

مدل‌سازی اجزا محدود کمانش عمودی خطوط لوله دریایی مدفون

محمد واقفی^{۱*}، مرجان کشاورزی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، پست الکترونیکی: vaghefi@pgu.ac.ir
۲- دانش‌آموخته کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوشهر، بوشهر، پست الکترونیکی: marjan.keshavarzi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱۴

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۱

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۴، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

یک خط لوله شامل هیدروکربن‌های گرم در اثر افزایش دما و یا اثرات اصطکاک در طول کیلومترها از خط لوله، دچار انبساط طولی می‌شود و تنش فشاری محوری در دیواره لوله به وجود می‌آید. چنین نیروهای فشاری می‌تواند منجر به کمانش جانبی در صفحه بستر دریا و یا کمانش در صفحه عمودی شود. کمانش عمودی به‌طور کلی در لوله‌های مدفون رخ می‌دهد. زیرا برای لوله راحت‌تر است که در برابر وزن و مقاومت در برابر مواد پوشاننده، به سمت بالا حرکت کند به نسبت آنکه در مقابل مقاومت خاک در دو طرف دیواره، به‌طور جانبی حرکت کند. در این تحقیق به مطالعه کمانش عمودی خطوط لوله دریایی مدفون تحت اثر حرارت و فشار داخلی پرداخته شد. جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی، ابتدا مدل اجزا محدود کمانش عمودی لوله، با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل شد، سپس نتایج حاصله با نتایج به‌دست آمده از مطالعات Wang و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه گردید. مدلی بر مبنای آیین‌نامه ALA توسط نرم افزار ABAQUS ارائه شد و سپس تاثیر دامنه نقص اولیه بر کمانش عمودی بررسی شد. از نتایج گرفته شده افزایش دمای شروع کمانش در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۰۲ متر به ترتیب به میزان ۳/۷۹٪، ۸/۱٪ و ۱۵/۹۹٪ نسبت به مدل‌ها با دامنه نقص اولیه ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ متر است.

کلمات کلیدی: خطوط لوله دریایی مدفون، کمانش عمودی، نقص اولیه، فشار داخلی، حرارت.

۱. مقدمه

نیروهای فشاری می‌تواند منجر به کمانش جانبی در صفحه بستر دریا و یا کمانش عمودی شود (C-CORE, 2008). کمانش جانبی معمولاً در خطوط لوله غیر مدفون اتفاق می‌افتد. زیرا در برابر حرکت جانبی تنها اصطکاک نیروی مقاوم است، در حالی که اگر به سمت بالا جابجا شود وزن لوله در برابر حرکت مقاومت می‌کند. رخدادهای مختلفی می‌تواند برای خطوط لوله پدید آید که منجر به صدمات اساسی در آنها می‌شود. در

افزایش جمعیت، پیشرفت تکنولوژی، نیاز به انرژی و کمبود منابع آن در خشکی موجب شده تا بشر در اقیانوس‌ها و دریاها دنبال منابع انرژی باشد. کمانش خطوط لوله دریایی به دلیل نیروهای محوری فشاری ناشی از انبساط محدود که توسط فشار داخلی و حرارت ایجاد می‌شود، اتفاق می‌افتد. چنین

و تاثیرات مقاومت خاک بر تعادل و پایداری خط لوله، حالت و دامنه کمانش را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اگر در مسیر خط لوله زیر دریا خاک نرم وجود داشته باشد، به جای کمانش متداول رو به بالا ممکن است کمانش رو به پایین رخ دهد. همچنین پیشنهاد دادند که برای جلوگیری از کمانش رو به بالای خط لوله از دفن کردن استفاده شود با وجود این، زمانی که با خاک بسیار نرم مواجه شویم، دفن کردن و پوشاندن با شن نمی‌تواند مانع از کمانش عمودی خط لوله شود، زیرا در این وضعیت کمانش رو به پایین غالب است. Xiaodi و Xiaoxian (۲۰۱۲) روابط تحلیلی برای کمانش جانبی مود ۲ خط لوله ارایه و تاثیر اصطکاک را بر کمانش جانبی مود ۲ مورد بررسی قرار دادند. Karampour و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی کمانش جانبی و عمودی خطوط لوله دریایی با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی با در نظر گرفتن اندرکنش غیرخطی خاک و لوله پرداختند. نتایج مطالعات عددی و تحلیلی آن‌ها با نتایج قبلی به دست آمده متفاوت بوده و اختلافاتی در این مورد را گزارش نمودند. Liu و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از چهار روش مختلف شبیه سازی (روش‌های دو بعدی و سه بعدی ضمنی و غیرضمنی) در نرم افزار ABAQUS به شبیه سازی کمانش کلی خطوط لوله زیر دریا در دماهای مختلف پرداختند. آن‌ها نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی خود را با روش‌های تحلیلی کلاسیک نیز مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که نتایج روش‌های ضمنی و غیرضمنی سه بعدی به هم نزدیک بوده، اما با نتایج تحلیلی تفاوت زیادی دارند. Albermani و Karampour (۲۰۱۴) به مطالعه آزمایشگاهی و عددی خطوط لوله دریایی در دو حالت گذرا و پایدار پرداختند. آن‌ها نتایج روش اجزاء محدود را با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی کرده و همچنین به مقایسه استانداردهای طراحی موجود نیز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پاسخ سازه‌ای لوله‌ای بسیار متاثر از نقص اولیه و کمانش لوله است.

در این تحقیق به مطالعه کمانش عمودی خط لوله مدفون تحت اثر حرارت و فشار داخلی، با صرف نظر از اثرات موج و جریان، پرداخته شد. جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی ابتدا مدل اجزا محدود کمانش عمودی لوله در حالت مدفون در خاک، با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل شده، سپس نتایج حاصله با نتایج به‌دست آمده از مطالعات Wang و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه شده و

خطوط لوله زیر دریا، برخورد‌های مکانیکی بر اثر ابزارهای ماهیگیری و یا لنگر کشتی می‌تواند سبب بروز صدماتی در خط لوله گردد. همچنین، در نزدیکی سکوه‌های دریایی، خطوط لوله می‌تواند در معرض برخورد اشیاء پرتاب شده نظیر ابزارات حفاری و همچنین تجهیزات در حال نصب قرار گیرد. امروزه اجرای خطوط لوله به‌صورت غیر مدفون، علاوه بر موارد ذکر شده، ممکن است سبب بروز مشکلاتی از جمله پیدایش دهانه آزاد به‌علت ناهمواری‌های بستر و یا آبستگي در زیر خط لوله نیز گردد. کمانش رو به بالا به‌طور کلی در لوله‌های مدفون و قرار گرفته در ترانشه رخ می‌دهد. زیرا برای لوله راحت‌تر است که در برابر وزن و مقاومت در برابر مواد پوشاننده، به سمت بالا حرکت کند به نسبت آنکه در مقابل مقاومت خاک در دو طرف دیواره، به طور جانبی حرکت کند. کمانش تقریباً همواره در محلی که لوله دارای انحنا است، رخ می‌دهد زیرا در آن پروفایل لوله به سمت بالا انحنا دارد و لوله از حالت بدون کمانش به حالت کمانش یافته انتقال می‌یابد که اغلب با یک جهش ناگهانی است (Liu and Yan, 2012). مشکلاتی که در مسیر راه آهن بیش از هفتاد سال پیش اتفاق افتاد و تحلیل‌هایی که توسط Kerr (1978) انجام شد، بسیار نزدیک به مسائل کمانش حرارتی در خطوط لوله است. Hobbs (1981, 1984) خلاصه‌ای از مدل‌های اولیه از کمانش در خط لوله با طول زیاد بر بستر صلب تحت دما و فشار داخلی ارایه داد. از اهم نتایج گرفته شده توسط ایشان، پایین‌تر بودن دمای شروع به کمانش جانبی در مقایسه با کمانش عمودی و اهمیت بیشتر کمانش جانبی نسبت به کمانش عمودی است. Gan و Taylor (۱۹۸۶) روابط تحلیلی برای خط لوله دارای نقص اولیه ارایه دادند. نتایج بیانگر کاهش دمای شروع کمانش با افزایش دامنه نقص اولیه است. Palmer و همکاران (۱۹۹۰) از طریق یک آزمایش کوچک مقیاس شرح دادند که محدودیت در انبساط خط لوله به دلیل افزایش فشار می‌تواند باعث کمانش عمودی شود. پاکزاده ماسوله و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی هیدرولیک جریان و طول دهانه آزاد مجاز خطوط لوله دریایی تحت اثر امواج دریا پرداختند. نتایج حاصله نشانگر این است که در اجرای خطوط لوله دریایی در منطقه خلیج فارس علاوه بر اثر جریان در پیش‌بینی طول دهانه آزاد مجاز، باید اثر امواج را نیز در نظر گرفت. Wang و همکاران (۲۰۱۱) یک راه حل تحلیلی برای کمانش عمودی خط لوله روی یک بستر صلب دریایی تا یک بستر نرم دریایی ارایه دادند

نوع فولاد بر اساس موسسه نفت آمریکا است. از بتن به‌عنوان پوشش محافظ لوله استفاده شده است. ویژگی‌های فولاد استفاده شده در جدول ۲ ذکر شده است (Wang et al., 2011).

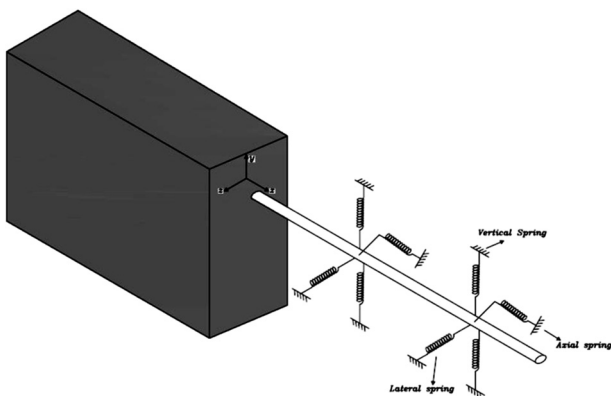
جدول ۱: پارامترهای در نظر گرفته شده برای لوله جهت حل تحلیلی و حل عددی

Pipe Outside Diameter (mm)	Pipe Wall Thickness (mm)	Cross Sectional Area (cm ²)	Second Moment of Area (cm ⁴)	Submerged Weight (KN/m)
۶۵۰	۱۵	۲۹۹/۲	۱۵۰۹۰۰	۳/۸

جدول ۲: ویژگی‌های فولاد API 5L X65

Density (kg/m ³)	Yield Stress (MPa)	Young Index (GPa)	Expansion Coefficient (1/°C)	Poisson's Ratio
۷۸۵۰	۴۴۸	۲۱۰	$۱۰/۵ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۳

جهت مدل‌سازی خط لوله‌ای به طول ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده است و از المان‌های تیر دو بعدی برای مدل‌سازی لوله استفاده شده است. در المان‌های تیر فرض بر این است که صفحات عمود بر محور تیر پس از تغییر شکل به صورت صفحه باقی می‌ماند. برای مش‌بندی طبق توصیه استاندارد (DNV 2006) طول المان‌ها حداکثر برابر با قطر لوله در محل کمانش و دو برابر قطر لوله برای المان‌های دورتر از محل کمانش در نظر گرفته می‌شود. به این منظور در مدل‌سازی از المان‌ها با طول ۰/۵ متر برای لوله استفاده شده است. از المان PIPE21 برای لوله استفاده شده است که المان ۲ گرهی دو بعدی است و این المان دارای سطح مقطع جدار نازک دایروی است و قابلیت اعمال فشار داخلی را دارد (Gao et al., 2011). از مدل فنرهای غیر خطی با المان Spring1 برای شبیه‌سازی مقاومت خاک در برابر حرکت لوله، استفاده شده است. شکل ۱ نمای شماتیکی استفاده از فنرهای محوری، عرضی و عمودی در مدل‌سازی خاک، در خطوط لوله مدفون، نشان می‌دهد.



شکل ۱: شکل شماتیک استفاده از فنر در مدل‌سازی خاک

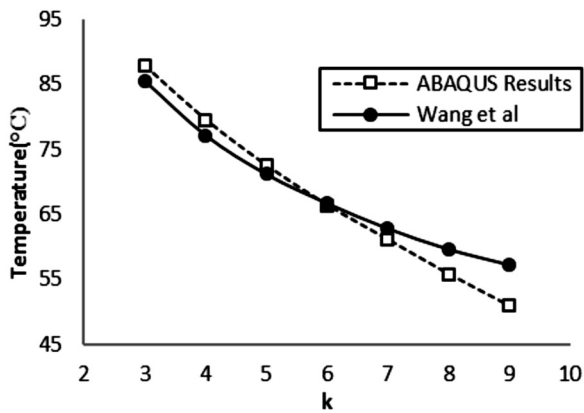
مدلی بر مبنای آیین نامه (2001) ALA^۱ ارائه گردید و سپس تاثیر دامنه نقص اولیه در کمانش عمودی مورد بررسی قرار گرفت.

۲. شیوه مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS و صحت سنجی آن

ABAQUS یک نرم‌افزار اجزا محدود قدرتمند است که قابلیت شبیه‌سازی مسایل پیچیده مهندسی را در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران، مهندسی مکانیک و... دارد. همین‌طور یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند است که مبتنی بر روش اجزا محدود، قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا است. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای است که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های رفتاری بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح، فوم‌های فزنی و نیز شکننده و همچنین مصالحی ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد (بهارى و معتمدنژاد، ۱۳۸۷). این برنامه قابلیت در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ غیر خطی و همچنین انجام تحلیل‌های غیرخطی مادی و هندسی را دارا است. یک تحلیل کامل در برنامه ABAQUS معمولاً از سه مرحله تشکیل می‌شود: مرحله پیش‌پردازش، مرحله پردازش و مرحله پس‌پردازش. در مرحله پیش‌پردازش مدل مسئله ساخته شده و یک فایل ورودی ABAQUS ایجاد می‌شود. مدل را معمولاً می‌توان به صورت گرافیکی با استفاده از ABAQUS/CAE و یا سایر پیش‌پردازنده‌ها ایجاد کرد. مرحله پردازش که معمولاً به صورت یک پروسه پردازش مدلی که در مرحله پیش‌پردازش ساخته شده است، مسایل عددی تعریف شده در مرحله قبل را تحلیل و به مرحله پس‌پردازش منتقل می‌کند. ارزیابی نتایج را می‌توان بعد از اتمام مرحله پردازش یعنی وقتی که تنش‌ها، تغییر مکان‌ها و سایر متغیرهای اساسی محاسبه شده‌اند، انجام داد. ارزیابی معمولاً به وسیله ماژول گرافیک‌ساز انجام می‌شود (عمرانی و همکاران، ۱۳۸۹). نمونه خط لوله بررسی شده توسط Wang و همکاران (۲۰۱۱) در جدول ۱ بیان شده است. جنس مصالح استفاده شده فولاد API 5L Grade X65 است که نام گذاری این

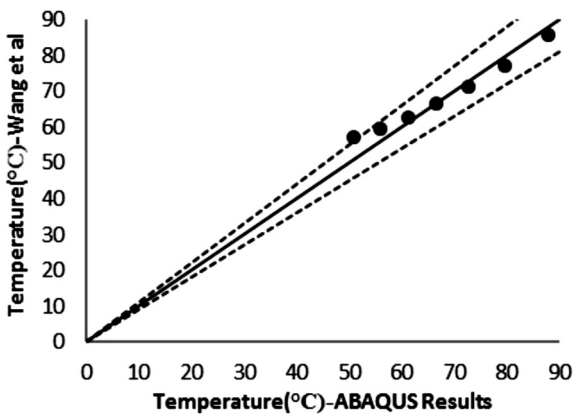
^۱ American Lifeline Alliance

نشان‌دهنده خطای ۱۰ درصد است و با توجه به نمودار خطا کمتر از ۱۰ درصد است.



شکل ۳: مقایسه دمای شروع کمانش در خط لوله مدفون

چنانچه خط لوله به صورت مستقیم و بدون هیچ‌گونه برون محوری باشد، کمانش در آن اتفاق نمی‌افتد. به‌منظور ایجاد کمانش در لوله یک نقص اولیه به طول ۳۰ متر و دامنه ۱۰ سانتی‌متر به لوله اعمال می‌شود. برای ایجاد نقص بایستی مدهای کمانشی لوله را با استفاده از تحلیل buckle (کمانش) به‌دست آورد که در شکل ۲ نشان داده شده است. سپس از تحلیل Static Riks بهره گرفته شده است که بر مبنای تحلیل کمانشی غیر خطی است. جهت اعمال بارگذاری درجات آزادی در دو انتهای خط لوله مقید شده است. فشار داخلی ۶ MPa به لوله اعمال می‌شود و دما در طول لوله افزایش پیدا می‌کند. افزایش دما باعث ایجاد نیروی محوری در لوله می‌شود، ولی این افزایش دما تا قبل از شروع کمانش هیچ‌گونه تغییر شکلی در لوله ایجاد نمی‌کند. دمای اولیه بستر ۱۳°C فرض شده و تا ۹۰°C افزایش می‌یابد.

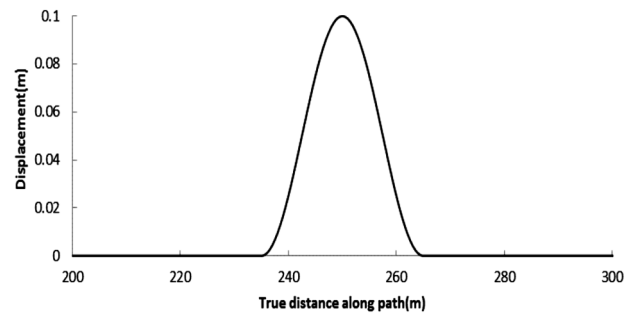


شکل ۴: خطا در نمودار دما بر حسب k برای خط لوله مدفون

با توجه به اینکه برای مدل‌سازی خاک از فنر استفاده شده و همین‌طور با توجه به این که خط لوله مدل شده دارای نقص اولیه است ولی روابط ارائه شده توسط Wang و همکاران (۲۰۱۱) مربوط به خط لوله مستقیم و بدون نقص است، صحت مدل‌سازی قابل قبول است.

۳. مدل‌سازی با استفاده از روابط آیین‌نامه ALA

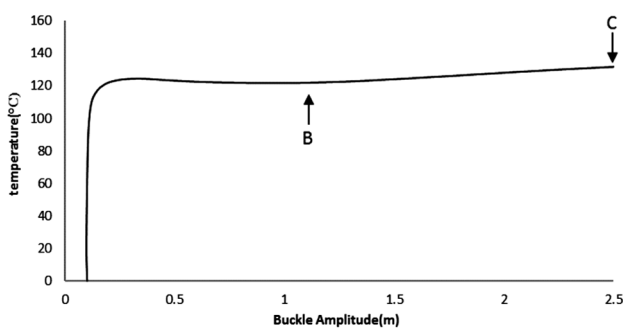
در این قسمت از روابط آیین‌نامه آمریکا (ALA) برای محاسبه مقاومت محوری و مقاومت عمودی خاک بهره گرفته شده است. بر مبنای آیین‌نامه ALA نیروهای خاک اعمال شده به لوله با استفاده از فنرهای غیر خطی بیان می‌شوند که مطابق با شکل ۵ است (ALA, ۲۰۱۱).



شکل ۵: دامنه نقص اولیه در لوله

تأثیر r_{II} (مقاومت خاک در برابر حرکت رو به بالای لوله) بر دمای شروع کمانش توسط Wang و همکاران (۲۰۱۱) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها بیان کردند با توجه به اینکه $r_i = 1.0w$ (مقاومت خاک در برابر حرکت رو به پایین لوله) و $ra = 0.3w$ (مقاومت محوری خاک) است، مقدار $k = (r_i - w) / (ru + w) = 9w / (ru + w)$ است و مقادیر کوچکتر k مربوط به مقادیر بزرگتر ru است (Wang et al., 2011). نتایج به‌دست آمده از بررسی کمانش عمودی خط لوله مدفون با استفاده از نرم افزار ABAQUS و نتایج به‌دست آمده از مطالعات Wang و همکاران (۲۰۱۱) در شکل ۳ نشان داده شده است. کاهش دمای شروع کمانش با افزایش k و یا به عبارت دیگر کاهش مقدار مقاومت خاک در برابر حرکت رو به بالای لوله r_{II} در این شکل مشاهده می‌شود. به‌منظور مقایسه بهتر، خطا در نمودار به‌دست آمده از نتایج عددی و نتایج تئوری در شکل ۴ نشان داده شده است. خطوط خط چین

در این قسمت دامنه نقص اولیه ۰/۱ متر در نظر گرفته شده است. طبق منحنی شکل ۷ دو طول کمانش ممکن است برای یک درجه حرارت وجود داشته باشد. چنانچه نقص اولیه در لوله کوچک باشد، نمودار به این صورت حاصل می‌شود. مسیر AB مسیر تعادل ناپایدار و مسیر BC مسیر تعادل پایدار است. در واقع پس از رسیدن به اولین تعادل در دمای معین که در این جا در حدود ۱۲۵°C است، کمانش آغاز شده ولی این حالت تعادل پایدار نبوده بلکه در تئوری مسیر مشخص شده را می‌پیماید تا به حالت تعادل در شاخه دوم کمانش برسد.



شکل ۷: نمودار دما-دامنه در کمانش در کمانش عمودی خط لوله مدفون

به دمایی که در آن مسیر تعادل پایدار شروع می‌شود و یا به عبارت دیگر حداقل دمایی که در آن کمانش عمودی شروع می‌شود، دمای اطمینان^۱ گفته می‌شود. دمای شروع کمانش عمودی با توجه به شکل ۷ برابر با ۱۲۱/۹°C است. تغییرات همزمان نیروی موثر محوری در محل کمانش و در محل دور از کمانش، در دماهای مختلف، در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است نیروی موثر محوری در محل کمانش در طول تحلیل پس از آنکه کمانش در خط لوله شروع می‌شود، کاهش می‌یابد. در واقع تغییر شکل لوله عاملی برای کاهش نیروی موثر محوری در محل کمانش است. اگر به یک خط لوله اجازه کمانش داده شود نیروی محوری دچار تغییر می‌شود. چون قسمت‌هایی از خط لوله به سمت کمانش تغییر مکان محوری می‌دهند نیروی اصطکاک در اثر این تغییر مکان بسیج می‌شود که باعث افت و آزاد شدن نیروی موثر محوری می‌شود. بنابراین هرچه کمانش بیشتر گسترش یابد نیروی محوری در محل کمان بیشتر افت می‌کند. مقدار نیروی موثر محوری در محل دور از کمانش ابتدا در اثر افزایش دما، افزایش

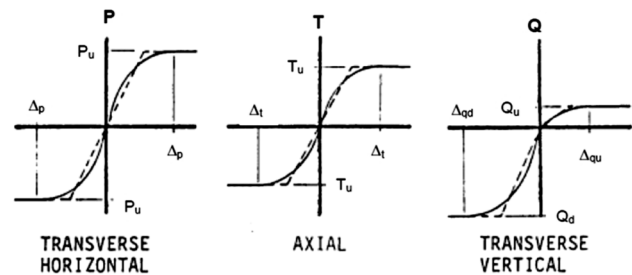
پارامترهای در نظر گرفته شده برای لوله و مراحل طراحی همانند آنچه گفته شد، است. در این مطالعه ماسه به عنوان خاک بستر دریا در نظر گرفته شده است (Gao et al., 2011). در ابتدا نسبت عمق خاک به قطر لوله ۱ در نظر گرفته شده است (H/D=1). خصوصیات پارامترهای ماسه مورد استفاده و ضرایب آن بر اساس روابط آیین‌نامه، مطابق با جدول ۳ است. مشخصات فنرهای خاکی برای مشخصات ذکر شده مطابق با جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۳: خصوصیات ماسه مورد استفاده

نوع خاک	عمق خاک (m)	دانسیته حجمی (KN/m ³)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	N _{qv}	N _q	N _γ
Fine Sand	۰/۶۵	۱۶	۳۵	۰/۷۹۵	۳۳	۴۴/۷

جدول ۴: مشخصات عددی فنرهای خاکی

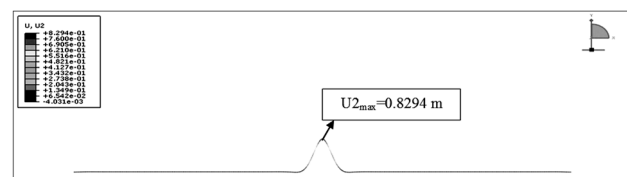
نوع فنر	فنرهای محوری	فنرهای عمودی بالا	فنرهای عمودی پایین
نیرو (KN/m)	۱۴/۹	۵/۴	۳۷۵
جابجایی (m)	۰/۰۰۳۲۵	۰/۰۱۳	۰/۰۶۵



شکل ۸: فنرهای خاک دو خطی جهت بیان نیروی خاک وارد بر لوله

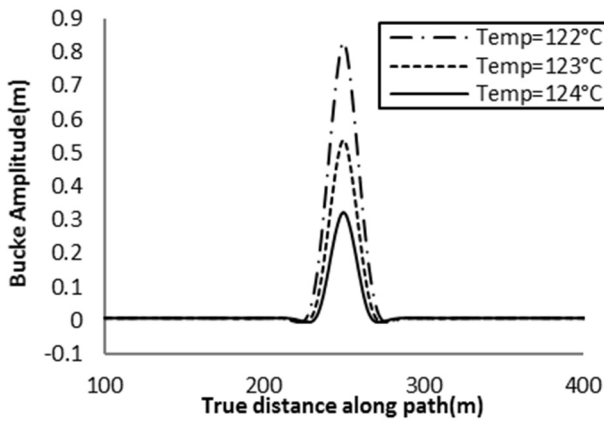
۴. نتایج حاصل از تحلیل

تغییر شکل لوله در لحظه شروع کمانش و دمای شروع کمانش در محیط ABAQUS مطابق با شکل ۶ است. کمانش در خط لوله در محل نقص اولیه اعمالی به لوله اتفاق می‌افتد. نمودار دما بر حسب دامنه کمانش برای کمانش عمودی خط لوله مدفون در شکل ۷ نشان داده شده است.

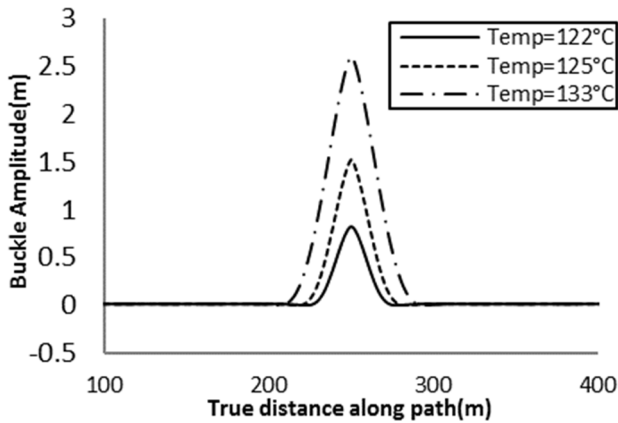


شکل ۶: دامنه کمانش در لحظه شروع کمانش

^۱ Safety Temperature

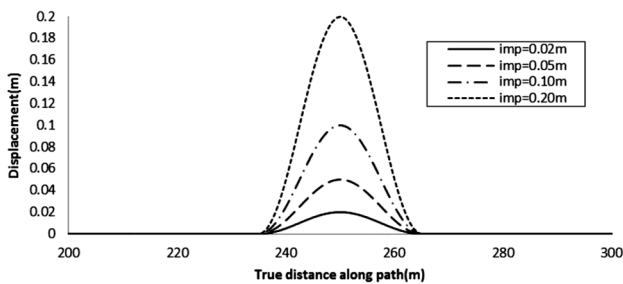


(الف)



(ب)

شکل ۹: تغییر شکل لوله در کمانش عمودی خط لوله مدفون: الف) مسیر تعادل ناپایدار، ب) مسیر تعادل پایدار

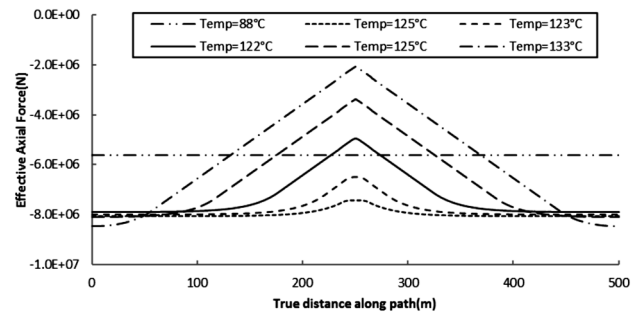


شکل ۱۰: نمودار دامنه نقص اولیه در طول خط لوله

جدول ۵: مقادیر مختلف نقص اولیه ایجاد شده در لوله

Imperfection Length (m)	Imperfection Amplitude (m)
۳۰	۰/۰۲
۳۰	۰/۰۵
۳۰	۰/۱
۳۰	۰/۳

می‌یابد و سپس روند تغییرات نیروی محوری موثر دور از کمانش متناسب با تغییرات دما در طول خط لوله است. در واقع مقدار این نیرو با کاهش دما (مسیر تعادل ناپایدار) کاهش و با افزایش دما، افزایش می‌یابد. دماهای 88°C و 125°C مربوط به قبل از شروع تعادل ناپایدار است که با افزایش دما نیروی محوری موثر افزایش می‌یابد تا به ماکزیمم مقدار خود برسد و تعادل ناپایدار آغاز شود. دماهای 123°C و 122°C مربوط به مسیر تعادل ناپایدار و لحظه شروع کمانش است. در این مسیر با کاهش دما مقدار نیروی محوری موثر کاهش می‌یابد. دماهای 52°C و 62°C مربوط به مسیر تعادل پایدار است. در این مسیر با افزایش دما نیروی محوری در محل کمانش کاهش و در محل دور از کمانش افزایش می‌یابد.



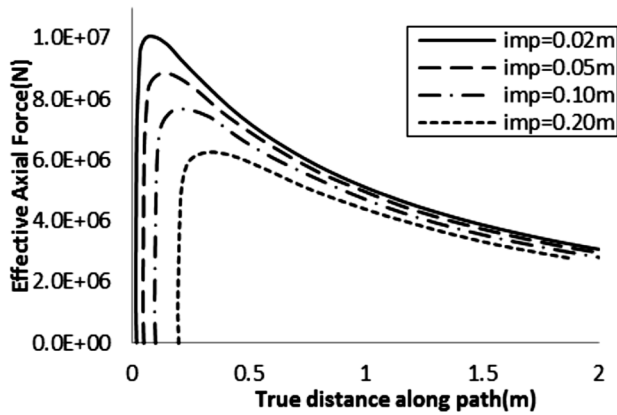
شکل ۸: نمودار نیروی محوری موثر محوری در طول لوله

شکل ۹ تغییرات دامنه کمانش و طول کمانش در خط لوله مدفون در اثر حرارت راه، برای مسیر تعادل ناپایدار و پایدار، نشان می‌دهد. در حالت تعادل ناپایدار با کاهش حرارت دامنه کمانش و طول کمانش افزایش می‌یابد و در مسیر تعادل پایدار با افزایش حرارت دامنه کمانش و طول کمانش افزایش می‌یابد.

۵. نقص اولیه در لوله

کمانش در لوله می‌تواند به دلیل وجود نقص اولیه در لوله در هنگام عملیات نصب لوله، در آن ایجاد شود. در این قسمت مقادیر مختلف نقص اولیه که در جدول ۵ ارایه شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سایر مقادیر مانند آنچه در بخش ۲ ذکر شده است، می‌باشد. نمودار دامنه نقص اولیه در طول خط لوله برای ۱۰۰ متر وسط خط لوله در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است.

کمتری دچار کمانش می‌شود و احتمال وقوع کمانش بیشتر می‌شود. نیروی موثر محوری در لحظه شروع کمانش در مدل با دامنه نقص ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ متر به ترتیب برابر با $۵/۲۶ \times ۱۰^۶$ ، $۵/۰۰ \times ۱۰^۶$ ، $۴/۹۵ \times ۱۰^۶$ و $۴/۲۷ \times ۱۰^۶$ نیوتن است.

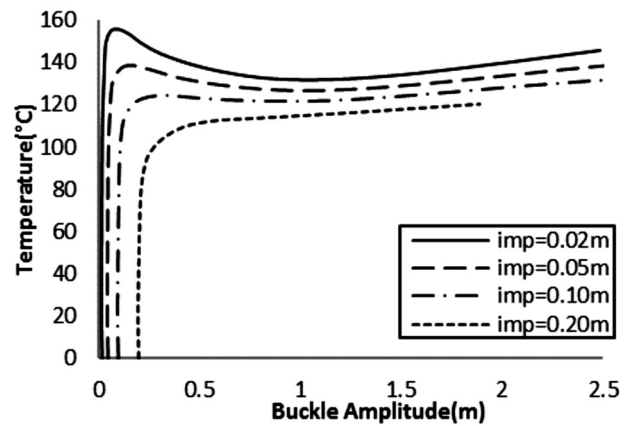


شکل ۱۲: نیروی موثر محوری به ازای نقص اولیه با دامنه مختلف

نمودار انبساط محوری بر حسب طول لوله در دمای ۱۳۳°C در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش دامنه نقص اولیه مقدار انبساط محوری بیشتر می‌شود، زیرا افزایش دامنه نقص اولیه باعث می‌شود که دمای شروع کمانش کاهش یابد و کمانش زودتر اتفاق بیفتد که باعث افت بیشتر نیروی موثر محوری و در نتیجه افزایش انبساط محوری در لوله می‌شود. انبساط محوری در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۰۲ متر برابر با ۰/۰۴ متر، در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۰۵ متر برابر با ۰/۰۶ متر، در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۱ متر برابر با ۰/۰۸ متر است. انبساط محوری در مدل با نقص اولیه ۰/۱ متر به ترتیب به میزان ۱۰۰٪، ۳۳/۳۳٪ نسبت به مدل‌ها با دامنه نقص اولیه ۰/۰۲، ۰/۰۵ متر افزایش یافته است. دامنه کمانش پس از شروع کمانش، به ازای دمای یکسان، با افزایش دامنه نقص اولیه افزایش می‌یابد (شکل ۱۴). زیرا با افزایش دامنه نقص اولیه دمای شروع کمانش افت می‌کند و لوله تا لحظه رسیدن به دمای یکسان در معرض اختلاف دمای بیشتری قرار می‌گیرد و در نتیجه این اختلاف دمای بیشتر تغییر دامنه کمانش بیشتری در لوله ایجاد می‌شود.

دامنه کمانش در دمای ۱۳۳°C در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۰۲ متر برابر با ۱/۲۷، در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۰۵ متر برابر با ۱/۷۶ متر و در مدل با نقص اولیه ۰/۱ متر برابر با ۲/۵۹ متر است. دامنه کمانش در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۱ متر

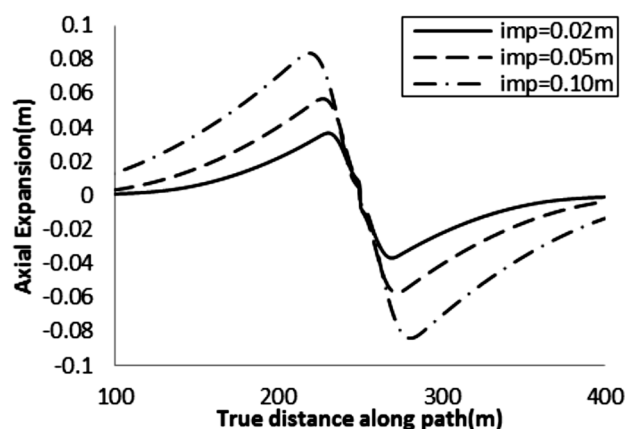
نمودار دما بر حسب دامنه کمانش برای خط لوله با نقص‌های مختلف در شکل ۱۱ ترسیم شده است.



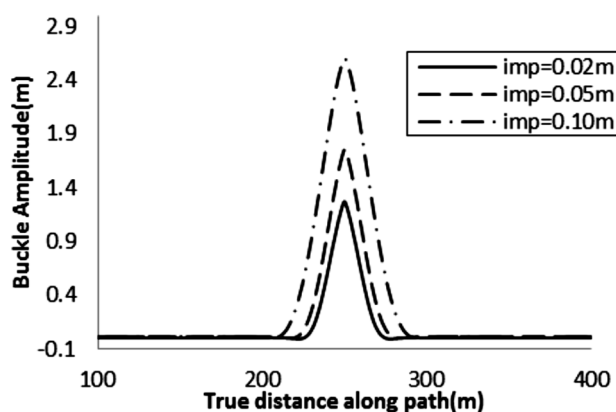
شکل ۱۱: نمودار دما-دامنه کمانش به ازای نقص اولیه با دامنه مختلف

نمودار دما بر حسب دامنه کمانش در کمانش خط لوله مدفون به ازای نقص‌های اولیه با دامنه کوچک به شکل U است و دو مسیر تعادل پایدار و تعادل ناپایدار در منحنی حاصل می‌شود. اما چنانچه دامنه نقص اولیه بیشتر شود مسیر تعادل ناپایدار به طور چشمگیری دستخوش تغییرات می‌شود. به طوری که به ازای نقص اولیه ۰/۲ تنها مسیر تعادل پایدار و یا به عبارتی مرحله پس کمانش حاصل می‌شود. دمای اطمینان نیز با افزایش دامنه نقص اولیه کاهش می‌یابد. به عبارتی در یک اختلاف دمای یکسان، احتمال وقوع کمانش عمودی در خط لوله دارای دامنه نقص اولیه بزرگتر نسبت به خط لوله دارای نقص اولیه کوچکتر بیشتر می‌شود که به دلیل کاهش نیروی موثر محوری مورد نیاز برای کمانش با افزایش دامنه نقص اولیه یا برون محوری اولیه در لوله است و در این حالت به دمای کمتری برای ایجاد نیروی محوری مورد نیاز برای کمانش نیاز است. دمای شروع به کمانش در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۰۲ متر برابر با $۱۳۱/۷۷^{\circ}\text{C}$ ، در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۰۵ برابر با $۱۲۶/۹۶^{\circ}\text{C}$ ، در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۱ متر برابر با $۱۲۱/۹^{\circ}\text{C}$ و در مدل با دامنه نقص اولیه ۰/۲ متر برابر با $۱۱۳/۶^{\circ}\text{C}$ است. دمای شروع کمانش در مدل با نقص اولیه ۰/۰۲ متر به ترتیب به میزان ۳/۷۹٪، ۸/۱٪ و ۱۵/۹۹٪ نسبت به مدل‌ها با دامنه نقص اولیه ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ متر افزایش پیدا کرده است. در واقع برون محوری سبب می‌شود که بار بحرانی کمانش کاهش یابد و لوله در نیروی محوری فشاری کمتری کمانش کند که در شکل ۱۲ دیده می‌شود. بنابراین لوله در دمای

به ترتیب ۲/۰۴ برابر و ۱/۴۷ برابر دامنه کمانش در مدل‌ها با دامنه نقص اولیه ۰/۰۲ و ۰/۰۵ متر است.



شکل ۱۳: انبساط محوری به ازای نقص اولیه با دامنه مختلف



شکل ۱۴: تغییر شکل لوله به ازای نقص اولیه با دامنه مختلف

جلوگیری از کمانش رو به بالای خط لوله از دفن کردن استفاده شود. نیروی موثر محوری در محل کمانش در طول تحلیل پس از آنکه کمانش در خط لوله شروع می‌شود، کاهش می‌یابد. در واقع تغییر شکل لوله عاملی برای کاهش نیروی موثر محوری در محل کمانش است. ولی روند تغییرات نیروی موثر محوری دور از کمانش متناسب با تغییرات دما در طول خط لوله است. در واقع مقدار این نیرو با کاهش دما (مسیر تعادل ناپایدار) کاهش می‌یابد و با افزایش دما، مقدار این نیرو افزایش می‌یابد.

نمودار دامنه کمانش بر حسب دما به ازای نقص‌های اولیه با دامنه کوچک به شکل U است و دو مسیر تعادل پایدار و تعادل ناپایدار در منحنی حاصل می‌شود. اما چنانچه دامنه نقص اولیه بیشتر شود مسیر تعادل ناپایدار به طور چشمگیری دستخوش تغییرات می‌شود و تنها مسیر تعادل پایدار حاصل می‌شود. دمای اطمینان در کمانش عمودی با افزایش دامنه نقص اولیه کاهش می‌یابد. که به دلیل کاهش نیروی موثر محوری مورد نیاز برای کمانش با افزایش دامنه نقص اولیه یا برون محوری اولیه در لوله است. دمای شروع کمانش در مدل با نقص اولیه ۰/۰۲ متر به ترتیب به میزان ۳/۷۹٪، ۸/۱٪ و ۱۵/۹۹٪ نسبت به مدل‌ها با دامنه نقص اولیه ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ متر افزایش پیدا کرده است. در کمانش عمودی دامنه کمانش و انبساط محوری پس از شروع کمانش، به ازای دمای یکسان، با افزایش دامنه نقص اولیه افزایش می‌یابد و مقدار نیروی موثر محوری در کمانش عمودی کمتر می‌شود.

منابع

- بهاری، م.ر؛ معتمدنژاد، ع.، ۱۳۸۷. کنترل کمانش جانبی غیر مجاز در خطوط لوله فراساحل تحت حرارت و فشار بالا. مجله مهندسی عمران، شماره ۳، صفحات ۲۱-۲۹.
- پاکزاده ماسوله، م.؛ یگانه بختیاری، ع.؛ کاظمی نژاد، م.ح.، ۱۳۹۱. بررسی هیدرولیک جریان و طول دهانه آزاد مجاز خطوط لوله دریایی تحت اثر امواج دریا. نشریه اقیانوس‌شناسی، سال سوم، شماره ۱۰، صفحات ۱-۱۰.
- عمرانی، ز.؛ مصطفی قره باغی، ا.ر.؛ عابدی، ک.، ۱۳۸۹. بررسی سرعت انتشار کمانش دینامیکی در خطوط لوله دریایی. نشریه مهندسی دریا، شماره ۱۱، صفحات ۱-۱۳.
- ABAQUS., 2011. Finite element program manual.,

۶. نتایج

در این تحقیق، به مطالعه کمانش عمودی خط لوله مدفون تحت اثر حرارت و فشار داخلی با استفاده از نرم افزار ABAQUS پرداخته شد و تاثیر دامنه نقص اولیه بر کمانش عمودی لوله مورد بررسی قرار گرفت.

در مدل‌سازی کمانش عمودی خط لوله مدفون با استفاده از فنرهای الاستوپلاستیک کاهش k نشان‌دهنده مقاومت بیشتر خاک در برابر حرکت رو به بالای لوله است و به ازای مقادیر k کوچکتر درجه حرارت شروع کمانش افزایش می‌یابد که با نتایج به دست آمده از مطالعات Wang و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت قابل قبولی دارد. بنابراین، در عمل پیشنهاد می‌شود که برای

- Liu, R.; Xiong, H.; Wu, X.; Yan, S., 2014. Numerical studies on global buckling of subsea pipelines. *Ocean Engineering*, 78: 62-72.
- Liu, R.; Yan, S.H., 2012. A brief history of upheaval buckling studies for subsea buried pipeline. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 4(3): 170-183.
- Palmer, A.C.; Elliance, C.P.; Richards, D.M.; Guijt, J., 1990. Design of submarine pipelines against upheaval buckling, *Proceedings of the 22nd Offshore Technology Conference*. May 5-8, 1990. Houston, Texas, 551P.
- Taylor, N.; Gan, A.B., 1986. Submarine pipeline buckling-imperfection study. *Thin-Walled Structures*, 4: 295-323.
- Veritas, D.N., 2007. Global buckling of submarine pipelines-structural design due to high temperature/high pressure. World Wide Web electronic publication. www.exchange.dnv.com, version (9/2007).
- Wang, L.; Ruowei, Sh.; Feng, Y.; Zhen, G.; Luqing, Y., 2011. Global buckling of pipelines in the vertical plane with a soft seabed. *Applied Ocean Research*, 33(2): 130-136.
- Xiaodi, S.; Xiaoxian, S., 2012. Study of lateral buckling of submarine pipeline. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. Sep. 7-9, 2012. Tianlun Regar Hotel of China, Liaoning, 562 p.
- Version 6.10. Retrieved March 18., 2011. <http://abaqusdoc.ugalgar.ca/books/stm/default.htm>
- American Lifeline Alliance (ALA), 2001. Guidelines for the design of buried steel pipe. Retrieved July 13, 2001. <http://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/>
- C-CORE., 2008. Design options for offshore pipelines in the US Beaufort and Chukchi Seas: C-CORE Report R-07-078-519. Retrieved June 3, 2008. <http://www.bsee.gov/Technology-and-Research/Technology-Assessment-Programs/Projects/Project-577/>.
- Gao, X.; Liu, R.; Yan, S.H., 2011. Model test based soil spring model and application in pipeline thermal buckling analysis. *China Ocean Engineering*, 25: 507-518.
- Hobbs, R.E., 1981. Pipeline buckling caused by axial loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 1(2): 2-10.
- Hobbs, R.E., 1984. In-service buckling of heated pipelines. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 110(2): 175-189.
- Karampour, H.; Albermani, F., 2014. Experimental and numerical investigations of buckle interaction in subsea pipelines. *Engineering Structures*, 66: 81-88.
- Karampour, H.; Albermani, F.; Gross, J., 2013. On lateral and upheaval buckling of subsea pipelines. *Engineering Structures*, 52: 317-330.
- Kerr, A.D., 1978. Analysis of thermal track buckling in the lateral plane. *Acta Mechanica*, 30(1-2): 17-50.