بررسی اثرات کمانش گیرها در جلوگیری از انتشار دینامیکی کمانش در خطوط لوله دریائی

احسان دادخواه خیابانی[۱] ، احمدرضا مصطفی قره باغی [۲] ، کریم عابدی [۳*]

۱- کارشناس ارشد سازه های دریائی، دانشگاه صنعتی سهند
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند
۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

یک خط لوله از جمله سازه هایی می باشد که در طراحی آنها معمولا پایداری، نقش مهمی را ایفا می کند. به علت اعمال نیروی بیش از حد به نقطه ای از لوله، احتمال وقوع کمانش موضعی وجود دارد. یکی از راه هایی که بتوان مطمئن شد که کمانش در اثر ایجاد خرابی موضعی انتشار نمی یابد، نصب متوالی کمانش گیرها در طول خط لوله است، که باعث می شود کمانش منتشر شده، تنها در فاصله بین دو کمانش گیر باقی بماند. فاصله بین دو کمانش گیر معمولا به صورت سعی و خطا (مثلا در طول مراحل تعمیر) تعیین شده و معمولا بین ۲۴۰-۹۰ متر متغیر است. در تحلیل های غیرخطی، هر دو رفتار غیرخطی هندسی و مصالح منظور شده است. فاصله بین کمانش گیرها با در نظرگیری نسبت های مختلف قطر به ضخامت لوله ($\frac{D}{t}$)، ضخامت کمانش گیر به ضخامت لوله ($\frac{h}{t}$) و طول کمانش گیر به قطر لوله ($\frac{La}{D}$) در فشارهای مختلف (شامل فشار گذر کمانش از کمانش گیر و فشار توقف کمانش) تعیین گردیده است.

کلمات کلیدی: کمانش دینامیکی، کمانش گیر، فاصله بین کمانش گیرها، سرعت انتشار، نسبت قطر به ضخامت

Investigation into the Effects of Buckle Arrestors on the Arresting of Dynamic Buckle Propagation in Pipelines

E. Dadkhah Khiabani[1], A. R. Mostafa Gharabaghi [2], K. Abedi[3]

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

Abstract

It is undeniable that instability plays a significant role in the design of pipelines. Local buckles induced by excessive force on specific part of pipeline can locally reduce the collapse pressure of a pipeline and cause local failure. Periodic placement of buckle arrestors along the pipeline can ensure that collapse only effect the length of pipe between two arrestors on either side of the initiation site. Arrestor spacing is usually derived by specific practical considerations on the particular line (e.g. installation and repair procedure) but typically spacing of 90-240m has been used. In the present study, the propagation and arresting of dynamic buckle are modeled using the finite element method. For the post buckling analysis, the material and geometrical nonlinearity are considered. The effects of arrestor spacing on cross over pressure

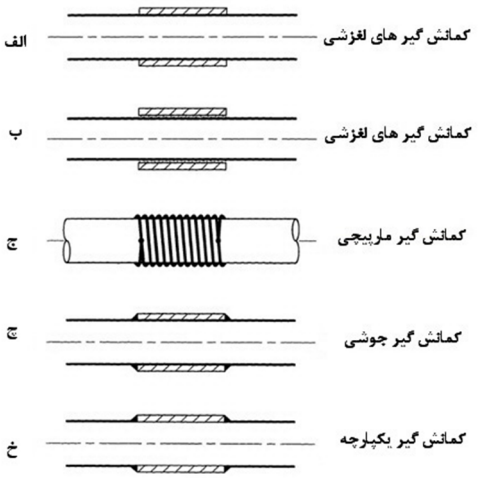
* نویسنده مسئول مقاله: k_abedi@sut.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

have been evaluated for different diameter to thickness ratio of pipeline (D/t), arrestor's thickness to pipe's thickness ratio (h/t), and arrestor's length to pipe's diameter ratio (L_a/D).
Keywords: Dynamic Buckle Propagation, Buckle Arrestor, Arrestor Spacing, Velocity of Propagation, Diameter to Thickness Ratio

۱ - مقدمه

سازه های لوله ای توخالی طویل مثل خطوط لوله، کانال های جریان و رایزرها، اصلی ترین وسایل جمع آوری و انتقال نفت و گاز از چاه های فراساحلی هستند. طراحی خط لوله بایستی بر اساس بزرگترین مد خرابی حاصل از فشار محیطی انجام شود. بصورت گسترده مطالعاتی در مورد فاکتورهای موثر در خرابی انجام شده است[۱،۲]، که از جمله موارد موثر در خرابی عبارتند از: نسبت قطر به ضخامت $\left(\frac{D}{t}\right)$، مشخصات مصالح (مدول یانگ، تنش تسلیم و پارامترهای سختی)، معایب هندسی از جمله بیضی شدگی اولیه و ضخامت متغیر در طول خط لوله و در نهایت تنش پسماند و تنش تسلیم غیر ایزوتروپیک حاصل از ساخت[۳]. کاملاً واضح است که خرابی چنین سازه های با خرابی موضعی پیش می آید و چنانچه تحت شرایط خاصی قرار داشته باشند، این خرابی گسترش یافته و به نوعی باعث انتشار کمانش در طول لوله می شود. در شرایط فشار محیطی ثابت، اگر فشار محیط(فشار هیدرواستاتیک) بیشتر از فشار انتشار لوله $\left(P_p\right)$ باشد، کمانش شروع به انتشار می کند. بروز کمانش و خرابی ناشی از فشار خارجی، مباحث تاثیر گذار در طراحی خطوط لوله نصب شده در آب عمیق هستند. مساله دیگری که به اندازه موارد قبلی دارای اهمیت می باشد، ایمنی خط لوله در مواردی است که انتشار کمانش به طور تصادفی شروع شود. از آنجایی که مقدار فشار انتشار لوله بسیار کوچکتر از فشار خرابی آن است، طراحی خطوط لوله برای فشار انتشار به خاطر ضخامت غیرمعقولی که نتیجه می دهد به هیچ وجه اقتصادی نیست. یکی از این روش ها، استفاده از کمانش گیرها در طول خط لوله است که اطمینان از محدود ماندن کمانش منتشر شده در بین دو کمانش گیر را فراهم می آورد. فاصله بین دو کمانش گیر معمولا به صورت سعی و خطا (مثلا در طول مراحل تعمیر) تعیین شده و معمولا بین ۹۰ تا ۲۴۰ متر متغیر است[۲،۵،۴]. کمانش گیر در واقع یک عضو الحاق یافته به لوله است که از لوله اصلی قوی تر بوده و برای تغییر شکل پلاستیک یا پهن شدگی آن نیاز به انرژی بسیار بیشتری می باشد. این عضو الحاق یافته، متوقف کننده یا کمانش گیر خوانده می شود. کمانش گیر ها صلبیت خمشی پیرامونی را در لوله به طور موضعی افزایش داده و لذا یک مانع در مسیر انتشار به وجود می آورند. یک نوع تقسیم بندی که برای کمانش گیر ها ارائه شده است در شکل ۱ نشان داده شده است[۴].



شکل ۱- انواع کمانش گیرها [٦]

کمانش گیر های (الف) و (ب)، کمانش گیر های لغزشی[1] به صورت یک حلقه با ضخامت زیاد هستند که اطراف لوله پیچیده شده اند[۷]، کمانش گیر (ج)، کمانش گیر مارپیچی[2] می باشد که با یک قید محکم بسته شده یا رزوه می شود[۸]، کمانش گیر (چ)، کمانش گیر جوشی[3] می باشد که بر روی لوله با جوش متصل می شود[۸]، کمانش گیر (خ)، کمانش گیر یکپارچه[4] می باشد که بین دو قطعه لوله قرار گرفته و جوش می شود[۹]. در آب های کم عمق، کمانش گیر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

لغزشی و در آب های با عمق متوسط تا عمیق، کمانش گیر یکپارچه به کار می رود. علیرغم تحقیقات زیادی که روی مساله انتشار کمانش و نحوه توقف آن انجام شده است، در مورد فواصل بین کمانش گیرها و تاثیر مشخصات کمانش گیرها و لوله بر روی این فاصله در برابر انتشار دینامیکی کمانش، مطالعات چندانی انجام نشده است. در این تحقیق یک مطالعه پارامتریک جامع با در نظرگیری نسبت قطر به ضخامت ($\frac{D}{t}$)، عمق کمانش گیر به ضخامت لوله ($\frac{h}{t}$) و پهنای کمانش گیر به قطر لوله ($\frac{L_a}{D}$) انجام شده و فاصله بهینه بین دو کمانش گیر در شرایط آب عمیق، عمق متوسط و کم عمق در فشارهای مختلف (شامل فشار گذر کمانش از کمانش گیر و فشار توقف کمانش) و همچنین سرعت انتشار دینامیکی کمانش در لحظه رسیدن به کمانش گیر در شرایط مذکور تعیین شده است. لذا در این تحقیق اهداف ذیل مورد نظر می باشد: ۱- مدل سازی عناصر محدود پدیده انتشار کمانش و توقف آن توسط کمانش گیر؛ ۲- تعیین فاصله مناسب بین دو کمانش گیر با در نظر گیری پارامترهای مربوط به مشخصات لوله و کمانش گیر شامل نسبت قطر به ضخامت ($\frac{D}{t}$)، عمق کمانش گیر به ضخامت لوله ($\frac{h}{t}$) و پهنای کمانش گیر به قطر لوله ($\frac{L_a}{D}$) ؛ ۳- تعیین سرعت کمانش دینامیکی در لحظه رسیدن به کمانش گیر در فشار گذر کمانش از کمانش گیر و فشار توقف کمانش.

۲- مدل سازی عناصر محدود سه بعدی انتشار کمانش دینامیکی و توقف آن توسط کمانش گیر

مدل سازی عناصر محدود در اوائل دهه ۱۹۹۰ جهت مدل سازی پدیده های شروع کمانش، انتشار شبه استاتیکی و دینامیکی کمانش[۱۰] در دانشگاه تگزاس مورد استفاده قرار گرفت. فرمول‌بندی عناصر محدود، به کار رفته توسط آنها با استفاده از فرمول‌بندی لاگرانژی و با استفاده از عناصر محدود پوسته ای صورت گرفت[۱۱].

مدل عناصر محدود سه بعدی به دلیل کاربرد آسان، پایدار بودن و در نظرگیری اثرات طولی در مقایسه با مدل عناصر محدود دو بعدی دقیق تر می باشد، از اینرو در تحقیق حاضر، از روش عناصر محدود سه بعدی برای مدل سازی استفاده شده است[۱۱].

در روش عناصر محدود سه بعدی، برای بررسی انتشار کمانش، لوله مورد نظر با مشخصات هندسی و مکانیکی معین و با طول مشخص (معمولا بیش از ده برابر قطر لوله) مدل سازی می گردد. سپس شبکه بندی شده، با اعمال شرایط مرزی، مورد تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح قرار می گیرد. برای محاسبه پاسخ پس کمانشی لوله، استفاده از روش طول کمان الزامی است. نتیجه تحلیل شبه استاتیکی، منحنی فشار خارجی- تغییر حجم لوله است که از روی آن فشار خرابی و فشار انتشار به دست می‌آید. در این مقاله مدل سازی عناصر محدود توسط نرم افزار ABAQUS انجام شده است که مشخصات مدل تهیه شده، به صورت زیر می باشد:

- در تمام مدت عمر لوله از عملیات نصب تا پایان مدت بهره برداری وقوع کمانش موضعی محتمل است. کمانش موضعی در شرایط زیر ایجاد می گردد :

الف) در هنگام نصب؛ ب) در هنگام بهره برداری در اثر برخورد یک عامل خارجی؛ ج) به سبب ناهمواری های بستر؛ د) به علت کاهش ضخامت جداره؛ ه) به علت ناپایداری بستر.

تمامی موارد ذکر شده باعث ایجاد یک خرابی موضعی در لوله شده که در این مقاله به نحوه گسترش این خرابی و راهکارهای مقابله با آن که کمانشگیر ها و طراحی آنها می باشند، پرداخته شده است.

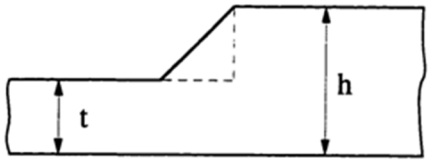
- لوله و کمانش گیر از جنس فولاد SS-304 می‌باشند.

- جهت مدل سازی لوله و کمانش گیر از المان Solid سه بعدی ۲۷ گرهی (C3D27R) Integratin Reduced یافته استفاده شده است که ۱۴ نقطه انتگرال‌گیری دارد این المان با متغیرهای گرهی تنش-تغییر مکان است که بر مبنای سینماتیک کرنش های بزرگ عمل می کند و درجات آزادی فعال در هر گره شامل سه مولفه انتقال می باشد[۱۲].

- برای المان‌بندی ناحیه تغییر مقطع از لوله به کمانش گیر (شکل ۲) از المان Solid سه بعدی ۱۸ گرهی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

(C3D15V) استفاده شده است. این المان از خانواده المان (C3D27) بوده و تمامی خصوصیات آن را دارا می باشد[۱۲].

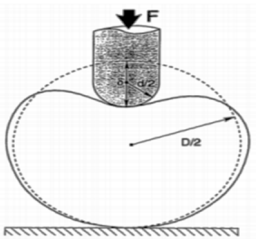


شکل ۲- ناحیه تغییر مقطع [۱۲]

- جهت اندازه گیری تغییرات حجم لوله از المان سیال هیدرواستاتیک استفاده شده است (F3D4). این المان سه بعدی، دارای چهار گره می باشد که این المان صرفا به منظور صحت سنجی مدل ساخته شده مورد استفاده قرار گرفته است[۱۲].

- برای جلوگیری از نفوذ دو سطح بالایی و پائینی لوله پس از کمانش، لازم است که سطح تماسی تعریف شود که لوله پس از کمانش با آن تماس پیدا کند، این سطح تماس با المان (R3D4) مدل شده است که قابلیت تغییر شکل ندارد در مرکز لوله و هم راستا به محور طولی آن قرار می گیرد و لذا لوله در آن نفوذ نمی کند. المان سه بعدی (R3D4) دارای چهار گره می باشد[۱۲].

- برای انتشار دینامیکی کمانش به یک محرک یا ضربه زن نیاز است[۸]. ضربه زن با استفاده از المان سه بعدی (R3D4) مدل سازی شده است. قطر ضربه زن $d = 0.4D$ انتخاب شده است (شکل ۳). میزان فرورفتگی ایجاد شده توسط ضربه زن در لوله $\delta_0 = 0.33D$ می باشد (D قطر لوله می باشد).



شکل ۳- مشخصات هندسی ضربه زن

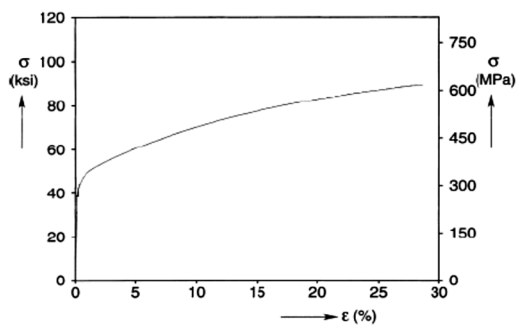
- در این مقاله، بر اساس تحقیقات Kyriakides و Netto (۲۰۰۰)، شبکه‌بندی بهینه به صورتی است که در راستای محیطی، لوله توسط ده المان با اندازه های متفاوت تقسیم بندی شده به طوری که کمان مربوطه به ترتیب از قسمت تحتانی به قسمت فوقانی ۲/۵-۲/۵-۷/۵-۷/۵-۱۰-۱۰-۱۵-۱۵-۱۰-۱۰درجه می باشد و در امتداد ضخامت هم دو المان به کار رفته است. طول انتخاب شده برای المان های لوله، معادل $\frac{5D}{7}$ یا ۰/۷۱ برابر قطر لوله است. در مورد کمانش گیر نیز در راستای طولی از چهار المان با طول $\frac{D}{8}$ استفاده شده است. در امتداد ضخامت کمانش گیر، از چهار المان استفاده شده است[۷].

- در اغلب مطالعات انجام شده از روش ناکاملی در حادترین حالت بر مبنای رابطه زیر، استفاده شده است:

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

که در آن w_0 تغییرمکان های شعاعی، θ زاویه قطبی Δ_0 پارامتر دامنه ناکاملی ، x فاصله از مبدا و β پارامتر تعیین کننده محدوده ناکاملی است[۷]. در این مقاله نیز از این رابطه استفاده شده است و مقادیر β و Δ_0 به ترتیب برابر با ۱و ۰/۰۴ در نظر گرفته شده[۷] و از آنجا که یک چهارم مقطع مدل شده، θ در محدوده ۰ تا ۹۰ درجه تغییر می کند[۲،۹].

- در لوله های دریائی رفتار غیرخطی مصالح 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–کرنشRamberg-Osgoodاصلاح شده، استفاده شده است. شکل ۴ منحنیRamberg-Osgood اصلاح شده را برای فولاد SS-304 نشان می دهد.



شکل ٤- منحنی تنش-کرنش اصلاح شده Ramberg-Osgood (n=12) [۸،۷،۱۲]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

- خطوط لوله را معمولا جهت کاهش کشش ناشی از وزن قسمت معلق به صورت خالی نصب می‌کنند. به علاوه به منظور تعمیر در طول عمر خطوط لوله، فشار داخلی آنها را کاهش می دهند، به همین دلائل، فشار خارجی، پارامتر بارگذاری مهمی در طراحی خط لوله است. فشار کمانش موضعی و فشار انتشار کمانش لوله، هر دو فشار مشخصه خارجی هستند، بنابراین جهت تعیین آنها باید به لوله فشار خارجی وارد شود. فشار خارجی ای که به لوله‌های دریائی وارد می شود، فشار هیدروستاتیک آب بوده و از آنجائی که قطر لوله در مقابل عمق آب ناچیز است، فرض می شود که به تمام نقاط آن فشار به صورت یکسان وارد می شود. راستای فشارهای وارد بر هر نقطه، به سمت مرکز لوله (در راستای شعاعی) می باشد.

- با توجه به مدل کردن یک چهارم لوله، شرایط مرزی مدل در یک سر لوله به صورت متقارن در راستای محور لوله تعریف شده است و در سر دیگر نیز در دو راستای شعاعی و محیطی گیردار شده است. درصفحات تقارن نیز شرایط تقارن اعمال شده است. صفحه قرار گرفته شده زیر لوله، به صورت گیردار مدل شده است. برای تعریف صحیح تماس به دو سطح نیاز است که سطح اول، سطح داخلی لوله و سطح دوم، سطحی است که لوله پس از کمانش با آن تماس پیدا می کند. پس از خرابی کامل مقطع لوله، دو جداره داخلی بالا و پائین لوله به هم برخورد می کنند. به دلیل مدل کردن ربع لوله جهت کاستن زمان تحلیل، صفحه صلب که قابلیت تغییر شکل ندارد در مرکز لوله و هم راستا به محور طولی آن قرار می گیرد و لذا لوله در آن نفوذ نمی کند. المان سه بعدی (R3D4) دارای چهار گره می باشد. منظور از تماس، رفتارهای تماسی مکانیکی (مانند اصطکاک)و حرارتی (مانند انتقال حرارت) بین قطعات است. در فرآیند انتشار کمانش، پس از خرابی کامل هر مقطع از لوله، دو جدار بالا و پائین آن به هم برخورد می کنند. برای مدل سازی عناصر محدود انتشار کمانش، ساخت مدلی که در زمان مقتضی تماس بین دو جداره را درک کرده و با داشتن سختی مناسب از در هم فروروی آنها جلوگیری کند، اهمیت زیادی دارد. اساسا در مسائل مربوط به اندرکنش دو جسم با هم سه روش تعریف در ABAQUS وجود دارد که شامل Contact، Actuator و Sensor است. برای مدل کردن اندرکنش بین دو جداره لوله از اندرکنش نوع Contact استفاده شده است که تماس بین دو جسم را به خوبی مدل می کند. این نوع اندرکنش نیز به نوبه خود به دو بخش مکانیکی و حرارتی تقسیم می شود که در مدل لوله، بخش مکانیکی مدنظر بود. بخش مکانیکی قادر به مدل سازی حرکت مماسی، حرکت عمودی و حرکت میرا است. از آنجا که دو جداره عمود بر هم حرکت می کنند از حرکت عمودی برای مدل کردن رفتار تماسی لوله استفاده شد. جهت مدل سازی تماس عمودی نیز دو نوع انتخاب نقطه به صفحه و صفحه به صفحه وجود دارد. تماس بین جداره های لوله با توجه به انتشار دینامیکی کمانش به صورت صفحه به صفحه است لذا تماس به صورت صفحه به صفحه تعریف شده است.

۳- تحلیل انتشار کمانش در خطوط لوله دریائی

تحلیل های انتشار کمانش در دو مرحله شبه استاتیکی و دینامیکی انجام می شود، که هرکدام به طور جداگانه در ادامه شرح داده شده است.

۳-۱- صحت سنجی تحلیل شبه استاتیکی

تحلیل های غیرخطی هندسی و مصالح با کنترل تغییر مکان، دقیق ترین روش برای تعیین ظرفیت کمانشی واقعی سازه ها است و برای طرح یا ارزیابی سازه های واقعی پیشنهاد می شود. در تحلیل کمانش غیرخطی که در آن سازه به طور کامل خراب می شود، یا به ساختار پایدار دیگری فروجهش می کند، از روش Riks استفاده می شود که معمولا روش طول کمان نامیده می شود. در این تحلیل، ناکاملی های اولیه، رفتار پلاستیک، پاسخ تغییر شکل های بزرگ و غیره را می‌توان اعمال نمود. به علاوه، با استفاده از بارگذاری کنترل تغییرمکان می توان رفتار پس کمانشی سازه را به دست آورد. برای انجام مطالعه موردی، از مدلی با مقیاس کوچک از جنس فولاد SS-304 با مشخصات

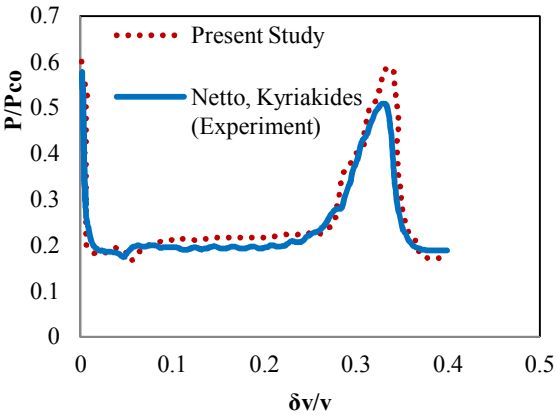
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

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 تحقیق حاضر

مشخصه	لوله	کمانش گیر
قطر خارجی لوله (mm)	۴۴/۴	-
ضخامت لوله (mm)	۱/۵۹	-
نسبت طول کمانش گیر به قطر لوله	-	۰/۵
نسبت ضخامت کمانش گیر به ضخامت لوله	-	۲/۱۸۷
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۵	۲۱۴
حداقل تنش تسلیم شاخص (MPa)	۳۰۱/۷	۳۶۰
تنش تسلیم (MPa)	۲۷۲	۲۷۲
چگالی فولاد (Kgm^{-3})	۷۷۵۰	۷۷۵۰

نتایج مدل سازی مرحله انتشار شبه استاتیکی کمانش توسط Kyriakids و Netto و مدل حاضر در شکل ۵ مقایسه شده است. همانطور که در شکل دیده می شود نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر تطابق مناسبی با نتایج محاسبه شده توسط محققین مذکور دارد.



شکل ۵- مقایسه نتیجه انتشار شبه استاتیکی کمانش، (h/t=2.187 و La/D =0.5)

محور افقی نمودار، بیانگر تغییرات حجم به حجم اولیه و محور عمودی نشان دهنده فشار به فشار خرابی محاسبه شده از آئین نامه است. رابطه فشار خرابی در آئین نامه API به صورت زیر است.

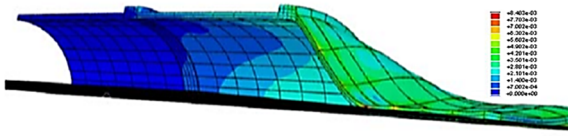
$$P_{co} = \frac{P_y P_{ce}}{\sqrt{\left(P_y^2 + P_{ce}^2\right)}} \quad (۲)$$

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

$$P_{ce} = \frac{2E}{1-\vartheta^2}\left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (۴)$$

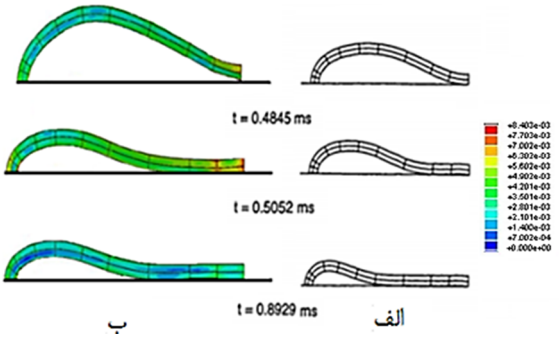
$$P_p = \sigma_0 A \left(\frac{t}{D}\right)^{\beta} \quad (۵)$$

که در این روابط P_{ce} فشار خرابی الاستیک، P_y فشار تسلیم، P_{co} فشار خرابی، σ_y پارامتر تسلیم، σ_0 حداقل تنش تسلیم مصالح لوله، E مدول یانگ و υ ضریب پواسون است. شکل۶ نیز تغییر شکل ایجاد شده از آنالیز شبه استاتیکی را نشان می دهد. همچنین برای فولاد SS304 ، A=35.547 و β=2.471 می باشد[۱۷].



شکل ٦- انتشار کمانش شبه استاتیکی

برای تحلیل رفتار انتشار کمانش شبه استاتیکی، شکل ۷ روند تدریجی تغییرشکل مقطع عرضی را با توجه به نمودار حاصل از تحلیل شبه استاتیکی نشان می دهد.



شکل ۷- روند تدریجی تغییر شکل مقطع عرضی در انتشار شبه استاتیکی کمانش الف) نتایج Kyriakides و Netto [۷] ب) نتایج تحقیق حاضر

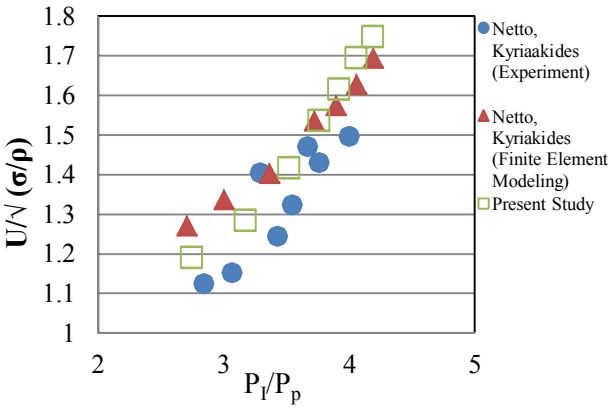
۳-۲- صحت سنجی تحلیل دینامیکی

برای تحلیل کمانش دینامیکی از روش انتگرال گیری ضمنی گام به گام برای حل معادلات غیرخطی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

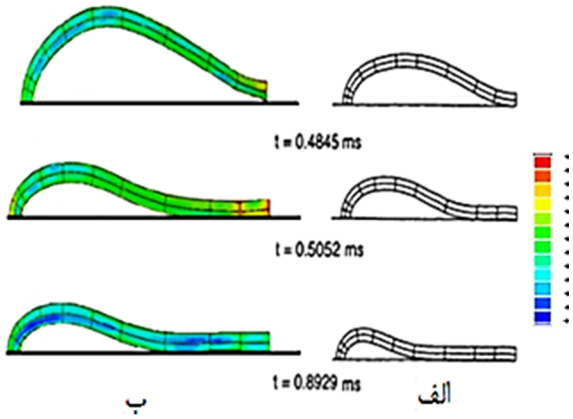
دینامیکی استفاده شده است. طبق تحقیقات Kyriakides اگر فشار اعمال شده به لوله در محدوده بین فشار انتشار کمانش تا فشار خرابی باشد، کمانش به صورت دینامیکی و با سرعت زیاد منتشر می شود. در این محدوده فشار، دو نوع مد خرابی Flip-flop و Flat مشاهده می شود. اگر فشار در محدوده بین فشار انتشار تا ۸۷ درصد فشار خرابی باشد، مود Flat خرابی و در فشارهای بالاتر از این محدوده مود Flip-flop خرابی ایجاد می شود. هدف در تحقیق حاضر، مدل سازی مود Flat خرابی می باشد. نتایج به دست آمده از مدل سازی در خلاء، با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی Netto و Kyriklides مقایسه شده است و نمودار حاصل در شکل ۸ آمده است. همانطور که از نمودار مشخص است نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تحلیلی ایشان تطابق خوبی دارد، ولی از نتایج آزمایشگاهی اندکی بیشتر است که دلیل آن عدم اعمال اثر سیال در مدل سازی است، چون اندرکنش سیال-سازه باعث کاهش سرعت انتشار کمانش می شود. در این شکل محور افقی نسبت فشار آغاز انتشار به فشار انتشار محاسباتی از آئین نامه و محور عمودی نسبت سرعت انتشار به جذر نسبت تنش تسلیم به چگالی مصالح است.

نحوه محاسبه سرعت بدین گونه است که اجازه داده می شود کمانش، طولی بیشتر از ۱۰ برابر قطر لوله را طی کند، سپس سرعت انتشار اندازه گیری می شود. برای محاسبه سرعت در لحظه رسیدن کمانش به کمانش گیر، یک گره در ابتدای کمانش گیر و گره دیگر را در فاصله $13D$ از آن تعریف کرده و نمودار جابجایی-زمان برای گره های مشخص شده بر روی لوله از نتایج تحلیل استخراج شد. سپس زمانی را که دو گره، حداکثر جابجایی خود را انجام داده و به صفحه صلب پایینی برخورد می کنند را تعیین کرده و تفاوت بین این دو زمان مشخص می شود. آنگاه، فاصله بین این دو گره را محاسبه کرده و در نهایت از تقسیم این فاصله به تفاوت زمانی، مقدار سرعت یکنواخت بدست می آید[۱۳،۱۵].



شکل ۸- مقایسه نتایج حاصله از مرحله انتشار دینامیکی کمانش مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی Netto و Kyrialides در خلاء $\frac{h}{t}=2.187$ و $\frac{L_a}{D}=0.5$ [۷]

برای تحلیل رفتار انتشار کمانش دینامیکی، شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب روند تدریجی تغییرشکل مقطع عرضی و مقایسه تغییر شکل نهایی مقطع عرضی در حالت شبه استاتیکی و دینامیکی را نشان می دهند و مبین پهن شدگی بیشتر لوله در انتشار دینامیکی کمانش می باشد.



شکل ۹- روند تدریجی تغییرشکل مقطع عرضی در انتشار دینامیکی کمانش الف) نتایج Kyriakides و Netto [۷] ب) نتایج تحقیق حاضر



شکل ۱۰- مقایسه تغییر شکل نهایی مقطع عرضی در حالت شبه استاتیکی و دینامیکی

----- حالت شبه استاتیکی ——— حالت دینامیکی

جدول ۲ صحت سنجی فشار گذر در انتشار دینامیکی نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

جدول ۲- فشار گذر در انتشار دینامیکی کمانش

شماره نمونه	$\frac{La}{D}$	$\frac{h}{t}$	شکل خرابی	P_{XD}, (bar) [۷]	P_{XD}, (bar) Present Study
۱	۰/۵۰۰	۲/۱۸۷	⬯	(۱۱۴/۳)	(۱۱۶/۷۲)
۲	۰/۵۰۵	۲/۳۸۷	⬭	(۱۱۶/۶)	(۱۱۸/۶)
۳	۰/۵۰۲	۳/۳۷۳	⬭	(۱۲۴/۱)	(۱۳۰/۱)
۴	۱/۰۰۰	۱/۱۹۲	⬯	(۱۱۵/۷)	(۱۱۸/۲)

⬭ گذر Flat و ⬯ گذر Flip-flop و P_{XD} فشار گذر دینامیکی

با توجه به اطمینان از صحت مدل سازی عناصر محدود مورد استفاده و با اطلاعات حاصله از این صحت سنجی، به مطالعه پارامتری اثرات کمانش گیرها در جلوگیری از انتشار دینامیکی کمانش، بر روی مدل هائی با نسبت های قطر به ضخامت مختلف پرداخته می شود.

۴- نتایج تحلیل های انتشار دینامیکی کمانش

در تحقیق حاضر، به منظور انجام تحلیل های مربوط به انتشار دینامیکی کمانش، پارامترهای مختلفی در نظر گرفته شده است که چگونگی انتخاب این پارامترها در زیر به طور مفصل شرح داده می شود:

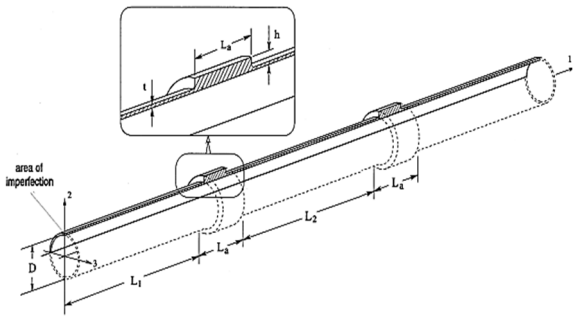
۴-۱- مشخصات مورد استفاده در تحلیل ها

۱- طبق تحقیقات انجام شده توسط Kyriakides [۷]، در مورد پروژه های انجام شده در سراسر دنیا، نسبت قطر به ضخامت ($\frac{D}{t}$) لوله های دریایی از ۱۵ برای آب های عمیق تا ۵۰ برای آب های کم عمق متغیر است. لذا برای بررسی سرعت کمانش دینامیکی منتشر شده در لحظه برخورد با کمانش گیر در نسبت های $\frac{D}{t}$ مختلف از بازه ی ۱۵ تا ۵۰ چندین نسبت انتخاب شد که شامل نسبت های $\frac{D}{t} = 15, 27.9$ و 50 است. مشخصات هندسی لوله در جدول۳ ذکر شده است.

جدول ۳- مشخصات هندسی لوله مورد استفاده در تحلیل

$\frac{D}{t}$	ضخامت(mm)	قطر(mm)
۱۵	۲/۹۶	۴۴/۴۵
۲۷/۹	۱/۵۹	۴۴/۴۵
۵۰	۰/۸۸۹	۴۴/۴۵

۲- در تحقیق حاضر تنها گذر کمانش از کمانش گیر بصورت Flat مورد بررسی قرار می گیرد. گذر کمانش از کمانش گیر به صورت Flat تابعی از $\frac{h}{t}$، $\frac{L_a}{D}$ و فشار اعمالی به خط لوله می باشد. به همین خاطر بایستی محدوده ای برای پارامترهای مذکور در نظر گرفته شود. با توجه به مطالعات Netto و Kyriakides گذر کمانش از کمانش گیر به صورت Flat در $\frac{L_a}{D} = 0.5$ صورت می گیرد و لذا در تحقیق حاضر $\frac{L_a}{D} = 0.5$ به عنوان حد پائینی بازه مربوط به $\frac{L_a}{D}$ انتخاب شد. به منظور یافتن حد بالایی $\frac{L_a}{D}$، تحلیل هایی صورت گرفت که نتایج آن ها در جدول ۴ آمده است. شکل ۱۱ مشخصات لوله و کمانش گیر را نشان می دهد. L_1 و L_2 فاصله بین سه کمانش گیر متوالی می باشند و در تمامی تحلیل های صورت گرفته $L_1=L_2$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱- مشخصات لوله و کمانش گیر

جدول ٤- نتایج جهت یافتن محدوده $\frac{L_a}{D}$

شماره نمونه	L2 =L1	$\frac{D}{t}$	$\frac{La}{D}$	$\frac{h}{t}$	نوع گذر	P_1 (bar)
S1	5D	۲۷/۹	۰/۵	۲/۱۸۷	--- ⬭	(۱۱۱) (۱۱۶/۷۲)
S2	5D	۲۷/۹	۰/۵۱	۲/۱۸۷	--- ⬭	(۱۱۹/۴) (۱۲۴/۸)
S3	5D	۲۷/۹	۰/۵۲	۲/۱۸۷	--- ⬯	(۱۱۱) (۱۱۶/۷۲)
S4	5D	۲۷/۹	۰/۵۵	۲/۱۸۷	--- ⬯	(۱۱۹/۴) (۱۲۴/۸)

--- کمانش متوقف می شود (فشار توقف)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

با توجه به نتایج بدست آمده برای گذر دینامیکی کمانش از کمانش گیر به صورت Flat، محدوده انتخابی برای $\frac{L_a}{D}$ برابر با بازه $0.5 \leq \frac{L_a}{D} \leq 0.51$ تعیین شد.

۳- با توجه به محدوده بدست آمده برای $\frac{L_a}{D}$ $(0.5 \leq \frac{L_a}{D} \leq 0.51)$ و با مراجعه به آئین نامه JPK (1997) [۱۳]، با استفاده از فرمول های ارائه شده در زیر، محدوده ای که برای ضخامت کمانش گیر بدست می آید به صورت $1.9 \leq \frac{h}{t} \leq 2.2$ می باشد:

$$(P_x - P_a) = (P_a - P_p)\left[1 - exp\left(-15\frac{t_{BA} l_{BA}}{D_{BA}^2}\right)\right] \quad (۶)$$

$$P_a = 34.SYMS.\left(\frac{t_{BA}}{D_{BA}}\right)^{2.5} \quad (۷)$$

که در آنها داریم:

P_x فشار گذر، P_p فشار انتشار برای کمانش، t_{BA} ضخامت کمانش گیر، D_{BA} قطر خارجی کمانش گیر، l_{BA} طول کمانش گیر

$$D_{BA} = D + 2t_{BA}\ [m] \quad (۸)$$

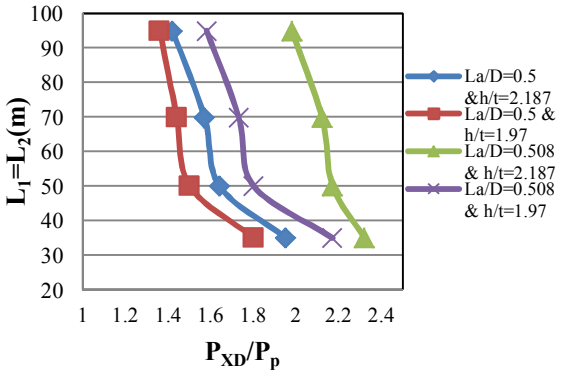
۴- محدوده فشاری که کمانش به صورت دینامیکی و به شکل Flat منتشر می شود، بین P_{co} ۰/۲۵تا P_{co} ۰/۸۷ است[۴].

۵- طبق تحقیقات انجام شده، فاصله ی بین کمانش گیرها از ۹۰ تا ۲۴۰ متر متغیر می باشد. این فاصله صرفا" بر اساس سعی و خطا (مثلا در مراحل تعمیر)[۱] و یا با در نظرگیری مسائل مالی و برآورد هزینه های نصب و نگهداری و میزان فولاد مصرفی در کمانش گیرها و غیره بدست آمده است [۷]. برای بررسی یافتن فاصله بهینه بین کمانش گیر از بازه ۹۰ تا ۲۴۰ متر ($35D$ تا $95D$)، چندین فاصله انتخاب شد که شامل۹۰، ۱۳۰، ۱۸۴، ۲۴۰ متر ($35D$، $50D$، $70D$ و $95D$) می باشد.

۴-۲- تحلیل رفتاری

با توجه به محدوده پارامترهای مشخص شده، ۴۸ مدل بدست آمد که تحلیل دینامیکی بر روی تمامی آنها انجام یافته است که انواع تحلیل ها و نتایج مربوط به این تحلیل ها در زیر بطور مختصر بیان شده است:

الف) با استفاده از نتایج تحلیل‌های دینامیکی، تاثیر تغییر فاصله بین کمانش گیر را در فشار گذر برای نسبت های مختلف قطر به ضخامت انجام شده است که به عنوان نمونه در شکل ۱۲ برای $\frac{D}{t} = 15$ نشان داده شده است. نحوه محاسبه فشار گذر برای انتشار کمانش دینامیکی بدین صورت است که تحلیل را با فشاری $100\ psi(6.89\ bar)$ بیشتر از فشار گذر در حالت شبه استاتیکی در نظر می گیرند و این فشار را رفته رفته افزایش داده تا به فشاری برسند که کمانش دینامیکی منتشر شده بتواند از کمانش گیر عبور کند.



شکل ۱۲- نمودار رابطه بین فاصله کمانش گیرها با فشار گذر نسبی برای $\frac{D}{t} = 15$

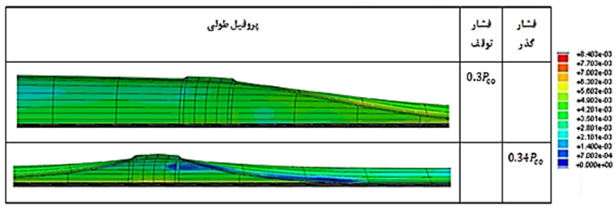
با توجه به نمودار فوق، مشاهده می شود که با افزایش فاصله بین کمانش گیرها فشار گذر کمانش دینامیکی از کمانش گیر کاهش می یابد و با افزایش نسبت های $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ فشار گذر افزایش می یابد. ولی میزان افزایش فشار گذر به دلیل افزایش $\frac{L_a}{D}$ بیشتر از میزان افزایش فشار گذر ناشی از افزایش $\frac{h}{t}$ می باشد.

- همانگونه که اشاره شد $\frac{D}{t} = 15$ برای آب های عمیق مناسب است و با توجه به نتایج $L_1=L_2=35D$، فشاری معادل $0.7P_{co}$ را تحمل می کند که انتخاب این فاصله برای کمانش گیرها برای لوله های با $\frac{D}{t} = 15$ توصیه می شود.

- با مقایسه نتایج بدست آمده، برای $L_1=L_2=50D$ و $L_1=L_2=70D$ تفاوت چندانی بین فشارهای گذر مشاهده نمی شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

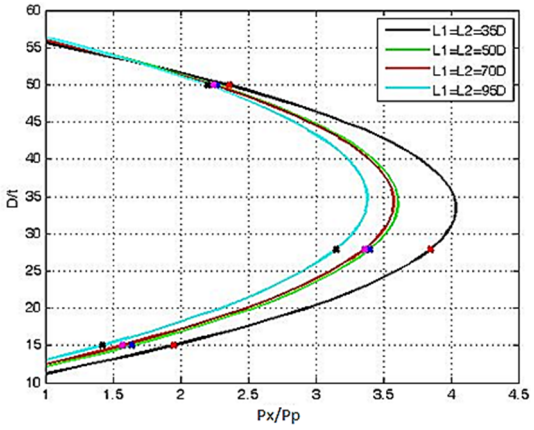
ب) به منظور بدست آوردن فشار توقف و گذر و نحوه تغییر شکل مقطع تحلیل‌هایی انجام شد که به عنوان نمونه برای $\frac{D}{t} = 50$ مقطع طولی لوله در فشارهای گذر و توقف در شکل ۱۳ در زیر ارائه شده است.



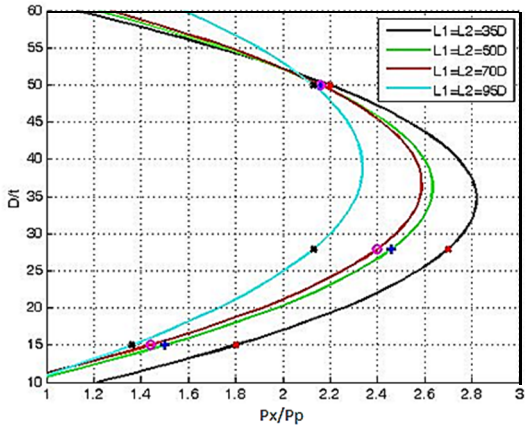
شکل ۱۳- تغییر شکل مقطع طولی زمانی که کمانش منتشر شده متوقف شده یا از کمانش گیر عبور می کند برای $\frac{D}{t} = 50$

فشارهای مذکور بیشترین فشار توقف و کمترین فشار گذر بدست آمده از تحلیل ها می باشند که به ترتیب مربوط به $L_1=L_2=35D$ و $L_1=L_2=95D$ می‌باشند.

پ) به منظور بررسی تاثیر نسبت قطر به ضخامت در نمودار فشار گذر با توجه به نتایج تحلیل های مربوطه و با توجه به شکل های ۱۴ و ۱۵، که به عنوان نمونه برای تغییرات فشار گذر نسبی- نسبت قطر به ضخامت در $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت می باشند، ارائه شده اند.



شکل ۱۴- نمودار تغییرات فشارگذر نسبی نسبت به $\frac{D}{t}$ برای $\frac{h}{t} = 2.187$ و $\frac{L_a}{D} = 0.5$



شکل ۱۵- نمودار تغییرات فشارگذر نسبی نسبت به $\frac{D}{t}$ برای $\frac{h}{t} = 1.97$ و $\frac{L_a}{D} = 0.5$

از مقایسه نتایج بدست آمده، در فاصله ثابت بین دو کمانش گیر و نسبت ثابت $\frac{D}{t}$، با کاهش نسبت $\frac{h}{t}$ یا $\frac{L_a}{D}$ میزان فشار گذر کاهش می یابد. در فاصله ثابت بین دو کمانش گیر و نسبت های $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت، با کاهش نسبت $\frac{D}{t}$ فشار گذر کاهش می یابد.

- در نسبت قطر به ضخامت ۵۰ که مربوط به آب های کم عمق می باشد، تفاوت چندانی در فشار گذر با تغییر در فاصله بین کمانش گیرها مشاهده نمی شود، لذا می توان از حداکثر فاصله بین دو کمانش گیر استفاده کرد.

- در نسبت های $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت برای هر یک از فاصله های انتخابی برای کمانش گیرها، P_X/P_P از یک معادله درجه دوم نسبت به $\frac{D}{t}$ تبعیت می کند که با افزایش فاصله بین کمانش گیرها، میزان فشار گذر کاهش می یابد.

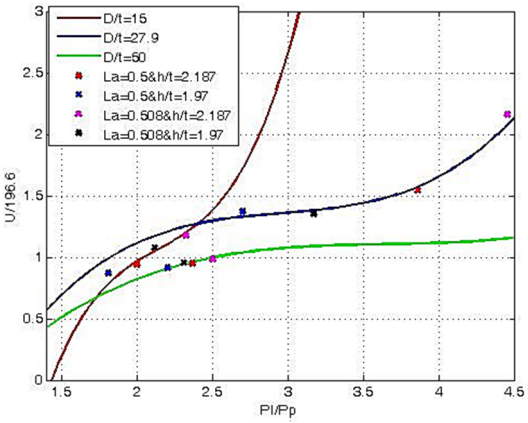
- در نسبت های $\frac{D}{t}$ و $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت با افزایش فاصله بین کمانش گیرها میزان فشار گذر کاهش می یابد.

ج) با بررسی تاثیر تغییرات فشار آغازی نرمالیزه در سرعت انتشار کمانش نرمالیزه که به عنوان نمونه شکل های ۱۶ و ۱۷ در فواصل بین کمانش گیرهای ثابت $L_1=L_2=35D$ و $L_1=L_2=95D$ می باشد، از معادلات درجه سومی که تابع فشار گذر می باشد پیروی می کنند که برای $\frac{D}{t} = 27.9$ به صورت زیر می باشد: که P_{XD} فشار خرابی دینامیکی، P_p فشار انتشار کمانش،

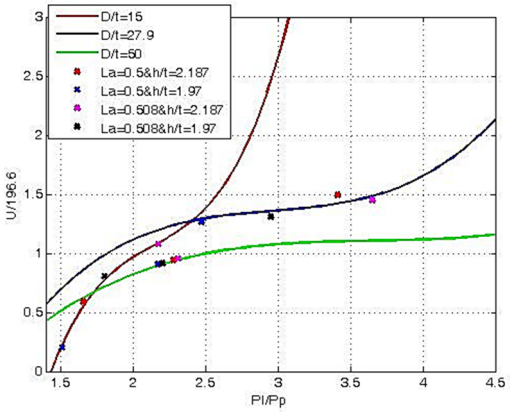
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

U سرعت انتشار و σ_0 تنش تسلیم اولیه و ρ چگالی مصالح لوله می باشد.

$$\frac{U}{\sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}}} = 0.16775\left(\frac{P_{XD}}{P_P}\right)^3 - 1.486\left(\frac{P_{XD}}{P_P}\right)^2 + 4.4898\left(\frac{P_{XD}}{P_P}\right) - 3.2623 \quad (۹)$$



شکل ۱۶- نمودار تغییرات فشار آغازی نسبی نسبت به سرعت انتشار نسبی برای $L_1=L_2=35D$



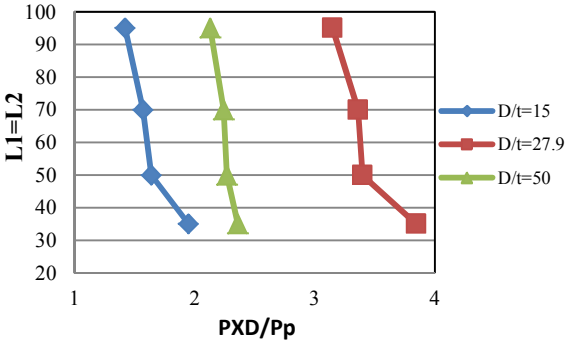
شکل ۱۷- نمودار تغییرات فشار آغازی نسبی نسبت به سرعت انتشار نسبی برای $L_1=L_2=95D$

از مقایسه نتایج بدست آمده، مشخص می شود که با افزایش نسبت $\frac{D}{t}$ از شدت تغییرات سرعت کاسته شده و سرعت انتشار کمانش با شیب ملایم تری تغییر می کند.

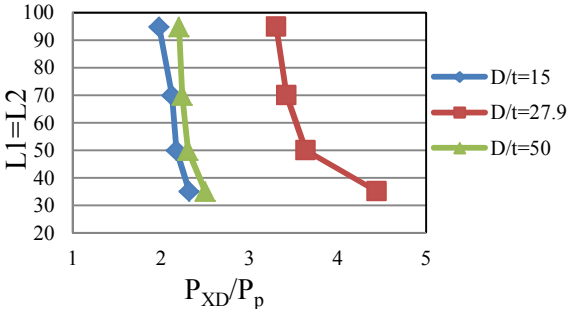
- برای نسبت های $\frac{D}{t}$ ، $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت، با افزایش فاصله بین کمانش گیرها میزان فشار گذر کاهش می یابد که در نتیجه کاهش P_X/P_P ، سرعت انتشار کمانش نیز کاهش می یابد.

- در نسبت قطر به ضخامت ۲۷/۹ که مربوط به آب های نیمه عمیق می باشد به دلیل اختلاف زیاد فشار گذر و فشار انتشار سرعت انتشار بیش از سایر موارد بررسی شده، می باشد.

د) شکل های ۱۸ و ۱۹ بیانگر نمودارهای تغییرات فشار گذر نسبی نسبت به فاصله بین کمانش گیرها می باشند



شکل ۱۸- نمودار فشار گذر نسبی نسبت به فاصله بین کمانش گیرها برای $\frac{L_a}{D} = 0.5$ و $\frac{h}{t} = 2.187$



شکل ۱۹- نمودار فشار گذر نسبی نسبت به فاصله بین کمانش گیرها برای $\frac{L_a}{D} = 0.508$ و $\frac{h}{t} = 2.187$

نتایج بدست آمده را با یکدیگر مقایسه کرده که در نهایت می توان گفت، در نسبت های $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت، خطوط لوله با $\frac{D}{t} = 27.9$ بیشترین مقاومت را در برابر کمانش دینامیکی منتشر شده در لحظه برخورد کمانش به کمانش گیر از خود نشان می دهند.

- در نسبت های $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت، با افزایش فاصله بین کمانش گیرها، فشار گذر کمانش دینامیکی کاهش می یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

۵- نتیجه گیری

در این بخش نتایج حاصل از این تحقیق که به منظور یافتن فاصله بهینه بین کمانش گیرها، پارامترهای $\frac{D}{t}$ و $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ در نظر گرفته شد و تاثیر این پارامترها در ۴۸ مدل ساخته شده بر فشار گذر و سرعت انتشار دینامیکی کمانش در لحظه برخورد با کمانش گیر مورد بررسی قرار گرفت ارائه می شود. لازم به ذکر است که با وجود اینکه نتایج به دست آمده محدود به مدل های تحلیل شده و شرایط مرزی و نیروئی در نظر گرفته شده برای آنها است، با این حال در مواردی امکان تعمیم نتایج وجود دارد.

۱- در نسبت های $\frac{D}{t}$ و $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت با افزایش فاصله بین کمانش گیرها میزان فشار گذر کاهش می یابد که در نتیجه کاهش P_X/P_P ، سرعت کمانش نیز کاهش می یابد.

۲- در فاصله ثابت بین دو کمانش گیر و نسبت ثابت $\frac{D}{t}$ ، با کاهش نسبت $\frac{h}{t}$ یا $\frac{L_a}{D}$ میزان فشار گذر کاهش می یابد که این امر نیز موجب کاهش سرعت کمانش می گردد.

۳- در نسبت قطر به ضخامت ۱۵ که مربوط به آب های عمیق می باشد و با توجه به نتایج $L_1=L_2=35D$، کمانش گیر فشاری معادل $0.7P_{co}$ را تحمل می کند که با توجه به این نتایج، انتخاب این فاصله برای کمانش گیرها در $\frac{D}{t}=15$ توصیه می شود.

۴- در نسبت قطر به ضخامت ۲۷/۹ که مربوط به آب های با عمق متوسط مناسب است، با توجه به نتایج، استفاده از $L_1=L_2=35D$ در $\frac{D}{t}=27.9$ توصیه می شود.

۵- در فاصله ثابت بین دو کمانش گیر و نسبت های $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ ثابت، با کاهش نسبت $\frac{D}{t}$، فشار گذر کاهش می یابد.

۶- در نسبت قطر به ضخامت ۲۷/۹ که مربوط به آب های نیمه عمیق می باشد، به دلیل اختلاف زیاد فشار گذر و فشار انتشار، سرعت انتشار دینامیکی کمانش در لحظه برخورد با کمانش گیر بیش از سایر نسبت های قطر به ضخامت می باشد.

۷- در نسبت قطر به ضخامت ۵۰ که مربوط به آب های کم عمق می باشد، تفاوت چندانی در فشار گذر با تغییر در فاصله بین کمانش گیرها مشاهده نمی شود، لذا می توان از حداکثر فاصله بین دو کمانش گیر استفاده کرد.

۸- در فشارهای نرمالیزه شده، در $\frac{D}{t}$ های مختلف، کمانش گیر با $\frac{L_a}{D}=0.508$ و $\frac{h}{t}=2.187$ بیشترین مقاومت را در برابر کمانش دینامیکی منتشر شده از خود نشان می دهند.

۹- با افزایش نسبت قطر به ضخامت، شیب نمودار سرعت انتشار کمانش دینامیکی مایل تر می شود و به عبارت دیگر تغییرات سرعت با شیب ملایم تری صورت می گیرد.

۱۰- حداقل فشاری که باعث ایجاد کمانش موضعی در لوله می گردد، فشار خرابی (P_c) نامیده می شود که بر اساس آئین نامه های[۵] (BS 8010)BSI، ABS و DNV از رابطه ی زیر تعیین می گردد[۱۵]:

$$P_c^3 - P_{el}.P_c^2 - \left[P_{pp}^2 + P_{el}.P_{pp}.f_0.\frac{D}{t}\right].P_c + P_{el}.P_{pp}^2 = 0 \qquad (۱۰)$$

که در آن P_{el}، P_{pp} و f_0 به صورت زیر تعریف می شوند:

$$P_{el} = \frac{2.E}{(1-\vartheta^2)}.\left(\frac{t}{D}\right)^3 \qquad (۱۱)$$

$$P_{pp} = \eta_{fab}.SYMS(T).\frac{2.t}{D} \qquad (۱۲)$$

$f_0 = D_{av}$ =خروج از گردی اولیه $\frac{D_{max}-D_{min}}{D_{av}}$

که در آن D_{av} قطر متوسط، $SMYS(T)$ حداقل مقاومت تسلیم مشخصه در جهت محیطی، E مدول الاستیسیته، ϑ ضریب پواسون، η_{fab} فاکتور derating ساخت، D_{max} و D_{min} به ترتیب قطر حداکثر و قطر حداقل لوله بیضی شده می باشد.

برای لوله هایی با نسبت قطر به ضخامت کمتر از ۵۰ که در معرض فشار خارجی و خمش هستند، برای کنترل وقوع کمانش می توان از معیار زیر استفاده کرد:

$$\left[\frac{f.\varepsilon}{\varepsilon_b}\right]^{0.8} + \frac{(P_c-P_I)}{P_c} \le 1 \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]

که در آن: $\varepsilon_b = \frac{t}{2.D}$

ε کرنش خمشی در لوله، f ضریب اطمینان برای خمش به وجود آمده در هنگام نصب یا خمش در محلی از لوله و P_I فشار آغاز می باشند. مقدار f با در نظر گرفتن شدت افزایش کرنش خمشی در طول نصب یا در حالت درجا، توسط طراح تعیین می گردد.

در مقاله حاضر علاوه بر موارد اشاره شده، به تعیین سرعت کمانش های منتشر شده در لحظه رسیدن به کمانش گیر بر اساس نسبت های $\frac{D}{t}$ و $\frac{h}{t}$ و $\frac{L_a}{D}$ و فاصله بین کمانشگیرها پرداخته شده است چراکه یکی از معیارهای مهم در طراحی کمانشگیرها پیش بینی سرعت کمانش های منتشر شده می باشد که با بررسی تاثیر تغییرات فشار آغازی نرمالیزه در سرعت انتشار کمانش نرمالیزه در فواصل بین کمانش گیرهای ثابت می باشد، از معادلات درجه سومی که تابع فشار گذر می باشد پیروی می کنند که برای $\frac{D}{\mathrm{t}} = 27.9$ به صورت رابطه (۹) می باشد.

۶- کلید واژگان

1- Slip-on Arrestor
2- Spiral Arrestor
3- Welded Arrestor
4- Integral Arrestor
5- British Standards Institution

۷- مراجع

1. Timoshenko, S.P., (1933), Working Stresses for Columns and Thin-Walled Structures. ASME J. Applied Mechanics, p. 173-183.
2. Yeh, M.K. and S. Kyriakdes, (1986), Collaps of Deepwater Pipelnes. ASME J. Energy Resources Technology.
3. Kyriakides, S., E. Corona, and F.J. Fischer, (1994), On The Effect of The U.O.E Manufacturing Process on The Collaps of Long Tubes, ASME J. Engineering for Industry. p. 93-100.
4. Park, T.D., (1996), On the Initiation and Arrest of Propagating Buckles in Offshore Pipeliness, the University of Texas.
5. Kyriakdes, S., (1994), Propagating Instabities in Structures. Advances in Applied Mechanics, 30: p. 67-189.
6. Stark, P. R., and Mc keehan, D. (1995), Hydrostatic Collapse Research in Support of the Oman India Gas Pipeline, Offshore Technology Conference paper OTC 7705.
7. Kyriakdes, S. and T.A. Netto, (2000), On The Dynamics of Propagating Buckle in Pipelines. Int. J. Solids Strucrures, p. 6848-6878.
8. Omrani, Z, (2010), Investigation into Dynamic Buckle Propagation Velocity in Marine Pipelines. J. Marine Engineering, Vol.6,p.1-13(In Persian).
9. Netto, T.A. and S.F. Estefen, (1996), Buckle Arrestors for Deepwater Pipelines. Marine Structures, p. 873
10.Song, H.W. and J.L.Tassoulas, Dynamics of Propagating Buckles in Deepwater Pipelines. ASME J.of Offshore Mechanics & Arcitic Engineering, 1992. 114: p. 45-49.
11. Toscano, R.G., et al., (2008), Collapse Arrestors for Deepwater Pipelines. Cross-over mechanisms. Computers and Structures, p. 728–743.
12. ABAQUS6.9,Documentation.
13. PARK, T.-D. and S. KYRIAKIDES, (1996), On The Performance of Integral Buckle Arrestors for Offshore Pipelines. Int. J. Mech. Sci, p. 643 669.
14. JPKennyA/S (1997), Buckle Arrestor Design, Report No. D501-PK-P121-F-CE.
15. Bai, Y. (2001). "Pipeline and Risers." Elsevier Ocean Engineering Book Series Vol.3, Netherlands.
16. ABS (2005), Guide for Building and Classing Subsea Pipeline System Risers, Amercan Bureau of Shipping, Houston.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.1.4]