ارزیابی روابط نیرو-تغییرمکان اعضای لوله‌ای فولادی تحت ضربه جانبی شبه‌استاتیکی سقوط اجسام

مهدی عزتی[۱*]، مصطفی زین‌الدینی[۲]، طاهره مسعودی[۳]

[۱] کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ Mezzati@sina.kntu.ac.ir
[۲] استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ Zeinoddini@Kntu.ac.ir
[۳] کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ t.Masoudi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
خط لوله
نیرو – تغییر مکان
قرشدگی
سنبه
ضربه جانبی

چکیده

در این پژوهش، از یک مدل عددی به منظور شبیه‌سازی پاسخ نیرو- تغییرمکان اعضای لوله‌ای تحت ضربه جانبی بدون در نظر گرفتن فشار داخلی یا نیروی محوری استفاده شده و با روابط تحلیلی موجود در آیین نامه‌ها مقایسه شده است. در ابتدا دو آزمایش بر روی نمونه‌های کوچک مقیاس فولادی با درجه X70 و نسبت D/t ۲۲ انجام شده و سپس مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است.
نتایج نشان می‌دهند که روابط تحلیلی برای شکل قرشدگی کروی و در حالتی که فشار داخلی وجود ندارد مقاومت جانبی بزرگتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی و عددی بیان می‌کنند. در انتها با استفاده از مدل عددی اثر عوامل مختلفی مانند نسبت D/t و نسبت d/D و تنش تسلیم بر مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که مقاومت جانبی به ترتیب اهمیت توسط نسبت D/t و تنش تسلیم و نسبت d/D کنترل می‌شود. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و روابط تحلیلی می‌توان اظهار داشت روابط تحلیلی به ازای نسبت‌های D/t و d/D بزرگتر نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌کنند.

Assessment of Force-Deflection Relations of Steel Tubular Members under Lateral Quasi-Static Impacts from Dropped Objects

Mehdi Ezzati[1*], Mostafa Zeinoddini[2], Tahereh Masoudi[3]

[1] MSc.,Department of Civil and Environmental Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
[2] Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
[3] MSc., Department of Civil and Environmental Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 13 Feb. 2014
Accepted: 13 Jan. 2015
Available online: 11 Mar. 2015

Keywords:
Offshore pipeline
Force-Deflection
Dent
Indentor
Lateral Impact

ABSTRACT

In the current study a numerical simulation approach has been chosen to simulate the force-deflection response of tubular member under lateral impact in the absence of internal pressure or axial force and the results have then been compared with analytical relations. Two series small scale experiments were carried out by the authors on X70 steel tubes and D/t of 22 and the numerical model has then been verified against experimental results.
The results show that the analytical relations estimate greater lateral resistance than experimental results for the spherical indentor and in the unpressurized tubular members. The numerical model has then been used to study the effect of D/t and d/D and yield stress on lateral resistance of steel tubes. It has been noticed that, the lateral resistance was governed by: 1) D/t ratio 2) Yield stress 3) d/D ratio.
The comparison between analytical and numerical results show that analytical relations are more accurate results for large D/t and d/D ratios.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]

۱ - مقدمه

امروزه اعضای لوله‌ای یکی از اجزاء اصلی صنعت نفت و گاز، به منظور انتقال فراورده‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر و همچنین به عنوان اعضای سکوهای نفتی شناخته می‌شوند. در اثر گسیختگی خطوط لوله احتمال بروز حوادثی مانند آتش‌سوزی، انفجار و... وجود دارد. از طرفی تعمیر خطوط لوله مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است، به همین دلیل ایمنی خطوط لوله از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. برخورد اجسام سنگینی مانند تجهیزات حفاری، لنگر کشتی، ابزار ماهیگیری و... باعث ایجاد قرشدگی[1] در خطوط لوله می‌شود. یکی از حالات خرابی که در فرایند اعمال قرشدگی باید در نظر گرفته شود، خرابی در اثر سوراخ شدن بدنه لوله است. از طرفی قرشدگی تا حد زیادی روی مقاومت لوله در برابر بارهای بهره‌برداری، محیطی و خصوصاً بارهای تناوبی تاثیرگذار است. بنابراین بررسی پاسخ نیرو- تغییرمکان۲ در خطوط لوله قرشده، سال‌های زیادی است که مورد توجه محققین قرار گرفته است. فرنس و امدهل در سال ۱۹۸۰ با استفاده از مدل صلب- خمیری رابطه‌ای برای پاسخ عضو استوانه‌ای در برابر بار متمرکز پیشنهاد دادند که تنها شامل قرشدگی موضعی گوه شکل بود[۱]. الیناس و واکر در سال ۱۹۸۳ با استفاده از یک روش نیمه تجربی یک عبارت برای پاسخ نیرو - تغییرشکل یک لوله دارای تکیه‌گاه‌های انتهایی بدست آوردند که دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی بود[۲]. هوو و همکارانش در سال ۱۹۹۱، اعضای لوله‌ای را تحت بارگذاری جانبی موضعی تحلیل کرده و روشی ارائه کردند که موضوع را به یک مسئله یک بعدی تبدیل می‌کند. با فرض مصالح صلب – خمیری عبارتی به صورت بسته بدست آمد[۳]. زین‌الدینی و همکارانش در سال ۲۰۰۰ یک نسخه اصلاح شده از مدل ساده شده ویرزبیکی را استفاده کردند تا پاسخ لوله را در برابر بار جانبی منفرد آنالیز کنند و یک عبارت ساده برای مسیر نیرو- تغییرمکان پیشنهاد کردند[۴]. بروکر در سال ۲۰۰۳ با انجام مطالعات پارامتریک در مدل‌سازی عددی رابطه‌ای را برای سنبه‌هایی[3] با مقطع مستطیل پیشنهاد کرد[۵]. لیو در سال ۲۰۰۴ یک آنالیز شبه استاتیک برای خطوط لوله تحت فشار انجام داد و یک رابطه ساده را بین نیرو و حداکثر قرشدگی بدست آورد. نشان داده شد که فشار $p = p_{in} - p_{out}$ که در آن p_{in} و p_{out} به ترتیب فشار داخلی و فشار خارجی هستند، دارای تاثیر مهمی بر روی مقاومت لوله در برابر قرشدگی می‌باشد و برای عمق قرشدگی ثابت، نیروی قرشدگی خارجی بالاتری برای لوله تحت فشار p بالاتر مورد نیاز است[۶]. در همان سال کارامانوس و همکارانش یک مدل تحلیلی ساده شده با استفاده از مکانیسم مفصل خمیری متحرک برای تعیین نیرو بر حسب عمق قرشدگی ارائه کردند. نتایج حاصل از این مدل نشان داد که وجود فشار خارجی تاثیر بسیار زیادی روی پاسخ یک لوله تحت بارگذاری جانبی دارد. حضور فشار داخلی، منجر به افزایش ظرفیت بار نهایی و ظرفیت جذب انرژی می‌شود که بوسیله مدل‌های اجزاء محدود نیز تایید شد[۷]. هاید و همکارانش در سال ۲۰۰۵ رابطه‌ای بین نیرو و تغییرمکان با توجه به شکل قرارگیری بستر لوله پیشنهاد کردند[۸]. در همان سال اثر حضور فشار داخلی را نیز مورد بررسی قرار دادند و رابطه پیشنهادی خود را تکمیل کردند[۹]. آیین‌نامه‌های API و DNV نیز روابطی برای مسیر نیرو-تغییرمکان پیشنهاد کرده‌اند[۱۰].

در این پژوهش چهار نمونه از روابط تحلیلی معتبر نیرو - تغییرمکان اعضای لوله‌ای تحت بارگذاری جانبی ارزیابی شده و تاثیر عوامل مختلف بر این رفتار به صورت عددی مورد بررسی قرارگرفته است. در ابتدا دو آزمایش بر روی نمونه‌های کوچک مقیاس انجام شده و سپس مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. شایان ذکر است که شبیه‌سازی عددی نمونه‌های استوانه‌ای در این پژوهش، به صورت بی‌نقص۴ در نظر گرفته شده‌اند در حالی که حضور ناراستی‌های هندسی می‌تواند رفتار اعضای لوله‌ای را تحت تاثیر قرار دهد[۱۱و۱۲].

۲-تنظیمات آزمایشگاهی

لوله‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع X70 انتخاب شده است که در اجرای لوله‌های فراساحل مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشخصات مکانیکی لوله‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌ها از لوله‌ای با قطر خارجی اولیه (OD) ۵۰ میلیمتر و ضخامت(t) ۵ میلیمتر تراشکاری شده‌اند. دقت تراشکاری در این بخش در حدود ۰/۰۵ میلیمتر تخمین زده شده است. شکل ۱ مشخصات هندسی لوله‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. طول کلی هر نمونه برابر ۲۹۰ میلیمتر است.

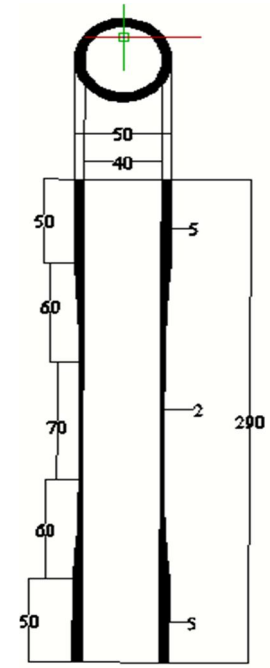
جدول ۱: مشخصات مکانیکی لوله

درجه لوله	تنش تسلیم(MPa)	تنش نهایی(MPa)	ازدیاد طول	مدول الاستیسیته(GPa)
X70	٦٤٠	٧٤٠	٪۱۸	۲۲۵

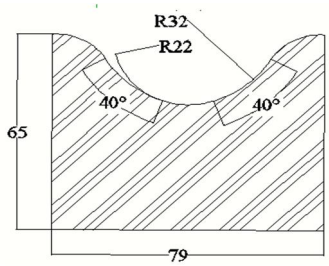
هندسه بستر لوله به شکل زین اسبی و از مصالح فولادی از جنس CK45 انتخاب شده است. شکل ۲ ابعاد هندسی بلوک بستر لوله را نشان می‌دهد. شعاع هندسه بستر قدری بزرگتر از شعاع لوله انتخاب شده است که در حین اعمال قرشدگی، لوله بتواند تغییر شکل آزادانه دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

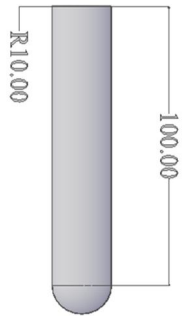
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]



شکل ۱- مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی (واحد mm)



شکل ۲- مقطع هندسی بلوک بستر لوله (واحد mm**)**. طول بلوک برابر با ۶۵ میلیمتر است.



شکل ۳- مشخصات هندسی سنبه (واحد mm**)**

جنس سنبه همانند جنس بستر لوله از فولاد نوع CK45 و هندسهسنبه متشکل از استوانه‌ای تو پر است که انتهای آن به صورت نیمکره‌ای با قطری(d) برابر ۲۰ میلیمتر انتخاب شده است. شکل ۳ مشخصات هندسی سنبه را نشان می‌دهد.

آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه (Servo-Hydraulic Dynamic Instron 8502 Testing System) انجام شده است. شکل ۴ نمایی کلی از نحوه انجام آزمایش را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در این آزمایش‌ها هیچ‌گونه قیدی برای دو انتهای طولی نمونه در نظر گرفته نشده است.

مراحل انجام آزمایش را می‌توان به ۳ بخش تقسیم کرد:

۱- مماس کردن سنبه بر جداره لوله، که این موضوع با استفاده از قابلیت تنظیم نیرو در دستگاه Instron با دقت خوبی انجام شده است

۲- اعمال قرشدگی به میزان مورد نظر

۳- باربرداری تا نقطه‌ای که نیروی سنبه به صفر برسد

دو سری آزمایش با مقادیر مختلف قرشدگی انجام شده است، آزمایش اول به ازای عمق قرشدگی ۴ میلیمتر(X/D=۹٪) و آزمایش دوم به ازای عمق قرشدگی ۷ میلیمتر(X/D=۱۶٪). در هر دو سری آزمایش، سرعت اعمال قرشدگی توسط دستگاه در حدود ۲ میلیمتر بر دقیقه بوده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های اول و دوم در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص است پس از باربرداری مقداری از عمق قرشدگی به صورت ارتجاعی بازگردانده می‌شود که این موضوع با حضور فشار داخلی افزایش می‌یابد. طبق تحقیقات کیس و همکارانش در سال ۲۰۱۰، عمق قرشدگی در صورت حضور فشار داخلی در حدود ۴۳٪ کاهش می‌یابد[۱۳]. شکل ۱۰ نمایی از دو نمونه لوله را پس از اعمال قرشدگی نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمایی کلی از اعمال قرشدگی در آزمایشگاه

به منظور مطالعه تاثیر پارامترهای گوناگون بر رفتار نیرو-تغییرمکان اعضای استوانه‌ای از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است و نتایج با روابط تحلیلی مختلف مقایسه شده است.

۳-شبیه‌سازی عددی

با استفاده از مدل ساخته شده در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS آزمایش‌های انجام شده شبیه‌سازی و صحت‌سنجی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

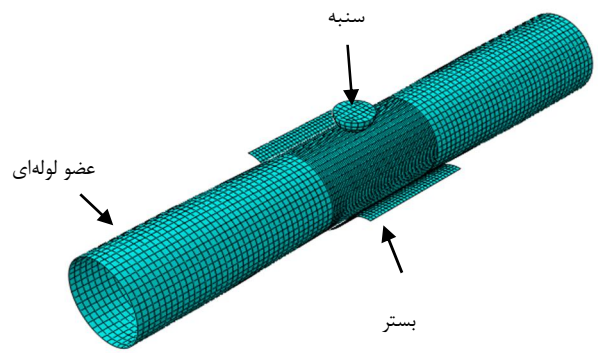
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]

شده‌اند. بخش‌های مختلف فرایند مدل‌سازی بدین صورت مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- مختصات هندسی مساله
- تعریف المان‌ها
- تعریف مصالح
- تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه
- تعریف بارگذاری و مراحل انجام آنالیز
- صحت سنجی مدل

هندسه مسئله شامل یک عضو با مقطع دایره (لوله) ، یک عضو به عنوان سنبه و بستر لوله می‌باشد که به شکل زینی و صلب مدل‌سازی شده است و ابعاد آن‌ها در بخش ۲ ذکر شده است. وضعیت هندسی مدل در شبیه‌سازی آزمایش‌های مذکور بدین صورت می‌باشد که لوله بر روی بستر صلب مورد نظر قرار دارد و سپس سنبه نیز در فاصله‌ای کم نسبت به نقطه فوقانی مقطع لوله و یا چسبیده به آن قرار می‌گیرد و سپس مقاومت جانبی عضو لوله‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

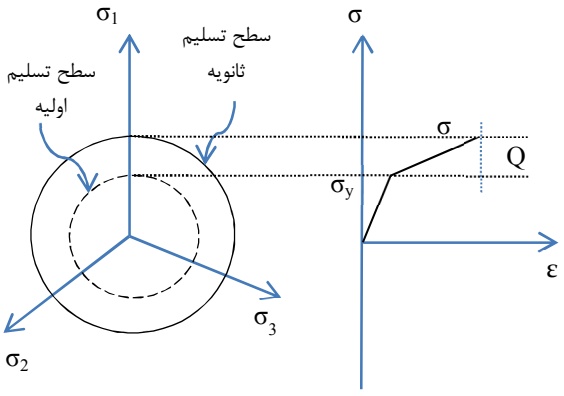
لوله مورد نظر با استفاده از المان پوسته‌ای S4R ساخته شده است. نمایی کلی از مدل ساخته شده و نحوه شن‌بندی در شکل ۵ نمایش داده شده است. در خصوص وضعیت ابعاد المان‌ها در طول لوله با توجه به حساسیت بیشتر مسئله در نزدیکی محل برخورد، در این محل بعد طولی المان‌ها ریزتر انتخاب گشته و طول و عرض المان‌ها در این محل تا حدود زیادی به هم نزدیک هستند. ولی در محل‌های دور از ناحیه برخورد، با توجه به حساسیت کمتر مسئله از المان‌هایی با طول بیشتر استفاده شده است. سنبه مورد استفاده در مدل توسط المان‌های سه بعدی پیوسته و بستر توسط المان پوسته‌ای المان‌بندی شده است که نهایتاً با توجه به سختی بالای سنبه و بستر در برابر جداره لوله، سنبه و بستر صلب فرض گشته و توسط قید جسم صلب[5] از حالت شکل پذیری خارج شده است.



شکل ۵- نمایی کلی از هندسه مدل و نحوه شن‌بندی

در مدل عددی خواص مکانیکی فولاد مشابه با جدول ۱ درنظر گرفته شده است. به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده، خواص غیرخطی فولاد نیز با استفاده از ترکیب مدل‌های سخت‌شوندگی غیرخطی کینماتیک/ایزوتروپیک در مدل تعریف شده است. مدل سخت‌شوندگی خطی رفتار سخت شوندگی ماده را با نرخ ثابت سخت‌شوندگی تخمین می‌زند در حالیکه در مدل‌های غیرخطی نرخ سخت‌شوندگی تابعی از کرنش پلاستیک در عضو می‌باشد.

در مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک، سطح تسلیم به صورت کاملاً یکنواخت در تمامی جهات صفحه تنش، تغییر شکل می‌دهد و رشد می‌کند (شکل ۶). در این مدل پارامتر Q حداکثر تغییر اندازه سطح تسلیم و پارامتر b میزان سرعت این تغییر را نشان می‌دهد.

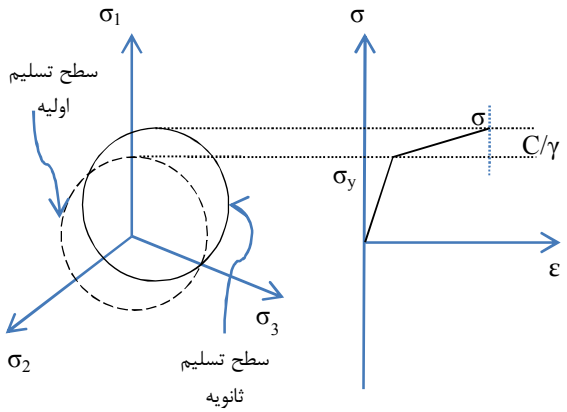


شکل ۶- رفتار تنش-کرنش مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک

مفهوم پایه مدل سخت شوندگی کینماتیک به این شکل می‌باشد که سطح تسلیم در محدوده غیرخطی بدون تغییر در شکل آن تنها در فضای تنش جابه‌جا می‌شود، از این رو کرنش در جهت کشش مقدار تنش تسلیم در جهت فشار را کاهش می‌دهد و بالعکس. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مدل سخت‌شوندگی کینماتیک تغییری در شعاع سطح تسلیم ایجاد نکرده و تنها منجر به حرکت سطح تسلیم شده است. در این مدل نسبت C/γ نشان دهنده حداکثر جابه‌جایی سطح گسیختگی و پارامتر γ سرعت جابه‌جایی سطح گسیختگی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]



شکل ۷- رفتار تنش-کرنش مدل سخت‌شوندگی کینماتیک

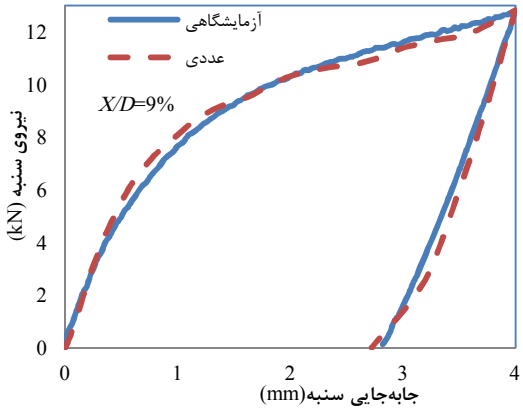
پارامترهای سخت‌شوندگی (C، γ، Q و b) با استفاده از روش تناوب‌های متعدد پایدار شده بر روی نمونه‌های کوچک استخوانی به‌دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی تصحیح شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده، ترکیبی از سخت شوندگی کینماتیک و ایزوتروپیک به منظور تعریف خواص غیر خطی فولاد در نظر گرفته شده است. جدول ۲ مشخصات پارامترهای سخت‌شوندگی کینماتیک/ایزوتروپیک را نشان می‌دهد.

جدول ۲: پارامترهای سخت شوندگی کینماتیک و ایزوتروپیک

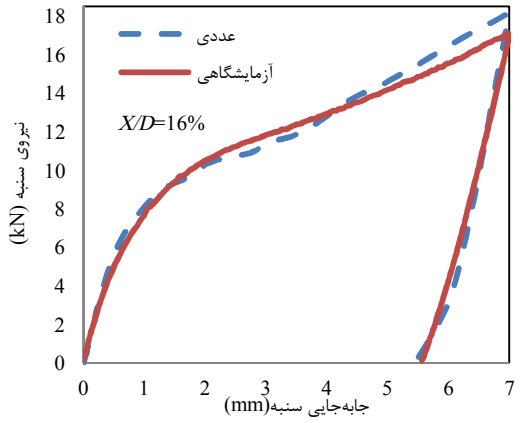
	پارامترهای سخت شوندگی کینماتیک		پارامترهای سخت شوندگی ایزوتروپیک	
درجه لوله	C(MPa)	γ	Q(MPa)	b
X70	۷۱۰۰	۳۱	۱۵۵	۰/۶

در ابتدا لوله بر روی بستر زینی شکل قرار داده شده است و در معرض نیروی جانبی توسط سنبه قرار می‌گیرد. با توجه به آزاد بودن دو سر لوله در آزمایش‌های انجام شده، در مدل‌سازی نیز هیچ گونه قیدی برای دو سر لوله درنظر گرفته نشده است. تمامی درجات آزادی جابه‌جایی سنبه به استثناء جهت قائم آن مقید شده است تا فرضیات حل را پوشش دهد. بستر نیز در حالت صلب در همه درجات آزادی خود مقید گشته است. پس از اعمال قرشدگی، سنبه و بستر حذف شده و لوله تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرد. در این مرحله دو سر لوله به صورت کامل مقید شده و فقط درجه آزادی در امتداد لوله در یکی از دو سر لوله به منظور اعمال نیروی محوری، بدون قید در نظر گرفته شده است.

صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه صورت گرفته است. در شکل‌های ۸ و ۹ مسیر نیرو-تغییرمکان از نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای عمق قرشدگی‌های(X) مختلف مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشهود است نتایج تا حد قابل قبولی به یکدیگر نزدیک هستند. در هنگام اعمال قرشدگی در نمونه‌های آزمایشگاهی از دو کرنش‌سنج در جهت طولی(SG1) و شعاعی(SG2) لوله به منظور مقایسه و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. کرنش‌سنج‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع FLA-5-11 بوده که قادر به ثبت کرنش‌های الاستیک و پلاستیک تا مقادیر ۵٪ می‌باشد. شکل ۱۰-ب نمایی از قرارگیری کرنش‌سنج‌ها بر روی نمونه‌های استوانه‌ای را نشان می‌دهد. موقعیت قرارگیری کرنش‌سنج‌ها به نحوی انتخاب شده است که حداکثر کرنش را در جهت طولی و شعاعی ثبت کند. نتایج عددی نشان دادند که حداکثر کرنش در حاشیه قرشدگی رخ می‌دهد. البته باید توجه داشت که کرنش‌سنج‌ها نمی‌بایست با سنبه تماس داشته باشند زیرا که این موضوع می‌تواند موجب از دست رفتن کرنش‌سنج در حین آزمایش‌ها شود. موقعیت دقیق کرنش‌سنج‌ها با توجه به نتایج عددی و در نقاطی انتخاب شده‌اند که مقادیر کرنش‌ها قابل توجه باشند. شکل ۱۱ مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از کرنش‌سنج‌های طولی و شعاعی در آزمایشگاه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای عمق قرشدگی ۷ میلیمتر را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ توجه شود که به ازای کرنش ۶/۴ درصد، هر دو کرنش‌سنج در جهت طولی و شعاعی به گسیختگی رسیده است.



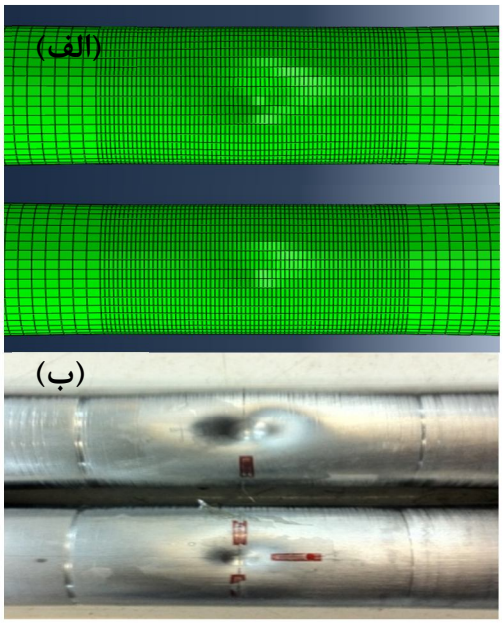
شکل ۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به ازای



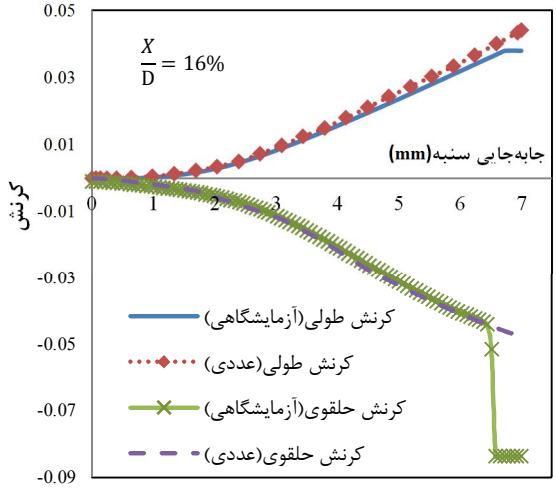
شکل ۹- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به ازای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]

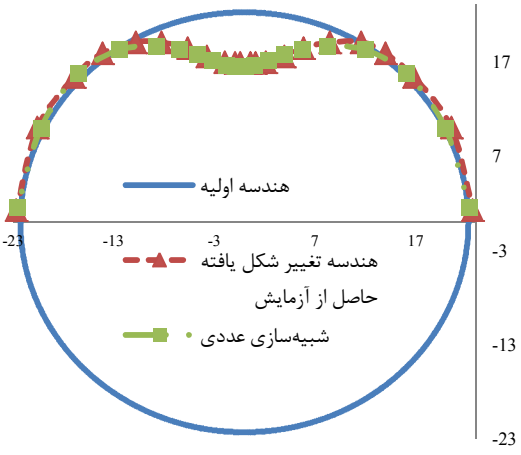


شکل ۱۰- نمایی کلی از دو لوله پس از اعمال قرشدگی الف)شبیه‌سازی عددی ب)نمونه‌های آزمایشگاهی



شکل ۱۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی کرنش‌سنج‌ها

به منظور اندازه‌گیری دقیق محل قرشدگی نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش، از اسکنر اپتیکی ATOS بهره‌برداری شده است و ابعاد هندسی محل قرشدگی با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. این اسکنر نوری با تاباندن پترن نوری توسط پروژکتور به سطح و تصویربرداری از آن امکان برداشت مختصات نقاط به صورت سه بعدی با دقت اندازه‌گیری ۳۰ میکرون را فراهم نموده است. شکل ۱۲ نمایی از مقطع عرضی قرشدگی ۱۶٪ در شبیه‌سازی عددی و عکس‌برداری سه بعدی را نشان می‌دهد. اختلاف میان عمق قرشدگی حاصل از عکس‌برداری سه بعدی و شبیه‌سازی عددی در حدود ۰/۱ میلیمتر بدست آمده است. با توجه به شکل‌ها و نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل عددی، عملیات قرشدگی را با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی می‌کند.



شکل ۱۲- هندسه قرشدگی حاصل از عکس‌برداری و شبیه‌سازی عددی

۴-مقایسه نتایج با روابط تحلیلی

در سال‌های گذشته روابط تحلیلی و تجربی مختلفی به منظور ارزیابی مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای توسط آئین‌نامه‌ها و محققین مختلف ارائه شده است که در این پژوهش به ۴ نمونه پرکاربرد از آن‌ها اشاره شده است. آئین‌نامه API-2A دو رابطه به منظور پیش‌بینی مسیر نیرو- تغییرمکان در اعضای استوانه‌ای واقع در معرض ضربه جانبی ارائه کرده است. رابطه (۱) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی فرنس در سال ۱۹۸۰ [۱] و رابطه (۲) بر اساس مطالعات الیناس در سال ۱۹۸۳ [۲] به‌دست آمده است. رابطه (۳) توسط آئین‌نامه DNV-RP-F111 [۱۵] برای تخمین مقاومت جانبی خطوط لوله واقع در معرض برخورد لنگر کشتی ارائه شده است. پالمر نیز در سال ۲۰۰۸ [۱۶] رابطه (۴) را به منظور تخمین نیروی مورد نیاز برای اعمال قرشدگی موضعی در خطوط لوله ارئه کرده است.

$$P_d = 21M_p(\frac{X}{t})^{0.5} \quad (۱)$$

$$P_d = 40F_y(t)^2(\frac{X}{D})^{0.5} \quad (۲)$$

$$P_d = 5F_y(t)^{1.5}(X)^{0.5} \quad (۳)$$

$$P_d = 5.7\sqrt{{F_y}^2t^3X} \quad (۴)$$

که در روابط مذکور داریم:

P_d: نیروی سنبه

M_p: ظرفیت لنگر پلاستیک لوله که برابر است با $F_y\ F_yt^2/4$ تنش تسلیم لوله)

D, R, t : به ترتیب برابر ضخامت، شعاع و قطر لوله هستند.

X: مقدار قرشدگی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

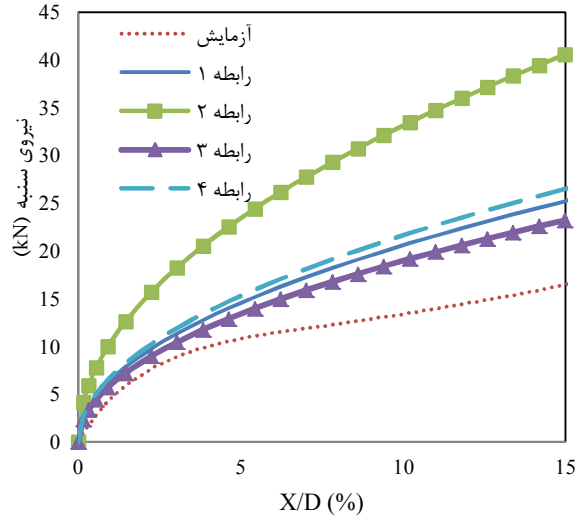
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها و روابط تحلیلی مذکور به صورت خلاصه در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش‌ها و روابط تحلیلی

	آزمایش (۱)	آزمایش (۲)
عمق قرشدگی(mm)	٤	۷
نسبت *X/D*	٪۹	٪۱٦
نیروی حاصل از آزمایش (kN)	۱۲/۷	۱۷
نیروی حاصل از شبیه‌سازی عددی(kN)	۱۲/۸	۱۸/۱
نیروی حاصل از رابطه (۱) (kN)	۱۹	۲۵/۱
نیروی حاصل از رابطه (۲) (kN)	۳۰/۸	٤۰/۸۳
نیروی حاصل از رابطه (۳) (kN)	۱۸/۱	۲۳/۹
نیروی حاصل از رابطه (۴) (kN)	۲۰/٦	۲۷/۲

همان‌طور که مشاهده می‌شود روابط (۳) و (۲) به ترتیب دارای کمترین و بیشترین اختلاف با نتایج آزمایشگاهی هستند. شایان ذکر است که در این روابط، اثر مشخصات هندسی سنبه، شکل بستر لوله، فشار داخلی، فشار خارجی، اندرکنش لوله با خاک و... درنظر گرفته نشده است در حالی که این موارد در مسیر نیرو- تغییر مکان قرشدگی بسیار موثر است و روابط فقط تابعی از قطر لوله، ضخامت لوله، عمق قرشدگی و تنش تسلیم لوله هستند. با توجه به مطالعات محققین مختلفی همچون هاید [۹] و کارامانوس [۷] و عرب‌زاده[۱۴] و... در صورت حضور فشار داخلی مقاومت لوله در برابر بارهای جانبی افزایش می‌یابد و در صورت حضور فشار خارجی مقاومت لوله در برابر بارهای جانبی کاهش می‌یابد. همچنین هاید [۸] نشان داد که مکان قرارگیری بستر لوله تا حد زیادی می‌تواند بر مقاومت لوله تاثیرگذار باشد. عرب‌زاده نیز در سال ۱۳۸۸ اثر بستر خاکی را بر مسیر نیرو- تغییرمکان بررسی کرد، نتایج نشان دادند که در حالت بستر صلب انرژی بیشتری توسط لوله جذب می‌گردد و این حالت موجب می‌شود نفوذ سنبه در لوله افزایش یابد [۱۴]. با توجه به توضیحات بالا روشن است که در حضور فشار داخلی اختلاف میان مقاومت جانبی ناشی از روابط تحلیلی با واقعیت کاهش می‌یابد ولی این موضوع در مواقعی مانند نصب لوله و قطع جریان و ... در جهت اطمینان نمی‌باشد. در شکل‌های ۸ و ۹ توجه شود که در هردو منحنی مربوط به نتایج آزمایشگاهی، یک نقطه عطف وجود دارد که بیانگر وقوع ناپایداری سازه‌ای در دیواره لوله است و به صورت موضعی در هنگام اعمال قرشدگی رخ می‌دهد که این موضوع را روابط مذکور نمی‌توانند شبیه‌سازی کنند. به منظور مقایسه بهتر میان نتایج آزمایشگاهی و روابط تحلیلی مسیر نیرو- تغییر مکان این روابط در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳- مقایسه مسیر نیرو-تغییرمکان روابط با نتایج آزمایشگاهی

همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه (۲) به ازای عمق‌های قرشدگی نسبی(*X/D*) مختلف مقادیر بسیار بزرگتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهد و این موضوع با افزایش عمق قرشدگی افزایش می‌یابد. در حالی که دیگر روابط به ازای مقادیر قرشدگی کوچک (*X/D<5%*) اختلاف اندکی با نتایج آزمایشگاهی دارند و هرچه میزان قرشدگی بیشتر می‌شود مقدار اختلاف نیز بیشتر می‌شود.

در ادامه با استفاده از مدل عددی اثر عوامل مختلف بر مقامت جانبی اعضای لوله‌ای به منظور ارزیابی بهتر روابط ارائه شده بررسی گردیده است.

۵-ارزیابی عددی پارامترهای موثر بر مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای

در این بخش با استفاده از مدل اجزای محدود، برخی پارامترهای مؤثر بر مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای بررسی شده است. لازم به توضیح است که در هر بخش با اعمال تغییراتی در یک پارامتر موثر سعی شده تاثیر پارامتر مورد نظر بر مقاومت جانبی بررسی شود و مشخصات دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند. موارد زیر بررسی شده است:

- تاثیر نسبت قطر لوله به ضخامت لوله (*D/t*)
- تاثیر تنش تسلیم(F_y)
- تاثیر نسبت قطر سنبه به قطر لوله(*d/D*)

حضور فشارهای داخلی و خارجی نیز قطعاً بر رفتار بار-تغییرمکان اعضای لوله‌ای فولادی تاثیرگذار می‌باشد. ارزیابی میزان تاثیر این پارامترها نیازمند مطالعات جداگانه آزمایشگاهی در حضور فشارهای

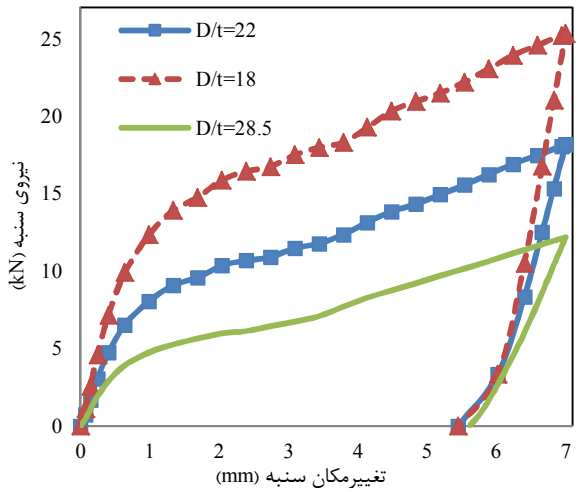
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]

داخلی و خارجی است تا بتوان ابتدا بر اساس نتایج تجربی مدل‌های عددی مربوط را صحت‌سنجی نمود و سپس مطالعات پارامتری را به انجام رساند. این موضوع خارج از حوصله مقاله حاضر، که به ارزیابی روابط نیرو-تغییرمکان موجود برای اعضای لوله‌ای فولادی تحت ضربه جانبی شبه‌استاتیکی می‌پردازد، قرار می‌گیرد لازم به توضیح است که در روابط مورد بحث تاثیر فشارهای داخلی و خارجی دیده نشده است. با این حال مطالعه تاثیر حضور فشارهای داخلی و خارجی بر رفتار بار-تغییرمکان اعضای لوله‌ای قطعاً موضوعی حائز اهمیت است که می‌تواند بخشی از تحقیقات آتی تلقی شود.

۵-۱ تاثیر نسبت D/t

در این بخش تاثیر نسبت D/t بر مقاومت جانبی لوله بررسی شده و در نهایت با روابط تحلیلی مقایسه شده است. نمودار نیرو-تغییر مکان به ازای نسبت D/t مختلف در شکل ۱۴ ارائه شده است. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با کاهش نسبت D/t مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش ۳۶ درصدی نسبت D/t مقاومت جانبی در حدود ۱۱۲ درصد افزایش یافته است که این موضوع نشان دهنده اهمیت نسبت D/t در مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای می‌باشد. در روابط تحلیلی نیز واضح است که با افزایش ضخامت لوله، مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴- تاثیر نسبت D/t بر مقاومت جانبی لوله

جدول ۴ خلاصه‌ای از نتایج شبیه سازی و روابط تحلیلی را به ازای عمق فرشدگی نسبی ۱۶٪ ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که اختلاف موجود میان مقاومت جانبی حاصل از روابط با نتایج شبیه‌سازی عددی با افزایش نسبت D/t کاهش می‌یابد که این موضوع نشان می‌دهد که این روابط به ازای مقادیر D/t بزرگ از دقت بیشتری برخوردار هستند. با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که مقاومت جانبی حاصل از رابطه (۳) به ازای مقادیر مختلف D/t دقیق‌ترین رابطه در میان روابط ارائه شده در این پژوهش است.

همانطور که اشاره شد، خطای موجود در مقاومت جانبی پیش‌بینی شده توسط روابط تحلیلی با افزایش نسبت D/t کاهش یافته است ولی همواره مقداری بزرگتر از واقعیت ارائه می‌کنند که این موضوع در خلاف جهت اطمینان است. باید توجه داشت که اختلاف میان روابط تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی و عددی درصورت حضورفشار داخلی، کاسته می‌شود اما این موضوع خصوصاً به هنگام نصب لوله و قطع شدن جریان و... که فشار داخلی حضور ندارد در جهت اطمینان نمی‌باشد.

جدول ۴- بررسی تاثیر نسبت D/t

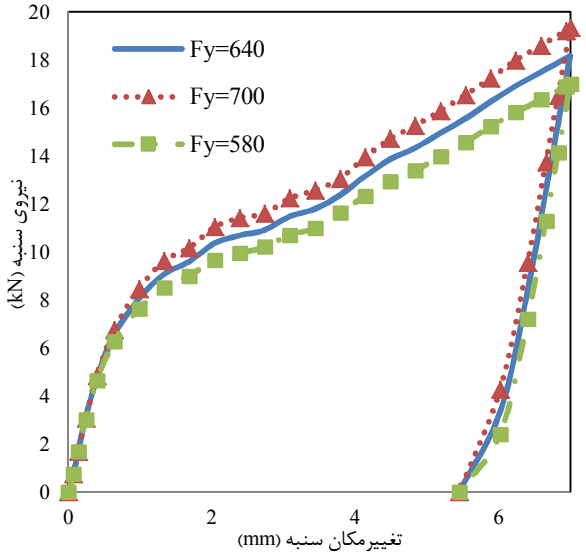
نسبت **D/t**	۱۸	۲۱	۲۸	۴۱
نسبت *X/D*	٪۱۶	٪۱۶	٪۱۶	٪۱۶
نیروی حاصل از شبیه‌سازی عددی (kN)	۲۵/۳۲	۱۸/۱۵	۱۱/۶۲	۷/۲
نیروی حاصل از رابطه (۱) (kN)	۳۳	۲۵/۱	۱۶/۳	۸/۸
نیروی حاصل از رابطه (۲) (kN)	۶۰/۲	۴۱/۸	۲۳/۵	۱۰/۴
نیروی حاصل از رابطه (۳) (kN)	۳۱/۴	۲۳/۹	۱۵/۵	۸/۴
نیروی حاصل از رابطه (۴) (kN)	۳۵/۸	۲۷/۲	۱۷/۷	۹/۶

۵-۲ تاثیر تنش تسلیم[۶]

در این بخش تاثیر تنش تسلیم بر مقاومت جانبی لوله بررسی شده است. نمودار نیرو-تغییر مکان به ازای تنش تسلیم مختلف در شکل ۱۵ ارائه شده است. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که با کاهش تنش تسلیم مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ۱۰ درصدی تنش تسلیم، مقاومت جانبی نیز در حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است که این موضوع نشان از رابطه خطی میان تنش تسلیم و مقاومت جانبی دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]

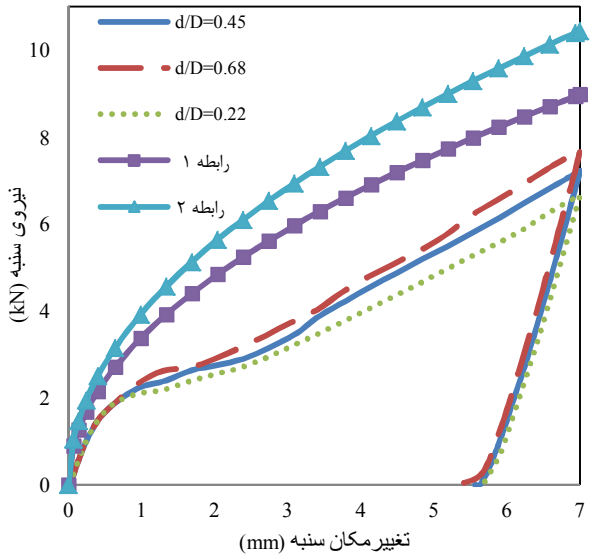


شکل ۱۵- تاثیر تنش تسلیم بر مقاومت جانبی لوله

روابط تحلیلی نیز رابطه‌ای خطی میان تنش تسلیم و مقاومت جانبی در نظر می‌گیرند که با توجه به این موضوع اختلاف میان مقاومت ناشی از این چهار رابطه با نتایج شبیه‌سازی عددی با کاهش یا افزایش تنش تسلیم تغییری نمی‌کند.

۵-۳ تاثیر نسبت d/D

در این بخش تاثیر نسبت d/D بر مقاومت جانبی لوله بررسی شده و در نهایت با روابط تحلیلی مقایسه شده است. نمودار نیرو-تغییر مکان به ازای نسبت d/D مختلف در شکل ۱۶ ارائه شده است. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که با کاهش نسبت d/D مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ۲۱۰ درصدی نسبت d/D مقاومت جانبی در حدود ۱۶ درصد افزایش یافته است که این موضوع نشان دهنده اهمیت کم نسبت d/D در مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که اختلاف موجود میان مقاومت جانبی محاسبه شده از روابط تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی عددی با افزایش نسبت d/D تا حدی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که روابط تحلیلی که در آن‌ها اثر قطر سنبه در نظر گرفته نشده است به ازای نسبت d/D بزرگ نتایج دقیقتری را ارائه می‌کنند.



شکل ۱۶- تاثیر نسبت d/D بر مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای

۶-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مقاومت اعضای لوله‌ای تحت بار جانبی مانند سقوط اجسام بدون در نظر گرفتن فشار داخلی یا نیروی محوری به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده و با روابط تحلیلی موجود در آیین‌نامه‌ها مقایسه شده است.

همان‌طور که مشاهده شد نتایج روابط تحلیلی و شبیه‌سازی عددی اختلاف بسیاری با یکدیگر دارند که این موضوع ناشی از موارد مختلفی است که در قسمت قبل به آن‌ها اشاره شده است. هر چهار رابطه، مقاومت لوله را نسبت به نتایج آزمایشگاهی، بزرگتر نشان می‌دهد که این موضوع در طراحی لوله‌ها در جهت اطمینان نمی‌باشد. با توجه به شکل ۱۳ می‌توان اظهار داشت که روابط ۱، ۳ و ۴ به ازای مقادیر قرشدگی کوچک($X/D< 5\%$) اختلاف اندکی با نتایج آزمایشگاهی دارد و هرچه میزان قرشدگی بیشتر می‌شود مقدار اختلاف نیز بیشتر می‌شود. در حالی که با توجه به جدول ۴ مشخص است که رابطه (۲) همواره اختلاف بسیار زیادی با نتایج تجربی دارد.

در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی عددی عوامل موثر بر مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان دادند که روابط تحلیلی به ازای نسبت D/t و d/D بزرگ نتایج دقیق‌تری ارائه می‌کنند. البته باید توجه شود که با درنظر گرفتن فشار داخلی در آزمایش‌ها، مقدار زیادی از اختلاف موجود با روابط تحلیلی کاسته می‌شود. از طرفی با توجه به اینکه در مواردی مانند نصب لوله، قطع شدن جریان و... فشار داخلی حضور ندارد و با توجه به حضور فشار خارجی، مقاومت لوله در برابر بارهای جانبی کاهش می‌یابد، محاسبه مقاومت جانبی از روابط تحلیلی در جهت اطمینان نمی‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که به ازای مقادیر مختلف D/t و d/D ، روابط (۳) و (۲) به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]

ترتیب دارای کمترین و بیشترین خطا در پیش‌بینی مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای هستند.

نتایج بخش ۵ نشان دادند که با کاهش نسبت D/t مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای به میزان چشمگیری افزایش پیدا می‌کنند. همچنین مقاومت جانبی به صورت خطی با افزایش تنش تسلیم افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت d/D مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای به نسبت کمی افزایش پیدا کرده‌اند. به طور کلی می‌توان اظهار داشت که مقاومت جانبی به ترتیب اهمیت توسط نسبت D/t و تنش تسلیم و نسبت d/D کنترل می‌شود.

۷-کلید واژگان

1- Dent
2- Force – Deflection
3- Indentor
4- Perfect
5- Rigid Constraint
6- Yield Stress

مراجع

[1] Furnes, O., & Amdahl, J. (1980). Ship collisions with offshore platforms. Intermaritec'80.

[2] Ellinas, C. P., & Walker, A. C. (1983). Damage on offshore tubular bracing members. In *IABSE Colloquium on Ship Collisions With Bridges and Offshore Structures, Copenhagen, May* (pp. 253-261).

[3] Fatt, H. MS and Wierzbicki, T., 1991,"Denting Analysis of Ring Stiffened Cylindrical Shells". In *Proceedings of the 1st European Offshore Mechanics Symposium* (pp. 153-163).

[4] Zeinoddini, M., Harding, J. E., & Parke, G. A. R. (2000). Contribution of ring resistance in the behaviour of steel tubes subjected to a lateral impact. *International Journal of Mechanical Sciences*, *42*(12), 2303-2320.

[5] Brooker, D. C. (2003). Numerical modelling of pipeline puncture under excavator loading. Part II: parametric study. *International journal of pressure vessels and piping*, *80*(10), 727-735.

[6] Liu, J. H., & Francis, A. (2004). Theoretical analysis of local indentation on pressured pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *81*(12), 931-939.

[7] Karamanos, S. A., & Eleftheriadis, C. (2004). Collapse of pressurized elastoplastic tubular members under lateral loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, *46*(1), 35-56.

[8] Hyde, T. H., Luo, R., & Becker, A. A. (2005). Elastic–plastic response of unpressurised pipes subjected to axially-long radial indentation. *International Journal of Mechanical Sciences*, *47*(12), 1949-1971.

[9] Hyde, T. H., Luo, R., & Becker, A. A. (2005). Prediction of force–deflection behaviour of pressurised pipes subjected to axially long radial indentation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *82*(8), 625-637.

[10] API, R. (2000). 2A-WSD. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*, *21*.

[11] Ezzati, M., Zeinoddini, M. (2012). Effect of imperfection on steel tubular members under monotonic axial compressive loading. 14th marine industries conference, Tehran, Iran. (In Persian).

[12] Ezzati, M., Zeinoddini, M. (2012). An Experimental/Numerical Study on the Sensitivity of Axial Compressive Load Bearing Response of Steel Tubular to Geometrical Imperfections. International Journal of Maritime Technology, Vol. 16, p.95-105. (In Persian).

[13] Escoe, A. K. (2006). Piping and Pipelines assessment guide, Volume I, British Library Cataloguing-in-Publication Data.

[14] Zeinoddini, M., Arabzadeh, H., Ezzati, M., & Parke, G. A. R. (2013). Response of submarine pipelines to impacts from dropped objects: Bed flexibility effects. *International Journal of Impact Engineering*, *62*, 129-141.

[15] Veritas, D. N. (2010). DNV-RP-F111 Interference between trawl gear and pipelines. *Oslo: DNV*.

[16] Palmer, A. C., & King, R. A. (2004). *Subsea pipeline engineering*. PennWell Books.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.4.9]