بررسی سرعت انتشار کمانش دینامیکی در خطوط لوله دریائی

زهرا عمرانی[۱]، احمدرضا مصطفی‌قره‌باغی[۲*]، کریم عابدی[۳]

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریائی، دانشگاه صنعتی سهند
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند
۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

با توجه به اینکه خطوط لوله جزء سازه‌های پوسته‌ای محسوب می‌شوند، طراحی آنها براساس اصول پایداری انجام می شود؛ زیرا ضخامت کم پوسته نسبت به ابعاد دیگر از یک سو و وجود میدان تنش‌های فشاری در اثر نیروهای اعمالی بر پوسته‌های استوانه‌ای از سوی دیگر، آن‌ها را در معرض ناپایداری قرار می‌دهد که بر اساس بارهای وارده ممکن است به صورت موضعی یا کلی در آن‌ها اتفاق بیافتد. به واسطه قرار گرفتن لوله تحت فشار بسیار زیاد (فشار هیدروستاتیک آب)، تحت شرایطی ممکن است کمانش موضعی رخ دهد که جلوگیری از وقوع این نوع کمانش و انتشار آن یکی از موضوعات اصلی طراحی است.

در مقاله حاضر ابتدا پدیده انتشار کمانش دینامیکی با روش المان محدود سه‌بعدی مدل‌سازی شده، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردیده و سپس سرعت انتشار کمانش دینامیکی در لوله‌هائی با نسبت قطر به ضخامت مختلف محاسبه شده است. با توجه به تاثیر سرعت انتشار کمانش در طراحی خطوط لوله دریائی، برای هر کدام از نسبتهای قطر به ضخامت، رابطه‌ای بین سرعت انتشار کمانش و فشار آغاز انتشار کمانش استخراج شده و میزان تاثیر نسبت قطر به ضخامت بر سرعت انتشار بررسی شده است.

کلمات کلیدی: انتشار دینامیکی کمانش، فشار هیدروستاتیک، خطوط لوله دریائی، سرعت انتشار، نسبت قطر به ضخامت

INVESTIGATION INTO DYNAMIC BUCKLE PROPAGATION VELOCITY IN MARINE PIPELINES

Z. Oomrani[1], A. R. Mostafa Gharabaghi[2], K. Abedi[3]

1- M.Sc. Marine Structures, Civil Engineering Dept., Sahand University of Technology
2- Assistant Professor, Civil Engineering Dept., Sahand University of Technology
3- Professor, Civil Engineering Dept., Sahand University of Technology

Abstract

A pipeline is considered as shell structure so its design is based on stability concepts; due to the exerted high pressure, local instability is probable to occur and so prevention of its occurrence and propagation are important subjects in its design. In this paper, dynamic buckle propagation has been modeled by 3D finite element method, results are verified with experimental tests and velocity of dynamic buckle propagation is calculated for pipes with different diameter to thickness ratios. Due to the effect of velocity in designing of marine pipelines, separate relations based on the initiation pressure are derived for the velocity of propagation and the influence of diameter to thickness ratio on the propagation velocity is studied.

Keywords: Dynamic Buckle propagation, Hydrostatic pressure, Marine pipelines, Propagation velocity, Diameter to thickness ratio

* نویسنده مسوول مقاله mgharabaghi@sut.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

۱- مقدمه

کمانش و خرابی ناشی از فشار خارجی، مباحث تاثیرگذاری در طراحی خطوط لوله نصب شده در آب های عمیق می باشند. کمانش، از یک مقطع موضعی ضعیف شده لوله، شروع شده با سرعت زیادی انتشار می‌یابد و پتانسیل خرابی کل لوله را دارد.

Stewart اولین کسی بود که به طور تجربی، وقوع و انتشار کمانش در لوله‌های بلند را بررسی کرد. در واقع هدف او از انجام این آزمایش تعیین فشار خرابی P_{co} بود. وی در آزمایشات خود هنگامی که فشار را دوباره بر لوله اعمال کرد، دریافت که در فشارهای پائین‌تر از فشار خرابی، کمانش انتشار یافته و تمام لوله را دچار پهن‌شدگی می‌کند [۱]. سال‌ها بعد با گسترش صنعت نفت و گاز فراساحلی، موضوع بررسی رفتار لوله‌های انتقال، تحت یک فشار خارجی زیاد، مورد توجه قرار گرفت و انگیزه‌ای شد تا شرکت‌های فعال در زمینه فراساحل به کمک بعضی از آزمایشگاه‌های معتبر، آزمایشاتی در این زمینه انجام دهند. اولین اشاعه عمومی اصطلاح "کمانش گسترش یافته" توسط Mesloh و همکاران صورت گرفت. در همان زمان مشاهده شد که تحت بعضی از فشارها، کمانش به صورت موضعی باقی می‌ماند، در صورتی که در مقادیر بالاتر، کمانش گسترش می‌یابد و تمام طول نمونه را خراب می‌کند. برهمین اساس فشار مشخصه‌ای برای لوله‌های دریائی تعریف گردید، که بیانگر کمترین فشاری بود که می‌توانست چنین کمانشی را در حالت انتشار نگه‌دارد که به آن فشار انتشار گفته می‌شود [۱].

فشار انتشار P_p، مقداری به مراتب کمتر از فشار خرابی لوله دارد (فشاری که در آن کمانش شروع به انتشار می‌کند، معمولا ۱۵-۲۵ درصد فشار خرابی است). اختلاف زیادی که بین این دو فشار بحرانی شاخص وجود دارد، پتانسیل ایجاد خرابی نگران کننده‌ای به اندازه چندین کیلومتر در یک زمان نسبتا کوتاه را نشان می‌دهد. ناپایداری به وجود آمده در هر فشاری بالاتر از فشار انتشار، به صورت دینامیکی انتشار می‌یابد. سرعت انتشار کمانش دینامیکی وابسته به فشار وارده به صدها متر بر ثانیه می رسد. امروزه خرابی تحت اثر فشار خارجی نقش اساسی را در طراحی لوله‌های آب عمیق ایفا می‌کند. معمولا پدیده انتشار کمانش دینامیکی در آب عمیق یا در حالتی که امکان اعمال فشاری بیشتر از فشار انتشار لوله وجود داشته باشد، رخ می‌دهد.

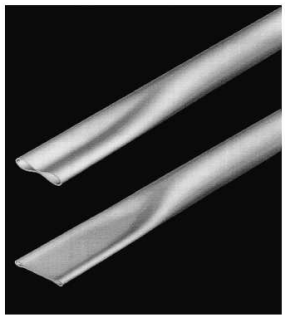
علی‌رغم تحقیقات زیادی که روی مساله انتشار کمانش انجام شده، در مورد انتشار کمانش دینامیکی مطالعات چندانی صورت نگرفته است و به همین ترتیب موضوع سرعت انتشار کمانش دینامیکی نیز هنوز به طور گسترده مورد تحلیل قرار نگرفته است. اگر لوله‌ای با نسبت قطر به ضخامت معین که تحت فشاری بیشتر از فشار انتشار قرار دارد دچار کمانش موضعی شود این کمانش با سرعتی متناسب با فشار آغاز، شروع به انتشار می‌کند. انتشار کمانش تا زمانی که کمانش به کمانش-گیر برخورد کند و یا به عمقی برسد که فشار کمتر از فشار انتشار باشد، ادامه می‌یابد. در صورتی که سرعت انتشار هنگام برخورد کمانش با کمانش‌گیر از سرعت ناشی از فشار آغازی برابر با فشار تقاطع کمانش‌گیر P_m بیشتر باشد کمانش از کمانش‌گیر عبور می‌کند. به عبارتی می‌توان با استفاده از سرعت انتشار کمانش و فشار تقاطع کمانش‌گیر مشخص نمود که آیا کمانش از کمانش‌گیر عبور می‌کند یا خیر. بنابراین یافتن سرعت انتشار مقوله‌ای مهم در طراحی لوله محسوب می‌شود.

خرابی به دو صورت شبه‌استاتیکی و دینامیکی منتشر می‌شود که خرابی ناشی از انتشار دینامیکی کمانش با خرابی حاصل از انتشار شبه استاتیکی تفاوت دارد. شکل ۱ یک نمونه لوله را در دو حالت خرابی (الف) شبه استاتیکی و (ب) دینامیکی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، اتصال بین نواحی جدار داخلی لوله در حالت دینامیکی بیشتر از حالت شبه استاتیکی است. علت افزایش تغییر شکل لوله، افزایش نیروهای وارد بر لوله، به واسطه نیروهای اینرسی ناشی از انتشار دینامیکی کمانش است [۳].

مساله انتشار دینامیکی کمانش برای اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط Mesloh و همکاران مورد توجه قرار گرفت [۴]. Kyriakides و Babcock (۱۹۷۹) آزمایشاتی روی نمونه لوله‌های آلومینیومی انجام دادند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]



شکل ۱- مقایسه تغییر شکل لوله در انتشار حالت پایدار (الف) شبه استاتیکی و (ب) دینامیکی [۲]

و سرعت انتشار را به صورت تابعی از $\frac{D}{t}$، فشار خارجی و سیال عامل فشار ارزیابی کردند [۵]. Tassoulas و Song (۱۹۹۰) یک تکنیک محاسباتی برای تحلیل دینامیکی انتشار کمانش را ارائه کرده و تا سال ۱۹۹۳ آن را تکمیل نمودند [۶]. Tassoulas و Nogueria (۲۰۰۰) با در نظر گرفتن ماهیت پایدار انتشار کمانش، یک فرمول‌بندی عناصر محدود برای انتشار دینامیکی ارائه دادند [۷]. Kyriakides و Netto (۲۰۰۰) رفتار دینامیکی انتشار را مورد توجه قرار دادند و با انجام آزمایشات مختلف در دامنه وسیع‌تری از فشار، به طوری که کل محدوده $P_p < P < P_{co}$ را بپوشاند، بررسی آزمایشگاهی سرعت انتشار لوله‌های SS-304 با $\frac{D}{t} = 27.9$ را تکمیل کردند.

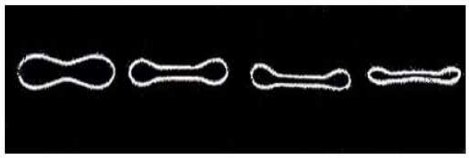
دراین مقاله، ابتدا پدیده انتشار دینامیکی کمانش مدل-سازی شده و سپس سرعت انتشار کمانش دینامیکی با توجه به نسبت قطر به ضخامت لوله و فشار اعمالی به آن بررسی می‌شود.

۲- مدهای خرابی مقطع ناشی از انتشار دینامیکی کمانش

خرابی مقطع در اثر انتشار دینامیکی کمانش وابسته به فشار خارجی، در دو حالت اتفاق می افتد که در ادامه به آنها پرداخته شده است.

۲-۱- مد خرابی Dog-bone

هنگامی که فشار خارجی وارد بر لوله با توجه به جنس مصالح، از حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد فشار خرابی کمتر است، انتشار دینامیکی کمانش مانند حالت شبه استاتیکی منجر به خرابی به شکل Dog-bone می‌شود. ولی در حالت انتشار دینامیکی کمانش مکان هندسی اتصال بین نواحی جدار داخلی لوله، دیگر یک خط نیست، بلکه صفحه ای است که با افزایش فشار خارجی سطح آن افزایش می‌یابد. شکل ۲ چند نمونه از خرابی Dog-bone دینامیکی را در مقایسه با خرابی Dog-bone شبه استاتیکی (اولین شکل از سمت چپ) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود انتشار دینامیکی در فشارهای بالاتر باعث افزایش لهیدگی مقطع می‌گردد.



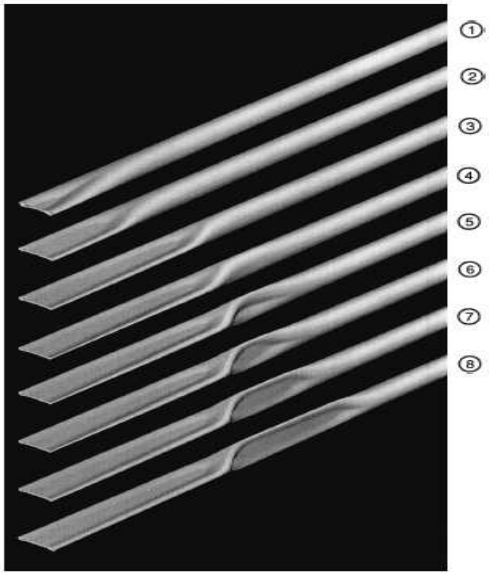
شکل ۲- مقایسه خرابی Dog-bone در حالت شبه استاتیکی (اولین شکل از سمت چپ) و دینامیکی [۱۴]

۲-۲- مد خرابی Flip-flop

Kyriakides (۱۹۷۹) طی اندازه گیری سرعت انتشار کمانش به صورت تابعی از فشار، مد خرابی Flip-flop انتشار کمانش را کشف کرد. او مشاهده کرد هنگامی که کمانش در یک لوله بلند آلومینیومی با میزان فشاری در حدود ۹۰ درصد یا بیشتر فشار خرابی انتشار می‌یابد، شکل خرابی مقطع عوض می‌شود. او این حالت خرابی را با توجه به شکل خاص آن، مد Flip-flop نامید [۵].

به زبان ساده، در این حالت، ابتدا کمانش مقداری در لوله منتشر می‌شود، سپس در مقطعی از لوله، به یکباره ۹۰ درجه می‌چرخد و به حالت اصلی خود بر می‌گردد. این روند که Flip-flop نامیده می‌شود، در فواصل معین در طول لوله تکرار می شود و آن قدر ادامه می‌یابد تا کل لوله را خراب کند. شکل ۳ این مد خرابی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]



شکل ۳- مد Flip-flop انتشار کمانش در لوله بلند [۳]

۳- سرعت انتشار کمانش

سرعت‌های انتشار در حد صدها متر بر ثانیه توسط Kyriakides و Babcock (۱۹۷۹) در آزمایشات روی لوله آلومینیومی گزارش شده است (سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط Tassoulas و Song (۱۹۹۳) با مدل المان محدود تائید شده است). حتی اخیراً سرعت‌های بالاتری در آزمایشاتی مشابه روی لوله‌های فولادی ضد زنگ گزارش شده است (Kyriakides و Netto (۲۰۰۰)). وقتی که انتشار کمانش دینامیکی تحت فشار ثابت آغاز می‌شود، جبهه کمانش از همان ابتدا با یک سرعت ثابت حرکت نمی‌کند و پس از طی مسافتی از لوله و همزمان با رسیدن به حالت پایدار انتشار، سرعت پس از طی یک روند صعودی ثابت می‌شود. برخی آزمایشات نشان دادند که کمانش باید فاصله‌ای در حدود ۱۰ برابر قطر لوله را طی کند، تا به حالت پایدار انتشار برسد [۱۵].

Zhi-Hong و Yu-Ying (۱۹۹۴) سرعت را در سه حالت الف) فشار آغاز کمتر از فشار انتشار، ب) فشار آغاز برابر با فشار انتشار و پ) فشار آغاز بیشتر از فشار انتشار بررسی کردند و از محاسبات خود به این نتیجه رسیدند که تاریخچه زمانی سرعت به دو بخش تقسیم می شود. در بخش اول که کمانش موضعی شکل می گیرد، تفاوت مشخصی بین این سه حالت وجود ندارد و سرعت در هر سه حالت برابر مقداری ثابت است. وقتی که سرعت وارد مرحله دوم می شود، در حالتی که فشار آغاز انتشار از فشار انتشار بیشتر است کمانش آغاز شده، شتاب مثبت می‌گیرد. وقتی که فشار آغاز برابر با فشار انتشار باشد، کمانش با همان سرعت منتشر می‌شود و در حالتی که فشار آغاز کمتر از فشار انتشار است، کمانش شتاب منفی می‌گیرد و سرعت آن کاهش می‌یابد و در نتیجه کمانش متوقف می‌شود. علاوه بر این، آنها نشان دادند که در فشار آغاز بیشتر از فشار انتشار میزان ناکاملی اولیه تاثیری در سرعت انتشار ندارد و فقط فشار در سرعت تاثیرگذار است و در فشار آغاز برابر با فشار انتشار، سرعت به ناکاملی وابسته است و ناکاملی‌های مختلف به سرعت‌های متفاوت منجر می‌شود.

در بررسی مکانیزم انتشار کمانش، فقط سرعت انتشار حالت پایدار مدنظر است، زیرا با توجه به اینکه جاگذاری اقتصادی کمانش‌گیرها ایجاب می‌کند که هر کمانش‌گیر در موقعیتی بسیار جلوتر از کمانش‌گیر قبلی نصب شود، کمانش قبل از رسیدن به متوقف-کننده به حالت پایدار انتشار می‌رسد و با سرعت انتشار پایدار به آن برخورد می‌کند. بنابراین هر جا صحبت از سرعت انتشار است، منظور حالت پایدار آن می‌باشد.

از جمله عوامل تاثیرگذار بر سرعت انتشار، جنس مصالح، نسبت قطر به ضخامت، فشار خارجی وارده و سیال عامل فشار می‌باشد که در این مقاله لوله از جنس فولاد SS-304 و تحت سیال هوا با نسبت قطر به ضخامت و فشار خارجی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۴- مدل‌سازی عناصر محدودسه‌بعدی انتشار خرابی

این روش در اوائل دهه ۱۹۹۰ توسط Tassoulas و همکارانش در دانشگاه Texas جهت مدل‌سازی پدیده-های شروع کمانش، انتشار شبه استاتیکی و دینامیکی کمانش ارائه گردید [۶، ۱۶]. بر اساس این تحقیقات، با توجه به اینکه مقاطع مختلف لوله در اثر انتشار کمانش دارای تاریخچه تغییر شکل یکسانی می باشند لذا در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

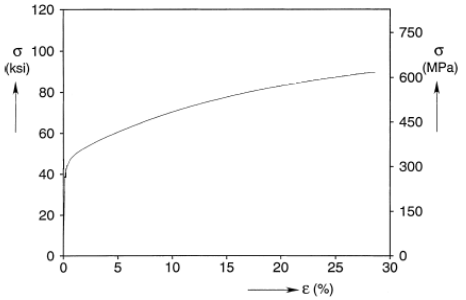
تحقیقات بعدی، بخش آغاز کمانش، از تحلیل عناصر محدود حذف گردید. از این رو مدل سه‌بعدی که توسط Nogueria و Tassoulas ارائه شد، یک مدل حالت پایدار بود که نسبت به مدل قبلی دارای کاربرد آسان‌تر بود [۱۵، ۱۷، ۱۸و ۱۹]. Kyriakides و همکارانش جهت بررسی مسائل مرتبط با انتشار کمانش، این روش را مورد استفاده قرار دادند[۳، ۲۱و ۲۰]. همین کار را Toscano و همکارانش در موسسه C-FER کانادا [۲۱، ۲۲] و در مرکز تحقیقاتی CINI در آرژانتین انجام دادند [۱۰، ۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۵]. هر چند مدل-سازی عناصر محدود خرابی با استفاده از این روش، نسبت به روش دو بعدی دشوارتر بوده و زمان تحلیل به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، لیکن با توجه به در نظر گرفتن اثر نیروی کشش غشائی (که بر اساس تحقیق Hoo Fatt، ۱۵ درصد انرژی ناشی از فشار خارجی را هنگام انتشار خرابی مستهلک می‌کند [۲۶])، روش سه‌بعدی همیشه نتایج دقیقتری می‌دهد. در این مقاله مدل‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شده که مشخصات مدل تهیه شده، به صورت زیر می‌باشد:

- لوله‌ها از جنس فولاد SS-304 است.
- جهت مدل‌سازی لوله، از المان جامد سه بعدی ۲۷ گرهی با انتگرال کاهش یافته استفاده شده است که ۱۴ نقطه انتگرال‌گیری دارد (C3D27R). این المان از جمله المان‌های با متغیرهای گرهی تنش/تغییر مکان است که بر مبنای سینماتیک کرنش‌های بزرگ عمل می‌کند و درجه آزادی فعال در هر گره شامل سه مولفه انتقال می‌باشد [۲۷].
- جهت اندازه‌گیری تغییرات حجم لوله از المان سیال هیدروستاتیک استفاده شده است (F3D4). این المان سه بعدی، دارای چهار گره است.
- برای جلوگیری از نفوذ دو سطح بالایی و پایینی لوله پس از کمانش، لازم است که سطح تماسی تعریف شود که لوله پس از کمانش با آن تماس پیدا کند. این سطح با المان صلب (R3D4) مدل شده که قابلیت تغییر شکل نداشته لذا لوله در آن نفوذ نمی‌کند. این المان سه بعدی، دارای چهار گره است.
- در این مقاله، بر اساس تحقیقات Kyriakides و Netto (۲۰۰۰)، شبکه‌بندی بهینه طوری انتخاب شده است که لوله در راستای محیطی توسط ۱۰ المان با اندازه‌های متفاوت تقسیم بندی شده بطوریکه کمان مربوطه به ترتیب از قسمت تحتانی به قسمت فوقانی ۲/۵، ۲/۵، ۷/۵، ۷/۵، ۱۰،۱۰، ۱۵، ۱۵، ۱۰ و ۱۰ درجه می باشند. برای ضخامت لوله نیز دو المان بکار رفته است. طول میانگین انتخاب شده برای المان‌ها، $\frac{5D}{7}$ یا ۰/۷۱ برابر قطر لوله است [۳].
- برای حذف نقاط دوشاخگی، براساس مد اول کمانش (که محتمل‌ترین مد کمانش است) و بر مبنای رابطه زیر، به مدل یک تغییر شکل اولیه بسیار کوچک وارد می‌شود [۳]:

$$w_0(\theta)= -\Delta_0\left(\frac{D}{2}\right)\exp\left[-\beta\left(\frac{x}{D}\right)^2\right]\cos(2\theta) \quad (۱)$$

در این رابطه w_0، تغییرمکان‌های شعاعی، θ زاویه قطبی، Δ_0 پارامتر دامنه تغییر شکل و β پارامتر تعیین کننده محدوده تغییرشکل است [۳، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲].
- طول لوله مدل‌سازی شده، نوزده برابر قطر آن در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که براساس مطالعات صورت گرفته، جهت مدل‌سازی سه‌بعدی انتشار خرابی باید طول مدل حداقل ده برابر قطر آن باشد [۲۵].
- در سازه‌های فولادی از جمله لوله‌های دریائی رفتار غیرخطی مصالح بیشتر به صورت ورود مصالح به ناحیه پلاستیک رخ می دهد. در این تحقیق از مصالح الاستوپلاستیک با معیار خرابی Von-Mises، سخت شدگی ایزوتروپیک و نمودار تنش-کرنش Ramberg-Osgood اصلاح شده، استفاده شده است. شکل ۴ منحنی Ramberg-Osgood اصلاح شده را برای فولاد SS-304 نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش اصلاح شده Ramberg-Osgood (n=12)

- خطوط لوله را معمولا به دلیل کاهش کشش ناشی از وزن قسمت معلق به صورت خالی نصب می‌کنند. به علاوه ممکن است به علت تعمیر، فشار داخلی آنها را کاهش دهند. به همین دلائل، فشار خارجی، پارامتر بارگذاری مهمی در طراحی خط لوله است. فشار خارجی‌ای که به لوله‌های دریائی وارد می‌شود، فشار هیدروستاتیک آب بوده و از آن‌جائی‌که قطر لوله در مقابل عمق آب ناچیز است، فرض می شود که به تمام نقاط آن فشار به صورت یکسان وارد می‌شود. جهت فشارهای وارد در هر نقطه به سمت مرکز لوله (در راستای شعاعی) می‌باشد.

- با توجه به وجود تقارن در مقطع لوله، یک هشتم آن مدلسازی شده و شرایط مرزی متناظر، به ترتیب در یک سر لوله به صورت تقارن در راستای محور لوله تعریف شده و در سر دیگر نیز در دو راستای شعاعی و محیطی گیردار تعریف شده است. درصفحات تقارن نیز شرایط تقارن اعمال شده است.

۵- تحلیل انتشار کمانش در خطوط لوله دریائی

تحلیل‌های انتشار کمانش دینامیکی در دو مرحله شبه‌استاتیکی و دینامیکی انجام شده که نتایج صحت سنجی هر مرحله به طور جداگانه در ادامه ارائه شده است.

۵-۱- صحت سنجی تحلیل شبه استاتیکی

تحلیل‌های غیرخطی هندسی و مصالح با کنترل تغییر مکان، دقیق‌ترین روش برای تعیین ظرفیت کمانشی واقعی سازه‌ها است و برای طرح یا ارزیابی سازه‌های واقعی پیشنهاد می‌شود. در این روش، برای تعیین بار بحرانی کمانشی و رفتار پس‌کمانشی سازه از تحلیل استاتیکی غیرخطی با بارگذاری نموی تدریجی استفاده می‌شود، تا اینکه میزان باری را که در آن سازه ناپایدار می‌گردد و گام زمانی مربوط به بار اعمالی در مرحله دینامیکی به دست آید. علاوه بر این، تنها با کاربرد روش تحلیل غیرخطی می‌توان نوع سوم غیرخطی شدگی در سازه که همانا غیرخطی شدگی ناشی از تغییر وضعیت[1] است را در محاسبات وارد کرد.

در نتیجه از نکاتی که باید در تحلیل مورد نظر در این تحقیق لحاظ نمود، اعمال غیرخطی های هندسی و مصالح و استفاده از روش طول کمان به منظور تعیین رفتار کمانشی و پس کمانشی سازه است.

برای انجام مطالعه موردی از مدلی با مقیاس کوچک از جنس فولاد با مشخصات موجود در جدول ۱ که توسط Kyriakides و Netto در سال ۲۰۰۰ مورد آزمایش قرار گرفته، استفاده شده است.

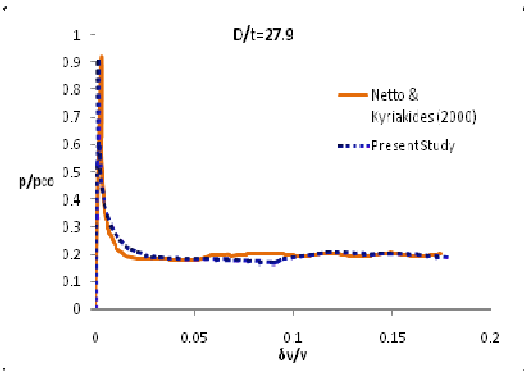
جدول ۱- پارامترهای هندسی و مصالح استفاده شده در مطالعه حاضر

قطر خارجی لوله in(mm)	ضخامت جداره in(mm)	مدول الاستیسیته msi(Gpa)
۷۴۸/۱ (۴۴/۴)	۰/۰۶۲۷ (۱/۵۹)	۲۹/۲ (۲۰۵)
حداقل تنش تسلیم شاخص Ksi(Mpa)	تنش تسلیم Ksi(Mpa)	چگالی فولاد $lbin^{-3}$ (kgm^{-3})
۴۳/۸۴ (۳۰۱/۷)	۳۹/۶ (۲۷۲)	۰/۲۸۰ (۷۷۵۰)

نتایج صحت‌سنجی مرحله انتشار شبه‌استاتیکی کمانش در شکل ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر تطابق خوبی با نتایج محاسبه شده توسط Kyriakides و Netto دارد. محور افقی نمودار بیانگر نسبت تغییرات حجم به حجم اولیه و محور عمودی نشان دهنده نسبت فشار به فشار خرابی محاسبه شده از آئین‌نامه می باشد. مقدار فشار خرابی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]



شکل ۵- مقایسه نتیجه انتشار شبه استاتیکی کمانش

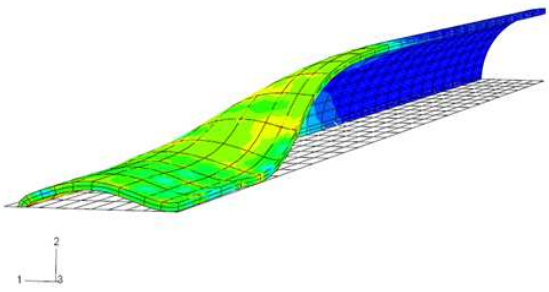
P_{co} از رابطه ارائه شده در API، به صورت زیر بدست آمده است:

$$P_{ce} = \frac{2E}{1-\upsilon^2}\left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (۲)$$

$$P_y = 2\sigma_y \cdot \left(\frac{D}{t}\right) \quad (۳)$$

$$P_{co} = \frac{P_y P_{ce}}{\sqrt{\left(P_y{}^2 + P_{ce}{}^2\right)^2}} \quad (۴)$$

در این روابط، P_{ce} فشار خرابی الاستیک، P_y فشار تسلیم، P_{co} فشار خرابی، σ_y حداقل تنش تسلیم مصالح لوله، D قطر خارجی لوله، t ضخامت جدار لوله، E مدول یانگ و υ ضریب پواسون است. شکل ۶ نیز تغییر شکل ایجاد شده ناشی از تحلیل شبه استاتیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- انتشار کمانش شبه‌استاتیکی

۵-۲- صحت سنجی تحلیل دینامیکی

برای تحلیل کمانش دینامیکی از روش انتگرال‌گیری ضمنی گام به گام برای حل معادلات غیرخطی دینامیکی استفاده شده است. این روش انتگرال‌گیری ضمنی بر اساس روش شتاب ثابت - متوسط نیومارک که قاعده ذوزنقه‌ای نیز نامیده می‌شود استوار است که در واقع می‌توان آن را بسطی از روش شتاب خطی تلقی نمود. جهت صحت‌سنجی مدل باید سرعت‌های انتشار در فشارهای مختلف محاسبه شده و با سرعت‌های به دست آمده از آزمایشات Kyriakides و Netto مقایسه شود. بر اساس پیشنهاد Kyriakides در خصوص محدوده فشار انتشار کمانش، مبنی بر اینکه کمانش شبه استاتیکی در محدوده فشارهای بین

$$0.15P_{co} < P_p < 0.25P_{co}$$

منتشر می‌شود، لذا در این تحقیق، اولین فشار انتخابی $0.3P_{co}$ در نظر گرفته شد.

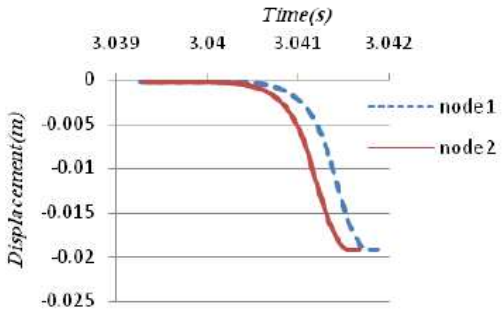
بر همین اساس، اگر فشار در محدوده بین فشار انتشار تا ۸۷ درصد فشار خرابی باشد، مد Flat خرابی و در فشارهای بالاتر از این محدوده مد Flip-flop خرابی ایجاد می شود که در این تحقیق جهت مدل‌سازی مد Flat خرابی، از مقادیر فشار $0.3P_{co}$، $0.4P_{co}$، $0.5P_{co}$، $0.6P_{co}$، $0.7P_{co}$ و $0.8P_{co}$ استفاده شد و آنالیز انتشار برای هر نسبت قطر به ضخامت در این شش مقدار فشار انجام گردید.

با توجه به روند انجام آزمایشات، کمانش دینامیکی به این صورت مدل‌سازی شده است که ابتدا لوله با بارگذاری فشار هیدروستاتیک تحت آنالیز استاتیکی با استفاده از روش طول کمان قرار گرفته تا تاریخچه بارگذاری و بار حداکثر به دست آید، سپس با استفاده از نتایج تحلیل استاتیکی، گام زمانی مربوط به فشار موردنظر برای ایجاد کمانش دینامیکی تعیین می‌شود که از آن گام زمانی به بعد، نوع تحلیل به دینامیکی ضمنی تعویض می‌شود. برای اینکه کمانش به صورت دینامیکی منتشر شود، نیاز به وجود یک محرک است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

در این مطالعه، این محرک به صورت فروبرنده‌ای استوانه‌ای مدل شده است که به لوله ضربه وارد می‌کند و در واقع عامل انتشار کمانش دینامیکی است. باید توجه داشت که سرعت ضربه محرک خارجی تاثیری در میزان سرعت انتشار کمانش دینامیکی ندارد. برای بررسی این مساله، ضربه با سرعت‌های مختلف به لوله‌ای که در معرض فشارهای آغاز متفاوت قرار داشت، اعمال شد و مشخص گردید که سرعت ضربه فرو برنده تاثیری در سرعت انتشار ندارد.

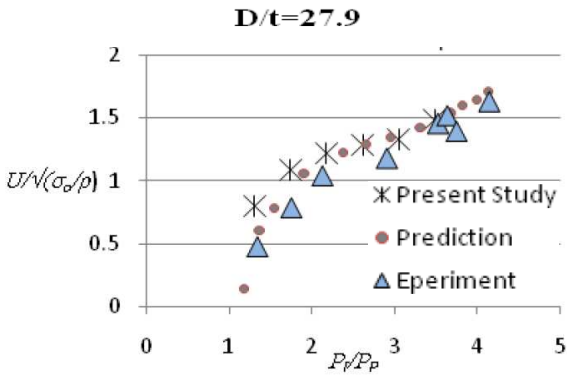
جهت به دست آوردن سرعت یکنواخت انتشار، نمودار تاریخچه زمانی جابجائی در چند گره از مدل تهیه شده لوله استخراج شد که در شکل ۷ نمونه ای از نمودارهای مذکور ارائه شده است.



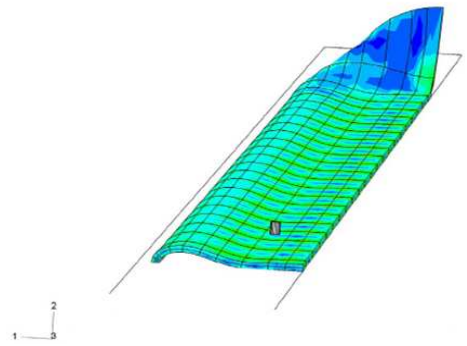
شکل ۷- نمودار تاریخچه زمانی جابجائی برای دو گره انتخابی روی مدل

سپس زمانی را که دو گره حداکثر جابجائی خود را انجام داده و به صفحه صلب پائینی برخورد می‌کنند استخراج کرده و اختلاف بین این دو زمان تعیین می‌شود، پس از تعیین فاصله بین این دو گره و تقسیم این فاصله به تفاوت زمانی، مقدار سرعت متوسط به دست می‌آید. این کار برای همه فشارها انجام شده و نتایج به دست آمده، با نتایج تحلیلی Netto و Kyriakides مقایسه شده است که نمودار مربوط در شکل ۸ ارائه شده است.

همان‌طور که از نمودار مشخص است نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، روند تغییرات را بهتر از نتایج تحلیلی ایشان ارائه می‌دهد، ولی از نتایج آزمایشگاهی اندکی بیشتر است که دلیل آن عدم اعمال اثر سیال در مدل‌سازی است. زیرا معمولا اندرکنش سیال- سازه باعث کاهش سرعت انتشار کمانش می‌گردد. در این شکل محور افقی نسبت فشار آغاز انتشار به فشار انتشار محاسباتی بر اساس آئین نامه API و محور عمودی نسبت سرعت انتشار به جذر نسبت تنش تسلیم به چگالی مصالح می باشد. شکل ۹ تغییر شکل ایجاد شده در مرحله تحلیل دینامیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقایسه نتایج حاصل از مرحله انتشار دینامیکی مدل حاضر با نتایج تحلیلی Kyriakides و Netto



شکل ۹- تغییر شکل ناشی از انتشار کمانش دینامیکی

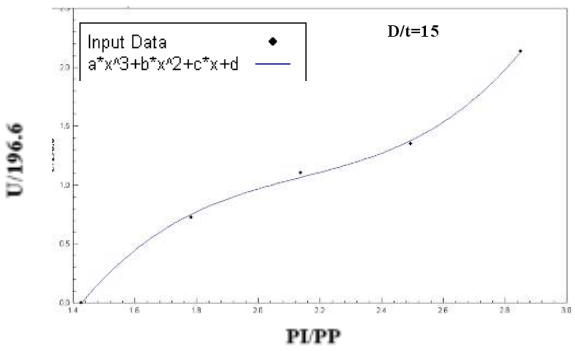
بر اساس مطالعات انجام شده توسط Kyriakides (۲۰۰۶)، در خصوص پروژه‌های اجرا شده در سراسر دنیا، نسبت‌های قطر به ضخامت لوله‌های دریائی از ۱۵ برای آب‌های عمیق تا ۵۰ برای آب کم‌عمق متغیر است[۱۳]. برای بررسی سرعت انتشار در نسبت‌های قطر به ضخامت مختلف از بازه ۱۵ تا ۵۰ چندین نسبت انتخاب شد که شامل نسبت قطر به ضخامت ۱۵، ۲۰، ۳۵، ۴۰ و ۵۰ می باشد. مشخصات هندسی لوله های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

جدول ۲- مشخصات هندسی لوله‌ها

D/t	ضخامت (mm)	قطر (mm)
۱۵	۲/۹۶	۴۴/۴
۲۰	۲/۲۲	۴۴/۴
۳۵	۱/۲۷	۴۴/۴
۴۰	۱/۱۱	۴۴/۴
۵۰	۰/۸۸۸	۴۴/۴

در تحقیقات انجام شده قبلی، جهت تعیین سرعت انتشار، رابطه خطی [۵] و غیرخطی درجه سوم [۱۹] بر حسب فشار ارائه شده است که رابطه غیرخطی درجه سوم تطابق بهتری نشان می‌دهد. درادامه، از برازش‌های غیرخطی نتایج تحلیل های دینامیکی برای هر نسبت قطر به ضخامت روابطی جهت تعیین سرعت انتشار بدست آمده که در اینجا ارائه شده است. شکل ۱۰ نمودار سرعت انتشار به فشار برای نسبت قطر به ضخامت ۱۵ و منحنی برازش شده را نشان می دهد.



شکل ۱۰- نمودار حاصل از رابطه درجه سوم برای D/t=15

رابطه پیشنهادی برای نسبت قطر به ضخامت ۱۵:

(۵)

$$\frac{U}{\sqrt{\sigma_0/\rho}} = 1.6218\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^3 - 10.4101\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^2 + 22.9489\left(\frac{P_I}{P_P}\right) - 16.2640$$

رابطه پیشنهادی برای نسبت قطر به ضخامت ۲۰:

(۶)

$$\frac{U}{\sqrt{\sigma_0/\rho}} = 0.172\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^3 - 1.44\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^2 + 4.19\left(\frac{P_I}{P_P}\right) - 2.97$$

رابطه پیشنهادی برای نسبت قطر به ضخامت ۳۵:

(۷)

$$\frac{U}{\sqrt{\sigma_0/\rho}} = 1.4483\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^3 - 0.1771\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^2 + 0.8589\left(\frac{P_I}{P_P}\right) - 0.2375$$

رابطه پیشنهادی برای نسبت قطر به ضخامت ۴۰:

(۸)

$$\frac{U}{\sqrt{\sigma_0/\rho}} = 3.874\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^3 - 0.4444\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^2 + 1.7196\left(\frac{P_I}{P_P}\right) - 1.0907$$

رابطه پیشنهادی برای نسبت قطر به ضخامت ۵۰:

(۹)

$$\frac{U}{\sqrt{\sigma_0/\rho}} = 5.4945\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^3 - 0.6019\left(\frac{P_I}{P_P}\right)^2 + 2.2195\left(\frac{P_I}{P_P}\right) - 1.6483$$

مقاطع عرضی و طولی لوله برای دو نسبت قطر به ضخامت مختلف و در فشارهای متفاوت در شکل‌های ۱۱ الی ۱۲ در زیر ارائه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

فشارآغاز	مقطع عرضی	مقطع طولی
$0.5p_{co}$		
$0.8p_{co}$		

شکل ۱۱- مقاطع عرضی و طولی تحت فشارهای آغازی مختلف برای D/t=15

فشار آغاز	مقطع عرضی	مقطع طولی
$0.4p_{co}$		
$0.7p_{co}$		

شکل ۱۲- مقاطع عرضی و طولی تحت فشارهای آغازی مختلف برای D/t=50

۶- بررسی تاثیر ناکاملی در سرعت انتشار کمانش دینامیکی

جهت بررسی تاثیر تغییر شکل اولیه در میزان سرعت انتشار کمانش مقادیر مختلف Δ_0 در نظر گرفته شد. این پارامتر نشان‌دهنده دامنه تغییر شکل است و با تغییر دادن آن می‌توان دامنه تغییر شکل را عوض کرد و تغییر شکل جدیدی به دست آورد. مدل‌های جدیدی با $\Delta_0 = 0.01,0.02,0.03,0.04$ ساخته شد. در همه مدل‌ها نسبت قطر به ضخامت برابر ۲۷/۹ می‌باشد. جدول ۳ نتایج حاصله را نشان می‌دهد.

جدول ۳- سرعت‌های به‌دست آمده در تغییرشکلهای مختلف

مقادیر مختلف Δ_0	فشارهای اعمالی	
	$0.4p_{co}$	$0.7p_{co}$
۰/۰۱	۲۱۳/۴	۲۵۹/۹۴
۰/۰۲	۲۱۳/۴۲	۲۵۹/۹۱
۰/۰۳	۲۱۳/۴۵	۲۵۹/۹۳
۰/۰۴	۲۱۳/۴۲	۲۵۹/۹۴

با توجه به نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که میزان تغییرشکل تاثیر زیادی در سرعت انتشار کمانش دینامیکی ندارد.

۷- بررسی تاثیر سرعت ضربه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

فرو برنده با سرعت ۱۲/۷ mm/s به لوله ضربه وارد می‌کند. برای اینکه مشخص شود که سرعت فرو برنده در انتشار پدیده کمانش دینامیکی چقدر تاثیرگذار است، چهار مورد تحلیل انجام شد. دو سرعت متفاوت که یکی کمتر از ۱۲/۷ mm/s و دیگری بیشتر از این مقدار بود، انتخاب شد.

ابتدا فرو برنده با سرعت ۶ mm/s به لوله‌ای که تحت فشار 0.7pco بود ضربه وارد کرد، سپس برای مشخص شدن تاثیر فشار، مقدار فشار اعمالی به 0.4pco تغییر داده شد و دوباره تحلیل انجام گردید. بار دیگر فرو برنده با سرعت ۲۵ mm/s به لوله‌ای که تحت فشارهای مورد قبلی قرار داشت ضربه وارد کرد. جدول ۴ نتایج حاصله را نشان می‌دهد.

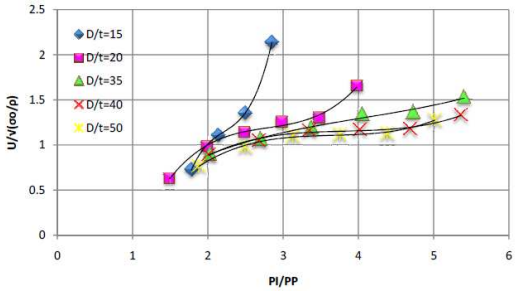
جدول ۴- مقادیر سرعت انتشار به ازاء سرعت‌های مختلف اعمال ضربه

سرعت اعمال ضربه	فشارهای اعمالی	
	$0.4p_{co}$	$0.7p_{co}$
۶(mm/s)	۲۱۳/۴	۲۱۳/۴۴
۱۲/۷(mm/s)	۲۵۹/۹۴	۲۵۹/۸۱

با مقایسه نتایج جدید با نتایج قبلی مشخص می‌شود که سرعت فرو برنده تاثیری در پدیده انتشار کمانش دینامیکی ندارد. به عبارتی فرورفتگی اولیه برای منتشر شدن فقط نیاز به یک محرک خارجی دارد.

۸- نتیجه گیری

در این بخش نتایج حاصل از این تحقیق ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که با وجود اینکه نتایج بدست آمده محدود به مدل‌های تحلیل شده و شرایط مرزی و نیروئی در نظر گرفته شده برای آن‌ها است، با این حال در مواردی امکان تعمیم نتایج وجود دارد. همه نتایج حاصله برای سرعت‌های انتشار به ازای نسبت‌های قطر به ضخامت مختلف در نمودار شکل ۱۳ برای مقایسه ارائه شده است.



شکل ۱۳- نمودارهای سرعت برای مقادیر مختلف نسبت قطر به ضخامت

با مقایسه مقادیر سرعت می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش نسبت قطر به ضخامت، مقدار سرعت افزایش می‌یابد. روند تغییرات سرعت با کاهش نسبت قطر به ضخامت افزایش می‌یابد به عبارتی لوله‌ای با نسبت قطر به ضخامت کمتر محدوده وسیع‌تری از سرعت‌ها را تجربه می‌کند. برای متوقف کردن کمانش‌های با سرعت بالا باید از کمانش‌گیرهائی با ضریب بازدهی بالاتر استفاده کرد و فاصله بین کمانش‌گیرها را نیز کاهش داد. در نسبت‌های قطر به ضخامت کمتر از ۳۵، فاصله بین نمودارها افزایش می‌یابد، در واقع می‌توان نتیجه گرفت که میزان افزایش سرعت برای نسبت‌های قطر به ضخامت‌های کمتر از ۳۵ به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. به طور کلی نتایج حاصله را بدین صورت می توان جمع بندی نمود:

۱- با کاهش نسبت قطر به ضخامت مقدار سرعت افزایش می‌یابد. در نسبت‌های قطر به ضخامت کمتر از ۳۵ میزان این افزایش بیشتر است.

۲- برای لوله‌هائی با مصالح یکسان و نسبت قطر به ضخامت مشخص، دقیق‌تر این است که رابطه بین سرعت انتشار کمانش دینامیکی و فشار آغاز به صورت یک تابع درجه سوم بیان شود.

۳- تغییرات سرعت انتشار در فشارهای نزدیک به فشار انتشار و فشار خرابی بیشتر است. روند تغییر منحنی‌های درجه سوم نشان می‌دهد که در ابتدا و انتهای منحنی یا به عبارتی در فشارهای نزدیک به فشار انتشار و فشار خرابی روند تغییرات سرعت بیشتر می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

۴- محدوده بین فشار انتشار و فشار خرابی برای لوله‌ای با نسبت قطر به ضخامت کمتر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. هر چه نسبت قطر به ضخامت افزایش یابد، نمودار سرعت به سمت افق و در مقابل برای مقادیر نسبت قطر به ضخامت کمتر نمودار سرعت به سمت قائم تمایل پیدا می‌کند.

۵- میزان تغییر شکل اولیه در سرعت انتشار کمانش دینامیکی تاثیری ندارد.

۶- برای اینکه کمانش به صورت دینامیکی منتشر شود، نیاز به وجود یک محرک است که به لوله ضربه ای وارد کند ولی سرعت ضربه محرک خارجی تاثیری در میزان سرعت انتشار کمانش دینامیکی ندارد.

۷- با افزایش فشار اعمالی به لوله، طول ناحیه انتقال کاهش و سطح تماس بین جداره‌های لوله افزایش می‌یابد.

کلید واژگان

1-Changing status nonlinearity

۹- مراجع

1-Kyriakides, S.; Bobcock, C. D.; Elyada, D., "Initiation of Propagating Buckles From Local Pipeline Damages", ASME Journal of Energy Resources Technology, vol. 106, pp. 79-87, (1984).

2-Kyriakides, S.; Bobcock, C. D., "Buckle Propagation Phenomena in Pipelines", in Collapse: the Buckling of Structures in Theory and Practise (edited by JMT Thompson and GW Hunt), Cambridge University Press, and Cambridge, (1993).

3-Kyriakides, S.; Netto, T. A., "On the Dynamics of Propagating Buckle in Pipelines", International Journal of Solids and Structures, vol. 37, pp. 6843-6878, (2000).

4-Mesloh, R.; Jhons, T. G.; Sorenson, J. E., "The Propagation Buckle", BOSS´ 76, vol. 1, pp. 787-797, (1976).

5-Kyriakides, S.; Bobcock, C. D., "On the Dynamics and the Arrest of the Propagation Buckle in Offshore Pipelines", Offshore Technology Conference, Paper OTC 3479, Houston TX, pp. 1035-1040, (1979).

6-Song, H. W.; Tassoulas, J. L., "Finite Element Analysis of Propagating Buckles", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 36, pp. 3529-3552, (1993).

7-Nogueria, A. C.; Tassoulas, J. L., "Dynamic Buckle Propagation: Steady-State Finite Element Analysis", (2000).

8-Pasqualino, I. P.; Estefen, S. F., "A Nonlinear Analysis of the Buckle Propagation Problem in Deepwater Pipelines", International Journal of Solids and Structures, vol. 38, pp. 8481-8502, (2001).

9-Kyriakides, s.; Vogler, T. J., "Buckle Propagation in Pipe-in-Pipe Systems. Part II. Analysis", Int. J. of Solids and Structures, vol. 39, pp. 367-392, (2002).

10-Toscano, R. G.; Mantovano, L. O.; Amenta, P. M.; Charreau, R. F.; Johnson, D. H.; Assanelli, A. P.; Dvorkin, E. N., "Collapse Arrestor for Deepwater Pipelines. Cross-Over Mechanism", Computers and Structures, vol. 86, pp. 728-743, (2008).

11-Olso, E.; Kyriakides, S., "Integral Ring Buckle Arrestors for Pipe-in-Pipe Systems", International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 38, pp. 267-284, (2003).

12-Lee, L.-H.; Kyriakides, S., "On the Arresting Efficiency of Slip-On Buckle Arrestors for Offshore Pipelines", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 46, pp. 1035-1055, (2004).

13-Kyriakides, S., "Mechanics of Offshore Pipelines", Austin, Texas, USA, (2006).

14-Kyriakides, S., "Propagating Instabilities in Structures", Advances in Applied Mechanics, vol. 30, pp. 67-189, (1994).

15-Nogueria, A. C.; Tassoulas, J. L., "Finite Element Analysis of Buckle Propagation in Pipelines under Tension", International Journal of Mechanical Science, vol. 37, No. 3, pp. 249-259, (1995).

16-Nogueria, A. C.; Tassoulas, J. L.,"Buckle Propagation in Tubular Structures", Offshore Technology Conference, Paper OTC 7803, Houston Tex., pp. 696-976, (1995).

17-Nogueria, A. C.,"Steady-State Finite Element Analysis of Buckle Propagation in Pipeline", Ph.D Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, Texas, (1993).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]

18-Nogueria, A. C.; Tassoulas, J. L., "Steady-State Finite Element Analysis of Buckle Propagation", Journal of Engineering Mechanics, vol. 120, No. 9, pp. 1931-1944, (1994).
19-Netto, T.A.; Kyriakides, S., "Dynamic Performance of Integral Buckle Arrestors for Offshore Pipelines. Part I Experiments", International Journal of Mechanical Science, vol. 42, No. 7, pp.1405-1423, (2000).
20-Kyriakides, S.; park, T. D.; Netto, T. A., "On the Design of I NTEGRAL Buckle Arrestores for Offshorre Pipelines", Applied Ocean Research, vol. 20, pp. 95-104, (1998).
21-Toscano, R. G.; Timms, C.; Dvorkin, E. N.; Degeer, D., "Determination of the Collapse and Collapse Propagation Pressure of Ultra-Deepwater Pipelines", Proceeding 22th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2003-37339, (2003).
22-Dvorkin, E. N.; Toscano, R. G., "Finite Element Models in the Steel Industry Part II Analysis of Tubular Products Performance", Computers and Structures, vol. 81, pp. 575-594, (2003).
23-Toscano, R.G.; Mantovano, L.; Dvorkin, E. N., "On the Numerical Calculation of Collapse and Collapse Propagation Pressure of Steel Deep-Water Pipelines under External Pressure and Bending: Experiamntal Verification of the Finite Element Results", TENARIS GROUP, Center for Industrial Research, Dr. Simini 250, 2804 Campana, Argentina.
24-Toscano, R.G., Gonzales, M.; Dvorkin, E.N., "Validation of a Finite ELEMENT Model that Simulates the Behavior of Steel Pipes under External Pressure", TENARIS GROUP, Center for Industrial Research (CINI); FUDETEC, av. Cordoba 320, 1054 Buenos Aires, Argentina.
25-Assanelli, A. P.; Toscano, R. G.; Johnson, D. H.; Dvorkin, E. N., " Experimental/Numerical Analysis of the Collapse Behavior of Steel Pipe", Enginrring Computations, vol. 17, No. 4, pp. 459-486, (2000).
26-Hoo Fatt, M. S., "Plastic Failure of Pipelines", Proceeding of the 8th International Offshore and Polar Engineering conference, Montreal, Canada, vol. 2, pp. 119-126, (1998).
27-ABAQUS users' manual, version6.5.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1389.6.11.1.0]