



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Sensitivity Analysis of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling

Abdolrahim Taheri^{*}, Mahdi Tasdighi

Department of Offshore Structural Engineering, Petroleum University of Technology, Iran.

^{*} Corresponding Author Email: rahim.taheri@put.ac.ir

Received: 24 May 2020

Revise Date: 6 December 2020

Accepted: 8 December 2020

DOI: 10.22113/JMST.2020.229313.2367

ABSTRACT

Using a high safety factor in construction without precise calculations imposes high costs on the execution project. Using a low safety factor exposes the project to a high risk of failure. Therefore, determining the impact of uncertain parameters greatly aids in designing with the least possible risk. The contribution of each parameter to uncertainty can be identified through sensitivity analysis. This paper considers the impact of the uncertainty of three parameters—elastic modulus, pipe thickness, and pipe diameter—on the buckling of a marine pipeline, as these three parameters significantly influence the geometry of the pipeline. Two analyses, First Order Second Moment (FORM) and Second Order Reliability Order (SORM), are employed for the sensitivity analysis of the pipeline parameters. The First Order Second Moment analysis provides four importance vectors, while the Second Order Reliability Order analysis yields only one importance index. The results indicate that the pipe diameter has a greater impact compared to the other two parameters. The smallest difference is observed between the elastic modulus and pipe thickness, suggesting that these two parameters have a similar level of sensitivity. The reliability index values in FORM and FOSM are distinct yet close to each other, with FOSM yielding a lower value.

Keywords: Pipeline, Upheaval buckling, Sensitivity analysis, Reliability

1. INTRODUCTION

Submarine pipelines are subjected to various forces of different natures during installation and operation, such as hoop stress, axial force, and so on. The high temperature and pressure gradient between the well and the terminal (platform or refinery) in gas transmission lines generates significant axial force in the pipeline. If the mentioned forces exceed a certain threshold, despite the friction of the seabed and the weight of the submerged pipeline, they can cause large deformations in the pipeline or, in other words, lead to pipeline buckling. The DNV-F-110 standard (DET NORSE VERITAS) classifies this type of buckling as global buckling, which can be categorized into horizontal and vertical buckling based on the deformation mode (Shabani et al., 2017). Global

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



buckling is a common and likely phenomenon that can occur during the operation of a pipeline. This phenomenon can lead to defects such as failure, bending, and so on in the pipeline (Karampour and Albermani, 2014). As accessible oil fields are depleted, the need for drilling at greater depths has increased, resulting in higher temperatures and pressures due to the transportation of hydrocarbon products. Consequently, the likelihood of global buckling occurring in deep waters has increased. Due to the lower critical temperature for lateral buckling compared to the critical temperature for vertical buckling, non-buried pipelines often face lateral buckling (Karampour et al., 2013). The presence of an initial vertical defect in a non-buried submarine pipeline makes the occurrence of vertical buckling possible.

2. MATERIALS AND METHODS

The marine pipeline studied in this research has a diameter of 0.816 meters, a thickness of 0.0242 meters, and a length of 40 meters. The Poisson's ratio of the pipeline is considered to be 0.3, and the thermal expansion coefficient is taken as 1.5×10^{-6} . The residual stress from the installation of the pipeline is not considered in this study due to its insignificance compared to other forces affecting the axial force. Horizontal compressive forces are considered with a high conservative coefficient.

3. RESULTS

Three parameters E , t , and D are geometric parameters of the underwater pipeline subjected to buckling. Among the three parameters mentioned, parameters of pipeline thickness and diameter are resistance variables, and elasticity modulus is the load resistance variable. The results show that the pipeline diameter is the most important among the mentioned parameters and the modulus of elasticity is the least important. In the analysis of FORM and FOSM, there are reliability indicators for both of them, which are the basic part of reliability evaluation by the two mentioned analyses. The reliability index values in FORM and FOSM are distinct but close values, which are lower in FOSM. According to Figure (2), the pipeline diameter is the most important variable of the defined limit state function. As it is clear, the smallest difference is between E and t , in other words, these two parameters are close to each other in terms of sensitivity, with the difference that one is a load variable and the other is a resistance variable. Also, this point can be concluded that the values related to the importance index κ have a big difference with other importance indices and the rest of the importance indices have close values.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

Among the three mentioned parameters, the thickness and diameter of the pipeline are variables affecting resistance, while the modulus of elasticity is a variable affecting load resistance. The diameter of the pipeline holds the greatest importance among the mentioned parameters, while the modulus of elasticity is of lesser significance. The reliability index values in FORM and FOSM are distinct yet close to each other, with FOSM yielding a lower value. The approximate equality of the reliability index in the two analyses can be expressed by the difference in the importance vectors in the two analyses, and as the importance of the variables decreases, the difference becomes more pronounced. The values related to the importance index κ show a significant difference compared to other importance indices, while the remaining importance indices have values that are close to each other.



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



تحلیل حساسیت خط لوله دریایی در برابر کمانش قائم

عبدالرحیم طاهری*، مهدی تصدیقی

گروه مهندسی سازه های دریایی، دانشگاه صنعت نفت، ایران.

نویسنده مسئول، پست الکترونیک: rahim.taheri@put.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2020.229313.2367

چکیده

استفاده از ضریب اطمینان بالا در ساخت بدون محاسبات دقیق، هزینه های گزافی را متوجه پروژه ی اجرایی می کند و همچنین استفاده از ضریب اطمینان پایین نیز پروژه را با ریسک شکست بالا رو به رو می کند لذا تعیین میزان اثرگذاری پارامترهای دارای عدم قطعیت کمک زیادی جهت طراحی با کمترین ریسک ممکن را فراهم می سازد. میزان سهم هر پارامتر در عدم قطعیت با تحلیل حساسیت قابل تشخیص می باشد. در این مقاله اثرگذاری عدم قطعیت سه پارامتر مدول الاستیسیته، ضخامت خط لوله و قطر خط لوله که سه پارامتر تاثیرگذار هندسه یک خط لوله دریایی می باشند بر روی کمانش قائم خط لوله دریایی در نظر گرفته شده است. دو تحلیل First Order Second Moment (FORM) و Second Order Reliability Order (SORM) برای تحلیل حساسیت پارامترهای خط لوله در نظر گرفته شده است که تحلیل First Order Second Moment ۴ بر دار اهمیت و تحلیل Second Order Reliability Order، تنها یک شاخص اهمیت دارد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است قطر خط لوله اثرگذاری بالاتری نسبت به دو پارامتر دیگر دارد. کمترین تفاوت میان مدول الاستیسیته و ضخامت خط لوله می باشد که به بیانی دیگر این دو پارامتر وضعیت نزدیک بهم در میزان حساسیت دارند مقادیر شاخص قابلیت اطمینان در FORM و FOSM مقادیر متمایز ولی نزدیک به هم می باشد که در مقدار کمتری را دارد.

واژگان کلیدی: خط لوله، کمانش قائم، تحلیل حساسیت، قابلیت اطمینان.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

کاهش ذخایر نفتی در آب‌های کم‌عمق باعث گرایش شرکت‌های نفتی به استخراج فرآورده‌های هیدروکربنی در آب‌های عمیق شده است. خطوط لوله دریایی به دلیل نسبت سود به هزینه‌ی بالاتر از سایر گزینه‌های انتقال فرآورده‌های هیدروکربنی به عنوان جایگزینی مقرون به صرفه نسبت به تمامی روش‌های گذشته به منظور انتقال فرآورده‌های هیدروکربنی از سکو به ترمینال‌های نفتی مستقر در خشکی مطرح شده است. خط لوله‌ی دریایی به واسطه‌ی انتقال هیدروکربن تحت فشار و حرارت بالا قرار دارد که این فشار و حرارت بالا موجب ایجاد نیروی محوری فشاری در دو سر خط لوله می‌شود. خط لوله‌ی در معرض صدمات به وجود آمده توسط حوادث مختلفی قرار دارد. خاموش کردن و استراحت دادن خط لوله برای تعمیر خط لوله امری ضروریست که این دو عملیات هزینه‌های زیادی را در بردارد. همچنین صدمات وارد بر خط لوله زمینه را برای آلودگی‌های محیطی به واسطه‌ی مواد هیدروکربنی فراهم می‌کند. به منظور کاهش هزینه‌های تعمیر و آلودگی‌های محیطی، کاهش صدمات وارد بر خط لوله و اقدامات پیشگیرانه ضرورت پیدا می‌کند. به منظور کاهش صدمات وارد به خط لوله ناشی از برخورد جسم، خط لوله در حالت مدفون قرار می‌گیرد. نسبت سود به هزینه بالا، سازگاری با شرایط سخت دریا و ظرفیت انتقال بالا، خطوط لوله را به کلیدی‌ترین سازه در صنایع دریایی تبدیل کرده است. امروزه به منظور بهره‌برداری از مخازن موجود در اعماق بیشتر، خطوط لوله در عمق‌های بیشتر و همچنین در مسیرهای طولانی‌تری در حال استفاده می‌باشد (Egan et al., 1996).

کاهش ذخایر نفتی در آب‌های کم‌عمق باعث گرایش شرکت‌های نفتی به استخراج فرآورده‌های هیدروکربنی در آب‌های عمیق شده است. خطوط لوله دریایی به دلیل نسبت سود به هزینه‌ی بالاتر از سایر گزینه‌های انتقال فرآورده‌های هیدروکربنی به عنوان جایگزینی مقرون به صرفه نسبت به تمامی روش‌های گذشته به منظور انتقال فرآورده‌های هیدروکربنی از سکو به ترمینال‌های نفتی مستقر در خشکی مطرح شده است. خط لوله‌ی دریایی به واسطه‌ی انتقال هیدروکربن تحت فشار و حرارت بالا قرار دارد که این فشار و حرارت بالا موجب ایجاد نیروی محوری فشاری در دو سر خط لوله می‌شود. خط لوله‌ی در معرض صدمات به وجود آمده توسط حوادث مختلفی قرار دارد. خاموش کردن و استراحت دادن خط لوله برای تعمیر خط لوله امری ضروریست که این دو عملیات هزینه‌های زیادی را در بردارد. همچنین صدمات وارد بر خط لوله زمینه را برای آلودگی‌های محیطی به واسطه‌ی مواد هیدروکربنی فراهم می‌کند. به منظور کاهش هزینه‌های تعمیر و آلودگی‌های محیطی، کاهش صدمات وارد بر خط لوله و اقدامات پیشگیرانه ضرورت پیدا می‌کند. به منظور کاهش صدمات وارد به خط لوله ناشی از برخورد جسم، خط لوله در حالت مدفون قرار می‌گیرد. نسبت سود به هزینه بالا، سازگاری با شرایط سخت دریا و ظرفیت انتقال بالا، خطوط لوله را به کلیدی‌ترین سازه در صنایع دریایی تبدیل کرده است. امروزه به منظور بهره‌برداری از مخازن موجود در اعماق بیشتر، خطوط لوله در عمق‌های بیشتر و همچنین در مسیرهای طولانی‌تری در حال استفاده می‌باشد (Egan et al., 1996).

اجرای عملیات نصب خط لوله بر مبنای دو موقعیت مکانی صورت می‌گیرد:

- استقرار بر روی سطح هموار شده بستر دریا (در صورت امکان)
- دفن کردن خط لوله (ترانشه: Trench)

محل قرارگیری خط لوله در بستر دریا، نوع بستر دریا همچنین خطاهای در حین ساخت، نصب یا بهره‌برداری در مشخصات هندسی خط لوله باعث ایجاد عدم قطعیت‌های بسیاری می‌گردد. به منظور تعیین یک برنامه مبتنی بر ریسک نیاز به تحلیل سلامتی خط لوله تحت شرایط عملیاتی با استفاده از روش‌های قابلیت اطمینان پررنگ‌تر می‌شود. از سویی دیگر به دلیل حساسیت خطوط لوله دریایی به دلیل پیامدهای ناشی از شکست خط لوله (به طور ویژه خطوط انتقال گاز) نیاز به انجام این گونه تحلیل‌ها بیشتر اهمیت می‌یابد.

عدم قطعیت موجود در پارامترهای موثر کمانش قائم موجب ایجاد عدم قطعیت در کمانش قائم می‌باشد (Taheri et al., 2019). در نظر گرفتن و بررسی این عدم قطعیت‌ها با استفاده از روش‌های قابلیت اطمینان جهت ارزیابی خط لوله کاربردی می‌باشد.

میزان تاثیر گذاری هر پارامتر با توجه به میزان اثرگذاری آن در کمانش قائم متفاوت است. در کمانش قائم پارامترهای زیادی دخیل هستند که بررسی تمام این پارامترها برای میزان اثرگذاری امری پرهزینه و زمان‌گیر است از این جهت تشخیص پارامترهای مهم‌تر و بررسی آن‌ها به ترتیب اهمیت آن‌ها امری کاربردی و بهینه است. تحلیل حساسیت به عنوان بخشی از ارزیابی قابلیت اطمینان نقش پررنگی در تسریع روند تحلیل برعهده دارد. تحلیل First (FORM) Order Second Moment، چهار بردار اهمیت و تحلیل

خطوط لوله دریایی در طول نصب/ بهره‌برداری در معرض نیروهای گوناگون با ماهیت متفاوت می‌باشند مانند تنش حلقوی (Hoop stress)، نیروی محوری و غیره. گرادیان بالای دما و فشار بین چاه و پایانه (سکو یا پالایشگاه) در خطوط انتقال گاز، باعث ایجاد نیروی محوری قابل توجهی در خط لوله می‌شود. نیروهای ذکر شده در صورت گذر از مقدار معینی با وجود اصطکاک بستر و وزن مغروق خط لوله باعث ایجاد تغییر شکل‌های بزرگی در خط لوله می‌گردد یا به عبارت دیگر باعث ایجاد کمانش خط لوله می‌گردد. آیین نامه DNV-F-110 این نوع از کمانش را به عنوان کمانش کلی (DET NORSKE)

Second Order Reliability Method (SORM) تنها یک شاخص اهمیت دارد.

در این مقاله اثرگذاری عدم قطعیت سه پارامتر مدول الاستیسیته، ضخامت خط لوله و قطر خط لوله که سه پارامتر تاثیرگذار هندسه یک خط لوله می‌باشند بر روی کماتش قائم خط لوله در نظر گرفته شده است. دو تحلیل FORM و FOSM برای تحلیل حساسیت پارامترهای خط لوله در نظر گرفته شده اند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است قطر خط لوله اثرگذاری بالاتری نسبت به دو پارامتر دیگر دارد (جدول ۱). تحلیل FORM و FOSM پارامترهای متفاوتی برای بیان میزان حساسیت اثرگذاری پارامترهای خط لوله در کماتش قائم از پارامترهای متفاوتی بهره مند می‌شوند که در این مقاله به مقایسه این پارامترها نیز پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

خط لوله‌ی دریایی مورد مطالعه در این تحقیق دارای قطر ۰/۸۱۶ متری و ضخامت ۰/۰۲۴۲ متری و طول ۴۰ متری است. ضریب پواسون خط لوله برابر ۰/۳ و ضریب انبساط گرمایی برابر $10^{-6} \times 1/15$ در نظر گرفته شده است. تنش پسماند نصب خط لوله به دلیل ناچیز بودن نسبت به سایر نیروها موثر در نیروی محوری در این مطالعه در نظر گرفته نشده است. نیروهای فشاری افقی با ضریب محافظه کارانه‌ی بالا در نظر گرفته می‌شوند. وزن مغروق عملیاتی خط لوله برابر (N/m) ۴۲۹۳ در نظر گرفته شده است. مشخصات کامل خط لوله‌ی دریایی مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات عدم قطعیت پارامترهای هندسی خط لوله (Taheri et al., 2018)

Table 1- Uncertainty characteristics of geometric pipeline parameters (Taheri et al., 2018)

ردیف	پارامترها	نوع توزیع	میانگین	انحراف معیار
۱	مدول یانگ	لاگ نرمال	210×10^9	0.05
۲	ضخامت خط لوله	نرمال	0.024	0.05
۳	قطر خط لوله	نرمال	6156.0	0.05

جدول ۲- مشخصات کلی خط لوله (Taheri et al., 2018)

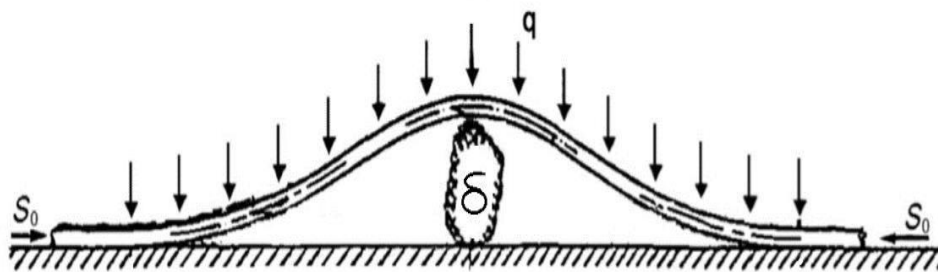
Table 2- Characteristics of pipeline (Taheri et al., 2018)

مشخصات خط لوله	مقدار
قطر خارجی خط لوله (m)	0.816
ضخامت خط لوله (m)	0.0242
چگالی فولاد خط لوله دریایی (kg/m^3)	7850
مدول الاستیسیته (GPa)	210
ضریب پواسون	0.3
ضریب انبساط گرمایی (c)	1.15×10^{-6}
وزن مغروق عملیاتی خط لوله (N/m)	4293
بیشترین عمق دریا (m)	85
چگالی آب (kg/m^3)	1023
تفاوت دما در مرحله نصب و عملیاتی (c)	75
فشار تصادفی عملیاتی (MPa)	10.8493

- نواقصی که ممکن است در مرحله‌ی نصب برای خط لوله اتفاق بیفتد (ناهمواری در بستر خط لوله مانند عبور دو خط لوله از روی هم یا ناهمواری در پروفیل بستر و ...)
- نقصی که ممکن در حیل عملیات ترانشه و خاک‌ریزی در خط لوله‌ی مدفون به وجود بیاید.

دما و فشار بالا درون خط لوله و تنش پسماند ناشی از نصب خط لوله سه عامل اساسی در ایجاد نیروی محوری فشاری در خط لوله هستند که در پی آن شرط لازم و اساسی برای ایجاد کمانش قائم در خط لوله فراهم می‌شود. نیروی محوری فشاری ایجاد شده در خط لوله دو سر مقید از رابطه (۱) پیروی می‌کند (Bai, 2014); که در این رابطه S_0 نیروی فشاری محوری را نشان می‌دهد. اگر مقدار این پارامتر مثبت باشد، کششی بودن نیرو و اگر منفی باشد، فشاری بودن این نیرو را نشان می‌دهد. $F_{residual}$ همان تنش پسماند ناشی از لی کردن خط لوله است. ΔP_i ذکر شده در فرمول، گویای اختلاف فشار داخلی در دو حالت لی کردن و نصب است که چنانچه واضح است فشار داخلی در حالت نصب مقدار صفر دارد. ΔT_i همچنین اختلاف دما داخلی در دو حالت لی کردن و نصب است. A_i مساحت داخلی خط لوله، A_s مساحت جداره ی خط لوله، θ ضریب پواسون، E مدول یانگ، α ضریب انبساط حرارتی هستند.

$$S_0 = F_{residual} - (1 - 2\theta)(\Delta P_i)A_i - EA_s\alpha(\Delta T_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۱. شمایل کلی خط لوله مدفون در بستر دریا با نقص اولیه (Taheri et al., 2018)

Fig. 1- The general schematic of buried pipelines with initial imperfection (Taheri et al., 2018)

است و علت آن وجود نقص اولیه عمودی است که با واسطه شرایط بستر در خط لوله به وجود آمده است. با فرض شکل (۱)، خط لوله را در محیط دو بعدی نشان می‌دهد. مبدا مختصات در پایین ترین نقطه خط لوله در انتهای سمت چپ در نظر گرفته شده است. محور x در

خط لوله‌ی دریایی به واسطه‌ی فشار و دمای بالا در معرض نیروی فشاری محوری قرار دارند. اگر خط لوله در بستر دریا در حالت مدفون قرار داده شود این نیروی فشاری موجب ایجاد پدیده‌ی کمانش قائم در خط لوله می‌شود.

چهار عامل اصلی موثر در کمانش قائم خط لوله‌ی دریایی عبارت‌اند از (Bai, 2014):

- ۱- دما و فشار عملیاتی
 - ۲- نوع بستر و شرایط محیطی
 - ۳- مشخصات هندسی، وزن و جنس مواد سازنده‌ی خط لوله‌ی دریایی
 - ۴- مشخصات خاک و لایه ی پوششی قرار گرفته روی خط لوله دریایی.
- نقص اولیه عمودی گام اول برای شروع کمانش قائم می‌باشد. ایجاد نقص اولیه عمودی در خط لوله‌ی دریایی، زمینه‌ی مناسب برای ایجاد اثرگذاری نیروی محوری فشاری را فراهم می‌کند. خط لوله در حالت ایده‌آل در مسیر مستقیم و بدون هیچ انحرافی در بستر دریا قرار دارد. عوامل متفاوتی موجب ایجاد نقص اولیه عمودی در خط لوله می‌شوند که عبارت‌اند از (Zhang et al, 2009; Ballet and) (Hobbs, 1992):

در شکل (۱) خط لوله با نقص اولیه آورده شده است. S_0 همان نیروی فشاری محوری به وجود آمده است که از دو انتها به خط لوله اعمال می‌شود. خط لوله نشان داده شده در شکل (۱) در صورت کافی بودن میزان نیروی فشاری محوری کاملاً مستعد ایجاد کمانش قائم

است (Bai, 2014). در این رابطه EI سختی خمشی خط لوله است که تیر در نظر گرفته شده است. تغییر شکل خمشی خط لوله در حالت الاستیک، L_0 ، به راحتی قابل محاسبه است (رابطه ۳) (Bai, 2014). δ_f ارتفاع نقص اولیه، w_S میزان بار وارده توسط خط لوله‌ی مغروق و EI سختی خمشی تیر هستند.

همچنین میزان بالآمدگی خط لوله در هر نقطه‌ی دلخواه بر روی خط لوله با تعریف تابع $w(x)$ قابل محاسبه است (رابطه ۴) (Bai, 2014).

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - S_0 \frac{d^2 w}{dx^2} = -q \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$L_0 = \left[\frac{72 \times EI \times \delta_f}{w_S} \right]^{1/4} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$w(x) = \delta_f \times \left(\frac{x}{L_0} \right)^3 \times \left(4 - \frac{3x}{L_0} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

بردار اهمیت، اهمیت نسبی پارامترهای دخیل در مساله را تعیین می‌کند.

اساس روش FORM (Du, 2008; Maier et al., 2001) خطی‌سازی تابع حالت حدی در نقطه‌ی طراحی است. \underline{y}^* محتمل‌ترین نقطه است. خطی‌سازی تابع حالت حدی با حول نقطه‌ی طراحی، \underline{y}^* ، با بسط تیلور صورت می‌گیرد.

تابع حالت حدی در نقطه‌ی طراحی صفر است (رابطه ۶).

$\underline{\alpha}$ بردار واحد می‌باشد که برابر است با قرینه‌ی نرمال شده گرادیان تابع حالت حدی و $\frac{\nabla G(\underline{y})}{\|\nabla G(\underline{y})\|}$ گرادیان تابع حالت حدی $G(\underline{y})$ است (رابطه ۷).

$$G(\underline{y}) \approx G(\underline{y}^*) + \nabla G^T(\underline{y}^*)(\underline{y} - \underline{y}^*) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\underline{\alpha} = - \frac{\nabla G(\underline{y})}{\|\nabla G(\underline{y})\|} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$G(\underline{y}) \approx - \|\nabla G(\underline{y}^*)\| \underline{\alpha}^T (\underline{y} - \underline{y}^*) = \|\nabla G(\underline{y}^*)\| (\underline{\alpha}^T \underline{y}^* - \underline{\alpha}^T \underline{y}) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$G(\underline{y}) \approx \|\nabla G(\underline{y}^*)\| (\beta - \underline{\alpha}^T \underline{y}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

یافتن نقطه طراحی امری مهم در FORM است که به منظور یافتن این نقطه روش بهینه‌سازی (optimization)، الگوریتم

امتداد خط لوله و بیانگر طول آن می‌باشد و محور w عمود بر محور افقی و نشان دهنده‌ی بالآمدگی بستر یا همان ارتفاع نقص اولیه می‌باشد. ارتفاع نقص اولیه را نشان می‌دهد و طول دهانه‌ی به وجود آمده به واسطه‌ی نقص اولیه 2L در نظر گرفته شده است. به منظور سهولت در محاسبات فقط نیمی از شکل به دلیل تقارن در نظر گرفته می‌شود.

q سربار وارد بر خط لوله جهت جلوگیری از بالآمدگی است که با فرض پیروی کردن خط لوله از تئوری تیر با رابطه (۲) قابل محاسبه

احتمال شکست (P_f) و شاخص قابلیت اطمینان (β) دو پارامتر مهم و اساسی در تحلیل حساسیت هستند. مشتق‌گیری از P_f و β نسبت به پارامترهای تابع حالت حدی، اهمیت پارامترها، دید فیزیکی نسبت به مساله، تعیین پارامترهای دخیل در مساله و ... در بردارد. یکی از خروجی‌های مشتق‌گیری از P_f و β بردار اهمیت است. در بردار اهمیت از طریق رتبه‌بندی متغیرهای تصادفی بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها می‌توان مهم‌ترین متغیرهای تصادفی را تعیین کرد که بایستی با دقت بیشتری محاسبه گردند و مابقی متغیرها را می‌توان از تحلیل احتمالاتی حذف کرد. مشتق‌گیری P_f و β را هم می‌توان نسبت به پارامترهای توزیع احتمال متغیرهای تصادفی و هم نسبت به ثابت‌های مساله (متغیر تصمیم‌گیری) محاسبه کرد. در این مقاله تمرکز بر روی مشتق‌گیری نسبت به پارامترهای توزیع احتمال متغیرهای تصادفی می‌باشد.

رابطه (۸)، فرمول خطی شده تابع حالت حدی در نقطه طراحی در فضای استاندارد نرمال را نشان می‌دهد.

بالایی برخوردار هستند. در تحلیل FORM چهار بردار α , γ , δ , η قابل برداشت هستند که به تفصیل به تشریح بردارهای ذکر شده پرداخته می شود.

تابع حالت حدی خطی شده با روند محاسبه ی ذکر شده آغاز روند بردار اهمیت $\underline{\alpha}$ است (Hohenbichler and R. Rackwitz, 1986).

این بردار اهمیت همبستگی بین پارامترها را در نظر نمی گیرد (رابطه ۹).

$$G(\underline{y}) \approx \|\nabla G(\underline{y}^*)\| (\beta - \underline{\alpha}^T \underline{y}) \quad \text{رابطه (۹)}$$

است که بردار اهمیت $\underline{\alpha}$ را شکل می دهد. با فرض برابری مشتق اول \hat{G} با G ، در رابطه (۱۰) داریم:

$$Var[\hat{G}] = \nabla \hat{G}^T \sum_{yy} \nabla \hat{G} = \nabla \hat{G}^T \underline{\nabla G} = (-\|\nabla G\| \underline{\alpha})^T (-\|\nabla G\| \underline{\alpha}) = \|\nabla G\|^2 \|\underline{\alpha}\|^2 = \|\nabla G\|^2 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2)$$

قابل ذکر است که بردار اهمیت یک بردار قابل قبول برای متغیرهای تصادفی در فضای استاندارد نرمال است و برای متغیرهای همبسته خطای محاسباتی را در بردارد.

بردار $\underline{\gamma}$ ، بردار اهمیتی است که همبستگی بین پارامترها را در نظر می گیرد. برای تعریف این بردار از بردار اهمیت α استفاده می شود.

$$\underline{\gamma} = \frac{\underline{\alpha}^T J_{y^*, x^*} \underline{\hat{D}}}{\|\underline{\alpha}^T J_{y^*, x^*} \underline{\hat{D}}\|}$$

در بیانی دیگر $\underline{\hat{D}}$ ، ماتریس قطری است که قطر اصلی آن را جذر المانهای قطر اصلی $\sum_{x, y}$ تشکیل داده است. در صورت برابری مقادیر دو بردار اهمیت $\underline{\alpha}$ و $\underline{\gamma}$ ، متغیرهای تابع حالت حدی غیر همبسته اند (Duckstein and Plate, 2012).

$$\sum_{x, y} = J_{y^*, x^*}^{-1} J_{y^*, x^*}^{-T}$$

Polka-He iHLRF، طرح گرادین (Gradient projection) و SQP (Sequential Quadratic Programming) قابل استفاده هستند. در تحقیق حاضر از روش بهینه سازی جهت یافتن نقطه ی طراحی استفاده شده است (Haukaas and Kiureghian, 2006).

بردارهای اهمیت (Importance vector)، اهمیت نسبی پارامترهای دخیل در مسئله را تعیین می کند به همین جهت از اهمیت

مشتق گیری P_f و β نسبت به پارامترهای توزیع احتمال متغیرهای تصادفی، راه حل رسیدن به بردارهای اهمیت است. واریانس (variance) یکی از پارامترهای توزیع احتمال متغیرهای تصادفی

رابطه (۱۰)

سهم هر متغیر تصادفی در واریانس تابع حالت حدی به اندازه ی α^2 است. سهم نسبی متغیرهای تصادفی را در واریانس تابع حالت حدی مشخص می کند. هر پارامتر موجود در تابع حالت حدی α ، مخصوص خود را دارد. هر پارامتری که میزان $|\alpha|$ بیشتری به خود اختصاص دهد، دارای اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها می باشد. اگر α مقدار مثبتی به خود اختصاص دهد به این معناست که متغیر مربوطه متغیر بار است و اگر این مقدار عددی منفی باشد، متغیر تصادفی مورد نظر، متغیر مقاومت می باشد.

رابطه (۱۱)

J_{y^*, x^*} ، ماتریس ژاکوبین است که اثرگذاری همبستگی بین پارامترها را اعمال می کند. که در آن چولستگی ماتریس همبستگی نمایان است. $\underline{\hat{D}}$ ، ماتریس انحراف معیار متغیرهای معادل نرمال است که برای بدست آوردن آن محاسبه ی $\sum_{x, y}$ گام اول است (رابطه ۱۲).

رابطه (۱۲)

مشتق شاخص قابلیت اطمینان نسبت به میانگین که یکی از شاخص‌های توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی است بردار حساسیت

$$\text{رابطه (۱۳)}$$

$\underline{\delta}$ را در پی دارد (رابطه ۱۳)، که در بیان برداری برابر است با رابطه (۱۴):

$$\delta_i = \frac{\partial \beta}{\partial \mu_i}$$

$$\underline{\delta} = \nabla_{\mu} \beta^T D_x$$

$$\text{رابطه (۱۴)}$$

مشتق شاخص قابلیت اطمینان نسبت به واریانس که یکی از شاخص‌های توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی است بردار حساسیت $\underline{\eta}$ را در پی دارد (روابط ۱۵ و ۱۶).

$$\text{رابطه (۱۵)}$$

مشتق شاخص قابلیت اطمینان نسبت به ضریب پراکندگی که یکی از شاخص‌های توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی است بردار حساسیت $\underline{\kappa}$ (kappa) را در پی دارد (رابطه ۱۷):

$$\eta_i = \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_i} \cdot \sigma_i$$

$$\underline{\eta} = \nabla_{\sigma} \beta^T D_x$$

$$\text{رابطه (۱۶)}$$

$$\kappa_i = \frac{\partial \beta}{\partial \delta_i} \cdot \sigma_i$$

$$\text{رابطه (۱۷)}$$

در تحلیل FOSM تنها یک معیار برای تشخیص اهمیت و حساسیت متغیرها وجود دارد. تعیین بردار اهمیت در FOSM از گام‌های زیر پیروی می‌کند (Haukaas and Kiureghian, 2005; Baker and Cornell 2003).

واریانس تابع حالت حدی گام بعدی است (رابطه ۱۹) که هر چه $|\nabla G_i \sigma_i|$ بیشتر باشد، اهمیت متغیر تصادفی x_i در محاسبه ی واریانس بیشتر است.

ابتدا برای تابع حالت حدی خطی‌سازی در فضای نرمال حول نقطه‌ی طراحی انجام شده است (رابطه ۱۸).

اگر $\nabla G_i \sigma_i$ مقدار مثبتی به خود اختصاص دهد؛ به این معناست که متغیر مربوطه متغیر بار است و اگر این مقدار عددی منفی باشد، متغیر تصادفی مورد نظر، متغیر مقاومت است.

$$\text{رابطه (۱۸)}$$

$$G(\underline{x}) \approx G(\underline{\mu}_x) + \nabla G^T(\underline{\mu}_x)(\underline{x} - \underline{\mu}_x)$$

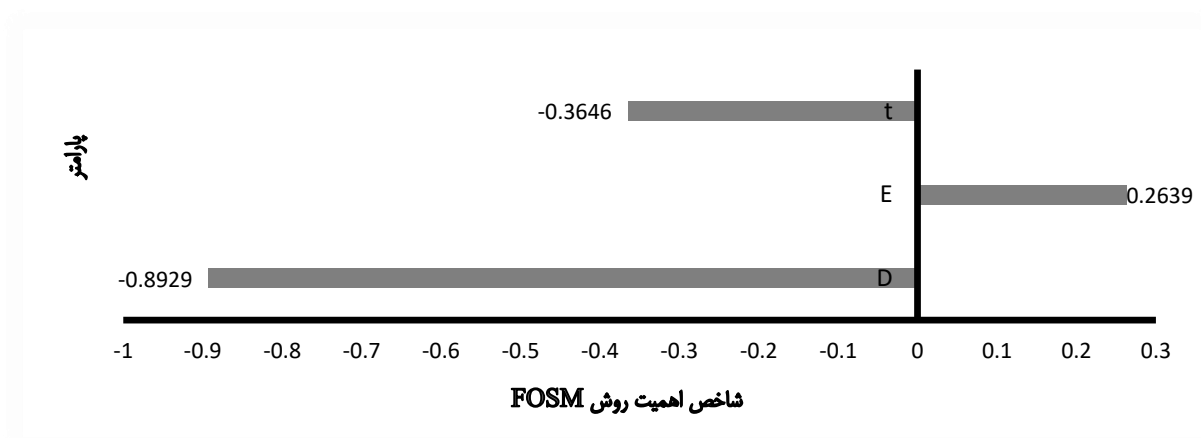
$$\text{رابطه (۱۹)}$$

$$Var[G(\underline{x})] \approx \nabla G^T \cdot (\underline{\mu}_x) \cdot \Sigma_{xx} \cdot \nabla G(\underline{\mu}_x) = (\nabla G_1 \sigma_1)^2 + (\nabla G_2 \sigma_2)^2 + \dots + (\nabla G_n \sigma_n)^2$$

۳. نتایج

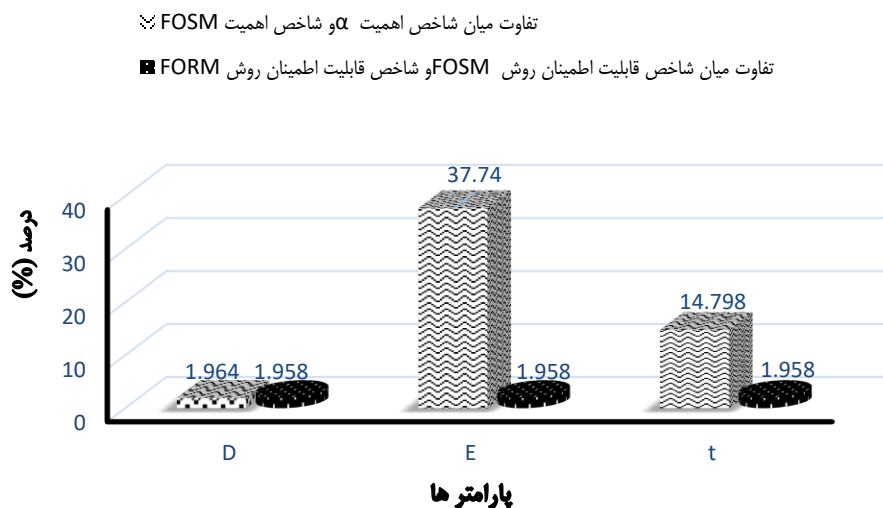
برای بررسی و صحت سنجی نتایج مربوط به آنالیز کماتش قائم مطابق مقاله کلیه پارامترها و شرایط موجود در این مقاله شبیه سازی شده است (Zeng et al, 2014). شاخص اهمیت FOSM که تنها شاخص تعیین کننده بردار اهمیت است برای پارامترهای هندسی خط لوله در شکل (۲) نشان داده شده است. سه پارامتر D ، t ، E سه پارامتر

از پارامترهای هندسی خط لوله دریایی در معرض کماتش قائم می‌باشند. شکل (۲) نشان می‌دهد که در بین سه پارامتر ذکر شده دو پارامتر ضخامت و قطر خط لوله متغیر مقاومت و مدول الاستیسیته متغیر مقاومت بار می‌باشد. همچنین این نکته قابل برداشت است که قطر خط لوله بیشترین اهمیت را در بین پارامترهای ذکر شده دارد و مدول الاستیسیته کمترین اهمیت را داراست.



شکل ۲- تحلیل حساسیت در روش FOSM

Fig. 2- Sensitivity analysis of FOSM method



شکل ۳- مقایسه شاخص اهمیت و شاخص قابلیت اطمینان

Fig. 3- Comparison of Importance Index and Reliability Index

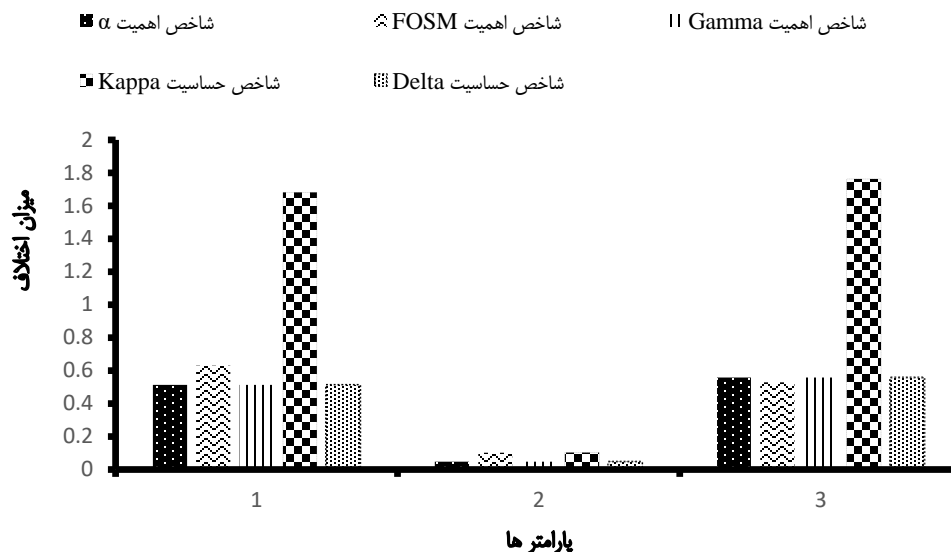
اهمیت در FOSM قرار داده شده است. طبق شکل (۲)، قطر خط لوله مهم ترین متغیر تابع حالت حدی تعریف شده می باشد. شکل (۳) نشان می دهد که شاخص قابلیت اطمینان در دو تحلیل با تفاوت دو برادر اهمیت در دو تحلیل تقریباً برابر می باشند و هر چه از اهمیت متغیرها کاسته می شود، تفاوت نیز مشهودتر می شود.

شکل (۴) مقایسه میان پنج برادر اهمیت بین هر سه متغیر به صورت مجزا را نشان می دهد. همانطور که واضح است کمترین تفاوت

در تحلیل FORM و FOSM، هر دو شاخص قابلیت اطمینان وجود دارد که جزو اساسی ارزیابی قابلیت اطمینان توسط دو تحلیل ذکر شده می باشد. مقادیر شاخص قابلیت اطمینان در FORM و FOSM مقادیر متمایز ولی نزدیک به هم می باشند که در FOSM مقدار کمتری را دارد. شکل (۳) بیانگر قیاس میان تفاوت های دو روش برای هر یک از سه پارامتر مد نظر این تحقیق می باشد. برای هر پارامتر مقایسه بین، تفاوت شاخص قابلیت اطمینان در دو روش FORM و FOSM و تفاوت میان برادر اهمیت در FORM و برادر

مربوط به شاخص اهمیت K اختلاف زیادی را با سایر شاخص‌های اهمیت دارا است و بقیه γ شاخص‌های اهمیت مقادیر نزدیک به هم دارند.

میان E و t می‌باشد که به بیانی دیگر این دو پارامتر وضعیت نزدیک بهم در میزان حساسیت دارند با این تفاوت که یکی متغیر بار و دیگری متغیر مقاومت است. همچنین این نکته قابل استنتاج است که مقادیر



شکل ۴- میزان تفاوت شاخص اهمیت روش‌های مختلف برای هر یک از پارامترهای هندسی

Fig. 4- The degree of difference in the importance index of various methods for each of the geometric parameters.

متمايز ولی نزدیک به هم می‌باشد که در FOSM مقدار کمتری را دارد. برابری تقریبی شاخص قابلیت اطمینان در دو تحلیل با تفاوت دو بردار اهمیت در دو تحلیل قابل بیان می‌باشد و هر چه از اهمیت متغیرها کاسته می‌شود، تفاوت نیز مشهودتر می‌شود. مقادیر مربوط به شاخص اهمیت K اختلاف زیادی را با سایر شاخص‌های اهمیت دارا است و بقیه γ شاخص‌های اهمیت مقادیر نزدیک به هم دارند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

سه پارامتر E ، t ، D سه پارامتر از پارامترهای هندسی خط لوله دریایی در معرض کماتش قائم می‌باشند. در بین سه پارامتر ذکر شده دو پارامتر ضخامت و قطر خط لوله متغیر مقاومت و مدول الاستیسیته متغیر مقاومت بار می‌باشد. قطر خط لوله بیشترین اهمیت را در بین پارامترهای ذکر شده دارد و مدول الاستیسیته کمتر اهمیت را داراست. مقادیر شاخص قابلیت اطمینان در FORM و FOSM مقادیر

References:

- Bai, Q. and Bai, Y., 2014. *Subsea pipeline design, analysis, and installation*. gulf professional publishing.
- Baker, J.W. and Cornell, C.A., 2004. *Uncertainty specification and propagation for loss estimation using FOSM method*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Ballet, J.P. and Hobbs, R.E., 1992. Asymmetric

effects of prop imperfections on the upheaval buckling of pipelines. *Thin-Walled Structures*, 13(5), pp.355-373. [https://doi.org/10.1016/0263-8231\(92\)90018-R](https://doi.org/10.1016/0263-8231(92)90018-R)

Du, X., 2008. Unified uncertainty analysis by the first order reliability method. *Journal of Mechanical Design*, 130(9), pp. 091401-091411. <https://doi.org/10.1115/1.2943295>

Duckstein, L. and Plate, E.J. eds., 2012.

- Engineering reliability and risk in water resources* (Vol. 124). Springer Science & Business Media.
- Egan, G.R., Kaplan, S. and Zebroski, E.L., 1996, May. Risk assessment of a deep sea pipeline. In *Offshore Technology Conference* (pp. OTC-8041). OTC. <https://doi.org/10.4043/8041-MS>
- Haukaas, T. and Der Kiureghian, A., 2006. Strategies for finding the design point in non-linear finite element reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21(2), pp.133-147. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2005.07.005>
- Haukaas, T. and Der Kiureghian, A., 2005. Parameter sensitivity and importance measures in nonlinear finite element reliability analysis. *Journal of engineering mechanics*, 131(10), pp.1013-1026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:10\(1013\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:10(1013))
- Hohenbichler, M. and Rackwitz, R., 1986. Sensitivity and importance measures in structural reliability. *Civil engineering systems*, 3(4), pp.203-209. <https://doi.org/10.1080/02630258608970445>
- Karampour, H. and Albermani, F., 2014. Experimental and numerical investigations of buckle interaction in subsea pipelines. *Engineering Structures*, 66, pp.81-88. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.038>
- Karampour, H., Albermani, F. and Gross, J., 2013. On lateral and upheaval buckling of subsea pipelines. *Engineering structures*, 52, pp.317-330. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.037>
- Shabani, M.M., Taheri, A. and Daghigh, M., 2017. Reliability assessment of free spanning subsea pipeline. *Thin-Walled Structures*, 120, pp.116-123. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.026>
- Maier, H.R., Lence, B.J., Tolson, B.A. and Foschi, R.O., 2001. First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. *Water Resources Research*, 37(3), pp.779-790. <https://doi.org/10.1029/2000WR900329>
- Taheri, A. Shaban, M. and Daghigh, M., 2018. Investigation of the effect of local buckling and VIV fatigue on failure probability of subsea pipelines in Iranian South Pars gas field. *International Journal of Maritime Technology*, 9(1), pp.23-32. DOI: 10.29252/ijmt.9.23
- Taheri, A., Tasdighi, M. and Faraji, M., 2019. Reliability Analysis of Subsea Pipeline against Upheaval Buckling. *International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering (ijcoe)*, 4(4), pp.17-23. DOI: 10.29252/IJCOE.2.4.17
- Zeng, X., Duan, M. and Che, X., 2014. Critical upheaval buckling forces of imperfect pipelines. *Applied Ocean Research*, 45, pp.33-39. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.01.001>
- Zhang, H., Zhang, X. and Zhang, B.A., 2009. System dynamics approach to urban water demand forecasting: —A case study of Tianjin. *Transactions of Tianjin University*, 15(1), pp.70-74. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12209-009-0014-5>.