



بررسی المان محدود کمانش پوسته کروی ساندویچی نسبتاً ضخیم با هسته مشبک و لایه‌های تقویت‌شده با سیم‌های حافظه‌دار شکلی

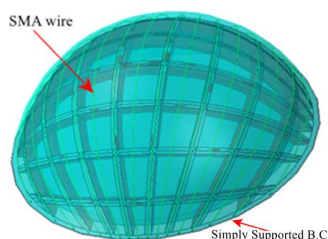
احمد دارابی^۱، کرامت ملک‌زاده فرد^{۲*}، سید مهدی نبوی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- شبیه‌سازی پوسته کروی در ABAQUS و زیر برنامه یومت انجام شده است.
- افزایش کسر حجمی سیم‌های SMA از ۰ تا ۰/۶ درصد به ازای α برابر با ۰/۱، باعث افزایش ۳۲۵ درصدی بار کمانش می‌گردد.

چکیده

در تحقیق حاضر، برای اولین بار رفتار کمانش پوسته‌های ساندویچی کروی نسبتاً ضخیم دارای هسته مشبک و رویه‌های تقویت‌شده با سیم‌های حافظه‌دار شکلی (SMA) مطالعه شده است. هسته پوسته به صورت مشبک و سلول‌های آن به صورت چهارضلعی بوده و رویه‌های پوسته توسط سیم‌های SMA با توزیع یکنواخت و تک‌جهته تقویت شده است. جهت انجام شبیه‌سازی‌ها از روش المان محدود و نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. رفتار سوپر الاستیک SMA با استفاده از مدل Brinson تعریف شده و تبدیلات فازی به کمک زیر برنامه UMAT در نرم‌افزار آباکوس اعمال شده است. پس از انجام شبیه‌سازی و استخراج نتایج، تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی مؤثر مانند شعاع انحنای پوسته، کسر حجمی سیم‌های SMA و میزان پیش‌تنیدگی آن‌ها بر بارهای کمانش پوسته بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیم‌های SMA باعث ایجاد تنش‌های بازیافتی شده که به صورت نیروی کششی بر لایه‌های بالایی پوسته اعمال می‌شود. این ویژگی باعث افزایش سفتی پوسته و در نتیجه بیشتر شدن بار کمانش می‌شود. افزایش کسر حجمی سیم‌های SMA از ۰ تا ۰/۶ درصد به ازای α برابر با ۰/۱، باعث افزایش ۳۲۵ درصدی در بار کمانش می‌گردد. علاوه بر این بار کمانش واحد حجم پوسته دارای هسته مشبک و بدون هسته مشبک به ترتیب برابر ۰/۷۱ و ۰/۷۹ به دست می‌آید که نشان می‌دهد وجود هسته مشبک باعث افزایش ۱۱ درصدی در بار کمانش ویژه می‌شود. این افزایش در کنار کاهش وزن سازه باعث آشکار شدن اهمیت استفاده از سازه‌های ساندویچی با هسته مشبک می‌شود.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

*نویسنده مسئول:

k.malekzadeh@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

پوسته دوانحنائی

سیم‌های SMA

هسته مشبک

تحلیل المان محدود

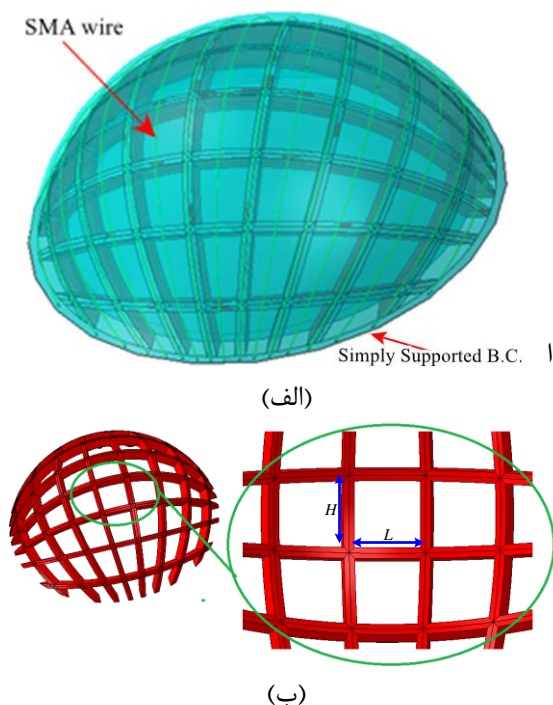
بار کمانش

۱- مقدمه

با توجه به استفاده گسترده پوسته‌ها در صنایع مختلف مانند سازه‌های هوافضا، صنایع دریایی، صنعت حمل‌ونقل، مهندسی مکانیک، مهندسی عمران و غیره تحقیقات زیادی این زمینه انجام پذیرفته است. صفحات سبک ساندویچی دارای نسبت استحکام به وزن بالایی هستند. این صفحات معمولاً از دو رویه فلزی و یا کامپوزیتی و یک هسته با چگالی پائین انتخاب می‌شوند. لایه میانی می‌تواند از جنس مواد پلاستیکی متخلخل مثل فوم، سازه لانه‌زنبوری، پروفیل‌های جدار نازک و یا ساختارهای مشبک باشند. با توجه به این ویژگی‌های مناسب پوسته‌ها، مطالعه رفتار کمانشی و ارتعاشی آن‌ها حائز اهمیت است. با توسعه مواد نوین مهندسی مانند مواد مدرج تابعی، انواع مختلف نانو ذرات [۱-۴] و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی [۵-۷]، مطالعه رفتار کمانشی سازه‌های ساندویچی تقویت‌شده با این مواد مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۸ و ۹]. کریمی اصل و احمدی [۱۰] با استفاده از تئوری مرتبه سوم تغییرشکل برشی به مطالعه رفتار کمانش ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی SMA با هسته ویسکوالاستیک پرداختند. ژانگ و همکاران [۱۱] به مطالعه پایداری و پس کمانش حرارتی صفحات دایروی تقویت‌شده با نانو صفحات گرافن و سیم‌های SMA پرداختند. اسدی و همکاران [۱۲-۱۴] جواب‌های دقیقی را به منظور مطالعه ارتعاشات آزاد و اجباری تیرهای کامپوزیتی هیبریدی SMA ارائه دادند.

نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که این سازه‌ها تحت اعمال بارهای حرارتی دچار کمانش و ناپایداری می‌شوند. دستجردی و همکاران [۱۵] به تحلیل خمشی صفحات کامپوزیتی بر اساس تئوری مرتبه بالای تغییرشکل برشی به روش کانترویچ توسعه‌یافته پرداختند. رحمانی و همکاران [۱۶] تحلیل ارتعاشات سازه ساندویچی با هسته مواد مدرج تابعی با استفاده از تئوری مرتبه بالا را ارائه دادند و ضمن ارائه یک تحلیل عددی از ارتعاشات آزاد تیر، به مطالعه پارامتری تأثیر توزیع مواد مدرج تابعی در هسته سازه ساندویچی پرداختند. لطفان و همکاران [۱۷] با استفاده از تئوری مرتبه بالا به بررسی رفتار ارتعاشات پوسته‌های دو

انحنایی تحت حرکت محوری پرداختند. بهلولی و همکاران [۱۸] با استفاده از روش تحلیلی به مطالعه رفتار پس کمانش پنل‌های دو انحنایی تقویت‌شده با سخت‌کننده عرضی پرداختند. آن‌ها خواص مکانیکی معادل پوسته دارای سخت‌کننده را با استفاده از تعادل استاتیکی تعیین کردند. صیاد و همکاران [۱۹] رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های دو انحنایی ساخته‌شده از مواد مدرج تابعی را با استفاده از روش حل ناویر مطالعه کردند. تورنابنه و همکاران [۲۰] با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی رفتار دینامیکی پوسته دو انحنایی با هسته لانه‌زنبوری پرداختند. اله‌کرمی و سریزدی [۲۱] ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای نازک و نسبتاً ضخیم مدرج تابعی دو جهتی را بر اساس تئوری مرتبه اول تغییرشکل مطالعه کردند. خلیلی و اکبری [۲۲] با انجام آزمون‌های تجربی به مطالعه کمانش استاتیکی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. سازه کامپوزیتی از جنس کربن اپوکسی انتخاب‌شده که به صورت چهار لایه به روش رشته پیچی با دو لایه چینی مختلف $+75^\circ/-$ و $+55^\circ/-55^\circ/SMA/+55^\circ/-55^\circ$ و $75^\circ/SMA/+75^\circ/-75^\circ$ ساخته‌شده و سیم‌های حافظه‌دار از نوع سوپر الاستیک انتخاب‌شده‌اند که در لایه میانی در دو حالت، با پیش کرنش ۵٪ و بدون پیش کرنش چیده شده‌اند. روو و همکاران [۲۳] کمانش حرارتی پوسته پلیمری تقویت‌شده با سیم‌های SMA را به روش عددی و با استفاده از معادلات ساختاری برینسون بررسی کردند. استازویچ و همکاران [۲۴ و ۲۵] فرکانس طبیعی و کمانش ورق‌های کامپوزیتی حافظه‌دار را با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. لی و همکاران [۲۶ و ۲۷] شبیه‌سازی عددی رفتار کمانش حرارتی پوسته‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با سیم‌های حافظه‌دار شکلی را با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام دادند. آن‌ها به منظور شبیه‌سازی رفتار ترمومکانیکی سیم‌های SMA معادلات بنیادین این مواد را به صورت زیر برنامه به نرم‌افزار ABAQUS ارتباط دادند. تحلیل حرارتی پوسته کامپوزیتی نشان داد که دمای بحرانی کمانش سازه با استفاده از نیروی بازایی عملگر حافظه‌دار شکلی افزایش و تغییرشکل کمانش حرارتی کاهش می‌یابد. اکبری و خلیلی [۲۸] با استفاده از



شکل (۱): الف) هندسه پوسته دوانحنائی ساندویچی کروی با هسته مشبک و رویه‌های تقویت‌شده با سیم‌های SMA به همراه شرایط مرزی مورد استفاده در لبه‌های آزاد آن؛ ب) ساختار سلولی هسته مشبک

۳- مدل برینسون برای SMA

معادلات ساختاری به‌منظور بررسی رفتار الاستیک-پلاستیک مواد SMA توسعه داده شده است. یکی از مدل‌های پرکاربرد مدل Tanaka می‌باشد که با استفاده از جملات نمایی توزیع دما و تنش در ماده را پیش‌بینی می‌کند [۲۹]. برینسون و لامرینگ [۳۰] این مدل را توسعه دادند. بر اساس مدل آن‌ها، تابع دیفرانسیل معادلات ساختاری به‌صورت زیر می‌باشد:

$$d\sigma = D(\xi)d\varepsilon + \Omega(\xi)d\xi_c + \Theta dT \quad (1)$$

$$D = D_A + \xi(D_m - D_A) \quad (2)$$

$$\Omega = -\varepsilon_L D \quad (3)$$

که در آن σ تنش، ε کرنش، ξ کسر حجمی فاز مارتنزیت، T دما و Θ مرتبط با ضریب انبساط حرارتی ماده می‌باشد. همچنین، D نشان‌دهنده مدول یانگ بوده به‌طوری‌که D_A

شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ABAQUS و انجام آزمون‌های تجربی به مطالعه رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با سیم‌های SMA پرداختند. سازه‌های مشبک برای تحمل بار در جهت‌های مشخص، طراحی و ساخته می‌شوند که این ویژگی موجب افزایش عملکرد سازه خواهد گردید. اندک بودن نسبی هزینه تولید، مقاومت مناسب در برابر شرایط محیطی و نسبت استحکام به وزن پایین این سازه‌ها از مزایای عمده سازه‌های مشبک کامپوزیتی نسبت به سایر سازه‌ها است. بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه پوسته‌های ساندویچی نشان می‌دهد که تاکنون کمانش پوسته‌های دو انحنایی با هسته مشبک و لایه‌های خارجی تقویت‌شده با سیم‌های SMA مطالعه نشده است. بر این اساس در تحقیق حاضر، برای اولین بار کمانش پوسته مرکب دوانحنائی ساندویچی با هسته مشبک و رویه‌های تقویت‌شده با سیم‌های SMA با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی و به کمک نرم‌افزار ABAQUS مطالعه می‌شود. رفتار سوپرالاستیک سیم‌های SMA با استفاده از روابط ساختاری برینسون و به کمک زیر برنامه UMAT تعریف شده است. پس از استخراج بار کمانش این نوع پوسته‌ها، تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی بر رفتار کمانشی مطالعه شده است.

۲- هندسه پنل نانو کامپوزیتی دوانحنایی

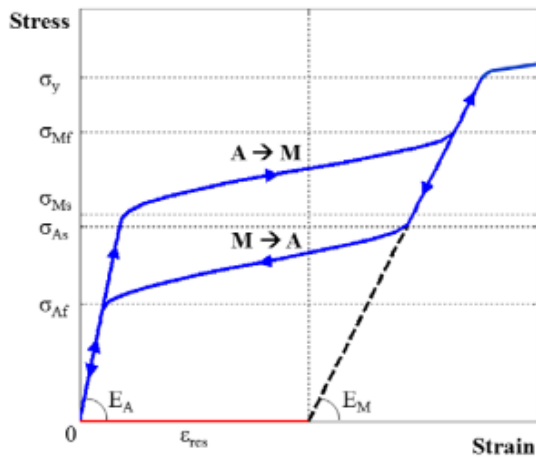
در این تحلیل مطابق شکل ۱ الف یک پوسته دو انحنایی کروی شکل ساندویچی با هسته مشبک و رویه‌های پلیمری تقویت‌شده با سیم‌های SMA در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای a, R, b, h_c و h_s به ترتیب طول لبه‌های طولی و عرضی، شعاع کره، ضخامت هسته و ضخامت رویه‌ها می‌باشد. هسته پنل از سازه مشبک نشان داده شده در شکل ۱ ب تشکیل شده است که طول پایه‌های افقی و پایه‌های عمودی به ترتیب برابر L و $H = \beta L$ می‌باشد. ضخامت سطح مقطع پایه‌ها نیز برابر $t = \alpha L$ در نظر گرفته می‌شود. β نسبت طول و α نسبت منظر می‌باشد؛ بنابراین، هندسه سلول‌های هسته مشبک به سه پارامتر L, α و β وابسته خواهد بود که در شکل ۱ ب نشان داده شده است.

$$T > A_s, C_{Af}(T - A_f) < \sigma < C_{As}(T - A_s)$$

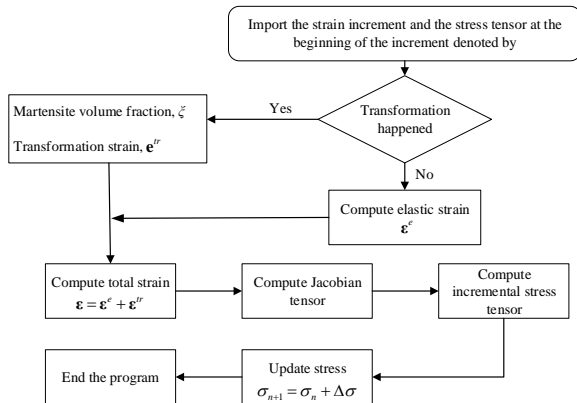
$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \cos \left[\frac{\pi(C_{Af}(T - A_f) - \sigma)}{C_{As}(T - A_s) - C_{Af}(T - A_f)} \right] \quad (9)$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0}(\xi_0 - \xi), \xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0}(\xi_0 - \xi)$$

در سابروتین UMAT نرم‌افزار ABAQUS، تنش در هر مرحله را می‌توان با حل معادله (۴) و با توجه به شرایط معادلات (۷)–(۹) تعیین نمود. در سابروتین UMAT لازم است که ماتریس ژاکوبین معادله تنش- کرنش تعریف و در هر مرحله برحسب مقادیر تنش و کرنش به‌روزرسانی شود. پس از به‌روزرسانی ماتریس تنش، نرم‌افزار ABAQUS اقدام به حل معادلات تعادل و محاسبه تغییرشکل‌های سازه می‌کند. در شکل ۳ مراحل استفاده از سابروتین UMAT نشان داده شده است.



شکل (۲): منحنی تنش-کرنش ماده SMA [۳۲]



شکل (۳): مراحل استفاده از سابروتین UMAT

مدول یانگ فاز آستنیت و D_m مدول یانگ فاز مارتنزیت می‌باشد. Ω تانسور انتقال و ε_L حداکثر کرنش بازیابی آلیاژ می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) از حالت‌های ابتدایی تا انتهایی، رابطه زیر به دست می‌آید [۳۱]:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\xi)\varepsilon - D(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_s - \Omega(\xi_0)\xi_{s0} + \Theta(T - T_0) \quad (4)$$

که در آن زیرنویس 0 نشان‌دهنده مقادیر در حالت اولیه می‌باشد.

در مدل برینسون، درصد حجمی مارتنزیت که وابسته به مارتنزیت حاصل از تنش ξ_s و مارتنزیت حاصل از دما ξ_T می‌باشد، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \xi_s + \xi_T \quad (5)$$

بنابراین، معادله ساختاری را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\sigma = (D_a + \xi(D_m - D_a))(\varepsilon - \varepsilon_L \xi_s) + \Theta(T - T_0) \quad (6)$$

در شکل ۲ منحنی تنش-کرنش ماده SMA برای نمونه نشان داده شده است. در این شکل M_s, M_f, A_s, A_f به ترتیب نشان‌دهنده دماهای شروع فاز مارتنزیت، اتمام فاز مارتنزیت، شروع فاز آستنیت و اتمام فاز آستنیت می‌باشند. C_A, C_M نشان‌دهنده ثوابت ماده وابسته به تنش تغییرات فاز می‌باشند. σ_s^{cr} و σ_f^{cr} تنش‌های شروع و اتمام فاز مارتنزیت هستند. بر اساس مدل برینسون، معادلات تبدیلات فازی به‌صورت زیر مطرح می‌شود [۳۱]:

(الف) آستنیت به مارتنزیت

$$T > M_s, \sigma_s^{cr} + C_{Ms}(T - M_s) < \sigma < \sigma_f^{cr} + C_{Mf}(T - M_s)$$

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left[\frac{\pi(\sigma - \sigma_f^{cr} - C_{Mf}(T - M_s))}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr} + (C_{Mf} - C_{Ms})(T - M_s)} \right] + \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \quad (7)$$

$$\xi_T = \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{s0}}(\xi_0 - \xi_{s0})$$

$$T < M_s, \sigma_s^{cr} < \sigma < \sigma_f^{cr}$$

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \times (\sigma - \sigma_f^{cr}) \right] + \frac{1 + \xi_{s0}}{2} \quad (8)$$

$$\xi_T = (\xi_0 - \xi_{s0}) + \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{s0}}(\xi_0 - \xi_{s0})$$

(ب) مارتنزیت به آستنیت

۴- شبیه‌سازی المان محدود

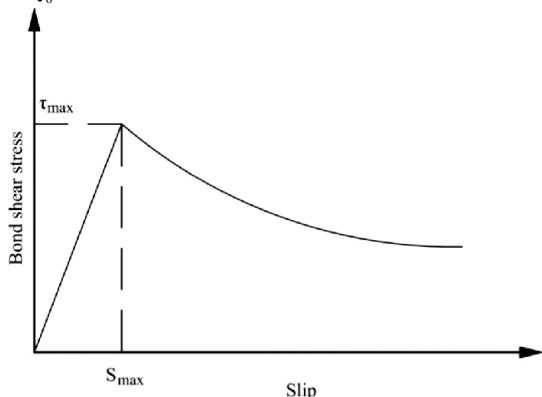
بیشتر از آن سطح چسبنده ظرفیت تحمل تنش خود را از دست داده و ترک رشد می‌کند، (یا δn یعنی جدایش در نقطه تنش ماکزیمم) و پارامتر n که نشان‌دهنده تغییرات نمایی بخش ناحیه شکست می‌باشد. علاوه بر این، G_c که انرژی جدایش می‌باشد نیز به‌عنوان یکی دیگر از پارامترهای مدل ناحیه چسبنده می‌باشد. با توجه به اینکه در مسئله حاضر، بارگذاری روی سیم‌ها به‌صورت مود ترکیبی می‌باشد بنابراین، هر دو مؤلفه تنش‌های مماسی و عمودی تماس در انرژی شکست مشارکت دارند و رابطه توانی انرژی شکست به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\left(\frac{G_n}{G_{cn}}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{ct}}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

که در آن G_n و G_t به ترتیب، انرژی‌های شکست عمودی و مماسی می‌باشند و برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی هستند که از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$G_n = \int_0^{\delta_c} \sigma_n(\delta) d\delta \quad (11)$$

$$G_t = \int_0^{\delta_c} \tau_t(\delta) d\delta \quad (12)$$



شکل (۴): تغییرات تنش برشی ناحیه چسبندگی برحسب میزان لغزش

به‌منظور اعمال نیروی پیش‌تنیدگی به سیم‌های SMA از گزینه Bolt Load نرم‌افزار استفاده شده است و تحلیل‌ها به ازای مقادیر مختلف نیروهای پیش‌تنیدگی انجام شده است. همچنین، با فرض اتصال کامل بین رویه‌ها و هسته مشبک، اتصال در سطوح مشترک به‌صورت تماس کامل تعریف شده است و از قید Tie در نرم‌افزار استفاده شده است. شرایط مرزی به‌صورت تکیه‌گاه‌های ساده در لبه‌های آزاد در نظر گرفته شده و تحلیل کمانش تحت بارگذاری فشاری

مدل المان محدود به‌منظور بررسی رفتار کمانشی پوسته‌های دوانحنایی کروی تقویت‌شده با سیم‌های SMA در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. در مدل‌سازی عددی، از تحلیل Buckling استفاده شده است. با استفاده از تحلیل Buckling یا کمانش خطی، مقادیر ویژه کمانش برای سازه استخراج شده است. مدل المان محدود از سه بخش رویه‌ها، هسته مشبک و سیم‌های SMA به همراه اندرکنش بین سیم‌های SMA با ماتریس رویه و اندرکنش بین رویه‌ها و هسته تشکیل شده است. با توجه به اینکه سیم‌های SMA قادر به تحمل نیروهای فشاری نیستند، بنابراین به‌منظور مش‌بندی آن‌ها از المان‌های دو گرهی تیر B33 استفاده شده است. چسبندگی بین سیم‌های SMA و ماتریس پلیمری با استفاده از قانون چسبندگی/جدایش موجود در نرم‌افزار ABAQUS تعریف شده است که جزئیات آن مطابق مرجع [۳۳] است. برای مدل‌سازی آسیب و پدیده جدایش در ناحیه تماس بین سیم و رویه‌ها از تئوری مدل ناحیه چسبنده که بر پایه نمودارهای نیرو-جابجایی هستند، استفاده شده است. در مدل ناحیه چسبنده، رفتار جدایش سطوح مشترک با قانون کشش-جدایش که رابطه بین تنش و جابجایی دو سطح چسبنده را نشان می‌دهد، بیان می‌شود. تعریف خواص مواد در مدل ناحیه چسبنده به دو صورت نمایی و دوخطی انجام می‌پذیرد که هرکدام دارای توابع پتانسیل مربوط به خود هستند. در مقاله حاضر، تحلیل جدایش اتصال سیم‌های آلیاژی از رویه‌های پلیمری با استفاده از سطوح چسبنده در نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود. رفتار مکانیکی مربوط به سطح تماس با استفاده از قانون تنش-جدایش و مبتنی بر مدل نمایی آن شبیه‌سازی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در غیاب هر نوع خرابی رفتار سطح تماس خطی فرض می‌شود که این رفتار خطی با پیدایش خرابی از بین می‌رود. در این مدل فرض می‌شود که تمامی مکانیسم‌های ساختار میکرو و فرایند شکست را می‌توان به‌وسیله سه پارامتر مورد توجه قرار داد: تنش ماکزیمم برشی یا استحکام ناحیه چسبنده (τ_{max})، حداکثر کرنش جدایش بحرانی S_{max} که به ازای مقادیر

۵- بررسی نتایج

در این قسمت به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر بار کمانش پوسته مرکب دو انحنايي با شرط مرزی تکیه‌گاه ساده تحت بارگذاری فشاری یکنواخت پرداخته می‌شود. در بررسی نتایج، از بار کمانش بی‌بعد در آن $P_{cr} = PE_f h_f^2 / R^2 \sqrt{3(1-\nu_f)}$ استفاده می‌شود که در آن اندیس f نشان‌دهنده مشخصات رویه می‌باشد. علاوه بر این، در استخراج کلیه نتایج مقادیر پیش‌فرض عددی پارامترهای هندسی عبارت است از: $h_c = 4 \text{ r}$ ، $h_s = 1 \text{ mm}$ ، $R = 25 \text{ cm}$ و مشخصات هسته مشبک عبارت است از: $L = 60 \text{ mm}$ ، $\beta = 1$ و $\alpha = 0$. همچنین، در حالت پیش‌فرض کسر حجمی سیم‌های SMA برابر ۰/۱٪ می‌باشد.

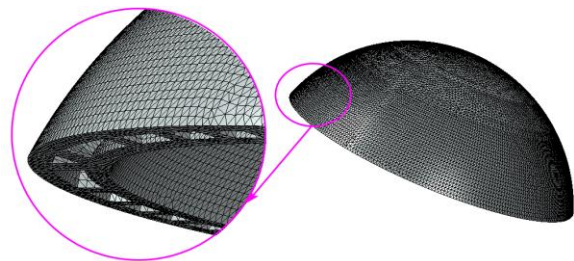
۵-۱- بررسی استقلال پاسخ از شبکه

قبل از بررسی نتایج، آنالیز حساسیت به مش‌بندی انجام شده و تعداد مناسب المان‌ها تعیین شده است. در شکل ۶ تغییرات بار کمانش اول و سوم برای پوسته با هسته مشبک برحسب تعداد مش نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد المان مورد استفاده، بار کمانش بی‌بعد افزایش می‌یابد و پس از تعداد حدود ۲۳۵۴۰۵ المان نتایج به مقدار مشخصی همگرا می‌شوند. بر این اساس، در تحقیق حاضر از این تعداد المان جهت استخراج نتایج استفاده شده است. همچنین، در شکل ۷ تأثیر تعداد مش بر شکل مود کمانش پوسته نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مش‌ها ضمن همگرا شدن بارهای کمانش، شکل مود کمانش نیز تقریباً به حالت مشابهی همگرا می‌شود.

۵-۲- صحت‌سنجی نتایج

با توجه به اینکه تاکنون رفتار کمانشی پوسته‌های کرووی با هسته مشبک مطالعه نشده است، بنابراین به‌منظور فراهم آوردن امکان صحت‌سنجی نتایج حالت پوسته نازک کرووی

یکنواخت خارجی اعمالی بر سطح پوسته انجام می‌شود. رویه‌ها و هسته مشبک با استفاده از المان‌های هرمی شکل غیرخطی ده گرهی C3D10 مش‌بندی شده است. تعداد مناسب المان‌ها پس از بررسی استقلال از شبکه تعیین شده و در مجموع برای تحلیل‌های کمانش از تعداد ۲۳۵۴۰۵ المان استفاده شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. پوسته و هسته از جنس پلیمر PMMA می‌باشند که به‌صورت الاستیک در نظر گرفته شده و چگالی آن برابر 1190 kg/m^3 و مدول یانگ برابر 3 GPa می‌باشد. همچنین، سیم‌های SMA مورد استفاده به‌منظور تقویت پوسته از جنس آلیاژ NiTi بوده و مشخصات مکانیکی آن مطابق جدول ۱ می‌باشد. رفتار سوپرالاستیک سیم‌های SMA با استفاده از روابط ساختاری برینسون و به کمک زیر برنامه UMAT تعریف شده است.



شکل (۵): نمونه‌ای از مدل مش‌بندی شده پوسته کرووی ساندویچی

جدول (۱): مشخصات مکانیکی سیم‌های SMA [۳۲]

مشخصات مکانیکی	مقدار	واحد
مدول الاستیک مارتنزیت خالص (D_m)	۵۰	GPa
مدول الاستیک آستنیت خالص (D_a)	۶۰	GPa
تنش بحرانی شروع فاز انتقالی (σ_s^{cr})	۹۰	MPa
تنش بحرانی پایان فاز انتقالی (σ_f^{cr})	۳۸۰	MPa
دمای پایانی آستنیت (A_f)	۲۶/۳۵	°C
دمای شروع فاز آستنیت (A_s)	۶۰/۵۷	°C
دمای ابتدایی مارتنزیت (M_s)	۴۶/۴۱	°C
دمای پایانی مارتنزیت (M_f)	-۵	°C
حداکثر تنش بازیابی (ϵ_L)	۰/۰۴۸	-
C_{Af}	۵/۵۶	MPa/°C
C_{As}	۶/۳۰	MPa/°C
C_{Mf}	۴/۱۳	MPa/°C
C_{Ms}	۳/۷۵	MPa/°C

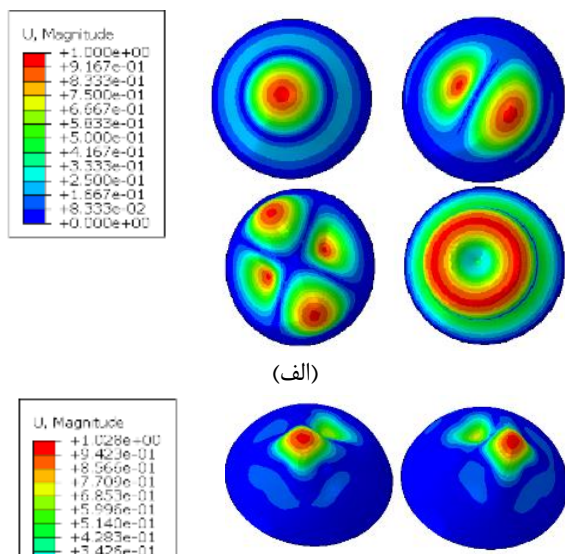
بر اساس رابطه فوق، در جدول ۲ مقایسه بار کمانش پوسته کروی جدار نازک به ازای $E = 3\text{GPa}$ و $\nu = 0.23$ و مقادیر مختلف h/R به دست آمده با استفاده از رابطه (۱۳) و نتایج المان محدود آورده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می شود که مدل المان محدود از دقت مطلوبی برخوردار بوده و حداکثر خطای بین نتایج کمتر از ۳ درصد می باشد که با افزایش ضخامت پوسته و با نزدیک شدن آن به پوسته جدار ضخیم نتایج اختلاف زیادی پیدا می کنند.

جدول (۲): مقایسه بار کمانش پوسته کروی جدار نازک به ازای $E = 3\text{GPa}$ و $\nu = 0.23$ و مقادیر مختلف h/R

h/R	نتایج مدل المان محدود	نتایج تحلیلی (رابطه ۱۰)	درصد خطا
۰/۰۰۱	$۳/۵۵۰ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۵۵۹ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۲۵
۰/۰۱	$۳/۴۰۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۵۵۹ \times ۱۰^{-۵}$	۱/۵۴
۰/۱	$۳/۵۶۴ \times ۱۰^{-۷}$	$۳/۵۵۹ \times ۱۰^{-۷}$	۲/۶۴

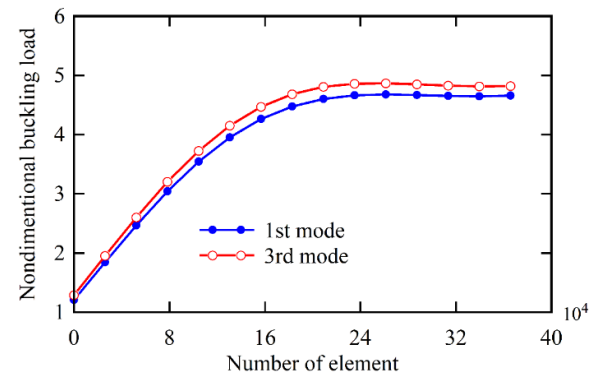
۳-۵- تأثیر مشخصات هندسی هسته مشبک

در شکل ۸ چهار شکل مود اول کمانش برای پوسته در غیاب هسته مشبک و پوسته دارای هسته مشبک نشان داده شده است. مشاهده می شود که وجود هسته مشبک باعث تغییر قابل ملاحظه ای در شکل مودهای کمانشی می شوند و این امر می تواند در بارهای کمانش نیز تأثیرگذار باشد.



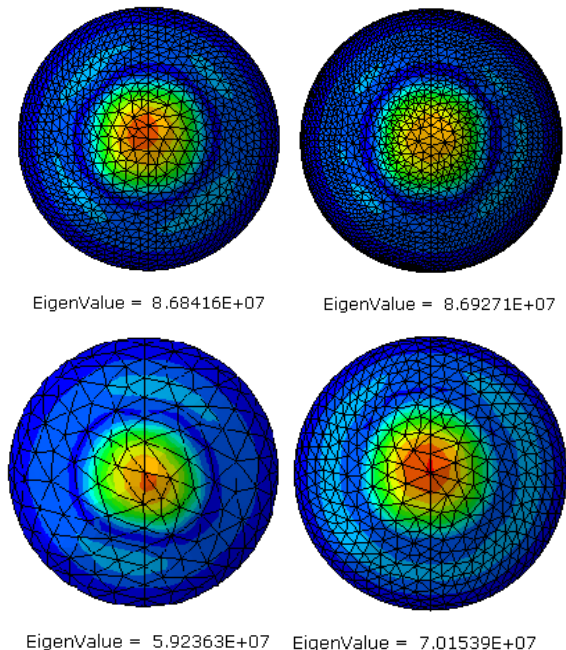
در نظر گرفته می شود. برای پوسته جدار نازک از جنس مواد الاستیک، کمانش قبل از رسیدن تنش به حد تسلیم اتفاق می افتد. برای پوسته های کروی جدار نازک، کمانش تحت بارگذاری فشار خارجی بر اساس مطالعات انجام شده توسط تیموشنکو و گیر [۳۴] و همچنین کرنزک و توماس [۳۵] به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$P_{cr} = 2E \left(\frac{h}{R} \right)^2 / \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (13)$$



شکل (۶): تغییرات بار کمانش بی بعد بر حسب تعداد المان

مورد استفاده در مدل المان محدود



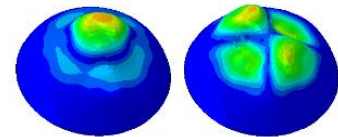
شکل (۷): تأثیر تعداد مش های مورد استفاده بر شکل مود

کمانش پوسته

همان‌طور که مطرح شد هندسه سلول‌های هسته مشبک به سه پارامتر وابسته α ، β و L می‌باشد که هرکدام از این پارامترها تأثیر متفاوت بر بار کمانش پوسته دارند. در جدول ۴ و همچنین شکل ۸ تأثیر α و β بر بار کمانش ویژه پوسته نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد با افزایش β تا مقدار ۱/۲ بار کمانش ویژه افزایش و سپس با افزایش بیشتر این پارامتر بار کمانش ویژه کاهش می‌یابد. در خصوص پارامتر α نیز چنین نتیجه‌ای وجود دارد و این پارامتر نیز دارای مقدار مناسب می‌باشد که در این حالت به ازای این مقدار بار کمانش ویژه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. مشاهده می‌شود به ازای مقادیر کمتر β با افزایش α بار کمانش ویژه همواره افزایش می‌یابد و در مقادیر $\beta > 1.0$ رفتار معکوسی دیده می‌شود. بر اساس این نتایج مشاهده می‌شود که بیشترین بار کمانش ویژه به ازای $\alpha = 0.15$ و $\beta = 1.2$ ایجاد شده و مقدار آن برابر ۰/۸۱ می‌باشد. علت چنین رفتاری در تأثیر مشخصات هسته مشبک بر بار کمانش را می‌توان در تغییرات سفتی معادل هسته و در نتیجه توزیع نیروهای داخلی در آن دانست.

جدول (۴): تأثیر زاویه سلول بر بار کمانش ویژه پوسته به ازای $L=60 \text{ mm}$

β	α				
	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳
۰/۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۵۴	۰/۶۰
۰/۸	۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۷۴
۱/۰	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۶۸
۱/۲	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۷۰
۱/۵	۰/۷۲	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۷۳
۲/۰	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۵۶	۰/۵۲
۲/۵	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۴۴
۳	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۳۵



(ب)

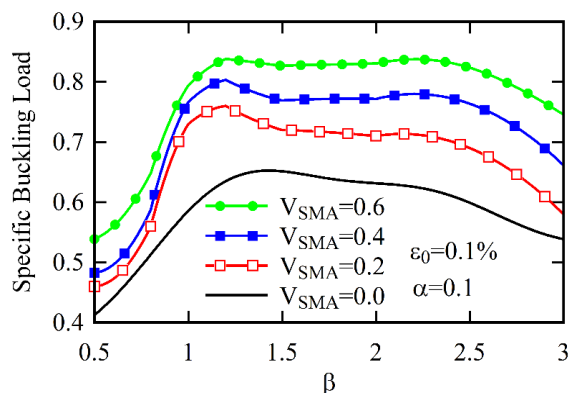
شکل (۸): الف) چهار شکل مود اول کمانش پوسته بدون هسته مشبک؛ ب) پوسته دارای هسته مشبک

در جدول ۳ مقادیر بار کمانش بی‌بعد این دو نوع پوسته ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بار کمانش بی‌بعد اول پوسته بدون هسته مشبک و دارای هسته مشبک به ترتیب برابر ۸/۹ و ۴/۷۵ به دست می‌آید که نشان می‌دهد وجود هسته مشبک باعث کاهش ۴۶ درصدی در بار کمانش می‌شود. با این وجود، نتیجه جالب توجهی که با توجه به این جدول قابل مشاهده است این می‌باشد که هرچند هسته مشبک باعث کاهش بار کمانش سازه می‌شود، ولی با مقایسه مقادیر بار کمانش ویژه که نسبت بار کمانش پوسته به وزن آن می‌باشد می‌توان دریافت که هسته مشبک باعث بیشتر شدن بار کمانش ویژه به خصوص در موده‌های کمانش پایین می‌شود. بر اساس نتایج این جدول بار کمانش ویژه پوسته دارای هسته مشبک و بدون هسته مشبک به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۷۱ به دست می‌آید که نشان می‌دهد وجود هسته مشبک باعث افزایش ۱۱ درصدی در بار کمانش می‌شود. این افزایش در کنار کاهش وزن سازه باعث اهمیت استفاده از سازه‌های ساندویچی با هسته مشبک می‌شود.

جدول (۳): مقادیر بار کمانش پوسته بدون هسته مشبک و پوسته دارای هسته مشبک

مود کمانش	بار کمانش ویژه (واحد وزن)		بار کمانش	
	پوسته بدون هسته مشبک	پوسته دارای هسته مشبک	پوسته بدون هسته مشبک	پوسته دارای هسته مشبک
اول	۰/۷۹	۰/۷۱	۴/۷۵	۸/۹
دوم	۰/۸۰	۰/۷۴	۴/۷۸	۹/۳
سوم	۰/۸۱	۰/۸۰	۴/۸۴	۱۰/۰
چهارم	۰/۸۷	۰/۹۲	۵/۱۹	۱۱/۵۵

شکل (۹): تأثیر کسر حجمی سیم‌های SMA و α بر بار کمانش ویژه ($h_c = 4 \text{ mm}$; $R = 25 \text{ cm}$; $L = 60 \text{ mm}$)
 ($\beta = 3$; $h_s = 1 \text{ mm}$)

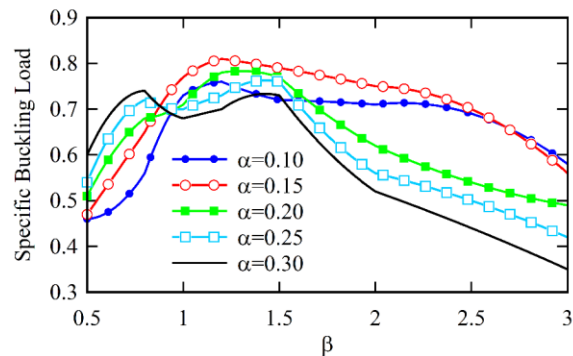


شکل (۱۰): تأثیر کسر حجمی سیم‌های SMA و β بر بار کمانش ویژه ($h_c = 4 \text{ mm}$; $R = 25 \text{ cm}$; $L = 60 \text{ mm}$)
 ($\alpha = 0.1$; $h_s = 1 \text{ mm}$)

مشاهده می‌شود در تمام حالت‌های تحت بررسی با افزایش کسر حجمی سیم‌های SMA بار کمانش در نتیجه افزایش سفتی معادل سازه، بیشتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اثر کسر حجمی سیم‌های SMA بر بار کمانش با افزایش α کمتر می‌شود و به‌عنوان مثال به ازای $\alpha = 0.3$ و $\alpha = 0.1$ با افزایش VSMA از مقدار 0 به 0.6 درصد، بار کمانش به ترتیب در حدود 32.5% و 14.5% افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که برآیند تنش کششی باز یافتی الیاف SMA، بر چگالی ناشی از افزایش کسر حجمی غالب شده و منجر به افزایش سفتی هندسی سازه و در نتیجه بار کمانش افزایش می‌شود. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود به ازای $\beta < 1.2$ افزایش کسر حجمی سیم‌های SMA باعث افزایش در بار کمانش می‌شود ولی با افزایش بیشتر β نرخ افزایش بار کمانش کاهش می‌یابد و تقریباً تأثیر $\beta = 1.2$ بر بار کمانش ناچیز می‌باشد. به ازای $\beta > 2.3$ افزایش بیشتر پارامتر باعث کاهش بار کمانش ویژه می‌شود که علت آن در کمانش موضعی سلول‌های هسته است.

۲-۴-۵- تأثیر پیش‌تنیدگی سیم‌های SMA

در شکل ۱۱ تأثیر نیروی پیش‌تنیدگی ناشی از سیم‌های SMA بر بار کمانش پوسته دوانحنایی کروی نشان داده شده



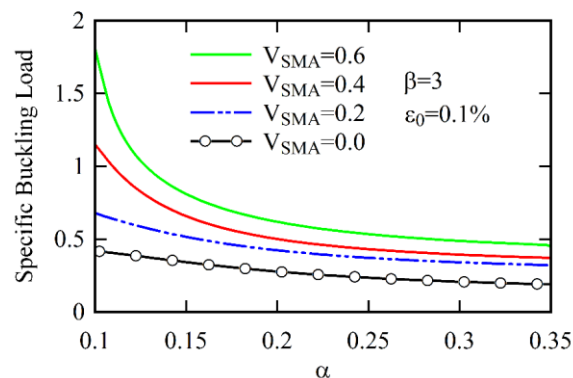
شکل (۸): تأثیر مشخصات هندسی سلول هسته مشبک بر بار کمانش ویژه در ($h_c = 4 \text{ mm}$; $R = 25 \text{ cm}$; $L = 60 \text{ mm}$)
 ($h_s = 1 \text{ mm}$)

۴-۵- تأثیر پارامترهای پوسته تقویت‌شده با سیم‌های SMA

در این بخش به مطالعه تأثیر پارامترهای پوسته‌های تقویت‌شده با سیم‌های SMA شامل کسر حجمی سیم‌های SMA و نیروی پیش‌تنیدگی بر بار کمانش سازه تحت بررسی پرداخته می‌شود.

۱-۴-۵- تأثیر کسر حجمی سیم‌های SMA

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر رفتار کمانش پوسته‌های دوانحنایی تحت بررسی، کسر حجمی سیم‌های SMA مورد استفاده در رویه‌ها می‌باشد. در شکل‌های (۹ و ۱۰) تأثیر کسر حجمی سیم‌های SMA بر بار کمانش ویژه بی‌بعد نشان داده شده است.

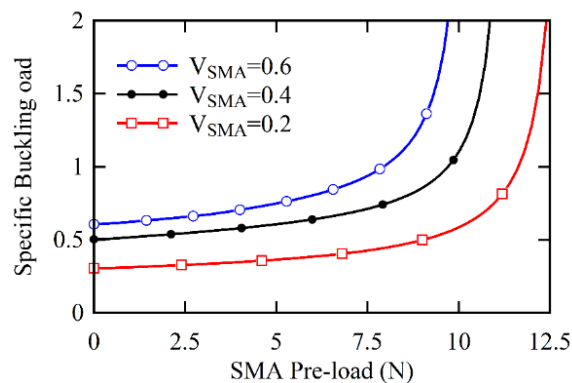


اعمال می‌شود و این امر باعث افزایش سفتی پوسته و در نتیجه بیشتر شدن بار کمانش می‌شود.

(۳) در اثر افزایش کسر حجمی سیم‌های SMA بار کمانش در نتیجه افزایش سفتی معادل سازه بیشتر می‌شود. همچنین، اثر کسر حجمی سیم‌های SMA بر بار کمانش با افزایش α کاهش می‌یابد و به‌عنوان مثال به ازای $\alpha = 0.1$ و $\alpha = 0.3$ با افزایش VSMA از مقدار 0 به 0.06٪ بار کمانش به ترتیب در حدود 0.325٪ و 0.145٪ افزایش می‌یابد.

(۴) نیروی پیش‌تنیدگی باعث افزایش سفتی سازه شده و در نتیجه با بیشتر شدن آن بار کمانش سیستم افزایش می‌یابد. میزان افزایش بار کمانش برحسب نیروی پیش‌تنیدگی در نیروهای بیشتر از 7 N بسیار قابل‌ملاحظه است که این امر را می‌توان در نتیجه تبدیلات فازی سیم‌های SMA و تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در کرنش‌های بیشتر دانست.

(۵) بار کمانش ویژه پوسته دارای هسته مشبک و بدون هسته مشبک به ترتیب برابر 0.71 و 0.79 به دست می‌آید که نشان می‌دهد وجود هسته مشبک باعث افزایش 11 درصدی در بار کمانش می‌شود. این افزایش در کنار کاهش وزن سازه باعث آشکار شدن اهمیت استفاده از سازه‌های ساندویچی با هسته مشبک می‌شود.



شکل (۱۱): تأثیر پیش کشش سیم‌های SMA بر بار کمانش

پوسته دو انحنایی ($L = 60 \text{ mm}$; $R = 25 \text{ cm}$; $h_c = 4 \text{ mm}$;

$h_s = 1 \text{ mm}$; $\beta = 1$; $\alpha = 0.17$)

۷- فهرست علائم

است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که نیروی پیش‌تنیدگی باعث افزایش سفتی سازه شده و در نتیجه با بیشتر شدن آن بار کمانش سیستم افزایش می‌یابد. میزان افزایش بار کمانش برحسب نیروی پیش‌تنیدگی در نیروهای بیشتر از 7 N بسیار قابل‌ملاحظه است که این امر را می‌توان در نتیجه تبدیلات فازی سیم‌های SMA و تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در کرنش‌های بیشتر دانست. مشاهده می‌شود که اثر افزایش پیش‌تنیدگی سیم‌های SMA در نیروهای کمتر نامحسوس بوده و با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی تأثیر آن بر بیشتر شدن بار کمانش محسوس می‌باشد. سیم‌های SMA باعث ایجاد تنش‌های بازیافتی شده که به‌صورت نیروی کششی بر لایه‌های خارجی پوسته اعمال و این امر باعث افزایش سفتی پوسته و در نتیجه بیشتر شدن بار کمانش می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر کمانش پوسته‌های کامپوزیتی دو انحنایی دارای هسته مشبک و رویه‌های تقویت‌شده با سیم‌های SMA برای اولین بار مطالعه شد. بدین منظور پوسته مدنظر در نرم‌افزار ABAQUS و با در نظر گرفتن سه بخش مجزای رویه‌ها، هسته مشبک و سیم‌های SMA شبیه‌سازی گردید. رفتار سوپرالاستیک سیم‌های SMA با استفاده از مدل برینسون و به کمک زیر برنامه UMAT در شبیه‌سازی المان محدود اعمال گردید. نتایج حل عددی برای پوسته دو انحنایی کرووی با شرایط مرزی تکیه‌گاه‌های گیردار به دست آمد. در نهایت، تأثیر پارامترهای هسته مشبک و سیم‌های SMA بر بار کمانش این پوسته‌ها مطالعه شد.

خلاصه‌ای از نتایج اصلی تحقیق حاضر عبارت است از:

(۱) برای مشخصات هندسی سلول‌های هسته مشبک، مقادیر بهینه‌ای وجود دارد که به ازای آن بار کمانش ویژه به حداکثر مقدار می‌رسد. با افزایش ضخامت هسته مشبک، بار کمانش ابتدا افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر کاهش می‌یابد.

(۲) سیم‌های SMA باعث ایجاد تنش‌های بازیافتی شده که به‌صورت نیروی کششی بر لایه‌های بالایی پوسته

blast loading by FRP and spray on polyurea. 2015;36(4).

[4] Vahidi Pashaki P, Pouya M, Maleki VAJPotIoME, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation. 2018;232(11):1927-36.

[5] Khalili SM, Saeedi AJJoS, Composites To. Micromechanics modeling and experimental characterization of shape memory alloy short wires reinforced composites. 2015;2(1):1-6.

[6] M. Mohaseb karimlou RE-F. Influence of pre-strain and position of shape memory alloy wire on buckling properties of smart fibers metal composites. Modares Mechanical Engineering. 2018;17(11):426 - 36.

[7] Sheikhi MM, Hadi A, Qasemi MJMME. Design and dynamic modeling of a module included a compressive spring and actuated by shape memory alloy wire. 2015;14(14):17-26.

[8] Asfaw AM, Sherif MM, Xing G, Ozbulut OEJJoME, Performance. Experimental investigation on buckling and post-buckling behavior of superelastic shape memory alloy bars. 2020;29(5):3127-40.

[9] Rostamijavanani A, Ebrahimi M, Jahedi SJJoFA, Prevention. Thermal post-buckling analysis of laminated composite plates embedded with shape memory alloy fibers using semi-analytical finite strip method. 2021;21(1):290-301.

[10] Karimiasl M, Ahmadi HJPC. Theoretical investigation on the buckling behavior of smart composite sandwich panels with viscoelastic core and shape memory alloy included skins. 2021;42(10):5361-73.

[11] Zhang T, Zhang BJMBDoS, Machines. On instabilities and thermal post-buckling of the electrically annular system coupled with shape-memory alloy fibers. 2021:1-21.

[12] Asadi H, Bodaghi M, Shakeri M, Aghdam MJAS, Technology. On the free vibration of thermally pre/post-buckled shear deformable SMA hybrid composite beams. 2013;31(1):73-86.

[13] Asadi H, Kiani Y, Shakeri M, Eslami MJCS. Exact solution for nonlinear thermal stability of hybrid laminated composite Timoshenko beams reinforced with SMA fibers. 2014;108:811-22.

[14] Asadi H, Bodaghi M, Shakeri M, Aghdam MJEJoM-AS. An analytical approach for nonlinear vibration and thermal stability of shape memory

طول لبه طولی، m	<i>a</i>
طول لبه عرضی، m	<i>b</i>
مدول الاستیسیته، N/m ²	<i>D</i>
ضخامت لایه، m	<i>h</i>
طول پایه عمودی، m	<i>H</i>
طول پایه افقی، m	<i>L</i>
ضخامت سطح پایه، m	<i>t</i>
دما، c	<i>T</i>
شعاع انحنای کره، m	<i>R</i>
نسبت منظر	α
نسبت طول	β
کرنش، m/m	ϵ
تنش، N/m ²	σ
چگالی، kg/m ³	ρ
ضریب پواسون	ν
کسر حجمی فاز مارتنزیت	ξ_c
مرتبط با ضریب انبساط حرارتی ماده	Θ
تانسور انتقال	Ω
زیرنویس و بالانویس	
فاز آستنیت	A
هسته	c
پایان فاز دمایی	f
بازیابی آلیاژ حافظه‌دار	L
فاز مارتنزیت	m
رویه	S
وابسته به تنش / شروع فاز دمایی	s
وابسته به دما	T
مربوط به نقطه بحرانی فاز	cr

۸- مراجع

[1] Rezaee M, Maleki VAJPotIoME, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. An analytical solution for vibration analysis of carbon nanotube conveying viscose fluid embedded in visco-elastic medium. 2015;229(4):644-50.

[2] Pourreza T, Alijani A, Maleki VA, Kazemi A. Nonlinear vibration of nanosheets subjected to electromagnetic fields and electrical current. Advances in nano research. 2021;10(5):481-91.

[3] Ghaderi M, Maleki VA, Andalibi KJFBD. Retrofitting of unreinforced masonry walls under

- of laminated composite shells with embedded shape memory alloy wire actuators. 2000;9(6):780.
- [27] Lee HJ, Lee JJ, Huh JSJCS. A simulation study on the thermal buckling behavior of laminated composite shells with embedded shape memory alloy (SMA) wires. 1999;47(1-4):463-9.
- [28] Akbari T, Khalili SJT-WS. Numerical simulation of buckling behavior of thin walled composite shells with embedded shape memory alloy wires. 2019;143:106193.
- [29] Chopra I, Sirohi J. Smart structures theory: Cambridge University Press; 2013.
- [30] Brinson L, Lammering RJJos, structures. Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications. 1993;30(23):3261-80.
- [31] Brinson LCJJoims, structures. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. 1993;4(2):229-42.
- [32] Kim Y-J, Lee C-H, Kim J-H, Lim JHJJoS, Structures. Numerical modeling of shape memory alloy plates considering tension/compression asymmetry and its verification under pure bending. 2018;136:77-88.
- [33] Miramini A, Kadkhodaei M, Alipour A, Mashayekhi M. Analysis of interfacial debonding in shape memory alloy wire-reinforced composites. Smart Materials and Structures. 2015;25(1):015032.
- [34] Timoshenko S. Theory of elastic stability 2e: Tata McGraw-Hill Education; 1970.
- [35] Krenzke MA, Kiernan TJ. The effect of initial imperfections on the collapse strength of deep spherical shells. David Taylor Model Basin Washington DC; 1965.
- alloy hybrid laminated composite beams. 2013;42:454-68.
- [15] Dastjerdi S, Abbasi M, Yazdanparast LJAM. A new modified higher-order shear deformation theory for nonlinear analysis of macro-and nano-annular sector plates using the extended Kantorovich method in conjunction with SAPM. 2017;228(10):3381-401.
- [16] Rahmani O, Khalili S, Malekzadeh K, Hadavinia HJCS. Free vibration analysis of sandwich structures with a flexible functionally graded syntactic core. 2009;91(2):229-35.
- [17] Lotfan S, Anamagh MR, Bediz BJT-WS. A general higher-order model for vibration analysis of axially moving doubly-curved panels/shells. 2021;164:107813.
- [18] Bohlooly M, Mirzavand B, Fard KMJAMM. An analytical approach for postbuckling of eccentrically or concentrically stiffened composite double curved panel on nonlinear elastic foundation. 2018;62:415-35.
- [19] Sayyad AS, Ghugal YMJCS. Static and free vibration analysis of doubly-curved functionally graded material shells. 2021;269:114045.
- [20] Tornabene F, Viscoti M, Dimitri R, Aiello MAJT-WS. Higher order formulations for doubly-curved shell structures with a honeycomb core. 2021;164:107789.
- [21] F. Allahkarami MGS. Free Vibration Analysis of Thin and Relatively Thick Two Dimensional Functionally Graded Cylindrical Shell Based on First Order Shear Deformation Theory. Journal of Mechanical Engineering. 2016;46(1):15-28.
- [22] Khalili SMR, Akbari TJJoS, Composites To. An investigation on the static buckling behavior of laminated cylindrical composite shells with embedded SMA wires by experiment. 2019;5(4):551-64.
- [23] Roh J-H, Oh I-K, Yang S-M, Han J-H, Lee IJSm, structures. Thermal post-buckling analysis of shape memory alloy hybrid composite shell panels. 2004;13(6):1337.
- [24] Ostachowicz W, Krawczuk M, Żak AJCs. Dynamics and buckling of a multilayer composite plate with embedded SMA wires. 2000;48(1-3):163-7.
- [25] Ostachowicz W, Krawczuk M, Żak AJFEiA, Design. Natural frequencies of a multilayer composite plate with shape memory alloy wires. 1999;32(2):71-83.
- [26] Lee HJ, Lee JJSM, Structures. A numerical analysis of the buckling and postbuckling behavior



Buckling Finite Element Analysis of Moderately Thick Spherical Sandwich Panel with Grid Stiffened Core and SMA Reinforced Layers

Ahmad Darabi¹, Keramat Malekzadehfard^{2*}, Seyyed Mehdi Nabavi³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

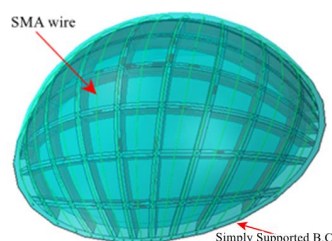
² Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- The Abaqus software & UMAT subroutine is used to perform the spherical panel simulations.
- Increasing the volume fraction of SMA wires from 0 to 0.6% leads to buckling load growth by 325%.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 6 March 2022

Received in revised form: 5 April 2022

Accepted: 15 May 2022

Available online: 28 June 2022

*Correspondence:

k.malekzadeh@gmail.com

A. Darabi, K. Malekzadehfard, S.M. Nabavi. Buckling finite element analysis of moderately thick spherical sandwich panel with grid stiffened core and SMA reinforced layers, Journal of Aerospace Mechanics. 2022;18(3): 155-167.

Keywords:

Doubly curved panel
Shape memory alloy wires
Finite element analysis
Buckling load
Grid-stiffened core

ABSTRACT

In the present study, the buckling behavior of moderately thick spherical sandwich panels with grid stiffened core and shape-memory wires (SMA) reinforced layer is studied for the first time. The core of the panel is a grid structure and its cells are tetrahedral, and the outer layers are reinforced by SMA wires with a uniform, one-way distribution. The finite element method is used to perform the simulations. The Brinson model is used for SMA super-elastic behavior definition and fuzzy transformations are applied using the UMAT subroutine in ABAQUS software. The effect of effective geometric and mechanical parameters such as the radius of curvature of the shell, the volume fraction of SMA wires, and their pre-stressing on the buckling loads of the shell are verified. The results show that SMA wires cause recycled stresses that are applied as a tensile force on the upper layers of the shell. This characteristic increases the stiffness of the shell and leads the buckling load growth. If $\alpha = 0.1$, increasing the volume fraction of SMA wires from 0 to 0.6% leads to the buckling load growth by 325%. In addition, the buckling load per unit volume of the shell with grid core and without grid core is 0.71 and 0.79, respectively, which indicates that the presence of grid core increases the specific buckling load by 11%. This increase, along with the reduction in the weight of the structure, highlights the importance of using sandwich structures with grid cores.

Buckling Finite Element Analysis of Moderately Thick Spherical Sandwich Panel with Grid Stiffened Core and SMA Reinforced Layers

Ahmad Darabi¹, Keramat Malekzadehfard^{2*}, Seyyed Mehdi Nabavi³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

² Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- The Abaqus software & UMAT subroutine is used to perform the spherical panel simulations.
- Increasing the volume fraction of SMA wires from 0 to 0.6% leads to buckling load growth by 325%.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 6 March 2022

Received in revised form: 5 April 2022

Accepted: 15 May 2022

Available online: 28 June 2022

*Correspondence:

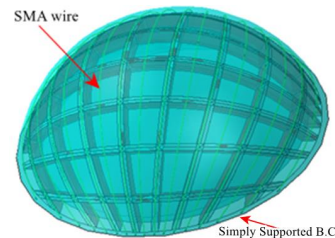
k.malekzadeh@gmail.com

A. Darabi, K. Malekzadehfard, S.M. Nabavi. Buckling finite element analysis of moderately thick spherical sandwich panel with grid stiffened core and SMA reinforced layers, *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022;18(3): 155-167.

Keywords:

Doubly curved panel
Shape memory alloy wires
Finite element analysis
Buckling load
Grid-stiffened core

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

In the present study, the buckling behavior of moderately thick spherical sandwich panels with grid stiffened core and shape-memory wires (SMA) reinforced layer is studied for the first time. The core of the panel is a grid structure and its cells are tetrahedral, and the outer layers are reinforced by SMA wires with a uniform, one-way distribution. The finite element method is used to perform the simulations. The Brinson model is used for SMA super-elastic behavior definition and fuzzy transformations are applied using the UMAT subroutine in ABAQUS software. The effect of effective geometric and mechanical parameters such as the radius of curvature of the shell, the volume fraction of SMA wires, and their pre-stressing on the buckling loads of the shell are verified. The results show that SMA wires cause recycled stresses that are applied as a tensile force on the upper layers of the shell. This characteristic increases the stiffness of the shell and leads the buckling load growth. If $\alpha = 0.1$, increasing the volume fraction of SMA wires from 0 to 0.6% leads to the buckling load growth by 325%. In addition, the buckling load per unit volume of the shell with grid core and without grid core is 0.71 and 0.79, respectively, which indicates that the presence of grid core increases the specific buckling load by 11%. This increase, along with the reduction in the weight of the structure, highlights the importance of using sandwich structures with grid cores.