

تحلیل کمانش و پس کمانش پانل ساندویچی با هسته انعطاف پذیر تقویت شده با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

محمدعلی رنجبر^۲

^۲ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

علیرضا پورمویذ^۱، کرامت ملک‌زاده فرد^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲)

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار عنوان گروهی از مواد هوشمند می‌باشند که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. رفتار تنش- کرنش این مواد دو پدیده غیرخطی خاص را در برمی‌گیرد، اثر حافظه‌داری و اثر شبه‌الاستیک. رفتار آلیاژ طی این دو اثر به‌گونه‌ای است که بعد از ورود آن به حالت پلاستیک، ماده شکل اولیه خود را بازیابی خواهد کرد. پژوهش انجام‌شده بر پایه مدل‌سازی این دو رفتار آلیاژهای حافظه‌دار در نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از کد یومت می‌باشد. شبیه‌سازی کمانش و پس کمانش پانل‌های ساندویچی از مواردی است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تهیه کد یومت خواص آلیاژ حافظه‌دار امکان هرگونه استفاده از امکانات آباکوس جهت تحلیل رفتار سازه‌های هوشمند ساخته شده با آلیاژ حافظه‌دار را برای طراح فراهم می‌سازد. همچنین در این پژوهش، ابتدا نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول به ازای درصدهای متفاوت آلیاژ در پوسته‌ها و هسته مطالعه شده و سپس اثرات تغییر درصد حجمی آلیاژها، فاصله از محور خنثی، تغییر زوایای الیاف و اثر کرنش اولیه آلیاژ حافظه‌دار بر پایداری و رفتار پس از کمانش مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان از ایجاد تغییرات زیاد آلیاژ حافظه‌دار روی نتایج به دلیل تنش بازیابی بزرگی که در حین تغییر فاز ایجاد می‌کنند، را دارد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار، پانل ساندویچی، کمانش، پس کمانش، زیربرنامه یومت

Buckling and Post-buckling Analysis of a Sandwich Panel with Flexible Core Reinforced with Memory Alloy Wires (SMA)

A. R. Pourmoayed¹, K. Malekzadeh Fard²

M. A. Ranjbar³

^{1,3} Department of Mechanical Engineering, Khatmol Anbia Air Defense, Tehran, Iran

² Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 30/November/2019; Accepted: 11/May/2020)

ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMAs) are a group of intelligent materials which have distinct and superior properties compared to other alloys. The stress-strain behavior of these materials involves two specific nonlinear phenomena, namely the Shape Memory effect and the quasi-elastic effect. The behavior of the alloy whilst subject to these two phenomena is such that after it enters the plastic state, the material will regain its original form. The research is based on the modeling of these two behaviors of memory alloys in the ABAQUS software using UMAT code. In this study, the simulation of buckling and post-buckling of sandwich panels have been investigated. Preparing a UMAT memory alloy properties code, enables the designer to use any ABAQUS features to analyze the behavior of smart structures made with the shape memory alloy. Also, in this research, the first buckling critical force of the first five modes for different percentages of the alloy in the shell and core have been studied, and then the effects of volumetric percentage change of alloys, distance from neutral axis, fiber angle variations, and finally stability and post-buckling behavior of the memory alloy as the result of initial strain have been investigated. The investigations have shown large changes in the shape memory alloy due to the great recovery stress during the phase shift.

Keywords: Shape Memory Alloys, Sandwich panels, Buckling, Post-buckling, UMAT Subroutine

^۱ - استادیار (نویسنده پاسخگو): pourmoayed@mut.ac.ir

^۲ - استاد: kmalekzadeh@mut.ac.ir

^۳ - استادیار: M_a_ranjbar@hotmail.com

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار عنوان گروهی از آلیاژها می‌باشد که قابلیت بازگشت به حالت یا شکل اولیه خود را دارا می‌باشند. عکس‌العمل این مواد نسبت به برخی پارامترهای ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال پارامترهای مذکور به‌گونه‌ای است که رفتار موجودات زنده را تداعی می‌نماید. وقتی یک آلیاژ معمولی تحت بار خارجی بیش‌ازحد الاستیک قرار می‌گیرد تغییر شکل می‌دهد. این نوع تغییر شکل بعد از حذف بار باقی می‌ماند. آلیاژهای حافظه‌دار، از جمله آلیاژهای نیکل-تیتانیوم و مس-روی-آلومینیم، رفتار متفاوتی از خود ارائه می‌نمایند. در دمای پائین یک نمونه حافظه‌دار می‌تواند تغییر شکل پلاستیک چنددرصدی را تحمل کند و سپس به‌صورت کامل به شکل اولیه در دمای بالا برگردد و این تنها با افزایش دمای نمونه به دست می‌آید. ویژگی‌های دیگر این آلیاژها عبارت است از: مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت ویژه الکتریکی به‌نسبت بالا، خواص مکانیکی به‌نسبت خوب، عمر خستگی طولانی، شکل‌پذیری بالا و قابلیت انطباق با بدن. از مهم‌ترین کاربردها این آلیاژها در صنایع می‌توان به هوافضا، صنایع مهندسی پزشکی و همچنین در جلوگیری از ارتعاش در موتورها و محرک‌ها اشاره نمود. در سال‌های اخیر مواد هوشمند گستره بسیار وسیعی از صنایع را در بر گرفته‌اند، به همین دلیل سعی شده است تمام خصوصیات آن‌ها بررسی شده و همه جوانب برای استفاده از آن‌ها، به‌خصوص آلیاژهای حافظه‌دار در نظر گرفته شود.

تابوشی و تاناکا [۱] با استفاده از مدل تاناکا، با فرض پیچش خالص، آنالیزی روی فنر پیچشی تحت بارمحوری انجام داده و سخت‌شوندگی آن را در طی تغییر فاز مورد بررسی قرار دادند. آپس و کاندرا [۲] با تحقیق بر روی کامپوزیت‌های گرافیت، اپوکسی و آلیاژ حافظه‌دار نشان دادند که افزایش درصد حجمی آلیاژ حافظه‌دار باعث بالاتر رفتن فرکانس طبیعی سازه می‌شود. پیترازاکوفسکی [۳] تیرهای چندلایه را که توسط آلیاژهای حافظه‌دار تقویت شده بودند را در نظر گرفت و اثر تغییر فاز و درصد حجمی آلیاژهای حافظه‌دار را بر روی فرکانس طبیعی با استفاده از روش المان محدود بررسی کرد و نشان داد با تغییر فاز از مارتنزیتی به آستونیتی، میزان فرکانس طبیعی سامانه افزایش می‌یابد. کیدوی و لاگوداس [۴] و رو و همکاران

[۵] با استفاده از معادلات ساختاری سه‌بعدی و کد یومت^۱ در آباکوس، مدل‌هایی را مانند لوله تحت بارپیچشی مورد تحلیل قرار دادند. لامرینگ و اشمیت [۶] به صورت تجربی ثابت کردند که وجود آلیاژ حافظه‌دار در سامانه باعث بهبود کنترل ارتعاشات در آن خواهد شد.

لائو [۷] با تقویت تیرهای کامپوزیتی توسط الیاف آلیاژ حافظه‌دار، تغییرات فرکانس طبیعی را به ازای تغییرات تعداد الیاف آلیاژ و همچنین تغییرات شرایط مرزی، مورد بررسی قرار داده و تأثیر زیاد حضور آلیاژهای حافظه‌دار را نتیجه گرفتند. شن [۸] پس‌کمانش مواد مدرج تابعی استوانه‌ای با طول محدود را مورد بررسی قرار داد. تفرشی [۹] پس‌کمانش مواد مرکب استوانه‌ای تحت بار تک‌محوره و همچنین فشار داخلی را بررسی کرد. او برای تحلیلش از آباکوس استفاده کرد.

لیو و همکاران [۱۰] پس‌کمانش ورق‌های ساخته شده از مواد مدرج تابعی وابسته به دما را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. کابل [۱۱] نیز رفتار پس‌کمانش یک میله را بررسی کرد. عابدی و همکاران [۱۲] کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای تحت فشار یکنواخت خارجی را بررسی کردند.

لی و همکاران [۱۳] پس‌کمانش حرارتی تیر تیموشنکو ساخته شده از مواد مدرج تابعی را بررسی کردند. ذاکری و علی‌نیا [۱۴] حلی تحلیلی برای پس‌کمانش پانل‌های ساندویچی دارای نقص تحت تنش‌های حرارتی یکنواخت به‌دست آورده و دریافتند که نقص اولیه تأثیر زیادی بر رفتار پانل‌های ساندویچی دارد. هار و همکاران [۱۵] پس‌کمانش استوانه‌های کامپوزیتی تحت فشار هیدرو استاتیک داخلی را مورد بررسی قرار دادند. خالو و همکاران [۱۶] با استفاده از یک مدل اجزا محدود، اثرات تغییر درصد حجمی میل‌گردهای آلیاژ حافظه‌دار را که در تقویت تیر بتنی استفاده شده بود را بر رفتار تیر بتنی تقویت‌شده بررسی کردند. حضور آلیاژهای حافظه‌دار به واسطه تنش‌های بازیابی بسیار زیاد، تأثیر به‌سزایی در بهبود نتایج داشت.

لو و همکاران [۱۷] مدلی تئوری برای خمش تیر چندلایه تقویت‌شده با الیاف آلیاژ حافظه‌دار ارائه کردند. همچنین هوانگ و هان [۱۸]، [۱۹] کمانش و پس‌کمانش الاستیک و غیرالاستیک مواد مدرج تابعی تحت فشار

همکاران [۳۱] معادلاتی را برای کمانش نامتقارن یک صفحه ساخته شده از مواد مدرج تابعی را به دست آوردند. سرپهاری و مایتی [۳۲] کمانش و پس‌کمانش صفحات چندلایه کامپوزیتی دارای نقص تحت بار ترمومکانیکی را مورد بررسی قرار دادند.

در این پژوهش با استفاده از کد یومت نوشته شده برای آلیاژهای حافظه‌دار، قابلیت تحلیل کمانش و پس‌کمانش در آباکوس فراهم شده است. با توجه به در نظر گرفتن معادلات هر سه نوع مدل بوید و لاگوداس، لیانگ و راجرز و همچنین تاناکا در این برنامه، می‌توان نتایج مربوط به مدل‌ها را ارزیابی و مقایسه کرد. همچنین در این تحقیق مطالعاتی در خصوص اثرات تغییر درصد حجمی آلیاژها، فاصله از محور خنثی و تغییر زوایای الیاف بر پایداری و رفتار پس از کمانش نیز انجام گرفته است.

۲- مدل‌های ساختاری آلیاژهای حافظه‌دار

مدل‌های ساختاری یکپارچه برای آلیاژهای حافظه‌دار توسط سه گروه ارائه شده است که در زیر به معرفی این مدل‌ها به‌طور خلاصه پرداخته می‌شود.

۲-۱- مدل بوید^۱ و لاگوداس^۲

مدل بنیادی لاگوداس که به مدل چندجمله‌ای^۳ نیز معروف است معتبرترین مدل ارائه‌شده برای آلیاژهای حافظه‌دار است. در این مدل و دو مدل دیگر انرژی آزاد گیبس به‌صورت رابطه (۱) ارائه‌شده و فقط تابع سختی $f(\xi)$ در آن‌ها متفاوت است [۴]:

$$G(\sigma, T, \xi, \epsilon^t) = -\frac{1}{2} \frac{1}{\rho} \sigma : S : \sigma - \frac{1}{\rho} \sigma : [a(T - T_0) + \epsilon^t] + c[(T - T_0) - T \ln(\frac{T}{T_0})] - s_0 T + u_0 + f(\xi) \quad (1)$$

در رابطه (۱) علامت: $G, T, \xi, \epsilon^t, S, \rho, \alpha, c, s$ و u به ترتیب نشانگر ضرب دو نقطه، انرژی آزاد گیبس، تنش، دما، جزء مارتنزیتی، کرنش انتقال، تانسور نرمی مؤثر، چگالی، تانسور ضریب انبساط حرارتی، گرمای ویژه، آنتروپی

محوری و شعاعی را مورد بررسی قرار دادند. شن و همکاران [۲۰] پس‌کمانش یک پوسته استوانه‌ای تحت فشار داخلی ساخته شده از مدرج تابعی در میان یک بستر الاستیک را مورد بررسی قرار دادند. میرزائی‌فر و همکاران [۲۱] حل‌های دقیقی برای میله‌های آلیاژ حافظه‌دار تحت پیچش خالص به دست آوردند. آن‌ها متوجه چگونگی تغییرات زاویه پیچش در اثر دما شدند و منحنی تنش-کرنش آلیاژ را به سه ناحیه تقسیم کردند. لی و همکاران [۲۲] ارتعاشات آزاد صفحات دایروی تحت حرارت، قبل و بعد از کمانش که با آلیاژ حافظه‌دار تقویت‌شده را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که دمای بحرانی رسیدن به کمانش، با حضور آلیاژ حافظه‌دار افزایش می‌یابد. آن‌ها از آلیاژ حافظه‌دار برای کنترل ارتعاشات این صفحات استفاده کردند. شن [۲۳] کمانش و پس‌کمانش حرارتی صفحات چندلایه کامپوزیتی تقویت‌شده را مورد بررسی قرار داد. برزگری و همکاران [۲۴] با استفاده از تئوری برنولی و تیموشنکو، فرکانس طبیعی یک تیر تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار را تحت شرایط مختلف بررسی کردند. پاندا و سینگ [۲۵] پوسته کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف آلیاژ حافظه‌دار را با استفاده از اجزاء محدود غیرخطی مدل کرده و ارتعاشات بعد از کمانش حرارتی آن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که الیاف آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش فرکانس سامانه می‌شود.

داک و کوان [۲۶] پس‌کمانش غیرخطی یک پوسته ساخته شده از مواد مدرج تابعی دارای نقص تحت یک بار خارج از مرکز را مورد بررسی قرار دادند. همچنین وان‌دانگ و هائو [۲۷] تحقیقاتی را بر روی کمانش و پس‌کمانش پیچشی پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از مواد مدرج تابعی تحت بار خارج از مرکز، انجام دادند. اندانی و همکاران [۲۸] مدل ساختاری برای حالت سوپرالاستیک تحت بارکششی-پیچشی غیریکنواخت به دست آوردند. دی و راماکاندرا [۲۹] کمانش و پس‌کمانش پائل‌های ساندویچی تحت بار مکانیکی غیریکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. همچنین شن [۳۰] پس‌کمانش پائل‌های ساندویچی ساخته شده از مواد مدرج تابعی بر روی بستر الاستیک را مورد بررسی قرار داد. او در تحقیقش حرارت را نیز در نظر گرفت. کولاکوفسکی و

1 - Boyd

2- Lagoudas

3- polynomial

و انرژی درونی می‌باشند. همچنین تابع سختی تغییر شکل یا انتقال است.

۲-۲- مدل تاناکا

تابع سختی انتقال مدل تاناکا که مدل نمایی نیز خوانده می‌شود به شکل رابطه (۲) است [۴]:

$$f(\xi) = \begin{cases} \frac{\Delta s_0}{a_e} \left[(1-\xi) \ln(1-\xi) + \xi \right] + (\mu_1^e + \mu_2^e) \xi, & \xi > 0 \\ -\frac{\Delta s_0}{a_e} \xi \left[\ln(\xi) - 1 \right] + (\mu_1^e - \mu_2^e) \xi, & \xi < 0 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن، a_e^A ، a_e^M ، μ_1^e و μ_2^e پارامترهای کرنش سختی ماده در حالت تغییر فاز در مدل نمایی بوده و به شکل رابطه (۳) تعریف می‌شوند [۴]:

$$Y^e = -\frac{\rho \Delta s_0}{2} (A_s - M_s) + \frac{\rho \Delta s_0}{2 \ln(0.01)} (M_s - M_f + A_f - A_s) \quad (3)$$

$$a_e^A = -\frac{\ln(0.01)}{(A_s - A_f)} \quad (4)$$

$$a_e^M = \frac{\ln(0.01)}{(M_s - M_f)} \quad (5)$$

$$\mu_1^e = \frac{\rho \Delta s_0}{2} (M_s + 2A_f - A_s) - \rho \Delta u_0 \quad (6)$$

$$\mu_2^e = \frac{\rho \Delta s_0}{2} \left(\frac{1}{a_e^A} - \frac{1}{a_e^M} \right) \quad (7)$$

در معادله (۳)، Y^e نشان‌گر بیش‌ترین مقدار نیروی ترمودینامیکی π است که باعث تغییر فاز می‌شود. مدل نمایی، فرایند تغییر فاز را در هسته مارتنزیتی که شروع آن از فاز آستونیتی است در نظر می‌گیرد.

۲-۳- مدل لیانگ و راجرز

ریشه مدل لیانگ و راجرز [۳۳] یا مدل کسینوسی همان مدل تاناکا می‌باشد. این مدل با تغییر پارامترهای کرنش سختی ماده، سعی در بهبود مدل تاناکا کرده است [۳۴]:

$$f(\xi) = \begin{cases} \int_0^\xi -\frac{\Delta s_0}{a_c} \left[\pi - \cos^{-1} \left(2\xi^{\%_0} - 1 \right) \right] d\xi^{\%_0} + (\mu_1^c + \mu_2^c) \xi, & \xi > 0 \\ \int_0^\xi -\frac{\Delta s_0}{a_c} \left[\pi - \cos^{-1} \left(2\xi^{\%_0} - 1 \right) \right] d\xi^{\%_0} + (\mu_1^c - \mu_2^c) \xi, & \xi < 0 \end{cases} \quad (8)$$

که در آن:

$$Y^c = -\frac{\rho \Delta s_0}{2} (A_s - M_s) + \frac{\rho \Delta s_0}{4} (M_s - M_f + A_f - A_s) \quad (9)$$

$$a_c^A = -\frac{\pi}{(A_s - A_f)} \quad (10)$$

$$a_c^M = \frac{\pi}{(M_s - M_f)} \quad (11)$$

$$\mu_1^c = \frac{\rho \Delta s_0}{4} (M_s + A_f) - \rho \Delta u_0 \quad (12)$$

$$\mu_2^c = \frac{\pi}{4} \rho \Delta s_0 \left(\frac{1}{a_c^A} - \frac{1}{a_c^M} \right) \quad (13)$$

۳- معرفی کد یومت و الگوریتم

معادلات ساختاری اغلب مواد در طبیعت شبیه به هم بوده و فقط مقادیر ثابت آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. اما مواد بسیار زیادی هم در طبیعت وجود دارند که دارای معادلات ساختاری خاص هستند و برای نرم‌افزارهای تجاری تعریف نشده‌اند. از این‌رو، برای تحلیل این‌گونه مواد باید معادلات ساختاری ماده در کد مخصوصی نوشته شود. اگر کد نوشته‌شده توانایی ایجاد ارتباط با نرم‌افزار اجزاء محدود خاصی را داشته باشد، هر نوع تحلیل که نرم‌افزار مربوطه توانایی آن را داشته باشد را برای انواع المان‌ها را ممکن می‌سازد. یکی از کدهایی که چنین امکانی را برای کاربر مهیا می‌سازد کد یومت بوده که تعریف جنس ماده خاص در آباکوس را فراهم می‌کند. بنابراین برای شبیه‌سازی انواع مواد، نیروها و حتی المان‌ها، باید با استفاده از کدی مخصوص مشخصات آن را به عنوان ورودی به نرم‌افزار داد. برای تعریف یک ماده خاص از کد یومت و برای ایجاد نیرویی خاص از دی‌لود^۱ استفاده می‌شود. در شکل ۱ الگوریتم برنامه نوشته‌شده در کد یومت در نرم‌افزار آباکوس به‌طور خلاصه آورده شده است.

برای تشخیص طبیعت تغییر شکل باید از تابع تغییر فاز و معیاری که برای بارگذاری و باربرداری تعریف می‌شود استفاده کرد. بدین منظور باید مسیر بارگذاری در تابع تنش- نیرو نسبت به ناحیه تغییر فاز را مورد بررسی قرار داد. جهت استخراج معادلات مربوطه، تابع تغییر شکل معادله (۱۴) را به صورت زیر در معادله (۱۶) بازنویسی می‌کنیم [۴]:

$$\Phi(\sigma, T, \xi) = \psi(\sigma, T) - \kappa(\xi) \quad (16)$$

$\kappa(\xi)$ شامل ترم‌های سخت‌شوندگی تغییر فاز بوده که مرتبط با جزء مارتنزیتی ξ می‌باشد. نخستین قدم در الگوریتم موجود، پیش‌بینی تنش اولیه می‌باشد. در بازه زمانی $[T_n, T_{n+1}]$ تعریف می‌کنیم:

$$\Psi_{n+1}^{(0)} := \Psi(\sigma_{n+1}^{(0)}, T_{n+1}) = \sigma_{n+1}^{(0)} \Lambda_n + \frac{1}{2} \sigma_{n+1}^{(0)} : \Delta S : \sigma_{n+1}^{(0)} + \sigma_{n+1}^{(0)} : \Delta \alpha (T_{n+1} - T_0) + \rho \Delta s_0 T_{n+1} \quad (17)$$

$$\Psi_n := \Psi(\sigma_n, T_n) = \sigma_n \Lambda_n + \frac{1}{2} \sigma_n : \Delta S : \sigma_n + \sigma_n : \Delta \alpha (T_{n+1} - T_0) + \rho \Delta s_0 T_0$$

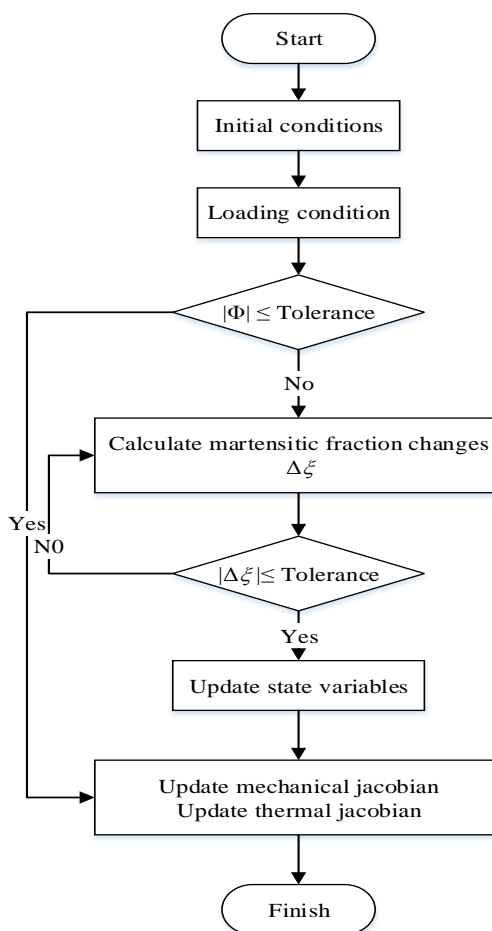
در مسئله همگرا، مقدار ξ در زمان‌های t_n و t_{n+1} برابر می‌باشد. به همین دلیل از ترم $\kappa(\xi)$ صرف‌نظر می‌کنیم.

با در نظر گرفتن Φ^f و Φ^r به‌عنوان توابع تغییر فاز در مسیر رفت‌و برگشت، برای مشخص نمودن بارگذاری یا باربرداری از الگوریتم زیر استفاده می‌شود:

$\text{If } \Phi_{n+1}^{(0)} - \Psi_n > 0$	حالت بارگذاری بر مسئله حاکم است)
$\text{If } \Phi_{n+1}^{(0)f} \leq 0$	حالت الاستیک و یا تغییر فاز پیش‌رونده بر مسئله حاکم است)

Elastic
Else
Forward transformation
Elseif

$\Phi_{n+1}^{(0)} - \Psi_n < 0$	حالت باربرداری بر مسئله حاکم است)
$\text{If } \Phi_{n+1}^{(0)r} \leq 0$	حالت الاستیک و یا تغییر فاز پس‌رونده بر مسئله حاکم است)



شکل (۱): الگوریتم نوشته شده یومت برای تحلیل آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار آباکوس.

تشخیص این‌که آلیاژ حافظه‌دار در نمو دمایی و تنشی دارای تغییر شکل الاستیک و یا تغییر فاز می‌باشد بسیار مهم است.

همچنین لازم به‌ذکر است که در کد نوشته شده تابع انتقال بر اساس نیروی ترمودینامیکی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۴]:

$$\Phi = \begin{cases} \pi - Y^* & , \xi > 0 \\ -\pi - Y^* & , \xi < 0 \end{cases} \quad (14)$$

که Y^* نشان‌دهنده اتلاف انرژی در حالت تغییر فاز بوده و برابر است با [۴]:

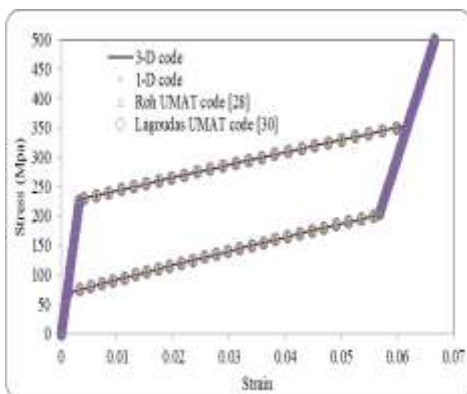
$$Y^* = -\frac{1}{2} \rho \Delta s_0 (A^{of} - A^{os}) + \frac{1}{4} \rho \Delta s_0 (M^{os} - M^{of} - A^{of} + A^{os}) \quad (15)$$

دمای در نظر گرفته شده برای اثر شبه الاستیک برابر با ۳۱۵ درجه کلوین بوده و همان طور که گفته شد با ۴ نیروی ۱۲۵ مگانیوتنی از ۴ گوشه مکعب کشیده می شود. در مدل یک بعدی نیز این نیرو به صورت متمرکز بر المان truss مورد نظر اعمال می شود.

نتایج به دست آمده حاکی از تطابق کامل با مدل های لاگوداس و همچنین کد نوشته شده توسط جینو رو [۵] بوده و شکل ۳ به خوبی این ادعا را اثبات می کند. در شکل ۳ کد یک بعدی، کد سه بعدی و مدل لاگوداس کاملاً بر روی هم منطبق شده اند. در شکل ۴ نیز نمودار اثر حافظه داری از مدل یک بعدی، سه بعدی و کد اجزا محدود استخراج شده است. نیروی اعمالی بر این نمونه ها برابر با ۴۰۰ مگانیوتن بوده و دارای دمای اولیه ۲۹۵ درجه کلوین است. جهت بازگرداندن کرنش پسماند، دمای آلیاژ را به ۳۲۰ درجه کلوین افزایش می دهیم.

جدول (۱): مشخصات آلیاژ حافظه دار [۴]

۷۰	مدول یانگ فاز آستونیت (GPa)
۳۰	مدول یانگ فاز مارتنزیت (GPa)
۰/۲۲	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
۶۴۵۰	چگالی (Kg/m^3)
۱۸	دمای شروع مارتنزیتی شدن ($^{\circ}\text{C}$)
-۲	دمای پایان مارتنزیتی شدن ($^{\circ}\text{C}$)
۲۲	دمای شروع آستونیتی شدن ($^{\circ}\text{C}$)
۳۸	دمای پایان آستونیتی شدن ($^{\circ}\text{C}$)



شکل (۳): مقایسه ۴ نمودار مختلف از اثر شبه الاستیک در دمای ۳۱۵ درجه کلوین.

Elastic
Else
Reverse transformation
Elseif
حالت خنثی بر مسئله حاکم
 $\Phi_{n+1}^{(0)} - \Psi_n = 0$ (است)

Elastic
Endif.

شرط تداوم تغییر فاز در معادله (۱۸) آمده است:

$$\begin{aligned} \Phi &= \Psi(\sigma + d\sigma, T + dT) - \Psi(\sigma, T) \\ &= \Psi(\sigma_{n+1}^{(0)}, T_{n+1}) - \Psi(\sigma_n, T_n) = \partial_{\sigma} \Psi : d\sigma \\ &\quad + \partial_T \Psi dT \end{aligned} \quad (18)$$

۴- اعتبارسنجی کد نوشته شده

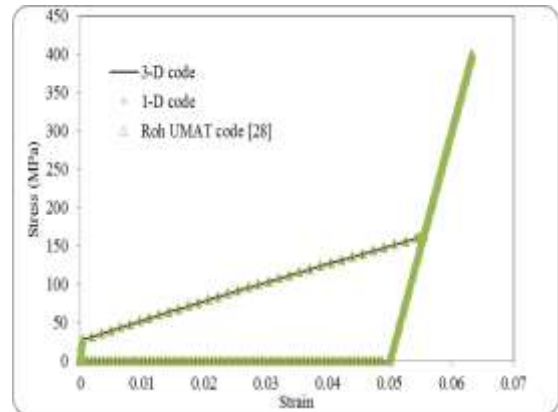
در این تحقیق برای اطمینان از صحت کد نوشته شده از مدل سه بعدی استفاده شده در پژوهش لاگوداس [۴] که مکعبی با اضلاع ۱ متر در آن بررسی شده، استفاده می شود. این مکعب از یک طرف به طور کامل مهار شده و از طرف دیگر با نیروی ۵۰۰ مگانیوتن کشیده می شود. این ۵۰۰ مگا نیوتن به صورت ۴ نیروی ۱۲۵ مگانیوتنی در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ می توان این مکعب را مشاهده کرد.

مدل یک بعدی در نظر گرفته شده برای آزمودن کد نوشته شده یک المان truss با سطح مقطع یک متر که دقیقاً برابر با سطح مقطع مکعب در نظر گرفته شده در شکل ۲ می باشد. همچنین طول این المان برابر با یک متر بوده که دقیقاً این مکعب را شبیه سازی می کند. علاوه بر این نتایج اجزاء محدود که توسط رو [۵] ارائه شده است نیز مورد بررسی قرار می گیرد. در این مدل نیز مکعبی همانند مدل لاگوداس مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام مدل ها آلیاژ انتخابی دارای مشخصاتی به صورت جدول ۱ می باشد.

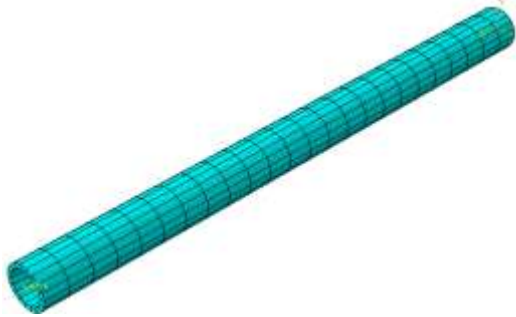


شکل (۲): مدل سه بعدی در نظر گرفته شده توسط لاگوداس [۴].

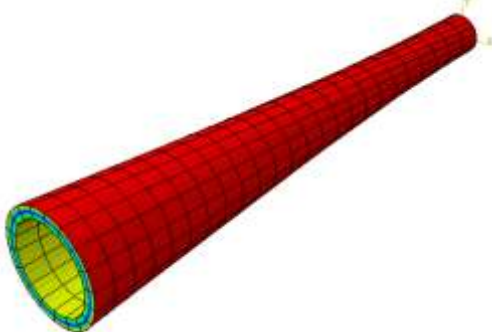
در نظر گرفته می‌شود. طول میل به ۲۴ قسمت و راستای شعاع به ۱۸ قسمت تقسیم‌شده در کل دارای ۴۳۲ المان است. یک انتهای آن ثابت بوده و انتهای دیگر تحت چرخشی به میزان ۱ رادیان قرار می‌گیرد. دمای جسم در طول تحلیل ثابت و برابر با ۵۲ درجه سانتی‌گراد بوده که همان دمای پایان آستونیتی شدن است. در شکل‌های ۶ و ۷ آن مشاهده می‌شود. در شکل ۸ هم مقایسه نمودارهای تنش و کرنش در راستای $Z\theta$ برای کد نوشته‌شده و کد لاگوداس مشاهده می‌شود.



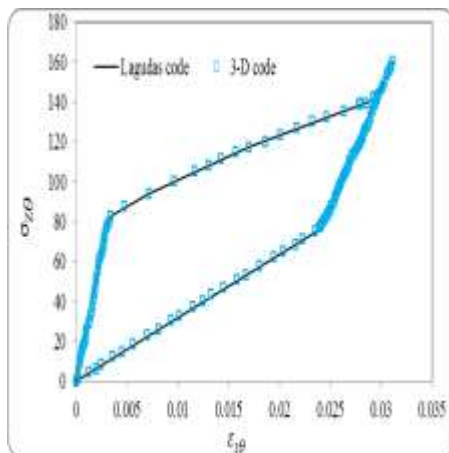
شکل (۴): مقایسه اثر حافظه‌داری در کد یک‌بعدی، سه‌بعدی و اجزا محدود.



شکل (۶): استوانه جدار نازک قبل از بارگذاری.



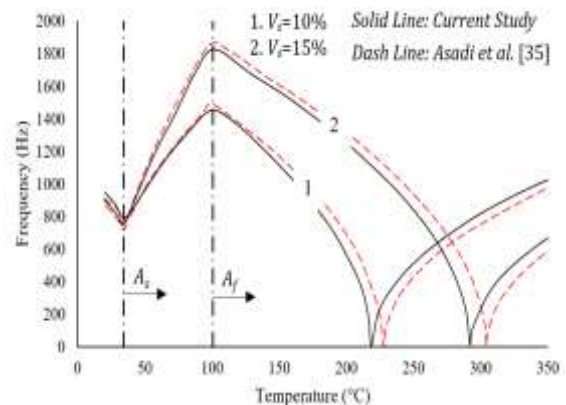
شکل (۷): استوانه جدار نازک پس از بارگذاری.



شکل (۸): نمودارهای تنش-کرنش در راستای $Z\theta$ اثر شبه الاستیک به‌دست‌آمده توسط کد لاگوداس و کد سه‌بعدی.

در نمودار شکل‌های ۳ و ۴ اعتبارسنجی کد در حالت تنش تک‌محوره بررسی شد. در ادامه به اعتبارسنجی کد نوشته شده در بخش ارتعاشات و کمانش همچنین مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جهت بررسی دقت شبیه‌سازی در بخش ارتعاشات یک ورق کامپوزیتی کمانش یافته، مقایسه‌ای بین نتایج پژوهش حاضر و پژوهش اسدی و همکاران [۳۵] برای یک کامپوزیت هیبریدی با ابعاد $0.25 \times 0.1 \times 0.01$ و ضخامت 0.01 متر و لایه چینی $(5/-10/0^{SMA}/0^{SMA}/10/-5)$ صورت گرفته و در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، نتایج شبیه‌سازی در این بخش هم دارای دقت قابل‌قبولی می‌باشد.



شکل (۵): مقایسه ارتعاشات ورق کامپوزیتی قبل و پس از کمانش حرارتی.

در ادامه درستی کد در حالت پیچش بررسی می‌شود. به همین منظور یک استوانه جدار نازک به طول ۸۲ میلی‌متر که دارای شعاع‌های داخلی و خارجی $2/5$ و $3/17$ میلی‌متر

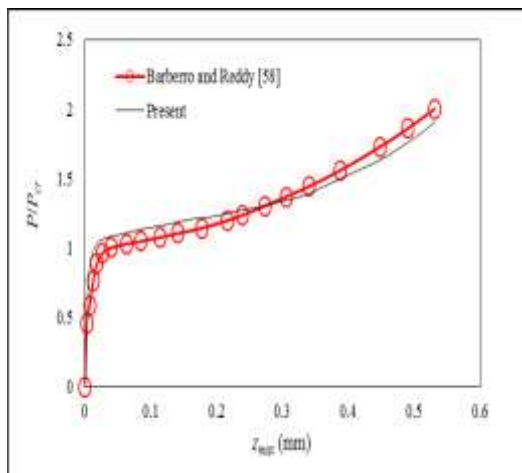
جدول (۲): مشخصات فوم WF 51 [۳۶].

$E_{xx} = E_{yy} = E_{zz}$	۰/۰۸۵ GPa
$G_{xy} = G_{yz} = G_{zx}$	۰/۰۳ GPa
$\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{zx}$	۰/۴۲

جدول (۳): مشخصات کولار-اپوکسی [۳۷].

E_1	۸۷ GPa
E_2	۵/۵ GPa
G_{12}	۲/۲ GPa
ν_{12}	۰/۳۴

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی در این پژوهش، نمودار نسبت نیرو به نیروی بحرانی به‌ازای حداکثر تغییر مکان در راستای ضخامت یک ماده مرکب با لایه چینی پادمتقارن، در مقایسه با نتایج باربر و ردی [۳۸] در شکل ۱۰ رسم شده است.



شکل (۱۰): اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزاری برای پس‌کمانش یک ماده مرکب با لایه چینی پادمتقارن.

نتایجی که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود را می‌توان ناشی از صحت مدل‌سازی قلمداد کرده و به نتایج پیش‌رو اطمینان حاصل کرد.

۲-۵- نتایج

با حصول اطمینان از اعتبار مدل‌سازی اینک به بررسی اثرات وجود آلیاژ حافظه‌دار در پوسته یا هسته، مقدار آن، فاصله از محور خنثی و زاویه الیاف بر مقدار بار نهایی

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود نمودارهای اثر شبه‌الاستیک کد لاگوداس و کد نوشته‌شده کاملاً بر یکدیگر منطبق بوده و هیچ‌گونه خطایی در کد مشاهده نمی‌شود.

۵- کمانش و پس‌کمانش پانل ساندویچی با هسته فوم

کمانش در انواع سازه‌ها امری بسیار ناخوشایند می‌باشد. همچنین شناخت رفتار پس از اتفاق افتادن این پدیده، برای یافتن راه‌کارهایی جهت مقابله با آن بسیار مهم و حیاتی خواهد بود. در ادامه به شناخت مقدار بار بحرانی کمانش، رفتار پس از کمانش و همچنین اثرات حضور آلیاژ حافظه‌دار در پانل هسته ساندویچی پرداخته خواهد شد.

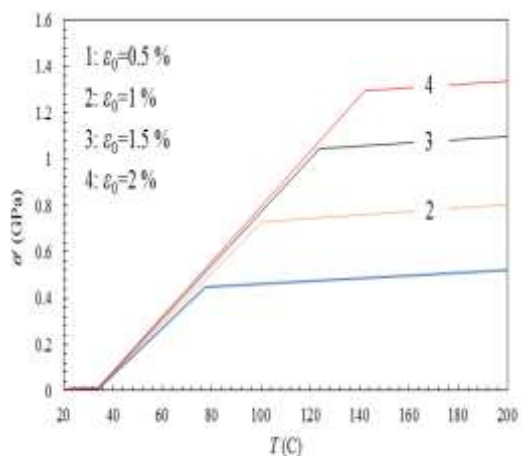
۵-۱- کمانش و پس‌کمانش پانل ساندویچی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار

در این قسمت به شبیه‌سازی پانل ساندویچی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار پرداخته و کمانش و پس‌کمانش آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پانل ساندویچی مورد تحلیل در این تحقیق در شکل ۹ نشان داده شده است.

طول و عرض این سازه به ترتیب ۱ و ۰/۵ متر بوده و از هسته فوم WF 51 و پوسته کولار-اپوکسی تشکیل شده است. ضخامت پوسته ۶ سانتی‌متر و ضخامت هر یک از رویه‌ها برابر با ۱ سانتی‌متر است. نیروی محوری نیز در راستای طول پانل ساندویچی وارد شده، و طرف دیگر گیردار است. در جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات فوم WF 51 [۳۶]، و کولار-اپوکسی [۳۷] آورده شده است. همچنین مشخصات الیاف آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین لازم به‌ذکر است که در این تحقیق از خواص آسیب استفاده نشده و تحلیل پس‌کمانش در آباکوس، طبق تحقیقات محققین دیگر، به صورت یک نقص اولیه بیان شده است.



شکل (۹): پانل ساندویچی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار.



شکل (۱۲): تنش ایجاد شده در آلیاژ به ازای کرنش اولیه.

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، اثر وجود آلیاژ حافظه‌دار در هر دو حالت فعال و غیرفعال در هسته مثبت بوده و باعث افزایش نیروی بحرانی کمانش شده است. اما افزایش این مقادیر در حالت فعال بسیار چشمگیر است. به‌طوری‌که هر چه کرنش اولیه بیشتر باشد، این افزایش بیشتر خواهد بود. لازم به ذکر است که با استفاده از کرنش‌های اولیه با مقادیر بالاتر، می‌توان مقاومت بیشتری در پانل ساندویچی در برابر کمانش و همچنین رفتار پس از کمانش ایجاد کرد.

جدول (۴): نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول به ازای

درصدهای متفاوت آلیاژ در هسته.

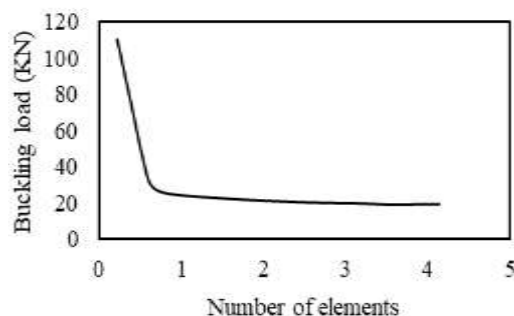
SMA volume fraction in the core		Buckling load (KN/m)			
		۰	۱۰	۲۰	۵۰
Mode 1st	Activated	۱۵۶۵۲/۱	۱۶۹۸۸/۳	۱۷۰۵۷/۷	۱۷۳۲۰/۸
	Not Activated	۱۵۶۵۲/۱	۱۶۹۲۷/۵	۱۶۹۲۸/۴	۱۶۹۲۹/۳
Mode 2nd	Activated	۱۷۹۵۴/۳	۱۹۱۱۱/۶	۱۹۱۸۰/۳	۱۹۴۵۹/۲
	Not Activated	۱۷۹۵۴/۳	۱۹۰۵۰/۵	۱۹۰۵۲/۸	۱۹۰۵۸
Mode 3th	Activated	۲۱۶۳۱/۲	۲۲۶۶۵/۸	۲۲۷۳۹/۹	۲۳۰۰۵/۶
	Not Activated	۲۱۶۳۱/۲	۲۲۶۰۳/۵	۲۲۶۰۸/۷	۲۲۶۲۱/۱
Mode 4th	Activated	۲۳۷۸۱/۴	۲۴۷۵۱/۶	۲۴۸۲۶/۲	۲۵۰۹۳/۲
	Not Activated	۲۳۷۸۱/۴	۲۴۶۸۸/۸	۲۴۶۹۸/۵	۲۴۷۲۴/۵
Mode 5th	Activated	۲۴۶۴۸/۵	۲۴۷۲۰/۳	۲۴۷۹۹/۵	۲۴۰۸۴/۵
	Not Activated	۲۴۶۴۸/۵	۲۴۲۵۸/۸	۲۴۲۷۲/۷	۲۴۳۱۱/۷

کمانش و همچنین رفتار پس از کمانش پانل ساندویچی پرداخته خواهد شد.

ابتدا اثرات موارد گفته شده به میزان پنج بار کمانشی مختلف پانل ساندویچی در جداولی نشان داده شده و پس از آن به ادامه بحث پرداخته خواهد شد. آلیاژها در دو حالت مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. در حالت اول آلیاژ دارای کرنش اولیه بوده و در دمای بالاتر از پایان آستونیتی شدن مورد تحلیل قرار می‌گیرند که به این حالت، فعال گفته می‌شود. در حالت فعال، با توجه به کرنش اولیه ایجاد شده در آلیاژ، تنش در آلیاژ به وجود می‌آید که نیروهای بحرانی کمانش و رفتار پس از آن را به شکل قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. اندازه المان‌ها ۱×۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است، به‌طوری‌که اندازه کوچک‌تر المان‌ها تأثیری در نتایج نداشته و فقط حجم محاسبات را افزایش می‌دهد. نتایج کمانش مود اول پانل که دارای ۱۰ درصد آلیاژ حافظه‌دار فعال در هسته است جهت بررسی همگرایی مش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، همگرایی نتایج در تعداد ۵۰۰۰۰ المان اتفاق افتاده است.

در شکل ۱۲، اثرات ایجاد کرنش اولیه و تنش ایجاد شده در آن‌ها را می‌توان مشاهده کرد. در تحلیل‌های پیش رو، کرنش اولیه برابر با ۱ درصد در نظر گرفته شده است. حالت دوم نیز بدون در نظر گرفتن کرنش اولیه بوده و در آلیاژ در دمای پایین‌تر از پایان مارتنزیتی شدن قرار دارد. در این حالت آلیاژ غیرفعال است.

در جدول ۴، نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول برای درصدهای متفاوت آلیاژ حافظه‌دار در هسته نشان داده شده است. در تمام جداول، نیروهای نشان داده شده دارای واحد کیلو نیوتن بر متر (KN/m) هستند.



شکل (۱۱): بررسی همگرایی مش در تحلیل کمانش پانل ساندویچی.

جدول (۶): نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول به‌ازای فواصل مختلف الیاف از محور خنثی هسته

Distance of SMAs from neutral axis of core (mm) Buckling load (KN/m)		۰	۵	۱۰	۲۵
		Mode 1st	Activated	۱۶۹۸۸/۳	۱۷۲۴۵/۳
	Not Activated	۱۶۹۲۷/۵	۱۷۱۶۲/۴	۱۹۱۱۳/۶	۲۵۴۲۵/۹
Mode 2nd	Activated	۱۹۱۱۱/۶	۱۹۲۸۹/۹	۲۱۳۴۶/۳	۲۷۵۹۹/۸
	Not Activated	۱۹۰۵۰/۵	۱۹۲۰۴/۸	۲۱۱۲۸/۹	۲۷۵۹۳/۱
Mode 3th	Activated	۲۲۶۶۵/۸	۲۲۸۳۹/۶	۲۴۸۶۰	۳۰۸۷۲/۴
	Not Activated	۲۲۶۰۳/۵	۲۲۷۴۰/۴	۲۴۷۴۱/۶	۳۰۶۵۵/۷
Mode 4th	Activated	۲۴۷۵۱/۶	۲۴۷۷۸/۶	۲۶۸۰۱/۹	۳۳۸۹۰/۱
	Not Activated	۲۴۶۸۸/۸	۲۴۶۹۹	۲۶۶۸۰/۲	۳۲۶۸۶/۶
Mode 5th	Activated	۲۶۷۲۰/۳	۲۷۰۳۹/۲	۲۹۰۵۹/۱	۳۴۷۵۵/۶
	Not Activated	۲۶۲۵۸/۸	۲۶۹۳۶/۸	۲۸۹۳۷/۹	۳۴۵۳۳/۹

همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، اثرات وجود الیاف در پوسته‌ها، به خصوص زمانی که دارای فاصله از محور خنثی پوسته‌ها وجود دارد بسیار زیاد است. این افزایش‌ها در زمانی که الیاف فعال است با شیب بیشتری بوده که در پایداری پانل ساندویچی تأثیر به‌سزایی خواهد گذاشت.

جدول (۷): نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول به‌ازای فواصل مختلف الیاف از محور خنثی پوسته‌ها.

SMA volume fraction in the faces Buckling load (KN/m)		۰	۱	۴
		Mode 1st	Activated	۱۵۷۱۵/۴
	Not Activated	۱۵۶۳۳	۲۵۶۲۳/۱	۳۱۵۶۶/۳
Mode 2nd	Activated	۱۸۰۲۱/۶	۲۸۱۲۸/۶	۳۴۱۷۵/۹
	Not Activated	۱۷۹۳۴	۲۷۹۲۰/۸	۳۳۸۴۱/۶
Mode 3th	Activated	۲۱۶۹۴/۳	۳۱۸۱۵/۷	۳۷۸۳۸/۲
	Not Activated	۲۱۶۰۹	۳۱۶۰۶/۹	۳۷۵۹۹/۵
Mode 4th	Activated	۲۳۸۹۰/۳	۳۳۹۰۹/۱	۳۹۵۴۲/۴
	Not Activated	۲۳۷۷۴/۷	۳۳۶۹۴/۵	۳۹۲۱۷/۹
Mode 5th	Activated	۲۶۶۱۵/۳	۳۷۰۴۰/۴	۴۲۳۶۱
	Not Activated	۲۶۵۴۱/۵	۳۶۸۲۱/۵	۴۱۹۹۹/۵

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که حضور الیاف حافظه‌دار در پوسته در حالت غیرفعال در مودهای پایین باعث کاهش و در مودهای بالا باعث افزایش کارایی پانل در برابر کمانش خواهد شد. اما این موضوع برای حالتی که الیاف فعال است بسیار متفاوت بوده و هر چه درصد آن بیشتر شود، نیروهای بحرانی کمانش در هر پنج مود، بهبود چشمگیری می‌یابد.

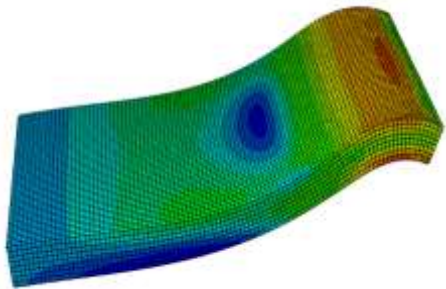
اثرات فاصله الیاف از محور خنثی هسته و پوسته‌ها در جدول‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. درصد الیاف در هسته برابر با ۱۰ بوده و توزیع آن به صورت متقارن در بالا و پایین محور خنثی خمش است. همچنین درصد الیاف در پوسته‌ها برابر با ۳۰ و متقارن در نظر گرفته شده که سهم آن در کل پانل با سهم ۱۰ درصدی پوسته برابر بوده تا مقایسه‌ای بهتر صورت پذیرد. همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است با افزایش فاصله از محور خنثی در هسته پانل ساندویچی، نیروی بحرانی کمانش افزایش می‌یابد. این افزایش در فاصله‌های بیشتر با شیب بیشتری دنبال خواهد شد. همچنین مطابق انتظار، وقتی الیاف در حالت فعال باشد، مقدار نیروی بحرانی کمانش را نسبت به حالت غیرفعال افزایش می‌دهد که این افزایش، در فواصل بیشتر از محور خنثی شیب بیشتری دارد.

جدول (۵): نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول به‌ازای درصدهای متفاوت الیاف در پوسته‌ها.

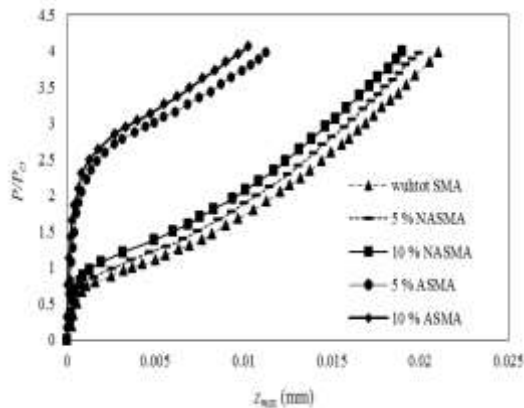
Distance of SMAs from neutral axis of faces (mm) Buckling load (KN/m)		۰	۱۰	۲۰	۵۰
		Mode 1st	Activated	۱۵۶۵۲/۱	۱۵۶۹۸/۵
	Not Activated	۱۵۶۵۲/۱	۱۵۶۳۴/۴	۱۵۶۳۳/۴	۱۵۶۳۲/۶
Mode 2nd	Activated	۱۷۹۵۴/۳	۱۷۹۹۸/۳	۱۸۰۰۸/۲	۱۸۰۴۸/۵
	Not Activated	۱۷۹۵۴/۳	۱۷۹۳۵/۷	۱۷۹۳۴/۵	۱۷۹۳۳/۶
Mode 3th	Activated	۲۱۶۳۱/۲	۲۱۶۷۵/۳	۲۱۶۸۳/۹	۲۱۷۲۳/۳
	Not Activated	۲۱۶۳۱/۲	۲۱۶۱۰/۹	۲۱۶۰۹/۶	۲۱۶۰۸/۶
Mode 4th	Activated	۲۳۷۸۱/۴	۲۳۶۳۸/۶	۲۳۸۵۱/۵	۲۳۷۹۲/۱
	Not Activated	۲۳۷۸۱/۴	۲۳۷۷۴/۴	۲۳۷۷۴/۵	۲۳۷۷۴/۹
Mode 5th	Activated	۲۶۶۴۸/۵	۲۶۶۴۷/۷	۲۶۵۷۴/۸	۲۶۶۴۹/۷
	Not Activated	۲۶۶۴۸/۵	۲۶۳۹۲/۹	۲۶۵۰۲/۱	۲۶۵۷۴/۱

در ادامه به رفتار پس از کمانش پانل‌های ساندویچی پرداخته خواهد شد. ابتدا نمودارهای نسبت نیرو به نیروی بحرانی به ازای حداکثر تغییر مکان در راستای ضخامت در درصدهای متفاوت الیاف رسم خواهد شد. در شکل ۱۳ ورق کمانش یافته در آباکوس نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمودار نسبت نیرو به نیروی بحرانی به ازای حداکثر تغییر مکان در راستای ضخامت برای حالت‌های بدون الیاف، و با الیاف در هسته و پوسته نشان داده شده است. کرنش اولیه برای حالت اولیه برابر با ۱٪ در نظر گرفته شده است. در این شکل‌ها آلیاژ حافظه‌دار غیرفعال به صورت مخفف 'NASMA' و آلیاژ حافظه‌دار فعال با مخفف 'ASMA' نمایش داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، وجود آلیاژ حافظه‌دار در هسته و یا پوسته‌ها در هر دو حالت فعال و غیرفعال باعث بهبود عملکرد پائل خواهد شد. تأثیر وجود این الیاف در هسته بیشتر بوده، که در مقایسه دو شکل مذکور کاملاً مشخص است.



شکل (۱۳): نتایج مربوط به پائل کمانش یافته در آباکوس.



شکل (۱۴): اثر وجود الیاف آلیاژ حافظه‌دار در هسته بر رفتار پس از کمانش.

همچنین در جدول‌های ۸ و ۹ اثرات تغییر زاویه الیاف در نیروی بحرانی کمانش را نشان می‌دهند. درصد الیاف در هسته ۱۰ و در پوسته‌ها ۲۵ درصد است.

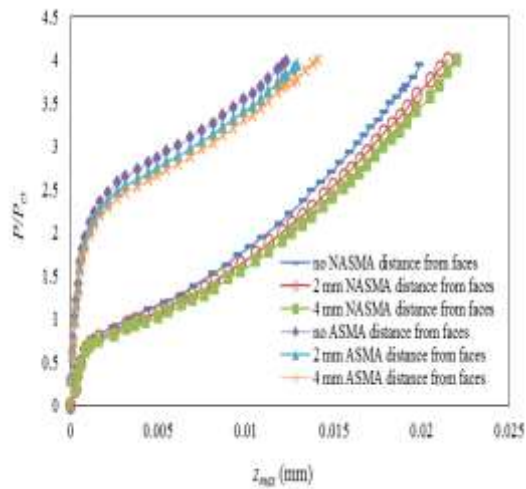
جدول (۸): نیروی بحرانی کمانش پنج‌مود اول به‌ازای زوایای مختلف الیاف در هسته.

Buckling load (KN/m)		Angle of SMAs in core		
		۰	۵	۲۰
Mode 1st	Activated	۱۶۹۸۸/۳	۱۶۹۸۰/۲	۱۶۹۴۸/۷
	Not Activated	۱۶۹۲۷/۵	۱۶۹۱۵/۳	۱۶۸۸۱/۲
Mode 2nd	Activated	۱۹۱۱۱/۶	۱۹۱۰۰/۱	۱۹۰۶۶/۸
	Not Activated	۱۹۰۵۰/۵	۱۹۰۳۸/۱	۱۹۰۰۲/۸
Mode 3th	Activated	۲۲۶۶۵/۸	۲۲۶۵۴/۹	۲۲۶۲۵/۲
	Not Activated	۲۲۶۰۲/۵	۲۲۵۹۲/۹	۲۲۵۵۹/۹
Mode 4th	Activated	۲۴۷۵۱/۶	۲۴۷۴۰	۲۴۷۰۷/۱
	Not Activated	۲۴۶۸۸/۸	۲۴۶۷۷/۲	۲۴۶۴۸/۵
Mode 5th	Activated	۲۶۷۲۰/۳	۲۶۷۰۵	۲۶۶۵۹/۴
	Not Activated	۲۶۲۵۸/۸	۲۶۲۴۵/۵	۲۶۲۱۱/۱

جدول (۹): نیروی بحرانی کمانش پنج‌مود اول به‌ازای زوایای مختلف الیاف در پوسته‌ها.

Buckling load (KN/m)		Angle of SMAs in faces		
		۰	۵	۲۰
Mode 1st	Activated	۱۵۷۱۵/۴	۱۵۷۰۷	۱۵۶۸۲/۵
	Not Activated	۱۵۶۳۳	۱۵۶۲۸/۸	۱۵۶۱۱/۹
Mode 2nd	Activated	۱۸۰۲۱/۶	۱۸۰۱۵/۲	۱۷۹۸۸/۴
	Not Activated	۱۷۹۳۴	۱۷۹۳۰/۸	۱۷۹۰۹/۴
Mode 3th	Activated	۲۱۶۹۴/۲	۲۱۶۸۸/۲	۲۱۶۳۳/۱
	Not Activated	۲۱۶۰۹	۲۱۶۰۲/۵	۲۱۵۷۳/۴
Mode 4th	Activated	۲۳۸۹۰/۳	۲۳۸۸۲/۷	۲۳۸۴۷
	Not Activated	۲۳۷۷۴/۷	۲۳۷۶۷/۴	۲۳۷۳۶/۷
Mode 5th	Activated	۲۶۶۱۵/۳	۲۶۶۹۱/۴	۲۶۹۱۸/۹
	Not Activated	۲۶۵۴۱/۵	۲۶۱۲۲/۵	۲۶۹۵۹/۵

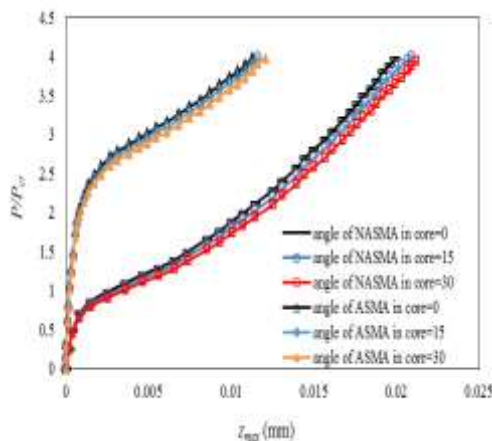
با توجه به جدول‌های ۸ و ۹، افزایش زاویه در هسته و پوسته‌ها از حالت اولیه در حالتی که آلیاژ غیرفعال است، باعث کاهش پایداری سازه خواهد شد. همچنین زمانی که آلیاژ فعال باشد، با افزایش زاویه مقدار پایداری کاهش یافته اما باز هم از حالت غیرفعال، مقادیر نیروهای بحرانی کمانش بالاتر است.



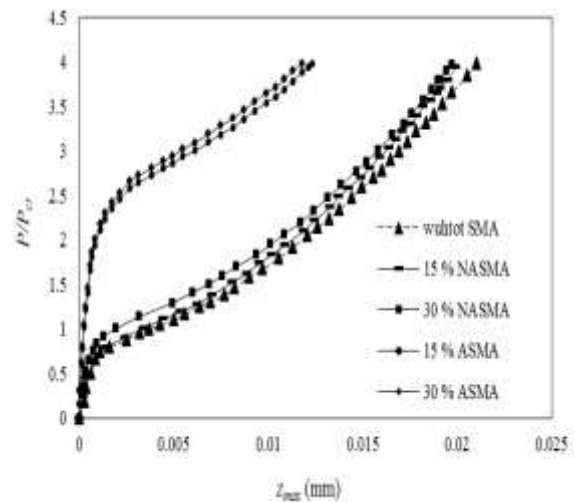
شکل (۱۷): اثر فاصله الیاف آلیاژ حافظه‌دار از خط تقارن پوسته‌ها بر رفتار پس از کمانش.

همان‌طور که در دو شکل ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است، افزایش فاصله الیاف آلیاژ حافظه‌دار از خط تقارن هسته باعث کاهش کارایی و افت عملکرد پانل ساندویچی خواهد شد.

در ادامه به بررسی اثر زاویه الیاف پرداخته خواهد شد. اثر تغییر زاویه الیاف در هسته و پوسته‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده‌اند. همانند شکل‌های قبل، در این شکل‌ها کرنش اولیه الیاف‌های فعال برابر با ۱ درصد و درصد حجمی آن‌ها در هسته ۵ و در هر کدام از پوسته‌ها برابر با ۱۵ است.

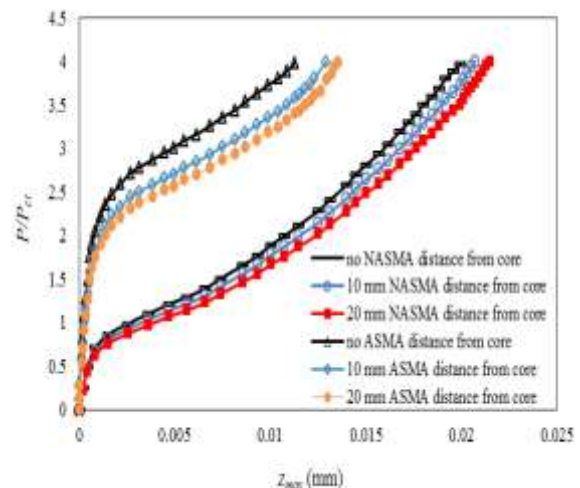


شکل (۱۸): اثر زاویه الیاف آلیاژ حافظه‌دار در هسته بر رفتار پس از کمانش.

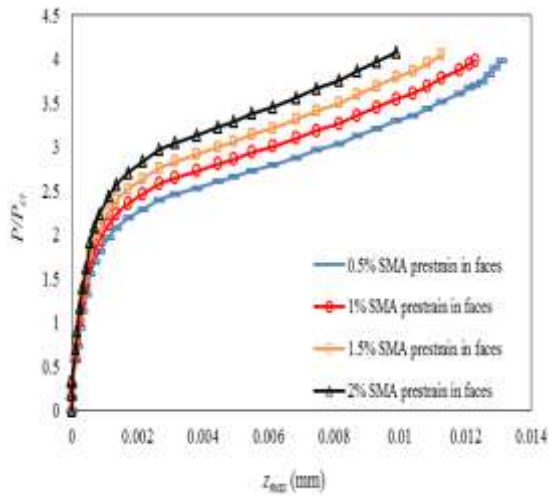


شکل (۱۵): اثر وجود الیاف آلیاژ حافظه‌دار در پوسته‌ها بر رفتار پس از کمانش.

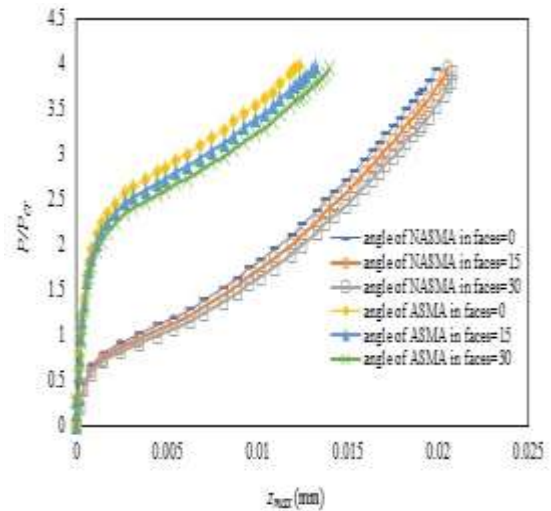
همچنین در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، اثرات فاصله الیاف از خط تقارن هسته و پوسته‌ها بر نسبت نیرو به نیروی بحرانی به ازای حداکثر تغییر مکان در راستای ضخامت نشان داده شده است. در این شکل‌ها به ترتیب الیاف ۵ درصد از کل هسته و همچنین ۱۵ درصد از هر کدام از پوسته‌ها را تشکیل داده و کرنش اولیه الیاف برابر با ۱ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۶): اثر فاصله الیاف آلیاژ حافظه‌دار از خط تقارن هسته بر رفتار پس از کمانش.



شکل (۲۱): اثر کرنش اولیه آلیاژ حافظه‌دار در پوسته‌ها بر رفتار پس از کمانش.



شکل (۱۹): اثر زاویه الیاف حافظه‌دار در پوسته‌ها بر رفتار پس از کمانش.

همان‌طور که در دو شکل ۲۰ و ۲۱ مشاهده می‌شود، هر چه کرنش اولیه آلیاژ بالاتر باشد رفتار پس از کمانش به طور قابل توجهی بهبود خواهد یافت. البته اثر این افزایش در هسته قابل توجه‌تر بوده که به دلیل وجود این آلیاژها روی محور خنثی پانل ساندویچی هستند.

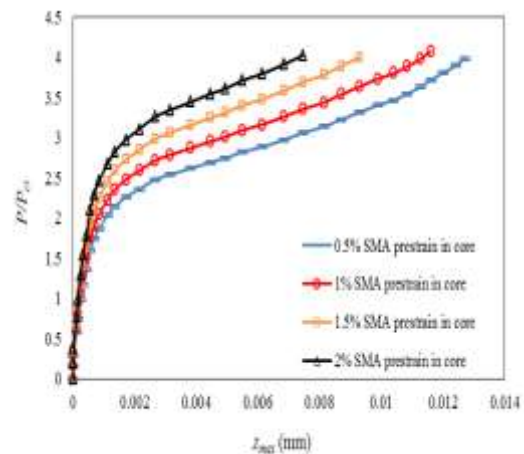
۶- نتیجه‌گیری

در انتهای پژوهش به جمع‌بندی نهایی در خصوص کمانش و پس‌کمانش پرداخته خواهد شد. این نتایج به صورت مختصر به شرح زیر می‌باشند:

- وجود آلیاژ حافظه‌دار در هسته و یا پوسته نه تنها باعث افزایش پایداری پانل هسته ساندویچی شده، بلکه رفتار پس از کمانش را نیز تحت تأثیر مثبت قرار داده و باعث بهبودی عملکرد آن خواهد شد.
- دور شدن آلیاژ از خط تقارن هسته موجب افزایش پایداری پانل خواهد شد. اما این دور شدن از هسته در رفتار پس از کمانش تأثیر منفی گذاشته و کاهش کارایی را موجب خواهد شد.
- همچنین هر چه زاویه الیاف از حالت اولیه خود منحرف‌تر شوند، علاوه بر تأثیر منفی در پایداری پانل ساندویچی، باعث افت عملکرد آن در رفتار پس از کمانش نیز خواهد شد.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است، افزایش زاویه در الیاف باعث کاهش کارایی پانل ساندویچی خواهد شد که البته این افت عملکرد در زمانی که آلیاژ غیرفعال است بیشتر نیز خواهد شد.

در نهایت به بررسی اثرات مقدار کرنش اولیه در آلیاژهای فعال بر رفتار پس از کمانش پرداخته خواهد شد. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب اثرات کرنش اولیه بر رفتار پس از کمانش در هسته و پوسته‌ها پرداخته خواهد شد. در این شکل‌ها، درصد حجمی آلیاژ در هسته و پوسته‌ها به ترتیب ۵ و ۱۵ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۲۰): اثر کرنش اولیه آلیاژ حافظه‌دار در هسته بر رفتار پس از کمانش.

thickness subjected to uniform external pressure”, *Thin-walled Struct.* Vol. 44, No. 8, pp. 904–909, 2006.

۷- مراجع

13. Li, S., Zhang, J., and Zhao, Y. “Thermal post-buckling of functionally graded material Timoshenko beams”, *Appl. Math. Mech.* Vol. 27, pp. 803–810, 2006.
14. Zakeri A. A., and Alinia, M. M. “An analytical study on post-buckling behaviour of imperfect sandwich panels subjected to uniform thermal stresses”, *Thin-walled Struct.* Vol. 44, No. 3, pp. 344–353, 2006.
15. Hur, S. H., Son, H. J., Kweon, J. H., and Choi, J. H. “Postbuckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure”, *Compos. Struct.* Vol. 86, No. 1, pp. 114–124, 2008.
16. Khaloo, A. R., Eshghi, I., and Aghl, P. P. “Study of Behavior of Reinforced Concrete Beams with Smart Rebars Using Finite Element Modeling”, *Int. J. Civ. Eng.*, Vol. 8, No. 3, pp. 221–231, 2010.
17. Lu, P., Cui, F. S., and Tan, M. J. “A theoretical model for the bending of a laminated beam with SMA fiber embedded layer”, *Compos. Struct.* Vol. 90, No. 4, pp. 458–464, 2009.
18. Huang, H., and Han, Q. “Nonlinear buckling and postbuckling of heated functionally graded cylindrical shells under combined axial compression and radial pressure”, *Int. J. Non. Linear. Mech.* Vol. 44, No. 2, pp. 209–218, 2009.
19. Huang, H., and Han, Q. “Nonlinear elastic buckling and postbuckling of axially compressed functionally graded cylindrical shells”, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 51, No. 7, pp. 500–507, 2009.
20. Shen, H. S., Yang, J., and Kitipornchai, S. “Postbuckling of internal pressure loaded FGM cylindrical shells surrounded by an elastic medium”, *Eur. J. Mech. - A/Solids.* Vol. 29, No. 3, pp. 448–460, 2010.
21. Mirzaeifar, R., DesRoches, R., and Yavari, A. “Exact solutions for pure torsion of shape memory alloy circular bars”, *Mech. Mater.* Vol. 42, No. 8, pp. 797–806, 2010.
22. Li, S. R., Yu, W. S. and Batra, R. C. “Free vibration of thermally pre/post-buckled circular thin plates embedded with shape memory alloy fibers”, *J. Therm. Stress.* Vol. 33, No. 2, pp. 79–96, 2010.
23. Shen, H. S., and Wang, H. “Thermal postbuckling of functionally graded fiber reinforced composite cylindrical shells
1. Tobushi, H., and Tanaka, K. “Deformation of a shape memory alloy helical spring (analysis based on stress-strain-temperature relation)”, *JSME Int. journal. Ser. 1, solid Mech. strenght Mater.* Vol. 34, No. 1, pp. 83–89, 1991.
2. Epps, J., and Chandra, R. “Shape memory alloy actuation for active tuning of composite beams”, *Smart Mater. Struct.* Vol. 6, No. 3, pp. 251, 1997.
3. Pietrzakowski, M. “Dynamics of thermally activated shape memory alloy reinforced laminated beams”, *J. Theor. Appl. Mech.* Vol. 36, No. 4, pp. 879–893, 1998.
4. Qidwai M. A., and Lagoudas, D. C. “Numerical implementation of a shape memory alloy thermomechanical constitutive model using return mapping algorithms”, *Int. J. Numer. Methods Eng.* Vol. 47, No. 6, pp. 1123–1168, 2000.
5. Roh, J. H., Han, J. H., and Lee, I. “Finite element analysis of adaptive inflatable structures with SMA strip actuator”, in *Smart structures and materials.* pp. 460–471, 2005.
6. Lammering R., and Schmidt, I. “Experimental investigations on the damping capacity of NiTi components”, *Smart Mater. Struct.* Vol. 10, No. 5, pp. 853, 2001.
7. Lau, K. “Vibration characteristics of SMA composite beams with different boundary conditions”, *Mater. Des.* Vol. 23, No. 8, pp. 741–749, 2002.
8. Shen, H. S. “Postbuckling analysis of pressure-loaded functionally graded cylindrical shells in thermal environments”, *Eng. Struct.* Vol. 25, No. 4, pp. 487–497, 2003.
9. Tafreshi, A. “Buckling and post-buckling analysis of composite cylindrical shells with cutouts subjected to internal pressure and axial compression loads”, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* Vol. 79, No. 5, pp. 351–359, 2002.
10. Liew, K. M., Yang J., and Kitipornchai, S. “Thermal post-buckling of laminated plates comprising functionally graded materials with temperature-dependent properties”, *J. Appl. Mech.* Vol. 71, No. 6, pp. 839–850, 2004.
11. Kabele, P. “A Simplified Analysis of the Post-buckling Behavior of a Compressed Reinforcing Bar”, *Acta Polytech.* Vol. 44, No. 5–6, 2004.
12. Aghajari, S. Abedi, K., and Showkati, H. “Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying

31. KolAKowsKi, Z., MAniA, R. J., and GRudZiecKi, J. "Local nonsymmetrical postbuckling equilibrium path of the thin FGM plate", *Eksplot. i Niezawodn.* Vol. 17, No. 1, 2015.
32. Sreehari, V. M., and Maiti, D. K. "Buckling and post buckling characteristics of laminated composite plates with damage under thermo-mechanical loading", in *Structures*. Vol. 6, pp. 9–19, 2016.
33. Liang, C., and Rogers, C. A. "One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* Vol. 8, No. 4, pp. 285–302, 1997.
34. Tanaka, K. "A thermomechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior", *Res Mech.* Vol. 18, pp. 251–263, 1986.
35. Asadi, H., Bodaghi, M., Shakeri, M., and Aghdam M. M. "Nonlinear dynamics of SMA-fiber-reinforced composite beams subjected to a primary/secondary-resonance excitation", *Acta Mech.* Vol. 226, pp. 1–19, 2014.
36. Rizov, V., Shipsha, A., and Zenkert, D. "Indentation study of foam core sandwich composite panels", *Compos. Struct.* Vol. 69, No. 1, pp. 95–102, 2005.
37. Birman, V. "Stability of functionally graded shape memory alloy sandwich panels", *Smart Mater. Struct.* Vol. 6, No. 3, pp. 278, 1997.
38. Barbero, E. J., and Reddy, J. N. "Nonlinear analysis of composite laminates using a generalized laminated plate theory", *AIAA J.* Vol. 28, No. 11, pp. 1987–1994, 1990.
- surrounded by an elastic medium", *Compos. Struct.* Vol. 102, No. 0, pp. 250–260, 2013.
24. Barzegari, M. M., Dardel, M., and Fathi, A. "Vibration analysis of a beam with embedded shape memory alloy wires", *Acta Mech. Solida Sin.* Vol. 26, No. 5, pp. 536–550, 2013.
25. Panda, S. K., and Singh, B. N. "Post-buckling analysis of laminated composite doubly curved panel embedded with SMA fibers subjected to thermal environment", *Mech. Adv. Mater. Struct.* Vol. 20, No. 10, pp. 842–853, 2013.
26. Duc, N. D., and Quan, T. Q. "Nonlinear postbuckling of imperfect doubly curved thin shallow FGM shells resting on elastic foundations and subjected to mechanical loads", *Mech. Compos. Mater.* Vol. 49, No. 5, pp. 493–506, 2013.
27. Van Dung, D. "Research on nonlinear torsional buckling and post-buckling of eccentrically stiffened functionally graded thin circular cylindrical shells", *Compos. Part B Eng.* Vol. 51, pp. 300–309, 2013.
28. Andani, M. T., and Elahinia, M. "A rate dependent tension–torsion constitutive model for superelastic nitinol under non-proportional loading; a departure from von Mises equivalency", *Smart Mater. Struct.* Vol. 23, No. 1, pp. 15012, 2013.
29. Dey, T., and Ramachandra, L. S. "Buckling and postbuckling response of sandwich panels under non-uniform mechanical edge loadings", *Compos. Part B Eng.* Vol. 60, No. 0, pp. 537–545, Apr. 2014.
30. Shen, H. S. "Postbuckling of FGM cylindrical panels resting on elastic foundations subjected to lateral pressure under heat conduction", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 89, pp. 453–461, 2014.