یادداشت فنی

تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر پیامدهای هزینه‌ای مود خرابی ترکیدگی در خطوط لوله‌ی دریایی

بهرام مهرافروز[۱] ، پدرام عدالت[۲*] ، مجتبی دیانتی[۳]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعت نفت؛ B.mehrafrooz@mnc.put.ac.ir
[۲] استادیار دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت آبادان؛ Edalat@put.ac.ir
[۳] محقق دانشگاه آکرون، ایالات متحده آمریکا؛ md102@zips.uakron.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۹

کلمات کلیدی:
خط لوله
ترکیدگی
کیفیت ساخت
قابلیت اطمینان
شبیه سازی مونت کارلو

چکیده

خطوط لوله در مسیرهای طولانی بدلیل دارا بودن مشخصاتی نظیر کارایی، ایمنی و هزینه‌ی نسبی پایین بطوری گسترده در انتقال نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکپارچگی خط لوله امری حیاتی و مهم برای قابل اطمینان بودن عملیات است. در این مطالعه، تاثیر کیفیت ساخت و عدم قطعیت‌های متناظر با آن بر یکپارچگی خطوط لوله‌ی دریایی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، تحلیل قابلیت اطمینان سازه تحت تاثیر خرابی ترکیدگی به عنوان متداول‌ترین مود خرابی در خطوط لوله با در نظر گرفتن خطاهای متداول در ساخت و نیز اعمال پدیده خوردگی انجام و برآورد سال خرابی خط لوله بررسی شده است. در این میان پارامتر خطا در ضخامت لوله به عنوان مهمترین پارامتر در افزایش احتمال شکست ارزیابی می‌شود. پیامدهای شکست تحت عنوان هزینه‌های تعمیرات و بازرسی پس از خرابی سازه نیز مورد مطالعه قرار گرفته که نتایج حاکی از افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های ریسک با کاهش اندک دقت ساخت در یک دوره مفروض از طول عمر بهره برداری خط لوله است. همچنین مشخص شد در تلورانس‌های مجاز ساخت آیین نامه‌ی DNV احتمال شکست بطور ذاتی وجود داشته و با مکانیزم‌های مخرب همچون خوردگی، می‌توانند تشدید شوند

Cost Consequence-Based Reliability Analysis of Bursting Failure Mode in Subsea Pipelines

Bahram Mehrafrooz[1], Pedram Edalat[2*], Mojtaba Dyanati

[1] M.Sc. in Offshore Structural Engineering, Petroleum University of Technology; B.mehrafrooz@mnc.put.ac.ir
[2] Offshore Structural Engineering Department, Petroleum University of Technology; Edalat@put.ac.ir
[3] The University of Akron, Akron, Ohio, USA; md102@zips.uakron.edu

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 30 Oct. 2018
Accepted: 31 Jul. 2019

keywords:
Pipeline
Bursting
Construction Quality
Reliability
Monte Carlo Simulation

ABSTRACT

Pipelines are widely used in transporting large quantities of oil and gas productions over long distances due to their efficiency, safety and low cost. Pipeline integrity is crucial for reliable pipeline operations, preventing expensive downtime, and failures resulting in leaking or spilling oil or gas content to the environment. In this paper, the influence of construction quality and corresponding uncertainties on the submarine pipelines integrity regarding the simultaneous effect of corrosion and bursting failure are investigated in a reliability analysis to predict critical failure year of the pipe. Also, sensitivity analysis is implemented to estimate how the important parameters affect the probability of failure using Monte Carlo simulation approach. Besides, consequences of failure also included in this study in terms of a ‘cost’ function considering post-failure inspection and repairs costs. Results illustrate that wall thickness is the dominant parameter in pipeline bursting. Also, allowable fabrication tolerances which are represented in DNV have an inherent probability of failure and it can be deteriorated by a degrading mechanism such as corrosion.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]

۱ – مقدمه

خطوط لوله انتقال نفت و گاز زیر دریا بعنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی و صنعتی، به دلیل شرایط عملیاتی و محیطی در زیر آب، می‌توانند عاملی تهدید کننده برای محیط اطراف در اثر آسیب پذیری این خطوط در مقابل تهدیدات باشند. از آنجایی که سرمایه-گذاری‌های کلان همواره بخشی جدایی ناپذیر از زیرساخت‌های خطوط لوله بوده، این پروژه‌ها می‌بایست به دور از هرگونه خرابی و افت کیفیت در طول عمر مفید به منظور حفظ ایمنی و محیط زیست باشند. لذا شرایط و وضعیت این سیستم‌ها به منظور تضمین پایایی یکپارچگی و عدم وجود خطر باید مرتباً مورد بازرسی و تحت نظر قرار گیرند[۱]. خطوط لوله زیر دریا نقشی موثر در زنجیره‌ی تامین انرژی فراساحلی را دارا بوده و وظیفه‌ی انتقال مواد هیدروکربنی و سایر مواد شیمیایی بین چاه، سکو و یا ترمینال‌های ساحلی و فراساحلی را دارند[۲].خطوط لوله همواره در معرض ریسک بالای خرابی می‌باشند. طبق گزارش اجرایی ایمنی، سلامت و محیط زیست[۱] انگلستان، بالغ بر ۱۹۷۰ حادثه‌ی منجر به انتشار مواد هیدروکربنی در بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ در نواحی نزدیک به ساحل تا عمق ۲۰۰ متر (حوزه فلات قاره) در محدوده این کشور به ثبت رسیده است[۳]. همچنین بنا به گزارش اداره کل ایمنی خطوط لوله و مواد مخرب ایالات متحده[۲]، حدود ۳۰۰ حادثه برای خطوط لوله در دهه‌ی اخیر در این منطقه گزارش شده که شامل ۷۱ مورد ورود مواد نفتی به محیط دریا بوده است[۴] که بدترین تاثیر این حوادث، در معرض خطر قرار دادن عموم در مناطق مسکونی واقع در خط ساحلی است [۵]. شکست در خطوط لوله فراساحل معمولا ناشی از فرایند افت کیفیت[۳] و استحکام سازه-ای ناشی از گذر زمان بهره‌برداری از خطوط لوله است. ریسکِ افت کیفیت بستگی به عوامل فیزیکی و زیست محیطی متعددی همچون عدم قطعیت در مقدار و میزان همگنی مشخصات مواد، عدم قطعیت در مقادیر بارهای داخلی و خارجی، عدم قطعیت در کیفیت ساخت و نوسانات حرارتی دارد[۶]. یکی از شکست‌های ناشی از این گونه افت‌ها، ترکیدگی[۴] می‌باشد که می‌تواند باعث نشت مواد و یا حتی شکست‌هایی در مقیاس بزرگ شود[۷].

در این مقاله یک روش و رویکرد مبتنی بر ریسک با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سازه‌ای برای بررسی برروی خط لوله و برنامه - نگهداری آن، ارائه شده است.

احتمال شکست توسط آنالیز پسینی-پیشینی بیزین[۵] به همراه روش‌های صریح بمنظور ایجاد مدل و برآورد عواقب هزینه‌ای شکست خطوط لوله تخمین زده شده است[۷,۸,۹]. همچنین تاثیر همزمان احتمال شکست خط لوله (ترکیدگی و نشت) و احتمال خرابی در سیستم تشخیص نشت[۶] نیز جهت پیش‌بینی و تخمین خرابی و سال رخداد خرابی خط لوله از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفته است[۵]. روش‌های ارزیابی بر اساس ریسک جهت مشخص کردن جایگزینی بهینه تاسیسات فراساحلی بر پایه احتمال خرابی ناشی از مکانیزم‌های کاهنده‌ی کیفیت وابسته به زمان نیز بکار گرفته شده‌اند[۱۰]. تئوری بیزین به همراه ارزیابی بر اساس ریسک به منظور به روز کردن خرابی‌های احتمالاتی خط لوله [۱۱,۱۲,۱۳] و انتخاب برنامه بهینه‌ی بازرسی فنی مورد استفاده قرار گرفته اند[۸]. روش‌هایی بر اساس ریسک به همراه سایر روش‌ها همچون منطق فازی نیز جهت بررسی عدم قطعیت استفاده شده است که منتج به ارائه روشی از ارزیابی ریسک به کمک منطق فازی برای خطوط لوله شده است[۱۴]. همچنین یک روش بر پایه‌ی ریسک در ارتباط با فرایند سلسله مراتبی تحلیلی[۷] برای انتخاب استراتژی نگهداری مورد استفاده قرار گرفته شده است[۱۶,۱۵]. هدف این مقاله بررسی تاثیر همزمان عدم قطعیت-های سازه‌ای ناشی از نواقص ساخت و خوردگی داخلی بر احتمال شکست، پیامد شکست و هزینه‌های مرتبط با ریسک خط لوله می-باشد. در این مقاله، حالت حدی ترکیدگی که محتمل ترین نوع خرابی و دارای بیشترین عواقب است[۷,۹]، به عنوان مد خرابی در نظر گرفته شده است. جهت برآورد سال بحرانی خرابی خط لوله برای مد خرابی ترکیدگی، آنالیز قابلیت اطمینان با روش شبیه سازی مونت کارلو انجام گرفته است. همچنین آنالیز حساسیت به منظور بررسی اثر پارامترهای عدم قطعیت بر روی محاسبات احتمال شکست نیز در این مقاله لحاظ شده است.

۲ – روش‌شناسی سنجش ریسک خط لوله

آنالیز قابلیت اطمینان و ریسک‌سنجی، اجزای یک چهارچوب کلی به نام براورد هزینه‌ی چرخه‌ی عمر[۸] بوده که اولین گام جمع‌آوری داده‌های خط لوله می‌باشد. هر نقطه‌ی خورده شده در طول خط لوله مستعد دو اتفاق نشت و ترکیدگی است. رشد خوردگی مورد انتظار در طول زمان را می‌توان با توجه به رابطه‌ی(۱) محاسبه نمود[۱۷]. در این مقاله نرخ رشد خوردگی در طول زمان ثابت فرض شده است.

$$d = \eta T \qquad (۱)$$

خرابی ترکیدگی متاثر از دو عدم قطعیت اصلی شامل عدم قطعیت در نوع خطرات احتمالی و عدم قطعیت در مقاومت سازه‌ای می‌باشد که در فاز طراحی توسط اعمال ضرایب اطمینان نسبی مربوطه و تلورانس‌های مجاز آیین‌نامه‌ای در نظر گرفته می‌شود. خطرات احتمالی، دارای منشاء طبیعی بوده که کنترلی بر روی آن‌ها نمی-توان اعمال کرد در حالی که عدم قطعیت مربوط به مقاومت سازه-ای را می توان با ارتقاء کیفیت ساخت، کنترل نمود و کاهش داد. جنبه‌ی کیفیت ساخت خط لوله در رعایت تلورانس ساخت[۹] نمود پیدا می‌کند. عواملی دیگر همچون عدم قطعیت در ضخامت، قطر و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]

تنش تسلیم کمینه‌ی ویژه[۱۰] نیز در این تحلیل قرار گرفته‌اند. تابع حالت حدی[۱۱] بر اساس معیار طراحی برای مد خرابی ترکیدگی مطابق رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود.[۱۸]:

$$P_{li} - P_e \le \frac{P_b}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \qquad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، با توجه به آیین نامه‌ی DNV [۱۸]، پارامترها (روابط(۳ تا ۷)) جایگذاری شده و رابطه حالت حدی برای معیار ترکیدگی مطابق رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$P_b = \frac{2t}{D-t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \qquad (۳)$$

$$P_{li} = \gamma_{inc} \cdot p_d + \rho_{cont} \cdot g(h_{ref} - h_l) \qquad (۴)$$

$$f_{cb} = Min(f_y, \frac{f_u}{1.15}) \qquad (۵)$$

$$f_y = \alpha_u (\mathrm{SMYS} - \Delta SMYS) \qquad (۶)$$

$$f_u = \alpha_u (\mathrm{SMTS} - \Delta SMTS) \qquad (۷)$$

باید توجه شود که برای درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های سازه‌ای و انجام آنالیز احتمالاتی، اثر ضرایب اطمینان مقاومت و استحکام متریال، به ترتیب با برابر واحد قرار دادن ضرایب γ_m و α_u از روابط حذف می‌شود.

$$g(t, D, SMYS) = \frac{2.20 \cdot t \cdot SMYS}{\gamma_{sc}(D-t)} - P_{li} + P_e \qquad (۸)$$

رابطه‌ی (۹) اساس محاسبات قابلیت اطمینان را تشکیل می‌دهد که در آن، مقاومت در برابر بار به عنوان تابعی از X بیان می‌شود. معیار برای عدم پذیرش یا شکست به عنوان $g(\mathrm{X}) < 0$ با دامنه‌ی v تعریف می‌شود که در آن X، بردار n بعدی از متغیرهای تصادفی است که توسط تابع چگالی احتمال $f_x(\mathrm{x})$ توصیف می‌شود[۱۹].

$$P[g(X) < 0] = \int_V f_x(\mathrm{x}) dx \qquad (۹)$$

شبیه سازی مونت کارلو یک روش دقیق و متداول برای محاسبه احتمال شکست می‌باشد. دو روش مختلف برای زمانی که این شبیه‌سازی با رویکرد تابع حالت حدی انجام می‌شود، وجود دارد. روش اول، روش شمارشی[۱۲] است که در آن مجموع تعداد مدل-هایی که تابع حالت حدی را نقض می‌کنند (N_f) محاسبه می‌شود. بعنوان مثال وقتی تابع حالت حدی از صفر کمتر می‌شود و مجموع تعداد این رخداد به تعداد کل مدل‌ها (N) تقسیم می‌شود[۵].

$$POF = N_f / N \qquad (۱۰)$$

و روش دوم، روش آمارهای نمونه[۱۳] است که در آن شاخص قابلیت اطمینان(β) مطابق آنچه که در رابطه (۱۱) آمده محاسبه می‌شود

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \qquad (۱۱)$$

μ_Z مقدار میانگین و σ_Z انحراف از معیار تابع حالت حدی می-باشد [۵].

$$PoF = 1 - \phi(\beta) \qquad (۱۲)$$

که در آن، ϕ بیانگر تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد می‌باشد.

برای کاربرد روش مونت کارلو در تخمین حساسیت احتمال خرابی، می‌بایست از تابع حالت حدی نسبت به هر پارامتر مشتق گرفته شود. با این هدف رابطه (۹) می‌تواند بصورت رابطه (۱۳) بازنویسی شود[۲۰].

$$P_f(\theta) = \int_{D(x)} I(x) fx(\mathrm{x}) dx \qquad (۱۳)$$

که در آن $D(x) = R^n$ و $I(\mathrm{x})$ تابع شاخص[۱۴] دامنه خرابی است و به ازای مقادیر x بزرگتر از صفر، برابر با صفر و کمتر از صفر، برابر با واحد خواهد بود. در روش استاندارد مونت کارلو، احتمال خرابی $P_f(\theta)$ توسط تولید n_s نمونه $\{x_k, k = 1, \ldots, n_s\}$ از X و میانگین گرفتن از $I(\mathrm{x})$ مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می-شود.

$$P_f(\theta) \approx \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} I(x_k) \qquad (۱۴)$$

تابع شاخص را می‌توان بصورت رابطه زیر بیان نمود[۲۱]

$$I(x) = \lim_{x \to 0} \phi(-\frac{g(x,\theta)}{\sigma}) \qquad (۱۵)$$

که در آن ϕ تابع توزیعی نرمال تجمعی[۱۵] استاندارد است و θ متغیری است که آنالیز حساسیت نسبت به آن انجام گرفته و g تابع حالت حدی است. با انتخاب مناسب σ (به اندازه کافی کم)، می‌توان تابع شاخص را با رابطه (۱۶) تخمین زد.

$$I(x) \approx \phi(-\frac{g(x,\theta)}{\sigma}) \qquad (۱۶)$$

با قرار دادن رابطه (۱۶) در رابطه (۱۳)، تخمین احتمال شکست که با $\tilde{P}_f(\theta, \sigma)$ نشان داده شده، بدست می‌آید و بصورت زیر بیان می‌گردد.

$$\tilde{P}_f(\theta, \sigma) = \int_{D(x)} \phi(-\frac{g(x,\theta)}{\sigma}) fx(\mathrm{x}) dx \qquad (۱۷)$$

با مشتق گیری رابطه (۱۷) نسبت به θ رابطه (۱۸) حاصل خواهد شد که بیانگر شدت تغییرات احتمال شکست نسبت به تغییرات متغیر احتمالاتی θ است.

$$\frac{\partial \tilde{P}_f(\theta, \sigma)}{\partial \theta} = -\int_{D(x)} \frac{1}{\sigma} \varphi(\frac{g(x,\theta)}{\sigma}) \frac{\partial g(x,\theta)}{\partial \theta} fx(\mathrm{x}) dx \qquad (۱۸)$$

رابطه (۱۸) انتگرال سطح بوده، لذا قابل بیان به صورت نمونه‌های مونت کارلو $\{x_k, k = 1, \ldots, n_s\}$ بشکل رابطه (۱۹) خواهد بود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]

$$\frac{\partial \tilde{P}_f(\theta,\sigma)}{\partial \theta} \approx \frac{1}{n_s}\sum_{k=1}^{n_s}[-\frac{1}{\sigma}\varphi(\frac{g(x_k,\theta)}{\sigma})\frac{\partial g(x_k,\theta)}{\partial \theta}] \quad (۱۹)$$

برای انجام آنالیز حساسیت، روابط (۲۰) الی (۲۲) را در رابطه (۱۹) قرار داده و محاسبات توسط برنامه متلب نوشته شده توسط نویسندگان این مقاله انجام می‌گیرد.

$$\frac{\partial g(t,D,SMYS)}{\partial t} = \frac{2.20\cdot SMYS}{\gamma_{sc}}(\frac{1}{D-t}+\frac{t}{(D-t)^2}) \quad (۲۰)$$

$$\frac{\partial g(t,D,SMYS)}{\partial D} = \frac{2.20}{\gamma_{sc}}(\frac{-t\cdot SMYS}{(D-t)^2}) \quad (۲۱)$$

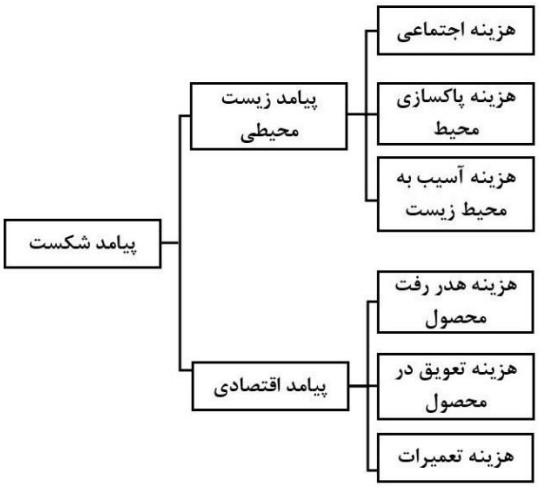
$$\frac{\partial g(t,D,SMYS)}{\partial (SMYS)} = \frac{2.20}{\gamma_{sc}}(\frac{t}{D-t}) \quad (۲۲)$$

مقدار ریسک از ترکیب دو مولفه‌ی احتمال شکست و پیامد آن حاصل می‌شود که بخش پیامدی آن شامل پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی بوده که عمدتا به صورت مالی بیان می‌گردد.

$$Risk = PoF \times CoF \quad (۲۳)$$

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، بخش اقتصادی پیامد شکست شامل هدر رفت محصول، تعویق و توقف در تولید محصول و هزینه‌ی ناشی از اقدامات تعمیراتی است، در حالی که بخش زیست محیطی پیامدها، شامل موارد تهدید کننده‌ی اجتماعی برای ساکنان حوزه‌ی رخداد خرابی، هزینه‌های بر طرف کردن و پاکسازی محصول نشت شده و نهایتا هزینه‌های ناشی از خسارات وارده به محیط زیست می‌باشد[۲۲]. بنابراین، هزینه‌ی کل (C_T) را با توجه به مطالب فوق، بر اساس هزینه‌های اقتصادی (C_{Eco}) و هزینه‌های زیست محیطی (C_{Env}) می‌توان به صورت رابطه‌ی (۲۴) بیان نمود.

$$C_T = C_{Eco} + C_{Env} \quad (۲۴)$$



شکل ۱ - پیامدهای شکست در خط لوله دریایی

پیامدهای زیست محیطی را می‌توان در سه دسته‌ی کلی مطابق آنچه در شکل ۱ به آن اشاره شده یعنی جنبه‌ی اجتماعی-اقتصادی، پاکسازی و خسارات وارده به محیط زیست تقسیم بندی نمود. مدلی برای برآورد هزینه‌ی جبرانی کل موارد ذکر شده توسط نهاد بین المللی جبران آلودگی نفتی[۱۶] برای خسارات ناشی از نشت فراورده‌های نفتی ارائه شده که مطابق رابطه‌ی (۲۵) بیان می‌گردد[۲۲]:

$$C_{Env} = Total\ cost\ of\ spillage = 51432Q^{0.728} \quad (۲۵)$$

که در آن دبی نشتی Q با استفاده از رابطه‌ی (۲۶) محاسبه می‌شود[۲۳]:

$$Q = A1.C_d\,(2\,\rho(P_o-P_s))^{0.5} \quad (۲۶)$$

مدل ارائه شده در رابطه‌ی (۲۵) در بردارنده‌ی ضررهای مالی مرتبط با هزینه‌های زیست محیطی، هزینه‌های اجتماعی-اقتصادی، هزینه‌های پاکسازی و هزینه‌های تعمیراتی می‌باشد که برای نشت نفت از تانکرها ارائه شده و قابلیت استفاده برای نشت محصول از خط لوله نیز دارد. این رابطه مقدار بودجه‌ی پرداختی توسط نهاد بین المللی جبران آلودگی نفتی به صاحبان تانکرها برای پوشش هزینه‌های وارده را برآورد می‌کند و قابلیت انطباق با حوادث خط لوله‌ای را دارد زیرا صرف نظر از منشاء آلودگی، هزینه‌های جبرانی و پاکسازی کلی، مشابه می‌باشند[۲].

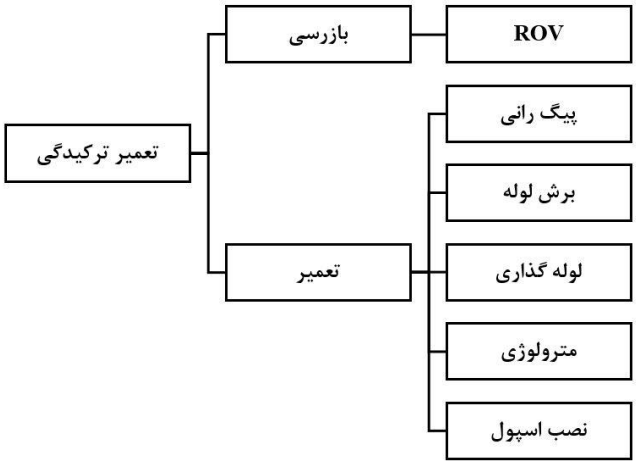
همانطور که قبلا اشاره شد، پیامدهای اقتصادی به سه دسته‌ی هدر رفت محصول، محصول معوقه و هزینه‌ی تعمیرات طبقه بندی می‌شود. هزینه‌ی محصول هدر رفته (C_{LP}) را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$C_{LP} = (Q_{LP}).\,(C_{Oil}).\,(T_{LP}) \quad (۲۷)$$

به همین شکل رابطه‌ی نهایی ضرر مالی ناشی از محصول معوقه (C_{DP}) در واحد دلار، مطابق رابطه‌ی زیر بر حسب مقدار دبی محصول معوقه، زمان به تعویق افتادن دستیابی به محصول و قیمت محصول خواهد بود[۲]:

$$C_{DP} = (Q_{DP}).\,(C_{Oil}).(T_{DP}) \quad (۲۸)$$

تمرکز این مقاله بر روی هزینه‌های تعمیراتی شامل هزینه‌های فرایند تعمیر یک خط لوله‌ی آسیب دیده بوده که در حالت خرابی از نوع ترکیدگی، این فرایند شامل مراحلی است که در شکل ۲ به آن اشاره می‌شود:



شکل ۲ - سناریوی تعمیر ترکیدگی خطوط لوله دریایی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]

در جدول ۱، مفروضات و داده‌های هزینه‌ای که در این مطالعه برای برآورد هزینه‌ی تعمیرات برای خط لوله‌ی تحت خرابی ترکیدگی مورد استفاده قرار گرفتند ارائه شده‌اند.

بنابراین پیامدهای اقتصادی را می‌توان مطابق آنچه در رابطه‌ی (۲۹) آمده، محاسبه نمود[۲]:

$$C_{Eco} = C_{LP} + C_{DP} + C_{Repair} \quad (۲۹)$$

و مقدار فعلی هزینه‌ها (PV)[۱۷] مطابق رابطه‌ی زیر خواهد بود:

$$PV = C_{Eco} + C_{Env} \quad (۳۰)$$

مقدار نهایی هزینه‌ها در سال T ام که به زمان آینده اشاره دارد، $FV(T)$، بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FV(T)=PV\,(1+i)^{T} \quad (۳۱)$$

که در آن i نرخ تورم می‌باشد و در نهایت مجموع هزینه‌های ناشی از ریسک در طول زمان سرویس دهی بصورت تجمعی و مطابق آنچه در رابطه‌ی (۳۲) به آن شاره شده تعریف می‌گردد[۱۹].

$$Riskex = \sum FV\,(\mathrm{T}) \times PoF_{T} \quad (۳۲)$$

جدول ۱ - داده‌های هزینه‌ای تعمیرات

هزینه	سناریوی تعمیر	قیمت واحد	عملیات
۷۰,۰۰۰$	مدت زمان عملیات ۲ روز مفروض می‌باشد	۳۵,۰۰۰ $/روز	بازرسی با ROV
۵۰۰,۰۰۰$	[-]	۵۰۰,۰۰۰ $	پیگ رانی
۲,۱۰۰,۰۰۰$	مدت زمان عملیاتی شناور DP به همراه غواصی در شرایط اشباع، ۲۸ روز مفروض می‌باشد.	۷۵,۰۰۰ $/روز	برش لوله و نصب اسپول
۶۰۰,۰۰۰$	مدت زمان عملیات ۲ روز مفروض می‌باشد	۳۰۰,۰۰۰$	لوله گذاری
۱,۰۰۰,۰۰۰$	[-]	۱,۰۰۰,۰۰۰$	شناور لوله گذار
۵,۵۰۰,۰۰۰$	***هزینه‌ی تعمیرات**		
۴,۰۰۰,۰۰۰$	**هزینه‌ی سایر پیامدها** [λ]		
۹,۵۰۰,۰۰۰$	**هزینه‌ی نهایی ریسک**		

*هزینه نهایی باید ۳۰٪ بدلیل در نظر گرفتن احتمالات، افزایش یابد.

برای بدست آوردن سال خرابی بحرانی و مدل کردن روند تضعیفی و بحرانی خط لوله، باید توجه داشته باشیم که مکانیزم‌های کاهنده‌ی کیفیت همچون خوردگی که در طول زمان، اثر گذاری منفی خود را ادامه می‌دهند بعلاوه‌ی مدت زمان عمر سرویس دهی نیز باید مدّ نظر قرار گیرند

۳ - مطالعه‌ی موردی

در این مقاله تاثیر سه سطح از دقت یا کیفیت ساخت مختلف بر روی احتمال ترکیدگی مورد بررسی قرار گرفته شده است. تغییر در پارامترهای تصادفی طراحی در بازه‌های تلورانس تعریف شده توسط آیین نامه می‌باشد. یک لوله حاوی گاز سبک با قطر ۶۰۹/۶ میلی-متر و ضخامت دیواره ۱۹/۱ میلی‌متر واقع در عمق ۱۷۵ متری در نظر گرفته شده است. فرایند ساخت لوله از نوع جوش شده‌ی *DNV SAW450* می‌باشد. چگالی و دمای محتوای خط لوله به ترتیب kg/m^3 ۲۶۵ و ۷۵ درجه سانتیگراد و فشار طراحی۱۰ مگاپاسکال در تراز ارتفاعی مبنای ۲۵+ متر است. مشخصات و شرایط عملیاتی و محیطی خط لوله در جدول ۲، جهت محاسبه ضخامت دیواره بر اساس معیار مدهای خرابی مورد مطالعه نشان داده شده است. ضرایب اطمینان نسبی مطابق جدول۳ برای محاسبه مقدار آیین‌نامه‌ای حداقل ضخامت مجاز برای خط لوله در نظر گرفته شده است. همانطور که قبلا نیز اشاره شد، برای محاسبه احتمال شکست و آنالیز حساسیت، این ضرایب برابر واحد قرار داده شده‌اند.

جدول ۲ - داده‌های محیطی و عملیاتی خط لوله

مشخصه	مقدار
طول خط لوله	۱۰۰[km]
h_{ref}	۲۵ [m]
h_l	-۱۷۵[m]
ρ_{cont}	۲۶۵[$kg.m^{-3}$]
ρ_w	۱۰۲۵[$kg.m^{-3}$]
P_d	۱۲[MPa]
E	۲۰۵ [GPa]
ν	۰/۳[-]
t_{corr}	۰ [mm]
نرخ خوردگی	۰/۰۸[mm]
T_{ti}	۰ [^oC]
T_o	۴۵ [^oC]

جدول ۳ - ضرایب نسبی آیین نامه‌ای و پارامترهای طراحی خط لوله

مشخصه	مقدار
α_u	۰/۹۶ [-]
γ_m	۱/۱۵ [-]
γ_{inc}	۱/۱ [-]
γ_{sc}	۱/۱۳۸ [-]

با توجه به معیار خرابی ترکیدگی و درنظر گرفتن تلورانس‌های مربوط به ساخت و خوردگی، روابط (۲ تا ۶)، حداقل ضخامت مورد نیاز برای معیار ترکیدگی برابر با ۱۰/۸۵ میلیمتر جهت استفاده به عنوان مقدار میانگین ضخامت دیواره در آنالیز قابلیت اطمینان و برآورد احتمال شکست محاسبه گردیده است. اطلاعات مربوط به متغیرهای تصادفی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]

خط لوله با توجه به مقادیر توصیه شده‌ی آیین نامه‌ای برای محاسبات آنالیز قابلیت اطمینان در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که نوع جوش، جنس و بازه‌ی قطر و ضخامت لوله، عوامل موثر در تعیین تلورانس ساخت می‌باشند.

جدول ۴ مشخصات متغیرهای تصادفی خط لوله مورد مطالعه

مشخصه	مقدار
قطر	
μ	۶۰۹/۶ [mm]
FT	۳/۲[mm]
توزیع	نرمال
ضخامت جداره	
μ	۱۰/۸۵[mm]
FT	۱[mm]
توزیع	نرمال
SMYS	
μ	۴۵۰[$kg.m^{-3}$]
FT	۴/۷۴[$kg.m^{-3}$]
توزیع	لوگ نرمال
تعداد مدل	$۱۰^{۸}$

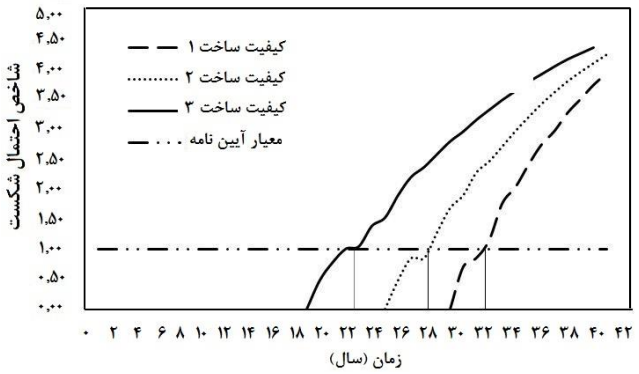
۴ - نتایج و بحث

اولین گام تحلیل، مشخص کردن رواداری‌های تایید شده توسط آیین نامه و چگونگی اثر آن بر مقاومت خط لوله در برابر ترکیدگی و کمانش است. با توجه به جداول ۳ تا ۵ مشاهده می‌گردد که فرایند ساخت با رعایت بازه‌ی رواداری توصیه شده‌ی آیین نامه در صورت در نظر گرفتن ۲، ۲/۵ و ۳ برای انحراف از معیار در تابع توزیع احتمال، منجر به حداقل احتمال شکست ۷×۱۰^{-۵} درصد برای شکست ناشی از ترکیدگی خواهد شد. این بازه برای انحراف از معیار، نماینده کیفیت سازنده‌های مختلف خط لوله می‌باشد که می‌تواند ایمنی پروژه و هزینه‌های محتمل آینده را تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به جدول ۵، حساسیت احتمال شکست به هر یک از متغیرهای تصادفی تابع حالت حدی از نظر تغییر احتمال شکست در اثر افزایش ۱ درصدی در هر متغیر تصادفی محاسبه شده است. علامت منفی بیانگر کاهش احتمال شکست در اثر افزایش آن متغیرِ بخصوص در محاسبه احتمال شکست می‌باشد.

جدول ۵- احتمال شکست و نرخ افزایش آن

σ	سازنده‌ی ۱ FT/۳	سازنده‌ی ۲ FT/۲.۵	سازنده‌ی ۳ FT/۲
PoF (%)	۷e-۵	۲,۶e-۳	۵,۹e-۲
نرخ رشد احتمال شکست ناشی از تغییر ضخامت(٪)	-۸۶/۹۲	-۷۰/۹۷	-۵۹/۱
نرخ رشد احتمال شکست ناشی از تغییر قطر(٪)	۶۷/۵	۵۴/۹۵	۴۳/۱۴
نرخ رشد احتمال شکست ناشی از تغییر SMYS(٪)	-۷۴/۶۱	-۵۹/۱۵	-۴۵/۱۳

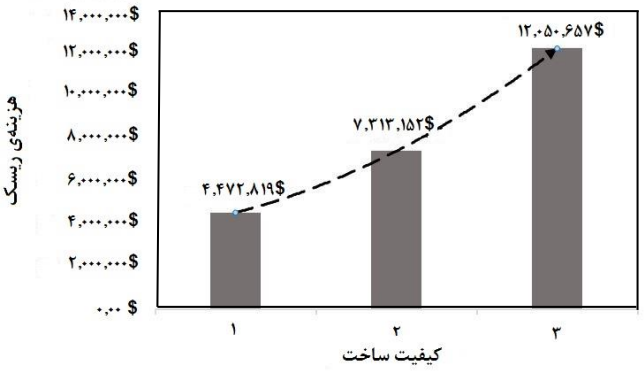
جدول ۵ نشان می‌دهد که ضخامت جداره‌ی خط لوله در مقایسه با قطر و *SMYS*، از نظر تاثیرگذاری در احتمال شکست، متغیر غالب می‌باشد. در نمودار شکل ۳ زمان خرابی خطوط لوله با کیفیت ساخت مختلف در مقیاس سال نشان می‌دهد. جهت مدل‌سازی خوردگی برای تعیین سال بحرانی خط لوله؛ از سه مدل متداول خطی، دو فازی و توانی برای در نظر گرفتن اثر خوردگی شامل مدل‌های برای محاسبه‌ی احتمال شکست خط لوله‌ی مدفون دارای نقاط خورده شده در طول مسیر آن استفاده می‌شود [۲۵]. در این مقاله برای در نظر گرفتن عامل خوردگی به عنوان مکانیزمی وابسته به زمان و کاهنده برای کیفیت لوله و سرویس‌دهی آن، ۲ میلی‌متر ضخامت جهت رواداری به ضخامت اولیه افزوده و سپس خوردگی‌ای با مدل خطی و نرخ ۰/۰۸ میلی‌متر در هر سال اتخاذ گردید. این موضوع امکان مدل‌سازی تضعیف شدگی و روند وخامت تدریجی لوله در طول ۴۰ سال عمر سرویس‌دهی را ایجاد می‌کند. برای تعیین سال خرابی بحرانی که به عنوان سالی که در آن احتمال شکست از حد آیین‌نامه‌ای تجاوز می‌کند تعریف می‌شود، حد $۱۰^{-۴}$ به عنوان ماکزیمم احتمال شکست مجاز برای خطوط لوله‌ی دریایی بنابر آیین نامه‌ی *DNV-OS-F101* تعیین می‌شود. منحنی احتمال شکست در واحد زمان در شکل ۳ زمان خرابی برای هر یک از سه نوع کیفیت ساخت مختلف را بر حسب سال نمایش می‌دهد.



شکل ۳- سال بحرانی خرابی ترکیدگی خط لوله مورد مطالعه

که در آن

شاخص احتمال شکست $=Log\ (PoF)+5$



شکل ۴- هزینه‌ی ریسک ترکیدگی خط لوله مورد مطالعه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]

با گذشت زمان از عمر لوله، ضخامت رواداری خوردگی، تقلیل خواهد رفت و سپس ضخامت جداره‌ی خالص لوله در معرض خوردگی واقع می‌شود. جهت محاسبه‌ی هزینه‌ی ریسک تا ۴۰ سال عمر سرویس دهی مفروض برای خط لوله‌ی این مقاله، رابطه‌ی (۳۲) با در نظر گرفتن ۳٪ نرخ تورم سالیانه استفاده خواهد شد.

۵ - خلاصه و نتیجه گیری

کیفیت در ساخت و تولید، نقشی مهم و اساسی در یکپارچگی و سلامت خطوط لوله انتقال نفت و گاز دریایی در طول عمر پروژه ایفا می‌کند. کیفیت مواد مورد استفاده در ساخت و کیفیت سازنده دو عامل مهم در دوام خط لوله به شمار می‌روند. بحث مربوط به عدم قطعیت مواد در ارزیابی ریسک خطوط لوله همواره مورد بحث بوده اما اثر کیفیت پیمانکاران ساخت به تنهایی تا کنون با توجه به ادبیات تحقیق مطالعه شده مورد بررسی قرار نگرفته است. کیفیت ساخت به عنوان انحراف از معیار متغیرهای تصادفی مربوط به مشخصات سازه‌ای خط لوله در این مقاله (یعنی کیفیت بهتر معادل با تغییرات کمتر در پارامترهای سازه‌ای) مدل شد. ریسک‌های مالی با استفاده از داده‌های هزینه‌ای برآورد شدند.

با توجه به جدول ۵ و شکل ۳، انتخاب سازنده‌ی با کیفیت پایین رخداد خرابی را تسریع بخشیده و متعاقبا هزینه‌های تعمیرات زودتر خود را نمایان می‌کنند. با توجه به آنچه استنباط شد، ارتقای کیفیت ساخت با کاهش ۳۳ درصدی انحراف از معیارمتغیرهای تصادفی (ضخامت جداره، قطر، SMYS) منجر به کاهش ۹۹ درصدی احتمال شکست و افزایش عمر سرویس دهی ۱۰ ساله (در این مطالعه‌ی موردی) می‌گردد. شکل ۴ هزینه‌ی ریسک را برای سه کیفیت ساخت نشان می‌دهد. با توجه به این مقادیر برآوردی، کیفیت برتر ساخت هزینه‌ای حدود ۴,۴۷۰,۰۰۰ دلار را متحمل می‌شود که پس از آن، هزینه‌های در حدود ۷,۳۰۰,۰۰۰ و ۱۲,۰۰۰,۰۰۰ دلاری به ترتیب برای کیفیت ساخت متوسط و ضعیف‌تر برآورد شده است.

۶ - تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله کمال تشکر را از کارشناسان محترم شرکت Deep Sea Offshore و جناب آقای مهندس مهدی نوری مدیر پروژه‌ی شرکت آیپِک جهت کسب اطلاعات هزینه‌ای تعمیراتی؛ دارند.

کلید واژگان

1- HSE
2- PHMSA
3- Degradation process
4- Bursting
5- Bayesian Prior-posterior analysis
6- Leak Detection System
7- Analytical Hierarchy Process
8- Life Cycle Cost
9- Fabrication tolerance
10- Specified Minimum Yield Stress (SMYS)
11- Limit State Function
12- Counting method
13- Sample statistics method
14- Indicator function
15- Standard cumulative normal density function
16- International Oil Pollution Compensation Fund (IOPCF)
17- Present value

۷- فهرست علائم

مساحت سطح مقطع نشت	$A1$
تابع توزیع تجمعی	CDF
ضریب تخلیه [۰,۶۱]	C_d
هزینه‌های اقتصادی	C_{Eco}
هزینه‌های زیست محیطی	C_{Env}
هزینه‌ی محصول معوقه	C_{DP}
هزینه‌ی محصول هدر رفته	C_{LP}
قیمت نفت [$/barrel]	C_{oil}
هزینه‌ی تعمیر	C_{Repair}
هزینه‌ی کل	C_T
قطر خارجی	D
آیین نامه DNV	DNV
مدول الاستیسیته	E
نوع فرایند ساخت	FAB
تلورانس ساخت	FT
مقاومت تسلیم ویژه	f_{cb}
مقاومت نهایی	f_u
مقاومت جاری شدن	f_y
گیگا پاسکال	GPa
ماکزیمم عمق آب[m]	h_l
سطح مبنای فشار طراحی[m]	h_{ref}
تابع حالت حدی	LSF
مگاپاسکال	MPa
فشار ترکیدگی	P_b
فشار طراحی	P_d
فشار خارجی	Pe
فشار تصادفی محلی	P_{li}
فشار عملیاتی	P_o
احتمال شکست	PoF
فشار خارجی در نقطه‌ی نشت	P_s
دبی جرمی نشت[kg/cm]	Q
محصول معوقه[barrels/hour]	Q_{DP}
محصول از دست رفته [barrels/hour]	Q_{LP}
هزینه‌ی ریسک	$RISKEX$
جوشکاری زیر آبی	SAW

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]

زمان [*year*]	T
بازه‌ی زمانی محصول معوقه [*hour*]	T_{DP}
بازه‌ی زمانی محصول هدر رفته [*hour*]	T_{LP}
ضریب استحکام ماده	α_u
شاخص قابلیت اطمینان	β
ضریب فشار تصادفی/ فشار طراحی	γ_{inc}
ضریب مقاومت ماده	γ_m
ضریب مقاومت کلاس ایمنی	γ_{sc}
اثر کاهنده مقاومت کششی	$\Delta SMTS$
اثر کاهنده مقاومت تسلیم	$\Delta SMYS$
نرخ خوردگی	η
مقدار میانگین	μ
میانگین تابع حالت حدی	μ_z
ضریب پوواسون	ν
چگالی ماده مورد انتقال	ρ_{cont}
چگالی آب	ρ_w
انحراف از معیار	σ
انحراف معیار تابع حالت حدی	σ_z

۸ – مراجع

1- Hossam A.Gabbar, H. A. Kishawy (2011), *Framework of pipeline integrity management*, Int. J. Process Systems Engineering, Vol. 1, Nos. 3/4,

2- Master's thesis, A., (2015), *Probabilistic Methods for Assessing the Performance of Offshore Pipeline Condition Monitoring System*, School of Graduate Studies, Memorial University of Newfoundland

3- HSE UK, Offshore Safety Statistics Bulletin, (2011), http://www.hse.gov.uk/offshore/, statistics /stat1011.htm

4- U.S. Department of Transportation, Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration, (PHMSA), (2014) http://primis.phmsa.dot.gov/comm/Index.htm/ nocache¼3213

5- Aljaroudi, A., Khan, F., Akinturk, A., Haddara, M., & Thodi, P. (2015), *Risk assessment of offshore crude oil pipeline failure.* Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 37, p.101–109.

6- Sha, M., & Finkelstein, M. (2015), *An optimal age-based group maintenance policy for multi-unit degrading systems*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 134, p.230–238.

7- Miran, Seyedeh Azadeh; Huang, Qindan; and Castaneda, Homero (2016), *Time-dependent reliability analysis of corroded buried pipelines considering external defects*, Journal of Infrastructure Systems 22.3: 04016019.

8- Shafiee, M., & Ayudiani, P. S. (2015), *Development of a risk-based integrity model for offshore energy infrastructures-application to oil and gas pipelines*, International Journal of Process Systems Engineering, *3*(4), p. 211–231.

9- Miran, S. A.; Huang, Q.; and Castaneda, H., Sajedi, S., (2016), *Optimal Inspection Interval Based on Reliability Assessment of Corroded Pipelines*, proceedings of NACE Corrosion Risk Management Conference, Paper No. RISK16-8743, Houston, TX, USA.

10- Thodi, P., Khan, F., & Haddara, M., (2013), *Risk-based integrity modeling of offshore process components suffering stochastic degradation*, Journal of Quality in Maintenance Engineering, *19*(2), p. 157–180.

11- Haddara, M., Khan, F. I., Haddara, M. M., & Bhattacharya, S. K. (2006). *Risk-Based Integrity and Inspection Modeling (RBIIM) of Process Components / System*, Risk Analysis, 26(1)

12- Straub, D., & Faber, M. H. (2005), *Risk based inspection planning for structural systems*, Structural Safety, 27(4), p. 335–355.

13- Tang,W.T,. (1973), *Probabilistic updating of flaw information*, Journal of Testing and Evaluation, 1 (6), p. 459-467.

14- Singh, M., & Markeset, T., (2009), *A methodology for risk-based inspection planning of oil and gas pipes based on fuzzy logic framework*, Engineering Failure Analysis, 16(7), p. 2098–2113.

15- Bevilacqua, M., & Braglia, M., (2000), *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*, Reliability Engineering & System Safety, 70(1), p. 71–83.

16- Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., & He, W. (2011), *An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection*, Safety Science, 49(6), p. 852–860.

17- Lee, O. S., Kim, D. H., & Choi, S. S., (2006), *Reliability of Buried Pipeline Using A Theory of Probability of Failure*, Solid State Phenomena, Vol. *110*, p. 221–230.

18- DNVGL. (2013), OS-F101 - Submarine Pipeline Systems, (Outubro), 367.

19- Bai, Y., & Bai, Q. (2014), *Subsea Pipeline Integrity and Risk Management*.

20- Papaioannou, I., Breitung, K., & Straub, D. (2013), *Reliability sensitivity analysis with Monte Carlo methods*, p. 5335–5342.

21- Spanier, J. & Oldham, K. B. (1987), *An Atlas of Functions*, Washington, DC: Hemisphere

22- Kontovas, C., Psaraftis, H., & Ventikos, N. (2010), *An empirical analysis of IOPCF oil spill cost data.* Marine Pollution Bulletin, Vol. 60, p. 1455–1466

23-Veritas, D. N. (2010), *Risk Based Inspection of Offshore Topside Static Mechanical Equipment*.

24- Sadiq, R., Rajani, B., and Kleiner, Y., (2004), Reliability Eng. and Systems Safety, Vol. 86, p. 1-10

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.8.6]