# طراحی خطوط لوله زیر دریا

علی خمسه
دانشجوی رشته مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ali.r.khamse@gmail.com

## چکیده:

طراحی خطوط لوله زیر دریا در ۶ قسمت عمده پیگیری می‌شود. در ابتدا بعد از تعیین معیارهایی که مورد قبول است، براساس معیارها و بارهای اعمالی به تعیین ضخامت دیواره لوله پرداخته می‌شود. در قسمت سوم تحلیل پایداری هیدرودینامیکی به روش‌های مختلفی نظیر تحلیل پایداری به فرمت‌های استاتیکی و دینامیکی و تحلیل با توجه به اثرات متقابل خاک و لوله (محوری، جانبی و عمودی) انجام می‌شود. در مرحله چهارم به تعیین دهانه‌های آزاد، به گونه‌ای که ایمنی مناسب در مقابل روش‌های شکست و تغییر شکل را داشته و پایداری خط لوله را به ارمغان بیاورد، می‌پردازیم. در مرحله بعدی انبساط‌ها و کمانش‌های سراسری و در آخر مکانیزم‌های خوردگی و نحوه جلوگیری از آن مورد بحث قرار می‌گیرد.

## مقدمه:

افزایش جمعیت، پیشرفت تکنولوژی، نیاز به انرژی و کمبود منابع آن در خشکی موجب شده است تا بشر در اقیانوس‌ها و دریاها دنبال منابع انرژی باشد. در این راستا صنعت فراساحل برای اکتشاف و استخراج منابع نفت و گاز و نیز انتقال آن‌ها به خشکی توسع یافته است. پس از اولین حفاری‌ها در آب‌های کم عمق، با توسعه صنعت فراساحل، عملیات شناسایی و استخراج و انتقال منابع انرژی با کشتی یا خط لوله در اعماق بالای دریاها (تا عمق ۳۰۰۰ متر) نیز صورت می‌گیرد.

خطوط لوله زیر دریا یکی از مهم‌ترین بخش‌های صنعت فراساحل می‌باشند که طراحی و اجرای آن در توسعه صنعت فراساحل نقش ویژه‌ای دارد. امروزه با استفاده از تکنولوژی‌های روز روش‌های گوناگونی جهت طراحی و نصب خطوط لوله دریایی با توجه به عمق آب دریا و منطقه عملیاتی آن ابداع شده است.

## ۱. شرایط طراحی

مقامات و مشتریان کشوری که قرار است خط لوله در آن اجرا شود، می‌بایست کدها و استانداردهای استفاده شده توسط طراح را تایید کنند. کدهای طراحی خط لوله که به طور گسترده‌ای به رسمیت شناخته شده‌اند، عبارتند از:

ASME B31.8-1999 Chapter VIII
BS 8010 Part 3
ISO 13623
DNV OS-F101

تعداد زیادی از خطوط لوله با استفاده از کدهای بالا با موفقیت طراحی شده است. این لیست کامل نبوده و بعد از آن کدهای دیگری مثل GL و DIN ساخته شده‌اند یا برخی اصلاحات روی همین استانداردها صورت گرفته‌است.

**در این مقاله طراحی براساس DNV انجام می‌شود،** زیرا کد حاکم در دریای شمال است و مورد موافقت بین‌المللی قرار گرفته است.

به طور متداول حالت‌های حدی تعمیرپذیری (SLS)، نهایی (ULS)، تصادفی (ALS) در نظر گرفته می‌شوند.

### حالت حدی تعمیرپذیری:

SLS به شرایط بارگذاری اشاره دارد که در صورت تجاوز از آن باعث می‌شود این خط لوله برای ادامه عملیات مناسب نباشد. SLS برای تمام شرایط بارگذاری که می‌تواند فرموله شود، تعریف شده است. موارد زیر به طور معمول در نظر گرفته می‌شوند:

۱. تغییر شکل و حرکات ناشی از امواج و جریان‌ها (پایداری هیدرودینامیکی)
۲. تغییر شکل‌های طولی ناشی از تغییرات دما و فشار (انبساط خط لوله)
۳. تغییر شکل‌های جانبی ناشی از مهار افزایش فشار و دما (کمانش شدید)
۴. انسداد خط لوله به سبب تشکیل هیدارت یا رسوبات مومی

تمایزی بین SLS برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر ایجاد شده است. در مورد صدمات محلی دائم درSLS فرمول مناسبی موجود نمی‌باشد و فاکتورهای طراحی ULS مورد استفاده قرار می‌گیرد. این بدان معنی است وقتی اولین شکست اتفاق می‌افتد فرمول‌بندی ULS مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بسیاری از SLSها انتقال بین حالت مطلوب ونامطلوب نسبتا مجهول است.

### حالت حدی نهایی:

باید اطمینان حاصل شود که خط لوله از ایمنی لازم در برابر شکست در ULSای که برحسب موارد زیر تعریف شده را دارد.

۱. تغییر شکل پلاستیک(تسلیم)
۲. ناپایداری محلی(کمانش)
۳. ناپایداری ترک(ترکیدن)
۴. بارهای تناوبی(خستگی)

علاوه براین باید اطمینان حاصل کرد که این خط لوله از ایمنی لازم علیه بارهای تصادفی برخوردار می‌باشد. معیارهای طراحی ULS در کل باید برای اولین گذر از حالت حدی، در حالی که اولین گذر تقریبا در تمام نمونه‌ها معادل شکست است، فرموله شده باشد. توجه داشته باشید که شکست تسلیم برحسب تغییر شکل تعریف شده است، نه تنش؛ این بدان معنی است که نخستین تسلیم اجازه داده شده است به شرط آن که به کرنش یا تغییر شکل بیشتر منجر نشود.

## ۲ تعیین ضخامت دیواره

هدف اصلی از طراحی خط لوله، تعیین ضخامت مطلوب دیواره و نوع فولاد خط لوله می‌باشد. برای اکثریت خطوط لوله موجود، ضخامت دیواره پس از انجام محاسبات تنش حلقه‌ای ساده، انتخاب شده است. یک ضریب کاربردی با حداقل تنش تسلیم تعیین شده همراه می‌شود که تنش مجازی را (وقتی که در فرمول تنش حلقه‌ای قرار داده می‌شود) که حداقل ضخامت مجاز دیواره لوله را تعیین می‌کند، تعریف می‌کند. سپس طراح باید نزدیک‌ترین ضخامت دیواره استاندارد API که بالاتر از حداقل مورد نیاز است، را انتخاب کند. برای خطوط لوله مایع یا دو فازی یک خوردگی مجاز نیز به آن اضافه می‌شود. روش‌های زیادی برای تعیین حد مجاز خوردگی وجود دارد. حد مجاز خوردگی ممکن است به سادگی و با مشاهده خطوط موجود و یا براساس ترجیحات صاحب طرح محاسبه می‌شود.

مهندسی ضخامت دیواره و نوع فولاد مطلوب می‌تواند، با داشتن الزاماتی برای کارخانه‌های فولاد که فولاد با کیفیتی را که از یک توزیع آماری دقیق پیروی‌کند، و با داشتن طراحی جامع در جاهایی که دقت پائین سیستم‌های ایمنی فشار در ورودی تجهیزات راداریم، بسیار پیچیده‌تر باشد. اگر ضخامت دیواره به طور نامساعد نازک شود پیچیدگی‌های اضافی را تحمیل می‌کند(معمولا موقعی که D/t از ۴۵ تجاوز کند).

طراحی خطوط لوله تعیین ضخامت دیواره و نوع فولادی که برای تحمل فشار داخلی لازم است، و هم‌چنین شناسایی این که کجا و چه مقدار ضخامت اضافی باید انتخاب شود، را پوشش می‌دهد. جدا از خورندگی مجاز که در بالا مورد بحث قرار گرفت، ضخامت اضافی دیوار ممکن است از تحلیل بارها در حین نصب بدست آمده باشد، یا ممکن است لازم باشد در یک نقطه مشخص، به خاطر نگرانی‌های موجود، افزایش یابد.

موارد دیگر بارگذاری که ممکن است تعیین ضخامت دیواره را تحت تاثیر قرار دهد از این قرارند. این موارد شامل فشارهای نصب، نیروهای خمشی وارده از ناهمواری‌های کف دریا، گذرگاه‌ها و غیره می‌باشد، هم‌چنین ضربه‌ها و برخوردهای خارجی یا بار اضافی خارجی که توسط ستون آب بالای خط لوله ایجاد می‌شود.

طراحی ضخامت دیواره ممکن است منجر به یک لوله خیلی نازک برای استفاده‌های کاربردی یا راحتی شود. DNV شرط مینیمم ضخامت دیواره ۱۲ میلی‌متر را برای لوله‌های با قطر بالاتر از ۸ اینچ در کلاس ایمنی بالا دارد.

## روش‌های طراحی:

طراحی ضخامت دیوار در کدهای مختلف که اغلب روی فرمول تنش دایره‌ای تمرکز می‌کنند، در حالی‌که نسبت تنش به SMYS به راحتی قابل فهم است، از این رو فرمول کد به وضوح تعیین می‌شود. در واقعیت مقایسه میان کدهای مختلف خیلی پیچیده است. ترکیب تعاریف مختلف فشارهایی که با ضرایب بار مختلف، مشخصات فولاد، مشخصات کد، تعریف‌های تنش، طبقه‌بندی کلاس ایمنی و غیره ترکیب می‌شود منجر به این نتیجه می‌شود که محاسبه یک ضخامت دیوار مناسب یک کار ساده نباشد.

فرمول تنش دایره‌ای متداول به صورت زیر خواهد بود:

$$t \geq \frac{\Delta p \cdot D_o}{2 \cdot SMYS} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2$$

| | |
|---|---|
| t | حداقل ضخامت دیواره لوله |
| Δp | فشار اضافی داخلی |
| $D_0$ | قطر لوله متوسط یا بیرونی |
| SMYS | تنش تسلیم مینیمم تعیین شده |
| $\gamma_1$ | ضریب ایمنی شماره ۱ ،کاربرد در تنش |
| $\gamma_2$ | ضریب ایمنی شماره ۲ ، مرتبط با جنس |

تنش دایره‌ای مولفه برجسته تنش می‌باشد ،اما نه تنها تنش آن. دیواره لوله یک خط لوله در حال کار ممکن است در معرض تنش‌های محوری قرار بگیرد که توسط فشار و دما القا می‌شوند. یک وضعیت از تنش صفحه‌ای فرض شده است، و بررسی براساس شرایط تسلیم مناسب می‌باشد، که معمولا Tresca یا von Mises می‌باشد. برای یک تنش تسلیم تک محوری معیار اول از دومی اندکی محافظه‌کارانه‌تر می‌باشد، که ممکن است خودش را در انتخاب قطر داخلی یا متوسط فرمول تنش دایره‌ای بالا نشان بدهد.

## تعریف کلاس مکان:

طراحی ضخامت دیواره خط لوله براساس طبقه‌بندی خط لوله برحسب کلاس‌های ایمنی، که برحسب مکان و حمل‌شونده‌ها است، می‌باشد. کدها بین ناحیه‌های جغرافیایی تفاوت قائل‌اند، و DNV از دو کلاس مکانی که در زیر تعریف شده‌انداستفاده می‌کند.

***کلاس مکانی ۱***: مکان‌هایی که هیچ فعالیت متداول انسانی در آن پیش‌بینی نشده است. برای اکثر خطوط لوله فراساحلی خطر کمی از فعالیت‌های انسانی که شکست رخ دهد وجود دارد. اکثریت مسیر خطوط لوله از این کلاس می‌باشند.

***کلاس مکانی ۲***: مکان‌های نزدیک سکوها یا مناطقی با فعالیت‌های انسانی متداول .گستردگی کلاس مکانی ۲ از این منطقه به طور معمول دارای مینیمم فاصله ۵۰۰ متر می‌باشد.

## ضخامت دیواره برحسب DNV OS-F101 :

DNV OS-F101 براساس یک فرمت LRFD می‌باشد، یعنی این‌که ضرایب بار در بارها ضرب شده‌اند و یک ضریب مقاومت در مقاومت ماده ضرب شده است. (از علائم رایج در DNV در ادامه استفاده شده است)

$$p_{li} - p_e \leq \frac{p_b(t_1)}{\gamma_{SC} \cdot \gamma_m}$$

| | |
|---|---|
| $P_{li}$ | فشار تصادفی محلی |
| $P_e$ | فشار خارجی |
| $P_b(t_1)$ | فشار محدود کننده مقاومت |
| $t_1$ | مینیمم ضخامت دیواره |
| $\gamma_{SC}$ | ضریب مقاومت کلاس ایمنی |
| $\gamma_m$ | ضریب مقاومت ماده |

که فشار تصادفی محلی با رابطه روبرو داده شده است:

$$p_{li} = p_d \cdot \gamma_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot H$$

| | |
|---|---|
| $P_d$ | فشار طراحی در نقطه مبدا |
| $\gamma_{inc}$ | نسبت فشار تصادفی به فشار طراحی |
| $\rho_{con}$ | چگالی حمل‌شونده |
| g | شتاب جاذبه |
| H | اختلاف ارتفاع بین نقطه انتخاب شده و نقطه مبدا |

ضریب $\gamma_{inc}$ باید دارای حداقل مقدار ۱,۰۵ باشد. در DNV OS-F101 Section 3 این مجاز است به شرط آن‌که سیستم ایمنی فشار که تعیین شده عدم افزایش فشار تصادفی محل را تضمین کند. حداکثر مقدار $p_{li} - p_e$ ضخامت دیواره را تعیین می‌کند. ماکزیمم ضخامت دیواره در ارتفاع متوسط از سطح دریا پیدا می‌شود، که در آن فشار خارجی برابر صفر است. درحالی‌که چگالی آب از مقدار حاصل ازکاهش $p_{li} - p_e$ که با افزایش عمق آب می‌باشد، بزرگ‌تر است، اما معمولا این اختلاف به اندازه‌ای نیست که باعث پرش عمده‌ای در ضخامت دیوار شود.

اساس انتخاب کلاس ایمنی، ضریب مکانی و طبقه‌بندی جریان براساس DNV OS-F101 Section 2 در بالا بیان شد.

کلاس ایمنی ضریب مقاومت از جدول ۱ که در زیر نیز آورده شده است، انتخاب می‌شود:

جدول ۱

| Safety class | Low | Normal | High |
|---|---|---|---|
| $\gamma_{sc}$ (hoop) | 1.046 | 1.138 | 1.308 |

محاسبه ضخامت دیواره براساس کلاس ایمنی نرمال برای قسمت‌های فراساحلی(کلاس مکانی۱) و کلاس ایمنی بالا برای مناطق نزدیک سکو و بارگیر (کلاس مکانی۲) می‌باشد.

ضریب مقاومت مواد $\gamma_m$ باید برای انواع محدودیت SLS ، ULS ، ALS برابر ۱,۱۵ گرفته می‌شود.

مقاومت محدودکننده فشاری توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$p_b(t_1) = \min\{p_{b,s}(t_1),\ p_{b,u}(t_1)\}$$

| | |
|---|---|
| $p_{b,s}(t_1)$ | مقاومت محدودکننده فشاری برای حد تسلیم |
| $p_{b,u}(t_1)$ | مقاومت محدودکننده فشاری برای حد ترکیدن |

که حد تسلیم و حد ترکیدن به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$p_{b,s}(t_1) = \frac{2 \cdot t_1}{D - t_1} \cdot f_y \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \qquad p_{b,u}(t_1) = \frac{2 \cdot t_1}{D - t_1} \cdot \frac{f_u}{1.15} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$$

| | |
|---|---|
| $f_y$ | تنش تسلیم طراحی |
| $f_u$ | مقاومت کششی طراحی |
| D | قطر خارجی نامی |

تنش تسلیم طراحی و مقاومت کششی طراحی به صورت زیر می‌تواند محاسبه شود:

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_U$$
$$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U \cdot \alpha_A$$

| | |
|---|---|
| $f_{y,temp}$ | اندازه تصحیح دما، اگر دما طراحی زیر ۵۰°C باشد برابر صفر |
| $f_{u,temp}$ | اندازه تصحیح دما، اگر دما طراحی زیر ۵۰°C باشد برابر صفر |
| $\alpha_U$ | ضریب مقاومت مواد، ۰٫۹۶ برای حالت نرمال و ۱ برای نیازهای مکمل |
| $\alpha_A$ | ضریب ناهمسان‌گردی، برای همسانی در تمام جهات ۱ |
| SMYS | حداقل تنش تسلیم معین |
| SMTS | حداقل مقاومت کششی معین |

## ۳ پایداری هیدرودینامیکی

تحلیل پایداری در کف برای اطمینان از پایداری خط لوله، زمانی که در معرض موج‌ها، نیروهای جریان و دیگر بارهای داخلی و خارجی (مثل بارهای خمش در قسمت‌های خمیده خط لوله)، انجام می‌شود. هیچ حرکت جانبی برای خطوط لوله قابل قبول نیست، معادل آن است که برخی از حرکات محدود که تداخل با اشیا مجاور و یا تجاوز از تنش مجاز برای لوله ایجاد نمی‌کند، مجاز می‌باشد. پایداری هیدرودینامیکی به طور کلی با افزایش وزن لوله مستغرق توسط پوشش بتونی بدست می‌آید. گاهی اوقات ابزارهای دیگر ممکن است مورد استفاده قرار گیرند، مثل افزایش ضخامت دیواره فولادی، قرار دادن تشک های بتونی یا قیری در سراسر خط لوله، نگهدارنده‌ها و یا پوشاندن آن با سنگ و شن. معیارهای طراحی به کار رفته باید روش های واقعی که برای پایداری به کار رفته است منعکس کنند.

خط لوله در بستر دریا یک ساختار واحد تشکیل می‌دهد که جابه‌جایی در یک منطقه تنش‌های خمشی و مقاومت کششی را تحمیل می‌کند. تنش‌های باقی‌مانده از فرآیند لوله گذاری ممکن است مقاومت در برابر جابه‌جایی را فراهم سازد. اگرچه واژه "در بستر دریا" به کار می‌رود، شرایط واقعی مطمئنا شامل شرایط متنوع اشتراک لوله و کف دریا می‌باشد. جایگذاری لوله‌ها تحت تاثیر ویژگی‌های خاک و پدیده‌هایی مثل آب شستگی، جابه‌جایی رسوب و دیگر ناپایداری‌های کف دریا می‌باشد. در بخش‌های دیگر لوله ممکن است به خاطر ناهموار بودن کف دریا و یا فرآیند رسوب-گذاری اندکی بالاتر از کف دریا باشد. برای هر دو وضعیت نیروهای هیدرودینامیکی نسبت به شرایط ایده‌آل کف کاهش می‌یابد.

نیروهای مقاوم خاک توسط قسمت‌هایی از لوله که تدفین شده/ جاسازی شده به شدت تحت تاثیر است. به طور کلی، مقاومت واقعی خاک تابعی از سابقه بار می‌باشد و برای بارگذاری‌های متناوب از بارگذاری‌های یک سویه استاتیک بزرگتر است. مقاومت خاک اغلب فرض می‌شود که از نیروهای اصطکاکی که با وزن موثر خط لوله تعیین می‌شود ( نیروی شناوری منهای نیروی بالابرنده) و یک مقاومت خاک کم اثر ناشی از جاسازی ساخته شده است. مقاومت خاک در طول لوله فرق می‌کند، و در جابه‌جایی‌های جانبی مقاومت خاک طولی افزایش می‌یابد. اثر متقابل خط لوله و کف دریا در حالت کلی پیچیده است و به اطلاعات جزئی کامل و روش‌های پیچیده و وسایل محاسباتی نیاز دارد، اگر آنالیز جزئی مورد استفاده قرار گیرد.

## فرآیندهای طراحی:

فرآیندهای محاسبه برای پایداری در کف دریا شامل مراحل زیر می شود:

۱. تعیین شرایط جریان نزدیک کف دریا
۲. تعیین نیروهای هیدردینامیکی و نیروهای عکس‌العملی خاک
۳. بررسی پایداری هیدرودینامیکی

که شرایط جریان نزدیک کف دریا به شکل زیر مشخص می شود:

۱. موج سرعت (چرخشی) و شتاب در کف دریا را القا می کند
۲. سرعت جریان پایدار در کف دریا

## فرمت طراحی پایداری استاتیکی:

طراحی پایداری استاتیکی براساس فرضیات اصلی زیر می‌باشد:

۱. لوله اجازه حرکت ندارد، باید تعادل میان بارها (نیروهای هیدرودینامیکی) و عکس‌العمل ها وجود داشته باشد
۲. جریان موج نزدیک بستر با زمان تغییر می‌کند و تنها مولفه‌های عمود به محور لوله درنظر گرفته می‌شوند
۳. مقاومت خاک براساس فرضیات دو بعدی انجام می‌شود، و ممکن شامل اصطکاک ساده به‌علاوه مقاومت خاک غیرفعال باشد

فرمت طراحی به شکل مقابل بیان می‌شود:

$$F_H \le \frac{1}{\gamma_s} R_H$$

درحالی‌که داریم:

$$R_H = \mu(W_s - F_L) + R_P$$

| | |
|---|---|
| $F_H$ | مولفه نیروی هیدردینامیکی در خط |
| $R_H$ | عکس‌العمل افقی خاک |
| $\mu$ | ضریب اصطکاک |
| $W_s$ | وزن شناوری |
| $F_L$ | نیروی برآ |
| $R_P$ | مقاومت غیرفعال خاک |
| $\gamma_s$ | ضریب ایمنی درمقابل لغزش |

فرمت طراحی ممکن است لازم باشد که برحسب وزن شناوری بیان شود که ضریب ایمنی توصیه شده برای آن $\gamma_s = 1.10$ می‌باشد:

$$W_s \ge \frac{\gamma_s}{\mu}(F_H - R_P) + F_L$$

## فرمت طراحی پایداری دینامیکی:

طراحی پایداری دینامیکی براساس فرضیات اصلی زیر می‌باشد:

۱. به لوله اجازه حرکت داده شده است، محدودیت‌ها برای حداکثر جابه‌جایی یا ماکزیمم تنش از معیارهای طراحی بدست می‌آید
۲. خط لوله به عنوان یک ساختار واحد دیده می‌شود (قسمت‌های بلند در آنالیز به‌کار می‌رود)، درحالی‌که خمش و تنش‌های کششی به عنوان نیروهای بازگرداننده عمل می کنند
۳. جریان موج به صورت سه بعدی با یک جهت و پراکندگی انرژی متوسط مدلسازی می‌شود
۴. اثر حرکت خط لوله بر روی نیروهای هیدرودینامیکی درنظرگرفته می‌شود

فرمت طراحی برحسب ماکزیمم جابه‌جایی جانبی مجاز و یا معیارهای کلی تنش برای طراحی خطوط لوله بیان می‌شود.

## اثر متقابل لوله و خاک:

پیکربندی خطوط لوله در بستر دریا، درطی نصب و همچنین فاز عملیاتی، به طور عمده توسط برهم‌کنش میان خطوط لوله و بستر دریا تعیین می‌شود. اثر متقابل خاک و لوله برای پایداری خطوط لوله در بستر دریا در جهات افقی و عمودی حائز اهمیت است. بنابراین اثر متقابل خاک و لوله نقش مهمی در ارزیابی دهانه‌های باز و در انبساط و کمانش خطوط لوله بازی می‌کند. پارامترهای مهم در زیر مورد بحث قرار گرفته‌اند.

## نیروهای محوری:

نیروهای محوری ممکن است تاثیر بارزی روی خمیدگی در مناطقی که حرکات عرضی خط لوله اتفاق می‌افتد، داشته باشد. مولفه‌های زیر در نیروی محوری در یک خط لوله در بستر دریا تاثیر دارند:

۱. نیروهای باقیمانده از نصب $N_{res}$
۲. نیروهای محوری که به وسیله گرما القا می‌شوند $N_{\theta}$
۳. نیروهای محوری که به وسیله فشار القا می‌شوند $N_{p}$
۴. نیروهای محوری که به وسیله تنش‌های مماسی القا می‌شوند $N_{v}$
۵. نیروهای محوری (غیرخطی) که توسط جابه‌جایی القا می‌شود $N_{nl}$

مولفه‌های مختلف نیروی محوری در حالت کششی مثبت درنظرگرفته می‌شوند و به شکل زیر محاسبه می‌شوند.

محاسبه دقیق نیروهای محوری باقیمانده که در طی فعالیت‌های نصب به‌وجود می‌آید، سخت می‌باشد. به طور معمول صرف‌نظر از نیروهای باقی‌مانده از نصب محافظه‌کارانه می‌باشد. در مواردی که تنش‌های باقی‌مانده اثر عمده‌ای در تعیین پیکربندی خط لوله دارند (مثل دهانه‌های آزاد یا خمیدگی‌های افقی)، استثنا به وجود می‌آید.

دما زمانی نیروهای محوری ایجاد می‌کند که دماهای کارکردی با دماهای زمان نصب متفاوت باشد. مولفه‌های نیروی که حاصل از جلوگیری از تغییر شکل‌های دمایی است به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$N_{\theta} = -\pi\,(D_s - t)\,t\,E\,\alpha\,\Delta\theta$$

$\alpha$ ضریب انبساط دمایی فولاد (برحسب $^{\circ}C^{-1}$ )

$\Delta\theta$ تغییرات دما (برحسب $^{\circ}C$)

$D_s$ قطر خارجی لوله فولادی

$t$ ضخامت دیواره لوله فولادی

$E$ مدول الاستیسیته فولاد

دمای نصب همان دمای محیط برای عملکرد خطوط لوله بدون عایق که فاصله زیادی از ورودی دارند، می‌باشد و دمای متوسط به دمای محیط نزدیک خواهد بود. در این موارد مولفه نیروی حاصل از دما $N_\theta$ قابل صرف‌نظر است. درحالی‌که برای خطوط جریان دما تاثیر زیادی روی نیروهای محوری دارد.

فشاری که نیروی محوری را ایجاد می‌کند، در فشار داخلی که روی قطر داخلی عمل می‌کند و فشار خارجی که روی تمام سطح مقطع عمل می‌کند، متفاوت است.

$$N_p = -\frac{1}{4}\pi (D_s - 2t)^2 p_i + \frac{1}{4}\pi D_s^2 p_e$$

$P_i$ فشار داخلی

$P_e$ فشار خارجی

نیروی محوری که به وسیله تنش مماسی ایجاد می‌شود از رابطه پواسون که متناسب با تنش مماسی است بدست آورده می‌شود:

$$N_v = \frac{1}{2}\pi (D_s - 2t)(D_s - t)\nu (p_i - p_e)$$

$\nu$ نسبت پواسون فولاد

نیروی محوری که به وسیله جابه‌جایی القا می‌شود، به وسیله تغییر شکل خط لوله به‌وجود می‌آید. در مواردی می‌توان آن را از روش تکرار در آنالیز دهانه‌های آزاد بدست آورد.

نیروی محوری کلی $N_a$ یک خط لوله که به طور کلی مهار شده است از قسمت‌های بالا تشکیل شده‌است، و به شکل زیر می‌باشد:

$$N_a = N_{res} + N_\theta + N_p + N_v + N_{nl}$$

مفید است که بین نیروی محوری " واقعی دیواره " و نیروی محوری" موثر" تفاوت قائل شد. نیروی محوری موثر رفتار کلی خطوط لوله را کنترل می‌کند، ممکن است به شکل زیر نوشته شود:

$$N_a = N_w - p_i A_i + p_e A_e$$

$N_w$ نیروی محوری در دیواره لوله

$A_i$ مساحت داخلی مقطع عرضی لوله (قطر داخلی)

$A_e$ مساحت کلی مقطع عرضی لوله (شامل پوشش‌ها می‌شود)

## ظرفیت تحمل عمودی:

ظرفیت تحمل بار عمودی در مواردی که خطوط لوله خیلی سنگین هستند یا رسوب‌ها نرم و یا در شرف تغییر حالت هستند نگرانی مخصوصی وجود دارد، زیرا امکان نشست کنترل نشده لوله وجود دارد. ظرفیت تحمل بار عمودی ممکن است در بدست آوردن رابطه جابه‌جایی عکس‌العملی خاک به کار رود، که آن هم در محاسبات مربوط به موازنه آرایش دهانه‌های آزاد به کار می‌رود. ظرفیت تحمل بار عمودی خاک ممکن است با استفاده از فرمول کلی شده برای حداکثر بار تحمل شده توسط شالوده‌های نواری بدست آورده شود.

اگر بستر دریا خیلی نرم باشد لوله تا زمانی‌که عکس‌العمل خاک با نیروهای رو به پائین به تعادل برسد، در کف دریا فرو خواهد رفت. پایداری خطوط لوله در جهت عمودی با نوشتن تعادل بین تمام نیروهای مرتبط بررسی می‌شود. در شکل ۱ تعادل نیروها مشخص شده‌است.

$$W_S + F_V + F_S - 2F_f \le R_V$$

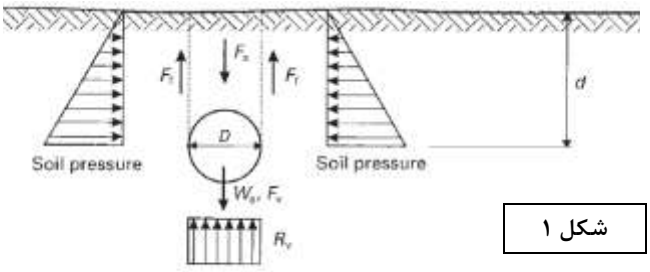
$W_S$ وزن شناوری

$F_V$ نیروی عمودی به سبب انحنا لوله در صفحه عمودی

$F_S$ وزن خاک بالای لوله

$F_f$ اصطکاک در طول صفحه‌های برشی

$R_V$ ظرفیت تحمل خاک




شکل ۱

Vertical equilibrium for a buried pipe

$N_\gamma$ , $N_q$, $N_c$ ضرایب تحمل بار می‌باشند که در روابط زیر که برای محاسبه مولفه‌های نیرو می باشند به‌کار رفته‌اند:

$$F_V = N_a/r$$ (نیروی محوری تقسیم بر شعاع انحنا)

$$F_f = \frac{1}{2}\gamma_s d^2 \tan\varphi_s \quad (F_f \le \frac{1}{2}F_s)$$

$$R_V = \left(\frac{1}{2}\gamma_s D N_\gamma + \gamma_s d N_q + C_u N_c\right) D$$

## مقاومت جانبی خاک:

نگرانی مهم در آنالیز توانایی خاک، تحمل نیروهای جانبی است که توسط خط لوله وارد می‌شود، می‌باشد. به علت سختی پیچشی بالا خطوط لوله فولادی، فقط مقاومت خاک در مقابل لغزش دارای اهمیت است. روش‌های تحلیلی دقیقی برای پیش‌بینی مقاومت‌های جانبی خاک در ماسه و خاک‌رس وجود ندارد. اگرچه، یک تقریب کلی با تقسیم مقاومت کلی خاک به دو قسمت مورد استفاده قرار می‌گیرد. که یکی اصطکاک خالص و دیگری به سبب فشار غیر فعال خاک می‌باشد. فشار غیر فعال خاک به‌وسیله جایگذاری لوله، بارهای تناوبی از کنش‌های موج و یا تپه‌های خاکی که برای مقابله با لغزش لوله‌ها ایجاد شده‌اند، به‌وجود می‌آیند.

در ماسه مقاومت جانبی خاک به دو مولفه اصطکاک کولنی و مقاومت غیر فعال خاک مجزا می‌شود. مولفه اصطکاکی به نیروی عکس‌العملی عمودی و ضریب اصطکاک بستگی دارد. مولفه غیر فعال به وزن واحد شناوری ماسه، ارتفاع تپه ماسه‌ای مقابل لوله، قطر لوله و شرایط بارگذاری بستگی دارد. یک معادله تقریبی برای محاسبه تقریبی مقاومت جانبی خاک در زیر آورده شده است:

$$R_H = \mu R_V + \frac{2}{3}\beta \rho_s D^2 (H_u/D)^{3/2} \quad 0 \le H_u \le D$$

جدول ۲

| Lateral friction coefficient, μ | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Coating | Concrete | | Steel, Epoxy | |
| Analysis | Static | Dynamic | Static | Dynamic |
| Loose sand | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.4 |
| Dense sand | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.4 |
| Silty sand | 0.6 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| Soft clay | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 |
| Medium clay | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| Hard clay | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.2 |
| Rock | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |

جدول ۳

| Soil type | Sand | Clay |
|---|---|---|
| Soil reaction constant β | 10 (3–15) | 2 (1–3) |

| | |
|---|---|
| $R_H$ | مقاومت جانبی خاک |
| $\mu$ | ضریب اصطکاک خاک و لوله (جدول ۲) |
| $R_V$ | نیروی عکس‌العمل عمودی |
| $\rho_s$ | وزن واحد شناوری ماسه |
| $D$ | قطر خارجی لوله(با پوشش) |
| $H_u$ | ارتفاع تپه خاک |
| $\beta$ | ضریب تجربی (جدول ۳) |

در خاک رس همان تقریب تجربی به همان رویه خاک‌های ماسه‌ای می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، جز این‌که مقاومت غیرفعال خاک به مقاومت برشی زهکشی وابسته است:

$$R_H = \mu R_V + \beta C_u D (H_u/D) \quad 0 \le H_u \le D$$

| | |
|---|---|
| $C_u$ | مقاومت برشی زهکشی خاک‌رس |

## انحناهای افقی:

نصب خطوط لوله در یک بستر توصیه شده معمولا شامل قسمت‌هایی می‌باشد که در صفحات افقی خم شده‌اند. شعاع انحنا به طور معمول بسیار بزرگ هستند مقاومت خمش لوله را می‌توان در نظر نگرفت، تنشی که در طی لوله‌گذاری القا می‌شود باعث راست شدن هر انحنا می‌شود، مگر اینکه لوله به وسیله مقاومت جانبی خاک در جایش نگه داشته شود. حداقل شعاع لوله‌گذاری که می‌تواند به‌وجود بیاید از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{min} = \gamma N_{res}/R_H$$

| | |
|---|---|
| $r_{min}$ | حداقل شعاع لوله‌گذاری |
| $\gamma$ | ضریب ایمنی |
| $N_{res}$ | تنش لوله‌گذاری باقی‌مانده |
| $R_H$ | مقاومت جانبی خاک |

ممکن است ضریب ایمنی $\gamma$ = ۱,۲ انتخاب شود تا تغییرات مقدار مجاز تنش(کشش) و اثرات دینامیکی حساب شود، و مقاومت جانبی از رابطه‌های بالا محاسبه می‌شوند.

## مقاومت محوری خاک:

روش محاسبه مقاومت محوری خاک برای لوله‌های مدفون یا نیمه مدفون به این که خاک به عنوان ماسه یا خاک‌رس طبقه‌بندی شود بستگی دارد. مقاومت محوری خاک موقعی که نیروی محوری موثر در دهانه آزاد محاسبه می شود، بکار می‌رود. اصطکاک محوری از تغییر شکل‌های القا شده در نگهدارنده‌ها جلوگیری می‌کند، و بدین وسیله تغییر شکل‌ها و لنگرهای خمشی محدود می‌شود.

در ماسه، مقاومت محوری خاک با بکار بردن یک ضریب اصطکاک و فشار خاکی که به پوسته لوله عمود است، بدست آورده می‌شود:

$$R_a = \int_A \mu_a \sigma_n \, dA \qquad \mu_a = \tan(f_\varphi \varphi_s)$$

در خاک‌رس یک معادله مشابه بکار می‌رود. حداقل مقاومت با معادله‌هایی که در ادامه می‌آید محاسبه می‌شود:

$$R_a = \int_A \mu_a \sigma_n \, dA \quad \text{and} \quad R_a = \int_A f_c C_u \, dA$$

انتگرال روی سطح پوسته با مساحت A که در تماس با خاک است گرفته می‌شود. و پارامترهایش از این قرارند:

| | |
|---|---|
| $R_a$ | مقاومت محوری خاک |
| $\mu_a$ | ضریب اصطکاک محوری |
| $\sigma_n$ | فشار عمودی روی خاک |
| $f_\varphi$ | ضریب مقاومت پوسته (ماسه یا خاک‌رس) |
| $\varphi_s$ | زاویه موثر اصطکاک (ماسه یا خاک) |
| $f_c$ | ضریب مقاومت پوسته (خاک‌رس) |

جدول ۴

| Material | | Sand | Clay | |
|---|---|---|---|---|
| | | $f_\phi$ | $f_\phi$ | $f_c$ |
| Smooth | Steel, plastic | 0.60 | 0.50 | 0.25 |
| Medium rough | Rusted steel | 0.80 | 0.50 | 0.45 |
| Rough | Concrete | 0.92 | 0.70 | 0.50 |

زاویه موثر اصطکاک و مقاومت برشی زهکشی باید با استاندارد تست ژئوتکنیک تعیین شود و مقادیر ضرایب از جدول ۴ بدست می‌آید.

## ۴ ارزیابی دهانه آزاد

دهانه آزاد خط لوله باید باید ایمنی مناسب در مقابل روش‌های شکست و تغییر شکل‌های زیر را داشته باشد:

۱. تجاوز از حد تسلیم ۲. خستگی ۳. کمانش ۴. بیضی شدن

ارزیابی دهانه آزاد معمولا باید براساس روش‌های محاسباتی پذیرفته شده دینامیکی و استاتیکی که شامل مدلسازی غیرخطی ساختاری، تعریف عکس‌العمل خاک و نیروهای القاشده از تغییر شکل بنا شود. شرایط لوله زیر باید در نظر گرفته شوند:

۱.خط لوله خالی ۲.خط لوله پر از آب ۳.خط لوله حین تست آب ۴.خط لوله در حال کار

ارزیابی دهانه آزاد معمولا نیاز دارد به :

۱. تحلیل استاتیکی برای تعیین ساختار خط لوله، نیروهای محلی، و تنش‌های ناشی از بارهای اصلی
۲. تحلیل مقدار مشخصه برای تعیین فرکانس طبیعی و شکل‌های قید
۳. تحلیل دینامیکی برای تعیین تغییر شکل خطوط لوله، نیروهای محلی و تنش‌های ناشی از بارهای ترکیبی اصلی و محیطی یا بارهای تصادفی
۴. تحلیل خستگی برای تعیین آسیب خستگی انباشته به سبب بارهای تناوبی کنش‌های موج و گرداب

## فرضیات خطوط لوله و دهانه آزاد:

فرضیات خطوط لوله برای تعیین بارها و پارامترهای مقاومت و ساختارهای استاتیکی و ویژگی‌های دینامیکی دهانه‌های آزاد خطوط لوله مورد نیاز می‌باشند. اطلاعات خطوط لوله ممکن است در اسناد طراحی اصلی در دسترس باشد، اما اطلاعات به‌روز یا اطلاعات بررسی‌های محلی برای تعیین دقیق ساختار دهانه‌ها و این که هیچ آسیبی به خطوط لوله وارد نشود، ممکن است مورد نیاز باشد.

### مفروضات لوله

۱) قطر خارجی لوله فولادی D
۲) ضخامت دیواره t
۳) ضخامت و چگالی
۴) ضخامت وچگالی
۵) مدول الاستیسیته
۶) نسبت پواسون فولاد
۷) تنش تسلیم فولاد
۸) پارامتر میرایی ساختار
۹) ضریب انبساط دمایی
۱۰) زبری لوله که شامل اثر دریا نیز می‌باشد
۱۱) موقعیت لوله در بستر دریا

### مفروضات کارکردی

۱) چگالی محتویات در فشار کارکرد
۲) دمای اضافی محتویات در شرایط کارکرد
۳) فشار داخل و فشار خارج
۴) نیروهای باقیمانده از عملیات نصب

### مفروضات دهانه آزاد

۱) عمق آب
۲) زبری بستر دریا
۳) طبقه بندی دهانه آزاد
۴) تصویر جانبی دهانه آزاد
۵) طول دهانه آزاد
۶) فضای خالی بین بستر و لوله
۷) جایگذاری لوله روی شانه‌های خاکی
۸) طبقه بندی و اطلاعات خاک

### مفروضات آب‌نگاری

۱) موج سرعت‌ها وشتاب‌های چرخشی آب را در سطح دهانه خطوط لوله القا می‌کند
۲) سرعت جریان در دهانه‌های خطوط لوله یکنواخت است
۳) چگالی آب در بستر دریا، ρ

## تحلیل استاتیکی:

تحلیل استاتیک فقط شامل بارهای اساسی است که ممکن باعث افزایش دادن به تقویت پاسخ‌های دینامیکی ناچیز شود. تحلیل باید شامل اثرات پدیده‌ها و شرایط زیر باشد:

۱. برهم‌کنش لوله و خاک
۲. رابطه غیر خطی میان تغییر شکل‌های جانبی و نیروی محوری
۳. تصحیح ترتیب بارگذاری
۴. وجود دهانه‌های مجاور که اثر متقابل دارند

در تحلیل خمیدگی تنش‌های خمشی به تنش‌های محوری ناشی از نیروهای در قسمت‌های بالا اضافی می‌شود. تطبیق طراحی خطوط لوله ممکن است به وسیله معادلات تنش von Mises انجام شود،یک وضعیت از تنش‌های صفحه ای را در دیواره لوله درنظر بگیرید:

$$\sigma_e = (\sigma_1^{\,2} + \sigma_2^{\,2} - \sigma_1\sigma_2)^{1/2} \le f_y$$

| | |
|---|---|
| $\sigma_e$ | تنش von Mises معادل |
| $\sigma_1$ , $\sigma_2$ | تنش‌های اصلی |
| $f_y$ | تنش تسلیم فولاد طراحی |

دیواره فولادی یک خط لوله در حال کار در معرض تنش‌های مماسی $\sigma_H$ ناشی از فشار داخلی و یک تنش محوری ناشی از فشار و نیروی کشش در خط لوله القا شده توسط دما، می باشد. اگر لوله تحت فشار در معرض خمش اضافی قرار گیرد، تنش خمشی $\sigma_B$ به این تنش‌ها اضافه می‌شود، بنابراین در غیاب پیچش حداکثر تنش‌های اصلی از این قرارند:

$$\sigma_1 = \sigma_A \pm \sigma_B$$

$$\sigma_2 = \sigma_H$$

## تحلیل دینامیکی:

دهانه آزاد خطوط لوله دارای ساختار پویایی است که مدها و فرکانس‌های طبیعی تعریف شده‌ای دارد. این طور ساختارها مستعد تقویت پاسخ‌ها،در زمانی‌که در معرض بارهای تناوبی با فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی قرار می‌گیرند، می‌باشند. بنابراین، تحلیل دهانه‌های آزاد باید شامل تحلیل بار موج که برای پاسخ‌های تقویت شده و گرداب گزارش شده است، باشد. تحلیل دینامیکی تمام بارهایی را که می توانند تقویت پاسخ‌های دینامیکی ناچیز را افزایش دهد، شامل می‌شود. بارهایی که در یک تحلیل دینامیکی عمل می‌کنند از این قرارند: بار ناشی ازکنش موج‌ها، انتشار گردابه و بارهای ضربه.

تحلیل دینامیکی به یک تحلیل مقدار مشخصه دهانه آزاد برای تعیین فرکانس‌های طبیعی و اشکال نمایی نیاز دارد. یک همسان‌سازی خطی از مسالله باید انجام شود زیرا تحلیل مقدار ویژه یک تحلیل خطی می‌باشد. تحلیل باید برای تعادل استاتیکی ساختار انجام شود، و سختی خطی شده خاک باید برای محاسبه صحیح ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گیرد. توجه خاصی باید به تعریف سختی محوری خاک داشت، زیرا نتیجه تحلیل مقدار مشخصه در صفحه عمودی به مقدار زیادی توسط سختی محوری تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در جائی‌که دهانه‌های معلق طراحی می‌شوند، شرایط مرزی که در قسمت‌های انتهایی خط لوله اعمال می‌شوند، باید برهم‌کنش خاک و لوله صحیح و پیوستگی تمام طول لوله را نشان دهد. اثر جرم اضافه شده به عنوان تابعی از فاصله خالی تا بستر دریا باید در زمان محاسبه فرکانس طبیعی مورد توجه قرار گیرد.

میرایی $K_{si}$ دهانه آزاد یکی از پارامترهای تعیین کننده ماکزیمم پاسخ به بارهای هیدرودینامیکی می‌باشد. میرایی توسط پارامتر پایداری برای هر مد طبیعی یا مقدار مشخصه بیان می‌شود:

$$K_{si} = \frac{4\pi m_{ei}\,\zeta_{Ti}}{\rho \cdot D^2}$$

| | |
|---|---|
| $\zeta_{Ti}$ | نسبت میرایی کلی |
| $m_{ei}$ | جرم موثر بر طول واحد لوله |
| i | زیر نویس مربوط به مد iام |

نسبت میرایی کلی $\zeta_{Ti}$ شامل موارد زیر می‌شود:

- میرایی ساختار، $\zeta_{Ti}$، به علت نیروهای اصطکاکی داخلی مصالح لوله که به میزان کرنش و تغییر شکل‌های همراهش وابسته است.
- میرایی خاک، $\zeta_{soil}$ ، به علت اثر متقابل خاک و لوله در نگهدارنده‌ها.
- میرایی هیدرودینامیکی، $\zeta_h$ ، که برای اثرات غیر یکنواختی سرعت جریان و تغییرات فضای خالی بین لوله و کف دریا محاسبه می‌شود.

میرایی ساختاری معمولا به صورت نسبت میرایی بیان می‌شود. اگر هیچ اطلاعاتی از میرایی ساختاری در دست نباشد، می‌توان $\zeta_{str} = 0.005$ فرض کرد. اگر خط لوله با بتون پوشانده شده باشد، لغزش در سطح تماس بتون و پوشش ضدخوردگی می‌تواند این مقدار را افزایش دهد.

## تحلیل خستگی:

بارهای دینامیکی کنش‌های موج و انتشار گرداب ممکن است تنش‌های تناوبی را افزایش دهد که ممکن است آسیب‌های خستگی دیواره را در پی داشته باشد که در نهایت شکست را در پی دارد. تحلیل خستگی باید یک دوره زمانی که نمایان‌گر دوره‌های بازدید دهانه آزاد می‌باشد، را پوشش دهد و محاسبات خستگی در شرایط خط لوله و در چنین فاصله‌هایی زمانی که ممکن است صدمات قابل توجهی اتفاق بیافتد انجام شود.
صدمات خستگی که از لرزش‌های ایجاد شده توسط گردابه ایجاد می‌شوند(VIV) باید مورد محاسبه قرار گیرند، پس به صورت خلاصه داریم:

- اثرات دینامیکی زمانی‌که محدوده تنش‌ها تعیین می‌شوند
- محاسبه تعداد سیکل‌ها در چند محدوده تنش نمونه
- محاسبه صدمات خستگی براساس قانون انباشت Palmgren–Miner
- تعیین تعداد سیکل‌ها تا وقوع شکست با استفاده از منحنی‌های S-N مناسب

محدوده‌های تنش که در تحلیل خستگی بکار می‌رود ممکن است با استفاده از دو روش بدست بیایند.

۱. محدوده تنش به وسیله یک تحلیل دینامیکی که از اعمال یک بار خارجی به دهانه آزاد بهره می‌جوید، پیدا می‌شود.
۲. محدوده تنش با استفاده از پاسخ‌های استاندارد که برای یک وضعیت معین جریان تقویت شده است،تعیین می‌شود

هر دو روش ممکن است در شرایط مختلف جریان بکار برده شوند، و استفاده از یک روش خاص اصولا توسط دلایل تجربی یا کیفیت مدل مناسب برای نمونه واقعی، تعیین می‌شود. مدل‌های مناسب پاسخ در DNV RP F105 *Free spanning pipelines* آورده شده است ، که برخی از شرایط توصیه شده جریان که باید مورد توجه باشند در زیر آورده شده است:

- جریان متقاطع VIV در جریان یکنواخت و جریان ترکیبی موج و جریان
- حرکات خطی به سبب جریان متقاطع VIV
- VIV خطی در جریان‌های یکنواخت و جریان‌های کنترلی

## منحنی‌های S-N :

تعداد سیکل‌ها تا وقوع شکست به وسیله منحنی‌های S-N به فرم زیر بدست آورده می‌شوند:

$$N = C\,(S)^{-\mathrm{m}}$$

| | |
|---|---|
| N | تعداد سیکل‌ها تا وقوع شکست در تنش با دامنه S |
| S | دامنه تنش براساس دامنه اوج تا اوج پاسخ |
| m | معکوس شیب منحنی S-N |
| C | ثابت مشخصه استحکام خستگی |

## صدمات خستگی:

صدمات ممکن است براساس قانون انباشتگی Palmgren–Miner تخمین زده شود. در این روش داریم:

$$D_{\mathrm{fat}} = \sum \frac{m_{\mathrm{i}}}{N_{\mathrm{i}}}$$

| | |
|---|---|
| $D_{fat}$ | صدمه خستگی انباشته شده |
| $m_i$ | تعداد سیکل‌های تناوب با دامنه نوسان $S_i$ |
| $N_i$ | تعداد سیکل‌ها تا وقوع شکست در دامنه تنش $S_i$ |

جمع بندی اصولا در تمام سیکل‌های تنش در عمر طراحی و سیکل‌های تنش $S_i$ انجام می‌شود.

### ضریب ایمنی:

صدمه خستگی مجاز به کلاس ایمنی و مقادیری توصیه شده توسط DNV RP F105 که در جدول زیر آورده شده است، وابسته است. این نکته باید مدنظر گرفته شود که این ضرایب در کنار ضرایب دیگر جزئی ذکر شده در DNV RP F105 مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انباشتگی صدمات خستگی خطوط لوله در طی فازهای زیر اتفاق می‌افتد:

- نصب ( برای مثال در حین لوله‌گذاری)
- در بستر دریا (خالی یا پر از آب)
- در حین کار

جدول ۵

| Safety class | Low | Normal | High |
|---|---|---|---|
| $\alpha_{fat}$ | 1.0 | 0.5 | 0.25 |

## ۵ انبساط و کمانش سراسری

اگر یک خط لوله آزاد باشد که افزایش طول یابد، افزایش دما و فشار در طی کارکرد باعث می‌شود یک افزایش در طول رخ دهد. اگرچه، به سبب محدودیت‌هایی که توسط اصطکاک بستر به‌وجود آمده است، چنین انبساط‌هایی در خط لوله خودشان را در انتهاها، یعنی نقاط ارتباطی که ساختارها را ثابت می‌کند، نشان می‌دهند. در قسمت‌هایی از لوله که محدودیت در مقابل انبساط‌های ناشی از دما و فشار وجود دارد ممکن است یک نیروی فشاری در خط لوله به‌وجود بیاید، که می‌تواند منجر به یک کمانش کلی شود.

با توجه به مولفه‌های نیروی محوری که در قسمت‌های قبل معرفی شدند و صرف نظر از هرگونه تغییر در نیروهای باقی‌مانده از لوله‌گذاری، نیروی فشاری کلی $N_0$ در خطوط لوله محدود شده به سبب افزایش دما و فشار به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$N_0 = \pi (D_s - t)\, t\, E\, \alpha\, \Delta\theta + \frac{1}{4}\pi (D_s - 2t)^2\, \Delta p - \frac{1}{2}\pi (D_s - 2t)(D_s - t)\, \nu\, \Delta p$$

$$= E\, A\, [\alpha\, \Delta\theta - \varepsilon_a(\Delta p)] + A_i\, \Delta p$$

| | |
|---|---|
| A | مساحت مقطع عرضی دیواره لوله |
| $\varepsilon_a(\Delta p)$ | کرنش محوری دیواره لوله که توسط افزایش فشار داخلی $\Delta p$ ایجاد می‌شود |
| | مابقی پارامترها نیز در قسمت‌های قبل تعریف شده‌اند |

نیروی محوری موثر $N_0$ (در حالت کششی مثبت است) جمع نیروهای فشاری در دیواره (که بین فشار ایجاد شده توسط مهار کردن انبساط دمایی و تنش ایجاد شده توسط مهار جمع‌شدگی Poisson متفاوت است) و یک نیروی فشاری ناشی از واسطه‌های لوله است.

انبساط خطوط لوله در حین تغییرات دما و فشار فقط به نیروهای بالا وابسته است. ارزیابی مقاومت در برابر کمانش نیاز به در نظر گرفتن نیروی محوری موثر محاسبه شده در قسمت‌های قبل دارد.

### انبساط خط‌لوله:

برای قسمت‌هایی از خط‌لوله که از جای طبیعی خود خارج نشده‌اند، نیروهای فشاری (که با نماد ⊖ در شکل۶,۷ نشان داده شده است) ایجاد شده توسط دما و فشار با نیروهای محوری اصطکاکی خاک محیط اطراف در تعادلند. اگر مولفه محوری اصطکاک قید در همان نقطه از بین برود، خط‌لوله فقط درصورتی که نیروی جلوگیری‌کننده $N = -N_0$ در نقطه پایانی وارد شود، ثابت خواهد ماند،(شکل ۶,۷a را ببینید). حذف این نیروی فرضی جلوگیری‌کننده، انبساط در خط لوله را نتیجه خواهد داد، و انبساط $\Delta = \Delta_0$ با شرط اینکه نیروی اصطکاکی در طول انبساطی $L_0$ اثر می‌کند باید با نیروی فشاری $N_0$ برابر باشد، تعیین می‌شود. توزیع نیروی حاصل در خطوط لوله در شکل(۶,۷b) نشان داده شده است.

حال فرض کنید که خطوط لوله تا شرایط طراحی خنک شده‌اند و فشارشان کاهش یافته‌است، یعنی $\Delta\theta = p_i = 0$ . حال ثابت نگهداشتن خط لوله به یک نیروی کششی $N = N_0$ در انتهای خط لوله نیاز دارد، زیرا نیروی فشاری خط لوله از بین رفته است. توزیع نیرو در خط لوله در شکل(۶,۷c) نشان داده شده است که کشش خالص در طول $L_0$ تا صفر کاهش یافته است. حذف کشش‌های فرضی انتها باعث ایجاد فشردگی در خط لوله می‌شود، مقدار با شرط این‌که اصطکاک اثرگذار باید با نیرو خط لوله در انتها طول فشرده در تعادل باشد. همان‌طور که در شکل(۶,۷d) دیده می‌شود، این بدان معنی است که در طول $L_0/2$ فشردگی $\Delta_0/2$ می‌باشد.

برآیند سیکل کامل این است که خط لوله یک جابه‌جایی انبساطی $\Delta = \Delta_0/2$ و یک تنش باقی‌مانده که در تعادل با اصطکاک بستر دریا می‌باشد،

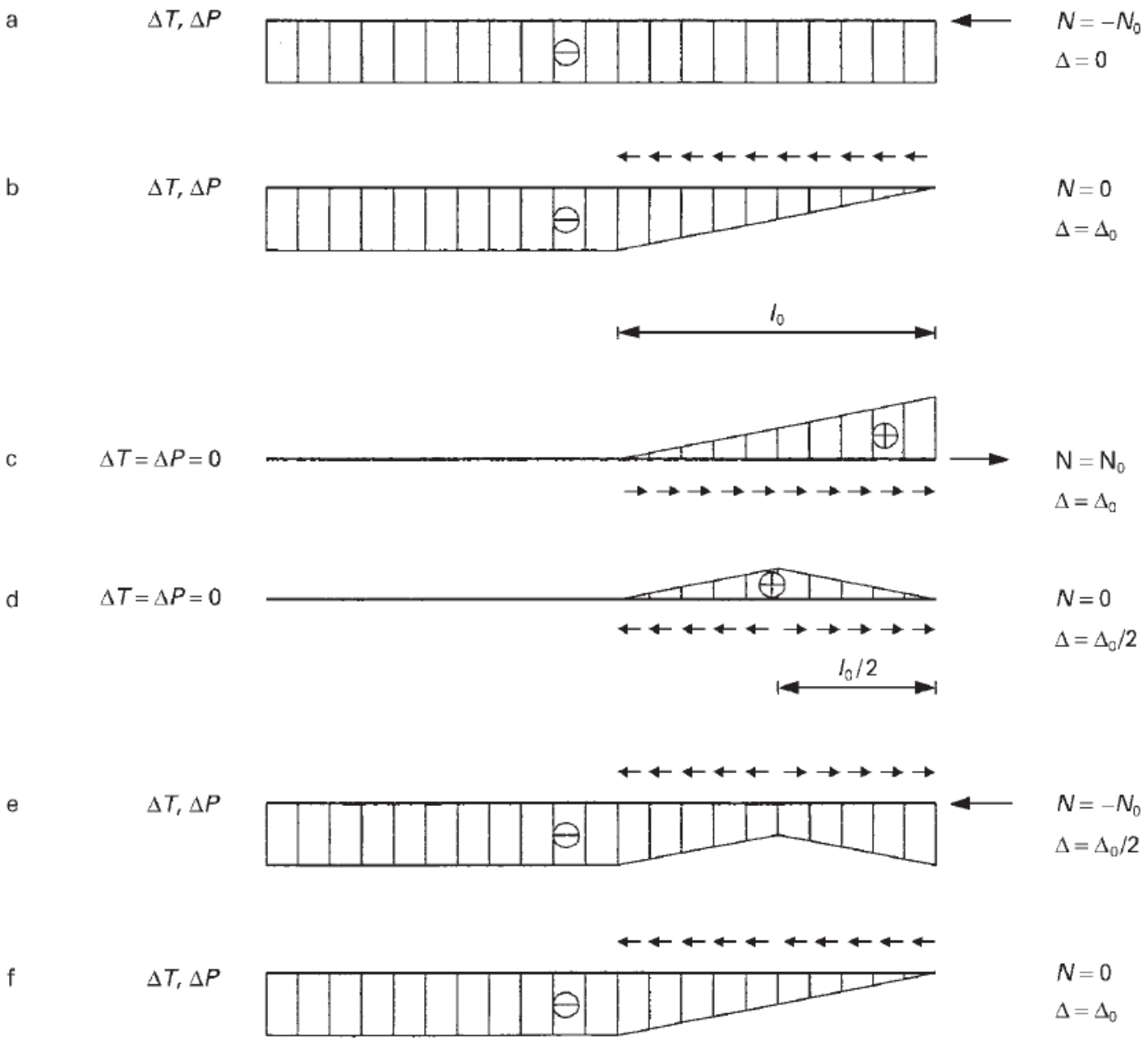



**Figure 6.7 Expansion and axial force distribution at the free end of a restrained pipeline**

را تحمل می‌کند. تنش باقی‌مانده دارای توزیع مثلثی با ماکزیمم $N = N_0/2$ در فاصله $L_0/2$ از انتها خط لوله می‌باشد.

زمانی‌که خط لوله دوباره شروع بکار می‌کند، نیروهای فشاری خط لوله باز می‌گردد، و فرض می‌شود که با یک قید انتهایی $N = N_0$ به تعادل رسیده باشد. اگرچه، به خاطر تنش‌های باقی‌مانده در خط لوله نیروهای فشاری در نزدیک انتها کاهش می‌یابد،شکل(۶,۷e) رابببینید. بنابراین حذف

نیروی قید انتهایی معکوس شدن اصطکاک را در طول $L_0/2$ و انبساط $\Delta_0/2$ خط لوله (انبساط کلی $\Delta = \Delta_0$) را نتیجه می‌دهد، شکل(۶,۷f) را ببینید. حالا وضعیت خط لوله همسان وضعیت بعد از اولین گرم کردن و افزایش فشار است.

ملاحظات بالا اشاره داردکه اولین کارکرد خط لوله منجر به انبساط انتهای آزاد به میزان $\Delta = \Delta_0$ می‌شود، سیکل‌های تکراری روشن/خاموش منجر به انبساط به میزان $\Delta_0/2$ می‌شود. بنابراین تغییر شکل‌های مختلف اعمال شده که باید در انتها خط لوله تطبیق داده شوند، $\Delta = \Delta_0 /2$ است.

وابستگی ویژگی‌های خاک به زمان به عنوان یکی از نتایج سیکل‌های عملکردی منجر به اعمال انبساط‌هایی به خط لوله می‌شود. خزش خاک ضریب اصطکاک پایین‌تری برای دوره‌های بلند مدت کارکردی از دوره‌های نسبتا مختصر خاموشی را ایجاد می‌کند.روش مرسوم برای حل این مشکل مقادیر محافظانه‌کارانه‌تری را برای فاکتورهای اصطکاک پوسته درنظر می‌گیرند که یک برآورد اضافی برای انبساط اولیه را نتیجه می‌دهد.

### کمانش خط لوله:

کمانش در خطوط لوله فراساحلی در حال کار ممکن است به علت بارهای محوری فشاری که توسط کنش‌های حرارتی یا فشارهای داخلی به وجود آمده‌اند، ایجاد شده باشد. اگر خط لوله روی بستر دریا خوابانده شده باشد تغییر شکل‌های جانبی غالب و شایع خواهد بود، درحالی‌که تغییر شکل عمودی زمانی که خط لوله در خاک مدفون باشد اتفاق می‌افتد. بنابراین، کمانش یک دهانه آزاد خط لوله ممکن است منجر به کمانش رو به پائین شود. زمانی که کمانش رخ می‌دهد، قسمتی از انبساط حرارتی محصور آزاد می‌شود، سپس نیروی فشاری در قسمت کمانش یافته کاهش می‌یابد. شکل کمانش یافته حاصل به میزان زیادی به مقاومت‌های اصطکاکی (محوری و جانبی) میان لوله و خاک دارد. نیروهای خارجی مثل ضربه لنگر یا تورهای ماهی‌گیری ممکن است باعث شروع کمانش شود.

همان طور که در بالا ذکر شد، کمانش جانبی زمانی که خط لوله در بستر دریا خوابانده شده است اتفاق می‌افتد، به این شکل که قید جانبی ضعیف‌تر از قید عمودی است. تحقیق تجربی درباره این پدیده نشان داد که وقتی کمانش در یک قسمت رخ داد، این کمانش به رشد خود در قسمت‌های مجاور ادامه می‌دهد، بنابراین احتمال کمی دارد که به خط لوله آسیب جدی وارد شود. محدودیت در اندازه خمیدگی به سفتی خمشی لوله و ضرایب اصطکاک خاک و لوله وابسته است. حداکثر کرنش مجاز توسط فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$\varepsilon = 0.425\, D\,(\mu_a / EI)^{1/3}\,\mu/\mu_a$$

| | |
|---|---|
| $\varepsilon$ | حداکثر کرنش خمشی |
| $D$ | قطر خارجی لوله فولادی |
| $EI$ | سفتی خمشی لوله |
| $\mu$ | ضریب اصطکاکی جانبی |
| $\mu_a$ | ضریب اصطکاکی محوری |

در پروژه صنعتی پیشرفته قید، فلسفه کلی طراحی اجازه به حرکات جانبی است ولی رفتار کمانش باید کنترل شود. شانه‌های سنگی میانی برای جلوگیری از حرکات طولی طراحی شده‌اند، بنابراین قسمت‌های مختلف لوله را از هم جدا می‌کند. فاصله میان شانه‌های میانی اجازه می‌هد که تمام انبساط‌ها در قسمت‌های مربوط بدون خطر به یک خمیدگی منجر شود.

## ۶ جلوگیری از خوردگی و عایق‌کاری

خوردگی به عنوان یک حمله مخرب به فلز، توسط واکنش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی فلز با محیط اطرافش تعریف می‌شود. نیروی محرکه تمایل فلز تصفیه شده برای بازگشت به یک وضعیت طبیعی که با یک سطح انرژی داخلی پائین‌تر مشخص می‌شود، می‌باشد. در خط لوله فولادی، آهن تمایل دارد که به وضعیت طبیعی خود یعنی اکسید فرو بازگردد.

خوردگی داخلی خط‌های لوله به نفوذ حمل‌شونده‌های داخل آن وابسته است، و ممکن است توسط پاشش بازدارنده‌ها، پوشش‌های داخلی یا آلیاژهای ضد خوردگی، از آن جلوگیری شود. عمر خط لوله معمولا می‌تواند با معرفی یک میزان مجاز خوردگی، یعنی یک ضخامت دیواره اضافه و بالاتر از آنچه برای محدوده فشار لازم است، افزایش می‌یابد. اگرچه، فولاد اضافی در مواردی که سوراخ ناشی از خوردگی داریم، که معمولا موقعی که حمل‌شونده خورنده بدون حرکت است یا فرسایش که معمولا در سرعت‌های بالای جریان یا جایی‌که عمل صیقلی کردن ممکن است اتفاق بیافتد، کم کاربرد است.

خوردگی خارجی خط لوله در آب دریا یک فرآیند الکتروشیمیایی است. زمانی‌که یک جریان الکتریکی میان یک ناحیه آندی و یک ناحیه کاتدی جریان می‌یابد (که در آن آب دریا به عنوان یک الکترولیت عمل می‌کند) یک عنصر گالوالنیک ساخته می‌شود. خوردگی در ناحیه آندی معمولا اتفاق می‌افتد، و یک خوردگی مجاز مقاومت در برابر خوردگی کمی را برای خوردگی خارجی پیشنهاد می‌کند. پوشاندن سطح فولاد با ساختن یک سد فیزیکی میان لوله و الکترولیت، از رسیدن اکسیژن به فولاد جلوگیری می‌کند، از خوردگی جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر محافظت کاتدی با پائین آوردن پتانسیل الکتریکی مقاومت در برابر خوردگی را ارائه می دهد.

سابقا، یک پوشش نفوذناپذیر به عنوان محافظ اصلی در برابر خوردگی و محافظت کاتدی یک پشتیبان در مقابل آسیب‌ها یا خرابی‌ها می‌بود. اگرچه، محافظت کاتدی ممکن به عنوان روش اصلی جلوگیری خوردگی درنظر گرفته شود در حالی‌که پوشش برای کاهش مقدار انرژی الکتریکی مورد استفاده، بکار می‌رود.

برای اطمینان از این‌که جریان مناسب حمل‌شونده‌ها درخط لوله داریم ممکن است نیاز به استفاده از عایق‌های حرارتی برای لوله‌ها باشد، که می‌تواند به راحتی با پوشش‌های ضدخوردگی خارجی ترکیب شود. در حالی که گرم کردن خط لوله می‌تواند یک روش دیگر باشد. در چنین نمونه‌هایی، اگرچه، مهم است که اثر دما روی فرآیندهای الکتروشیمیایی که خوردگی و محافظت کاتدی را ایجاد می‌کنند، در نظر گرفته شود. در تئوری، میزان واکنش برای هر ۱۰°C افزایش دما دو برابر می‌شود،اما در واقعیت، برای افزایش ۳۰ درجه‌ایی دما میزان واکنش دو برابر می‌شود.

## خوردگی فولاد در آب دریا:

وقتی آهن در تماس با یک الکترولیت اکسید می‌شود اتم‌های خنثی از طریق تشکیل یون‌های مثبت وارد محلول می‌شوند، در حالی‌که الکترون‌های منفی را آزاد می‌کند:

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$$

این واکنش، واکنش آندی نامیده می‌شود. یون‌های آهن ممکن است بعدا با یون‌های منفی در محیط واکنش داده که محصولات نامحلول خورنده را تولید می‌کند. الکترون‌های اضافی به سطح فولاد می‌روند، جایی که آنها در واکنش کاتدی با آب و اکسیژن شرکت می‌کند و یون‌های هیدروکسید را به وجود می‌آورد:

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4\ (OH)^{-}$$

تجزیه و انحلال آهن فقط اگر الکترون‌های اضافی که توسط واکنش‌های آندی آزاد می‌شود با همان آهنگ توسط واکنش‌های کاتدی مصرف شود، ممکن است ادامه پیدا کند. آهنگ تجزیه آهن و مصرف هم‌زمان الکترون‌ها را می‌توان به عنوان شدت جریان از فولاد به الکترولیت اندازه گرفت. بزرگی جریان متناسب با نرخ خوردگی است، که در فولادهای بدون محافظ در آب دریا ساکن، ممکن به طور متوسط تا ۰٫۱ (میلی‌متر/ سال) برسد. اگرچه نرخ خوردگی در بستر دریا ممکن است به طور قابل توجهی بالاتر باشد، و در مناطق خورنده‌تر به ۰٫۵ میلی‌متر/ سال برسد.

همان‌طور که در واکنش کاتدی بالا دیده شد، ممکن است خاصیت قلیایی در سطح فولاد افزایش یابد، که ممکن است باعث خرابی رنگ‌ها و دیگر پوشش‌ها شود.

در یک محیط اسیدی غالب بودن واکنش کاتدی ممکن است کاهش هیدروژن را به سبب دسترسی‌پذیری افزایش یافته یون‌های هیدروژن تغییر بدهد:

$$H^{+} + e^{-} \rightarrow H$$

معمولا اتم‌های هیدروژن به هیدروژن‌های مولکولی مضر ($H_2$) ترکیب می‌شوند، اما در حضور سولفیدها، ترکیبات آرسنیک یا سلنیم اتم‌های هیدروژن ممکن است در فولاد پراکنده شوند، که تردی هیدروژنی را افزایش می‌دهد. فرآیند پراکندگی و نفوذ اگر فولاد در معرض تنش‌های کششی باشد، افزایش می‌یابد.

تردی هیدروژنی به سبب خوردگی می‌تواند برای پیوستگی و یکنواختی فولاد،در حالی‌که فلز اصلی از دست رفته، مخصوصا برای فولاد با استحکام عالی و جوش‌های سختی بالا، یک تهدید باشد.

## جلوگیری از خوردگی داخلی:

هیدروکربن‌ها خورنده فولاد خطوط لوله نیستند، دلیل اصلی خوردگی داخلی در خطوط لوله آب است که ممکن است از دیواره گذشته باشد یا در گاز یا روغن خام وجود داشته باشد. خطوط لوله فراساحلی ممکن است برای انتقال آب به نقاط دور دست مورد نیاز باشند. برای جلوگیری از خوردگی چنین آبی باید هوازدایی داشته باشیم و آفت‌کش‌ها را اضافه کنیم تا از آلودگی توسط باکتری‌های مضر جلوگیری کنیم.

آب دریا به طور موقت به سبب عملیات اتصال و یا تست‌های هیدرواستاتیکی در خط لوله وجو دارد. همان‌طور که در بالا بحث شد، فولاد کربنی موقعی که در معرض آب دریا با اکسیژن یا بدون اکسیژن قرار گیرد، اکسید می‌شود. اکسیژن به سرعت در سطح فولاد بدون پوشش مصرف می‌شود و به زنگ تبدیل می‌شود. در وضعیتی که میزان اکسیژن در دسترس کاهش می‌یابد زمینه ایجاد حفره کم می‌شود و مقدار خوردگی خیلی کم می‌شود. اگر زمان پر شدن کم‌تر از دو یا سه ماه باشد، زمینه ایجاد حفره کم باقی خواهد ماند، خوردگی به سبب کاهش اکسیژن به فرم خوردگی‌های کلی که عمق کم‌تر از ۰,۰۲۵ میلی‌متر دارند، در می‌آید.

برای خطوط لوله در حال کار روغن در حال حمل ممکن حاوی آب باشد، چه در حالت امولسیون و چه در حالت دوفازی، و پتانسیل خوردگی می‌تواند با ناخالصی‌هایی مثل آب نمک، کربن دی‌اکسید یا هیدروژن سولفید تحت تاثیر قرار گیرد، خصوصا اگر آب بتواند در فضاهای مرده یا مناطق کوچک جمع شود. در گاز آب به صورت فاز بخار وجود دارد، اما خوردگی ممکن با کندانس شدن و جمع شدن آب ، به خصوص در حضور $CO_2$ و $H_2S$ ، اتفاق بیافتد.

به عنوان یک پیشنهاد یا کار مکمل، پوسته داخلی ممکن است به وسیله محافظ خوردگی، مثل یک پوشش داخلی یا آستری شکل‌پذیر بر اثر حرارت ، محافظت شود. متداول‌ترین پوشش ضد خوردگی داخلی اپکسی (نوعی اندود پلاستیکی لوله ها) می‌باشد.

## عایق‌کاری حرارتی:

دمای مناسب جریان حمل‌شونده‌ها در یک خط لوله دریایی ممکن است به یک دمای حداقلی عملکردی نیاز دارد، این چنین خط لوله‌هایی باید با عایق حرارتی مناسب یا یک سیستم گرمایی طراحی شوند. دمای لازم که برای جلوگیری از مومی شدن یا ته‌نشینی پارافین، تشکیل هیدرات یا آب حذف شده، معمولا به فشار وابسته است. بنابراین طراحی عایق‌کاری حرارتی به تحلیل جریان مرتبط است.

عایق‌کاری حرارتی توسط پوشش خطوط لوله، یا دفن در بستر دریا انجام می‌گیرد. ویژگی‌های عایق‌کاری مواد توسط هدایت گرمایی توصیف می‌شود.

# منابع:

1. **Design and Installation of Marine Pipelines** © 2005 by Blackwell Science Ltd