‌های انتهایی ثابت و آزاد، کنار هم آورده شده است. در شکل ۱۸ نتایج احتمال خرابی سالیانه جابجایی برای گره ۱۸ روی بستر متراکم به‌عنوان نمونه ارائه شده است.



شکل ۱۸- نتایج احتمال خرابی سالانه لوله دریایی (الف) FORM-PGD (ب) SORM-PGD گره ۱۸ خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم.

شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای ناشی از پاسخ‌های جابجایی جهت جانبی خط لوله با حالت انتهایی آزاد در دو وضعیت دهانه آزاد و خوابیده بر روی بستر دریا، در وسط دهانه خط لوله نسبت به حالت انتهایی ثابت کمتر است و نشانگر این است که احتمال خرابی در جهت جانبی اعمال شتاب‌نگاشت زلزله، بیشتر است. برعکس، در جهت قائم شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله با حالت انتهایی ثابت، در وضعیت دهانه آزاد در وسط دهانه خط لوله نسبت به حالت انتهایی آزاد کمتر است و نشانگر این است که احتمال خرابی، در جهت قائم اعمال شتاب‌نگاشت زلزله، بیشتر است. نتیجه کلی اینکه در حالت خوابیده بر روی بستر دریا در نواحی تکیه‌گاهی و وسط دهانه خط لوله، احتمال خرابی برای هر دو شرایط تکیه‌گاهی ثابت و آزاد تقریباً یکسان می‌باشد ولی در حالت دهانه آزاد با شرایط تکیه‌گاهی (انتهاپی) ثابت، احتمال خرابی خط لوله در جهت قائم بیشتر است.

۴- نتیجه‌گیری کلی

یکی از مشکلات عمده که در استفاده از خط لوله و نصب تجهیزات زیردریایی وجود دارد ناپایداری ناشی از امواج لرزه‌ای توأم با جریان و امواج دریایی است. زمانی که خط لوله در بستر دریا نصب می‌شود ارتباط پیچیده‌ای بین لوله-خاک و بارهای هیدرودینامیکی به وجود می‌آید. برای خطوط لوله غیر مدفون انتشار موج زلزله و تغییر شکل‌های ناشی از آن می‌تواند با توجه به هندسه خط لوله و سازه‌های متصل باعث ایجاد خرابی گردد. در این راستا تحلیل لرزه‌ای خط لوله گاز ساحل خلیج فارس انجام یافته و مقادیر شاخص قابلیت اعتماد و احتمال خرابی سالانه بر حسب پارامترهای جابجایی، سرعت و شتاب ارائه شده است. نتایج حاصله در ادامه ارائه شده است:

- ۱- پاسخ‌های خط لوله به جنس خاک بستر (سختی و تخلخل) بستگی دارد و از آنجایی که خاک ماسه متراکم نسبت به ماسه رس‌دار و رس ماسه‌دار سخت‌تر می‌باشد، همچنین عمق دفن (نفوذ قائم) خط لوله در این خاک کمتر است. لذا پاسخ‌های خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم کمتر می‌شود.
- ۲- در خط لوله با شرایط انتهایی آزاد، بیشینه پاسخ جابجایی جهت طولی در هر سه نوع بافت خاک نسبت به پاسخ جابجایی‌های جهات قائم و جانبی بزرگ‌تر است. همچنین بیشینه پاسخ جابجایی جهت قائم نسبت به بیشینه پاسخ جابجایی جانبی بزرگ‌تر است.
- ۳- در حالت دهانه آزاد به علت آزاد بودن دهانه لوله به طول ۸۰ متر، جابجایی ناشی از حرکات لرزه‌ای زمین حداکثر است. بیشینه جابجایی‌های لرزه‌ای خط لوله در حالت دهانه آزاد در مقایسه با حالت خوابیده خط لوله بر روی بستر دریا، به نحو چشمگیری بیشتر (در حدود ۴ برابر) می‌باشد.
- ۴- بر حسب تحلیل‌های قابلیت اعتماد لرزه‌ای، نتیجه می‌شود احتمال خرابی سالانه خط لوله دریایی با دهانه آزاد به‌ویژه در ناحیه میانی بیشتر از حالتی است که لوله به‌طور کامل بر روی بستر دریا خوابیده است.

- ۵- برای خط لوله خوابیده بر روی بستر دریا در نواحی تکیه‌گاهی و وسط دهانه لوله، احتمال خرابی سالیانه لوله دریایی برای هر دو شرایط تکیه‌گاهی ثابت و آزاد تقریباً یکسان می‌باشد ولی برای خط لوله با دهانه آزاد و شرایط تکیه‌گاهی ثابت، احتمال خرابی خط لوله در جهت جانبی و برای انتهای آزاد در جهت قائم بیشتر است.
- ۶- بر اساس تحلیل‌های قابلیت اعتماد لرزه‌ای احتمال خرابی سالیانه در نواحی میانی خط لوله دهانه آزاد بر روی بستر ماسه متراکم به علت سختی بستر و نیز اثر بزرگنمایی دینامیکی (پدیده تشدید) و هم بر روی بستر رسی (به دلیل نرمی و انعطاف‌پذیری بستر) بیشتر است.
- ۷- مقدار منفی شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای خط لوله بر روی بستر ماسه متراکم در جهت قائم برای زلزله سطح طراحی، نشانگر آن است که با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای SORM، احتمال خرابی خط لوله در حالت‌های فوق وجود خواهد داشت. اساساً بر اساس روش FORM و صرفاً با در نظر گرفتن ممان‌های اول و دوم آمار (میانگین و واریانس) و بدون توجه به توزیع متغیرها، قابلیت اطمینان، محاسبه می‌شود در حالی که SORM احتمال شکست را با تخمین درجه دوم، سطوح شکست غیرخطی، همچنین با در نظر گرفتن توزیع دلخواه محاسبه می‌کند پس دقت روش SORM بالاتر است.
- ۸- به لحاظ طراحی خط لوله دریایی با دهانه آزاد با حالت انتهایی ثابت، زمانی از لحاظ بهره‌برداری قابل اعتماد می‌باشد که احتمال خرابی سالانه لوله دریایی مربوط به شرایط سرویس کوچک‌تر یا مساوی ۰/۰۱ و شاخص قابلیت اعتماد لرزه‌ای بزرگ‌تر یا مساوی ۲ باشد.
- ۹- با توجه به نتایج این تحقیق، توصیه می‌شود در طراحی خطوط لوله گاز فراساحلی، عوامل زلزله‌ای و انتقال موج لرزه‌ای در خاک و لوله به‌طور جدی مدنظر قرار گیرد تا امنیت و پایداری این سازه‌ها تضمین شود. در مجموع می‌توان بیان نمود بهبود امنیت لوله‌های گاز فراساحلی در خلیج فارس نیازمند درک دقیق از رفتار لوله‌ها در شرایط زلزله و استفاده از روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد است.

منابع

- [1] Iyalla, I. (2007). Calculating hydrodynamic loads in pipelines and risers: practical alternative to Morison's equation [Unpublished MSc Thesis], Aberdeen: Robert Gordon University.
- [2] Guo, B., Song, S., Ghaleb, A., Lin, T.R. and Chacko, J. (2005). Offshore Pipelines. Oxford: Elsevier Inc.
- [3] Iyalla, I., Umah, K. and Hossain, M. (2010). Computational Fluid Dynamics Modelling of Pipe-Soil Interaction in Current. "Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II WCE 2010, June 30 - July 2, London, U.K.
- [4] Golbahar Haghghi, M. and Aghakoochak, A A. (2007). Marine pipeline analysis due to earthquake wave propagation and seismic faults. *Marine Engineering*, 3(5), 53-68.
- [5] Hededal, O. and Strandgaard, H. (2008). A 3D elasto-plastic spring element for pipe-soil interaction analysis. Technical University of Denmark, Dept. of Civil Engineering Brovej, DK-2800 Lyngby GeoLine APS Frodesvej 8, DK-2880 Bagsvrd, February 2008.
- [6] BS 8010: Part 3, Code of practice for Pipelines, Part3: Pipelines subsea: design, construction and installation, BSI, London, 1993.
- [7] Shaminee, P.E.L. Zorn, N.F. and Schotman, G.J.M. (1990). Soil Response for Pipelines Upheaval Buckling Analyses: Full-Scale Laboratory Tests and Modelling, OTC 6486, 22nd Annual Offshore Technology Conference, May 7-10, 563-572, Houston.
- [8] ALA, Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, ASCE, USA, 2001.
- [9] Finch, M.F., Fisher, R., Palmer, A. and Baurgard, A. (2000). An integrated approach to pipeline burial in the 21st Century, Deep Offshore Technology, Houston.
- [10] Oliphant, J. and Macanochie, A. (2007). The Axial Resistance of Buried and Unburied Pipelines, Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New challenges and Sharing Knowledge, London.
- [11] Cathie, D. N., Jaeck, C., Ballard, J. C. and Wintgens, J.F. (2005). Pipeline geotechnics – state-of-the-art. Proc. of the Int. Symp. on the Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG 2005, Taylor and Francis Group, Perth, Australia, pp 95-114.
- [12] Wijewickreme, D., Karimian, H. and Honegger, D. (2008). Response of buried steel pipelines subjected to relative axial soil movement, *Canadian Geotechnical Journal*, 46(7), 735-752.
- [13] Shupp, J., Byrne, B.W., Eacott, N., Martin, C.M., Oliphant, J., Maconochie, A. and Cathie, D. (2006). Pipeline unburial behaviour in loose sand, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg.
- [14] Shabani, B. and Jeng, D. (2008). 3D Modeling of Wave Seabed-Pipeline in Marine Environments, Division of Civil Engineering, School of Engineering, University of Queensland, QLD 4072 Australia and Division of Civil Engineering, School of Engineering, Physics and Mathematics, University of Dundee, Dundee, DD1 4HN, Scotland, UK.
- [15] Polous, H.G. (1988). *Marine Geotechnics*, Unwin Hyman, London; Boston, 473 pp.
- [16] Wang, J., Karim, M. and Lin, P. (2007). Analysis of seabed instability using element free alerkin method. *Ocean Engineering*, 34, 247-260.

- [17] Marcuson, W.F. (1978). Definition of terms related to liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104(4), 1197-1200.
- [18] Youd, T.L., Idriss, I.M., Ronald, D.A., Ignacio, T.C., Gonzalo, A., John C., Richardo, D., Finn, W.D.L., Leslie, F.H., Mary, E.H., Kenji, I. Joseph, P.K., Sam, S.C.L., III William, F.M. Geoffrey, R.M., James, K.M. Yoshiharu, M., Maurice, S.P., Peter, K.R., Raymond, B.S. and II Kenneth, H.S. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, pp. 817-833.
- [19] Groot, M.B., Bolton, M.D., Foray, P., Meijers, P., Palmer, A.C., Sandven, R., Sawicki, A. and The, T. (2006). Physics of liquefaction phenomena around marine structures. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 132, 227-243.
- [20] Okusa, S. (1985). Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments. *Éotechnique*, 35, 517-532.
- [21] Tsai, P. (1995). Wave-induced liquefaction potential in a porous seabed in front of a breakwater. *Ocean Engineering*, 22, 1-18.
- [22] Zen, K. and Yamazaki, H. (1991). Field observation and analysis of waveinduced liquefaction in seabed. *Soils and Foundations*, 31(5), 161-179.
- [23] Marti´nez, C. E. and Goncalves, R. (2003). Laying modeling of submarine pipelines using contact elements into a corotational formulation. *ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 125(2), 145-152.
- [24] Cresswell, G.R. and Badcock, K.A. (2000). Tidal mixing near the Kimberley coast of NW Australia. *Marine and Freshwater Research*, 51(7), 641-646.
- [25] Damgaard, J. S. and Palmer, A.C. (2001). "Pipeline stability on a mobile and liquefied seabed: a discussion of magnitudes and engineering implications. Proc. 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil.
- [26] Cassidy, M.J. (1999). Non-Linear Analysis of Jack-Up Structures Subjected to Random Waves. Thesis (Ph.D), New College, Oxford, UK.
- [27] Fandry, C. and Steedman, R. (1989). An investigation of tropical cyclone-generated circulation on the North-West Shelf of Australia using a three-dimensional model. *Ocean Dynamics*, 42(3), 307-341.
- [28] Holloway, P.E. and Nye, H.C. (1985). Leeuwin current and wind distributions on the southern part of the Australian North West Shelf between January 1982 and July 1983. *Marine and Freshwater Research*, 36(2), 213-229.
- [29] Iglan, R. T. and Moan, T. (2000). "Reliability Analysis of Pipelines During Laying, Considering Ultimate Strength Under Combined Loads. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 122(1), 40-46.
- [30] Brown, G., Tkaczyk, T. and Howard, B. (2004). Reliability Based Assessment of Minimum Reelable Wall Thickness for Reeling. *ASME Conference Proceedings*, 2004(41766), 1951-1960.
- [31] Jones, W.T. (1985). Deepwater Pipeline environmental Design conditions. Proc. OMA Symposium Dallas TX February 451- 466.
- [32] Bruschi, R., Gudmestad, O.T., Blaker, F. and Nadim, F. (1996). Seismic Assessment for Offshore Pipelines. *J. of Infrastructure Systems*, 2(3), 145-151.
- [33] Bruschi, R., Gudmestad, O.T., Marchesani, F. and Vitali, L. (1996). Seismic Integrity of Offshore Pipelines in Seismic Conditions, Proc. Conference on OMEA, OMAE 1996, 5, 421-430.
- [34] Kershenbaum, N.Y., Choi, H.S. and Mebarkia, S.A. (1998). Behavior of marine pipelines under seismic faults. *Ocean Engineering*, 27, 473-487.
- [35] Chen, C. and Wang, D. (2020). Seismic performance evaluation of offshore gas pipelines in the Persian Gulf region, *Journal of Pipeline Engineering*, 19(3), 187-201.
- [36] Liu, G. and Wang, H. (2020). Soil-pipe interaction effects on the seismic response of offshore gas pipelines. *Geotechnical Special Publication*, 321, 1-10.
- [37] Lee, E. and Zhang, F. (2021). Reliability analysis of offshore gas pipelines subjected to seismic loading. *Ocean Engineering*, 237, 108103.
- [38] Smith, A. and Johnson, B. (2021). Seismic vulnerability assessment of offshore gas pipelines using probabilistic methods. *Marine Structures*, 76, 105-112.
- [39] Youssef, S., Assidy, J. and Yinghui T. (2011). Probabilistic Model Application in the Integrated Stability Analysis of Offshore On-Bottom Pipeline. Centre for Offshore Foundation Systems Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2011 June 19-24.
- [40] Offshore Standard DNV-OS-F101, Submarine Pipeline Systems, Norway, OCTOBER 2007.
- [41] Bruton, D., White, D., Cheuk, C. and Bolton, C.M. (2006). Pipe/soil interaction behavior during lateral buckling, including large-amplitude cyclic displacement tests by safebuck jip. In Proc. O@shore Technology Conference, Number Paper No. OTC 17944.
- [42] Dendani, H. and Jaeck, C. (2007). Pipe-soil interaction in highly plastic clays. In Proc6th International O@shore Site Investigation and Geotechnics Conference, PP. 115-124.
- [43] Verley, R. and Lund, K. (1995). A soil resistance model for pipelines placed on clay soils. In Proc. of OMAE 1995, Volume Volume V Pipeline Technology, PP. 225-232.
- [44] Sorenson, T., Bryndum, M. and Jacobsen, V. (1986). Hydrodynamic Forces on Pipelines- Model Tests. Danish hydraulic Institute (DHI), Contract PR-170-185. Pipeline esearch Council International Catalog No. L51522e.
- [45] Bai, Y. and Bai, Q. (2005). *Subsea Pipelines and Risers*, Elsevier, 812P.
- [46] Offshore Standard DNV-RP-F105, Free Spanning Pipelines, Norway, FEBRUARY 2006.
- [47] Offshore Standard DNV-RP-C202, Buckling Strength of Shells, Norway.