آنالیز حساسیت پاسخ دینامیکی ترمینال نفتی CALM تحت اثر پارامترهای عملیاتی مختلف در منطقه خلیج فارس

اسماعیل حسنوند[۱]، پدرام عدالت[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران، E.hasanvand@mnc.put.ac.ir
[۲] استادیار،گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران، Edalat@put.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹

کلمات کلیدی:
آنالیز حساسیت
ترمینال نفتی فراساحل
CALM
پاسخ دینامیکی
تحلیل مهاربندی

چکیده

در این مقاله به آنالیز حساسیت ترمینال CALM، تحت پارامترهای عملیاتی مختلف همچون عمق آب، وزن زنجیر، سرعت جریان، دوره تناوب موج، طول هاوسر و همچنین جابجایی ترمینال در جهت‌های مختلف و میزان تاثیر حضور تانکر برای بررسی رفتار رایزر (با پیکره‌بندی لیزی اس) در حین عملیات تخلیه/بارگیری پرداخته شده است. برای مدلسازی ابتدا مشخصه‌های پاسخ هیدرودینامیکی ترمینال و شناور تانکر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA 2018 محاسبه شده و سپس خروجی‌های به دست آمده به نرم افزار ORCAFLEX10 برای مدل‌سازی و سناریوهای عملیاتی محتمل و مطالعه پاسخ اندرکنشی ترمینال، تانکر، خطوط مهاربندی و شرایط محیطی منتقل می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی ترمینال نسبت به تغییرات سرعت جریان بیشترین حساسیت را از خود نشان می‌دهد. همچنین نتیجه می‌شود برای رایزر، هنگام جابجایی ترمینال در جهت نزدیک شدن به محل اتصال رایزر به بستر دریا (PLEM)، کشش ایجاد شده؛ و برای جابجایی ترمینال در جهت دور شدن از PLEM، لنگر خمشی؛ حالت‌های بحرانی را شامل می‌شوند. لنگر خمشی در ابتدای رایزر و کشش موثر در انتهای رایزر بیشترین تاثیر را از مود عملیاتی اندرکنشی میان تانکر و ترمینال، می‌پذیرند.

Sensitivity Analysis of the Dynamic Response of CALM Oil Terminal, in The Persian Gulf Region Under Different Operation Parameters

Esmaeil Hasanvand[1], Pedram Edalat[2*]

[1] M.Sc. Offshore Structure Engineering Department, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran; E.hasanvand@mnc.put.ac.ir
[2] Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Petroleum University of Technology, Abadan; Edalat@put.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 04 Feb. 2020
Accepted: 19 Sep. 2020

Keywords:
Sensitivity Analysis
Offshore oil terminal
CALM
Dynamic response
Mooring analysis

ABSTRACT

This paper analyzes CALM terminal sensitivity under various operating parameters such as water depth, chain mass, current velocity, wave period, hawser length as well as terminal displacement in different directions, and the impact of tanker presence on the behavior of the riser (lazy S) during unloading/loading operations. The hydrodynamic response characteristics of the tanker and CALM buoy are calculated using ANSYS-AQWA software and the outputs are imported in OracleFlex software for simulation of the probable operating scenarios considering the terminal, tanker, mooring lines and Environmental conditions. The results indicate that the terminal dynamic response is most sensitive to the current velocity changes. It is also concluded that for the riser, when Near offset, an effective tension and for far offset, the bending moment includes critical states. The bending moment at the hang-off the riser and the effective tension at PLEM receive the most impact from the interactive mode of operation between the tanker and the terminal.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

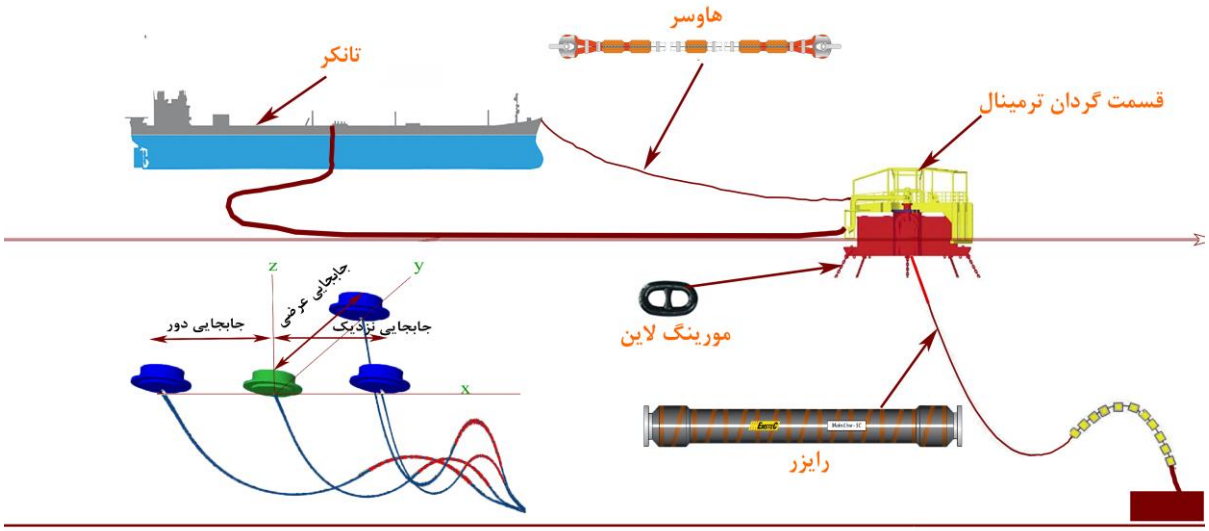
۱ – مقدمه

صادرات فراورده‌های نفتی از دو طریق خطوط لوله انتقال تا پایانه صادراتی و انتقال از طریق ترمینال‌های نفتی به نفتکش‌ها امکانپذیر است. ترمینال‌های نفتی در دو نوع ساحلی و فراساحلی از جمله متداولترین نوع انتقال در صادرات فراورده‌های نفتی می‌باشند. امروزه با توجه به هزینه‌های قابل توجه احداث و نگهداشت پایانه‌های صادراتی ساحلی از جمله لایروبی از یکسو و تهدیدات ناشی از انجام عملیات تخلیه و بارگیری مواد نفتی در نزدیک تاسیسات ساحلی و بعضا مناطق صنعتی و مسکونی مجاور این پایانه‌ها از سوی دیگر، گرایش به استفاده از ترمینال‌های فراساحلی را بیشتر نموده است. از انواع متداول این ترمینال‌های فراساحل می‌توان به نوع CALM [۱] اشاره نمود.

از مهمترین قسمت‌های موثر بر پاسخ دینامیکی ترمینال نفتی CALM می‌توان از خطوط مهاربندی و رایزرها نام برد. خطوط مهاربندی موجب حفظ موقعیت ترمینال در یک شرایط ایمن از لحاظ جابجایی برای عملیات بارگیری تانکر می‌شود. در نتیجه طراحی این مهاربندها باید به گونه باشد که از یک طرف جابجایی افقی ترمینال را در یک محدوده مجاز کنترل نماید و از طرف دیگر کشش‌های ایجاد شده در خطوط مهاربندی در محدوده مجاز پیشنهادی آیین نامه طراحی باشد. رایزرها نیز که وظیفه انتقال فراورده‌های نفتی را از بستر دریا تا ترمینال بر عهده دارند، می‌بایست به‌گونه‌ای طراحی شوند که این انتقال را به صورت ایمن و با رعایت معیارهای آیین‌نامه ای فراهم آورند. بنابراین شناخت پارامترهای موثر و بررسی شدت تاثیر آن‌ها بر روی مهاربندها و رایزرها، اهمیت ویژه‌ای در مطالعه و طراحی ترمینال‌های فراساحل دارند.

اولین مدل از سازه CALM در سال ۱۹۵۹ مورد استفاده قرار گرفته شده است[1]. این سازه مطابق شکل(۱)، از پنج قسمت اصلی تشکیل می‌شوند، که شامل: شناور(بدنه شناور – قسمت گردان)، خطوط مهاربندی، سیستم انتقال فرآورده (رایزرها- شلنگ شناور)، سیستم اتصال تانکر به ترمینال شناور(هاوسر) و تجهیزات موجود در بستر دریا (خطوط لوله دریایی – PLEM) است.

هر کدام از خطوط مهاربندی با زاویه‌ای مشخص (به طور متداول ۶۰ درجه) از مهاربند قبلی قرار گرفته شده است. این سازه از دو قسمت شامل قسمت گردان بالا و قسمت ثابت پایین تشکیل شده است. تانکر بوسیله هاوسر به قسمت گردان ترمینال متصل می‌شود. قسمت گردان بالای این ترمینال امکان چرخش ۳۶۰ درجه‌ای به تانکر را می‌دهند که باعث می‌شود نیروی ایجاد شده در مهاربندها کاهش پیدا کند[2]. برای رایزر این ترمینال‌ها می‌توان از سه پیکره بندی فانوس چینی ، لیزی اس شکل و استیپ اس استفاده کرد [3]. که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند. جنس رایزرها از هوس انعطاف‌پذیر چند لایه‌ای غیر متصل به هم ، تشکیل می‌شود. ترمینال نفتی CALM از دو قسمت اصلی (بالا و پایین) تشکیل شده است، که قسمت بالا بوسیله یاتاقان به قسمت پایین متصل است و تانکر بوسیله هاوسر به این قسمت متصل می‌شود. قسمت پایین نیز به وسیله خطوط مهاربندی مهار می‌شود. سیستم یاتاقان باعث می‌شود قسمت بالا و پایین ترمینال امکان چرخش نسبت به هم را داشته باشند و از این طریق تانکر امکان جابجایی حول ترمینال را پیدا می‌کند. از این طریق نیروی ایجاد شده در مهاربند کاهش می یابد[2].

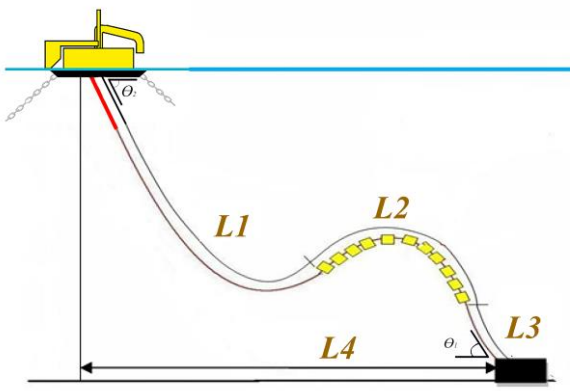


شکل۱. نمای شماتیکی از ترمینال نفتی CALM

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

خطوط مهاربندی که به عنوان سیستم نگهدارنده موقعیت این دسته از ترمینال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت متداول از جنس زنجیر[۱۲] ، سیم فولادی[۱۳] و یا کابل رشته‌ای[۱۴] بوده که بهینه‌ترین حالت ترکیبی از انواع جنس‌های ذکر شده است به این صورت که ابتدا و انتهای مهار از جنس زنجیر و قسمت میانی از جنس سیم و یا کابل رشته‌ای بوده، که باعث می‌شود هم وزن مهار کم شود و هم نیروی قائم وارد بر سازه کاهش یابد. به طور متداول مهاربند با جنس زنجیر بیشتر از سایر جنس‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته که در دو مدل با گل میخ و بدون گل میخ موجود است. مدل بدون گلمیخ برای سازه‌های دائمی و مدل گلمیخ برای سازه‌هایی که مدت کمی(مانند سازه های حفاری) مورد استفاده قرار می‌گیرند استفاده می‌شود که سنگین‌ترین نوع مهاربندی نیز می‌باشد. بعد از زنجیر، سیم فولادی بیشترین استفاده از آن شده که وزن کم و بیشترین انعطاف‌پذیری را دارد. حساسیت آن به خوردگی و سایش از نقاط ضعف این مهاربند می‌باشد. کابل رشته‌ای جدیدترین نوع مورینگ بوده که دارای انعطاف‌پذیری و مقاومت شکست کمتری نسبت به دو مدل قبلی می‌باشد که نقطه ضعف آن حساسیت این سازه نسبت به ضربه است.

رایزرها برای انتقال فراورده‌های نفتی از بستر دریا تا قسمت پایینی بخش شناور ترمینال مورد استفاده قرار می‌گیرند. این رایزرها لوله-های انعطاف‌پذیری هستند که از چند لایه مختلف تشکیل می‌شوند. به رایزرهای مورد استفاده در ترمینال‌های نفتی، اصطلاحاً هوس‌های زیر آب[۱۵] گفته می‌شود. لایه‌ها در این هوس‌ها بوسیله فرایند ولکانیزیشن[۱۶] به هم متصل می‌شوند و یک جنس واحد به وجود می‌آید که به آن لوله‌های پیوند خورده[۱۷] گفته می‌شود[3]. این دسته از رایزرها معمولا به شکل سه پیکره‌بندی شامل فانوس چینی، لیزی اس (شکل۲) و استیپ اس بوده که هر کدام از آن‌ها با توجه ملاحظات فنی و اقتصادی مورد نظر پروژه استفاده می‌شوند.



شکل۲. پیکره بندی لیزی اس

در یک دسته‌بندی کلی مطالعات و تحقیقات انجام شده در این حوزه به دو بخش خطوط مهاربندی و سیستم رایزر تقسیم می‌شوند.

هوانگ در سال ۱۹۹۷ رفتار دینامیکی سازه CALM را تحت بار موج، جریان و باد مورد مطالعه قرار داده است. معادلات غیرخطی خطوط مهاربندی با استفاده از عناصر کابل فرموله شده بر اساس اصل همیلتون تدوین می شود. این مطالعه نشان داد که دینامیک خطوط مهاربندی تاثیر زیادی روی کشش ایجاد شده در این خطوط و همچنین حرکت شناور دارد[4]. در سال ۲۰۰۱ اسماعیل‌زاده و گودرززاده به بررسی پایداری سازه CALM بدون اتصال به تانکر بر اساس مدل ریاضی پرداخته و میزان تاثیر هندسه سازه را بر روی پایداری این سازه بررسی نمودند. مدل ریاضی نشان می دهد که معادله حاکم بر حرکت برای سیستم یک معادله دیفرانسیل درجه دوم پارامتری غیر خطی است. [5]. در سال ۲۰۱۴ پچر و همکاران به بررسی دو نوع پیکره‌بندی خطوط مهاربندی شامل CALM و SALM[۲] متصل به مبدل انرژی موج بر اساس آنالیز شبه استاتیکی بر اساس روابط موجود برای سیستم مهاربندی پرداخته و تاثیری که سختی و اندازه خطوط مهاربندی روی جابجایی این سازه و همچنین تاثیری که روی نیروهای این خطوط مهاربندی دارد را مطالعه نمودند[6]. در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۷ ژی و همکاران به بررسی اسکرت[۳] (قسمت پایینی ترمینال) سازه CALM ، و همچنین امکان‌سنجی رایزر با پیکره‌بندی فانوس چینی [۴] با استفاده از نرم افزار ORCAFLEX پرداخته و نشان دادند که با افزایش قطر این بدنه جرم افزوده در جهت هیو و رول افزایش پیدا می‌کند که باعث می‌شود جابجایی سازه در جهت هیو کاهش پیدا کند. همچنین امکان‌پذیر بودن استفاده از این نوع پیکره‌بندی رایزر برای منطقه‌ای خاص از نصب این ترمینال مطالعه شده است[7]. در سال ۱۹۷۰ اولین مطالعات در مورد هوس[۵]های رایزرهای ترمینال نفتی CALM توسط زیکاردی[۶] و همکاران با استفاده از مدلهای آزمایشگاهی انجام گرفت. در این مطالعه دو مدل پیکره‌بندی رایزر شامل فانوس چینی و پیکره‌بندی لیزی اس[۷] مورد بررسی قرار گرفته بود[8]. ایکن در سال ۲۰۱۳ به مطالعه پیکره‌بندی مختلف هوس زیرآب (لیزی اس و کتنری[۸]) با قطر متفاوت با نرم افزار ارکافلکس می‌پردازد و نشان می‌دهد که چه معیارها وچالش‌های را باید برای طراحی این هوس‌ها انجام داد[9]. در سال۲۰۱۹ آماچی و همکاران مقاومت رایزر CALM با پیکره‌بندی فانوس چینی متصل به تانکر را تحت شرایط محیطی مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه برای آنالیز هیدرودینامیکی ساز CALM از نرم افزار ANSYS AQWA و برای آنالیز رایزر از نرم افزار ORCAFLEX کمک گرفته شده است. هدف از این مطالعه تعیین تاثیر پارامتر زاویه جریان[۹] روی رفتار سازه‌ای رایزر از قبیل انحنا، کشش موثر و لنگر خمشی ایجاد شده می‌باشد[10]. اندرکنش بین مهاربندها و رایزر در شناورها از پارامترهای مهمی می‌باشد که در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در این خصوص انجام شده است [13]–[11].

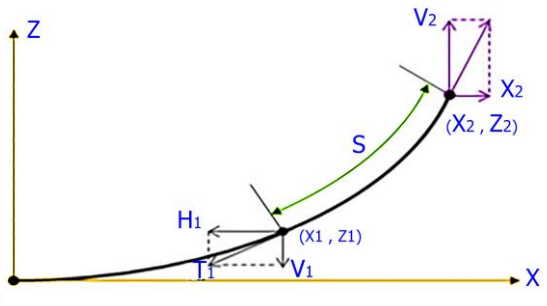
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

با توجه به مطالعات گذشته، تاکنون پاسخ ترمینال شناور تحت تاثیر تانکر و میزان تاثیر آن روی المانهای دیگر همچمون رایزر و سیستم مهاربندی انجام نگرفته است. کابل اتصال بین تانکر و ترمینال نیز از مهمترین المان ها هنگام عملیات می باشد که ایمنی آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این ترمینالهای بیشتر چالش ها و نیروها موجود در هنگام عملیات (در صورت وجود تانکر) ایجاد می شوند. سیستم مهاربندی و سیستم رایزر از مهمترین اجزای سازه‌ای ترمینال‌های نفتی فراساحل می‌باشد. در نتیجه شناسایی پارامترهای تاثیرگذار بر روی این اجزای سازه‌ای در فرآیند طراحی بسیار حائز اهمیت است. بنابراین در این مقاله پاسخ دینامیکی ترمینال نفتی CALM تحت تاثیر پارامترهای موثر در طراحی از قبیل عمق آب، وزن زنجیر، سرعت جریان، مشخصات موج و طول هاوسر[10] برای بررسی رفتار مهاربند و میزان جابجایی ترمینال تحت تاثیر متقابل تانکر برای بررسی رفتار رایزر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. معادلات حاکم بر مسئله

۲.۱ معادلات حاکم بر خطوط مهاربندی[14]

برای مهارهایی که مطابق شکل(۳) دارای شیب صفر در محل بستر دریا در تماس باشد، معادلات مهاربند در حالت کتنری در نظر گرفته می‌شود که در ادامه به بیان این روابط پرداخته خواهد شد.



شکل۳. پارامترهای موجود در مهاربند در حالت کتنری

نیروهای موجود در نقاط مختلف و تحت تنش‌های مختلف، با در نظر گرفتن الاستیسیته خطوط مهاربندی، از معادلات (۱ تا ۵) بدست می‌آیند. ابتدا، بار طراحی افقی (H_2) در شناور بر اساس رابطه (۱) و با توجه به سایر مشخصات سیستم محاسبه می‌شود.

$$H_2 = AE\sqrt{\left(\frac{T_2}{AE}+1\right)^2 - \frac{2WZ_2}{AE}} - A = H \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) H_2 بار طراحی افقی مهاربند در اتصال به شناور، AE سختی محوری مهاربند، W وزن مهار، T_2 کشش ایجاد شده در مهاربند در نقطه اتصال بالایی و Z_2 ارتفاع قائم نقطه اتصال مهاربند به شناور می باشد.

در ادامه، حداکثر نیروی عمودی و همچنین نیروی کششی برآیند در نقطه اتصال روی شناور طبق روابط (۲و ۳) می‌تواند محاسبه شود.

$$V_2 = WL \qquad (۲)$$

$$T_2 = \sqrt{H_2^2 + V_2^2} \qquad (۳)$$

در روابط (۲) و (۳) L طول مهار و V_2 برابر بار طراحی قائم در نقطه اتصال به شناور می‌باشد. با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه (۱) ، نیروی افقی به دست آمده به صورت رابطه (۴) باز نویسی می‌شود.

$$H_2 = \frac{V_2^2 - \left(WZ_2 - \frac{W^2\times L^2}{2\times AE}\right)^2}{2\left(WZ_2 - \frac{W^2\times L^2}{2\times AE}\right)} \qquad (۴)$$

همچنین طول فاصله افقی بین نقطه ابتدا و انتهای مهار X_2 را می‌توان طبق رابطه (۵) به دست آورد.

$$X_2 = \frac{H_2}{W}\,sinh^{-1}\left(\frac{wL}{H_2}\right) + \frac{H_2 L}{AE} \qquad (۵)$$

برای سیستم مهاربندی کشش‌های ایجاد شده می‌بایست در محدوده مجاز معیارهای آیین‌نامه‌ای باشد. این معیارها با توجه به رابطه (۶) و جدول(۱) لحاظ می‌شوند[15].

$$\text{ضریب ایمنی} = \frac{\text{کشش مجاز}}{\text{حداکثر کشش ایجاد شده مهاربند}} \qquad (۶)$$

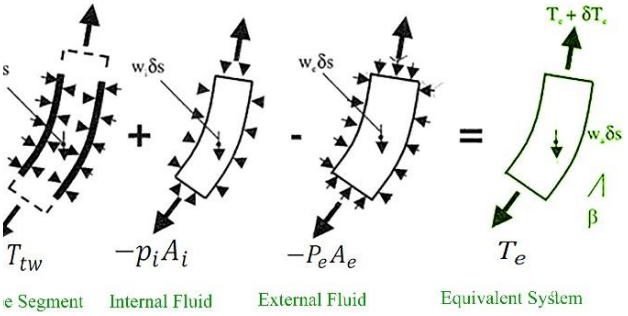
جدول۱. ضرایب ایمنی ارائه شده در آیین نامه API-RP-2SK

در حالت مهاربندی سالم	۱.۶۷
در حالت با یک مهاربند آسیب دیده	۱.۲۵

۲.۲ معادلات حاکم بر رایزرها

برای طراحی رایزرها مطابق شکل(۴) دو نوع کشش حائز اهمیت بوده که شامل کشش مؤثر (T_e) و کشش دیواره ((T_{tw}) می‌باشند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]



شکل ۴. نیروهای ایجاد شده در رایزر

کشش مؤثر (T_e) و کشش دیواره(T_{tw}) طبق رابطه(۷) با هم در ارتباط هستند. [6]

$$T_e = T_{tw} + (-P_iA_i) + (-P_eA_e) \qquad (۷)$$

در رابطه بالا P_i فشار داخلی و P_e فشار خارجی لوله که در سطح آب صفر و مقدار آن با کاهش عمق افزایش پیدا می‌کند. همچنین A_i و A_e سطح مقطع داخلی و خارجی ناحیه تنش محیطی می‌باشد. از دیگر پاسخ‌های سازه می‌توان از لنگر خمشی که موجب انحنا می‌شود نام برد. انحنا در این لوله‌ها طبق روابط(۸ و۹) به دست می‌آید.

$$k = \frac{w_a}{T_h}\cos h\frac{xw_a}{T_h} \qquad (۸)$$

$$W_a = W_h + W_i - W_e \qquad (۹)$$

در رابطه بالا x ، فاصله افقی دو نقطه ابتدا و انتهای رایزر، T_h نیروی افقی در بستر دریا، , W_h ,W_a، W_e، W_i به ترتیب برابر وزن خالی لوله، وزن ظاهری، وزن خارجی اطراف لوله و وزن سیال داخل لوله است. همچنین شعاع خمشی برابر معکوس انحنا می‌باشد. لنگر خمشی مجاز و انحنای مجاز بر اساس حداقل شعاع خمش[۱۹] هر لوله رایزر که توسط شرکت سازنده مشخص می‌شود، به دست می‌آید. این روابط بر اساس روابط (۱۰ و ۱۱) محاسبه می‌شوند[16].

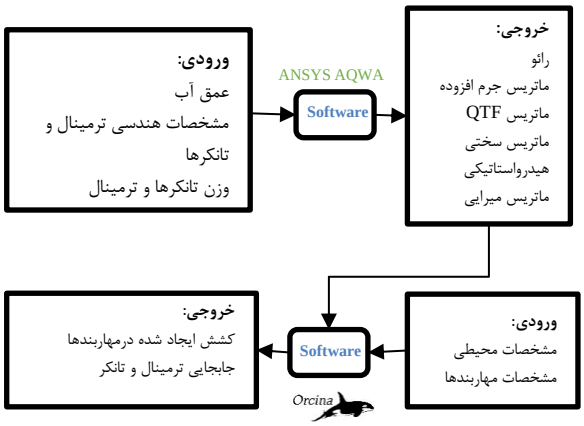
$$\text{لنگر خمشی مجاز} = \frac{EI}{MBR} \qquad (۱۰)$$

$$\text{انحنا مجاز} = \frac{1}{MBR} \qquad (۱۱)$$

در روابط بالا EI سختی خمشی لوله MBR حداقل انحنای مجاز می‌باشد که جزء مشخصه‌های رایزرها بوده که توسط شرکت سازنده مشخص می‌شود.

۳. مطالعه موردی

با هدف بررسی تاثیر پارامترهای مختلف همچون عمق آب، وزن زنجیر، شدت جریان و پریود موج بر رفتار مهاربند و همچنین بررسی میزان تاثیر اتصال تانکر و جابجایی ترمینال در جهت های مختلف روی پاسخ رایزر، به مدل‌سازی و تحلیل سازه‌ای این نوع از ترمینال فراساحل پرداخته می‌شود. به این منظور از نرم افزار ANSYS AQWA و ORCAFLEX مطابق فرایند شکل(۵) برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است[10]. ابتدا در نرم افزار ANSYS AQWA هندسه تانکر و ترمینال مدلسازی می‌شود. سپس خروجی‌های به دست آمده (شامل RAO و ضرایب هیدرودینامیکی) به نرم‌افزار ORCAFLEXمنتقل می‌شود که در آن مشخصات مهاربندها، رایزرها و همچنین مشخصات محیطی و زمان آنالیز به عنوان ورودی برای تحلیل شرایط عملیاتی تعیین می‌شوند. مشخصات مورد نیاز برای شبیه-سازی این ترمینال با توجه به مشخصات ترمینال نفتی نصب شده در فاز ۱۹ پارس جنوبی انجام می‌گیرد که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.



شکل ۵. فرایند مدل سازی در ترمینال نفتی CALM در نرم افزار

مشخصات هندسی تانکر و ترمینال در جدول(۱) آورده شده است. همانطور که پیشتر نیز اشاره شد یکی از خصوصیت‌های عملیاتی ترمینال‌های CALM قابلیت چرخان بودن [۱۱] بدنه بالایی متصل به تانکر بوده که برای شبیه‌سازی ایجاد چرخش دو قسمت بالا و پایین از مفصل استفاده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

جدول۲. مشخصات تانکر و ترمینال CALM

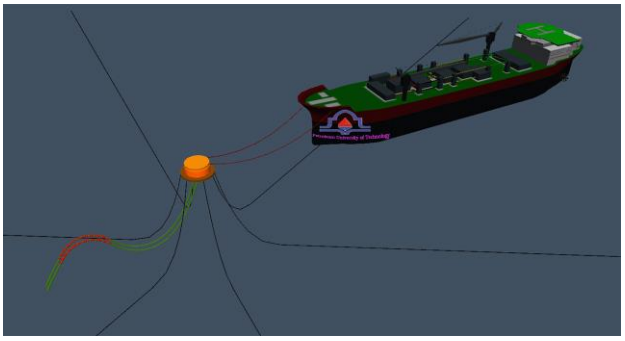
پارامتر ها	تانکر	CALM
		مقادیر
آبخور[m]	۸	۳.۲۶۶
مرکز جرم در جهت X. [m]	۶۰	۰
مرکز جرم در جهت Y. [m]	۰	۰
مرکز جرم در جهتZ. [m]	۸.۵	۰.۷۶۶
ممان اینرسی جرمی در جهت XX [kg.m^2]	۱۸۴.۹۶	۴۸۴۰۰۰۰
ممان اینرسی جرمی در جهت YY [kg.m^2]	۲۵۰۰	۴۸۴۰۰۰۰
ممان اینرسی جرمی در جهت ZZ [kg.m^2]	۲۷۰۴	۹۳۵۰۰۰۰
قطر[m]	-	۱۲.۵
قطر اسکرت[m]	-	۱۶.۶۳
وزن[ton]	۴۵۰۰۰	۲۸۹.۹۸
ارتفاع شناور [m]	-	۵.۳

۳.۱ خطوط مهاربندی

در این مطالعه مهاربندها از جنس زنجیر فولادی و جنس هاوسر از کابل رشته از جنس نایلون با مشخصات جدول(۲) استفاده شده است.

۳.۲ سیستم رایزر

در این مطالعه برای رایزر از پیکره‌بندی لیزی اس با توجه به مشخصات جدول(۳) استفاده شده است. در شکل(۶) نیز مدل ساخته شده در نرم افزار ORCAFLEX در حین عملیات تخلیه/بارگیری تانکر نشان داده شده است.



شکل۶. مدل ساخته شده در نرم افزار ORCAFLEX

جدول۳. مشخصات مکانیکی رایزر

پارامتر	مقدار
طول هر بخش رایزر[m]	۱۰.۷
قطر داخلی [mm]	۵۰۰
قطر خارجی [mm]	۶۲۰
سختی خمشی [kN.m^2]	۱۵۸
سختی محوری [kN]	۴۳۲۵.۸۶۶
جرم در آب[kg/m]	۲۵۹
حداقل کشش شکست[18] [kN]	۸۱۰
چگالی سیال [kg/m^3]	۷۲۵
طول L1 [m]	۷۲
طول L2 [m]	۲۸.۹
طول L3 [m]	۱۳.۱
طول L4 [m]	۸۱
طول کل رایزر L [m]	۱۱۸

۳.۳. شرایط محیطی

به منظور بررسی رفتار ترمینال نفتی CALM تحت پارامترهای طراحی موجود، مهم است که این ترمینال‌ها تحت شرایط یکسان با پارامترهای یکسان مورد بررسی قرار بگیرند. در این مقاله شرایط محیطی شامل موج، جریان و باد مربوط به اطلاعات منطقه نصب ترمینال نفتی CALM فاز ۱۹ پارس جنوبی مطابق جدول(۴) در نظر گرفته شده است. راستای این بارگذاری‌ها به صورت هم جهت

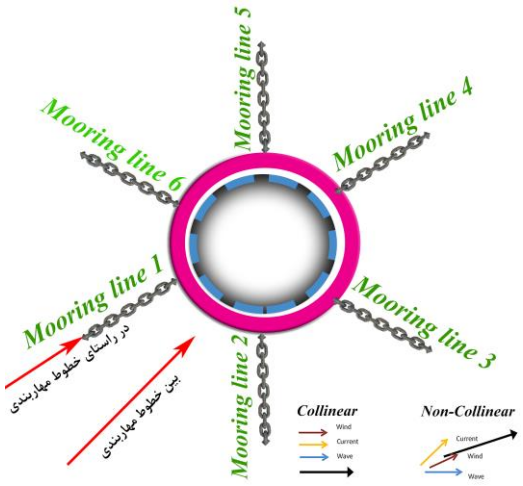
جدول۴. مشخصات خطوط مهاربندی

پارامتر ها		مقادیر
قطر مهار[mm]	هاوسر	۰.۴۰۶
	خط مهار CALM	۹۵
طول زنجیر[m]	خط مهار CALM	۴۳۶
	هاوسر	۴۲.۸
جرم در آب[kg/m]		۱۸۰
سختی محوری EA [kN]		۷۷۰۷۳۵
حداکثر کشش مجاز[kN]		۵۸۸۳

با خطوط مهاربند مطابق شکل(۷) انجام می‌گیرد. برای بررسی رفتار رایزر به طور متداول از معیار کنترل جابجایی مطابق استاندارد API استفاده می‌شود که این جابجایی‌ها مطابق شکل(۸)، شامل جابجایی دور ، نزدیک و عرضی می‌باشد[17].

جدول۵. شرایط محیطی اعمال شده

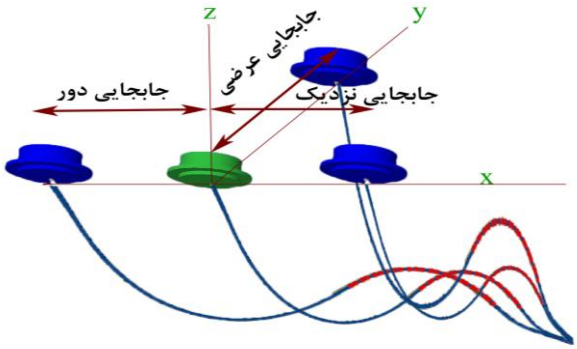
موج	جانسواپ	H_S[m]	۲.۶
		T_p[s]	۷.۵
		γ	۱.۴۹۳۳
جریان	مثلثی	سرعت موج در سطح آب [m/s]	۰.۷
		سرعت موج در بستر دریا [m/s]	۰
باد	ثابت	۲۶ m/s	



شکل ۷ . نحوه چیدمان خطوط مهاربندی و راستای بارگذاری

با توجه به روابط ارائه شده در قسمت ۲، می‌توان نشان داد که پاسخ سازه متاثر از تغییر در پارامترهای عملیاتی همچون وزن زنجیر، عمق آب و میزان جابجایی ترمینال (تحت تاثیر پارامترهایی از قبیل موج، جریان و جابجایی تحت تاثیر تانکر) خواهد بود. مسئله‌ای که مهم می‌باشد این است که کدام یک از این پارامترها بیشترین تاثیر را روی پاسخ سازه دارد و با تغییر در آن پارامتر بیشترین تغییرات ایجاد می شوند. در این مقاله به بررسی پارامتر هایی از قبیل میزان تاثیر جرم زنجیر، عمق آب، سرعت جریان، پریود موج و طول هاوسر(مهار اتصال بین تانکر و ترمینال) روی پاسخ سیستم مهاربندی و تاثیر جهت جابجایی ترمینال و میزان تاثیر حضور تانکر روی رایزر پرداخته شده است، و میزان اثرگذاری هر کدام بررسی خواهد شد.

برای بررسی رفتار رایزر، جابجایی ترمینال در سه جهت نزدیک، دور، و عرضی نسبت به PLEM در بستر دریا مفروض است که در شکل(۸) این جابجایی ها به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل۸. جهت‌های جابجایی ترمینال

در این راستا پارامترهای مورد نظر مطابق جدول(۶) تا ۳۰ درصد تغییر از مقدار مرجع لحاظ شده اند تا روند تغییر در جابجایی ترمینال و نیروی ایجاد شده در مهاربندها نسبت به پارامترهای اعمالی بررسی شوند. در تمامی موارد، بارهای اعمالی به صورت هم جهت با خطوط مهاربندی و با ۳۰ درجه نسبت به ترمینال با توجه به شکل ۷ می‌باشد. همچنین بارهای موج، جریان و باد به صورت هم جهت با یکدیگر[۲۰] اعمال می شوند.

جدول۶. تغییرات اعمالی در پارامترهای عملیاتی

	پارامترها	−%30 میزان مرجع ×	مرجع	+30% میزان مرجع ×
پارامترهای مورد نظر برای بررسی رفتار مهاربند	**عمق آب[m]**	۳۳.۴۶	۴۷.۸	۶۲.۱۴
	وزن زنجیر [t/m]	۰.۱۲۶	۰.۱۸۰	۰.۲۳۴
	پریود موج[s]	۵.۲۵	۷.۵	۹.۷۵
	سرعت جریان [m/s]	۰.۴۹۰	۰.۷۰	۰.۹۱
	طول هاوسر [m]	۴۲.۴۸	۶۰.۶۹	۷۸.۸۹

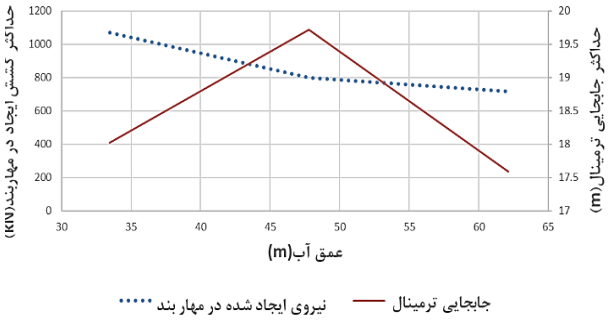
۴. نتایج

در این مقاله، ترمینال نفتی CALM تحت پارامترهای عملیاتی مختلف همچون عمق آب، وزن زنجیر، سرعت جریان، دوره تناوب موج و طول هاوسر و همچنین جابجایی ترمینال در جهت های مختلف و میزان تاثیر حضور تانکر تحت مطالعه قرار گرفته است. در این آنالیزها، نیروی ایجاد شده در مهاربند به دلیل حفظ موقعیت سازه-ها و جابجایی ترمینال در حالت اتصال رایزرها به ترمینال به عنوان مهمترین پاسخ‌های سازه در نظر گرفته می‌شوند. برای تحلیل، شرایط محیطی منطقه نصب ترمینال نفتی فاز ۱۹ پارس جنوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

حداکثر جابجایی ترمینال و نیز حداکثر کشش ایجاد شده در خطوط مهاربندی برحسب تغییرات در عمق آب، در نمودار شکل(۹) ارائه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

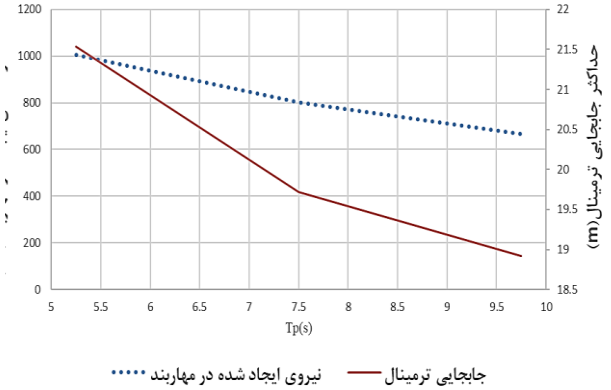
شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، رفتار نمودار را می‌توان به دو بخش مشخص شامل عمق تا ۴۷ متر و عمق بیش از ۴۷ متر تقسیم نمود. با افزایش عمق آب تا ۴۷ متر جابجایی بیشینه ترمینال افزایش یافته و به تبع آن نیروی کشش بیشینه در مهاربندها کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر عمق آب (فراتر از ۴۷ متر) با توجه به شکل(۱) طول بیشتری از مهاربند از بستر دریا جدا شده که باعث می شود جرم کلی سازه افزایش پیدا کند. با افزایش جرم سیستم مهاربندی و اینرسی ناشی از آن، جابجایی بیشینه ترمینال کاهش یافته و روند کاهش نیروی کششی داخل مهاربند با شدت کمتری کاهش می‌یابد که این ناشی از افزایش نیروی بویانسی ناشی از طول زنجیر مهاربندی خواهد بود.



شکل ۹. تاثیر پارامتر عمق آب روی پاسخ سازه

در ادامه دوره تناوب موج به عنوان متغیر برای بررسی حساسیت ترمینال نفتی CALM نسبت به این متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل(۱۰) مشخص است، جابجایی ترمینال و کشش ایجاد شده در مهاربند با افزایش دوره تناوب موج، هر دو روندی نزولی داشته به گونه‌ای که با افزایش حدود ۸۵ درصدی دوره تناوب از ۵.۲۵ تا ۹.۷۵ ثانیه، میزان کاهش برای جابجایی

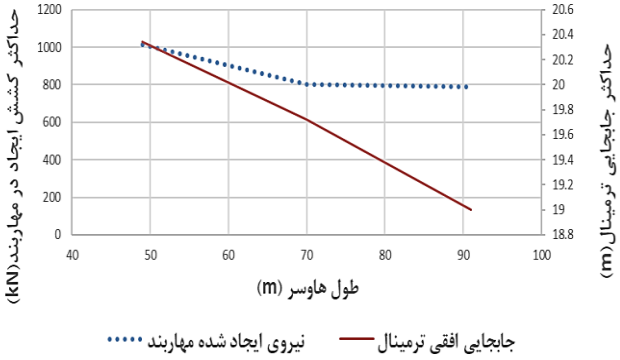
ترمینال مقدار ۱۲ درصد و برای کشش ایجاد شده درمهاربند به میزان ۳۳ درصد تغییرات کاهشی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. میزان تاثیر پریود موج بر پاسخ سازه

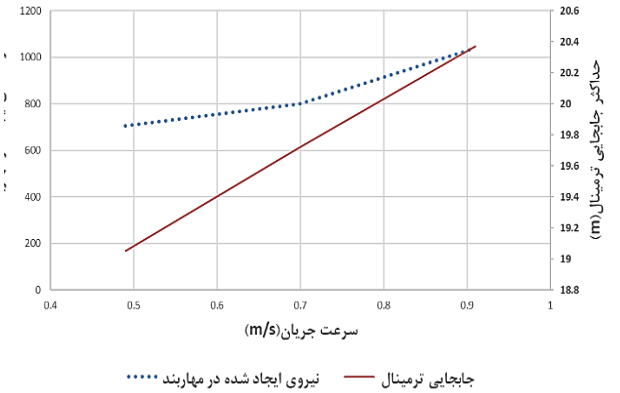
طول هاوسر یا همان کابل اتصال بین تانکر و ترمینال، از دیگر متغیرهای موثر بر پاسخ دینامیکی سازه است. در این مطالعه، هاوسرها از جنس نایلون هشت رشته‌ای انتخاب شده است. در شکل(۱۱) تاثیر طول هاوسر بر حداکثر جابجایی ترمینال و نیز حداکثر کشش ایجاد شده در خطوط مهاربندی نشان داده است.

با افزایش طول هاوسر از ۴۲ تا ۷۹ متر، جابجایی ترمینال و کشش ایجاد شده در مهاربند روند کاهشی را نشان می‌دهد. با افزایش این جابجایی ترمینال به میزان ۶ درصد کاهش پیدا می‌کند و ۲۱ درصد کاهش برای کشش ایجاد شده در مهاربند را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۱۱. میزان تاثیر طول هاوسر بر پاسخ سازه

با متغیر قرار دادن سرعت جریان به عنوان بار اعمالی، تغییرات در کشش ایجاد شده و جابجایی ترمینال به عنوان پاسخ سازه به صورت شکل(۱۲) نتیجه می‌شود.

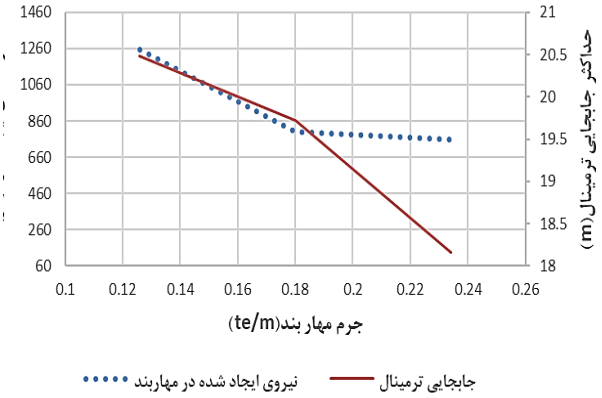


شکل۱۲ . میزان تاثیر سرعت جریان بر پاسخ سازه

با توجه به شکل ۱۲ نتیجه می‌شود که با افزایش سرعت جریان، کشش در مهاربند و جابجایی در ترمینال روند صعودی از خود نشان می‌دهند. به گونه‌ای که با افزایش سرعت جربان از ۰.۴۹ به ۰.۹۱ متر بر ثانیه، کشش ایجاد شده در مهاربند به میزان ۴۷ درصد و برای جابجایی ترمینال میزان ۷ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

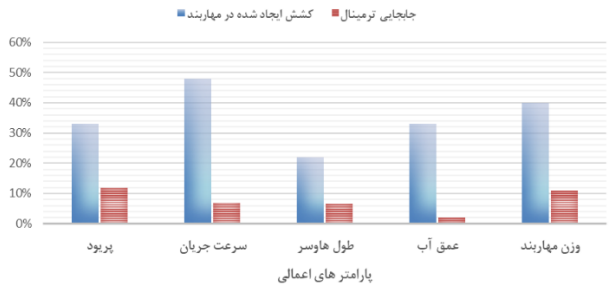
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

با متغیر قرار دادن جرم زنجیر مهاربند، تغییرات در پاسخ سازه با توجه به شکل (۱۳) قابل مشاهده است.



شکل ۱۳. میزان تاثیر جرم مهاربند بر پاسخ سازه

با افزایش جرم مهاربند میزان جابجایی ترمینال و کشش ایجاد شده در مهاربند هر دو روند نزولی دارند. به گونه‌ای که با افزایش جرم مهاربند از ۰.۱۲۶ تا ۰.۲۳۴ تن بر متر جابجایی ترمینال ۱۱ درصد و این میزان برای کشش ایجاد شده در مهاربند مقدار ۳۹ درصد کاهش را نشان می‌دهد. با افزایش جرم مهاربند وزن کلی سازه و اینرسی آن افزایش پیدا می‌کند در نتیجه جابجایی سازه کاهش و به تبع آن نیروی ایجاد شده در مهاربندها نیز کاهش پیدا می‌کند. میزان تغییرات برای تمام پارامترهای در شکل ۱۵ قابل مشاهده می باشد

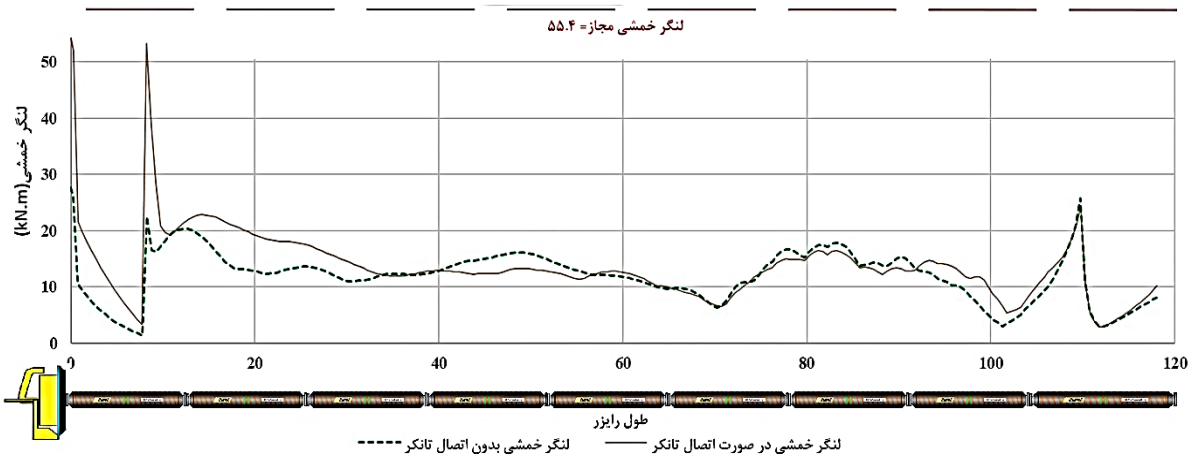


شکل۱۴. میزان تغییرات پاسخ سازه تحت پارامترها طراحی

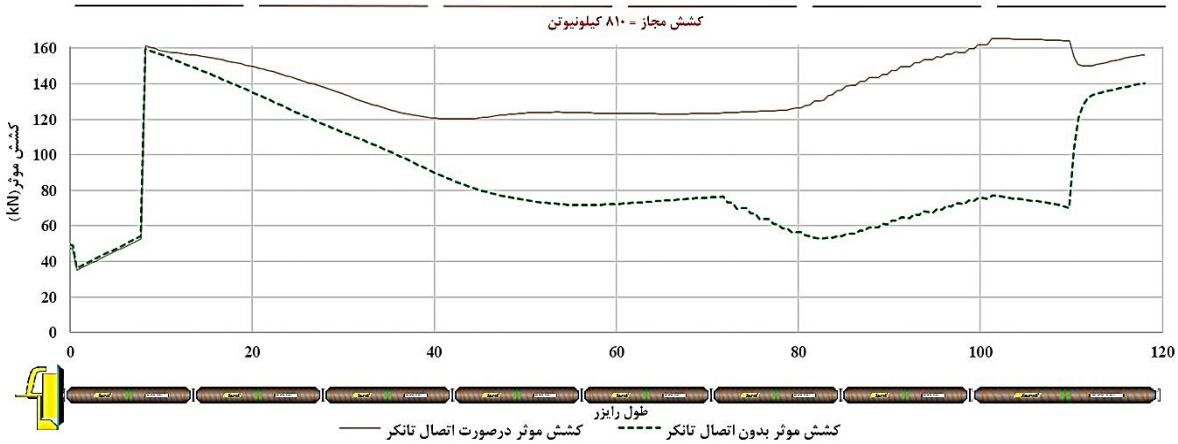
رایزرها به عنوان مهمترین اجزای ترمینال نفتی نیز با دو متغیر شامل جابجایی ترمینال در جهت‌های مختلف و حضور و عدم حضور تانکر مورد بررسی قرار می‌گیرند. جابجایی ترمینال در سه جهت نزدیک، دور و عرضی مورد بررسی قرار می‌گیرد و تاثیری که این جابجایی‌ها می‌توانند روی پاسخ دینامیکی رایزر داشته باشند مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مهمترین پارامترهای که می‌تواند در حالت عملیاتی روی پاسخ سازه و خصوصا رایزر داشته باشد، میزان تاثیر حضور تانکر است. در این حالت برای بررسی رایزر از معیار کنترل نیرو[۲۱] استفاده می‌شود؛ به این طریق که در دو حالت با تانکر و بدون تانکر ترمینال می‌تواند تحت شرایط محیطی اعمالی جابجا شود. اما برای بررسی میزان تاثیر جهت جابجایی ترمینال، با توجه به آنالیز-های انجام گرفته شده برای حالت بدون اتصال به تانکر نتیجه می-شود که ترمینال تحت موارد بار اعمالی به میزان ۱۵ متر جابجایی داشته است که این میزان جابجایی به عنوان جابجایی مبنا برای برای بررسی پاسخ رایزر در سه جهت دور نزدیک و عرضی در نظر گرفته خواهد شد. در ادامه در مورد هر کدام به صورت جداگانه بحث خواهد شد.

درصورتیکه میزان تاثیر حضور تانکر برای بررسی پاسخ سازه مورد ارزیابی قرار بگیرد نتایج شکل(۱۶) به دست می‌آیند. همانگونه که در شکل(۱۶) قابل مشاهده است، در این نوع پیکره‌بندی (بدون حضور تانکر) بیشترین مقدار لنگر خمشی و بیشترین مقدار کشش موثر در قسمت اتصال رایزر به ترمینال (اتصال بالای رایزر۲۲) در حالت دینامیکی بوجود می¬آید. با اتصال تانکر به ترمینال، میزان لنگر خمشی در قسمت پایین رایزر(PLEMتغییری مشاهده نمی¬شود و همچنین مشاهده می¬شود که تغییرات لنگر خمشی در طول رایزر تقریبا ثابت است و نقطه بحرانی برای لنگر خمشی هنگام عملیات بارگیری همان نقطه اتصال بالای رایزر می¬باشد. لنگر خمشی در محل اتصال رایزر به ترمینال میزان ۴۸ درصد افزایش پیدا می¬کند. در هر دو شرایط، لنگر خمشی از حد مجازی که آیین¬نامه برای رایزر پیشهاد داده عبور نکرده است. میزان تغییر در کشش موثر برخلاف نتیجه لنگر خمشی می‌باشد یعنی با حضور تانکر کشش موثر در قسمت پایین رایزر بیشتر تغییر می‌کند و در قسمت اتصال بالای رایزر، کشش موثر تقریبا تغییری ندارد. میزان تغییرات کشش موثر در اتصال پایین رایزر تقریبا ۵۷ درصد است. بر خلاف لنگر خمشی، کشش موثر در طول رایزر زیاد می‌باشد. در این حالت نیز رایزر از حد مجاز کشش موثر که ۸۱۰ کیلونیوتن می-باشد تجاوز نکرده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]



الف. میزان تاثیر حضور تانکر بر لنگر خمشی رایزر



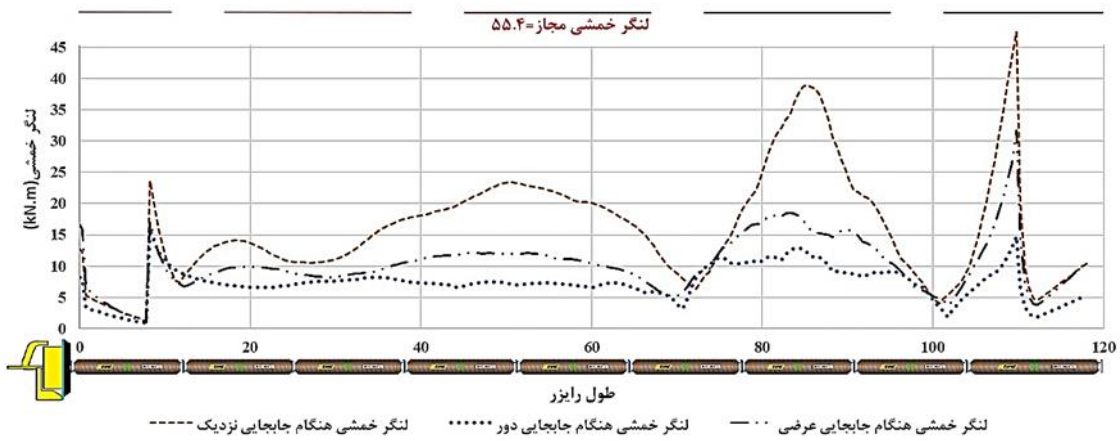
ب. میزان تاثیر حضور تانکر بر کشش موثر رایزر

شکل۱۵ . میزان تاثیر حضور تانکر بر پاسخ دینامیکی سازه

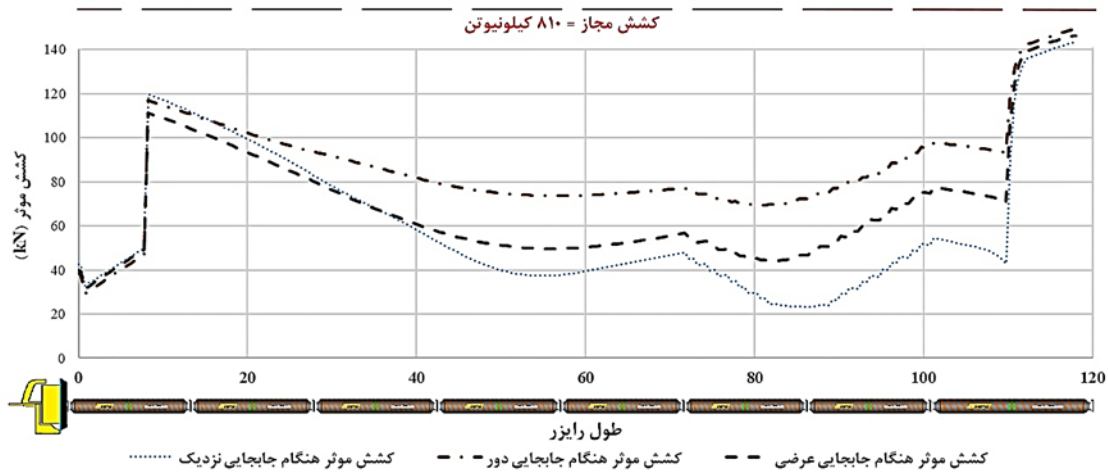
در شکل(۱۵) میزان تاثیر جابجایی ترمینال در جهت‌های مختلف تحت کنترل جابجایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این حالت با توجه به تحلیل‌های قبلی (بدون اتصال رایزر)، که حداکثر جابجایی ترمینال به دست آمده است، این جابجایی‌ها به عنوان حداکثر جایجایی که ترمینال می‌تواند تحت شرایط محیطی موجود داشته باشد در نظر گرفته می‌شود.

سپس با وجود اتصال رایزر، ترمینال در حداکثر نقاط جابجایی که در جهت‌های نزدیک، دور و عرض قرار می‌گیرد، میزان ۱۵ متر جابجایی برای هر جهت با توجه به حداکثر جابجایی که ترمینال می‌تواند تحت شرایط محیطی موجود داشته باشد نتیجه میشود که لنگر خمشی در جهت نزدیک بیشترین مقدار و جابجایی در جهت دور کمترین مقدار را دارا می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود لنگر خمشی در نقطه بالای اتصال رایزر تحت جهت‌های مختلف یکسان می‌باشد و بیشترین مقدار تغییرات در نقطه پایین اتصال رایزر بوجود می‌آید. این در حالی است که تغییرات کشش موثر در قسمت پایین رایزر بیشتر می‌باشد و در قسمت بالای رایزر تغییرات کم و ناچیز است. در جابجایی دور بیشترین کشش موثر برای رایزر حاصل می گردد. برای حالت های درنظر گرفته شده مشاهده می-شود علاوه بر نقاط ابتدا و انتها رایزر، قسمت انحنای رایزر نیز مهم می‌باشد اما بیشترین اهمیت را همان نقاط ابتدا و انتها به دلیل تغییرات بیشتر نیرو را دارند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]



الف. میزان تاثیر جهت جابجایی ترمینال بر لنگر خمشی رایزر



ب. میزان تاثیر جهت جابجایی ترمینال بر کشش موثر رایزر

شکل ۱۶. میزان تاثیر جهت جابجایی ترمینال بر پاسخ دینامیکی رایزر

۵. جمع بندی

در این مقاله آنالیز حساسیت ترمینال نفتی CALM تحت پارامتر-های مختلف با شرایط محیطی منطقه نصب ترمینال نفتی فاز ۱۹ مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که:

- با تغییر سرعت جریان بیشترین میزان تغییرات در کشش ایجاد شده در مهاربند ایجاد می شود این در حالی است که با تغییر دوره تناوب موج بیشترین میزان تغییرات در جابجایی ترمینال مشاهده می شود. برای سایر پارامترها در شکل(۱۶) این میزان تغییرات آورده شده است.
- با تغییرات در پارامترهای موجود کشش ایجاد شده در مهاربند نسبت به جابجایی ترمینال بیشترین حساسیت را از خود نشان می‌دهد.
- برای این نوع پیکره‌بندی رایزر می‌توان نشان داد بیشترین کشش موثر و لنگر خمشی در قسمت ابتدایی و انتهایی رایزر رخ می‌دهد و می‌توانتیجه گرفت که درصورت اتصال تانکر، لنگر خمشی در قسمت بالای رایزر و کشش موثر در قسمت پایین رایزر بیشترین تغییرات رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که در صورت جابجایی ترمینال در سه جهت دور، نزدیک و عرضی بیشتر تغییرات در لنگر خمشی و کشش ایجاد شده در قسمت پایین رایزر رخ می دهد. در جابجایی نزدیک لنگر خمشی و در جابجایی دور کشش ایجاد شده در مهاربند بیشترین تغیرات ایجاد می شود.
- در بیشتر موارد مورد بررسی(به استثنای تاثیر عمق آب)، نیروی ایجاد شده در مهاربند و جابجایی ترمینال رابطه مستقیم وجود دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]

۶. کلید واژگان

1- Catenary Anchor Leg Mooring
2- Single Anchor Leg Mooring
3- Skirt
4- Chinese Lantern
5- Hose
6- Ziccardi
7- Lazy S
8- Free hanging
9- Flow angle
10- Hawser
11- Weathervaning
12- Chain
13- Wire
14- Fiber Rope
15- Under-Water Hose
16- Vulcanization
17- Bonded
18- Minimum Breaking Tension
19- Minimum Bending Radius
20- Collinear
21- Load Control
22- Hang-off

۷. مراجع

[1] A. M. Salancy and R. G. Bea, "*Offshore single point mooring systems for import of hazardous liquid cargoes*," California Univ., Berkeley, CA (United States). Dept. of Naval Architecture …, 1994.

[2] G. Rutkowski, "*A comparison between conventional buoy mooring CBM, single point mooring SPM and single anchor loading SAL systems considering the Hydro-meteorological condition limits for safe ship's operation offshore*," TransNav Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp., vol. 13, no. 1, 2019.

[3] "Marine Hoses | YOKOHAMA RUBBER Co., Ltd. MULTIPLE BUSINESS." [Online]. Available: https://www.y-yokohama.com/global/product/mb/marine-hoses/. [Accessed: 26-Nov-2019].

[4] K. Wang, G.-K. Er, and V. P. Iu, "*Nonlinear dynamical analysis of moored floating structures*," Int. J. Non. Linear. Mech., vol. 98, pp. 189–197, 2018.

[5] E. Esmailzadeh and A. Goodarzi, "*Stability analysis of a CALM floating offshore structure*," Int. J. Non. Linear. Mech., vol. 36, no. 6, pp. 917–926, 2001.

[6] A. Pecher, A. Foglia, and J. P. Kofoed, "*Comparison and sensitivity investigations of a CALM and SALM type mooring system for wave energy converter*s," J. Mar. Sci. Eng., vol. 2, no. 1, pp. 93–122, 2014.

[7] X. Qi, Y. Chen, Q. Yuan, G. Xu, and K. Huang, "*Calm Buoy and Fluid Transfer System Study*," in The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2017.

[8] J. J. Ziccardi and H. J. Robins, "*Selection of Hose Systems for SPM Tanker Terminals*," in Offshore Technology Conference, 1970.

[9] C. Eiken, "*Pre-commissioning hose operations on the Valemon field in the North sea*." University of Stavanger, Norway, 2013.

[10] C. V. Amaechi, F. Wang, X. Hou, and J. Ye, "*Strength of submarine hoses in Chinese-lantern configuration from hydrodynamic loads on CALM buoy*," Ocean Eng., vol. 171, pp. 429–442, 2019.

[11] A. R. Cruces Girón, F. N. Corrêa, B. P. Jacob, and S. F. Senra, "*An Integrated Methodology for the Design of Mooring Systems and Risers of Floating Production Platforms*," in International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2012, vol. 44885, pp. 539–549.

[12] A. R. C. Girón, F. N. Corrêa, A. O. V. Hernández, and B. P. Jacob, "*An integrated methodology for the design of mooring systems and risers*," Mar. Struct., vol. 39, pp. 395–423, 2014.

[13] A. R. Cruces Girón, F. N. Corrêa, and B. P. Jacob, "*Evaluation of Safe and Failure Zones of Risers and Mooring Lines of Floating Production Systems*," in International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2013, vol. 55317, p. V001T01A024.

[14] "AQWA User Manual." [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/14.0/en-us/help/wb_aqwa/wb_aqwa.html.

[15] T. Edition, "*API RP 2SK Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*," no. October 2005. 2014.

[16] Orcaflex, *OrcaFlex Manual version 9.7a,2015*. section 1;3;4;6;7, 2015.

[17] American Petroleum Institute, "*Recommended Practice for Flexible Pipe (API Recommended Practice 17B Third Edition)*," no. March. 2002.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.5.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.73]