بررسی فروپاشی رایزر منعطف تحت فشار خارجی و ارائه طرح جدید با الهام از طبیعت برای افزایش استحکام

علی بالوئی[۱] ، جعفر قنبری[۲*]

[۱] دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی قم، balouei.a@qut.ac.ir
[۲] استادیار، دانشگاه صنعتی قم، Ghanbari@qut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

کلمات کلیدی:
رایزر منعطف
لایه کارکس
فشار بحرانی
کمانش غیر خطی
طرح با الهام از طبیعت

چکیده

رایزر انعطاف‌پذیر، جزو تجهیزات ضروری در استخراج نفت و گاز از منابع دریایی عمیق به شمار می‌روند. فشار هیدرواستاتیک زیادی در عمق زیاد بر رایزر اعمال می‌شود که یکی از عوامل فروپاشی در این لوله‌ها است. مهم‌ترین لایه مقاوم در برابر فشار خارجی داخلی‌ترین لایه آن یعنی کارکس است. در این مقاله با روش اجزاء محدود ابتدا به بررسی فروپاشی مدل فعلی لایه کارکس تحت فشار خارجی پرداخته می‌شود، سپس طرح جدید با الهام از ساختار اسکلت خارجی یک نوع سوسک ارائه می‌شود که فروپاشی در آن بررسی می‌شود. مکانیزم اتصال اسکلت این سوسک به گونه‌ای است که در عین انعطاف پذیری حرکتی مورد نیاز، توانایی مقاومت در برابر فشارهای خارجی را دارد. پس از بررسی فروپاشی سازه جدید تحت فشار خارجی به مقایسه عملکرد دو سازه پرداخته می‌شود. با مقایسه نتایج، مشخص شد مقدار فشار بحرانی در طرح جدید نسبت به طرح قبلی افزایش قابل توجهی داشته است.

Analysis of the collapse of the flexible risers under external pressure and proposing and bio-inspired design for increasing its strength

Ali Balouei[1], Jaafar Ghanbari[2*]

[1] Master Student, Qom University of Technology; email address (balouei.a@qut.ac.ir)
[2] Assistant Professor, Qom University of Technology; email address (Ghanbari@qut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 13 Aug 2023
Accepted: 23 Jan 2024
Available online: 27 Jan 2024

Keywords:
Flexible riser
carcass layer
nonlinear buckling
critical pressure
bio-inspired design

ABSTRACT

Flexible risers are one of the crucial pieces of equipment for moving the output fluid from the well to the platform during the extraction of oil and gas from deep sea resources. One of the causes of collapse in these pipes is the high hydrostatic pressure that is applied to the riser in deep water. Its innermost layer, known as the carcass, is the layer that plays the most significant role in the resistance to external pressure. This article uses the finite element method to investigate the collapse (non-linear buckling) of the riser under pressure from the outside. A new design that draws inspiration from the structure of a beetle's exoskeleton has been presented to increase the load capacity of the carcass layer. This type of beetle's skeleton is constructed in such a way that it creates a strong connection between various parts of the external skeleton to produce high strength against external pressures while still allowing for the necessary movement flexibility. To assess how well the new design performs in comparison to the original, nonlinear buckling of the new structure under external pressure has been examined. The critical pressure in the new design is increased compared to the old design.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

۱ - مقدمه

با افزایش استخراج منابع نفت و گاز در جهان و اتمام منابع سهل‌الوصول، استخراج از منابع دریایی با شرایط سخت مانند عمق زیاد، شرایط جوی نامناسب و... جزو اولویت‌های این بخش قرار گرفته است. در استخراج از دریا تجهیزات متفاوت و پیچیده‌ای به کار گرفته می‌شوند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها رایزرهای دریایی هستند. رایزر لوله‌ای عمودی است که تجهیزات سرچاهی را به سکو متصل می‌کند و وظیفه انتقال هیدروکربن، گل، تزریق گاز و سیالات درون چاهی را بر عهده دارد. رایزرها به سه دسته کلی صلب، انعطاف‌پذیر و هیبریدی تقسیم می‌شوند [۱]. رایزرهای انعطاف‌پذیر شامل دو نوع پیوندی و ناپیوندی می‌باشند که رایزرهای منعطف پیوندی به دلیل سختی خمش کم در فواصل کوتاه سرچاه استفاده می‌شوند. اما رایزرهای انعطاف پذیر ناپیوندی به دلیل سختی خمشی و تحمل نیروی فشاری زیاد در فواصل طولانی و عمق زیاد دریا قابل بهره‌برداری می‌باشند. این رایزرها از لایه‌هایی تشکیل شده‌اند که بر روی هم می‌لغزند و در شکل ۱ نمایش داده شده است [۲].

لایه کارکس داخلی ترین لایه فولادی لوله‌های انتقال‌دهنده مواد هیدروکربنی است، این لایه وظیفه مقاومت در برابر کمانش محیطی به دلیل فشار بیرونی یا گاز محبوس‌شده در حلقه‌ها را بر عهده دارد. غلاف فشاری داخلی که از جنس پلیمر است وظیفه جداسازی مایع درون رایزر از حلقه‌ها را برعهده دارد. زره فشاری فولادی نقش مقاومت در برابر تنش شعاعی ناشی از فشار داخلی لوله را ایفا می‌کند. نوارهای ضدسایش مابین لوله‌های فلزی قرار گرفته تا از ساییدگی و کاهش مقاومت آن‌ها جلوگیری کند. زره کششی فولادی همان‌طور که از نامش پیداست مقاومت در راستای کششی ایجاد می‌کند و نیروهای حاصل از وزن رایزر در را تحمل و به سکو انتقال می‌دهد، در صورتی که رایزر در آب‌های خیلی عمیق مورد استفاده قرار گیرد به‌جای دو زره از چهار زره استفاده می‌شود. غلاف فشاری خارجی هم به‌عنوان یک مانع در برابر آب دریا عمل می‌کند و معمولاً جنس آن همانند غلاف داخلی و از پلیمر است [۴,۳].

شکل ۱ لایه بندی رایزرهای انعطاف‌پذیر[۵]

در استاندارد API RP 17B برای رایزرهای انعطاف‌پذیر ناپیوندی ۹ مد خرابی ارائه شده است که عبارتند از: فروپاشی، ترکیدن، خرابی کششی، خرابی فشاری، خمش بیش از حد، خرابی پیچشی، خرابی خستگی، فرسایش و خوردگی، که برای هرکدام علت وقوع و راهکار جلوگیری از وقوع خرابی پیشنهاد می‌دهد. برای مثال خرابی فروپاشی را ناشی از کشش ، بیضوی‌شدن و نیروهای نصب و فشار خارجی بیش از حد می داند که برای هر مورد راهکار مناسب ارائه می‌دهد [۶]. سیمنسن به بررسی این ۹ مود خرابی پرداخته است و علل وقوع فروپاشی را علاوه بر عوامل مورد بررسی در API RP 17B انتشار گاز مابین حلقه‌ها، تصادم، سقوط اشیا سنگین، خوردگی، ناهنجاری کارخانه‌ای و فرسایش می‌داند [۷]. دروموند و همکاران یکی دیگر از عوامل فروپاشی این لوله‌ها را وجود شن و ماسه در سیال خروجی از چاه (به‌خصوص در انتقال گازها) می‌داند و معتقدند این ذرات طی برخورد به لایه کارکس با سرعت بالا موجب فرسایش و نازک شدن ضخامت آن شده که در نهایت به فروپاشی ختم می‌شود [۸]. کلولاریو و همکاران، با بررسی ۵ ساختار متفاوت از رایزر منعطف در عمق ۲۵۰۰ متری تحت تست فروپاشی مستقیم و فروپاشی انحنادار به تاثیر خمش بر فروپاشی می‌پردازند و یک مدل عددی جهت اندازه‌گیری مقدار مقاومت رایزر در برابر فروریختن تحت انحنا ارائه کردند [۹] ها در گزارشی ابتدا به بررسی مودهای خرابی و سپس به اهمیت محاسبه فشار بحرانی و راه‌های تقویت رایزرمنعطف در مقابل فروپاشی می‌پردازد و راهکارهای مختلفی از جمله افزایش تعداد لایه‌ها، ضخامت آن‌ها و... ارائه می‌دهد و محاسبه فشار بحرانی را بااهمیت می‌داند [۱۰]. شن و همکاران، طراحی بیش از حد محافظه‌کارانه سازندگان رایزرهای منعطف در لایه کارکس را عامل سنگین‌شدن لایه کارکس و متعاقبا افزایش تعداد زره‌های کششی و نیروهای وارد بر سازه‌های دریایی می‌دانند که این موارد هزینه‌های تولید، نصب و بهره‌برداری را افزایش می‌دهد [۱۱]. روزاس و همکاران

به بررسی فروپاشی تحت فشار هیدرواستاتیک، سپس بررسی فروپاشی تحت نیروی شعاعی می‌پردازند و نهایتاً به رابطه‌ای درجه دو میان فروپاشی تحت نیروی شعاعی و فروپاشی تحت فشار هیدرواستاتیک می‌رسند [۱۲]. لی و همکاران مدل تحلیلی برای پیش‌بینی فروپاشی مرطوب لایه کارکس با نقص اولیه ارائه کردند که در ادامه با شبیه‌سازی اجزاء محدودی آن را صحه‌گذاری کردند، همچنین آنها در مقاله دیگری به شبیه‌سازی اجزاء محدودی فروپاشی تحت فشار خارجی و اثر تعداد حلقه‌های رایزر در حل عددی و زاویه خمش بر فشار بحرانی می‌پردازند [۱۴،۱۳]. با توجه به زمان‌بر بودن انجام محاسبات این تحلیل در نرم افزارهای شبیه سازی رن و همکاران با استفاده از حل تحلیلی یک مدل جایگزین برای کارکس مدل S شکل در نظر گرفتند و نتایج شبیه سازی با آن مدل حلقه‌ای را با نتایج مدل واقعی شبیه‌سازی شده مقایسه کرده‌اند[۱۵]. همچنین در مقاله دیگری چن و همکاران به بررسی و تحلیل فروپاشی لایه کارکس با وجود سایش در نوارهای آن پرداختند که این سایش به دلیل وجود برآمدگی درون این لایه بوجود می‌آید [۱۶]. طالب پور و همکاران [۱۷] به بررسی پدیده انتشار خرابی رایزرها با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود پرداخته‌اند. دادخواه خیابانی و همکاران [۱۸] اثر کمانش‌گیرها در جلوگیری از انتشار دینامیکی کمانش در خطوط لوله دریایی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. قدسی حسن آباد و همکاران [۱۹] نیز لوله‌های دریایی روی بستر دریا که دارای پوشش بتنی هستند را تحت نیروی کششی با استفاده از شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود بررسی کرده‌اند.

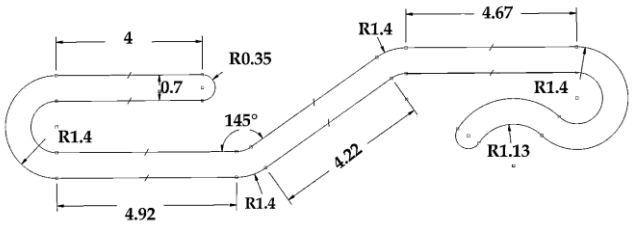
در این مقاله ابتدا فروپاشی (کمانش محیطی) لایه کارکس فعلی تحت فشار خارجی تحلیل شده و رفتار کمانش غیرخطی این سازه تحت فشار بررسی می‌شود. سپس، یک طرح جدید برای کارکس که از نحوه اتصال ساختار اسکلت خارجی یک نوع سوسک الهام گرفته شده است ارائه شده و فروپاشی تحت فشار خارجی در لایه جدید بررسی می‌شود. نهایتاً نتایج حاصل از این دو تحلیل باهم مقایسه شده و مشخص می‌شود طرح جدید نسبت به مدل اصلی توانایی بیشتری در تحمل فشار خارجی دارد.

۲ - تحلیل کمانش محیطی

در این بخش ابتدا به تحلیل کمانش غیرخطی لایه کارکس تحت فشار خارجی پرداخته می‌شود و سپس مدل جایگزین ارائه شده و مود فروپاشی آن تحت فشار خارجی تحلیل می‌شود. معیار فروپاشی در این پژوهش ناپایداری سازه تحت فشار خارجی است. با اعمال فشار خارجی بر سطح بیرونی، ابتدا سازه تغییر شکل جزئی از خود نشان می‌دهد که نشان از رفتار الاستیک آن دارد، به تدریج با تبدیل به رفتار پلاستیک و نهایتاً رسیدن به تنش نهایی ماده دچار ناپایداری می‌شود و تغییرشکل‌های بزرگ از خود نشان می‌دهد که فشار معادل در اعمال این تغییر شکل، فشار بحرانی برای فروپاشی سازه در نظر گرفته می‌شود.

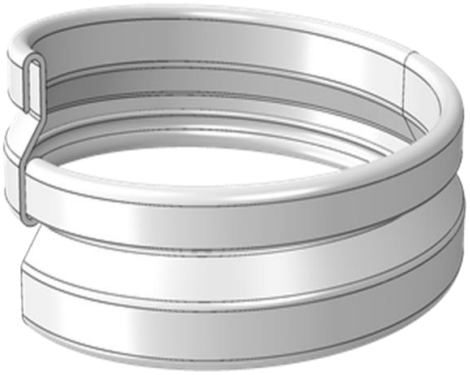
۲-۱- تحلیل فروپاشی در کارکس با مدل اولیه

در این بخش، برای بررسی عملکرد طرح اولیه استفاده شده در مرجع ملندز و همکاران [۲۰] و نیز اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها، از هندسه بررسی شده در این مرجع استفاده شده است. در این مقاله یک لوله انعطاف‌پذیر ۲ اینچی با اندازه‌های سطح مقطع ارائه شده در شکل ۲ در نظر گرفته شده است که همگی آن‌ها برحسب میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲ سطح مقطع لایه کارکس مدل اصلی

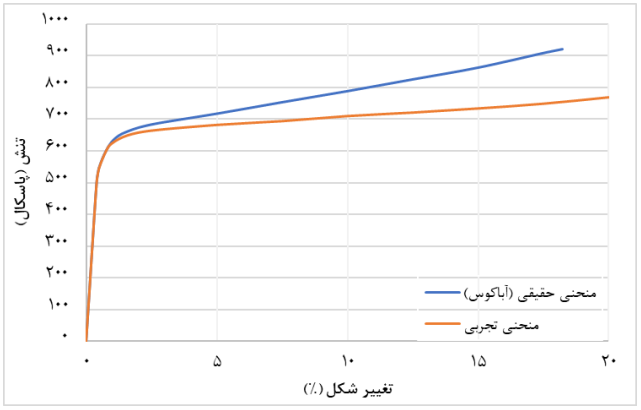
این مقطع با شعاع داخلی ۲۵/۴ میلی‌متر، گام ۱۰/۲۵ میلی‌متر به صورت مارپیچی و با زاویه پیچش ۸۶/۳ درجه چرخانده شده تا یک حلقه از کارکس به وجود آید. حلقه ایجاد شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در ادامه این حلقه با شرایط مدنظر وارد نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شده و به تعداد مورد نیاز در راستای محوری تکثیر شده تا طول مد نظر از رایزر ایجاد شود. هر حلقه از محل تماس مقطع خود به حلقه دیگر با کوپلینگ کامل متصل شده است.



شکل ۳ نمایی از لایه کارکس مدل اصلی

جنس ماده کارکس در نرم‌افزار آباکوس فولاد با چگالی۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته ۲۰۷ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ تعریف شده است. با توجه به تغییر شکل بزرگ بر اثر فشار خارجی، خواص پلاستیک از نمودار تنش کرنش فولاد مورد استفاده در لایه کارکس مطابق تحقیقات سوزا [۲۱] در شکل ۴ استخراج شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]



شکل ۴ نمودار تنش کرنش ماده مورد استفاده در لایه کارکس تحت آزمون کشش [۲۱]

مقادیر استخراج شده از نمودار فوق به صورت نقطه‌ای در ارائه شده است که با مدل رفتاری پلاستیسیته چند خطی در نرم افزار آباکوس تعریف گردید.

در این شبیه سازی از لایه کارکس با تعداد ۱۰ حلقه استفاده شده است که از اثرگذاری شرط مرزی بر روی نتایج جلوگیری شود. همچنین قید اتصال کامل مابین سطح مقطع آن‌ها برای ایجاد مارپیچ یکپارچه اعمال گردید و قید تماسی با ضریب اصطکاک ۰/۱ نیز مابین سطوح داخلی حلقه‌ها در کل سازه تعریف شد. این تحلیل با استفاده از حلگر Explicit حل شد که به دلیل ایجاد تغییر شکل بزرگ در تنظیمات آن NLGEOM فعال شده است.

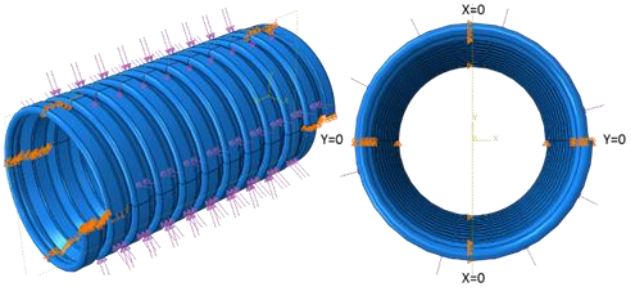
جدول ۱ خواص پلاستیک ماده مورد استفاده در تحلیل فروپاشی لایه کارکس [۲۱]

تنش (مگاپاسکال)	۶۰۰	۶۳۰	۶۵۵	۶۷۵	۷۰۰	۷۱۰	۷۵۰
کرنش	۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۷۸	۰/۰۱۷۹	۰/۰۳۲۹	۰/۰۴۲۹	۰/۰۶۷۹
تنش (مگاپاسکال)	۷۸۵	۸۰۰	۸۲۲	۸۶۳	۹۰۰	۹۰۶	۹۲۰
کرنش	۰/۰۹۲۹	۰/۱۰۰۹	۰/۱۱۷۹	۰/۱۴۲۹	۰/۱۶۲۹	۰/۱۶۷۹	۰/۱۷۴۹

علت استفاده از این حلگر این است که با توجه به وجود تغییر شکل‌های ناپایدار در این تحلیل و بررسی پساکمانش امکان استفاده از حلگر استاندارد وجود ندارد زیرا در این حلگر به علت ناپایداری بوجود آمده در سازه مسئله همگرا نمی‌شود. برای رفع این مشکل به ناچار از حلگر صریح استفاده شده است. لازم به ذکر است برای جلوگیری از بوجود آمدن اثرات دینامیکی و اینرسی سازه، زمان حل طولانی‌تر در نظر گرفته شده است.

در این تحلیل شرط مرزی فقط به نوارهای انتهایی وارد شده و حداقل شرط مرزی به نحوی اعمال شده است که صرفا از بروز حرکت صلب‌وار جلوگیری کند. با توجه به زمانبر بودن تحلیل کامپیوتری، امکان ایجاد تعداد زیادی از حلقه‌ها در نرم افزار آباکوس وجود ندارد فلذا باید تعداد حلقه‌ها به حدی انتخاب شوند که از اثرات شرایط مرزی در نتیجه حل جلوگیری شود. به همین دلیل تعداد ۱۰ حلقه در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، اثرات تکیه گاهی در روی حلقه های میانی تا حد زیادی حذف شده است. گرچه در صورت امکان باید مدل هایی با تعداد حلقه بیشتر بررسی کرد اما به جهت امکان پذیر بودن از نظر محاسباتی محدودیت وجود دارد. نکته دیگر اینکه در مراجع مشابه نیز همین تعداد حلقه در نظر گرفته شده است.

فشار خارجی معادل ۵۰ مگاپاسکال به صورت شیب‌دار، از صفر با نرخ افزایشی یکنواخت تا فشار نهایی به سطح خارجی حلقه‌ها اعمال می‌شود. در اعمال بارگزاری فشار نسبی در نظر گرفته شده و از اثر فشار داخلی صرف‌نظر شده است. این فشار زیاد به این منظور در نظر گرفته شده است که ظرفیت کمانش غیر خطی سازه بدست آید. بدیهی است که سازه کل این فشار را تحمل نخواهد کرد و در میانه حل، بر اثر فشار بحرانی و شرایط مرزی اعمالی نشان داده شده در شکل ۵ دچار کمانش و تغییرشکل‌های بزرگ می‌شود که اصطلاحاً فروپاشی نامیده می‌شود. شرایط مرزی به لبه‌های لایه کارکس و به صورت قرینه طوری وارد می‌گردد که از حرکت صلب آن جلوگیری شود. این لوله در راستای X و Y همانند شکل ۵ مقید شده است و در راستای Z هم لوله از یک طرف مقید شد تا شرایط مناسب جهت فروپاشی به‌وجود آید.

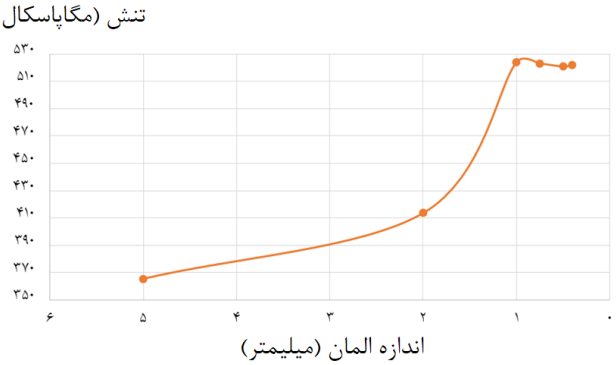


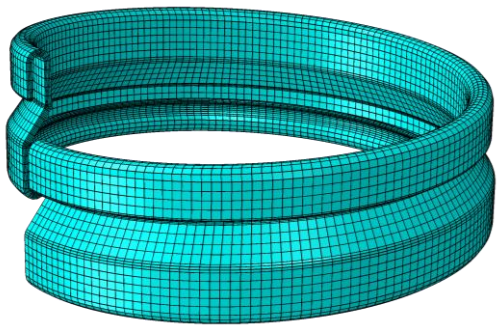
شکل ۵ شرایط مرزی و بارگزاری حل مسئله فروپاشی

برای اطمینان از نتایج تحلیل اجزاء محدود نیاز به بررسی همگرایی مش است تا اثر اندازه المان حذف شده و اندازه‌ای بدست آید که به ازای آن نتایج عددی همگرا شده و با کوچک‌تر کردن اندازه المان، این نتایج تغییری نکند. این کار انجام شده و نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است. برای این کار، یک حلقه لایه کارکس تحت فشار خارجی ۲۵ مگاپاسکال قرار گرفته است. این مقدار فشار خارجی برای فروپاشی حلقه و ورود آن به حالت پساکمانش غیر خطی کافی است. به ازای اندازه المان‌های مختلف، تنش بیشینه در این حلقه بدست آمده و برحسب اندازه المان رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، تنش بیشینه حلقه به ازای اندازه المان کمتر از ۱ میلیمتر تغییر چندانی نمی‌کند و می‌توان گفت همگرایی المان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

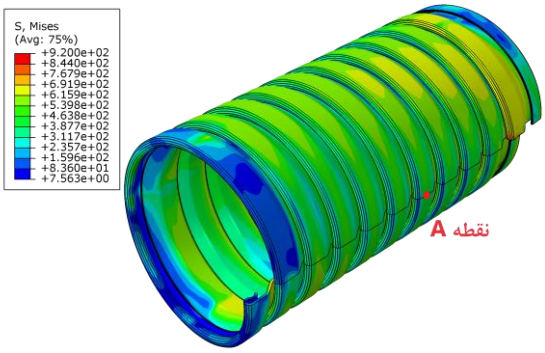
حاصل شده است. بنابراین، اندازه المان ۱ میلی‌متر برای تحلیل‌ها اعمال شد و برای هر حلقه تعداد ۴۴۸۹۲ المان از خانواده C3D8R بصورت شش‌وجهی خطی تولید شد. این المان یک المان سه بعدی هشت گرهی است که از انتگرال گیری عددی کاهش یافته برای محاسبه ماتریس سختی المان استفاده می‌کند. دلیل استفاده از المان سه بعدی نیز این است که اولاً در مقایسه با نتایج مقاله مرجع، نوع المان هر دو مطالعه یکسان باشد تا تاثیری از این منظر روی نتایج ایجاد نشود. با توجه به روند انجام پژوهش و مقایسه نتایج این مدل با مدل بیونیک لازم است تا حد امکان شرایط حل مسئله یکسان فرض شود بدین منظور با توجه به لزوم استفاده از المان سه‌بعدی در مدل بیونیک در حل فروپاشی باید در این مدل نیز از المان سه‌بعدی استفاده شود تا شرایط یکنواخت در حل هر دو مورد تعریف شود و اثر فرمول‌بندی المان در نتیجه تحلیل تاثیرگذار نباشد.





شکل ۶ نمودار همگرایی مش و مش‌بندی حلقه کارکس

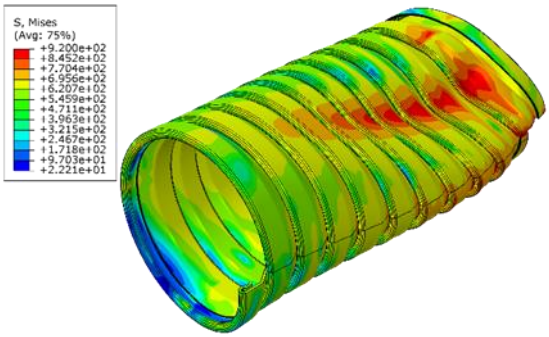
لازم به ذکر است که در این پژوهش از تحلیل کمانش خطی متداول استفاده نشده است و ناپایداری سازه تحت فشار خارجی بصورت تحلیل تغییر شکل غیر خطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش فشار این ناپایداری گسترش می‌یابد و سبب کاهش استحکام سازه می‌شود که می‌توان این فشار را به عنوان فشار بحرانی در نظر گرفت. پس از انجام تحلیل، مشخص شد سازه در فشار ۳۲/۱۵ مگاپاسکال شروع به تغییرشکل بزرگ می‌کند که به‌عنوان فشار بحرانی کمانش غیرخطی این سازه در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۷ نمای سه بعدی آن اندکی قبل از کمانش نمایش داده شده است.



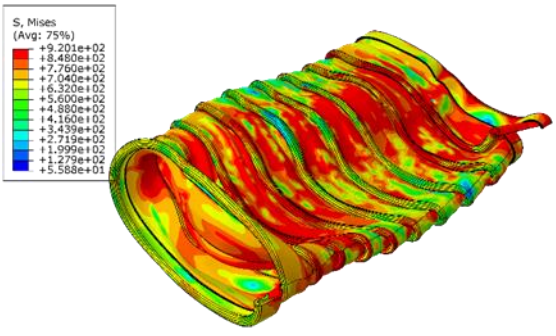
شکل ۷ لایه کارکس مدل اصلی تحت فشار ۳۲/۱۵ مگاپاسکال

در شکل ۸ نمای لایه کارکس در حالت تغییر شکل‌یافته پس از شروع کمانش و قبل از فروپاشی کامل در فشار ۳۲/۵ مگاپاسکال نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است در این فشار تغییرشکل محلی متناظر با کمانش مود اول سازه استوانه‌ای وجود دارد و با افزایش فشار خارجی منجر به تغییرشکل کامل کارکس شده و به متلاشی‌شدن کامل آن منجر می‌شود.

نهایتاً در فشار ۳۲/۸ مگاپاسکال دو وجه داخلی لوله باهم برخورد کرده و سازه به‌طورکامل متلاشی می‌شود که در شکل ۹ نمای تغییر شکل یافته نهایی سازه نشان داده شده است.



شکل ۸ لایه کارکس مدل اصلی در فشار ۳۲/۵ مگاپاسکال



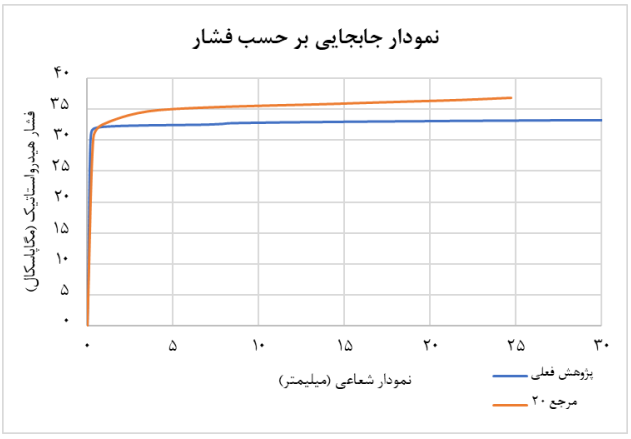
شکل ۹ لایه کارکس مدل اصلی تحت فشار ۳۲/۸ مگاپاسکال

به منظور مقایسه نتایج و بررسی صحت انجام شبیه‌سازی فروپاشی، هندسه و مواد مورد استفاده توسط ملندز و همکاران [۲۰] در این بخش انجام شده است و در ادامه فشار بحرانی بدست آمده در مدل کارکس اصلی با نتایج مرجع ذکر شده با هم مقایسه شوند. در شکل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

۱۰ نمودار جابجایی برحسب فشار خارجی در حل عددی انجام شده در این پژوهش در مقایسه با پژوهش انجام شده توسط ملندز و همکاران ارائه شده است. فشار بحرانی محاسبه شده توسط این مرجع ۳۰/۷۵ مگاپاسکال می‌باشد که نشان دهنده تفاوت ۴ درصدی نسبت به نتایج پژوهش فعلی است. در شکل ۱۰ نمودار نارنجی رنگ مربوط به نتایج پژوهش فعلی است که از نقطه A (نمایش داده شده در شکل ۷) استخراج شده است و نمودار آبی رنگ نتایج پژوهش آقای ملندز را نشان می‌دهد.

با توجه به شبیه سازی انجام گرفته در مورد لایه کارکس و بررسی مود فروپاشی در آن به دلیل اهمیت موضوع، نواقص دیگری نیز می‌توان برای این لایه با این سطح مقطع عنوان کرد که در ادامه بیان می‌شوند. لایه کارکس با مدل S شکل به دلیل ناهموار بودن سطح داخلی آن، موجب ایجاد گردابه و چرخش در سیال عبوری می‌شود که مطابق با پژوهش انجام شده این گردابه‌ها منجر به ایجاد ارتعاش در رایزرها می‌شوند که می‌تواند مشکلات عدیده‌ای در عملکرد رایزر بوجود آورد و می‌توان نحوه محاسبه این ارتعاشات در نرم افزار ارکافلس را در این مقاله مشاهده نمود [۲۲]. همچنین سطوح ناهموار آن مستعد سایش و از بین رفتن است که این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که نسبت گاز در سیال خروجی بالا باشد.

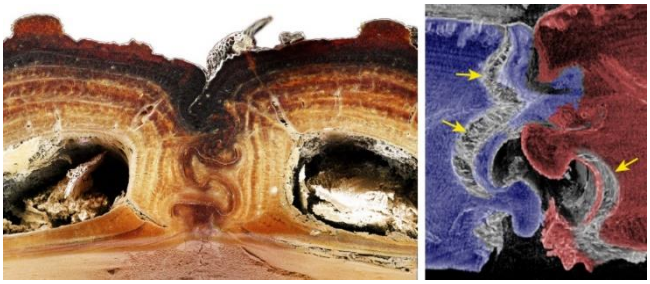


شکل ۱۰ نمودار جابجایی بر حسب فشار خارجی

۲-۲- طرح بیونیک کارکس با الهام از طبیعت

در طراحی لایه کارکس با طرح جدید لازم است توهم رفتگی مقطع طوری باشد که رایزر انعطاف‌پذیری خود را از دست ندهد و از طرفی هم در برابر پیش‌کشش اعمالی از سکو و نیروهای دیگر مانند خمش مقاومت نشان دهد. می‌توان برای طراحی این مقطع از ساختارهای سلولی موجود در طبیعت بهره گرفت که علاوه بر انعطاف‌پذیری، سختی مناسبی در برابر فشار و نیروهای خارجی ارائه می‌دهد.

در بافت‌های بیولوژیکی گونه‌های جانوری و گیاهی متعدد، استراتژی‌های کارآمدی برای سنتز، ساخت و ادغام کامپوزیت‌هایی که خواص مکانیکی استثنایی دارند، تکامل یافته‌اند. یک نمونه چشمگیر در بال‌های جلویی اسکلتی بیرونی (elytra) حشره‌ای موسوم به سوسک آهنین اهریمنی، با نام علمی Phloeodes diabolicus یافت می‌شود. این حشره صحرایی فاقد توانایی پرواز و فرار از شکارچیان، دارای الیترای بسیار مقاوم در برابر ضربه و لهیدگی است که توسط رابطهای پیچیده و درجه‌بندی شده ایجاد می‌شود. این سوسک را می‌توان در زیر پوست درختان سخت چوب و مخروطیان یافت که خود را به مرده بودن می‌زند و به دلیل بافت خشن الیترای[۱] آن ظاهراً شبیه یک سنگ کوچک است. فراتر از تظاهر به مرگ، این سوسک توانایی قابل توجهی در مقاومت در برابر ضربات له کردن و سوراخ کردن شکارچیان و حتی وزن خودروها دارد. اخیرا در مقاله‌ای [۲۳] که توسط گروهی از محققان در نشریه نیچر به چاپ رسیده است، ساختار اسکلت این سوسک بررسی شده که در شکل ۱۱ به نمایش درآمده است. طبق بررسی‌های میکروسکوپی از ساختار اسکلت سوسک، مشخص شده است که اتصال بخش‌های مختلف اسکلت خارجی، بصورت نوعی مکانیزم قفل شدگی انجام می‌پذیرد که در عین حفظ استحکام و مقاومت در برابر بارهای خارجی، انعطاف پذیری مورد نیاز برای حرکت سوسک را نیز ایجاد می‌کند.



شکل ۱۱ شکل سلولی بدنه سوسک /۲۳/

طرح پیشنهادی الهام گرفته از ساختار اسکلت خارجی این سوسک علاوه بر دارا بودن استحکام مورد نیاز در برابر فشار خارجی، از بروز جریانات گردابه‌ای در سیال انتقالی به‌دلیل نداشتن فرورفتگی در سطح داخلی رایزر نیز جلوگیری می‌کند. به تبع آن ارتعاشات ناشی از این جریان کاهش یافته و همچنین از کاهش سرعت سیال عبوری جلوگیری می‌کند که به نسبت مقطع اصلی گزینه مناسب‌تری در این مورد می‌باشد.

با توجه به صحت سنجی پژوهش بر اساس مدل S شکل با مقاله ملندز و همکاران، سعی شده است تا حد امکان تمامی مقادیر مدل بیونیک همانند مدل اصلی در نظر گرفته شود. بنابراین نوع المان،

[۱] بال‌های جلویی اسکلتی بیرونی

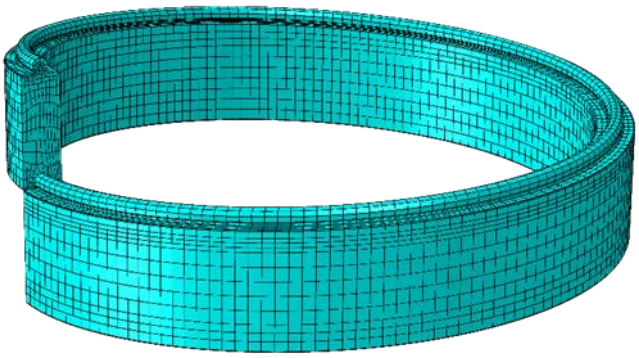
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

سایز المان، قطر داخلی، قطر خارجی، تعداد حلقه‌ها و طول لوله برابر با لوله شبیه‌سازی شده با مدل S می‌باشد. بدین جهت می‌توان استحکام دو مدل را نسبت به یکدیگر مقایسه کرد. گرچه مقایسه بهتر برای حالتی خواهد بود که هر دو سازه از یک نوع ورق با ضخامت یکسان ساخته شوند که به علت طبیعت و هندسه مدل جدید (با توجه به نحوه قفل شوندگی حلقه ها نسبت به یکدیگر) امکان پذیر نمی‌باشد.

طرح پیشنهادی همانند مدل اصلی به‌صورت مارپیچ با شعاع داخلی ۲۵/۴ میلی‌متر، گام ۱۰/۲۵ میلی‌متر و زاویه پیچش ۸۶/۳ درجه طراحی و وارد نرم‌افزار آباکوس شده که در شکل ۱۲ نمای سه بعدی آن مشخص است.

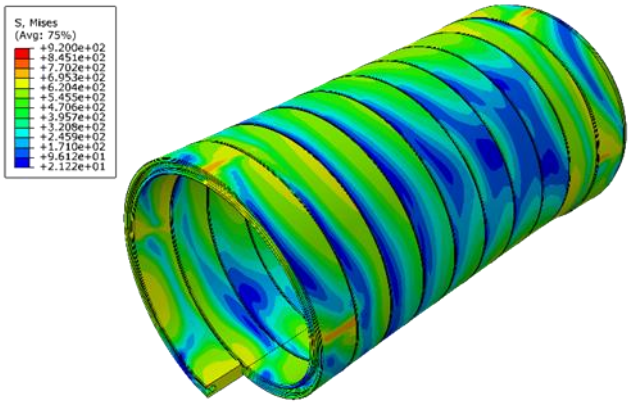
شکل ۱۲ تک حلقه لایه کارکس مدل بیونیک

این مدل هم همانند مدل اصلی از ۱۰ حلقه تشکیل شده و خواص ماده، قیود، بارگذاری و شرایط مرزی آن همانند مدل اصلی شبیه‌سازی شده است. در مش‌بندی هم هر حلقه تعداد ۲۵۱۶۸ المان از خانواده C3D8R به‌صورت شش‌وجهی خطی دارد که در شکل ۱۳ مشخص است.



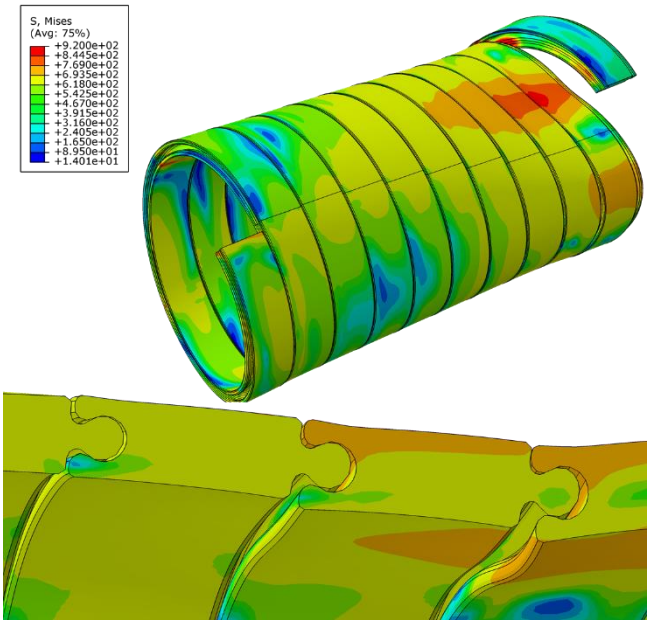
شکل ۱۳ مش‌بندی حلقه کارکس مدل بیونیک

پس از انجام تحلیل و بررسی نتایج مشخص شد که این مدل تحت فشار خارجی ۵۰ مگاپاسکال شروع به تغییرشکل می‌کند. در نتیجه فشار بحرانی معادل آن برابر با ۵۰ مگاپاسکال بدست می‌آید. شکل ۱۴ نمای سه بعدی مدل را در این فشار نمایش می‌دهد.



شکل ۱۴ لایه کارکس مدل بیونیک تحت فشار ۵۰ مگاپاسکال

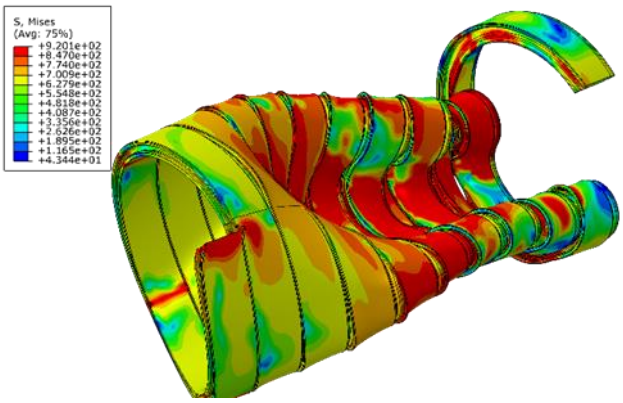
در شکل ۱۵ مدل طراحی‌شده تحت فشار ۵۱/۲ مگاپاسکال وجود دارد که در حال فروپاشی می‌باشد. نکته مهم وجود تغییر شکل محلی در قسمت میانی سازه است که با افزایش فشار خارجی این تغییرشکل منجر به متلاشی‌شدن کامل سازه می‌شود. در شکل ارائه شده سطح برش خورده لایه نمایش داده شده است که در آن تمرکز تنش در لبه قفل‌شدگی حلقه مشخص است و همانند مدل S شکل که در شکل ۸ نشان داده شد و تمرکز تنش در ناحیه خم شدگی ورق بوجود آمد پیش‌بینی می‌شد در مدل بیونیک نیز این مشکل در نواحی شکل‌دهی رخ دهد که در شکل ۱۵ مشخص است.



شکل ۱۵ لایه کارکس مدل بیونیک تحت فشار ۵۱/۲ مگاپاسکال

نهایتاً با افزایش فشار خارجی تغییر شکل محلی در فشار ۵۲/۲ مگاپاسکال به تغییرشکل کلی سازه تبدیل شده و مدل پیشنهادی در فشار معادل ۵۲/۲ مگاپاسکال متلاشی می‌شود که شکل مود و نمای سه‌بعدی آن در شکل ۱۶ مشخص است.

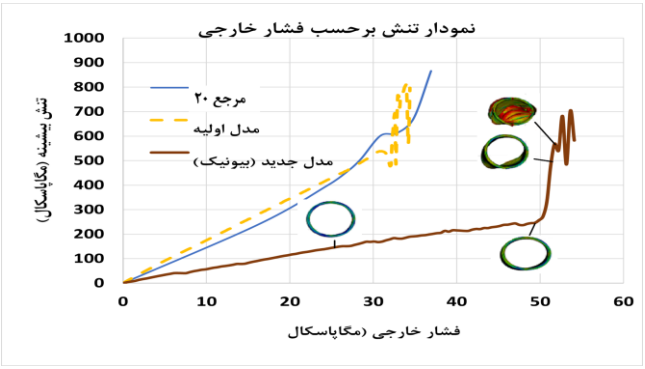
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]



شکل ۱۶ لایه کارکس مدل بیونیک تحت فشار ۵۲/۲ مگاپاسکال

نکته قابل تامل در شکل مود خرابی مدل جدید نسبت به مدل مرجع ۲۲ از هم گسیختگی حلقه‌های آن است. در این رابطه ذکر این نکته ضروری است که در ساختار اولیه کارکس از اتصالی استفاده شده است که در آن بخشی از پوسته مقطع کارکس در داخل مقطع دیگر بصورت قلاب قرار می‌گیرد. این نوع اتصال باعث می‌شود که در فشارها و کشش‌های قابل تحمل توسط لایه کارکس، رینگ‌ها از هم جدا نشوند و یکپارچگی ساختار حفظ شود. در صورتی که ساختار جدید معرفی شده در این مقاله از نوع اتصال کاملا متفاوت و در واقع الهام گرفته از ساختار اسکلت خارجی سوسک استفاده شده است. این نوع اتصال مشابه نحوه متصل شدن قطعات پازل جورچین است که قطعات به هم قلاب نمی‌شوند. بدین جهت در صورتی که فشار به اندازه کافی زیاد شود، دو قطعه از یکدیگر جدا خواهند شد. البته ذکر این نکته ضروری است که به هم خوردن یکپارچگی ساختار جدید در فشارهای بسیار بزرگتری در مقایسه با سازه اولیه (۵۲/۲ در مقایسه با ۳۲/۸ مگاپاسکال) رخ داده است و در عمل پس از اینکه سازه به فروپاشی رسیده (که معادل از بین رفتن رایزر است) رینگ‌ها از هم جدا شده اند.

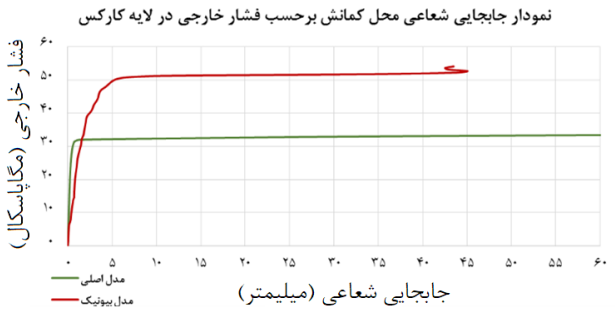
در ادامه به بررسی و مقایسه تغییرات تنش فون-میسز بر حسب فشار خارجی پرداخته می‌شود. این تغییرات در نمودار شکل ۱۷ نمایش داده شده است که در آن نمودار تغییرات مدل S شکل و پژوهش ملندز نیز وجود دارد. همانطور که مشخص است مدل الهام گرفته از طبیعت دیرتر از مدل اصلی دچار تغییر شکل بزرگ و فروپاشی می‌شود. همچنین در این نمودار در زمان‌های مشخص سطح مقطع مدل جدید نمایش داده شده است که نشان‌دهنده نحوه بروز تغییرات بزرگ در سازه جدید می‌باشد.



شکل ۱۷ تغییرات تنش ون مایزز نسبت به فشار خارجی

۳- نتایج و بحث

در بخش قبلی فشار بحرانی متناظر با فروپاشی غیر خطی هر دو مدل بررسی شد و به عنوان یک فاکتور مورد اهمیت در لایه کارکس رایزر منعطف مورد ارزیابی قرار گرفت. محاسبه فشار بحرانی در کمانش غیرخطی رایزر علاوه بر مشاهده تغییر شکل رایزر وابسته به فشار خارجی، با استفاده از نمودار جابجایی شعاعی در محل کمانش برحسب فشار خارجی وارد بر لایه نیز انجام می‌شود. نمودار مدنظر برای هر دو مدل به منظور مقایسه میان مقاومت در برابر فشار خارجی در شکل ۱۸ ترسیم شده‌است.



شکل ۱۸ نمودار جابجایی شعاعی محل کمانش برحسب فشار خارجی

همانطور که در شکل ۱۸ مشخص است هر دو مدل تا فشار خارجی ۳۲/۱۲ مگاپاسکال تغییرشکل بسیار کمی دارند. مدل اولیه حوالی این فشار شروع به تغییر شکل شدید می‌کند که در نمودار این موضوع با تغییر روند مشخص است. در مدل بیونیک نیز این اتفاق در فشار خارجی معادل ۵۰ مگاپاسکال رخ می‌دهد و نمودار در این نقطه دچار تغییر روند می‌شود. تا رسیدن به فشار ۵۰ مگاپاسکال طرح بیونیک تغییر شکل قابل توجهی نشان نمی‌دهد اما با افزایش فشار از این نقطه روند تغییرشکل افزایش می‌یابد و سازه دچار ناپایداری می‌شود. علاوه بر بررسی فشار بحرانی در این دو سازه لازم است نسبت‌های جرم بر واحد طول و فشار بحرانی بر جرم بر واحد طول باهم مقایسه شوند. بررسی نسبت وزن بر واحد طول به این دلیل اهمیت دارد که رایزر در عمق‌های زیاد نصب می‌شود که می‌تواند عامل خرابی‌های دیگر شود. افزایش وزن سبب افزایش نیروهای وارده بر رایزر و سکو

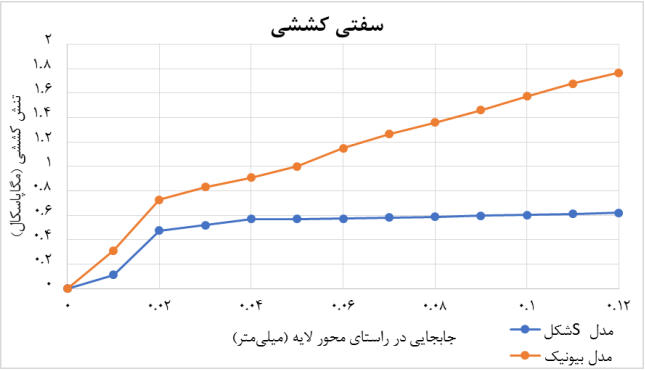
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

و همچنین افزایش فشار خارجی (به علت افزایش کشش در زره کششی که حاصل از افزایش وزن است) می‌شود. این نسبت‌ها در جدول ۲ محاسبه شده است. در این جدول فشارهای بحرانی محاسبه شده در بخش قبلی، به همراه وزن لایه‌ای که مدل سازی شده ارائه شده است. با توجه به استفاده رایزر در مسافت طولانی لازم است فاکتور جرم بر واحد طول هر دو مدل بررسی شود. نهایتا برای بی اثر کردن حجم مدل و وزن مشتق شده از آن، نسبت فشار بر جرم واحد ارائه شد که با توجه به بی بعد شدن نسبت به فاکتورهای تاثیرگذار بر استحکام لایه، شاخص مناسبی جهت بررسی بازدهی لایه کارکس در شرایط واقعی است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مدل بیونیک علاوه بر ظرفیت مطلق در تحمل فشار خارجی، ظرفیت کمانش بر واحد جرم بیشتری نیز در مقایسه با مدل اولیه دارد.

جدول ۲ بررسی فاکتورهای تاثیرگذار بر انتخاب مدل جایگزین

عنوان	مدل بیونیک	مدل اولیه
فشار بحرانی (مگاپاسکال)	۵۰	۳۲/۱۲
جرم (کیلوگرم)	۳۷۲	۲۷۵
طول (متر)	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵
جرم بر واحد طول (کیلوگرم بر متر)	۳/۶۳۳	۲/۶۷۸
فشار بر جرم بر واحد طول (مگاپاسکال بر کیلوگرم بر متر $(\frac{MPa}{Kg/m^3})$	۱۳/۷۶	۱۱/۹۵۴

به منظور بررسی انعطاف پذیری سازه به بررسی سفتی کششی در دو مدل پرداخته شد که در شکل ۱۹ نتایج تغییر شکل کششی نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است مدل جدید ارائه شده در تنش یکسان، کرنش کمتر از مدل اولیه دارد. از نگاه دیگر نیز در کرنش یکسان، تنش بیشتری نیاز دارد. اما این نکته به معنی ضعف مدل نیست چرا که هر دو مدل کشیدگی طولی یکسانی دارند و انسجام مدل جدید تا کشیدگی متناسب به مدل اول نیز حفظ شده و سازه متلاشی نمی شود. یعنی مکانیزم اتصال طراحی شده الهام گرفته از ساختار اسکلت خارجی سوسک به درستی عمل کرده و وظیفه خود را انجام داده است.



شکل ۱۹ نمودار جابجایی محوری به ازای نیروی کششی

لازم به ذکر است آیین نامه API-17J برای رایزرهای انعطاف پذیر ناپیوندی ارائه شده است. معیار طراحی رایزرها در این آیین نامه در بند ۶ آن ذکر شده است که مطابق آن حداکثر تنش قابل قبول برای لایه کارکس معادل ۰/۸۵ تنش کمانش آن است. با توجه به تحلیل کمانش انجام شده در این پژوهش و محاسبه فشار بحرانی ۵۰ مگاپاسکال در مدل جدید، یعنی فشار معادل طراحی برای این لایه ۴۲/۵ مگاپاسکال می‌باشد. لازم به ذکر است که عامل این فشار صرفا فشار هیدرواستاتیک محیط خارجی نیست و عواملی مانند خمش، از بین رفتن نگهدارنده‌های رایزر، کشش و... نیز منجر به اعمال فشار به لایه کارکس از طرف لایه‌های بیرونی رایزر است. همچنین در این آیین نامه برای مودهای خرابی دیگر وارد بر کارکس (خستگی، ساییدگی و خوردگی، نیروی ناشی از انبساط دمایی و ترک موجود در حلقه‌های کارکس) نیز معیار طراحی بیان شده است. تحقیقات مناسبی در مودهای خرابی دیگر این رایزرها انجام شده است، برای مثال آقایان لی و همکاران در محاسبه تاثیر انحنا بر فروپاشی رایزرهای انعطاف پذیر پژوهشی انجام داده اند که می‌توان از آنها به عنوان الگو برای پژوهش‌های آتی استفاده کرد [۲۴]. همچنین در این آیین نامه برای مودهای خرابی دیگر وارد بر کارکس (خستگی، ساییدگی و خوردگی، نیروی ناشی از انبساط دمایی و ترک موجود در حلقه‌های کارکس) نیز معیار طراحی بیان شده است که می‌توان در پژوهش‌های دیگر آنها را مورد بررسی قرار داد. بدین منظور می‌توان با الگوگیری از پژوهش‌های انجام شده در محاسبه این مودهای خرابی در رایزر مانند تحقیق آقایان مقیسه و رهی (تحلیل اثر عامل خورنده بر رشد ترک خستگی در رایزرهای عمیق) استفاده نمود[۲۵]. فلذا این تحقیق با توجه به آیین نامه API و هدف آن که ارائه ایده جدید در لایه کارکس به جهت افزایش مقاومت آن است دارای جایگاه مناسبی می‌باشد و می‌توان از آن برای گسترش علم در رایزرهای دریایی انعطاف‌پذیر استفاده نمود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، کمانش غیر خطی فروپاشی سازه کارکس در رایزرهای منعطف تحت فشار خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. با تعیین رفتار غیر خطی کارکس در کمانش محیطی، طرح جدیدی با الهام از ساختار اسکلت خارجی یک نوع سوسک که در برابر فشار بیرونی مقاومت زیادی دارد برای کارکس ارائه شده است. با بررسی کمانش غیر خطی سازه جدید مشخص شده است که این سازه در برابر فشار خارجی مقاومت بسیار بالاتری نسبت به مدل اولیه دارد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، مدل جدید نسبت به مدل اصلی فشار بیشتری را تحمل می‌کند. هم‌چنین این مدل در مقابله با جریانات گردابه‌ای نیز مناسب‌تر عمل می‌کند و سبب کاهش ارتعاشات و افزایش سرعت انتقال سیال می‌شود. مدل بیونیک، وزن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

بر واحد طول بیشتری نسبت به مدل اصلی دارد که این موضوع به‌تنهایی شاید سبب افزایش وزن سازه، افزایش نیروی وارد بر سکو و زره فشاری و افزایش هزینه استفاده از این مدل شود اما نسبت به تحمل فشار خارجی بسیار بیشتر از مدل اصلی رایزر این مسئله قابل چشم‌پوشی است. معیار مناسب‌تر جهت بررسی کارایی استفاده از این مدل نسبت فشار بر جرم واحد بر طول است که مقدار آن بیشتر از مدل اصلی لایه کارکس است. انعطاف پذیری دو سازه نیز در حالت کششی مورد بررسی قرار گرفت که مطابق نتایج بدست آمده مدل بیونیک در تحمل نیروی کششی عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان مدل بیونیک را از لحاظ تحمل فشار خارجی گزینه مناسبی جهت جایگزینی با مدل اصلی کارکس دانست.

۶ - مراجع

1- Lee J. (2009) *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*.
2- Bai Y, Bai Q. (2018) *Subsea engineering handbook*. 2nd ed. Brian Romer; https://doi.org/10.1016/C2016-0-03767-1.
3- Rahi A, Moghiseh A. (2013) *Marine risers and subsurface robots. Mechanical Engineering* 2013;21:65–71. (In Persian)
4- Pinto CA, Gomes M. (2017) *Finite Element Analysis of Flexible Pipes: Bending Combined With Tensile Load*. COPPE/UFRJ,
5- 1998, *API RP 17B Recommended practice for flexible pipe*. API Recommended Practice. 1998:141
6- Anders Simonsen. (2014) *Inspection and monitoring techniques for un-bonded flexible risers and pipelines*. university of stavanger,
7- Drumond GP, Pasqualino IP, Pinheiro BC, Estefen SF. (2018) *Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review*. Ocean Engineering 2018;148:412–25. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.035.
8- Clevelario JA, Pires F, Falcao G, Tan Z, Lu J, Sheldrake TH. (2010) *Special Session: Advances in Flexible Riser Technology: Flexible Pipe Curved Collapse Behavior Assessment for Ultra Deep Water Developments for the Brazilian Pre-salt Area*. All Days, vol. 20636, OTC;, p. 1401–11. https://doi.org/10.4043/20636-MS.
9- Hanh.Ha. (2016) *An Overview of Advances in Flexible Riser and Flowline Technology*. 2H Offshore (Technical Paper) 2016;4.
10- Shen Y, Jukes P. (2015) *Technical Challenges of Unbonded Flexible Risers in HPHT and Deepwater Operations*. The Twenty-Fifth International Ocean and Polar Engineering Conference 2015:ISOPE-I-15-554.
11- Rosas MAP, Souza APF, Rodrigues M V, da Silva DML. (2014) *Hydrostatic Collapse Pressure and Radial Collapse Force Comparisons for Ultra-Deepwater Pipelines*. Volume 6B: Pipeline and Riser Technology, vol. 45479, American Society of Mechanical Engineers;, p. V06BT04A008. https://doi.org/10.1115/OMAE2014-24081.
12- Li X, Jiang X, Hopman H. (2022) *Curvature effect on wet collapse behaviours of flexible risers subjected to hydro-static pressure*. Ships and Offshore Structures 2022;17:619–31. https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1861705.
13- Li X, Jiang X, Hopman H. (2020) *Predicting the wet collapse pressure for flexible risers with initial ovalization and gap: An analytical solution*. Marine Structures 2020;71:102732. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102732.
14- Ren S, Liu W, Song Y, Geng H, Wu F. (2019) *Crushing study for interlocked armor layers of unbonded flexible risers with a modified equivalent stiffness method*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2019;11:521–9. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.09.006.
15- Chen, Y., Jiang, Z., & Liu, H. (2022, June). *Collapse failure analysis of flexible pipe carcass layers with erosion defects*. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference (pp. ISOPE-I). ISOPE. n.d.
16- Garebaghi, M., Abedi, K., (2007) TalebPour, R., *Finite element modeling of fault emission in marine pipelines*. Journal of marine engineering. (In Persian)
17- Abedi, K., Gharebaghi, M., Khiabani, D., (2013), *Investigating the effects of buckling arresters in preventing the dynamic propagation of buckling in marine pipelines*. Journal of marine engineering. (In Persian)
18- Ziaeifar, M. Ghodsi, M., (2017) *Finite element analysis of offshore pipeline with reinforced concrete cover under the effect of lateral tension force by considering non-linear parameters*. Journal of marine engineering. (In Persian)
19- Cuamatzi Meléndez R, Dionicio-Bravo S, Ruiz-Mendoza A, Juárez-López F. (2022) *Finite Element Modelling and Theoretical Analysis of Flexible Risers Subjected to Installation/Crushing Loads*. Crushing Loads.
20- Cuamatzi-Melendez R, Castillo-Hernández O, Vázquez-Hernández AO, Vaz MA. (2017) *Finite element and theoretical analyses of bisymmetric collapses in flexible risers for deepwaters developments*. Ocean Engineering 2017;140:195–208. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.032.
21- Souza APF de, Segen Farid Estefen. *Colapso de dutos flexíveis sob pressão externa*. COPPE-UFRJ, 2002.
22- Rivera J, Hosseini MS, Restrepo D, Murata S, Vasile D, Parkinson DY, et al. (2020) *Toughening*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]

mechanisms of the elytra of the diabolical ironclad beetle. Nature 2020;586:543–8. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2813-8.

23- Li X, Jiang X, Hopman H. (2021) *Development of an analytical model for predicting the wet collapse pressure of curved flexible risers*. Ocean Engineering 2021;232. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109132.

24- Rahi A, Moghiseh A., (2014). *Effect of presence of corrosive agent on fatigue crack growth in deep water risers*. Journal of marine engineering. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.6.6]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.74]