

بررسی رفتار خمشی یک ساختار ساندویچی انعطاف پذیر جدید

محمدرضا ذاکرزاده^{1*}، حمید صالحی²، ابوالفضل صالحی³، مصطفی باغانی¹

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-4563، zakerzadeh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 آذر 1394

پذیرش: 05 بهمن 1394

ارائه در سایت: 25 بهمن 1394

کلید واژگان:

سازه ساندویچی انعطاف پذیر باربر

رفتار هایپر الاستیک¹

بال هوشمند

چکیده

در این مقاله یک ساختار ساندویچی انعطاف پذیر نوین معرفی شده است که می‌تواند در هواپیمایی که بصورت هوشمند قادر به تغییر شکل خارجی خود در رژیم‌های مختلف پروازی است، کاربرد داشته باشد. ابتدا مروری بر ایده‌های مختلف ارائه شده در دنیا برای دستیابی به این هدف انجام شده و در ادامه ویژگی‌های سازه جدید معرفی و تفاوت‌های آن با سایر ایده‌ها بیان شده است. سپس فرآیند ساخت و مراحل مختلف شکل دادن به ساختار جدید شرح شده است. در یک هواپیمایی با انحنای بال متغییر، بخش تغییر شکل پذیر بال را می‌توان بصورت تیر یکسردرگیر فرض نمود. بنابراین نمونه‌هایی از ساختار جدید بصورت تیر یکسردرگیر ساخته و تحت نیروی انتهایی آزمایش شده است. از آنجا که تحلیل عددی ساختار نوین مستلزم شناخت رفتار مکانیکی اجزاء مورد استفاده در آن است، بررسی جامعی در مورد رفتار مکانیکی تک تک اجزاء تشکیل دهنده ساختار نوین انجام شده است. در انتها از روش عددی، جهت مدلسازی نمونه منتخب سازه جدید، استفاده شده و تغییرات خیز نمونه‌ها با تغییر بار انتهایی بررسی شده است. با توجه به مشاهدات نمونه شکسته شده در یکی از مدل‌ها، توزیعی برای حفره‌های ناشی از فرآیند ساخت در نظر گرفته شده تا نتایج عددی دقیق‌تری بدست آید. در نهایت با همین فرضیات نمونه دیگری تحلیل شده و نشان داده شده که نتایج مدل دوم با نتایج تجربی همخوانی دارد.

Bending analysis of a new deformable sandwich structure

Mohammad Reza Zakerzadeh^{1*}, Hamid Salehi², Abolfazl Salehi², Mostafa Baghani¹

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, zakerzadeh@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 December 2015
Accepted 25 January 2016
Available Online 14 February 2016

Keywords:
Deformable and load bearable sandwich structure
Hyperelastic behavior
Smart wing

ABSTRACT

In this paper, an innovative flexible sandwich structure is introduced which can be used in shape changing (morphing) aircrafts that adapt their external shape to different flight conditions. First, different ideas for achieving smart aircraft in the literature are briefly reviewed and then characteristics of the new deformable sandwich structure as well as its different features in comparison to other proposed structures are described. Moreover, fabrication details of deformable and load bearable sandwich panel are explained. In an aircraft with variable camber wings, deformable sections can be supposed as a cantilever beam. As a result, some specimens of new deformable sandwich structure are constructed and then tested as end-loaded beams. Since the numerical study of the new proposed structure requires an understanding of the mechanical behavior of components used, a comprehensive study about the mechanical behavior of individual components of structure is conducted. According to the observation of broken samples, a distribution of cavities resulting from the manufacturing process is supposed in one type of model to obtain more accurate numerical results. Finally, another example is analyzed with the same assumptions and it is shown that in the second example, the numerical results are close to the experimental data.

1- مقدمه

کل بال برای هواپیماهای کوچک و انعطاف پذیر آن دوران مناسب بود اما نیاز به سرعت‌های بالا و سنگین تر شدن هواپیماها، باعث افزایش شدید نیروهای آیرودینامیکی وارد بر سازه بال گردید. طبیعتاً در این حالت، سازه بال برای تحمل این نیروها باید فوق العاده قویتر و صلب تر طراحی می‌شد. علاوه بر این در طی جنگ جهانی اول مشخص شد که ایرفویل‌های ضخیم تر نسبت به ایرفویل‌های نازک تر برای بیشتری تولید می‌کنند که در پی آن سازه هواپیما، بخصوص بال، قوی تر و صلب تر گردید. بنابراین ایده تغییر شکل کل بال به سرعت جای خود را به تغییر شکل بخش‌های کوچکی از بال همانند سطوح

در اولین هواپیمای موتوردار که توسط براداران رایت به پرواز درآمد برای کنترل عرضی هواپیما و همچنین برای کاهش یا افزایش نیروی برای² بال از ایده تغییر شکل پیوسته بال استفاده شده بود که از پرواز پرندگان در طبیعت الهام می‌گرفت. در این هواپیما تغییر شکل لازم در سازه بال به کمک مجموعه‌ای از طناب و قرقره و کشش فیزیکی خلبان ایجاد شده بود. پیش از

1- Hyperelastic
2- Lift

Please cite this article using:

M. R. Zakerzadeh, H. Salehi, A. Salehi, M. Baghani, Bending analysis of a new deformable sandwich structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 235-244, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. R. Zakerzadeh, H. Salehi, A. Salehi, M. Baghani, Bending analysis of a new deformable sandwich structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 235-244, 2016 (in Persian)

کنترل رایج امروزی داد. با این حال مزیت ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ بصورت پیوسته و کنترل شده در هواپیما و مخصوصا بال برای دانشمندان هوافضا کاملا آشکار بوده و تلاش‌های زیادی در جهت طراحی هواپیمایی با قابلیت تغییر شکل در طول پرواز، بخصوص به صورت پیوسته، انجام شده است.

با پیشرفت فناوری مواد هوشمند و همچنین سایر حوزه‌های مرتبط، امیدها برای دستیابی به هواپیمایی که همانند پرنده‌گان طبیعی قابلیت انطباق با شرایط مختلف پرواز را داشته باشد، در میان محققین افزایش یافته است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته و ایده‌های مختلفی ارائه شده و بعضا به پرواز نیز در آمده است [1-4].

از آنجا که بال نقش اساسی در آیرودینامیک هواپیما دارد، عمده تحقیقات بر روی طراحی بال با قابلیت تغییر شکل هوشمند متمرکز شده است. تغییر شکل بال در طول پرواز برای هواپیما می‌تواند به صورت تغییر شکل داخل صفحه بال شامل تغییر در زاویه عقبگرد بال¹، تغییر در طول بال² و تغییر در اندازه عرض بال³ و یا تغییر شکل خارج از صفحه بال شامل پیچش بال حول ریشه⁴، تغییر زاویه هفتی یا هشتی بال⁵ و یا خمیدگی بال در طول آن⁶ باشد [3].

اولین چالش در طراحی بال با قابلیت تغییر شکل، داشتن پوسته مناسب است. با توجه به اینکه وظیفه پوسته بال انتقال بار آیرودینامیکی به سازه داخلی است، یک جزء کاملا باربر محسوب می‌شود. از این رو مواد رایج مورد استفاده در ساخت این بخش از بال مانند آلومینیوم و کامپوزیت‌های پایه پلیمر، دارای صلبیت و استحکام فوق‌العاده بالایی هستند. ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در این پوسته‌ها به دلیل کرنش پلاستیک پایین (در آلومینیوم) و کرنش شکست پایین (در کامپوزیت‌ها) امکان‌پذیر نمی‌باشد. علاوه بر این حتی ایجاد تغییر شکل‌های کوچک در این مواد نیز به نیروی فوق‌العاده‌ای نیاز دارد که خارج از توان عملگرهای عادی می‌باشد. بنابراین پوسته‌ای که یک سازه بال تغییر شکل‌پذیر نیاز دارد باید دو ویژگی انعطاف‌پذیری و قابلیت تحمل بار آیرودینامیکی را همزمان باهم داشته باشد. تیل [1] در سال 2008 یک مقاله مروری ارائه نمود که در آن تکنولوژی‌ها و ایده‌های متعدد برای دستیابی به پوسته انعطاف‌پذیر بررسی شده است. ایده‌های ارائه شده در این زمینه شامل مواد فوق‌العاده ناهمسانگرد⁷، الاستومرها، مواد و ساختارهایی با ضریب پواسون صفر و منفی بوده و این ایده‌ها از جمله بخش‌هایی می‌باشد که در تولید سازه‌های قابل تغییر شکل، توجه محققین را به خود جلب نموده است.

اولین بار ایده استفاده از ساختار کامپوزیتی موج‌دار در پوسته بال هواپیمایی قابل تغییر شکل توسط یوکوزوکی و همکاران در سال 2006 ارائه گردید [5]. این ساختار به دلیل ویژگی خاصی که دارد در راستای طولی فوق‌العاده صلب و مستحکم بوده و در راستای موج کاملا انعطاف‌پذیر است. این ویژگی‌ها که همان ناهمسانگردی مورد نیاز بال است می‌تواند طوری در بال تعبیه شود که راستای طولی بال صلب و مستحکم شده و راستای عرضی آن، که همان مقطع ایرفویل بال است، قابلیت تغییر شکل داشته باشد. ایده ساختار موج‌دار در سالهای اخیر نیز همواره مورد توجه محققین بوده و

مقالات متعددی در مورد آن منتشر شده است [6-11]. یوکوزوکی و سوگیورا در سال 2014 [12] ایده تکمیل شده خود در مورد استفاده از ساختار موج‌دار را در یک ایرفویل پیاده سازی، بررسی و منتشر نموده‌اند. یکی از مشکلات این ساختار در ترکیب با یک پوسته الاستومری ایجاد اعوجاج در ناحیه فشاری است که شکل ایرفویل بال را به هم زده و از کارایی آیرودینامیکی آن می‌کاهد.

ساختارهای لانه زنبوری مورد استفاده در سازه هواپیما یکی از موادی است که دارای خواص ناهمسانگرد بوده و در یک جهت نسبت به جهت دیگر دارای انعطاف‌پذیری بالایی است. یکی از ویژگی‌های این نوع ساختارها داشتن ضریب پواسون در محدوده وسیعی از اعداد منفی و مثبت نسبت به سایر مواد است. در سالهای اخیر استفاده از این ساختارها به همراه روکش الاستومری برای بدست آوردن سازه انعطاف‌پذیر مورد توجه برخی از محققین قرار گرفته است [13، 14]. در حالتی که تک جزء ساختار لانه زنبوری شش گوش باشد این ساختار دارای ضریب پواسون مثبت بالایی است. با این حالت ساختارهایی که شکل تک جزء خاصی داشته باشد می‌تواند ضریب پواسون صفر یا منفی داشته باشد. علی‌رغم توجهی که به این ساختار شده است، مشکلات مربوط به چروکیدگی در این ساختار نیز گزارش شده [15] و همانند ساختار کامپوزیتی موج‌دار این معضل وجود دارد.

یکی از روش‌های قدیمی دستیابی به ایرفویل متغیر استفاده از مکانیزم‌هاست. علی‌رغم قدیمی بودن این ایده و مشکلات گزارش شده برای آن، هنوز هم در مورد این روش و یا ترکیب آن با روش‌های نوین مطالب جدیدی منتشر می‌گردد [16، 17].

الاستومرها یکی از شناخته شده‌ترین مواد انعطاف‌پذیر هستند که در بسیاری از ایده‌های مربوط به سازه‌های انعطاف‌پذیر باربر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. موارد متعددی از استفاده از الاستومرها در طراحی سازه‌های انعطاف‌پذیر هواپیما در مراجع [1-4] نامبرده شده است. ویژگی‌های خاص این مواد مانند انعطاف‌پذیری بالا، استحکام مناسب، در دسترس بودن و حافظه‌داری در برخی نمونه‌های خاص، باعث شده تا در پروژه‌های مشهور هواپیمایی شکل متغیر، این مواد مورد توجه ویژه باشند. مفهوم بال مرغابی شرکت نکس‌جن⁸، هواپیمای Z شکل شرکت لاکهید مارتین [4] و فلب پیوسته هواپیمای جت گلف استریم [18] از نمونه‌های مشهور در زمینه بال هوشمند هستند که از الاستومرها بهره زیادی گرفته‌اند.

در این مقاله ایده جدیدی برای سازه انعطاف‌پذیر باربر ارائه شده که ویژگی‌های آن ناشی از استفاده از الاستومرها و همچنین تغییراتی است که در سازه ساندویچی عادی داده می‌شود. این روش در نهایت منجر به ساختاری نوین می‌گردد که بسته به فرآیند ساخت می‌تواند در جهات مورد نظر نسبت به سازه اولیه کاملا انعطاف‌پذیر شده و یا صلبیت اولیه سازه اولیه در آن تا حدود زیادی حفظ گردد. هدف از ارائه این مقاله معرفی سازه جدید و مطالعه خواص مکانیکی آن است.

2- مشخصات و ویژگی‌های ساختار ساندویچی باربر ابدایی

طراحی و ساخت ایده مورد نظر این مقاله که حاصل مطالعات گسترده در حوزه باربری و انعطاف‌پذیری ساختارهای مختلف می‌باشد، با تغییراتی که در سازه ساندویچی معمولی داده می‌شود، آغاز می‌گردد. ساختار اولیه شامل یک مغزی لانه زنبوری با رویه‌های کامپوزیتی است که در صنعت مواد مرکب به عنوان یک ساختار مستحکم، صلب و سبک شناخته می‌شود. علی‌رغم این

- 1- Sweep
- 2- Span
- 3- Chord
- 4- Twist
- 5- Dihedral/Gull
- 6- Span wise bending
- 7- Material with extreme anisotropy

8- NextGen

شده است، باید از بافت‌های خاص کشسان استفاده شود. صفحه ساندویچی نهایی و نحوه انعطاف‌پذیری آن در شکل 2 نشان داده شده است. فرآیند ساخت و شیاردهی و همچنین انتخاب نوع پارچه روکش در انعطاف‌پذیری صفحه ساندویچی نهایی موثر است که در بخش بعدی به نحوه تاثیر این کمیت‌ها اشاره خواهد شد.

3- کمیت‌های تاثیرگذار بر انعطاف‌پذیری ساختار ساندویچی انعطاف‌پذیر

1-3- هسته شیار داده شده

انعطاف‌پذیری هسته شکل 1 کاملاً به نوع، ابعاد و تعداد شیارهای ایجاد شده بر روی ساختار اولیه بستگی دارد. با توجه به ناپیوسته بودن ساختار انعطاف‌پذیر ایجاد شده، هر چه تعداد شیارها بیشتر شده و فاصله آنها کاهش یابد سطح بیرونی ساختار به هنگام تغییر شکل پیوسته‌تر خواهد بود. با توجه به این موضوع پارامترهای هندسی شیار از قبیل عرض شیار، تعداد شیارها و فاصله شیارها کمیت‌هایی هستند که رفتار انعطافی هسته و ساختار نهایی را شکل می‌دهند. شکل 3 کمیت‌های اثرگذار بر انعطاف‌پذیری سازه پیشنهادی را نشان داده است. علاوه بر الگوی شکل 1، در یک الگوی متفاوت می‌توان برابری هر دو پوسته بالایی و پایینی را با ایجاد شیار تحت تاثیر قرار داد. این الگو در شکل 4 نشان داده شده است. در این الگو به دلیل اینکه در هر دو جهت خمشی از پوسته شیاردار تحت کشش است، بنابراین انعطاف‌پذیری دوطرفه خواهد بود. در الگوی شیار یک طرفه در صفحه ساندویچی نهایی دو نوع رفتار متفاوت در بارگذاری وجود خواهد داشت. به عبارت دیگر با توجه به خصوصیات ساختار، جهت خمشی بر رفتار سازه موثر است. اگر جهت خمشی طوری باشد که رویه شیار شده تحت فشار باشد، به



Fig. 2 Different flexibility of sandwich panel

شکل 2 صفحات ساندویچی ساخته شده با انعطاف‌پذیری متفاوت

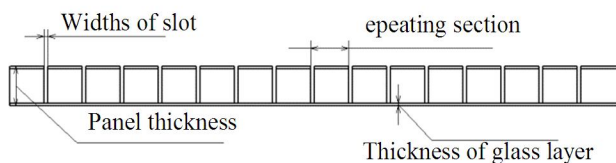


Fig. 3 Effective parameters on flexibility of initial sandwich panel

شکل 3 کمیت‌های هندسی اثرگذار بر انعطاف‌پذیری صفحه ساندویچی اولیه



Fig. 4 Up and down slot pattern in sandwich panel core

شکل 4 الگوی شیار بالا و پایین در هسته سازه انعطاف‌پذیر

استحکام و صلبیت، رویه‌های کامپوزیت شیشه و مغزی نومکس¹ در صفحه ساندویچی منتخب بسیار انعطاف‌پذیرتر از ساختار نهایی هستند. بنابراین صلبیت سازه ساندویچی از ویژگی‌های مربوط به چیدمان اجزاء آن بوده و لزوماً به معنای صلبیت مواد اولیه آن نیست. در اولین گام به کمک شکاف‌هایی که به شکل‌های مختلف در رویه‌ها داده می‌شود، در صلبیت سازه مزبور تغییراتی ایجاد می‌شود. به عنوان نمونه اگر شیارهای ایجاد شده بر روی یک سطح موازی با هم و در یکی از رویه‌ها داده شود در جهت عمود بر شیارها صلبیت ساختار برداشته شده و یک ساختار کاملاً انعطاف‌پذیر بدست می‌آید. شکل 1 مدل ساختار اولیه ساندویچی اولیه و الگوی شیار ایجاد شده در این ساختار را نشان می‌دهد. باید به این نکته توجه شود که شیارهای ایجاد شده تا سطح رویه پایینی ادامه یافته اما رویه پایینی دست نخورده باقی می‌ماند. بعد از تغییراتی که در ساختار ساندویچی عادی داده می‌شود این ساختار بصورت کاملاً انعطاف‌پذیر در می‌آید. در ضمن به دلیل شیارهای ایجاد شده بر روی آن استحکام نمونه نیز کم است. بنابراین سازه بدست آمده باید طوری تقویت گردد که ضمن افزایش استحکام، انعطاف‌پذیری آن حفظ گردد. در صورت نیاز به یک صفحه ساندویچی با ضخامت یک سانتی‌متر و با قابلیت انعطاف در نیروهایی در حد چند نیوتن، باید مدول الاستیسیته رویه‌ها و چسب اتصال رویه به مغزی جدید، در اندازه چند ده مگاپاسکال باشد. از این رو گزینه پیش رو برای چسب و رویه، الاستومرها هستند. الاستومرها دارای خواص بسیار گوناگونی بوده و انواع مختلفی از آنها نیز در دسترس است. بنابراین بعد از مرحله ایجاد شیار، مرحله دوم پر کردن شیار با یک چسب الاستومری مناسب است. دو نوع سیلیکون با نشان تجاری آر تی وی 732² و آر تی وی 736³ برای پر کردن شیارها و همچنین اتصال روکش‌ها استفاده شده است. پر کردن شکاف‌ها با سیلیکون جهت بدست آوردن انعطاف‌پذیری مناسب و همچنین سطح مناسب آیرودینامیکی، ضروری می‌باشد.

با توجه به اینکه الاستومرها خود به تنهایی استحکام کافی ندارند و قابلیت کشسانی آنها فراتر از نیاز صفحه ساندویچی انعطاف‌پذیر است، ساختار تشکیل شده بعد از پر شدن شکاف‌های هسته با الاستومر، باید با یک عضو سازه‌ای مناسب با حفظ انعطاف‌پذیری، تقویت گردد.

گزینه مناسب برای این کار پارچه‌های پوشش داده شده با الاستومر⁴ است. این نوع پارچه‌ها، صلبیت خمشی بسیار پایینی داشته و صلبیت آنها در داخل صفحه در حالت کشش بسته به نوع بافت پارچه می‌تواند بسیار متفاوت

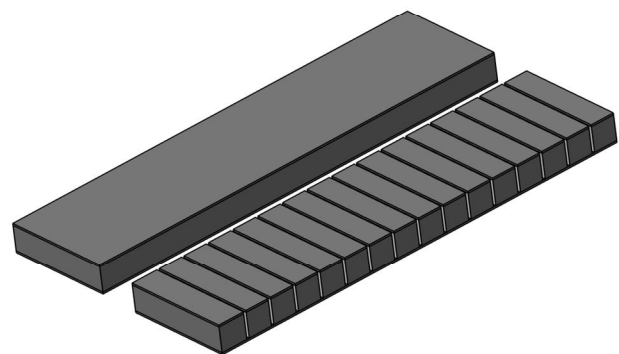


Fig. 1 Initial sandwich structure and slots

شکل 1 مدل ساختار ساندویچی اولیه و شیارهای ایجاد شده بر روی آن باشد. بنابراین برای حفظ انعطاف‌پذیری در بار کششی که نیاز ساختار ارائه

1- Nomex
2- RTV 732
3- RTV 736
4- Coated fabrics

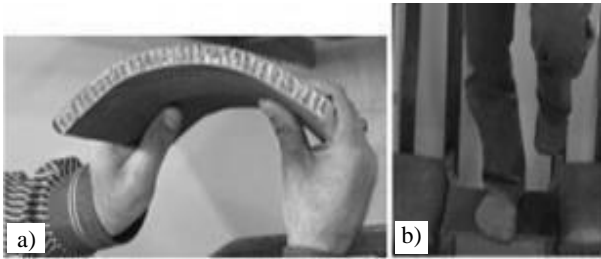


Fig. 5 a) Flexibility in the widthwise direction (perpendicular to slats) & b) stiffness in the lengthwise direction (parallel to slots), for innovative flexible sandwich panel

شکل 5 الف) انعطاف در جهت عرضی (عمود بر جهت شیار) ب) صلبیت در جهت طولی (موازی با شیار) برای صفحه ساندویچی انعطاف‌پذیر ابداعی

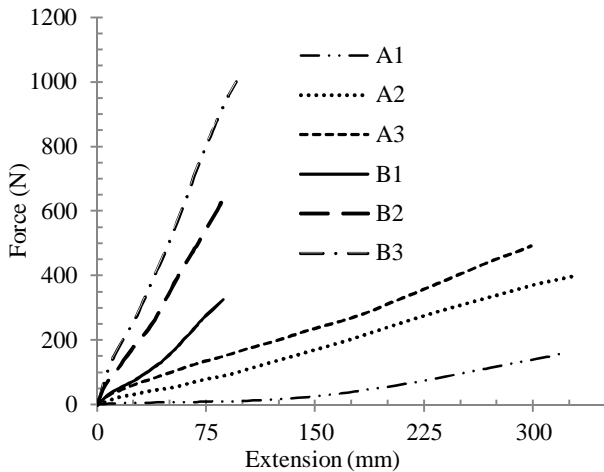


Fig. 6 Results of tensile test for one, two and three layer coated fabric in 0° and 90° directions

شکل 6 نتایج مربوط به تست کشش پارچه الاستومری بصورت تک لایه، دو لایه و سه لایه در جهات صفر و 90 درجه

کمیت‌های موثر بر انعطاف‌پذیری بحث گردید. در این بخش یک مجموعه مناسب برای تست انعطاف‌پذیری صفحات مختلف ساخته شده است و در ادامه نتایج حاصل از این تست‌ها بررسی خواهد شد.

1-4- روش انجام تست و ابزارهای مورد استفاده

به منظور بررسی انعطاف‌پذیری سازه پیشنهادی، تیر یک سر درگیر به عنوان المان تست در نظر گرفته شده و تیر مزبور به یک پایه خاص متصل می‌گردد. انتهای تیر نیز وزنه ثابت آویخته شده و خیز انتهای آن توسط یک خط‌کش ساده اندازه‌گیری می‌شود. اتصال وزنه طوریست که هیچگونه پیچشی در تیر ایجاد نشود، زیرا ریسمان بسته شده به انتهای تیر دقیقاً از مرکز بخش عرضی تیر عبور می‌کند. دلیل انتخاب نمونه بصورت یکسر درگیر این است که کاربرد در نظر گرفته شده برای نمونه، استفاده در انتهای ایرفویل بال بصورت سطح کنترل پیوسته است که رفتار آن در بارهای وارده به تیر یکسر درگیر شباهت زیادی دارد.

2-4- نتایج تست انعطاف‌پذیری برای صفحات با رویه‌های مختلف

به منظور نشان دادن تغییرات انعطاف‌پذیری صفحات ساندویچی ابداعی با تغییر سفتی پارچه مورد استفاده برای روکش صفحات، شش تیر انعطاف‌پذیر با ابعاد یکسان 160×40×10 میلی‌متر مکعب با استفاده از شش نمونه پارچه شکل 6 ساخته و تست شده است. ابتدا در شکل 7-ب انعطاف‌پذیری یک

دلیل ویژگی‌های ساختار و همچنین تفاوت رفتار الاستومر در کشش و فشار، انعطاف کمتری در صفحه دیده می‌شود. اما اگر جهت ایجاد خمش طوری باشد که بخش شیاردار در کشش قرار گیرد در این صورت انعطاف بیشتری نسبت به حالت قبل بوجود می‌آید. این امر با جزئیات بیشتر در قسمت بعد نشان داده خواهد شد.

جهت شیاردهی از کمیت‌هایی است که می‌تواند انعطاف‌پذیری یا صلبیت را در طول و عرض صفحه تعیین کند. اگر شیارها در راستای طولی و همگی موازی هم باشد، در جهت طولی صفحه هنوز سفتی زیادی داشته و در عوض در عرض انعطاف‌پذیر خواهد بود. این اختلاف طوریست که به راحتی می‌توان در یک آزمایش ساده آن را مشاهده نمود. انعطاف صفحه نهایی در راستای عرضی (عمود بر شیارها) به اندازه‌ای است که به راحتی با نیروی دست می‌توان صفحه را خم نمود؛ این در حالی است که در جهت طولی صفحه به راحتی قادر به تحمل وزن یک انسان معمولی است. این موضوع در شکل 5 کاملاً قابل مشاهده است.

3-2- اثر رویه‌ها بر انعطاف‌پذیری صفحه

همانطور که اشاره شد انعطاف‌پذیری رویه نهایی مورد استفاده، یک بخش کلیدی در حفظ و کنترل انعطاف‌پذیری است. علاوه بر این با توجه به استحکام پایین سیلیکون داخل شیارها، وجود رویه‌ای از یک جنس مستحکم و در عین حال انعطاف‌پذیر ضروری است. گزینه پیش رو در این مورد پارچه پوشش داده شده با الاستومر است. در این تحقیق جهت روکش نمونه‌های صفحات انعطاف‌پذیر مورد بررسی از یک پارچه کشسان (با بافت حلقوی تار) و پوشش داده شده با کلروپرن¹ استفاده شده است. بافت این پارچه طوری است که پارچه در یک جهت به دلیل بافت حلقوی کشسان و در جهت عمود بر آن به دلیل وجود الیاف طولی، نسبتاً صلب است. از سه ضخامت 0.25، 0.5 و 0.75 میلی‌متر که به ترتیب دارای یک، دو و سه لایه است، برای نمونه‌های مختلف استفاده می‌شود. نمونه‌های دو لایه و سه لایه به صورت هم جهت روی هم چسبانده شده به طوری که جهت انعطاف‌پذیر لایه‌ها موازی باهم می‌باشد. با در نظر گرفتن این جهت‌ها می‌توان شش حالت برای سفتی نهایی پارچه‌های مورد استفاده برای روکش در نظر گرفت. به ترتیب نمونه‌ها را با توجه به سفتی A1، A2، A3، B1، B2، B3 می‌نامیم (نمونه‌های A در جهت انعطاف‌پذیر و نمونه‌های B در جهت عدم انعطاف پارچه پوشش‌دار بریده شده‌اند).

نتایج مربوط به تست کشش این پارچه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D5035 در شکل 6 نشان داده شده است. مقدار تنش در این نمودارها بر اساس مساحت اولیه سطح مقطع بوده و کرنش بر اساس جابجایی فک محاسبه شده است. بنابراین تنش و کرنش مهندسی در این شکل به نمایش در آمده است. بطور طبیعی با ثابت نگه داشتن سایر شرایط، هر چقدر پارچه مورد استفاده برای روکش ساختار ابداعی سفت‌تر باشد انعطاف ساختار نهایی کمتر خواهد شد. نمونه‌های صفحه ساندویچی انعطاف‌پذیر ساخته شده با این پارچه‌های پوشش داده شده را با همان نمونه پارچه مورد استفاده برای روکش نام گذاری می‌کنیم. بنابراین انعطاف‌پذیری نمونه‌های ساندویچی نهایی از A1 تا B3 کاهش خواهد یافت.

4- بررسی تجربی مقدار انعطاف‌پذیری صفحات مختلف ساخته شده

در بخش قبل با توجه به ماهیت ساختار ساندویچی انعطاف‌پذیر در مورد

1- Chloroprene

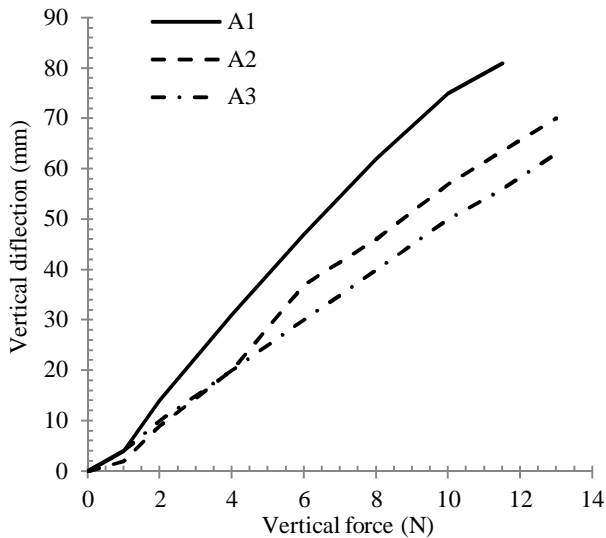


Fig. 9 Vertical deflection of cantilever beam in the more flexible direction

شکل 9 نمودار تغییر مکان عمودی تیر یک سر گیردار در جهت انعطاف بیشتر

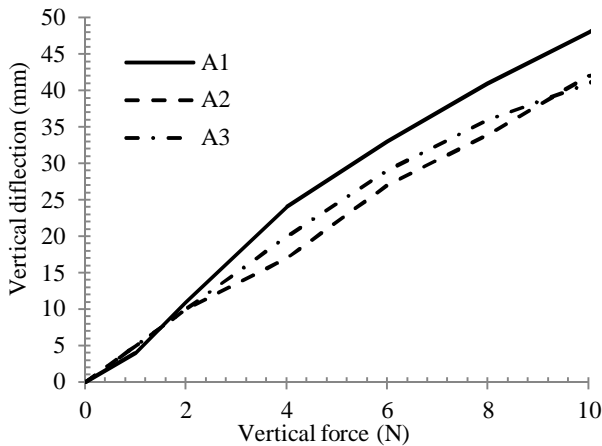


Fig. 10 vertical deflection of cantilever beam in direction with less flexibility

شکل 10 نمودار تغییر مکان عمودی تیر یک سر گیردار در جهت انعطاف کمتر

تحت بار قرار گرفتن پارچه در جهتی است که بافت کشسان نداشته و تحت بارهای وارده تغییر شکل دائم می‌دهد. این موضوع بیانگر آن است که علاوه بر سفتی لایه روکش، بعضا پارامترهای دیگر نیز در کنترل انعطاف‌پذیری دخالت موثر دارند. البته لازم به ذکر است که عمده اثرات کرنش پسماند در نمونه‌های نوع B بخصوص نمونه B1 رخ داده و به همین دلیل در تحلیل نمونه‌های نوع A که مورد توجه این مقاله است، موضوع اثرات کرنش پسماند قابل صرف نظر خواهد بود.

5- مشخصات مختلف مدل اجزاء محدود

از آنجا که ساختار ساندویچی انعطاف‌پذیر پیشنهادی، از ساختار ساندویچی کامپوزیتی به علاوه پارچه‌های آغشته به الاستومر و چسب‌های الاستومری استفاده می‌کند دارای رفتار مکانیکی پیچیده‌ای است، زیرا خواصی نظیر کرنش هایپر الاستیک در اندازه‌های بزرگ، رفتار ناهمسانگرد، رفتار هیستریزیسی، خزش و رفتارهای چرخه‌ای الاستومرها، به واسطه چسب سیلیکونی و پارچه الاستومری مورد استفاده، در این ساختار ابداعی تاثیرگذار خواهند بود. بنابراین مدل‌سازی کامل این رفتارها و پیش‌بینی رفتارهای تحت

نمونه صفحه بعد از شیار و قبل از پر شدن شکاف‌ها، تحت وزنه 520 گرمی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این صفحه در مقایسه با حالت قبل از شیار (شکل 7- الف) دارای انعطاف‌پذیری بسیار بالایی می‌باشد. در مرحله بعد انعطاف شش تیر بدست آمده از روکش کردن نمونه‌ها با پارچه‌های مختلف، با هم مقایسه گردیده است. در شکل 8 نتایج مربوط به این شش نمونه تحت وزنه 1 کیلوگرمی نشان داده شده است. در همه این نمونه‌ها گشتاور اعمالی منفی بوده و شکاف‌های پر شده با الاستومر در حال باز شدن هستند. به طور کلی در شکل 8 انعطاف صفحه‌ها به ترتیب از نمونه A1 تا B3، با توجه به شیب نمودار نیرو- جابجایی پارچه مورد استفاده برای روکش نمونه‌های نهایی، در حال کاهش است. همچنین نتایج کامل مربوط به رفتار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های A1 تا A3 در شکل‌های 9 و 10 در دو جهت بار خمشی رسم شده است. در شکل 9 شکاف‌های پر شده با الاستومر در حال باز شدن بوده و روکش پارچه و الاستومر تحت کشش است. نتایج شکل 10 برای حالتی است که شکاف‌ها در حال بسته شدن بوده و الاستومر تحت فشار قرار می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییر شکل‌ها از حالت ایده‌آل مورد انتظار در برخی نقاط کمی فاصله دارد. یکی از دلایل مهم این امر، کرنش پسماند در چرخه‌های بارگذاری پارچه است که باعث نرم شدن نمونه‌های نوع B می‌گردد. دلیل بالا بودن کرنش پسماند نمونه‌های نوع B،

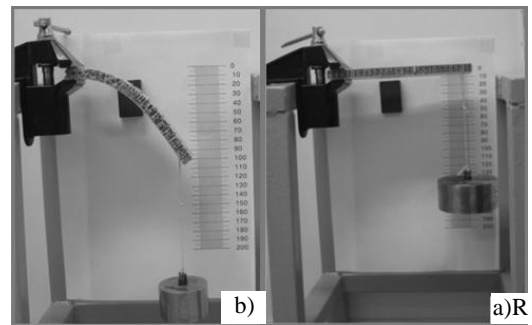


Fig. 7 Flexibility test set up; a) sample before grooving under 1 kg load, b) sample after grooving under the 520 gr load

شکل 7 دستگاه ساخته شده برای تست انعطاف‌پذیری سازه الف) نمونه قبل از شکاف تحت بار یک کیلوگرم، ب) نمونه بعد از شکاف تحت بار 520 گرم

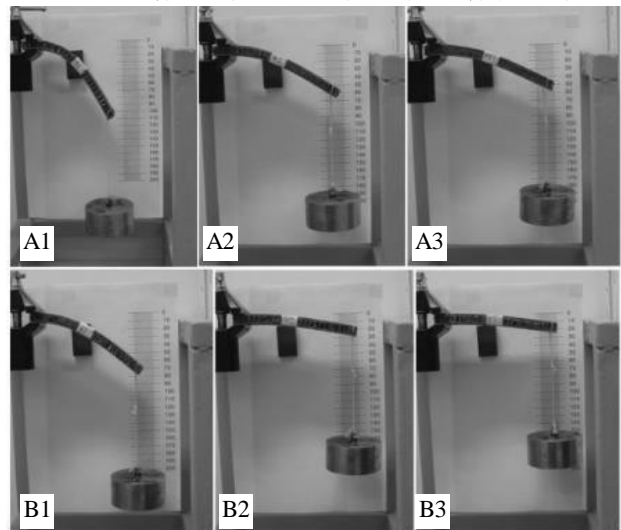


Fig. 8 Sandwich panel flexibility control by changing the stiffness of coated fabric layer

شکل 8 کنترل انعطاف‌پذیری صفحه ساختار ساندویچی انعطاف‌پذیر با استفاده از کنترل سفتی رویه پارچه ای آغشته با الاستومر

استاندارد مورد استفاده در صنعت هوایی است خواص مکانیکی آن مطابق با مدارک فنی آن خواهد بود که در جدول 1 و 2 مقادیر آنها ذکر گردید. اما نمونه‌های مناسب برای پارچه پوشش‌دار مورد استفاده و چسب الاستومری، توسط گروه نویسندگان تهیه شده و با همکاری دانشگاه صنعتی اصفهان تست شده است. نتایج حاصل از این تست‌ها علاوه بر مرجع [21] در این مقاله نیز استفاده شده است.

سیلیکون مورد استفاده بر اساس روش استاندارد ASTM-D 412-98a به صورتی که در شکل 11 دیده می‌شود تست شده و نتایج حاصل از آن در شکل 12 نشان داده شده است [21]. نمونه‌های آزمایش شده در بار کششی شباهت مناسبی نسبت به یکدیگر داشته و نقطه پارگی نیز تا حد زیادی یکسان است.

یکی از ویژگی‌های الاستومرها این است که در چرخه اول بارگذاری، صلبیت این مواد از چرخه‌های بعدی بیشتر است. به عبارت دیگر اگر این مواد تحت آزمون کششی بارگذاری و باربرداری متناوب قرار گیرد، نمودار تنش کرنش در چرخه اول آزمون دارای مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به چرخه بعدی خواهد بود. این موضوع در چرخه‌های دیگر نیز وجود دارد، اما با تکرار چرخه‌ها نمودارهای بعدی کم کم بر روی هم منطبق می‌شوند. البته اگر کرنش نهایی کشش در چرخه‌ی بارگذاری افزایش یابد، مجدداً در چرخه اول مربوطه، صلبیت بالاتری مشاهده خواهد شد. علت اصلی مشاهده این پدیده

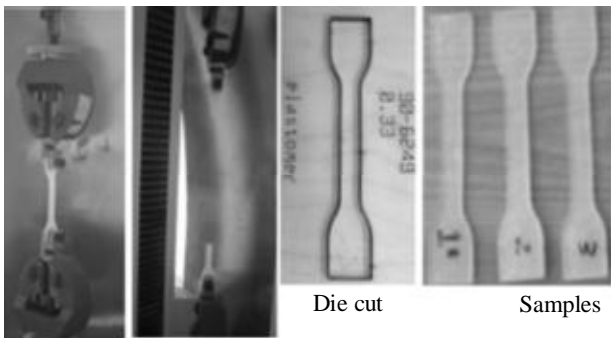


Fig. 11 Samples, cutting die for silicon sheet and testing process of samples

شکل 11 نمونه‌ها، قالب برش از ورق سیلیکون و نحوه تست نمونه

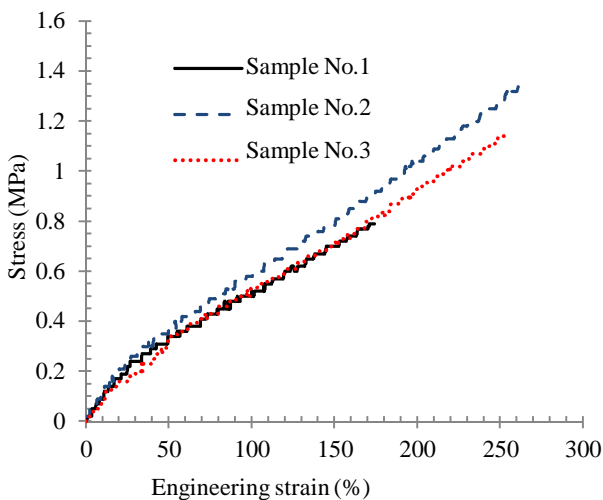


Fig. 12 Tensile test results for silicon RTV 732

شکل 12 نتایج حاصل از تست کشش چسب سیلیکونی به کار رفته در ساختار انعطاف پذیر (RTV 732) [21]

بر این ساختارها، نیازمند مطالعات جامعی است. در این مقاله رفتار هاپیرالاستیک و اثر مولینس در ساختار مورد توجه قرار گرفته، اما به دلیل پایین بودن نرخ بارگذاری و همچنین مطالعه ساختار در یک فرایند بارگذاری خالص (بدون مطالعه باربرداری)، نیاز به بررسی اثرات ویسکوالاستیک و هیستریزس منتفی خواهد شد.

1-5- رفتار مکانیکی اجزاء مختلف سازه انعطاف پذیر

بررسی رفتار مکانیکی ساختار نهایی نیازمند اطلاعات جامعی در مورد رفتار مکانیکی مواد تشکیل دهنده ساختار است. از این رو در چند بخش رفتار مکانیکی تک تک اجزاء تشکیل دهنده ساختار بررسی شده و اطلاعات مربوط به آنها جمع‌آوری و استخراج خواهد شد. اولین مورد ساختار اولیه ساندویچی است. این ساختار از کامپوزیت گلس اپوکسی¹ با نام تجاری HexPly®913، تشکیل شده است [19]. پارچه شیشه مورد استفاده در آن از نوع بافت صفحه‌ای ساده² بوده و بنابراین در دو جهت 0 و 90 درجه، خواص آن یکسان خواهد بود. خواص کامپوزیت شیشه مورد استفاده در ساختار بر اساس داده‌های فنی شرکت سازنده، در جدول 1 ارائه شده است. همچنین مغزی مورد استفاده در صفحه ساندویچی انتخاب شده از نوع لانه زنبوری نومکس است که با مشخصه HRH-10-1/8-4 شناخته می‌شود. خواص مربوط به این ماده در جدول 2 آمده است. نکته قابل توجه در تحلیل‌های انجام شده آن است که رفتار مکانیکی صفحه نهایی عمدتاً تحت تاثیر چسب الاستومری است. دلیل این امر هم پایین بودن مدول الاستیسیته الاستومر در برابر هسته نومکس و رویه‌های کامپوزیتی است.

چسب مورد استفاده، نوع سیلیکون بوده و رفتار کشسانی زیادی داشته و جزو مواد هاپیرالاستیک به شمار می‌رود. این مواد دارای رفتارهای دیگر نظیر هیستریزس، ضریب پواسون نزدیک به 0.5 (که ناشی از تغییرات نزدیک به صفر حجم در فشار هیدرواستاتیک است)، رفتارهای چرخه‌ای و دارای هیستریزس، نسبت مدول حجمی به مدول برشی بالا (این موضوع نیز مرتبط با ضریب پواسون بالاست)، اثر مولینس³ و رفتار ویسکوالاستیک⁴ است. با توجه به این موضوع مدلسازی رفتار این مواد پیچیده‌تر از مواد الاستیک ساده بوده و تحقیقات زیادی در مورد این رفتارها تاکنون توسط محققین مختلف انجام شده است.

برای تحلیل سازه نهایی بررسی رفتار مکانیکی تک تک اجزاء سازه مانند رویه کامپوزیت، هسته نومکس، چسب الاستومری و رویه پارچه پوشش دار الاستومری باید با دقت مناسب مشخص گردد. با توجه به اینکه ساختار ساندویچی اولیه، متشکل از رویه کامپوزیت و هسته نومکس، از نمونه‌های

جدول 1 خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه HexPly®913

Table 1 Mechanical property of HexPly®913 glass epoxy

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12}
20	20	4.5	3.5	3.5	0.25

جدول 2 خواص مکانیکی لانه زنبوری نومکس [20]

Table 1 Mechanical property of Nomex honeycomb [20]

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)	ν_{12}
193	193	60	60	33	0.3

1- Glass-Epoxy
2- Plain
3- Mullins
4- Viscoelastic

رفتار مواد هاپیرالاستیک هستند که از آنها در مدلسازی این مواد می‌توان استفاده نمود. از میان این مدلها، مدل آگدن جامعیت بالایی نسبت به مدل‌های دیگر داشته و بر اساس تجربیات مدلسازی بدست آمده توسط نویسندگان، از دقت مناسبی برای مدلسازی ساختار حاضر برخوردار است. برای مدلسازی الاستومر در مدل‌های عددی، با در نظر گرفتن پدیده مولینس، از نتایج تست کشش که در نمودار 14 رسم شده، استفاده شده است.

از میان ویژگی‌های مختلف مورد بحث در مورد الاستومرها یکی از مهمترین ویژگی‌های موثر در مدلسازی صفحه انعطاف‌پذیر حاضر، رفتار متفاوت در کشش و فشار است، زیرا چسب الاستومری مورد استفاده به دلیل موقعیتی که در پر کردن شکاف‌های صفحه دارد، در جهت‌های متفاوت بارگذاری تحت کشش یا فشار قرار دارد. با توجه به ضریب پواسون تعریف شده (0.499) و همچنین تست کشش تک محوره، در مدل مورد استفاده در تعریف رفتار هاپیرالاستیک این ماده، این اختلاف در هنگام تحلیل مد نظر خواهد بود. همچنین با استفاده از نتایج شکل 6 نمودار تنش-کرنش مربوط

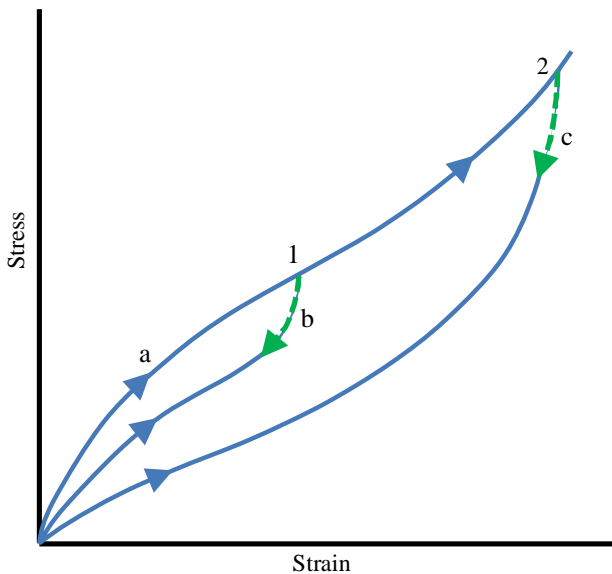


Fig. 13 Mullins effect in elastomer cyclic stress-strain behavior
شکل 13 اثر مولینس در رفتار تنش کرنش چرخه‌ای الاستومر [21]

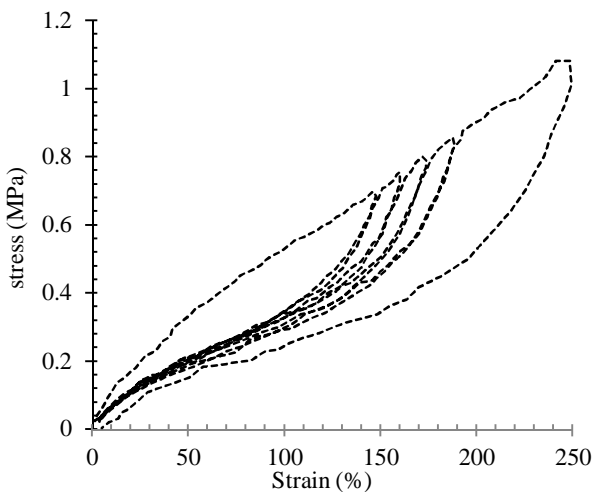


Fig. 14 Mullins effect in silicon RTV 732 cyclic stress-strain behavior
شکل 14 اثر مولینس در رفتار تنش کرنش چرخه‌ای سیلیکون RTV 732 [21]

ساختار مولکولی و پلیمری مواد الاستومری می‌باشد. بسیاری از این مواد از شبکه‌های پلیمری به هم تنیده و پر شده از ذرات کربن ساخته شده است.

این شبکه‌ها طی فرآیند کشش به تدریج دچار آسیب می‌گردد. این آسیب موجب می‌گردد که در چرخه‌های بعدی کشش، نرم‌شدگی مشاهده شود. با توجه به نمودار تنش-کرنش مواد الاستومری، در شکل 13 این رفتار بررسی شده است. رفتار چرخه‌ای از نقطه بدون تنش آغاز می‌شود. با آغاز کشش مسیر a طی می‌شود. این مسیر را می‌توان مسیر بارگذاری اصلی نامید. در صورت برداشتن تدریجی بار در نقطه 1 منحنی از مسیر b به مبداء برمی‌گردد. (که البته در مورد بیشتر لاستیک‌ها تغییر شکل دائمی جزئی در این نقطه رخ می‌دهد). مشاهده می‌شود که طی اولین بارگذاری و باربرداری مقداری انرژی صرف می‌گردد که مساحت بین مسیرهای a و b مبین این اتلاف انرژی می‌باشد. پس از اولین چرخه، با بارگذاری مجدد، مسیر رفتار تنش-کرنش عوض می‌شود و این بار از مسیر b عبور می‌کند. در این شرایط هنگامی که منحنی به نقطه 1 (نقطه‌ای که باربرداری از آنجا آغاز شد) می‌رسد، ادامه بارگذاری بر مسیر a منطبق می‌شود. نکته قابل توجه این است که مشخصات مکانیکی قطعه‌ای که تحت اثر بارگذاری و باربرداری بوده عوض شده است. باربرداری مجدد در نقطه 2 موجب می‌شود که مسیر c فعال گشته و قطعه لاستیکی از این مسیر به مبداء بر گردد.

علاوه بر این اگر اعمال بار مجدداً تکرار شود افزایش نیرو در چرخه بعدی مطابق با نمودار برگشت چرخه قبلی (مسیر c) خواهد بود.

الاستومر مورد استفاده در این تحقیق نیز که بر اساس استاندارد ASTM-D 412 تست شده، دقیقاً همین رفتار را در حالت چرخه‌ای از خود نشان داده است. شکل 14 نمودار مربوط به تنش کرنش سیلیکون RTV 732 را در چرخه‌های بارگذاری متعدد نشان می‌دهد [21]. اثر مولینس را می‌توان در این شکل به خوبی مشاهده نمود. رفتار دیگری که در الاستومرها دیده می‌شود، تفاوت نمودار تنش-کرنش در چرخه بارگذاری و باربرداری است. این موضوع ناشی از رفتار ویسکوالاستیک این مواد است که در نتیجه باعث وجود رفتار هیستریزیسی در نمودار تنش-کرنش می‌گردد. علاوه بر رفتار هیستریزیسی، رفتار ویسکوالاستیک این مواد به معنی تغییر بار در اثر افزایش زمان نیز می‌باشد. این موضوع با نام وارفتگی تنش¹ نیز شناخته می‌شود. در شکل‌های 13 و 14 این رفتارها کاملاً واضح هستند.

مواد عادی معمولاً در کشش و فشار به طور یکسانی رفتار می‌کنند. اما الاستومرها به دلیل تراکم‌ناپذیری بالایی که دارند در کشش و فشار رفتار متفاوتی خواهند داشت. این موضوع از اختلاف بالای مدول حجمی و مدول برشی ناشی می‌شود که این نسبت در الاستومرها حدود هزار برابر نسبت مشابه در فولاد است.

2-5- مدل مورد استفاده در نرم افزار برای مدلسازی الاستومر و پارچه آغشته به آن

تئوری‌های مختلفی برای مدلسازی رفتار الاستومرها توسعه داده شده‌اند که در نرم‌افزار آباکوس² چند نمونه مشهور از این مدل‌ها جهت شبیه‌سازی رفتار مواد هاپیرالاستیک استفاده شده است. مدل‌هایی نظیر مدل آردا-بویس³، مارلو⁴، مونی-ریولین⁵ و مدل آگدن⁶ از جمله مدل‌های مشهور در بررسی

1- stress relaxation
2- ABAQUS
3- Arruda-Boyce
4- Marlow
5- Mooney-Rivlin
6- Ogden



Fig. 15 Sections of flexible samples in the slot locations

شکل 15 مقطع برش داده شده از نمونه‌های انعطاف‌پذیر در محل شیارها

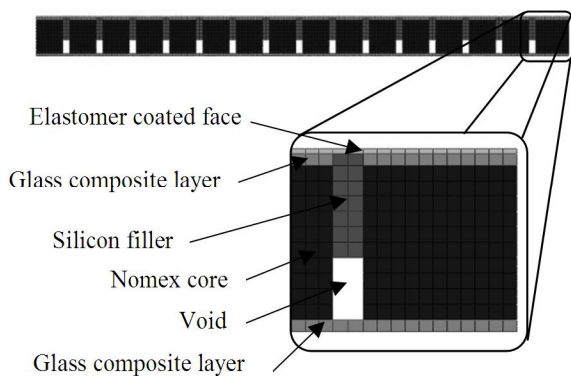


Fig. 16 FEM model for panel bending study

شکل 16 مدل المان محدود ساخته شده برای تحلیل رفتار خمشی



Fig. 17 Loading and boundary condition for panel modeling

شکل 17 بارگذاری و شرط مرزی صفحه مورد تحلیل

حل مسئله نیز استاتیکی با تغییر شکل‌های بزرگ (غیرخطی) می‌باشد.

6- نتایج بدست آمده برای تحلیل‌های مختلف

6-1- نتایج اولیه برای مدل A1

شکل‌های 18 و 19 تنش راستای X را برای بخش‌های مختلف این تیر در مدل دو بعدی و شکل‌های 20 و 21 همین تنش را برای مدل سه بعدی نشان داده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو مدل دو بعدی و سه بعدی عمده تنش در لایه کامپوزیتی سالم زیرین رخ داده است. مشاهده

به پارچه الاستومری استخراج و در مدل آگدن قرار داده شده است. جهت مواجه نشدن با رفتارهای ویسکوالاستیک و هیستریزس، رفتار نمونه‌ها فقط در یک فرآیند بارگذاری خالص بررسی شده است. همچنین با توجه به نرخ پایین اعمال بار اثرات ویسکوالاستیک در بارگذاری تنها نیز خود را نشان نخواهد داد. همانطور که اشاره شده عمده اثرات ویسکوپلاستیک و کرنش پسماند مربوط به نمونه‌های نوع B است که علت آن هم مربوط به نوع بافت پارچه در جهت اعمال بار است. با توجه به نمونه منتخب مورد تحلیل که از نوع A است، بحث کرنش پسماند در این نمونه‌ها اثر قابل توجهی ندارد. با این حال اثر مولینس با توجه به تکرار آزمایش بارگذاری خود را در نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. بنابراین در تحلیل مد نظر قرار خواهد گرفت.

5-3- هندسه نمونه و نحوه مدلسازی اجزاء محدود آن

از میان نمونه‌های مختلف، نمونه‌ی A1 که انعطاف‌پذیرترین نمونه به شمار می‌رود، بصورت عددی مدلسازی و نتایج آن بررسی خواهد شد. به منظور مدل سازی دقیق‌تر، یکی از نمونه‌ها از محل‌های پر شده با سیلیکون بریده شده و مقطع برش مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ای از این مقاطع در شکل 15 مشاهده می‌گردد. همان گونه که در این تصویر مشاهده می‌گردد چسب سیلیکونی شکاف ایجاد شده در تیر را به طور کامل پر نکرده است. برای مشخص کردن میزان پرشدگی تصاویر به دست آمده مورد بررسی و پردازش قرار گرفت. مقدار متوسط پرشدگی نمونه‌ها در حدود 60 درصد است که در هنگام مدلسازی مورد توجه قرار گرفته است.

این نمونه در نرم افزار آباکوس به صورت دو بعدی و سه بعدی و با استفاده از المان‌های CPE8R و C3D20R مدل شده است. برای مدلسازی قسمت پر نشده توسط الاستومر مطابق با نتایج به دست آمده 40 درصد المان‌های انتهایی هر مقطع حذف گردیده و نتایج مربوط به رفتار خمشی این ساختار تحت شرایط مختلف بارگذاری مطالعه شده است.

با توجه به اینکه رفتار نمونه منتخب به دلیل وضعیت خاص ناشی از شکاف‌های عرضی کاملاً شبیه تیر بوده و توزیع مواد در بخش‌های مختلف در راستای عرض نمونه تقریباً ثابت است، انتخاب مدل دوبعدی نیز کاملاً توجیه پذیر خواهد بود. هندسه مدل مطابق با نمونه بوده و بخش‌های مختلف آن بر اساس رفتار مواد متناسب با آن بخش مدل شده است. شکل 16 این بخش‌ها را به تفکیک برای مدل دوبعدی نشان داده است. مدل سه بعدی نیز کاملاً شبیه به این مدل خواهد بود. لایه مربوط به کامپوزیت شیشه در هر دو رویه از دو لایه با زاویه صفر تشکیل شده که در هر رویه مجموعاً دارای ضخامت 0.7 میلی‌متر است. این دو لایه با توجه به زاویه برابر بصورت یک تک لایه مدل شده است. تک لایه پارچه پوشش‌دار با ضخامت 0.25 نیز با زاویه 90 (جهت انعطاف‌پذیر) مدل شده است.

5-4- بارگذاری و شرایط مرزی

مدل ساخته شده بصورت یک تیر یکسر درگیر مورد تست قرار گرفته است. بنابراین در مدل دو بعدی و سه بعدی ساخته شده، ابتدای تیر بصورت کاملاً ثابت در نظر گرفته شده و در انتهای آن، نیرو در راستای عمود بر تیر اعمال می‌شود. با تغییر جهت نیروی اعمالی، به دلیل عدم تقارنی که در چیدمان مواد و رفتار الاستومر وجود دارد، رفتار تیر متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر با فرض جابجایی یکسان، مقدار نیروی مورد نیاز برای خم کردن تیر رو به پایین با نیروی مورد نیاز برای خم کردن تیر رو به سمت بالا، با هم برابر نیست. شکل 17 نمایی از بارگذاری و شرط مرزی تیر را نشان می‌دهد. نوع

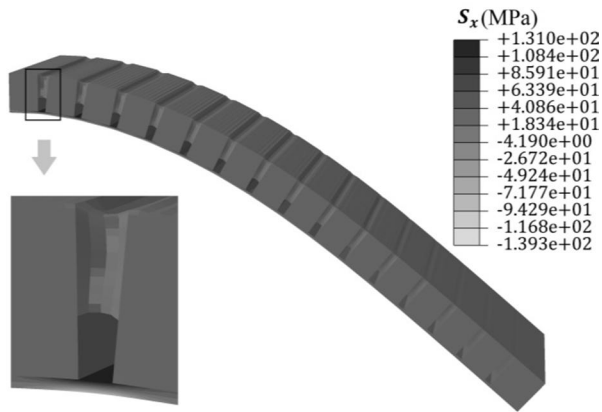


Fig. 21 Stress distribution in the X direction for 3D flexible sandwich beam model with negative bending moment
 شکل 21 توزیع تنش راستای X در سازه انعطاف‌پذیر ابداعی در حالت خمش منفی در مدل سه بعدی

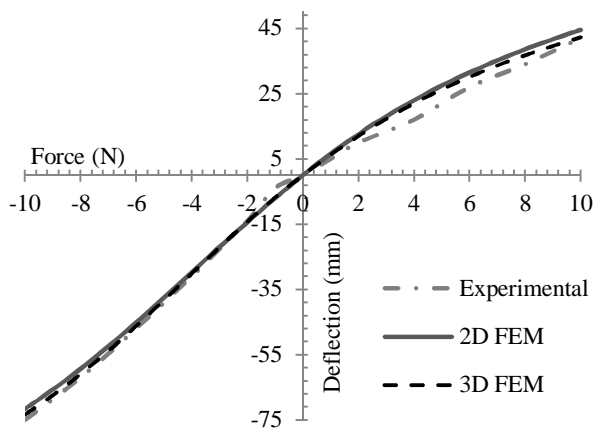


Fig. 22 Experimental and analytical deflection result comparison for sandwich panel
 شکل 22 مقایسه نتایج المان محدود با نتایج تجربی برای خیز تیر ساندویچی انعطاف‌پذیر ابداعی در مدل اولیه

جهت بررسی اثر همگرایی مدل‌های عددی، در چندین مرحله المان‌های مورد استفاده ریز شده است. مشاهده شد که علی‌رغم ریز کردن المان‌ها از یک مرحله به بعد، در نتایج بدست آمده تفاوت چشم‌گیری حاصل نمی‌گردد.

6-2- نتایج تحلیل مربوط به نمونه A2

نمونه A2 از تمامی لحاظ به نمونه A1 شباهت دارد، به جز آنکه ضخامت لایه پارچه الاستومری دو برابر نمونه A1 است. در شکل 23 نتایج مربوط به خیز انتهای نمونه A2 با نتایج حاصل از تست تجربی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج مدل A2 با حفره حدود 40 درصد در پایین شیارها، با نتایج تجربی این نمونه مطابقت خوبی دارد.

7- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله مشخصات ساختار انعطاف‌پذیر باربر ابداعی توسط نویسندگان ارائه و مشخصات و ویژگی‌های سازه جدید تحت آزمایش‌های مختلف بررسی شد. در نهایت با استفاده از روش المان محدود، رفتار مکانیکی این ساختار بررسی شد. نتایج حاصل از این روش نشان داد که به خوبی می‌توان از روش

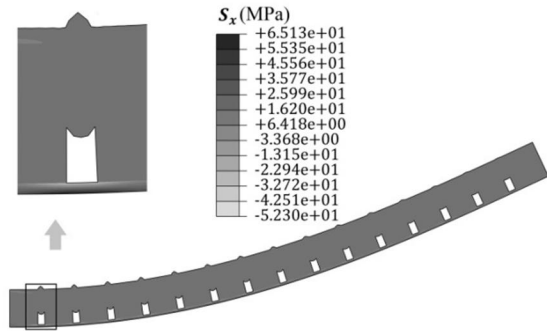


Fig. 18 Stress distribution in the X direction for 2D flexible sandwich beam model with positive bending moment

شکل 18 توزیع تنش راستای X در سازه انعطاف‌پذیر ابداعی در حالت خمش مثبت در مدل دو بعدی

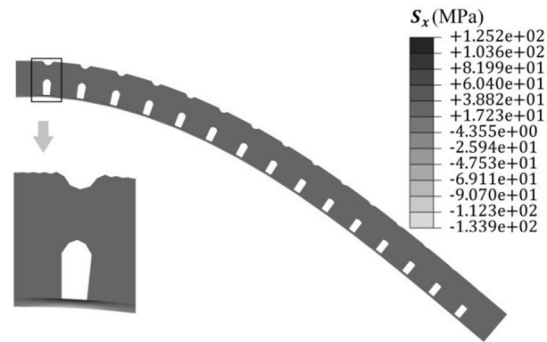


Fig. 19 Stress distribution in the X direction for 2D flexible sandwich beam model with negative bending moment

شکل 19 توزیع تنش راستای X در سازه انعطاف‌پذیر ابداعی در حالت خمش منفی در مدل دو بعدی

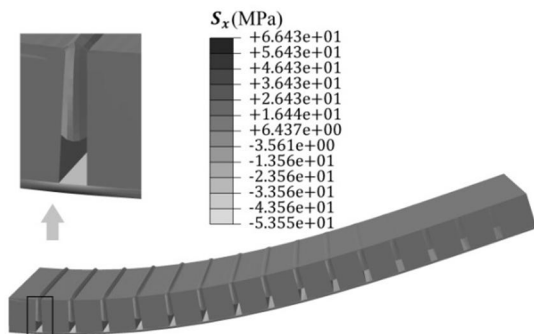


Fig. 20 Stress distribution in the X direction for 3D flexible sandwich beam model with positive bending moment

شکل 20 توزیع تنش راستای X در سازه انعطاف‌پذیر ابداعی در حالت خمش مثبت در مدل سه بعدی

می‌شود که تنش در این دو مدل در بخش کامپوزیتی از همه نقاط بیشتر است. مقایسه دو حالت گشتاور خمشی مثبت و منفی نشانگر آن است که تنش در خمش منفی (حالتی که الاستومر در کشش است) بیشتر از حالت دیگر است. جهت بررسی تطابق نتایج با داده‌های تجربی، در شکل 22 تغییرات خیز تیر در روش اجزاء محدود با تست‌های انجام شده بر روی نمونه A1 مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از دو روش تجربی و تحلیلی به دو بعدی و سه بعدی در هر دو ناحیه خمش مثبت و منفی تقریباً به هم منطبق می‌باشند. (بخش منفی نمودار 22 مطابق با شکل 9 و بخش مثبت آن مطابق شکل 10 و برای نمونه A1 می‌باشد).

- flexible wing structures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 10, pp. 1578-1586, 2006.
- [6] I. Dayyani, M. I. Friswell, S. Ziaei-Rad, E.I. Saavedra, Equivalent models of composite corrugated cores with elastomeric coatings for morphing structures, *Composite Structures*, Vol. 104, pp. 281-292, 2013.
- [7] C. Thill, J. Etches, I. Bond, K. Potter, P. Weaver, Composite corrugated structures for morphing wing skin applications, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 12, pp. 124009, 2010.
- [8] J. Qiu, C. Wang, C. Huang, H. Ji, Z. Xu, Smart skin and actuators for morphing structures, *Proceedings of the 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Beijing, China, August, 19-24, 2012.
- [9] G. Kress, M. Winkler, Corrugated laminate homogenization Model, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 3, pp. 795-810, 2010.
- [10] I. Dayyani, S. Ziaei-Rad, H. Salehi, Numerical and experimental investigations on mechanical behavior of composite corrugated core, *Applied Composite Materials*, vol. 19, No. 3, pp. 705-721, 2012.
- [11] A.D. Shaw, I. Dayyani, M.I. Friswell, Optimization of composite corrugated skins for buckling in morphing aircraft, *Composite Structures*, Vol. 119, pp. 227-237, 2015.
- [12] T. Yokozeki, A. Sugiura, Development of variable camber morphing airfoil using corrugated structure, *Journal of Aircraft*, Vol. 51, No. 3, pp. 1023-1029, 2014.
- [13] K. R. Olympio, F. Gandhi, Flexible skins for morphing aircraft using cellular honeycomb cores, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 1, pp. 1719-1735, 2010.
- [14] K. R. Olympio, F. Gandhi, Zero Poisson's ratio cellular honeycombs for flex skins undergoing one dimensional morphing, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 1, pp. 1737-1753, 2010.
- [15] K. R. Olympio, F. Gandhi, L. Asheghian, J. Kudva, Design of a flexible skin for a shear morphing wing, *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, Vol. 21, No. 1, pp. 1755-1770, 2010.
- [16] H. Basaeri, A. Yousefi-Koma, M.R. Zakerzadeh, S.S. Mohtasebi, Experimental study of a bio-inspired robotic morphing wing mechanism actuated by shape memory alloy wires, *Mechatronics*, Vol. 24, No. 8, pp. 1231-1241, 2014.
- [17] R.M. Ajaj, E.I. Saavedra Flores, M.I. Friswell, G. Allegri, B.K.S. Woods, A.T. Isikveren, W.G. Dettmer, The Zigzag wing box for a span morphing wing, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 364-375, 2013.
- [18] Shape-changing flap takes to air, Accessed 10 November 2014; <http://www.wpafb.af.mil/news/index.asp>.
- [19] HexPly 913 257°F (125°C) Curing Epoxy Matrix, Accessed 20 April 2015; <http://www.hexcel.com>.
- [20] A. Kamal, *Numerical and experimental analysis of SMA actuated flexible sandwich panels*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of technology, Isfahan, 2014. (in Persian فارسی)
- [21] HexWeb HRH-10, *Aramid Fiber/Phenolic Resin Honeycomb*, Accessed 20 April 2015; <http://www.hexcel.com>.

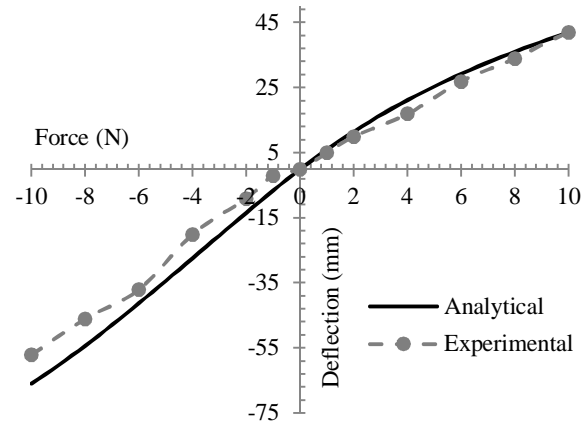


Fig. 23 Experimental and analytical deflection result comparison for sandwich panel A2

شکل 23 مقایسه نتایج تحلیلی نمونه A2 با نتایج تست تجربی

عددی در تحلیل و طراحی این سازه استفاده کرد. با توجه به ویژگی‌های مثبتی نظیر امکان ساخت این سازه با بازه وسیعی از انعطاف‌پذیری (با توجه به نیاز می‌توان انعطاف ساختار ساندویچی معرفی شده را در مرحله طراحی کم یا زیاد نمود)، کمتر بودن مشکل اعوجاج و چروکیدگی در هنگام تحمل بار و ساخت آسان، سازه پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب برای تغییر انحنای ایرفویل بال هواپیما، بصورت پیوسته مورد استفاده قرار گیرد.

8- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از حمایت ویژه "صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور" تشکر و قدردانی نمایند.

9-مراجع

- [1] C. Thill, J. Etches, I. Bond, K. Potter, P. Weaver, Morphing skins, *The Aeronautical Journal*, Vol. 112, No. 1129, pp. 117-139, 2008.
- [2] M. Zheng, V. Khac Kien, J.Y. Richard, Aircraft morphing wing concepts with radical geometry change, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 188-195, 2010.
- [3] S. Barbarino, O. Bilgen, R.M. Ajaj, M.I. Friswell, D.J. Inman, A review of morphing aircraft, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 9, pp. 823-877, 2011.
- [4] I. K. Kuder, A. F. Arrieta, W. E. Raither, P. Ermanni, Variable stiffness material and structural concepts for morphing applications, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 63, pp. 33-55, 2013.
- [5] T. Yokozeki, S.I. Takeda, T. Ogasawara, T. Ishikawa, Mechanical properties of corrugated composites for candidate materials of