تحلیل المان محدود خط لوله فراساحلی دارای پوشش بتن مسلح تحت اثر نیروی کشش جانبی با در نظر گرفتن پارامترهای غیرخطی بستر دریا

محمد مهدی ضیایی فر[۱]، مجید قدسی حسن آباد[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد رشته عمران، گرایش سازه های دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
[۲] استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ m.ghodsi@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:
خط لوله فراساحلی
خاک بستر دریا
اندرکنش خاک و لوله
لنگر
تور ماهیگیری

چکیده

پیامد آسیب خط لوله های فراساحلی توقف تولید، خسارات سنگین و خطرات زیست محیطی می باشد. سالانه چند مورد از آسیب این خطوط بواسطه فعالیتهای ماهیگیری و برخورد لنگر کشتی ها در خلیج فارس گزارش میشود. در این مقاله پاسخ لوله در برابر کشش ناشی از قلاب شدن لنگر و تور ماهیگیری بررسی شده است. مدلسازی مطابق شرایط واقعی خلیج فارس بوده و شامل یک خط لوله گاز است که بر روی بستر دریا قرار دارد. برای مدلسازی خاک و پوشش بتن مسلح لوله، پارامترهای غیرخطی آنها لحاظ گردید. نیرو استاتیکی بوده و بصورت جانبی وارد میگردد. این تحقیق با روش المان محدود انجام شده و به منظور صحت سنجی، با یک تست آزمایشگاهی مقایسه گردید. هدف از این مطالعه تعیین مقاومت خط لوله در برابر بار جانبی میباشد. نتایج نشان داد لوله ۴ اینچ در برابر حداقل نیروهای جانبی توسط لنگر مقاومت سازه ای کمی داشته و آسیب جدی خواهد دید.

Finite Element Analysis for Offshore Pipeline with Reinforced Concrete under Effect by Lateral Traction Considering the Seabed Non-Linear Parameters

Mohammad Mehdi Ziaeifar[1], Madjid Ghodsi hassanabad[2*]

[1] Msc Student, Department of Marine Science and Technology; Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; mohamadziaeifar@yahoo.com
[2] Assistant Professor, Department of Marine Science and Technology; Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; m.ghodsi@srbiau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 21 Dec. 2015
Accepted: 27 Nov. 2016

Keywords:
Offshore Pipeline
Seabed
Soil_ Pipe Interaction
anchor
Trawl gear

ABSTRACT

Stopping the production, heavy loss and environmental hazards are the outcomes of damaging the offshore pipelines. Several cases of damaging because of fishing activities and clash anchors are reported in the Persian Gulf annually. In this paper, response of pipeline against the traction of hooking the anchor and trawling the gear is studied. In other words, the strength of a pipeline against a lateral load will be evaluated. The actual situation of a gas pipeline lying on the seabed of the Persian Gulf is modeled regarding soil, reinforced concrete and non-linear parameters. The load is considered statically which occurred laterally. This research is performed by the finite element method and will be compared to an experimental test for validation. The results show that a 4-inch pipe has low strength against the lateral loads.

۱ – مقدمه

خطوط لوله زیر دریا یکی از مهم ترین بخش های صنعت فراساحل می باشند که طراحی و اجرای آن در توسعه صنعت فراساحل نقش ویژه ای دارد. هدف یک خط لوله دریایی، انتقال مایع از یک مکان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]

به مکانی دیگر است. پارامترهای مختلف بسیاری اقتصادی، تکنیکی، محیطی وغیره– نصب یا عدم نصب یک خط لوله را مشخص می کند. امروزه با استفاده از تکنولوژی های روز روش های گوناگونی جهت طراحی و نصب خطوط لوله دریایی با توجه به عمق آب دریا و منطقه عملیاتی آن ابداع شده است. چندین روش طراحی برای محاسبه پایداری خط لوله های دریایی وجود دارد. روشهای طراحی از نظر پیچیدگی متغیرند، این محاسبات بین نیروهای تعادل ساده تا شبیه سازی دینامیکی می باشد. پاسخ دوبعدی لوله های فلزی نسبت به نیروی جانبی اولین بار بصورت آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج آن با تحلیل انجام شده مورد مقایسه قرار گرفت [۱]. اگیل مولستد و پال برگن توسعه یک مدل محاسباتی را برای شبیه سازی عددی خط لوله های دریایی را که تحت ضربه یا حرکت ناگهانی قرار گرفته را بررسی کرده، نیروهای اینرسی، هیدرودینامیک، نیروهای دراگ و همچنین اثرات اصطکاک و لیفت را درنظر گرفته اند. آنها از روش غیرخطی که در بر گیرنده جابجایی های بزرگ و رفتار الاستیک-پلاستیک مواد می باشد استفاده و در آن فرمول سازی عددی مسئله و حل معادلات دینامیکی غیر خطی آن بحث شده و پاسخ دینامیکی را برای لوله های قرار گرفته روی بستر دریا و همچنین برای لوله ای که بر روی آب غوطه ورند محاسبه گردیده است [۲].در تحقیقات بعدی نقاط خاصی از لوله تحت بارگذاری متمرکز قرار گرفتند و پس از بررسی پاسخ ها مشخص شده که پاسخ لوله ارتباط زیادی به سخت شوندگی کرنشی و نسبت قطر به ضخامت (D/t) دارد [۳و۴]. در مطالعه ای دیگر روش المان محدود گذرا برای بدست آوردن پاسخ خط لوله در نظر گرفته شد و اثر نیروهای هیدرودینامیکی وارد شده بر خط لوله بر اثر موجهای سطحی یا موج های درونی، اندرکنش بین لوله و خاک شبیه سازی شده و پاسخ های به دست آمده با تحقیقات پیشین مقایسه گردید. همچنین قابلیت های بالقوه روش المان محدود برای حالت کمانش بر روی بسترهای ناهموار ارائه شده است [۵]. رفتار دینامیکی غیر خطی لوله هایی که دارای Catenary می باشند نیز با استفاده از تکنیک حوزه فرکانس با تاکید بر شبیه سازی اجزای دریایی که دارای خواص فیزیکی و مکانیکی ثابت و تحت تنش های بالا قرار دارند، انجام شده است. سیستم غیرخطی به صورت افزایش اثر انحراف بر اجزای دینامیکی اثر می کند و روش به کار گرفته شده می تواند نتایج را به صورت جداگانه و پی در پی ارائه کند [۶]. کمانشی که در شرایط ثابت در لوله های دارای تغییر ضخامت (در پوسیدگی) تحت اثر فشار هیدرواستاتیک خارجی رخ می دهد نیز با روش آنالیز المان محدود غیر خطی بررسی گردید. مطالعه پارامتری نشان داد، با تغییر عمق و زاویه تغییر ضخامت، میزان آسیب نیز تغییر می کند و روش المان محدود با استفاده از حل کلاسیک معادله تیموشنکو این نتایج را به دست می دهد [۷]. جیانگوگ ژو و میشل هوفت با استفاده از روش المان محدود کمانش در اثر فشار در خط لوله دریایی را در حالت پایدار و با ضخامت های متفاوت را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند زمانیکه خوردگی مساوی یا کمتر از ۱۰ درصد قطر لوله باشد کمانش بطور کلی صورت می گیرد و در غیر اینصورت کمانش محلی اتفاق می افتد [۸]. با استفاده از روش المان محدود می توان میزان اعوجاج ایجاد شده در اثر نیروهای مختلف در لوله ها با سایز های مختلف را محاسبه نمود. با مقایسه انجام گرفته بین تئوری های نظری موجود و آزمون های تجربی انجام شده توسط محققان و نتایج به دست آمده از تحلیل می توان نتیجه گرفت که روش المان محدود تخمین دقیقی از میزان آسیب به خط لوله را به دست می دهد [۹و۱۰]. اثر ضربه وارد بر خط لوله زمانیکه بر روی بستر انعطاف پذیر قرار گرفته نیز پس از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که فشار داخلی لوله باعث افزایش فشار ضربه وارده به لوله می گردد همچنین با کاهش طول منطقه ای که تحت اثر نیرو قرار گرفته،آسیب دیدگی موضعی تر می شود [۱۱]. بررسی رفتار خط لوله در برابر ضربات جانبی با استفاده از مدلسازی سه بعدی مسئله به روش اجزا محدود بیانگر این موضوع است که نوع بستر خاکی نیز اثر قابل توجهی در پاسخ لوله خواهد داشت و می توان نتیجه گرفت که میزان قر شدگی لوله زمانیکه بر روی بستر صلب قرار گرفته بیشتر از زمانی است که لوله بر روی بستر با خاک انعطاف پذیر قرار دارد [۱۲]. بستر انعطاف پذیر سبب توزیع بیشتر نیرو بر روی خط لوله می گردد و این موضوع زمانیکه فشار داخلی کم باشد، بارزتر است [۱۱]. وایت و چیوک مدلسازی خاک بستر دریا را زمانیکه خط لوله دچار حرکت جانبی می شود، را انجام دادند. این مقاله چهارچوبی برای زمانیکه خاک به میزان کافی تجمع گشته و دچار سختی شود، تا هنگامیکه مقاومت سخت شوندگی خاک جلوی لوله در برابر حرکت خط لوله غلبه می کند را ارائه می کند [۱۳].

با توجه به تحقیقات انجام شده، خطوط گاز مایع موجود در خلیج فارس که عموماً ۳۲ اینچ بوده و یک خط لوله ۴ اینچ حاوی مونواتیلن گلیکول نیز بر روی آن نصب می گردد، بعلت نداشتن محافظ در طول مسیر تا ساحل، همواره در معرض آسیب ناشی از برخورد لنگر و تورهای ماهیگیری قرار دارند و سالانه چندین مورد از آسیب خط لوله ۴ اینچ گزارش می شود که این موضوع علاوه بر خسارات مالی، می تواند خطرات زیست محیطی را نیز در پی داشته باشد. در تحقیق حاضر ابتدا خط لوله ۴ اینچ برای حالتی که لنگر قایق ماهیگیری به آن گیر کرده است، تحت اثر بارجانبی قرار می گیرد و مقاومت و پاسخ آن بررسی می گردد. پس از آن خط لوله ۳۲ اینچ تحت اثر نیروی تور ماهیگیری ارزیابی می گردد. توانایی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

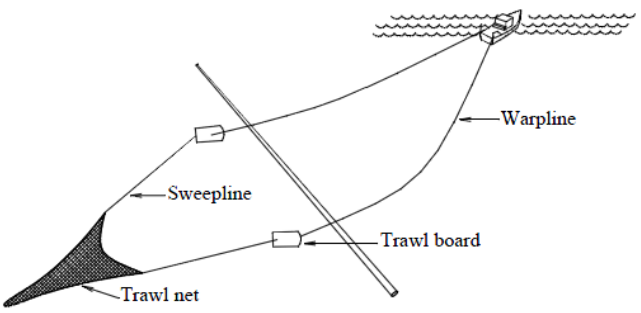
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]

لوله ها در جذب انرژی بار وارده و تبدیل آن به تغییر شکل های خمیری یکی از موارد مورد توجه در بسیاری از کاربرد های مهندسی می باشد. علاوه بر این، پاسخ خطوط لوله نفت و گاز تحت بارهای جانبی، که بوسیله ابزارهای کششی نظیر تخته ماهیگیری یا لنگر کشتی ایجاد می شود دارای اهمیت فراوانی است، زیرا می تواند موجب آسیب های ناگهانی و جدی شود. خطوط لوله همچنین می توانند در معرض بارهای جانبی بر اثر سقوط تجهیزات سنگین حفاری قرار گیرد. به علاوه، بار های جانبی ضربه ای، روی اعضای لوله ای سکوهای دریایی، می تواند تهدیدی برای رفتار ایمن سازه ای سکو باشد[۱۴]. در تحقیق حاضر برای اولین خط لوله ۳۲ اینچ به همراه پوشش بتن مسلح، خط لوله ۴ اینچ و بستر انعطاف پذیر برای اولین بار به همزمان مورد بررسی قرار گرفته اند و برای این منظور از نرم افزار آباکوس ویرایش ۶,۱۳ [۲۰] استفاده شده است.

۲ - معادلات اساسی حاکم

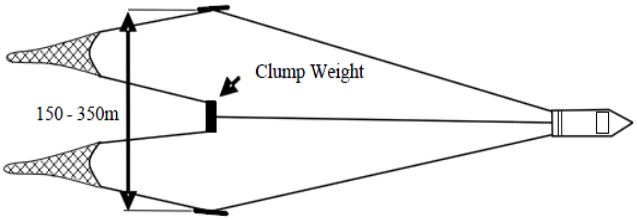
۲-۱- نیروی تور ماهیگیری

خطر عمده ناشی از فعالیت های ماهیگیری بر خطوط لوله، اثر متقابل با تورهای تحتانی است که شامل ضربه، کشش بیش از اندازه تور ماهیگیری و قلاب شدن است. بارهای طراحی را می توان مطابق با DNV-RP-F111 [۱۸] تعیین کرد. لوازم تحتانی تور ماهیگیری مجهز به تخته صیدها است که در آن کیسه تور ماهیگیری توسط تخته های جداگانه تور، باز نگه داشته می شود. گروه دوم، تورهای کیسه ای شاهین دار است که یک میله کج به همراه کفشک های تور ماهیگیری در نقاط انتهایی به کار می رود. جرم کل تور کیسه ای شاهین دار، حداکثر تا kg ۵۵۰۰ است. ساختار یک تور کیسه ای شاهین دار در شکل۱ نشان داده شده است. تخت صیدهای تور ماهیگیری با حداکثر جرم kg ۵۰۰۰ به کار می رود، اما یک تخته تور ماهیگیری از نوع Polyvalent متداول، دارای حداکثر جرم فولادی معادل با kg ۴۰۰۰ است (تخته صیدهای گوناگونی طراحی و ساخته شده است ولی نوع Polyvalent / مستطیلی و V شکل آنها متداول تر است) [۱۸].



شکل۱- ساختار تور کیسه ای

برخی از کشتی های ماهیگیری دو تور را در ساختاری جفتی به کار می برند که تا اندازه ای مشابه تورهای کیسه ای شاهین دار می باشد (شکل۲)، اما تورها نزدیک هم قرار دارند و توسط دو تخته خارجی تورماهیگیری و یک وزنه سنگین مرکزی که بلوک بتونی استوانه ای یا کروی است و در بستر دریا می غلتد، باز نگه داشته می شود. با توجه به اینکه جرم وزنه سنگین تر است اما شکل گرد آن باعث می شود ضربه کمتر و به شکل بحرانی انتقال یابد.



شکل۲- تور ماهیگیری در ساختار جفتی [۱۸]

۲-۲- تغییر شکل مقطع لوله توسط تور کیسه ای

ملاحظات طراحی در مورد تغییر شکل مقطع عرضی لوله عبارتند از: برخورد تور ماهیگیری، قلاب شدن تور ماهیگیری و کشش بیش از حد. راهنمای DNV-RP-F111 [۱۸]، برای محاسبه نیروی کشش افقی و قائم وارد شده به خط لوله با سایز های بین ۱۰ اینچ تا ۴۰ اینچ روابط زیر را ارائه می دهد، البته این روابط در صورتیکه لوله روی دهانه های آزاد قرار داشته باشد، متفاوت خواهند بود:

برای تخته های ماهیگیری

$$P = C_f V (M_t K_w)^{0.5} \quad (۱)$$

برای تورهای شاهین دار

$$F_p = C_f V [(M_t M_a) K_w]^{0.5} \quad (۲)$$

C_f برای تخته های ماهیگیری به صورت زیر تعیین می شود:

برای تخته های ماهیگیری Polyvalent و مستطیلی:

$$F = 8.0 (1 - e^{-0.8 \bar{H}}) \quad (۳)$$

تخته های ماهیگیری V شکل:

$$F = 5.8 (1 - e^{-1/1 \bar{H}}) \quad (۴)$$

که در آن $\bar{H}$ (ارتفاع بی بعد) برابر است با:

$$\bar{H} = \frac{H_{sp} + \frac{OD}{2} + 0.2}{B} \quad (۵)$$

$$K_W = \frac{3.5 \times 10^{7}}{L_W} \quad (۶)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]

که در آنها OD قطر خارجی لوله بعلاوه پوشش، H_{sp} ارتفاع دهانه، B نصف ارتفاع تخته تور ماهیگیری؛ F_p نیروی کشش بیش از اندازه، V سرعت تور ماهیگیری، M_t جرم تور ماهیگیری، M_a که شامل جرم های اضافه شده است، k_W سفتی طناب، L_W طول طناب (معمولا ۲,۵ تا ۳,۵ برابر عمق آب)، C_f ثابت تجربی. ثابت C_f برای تورهای کیسه ای شاهین دار در دامنه ۳ تا ۵ قرار دارد و به شرایط هندسی تور ماهیگیری بستگی دارد و اینکه آیا یک میله حلقه ای در جلوی کفشک تور ماهیگیری نصب شده است یا خیر. در تخته صیدهای تور ماهیگیری، این ثابت به مقدار زیادی وابسته به ارتفاع خط لوله نسبت به بستر دریا دارد، ارتفاع دهانه H_{sp} برای خطوط لوله ای که تا حدی در خاک نفوذ کرده باشند منفی در نظر گرفته می شود. در مورد نیروهای عمودی وارده بر تخته صیدهای Polyvalent و مستطیلی، راهنمای DNV-RP-F111 [۱۸]، عبارات زیر را پیشنهاد می دهد:

برای تخته های ماهیگیری Polyvalent:

$$F_z = F_p\,(0.2 + 0.8\,e^{-2.5\overline{H}}) \qquad (۷)$$

برای تخته های ماهیگیری V شکل

$$Z = 0.5\ F_p \qquad (۸)$$

پوشش معمولی ضد خوردگی یا عایق کاری، هیچ محافظت قابل توجهی را در مقابل نیروی وارده از طرف لنگر یا تور ماهیگیری از خود نشان نمی دهند اما اگر تحلیل ضربه مورد نظر باشد می توان پوشش بتونی را برای جذب انرژی ضربه ای به اندازه ۵/۴ kj در نظر گرفت [۱۸].

۲-۳- کشش خط لوله تحت اثر نیروی لنگر و تور ماهیگیری

قلاب شدن وضعیتی است که در آن ابزار تور ماهیگیری در زیر خط لوله گیر می کند و لوله را در معرض نیرویی به بزرگی استحکام شکست در راستای پیچش تور ماهیگیری قرار می دهد. این وضعیت معمولاً در حالت بار تصادفی در نظر گرفته می شود که اشاره دارد تمامی ضرایب بار و مقاومت، با مقدار واحد تنظیم شده است. قلاب کردن در دهانه های آزاد خط لوله، خطر محسوب می شود و دستورالعمل DNV-RP-F111 دوحالت را مد نظر قرار داده است: نفوذ جزیی (ممکن است در تمام ارتفاع های دهانه آزاد اتفاق افتد)، حالت گوه ای (ممکن است در دهانه های آزاد بالاتر از عمق بحرانی H_{cr} اتفاق افتد). عمق بحرانی بستگی به نوع ابزار تور ماهیگیری دارد. راهنمای DNV-RP-F111 مقدار زیر را برای قسمت های اصلی تور ماهیگیری ارائه می دهد:

$$H_{cr} = 0.35 \times H_B \qquad (۹)$$

که در آن H_B ارتفاع قسمت اصلی تور ماهیگیری می باشد. معیار پذیرش قلاب کردن در ارتباط با مقاومت لوله نسبت به کمانش موضعی در زمانی است که خط لوله از بستر دریا تا ارتفاع ماکزیممی برابر با H_1 بالا آورده می شود و در نتیجه آن، قسمت اصلی تور ماهیگیری بریده و رها می شود. در این حالت می توان پاسخ را با استفاده از تحلیلی استاتیکی محاسبه کرد که درآن حداکثر ارتفاع بالا رفتن به عنوان تغییر شکل معین شده، اعمال می شود. ارتفاع بالا رفتن H_1 بستگی به حالت قلاب شدن دارد و راهنمای DNV-RP-F111 مقادیر زیر را برای آن ارائه می دهد:

نفوذ جزئی

$$H_1 = 0.35 \times H_B - 0.3 \times \mathrm{D} \qquad (۱۰)$$

حالت گوه ای

$$H_1 = 0.5 \times H_B \qquad (۱۱)$$

اما در اکثر موارد این نیروهای کششی بیش از اندازه بوده و ارتفاع مجاز دهانه را محدود خواهد کرد. بنابراین مسأله مورد بررسی اعم از اینکه ابزار موضعی تور ماهیگیری موجود به اندازه ای باشد که سبب قلاب شدن شود که در آن صورت مجاز است که تحلیل کشش بیش از اندازه مورد بررسی قرار گیرد.

انحراف از گرد اولیه [۱۵و۱۶و۱۷و۱۹].

$$f_{0\cdot} = \frac{Dmax - Dmin}{D} \qquad (۱۲)$$

در این رابطه D قطر متوسط لوله، D_{max} و D_{min} به ترتیب قطر حداکثر و قطر حداقل لولهٔ بیضی شده می باشند.

۳- مدلسازی مسئله به روش اجزاء محدود

۳-۱- مدلسازی لوله

برای انجام این تحلیل دو نوع لوله ۳۲اینچ و لوله ۴ اینچ مدلسازی گردیدند. برای شبیه سازی لوله۳۲ اینچ از روش مدلسازی حجمی سه بعدی (3D) و برای لوله ۴ اینچ از روش مدلسازی پوسته ای (Shell) از نوع انعطاف پذیر انتخاب شده است. مشخصات، ابعاد و اندازه لوله ها مطابق با لوله های انتقال گاز استفاده شده در خلیج فارس می باشد. برای مصالح لوله رفتاری الاستیک - پلاستیک منطبق با مدل ون مایسز در نظر گرفته شد. برای شبیه سازی پاسخ لوله، رفتار غیر خطی ساختار لوله لحاظ شده است. لوله۳۲ اینچ بوسیله المان حجمی (C3D8R) و لوله ۴ اینچ با استفاده از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]

المان پوسته ای چهار گرهی (S4R) با نقاط انتگرال گیری کاهش یافته مدل سازی شده اند. ابعاد و مشخصات مکانیکی مربوط به لوله ۳۲ اینچ استفاده شده که از استاندارد API 5L استخراج شده و جنس آن X-65 می باشد در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول۱ - مشخصات فیزیکی لوله ۳۲ اینچ

مشخصه	مقدار
جنس لوله	APL 5L
قطر خارجی [m]	۰/۸۱۲۸
ضخامت دیواره [m]	۰/۰۲۰۶
طول [m]	۱۲۰

جدول۲- مشخصات مکانیکی لوله X-65

مشخصه	مقدار
چگالی [Kg/m^3]	۷۸۵۰
مدول الاستیسیته [Gpa]	۲۱۰
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم [Mpa]	۴۵۰
تنش کششی نهائی [Mpa]	۵۳۵

به منظور مدلسازی لوله ۴ اینچ با توجه به اطلاعات پروژه مربوطه، جنس این لوله از نوع X-52 API ابعاد و مشخصات مکانیکی مربوط به آن که از استاندارد API 5L استخراج شده و در جداول ۳و ۴ آورده شده است.

جدول۳- مشخصات فیزیکی لوله ۴ اینچ

مشخصه	مقدار
جنس لوله	APL 5L
قطر خارجی [m]	۰/۱۱۴۳
ضخامت دیواره [m]	۰/۰۰۶۴
طول [m]	۱۲۰

جدول۴- مشخصات مکانیکی لوله X-52

مشخصه	مقدار
چگالی [Kg/m^3]	۷۸۵۰
مدول الاستیسیته [Gpa]	۲۱۰
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم [Mpa]	۳۵۸
تنش کششی نهائی [Mpa]	۴۵۰

۳-۲- مدلسازی بتن مسلح

خط لوله های دریایی بعضاً دارای پوشش بتنی می باشند. این پوشش به منظور حفظ تعادل لوله بر روی بستر دریا در مقابل جریان و همچنین نیروهای وارد بر خط لوله می باشد و در عمل نیز هیچ ظرفیتی برای پوشش بتنی خطوط لوله در نظر گرفته نمی شود. پوشش بتنی به دلیل وارد شدن نیروهای مختلف از جمله در زمان نصب، مسلح است. به منظور اعمال تاثیر اثر وزن بتن، اصطکاک بتن با بستر دریا همچنین اثر وجود آرماتور در بتن و تاثیر آن در پاسخ لوله تحت نبروی وارده، پوشش بتن مسلح لوله بصورت دقیق و مطابق مدل موجود، مدلسازی گردید. چگالی بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت آن ۵۰ میلیمتر می باشد. مشخصات مربوط به میلگردها نیز مطابق مشخصات میلگردهای فولادی معمولی و با قطر ۸ میلیمتر مدلسازی گردید. فواصل قرار گیری میلگردها از هم و قطر آنها با توجه مدل واقعی موجود درخلیج فارس شبیه سازی گردیده است.

۳-۳- مدلسازی بستر دریا

در این تحقیق، بستر خاکی انعطاف پذیر برای لوله منظور شده است. بستر خاکی توسط المان های پیوسته حجمی سه بعدی مدلسازی شده است. برای در نظر گرفتن رفتار غیر خطی خاک از معیار موهر-کولمب استفاده گردیده است. پارامترهای فیزیکی خاک، از اطلاعات مربوط به خاک بستر دریا مربوط به یکی از خط لوله های نصب شده در خلیج فارس که با استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد SPT بدست آمده بودند، استخراج گردید. عمق خاک برابر ۶ متر و پهنای آن در راستای عمود بر لوله متجاوز از ۱۵ برابر قطر لوله لحاظ شد. در دو طرف محل اعمال نیرو نسبت ابعاد المان لوله و بتن نسبت به خاک یک به سه در نظر گرفته شده است. برای آرماتورها نیز از المان بیم سه بعدی استفاده شده و اندازه المان ها برابر اندازه المان های لوله در نظر گرفته شد. در قسمت دو انتها مدل خاک و لوله اندازه المان بزرگتر در نظر گرفته شد. مشخصات لایه های خاک در محل مورد نظر بر اساس تست انجام شده در جدول۵ آمده است.

جدول۵- مشخصات مصالح بستر خاکی

	مشخصه	مقدار
لایه اول (۰ - ۴)	چگالی [Kg/m3]	۱۹۰۰
	مدول الاستیسیته [Gpa]	۳۲/۵
	ضریب پواسون	۰/۳۷۵
	مقاومت چسبندگی [Kpa]	۱۱۰
	زاویه اصطکاک داخلی [Degree]	۱
	زاویه اصطکاک داخلی [Degree]	۰
لایه دوم (۴ - ۸)	چگالی [Kg/m3]	۱۹۵۰
	مدول الاستیسیته [Gpa]	۳۸/۵
	ضریب پواسون	۰/۳۷۵
	مقاومت چسبندگی [Kpa]	۱۸۵
	زاویه اصطکاک داخلی [Degree]	۱
	زاویه اتساع [Degree]	۰

به منظور تعریف اندرکنش بین بتن و خاک، از قید تماسی استفاده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]

گردید. این قید از عبور کردن خاک و بتن در یکدیگر جلوگیری می کند و به وسیله آن می توان تغییر شکل لوله (نشست لوله در اثر وزن) که حاصل تماس بتن با خاک می باشد را به خوبی مشاهده نمود. زاویه اصطکاک بین لوله و خاک با توجه به شرایط و اطلاعات موجود از منطقه مورد نظر ۰,۵ در نظر گرفته شد.

این تحقیق بحرانی ترین حالت خط لوله را مورد بحث قرار می دهد، یعنی زمانی که خط لوله به تازگی نصب شده، هنوز در اثر رسوبات در قسمتهایی از مسیر دفن نشده همچنین هنوز عملیاتی نشده و خالی از سیال و فشار داخلی می باشد.

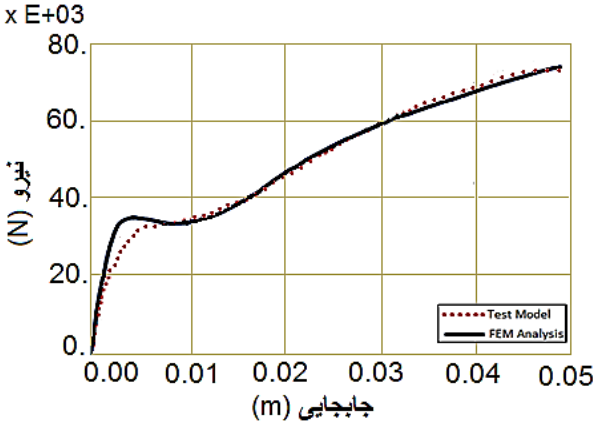
۴- مقایسه مدل عددی و مطالعات آزمایشگاهی

به منظور صحت سنجی مدلسازی عددی، نتایج با یک نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده اند [۱۴]. این آزمایش با هدف بررسی تاثیر ضخامت لوله ها در برابر آسیب های خارجی انجام شده است [۱۴]. خواص و ابعاد سنبه مشابه این تحقیق بوده و براساس DNV-RP-F111 مدلسازی شده می باشد، لوله بر روی زمین صلب و مسطح قرار داشته و به صورت دو سر آزاد مدلسازی شده است. فشار داخلی نیز صفر می باشد. کلیه جزئیات مدلسازی و تحلیلی مشابه تحقیق حاضر می باشد. مشخصات لوله در جدول۶ آورده شده است.

جدول۶- مشخصات لوله مورد آزمایش [۱۴]

مشخصه	مقدار
جنس لوله	APL 5L
قطر خارجی $[m]$	۰/۱۶۵
ضخامت دیواره $[m]$	۰/۰۰۴۸۲
طول $[m]$	۲

پس از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و خروجی حاصل از مدلسازی عددی مشاهده شد که نتایج اختلاف کمی نسبت به هم دارند. این اختلاف در جابجایی های کمتر بیشتر بوده و لی در جابجایی های بزرگتر این اختلاف بسیار کم می شود. البته تفاوت های اندکی در تخمین مقاومت قرشدگی بین دو مدل خصوصاً در مقادیر کوچک جابجایی وجود دارند که می توانند به تأثیراتی چون وجود سخت شدگی کرنشی مرتبط باشد [۱۱]. می توان نتیجه گرفت که برای جابجایی های بزرگ این روش تخمین بسیار دقیقی از پاسخ لوله در اثر نیروی وارده به دست می دهد.



شکل۳- نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی

۵- تحلیل عددی کشش خط لوله ۴ اینچ توسط لنگر کشتی یا تور ماهیگیری

در ابتدا خط لوله ۴ اینچ تحت اثر نیرو قرار می گیرد. نیرو با توجه به توان وینچ های لنگر موجود در کشتی های ماهیگیری و یدکش های موجود در خلیج فارس اعمال گردیدند و با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص شد وینچ هایی که بطور معمول در قایق های ماهیگیری کوچک نصب شده اند، تناژی بالای ۵ تن دارند، کشتی های ماهیگیری بزرگ دارای وینچ های قوی بوده و از نیرویی فراتر از ۴۰ تن برخوردار هستند. لنگرها از لحاظ شکل ظاهری متفاوت می باشند ولی از لحاظ ظاهری با لنگری به نام Four Fluke Anchor مطابقت دارند (شکل۴). از آنجایی که مرجعی جهت مدلسازی این نوع انتقال نیرو از لنگر به خط لوله وجود ندارد، لذا با توجه به شکل سطح مقطع لنگر، برای اعمال نیرو بصورت بحرانی، محل اعمال نیرو به لوله بصورت خطی و مقطعی از محیط لوله در نظر گرفت شد.

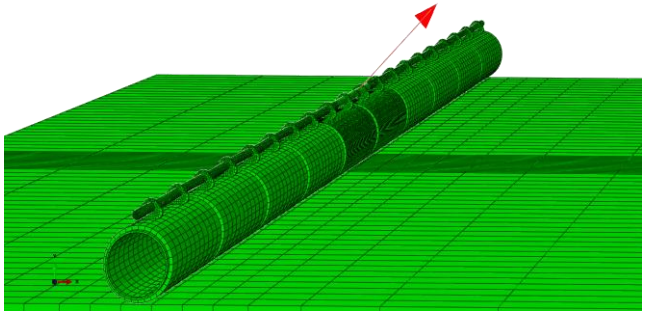
شکل۴- Four Fluke Anchor [۲۱]

خط لوله ۴ اینچ بوسیله تکیه گاه های لاستیکی بر روی خط لوله ۳۲ اینچ نصب می گردند، بدین جهت، تکیه گاه ها براساس مشخصات لاستیک استفاده شده در پروژه مدلسازی شدند و مطابق با فواصل مشخص شده در مدارک طراحی خط لوله بر روی خط لوله ۳۲ اینچ قرار داده شدند. این فاصله برای خط لوله مورد نظر ۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]

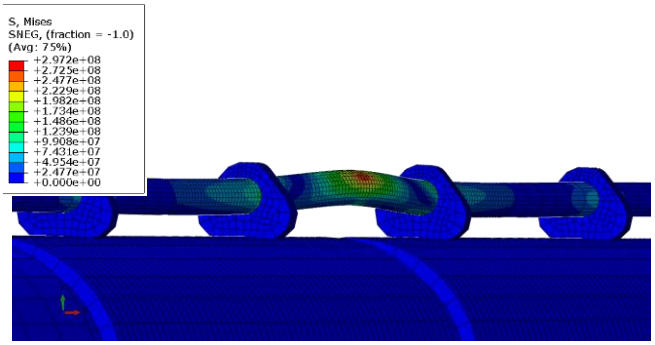
متر می باشد. لازم به ذکر است با توجه به شرایط تکیه گاه ها در تحلیل، از بررسی تنش در آنها صرفنظر شد. این تکیه گاه ها پس از نصب خط لوله ۴ اینچ، توسط تسمه هایی با مقاومت کششی و خوردگی بالا در موقعیت خود تثبیت می گردند. جهت اعمال مقاومت این تسمه ها به دلیل اینکه مدلسازی سه بعدی و اعمال شرایط واقعی آنها با توجه به تعداد زیاد آنها بسیار مشکل می باشد و باعث حجیم شدن مدل می شد، لذا بجای مدلسازی، مقاومت کششی آنها بصورت نیروی فشاری اعمال گردید. دراین تحقیق این مقدار برابر ۵۰۰ مگاپاسکال است. برای تحلیل خط لوله ۴ اینچ دو حالت در نظر گرفته شد. در حالت اول لوله در اثر نیرو وارد محدوده پلاستیک نمی شود و مقاومت آن بر نیروی لنگر غلبه می کند، در حالت دوم نیروی وارد شده از طرف لنگر از مقاومت لوله بیشتر بوده و باعث وارد شدن لوله به محدوده پلاستیک می گردد:



شکل۵-خط لوله ۳۲ اینچ و ۴ اینچ بر روی بستردریا به همراه راستای نیرو

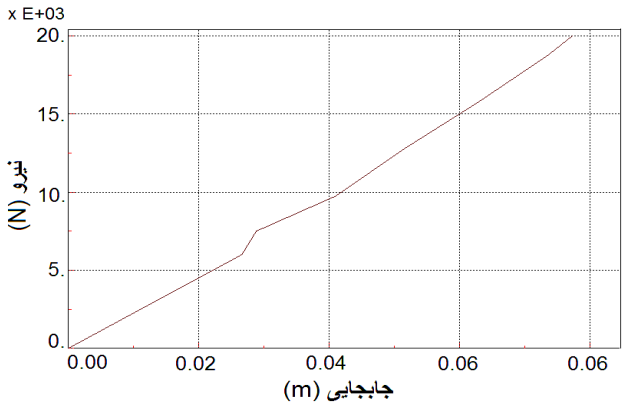
۵-۱- تحلیل خط لوله ۴ اینچ تحت اثر نیروی ۲ تنی

برای حالت اول نیرویی معادل ۲ تن به خط لوله وارد شده و فرض می گردد که لنگر به خط لوله ۴ اینچ گیر کرده و تحت زاویه ۴۵ درجه به خط لوله نیروی کششی وارد می کند.



شکل۶- تنش وارده به خط لوله در اثر اعمال نیروی ۲ تن

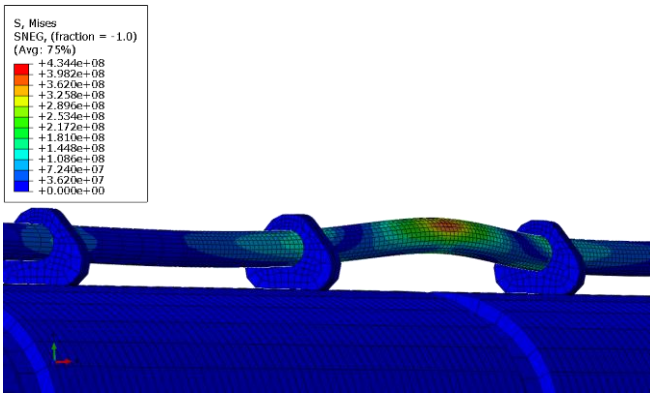
مشاهد شد پس از اعمال نیروی ۲ تن، تنش وارد شده ۲۹۷ مگاپاسکال می شود که در محدوده مجاز قرار دارد. نمودار نیرو - جابجایی در شکل ۶ نشان داده شده است.



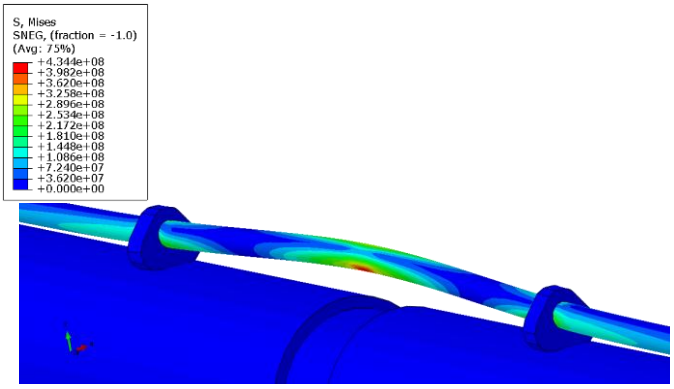
شکل۷- نمودار نیرو – جابجایی در اثر اعمال نیروی ۲ تن

۵-۲- تحلیل خط لوله ۴ اینچ تحت اثر نیروی ۳ تن

برای حالت دوم نیروی ۳ تنی به خط لوله وارد شد. فرضیات مانند حالت نیروی ۲ می باشد.



شکل۸- تنش وارده به خط لوله در اثراعمال نیروی ۳ تنی

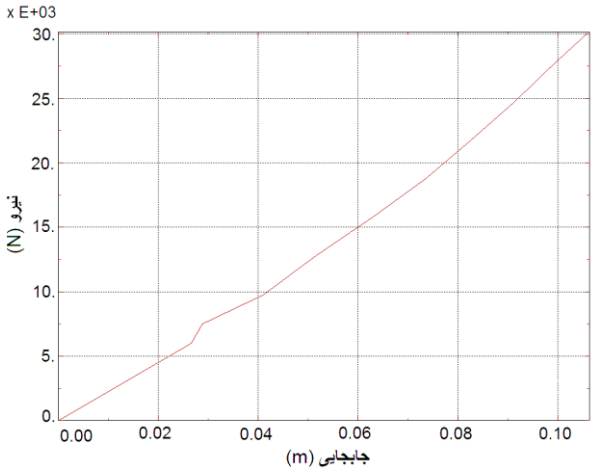


شکل۹- تنش وارده به خط لوله در اثر اعمال نیروی ۳ تن

مشاهد شد که پس از اعمال نیروی ۳ تن، تنش وارد شده به خط لوله از مقدار تنش تسلیم لوله ۴ اینچ بیشتر شد و لوله وارد محدوده غیر خطی می گردد. نمودار نیرو - جابجایی در شکل ۹ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

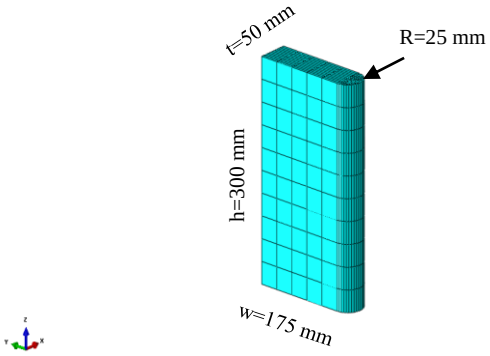
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]



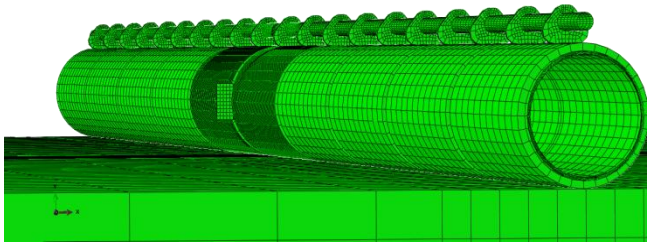
شکل۱۰- نمودار نیرو – جابجایی در اثر اعمال نیروی ۳ تن

۶- آنالیز عددی کشش خط لوله ۳۲ اینچ توسط لنگر کشتی یا تور ماهیگیری

برای اعمال نیرو به خط لوله ۳۲ اینچ از آیین نامه RP-F-111 DNV استفاده گردید، برای شبیه سازی شرایط مرزی پس از بررسی حالات مختلف مشخص شد در حالتیکه لوله دو سر گیر دار باشد پاسخ ها به واقعیت نزدیک تر می شوند. برای اعمال نیرو فرض شد که تور ماهیگیری از نوع دوم که دارای ساختار جفتی بوده و شامل یک وزنه سنگین مرکزی می باشد، به خط لوله برخورد کرده و لوله را تحت کشش قرار می دهد، وزن آن مطابق استاندارد [۱۸] ۹۰۰۰ کیلوگرم می باشد. به منظور مدلسازی اعمال نیرو که بصورت افقی به لوله وارد می شود، آئین نامه دو نوع سنبه معرفی می کند، نوع اول گرد و نوع دوم سنبه با گردی کمتر می باشد، لذا به منظور اعمال نیروی بیشتر در این تحقیق از سنبه نوع اول استفاده گردید. ابعاد سنبه نیز مطابق آئین نامه بوده و المان آن از نوع صلب است. همچنین به منظور بررسی حالت بحرانی تر، خط لوله بدون فشار عملیات و بدون سیال در نظر فرض شد. محل اعمال نیرو، در محل جوش که فاقد پوشش بتن می باشد در نظر گرفته شد. در مرحله اول، خط لوله تحت اثر وزن خود بر روی بستر قرار داده شد و نیروی وزن به صورت استاتیکی اعمال گردید تا مطابق با شرایط واقعی، خط لوله در خاک بستر نفوذ کند و تعادل استاتیکی بین خاک و خط لوله برقرار شود. سپس در مرحله بعد نیرو توسط سنبه اعمال گردید. مدل سه بعدی سنبه در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل۱۱- مدل سنبه مطابق با آئین نامهDNV-RP F-111

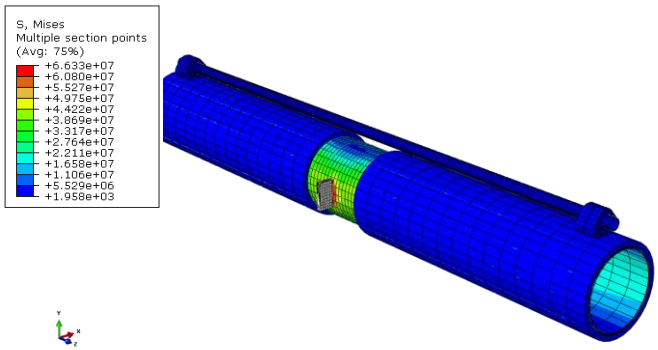


شکل۱۲- مدلسازی خط لوله ۳۲ اینچ و ۴ اینچ بر روی بستر دریا

براساس تحقیقات میدانی برای اعمال نیرو سه مقدار در نظر گرفته شد: ۱۰ تن برای قایق های ماهیگیری کوچک در خلیج فارس، ۳۰ تن برای کشتی های ماهیگیری معمولی و پس از آن افزایش نیرو تا جائیکه باعث تخریب لوله گردد.

۶-۱- آنالیز لوله ۳۲ اینچ تحت اثر نیروی ۱۰ تنی

برای حالت اول نیروی ۱۰ تنی به سنبه وارد می گردد، جهت نیرو نیز افقی و راستای آن عمود بر راستای خط لوله می باشد.

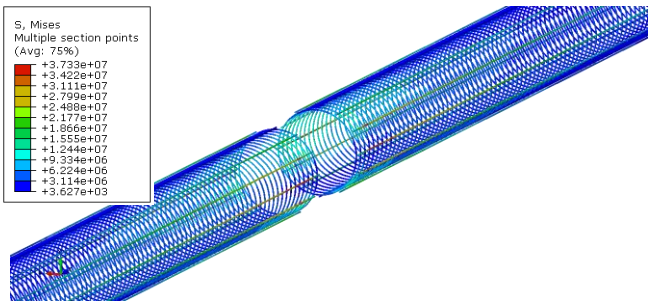


شکل۱۳- تنش وارده به خط لوله در اثر اعمال نیروی ۱۰ تن

مشاهد شد پس از اعمال نیرو، تنش وارد شده به خط لوله تقریباً ۶۷ مگاپاسکال می باشد که در محدوده مجاز قرار می گیرد. تنش وارده به میلگردها مطابق شکل ۱۳، ۳۷ مگا پاسکال بدست آمد که آن نیزدر محدوده مجاز قرار دارد.

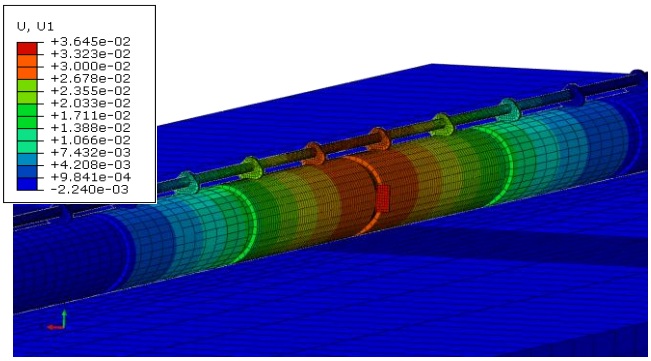
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]



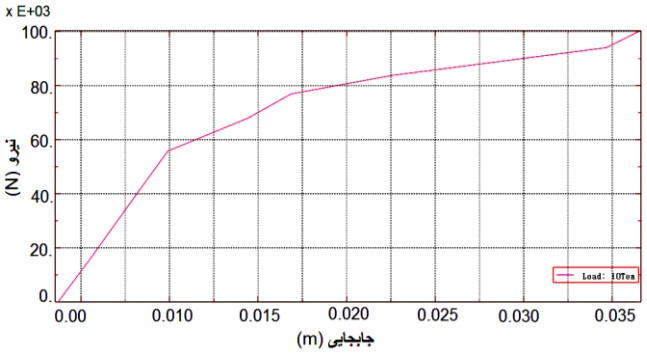
شکل۱۴- تنش وارده به میلگردها در اثر اعمال نیروی ۱۰ تنی

جابجایی عرضی خط لوله در اثر نیروی ۱۰ تنی نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل۱۵- جابجایی خط لوله در اثر اعمال نیروی ۱۰ تنی

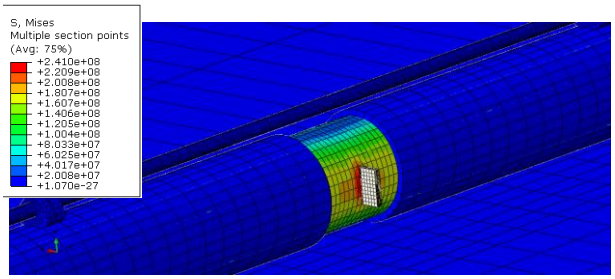
نمودار نیرو - جابجایی در شکل۱۵ نشان داده شده است.



شکل۱۶- نمودار نیرو – جابجایی در اثر اعمال نیروی ۲ تن

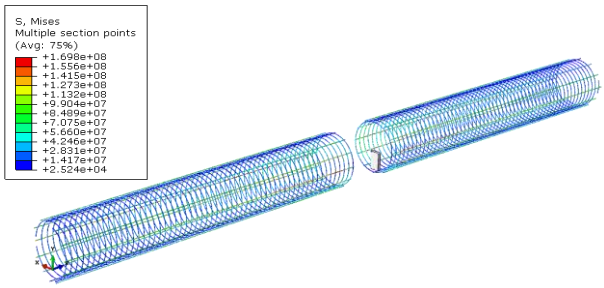
۶-۲- تحلیل خط لوله ۳۲ اینچ تحت اثر نیروی ۳۰ تنی

برای حالت دوم نیروی ۳۰ تن به سنبه وارد گردید، جهت نیرو نیز افقی و راستای آن عمود بر راستای خط لوله می باشد.



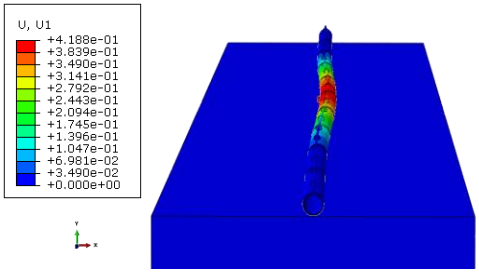
شکل۱۷- تنش وارده به خط لوله در اثر اعمال نیروی ۳۰ تنی

مشاهد شد پس از اعمال نیرو، تنش وارد شده به خط لوله ۲۴۱ مگاپاسکال است که در محدوده مجاز قرار دارد. تنش وارده به میلگردها نیز در شکل۱۷ نشان داده شده و مقدار آن ۱۷۰ مگاپاسکال بدست آمد که آن نیز در محدوده مجاز قرار می گیرد.



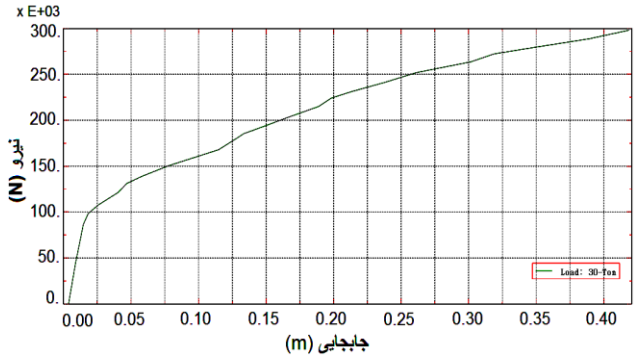
شکل۱۸- تنش وارده به میلگردها در اثر اعمال نیروی ۳۰ تنی

جابجایی عرضی خط لوله در اثر نیروی ۳۰ تن نیز در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل۱۹- جابجایی خط لوله در اثر اعمال نیروی ۳۰ تن

نمودار نیرو بر حسب جابجایی در شکل زیر نشان داده شده است.



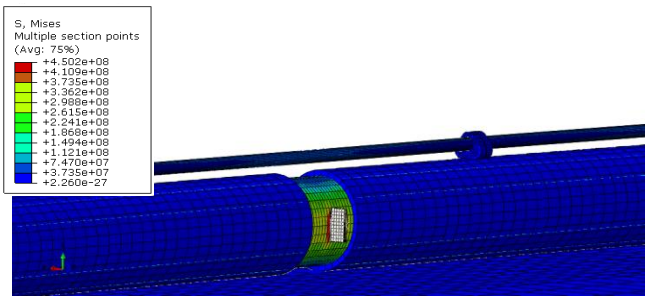
شکل۲۰- نمودار نیرو – جابجایی در اثر اعمال نیروی ۳۰ تن

۶-۳- تحلیل خط لوله ۳۲ اینچ تحت اثر نیروی مخرب

برای اینکه مشخص شود مقاومت لوله در برابر نیرو به چه میزان است، باید نیرو را تا جاییکه تنش بوجود آمده در لوله از تنش تسلیم آن فراتر رود. بدین منظور خط لوله چندین بار تحت نیرو با شدت های مختلف قرار گرفت و در نهایت تحت اثر نیروی ۶۰ تن، تنش وارد از تنش تسلیم لوله فراتر رفت. تنش بدست در شکل ۲۰ عدد ۴۵۰,۲ را نشان می دهد که بیانگر تخریب لوله می باشد.

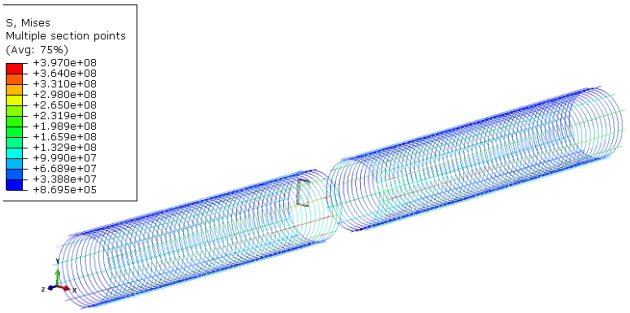
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]



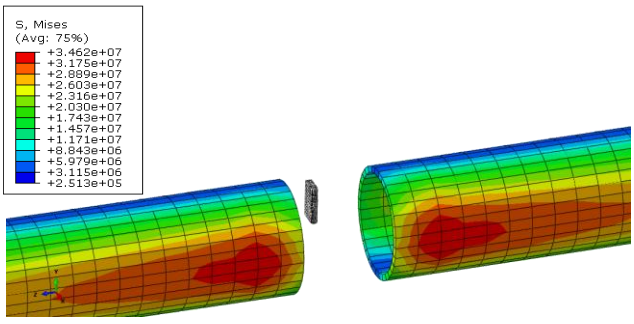
شکل۲۱- تنش وارده به خط لوله در اثر اعمال نیروی ۶۰ تن

تنش وارده به میلگردها نیز در شکل ۲۱ نشان داده شده است و مقدار آن ۴۰۰ مگاپاسکال می باشد که نشان می دهد تنش وارده به میلگردها نیز وارد محدوده پلاستیک قرار دارد.



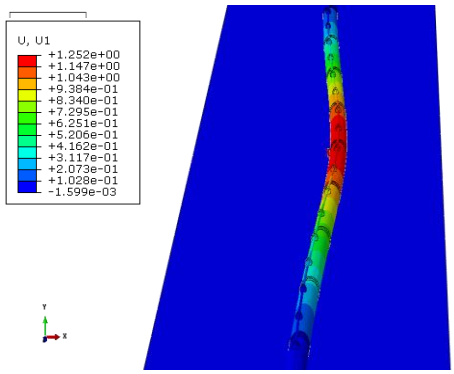
شکل۲۲- تنش وارده به میلگردها در اثر اعمال نیروی ۶۰ تن

پس از اینکه میلگردها وارد محدوده پلاستیک شدند، بررسی تنش وارد شده به بتن نیز مشخص نمود، تنش اعمالی برابر ۳۵ مگاپاسکال است، براساس آیین نامه ACI تنش فشاری مجاز برای بتن ۰٫۴۵× تنش مجاز (۴۰ مگاپاسکال) می باشد. در نتیجه تنش وارد شده به بتن نیز در محدوده غیر مجاز قرار دارد (شکل ۲۲).



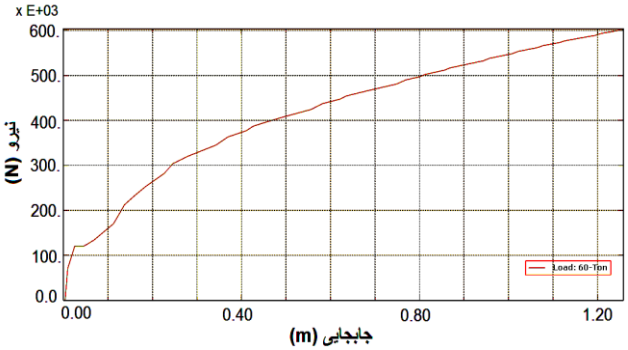
شکل۲۳-تنش وارده به به عایق بتن در اثر اعمال نیروی ۶۰ تن

جابجایی عرضی خط لوله در اثر نیروی ۳۰ تن نیز در شکل ۲۴ نشان داده شده است.



شکل۲۴-جابجایی خط لوله در اثر اعمال نیروی ۶۰ تن

نمودار نیرو - جابجایی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل۲۵-نمودار نیرو – جابجایی در اثر اعمال نیروی ۶۰ تن

نتیجه گیری

باتوجه به تحلیل های انجام شده مشخص می شود که خط لوله ۴ اینچ بسیار در برابر وارد شدن نیروهای جانبی حساس بوده و تنها در مقابل نیروهای جزئی می تواند از خود مقاومت نشان دهند که در چنین حالتی نیز به دلیل نداشتن پوشش بتنی، عایق ضد خوردگی لوله آسیب خواهد دید و در اینصورت هم خط لوله به سرعت دچار خوردگی شده و عمر آن کاهش چشمگیری خواهد یافت. لذا می توان نتیجه گرفت که خط لوله ۴ اینچ در صورت برخورد یا گیرکردن لنگر یا تور قایق های ماهیگیری موجود در خلیج فارس به احتمال زیاد آسیب جدی خواهد دید که با در نظر گرفتن این موضوع که این خطوط لوله در هنگام عملیات تحت فشار بسیار بالایی قرار دارند، در صورتیکه براساس استاندارد DNV-OS-F101 [۱۹] تنش وارد شده به لوله تحت اثر نیروی وارده از ۰٫۷۵ تنش تسلیم فراتر رود، خط لوله نیاز به تعمیر یا بازسازی خواهد داشت.

خط لوله ۳۲ اینچ بعلت داشتن ابعاد و وزن زیاد همچنین پوشش بتنی، در مقابل ضربات و نیروهای ناشی از لنگر و تور قایق های ماهیگیری موجود در خلیج فارس مقاومت خوبی داشته و آسیب جدی نخواهد دید ولی اثرات جابجایی آنها باید مورد بررسی بیشتر قرار گیرد، البته این خط لوله در مقابل نیروی ناشی از لنگر کشتی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]

های بزرگ، شناورهای لنگری که مخصوص نصب سازه های دریایی سنگین هستند و همچنین شناورهای لوله گذاری که با سیستم لنگری کار می کنند، آسیب پذیر خواهد بود.

در این تحقیق شرایط بستر دریا برای قسمت هایی که خاک انعطاف پذیر است بررسی شده است. لذا پاسخ خط لوله برای قسمت های که بستر دریا صخره ای است و یا خاک محل خیلی نرم می باشد، تفاوت خواهد داشت.

برای قسمت های از خط لوله که در خاک مدفون می باشند، بعلت وجود مقاومت جانبی خاک، جابجایی کمتر خواهد بود و نیروی موضعی وارد شده به لوله افزایش خواهد داشت.

۷- مراجع

1- RH, Burton, JM, Craig , (1963), *An investigation into the energy absorbing properties of metal tubes loaded in the transverse direction*, B.Sc. (Eng.) Report, University of Bristol, Bristol, U.K.

2- E.Mollestad , P. Bergan, (1982), *Nonlinear dynamic analysis of submerged pipelines*, Computer methods in applied mechanics and engineering 34, 881-892.

3- SR, Reid, TY, Reddy, (1978), *Effects of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates*, International Journal of Solids and Structures,14:213–25.

4- SR. Reid, WW. Bell, (1982), *Influence of strain hardening on the deformation of thin rings subjected to opposed concentrated loads*, International Journal of Solids and Structures,18.643–58.

5- H. O Zeitoun, K. Tørnes, J. Li, S. Wong, R. Brevet, J. Willcocks, (2009), *Advanced dynamic stability analysis*, Offshore and Arctic Engineering OMAE-79778.

6- I. Chatjigeorgiou, (2013), *Second-order nonlinear dynamics of catenary pipelines: A frequency domain approach*, Computers and Structures 123–1–14.

7- J. Xue, (2006), *A non-linear finite-element analysis of buckle propagation in subsea corroded pipelines*, Finite Elements in Analysis and Design, 42–1211 – 1219.

8- J. Xue , M. Hoo Fatt, (2001), *Buckle propagation in pipelines with non-uniform thickness*, Ocean Engineering 28–1383–1392.

9- R. Ramasamy, T.M.Y.S. Tuan Ya, (2014) , *Nonlinear finite element analysis of collapse and post-collapse behaviour in dented submarine pipelines*, Applied Ocean. Research 46–116–123.

10-MS. Hoo Fatt, T. Wierzbicki, (1991), Denting analysis of ring stiffened cylindrical shells, In, Proceedings of the 1st European offshore mechanics symposium, Trondheim, Norway p. 153e63.

11-M. Zeinoddini, H. Arabzadeh, M. Ezzati, G.A.R. Parke, (2013), Response of submarine pipelines to impacts from dropped objects: Bed flexibility effects, International Journal of Impact Engineering, 62–129e141.

12-H. Arabzadeh, M. Zeinoddini, (2011) "Dynamic Response of Pressurized Submarine Pipelines Subjected To Transverse Impact Loads, Procedia Engineering, 14–648–655.

13-D.J. Whitea, C.Y. Cheukb, (2008), Modelling the soil resistance on seabed pipelines during large cycles of lateral movement, Marine Structures, 21–59–79.

14-SA, Karamanos, C, Eleftheriadis, (2004) ,Collapse of pressurized elastoplastic tubular members under lateral loads, International Journal of Mechanical Sciences, 46(1):35–56.

15-BS 8010, Code of Practice for Pipelines (2002), Part 3 Pipelines Subsea, Design, Construction and Installation, British Standards Institution, UK.

16-ABS, (2006), Guide for Building and Classing Subsea Pipeline Systems and Risers, American Bureau of Shipping, Houston.

17-API Recommended Practices 1111, (1999), Design, construction, operations and main-tenance of offshore hydrocarbon pipeline (limit state design).

18-DNV-RP-F111, (2010), Interference Between Trawl Gear And Pipelines.

19-Offshore Standards DNV-OS-F101, (2000), Submarine Pipeline Systems, Det Norske Veritas.

20-Abaqus Theory Manual version 6.13.

21- VARYHOF Anchors B.V, Fifth Edition (2015), The Guide To Anchoring, Global Maritime.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.2.9]