

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

علیرضا رعنایی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر آقا کوچک<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

### چکیده

نصب خطوط لوله دریایی به دو روش خوابانیدن<sup>۱</sup> و کشیدن<sup>۲</sup> 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 تنفس و تغییرشکل در طول خط‌لوله در حین انتقال به روش کشیدن روی سطح آب در آبهای کم عمق، با استفاده از نرم افزار ارکافلس<sup>۳</sup> 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 جانی و قائم و مقادیر تنفس‌های 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 جابجایی جانبی خط‌لوله ناشی از طیف موج کمتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماقریم طیف موج می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت حرکت، انحنای جانبی خط‌لوله به انتهای آن نزدیک‌تر می‌شود و باعث افزایش تنفس خمی ناشی احنای 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<sup>1</sup>, A.A.Aghakouchak<sup>2</sup>

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 مسؤول مقاله alireza.ranaei@yahoo.com

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

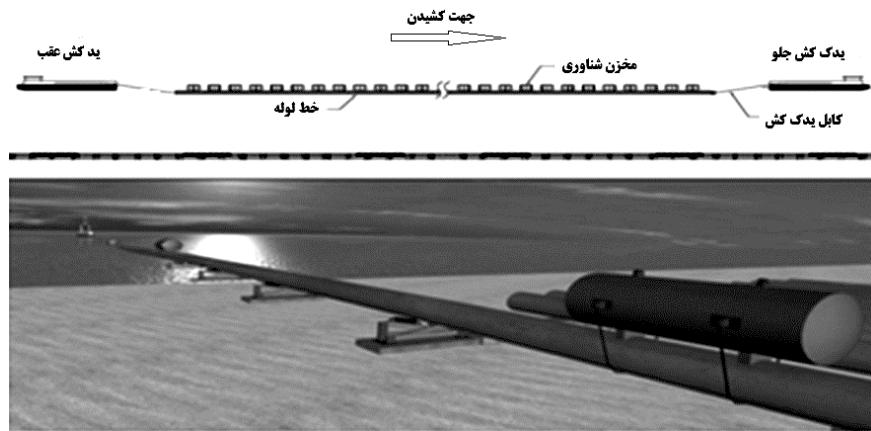
مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد. در این روش مخازن شناوری در طول خط‌الوله متصل شده و خط‌الوله به وسیله دو یدک‌کش روی سطح آب کشیده می‌شود [۳] (شکل ۱).

دانیو ماچادو و همکاران در سال ۲۰۰۷ به تحلیل عددی خط‌الوله در حین به آب اندازی موازی خط‌الوله پرداخته‌اند [۴]. پروژه مورد بررسی، تعویض خط‌الوله انتقال نفت بین سکوی پی ایکس ای و بوی فرانس در فراساحل بزرگ می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های لوله گذاری با بارج لوله‌گذار، روش نصب Tow برای این پروژه انتخاب شده است. در ابتدا خط‌الوله موازی خط ساحل ساخته شد (در ساحل کنتو) و سپس بوسیله کابل به یدک‌کش متصل گردید. با حرکت یدک‌کش به تدریج انحنای جانبی در خط‌الوله ایجاد شد. تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی برای جهت‌های مختلف حرکت شامل  $-5^{\circ}$ ،  $0^{\circ}$ ،  $10^{\circ}$ ،  $15^{\circ}$  و  $20^{\circ}$  درجه و سرعت‌های مختلف یدک‌کش شامل  $1\text{ km/h}$ ،  $2\text{ km/h}$  و  $3\text{ km/h}$  بر ساعت انجام شده است. شرایط محیطی نیز آرام در نظر گرفته شده است.

آلیوت و همکاران در سال ۲۰۰۶، چهار نوع خط‌الوله به طول  $20\text{ km}$  در حال انتقال به روش کشیدن موجی شکل روی سطح آب<sup>۴</sup> را مورد بررسی قرار دادند [۵]. طراحی خط‌الوله برای عمق  $1800\text{ m}$  تا  $2500\text{ m}$  انجام شده است. مخازن شناوری در طول خط‌الوله بسته شده اند و سه نقطه با شناوری مشتمل و چهار نقطه با شناوری منفی را تأمین می‌کنند. کل سیستم با در نظر گرفتن اثر حرکت‌های یدک‌کش‌های عقب و جلو و یدک‌کش‌های کمکی ناشی از موج، مدل می‌شود.

با توجه به اهمیت خطوط انتقال و هزینه‌های 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 می‌شود. روش خوابانیدن یکی از روش‌های معمول و پرکاربرد نصب خط لوله دریایی می‌باشد. در این روش قطعات خط لوله در بارج لوله گذاری به یکدیگر جوش داده شده و به تدریج به آب انداخته می‌شوند.

در روش کشیدن خط‌الوله با طول مشخص در ساحل ساخته می‌شود و پس از به آب اندازی به وسیله یدک‌کش به سایت نصب انتقال داده می‌شود. پس از انتقال خط‌الوله به سایت نصب، با تامین تمہیدات لازم خط‌الوله روی بستر دریا قرار داده می‌شود [۱]. با توجه به اینکه در روش کشیدن خط‌الوله در ساحل ساخته می‌شود، کیفیت جوشکاری و آزمایش‌های مورد نیاز در مقایسه با روش خوابانیدن که این عملیات در فراساحل بر روی بارج انجام می‌شود، افزایش می‌یابد و از طرفی هزینه‌های ساخت کاهش می‌یابد. این مسئله همچنانی 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 خط‌الوله می‌تواند در سطح آب و یا بر روی بستر دریا و یا فاصله معینی از بستر دریا کشیده شود. در آب های بسیار کم عمق با توجه به محدودیت‌هایی 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



شکل ۱- خط لوله و مخزن شناوری در روش کشیدن در سطح آب

یدک کش جلو، نتایج آنالیز کوپله ۱۴ درصد بیشتر است، در حالیکه برای مقاطع نزدیک یدک کش عقب نتایج آنالیز غیرکوپله ۲۰ درصد بیشتر است. برای ارتفاع ۱ متری موج، تنش به ۱۵۰ مگاپاسکال می‌رسد و در نیمه اول اینجا خط لوله، نتایج آنالیز کوپله ۲۰ درصد بیشتر است، در حالیکه برای نیمه دوم اینجا نتایج آنالیز غیرکوپله ۲۵ درصد بیشتر است. برای ارتفاع ۱/۵ متری موج، تنش به ۲۰۰ مگا پاسکال در نزدیکی یدک کش 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 خط لوله با دو طول مشخص (۴۰۰ و ۱۲۰۰ متری) می‌باشد که دو انتهای آن به کابل متصل شده است و کابل‌ها به وسیله وینچ به یدک کش جلو و عقب متصل شده‌اند. برای مشخصات لوله از یک نمونه خط لوله در خلیج فارس (جدول ۲) استفاده شده است.

برای تامین شناوری خط لوله، 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.

برای کنترل پاسخ‌های خط لوله تحت نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از موج و جریان و حرکت‌های یدک کش‌ها، تحلیل دینامیکی انجام شده است. نتایج اصلی تحلیل برای یک نمونه خط لوله به قطر خارجی 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 خط لوله به روش کشیدن قوسی<sup>۵</sup> 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 می‌شود و طول کلی خط لوله ۳۲۰۰ متر می‌باشد که به وسیله دو یدک کش به ظرفیت کششی ۱۸۰ تن کشیده می‌شود.

در آنالیز غیر کوپل ضرایب اندرکنش موج و حرکت‌های یدک کش توسط برنامه‌های اختصاص یافته براساس پتانسیل مانند وامیت<sup>۶</sup> محاسبه می‌شود (البته بدون توجه به حضور خط لوله) و سپس حرکت‌ها را به مدل خط لوله اعمال می‌کنند. آنالیز کوپل در حوزه زمان است و در آن ضریب نیروی هسکینند<sup>۷</sup> مشابه آنالیز حرکت‌های یدک کش 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

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

حالت بارگذاری	سرعت ترکیبی جریان زاویه موج و جریان نسبت به راستای خط لوله [deg]	شرايط	ماکزیمم نیروها	جابجائي
جانبی	قائم [m]	تنش معادل [MPa]	نیروی محوری [KN]	
۱	.	۲۵	۵۴۹	.
۲	.	۵۹	۲۱۱۳	.
۳	۹۵	۷۲	۲۴۵۳	۹۰
۴	۱۹۱	۶۲	۲۰۰۶	۹۰

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 ۴- شرایط محیطی

۰/۸	سرعت جریان در سطح آب [m/sec]
۰/۶	سرعت جریان در نزدیکی بستر دریا [m/sec]
۱۰	عمق آب دریا [m]
۱۰/۲۵	وزن مخصوص آب دریا [KN/m]

به طور کلی تحلیل‌ها برای خط‌لوله تحت اثر موج منظم و موج نامنظم انجام شده است. با توجه محدوده کاربرد تئوری‌های موج ارائه شده در آئینه‌نامه آمریکا<sup>۱</sup>، از تئوری موج استریم مرتبه سوم برای موج منظم استفاده شده است [۸]. با توجه به اینکه طیف موج جان سوآپ<sup>۹</sup> تطابق خوبی با طیف موج خلیج فارس دارد، برای موج نامنظم از طیف موج جان سوآپ با ضریب ۶/۳ 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

جدول ۲- مشخصات خط‌لوله

۳۲۳/۸۵	قطر خارجی [mm]
۱۷/۵	ضخامت [mm]
۴۱۴	تنش تسلیم [MPa]
$۲/۰۷ \times 10^5$	مدول الاستیسیته [KPa]
۰/۳	ضریب پواسون
۸۵	ضخامت پوشش بتونی [mm]
۳۰۴۰	وزن مخصوص پوشش بتونی [ $Kg/m^3$ ]
۲/۵	ضخامت پوشش خوردگی [mm]
۹۰۰	وزن مخصوص پوشش خوردگی [ $Kg/m^3$ ]
۴/۶۰	وزن خشک [KN/m]
۲/۶۳	وزن شناور [KN/m]

جدول ۳- مشخصات مخزن شناوری

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

کابل مدل شده در دو انتهای خط لوله، ۵۰ متر طول دارد. وظیفه وینچ متصل‌کننده کابل به یدک‌کش، تامین نیروی کششی تعريف 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

### ۳- نتایج تحلیل‌ها برای خط‌لوله شناور ساکن

در این حالت مطالعه پارامتری روی پاسخ‌های خط‌لوله تحت تأثیر 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.

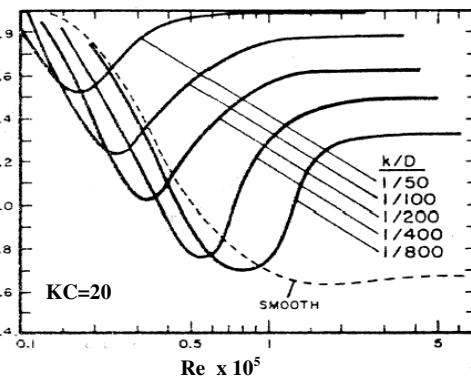
#### ۳-۱- بررسی تأثیر نیروی کششی یدک‌کش

برای بررسی تأثیر نیروی کششی یدک‌کش، خط‌لوله 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 نیروی کششی ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتون انجام شده است.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با کاهش نیروی کششی یدک‌کش‌ها و به عبارتی کاهش سختی سیستم، جابجایی جانبی خط‌لوله تحت اثر موج و جریان که در جهت عمود بر راستای خط‌لوله اعمال می‌شوند، افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش نیروی کششی تغییر محسوسی در جابجایی‌های قائم خط‌لوله ندارد. این مسئله با توجه به شناور بودن خط‌لوله قبل توجیه است، به عبارتی مخازن شناوری در طول خط‌لوله عامل اصلی برای کنترل جابجایی‌های قائم خط‌لوله می‌باشدند. 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 جابجایی جانبی، لنگر خمشی ناشی از انحنای جانبی جانی بویژه در نزدیکی دو انتهای خط‌لوله، 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

آئین نامه نروژ<sup>۱۰</sup> برای سطح بتنی ۰/۰۳ 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 خط‌لوله ایجاد می‌شود، این ضریب فقط برای المان انتهایی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- ضریب درگ برای استوانه افقی [۹]

به طور کلی تحلیل‌های دینامیکی تحت اثر موج و جریان برای سه حالت انجام شده است. حالت اول خط‌لوله و شناور روی سطح آب ساکن می‌باشد و نیروی کششی ثابت به وسیله یدک‌کش‌ها به دو انتهای خط‌لوله اعمال می‌شود. حالت دوم خط‌لوله به وسیله یدک‌کش‌ها 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.

کاهش می‌یابد.

دو انتهای خط‌لوله به وسیله کابل با طول ۵۰ متر به وینچ متصل شده و نیروی کششی ثابت ۱۶۰ کیلو نیوتون برای وینچ‌ها 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 ۲۰۰ ثانیه تحلیل، ماکریم 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 ماکریم 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 خط‌لوله اعمال می‌شوند.

شکل ۳ ماکریم جابجایی جانبی تحت اثر موج منظم و نامنظم را نشان می‌دهد.

برای توجیه این اختلاف می‌توان 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 جابجایی جانبی خط‌لوله ناشی از طیف موج کمتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکریم است.

ماکریم جابجایی قائم تحت اثر موج منظم و نامنظم را نشان می‌دهد.

انتهای خط‌لوله کاهش می‌یابد و به تبع آن لنگر خمشی مقادیر ماکریم لنگر خمشی و تنش در خط‌لوله برای نیروهای کششی مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. با افزایش نیروی کششی، لنگر خمشی 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 کیلونیوتون، 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 تشديد 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، خط‌لوله با طول ۱۲۰۰ متری مدل شده است.

جدول ۵- مقادیر ماکریم لنگر خمشی و تنش برای نیروهای کششی مختلف در خط‌لوله به طول ۴۰۰ متر

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

جدول ۶- پریود مودهای ارتعاشی طبیعی خط لوله به طول ۴۰۰ متر

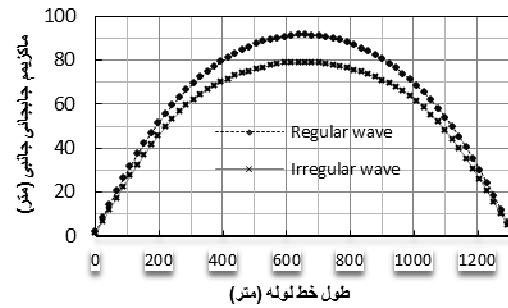
پریود ارتعاش خط لوله [sec.]								نیروی کششی [KN]
	مود سیام	مود پنجم	مود چهارم	مود سوم	مود دوم	مود اول		
۲/۲۹	۳/۲۵	۴/۲۷	۹/۰۵	۱۱/۳۱	۱۴/۵۲	۲۰/۵۸	۳۱/۲۵	۳۰۰
۲/۱۶	۳/۰۴	۴/۲۴	۹/۱۰	۱۰/۱۱	۱۲/۶۱	۱۷/۹۴	۲۶/۳۹	۴۰۰
۲/۰۵	۲/۹۴	۳/۸۷	۸/۷۴	۱۱/۳۱	۱۱/۳۸	۱۶/۳۲	۲۳/۹۹	۵۰۰

دامنه کمتری داشته باشد، در نتیجه نیروی شناوری کاهش یافته و جابجایی 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 جابجایی‌های بزرگ‌تر داده نمی‌شود.

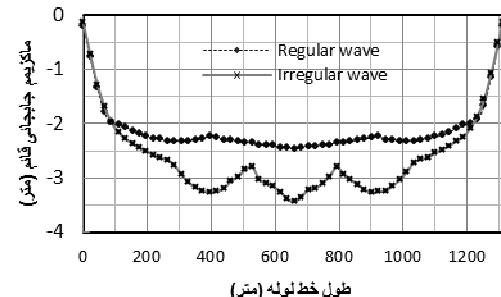
با توجه به نزدیک بودن جابجایی کلی خط لوله برای موج منظم و نامنظم، انتظار می‌رفت لنگرخمشی نیز برای دو حالت مذکور اختلاف کمی داشته باشند، حال آنکه لنگرخمشی برای موج نامنظم بیشتر می‌باشد. این اختلاف با توجه به نزدیک بودن جابجایی خط لوله در دو حالت، ناشی از انحرافات محلی در طول خط لوله که ناشی از موج‌های 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 ماکریم لنگر خمشی و تنش در خط لوله را برای موج منظم و نامنظم نشان می‌دهد.

### ۳-۳- بررسی تاثیر ارتفاع موج بر خوردی

برای بررسی تاثیر ارتفاع موج بر خوردی خط لوله 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.



شکل ۳- ماکریم جابجایی جانبی خط لوله با طول ۱۲۰۰ متر تحت اثر موج منظم و نامنظم



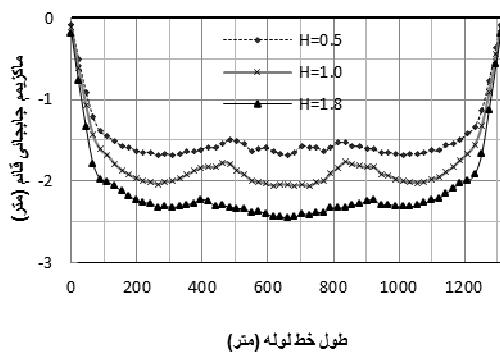
شکل ۴- ماکریم جابجایی قائم خط لوله با طول ۱۲۰۰ متر تحت اثر موج منظم و نامنظم

مشاهده می‌شود جابجایی قائم خط لوله برای موج نامنظم بیشتر از موج منظم می‌باشد. برای توجیه این مسئله می‌توان گفت، عامل تاثیر گذار در جابجایی 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 تاج های موج در مقایسه با حضیض های موج،

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

نوع موج	لنگر خمی ناشی از انحنای جانبی [KN/m]	تنش محدود از انحنای قائم [KN/m]	تنش خمی [MPa]	تنش معادل [MPa]
موج نامنظم	۶۰	۷۳	۶۴	۹۶
موج منظم	۴۲	۵۴	۴۵	۹۶

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 خط‌لوله کاهش می‌یابد. این مسئله باعث کاهش نیروی شناوری و افزایش ماکریم جابجایی قائم خط‌لوله می‌شود. نتایج نشان می‌دهد به طور طبیعی نسبت افزایش جابجایی قائم در خط‌لوله بیش از نسبت افزایش جابجایی جانبی است.



شکل ۶- ماکریم جابجایی قائم خط‌لوله با طول ۱۲۰۰ متر ناشی از موج‌ها با ارتفاع ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۸ متر

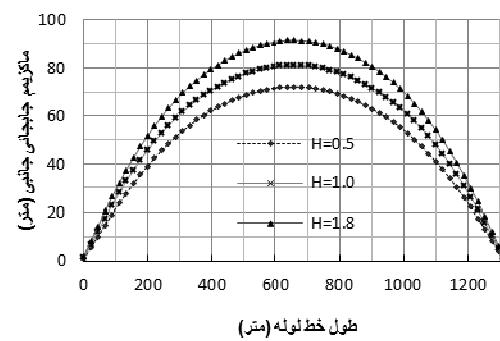
**۴-۳- بررسی تاثیر افزایش ظرفیت شناوری**  
برای نصب خط‌لوله در آبهای بسیار کم عمق جهت جلوگیری از برخورد خط‌لوله با بستر دریا، افزایش ظرفیت برای کاهش جابجایی‌های قائم خط‌لوله مناسب است. در این بخش به بررسی تاثیر افزایش ظرفیت شناوری می‌پردازیم. بدین منظور تحلیل بروی خط‌لوله به طول ۱۲۰۰ متر برای ذخیره شناوری 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 می‌کند و نیروی کششی ثابت ۱۸۰۰ کیلو نیوتون در طول تحلیل به خط‌لوله اعمال می‌شود.

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

جدول ۸- مشخصات موج‌های منظم

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

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



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

جابجایی قائم خط‌لوله نیز با افزایش ارتفاع موج، افزایش می‌یابد. ماکریم جابجایی قائم خط‌لوله زمانی که حضیض موج رخ می‌دهد و به عبارتی کمترین ارتفاع

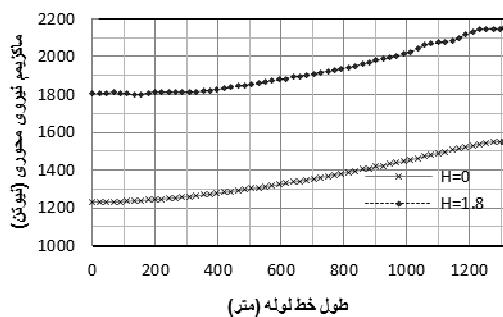
#### ۴- نتایج تحلیل‌ها برای خط‌لوله در حین انتقال

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 تأثیر موج برخوردی

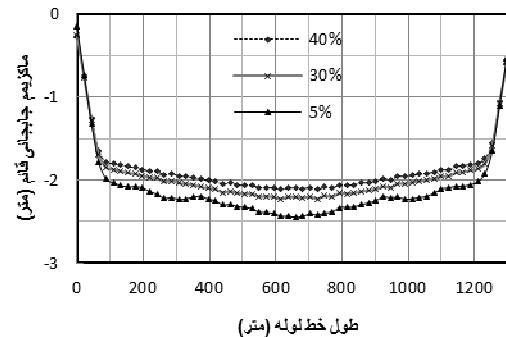
برای بررسی تأثیر موج برخوردی خط‌لوله با طول ۱۲۰۰ متر مدل شده است و تحلیل برای دو حالت یکی خط‌لوله تحت تأثیر موج و جریان و دیگری تحت اثر جریان و بدون در نظر گرفتن موج انجام شده است. برای حالت اول موج منظم با ارتفاع  $1/8$  متر و پریود  $4/8$  ثانیه در جهت عمود بر راستای خط‌لوله اعمال شده است و جریان نیز 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 نیرو نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۰ ماکزیمم جابجایی قائم خط‌لوله برای دو حالت مذکور نشان می‌دهد.

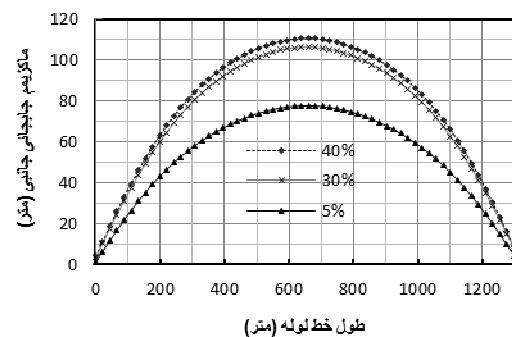


شکل ۹- ماکزیمم نیروی محوری خط لوله با طول ۱۲۰۰ متر و سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت برای دو حالت حضور موج و بدون آن

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 جابجایی قائم و جانبی خط‌لوله برای سه حالت ذکر شده، نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رفت با افزایش ذخیره شناوری، نیروی شناوری افزایش می‌یابد و به تبع آن جابجایی قائم کاهش یافته و خط‌لوله به سطح آب نزدیک‌تر می‌شود. این مسئله اگر چه باعث کاهش جابجایی قائم خط‌لوله می‌شود و لیکن با توجه به نزدیک شدن به سطح آب و افزایش سطح درگ مخازن شناوری، خط‌لوله بیشتر تحت تأثیر نیروی موج قرار می‌گیرد و به تبع آن جابجایی جانبی خط‌لوله افزایش قابل توجهی خواهد داشت (شکل ۸).



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



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

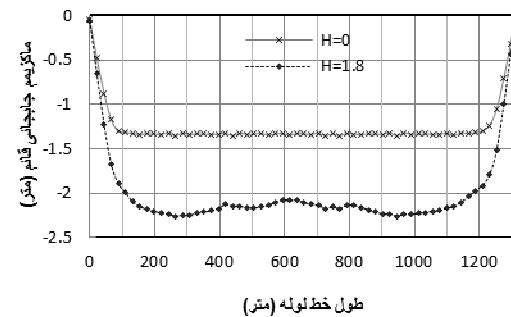
می‌دهد و در مرکز خط‌لوله بسیار نزدیک به حالت بدون موج می‌باشد.

**۴-۲-۴-بورسی سرعت حرکت یدک کش**  
برای بررسی تاثیر سرعت حرکت یدک کش، یک نمونه خط‌لوله به طول ۴۰۰ متر مدل شده و برای سرعت‌های ۳، ۷، ۱۰ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت یدک کش‌ها و کش‌ها تحلیل انجام شده است. فاصله یدک کش‌ها 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 پریود ۴/۸ 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. یدک کش جلو باید ظرفیت غلبه بر وزن شناور خط‌لوله و نیروهای موج و جریان به ویژه نیروی درگ را داشته باشد. 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.

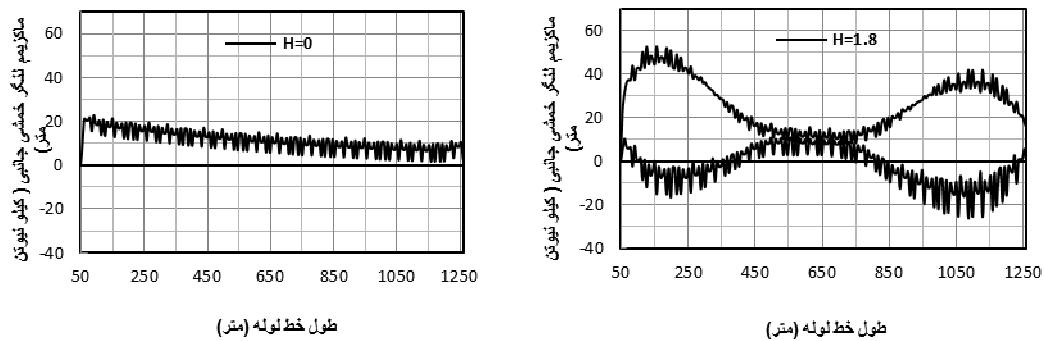
شکل ۱۳ نیروی کششی در طول خط‌لوله را برای سرعت‌های ۳، ۷، ۱۰ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت یدک-کش‌ها نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش سرعت اختلاف نیروی کششی ابتدا و انتهای خط‌لوله با شدت بیشتری افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش سرعت از ۱۰ به ۱۵ کیلومتر بر ساعت، اختلاف نیروی کششی ابتدا و انتهای خط‌لوله ۲/۱۳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

مشاهده می‌شود ماکریم 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.

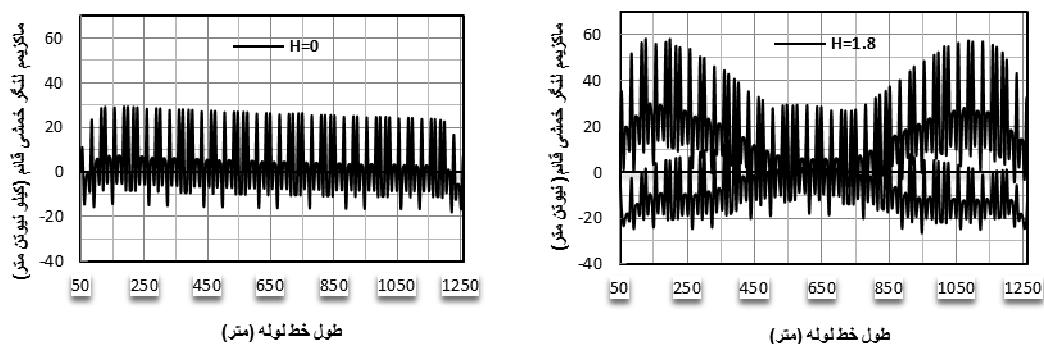


شکل ۱۰- ماکریم جابجایی قائم خط لوله با طول ۱۲۰۰ متر و سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت برای دو حالت حضور موج و بدون آن

شکل ۱۱ و شکل ۱۲ ماکریم 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 خط‌لوله، لنگرخمشی به ویژه در نزدیکی دو انتهای خط‌لوله افزایش قابل توجهی دارد. برای توجیه این مسئله می‌توان 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 خط‌لوله 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 ماکریم مقدار در نزدیکی دو انتهای خط‌لوله رخ

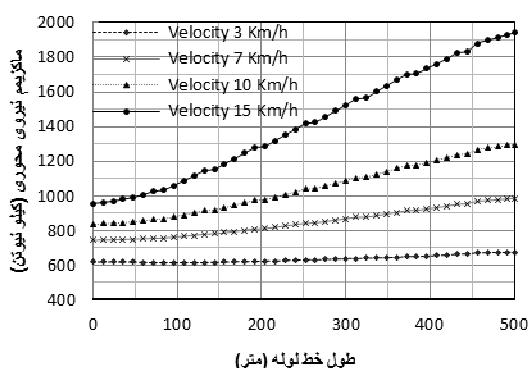


شکل ۱۱- ماکزیمم لنگرخمشی ناشی از انحنای جانبی در طول خط لوله به طول ۱۲۰۰ متر و سرعت ۵ کیلومتربر ساعت برای دو حالت حضور موج و بدون آن



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

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 خط لوله را برای سرعت‌های مختلف حرکت نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- ماکزیمم نیروی کششی خط لوله با طول ۴۰۰ متر برای سرعت حرکت ۳، ۷، ۱۰ و ۱۵ کیلومتربر ساعت

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

با افزایش سرعت، تنش خمشی در انتهای خط لوله افزایش و در طول خط لوله کاهش می‌یابد و برای سرعت‌های بالا اختلاف تنش خمشی در طول خط لوله قابل توجه می‌شود به طوری که برای سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت تنش خمشی در انتهای خط لوله برابر سایر قسمتهای خط لوله می‌باشد.

افزایش سرعت حرکت اگر چه باعث کاهش تنش محوری در انتهای خط لوله می‌شود، ولی تاثیر این کاهش در مقایسه با افزایش تنش خمشی کم می‌باشد، بنابراین تنش معادل در انتهای خط لوله با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. عکس این حالات در ابتدای خط لوله رخ می‌دهد و با افزایش سرعت حرکت یدک-کش، تنش محوری به مقدار قابل توجه افزایش می‌یابد

جدول ۹- مقادیر ماکریم تنش و نیروی محوری خط لوله برای سرعت‌های حرکت ۳، ۷، ۱۰ و ۱۵ کیلومتر بر ساعت

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

**۳-۴- بررسی تاثیر زاویه برخورد موج**

جابجایی ماکریم قائم خط لوله برای زوایای مختلف تغییر محسوسی ندارد ولی زاویه برخورد موج و جریان باعث ایجاد انحنا محلی در خط لوله 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 خط لوله می‌باشد، افزایش قابل توجهی در مقایسه با زاویه ۹۰ درجه مشاهده می‌شود.

زاویه برخورد موج و جریان باعث ایجاد نیروی کششی مختلف در خط لوله در حال کشیده شدن است زاویایی که هم جهت یا نزدیک به جهت حرکت خط-لوله می‌باشد، نیروی کششی موردنیاز برای غلبه بر نیروی هیدرودینامیک کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه بین جهت حرکت خط لوله با موج و جریان این نیرو افزایش می‌یابد. برای زاویه صفر درجه کمترین نیروی کششی در خط لوله 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 خط لوله با افزایش زاویه برخورد برای زوایای بزرگتر از ۹۰ درجه می‌باشد. از طرفی برای زوایای کوچکتر از ۹۰ درجه این اختلاف کاهش می‌یابد.

برای بررسی تاثیر زاویه برخورد موج و جریان یک نمونه خط لوله به طول ۴۰۰ متر مدل شده است و برای زوایای ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ 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 خط لوله اعمال می‌شود.

با توجه به اینکه خط لوله در حال کشیده شدن است ماکریم جابجایی جانبی آن به انتهای خط لوله نزدیک می‌شود و زمانی که موج با زوایای بزرگتر از ۹۰ درجه به خط لوله اعمال می‌شود، جابجایی جانبی ماکریم به انتهای خط لوله نزدیک‌تر می‌شود، به طوری که برای زاویه ۱۵۰ درجه بیشترین جابجایی جانبی در انتهای خط لوله را داریم. همچنین مشاهده می‌شود برای زاویه ۶۰ درجه بیشترین جابجایی جانبی در ابتدای خط لوله 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 خط لوله که باعث نزدیک شدن ماکریم جابجایی جانبی به انتهای خط لوله 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 تقریباً "عمود بر انحنای ماکریم خط لوله بوده و باعث ایجاد انحنای محلی و گسترش آن در طول خط لوله می‌شود.

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 لنگرخمثی ماقزیم ناشی از انحنای قائم در طول خط‌لوله را برای ارتفاع‌های موج  $0.05$  و  $0.10$  متری نشان می‌دهد. قابل ذکر است لنگرخمثی مثبت ناشی از انحنای کوژ (انحنای کلی روی سطح آب) و لنگرخمثی منفی ناشی از انحنای کاو (انحنای کلی روی بستر دریا) می‌باشد.

جدول ۱۱- مشخصات موج‌های برخورده

[sec]	ارتفاع [m]
پریود	
۰.۰۵	۰.۰۵
۰.۱۰	۰.۱۰

با توجه به آزادسازی تدریجی مخازن شناوری شکل S خط‌لوله در طول تحلیل ثابت است و به تبع آن تغییرات لنگرخمثی ناشی از انحنای کوژ و انحنای کاو در طول خط‌لوله تقریباً ثابت می‌ماند و فقط در انتهای قرار دادن خط‌لوله روی بستر، شکل J خط‌لوله باعث ایجاد انحنای کاو بزرگتری می‌شود و به تبع آن لنگرخمثی بزرگتری ایجاد می‌شود. با اضافه شدن موج انحنای محلی در طول خط‌لوله ایجاد می‌شود و باعث افزایش لنگرخمثی می‌شود. این افزایش برای ارتفاع  $0.05$  متری موج محسوس نبوده ولی برای ارتفاع  $0.10$  متری موج این افزایش قابل توجه است.

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

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

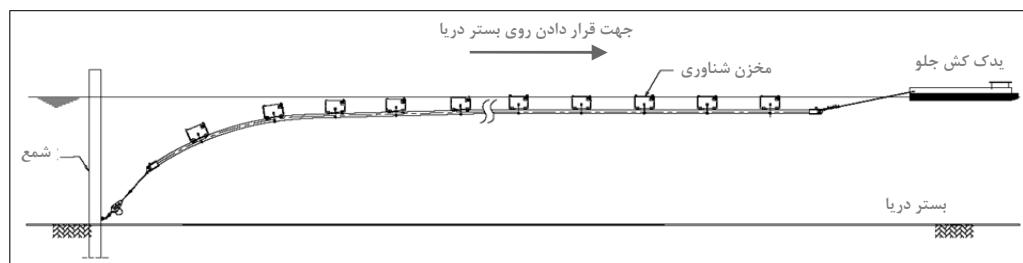
در روش نصب خط‌لوله با روش کشیدن در سطح آب، پس از رسیدن به محل، خط‌لوله با آزادسازی تدریجی مخازن شناوری روی بستر دریا قرار می‌گیرد. مدل مورد مطالعه برای این حالت شامل یک نمونه خط‌لوله با طول  $400$  متر است که ابتدای خط‌لوله به شمع کوبیده شده در محل مهار شده است و انتهای آن نیز به وسیله کابل به وینچ یدک‌کش متصل است و نیروی کششی ثابتی به خط‌لوله اعمال می‌کند (شکل ۱۴). مخازن شناوری به وسیله المان ارتباط دهنده به خط‌لوله 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  $100$  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

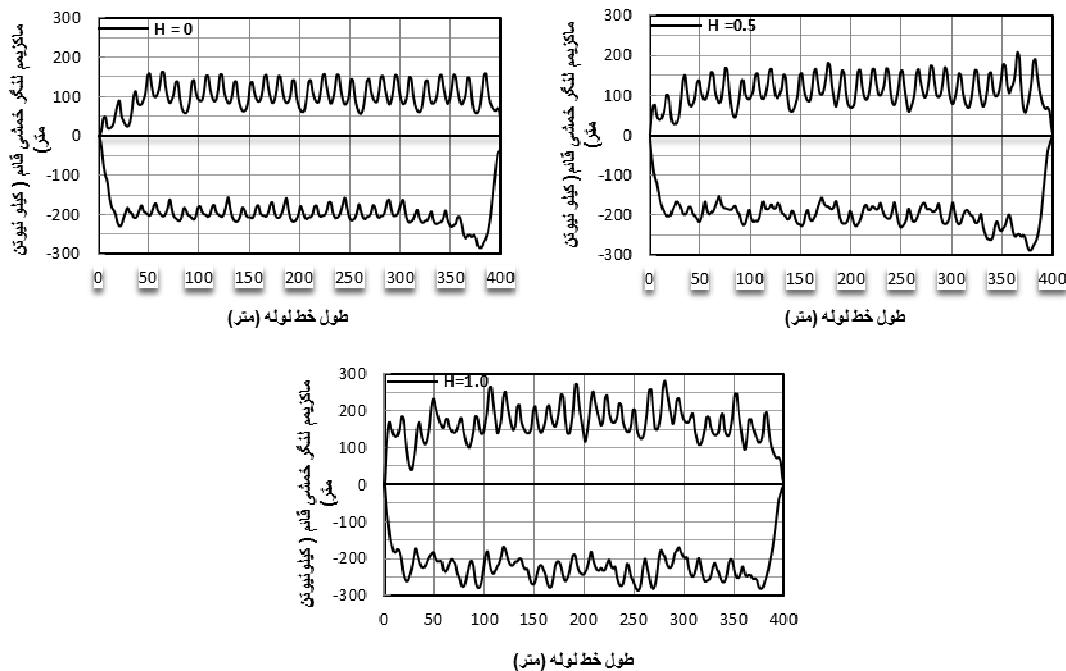
۰/۰	ضریب اصطکاک جانبی
۰/۵	ضریب اصطکاک محوری
۱/۰	سختی خاک [KPa]

## ۶- بررسی تأثیر موج برخورده

برای بررسی تأثیر ارتفاع موج برخورده در حین قرار دادن خط‌لوله روی بستر دریا، تحلیل برای خط‌لوله به طول  $400$  متر و در عمق  $10$  متری و برای شرایط



شکل ۱۴- قرار دادن خط‌لوله روی بستر دریا



شکل ۱۵- ماکزیمم لنگرخمشی ناشی از انحنای قائم خط‌طولوله با طول ۴۰۰ متر برای ارتفاع‌های ۰/۰ و ۰/۵ متری موج

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 خط‌طولوله نقش دنباله را ایفا می‌کنند و باعث کنترل انحنای کوژ خط‌طولوله می‌شوند، حال آنکه عامل اصلی برای کنترل انحنای کاو خط‌طولوله 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 خط‌طولوله ناشی از شکل J مایل خط‌طولوله هنگام قرار دادن روی بستر می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق و به عبارتی نزدیک شدن J قائم، انحنای کاو خط‌طولوله افزایش می‌یابد و از طرفی اختلاف انحنای کاو انتهای خط‌طولوله در مقایسه با سایر قسمت‌های خط‌طولوله افزایش می‌یابد.

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

#### ۲-۵- بررسی تاثیر عمق آب

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

ماکزیمم لنگرخمشی ناشی از انحنای کاو و انحنای کوژ در طول خط‌طولوله را برای عمق‌های ۴، ۱۰ و ۲۰ متری نشان می‌دهد. با افزایش عمق لوله‌گذاری، لنگرخمشی ناشی از انحنای کوژ و انحنای کاو خط‌طولوله افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد انحنای کاو خط‌طولوله روی بستر دریا محسوس‌تر است، به طوری که با

جدول ۱۲- مقادیر ماکریم لنگر خمی قائم در طول خط لوله را برای عمق های ۴، ۱۰ و ۲۰ متری

عمق آب دریا [m]			لنگر خمی ناشی از انحنای کوثر [KN/m]
۲۰	۱۰	۵	
۱۵۰	۱۶۰	۱۰۰	لنگر خمی ناشی از انحنای کاو [KN/m]
۳۵۰	۲۸۰	۱۴۰	

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- جابجایی جانبی خط لوله ناشی از طیف موج کمتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکریم طیف موج می‌باشد، حال آنکه لنگر خمی برای طیف موج بیشتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکریم می‌باشد. از طرفی ماکریم جابجایی قائم خط لوله ناشی از طیف موج بیشتر از موج تکرنگ با ارتفاع ماکریم می‌باشد.

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

۳- با افزایش عمق لوله گذاری، لنگر خمی ناشی از انحنای کوثر و انحنای کاو خط لوله افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد انحنای کاو خط لوله روی بستر دریا محسوس‌تر است. بنابراین با افزایش عمق می‌بایست نیروی کششی افزایش یابد تا تنفس‌ها در حد مجاز باقی بماند.

### ۳-۵- بررسی تاثیر نیروی کششی یدک‌کش

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

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

### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به طور کلی تحلیل‌ها برای سه حالت شامل خط لوله ساکن، خط لوله در حال انتقال و خط لوله

جدول ۱۳- مقادیر مکزیم لنگر خمشی قائم و تنش معادل در طول خط لوله را برای نیروهای کششی  
نیروی کششی یدک کش [KN] ۵۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰ کیلونیوتن

نیروی کششی یدک کش [KN]			
۵۰۰	۳۰۰	۱۰۰	
۶۰	۱۲۰	۱۶۵	لنگر خمشی ناشی از انحنای کوچک [KN/m]
۲۰۰	۲۰۰	۲۸۰	لنگر خمشی ناشی از انحنای کاو [KN/m]
۱۷۵	۱۷۵	۲۴۰	تنش معادل [MPa]

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.

### 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

### -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 Reynold, 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 deflection 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.