

## آنالیز و اماندگی کپسول‌های CNG کامپوزیتی با بررسی تأثیر همزمان تغییر تعداد لایه‌ها و

### کسر حجمی الیاف تقویت کننده

سعید کریمی<sup>۱\*</sup> و سیروس جوادپور<sup>۲</sup>

#### چکیده

کپسول‌های CNG کامپوزیتی، مزایای قابل توجهی نسبت به انواع فلزی خود دارند که از آن جمله می‌توان به قابلیت ذخیره سازی گاز با فشار بالاتر، مکانیزم‌های اماندگی ایمن‌تر، ویژگی‌های مکانیکی بهتر، مقاومت بالاتر در برابر خوردگی و ۲ تا ۴ برابر وزن کمتر اشاره کرد. هدف اصلی این پژوهش، آنالیز ترمومکانیکی و ارزیابی کپسول‌های CNG کامپوزیتی است. برای ساخت این کپسول‌ها، یک رزین اپوکسی با کارایی بالا به عنوان فاز زمینه کامپوزیت زمینه پلیمری و الیاف کربن با استحکام بالا از نوع T-700S به عنوان فاز تقویت کننده انتخاب شد. پس از تعیین ویژگی‌های گوناگون این دو بخش اصلی، ویژگی‌های لمینای ناشی از آن‌ها به کمک روابط میکرو مکانیک تعیین و برای ساخت آن نیز یک دستگاه رشته‌پیچ ۵ محوری ساخته شد. سپس با توجه به شرایط کاری بهینه دستگاه که در کسر حجمی ۵۰ تا ۶۰ درصد از الیاف تقویت کننده بدست می‌آمد، آنالیز ترمومکانیکی سه بُعدی در کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-12 انجام شد. با توجه به نتایج این پژوهش، افزایش تعداد لایه‌های لمینت کامپوزیتی و کسر حجمی الیاف تقویت کننده، تأثیری متفاوت بر رفتار و اماندگی آستر فلزی و لایه‌های کامپوزیتی دارند. از نتایج دیگر، تأثیر بسزای تنش‌های حرارتی بر و اماندگی لمینت است؛ در حالی که تأثیر آن‌ها بر و اماندگی آستر فلزی قابل چشم‌پوشی است.

**واژه‌های کلیدی:** کپسول CNG، کامپوزیت زمینه پلیمری، آنالیز ترمومکانیکی، میکرو مکانیک، رشته‌پیچی.

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، دانشگاه شیراز.

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

\*- نویسنده مسئول مقاله: Saeed\_Karimi\_ir@yahoo.com

## پیشگفتار

امروزه تمرکز اصلی صنایع اتومبیل‌سازی بر طراحی و تولید خودروهای سبک‌تر و ایمن‌تری معطوف شده است که از سوخت‌هایی به غیر از بنزین و گازوئیل استفاده می‌کنند. گاز طبیعی فشرده<sup>۱</sup> (CNG)، یک سوخت جایگزین مناسب است زیرا افزون بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر اصلی، نرخ آلودگی هوا را با تولید میزان کمتری از گازهای ناشی از احتراق مانند CO<sub>2</sub>، CO و NO<sub>x</sub> کاهش می‌دهد که نتیجه آن کاهش سرعت گرمایش جهانی است [۱-۳].

خودروهایی که گاز طبیعی را به عنوان سوخت خود مصرف می‌کنند<sup>۲</sup> (NGV)، باید به کپسول‌ها یا مخازنی برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی فشرده مجهز شوند. این کپسول‌ها مهم‌ترین و البته پر هزینه‌ترین بخش این خودروها بشمار می‌روند. بر اساس استانداردهای کنونی، چهار نوع مختلف از کپسول‌های CNG را می‌توان در NGV ها به کار برد [۴ و ۵]: مخازن تحت فشار فلزی (نوع I)، مخازن تحت فشار کمرپیچ (نوع II)، مخازن تمام پیچ با آستر فلزی (نوع III) و مخازن تمام پیچ با آستر پلیمری (نوع IV).

کپسول‌های فلزی به دلیل وزن زیاد و مشکل شکست سریع ذاتی خود، چندان قابل اعتماد نیستند. کپسول‌های CNG کامپوزیتی ویژگی‌های مکانیکی بهتری دارند، مکانیزم‌های اماندگی آن‌ها ایمن‌تر است، ۵۰ تا ۸۰ درصد از انواع فولادی خود سبک‌تر هستند و همچنین، مقاومت بالایی در برابر خوردگی دارند [۶].

به دلیل این ویژگی‌های منحصر به فرد کپسول‌های CNG کامپوزیتی، مطالعات گوناگونی در مورد بهینه‌سازی طراحی، شبیه‌سازی، مدل‌سازی، ارزیابی و نمایش ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی آن‌ها انجام گرفته است. زو و همکارانش به طراحی بهینه مقاطع رشته‌پیچی شده بر اساس مسیرهای ژئودزیک و غیر ژئودزیک پرداختند [۷-۹]؛ وفایی صفت الگوریتمی را برای اصلاح هندسه عدسی‌ها ارائه داد [۱۰] و تنگ و همکارانش تاثیر پهنای الیاف و الگوی پیچش را ارزیابی و بهینه کردند

[۱۱]. چانگ‌لیانگ و همکارانش رفتار مکانیکی مخازن تحت فشار را در برخوردی با سرعت کم با روش‌های المان محدود غیر خطی شبیه‌سازی کردند [۱۲] و زو و همکارانش اماندگی مخازن کامپوزیتی ذخیره هیدروژن را که حساسیت بالاتری دارد، بر اساس معیارهای اماندگی Tsai-Hill و Tsai-Wu بررسی کردند [۱۳]. مائو و همکارانش با استفاده از یک رویکرد آماری، یک مدل تحلیلی جدید برای پیش‌بینی استحکام مخازن کامپوزیتی ارائه دادند [۱۴]. فرایس پارامترهای بحرانی گوناگون مخازن کامپوزیتی را با استفاده از سنسورهای نمایش داد [۱۵].

هدف اصلی این پژوهش، بررسی رفتار ترمومکانیکی کپسول‌های CNG کامپوزیتی نوع III است. در پژوهش‌هایی که پیش‌تر در این زمینه انجام گرفته است (مانند مواردی که در بالا به آن‌ها اشاره شد)، یا به اثر تعداد لایه‌ها و کسر حجمی تقویت کننده توجه نشده است و یا تنها تاثیر کسر حجمی بر استحکام و اماندگی این نوع از کپسول‌ها بررسی شده است [۱۶]؛ در حالی که در این پژوهش، تاثیر همزمان تغییر تعداد لایه‌ها و کسر حجمی بر کرنش‌های ترمومکانیکی و اماندگی آستر و لایه‌های کامپوزیتی در نظر گرفته شده است.

گفتنی است که در این پژوهش، فرایند شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-12 و در یک بازه معین از کسر حجمی الیاف تقویت کننده و تعداد لایه‌های لمینت کامپوزیتی انجام شده و هدف از آن، بررسی و ارزیابی رفتار و اماندگی کپسول کامپوزیتی بوده است. از این رو، مقادیر مطلق فشارها، تنش‌ها، کرنش‌ها و جابه‌جایی‌ها چندان مد نظر قرار نگرفته است بلکه به روند و چگونگی تغییرات پرداخته و با اتخاذ و ارزیابی معیارها و پارامترهای مقایسه‌ای مهم، حالت بهینه پیش‌بینی شده است.

## مواد و روش پژوهش

نخست یک رزین اپوکسی با کارایی بالا از نوع Araldite به عنوان فاز زمینه کامپوزیت انتخاب شد و زمان و دمای ژل شدن آن با استفاده از افزودنی‌های مناسب اصلاح گردید. الیاف کربن با استحکام بالا از نوع T700-S نیز به عنوان فاز تقویت کننده انتخاب شد.

<sup>1</sup> - Compressed Natural Gas

<sup>2</sup> - Natural Gas Vehicle

## آنالیز المان محدود مدل‌ها و روابط ریاضی

در حالت کلی، تعیین ویژگی‌های لمینا نسبت به مواد تجاری مرسوم، دشوارتر است و به صرف هزینه و زمان بیش‌تری نیاز دارد. می‌توان ویژگی‌های لمینا را با بکارگیری روابط میکرو مکانیک مناسب و بر اساس کسر حجمی الیاف تقویت کننده، حالت‌های واماندگی و شرایط گوناگون لمینا و لمینت ناشی از آن پیش‌بینی کرد. کاژ روابط میکرو مکانیک گوناگونی را جمع‌آوری و ارائه کرده است [۱۸]. در این پژوهش، نخست ویژگی‌های گوناگون اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت تعیین شد. از قانون مخلوط‌ها و روابط الاستیسیته میکرو مکانیک به ترتیب برای پیش‌بینی چگالی و چهار ثابت کشسان استفاده شد. پنج کمیت استحکامی و دو ضریب انبساط حرارتی نیز با استفاده از روابط میکرو مکانیک متداول محاسبه شد.

برای نمونه، از روابط زیر برای تعیین مدول یانگ عرضی با رویکرد الاستیسیته استفاده شد [۱۸] که نتیجه نهایی آن نیز در شکل ۳ رسم شده است:

$$E_2 = 2(1 + \nu_{23})G_{23} \quad (1)$$

در این رابطه  $G_{23}$  و  $\nu_{23}$  به ترتیب مدول برشی عرضی و نسبت پواسون عرضی است. نسبت پواسون عرضی با رابطه زیر محاسبه شد:

$$\nu_{23} = \frac{K^* - mG_{23}}{K^* + mG_{23}} \quad (2)$$

که در آن

$$m = 1 + 4K^* \frac{V_{12}^2}{E_1} \quad (3)$$

نسبت پواسون اصلی ( $\nu_{12}$ ) با استفاده از روابط زیر و بر اساس کسر حجمی الیاف کربن ( $V_f$ ) و کسر حجمی فاز زمینه ( $V_m$ ) همراه با نسبت پواسون الیاف زمینه ( $\nu_f$  به ترتیب  $D_f$  و  $D_m$ ) محاسبه شد:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m + \frac{V_f V_m (\nu_f - \nu_m) (2E_f \nu_m^2 + \nu_m E_f - E_f + E_m - \nu_f E_m - 2E_m \nu_f^2)}{E_f (2V_f \nu_m^2 - \nu_m + V_f \nu_m - \nu_f - 1) + E_m (-1 - 2V_f \nu_f^2 + \nu_f - V_f \nu_f + 2\nu_f^2 + V_f)} \quad (4)$$

مدول حجمی کامپوزیت ( $K^*$ ) تحت کرنش صفحه‌ای طولی و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

ویژگی‌های نهایی سیستم رزین و الیاف کربن در جدول ۱ آمده است. داده‌های این جدول با استفاده از انجام آزمایش‌های امکان‌پذیر (مانند استحکام کششی)، با مراجعه به برگه‌های اطلاعاتی تأیید شده به وسیله فروشنده الیاف کربن و رزین (مانند ضریب انبساط حرارتی)، با استفاده از کتاب‌های راهنما و مقاله‌هایی که گستره‌ای از ویژگی‌های مواد گوناگون را در شرایط متفاوت ارائه می‌دهند (مانند استحکام فشاری) و یا با محاسبه، برآورد و نرمال‌سازی ویژگی‌ها به کمک روابط متداول مهندسی (مانند مدول برشی) بدست آمده است. بر اساس استاندارد ISO-11439 و رابطه‌ای تجربی [۸]، یک آستر آلومینیومی مناسب با ضخامت ۳mm نیز انتخاب شد (جدول ۲ را ببینید).

برای ساخت این کپسول کامپوزیتی، یک دستگاه CNC پنج محوری در شرکت فراسان ساخته شد: دو حرکت در سیستم مختصات دکارتی و سه حرکت در سیستم مختصات قطبی. بهترین شرایط کاری این دستگاه رشته‌پیچ، در کسرهای حجمی ۵۰ تا ۶۰ درصد از الیاف کربن بدست آمد. شکل ۱ بخشی از این دستگاه را با چگونگی حرکت آن نشان می‌دهد (در این شکل، حرکت چرخشی کپسول در مختصات ZY نشان داده نشده است). نخستین فرآورده تولید شده با این دستگاه، در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$K^* = \frac{K_m(K_f + G_m)V_m + K_f(K_m + G_m)V_f}{(K_f + G_m)V_m + (K_m + G_m)V_f} \quad (۵)$$

که در آن

$$K_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)(1-2\nu_f)} \quad \text{و} \quad K_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)(1-2\nu_m)} \quad (۶)$$

مدول برشی عرضی به عنوان جواب معادله درجه دو زیر محاسبه شد:

$$A\left(\frac{G_{23}}{G_m}\right)^2 + 2B\left(\frac{G_{23}}{G_m}\right) + C = 0 \quad (۷)$$

که در آن

$$A = 3V_f(1-V_f)^2\left(\frac{G_f}{G_m}-1\right)\left(\frac{G_f}{G_m}+\eta_f\right) + \left[\frac{G_f}{G_m}\eta_m + \eta_f\eta_m - \left(\frac{G_f}{G_m}\eta_m - \eta_f\right)V_f^3\right] \left[V_f\eta_m\left(\frac{G_f}{G_m}-1\right) - \left(\frac{G_f}{G_m}\eta_m + 1\right)\right] \quad (۸)$$

$$B = -3V_f(1-V_f)^2\left(\frac{G_f}{G_m}-1\right)\left(\frac{G_f}{G_m}+\eta_f\right) + \frac{1}{2}\left[\frac{G_f}{G_m}\eta_m + \left(\frac{G_f}{G_m}-1\right)V_f + 1\right] \left[(\eta_m - 1)\left(\frac{G_f}{G_m}+\eta_f\right) - 2\left(\frac{G_f}{G_m}\eta_m - \eta_f\right)V_f^3\right] + \frac{V_f}{2}(\eta_m + 1)\left(\frac{G_f}{G_m}-1\right)\left[\frac{G_f}{G_m}+\eta_f + \left(\frac{G_f}{G_m}\eta_m - \eta_f\right)V_f^3\right] \quad (۹)$$

$$C = 3V_f(1-V_f)^2\left(\frac{G_f}{G_m}-1\right)\left(\frac{G_f}{G_m}+\eta_f\right) + \left[\frac{G_f}{G_m}\eta_m + \left(\frac{G_f}{G_m}-1\right)V_f + 1\right] \left[\frac{G_f}{G_m}+\eta_f + \left(\frac{G_f}{G_m}\eta_m - \eta_f\right)V_f^3\right] \quad (۱۰)$$

$$\eta_m = 3 - 4\nu_m \quad (۱۱)$$

$$\eta_f = 3 - 4\nu_f \quad (۱۲)$$

۱- نوع مسئله از نوع سازه‌ای - حرارتی و روش حل از نوع h-method انتخاب شد.

۲- انتخاب المان‌های سه بُعدی سازگار با یکدیگر و هندسه مسئله: SOLID45 برای آستر و SOLID46 برای لایه‌های کامپوزیتی.

۳- تعریف ویژگی‌های کشسان: Material-1 به عنوان آستر آلومینیومی و Material-2 به عنوان لمینت.

خروجی روابط گوناگون میکرو مکانیک برای تعیین ویژگی‌های لمیناهای با کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد یاف کربن در جدول ۳ آمده است.

### شبیه‌سازی سه بُعدی

۱۰ گام اصلی زیر برای انجام شبیه‌سازی سه بُعدی با نرم‌افزار ANSYS-12 طی شد:

## نتایج و بحث

### نتایج شبیه‌سازی مکانیکی

همان گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، شرایط کاری بهینه دستگاه CNC رشته‌پیچ در کسر حجمی ۵۰ تا ۶۰ درصد از الیاف کربن بدست آمد و از این رو شبیه‌سازی تنها در این بازه و در سه کسر حجمی مشخص از آن انجام گرفت: ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد. کپسول‌های CNG فولادی در یک حجم یکسان، ۱۳mm ضخامت دارند و در این کار نیز بررسی رفتار نوع کامپوزیتی آن حداکثر تا ۸۰ لایه پیش رفت تا مجموع ضخامت لایه‌های کامپوزیتی و آستر آلومینیومی، همان ۱۳mm شود: ۳mm آستر + ۱۰mm لمینت. از سوی دیگر، با توجه به زمان بسیار زیاد انجام و تکرار مراحل شبیه‌سازی، در عمل، بررسی تعداد لایه‌های بیش‌تر از ۸۰ لایه نیز امکان‌پذیر نبود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۶ تا ۹ آمده است. هر نقطه از این نمودارها، نتیجه یک مرحله مدل‌سازی و شبیه‌سازی جداگانه است زیرا در این پژوهش به جای المان‌های SHELL، از المان‌های دقیق‌تر SOLID استفاده شده است و در نتیجه، برای هر کسر حجمی، تعداد لایه و ضخامت، کل فرایند شبیه‌سازی از ابتدا تا انتها انجام شد.

### بحث درباره شبیه‌سازی مکانیکی

بر اساس نتایج بدست آمده از روابط میکرو مکانیک (جدول ۳)، با افزایش کسر حجمی الیاف کربن، مقادیر  $E_1$ ،  $E_2$  و  $G_{12}$  افزایش می‌یابند و در نتیجه، بیش‌ترین مقدار افزایش قطر مخزن نیز کاهش می‌یابد (شکل ۶ را ببینید).

شکل ۷ یک رفتار واماندگی نامنتظره را پیش‌بینی می‌کند: با افزایش کسر حجمی الیاف کربن با استحکام بالا از ۵۰ به ۶۰ درصد، لایه‌های کامپوزیتی در تنش‌های کمتری دچار واماندگی می‌شوند و مقدار معیار واماندگی Tsai-Wu افزایش می‌یابد. می‌توان این رفتار نامعمول را با استفاده از نتایج روابط میکرو مکانیک توضیح داد. همان گونه که جدول ۳ نشان می‌دهد، با افزایش کسر حجمی الیاف تقویت کننده، مقدار همه ویژگی‌های مکانیکی لمینای مورد نظر افزایش نمی‌یابد:  $\sigma_{1,T}$  و  $\sigma_{2,C}$  افزایش و  $\sigma_{1,C}$ ،  $\sigma_{2,T}$  و  $\tau_{12}$  کاهش می‌یابد. افزون بر آن، باید

۴- تعریف ویژگی‌های واماندگی لمینا: ویژگی‌های مکانیکی لمینا که با استفاده از روابط میکرو مکانیک در سه کسر حجمی تعیین شد.

۵- تعریف لمینت: ویژگی‌های لمینا، جهت‌گیری آن ( $54.7^\circ$ )، ضخامت آن (۱.۲۵mm) و چیدمان آن (نامتقارن) تعریف شد. دلایل انتخاب این زاویه و نوع چیدمان در [۱۹] تشریح شده است.

۶- مدل‌سازی: شکل ۴ مقطع طولی کپسول CNG مورد بررسی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این پژوهش با دو فرض اصلی، این کپسول به صورت یک لوله تحت فشار مدل‌سازی شد: در هیچ نقطه از مخزن، دما افزایش نیابد و مقدار تمرکز تنش نیز از تنش وارد بر طول مخزن بیش‌تر نشود. سپس به دلیل تقارن محوری، نیمی از آن لوله تحت فشار، مدل شد. باید خاطر نشان کرد که در این حالت با توجه به اعمال شرایط مرزی در ابتدا و انتهای مخزن، مقدار داده‌های خروجی در این نواحی می‌تواند به مقدار قابل ملاحظه‌ای متفاوت از شرایط واقعی باشد؛ از این رو، داده‌ها در نواحی میانی مخزن قرائت شده است تا به مقدار کافی از نواحی انتهایی فاصله داشته باشد و کمترین خطای ممکن در آن وارد شود.

۷- مش: هر دوی آستر و لمینت به صورت Hex/Wedge با مش با اندازه مناسب، مش زده شد.

۸- تعریف نیرو و شرایط مرزی: بر اساس استاندارد ISO-11439 فشار داخلی ۲۱۰ بار در یک شرایط مرزی مناسب وارد شد.

۹- حل و نتایج: بیش‌ترین مقدار افزایش قطر مخزن، معیار واماندگی Tsai-Wu برای لمینت و کرنش Von Mises برای آستر آلومینیومی بررسی شد. برای نمونه، نتیجه واماندگی Tsai-Wu برای یک لمینت ۲۰ لایه در شکل ۵ آمده است.

۱۰- تکرار: مراحل ۹ گانه بالا برای لمینت‌های ۲۰ تا ۸۰ لایه در کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد از الیاف کربن تکرار شد.

همزمان تنش‌های حرارتی و مکانیکی در نظر گرفته و ارزیابی شد. برای این منظور، بر اساس استاندارد ISO-11439، یک بازه دمایی بیشینه، برابر با ۴۰- تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد وارد شد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتایج شبیه‌سازی سه بُعدی ترمومکانیکی را نشان می‌دهند. همان گونه که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، با اضافه شدن تنش‌های حرارتی، مقدار معیار و اماندگی Tsai-Wu برای لمینت بیش از پیش افزایش می‌یابد و در نتیجه، شرایط و اماندگی آن بحرانی‌تر می‌شود.

بر اساس پیش‌بینی‌های روابط میکرو مکانیک، مقدار  $\alpha_1$  بسیار کمتر از مقدار  $\alpha_2$  خواهد بود (جدول ۳) و از سوی دیگر، ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم از  $\alpha_1$  بیش‌تر است (جدول ۲). با توجه به شکل ۱۱، تأثیر  $\alpha_1$  در تعداد لایه‌های ۷۰ تا ۸۰، غالب می‌شود و به دلیل اعمال تنش‌های فشاری از سوی لایه‌های کامپوزیتی به آستر آلومینیومی، شرایط بارگذاری ترمومکانیکی آن به حالت بارگذاری مکانیکی بیش از پیش نزدیک می‌شود.

### نتایج

در این پژوهش، رفتار ترمومکانیکی کپسول‌های CNG کامپوزیتی الیاف کربن- رزین اپوکسی رشته‌پیچی شده بررسی شد. بر اساس نتایج، با افزایش همزمان تعداد لایه‌ها و کسر حجمی الیاف کربن، بیش‌ترین مقدار افزایش قطر مخزن کاهش می‌یابد و از این رو، و اماندگی آستر آلومینیومی بهبود می‌یابد؛ در حالی که و اماندگی لمینت‌های کامپوزیتی بحرانی‌تر می‌شود. تنش‌های حرارتی نیز یک نقش مخرب بر استحکام و توانایی تحمل نیروی لمینت ایفا می‌کنند، اما با افزایش تعداد لایه‌ها، تأثیر این تنش‌ها در و اماندگی آستر آلومینیومی کاهش می‌یابد و از ۸۰ لایه به بعد می‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. در پایان می‌توان کسر حجمی ۵۵ درصد از الیاف کربن را به عنوان کسر حجمی بهینه در بازه ۵۰ تا ۶۰ درصد معرفی کرد و مخازن تحت فشار ایمن‌تری را با آن ساخت.

خاطر نشان کرد که معیار و اماندگی Tsai-Wu، معیاری تعاملی است و تأثیر همزمان همه نیروها و استحکام‌های لمینا را در نظر می‌گیرد و از این رو، می‌توان کسر حجمی ۵۰ درصد از الیاف کربن را به عنوان ایمن‌ترین حالت برای و اماندگی لمینت معرفی کرد. این موضوع، به گونه‌ای دیگر با استفاده از معیار کمترین فشار داخلی که موجب و اماندگی در نخستین لایه لمینت می‌شود نیز بررسی شد. در این معیار که نتیجه‌ای از معیار Max Stress یا تنش بیشینه است، هنگامی لمینت و امانده تلقی می‌شود که در یکی از لایه‌های آن، تنش به بیش‌ترین مقدار قابل تحمل خود برسد. در این حالت نیز این معیار، نتیجه‌ای مشابه با معیار Tsai-Wu پیش‌بینی و برتری کسر حجمی ۵۰ درصد از الیاف کربن را برای بهبود و اماندگی لایه‌های کامپوزیتی تصدیق می‌کند (شکل ۸).

شکل ۹ نمودار کرنش von Mises آستر آلومینیومی بر حسب تعداد لایه‌ها در سه کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد از الیاف کربن را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، با افزایش تعداد لایه‌ها و کسر حجمی الیاف کربن، اگرچه همچنان مقدار کرنش معادل آستر آلومینیومی از کرنش تسلیم آن (۰/۰۰۴) بالاتر است، اما مقدار آن تا حدود دو برابر کاهش و در نتیجه، شرایط و اماندگی آن ارتقا یافته است. این رفتار ناشی از کاهش بیش‌ترین مقدار افزایش قطر کپسول است و از این رو، ایمن‌ترین کسر حجمی الیاف کربن برای بهبود و اماندگی آستر، با انتخاب بیش‌ترین کسر حجمی ممکن (۶۰ درصد) بدست می‌آید. همان گونه که این چهار نمودار ناشی از شبیه‌سازی نشان می‌دهند، کسر حجمی ۵۵ درصد از الیاف تقویت کننده، میانگینی از ویژگی‌های کسر حجمی ۵۰ درصد (واماندگی ایمن‌تر برای لمینت) و ۶۰ درصد (واماندگی ایمن‌تر برای آستر) را دارد و می‌توان آن را به عنوان کسر حجمی بهینه در نظر گرفت.

### نتایج و بحث درباره شبیه‌سازی ترمومکانیکی

همان گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، کسر حجمی ۵۵ درصد از الیاف تقویت کننده، کارایی بهینه مکانیکی را ایجاد می‌کند. به دلیل حضور و اهمیت تنش‌های ترمومکانیکی در مواد کامپوزیتی زمینه پلیمری، تأثیر

امامی مدیر محترم مجموعه کارخانه‌های فراسان و کارکنان آن مجموعه می‌دانند. در حقیقت، این پژوهش بدون حمایت‌های مالی و فنی ایشان ممکن نبود.

### References

- 1- F. Ryan, B. Caulfield, "Examining The Benefits of Using Bio-CNG in Urban Bus Operations", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 15 (6), 362-365, 2010.
- 2- M. U. Aslam, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, H. Abdesselam, T. M. I. Mahlia, M. A. Amalina, "An Experimental Envestigation of CNG as an Alternative Fuel for a Retrofitted Gasoline Vehicle", *Fuel*, Vol. 85 (5-6), 717-724, 2006.
- 3- S. Yeh, "An Empirical Analysis on the Adoption of Alternative Fuel Vehicles: The Case of Natural Gas Vehicles", *Energy Policy*, Vol. 35 (11), 5865-5875, 2007.
- 4- ISO standard: 11439 (2000), "Gas Cylinders - High Pressure Cylinders for the On-Board Storage of Natural Gas as a Fuel for Automotive Vehicles".
- 5- ANSI/CSA standard: NGV2 (2000), "Basic Requirements for Compressed Natural Gas Vehicle (NGV) Fuel Containers".
- 6- A. Önder, O. Sayman, T. Dogan, N. Tarakcioglu, "Burst Failure Load of Composite Pressure Vessels", *Composite Structures*, Vol. 89 (1), 159-166, 2009.
- 7- L. Zu, S. Koussios, A. Beukers, "Optimal Cross Sections of Filament-Wound Toroidal Hydrogen Storage Vessels Based on Continuum Lamination Theory", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35 (19), 10419-10429, 2010.
- 8- L. Zu, S. Koussios, A. Beukers, "Shape Optimization of Filament Wound Articulated Pressure Vessels Based on Non-Geodesic Trajectories", *Composite Structures*, Vol. 92 (2), 339-346, 2010.
- 9- L. Zu, S. Koussios, A. Beukers, "Design of Filament-Wound Isotensoid Pressure Vessels With Unequal Polar Openings",

### تشکر و قدردانی

- نویسندگان این مقاله، دستاوردهای خود را مدیون همکاری صمیمانه و بی‌دریغ آقای دکتر محمد رضا ظهیر
- Composite Structures*, Vol. 92 (9), 2307-2313, 2010.
- 10- A. Vafaeseefat, "Dome Shape Optimization of Composite Pressure vessels Based on Rational B-Spline Curve and Genetic Algorithm", *Applied Composite Materials*, Vol. 16 (5), 321-330, 2009.
  - 11- T. L. Teng, C. M. Yu, Y. Y. Wu, "Optimal Design of Filament-Wound Composite Pressure Vessels", *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 41 (4), 333-340, 2005.
  - 12- Z. Changliang, R. Mingfa, Z. Wei, C. Haoran, "Delamination Prediction of Composite Filament Wound Vessel with Metal Liner Under Low Velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 75 (1-4), 387-392, 2006.
  - 13- P. Xu, J. Y. Zheng, P. F. Liu, "Finite Element Analysis of Burst Pressure of Composite Hydrogen Storage Vessels", *Materials and Design*, Vol. 30 (7), 2295-2301, 2009.
  - 14- C. S. Mao, M. F. Yang, D. G. Hwang, H. C. Wang, "An Estimation of Strength for Composite Pressure Vessels", *Composite Structures*, Vol. 22 (3), 179-186, 1992.
  - 15- C. Frias, H. Faria, O. Frazo, P. Vieira, A. T. Marques, "Manufacturing and Testing Composite Overwrapped Pressure Vessels with Embedded Sensors", *Materials and Design*, Vol. 31 (8), 4016-4022, 2010.
  - 16- D. Cohen, S. C. Mantell, L. Zhao, "The Effect of Fiber Volume Fraction on Filament Wound Composite Pressure Vessel Strength", *Composites*, Vol. 32 (5), 413-429, 2001.
  - 17- ASTM standard: B 308/B 308M (2002), "Standard Specification for Aluminum – alloy 6061- T6 Standard Structural Profiles"
  - 18- A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2ed., p. 203-301, CRC Press, London, 2005.
  - 19- S. Karimi, "Materials Selection and Design for Manufacturing a Suitable Composite CNG Tank", M.S. Thesis Shiraz University, 2011.

## پیوست‌ها

جدول ۱- ویژگی‌های الیاف کربن و سیستم رزین تشکیل‌دهنده لمینت کامپوزیتی.

ویژگی	واحد	الیاف کربن	منبع داده	سیستم رزین	منبع داده
چگالی ( $\rho$ )	$g/cm^3$	۱/۸	b	۱/۲	a
مدول یانگ طولی ( $E_1$ )	GPa	۲۳۰	b	۳/۶۳	a
مدول یانگ عرضی ( $E_2$ )	GPa	۲۲	c	۳/۶۳	a
مدول برشی طولی ( $G_{21}$ )	GPa	۸۸/۴۶	d	۱/۴	d
مدول برشی عرضی ( $G_{12}$ )	GPa	۸/۱۵	d	۱/۴	d
نسبت پواسون عرضی ( $\nu_{12}$ )	-	۰/۲	c	۰/۳	c
استحکام کششی طولی ( $\sigma_{1,T}$ )	MPa	۴۹۰۰	b	۷۹	a
استحکام کششی عرضی ( $\sigma_{2,T}$ )	MPa	۱۸۲/۴۹	d	۷۹	a
استحکام فشاری طولی ( $\sigma_{1,C}$ )	MPa	۴۷۳۷	d	۱۴۰	c
استحکام فشاری عرضی ( $\sigma_{2,C}$ )	MPa	۹۹/۵۴	d	۱۴۰	c
استحکام برشی ( $\tau_{12}$ )	MPa	۳۶	c	۵۶	b
ضریب انبساط حرارتی طولی ( $\alpha_1$ )	$10^{-6}/^{\circ}C$	-۰/۳۸	b	۶۳	b
ضریب انبساط حرارتی عرضی ( $\alpha_2$ )	$10^{-6}/^{\circ}C$	۷	c	۶۳	b

a: آزمایش مستقیم      b: برگه اطلاعاتی فرآورده      c: کتاب راهنما و مقاله      d: محاسبه، تخمین و نرمال‌سازی

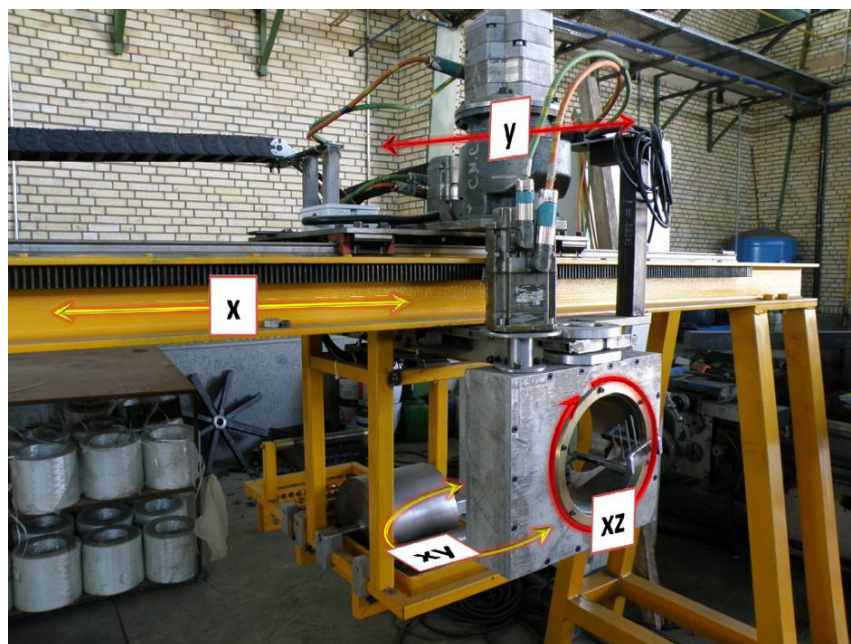
جدول ۲- ویژگی‌های آستر آلومینیومی انتخاب شده [۱۷].

مقدار	ویژگی
۲/۷	چگالی ( $g/cm^3$ )
۳۱۰	استحکام کششی (MPa)
۲۷۶	استحکام تسلیم (MPa)
۶۸/۹	مدول یانگ (GPa)
۰/۰۰۴	کرنش تسلیم
۰/۱	کرنش شکست
۱۲	ازدیاد طول (%)
۰/۳۳	نسبت پواسون
۲۵/۲	ضریب انبساط حرارتی ( $\mu m/m^{\circ}C$ )



جدول ۳- ویژگی های لمینا که با روابط میکرو مکانیک محاسبه شده است.

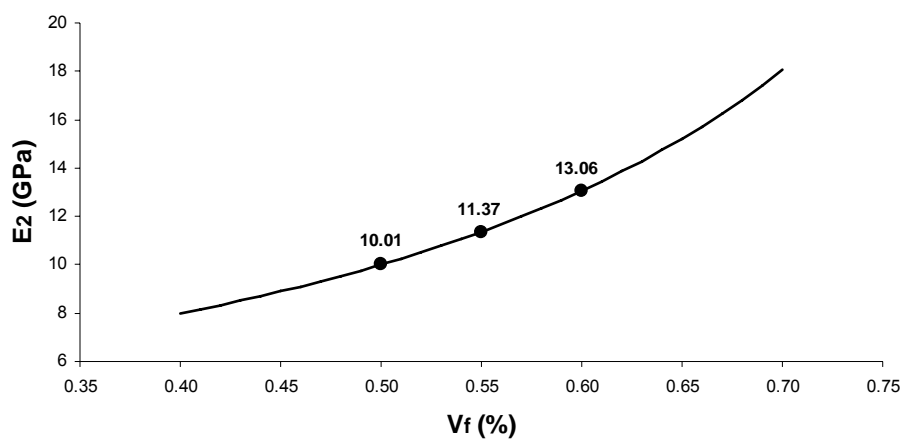
$V_f = 60\%$	$V_f = 55\%$	$V_f = 50\%$	واحد	ویژگی
۱,۵۶	۱,۵۳	۱,۵۰	$g/cm^3$	چگالی ( $\rho$ )
۱۳۹,۵	۱۲۸,۲	۱۱۶,۸	GPa	مدول یانگ طولی ( $E_1$ )
۱۳,۰۶	۱۱,۳۷	۱۰,۰۱	GPa	مدول یانگ عرضی ( $E_2$ )
۵,۲۹	۴,۵۹	۴,۰۳	GPa	مدول برشی عرضی ( $G_{12}$ )
۰,۲۵	۰,۲۶	۰,۲۷	-	نسبت پواسون عرضی ( $\nu_{12}$ )
۲۹۴۰,۰۳	۲۶۹۵,۰۳	۲۴۵۰,۰۴	MPa	استحکام کششی طولی ( $\sigma_{1,T}$ )
۳۹,۷۱	۴۳,۶۳	۴۶,۷۹	MPa	استحکام کششی عرضی ( $\sigma_{2,T}$ )
۱۰۶,۴۰	۱۱۰,۷۰	۱۱۵,۰۰	MPa	استحکام فشاری طولی ( $\sigma_{1,C}$ )
۱۳۶,۰۶	۱۳۲,۰۶	۱۲۸,۸۹	MPa	استحکام فشاری عرضی ( $\sigma_{2,C}$ )
۲۹,۵۶	۳۲,۴۱	۳۴,۶۲	MPa	استحکام برشی ( $\tau_{12}$ )
۰,۲۸	۰,۴۳	۰,۶۰	$10^{-6}/^{\circ}C$	ضریب انبساط حرارتی طولی ( $\alpha_1$ )
۳۸,۹۹	۴۲,۷۸	۴۶,۵۶	$10^{-6}/^{\circ}C$	ضریب انبساط حرارتی عرضی ( $\alpha_2$ )



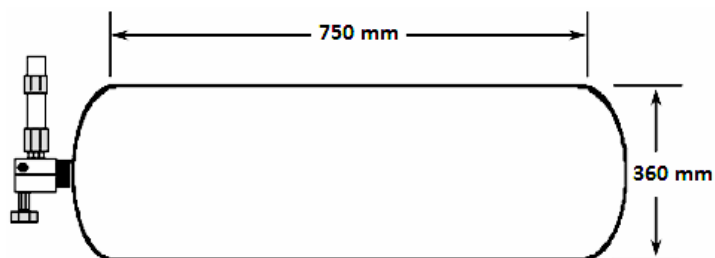
شکل ۱- دستگاه رشته پیچ ۵ محوری که در این پژوهش ساخته شد.



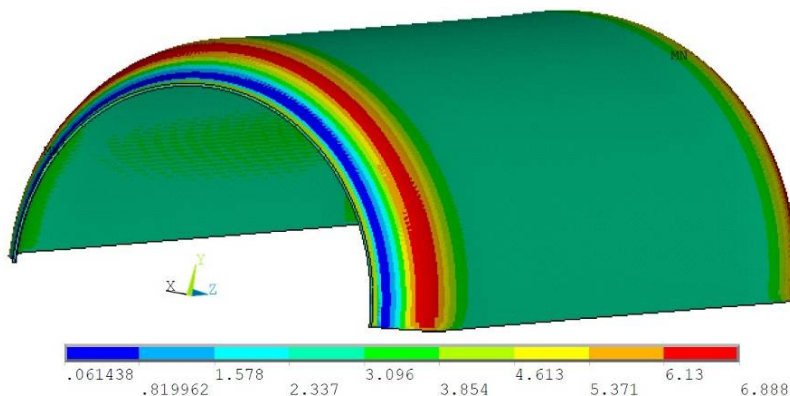
شکل ۲- نخستین فرآورده دستگاه رشته پیچ.



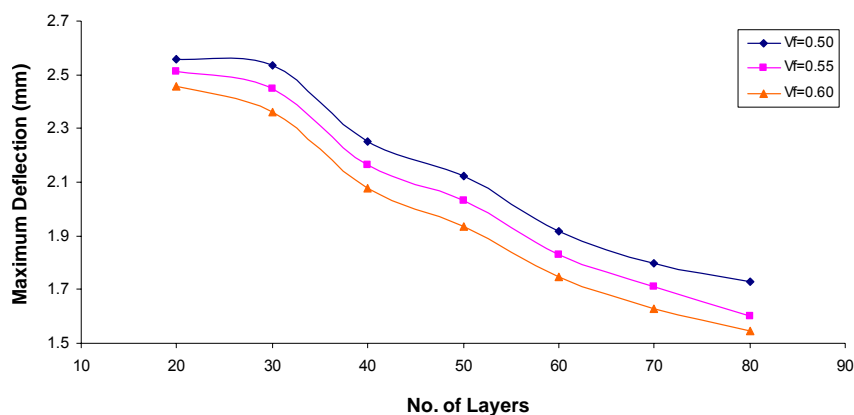
شکل ۳- خروجی روابط میکرو مکانیک برای محاسبه مدول یانگ عرضی در سه کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد از الیاف کربن.



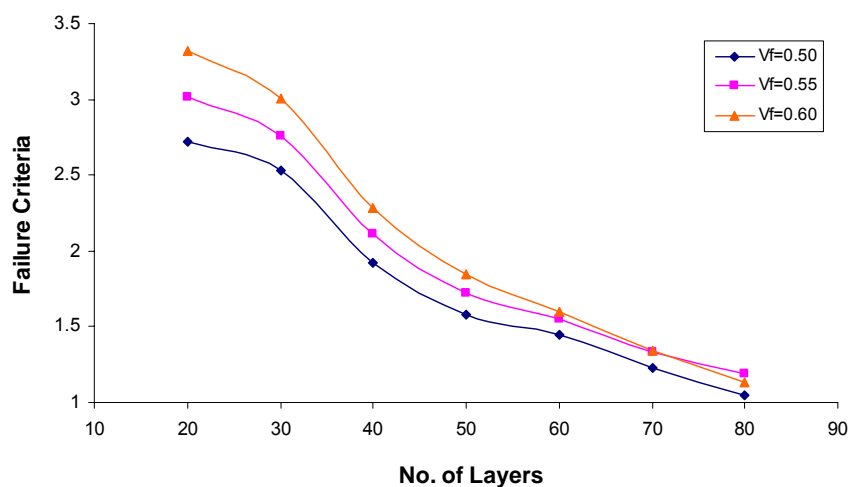
شکل ۴- شکل شماتیک مقطع طولی مخزن CNG کامپوزیتی مورد بررسی در این پژوهش.



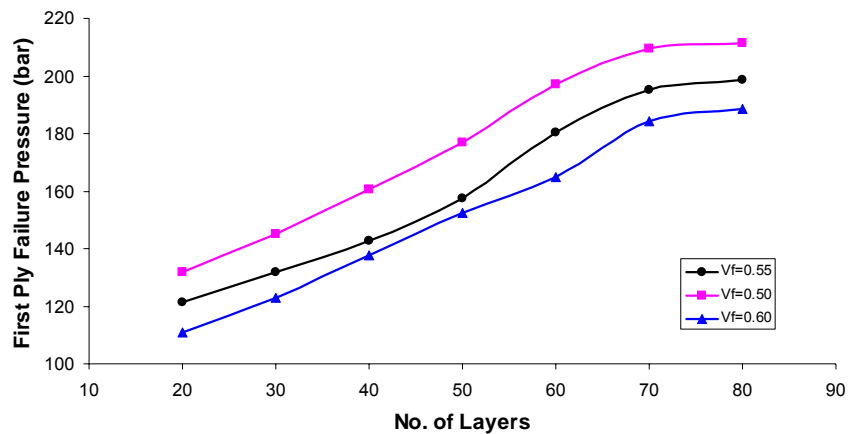
شکل ۵- مقادیر معیار واماندگی Tsai-Wu برای یک کپسول CNG کامپوزیتی ۲۰ لایه با کسر حجمی ۵۰ درصد از الیاف کربن.



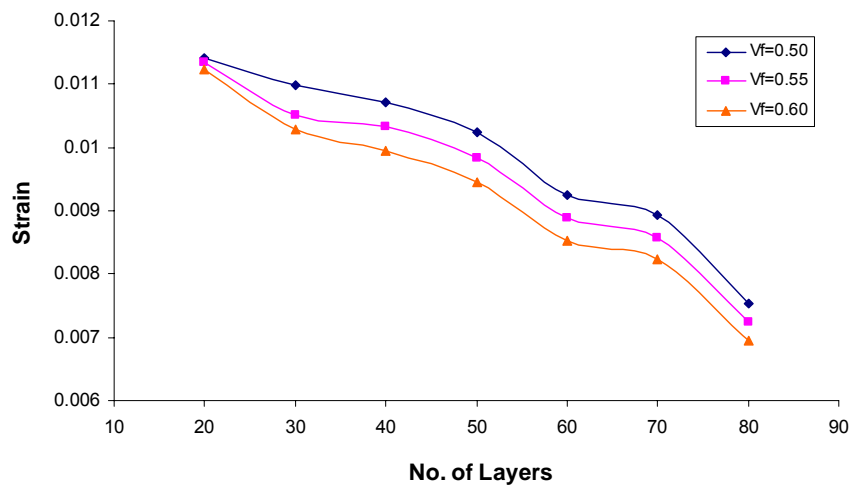
شکل ۶- بیشترین مقدار افزایش قطر مخزن بر حسب تعداد لایه‌های آن برای سه کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد از الیاف کربن.



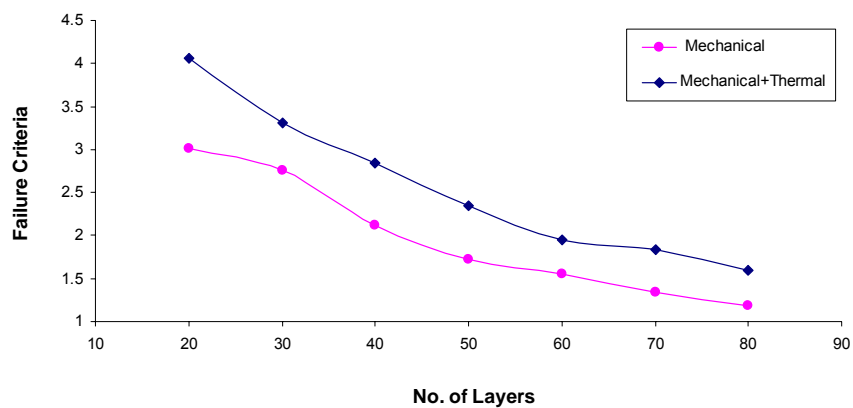
شکل ۷- معیار واماندگی Tsai-Wu لمینت بر حسب تعداد لایه‌های آن برای سه کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد از الیاف کربن.



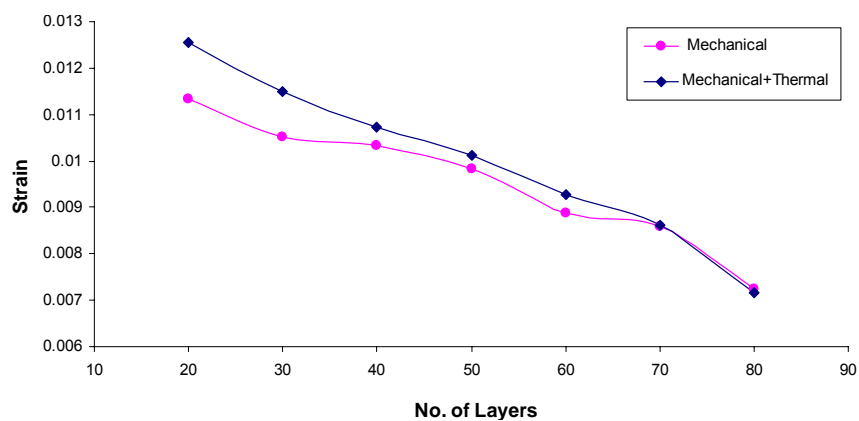
شکل ۸- نمودار کم‌ترین فشار داخلی که موجب اماندگی در نخستین لایه می‌شود بر حسب تعداد لایه‌های کامپوزیتی برای سه کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد.



شکل ۹- کرنش von Mises آستر آلومینیومی بر حسب تعداد لایه‌های آن برای سه کسر حجمی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد از الیاف کربن.



شکل ۱۰- معیار واماندگی Tsai-Wu لمینت بر حسب تعداد لایه‌های آن برای کسر حجمی ۵۰ درصد از الیاف کربن.



شکل ۱۱- کرنش von Mises آستر آلومینیومی بر حسب تعداد لایه‌های آن برای کسر حجمی ۵۰ درصد از الیاف کربن.

