تحلیل خط لوله دریایی در هنگام انتقال به محل نصب به روش کشیدن در سطح آب

علیرضا رعنایی[1*]، علی اکبر آقا کوچک[2]

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

نصب خطوط‌لوله دریایی به دو روش خوابانیدن[1] و کشیدن[2] انجام می‌گیرد. در آب‌های کم عمق با توجه به محدودیت‌هایی که برای بارج لوله‌گذار به روش خوابانیدن وجود دارد، روش کشیدن بسیار مناسب می‌باشد. در این روش خط‌لوله با طول مشخص در ساحل ساخته شده و به آب انداخته می‌شود و سپس با توجه به شرایط محیطی و محدودیت‌های موجود خط‌لوله با فاصله مشخص از بستر دریا به سایت نصب کشیده می‌شود. در تحقیق حاضر به بررسی تنش و تغییرشکل در طول خط‌لوله در حین انتقال به روش کشیدن روی سطح آب در آب‌های کم عمق، با استفاده از نرم افزار ارکافلس[3] پرداخته شده است. جهت رسیدن به این هدف، مطالعه پارامتری روی پاسخ‌های خط‌لوله تحت تاثیر بارهای محیطی ناشی از موج و جریان و سایر پارامترهای موثر مانند ظرفیت کششی یدک‌کش و میزان ذخیره شناوری انجام شده و جابجایی جانبی و قائم و مقادیر تنش‌های ایجاد شده در خط‌لوله در شرایط مختلف سکون، کشیده شدن و قرارگرفتن بر روی بستر مطالعه شده است.

برای مشخصات خط‌لوله از یک نمونه خط لوله در خلیج فارس استفاده شده است. با توجه به شناور بودن خط‌لوله، از اثر حرکت‌های یدک‌کش ناشی از موج صرف نظر شده است. نتایج نشان می‌دهد جابجائی جانبی خط‌لوله ناشی از طیف موج کمتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکزیمم طیف موج می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت حرکت، انحنای جانبی خط‌لوله به انتهای آن نزدیک‌تر می‌شود و باعث افزایش تنش خمشی ناشی انحنای جانبی می‌شود.

کلمات کلیدی: خط لوله دریایی، روش کشیدن در سطح آب، تحلیل تحت اثر امواج منظم و نامنظم

ANALYSIS OF OFFSHORE PIPELINE DURING TRANSPORTATION TO INSTALLATION SITE BY SURFACE TOW METHOD

A.R.Ranaei[1], A.A.Aghakouchak[2]

1- M.Sc. in marine structures, Tarbiyat Modares University
2- Professor, Faculty of Civil Eng., Tarbiat Modares University

Abstract

In general, Lay and Tow methods are the two most common methods of offshore pipeline installation. In the shallow waters, considering the restrictions of Lay barge, Tow method is usually more appropriate. In this method, pipestring is fabricated on-shore and then it is launched into water. Then, according to environmental conditions and restrictions, the pipeline is towed to the installation site. In the present study, the evaluation of stress and deformation along pipeline during transportation and installation in shallow water has been presented. All analyses have been carried out using Orcaflex software. A parametric study has been carried out on the effect of environmental loading (wave and currents) and other parameter such as tugboat

* نویسنده مسوول مقاله alireza.ranaei@yahoo.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

pull capacity and reserve buoyancy rate. Also lateral and vertical displacements and stress on pipeline for different conditions including static, transportation and laydown conditions have been investigated.
For modeling properties of the pipeline, an existing pipeline in the Persian Gulf is considered. Due to the pipeline floating condition, the effect of the tug motions due to wave is ignored. The results are shown that lateral deflection of the pipeline due to wave spectrum is less than monochromatic waves with a maximum height of the wave spectrum. Also, by increasing tug speed, lateral curvature is closer to the end of the pipeline and increases the bending stress due to lateral curvature.
Keywords: Offshore Pipeline, Surface Tow Method, Regular and Irregular Wave Analysis

۱- مقدمه

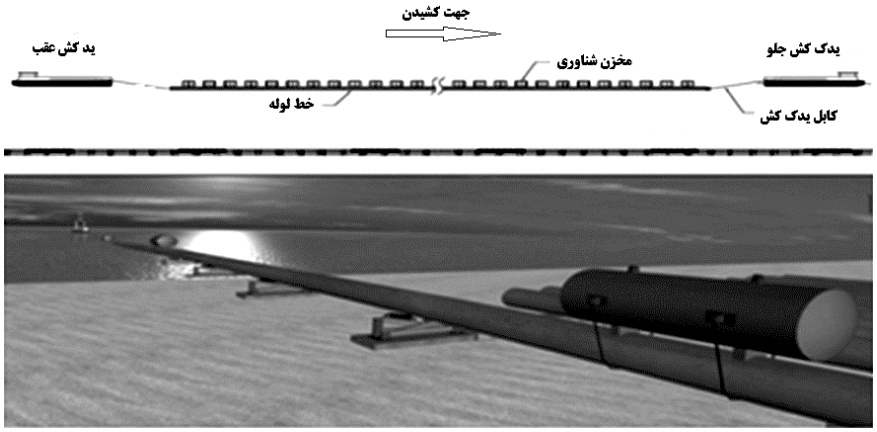
با توجه به اهمیت خطوط انتقال و هزینه های هنگفت ناشی از خسارت وقفه در بهره برداری از این منابع انرژی ، طراحی و نصب صحیح خط لوله از اهمیت بسزایی برخوردار است. نصب خط لوله دریایی به دو روش خوابانیدن و کشیدن انجام می شود. روش خوابانیدن یکی از روش های معمول و پرکاربرد نصب خط لوله دریایی می باشد. در این روش قطعات خط لوله در بارج لوله گذاری به یکدیگر جوش داده شده و به تدریج به آب انداخته می شوند.

در روش کشیدن خطلوله با طول مشخص در ساحل ساخته می‌شود و پس از به آب اندازی به وسیله یدک-کش به سایت نصب انتقال داده می‌شود. پس از انتقال خطلوله به سایت نصب، با تامین تمهیدات لازم خطلوله روی بستر دریا قرار داده می شود [۱]. با توجه به اینکه در روش کشیدن خطلوله در ساحل ساخته می‌شود، کیفیت جوشکاری و آزمایش‌های مورد نیاز در مقایسه با روش خوابانیدن که این عملیات در فراساحل برروی بارج انجام می‌شود، افزایش می‌یابد و از طرفی هزینه-های ساخت کاهش می‌یابد. این مسئله همچنین باعث افزایش سرعت نصب فراساحل می‌شود.کاهش زمان نصب فراساحل علاوه بر کاهش هزینه‌ها، احتمال رخداد شرایط نامساعد جوی را کاهش می‌دهد [۲]. در روش کشیدن خطلوله می‌تواند در سطح آب و یا برروی بستر دریا و یا فاصله معینی از بستر دریا کشیده شود. در آب های بسیار کم عمق با توجه به محدودیت هایی که برای بارج لوله گذار به روش خوابانیدن وجود دارد و از طرفی با توجه به موانع موجود در بستر روش کشیدن در کف قابل کاربرد نیست، روش کشیدن در سطح مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد. در این روش مخازن شناوری در طول خطلوله متصل شده و خطلوله به وسیله دو یدک‌کش روی سطح آب کشیده می‌شود [۳] (شکل ۱).

دانیو ماچادو و همکاران در سال ۲۰۰۷ به تحلیل عددی خطلوله در حین به آب اندازی موازی خط‌ساحل پرداخته‌اند [۴]. پروژه مورد بررسی، تعویض خطلوله انتقال نفت بین سکوی پی ایکس ای و بوی فرنس در فراساحل برزیل می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های لوله گذاری با بارج لوله‌گذار، روش نصب Tow برای این پروژه انتخاب شده است. در ابتدا خطلوله موازی خط ساحل ساخته شد (در ساحل کنتو) و سپس بوسیله کابل به یدک‌کش متصل گردید. با حرکت یدک‌کش به تدریج انحنای جانبی در خطلوله ایجاد شد. تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی برای جهت‌های مختلف حرکت شامل ۵- ، ۰، ۵ ، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه و سرعت‌های مختلف یدک‌کش شامل ۱، ۲ و ۳ کیلومتر بر ساعت انجام شده است. شرایط محیطی نیز آرام در نظر گرفته شده است.

آلیوت و همکاران در سال ۲۰۰۶، چهار نوع خطلوله به طول ۲۰ کیلومتر در حال انتقال به روش کشیدن موجی شکل روی سطح آب[۴] را مورد بررسی قرار دادند [۵]. طراحی خطلوله برای عمق ۱۸۰۰ تا ۲۵۰۰ متری انجام شده است. مخازن شناوری در طول خطلوله بسته شده اند و سه نقطه با شناوری مثبت و چهار نقطه با شناوری منفی را تامین می‌کنند. کل سیستم با در نظر گرفتن اثر حرکت‌های یدک‌کش‌های عقب و جلو و یدک‌کش های کمکی ناشی از موج، مدل می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]



شکل ۱- خطلوله و مخزن شناوری در روش کشیدن در سطح آب

برای کنترل پاسخ‌های خطلوله تحت نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از موج و جریان و حرکت‌های یدک‌کش‌ها، تحلیل دینامیکی انجام شده است. نتایج اصلی تحلیل برای یک نمونه خطلوله به قطرخارجی ۲۴ اینچ، ضخامت ۱/۰۲۵ اینچ در حین عملیات انتقال در جدول ۱ آمده است.

مندس و همکاران در سال ۲۰۰۷ به مقایسه نتایج آنالیز کوپله و غیر کوپله برای انتقال خطلوله به روش کشیدن قوسی[5] پرداخته اند [۶]. خط لوله به قطر ۸ اینچ از جنس فولاد (ایکس ۶۵) در عمق ۱۸۰۰ متری جهت انتقال نفت مدل شده است. خط لوله به روش کشیدن قوسی انتقال داده می شود و طول کلی خطلوله ۳۲۰۰ متر می‌باشد که به وسیله دو یدک‌کش به ظرفیت کششی ۱۸۰ تن کشیده می‌شود.

در آنالیز غیر کوپل ضرایب اندرکنش موج و حرکت‌های یدک‌کش توسط برنامه‌های اختصاص یافته براساس پتانسیل مانند وامیت[6] محاسبه می‌شود (البته بدون توجه به حضور خط لوله) و سپس حرکت‌ها را به مدل خطلوله اعمال می‌کنند. آنالیز کوپل در حوزه زمان است و در آن ضریب نیروی هسکیند[7] مشابه آنالیز حرکت‌های یدک‌کش در وامیت، تولید می‌شود. برای فهمیدن تاثیر پارامترهای مختلف روی رفتار دینامیکی سیستم، حالات مختلف بارگذاری با پریودها ، جهت‌ها و ارتفاع‌های موج مختلف و سرعت‌های مختلف کشیدن ایجاد شده است. برای ارتفاع ۰/۵ متری موج، تنش به ۱۴۰ مگاپاسکال می‌رسد و برای مقاطع نزدیک یدک‌کش جلو، نتایج آنالیز کوپله ۱۴ درصد بیشتر است، در حالیکه برای مقاطع نزدیک یدک‌کش عقب نتایج آنالیز غیرکوپله ۲۰ درصد بیشتر است. برای ارتفاع ۱ متری موج، تنش به ۱۵۰ مگاپاسکال می‌رسد و در نیمه اول انحنا خطلوله، نتایج آنالیز کوپله ۲۰ درصد بیشتر است، در حالیکه برای نیمه دوم انحنا نتایج آنالیز غیرکوپله ۲۵ درصد بیشتر است. برای ارتفاع ۱/۵ متری موج، تنش به ۲۰۰ مگا پاسکال در نزدیکی یدک‌کش جلو که ۷۲ درصد تنش مجاز است، می‌رسد.

۲- مدل سازی

در این تحقیق برای مدل سازی خط لوله به روش کشیدن در سطح آب از نرم افزار ارکافلکس استفاده شده است. مدل شامل یک خطلوله با دو طول مشخص (۴۰۰ و ۱۲۰۰ متری) می‌باشد که دو انتهای آن به کابل متصل شده است و کابل‌ها به وسیله وینچ به یدک‌کش جلو و عقب متصل شده‌اند. برای مشخصات لوله از یک نمونه خط لوله در خلیج فارس (جدول ۲) استفاده شده است.

برای تامین شناوری خطلوله، مخازن شناوری در طول خط لوله با فاصله محور به محور ۱۴/۵ متر بسته شده است (شکل ۱). فاصله مخازن شناوری به گونه‌ای تنظیم شده است که حدود ۵ درصد ذخیره شناوری وجود دارد. مشخصات مخازن شناوری در جدول ۳ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

جدول ۱- نتایج اصلی تحلیل برای سه نمونه خط لوله در حین عملیات انتقال

حالت بارگذاری	شرایط		ماکزیمم نیروها		جابجائی	
	سرعت ترکیبی جریان [*Knots*]	زاویه موج و جریان نسبت به راستای خط لوله [*deg*]	نیروی محوری [*KN*]	تنش معادل [*MPa*]	قائم [*m*]	جانبی [*m*]
۱	۰	۰	۵۴۹	۲۵	-۱۸۱	۰
۲	۳/۵	۰	۲۱۱۳	۵۹	-۲۶۳	۰
۳	۳/۵	۹۰	۲۴۵۳	۷۲	-۱۹۵	۹۵
۴	۳/۲	۹۰	۲۰۰۶	۶۲	-۲۰۷	۱۹۱

جدول ۲- مشخصات خطلوله

قطر خارجی [*mm*]	۳۲۳/۸۵
ضخامت [*mm*]	۱۷/۵
تنش تسلیم [*MPa*]	۴۱۴
مدول الاستیسیته [*KPa*]	$۲/۰۷\times۱۰^{۵}$
ضریب پواسون	۰/۳
ضخامت پوشش بتونی[*mm*]	۸۵
وزن مخصوص پوشش بتونی[Kg/m^3]	۳۰۴۰
ضخامت پوشش خوردگی[*mm*]	۲/۵
وزن مخصوص پوشش خوردگی[Kg/m^3]	۹۰۰
وزن خشک [*KN/m*]	۴/۶۰
وزن شناور[*KN/m*]	۲/۶۳

جدول ۳ - مشخصات مخزن شناوری

قطر خارجی [*m*]	۱/۱
طول [*m*]	۶/۱
حجم [m^3]	۵/۷۹
وزن خشک [*KN/m*]	۱۸/۰۵
وزن شناور [*KN/m*]	-۴۰/۰۹

کابل مدل شده در دو انتهای خط لوله، ۵۰ متر طول دارد. وظیفه وینچ متصل‌کننده کابل به یدک‌کش، تامین نیروی کششی تعریف شده با آزاد کردن یا بستن سیم وینچ می‌باشد. برای مدل کردن یدک‌کش جلو و عقب از المان شناور نرم افزار استفاده شده است [۷]. با توجه به شناور بودن خطلوله، اثر حرکت‌های یدک‌کش ناشی از موج بروی خطلوله ناچیز است [۳]. بنابراین برای المان شناور، حرکت‌های یدک‌کش ناشی از موج، تعریف نشده و در واقع از حرکت‌های یدک‌کش ناشی از موج صرف نظر شده است.

عمق آب، وزن مخصوص آب دریا و سرعت جریان برای کلیه تحلیل‌ها مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است.

جدول ٤- شرایط محیطی

سرعت جریان در سطح آب [*m/sec*]	۰/۸
سرعت جریان در نزدیکی بستر دریا [*m/sec*]	۰/۶
عمق آب دریا [*m*]	۱۰
وزن مخصوص آب دریا [*KN/m*]	۱۰۲۵

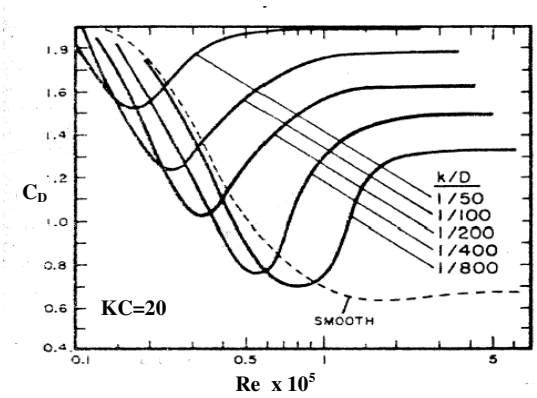
به طور کلی تحلیل‌ها برای خطلوله تحت اثر موج منظم و موج نامنظم انجام شده است. با توجه محدوده کاربرد تئوری‌های موج ارائه شده درآئین‌نامه آمریکا[۸]، از تئوری موج استریم مرتبه سوم برای موج منظم استفاده شده است [۸]. با توجه به اینکه طیف موج جان سوآپ[۹] تطابق خوبی با طیف موج خلیج فارس دارد، برای موج نامنظم از طیف موج جان سوآپ با ضریب ۷ برابر با ۳/۳ استفاده شده است.

ضریب درگ بر اساس نتایج کار آزمایشگاهی ارائه شده توسط سارپ کایا بر روی استوانه افقی در نظر گرفته شده است [۹]. شکل تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز و برای نسبت زبری‌های مختلف را نشان می‌دهد. میزان زبری سطح لوله در شکل بر اساس

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

آئین نامه نروژ[10] برای سطح بتنی ۰/۰۰۳ در نظر گرفته شده است [۱۰]. قابل ذکر است ضریب درگ ارائه شده در شکل برای راستای عمود بر محور لوله می‌باشد و ضریب درگ مماسی بر اساس آئین نامه نروژ ، برابر با ۰/۰۳ ضریب درگ نرمال در نظر گرفته شده است.

ضریب جرم اضافی نرمال لوله بر اساس آئین نامه نروژ برابر با ۱/۰ و ضریب جرم اضافی محوری ۰/۶۴ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است با توجه به اینکه نیروی جرم اضافی محوری فقط در المان انتهایی خط-لوله ایجاد می‌شود، این ضریب فقط برای المان انتهایی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- ضریب درگ برای استوانه افقی[۹]

به طورکلی تحلیل‌های دینامیکی تحت اثر موج و جریان برای سه حالت انجام شده است. حالت اول خط-لوله و شناور روی سطح آب ساکن می‌باشد و نیروی کششی ثابت به وسیله یدک‌کش‌ها به دو انتهای خط-لوله اعمال می‌شود. حالت دوم خطلوله به وسیله یدک-کش‌ها روی سطح آب با سرعت ثابت کشیده می‌شود و فاصله یدک‌کش‌ها و طول وینچ در طول انتقال ثابت نگه داشته شده است. حالت سوم خطلوله با آزادسازی تدریجی مخازن شناوری روی بستر دریا قرار می‌گیرد و در حین آزادسازی مخازن شناوری، انتهای خطلوله با نیروی کششی ثابت نگه داشته می‌شود. همچنین آنالیز مودال برای بدست آوردن مودهای ارتعاش طبیعی خطلوله شناور روی سطح آب انجام شده است.

۳- نتایج تحلیل‌ها برای خطلوله شناور ساکن

در این حالت مطالعه پارامتری روی پاسخ‌های خط-لوله تحت تاثیر بارهای محیطی ناشی از موج و جریان و سایر پارامترهای موثر مانند ظرفیت کششی یدک‌کش و میزان ذخیره شناوری انجام شده است. نتایج تحلیل‌ها برای این حالت در بخش‌های زیر ارائه می‌شود.

۳-۱- بررسی تاثیر نیروی کششی یدک‌کش

برای بررسی تاثیر نیروی کششی یدک‌کش، خط-لوله با طول ۴۰۰ متری که دو انتهای آن بوسیله کابل به طول ۵۰ متر به وینچ شناور متصل است، مدل شده است و نیروی کششی ثابت برای وینچ‌ها در طول تحلیل در نظر گرفته شده است. موج منظم با ارتفاع ۱/۸ متر و پریود ۴/۸ ثانیه و جریان مطابق جدول ۴ به خطلوله اعمال می‌شود. موج منظم و جریان در جهت عمود بر راستای خطلوله برای کلیه تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است و تحلیل برای نیروی‌های کششی ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن انجام شده است.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با کاهش نیروی‌کششی یدک‌کش‌ها و به عبارتی کاهش سختی سیستم، جابجائی جانبی خطلوله تحت اثر موج و جریان که در جهت عمود بر راستای خط لوله اعمال می‌شوند، افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش نیروی کششی تغییر محسوسی در جابجائی‌های قائم خطلوله ندارد. این مسئله با توجه به شناور بودن خطلوله قابل توجیه است، به عبارتی مخازن شناوری در طول خطلوله عامل اصلی برای کنترل جابجائی‌های قائم خطلوله می‌باشند.

ماکزیمم لنگرخمشی جانبی در کلیه حالات ناشی از انحنای جانبی کلی خطلوله رخ می‌دهد و بیشترین مقدار در نزدیکی دو انتهای خطلوله می‌باشد. با افزایش نیروی کششی و کاهش جابجائی جانبی، لنگر خمشی ناشی از انحنای جانبی بویژه در نزدیکی دو انتهای خط-لوله، کاهش می‌یابد. ماکزیمم لنگرخمشی قائم در کلیه حالات ناشی از انحنای محدب خطلوله و در خلاف جهت انحنای قائم خطلوله بین مخازن شناوری، رخ می‌دهد. با افزایش نیروی کششی، آزادی حرکت در دو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

انتهای خطلوله کاهش می‌یابد و به تبع آن لنگر خمشی مقادیر ماکزیمم لنگر خمشی و تنش در خط لوله برای نیروهای کششی مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. با افزایش نیروی کششی، لنگرخمشی و به تبع آن تنش خمشی در طول خطلوله کاهش می‌یابد. هرچه سختی سیستم کمتر باشد، اثر افزایش نیروی کششی بر کاهش تنش خمشی بیشتر است، به طوری که برای خطلوله با طول ۴۰۰ متر با افزایش تنش محوری از ۳۰۰ به ۵۰۰ کیلونیوتن، تنش خمشی ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی با توجه به کوچک بودن نیروی کششی، تنش محوری کمی در خطلوله ایجاد می‌شود و در مجموع تنش معادل ۳۰ درصد کاهش می‌یابد (جدول ۵).

برای بدست آوردن مودهای ارتعاشی خطلوله، آنالیز مودال برای نیروهای کششی مختلف انجام شده است. جدول ۶ پریود مودهای مختلف ارتعاش خطلوله به طول ۴۰۰ متر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی کششی، سختی سیستم افزایش یافته و به تبع آن پریود مودهای ارتعاشی خطلوله کاهش می‌یابد. از طرفی با توجه به بزرگ بودن پریود مودهای ارتعاش خطلوله در مقایسه با پریود موج، امکان رخداد پدیده تشدید در مودهای اول ارتعاش خطلوله وجود ندارد. همچنین برای خطلوله با طول ۴۰۰ متر تا مود چهاردهم ارتعاش خطلوله جانبی است و سپس مودهای ارتعاش قائم خطلوله آغاز می‌شود.

۳-۲- مقایسه نتایج برای موج منظم و نامنظم

برای مقایسه رفتار خطلوله تحت اثر موج منظم و نامنظم، خط لوله با طول ۱۲۰۰ متری مدل شده است. کاهش می‌یابد.

دو انتهای خطلوله به وسیله کابل با طول ۵۰ متر به وینچ متصل شده و نیروی کششی ثابت ۱۶۰۰ کیلو نیوتن برای وینچ ها در طول تحلیل در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن موج نامنظم از موج با ارتفاع مشخصه ۱/۰ و پریود متناظر ۳/۵ ثانیه و طیف موج جان سوآپ استفاده شده است. در طول ۲۰۰۰ ثانیه تحلیل، ماکزیمم ارتفاع موج نامنظم ۱/۸۴ متر می‌باشد. برای اینکه بتوان نتایج موج نامنظم را با موج منظم مقایسه کرد، برای موج منظم از موج تکرنگ با ارتفاع ۱/۸ متر و پریود ۴/۸ ثانیه که نزدیک به ارتفاع ماکزیمم موج نامنظم می‌باشد، استفاده شده است. سرعت جریان نیز مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است، همچنین موج و جریان در کلیه تحلیل‌ها عمود بر راستای خط-لوله اعمال می‌شوند.

شکل ۳ ماکزیمم جابجائی جانبی تحت اثر موج منظم و نامنظم را نشان می‌دهد.

برای توجیه این اختلاف می توان گفت، با توجه به اینکه موج نامنظم از موج‌های با ارتفاع مختلف و کمتر از ارتفاع موج منظم تشکیل شده است، موج نامنظم نیروی کمتری در مقایسه با موج منظم به خطلوله اعمال می‌کند و به تبع آن جابجائی جانبی خط لوله ناشی از طیف موج کمتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکزیمم است.

ماکزیمم جابجائی قائم تحت اثر موج منظم و نامنظم را نشان می‌دهد.

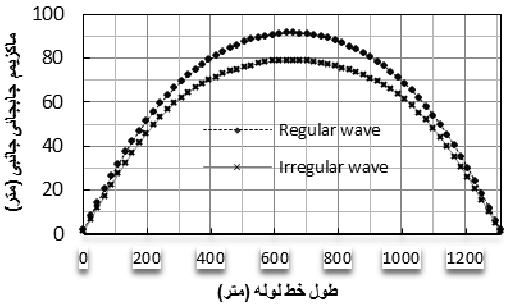
جدول ۵- مقادیر ماکزیمم لنگر خمشی و تنش برای نیروهای کششی مختلف در خطلوله به طول ٤٠٠ متر

نیروی کششی $[KN]$	لنگرخمشی ناشی از انحنای جانبی $[KN/m]$	لنگرخمشی ناشی از انحنای قائم $[KN/m]$	تنش خمشی $[MPa]$	تنش محوری $[MPa]$	تنش معادل $[MPa]$
۳۰۰	۱۱۵	۱۰۰	۹۷	۱۹	۱۱۷
۴۰۰	۷۴	۶۵	۶۴	۲۴	۸۸
۵۰۰	۵۶	۵۲	۵۳	۳۰	۸۲

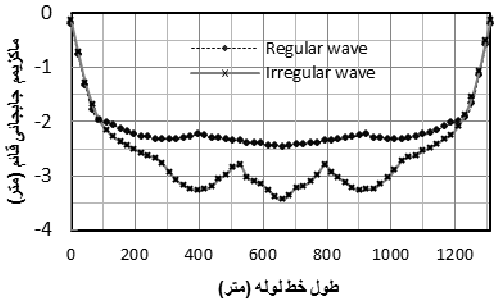
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

جدول ٦- پریود مودهای ارتعاشی طبیعی خطلوله به طول ٤٠٠ متر

نیروی کششی [KN]	پریود ارتعاش خطلوله [sec.]							
	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم	مود پنجم	مود دهم	مود بیستم	مود سی‌ام
۳۰۰	۳۱/۲۵	۲۰/۵۸	۱۴/۵۲	۱۱/۳۱	۹/۰۵	۴/۷۵	۳/۲۵	۲/۲۹
۴۰۰	۲۶/۳۹	۱۷/۹۴	۱۲/۶۱	۱۰/۱۱	۹/۱۰	۴/۲۴	۳/۰۴	۲/۱۶
۵۰۰	۲۳/۹۹	۱۶/۳۲	۱۱/۳۸	۱۱/۳۱	۸/۷۴	۳/۸۷	۲/۹۴	۲/۰۵



شکل ۳- ماکزیمم جابجائی جانبی خطلوله با طول ۱۲۰۰ متر تحت اثر موج منظم و نامنظم



شکل ٤- ماکزیمم جابجائی قائم خطلوله با طول ۱۲۰۰ متر تحت اثر موج منظم و نامنظم

مشاهده می‌شود جابجائی قائم خط لوله برای موج نامنظم بیشتر از موج منظم می باشد. برای توجیه این مسئله می‌توان گفت، عامل تاثیر گذار در جابجائی قائم خط لوله، وزن و نیروی شناوری می‌باشد و عوامل دیگر مانند طول خط لوله و نیروی کششی وینچ ها تاثیر کمی دارند. با توجه به اینکه نیروی شناوری رابطه مستقیم با ارتفاع ستون آب بالای خط لوله دارد و از طرفی موج نامنظم از موج ها با ارتفاع کمتر از موج منظم تشکیل شده است، که باعث می‌شود در یک بازه زمانی تاج‌های موج در مقایسه با حضیض‌های موج، دامنه کمتری داشته باشد، در نتیجه نیروی شناوری کاهش یافته و جابجائی قائم افزایش می‌یابد. ولی برای موج منظم با توجه به برابر بودن تاج و حضیض موج، رنج تغییرات نیروی شناوری کمتر است، به عبارتی هر کاهش نیروی شناوری ناشی از حضیض موج با تاج موج برابر، جبران می‌شود و اجازه جابجائی‌های بزرگتر داده نمی‌شود.

با توجه به نزدیک بودن جابجائی کلی خط لوله برای موج منظم و نامنظم، انتظار می‌رفت لنگرخمشی نیز برای دو حالت مذکور اختلاف کمی داشته باشند، حال آنکه لنگرخمشی برای موج نامنظم بیشتر می‌باشد. این اختلاف با توجه به نزدیک بودن جابجائی خطلوله در دوحالت، ناشی از انحناهای محلی در طول خطلوله که ناشی از موج‌های با ارتفاع کم می‌باشد، ایجاد می‌شود. بنابراین در مجموع تنش خمشی و تنش معادل ناشی از موج نامنظم بیشتر از موج منظم می‌باشد. جدول ۷ مقادیر ماکزیمم لنگر خمشی و تنش در خطلوله را برای موج منظم و نامنظم نشان می دهد.

۳-۳- بررسی تاثیر ارتفاع موج برخوردی

برای بررسی تاثیر ارتفاع موج برخوردی خطلوله به طول ۱۲۰۰ متر که دو انتهای آن بوسیله کابل به طول ۵۰ متر به وینچ شناور متصل است، مدل شده است. سه نوع موج منظم مطابق جدول ۸ در جهت عمود بر راستای خط لوله در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است ارتفاع موج و پریود متناظر آن به گونه‌ای انتخاب شده اند که دارای تیزی موج یکسان و نزدیک به تیزی موج طوفان که مقدار آن ۰/۵۵۶ است، باشند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

جدول ۷- مقادیر ماکزیمم لنگر خمشی و تنش در خطلوله به طول ۱۲۰۰ متر تحت اثر موج منظم و نامنظم

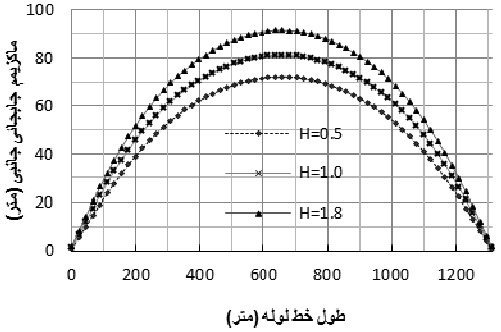
نوع موج	لنگرخمشی ناشی از انحنای جانبی $[KN/m]$	لنگرخمشی ناشی از انحنای قائم $[KN/m]$	تنش خمشی $[MPa]$	تنش محوری $[MPa]$	تنش معادل $[MPa]$
موج نامنظم	۶۰	۷۳	۶۴	۹۶	۱۶۰
موج منظم	۴۲	۵۴	۴۵	۹۶	۱۴۰

جریان نیز مطابق جدول ۴ و هم جهت با موج اعمال می‌شود. همچنین نیروی کششی ثابت ۱۶۰۰ کیلونیوتن در طول تحلیل برای هر سه حالت در نظر گرفته شده است.

جدول ۸- مشخصات موج‌های منظم

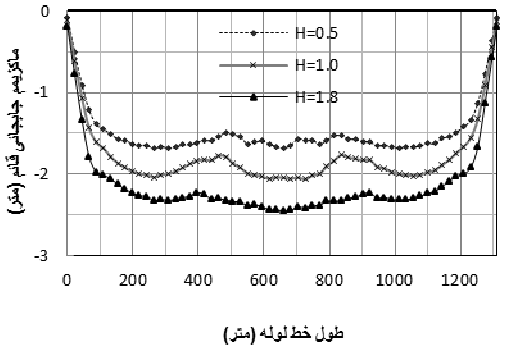
ارتفاع $[m]$	پریود $[sec]$
۰/۵	۲/۵
۱/۰	۳/۵
۱/۸	۴/۸

شکل ۵ و شکل ۶ ماکزیمم جابجائی جانبی و قائم خط لوله برای سه حالت مذکور را نشان می دهد. مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع موج، جابجائی جانبی خطلوله افزایش می‌یابد. این مسئله ناشی از افزایش سرعت ذرات موج و به تبع آن افزایش انرژی موج بوده، که باعث افزایش جابجائی جانبی بویژه در مرکز خط لوله می‌شود، لیکن میزان افزایش جابجایی متناسب با افزایش ارتفاع موج نیست.



شکل ۵- ماکزیمم جابجائی جانبی خطلوله با طول ۱۲۰۰ متر ناشی از موج‌ها با ارتفاع ۰/۵، ۱/۰و ۱/۸ متر

جابجائی قائم خطلوله نیز با افزایش ارتفاع موج، افزایش می‌یابد. ماکزیمم جابجائی قائم خطلوله زمانی که حضیض موج رخ می‌دهد و به عبارتی کمترین ارتفاع ستون آب روی خطلوله را داریم، ایجاد می‌شود. بنابراین با افزایش ارتفاع موج، ارتفاع حضیض موج نیز افزایش می‌یابد و به تبع آن ارتفاع ستون آب روی خط-لوله کاهش می‌یابد. این مسئله باعث کاهش نیروی شناوری و افزایش ماکزیمم جابجائی قائم خطلوله می‌شود. نتایج نشان می‌دهد به طور طبیعی نسبت افزایش جابجایی قائم در خطلوله بیش از نسبت افزایش جابجایی جانبی است.



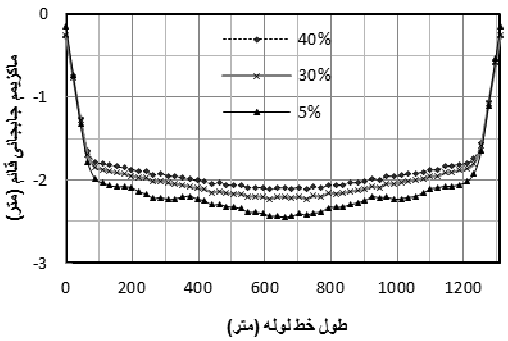
شکل ٦- ماکزیمم جابجائی قائم خطلوله با طول ۱۲۰۰ متر ناشی از موج‌ها با ارتفاع ۰/۵، ۱/۰و ۱/۸ متر

۳-۴- بررسی تاثیر افزایش ظرفیت شناوری

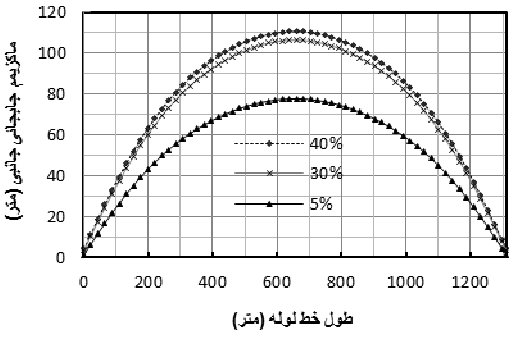
برای نصب خطلوله در آب‌های بسیار کم عمق جهت جلوگیری از برخورد خطلوله با بستر دریا، افزایش ظرفیت برای کاهش جابجائی‌های قائم خطلوله مناسب است. در این بخش به بررسی تاثیر افزایش ظرفیت شناوری می‌پردازیم. بدین منظور تحلیل بروی خطلوله به طول ۱۲۰۰ متر برای ذخیره شناوری ۵ ، ۳۰ و ۴۰ درصد انجام شده است. موج منظم با ارتفاع ۱/۸ متر و پریود ۴/۸ ثانیه و جریان مطابق جدول ۴، عمود بر راستای خط لوله اثر می‌کنند و نیروی کششی ثابت ۱۸۰۰ کیلو نیوتن در طول تحلیل به خطلوله اعمال می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

قابل ذکر است برای افزایش ذخیره شناوری، طول مخازن شناوری افزایش داده شده است و قطر و فاصله محور به محور مخازن شناوری ثابت در نظر گرفته شده است. شکل ۷ و شکل ۸ ماکزیمم جابجائی قائم و جانبی خطلوله برای سه حالت ذکر شده، نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می رفت با افزایش ذخیره شناوری، نیروی شناوری افزایش می‌یابد و به تبع آن جابجائی قائم کاهش یافته و خطلوله به سطح آب نزدیک‌تر می‌شود. این مسئله اگر چه باعث کاهش جابجائی قائم خطلوله می‌شود و لیکن با توجه به نزدیک شدن به سطح آب و افزایش سطح درگ مخازن شناوری، خط‌لوله بیشتر تحت تاثیر نیروی موج قرار می‌گیرد و به تبع آن جابجائی جانبی خطلوله افزایش قابل توجهی خواهد داشت (شکل ۸).



شکل ۷- ماکزیمم جابجائی قائم خطلوله با طول ۱۲۰۰ متر برای ذخیره شناوری ۵، ۳۰و ۴۰ درصد



شکل ۸- ماکزیمم جابجائی جانبی خطلوله با طول ۱۲۰۰ متر برای ذخیره شناوری ۵، ۳۰و ۴۰ درصد

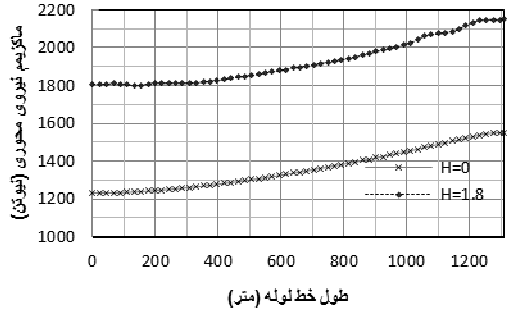
۴- نتایج تحلیل‌ها برای خطلوله در حین انتقال

فرض می‌شود در این حالت خطلوله به وسیله یدک‌کش‌ها روی سطح آب با سرعت ثابت کشیده می‌شود. در ادامه به بررسی نتایج خطلوله در حین انتقال می‌پردازیم.

۴-۱- بررسی تاثیر موج برخوردی

برای بررسی تاثیر موج برخوردی خطلوله با طول ۱۲۰۰ متر مدل شده است و تحلیل برای دو حالت یکی خطلوله تحت تاثیر موج و جریان و دیگری تحت اثر جریان و بدون در نظر گرفتن موج انجام شده است. برای حالت اول موج منظم با ارتفاع ۱/۸ متر و پریود ۴/۸ ثانیه در جهت عمود بر راستای خطلوله اعمال شده است و جریان نیز برای دو حالت در جهت عمود بر راستای خطلوله مطابق جدول ۴ اعمال شده است. همچنین یدک‌کش‌ها با سرعت ثابت ۵ کیلومتر بر ساعت در راستای محور خطلوله حرکت می‌کنند. قابل ذکر است طول وینچ‌ها و فاصله یدک‌کش‌ها در طول تحلیل ثابت و برای کلیه حالات برابر در نظر گرفته شده است.

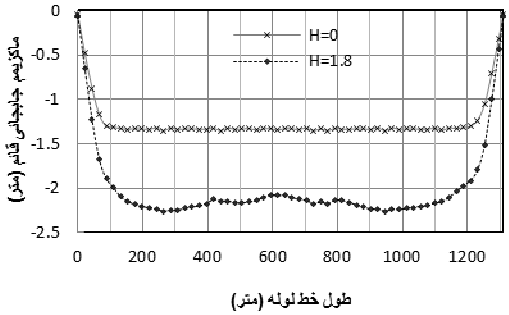
جابجایی جانبی خطلوله برای دو حالت با توجه به ثابت بودن طول وینچ‌ها در طول تحلیل تغییری ندارد و نیروی موج باعث افزایش نیروی محوری در خطلوله می‌شود. شکل ۹ نیروی محوری در طول خطلوله برای دو حالت حضور موج و جریان و حضور جریان و بدون موج نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۰ ماکزیمم جابجایی قائم خطلوله برای دو حالت مذکور نشان می‌دهد.



شکل ۹- ماکزیمم نیروی محوری خط لوله با طول ۱۲۰۰ متر و سرعت ۵ کیلومتربرساعت برای دو حالت حضور موج و بدون آن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

مشاهده می‌شود ماکزیمم جابجایی قائم برای شرایط حضور موج در مقایسه با عدم حضور آن بیشتر است. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، عامل تاثیر گذار در جابجایی قائم خطلوله وزن و نیروی شناوری است. همچنین نیروی شناوری رابطه مستقیم با ارتفاع ستون آب بالای خطلوله دارد، بنابراین اختلاف جابجایی قائم در دو حالت ناشی از کاهش ارتفاع ستون آب بالای خطلوله به علت حضیض موج می‌باشد.



شکل ۱۰- ماکزیمم جابجائی قائم خط لوله با طول ۱۲۰۰ متر و سرعت ۵ کیلومتربرساعت برای دو حالت حضور موج و بدون آن

شکل ۱۱ و شکل ۱۲ ماکزیمم لنگرخمشی ناشی از جابجایی جانبی و قائم خطلوله را برای دو حالت مذکور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود تغییرات لنگرخمشی در طول خطلوله ناشی از انحنای جانبی برای حالتی که فقط تحت اثر جریان قرار دارد، کم بوده و بیشترین مقدار در انتهای خطلوله رخ می‌دهد. با اعمال موج به خطلوله به رغم ثابت بودن جابجایی جانبی کلی خط-لوله، لنگرخمشی به ویژه در نزدیکی دو انتهای خطلوله افزایش قابل توجهی دارد. برای توجیه این مسئله می-توان گفت که نیروی موج باعث ایجاد انحنای محلی در دو انتهای خطلوله می‌شود. انحنای محلی ایجاد شده در دو انتهای خطلوله با نزدیک شدن به مرکز خطلوله میرا می‌شود، به طوری که لنگرخمشی در مرکز خط-لوله بسیار نزدیک به لنگرخمشی در حالت بدون موج می‌شود. این مسئله در مورد لنگرخمشی ناشی از انحنای قائم نیز برقرار است و برای حالت حضور موج ماکزیمم مقدار در نزدیکی دو انتهای خطلوله رخ می‌دهد و در مرکز خطلوله بسیار نزدیک به حالت بدون موج می‌باشد.

۴-۲- بررسی سرعت حرکت یدک‌کش

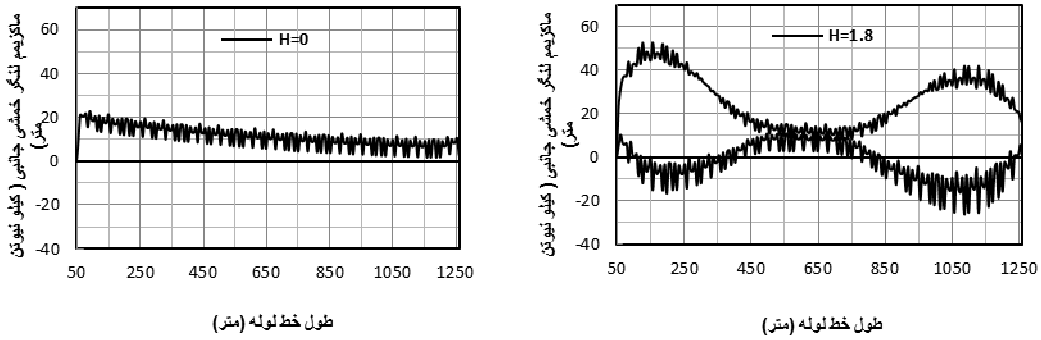
برای بررسی تاثیر سرعت حرکت یدک‌کش، یک نمونه خطلوله به طول ۴۰۰ متر مدل شده و برای سرعت‌های ۳ ، ۷ ، ۱۰ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت یدک-کش‌ها تحلیل انجام شده است. فاصله یدک‌کش‌ها و طول وینچ‌ها در طول تحلیل ثابت و برای کلیه حالات یکسان در نظر گرفته شده است. موج منظم با ارتفاع ۱/۸ متر و پریود۴/۸ ثانیه و جریان در جهت عمود بر راستای خطلوله مطابق جدول ۴ اعمال شده است.

افزایش سرعت حرکت باعث افزایش نیروی کششی مورد نیاز برای کشیدن خطلوله می‌شود. یدک‌کش جلو باید ظرفیت غلبه بر وزن شناور خطلوله و نیروهای موج و جریان به ویژه نیروی درگ را داشته باشند. شناور بودن خطلوله و کاهش وزن آن باعث کاهش نیروی کششی مورد نیاز می‌شود، از طرفی مخازن شناوری در طول خط لوله باعث افزایش نیروی درگ و به تبع آن افزایش نیروی کششی مورد نیاز می‌شوند.

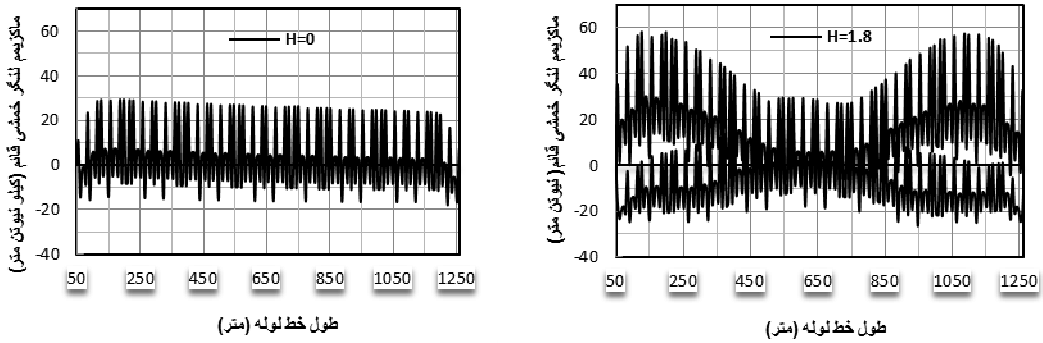
افزایش سرعت حرکت همچنین باعث کاهش نیروی کششی در انتهای خطلوله در مقایسه با ابتدای آن می‌شود. کاهش نیروی کششی باعث افزایش آزادی حرکت در انتهای خط لوله و به تبع آن افزایش تنش‌ها می‌شود، بنابراین با کنترل نیروی کششی در انتهای خطلوله به وسیله یدک کش عقب می‌توان تنش‌ها را کاهش داد.

شکل ۱۳ نیروی کششی در طول خطلوله را برای سرعت های ۳ ، ۷ ، ۱۰ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت یدک-کش‌ها نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش سرعت اختلاف نیروی کششی ابتدا و انتهای خطلوله با شدت بیشتری افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش سرعت از ۱۰ به ۱۵ کیلومتر بر ساعت، اختلاف نیروی کششی ابتدا و انتهای خطلوله ۲/۱۳برابر می‌شود. به عبارتی با توان ۲ سرعت رابطه مستقیم دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]



شکل ۱۱- ماکزیمم لنگرخمشی ناشی از انحنای جانبی در طول خط لوله به طول ۱۲۰۰ متر و سرعت ۵ کیلومتربرساعت برای دو حالت حضور موج و بدون آن

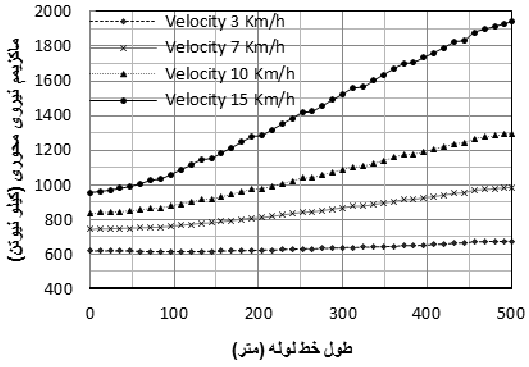


شکل ۱۲- ماکزیمم لنگرخمشی ناشی از انحنای قائم در طول خطلوله به طول ۱۲۰۰ متر و سرعت ۵ کیلومتربرساعت برای دو حالت حضور موج و بدون آن

که نشان دهنده اثر نیروی درگ می‌باشد. این مسئله همچنین باعث افزایش تنش‌خمشی در انتهای خطلوله ناشی از نزدیک شدن انحنای جانبی و افزایش آزادی حرکت در انتهای خط لوله، می‌شود.

با افزایش سرعت، تنش خمشی در انتهای خطلوله افزایش و در طول خطلوله کاهش می‌یابد و برای سرعت های بالا اختلاف تنش خمشی در طول خطلوله قابل توجه می‌شود به طوری که برای سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت تنش خمشی در انتهای خطلوله ۲/۵ برابر سایر قسمتهای خطلوله می‌باشد.

افزایش سرعت حرکت اگر چه باعث کاهش تنش محوری در انتهای خطلوله می‌شود، ولی تاثیر این کاهش در مقایسه با افزایش تنش خمشی کم می‌باشد، بنابراین تنش معادل در انتهای خطلوله با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. عکس این حالات در ابتدای خطلوله رخ می‌دهد و با افزایش سرعت حرکت یدک-کش، تنش محوری به مقدار قابل توجه افزایش می‌یابد و تنش خمشی کمی کاهش می‌یابد. بنابراین در مجموع تنش معادل افزایش می‌یابد. جدول ۹ مقادیر ماکزیمم تنش محوری، تنش خمشی، تنش معادل و نیروی محوری در ابتدا و انتهای خطلوله را برای سرعت‌های مختلف حرکت نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- ماکزیمم نیروی‌کششی خطلوله با طول ٤٠٠ متر برای سرعت حرکت ۳، ۷، ۱۰و ۱۵کیلومتربرساعت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

جدول ۹- مقادیر ماکزیمم تنش و نیروی محوری خط لوله برای سرعت‌های حرکت ۳، ۷، ۱۰و ۱۵ کیلومتربرساعت

سرعت حرکت یدک‌کش $[Km/hr]$	نیروی محوری در ابتدای خطلوله $[KN]$	نیروی محوری در انتهای خطلوله $[KN]$	تنش محوری $[MPa]$	تنش خمشی $[MPa]$	تنش معادل $[MPa]$
۳	۶۹۰	۶۱۰	۴۰	۷۶	۱۰۱
۷	۹۹۵	۷۵۰	۵۷	۸۸	۱۲۴
۱۰	۱۳۰۰	۸۳۰	۷۴	۹۸	۱۴۲
۱۵	۱۹۴۰	۹۶۰	۱۱۰	۱۲۴	۱۷۵

۴-۳- بررسی تاثیر زاویه برخورد موج

برای بررسی تاثیر زاویه برخورد موج و جریان یک نمونه خطلوله به طول ۴۰۰ متر مدل شده است و برای زوایای ۰ ، ۳۰ ، ۶۰ ، ۹۰ ، ۱۲۰ ، ۱۵۰ ، ۱۸۰ درجه برخورد موج و جریان تحلیل انجام شده است. سرعت حرکت یدک‌کش‌ها برای کلیه حالات ۵ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است و فاصله آنها و طول وینچ در طول تحلیل ثابت در نظر گرفته شده است. موج منظم با ارتفاع ۱.۸ متر و پریود ۴.۸ ثانیه و جریان مطابق جدول ۴ به خطلوله اعمال می‌شود.

با توجه به اینکه خطلوله در حال کشیده شدن است ماکزیمم جابجائی جانبی آن به انتهای خطلوله نزدیک می‌شود و زمانی که موج با زوایای بزرگتر از ۹۰ درجه به خطلوله اعمال می‌شود، جابجائی جانبی ماکزیمم به انتهای خطلوله نزدیک‌تر می‌شود، به طوری که برای زاویه ۱۵۰ درجه بیشترین جابجائی جانبی در انتهای خطلوله را داریم. همچنین مشاهده می شود برای زاویه ۶۰ درجه بیشترین جابجائی جانبی در ابتدای خطلوله به وجود می‌آید. با بررسی لنگر خمشی ناشی از انحنای جانبی مشخص می‌شود برای زاویه ۱۵۰ درجه بیشترین لنگر خمشی را وجود دارد. این مسئله ناشی از دو عامل است، یکی حرکت خطلوله که باعث نزدیک شدن ماکزیمم جابجائی جانبی به انتهای خطلوله و به تبع آن افزایش انحنای جانبی و کاهش نیروی کششی که باعث افزایش آزادی حرکت در انتهای خط می‌شود و عامل دیگر زاویه برخورد موج و جریان است که تقریبا" عمود بر انحنای ماکزیمم خطلوله بوده و باعث ایجاد انحنای محلی و گسترش آن در طول خطلوله می‌شود.

جابجائی ماکزیمم قائم خطلوله برای زوایای مختلف تغییر محسوسی ندارد ولی زاویه برخورد موج و جریان باعث ایجاد انحنا محلی در خطلوله و گسترش آن در کل طول آن می‌شود. مشابه لنگر ناشی از انحنای جانبی، زاویه ۱۵۰ درجه بیشترین لنگر خمشی ناشی از انحنای قائم را دارد و برای زوایای ۰ و ۱۸۰ درجه که جهت موج و جریان در راستای خطلوله می‌باشد، افزایش قابل توجهی در مقایسه با زاویه ۹۰ درجه مشاهده می‌شود.

زاویه برخورد موج و جریان باعث ایجاد نیروی کششی مختلف در خطلوله در حال کشیدن می‌شود. برای زوایایی که هم جهت یا نزدیک به جهت حرکت خط-لوله می‌باشند، نیروی کششی مورد نیاز برای غلبه بر نیروی هیدرودینامیک کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه بین جهت حرکت خطلوله با موج و جریان این نیرو افزایش می‌یابد. برای زاویه صفر درجه کمترین نیروی کششی در خطلوله ایجاد می‌شود و امکان افزایش سرعت حرکت را ایجاد می‌کند و بیشترین نیروی کششی برای زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه و یا به عبارتی زوایای نزدیک به جهت عمود بر راستای خط-لوله رخ می‌دهد. نکته قابل ذکر دیگر افزایش اختلاف نیروی کششی دو انتهای خطلوله با افزایش زوایه برخورد برای زوایای بزرگتر از ۹۰ درجه می‌باشد. از طرفی برای زوایای کوچکتر از ۹۰ درجه این اختلاف کاهش می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

۵- نتایج تحلیل‌ها برای خطلوله در حین قراردادن روی بستر دریا

در روش نصب خطلوله با روش کشیدن در سطح آب، پس از رسیدن به محل، خطلوله با آزادسازی تدریجی مخازن شناوری روی بستر دریا قرار می‌گیرد. مدل مورد مطالعه برای این حالت شامل یک نمونه خط لوله با طول ۴۰۰ متر است که ابتدای خطلوله به شمع کوبیده شده در محل مهار شده است و انتهای آن نیز به وسیله کابل به وینچ یدک‌کش متصل است و نیروی کششی ثابتی به خطلوله اعمال می کند (شکل ۱۴).

مخازن شناوری به وسیله المان ارتباط دهنده به خط-لوله متصل است و در طول تحلیل با آزادسازی المان ارتباط دهنده آزاد می‌شوند. در هر گام زمانی یک المان ارتباط دهنده آزاد می‌شود و طول هر گام زمانی ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است، به طوری که حرکت‌های خطلوله بعد از هر آزاد سازی پایدار شود. مشخصات بستر نیز مطابق جدول ۱۰ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است، برنامه قابلیت در نظر گرفتن اندرکش خاک و خط لوله را ندارد و بستر دریا را با یک سری فنر با سختی مشخص در نظر می‌گیرد. در ادامه به بررسی نتایج در حین قراردادن خطلوله روی بستر دریا می‌پردازیم.

جدول ۱۰- مشخصات بستر دریا

ضریب اصطکاک جانبی	۱/۰
ضریب اصطکاک محوری	۰/۵
سختی خاک $[KPa]$	۱۰۰

۵-۱- بررسی تاثیر موج برخوردی

برای بررسی تاثیر ارتفاع موج برخوردی در حین قرار دادن خطلوله روی بستر دریا، تحلیل برای خطلوله به طول ۴۰۰ متر و در عمق ۱۰ متری و برای شرایط بدون موج و موج منظم با ارتفاع‌های مختلف مطابق جدول ۱۱ انجام شده است. جریان نیز مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است و موج و جریان در راستای خطلوله و در جهت قرار دادن خطلوله روی بستر دریا، اعمال می‌شوند. در طول تحلیل انتهای خطلوله با نیروی ثابت ۱۰۰ کیلو نیوتن کشیده می‌شود.

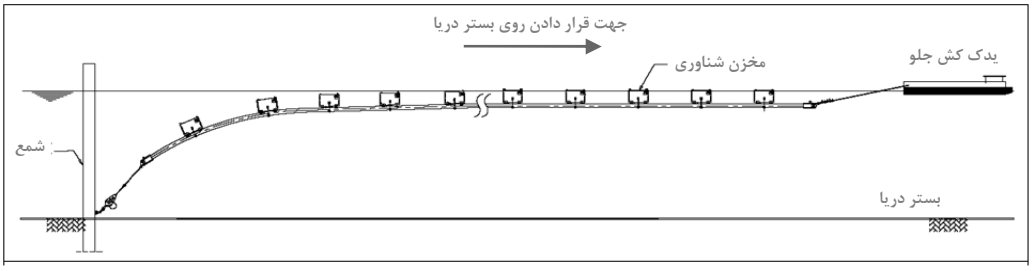
شکل ۱۵ لنگرخمشی ماکزیمم ناشی از انحنای قائم در طول خطلوله را برای ارتفاع‌های موج ۰، ۰/۵ و ۱/۰ متری نشان می‌دهد. قابل ذکر است لنگرخمشی مثبت ناشی از انحنای کوژ (انحنای کلی روی سطح آب) و لنگرخمشی منفی ناشی از انحنای کاو (انحنای کلی روی بستر دریا) می‌باشد.

جدول ۱۱- مشخصات موج‌های برخوردی

ارتفاع $[m]$	پریود $[sec]$
۰/۵	۲/۵
۱/۰	۳/۵

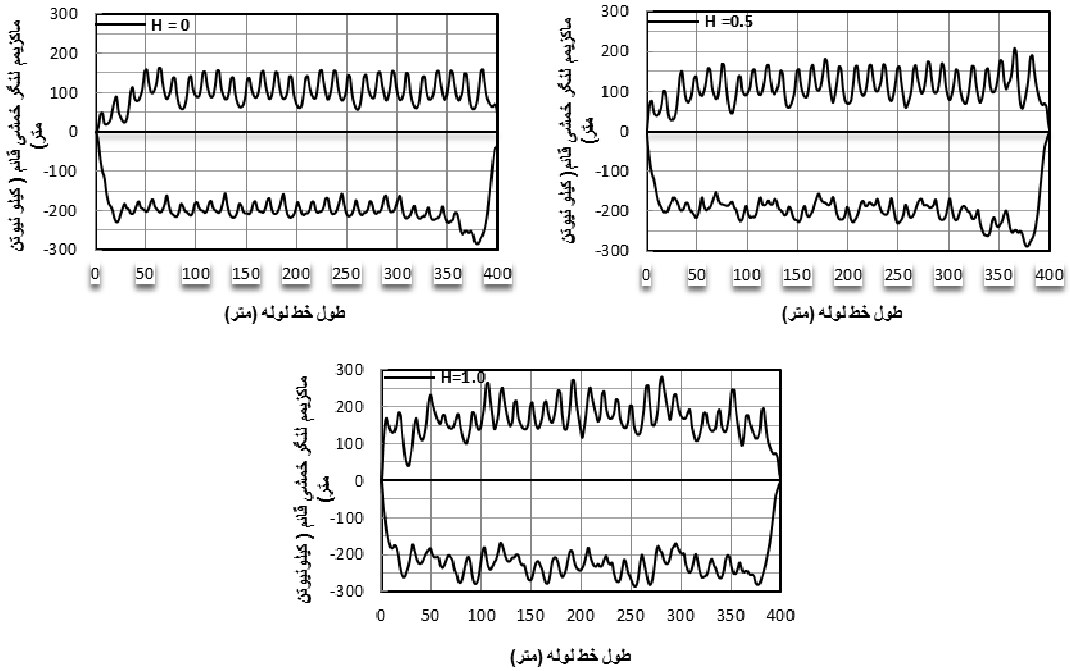
با توجه به آزادسازی تدریجی مخازن شناوری شکل S خطلوله در طول تحلیل ثابت است و به تبع آن تغییرات لنگر خمشی ناشی از انحنای کوژ و انحنای کاو در طول خطلوله تقریبا ثابت می‌ماند و فقط در انتهای قرار دادن خطلوله روی بستر، شکل J خطلوله باعث ایجاد انحنای کاو بزرگتری می‌شود و به تبع آن لنگر خمشی بزرگتری ایجاد می‌شود. با اضافه شدن موج انحنای محلی در طول خطلوله ایجاد می‌شود و باعث افزایش لنگرخمشی می‌شود. این افزایش برای ارتفاع ۰/۵ متری موج محسوس نبوده ولی برای ارتفاع ۱/۰ متری موج این افزایش قابل توجه است.

با توجه به ثابت بودن نیروی کششی برای کلیه حالات، تغییرات تنش معادل بری ارتفاع‌های مختلف موج



شکل ۱۴- قرار دادن خطلوله روی بستر دریا

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]



شکل ۱۵- ماکزیمم لنگرخمشی ناشی از انحنای قائم خطلوله با طول ٤٠٠ متر برای ارتفاع‌های ۰، ۰/۵ و ۱/۰ متری موج

مشابه تغییرات لنگرخمشی قائم می‌باشد و بیشترین مقدار آن در نزدیکی انتهای خطلوله رخ می‌دهد.

۵-۲- بررسی تاثیر عمق آب

برای بررسی تاثیر عمق آب در حین قرار دادن خطلوله روی بستر دریا، تحلیل برای خطلوله به طول ۴۰۰ متر و در عمق‌های ۴ ، ۱۰ و ۲۰ متری انجام شده است. در طول تحلیل انتهای خطلوله با نیروی ثابت ۱۰۰ کیلو نیوتن کشیده می‌شود و جریان مطابق جدول ۴ در راستای خطلوله و در جهت قرار دادن خطلوله روی بستر دریا، اعمال می‌شود. قابل ذکر است برای کلیه حالات با توجه به اینکه عملیات لوله‌گذاری در شرایط دریای آرام انجام می‌شود، تحلیل‌ها بدون حضور موج انجام شده است.

ماکزیمم لنگر خمشی قائم ناشی از انحنای کاو و انحنای کوژ در طول خط لوله را برای عمق های ۴، ۱۰ و ۲۰ متری نشان می‌دهد. با افزایش عمق لوله‌گذاری، لنگرخمشی ناشی از انحنای کوژ و انحنای کاو خطلوله افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد انحنای کاو خط-لوله روی بستر دریا محسوس‌تر است، به طوری که با افزایش عمق از ۴ به ۲۰ متر لنگرخمشی ناشی از انحنای کاو ۲/۵ برابر می‌شود، حال آنکه لنگرخمشی ناشی از انحنای کوژ ۱/۵ برابر می‌شود. برای توجیه این مسئله می‌توان گفت، مخازن شناوری در طول خطلوله نقش دنباله را ایفا می‌کنند و باعث کنترل انحنای کوژ خطلوله می‌شوند، حال آنکه عامل اصلی برای کنترل انحنای کاو خطلوله نیروی کششی اعمالی می‌باشد. بنابراین با افزایش عمق با توجه به ثابت بودن نیروی کششی و همچنین ثابت بودن ترتیب آزادسازی مخازن شناوری، انحنای کاو روی بستر افزایش بیشتری در مقایسه با انحنای کوژ دارد.

نکته قابل ذکر دیگر لنگرخمشی در نزدیکی انتهای خطلوله ناشی از شکل J مایل خطلوله هنگام قرار دادن روی بستر می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق و به عبارتی نزدیک شدن J قائم، انحنای کاو خطلوله افزایش می‌یابد و از طرفی اختلاف انحنای کاو انتهای خطلوله در مقایسه با سایر قسمت‌های خطلوله افزایش می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

جدول ۱۲- مقادیر ماکزیمم لنگر خمشی قائم در طول خط لوله را برای عمق های ٤، ۱۰ و ۲۰ متری

	عمق آب دریا $[m]$		
	۵	۱۰	۲۰
لنگرخمشی ناشی از انحنای کوژ $[KN/m]$	۱۰۰	۱۶۰	۱۵۰
لنگرخمشی ناشی از انحنای کاو $[KN/m]$	۱۴۰	۲۸۰	۳۵۰

۵-۳- بررسی تاثیر نیروی کششی یدک‌کش

برای بررسی تاثیر نیروی کششی یدک‌کش در حین قرار دادن خطلوله روی بستر دریا، تحلیل برای خطلوله به طول ۴۰۰ متر و نیروهای کششی ۱۰۰ ، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن یدک‌کش انجام شده است. برای کلیه حالات عمق آب دریا ۱۰ متر می‌باشد و جریان مطابق جدول ۴ و در راستای خطلوله و در جهت قرار دادن خطلوله روی بستر دریا، اعمال می‌شوند. . قابل ذکر است برای کلیه حالات با توجه به اینکه عملیات لوله‌گذاری در شرایط دریای آرام انجام می‌شود، تحلیل‌ها بدون حضور موج انجام شده است.

جدول ۱۳ ماکزیمم لنگر خمشی قائم ناشی از انحنای کاو و انحنای کوژ، همچنین تنش معادل در طول خط لوله را برای نیروهای کششی ۱۰۰ ، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش نیروی کششی یدک‌کش، انحنای کاو و انحنای کوژ کاهش می‌یابد و به تبع آن لنگر خمشی نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نیروی کششی یدک‌کش تنش خمشی کاهش می‌یابد و به رغم افزایش تنش محوری، تنش معادل کاهش می‌یابد. قابل ذکر است افزایش بیش از اندازه نیروی کششی تاثیری در کاهش تنش معادل ندارد به طوری که با افزایش نیروی کششی از ۳۰۰ به ۵۰۰ کیلونیوتن، تنش معادل تغییری نمی‌کند.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به طور کلی تحلیل‌ها برای سه حالت شامل خطلوله ساکن، خطلوله در حال انتقال و خطلوله در حال قرار دادن روی بستر دریا انجام شده است. اهم نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر برای سه حالت مذکور در محدوده پارامترهای مورد مطالعه به شرح زیر است:

۱- جابجائی جانبی خطلوله ناشی از طیف موج کمتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکزیمم طیف موج می‌باشد، حال آنکه لنگرخمشی برای طیف موج بیشتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکزیمم می‌باشد. از طرفی ماکزیمم جابجائی قائم خطلوله ناشی از طیف موج بیشتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکزیمم می‌باشد.

۲- با افزایش سرعت حرکت، انحنای جانبی خطلوله به انتهای آن نزدیک‌تر می‌شود و باعث افزایش تنش خمشی ناشی انحنای جانبی می‌شود. افزایش سرعت حرکت اگر چه باعث کاهش تنش محوری در انتهای خطلوله می‌شود، ولی به دلیل افزایش تنش خمشی کم می‌باشد، بنابراین تنش معادل در انتهای خطلوله افزایش می‌یابد. عکس این حالات در ابتدای خطلوله رخ می‌دهد. بنابراین سرعت بهینه سرعتی است که تنش معادل در ابتدا و انتهای خطلوله حداقل اختلاف را داشته باشند.

۳- با افزایش عمق لوله گذاری، لنگرخمشی ناشی از انحنای کوژ و انحنای کاو خطلوله افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد انحنای کاو خطلوله روی بستر دریا محسوس‌تر است. بنابراین با افزایش عمق می‌بایست نیروی کششی افزایش یابد تا تنش‌ها در حد مجاز باقی بماند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]

جدول ۱۳- مقادیر ماکزیمم لنگر خمشی قائم و تنش معادل در طول خط لوله را برای نیروهای کششی ۱۰۰ ، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن

	نیروی کششی یدک‌کش [KN]		
	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰
لنگرخمشی ناشی از انحنای کوژ [KN/m]	۱۶۵	۱۲۰	۶۰
لنگرخمشی ناشی از انحنای کاو [KN/m]	۲۸۰	۲۰۰	۲۰۰
تنش معادل [MPa]	۲۴۰	۱۷۵	۱۷۵

کلید واژگان

1-Lay
2-Tow
3-Orcaflex
4-Surface Wave Tow
5-Catenary tow
6-Wamit
7-Haskind
8-API-RP-2A-WSD
9-JONSWAP
10-DNV-RP-C205

۸- مراجع

1-Gue, B., Song, S., Chacko, J., and Ghalambor, A. (2005). "Offshore Pipeline". Elsevier.
2-Bai, Y., and Bai, Q. (2005). "Subsea Pipelines and Risers". Elsevier.
3-Ley, T., and Reynoild, D. (2006). "Pulling and towing of pipeline and bundles". Offshore Technology Conference, (p. OTC 18233). Houston.
4-Silva, D. M., Bahiense, R. A., Jacob, B. P., Torres, F. G., and Medeiros, A. R. (2007). "Numerical simulation of offshore pipeline installation by lateral defelection procedure". Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (pp. OMAE2007-29703). San Diego.
5-Alliot, V., Zhang, H., Perinet, D., and Sinha, S. (2006). "Development of towing techniques for deepwater flowlines and risers". Offshore Technology Conference, (p. OTC 17826). Houston.
6-Mendes, P. L., Jacob, B. P., Vaz, M. A., and Correa, F. N. (2007). "Comparison of Coupled and Uncoupled Analysis Methodologies in Towing Pipeline Installation Modeling". Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (pp. OMAE2007-29506). San Diego.
7-Orcaflex user manual-version 8.4a9. (2000). Orcina Ltd. Cumbria,UK.
8-API-RP-2A-WSD. (1993). Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design. 20th ed .
9- Sarpkaya, T., and Isaacson, M. (1995). Mechanics of wave forces on offshore structures.
10-DNV-RP-C205. (2007, April). Environmental Conditions and Environmental Loads. Det Norske Veritas.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.1.1]