



Buckling and Post-Buckling Analysis of Composite Pipe Reinforced with Shape Memory Alloy under Internal Pressure

Alireza Pourmoayed ^{*1} , Mohammadali Ranjbar ² , Seyyed Morteza Seyyednejad ³

1. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Khatamul-Anbiya Air Defense University, Tehran, Iran

1. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Khatamul-Anbiya Air Defense University, Tehran, Iran

1. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

This study investigates the buckling and post-buckling behavior of composite pipes under internal pressure, with a focus on the effect of embedding NiTi wires with shape memory alloy (SMA) effect on improving mechanical capacity and controlling post-buckling. The pipes were made of carbon/epoxy composite (T300/5208) and fabricated using a filament winding process with a [-55/55] layup. Shape memory wires under 5% prestrain were embedded in multiple layers to provide compressive force against residual tensile stresses caused by curing and to enhance the mechanical performance of the tubes. Three models were analyzed using Abaqus software: a pipe without SMA and internal pressure, a pressurized pipe without SMA, and a pressurized SMA-reinforced pipe. Buckling analysis using a linear perturbation solver and examining the first five buckling modes was performed; then, post-buckling analysis using a general nonlinear static solver and applying initial deflection according to mode I was performed. The results showed that the presence of the memory wire increased the critical buckling force by less than 1% and increased the internal pressure capacity of the pipes by 20%, without negatively changing the post-buckling behavior under internal pressure. These findings indicate that the use of shape memory alloys can be an effective and practical solution for improving the mechanical performance and increasing the pressure capacity of composite pipes, especially in industrial applications and advanced structures.

Keywords

Composite pipes
Buckling behavior
Post-buckling behavior
Shape memory alloy (SMA)
Internal pressure

Received: 01.09.2025

Revised: 16.10.2025

Accepted: 03.11.2025

*Corresponding Author

Alireza Pourmoayed

Email

A.Pourmoaved@khadu.ac.ir

1- Introduction

The increasing demand for carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) materials in aerospace, automotive, and oil and gas industries highlights the necessity of reliable and cost-effective design and simulation approaches. In the design of composite pressure vessels and pipes, achieving minimal thickness while maintaining maximum internal pressure capacity remains a key challenge, as weight reduction directly influences production, transportation, and installation efficiency.

Numerous analytical and numerical studies have investigated the buckling and post-buckling behavior of multilayer composite cylinders under complex loading conditions, including internal and external pressure, axial forces, and thermal effects. Previous research has shown that fiber orientation, laminate sequence, and manufacturing imperfections significantly affect buckling resistance and post-buckling stability. However, traditional composite structures often suffer from

How to Cite this Article:

[1] A. Pourmoayed, M. Ranjbar, and S. M. Seyyednejad, "Buckling and post-buckling analysis of composite pipe reinforced with shape memory alloy under internal pressure," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 205–218, 2026.

[Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.544309.1165> (in Persian)



residual tensile stresses generated during curing, which can compromise their load-bearing capacity.

Embedding pre-strained shape memory alloy (SMA) wires into composite laminates offers a promising method to actively counteract these residual stresses and improve mechanical performance. The present study numerically investigates the influence of NiTi SMA reinforcement on the buckling and post-buckling behavior of composite pipes under internal pressure using Abaqus finite element simulations. The results provide insight into the potential of SMA integration for enhancing structural stability and pressure-bearing capacity in advanced composite applications.

2- Modeling and Solution Method

In this section, the governing theory describing the mechanical behavior of composite pipes and shape memory alloys (SMAs) is first presented. Subsequently, the numerical modeling approach developed to analyze the behavior of SMA-reinforced composite pipes is described in detail.

2.1 Mechanical Properties of T300/5208

To analyze the mechanical response of thick-walled composite pipes under internal pressure, the analytical method proposed by Bohafas [1] was employed. In this approach, the radial and hoop stresses in each layer are determined by satisfying the interlaminar boundary conditions between adjacent layers. The mechanical properties of the T300/5208 carbon/epoxy composite used in the present study are summarized in Table 1.

Table 1: Mechanical Properties of T300/5208[1]

Elastic modulus (GPa)				Poisson's ratio			Strength (MPa)	
E1	E2	E3	G12	ν_{12}	ν_{13}	ν_{32}	Y	Y''
181	10.3	10.3	7.17	0.28	0.28	0.59	40	246

2.2 Behavior of Shape Memory Alloys

Shape memory alloys (SMAs), in addition to conventional mechanical and thermal properties such as Young's modulus, Poisson's ratio,

coefficient of thermal expansion, and specific heat capacity, exhibit unique characteristics associated with the martensite and austenite phases. The thermomechanical properties of NiTi are summarized in Table 2.

A finite element model of the composite pipes and shape memory alloy (SMA) wires was developed in Abaqus. The main steps are as follows:

Geometry and material definition: The pipes were created, and the T300/5208 properties were assigned according to Table 1. SMA wires were modeled using a user-defined UMAT subroutine [3], based on the NiTi properties listed in Table 2.

Table 2: Mechanical and thermomechanical properties of NiTiNOL [2]

Parameter	Denoted by	Magnitude
Elastic Stiffness of the martensite	E_m	19.14 GPa
Elastic Stiffness of the Austenite	E_A	37.43 GPa
Poisson's ratio (equal for both phases)	ν_f	0.33
Coefficient of thermal expansion for the martensite	C_m	$29 \text{ MPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
Coefficient of thermal expansion for the austenite	C_A	$21.74 \text{ MPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
Martensitic finish temperature	M_f	$18 \text{ } ^\circ\text{C}$
Martensitic start temperature	M_s	$33 \text{ } ^\circ\text{C}$
Austenitic start temperature	A_s	$45 \text{ } ^\circ\text{C}$
Austenitic finish temperature	A_f	$75 \text{ } ^\circ\text{C}$

SMA placement: The wires were embedded helically within the composite layers with a diameter of 60 mm and a pitch of 5 mm. A pre-strain of 5% was applied to the wires, and the components were assumed to be stress-free at the furnace temperature.

A linear perturbation solver was employed to perform the buckling analysis and determine the critical loads for the first five modes. Boundary

conditions were applied with one end fully fixed and the opposite end constrained only in the axial direction. Figure 1 illustrates the displacement contour perpendicular to the pipe axis under Mode I buckling. In this figure, the pressurized pipe, subjected to an initial imperfection based on the first buckling mode and axial loading, exhibits post-buckling behavior. The pipe under internal pressure was analyzed with simple support conditions (one end fully fixed, the other end free in the axial direction) while subjected to axial load.

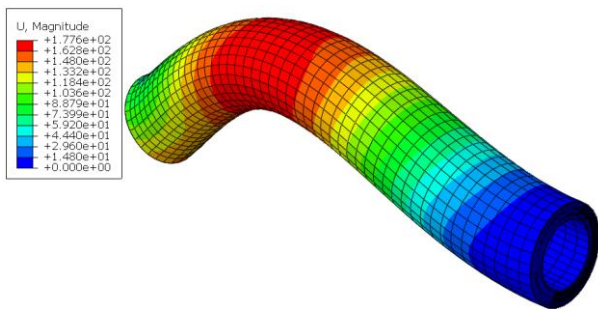


Figure 1: Displacement contour of the pressurized pipe under post-buckling conditions

The primary objective of the modeling was to investigate the effect of embedded shape memory alloy (SMA) wires and their pre-strain levels on the pressure capacity and reduction of twisting in composite pipes. Upon activation of the SMA wires after curing and cooling, the shape memory recovery force helps to alleviate residual stresses and improve the buckling behavior.

3- Results

To investigate the effect of the shape memory alloy (SMA) on the internal pressure capacity of the composite pipe, the wire winding diameter was considered as a variable in the first stage. Helical SMA wires were embedded within the composite layers with diameters of 55, 60, 65, and 70 mm.

Table 3: Critical buckling loads of the first five modes for the pipe without shape memory alloy and without internal pressure

Mode	Buckling Load (N)
1	3495408.75
2	3495408.75
3	8309028.75
4	8309028.75
5	12579625

Table 4: Critical buckling loads of the first five modes for the pipe without shape memory alloy under internal pressure

Mode	Buckling Load (N)
1	3412296.88
2	3412296.88
3	8233080
4	8233080
5	12510937.5

Table 5: Critical buckling loads of the first five modes for the SMA-reinforced pipe under internal pressure

Mode	Buckling Load (N)
1	3440851.25
2	3440851.25
3	8288913.13
4	8288913.13
5	12581587.5

The results of Table 3, corresponding to the baseline composite pipe without SMA and internal pressure, were used as a reference. Comparison with Table 4 shows that applying 10 MPa internal pressure slightly reduces the critical buckling loads for the first five modes. Table 5 presents the SMA-reinforced pipe with 70 mm winding diameter and 10 mm pitch under the same pressure, showing a minor increase in critical loads and improved buckling behavior. Post-buckling analysis of the three pipe configurations was conducted using initial imperfections from Mode I and a nonlinear static solver. Figure 2 illustrates that SMA wires reduce twisting, enhance post-buckling stability, and increase load-bearing capacity under internal pressure. These findings confirm that SMA reinforcement improves the mechanical performance of composite pipes without negatively affecting critical buckling loads. Future studies may explore axial SMA placement to further enhance axial buckling and post-buckling response.

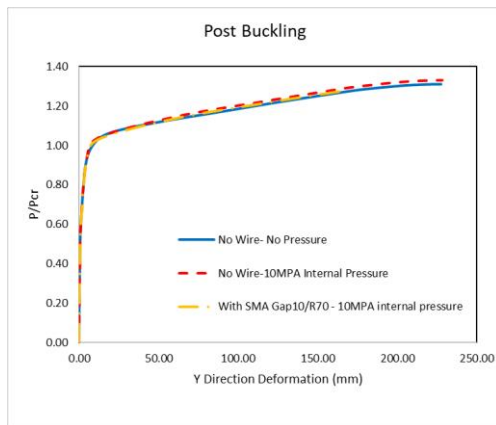


Figure 2: Comparison of post-buckling results for the three pipe specimens under FEM analysis

As observed in Figure 2, the presence of shape memory alloy (SMA) wires causes a minor change of less than 1% in post-buckling behavior, and the examined models behave nearly identically. Therefore, it can be concluded that SMA reinforcement successfully enhances the internal pressure capacity of the pipes without adversely affecting post-buckling performance. This demonstrates the practical and safe applicability of SMA wires for improving the mechanical performance of composite pipes under internal loading.

4- Conclusion

The influence of shape memory alloy (SMA) wires on carbon/epoxy composite pipes under internal pressure was investigated using a validated 3D finite element model. SMA wires, embedded as secondary reinforcement between layers, were studied with varying diameters and winding pitches. Results showed that SMA inclusion slightly increased the critical buckling load (<1%) and

improved post-buckling behavior. Post-buckling analysis with initial imperfections indicated no adverse effect on axial response. Comparison of pipes without SMA, with pressure, and SMA-reinforced under pressure revealed minor enhancements in buckling and post-buckling performance. Wire geometry directly influenced stability, with 70 mm diameter and 5 mm pitch yielding the highest improvement (~1%). The study demonstrates that SMA reinforcement can effectively enhance internal pressure capacity without negatively affecting structural stability, providing a reliable tool for the design and optimization of composite pressure vessels.

5- References

- [1] M. Bouhafs, Z. Sereir, and A. Chateaneuf, "Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 95, pp. 7–15, 2012, doi: [10.1016/j.ijpvp.2012.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.001).
- [2] H. Fathi, M. M. Shokrieh, and A. Saeedi, "A theoretical and experimental investigation on the stress distribution in the interface of pre-strained SMA wire/polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 175, p. 107100, 2019, doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107100](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107100).
- [3] D. Lagoudas, Z. Bo, M. Qidwai, and P. Entchev, "SMA UM: User material subroutine for thermomechanical constitutive model of shape memory alloys," Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/239541732>.



تحلیل کمانش و پس کمانش لوله کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه دار تحت فشار داخلی

علیرضا پورموید^{۱*} ID، محمدعلی رنجبر^۲ ID، سیدمرتضی سیدنژاد^۳ ID

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا (ص)، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا (ص)، تهران، ایران
۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

لوله‌های کامپوزیتی
رفتار کمانش
رفتار پس کمانش
آلیاژ حافظه دار
فشار داخلی

این پژوهش به بررسی رفتار کمانش و پس کمانش لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار داخلی، با تمرکز بر تأثیر حضور سیم‌های نایتینول با اثر حافظه‌شکلی در بهبود ظرفیت مکانیکی و کنترل پس کمانش می‌پردازد. لوله‌ها از جنس کامپوزیت کربن-اپوکسی T300/5208 ساخته شده و به روش الیاف پیچی با لایه چینی [۵۵/-۵۵] تولید شدند. سیم‌های حافظه دار تحت پیش کرنش ۵٪ در چند لایه جاسازی شدند تا نیروی فشاری در برابر تنش‌های پسماند کششی ناشی از یخت ایجاد کنند و عملکرد مکانیکی لوله‌ها را تقویت نمایند. سه نمونه شامل لوله بدون سیم حافظه دار و بدون فشار داخلی، لوله بدون سیم حافظه دار تحت فشار داخلی و لوله تقویت شده با سیم حافظه دار تحت فشار داخلی در نرم افزار آباکوس تحلیل شدند. تحلیل کمانش با استفاده از حل گر اغتشاش خطی، کمانش و بررسی پنج مود اول انجام شد؛ تحلیل پس کمانش با حل گر استاتیکی عمومی غیرخطی و اعمال انحراف اولیه مطابق مود I صورت گرفت. نتایج نشان داد که حضور سیم حافظه دار موجب افزایش کمتر از ۱٪ نیروی بحرانی کمانش و افزایش ۲۰٪ ظرفیت فشار داخلی لوله‌ها می‌شود، بدون آن که رفتار پس کمانش تحت فشار داخلی تغییر منفی پیدا کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از آلیاژ حافظه دار می‌تواند یک راهکار مؤثر و عملی برای بهبود عملکرد مکانیکی و افزایش ظرفیت فشار لوله‌های کامپوزیتی، به ویژه در کاربردهای صنعتی و سازه‌های پیشرفته باشد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

* نویسنده مسئول

علیرضا پورموید

A.Pourmoayed@khadu.ac.ir

۱- مقدمه

تحلیل رفتار کمانش و پس کمانش در مخازن جدار نازک و لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های پیچیده، شامل فشار داخلی، فشار خارجی و بار محوری، همواره یکی از موضوعات کلیدی در طراحی سازه‌های مهندسی بوده است.

ژیا و همکاران [۴] یک مدل تحلیلی برای تعیین تنش‌ها و کرنش‌ها در لوله‌های چندلایه تحت فشار داخلی ارائه کردند که در آن، ناهمسانگردی هر لایه در نظر گرفته شده است. در ادامه، آن‌ها [۵] روشی تحلیلی برای ارزیابی تنش‌های حرارتی در لوله‌های ساندویچی خیم تحت ترکیب بارگذاری فشار داخلی و حرارتی- مکانیکی توسعه

افزایش روزافزون تقاضا برای پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن به عنوان مواد ساختاری در صنایع هوافضا، خودرو و نفت و گاز، نیاز به روش‌های طراحی و شبیه‌سازی معتبر، قابل اعتماد و اقتصادی را بیش از پیش برجسته کرده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تولید لوله‌ها و مخازن کامپوزیتی، دستیابی به حداقل ضخامت همراه با حداکثر ظرفیت فشار داخلی است، زیرا کاهش وزن سازه نه تنها هزینه‌های حمل و نصب را کاهش می‌دهد، بلکه زمان و هزینه لازم برای تولید تجهیزات را نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۱-۳].

How to Cite this Article:

[1] A. Pourmoayed, M. Ranjbar, and S. M. Seyednejad, "Buckling and post-buckling analysis of composite pipe reinforced with shape memory alloy under internal pressure," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 205-218, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.544309.1165> (in Persian)



دادند. همچنین آن‌ها [۶] یک راه‌حل دقیق برای لوله‌های چندلایه‌ی کامپوزیتی آسیب‌دیده تحت خمش خالص ارائه کردند. رزنو^۱ [۷] با بهره‌گیری از نظریه‌ی استوانه‌های کامپوزیتی چندلایه، تنش‌ها و کرنش‌های لوله‌ها را در زوایای الیاف بین ۱۵ تا ۸۵ درجه پیش‌بینی کرده و نتایج را با آزمایش‌ها مقایسه نمود. در لایه‌های نازک چندلایه، زاویه‌ی پیچش ۵۵ درجه به‌عنوان نسبت بهینه‌ی تنش محیطی به محوری معرفی شد، اما در حالت فشار داخلی بدون بارگذاری محوری، زاویه‌ی بهینه باید در حدود ۷۵ درجه باشد. وایلد^۲ و ویکرز^۳ [۸] روشی تحلیلی مبتنی بر نظریه‌ی استوانه‌های چندلایه‌ی ارتوتروپ ارائه کردند و هر دو حالت تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای در استوانه‌های چندلایه را مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که زاویه‌ی بهینه‌ی الیاف نقش مهمی در طراحی پوسته‌های استوانه‌ای چندلایه ایفا می‌کند. بارهای ناشی از فشار داخلی، نیروی محوری، نیروی پیچشی، به‌علاوه تغییرات دما و رطوبت در طول لوله، به‌عنوان شرایط بارگذاری در نظر گرفته شده‌اند. کریکانوف^۴ [۹] یک روش نوین برای طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی چندلایه تحت قیود کرنش و استحکام پیشنهاد کرد. در این روش، تحلیل گرافیکی به‌منظور یافتن ضخامت بهینه‌ی لایه‌ها در راستای زاویه‌های مختلف الیاف مورد استفاده قرار گرفت. بلکات^۵ [۱۰]، در پژوهشی مروری، گنبدها و پوسته‌های استوانه‌ای فلزی و کامپوزیتی تحت فشار داخلی و خارجی را بررسی کرد. اثر پارامترهایی نظیر نقص‌های هندسی، ضخامت غیریکنواخت، حساسیت نسبت به ناهمگونی‌ها و شرایط مرزی، در کاهش مقاومت کمانشی این سازه‌ها برجسته گردید. همچنین پدیده‌هایی نظیر شکست ناگهانی^۶، کمانش پلاستیک و فشار شیک‌داون نیز در مخازن تحت فشار داخلی مورد توجه قرار گرفتند. همچنین وی [۱۰] با تمرکز بر استوانه‌های کامپوزیتی لایه‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی و استفاده از نرم‌افزار آباکوس، تحلیل‌های خطی و غیرخطی انجام داد و نتایج عددی را با داده‌های تجربی مقایسه کرد. اختلاف ۱۸ درصدی بین تحلیل عددی و آزمون تجربی، بر اهمیت اعتبارسنجی مدل‌های عددی تأکید داشت. هان و همکاران، نرم‌افزار ایکاسوین^۷ برای تحلیل رفتار شکست

تدریجی و پس‌کمانش در لوله‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار دادند. با استفاده از مدل باربرداری کامل پس از شکست و فرمول‌بندی لاگرانژی به‌روز شده، پیش‌بینی دقیقی از الگوهای کمانش حاصل شد. مقایسه با نتایج تجربی نشان داد که اختلاف موج‌های محیطی بین تحلیل و آزمون می‌تواند ناشی از ساده‌سازی در مدل‌سازی باشد. هور^۸ و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای تجربی با بررسی ۴۴ نمونه لوله کامپوزیتی ساخته‌شده از الیاف کربن^۹ و شیشه، رفتار کمانشی تحت فشار خارجی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شکست‌ها عمدتاً در نواحی تغییر ناگهانی لایه‌چینی ناشی از فرآیند ساخت رخ می‌دهد. همچنین، مشخص شد که روش‌های کلاسیک مانند فرمول فون مایسز در برخی موارد عملکرد بهتری از روش اجزای محدود در پیش‌بینی فشار کمانش دارند، به‌ویژه زمانی که خواص مواد بر پایه آزمایش تعیین شده باشند. کین^{۱۱} و همکاران [۱۴] روی رفتار پس‌کمانش لوله‌های نازک چندلایه کامپوزیتی در شرایط چرخان و جریان سیال برسی کردند و با ارائه مدل تحلیلی- عددی، شکل و گسترش موج‌های پس‌کمانش را پیش‌بینی نمودند. این مطالعه نشان داد که شرایط کاربردی مانند دوران و انتقال سیال می‌تواند الگوی پس‌کمانش را تغییر داده و حساسیت به اغتشاشات را افزایش دهد. دینگ^{۱۱} و همکاران [۱۵] با انجام یک مطالعه مقایسه‌ای پارامتریک روی لوله‌های ترموپلاستیک تقویت‌شده با زوایای پیچش مختلف نشان دادند که زاویه پیچش بین ۵۰ تا ۷۰ درجه تأثیر قابل‌توجهی بر فشار اولین آسیب لایه‌ها و رفتار پس‌کمانش دارد. این نتایج با انتخاب چیدمان [۵۵- تا +۵۵] در پژوهش حاضر هم‌راستا بوده و مبنای مناسبی برای طراحی لایه‌ها فراهم می‌کند. یلدرم^{۱۲} [۱۶] تحلیل تجربی و عددی پس‌کمانش لوله‌های کامپوزیتی شیشه/کربن را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که نقص‌های ساخت و تغییرات محلی در لایه‌چینی اساساً الگو و مکان شروع پس‌کمانش را کنترل می‌کنند. این یافته‌ها بر ضرورت اعتبارسنجی عددی با داده‌های تجربی تأکید می‌کند. لال^{۱۳} و مارکاد^{۱۴} [۱۷] اثر لایه‌های SMA^{۱۵} روی کمانش صفحات کامپوزیتی را بررسی کردند و نشان دادند که پیش‌کرنش و

⁹ CFRP

¹⁰ Y. Qin

¹¹ X. Ding

¹² Yildirim

¹³ A Lal

¹⁴ K Markad

¹⁵ Shape Memory Alloy (SMA)

¹ Rosenow

² Wild

³ Vickers

⁴ Krikanov

⁵ Blachut

⁶ snap-through

⁷ ACOSwin

⁸ Hur

نیروی فشاری در لایه‌ها و کاهش اثر تنش‌های باقیمانده ناشی از پخت، رویکردی نوین و عملی برای تقویت ظرفیت مکانیکی و کنترل رفتار پس‌کمانش محسوب می‌شود. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر حضور آلیاژ حافظه‌دار بر رفتار کمانش و پس‌کمانش لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار داخلی می‌پردازد و تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است تا اثرات حضور آلیاژ حافظه‌دار بر نیروی بحرانی کمانش، الگوهای پس‌کمانش و ظرفیت فشار داخلی به‌طور دقیق مشخص شود. این مطالعه می‌تواند راهنمایی علمی برای طراحی لوله‌های کامپوزیتی مقاوم و بهینه در کاربردهای صنعتی و سازه‌های پیشرفته ارائه دهد.

۲- مدل‌سازی و روش حل مسئله

در این بخش، ابتدا تئوری حاکم بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی و آلیاژهای حافظه‌دار ارائه شده و سپس روش مدل‌سازی عددی برای بررسی رفتار لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با سیم‌های حافظه‌دار شرح داده می‌شود.

۲-۱- خواص مکانیکی T300/5208

برای تحلیل پاسخ مکانیکی لوله‌های ضخیم کامپوزیتی تحت فشار داخلی، از روش تحلیلی ارائه شده توسط بوهافس^۸ [۲۳] استفاده شده است. در این روش، تنش‌های شعاعی و محیطی در هر لایه با رعایت شرایط مرزی بین لایه‌های مجاور تعیین می‌شوند. خواص مکانیکی لوله کربن/اپوکسی T300/5208 در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خواص مکانیکی [23] T300/5208

مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)				ضریب پواسون			استحکام (مگا پاسکال)	
E1	E2	E3	G12	ν_{12}	ν_{13}	ν_{32}	Y	Y ^u
۱۸۱	۱۰/۳	۱۰/۳	۷/۱۷	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۵۹	۴۰	۲۴۶

۲-۲- رفتار آلیاژهای حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار علاوه بر خواص مکانیکی و حرارتی معمول شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، ضریب انبساط طولی و ظرفیت گرمایی، دارای خواص ویژه ناشی از فازهای مارتنزیت و آستنیت هستند. خواص مکانیکی/دمایی نایتینول در جدول ۲ ارائه شده است.

قرارگیری سیم/لایه‌های SMA نقش اساسی در افزایش بار بحرانی کمانش ایفا می‌کنند. این نتایج مبنای منطقی برای اعمال SMA در لوله‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر است. زوو^۱ [۱۸] رفتار کمانشی استوانه‌های کامپوزیتی با الیاف مارپیچی را تحت فشار یکنواخت خارجی تحلیل نمود. وی با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی و عددی نشان داد که افزایش زاویه مارپیچ باعث توزیع مجدد تنش‌ها و تأخیر در آغاز کمانش می‌شود. نتایج این تحقیق مبنای مهمی برای طراحی بهینه لایه‌چینی در لوله‌های تحت فشار فراهم می‌کند. توماس^۲ [۱۹] و همکاران به بررسی نقش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کامپوزیت‌های پیشرفته پرداختند و نشان دادند که افزودن سیم‌ها یا ذرات NiTi می‌تواند خاصیت خود ترمیمی و کنترل فعال تغییر شکل را به سازه اضافه کند. آن‌ها تأکید کردند که رفتار حرارتی و فازی SMA در تعامل با ماتریس پلیمری نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری مکانیکی و ظرفیت تحمل تنش دارد. روزیلو^۳ [۲۰] و همکاران تحلیل کمانش سازه‌های کامپوزیتی دیواره نازک با مقطع مستطیلی را تحت بار فشاری انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات ناهمسانگردی مواد و نسبت ابعادی بر مسیر کمانش و سختی پس‌کمانش بسیار قابل توجه است. یافته‌های این مطالعه در درک بهتر پایداری سازه‌های کامپوزیتی سبک‌وزن نقش دارد. اصغری^۴ [۲۱] و همکاران پاسخ‌های خمشی، ارتعاشی و کمانشی تیرهای ساندویچی را با در نظر گرفتن ذرات SMA و خواص وابسته به دما بررسی کردند. بر اساس نتایج عددی، حضور مواد حافظه‌دار شکلی منجر به افزایش قابل توجه سختی مؤثر و تأخیر در آغاز کمانش می‌گردد. این نتایج بر اهمیت استفاده از SMA در بهبود پایداری سازه‌های کامپوزیتی تأکید دارد. لی^۵ [۲۲] در یک مطالعه تجربی به تحلیل کمانش استوانه‌های کامپوزیتی پرداخت و نشان داد که تغییر شکل تحت بار محوری می‌تواند به سه مرحله تقسیم شود: فشردگی یکنواخت، شکل‌گیری مود کمانش اولیه و سپس کمانش کامل. نتایج این تحقیق بر اهمیت مرحله واسط (مود شکل‌گیری) در پیش‌بینی دقیق بار بحرانی و مسیر تغییر شکل تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت دیواره، هندسه اولیه و توزیع لایه‌ها در هر مرحله متفاوت است.

با توجه به چالش‌های ذکر شده، استفاده از سیم‌های حافظه‌دار^۶ با اثر حافظه‌شکلی^۷ در لوله‌های کامپوزیتی به‌عنوان روشی برای اعمال

⁵ Li

⁶ NiTiInol

⁷ Shape Memory Effect

⁸ Bouhafs

¹ Zuo

² Thomas

³ Rozylo

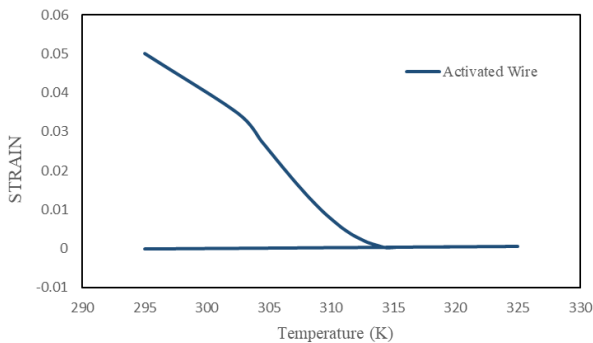
⁴ Asgari

جدول ۲: خواص مکانیکی نایتینول [۲۴]

مؤلفه	علامت اختصاری	مقدار
مدول الاستیسیته مارتنزیت	E_m	۱۹/۱۴ GPa
مدول الاستیسیته آستنیت	E_A	۳۷/۴۳ GPa
ضریب پواسون (مشترک برای هر دو فاز)	ν_f	۰/۳۳
ضریب انبساط حرارتی مارتنزیت	C_m	۲۹ MPa °C ⁻¹
ضریب انبساط حرارتی آستنیت	C_A	۲۱ MPa °C ⁻¹ /۷۴
دمای پایان مارتنزیت	M_f	۱۸°C
دمای شروع مارتنزیت	M_s	۳۳°C
دمای شروع آستنیت	A_s	۴۵°C
دمای پایان آستنیت	A_f	۷۵°C

$$\sigma_{rec} = \frac{Y(\xi)S_{res}}{2} \left\{ 1 - \cos \left[a_A(T - A_s) - \frac{a_A}{C_A} \sigma_{rec} \right] \right\} \quad (2)$$

که در آن $Y(\xi)$ مدول الاستیسیته سیم، S_{res} پیش کرنش اعمال شده، C_A شیب دیاگرام فازی تنش-دمای شروع آستنیت، T دمای اعمال شده، A_s دمای شروع آستنیتی شدن و A_f دمای پایان آستنیتی شدن می‌باشد. شکل ۲ رفتار آلیاژ حافظه‌دار دارای پیش کرنش، در اثر افزایش دما جهت فعال‌سازی آن را نشان می‌دهد. قطعه با افزایش دما، پیش کرنش را باز یافته و به کرنش صفر برخواهد گشت و با کاهش دما، به علت یک جهته بودن آلیاژ حافظه‌دار، کرنش صفر باقی خواهد ماند.



شکل ۲: رفتار سیم حافظه‌دار با پیش کنش ۵٪ در اثر تغییرات دما

۲-۳- مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس

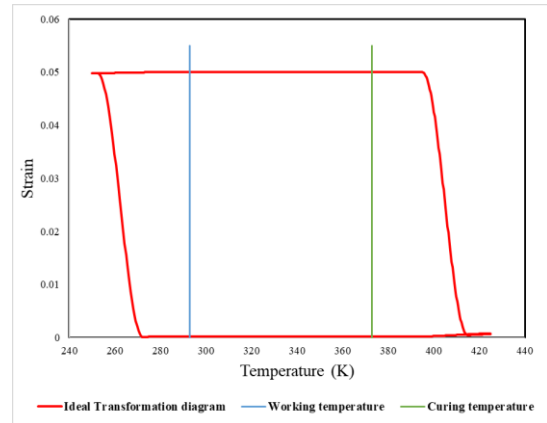
مدل المان محدود لوله‌های کامپوزیتی و سیم‌های حافظه‌دار در نرم‌افزار آباکوس توسعه داده شد. مراحل اصلی شامل موارد زیر است: تعریف هندسه و مواد: لوله‌ها ایجاد شده و خواص T300/5208 مطابق جدول ۱ اختصاص داده شد. سیم‌های حافظه‌دار با استفاده از سابروتین یومت^۳ [۲۷] و بر اساس خواص نایتینول مطابق جدول ۲ مدل سازی شدند.

قرارگیری سیم‌ها: سیم‌ها به صورت مارپیچ با قطر ۶۰ میلی‌متر و فاصله ۵ میلی‌متر در لایه‌های کامپوزیتی تعبیه شدند (شکل ۳). پیش کرنش ۵٪ به سیم‌ها اعمال گردید و قطعات در دمای کوره در شرایط بدون تنش در نظر گرفته شدند.

مراحل تحلیل: تحلیل به سه مرحله تقسیم شد:

- مرحله ۱: سرد شدن پس از پخت لایه‌های کامپوزیتی
- مرحله ۲: افزایش دما و فعال سازی سیم‌های حافظه‌دار
- مرحله ۳: اعمال فشار داخلی (۱۰ و ۱۵ مگا پاسکال)

خاصیت مورد توجه در این پژوهش، اثر حافظه‌شکلی است. شکل ۱ نشان‌گر رفتار ایده‌آل تغییر فرم یک آلیاژ حافظه‌دار دو جهته است.



شکل ۱: رفتار آلیاژ حافظه‌دار دو جهته در اثر تغییرات دما

در این پژوهش سیم‌های حافظه‌دار با المان‌های یک‌بعدی^۱ و قطر ۰/۴ میلی‌متر مدل سازی شده و خواص مکانیکی و حرارتی آن‌ها از پژوهش‌های پیشین [۲۴] استخراج شده است. در فاز مارتنزیت، سیم در دمای محیط تحت بار خارجی تغییر شکل می‌دهد و با افزایش دما تا رسیدن به فاز آستنیت، به شکل اولیه خود بازمی‌گردد. این خاصیت برای اعمال نیروی فشاری در جهت کاهش واپیچش چندلایه‌ها استفاده شده است. روابط میان تنش، کرنش و کسر مارتنزیتی ξ توسط معادله (۱) ارائه شده است [۲۵]:

$$T_1 - T_1^0 = Y_1(S_1 - S_1^0) + \Omega(\xi - \xi^0) \quad (1)$$

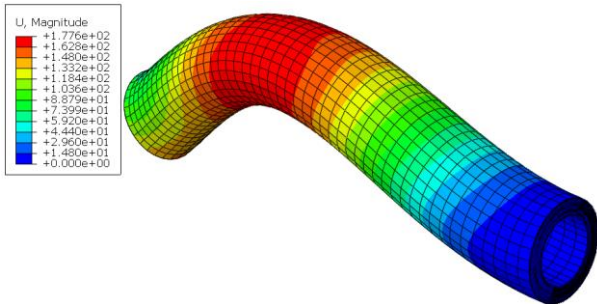
نیروی بازگشت^۲ سیم‌های دارای پیش کرنش نیز با رابطه (۲) تعیین می‌شود [۲۶]:

³ U-Mat

Wire
² Recovery Force

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد اختلاف نسبی دو حالت ۳۰۰,۰۰۰ و ۴۵۰,۰۰۰ کمتر از ۱/۱۵٪ بوده و مدت‌زمان تحلیل نیز از افزایش چشم‌گیر سه برابری را نشان می‌دهد؛ لذا از تعداد مش ۳۰۰,۰۰۰ به بالا، نتایج دارای همگرایی مناسب هستند.

حل‌گر اختلال خطی^۲، کمانش^۳، برای تحلیل کمانش و تعیین نیروی بحرانی پنج مود اول به کار گرفته شد. شرایط مرزی به‌صورت یکسر گیردار و انتهای دیگر با آزادی جابجایی فقط در راستای محوری در نظر گرفته شد. شکل ۵ کانتور جابجایی در راستای عمود بر محور لوله را تحت کمانش مود I نمایش می‌دهد. در این شکل، لوله تحت‌فشار، تحت یک عیب اولیه بر اساس دیتای کمانش مود اول و تحت بارمحوری، دچار پس‌کمانش شده است. لوله تحت‌فشار در شرایط تکیه‌گاهی ساده (یکسر کاملاً محدود و گیردار، یکسر فقط در راستای محوری آزاد) تحت بارمحوری قرار گرفته است.



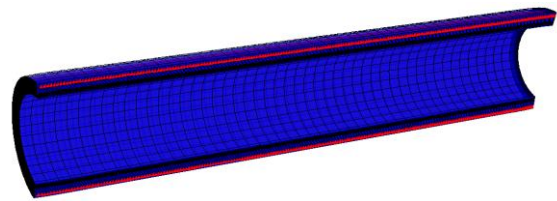
شکل ۵: کانتور جابجایی لوله تحت‌فشار در شرایط پس‌کمانش

هدف اصلی مدل‌سازی، بررسی تأثیر حضور سیم‌های حافظه‌دار و میزان پیش‌کرنش آن‌ها بر ظرفیت فشار و کاهش واپیچش لوله‌های کامپوزیتی است. با فعال‌سازی سیم‌ها پس از پخت و سرد شدن قطعات، نیروی بازگشت ناشی از حافظه‌شکلی به کاهش تنش‌های پسماند و بهبود رفتار کمانش کمک می‌کند.

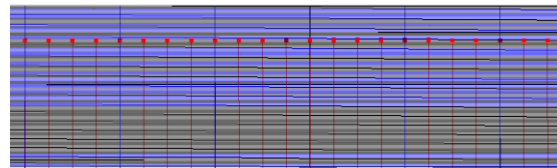
۲-۴- صحت‌سنجی

برای ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل المان محدود ارائه‌شده، صحت‌سنجی آن بر اساس نتایج تحلیلی ارائه‌شده در مقاله بوهافس [۲۳] و همچنین خاصیت حافظه‌شکلی آلیاژهای حافظه‌دار انجام شد. در این راستا، نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی لوله‌های کامپوزیتی با و بدون سیم‌های SMA با نتایج تحلیلی بوهافس مقایسه گردید. نمودارهای حاصل از این مقایسه در شکل ۶ ارائه‌شده‌اند.

مش‌بندی: از المان‌های C3D8R برای لایه‌های کامپوزیتی و المان‌های Beam برای سیم‌ها استفاده شد.



(الف)

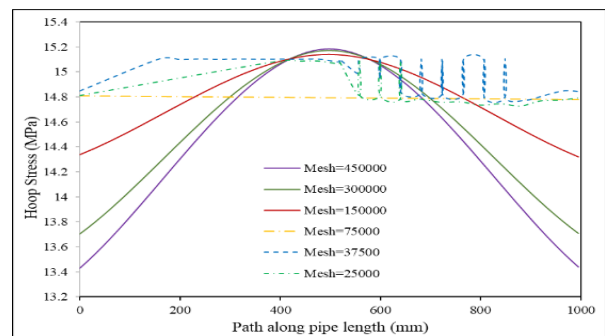


(ب)

شکل ۳: (الف) نمای ایزومتریک لوله تحت‌فشار مدل‌سازی شده و چیدمان آلیاژ حافظه‌دار در پوسته. (ب) برشی در راستای طول لوله، گام سیم‌پیچ (نقاط قرمز رنگ) در این حالت ۵ میلی‌متر است

تحلیل کمانش و پس‌کمانش: برای بررسی اثر حضور سیم‌های حافظه‌دار، سه نوع نمونه مورد آزمون قرار گرفت:

- ۱- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی
 - ۲- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار و تحت‌فشار داخلی
 - ۳- لوله تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار تحت‌فشار داخلی
- برای تحلیل تأثیر تعداد المان‌ها بر نتایج و تضمین همگرایی، نمونه بدون سیم تحت‌فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. مدل‌های متعددی با تعداد مش‌های متفاوت از ۲۵,۰۰۰ تا ۴۵۰,۰۰۰ در نظر گرفته شد. در هر مدل، تنش محیطی^۱ در راستای طول لوله محاسبه شد و نتایج در شکل ۴ ارائه گردید.



شکل ۴: نمودار تنش محیطی در راستای طول لوله در سطح داخلی آن بر اساس تعداد مش

³ Linear Perturbation, Buckle

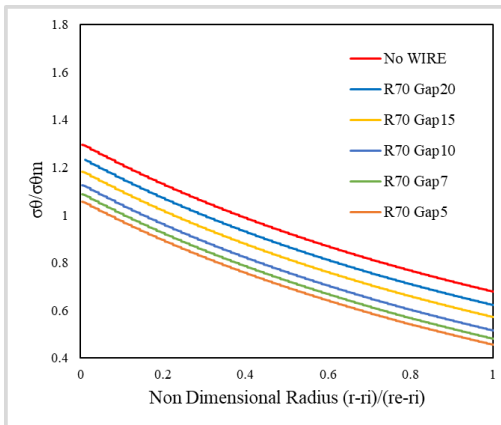
¹ Hoop Stress

² Linear Perturbation

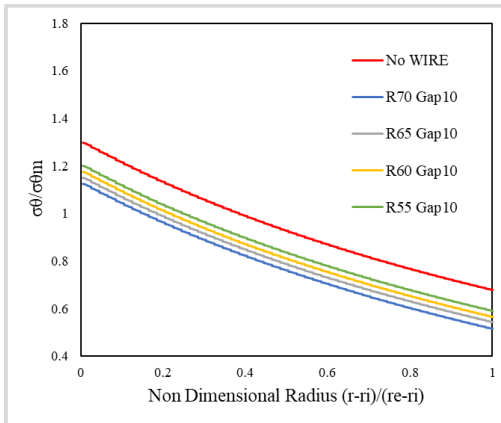
می‌تواند برای تحلیل‌های بعدی شامل بررسی اثر پیش‌کنش سیم‌ها، تحلیل کمانش و پس‌کمانش و ارزیابی ظرفیت فشار داخلی لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی تأثیر آلیاژ حافظه‌دار بر ظرفیت فشار لوله کامپوزیتی در مرحله اول، قطر سیم-پیچ به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. سیم-پیچ در قطرهای مختلف ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ میلی‌متر در میان چندلایه تعبیه شد. نتایج تأثیر آن بر تنش محیطی در شکل ۷ ارائه شده است.



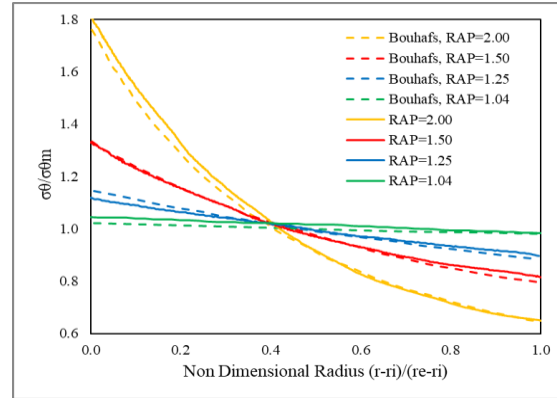
(الف)



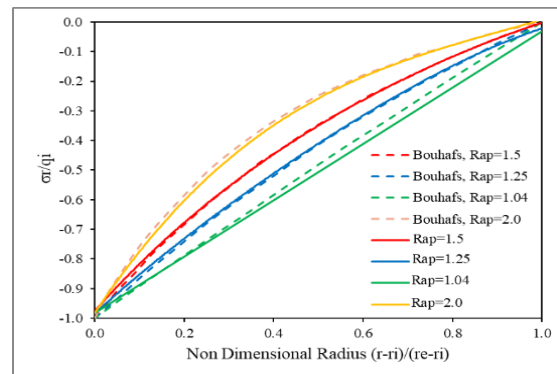
(ب)

شکل ۷: (الف) تأثیر گام سیم‌پیچ آلیاژ حافظه‌دار بر تنش محیطی **Hoop Stress** بی‌بعد شده. (ب) تأثیر قطر سیم‌پیچ آلیاژ حافظه‌دار بر تنش محیطی **Hoop Stress** بی‌بعد شده

شکل ۷ نشان می‌دهد که حضور آلیاژ حافظه‌دار به‌صورت یک سیم‌پیچ در یک لوله کامپوزیتی چه تأثیری خواهد داشت. شکل ۷ (الف)، تأثیر گام سیم‌پیچ بر تنش محیطی را نشان می‌دهد. با کاهش گام سیم‌پیچ از ۲۰ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر و نزدیک شدن سیم‌ها به



(الف)



(ب)

شکل ۶: (الف) مقایسه میزان تنش‌های محیطی در مدل حاضر و پژوهش بوهافس [۲۳] (ب) مقایسه میزان تنش‌های شعاعی در مدل حاضر و پژوهش بوهافس [۲۳]

در نمودارهای ادامه پژوهش، Rap نسبت شعاع خارجی به شعاع داخلی، $R(70)$ شعاع سیم‌پیچ که از ۵۵ تا ۷۰ میلی‌متر متغیر خواهد بود و $Gap(5)$ گام سیم‌پیچ بوده و از ۵ تا ۲۰ میلی‌متر متغیر خواهد بود. همچنین σ_{θ} تنش محیطی، σ_z تنش محوری، σ_r تنش شعاعی، q_i فشار داخلی، نیز پارامتر بی‌بعد شده از شعاع می‌باشد. تمامی تنش‌ها، به‌صورت نقطه‌ای^۱ روی یک مسیر از سطح داخلی لوله تا سطح بیرون آن با پارامتر بی‌بعد ۰ تا ۱ نمایش داده شده است. همچنین

$$\sigma_{\theta m} = \frac{q_i r_i}{r_e - r_i} \text{ است.}$$

بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که انحراف نمودار خروجی مدل انجام‌شده نسبت به نمودار ارائه‌شده توسط بوهافس، به‌صورت نقطه‌به‌نقطه در تمام حالات کمتر از ۵٪ بوده است. این مقدار خطا بیانگر صحت بالای مدل المان محدود و هم‌خوانی بسیار خوب بین نتایج مدل حاضر و نتایج بوهافس [۲۳] بوده و صحت و دقت مدل المان محدود توسعه‌یافته را تأیید می‌کند؛ بنابراین، مدل ارائه‌شده

¹ Unique Nodal

تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار و تحت فشار داخلی، به ترتیب در جدول ۳، جدول ۴ و جدول ۵ ارائه می‌گردد.

جدول ۳: نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول نمونه بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی

مود	نیروی بحرانی کمانش (نیوتن)
۱	۳۴۹۵۴۰۸/۷۵
۲	۳۴۹۵۴۰۸/۷۵
۳	۸۳۰۹۰۲۸/۷۵
۴	۸۳۰۹۰۲۸/۷۵
۵	۱۲۵۷۹۶۲۵

جدول ۴: نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول نمونه بدون آلیاژ حافظه‌دار و تحت فشار داخلی

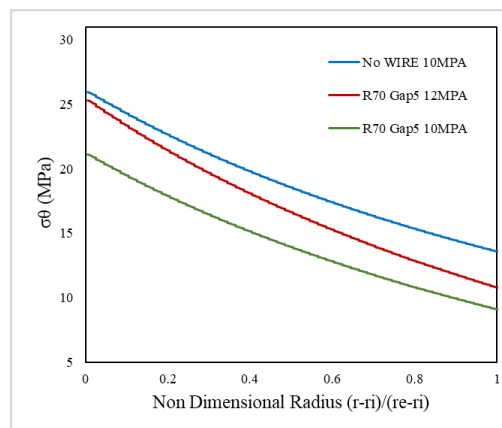
مود	نیروی بحرانی کمانش (نیوتن)
۱	۳۴۱۲۲۹۶/۸۸
۲	۳۴۱۲۲۹۶/۸۸
۳	۸۲۳۳۰۸۰
۴	۸۲۳۳۰۸۰
۵	۱۲۵۱۰۹۳۷/۵

جدول ۵: نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول نمونه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار و تحت فشار داخلی

مود	نیروی بحرانی کمانش (نیوتن)
۱	۳۴۴۰۸۵۱/۲۵
۲	۳۴۴۰۸۵۱/۲۵
۳	۸۲۸۸۹۱۳/۱۳
۴	۸۲۸۸۹۱۳/۱۳
۵	۱۲۵۸۱۵۸۷/۵

نتایج جدول ۳ مربوط به نمونه خام لوله کامپوزیتی بدون حضور آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی می‌باشد و به‌عنوان مرجع اولیه مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه آن با جدول ۴ نشان می‌دهد که اعمال فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال باعث افت اندک نیروهای بحرانی کمانش در پنج مود اول می‌شود. نتایج جدول ۵ مربوط به لوله کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار با آرایش قطر ۷۰ میلی‌متر و گام ۱۰ میلی‌متر و تحت فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که حضور آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش جزئی نیروهای بحرانی کمانش پنج مود اول شده و بهبود رفتار کمانش لوله تحت فشار داخلی را فراهم می‌آورد؛ بنابراین، استفاده از سیم‌های حافظه‌دار نه تنها ظرفیت فشار داخلی لوله را افزایش می‌دهد، بلکه تأثیر منفی بر

یکدیگر میزان تنش محیطی وارد بر بدنه کامپوزیتی لوله از ۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است. چراکه تعداد سیم‌ها بر واحد سطح بیشتر بوده و نیروی بازیابی بیشتری به پوسته وارد می‌شود. شکل ۷ (ب)، تأثیر قطر سیم‌پیچ بر میزان تنش محیطی را نشان می‌دهد. با افزایش قطر سیم‌پیچ از ۵۵ میلی‌متر تا ۷۰ میلی‌متر، تنش محیطی از ۱۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است. چراکه طول محیط سیم استفاده‌شده بیشتر بوده و نیروی بازیابی بیشتری به پوسته وارد می‌شود. برای بررسی مقدار افزایش ظرفیت فشار، مدل لوله کامپوزیت تقویت‌شده با سیم حافظه‌دار، با فشار 12MPa ایجاد شد. نتایج در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸: تنش محیطی وارد بر سه نمونه لوله کامپوزیتی

در شکل ۸، سه نمونه ۱- آبی: بدون سیم با فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال، ۲- سبز: نمونه با سیم‌پیچ و فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال و ۳- قرمز: نمونه با سیم‌پیچ و فشار داخلی ۱۲ مگا پاسکال، مورد بررسی قرار گرفتند. سیم‌پیچ در دو نمونه ۲ و ۳ با شعاع ۷۰ و گام ۵ میلی‌متر دفن شده است. آنچه مشاهده می‌شود، حضور آلیاژ حافظه‌دار در چندلایه، میزان تنش محیطی را به کمک نیروی بازیابی ناشی از فعال‌سازی، کاهش داده و در شرایط فشار داخلی یکسان، میزان تنش‌های محیطی وارد بر پوسته، کاهش می‌یابد. با افزایش فشار داخلی لوله به میزان ۲۰٪ مشاهده می‌شود که نمودار مربوط به فشار ۱۲ مگا پاسکال با سیم حافظه‌دار، هنوز زیر نمودار نمونه ۱۰ مگا پاسکال بدون سیم حافظه‌دار است. لذا این مفهوم نشان می‌دهد که میزان ظرفیت فشار ۲۰٪ افزایش یافته است. این افزایش ظرفیت فشار در حضور آلیاژهای حافظه‌دار بر روی رفتار کمانش و پس‌کمانش نیز تأثیرگذار خواهد بود. نیروی بحرانی نمونه‌های ۱- بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی، ۲- بدون آلیاژ حافظه‌دار و تحت فشار داخلی، ۳-

نتیجه گرفت که استفاده از سیم‌های حافظه‌دار برای افزایش ظرفیت فشار داخلی لوله‌ها موفقیت‌آمیز است و علاوه بر افزایش ظرفیت فشار، تأثیر منفی بر رفتار پس‌کمانش لوله تحت فشار اعمال نمی‌کند. این امر نشان‌دهنده قابلیت استفاده عملی و ایمن آلیاژ حافظه‌دار برای بهبود عملکرد مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری داخلی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی تحت فشار داخلی بررسی شد. مدل اجزای محدود سه‌بعدی توسعه یافت و صحت آن با نتایج تحلیلی بوهافس تأیید شد. سیم‌های حافظه‌دار به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی ثانویه میان لایه‌های کامپوزیتی تعبیه شدند و پارامترهایی مانند قطر سیم و گام سیم‌پیچ مورد مطالعه قرار گرفتند.

نتایج نشان دادند که:

- حضور سیم‌های حافظه‌دار موجب افزایش جزئی کمتر از ۱٪ نیروهای بحرانی کمانش و بهبود جزئی رفتار پس‌کمانش لوله تحت فشار داخلی شد.
- تحلیل پس‌کمانش لوله تقویت‌شده با سیم‌پیچ محیطی با وارد کردن انحراف اولیه مود اول نشان داد که سیم‌های حافظه‌دار تأثیر منفی روی رفتار پس‌کمانش محوری ایجاد نمی‌کند.
- مقایسه سه نمونه:

۱- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار

۲- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار تحت فشار

۳- لوله تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار تحت فشار نشان داد که حضور آلیاژ حافظه‌دار، رفتار کمانش و پس‌کمانش لوله را بهبود جزئی می‌بخشد.

- قطر و گام سیم‌ها تأثیر مستقیمی بر عملکرد کمانش داشت؛ سیم‌پیچ با قطر ۷۰ و با گام ۵ میلی‌متر، بیشترین بهبود را در پایداری پس‌کمانش ایجاد کردند. این بهبود در بیشترین حالت ۱٪ بود.

نتایج نشان‌دهنده آن است که حضور آلیاژ حافظه‌دار به‌صورت سیم‌پیچ، می‌تواند جهت افزایش ظرفیت فشار داخلی لوله کامپوزیتی به کار گرفته شود و این موضوع بر سایر ویژگی‌های لوله شامل رفتار کمانش و پس‌کمانش، تأثیر منفی نخواهد داشت.

مدل ارائه‌شده قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار کمانش و پس‌کمانش لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار را دارد و می‌تواند

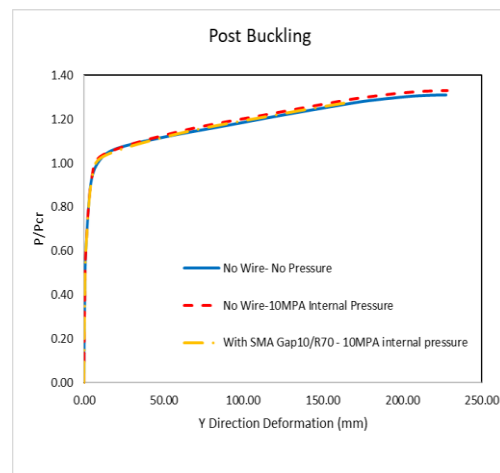
نیروهای بحرانی کمانش ندارد. به‌عنوان پژوهش‌های آتی، می‌توان، حضور آلیاژهای حافظه‌دار به‌صورت محوری (نه به شکل سیم‌پیچ) را مورد بررسی قرار داد. این نوع چیدمان می‌تواند تأثیر بیشتری بر رفتار کمانش و پس‌کمانش محوری داشته باشد.

در ادامه، رفتار پس‌کمانش لوله تحت فشار داخلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا اثر آلیاژ حافظه‌دار بر کاهش واپیچش و بهبود عملکرد پس‌کمانش تحلیل شود.

برای بررسی رفتار پس‌کمانش لوله‌های کامپوزیتی، همان سه نمونه‌ای که در تحلیل کمانش مورد مطالعه قرار گرفتند، مورد تحلیل قرار گرفتند. در این مرحله، از خروجی مدل کمانش، استفاده‌شده و انحراف اولیه^۱ لازم برای مود I پس‌کمانش به مدل وارد گردید تا رفتار واقعی‌تر ساختار شبیه‌سازی شود.

سپس با استفاده از حل‌گر استاتیک غیرخطی^۲ تحلیل پس‌کمانش انجام شد. نتایج حاصل از پس‌کمانش برای هر سه نمونه در شکل ۹ ارائه شده است و رفتار لوله‌ها تحت بارگذاری بیش از نیروی بحرانی کمانش و اثر حضور آلیاژ حافظه‌دار بر کاهش واپیچش و بهبود پایداری لوله نشان داده شده است.

این تحلیل امکان بررسی اثر سیم‌های حافظه‌دار بر کاهش واپیچش پس‌کمانش و افزایش ظرفیت باربری لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار داخلی را فراهم می‌آورد.



شکل ۹: مقایسه نتایج پس‌کمانش سه نمونه تحت تحلیل FEM

مطابق آنچه در شکل ۹ مشاهده می‌شود: حضور آلیاژ حافظه‌دار تغییر جزئی کمتر از ۱٪ در رفتار پس‌کمانش ایجاد کرده است و مدل‌های مورد بررسی تقریباً مشابه عمل می‌کنند؛ بنابراین، می‌توان

² Non-Linear General Static

¹ Imperfection

[5] M. Xia, K. Kemmochi, and H. Takayanagi, "Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading," *Composite Structures*, Vol. 51, No. 3, pp. 273–283, 2001, doi: [10.1016/S0263-8223\(00\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00137-9).

[6] M. Xia, H. Takayanagi, and K. Kemmochi, "Bending behavior of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipes," *Composite Structures*, Vol. 56, No. 2, pp. 201–210, 2002, doi: [10.1016/S0263-8223\(01\)00181-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00181-7).

[7] M. W. K. Rosenow, "Wind angle effects in glass fibre-reinforced polyester filament wound pipes," *Composites*, Vol. 15, No. 2, pp. 144–152, 1984, doi: [10.1016/0010-4361\(84\)90727-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(84)90727-4).

[8] P. M. Wild and G. W. Vickers, "Analysis of filament-wound cylindrical shells under combined centrifugal, pressure and axial loading," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, No. 1, pp. 47–55, 1997, doi: [10.1016/S1359-835X\(96\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00093-0).

[9] A. A. Krikanov, "Composite pressure vessels with higher stiffness," *Composite Structures*, Vol. 48, No. 1–3, pp. 119–127, 2000, doi: [10.1016/S0263-8223\(99\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00083-5).

[10] J. Blachut, "Pressure vessel components: Some recent developments in strength and buckling," *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 1, No. 4, pp. 415–421, 1998, doi: [10.1002/pse.2260010410](https://doi.org/10.1002/pse.2260010410).

[11] J. Błachut, "Experimental perspective on the buckling of pressure vessel components," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 66, No. 1, p. 010803, 2014, doi: [10.1115/1.4026067](https://doi.org/10.1115/1.4026067).

[12] J. Y. Han, H. Y. Jung, J. R. Cho, J. H. Choi, and W. B. Bae, "Buckling analysis and test of composite shells under hydrostatic pressure," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1–3, pp. 742–745, 2008, doi: [10.1016/j.jmatprotec.2007.11.228](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.228).

[13] S. H. Hur, H. J. Son, J. H. Kweon, and J. H. Choi, "Postbuckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure," *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1–3, pp. 114–124, 2008, doi: [10.1016/j.compstruct.2008.03.028](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.028).

به‌عنوان ابزاری معتبر برای طراحی و بهینه‌سازی مخازن تحت‌فشار کامپوزیتی استفاده شود.

۴-۱- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
مدول الاستیسیته	$Y(\xi)$
کرنش	S
پیش‌کرنش اعمال شده	S_{res}
شیب دیاگرام فازی	C_A
دمای اعمال شده	T
دمای شروع آستنتیتی شدن	A_s
دمای پایان آستنتیتی شدن	A_f
علائم یونانی	
کسر مارتنزیتی	ξ
تنش بازگشت (نیروی برگشت آلیاژ حافظه‌دار)	σ_{rec}
ضریب تأثیر داخلی کسر مارتنزیتی	Ω
ضریب تأثیر دما روی بازگردانی تنش SMA	α_A
زیرنویس	
ابتدایی	res
شروع	s
پایان	f
درجه	o

۵- منابع

[1] E. Kappel, D. Stefaniak, T. Sprowitz, and C. Hühne, "A semi-analytical simulation strategy and its application to warpage of autoclave-processed CFRP parts," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 12, pp. 1985–1994, 2011, doi: [10.1016/j.compositesa.2011.09.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.001).

[2] S. C. Tseng and T. A. Osswald, "Prediction of shrinkage and warpage of fiber reinforced thermoset composite parts," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 13, No. 8, pp. 698–721, 1994, doi: [10.1177/073168449401300803](https://doi.org/10.1177/073168449401300803).

[3] S. R. White and J. B. Berman, "Thermomechanical response of SMA composite beams with embedded nitinol wires in an epoxy matrix," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 9, No. 5, pp. 391–400, 1998, doi: [10.1177/1045389X9800900507](https://doi.org/10.1177/1045389X9800900507).

[4] M. Xia, H. Takayanagi, and K. Kemmochi, "Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure," *Composite Structures*, Vol. 53, No. 4, pp. 483–491, 2001, doi: [10.1016/S0263-8223\(01\)00061-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00061-7).

- sandwich beam composed of five layers considering honeycomb core and CNTRC with SMA particles and temperature-dependent material properties using SSDT,” *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 12, No. 1, pp. 153–168, 2025, doi: [10.22075/mac.2024.33537.1622](https://doi.org/10.22075/mac.2024.33537.1622).
- [22] Z. Li, X. Zhang, K. Shen, J. Liu, J. Zhang, and G. Pan, “Experimental study on the buckling of composite cylinders with reinforced circular hole under hydrostatic pressure,” *Defence Technology*, Vol. 44, pp. 231–247, 2025, doi: [10.1016/j.dt.2024.10.002](https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.10.002).
- [23] M. Bouhafis, Z. Sereir, and A. Chateaufneuf, “Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 95, pp. 7–15, 2012, doi: [10.1016/j.ijpvp.2012.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.001).
- [24] H. Fathi, M. M. Shokrieh, and A. Saeedi, “A theoretical and experimental investigation on the stress distribution in the interface of pre-strained SMA wire/polymer composites,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 175, p. 107100, 2019, doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107100](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107100).
- [25] M. Abouhamzeh, J. Sinke, K. M. B. Jansen, and R. Benedictus, “Closed form expression for residual stresses and warpage during cure of composite laminates,” *Composite Structures*, Vol. 133, pp. 902–910, 2015, doi: [10.1016/j.compstruct.2015.07.098](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.098).
- [26] C. Liang and C. A. Rogers, “One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302, 1997, doi: [10.1177/1045389X9700800402](https://doi.org/10.1177/1045389X9700800402).
- [27] D. Lagoudas, Z. Bo, M. Qidwai, and P. Entchev, “SMA UM: User material subroutine for thermomechanical constitutive model of shape memory alloys,” Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/239541732>
- [14] Y. Qin, H. Lv, X. Zhang, and X. Li, “Post-buckling behaviors of a spinning composite thin-walled pipe conveying fluid considering thermal effects,” *Ocean Engineering*, Vol. 330, p. 121279, 2025, doi: [10.1016/j.oceaneng.2025.121279](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121279).
- [15] X. D. Ding, S. Q. Wang, W. C. Liu, and X. H. Ye, “A comparative study on the post-buckling behavior of reinforced thermoplastic pipes under external pressure considering progressive failure,” *China Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 2, pp. 233–246, 2024, doi: [10.1007/s13344-024-0020-3](https://doi.org/10.1007/s13344-024-0020-3).
- [16] H. Yıldırım, “The post-buckling analysis of cylindrical polymer fiber-reinforced composite tubes subjected to axial loading fabricated by filament winding technology,” *Polymer Composites*, Vol. 45, No. 14, pp. 13434–13450, 2024, doi: [10.1002/pc.28960](https://doi.org/10.1002/pc.28960).
- [17] A. Lal and K. Markad, “Static buckling analysis of shape memory alloy reinforced composite laminated plate,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 814, No. 1, p. 012009, 2020, doi: [10.1088/1757-899X/814/1/012009](https://doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012009).
- [18] X. Zuo, J. Zhang, W. Tang, M. Zhan, and Y. Li, “Buckling of helically wound composite cylinders under uniform external pressure,” *Ships and Offshore Structures*, Vol. 19, No. 3, pp. 348–365, 2024, doi: [10.1080/17445302.2023.2169065](https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2169065).
- [19] K. K. Thomas, N. M. Hassan, Z. Bahroun, and M. Awad, “Exploring the role of shape memory alloys in advanced composite sandwich panels and laminates,” *Composites Part C: Open Access*, p. 100557, 2025, doi: [10.1016/j.jcomc.2025.100557](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100557).
- [20] P. Rozylo, M. Rogala, and J. Pasnik, “Buckling analysis of thin-walled composite structures with rectangular cross-sections under compressive load,” *Materials*, Vol. 16, No. 21, p. 6835, 2023, doi: [10.3390/ma16216835](https://doi.org/10.3390/ma16216835).
- [21] M. Asgari, M. Mohammadimehr, M. Arabzadeh-Ziari, and E. Arabzadeh-Ziari, “Static bending, vibration, and buckling responses of a