کنترل کمانش جانبی غیر مجاز در خطوط لوله فراساحل تحت حرارت و فشار بالا

محمد رضا بهاری[i] ; علی معتمد نژاد[ii]

چکیده

خطوط لوله فراساحل که برای انتقال نفت و گاز مورد استفاده قرار می گیرد، تحت حرارت و فشار بالایی قرار دارد. این دما و فشار باعث انبساط و افزایش طول لوله خواهد شد. اصطکاک موجود بین خط لوله و بستر دریا عاملی است که مانع این افزایش طول می شود. لذا این بازدارندگی باعث ایجاد نیروی محوری قابل توجهی در خط لوله می شود که در صورتی که کنترل نشود تغییر شکل های جانبی و تنش های غیر مجازی در خط لوله بوجود می آورد که بعضا باعث ایجاد خرابی در لوله می شود. در این مقاله ابتدا روش های پیشنهاد شده برای کنترل کمانش جانبی خطوط لوله فراساحل تحت حرارت و فشار بالا شرح داده می شود و سپس روش مارپیچی کردن لوله به عنوان اقتصادی ترین و پرکاربردترین روش مورد بررسی قرار می گیرد و با استفاده از مدل سازی های عددی الگویی مناسب برای شکل مارپیچ خط لوله بر اساس داده های طراحی خطوط لوله پارس جنوبی ارائه خواهد گردید.

کلمات کلیدی : **خطوط لوله فراساحل ، حرارت و فشار بالا ، مارپیچی کردن لوله ، کمانش جانبی ، نقص اولیه ، نیروی بحرانی کمانش**

---

[i] دانشیار دانشگاه تهران، دانشکده فنی : Bahaari@ut.ac.ir

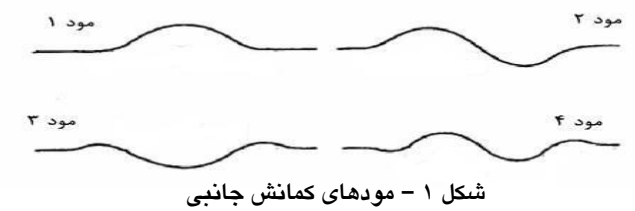
[ii] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، دانشکده فنی: Alimn62@yahoo.com

۱- مقدمه

خطوط لوله فراساحل که تحت حرارت و فشار بالایی قرار دارند تمایل به انبساط و افزایش طول دارند. اصطکاک موجود بین بستر دریا و لوله عاملی است که مانع افزایش طول لوله می شود. بنابراین نیروهای محوری فشاری بزرگی در لوله ایجاد می شودو با افزایش دما و فشار داخلی سیال این نیروی فشاری افزایش میابد[۱]. پاسخ کلی یک خط لوله تحت حرارت و فشار بالا (HP-HT) بستگی به سطح نیروی محوری گسترش یافته در جداره لوله در اثر سیکل های بارگذاری حرارت و فشار داخلی دارد. اگر نیروی فشاری موثر در لوله از یک حد مشخص بیشتر شود خط لوله برای کاهش نیروی محوری و آزاد کردن آن به طور کلی تغییر شکل می دهد و در حالت جدیدی پایدار می شود. به این پاسخ سازه ای که در آن لوله حالت تعادل جدیدی را به کمک تغییر شکل های بزرگ بدست می آورد کمانش کلی گویند و نیروی محوری مورد نیاز برای شروع کمانش را بار بحرانی کمانش می گویند. کمانش کلی خطوط لوله فراساحل اغلب به صورت جانبی می باشد و در صورتیکه امکان تغییرشکل جانبی نداشته باشد به شکل قائم کمانش می کند. [۲] به طور کلی کمانش خطوط لوله به عواملی مانند ضریب اصطکاک محوری و جانبی بین لوله و خاک ، مشخصات مقطع لوله ، نقص اولیه لوله (initial

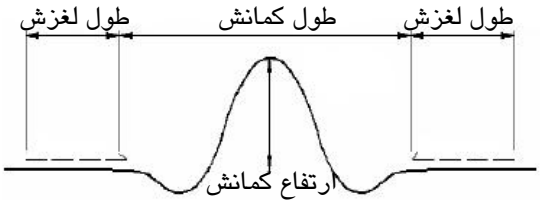
imperfection) و همواری و ناهمواری بستر دریا بستگی دارد. اگر خط لوله در بستر تقریبا مسطح قرار داشته باشد تغییر شکل لوله در صفحه افقی ایجاد می شود و کمانش جانبی رخ می دهد. در صورتیکه که کمانش در خطوط لوله کنترل نشود تنش های غیر مجاز در لوله ایجاد می شود که باعث ایجاد خرابی در خطوط لوله می شود لذا شناسایی روش های کنترل کمانش در خطوط لوله HP-HT امری ضروری در مهندسی خطوط لوله خواهد بود.

مساله کمانش جانبی خطوط لوله به طور گسترده توسط Hobbs در سال ۱۹۸۵ به کمک روش های تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. [۳] Hobbs با آزمایش های مختلف به این نتیجه رسید که خطوط لوله HP-HT به اشکال مختلفی می تواند به صورت جانبی کمانش کندکه معمول ترین آنها مودهای ۱ تا ٤ می باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است.

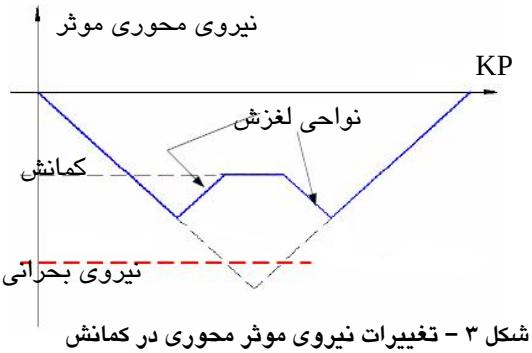


شکل ۱ – مودهای کمانش جانبی

شکل ۲ ناحیه کمانش یافته لوله را نشان می دهد . در دوطرف کمانش طول های لغزش قرار دارد که خط لوله به سمت کمانش حرکت می کند و باعث می شود تا نیروی اصطکاک در خلاف جهت حرکت بسیج شود و نیروی فشاری موثر در لوله به اندازه نیروی اصطکاک بسیج شده کاهش یابد. شکل ۳ کاهش نیروی محوری در اثر یک کمانش جانبی را نشان می دهد. [٤]



شکل ۲ – نواحی مختلف در یک کمانش مود ۳



شکل ۳ – تغییرات نیروی موثر محوری در کمانش

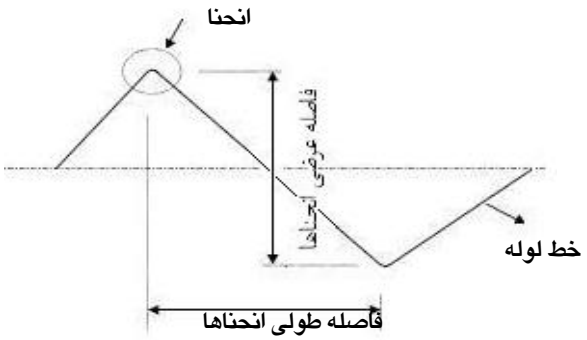
۲- روش های کنترل کمانش جانبی در خطوط لوله HP-HT

۲-۱- معرفی

کمانش در خطوط لوله را با روش های مختلفی می توان کنترل کرد. در واقع اصلی ترین هدف تمام این روش ها کاهش نیروی بحرانی کمانش و ایجاد یک کمانش زود هنگام است . نکته مشترک دیگر در تمام این روش ها این است که نیروی محوری در دیواره خط لوله بین کمانش های مختلف که در فواصل منظم در طول مسیر لوله ایجاد می شوند تقسیم می شود . محل این کمانش ها باید به اندازه ای باشد که کرنش های ایجاد شده در لوله از حد مجاز بیشتر نشود و خط لوله تغییر شکل های زیادی در طول عمر بهره برداری خود که شامل سیکل های زیاد گرم شدن – سرد شدن است تحمل نکند . کمانش جانبی را می توان با تکنیک های مختلفی در محل مطلوب و از پیش تعیین شده ایجاد کرد . برای این کار نیاز به یک سری ایجاد کننده های کمانش (Buckle Initiator) می باشد. این ایجاد کننده های کمانش را به شکل های مختلف طراحی میکنند . استفاده از هر کدام از این روش ها نیازمند بررسی شرایط فنی ، ماشین آلات در دسترس ، توجیه اقتصادی پروژه و حساسیت پروژه از لحاظ مسائل انسانی و زیست محیطی می باشد شرایط خاک بستر دریا نیز یکی از مهمترین عوامل موثر در انتخاب نوع روش کنترل کمانش می باشد. در ادامه تعدادی از روش های کنترل کمانش جانبی خطوط لوله HP-HT به اختصار شرح داده خواهد شد.

۲-۲- لوله گذاری مارپیچ

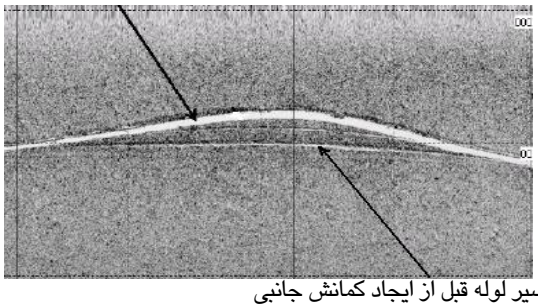
این روش به عنوان ساده ترین و اقتصادی ترین روش کنترل کمانش جانبی لوله های تحت فشار و حرارت بالا شناخته شده است . در این متود خط لوله به شکل مارپیچ های یکنواخت در روی بستر قرار داده می شود. شکل ٤ تصویری شماتیک از لوله گذاری مارپیچ می باشد. در واقع در این روش یک نقص اولیه به شکل انحنا در صفحه افق در لوله ایجاد می شود که لوله را منجر به کمانش در نیروی محوری کم می کند. این منحنی ها با حرکت بارج لوله گذار در مسیر قراردهی خط لوله به صورت زیگزاگل و با کنترل های نقشه برداری دقیق ایجاد می شود. تعیین شعاع انحنا و فاصله عرضی و طولی بین انحنا ها و به عنوان محلی برای آزاد کردن نیروی محوری امری ضروری است. وجود انحنا یا نقص اولیه در خط لوله نیروی بحرانی کمانش در خط لوله را تا حد زیادی کم می کند [٥] طوری که با افزایش دما و فشار داخلی و به طبع آن افزایش نیروی فشاری محوری ، تحت نیروهای بسیار کمتر از نیروی بحرانی کمانش برای خط لوله صاف ، کمانش جانبی انجام می شود و نیروهای فشاری آزاد می شود. این آزاد سازی نیرو سبب می شود تا از کمانش های کنترل نشده جلوگیری شود. شکل ٥ تصویر عکس برداری شده از خط لوله در محل انحنا قبل و بعد از کمانش جانبی را نشان می دهد.



شکل ۴ – تصویر شماتیک لوله گذاری مارپیچ

مشکل اصلی در روش مارپیچی کردن خط لوله انتخاب فاصله بحرانی بین کمانش ها است تا تنش های ایجاد شده در لوله از حد مجاز بیشتر نشود و همچنین اطمینان کامل از ایجاد کمانش در محل های از پیش تعیین شده (تاج مارپیچ ها) وجود داشته باشد. در واقع فاصله زیاد بین مارپیچ ها سبب می شود نیروی موثر در لوله افزایش یابد و کمانش ایجاد شده در تاج مارپیچ کرنش های زیادی را باعث گردد. همچنین فاصله کم بین آنها اطمینان ایجاد کمانش در تاج ها را کاهش می دهد. لذا این مساله چالش بزرگی در طراحی خطوط لوله مارپیچی است . مساله مهمتر عدم اطمینان این روش در خاک های نرم و چسبنده است. چون در اثر نشست لوله در این نوع خاک مقاومت جانبی خاک افزلیش یافته و مانع حرکت لوله می شود.

مسیر لوله بعد از ایجاد کمانش جانبی

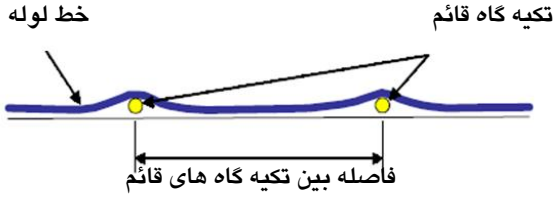


مسیر لوله قبل از ایجاد کمانش جانبی

شکل ۵ – تصویر لوله قبل و بعد از کمانش جانبی

۲-۳- تکیه گاه های قائم

در این روش برون محوری ای در صفحه قائم به لوله اعمال می شود تا باعث ایجاد کمانش شود. یک تکیه گاه عمودی، لوله ای با قطر زیاد است که در مکان از پیش تعیین شده روی بستر دریا در مسیر خط لوله نصب می شودو باعث میشود تا خط لوله از روی بستر بلند شده و تعادل آن حفظ شود. شکل ٦ تصویری شماتیک از خط لوله و تکیه گاه عمودی آن را نشان می دهد. [۲]



شکل ۶ – تصویر شماتیک لو له روی تکیه گاه های عمودی

نقص اولیه ای (برون محوری) که در نتیجه قرار گرفتن لوله روی تکیه گاه قائم ایجاد می شود سبب می شود که بار بحرانی کمانش لوله کاهش یابد و لوله در نیروی محوری فشاری کمتری کمانش می کند، علاوه بر آن لوله در تاج کمانش تماسی با بستر دریا ندارد و کاهش زیادی که در اصطکاک ایجاد می شود باعث می شود تا لوله به راحتی کمانش کند. همچنین بالا آمدن لوله از بستر دریا این حسن را دارد که عدم اطمینانی که در تعیین مشخصات بستر و نوع خاک وجود دارد به طور کامل از بین برود. بنابراین استفاده از تکیه گاه های عمودی در کاهش نیروی بحرانی کمانش و ایجاد یک کمانش بی خطر با تنش کم بسیار مفید است. چالش اصلی در استفاده از این روش نصب تکیه گاه ها قبل از مرحله لوله گذاری است که از لحاظ اقتصادی بار مالی زیادی را به پروژه تحمیل می کند و نیاز به ابزار های خاص بالاخص در آب های عمیق دارد. روی هم رفته استفاده از تکیه گاه های قائم روش مناسبی برای کنترل کمانش جانبی در لوله های پر حرارت و پر فشار است.

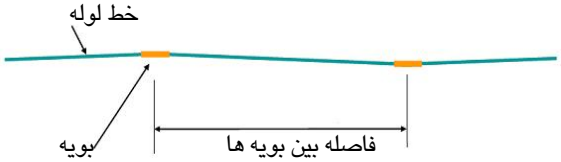
۲-٤- شناوری

این روش با افزایش ضخامت عایق و پوشش دور لوله که معمولا بتنی است و یا با نصب بویه های مخصوص دور لوله نیروی شناوری زیاد شده و وزن مستغرق لوله کاهش میابد. این کاهش وزن منجر به کاهش نیروی اصطکاک خاک می شود و این موضوع فواید زیر را به همراه دارد :

۱- کاهش در مقاومت جانبی باعث می شود تا تحت نیروی فشاری کمتری کمانش بی خطر با خمش و کرنش کمتر ایجاد شود.

۲-وجود شناوری فیزیکی با قطر زیاد باعث ایجاد یک نقص اولیه قائم در لوله می شود و باعث تسهیل در ایجاد کمانش با نیروی موثر کمتر می شود.

شکل ۷ تصویر شماتیکی از این روش را نشان می دهد. واضح است که افزایش در قطر بویه ها باعث افزایش احتمال ایجاد کمانش و پایین آمدن نیروی بحرانی می شود. همچنین مقدار برون محوری قائم هم اگر با استفاده از بویه های بزرگتر افزایش یابد تاثیر اساسی در آزاد شدن نیروی فشاری لوله دارد [۲].



شکل ۷ – تصویر شماتیک کنترل کمانش جانبی به روش شناوری

۳- تعیین هندسه بهینه برای روش لوله گذاری مارپیچ به کمک مدلسازی اجزاء محدود

۳-۱- معرفی مدل کامپیوتری

مدلسازی های کامپیوتری بر اساس روش لوله گذاری مارپیچ و به کمک نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS انجام شد تا هندسه ای بهینه برای این روش منطبق بر داده های طراحی خطوط لوله پارس جنوبی ارائه شود. در این مدل خط لوله ای به طول ۳۰ کیلومتر به صورت المان های PIPE31 و خاک بستر به صورت المان صلب R3D4 موجود است. مشخصات کلی مدل در جدول ۱ ارائه گردیده است. JP Kenny [۲] مقادیر حدودی برای هندسه یک خط لوله مارپیچ را به صورت جدول۲ ارائه کرده است. براین اساس سعی شده است تا با مدل سازی های دقیق مقدار قابل قبولی ارائه شود.

جدول ۱ – مشخصات خط لوله مدل شده

قطر خارجی D_o (m)	قطر داخلی D_i (m)	فشار داخلی P_i (Pa)	دمای طراحی T_d (C)	دمای محیط T_e (C)	مدول الاستسیته E (Pa)	تنش تسلیم $SMYS$ (Pa)	ضریب انبساط حرارتی α	عمق آب h (m)	ضریب اصطکاک طولی μ_A	ضریب اصطکاک جانبی μ_L
0.813	0.771	13.9e6	88	13	2.07e11	420e6	11.7e-6	70	0.5	0.79

جدول ۲ – مقادیر حدودی هندسه خط لوله مارپیچ پیشنهاد شده توسط JPKenny

R=شعاع انحنا (m)	L=فاصله افقی بین انحنا ها (m)	H= فاصله قائم بین انحنا ها (m)
۱۰۰۰ - ۱۵۰۰	۸۰۰ - ۵۰۰۰	۲۰ - ۱۰۰

۳-۲-تعیین نیروی بحرانی کمانش و معیار طراحی

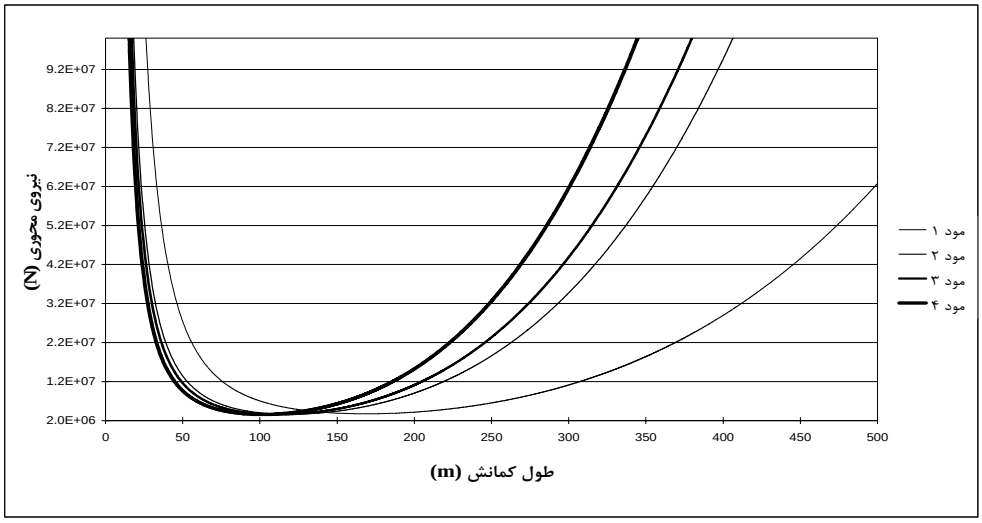
آیین نامه DNV-RP-F110 [٤] برای تعیین نیروی بحرانی کمانش در خطوط لوله HP-HT حداقل مقدار نیرو در منحنی های نیرو–طول کمانش برای مود های ۱ تا ٤ که بوسیله Hobbs [٥] ارائه شد را پیشنهاد می کند. این منحنی بر اساس فرمول ۱ بدست می آیند و برای خط لوله با مشخصات جدول ۱ به صورت شکل ۸ می باشد. که در آن W وزن مستغرق لوله ، I ممان اینرسی مقطع لوله ، k_1، k_2 و k_3 ثابت های Hobbs ، A سطح مقطع لوله و l طول کمانش می باشد. باقی متغیر ها در جدول ۱ معرفی شده اند. با توجه به شکل ۹ کمترین مقدار نیرو برای مودهای مختلف برابر با $3.7\times10^6\,N$ می باشد.

همچنین این آیین نامه تنش های مجاز در یک خط لوله مارپیچی را ۰/۸ برابر تنش تسلیم فولاد می داند.

$$P_0 = k_1\frac{EI}{L^2} + k_3\mu_A LW\left(\sqrt{1+k_2\frac{AE\mu^2{}_L WL^5}{\mu_A(EI)^2}}-1\right) \qquad (۱)$$

که در آن W وزن مستغرق لوله ، I ممان اینرسی مقطع لوله ، A سطح مقطع لوله و L طول کمانش می باشد. باقی متغیر ها در جدول ۱ معرفی شده اند.

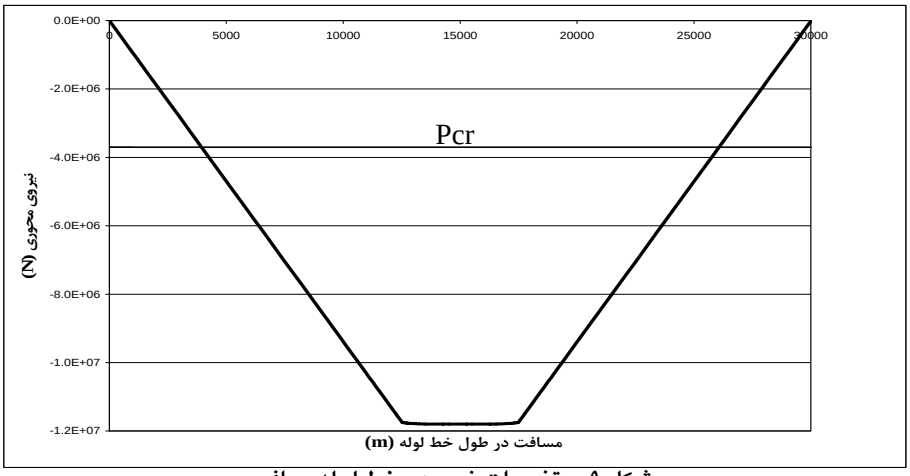
بر اساس شکل فوق مقدار کمینه منحنی ها برابر با $3.7\times10^6\,N$ می باشد لذا خط لوله با مشخصات جدول ۱ در نیروهای فشاری بیشتر از این مقدار کمانش می کند.



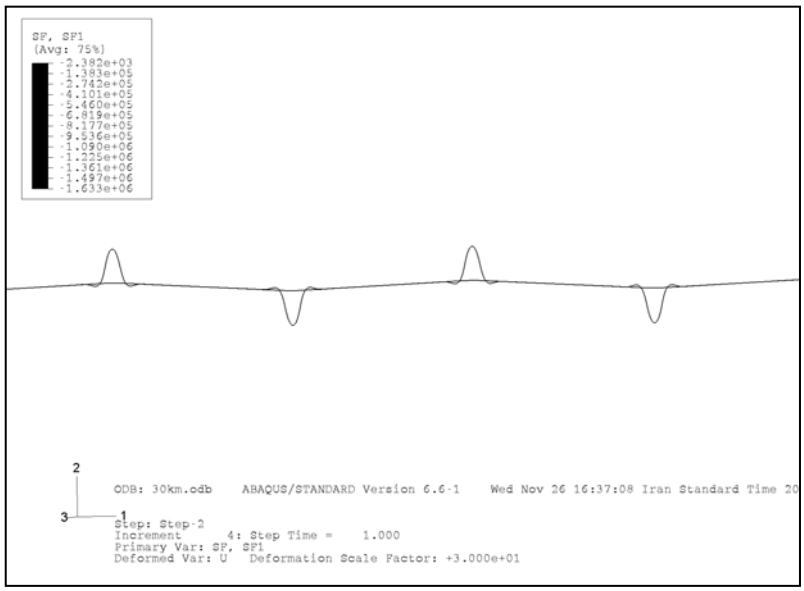
شکل ۸ – منحنی های Hobbs برای تعیین نیروی بحرانی کمانش

۳-۳-خط لوله صاف

برای بررسی نیاز یا عدم نیاز به روش های کنترل کمانش جانبی خط لوله صافی به طول ۳۰ کیلومتر تحت بارگذاری و مشخصات فیزیکی منطبق بر جدول ۱ مدل شد و مشخص گردید در فواصل بین ٤ و ٢٦ کیلومتر از ابتدای لوله نیروی محوری مقادیری بیشتر از نیروی بحرانی کمانش را دارد ولذا برای کاهش نیرو نیاز به استفاده از روش های کنترل کمانش می باشد. شکل ۹ توزیع نیروی محوری در خط لوله صاف نمایش داده شده است.



شکل ۹ – تغییرات نیرو در خط لوله صاف



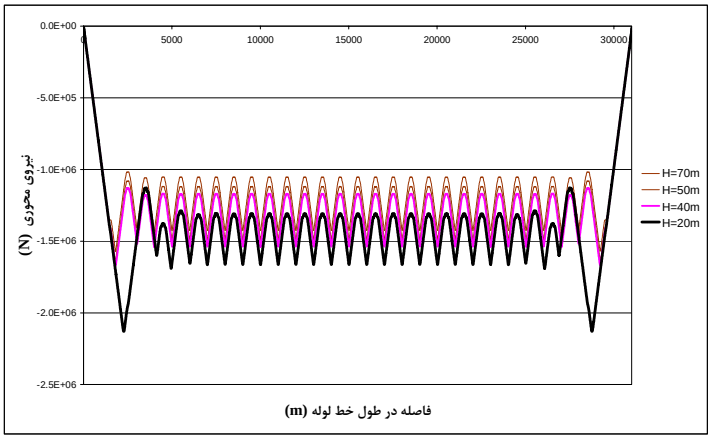
شکل۱۰ – کمانش جانبی در انحناهای مارپیچ در مدل کامپیوتری (تغییر شکل های جانبی بزرگنمایی شده است)

٤-۳- خط لوله مارپیچ

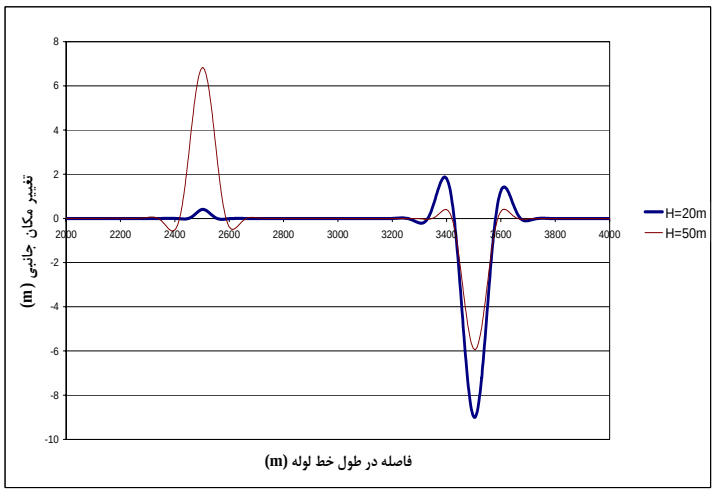
برای کنترل کمانش در خط لوله ۳۰ کیلومتری فوق از روش مارپیچی کردن لوله استفاده شده است. هدف کاهش نیروی محوری به مقداری کمتر از نیروی بحرانی با نگه داشتن تنش ها در محدوده کمتر از ۸SMYS/. یعنی Mpa ۳۳٦ می باشد. با انجام تعداد زیادی آنالیز برای خطوط لوله با L های مختلف مشخص گردید که مارپیچی با L=۱۰۰۰ m تنش ها در محدوده مجاز قرار دارند و با افزایش L تنش ها از محدوده مجاز خارج می شوند .شکل ۱۰ تصویری از قسمتی از مدل کامپیوتری برای مارپیچی با L=1000 ، H=50m و R=1000m را بعد از کمانش نشان می دهد. در شکل ۱۱ تغییرات نیروی محوری در خط لوله مارپیچی با مشخصات L=1000m و بازای H های مختلف نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۱۱ بر می آید ایجاد کمانش های کنترل شده در انحناهای مارپیچ سطح نیروی محوری را تا حد زیادی پایین می آورد.

تغییر مکان جانبی در دو انحنای متوالی در فواصل ۲۵۰۰ و ۳۵۰۰ متر از ابتدای خط لوله در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل در خط لوله با H=۲m به علت نقص اولیه کم در فاصله ۲۵۰۰ متری کمانش قابل توجهی رخ نمی دهد و نیروی محوری به اندازه

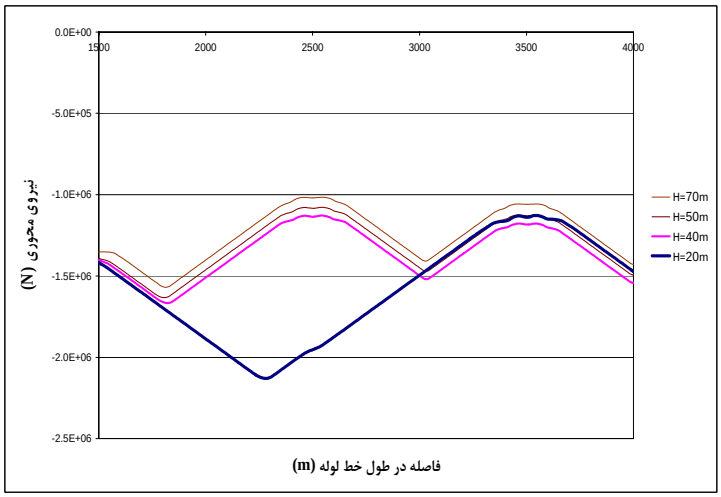
کافی آزاد نمی شود این مساله سبب می شود تا در فاصله ۳۵۰۰ متری کمانش بزرگتری در این لوله رخ دهد. توزیع نیروی محوری در این قسمت که در شکل ۱۳ نمایش دهنده شده است موید این مطلب است. در شکل ١٤ تغییرات تنش در خط لوله با L=1000m ، R=1000m و H=50m را نشان می دهد. کلیه تنش ها در محدوده مجاز (کمتر از ۳۳٦ مگاپاسکال) می باشد. شکل ۱۵ تغییرات تنش برای دو کمانش متوالی در فواصل ۲۵۰۰ و ۳۵۰۰ متری از ابتدای خط لوله را نشان می دهد.



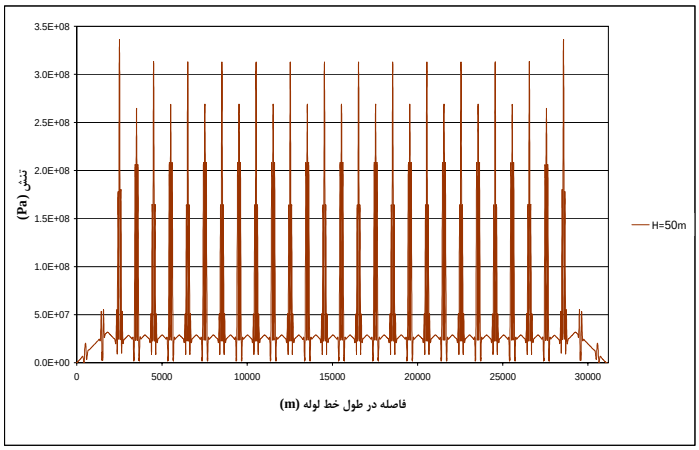
شکل۱۱ – نیروی محوری در خط لوله با L=1000m و با تغییرات H



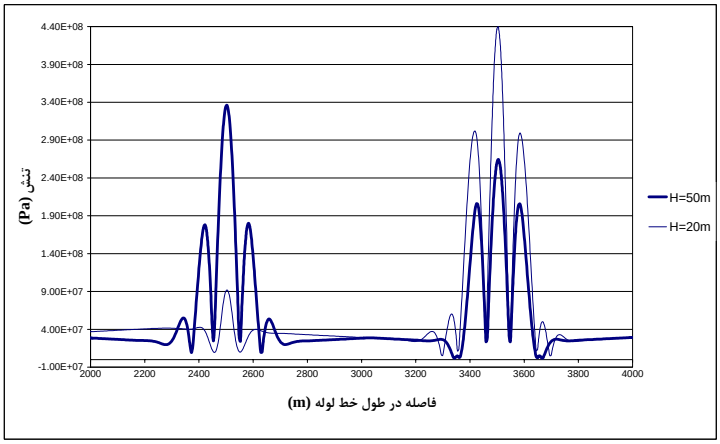
شکل۱۲ – تغییر مکان جانبی در دو کمانش متوالی



شکل ۱۳ – تغییرنیروی محوری در دو کمانش متوالی



شکل۱۴ – تغییرات تنش در خط لوله



شکل ۱۵ – تغییرات تنش در دو کمانش متوالی

در حالت کلی تاثیر شعاع انحنای مارپیچ (R) در آزاد کردن نیروی محوری خط لوله قابل توجه نیست اما فاصله طولی بین انحناها (L) در آزاد کردن نیروی فشاری به کمک کمانش های کنترل شده جانبی و مقدار تنش های ایجاد شده حاصل از ان در لوله بسیار موثر است. مقدار L=1000m برای خط لوله با مشخصات جدول ۱ نیروی محوری و تنش ها را در حدود مجاز نگاه می دارد. تنش های خط لوله با H=50m در مقایسه با دیگر مقادیر H به مقدار ۸xSMYS./. نزدیک تر است. جدول ۳ خلاصه حداکثر مقادیر تنش و نیروی محوری را برای هندسه های مختلف مارپیچ ارائه میکند.

جدول ۳ – خلاصه حداکثر مقادیر تنش و نیروی محوری برای هندسه های مختلف مارپیچ

مشخصات هندسی	L=1000m					
	R=1000m			R=1500m		
	H=70m	H=50m	H=20	H=70m	H=50m	H=20
حد اکثر تنش (MPa)	290.5	336.0	439.6	308.2	332.3	432.8
حد اکثر نیروی محوری (kN)	158.9	163.2	213.2	163.5	166.8	213.2

۵- نتیجه گیری

خطوط لوله فراساحل که تحت دما و فشار بالا قرار دارند ، به علت اصطکاک با بستر دریا تحت نیروهای بزرگ فشاری قرار می گیرند که این نیروها اگر از نیروی بحرانی کمانش بزرگتر شوند لوله کمانش غیر مجاز جانبی می کند که باعث ایجاد گسیختگی در لوله می شود. نتایج نشان می دهد که قرار دادن یک سری نقص اولیه (برون محوری) مانند انحناهای موجود در خط لوله مارپیچ تغییر مکان های جانبی لوله تحت دما و فشار داخلی را کنترل می کند و باعث می شود تا نیروهای بزرگ محوری در خط لوله آزاد شوند . در مطالعه ارائه شده در این مقاله برای کنترل کمانش جانبی در خط لوله از روش مارپیچی کردن لوله استفاده گردید که نکات زیر از آن برداشت گردید:

۱- وجود انحنا در خط لوله باعث آزاد شدن نیرو به اندازه قابل توجهی می شود

۲- هر چه فاصله عرضی بین انحنا ها (H) بیشتر باشد نیروی محوری بیشتر آزاد می شود و تنش های کمتری در خط لوله در اثر کمانش ایجاد می شود.

۳- مقدار شعاع انحنای مارپیچ (R) تاثیر زیادی در آزاد سازی نیروی محوری ندارد ولی با این حال هرچه شعاع کمتر باشد کمانش در محل احنا تحت نیروی کمتری رخ می دهدو نیرو زودتر آزاد می شود.

٤- با افزایش فاصله طولی بین انحنا ها (L) نیرو در خط لوله بزرگ می شود و کمانش های بزرگ تری در محل انحنا در لوله ایجاد می شود که باعث ایجاد تنش های بزرگی هم در لوله می گردد. برای خط لوله مورد مطالعه فوق مقدار ۱۰۰۰ متر برای فواصل طولی بین انحنا ها مناسب است.

۶- مراجع

[۱] Bruton, David, "The safe design of hot on-bottom pipelines with lateral buckling using the design guideline developed by the SAFEBUCK industry project", Deep Offshore Technology Conference, Brazil, 2005

[۲] JP Kenny Engineering Ltd. "Design of high temperature/high pressure (HT/HP) pipeline against lateral buckling.

[۳] Hobbs, R.E. "In-service buckling of heated pipelines" J Transportation, ASCE, Vol 110, No2, pp 175-189

[٤] DNV, RP-F110, Global buckling of pipelines – structural design procedure and criteria for HP/HT pipelines, 2006

[٥] Guan, Jiong, "Optimized solution to control lateral buckling of pipelines with snaked-lay: Theoretical and Numerical Studies", OMAE, 26, 2007