



بررسی تجربی چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه دار در برابر ضربه سرعت پایین شارپی

مسعود عصفوری¹، امید رحمانی^{2*}، محمدرضا زمانی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
* زنجان، صندوق پستی 45371-38791، Omid.rahmani@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>دریافت: 96/7/14 پذیرش: 96/10/2</p> <p>کلیدواژگان: سیم حافظه‌دار چندلایه فلز-الیاف طراحی تاگوچی ضربه شارپی</p>	<p>در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی میزان جذب انرژی در چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت پایین پرداخته شده است. پارامترهای مورد آزمایش در این پژوهش، زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در گلره تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار می‌باشند و برای اعمال ضربه از دستگاه ضربه شارپی 200J استفاده شده است. از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های این پژوهش استفاده گردید و نمونه‌های مورد بررسی بر اساس آرایه متعامد L16 ساخته شدند. در استفاده از این آرایه پارامترهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در 2 سطح مورد آزمایش قرار گرفتند. گلره‌های مورد بررسی از 19 لایه که حاوی 3 لایه آلومینیومی بودند، ساخته شدند. برای بررسی تاثیر تغییرات پارامترها بر روی میزان جذب انرژی ضربه شارپی چندلایه، بر روی داده‌های استخراجی تحلیل واریانس انجام گرفت. مشخص شد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری این سیم‌ها در چندلایه به ترتیب به میزان 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد بر روی میزان جذب انرژی چندلایه تاثیرگذار می‌باشد. همچنین آنالیز واریانس نشان داد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری این سیم‌ها در چندلایه، با اطمینان به ترتیب 92.1 درصد، 90.6 درصد و 71 درصد بر تغییرات میزان جذب انرژی ضربه تاثیرگذار می‌باشد.</p>

An Experimental investigation on Nitinol shape memory alloy reinforced GLAREs against Charpy low velocity impact

Masoud Osfoury¹, Omid Rahmani^{1*}, Mohammad Reza Zamani²

1- Department of Mechanical engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
2- Department of Mechanical engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 45371-38791, Zanjan, Iran, Omid.Rahmani@znu.ac.ir

Keywords

Charpy impact
Fiber metal laminate
GLARE
Shape memory alloy
Nitinol

Abstract

This research is on the energy absorption level in a metal-fiber laminate reinforced with a shape-memory-alloy and against low velocity impact. The parameters of the study are fiber angle, level of pre-strain and position of memory wires in a GLARE reinforced with 2 memory-wires, and a 200-J Charpy-Impact device was used to exert the impact. Moreover, we have focused on effects of changes in fiber's angel, the location of shape-memory wires and their pre-strain effect on energy absorption level of GLARE, which is reinforced with two shape-memory-wires, against a Charpy-impact of 200 Jules. Taguchi method was used in designing of the experiments for this research and the investigated specimen were constructed based on L16 orthogonal array. During the usage of array, parameters of "fiber angel" and the "pre-strain level of shape-memory wires" were tested in 4 levels as well as the parameter related to the location of shape-memory-wires, tested in 2 levels. The scrutinized GLAREs were constructed of 16 layers containing 3 layers of aluminum. The analysis of variance was performed on extracted data to investigate the effect of changes in parameters on the energy absorption level of laminate-Charpy-impact. It was found that the changes in following parameters of pre-strain of shape-memory wires, fiber's angel and the location of these wires in laminate, have the influence of 39.12%, 32.13%, 4.56%, respectively, on the energy absorption level of laminate. The variance analysis also proved that changes in energy absorption have confidence level of 92.1%, 90.6% and 71% respectively with the changes in aforementioned parameters.

1-مقدمه

الیاف یکی از موادی هستند که در آن هم خواص ویژه استحکامی کامپوزیت‌های الیاف-پلیمر وجود دارد و هم خواص چقرمگی و مقاومت در برابر ضربه و بارگذاری‌های دینامیکی فلزات قابل ملاحظه می‌باشد. دسته‌ای از

در سال‌های اخیر نیاز به استفاده توأمان از خواص مختلف مواد، مهندسیین را به تحقیق در مورد مواد جدید و توسعه آن واداشته است. چندلایه‌های فلز-

Please cite this article using:

Osfoury, M. Rahmani, O. and Zamani, M. R., "An Experimental investigation on Nitinol shape memory alloy reinforced GLAREs against Charpy low velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 403-414, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

افزایش سرعت اولیه ضربه‌زننده و در نتیجه افزایش انرژی ناشی از ضربه، تعداد لایه‌های جدا شده، مساحت جدایش بین لایه‌ها و نیز تعداد لایه‌های شکسته شده افزایش می‌یابد، در حالی که روند جذب انرژی نمونه‌ها با افزایش سرعت ضربه زننده تغییر نمی‌کند [9].

صدیقی و داریوشی به بررسی تأثیر زاویه الیاف در روی جذب انرژی ضربه سرعت‌پایین چندلایه فلز الیاف پرداختند. آن‌ها برای تحقیق خود از 2 دستگاه ضربه شاری با انرژی‌های اعمالی متفاوت z 150 و z 6 استفاده کردند، هر چند نتایج آزمایش‌ها آن‌ها برای هر دستگاه مقدار متفاوتی را نشان می‌داد اما آن‌ها نتیجه گرفتند که لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 0 درجه مقاومت به ضربه نمونه را به شدت افزایش می‌دهد، لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 90 درجه نمونه را شکننده‌تر می‌کند و لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 45 درجه، اگر در بخش پشتی نمونه قرار گیرند، انرژی ضربه‌ای جذب شده را افزایش می‌دهند. در واقع نیروی وارد شده باعث شکست کامپوزیت روی خط 45 درجه و موازی الیاف می‌شود و این نوع شکست موجب پاره شده لایه آلومینیومی مقابل آن می‌شود. به بیان دیگر لایه آلومینیومی ابتدا دچار کرنش پلاستیک زیادی شده و سپس می‌شکند که این امر باعث جذب انرژی زیادی به وسیله این لایه می‌گردد [10].

یکی دیگر از موادی که به منظور بهبود خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌ها نظر محققان را به خود جلب کرده است، آلیاژهای حافظه‌دار می‌باشد. هنگامی که آلیاژ حافظه‌دار تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد فاز کریستالی آن از مارتنزیت به مارتنزیت دوقلوبی تغییر کرده و با اعمال حرارت به آن، تغییر فاز مارتنزیت دوقلوبی به فاز آستنیت اتفاق افتاده و منجر به بازیابی شکل اولیه آلیاژ می‌شود، این فرآیند با عنوان حافظه‌داری این آلیاژها شناخته می‌شود. همچنین در نمودار تنش و کرنش این آلیاژها در سیکل بارگذاری-باربرداری 1 حلقه هیستریزس به وجود می‌آید که مساحت داخلی این حلقه معادل با میزان انرژی است که آلیاژ مستهلک می‌سازد. این 2 خاصیت باعث شده است که این آلیاژها یکی از کاندیداها برای تقویت کامپوزیت‌های الیاف پلیمر در برابر بارگذاری ضربه‌ای باشند.

سان و همکاران به مطالعه پاسخ ضربه‌ای چندلایه متعامد الیاف شیشه - اپوکسی تک جهته تقویت‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار که در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته بودند، پرداختند. آن‌ها ابتدا از طریق فرایند تزریق رزین در خلأ صفحات بدون آلیاژ حافظه‌دار را تولید کرده و سپس در بین این صفحات، یک لایه حاوی سیم حافظه‌دار در ارتفاع‌های مختلف قرار دادند. نسبت این ارتفاع‌ها به نسبت کل ضخامت چندلایه، اعداد $1/8$ ، $1/2$ ، $7/8$ و $15/16$ را شامل می‌شد. آن‌ها همچنین نمونه‌هایی با 2 صفحه حاوی سیم حافظه‌دار را نیز ساخته و آزمایش کردند. در این دسته از نمونه‌ها 2 لایه حافظه‌دار در ارتفاع‌های $15/16$ و $14/16$ ضخامت، $15/16$ و $1/2$ ضخامت، در $14/16$ و $1/2$ ضخامت، در $14/16$ و $1/2$ ضخامت و در ارتفاع‌های $1/2$ و $1/8$ ضخامت نمونه قرار داشتند. آزمایش ضربه سرعت‌پایین آن‌ها با دستگاه ضربه افتان J. 28 انجام گرفت. پاسخ‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها تحلیل شده و پارامترهای مؤثر مانند نیروی تماس (F)، جابجایی (D) و انرژی (E) استخراج شدند. برای تجزیه و تحلیل مدهای آسیب، آن‌ها نمونه‌ها را ابتدا با استفاده از بازرسی چشمی بررسی کرده و برای مشاهده بهتر از میکروسکوپ الکترونی استفاده کردند. نتایج تجربی مطالعه آن‌ها نشان داد که مقاومت چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت‌پایین بیشتر از چندلایه-هایی است که با سیم حافظه‌دار تقویت نشده‌اند، همچنین در صورتی که

این کامپوزیت‌ها که با عنوان گلره‌ها شناخته می‌شوند، دارای لایه‌های فلزی از جنس آلومینیوم هستند که با الیاف شیشه تقویت شده‌اند. این مواد در برابر بارگذاری‌های ضربه‌ای مقاومت بالایی داشته و نسبت به آلومینیوم یکپارچه چگالی پایین‌تری دارند.

ضربه وارد بر پیکره هواپیما می‌تواند ضربه کم‌سرعت مانند افتادن بار بر روی بدنه، برخورد ماشین و سنگ‌ریزه و افتادن ابزار کار بر روی پیکره هواپیما یا برخوردهای پرسرعت مانند برخورد هواپیما با پرندگان و تگرگ و یا برخورد گلوله با بدنه هواپیماهای جنگی را شامل شود. هر برخوردی که دارای سرعتی کمتر از 10 m/s باشد جزو این دسته از برخوردها حساب می‌شود [4-1].

آشنای قاسمی و همکاران پاسخ دینامیکی ورق یکسر گیردار کامپوزیتی با لایه فلزی تحت ضربه با اجرام کوچک و بزرگ را با استفاده از مدل 2 درجه آزادی جرم و فنر و نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از ورق آلومینیومی کم ضخامت در بین لایه‌های کامپوزیت باعث بهبود مقاومت ورق در اثر اعمال ضربه می‌شود [5].

جاروسلا و همکاران به مقایسه رفتار چندلایه‌های فلز-الیاف شیشه-اپوکسی/آلومینیوم و کربن-اپوکسی/آلومینیوم پرداختند. در پژوهش آن‌ها تأثیر جهت‌گیری الیاف و همچنین تجزیه و تحلیل مدت‌زمان بارگذاری، منطقه آسیب و عمق تخریب و ارتباط آن‌ها با سطوح مختلف انرژی ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده امکان تعیین نقاط مشخصی را که ممکن است در مراحل خاصی از فرآیند تخریب ساختار چندلایه، تخریب در آنجا رخ دهد را ایجاد می‌کند. این مودهای تخریب شامل ریزترک‌های محلی و لایه‌لایه شدن می‌باشند که سبب کاهش سفتی چندلایه شده و آسیب بیشتر به واسطه ترک‌های موجود در چندلایه را باعث می‌شوند. آن‌ها دریافتند که چندلایه‌های دارای الیاف کربن، نسبت به لمینیت‌هایی که حاوی الیاف شیشه هستند، تمایل بیشتری به سوراخ شدن دارند و لایه‌لایه شدن در کامپوزیت و جدایش بین صفحات فلزی و لایه‌های الیاف-پلیمر در چندلایه‌های فلز-الیاف مد اصلی تخریب می‌باشد. آن‌ها دریافتند که در چندلایه‌های گلره جذب انرژی عمدتاً از طریق تغییر شکل پلاستیک و همچنین از طریق شروع لایه‌لایه شدن و پخش آن می‌باشد، در حالی که در چندلایه‌های کارال(الیاف کربن-اپوکسی/آلومینیوم) جذب انرژی ضربه از طریق نفوذ و سوراخ کردن چندلایه اتفاق می‌افتد [6].

شنگینگ و همکاران پاسخ دینامیکی ضربه و نحوه شکست ورق‌های فلز-الیاف تحت ضربه سرعت‌پایین را مورد بررسی قرار دادند، نمونه‌های آن‌ها متشکل از 1 لایه شیشه - اپوکسی (شامل الیاف تک جهته و یا پارچه الیاف 0درجه - 90 درجه) بود که در بین 2 لایه آلومینیوم چسبیده بودند. آن‌ها برای بررسی تجربی از دستگاه تست ضربه افتان و برای مطالعه عددی از نرم افزارهای استاندارد المان محدود استفاده کردند. آن‌ها مدهای شکست، بیشترین نیروی تماسی و مقدار نیروی تماسی در طول زمان برخورد را شبیه‌سازی نموده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج بررسی آن‌ها تطبیق قابل قبول نتایج تجربی را با خروجی‌های حاصل از مدل‌سازی نشان داد [7].

چندلایه‌های فلز-الیاف بر پایه کامپوزیت‌های گرم‌انرم توسط کانت ول و همکارانش بررسی شد، آن‌ها دریافتند که این دسته از چندلایه‌ها نسبت به چندلایه‌های با ماتریس گرم‌سخت برای تحمل ضربه و جذب انرژی ناشی از آن و از لحاظ استحکام شکست خواص بهتری دارند [8].

سزیکار بروجردی و همکاران به بررسی تجربی و تحلیلی ضربه کم‌سرعت بر صفحات چندلایه فلز-الیاف پرداختند. آن‌ها دریافتند که با

نبود مقایسه کردند، آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که در صورتی که صفحه کامپوزیتی با آلیاژ حافظه‌دار تقویت شود استحکام صفحه به شدت افزایش می‌یابد [15].

سیلیو پاپادا و همکاران به بررسی آزمایشگاهی اثر تقویت‌کنندگی سیم‌های حافظه‌دار و سیم‌های فولادی روی مواد مرکب رزین-الیاف در مقابل ضربه سرعت‌پایین پرداختند و دریافتند که اثر تقویت‌کنندگی سیم‌های حافظه‌دار بیشتر از سیم‌های فولادی می‌باشد. آن‌ها همچنین به این موضوع پی بردند که اثر تقویت‌کنندگی سیم‌های حافظه‌دار در مقابل ضربه سرعت‌پایین روی کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی کمتر از کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی می‌باشد [16].

رضائی پارسا و اسلامی فارسانی به بررسی تجربی تأثیر تقویت‌کنندگی پیش‌کرنش‌های مختلف سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نیتینول تعبیه‌شده در چندلایه‌های فلز-الیاف در برابر ضربه سرعت‌پایین پرداختند. آن‌ها برای انجام آزمایش‌های خود از دستگاه ضربه افتان استفاده کردند. جنس چندلایه مورد بررسی آن‌ها آلومینیوم-شیشه-اپوکسی بود که درون آن‌ها 6 سیم با پیش‌کرنش‌های 1، 2 و 3 درصد تعبیه شده بود. نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد که با افزایش پیش‌کرنش سیم‌ها، مدت‌زمان تماس ضربه زنده با قطعه افزایش و شوک نیروی ضربه، جابجایی ضربه زنده و میزان سطح آسیب کاهش می‌یابد [17].

آشنای قاسمی و همکاران به بررسی پاسخ آلومینیوم ترک‌دار که با چندلایه‌های فلز-الیاف تعمیر شده بودند، در برابر ضربه شارپی پرداختند. پیچ چندلایه فلز-الیاف مورد استفاده آن‌ها از یک لایه آلومینیوم و 2 لایه پارچه بافته شده الیاف شیشه تشکیل می‌شد. نمونه‌های مورد بررسی آن‌ها دارای 3 پارامتر طول ترک، زاویه ترک و نحوه چیدمان لایه‌ها در چندلایه فلز-الیاف بود. نتیجه آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که برای نمونه‌های دارای ترک بلندتر تأثیر زاویه ترک در جذب انرژی ضربه بیشتر خواهد بود. در پژوهش آن‌ها مشخص شد که جذب انرژی ضربه شارپی در نمونه‌ها، بیشتر متأثر از چیدمان لایه‌ها خواهد بود. همچنین آن‌ها دریافتند که میزان جذب انرژی در نمونه‌های دارای ترک با زاویه 45 درجه 25 درصد بیشتر از نمونه‌های دارای زاویه 0 درجه خواهد بود. آن‌ها همچنین دریافتند که نحوه چیدمان لایه‌ها و محل قرارگیری لایه آلومینیومی در چندلایه پیچ تعمیر بر روی میزان جذب انرژی بسیار مؤثر می‌باشد. به طوری که با افزایش فاصله لایه فلزی پیچ تعمیر از آلومینیوم دارای ترک، میزان جذب انرژی چندلایه کاهش می‌یابد [18].

خلیلی و همکاران یک ترکیب جدید از کامپوزیت‌های فلز-الیاف را معرفی نمودند. نمونه‌های آن‌ها از صفحات فولاد/آلومینیوم/الیاف-پلیمر تشکیل شده بود. آن‌ها روی نمونه‌های ساخته شده آزمایشات مختلفی را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که کامپوزیت‌های فلز-الیاف حد تحمل بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های الیاف-پلیمر دارند. همچنین میزان مساحت زیر نمودار تنش و کرنش در چندلایه فلز-الیاف بزرگتر از ناحیه زیر نمودار در چندلایه الیاف-پلیمر می‌باشد. در آزمایشات آن‌ها مشخص شد که حضور لایه‌های فولادی در چندلایه باعث افزایش میزان جذب انرژی ضربه و همچنین افزایش سختی چندلایه می‌شود. همچنین سختی خمشی چندلایه‌هایی که با صفحات فولادی تقویت شده‌اند 16 برابر بیشتر از سختی خمشی چندلایه‌های الیاف-پلیمر خواهد بود، این در حالیست که استفاده کردن از فولاد در چندلایه باعث افزایش وزن چندلایه می‌شود [19].

با توجه به آنچه از تحقیقات گذشته موجود حاصل شد، نیاز به ساخت چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار و بررسی خواص ضربه‌ای

سیم‌ها در 2 صفحه قرار بگیرند و میانگین فاصله آن‌ها از ضربه زنده کمینه باشد میزان جذب انرژی ضربه نیز بیشینه خواهد بود [11].

هو و همکاران به مطالعه اثر مقاوم‌سازی چندلایه‌های مورد استفاده در بدنه هواپیماها که با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی و سوپرالاستیک تقویت شده بودند، پرداختند. آن‌ها در بررسی خود ابتدا به مطالعه عددی رفتار چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت‌پایین پرداخته و برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند، سپس، آن‌ها به بررسی پاسخ گذرای چندلایه پرداخته و توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها را به دست آوردند. نتایج عددی استخراج‌شده نشان داد که هر 2 مقدار تنش و تغییر شکل در چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار از چندلایه فاقد آلیاژ حافظه‌دار کمتر است. این مسئله ثابت کرد که تعبیه آلیاژ حافظه‌دار در چندلایه‌های پلیمر-الیاف می‌تواند به‌طور مؤثر باعث بهبود مقاومت سازه در برابر ضربه سرعت‌پایین شود. آن‌ها در نهایت به بررسی تأثیر حضور آلیاژ حافظه‌دار شکلی و سوپرالاستیک در چندلایه به‌منظور مقاوم‌سازی چندلایه در برابر ضربه سرعت‌پایین پرداختند. مقادیر تنش ماکزیمم و تغییر شکل در چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به چندلایه غیرمسلح با آلیاژ حافظه‌دار به ترتیب به میزان 18.28 و 9.43 درصد کاهش داشته است و نیز مقادیر مذکور برای چندلایه تقویت‌شده با آلیاژ سوپرالاستیک نسبت به چندلایه غیرمسلح با آلیاژ حافظه‌دار کاهشی معادل 8.12 درصد و 5.19 درصد را نشان داد. در آخر آن‌ها نتیجه گرفتند که تقویت کردن چندلایه با آلیاژ حافظه‌دار می‌تواند منجر به تولید چندلایه‌هایی شود که در برابر ضربه سرعت‌پایین مقاومت بالاتری نسبت به چندلایه غیرمسلح دارند [12].

شن و همکاران در پژوهش خود به بررسی قابلیت مقاومت ضربه‌ای هر 2 سیم حافظه‌دار شکلی و سوپرالاستیک نیتینول پرداختند. سیم‌های مورد بررسی آن‌ها 0.3 mml قطر داشتند و تحت سطوح مختلف انرژی ضربه و دماهایی بین دمای شروع آستنیت و دمای پایان آستنیت آزمایش شدند. آن‌ها در بررسی خود از 1 نوع جدیدی از طرح آزمایش‌ها استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که مسلح کردن چندلایه با هر دو نوع از سیم‌های سوپرالاستیک و حافظه‌دار شکلی نیتینول باعث افزایش قابل‌ملاحظه مقاومت چندلایه در برابر ضربه می‌شود و این سیم‌ها می‌توانند انرژی ضربه را به میزان بسیار بیشتر از فلزات دیگر مانند آهن، مس و آلومینیوم مستهلک کنند. همچنین آن‌ها دریافتند که آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیتینول نسبت به آلیاژ سوپرالاستیک می‌تواند در مدت‌زمان کمتری مقدار انرژی بیشتری را از ضربه زنده جذب و آن را مستهلک کند. آن‌ها همچنین دریافتند که تقویت‌کنندگی آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیتینول در برابر ضربه شدیداً به دمای محیط آزمایش وابسته است و این وابستگی به دما مخصوصاً در محدوده دمایی شروع و پایان آستنیت به شکل شدیدی قابل رؤیت است. تحقیقات آن‌ها برای مقاوم‌سازی خودروها در برابر ضربات ناشی از تصادفات مورد استفاده قرار گرفت [13].

ژانگ و همکاران دو دسته صفحه کامپوزیتی ساختند، یک دسته از این صفحات به سیم‌های حافظه‌دار تک‌جهته و دسته دیگر به سیم‌های حافظه‌دار بافته‌شده مسلح بود، آن‌ها به تحلیل ارتعاشی ناشی از برخورد پرداختند. مطالعه آن‌ها نشان داد که با کنترل تحول مارتنزیت به آستنیت در آلیاژ حافظه‌دار می‌توان کنترل بیشتری روی تنظیم سفتی سازه‌ها داشت [14].

کین تاک لاوو و همکاران به بررسی آزمایشگاهی روی چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه - اپوکسی که با سیم‌های حافظه‌دار تقویت‌شده بودند پرداختند و نتایج آزمایش‌ها را باحالتی که در آن سیم‌های حافظه‌دار موجود

برای تقویت کردن چندلایه در برابر ضربه استفاده شده است. درصدهای فلزات استفاده شده در ساخت این آلیاژ با توجه به استاندارد ASTM F2063 مورد پذیرش می‌باشند.

از آنجایی که در برگه مشخصات این سیم حافظه دار مشخصات مکانیکی محصول ذکر نشده بود، برای مشخص کردن مقدار کرنش پارگی سیم، روی این سیم توسط آزمایشگاه دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی آزمایش کشش سیم انجام شد. نتیجه آزمایش نشان داد که میزان کرنش پارگی این سیم به‌طور میانگین 3.4 درصد می‌باشد.

با توجه به این که در این پژوهش میزان دمای شروع و پایان مارتنزیت و آستنیت از پارامترهای بسیار مهم می‌باشد، لذا معلوم بودن این پارامترها نیز ضروری می‌نماید.

به منظور به دست آوردن این دماها برای سیم حافظه دار، آزمایش DSC توسط شرکت رازی بر روی آن انجام گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که دماهای پایان و شروع آستنیت و شروع و پایان مارتنزیت به ترتیب مقادیر 0.5°C ، 5.6°C ، 66.4°C ، 75.9°C می‌باشد.

استحکام استاتیکی نهایی و چگالی این سیم نیز با استعلام از سازنده آن مقادیر جدول 1 را مشخص نمود.

جدول 1 خواص مکانیکی سیم نیتینول

Table 1 Nitinol wire mechanical characteristics

مقدار	خاصیت
$>100\text{ MPa}$	تنش نهایی تحت بارگذاری 3mm/min
6.5 gr/cc	چگالی

در این پژوهش از آلومینیوم گرید 2024 با عملیات حرارتی T3 به ضخامت 0.5 mm استفاده شد. ابتدا آلومینیوم به قطعات $4\text{cm} \times 24\text{cm}$ بریده شد و برای ساخت نمونه‌ها این قطعات مورد استفاده قرار گرفتند.

3-طراحی آزمایش‌ها

در این مطالعه از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها، تحلیل نتایج و بهینه‌سازی آن‌ها استفاده شد. به‌طور ایده‌آل در این روش، انجام یک دوره جلسات طوفان ذهنی، بررسی تحقیقات گذشته و آزمایش‌های ابتدایی برای تعیین نوع و سطوح فاکتورهای مناسب جهت طراحی آزمایش‌ها نیاز است. چنانچه در بررسی منابع مورد استفاده در تحقیق نیز بیان شد تاکنون تحقیقی مبنی بر بررسی مقاومت به ضربه شاری در چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه دار انجام نگرفته است. با توجه به بررسی‌هایی که بر روی منابع گذشته انجام شد 3 پارامتر زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم حافظه دار و محل قرارگیری سیم نسبت به ضربه‌زننده به‌عنوان کاندیداهای پارامترهای موثر معرفی شدند. بنابراین نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق چندلایه‌های تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار بودند که در آنها زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه دار و محل قرارگیری سیم‌های حافظه دار نسبت به ضربه‌زننده متغیر است.

در این پژوهش فاکتورهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم حافظه دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم حافظه دار در 2 سطح مورد بررسی قرار گرفت. زوایای 0 درجه، 30 درجه، 45 درجه و 60 درجه سطوح زاویه الیاف را و مقدارهای 0 درصد، 1 درصد، 2 درصد و 3 درصد سطوح مورد بررسی برای میزان پیش‌کرنش سیم حافظه دار را تشکیل می‌دادند. فاصله قرارگیری سیم‌های حافظه دار از ضربه زننده نیز در 2 سطح یعنی بین لایه‌های 5 و 6 چندلایه و بین لایه‌های 14 و 15 (با فرض اینکه لایه

آنها مفید به فایده می‌باشد، لذا در این پژوهش به بررسی میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه گلره تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه دار و میزان تاثیر تغییرات پارامترهای میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه دار نسبت به ضربه زننده در جذب انرژی ضربه سرعت پایین شاری پرداخته شده است.

2-مواد و روش‌ها

مواد سازنده نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق رزین اپوکسی، الیاف شیشه، ورق آلومینیوم و سیم آلیاژ حافظه دار می‌باشد.

در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه دار از رزین اپوکسی کر¹ 828 ساخت شرکت کوموهو² کره جنوبی به‌عنوان فاز زمینه استفاده شد. این رزین دارای ساختاری بر پایه ترکیب پلیمری بیسفنول ای³ و اپی کلروهیدرین⁴ می‌باشد.

رزین اپوکسی مذکور به‌صورت خام و بدون رقیق‌کننده از شرکت شیمی افسون تهیه گردید. از هاردنر تری‌اتیلن-اتترامین⁵ به‌عنوان جز سخت‌کننده رزین اپوکسی استفاده شد. این هاردنر با نسبت 12 درصد جرمی با رزین پایه ترکیب شد.

رزین اپوکسی کر 828 دارای ویسکوزیته متوسط می‌باشد. برخی از خواص این رزین که از عوامل مهم استفاده از آن است، شامل موارد ذیل می‌باشد.

- خواص مکانیکی خوب و مقاومت در برابر خوردگی بالا
- مناسب برای پوشش‌دهی سطوح مختلف
- واکنش‌پذیری بالا با هاردنرهای آمینی
- چسبندگی مناسب با الیاف
- امکان استفاده در ساخت سازه‌های بزرگ

اپوکسی رزین کر 828 که در بازارهای بین‌المللی با نام اپون⁶ 828 شناخته می‌شود، متداول‌ترین نوع رزین استفاده شده به‌عنوان فاز زمینه در کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی می‌باشد.

برای مشخص شدن کامل اجزای تشکیل‌دهنده چندلایه پلیمر-الیاف استفاده شده در این مطالعه، پس از مشخص شدن جنس فاز زمینه، نوع الیاف شیشه نیز مشخص گردید، بدین‌صورت که پارچه شیشه‌ای بافته شده 400 گرمی به‌عنوان الیاف تقویت‌کننده فاز زمینه کامپوزیت انتخاب شد. این پارچه الیاف شیشه‌ای محصول شرکت دونگیو فایبرگلاس⁷ چین بود و از شرکت ایران کامپوزیت خریداری شد. پارچه مورد استفاده به عرض یک متر و از نوع E-GLASS بود. طبق برگه مشخصات فنی این محصول استحکام نهایی و تسلیم این الیاف 3200 N/MM می‌باشد و نوع آن حصیری ساده بافت است. طراحی انعطاف‌پذیر و کرنش شکست بالا، قابلیت خیس شونده‌گی بالا، ایجاد چسبندگی خوب با ماتریس، قیمت پایین و امکان سفارش مقادیر جرمی مختلف، دلیل انتخاب این نوع از الیاف شیشه بود.

در این تحقیق از سیم حافظه دار به قطر 0.3 mm و تولیدی کارخانه فرانک جونگ⁸ چین با درصد 55.07 درصد نیکل و 43.86 درصد تیتانیوم

¹ KER

² KUMUHO

³ Bisphenol A

⁴ Epichlorohydrin

⁵ Triethylenetetramin

⁶ EPON

⁷ Dongyu Fiberglass

⁸ Frank Jung

به منظور اتصال بهتر لایه‌های آلومینیومی بریده شده به ابعاد 24mm×4mm به رزین اپوکسی، روی قطعات آلومینیومی، عملیات سطحی ذیل انجام شد.

- چربی زدایی با استون
- سنباده زنی در جهت الیاف
- چربی زدایی با استون
- آلکالین شویی
- اچ کردن با محلول فریک سولفات و اسید سولفوریک
- آنودایز

الیاف شیشه نیز در ابعاد مشابه آلومینیوم‌ها در زوایای مورد بررسی بریده شدند. از آنجایی که برای ساخت گلره‌ها اعمال فشار برای اتصال مناسب بین رزین اپوکسی و فلز آلومینیوم غیر قابل اغماض است، لذا قالب ساخت و اعمال مطابق شکل شماره 1 طراحی و ساخته شد. این قالب دارای 2 فک می‌باشد. فک زیرین از صفحه فولادی به ضخامت 3 cm ساخته شده است که در داخل آن شیار به عمق 1 cm و با ابعاد داخلی 3.5 cm×23 cm تراشیده شده و با رزین سیلیکون رابر پر شده است. فک بالایی قالب نیز از 1 صفحه فولادی ساخته شده است و با استفاده از 4 پیچ شماره 16 به راحتی به فک پایینی بسته شده و باعث اعمال فشار مورد نظر می‌شود.

برای اعمال پیش کرنش‌های مورد نظر به سیم‌های حافظه‌دار نیز قالبی مستطیل شکل مطابق شکل شماره 2 طراحی و ساخته شد. این قالب از 1 قاب مستطیل شکل تشکیل شده است که در روی عرض‌های آن 4 سوراخ تعبیه گشته است. 4 عدد 3 نظام در داخل این سوراخ‌ها قرار گرفته و با پیچاندن پیچ تنظیم آن‌ها مقدار پیش کرنش مورد نظر به سیم‌ها اعمال خواهد شد. برای رساندن سیم‌ها به پیش کرنش دلخواه، ابتدا آنها توسط اسپری سرما به فاز مارتنزیت برده شده و سپس با پیچاندن پیچ تنظیم پیش کرنش مورد نظر به سیم‌های حافظه‌دار اعمال شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا 2 قطعه آلومینیوم بر روی قالب پرس مطابق شکل شماره 3 قرار داده شد، سپس در اطراف آن‌ها تعدادی سوزن به داخل سیلیکون رابر فرو برده شد. این سوزن‌ها به منظور جلوگیری از لغزش لایه‌ها در حین آغشته سازی به رزین تعبیه شده است. در ادامه لایه‌ها از طریق روش لایه گذاری دستی روی هم قرار گرفتند.

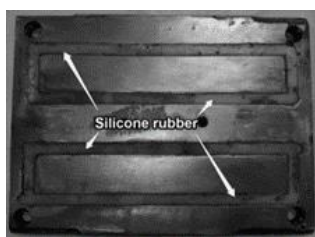


Fig. 1 Pressing die for constructing fiber metal laminates

شکل 1 قالب ساخت و پرس چندلایه فلز-الیاف

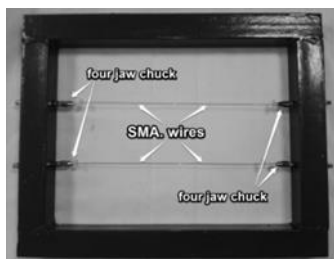


Fig. 2 Frame for wire prestraining

شکل 2 قاب پیش‌کرنش‌دهنده سیم حافظه‌دار

در تماس با چکش، لایه شماره 1 در نظر گرفته شود) طراحی شدند. در این مقاله برای رعایت ایجاز، به جای به کار بردن عبارات محل سیم در بین لایه‌های 5-6 و 14-15، از عبارات‌های نزدیک نسبت به ضربه زننده و دور نسبت به ضربه زننده استفاده شده است.

بر اساس چگالی الیاف و رزین مورد استفاده و با توجه به اینکه نسبت حجمی استاندارد برای الیاف در ساخت گلره‌ها 60 درصد می‌باشد و اینکه در این پژوهش گلره مورد نظر دارای 3 لایه آلومینیومی می‌باشد، تعداد لایه‌های الیاف پلیمر مورد نیاز برای دستیابی به نسبت حجمی مذکور، 16 لایه محاسبه شد. بنابراین در کل در این پژوهش یک 19 لایه فلز الیاف با لایه چینی [AL/GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI/AL/ GI, GI, GI, GI, GI, GI, GI /AL] که با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار تقویت شده بود مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین چنانچه گفته شد 2 سطح نزدیک و دور که برای محل قرارگیری سیم حافظه‌دار تعریف شد، به ترتیب در بین لایه‌های 4 و 5 پلیمر-الیاف و 9 و 10 پلیمر-الیاف می‌باشند.

آزمایش‌های انجام گرفته شده در این تحقیق با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی و بر اساس آرایه متعامد L16 که در جدول شماره 2 مشاهده می‌شود، انجام گرفت.

جدول 2 جدول طراحی آزمایش تاگوچی

Table 2 Taguchi design of experiment

محل سیم	سطح زاویه الیاف	سطح پیش کرنش	شماره آزمایش
نزدیک	0	0%	1
نزدیک	30	0%	2
دور	45	0%	3
دور	60	0%	4
نزدیک	0	1%	5
نزدیک	30	1%	6
دور	45	1%	7
دور	60	1%	8
دور	0	2%	9
دور	30	2%	10
نزدیک	45	2%	11
نزدیک	60	2%	12
دور	0	3%	13
دور	30	3%	14
نزدیک	45	3%	15
نزدیک	60	3%	16

1-3-1 استاندارد ساخت

طبق بررسی‌های صورت گرفته، در تمامی استانداردهای آمریکایی، وجود شکاف یا ناچ در نمونه‌های تست غیرقابل اغماض بوده است و از بین استانداردهای ایزو نیز تنها ISO197 نمونه‌هایی را در نظر می‌گرفت که در آن‌ها ناچ وجود نداشت. به جهت آنکه هدف این پژوهش بررسی اثر پیش‌کرنش آلیاژ حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری آلیاژ در چندلایه بر روی جذب انرژی ضربه شاری می‌باشد و وجود ناچ باعث به هم خوردن پارامترهای بررسی می‌شود، لذا استاندارد ISO179-a، که در آن ناچ در نظر گرفته نشده بود، برای ساخت نمونه‌ها انتخاب شد. بر طبق این استاندارد قطعات در ابعاد 5 mm×15 mm×65 mm و بدون ناچ ساخته شدند.

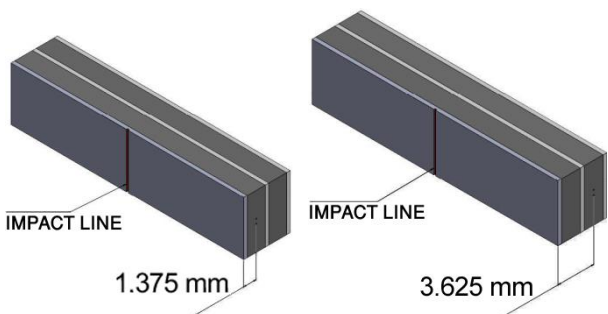


Fig 6-A. The distance between the SMA wires and the impact plate in the string-included specimen near to the impactor

شکل 6a نمونه دارای سیم حافظه‌دار که سیم‌های آن در فاصله نزدیک به ضربه‌زننده قرار دارد.

Fig 6-B. The distance between SMA wires and the impact plate in the string-included specimen far from the impactor

شکل 6b نمونه دارای سیم حافظه‌دار که سیم‌های آن در فاصله دور از ضربه‌زننده قرار دارد.

به منظور رساندن سیم‌های حافظه‌دار به دمای آستنیت و ایجاد تنش بازبایی در چندلایه، نمونه‌های استاندارد به مدت 150 دقیقه در دمای 75 درجه سلسیوس قرار داده شدند. با انجام این کار علاوه بر پس پخت شدن رزین اپوکسی با تغییر فاز سیم‌های حافظه‌دار کل گلره تحت تنش فشاری قرار گرفت.

برای انجام تست از دستگاه تست ضربه شاریبی 200 J که ساخت شرکت سنتام بود استفاده شد. ساپورت‌های این دستگاه دارای فاصله 40 mm بوده و بیشینه انرژی اعمالی دستگاه 200 J می‌باشد.

4-نتایج و بحث

چنانچه گفته شد نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش 16 نمونه و 3 تکرار را شامل می‌شدند. میانگین جذب انرژی تکرارهای هر نمونه به عنوان متغیر خروجی هر نمونه در نظر گرفته شد. نتایج نمودار شکل 7 نشان‌دهنده میانگین میزان جذب انرژی چندلایه در برابر ضربه شاریبی 200 J می‌باشد.

برای سهولت در توضیح نمودار شکل شماره 7 ستون‌های آن به 4 دسته 4 تایی تقسیم بندی شدند به طوری که در نمونه‌های هر دسته میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار بهم برابر باشند. آنگاه دسته‌های اول و دوم، نمونه‌هایی را شامل می‌شوند که در آن‌ها میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب 0 درصد و 1 درصد بوده و در هر دسته، زوایای الیاف تار نمونه‌ها به ترتیب مقادیر 0، 30، 45 و 60 درجه را شامل می‌شوند. محل قرارگیری سیم‌ها نیز در نمونه‌های 2 دسته اول به ترتیب طبق الگوی (نزدیک، نزدیک، دور، دور) قرار دارند. دسته‌های 3 و 4 نیز روندی مشابه دارند. با این تفاوت که در آنها میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب مقادیر 2 درصد و 3 درصد را شامل می‌شوند و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب از الگوی (دور، دور، نزدیک، نزدیک) پیروی می‌کند.

چنانچه در هیستوگرام شکل 7 مشاهده می‌شود، در آن دسته از نمونه‌هایی که در آن‌ها سیم‌های حافظه‌دار دارای پیش کرنش‌های برابر می‌باشد (دسته‌های 4تایی 4 تا 1، 5 تا 8، 9 تا 12 و 13 تا 16 که با طرح‌های متفاوت در نمودار نشان داده شده است)، مقادیر میانگین جذب انرژی نشان‌دهنده این است که نمونه‌های دارای الیاف با زاویه $\pm 45^\circ$ بیشترین میزان جذب انرژی ضربه را دارند (نمونه‌های شماره 3، 7 و 15). برای بررسی دلیل این مشاهده باید در نظر گرفته شود که اعمال ضربه باعث ایجاد خمش

طبق طرح آزمایش مطرح شده در جدول شماره 2 پس از اینکه مراحل لایه‌گذاری به لایه قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار رسید، قالب پیش کرنش‌دهنده سیم‌های حافظه‌دار (که سیم‌ها از قبل در آن قالب جا زده شده و به میزان پیش‌کرنش مورد نظر رسیده بود) بر روی قالب پرس قرار گرفت و سپس ادامه روند لایه‌گذاری انجام شد (شکل شماره 4).

در آخر فک بالایی قالب بسته شده و چندلایه به مدت 1 روز تحت پرس در دمای محیط پخته شدند. پس از 1 روز چندلایه از داخل قالب پرس بیرون آورده شد. با گذشت 1 هفته از اتمام مراحل لایه‌گذاری چندلایه، پخت رزین کامل شد. برای تکمیل مراحل پایانی ساخت نمونه‌های ضربه شاریبی، حاشیه‌های اضافی چندلایه با استفاده از اره گردبر بریده شد و نمونه‌های با ابعاد استاندارد ساخته شدند (شکل‌های شماره 5-الف و 5-ب). شکل‌های شماره 6-الف و 6-ب نشان دهنده فاصله محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار نسبت به صفحه مجاور ضربه‌زننده می‌باشد.

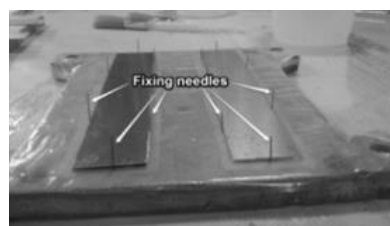


Fig. 3 Aluminum layers and fixing needles

شکل 3 لایه آلومینیومی و سوزن‌های تعبیه شده در اطراف آن

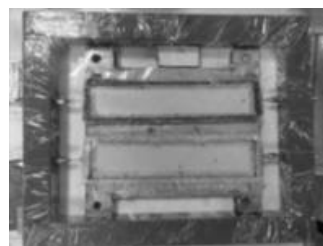


Fig 4. Wovens fibers Layup and imbedding prestrained SMA. wires

شکل 4 لایه‌گذاری الیاف و سیم حافظه‌دار پیش‌کرنش شده در روی قالب پرس

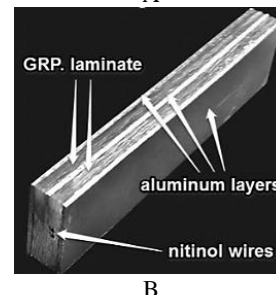
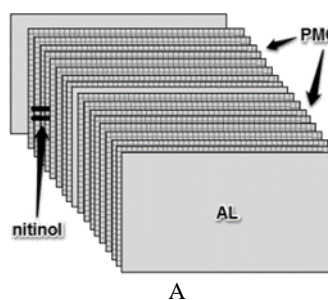


Fig 5 A. Specimen layers extended model **B.** Final specimen

شکل 5 الف- شمای گسترده لایه‌ها در نمونه‌های چندلایه فلز-الیاف ب- نمونه نهایی

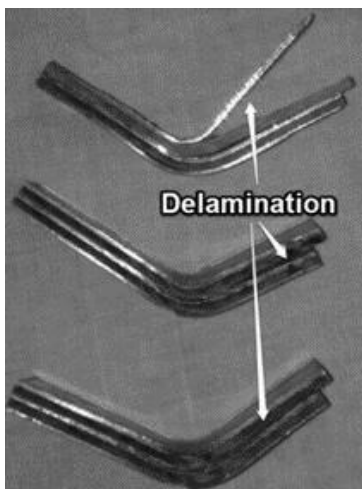


Fig. 8 Layers delamination style in treatments no. 3 and 7

شکل 8 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 3 و 7

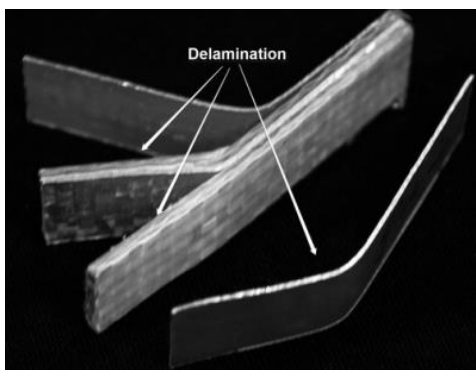


Fig. 9 Layers delamination style in treatments no. 1 and 5

شکل 9 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 1 و 5

بررسی بیشتر روی نمونه‌ها نشان‌دهنده تغییرات ناچیز در مساحت جدایش بین نمونه‌های شماره 2 و 4 و نمونه‌های شماره 6 و 8 می‌باشد. این دسته از نمونه‌ها با زوایای الیاف تار 30 و 60 ساخته شده‌اند و به دلیل اینکه الیاف استفاده شده دارای تار و پود عمود بر هم می‌باشند، این نمونه‌ها از نظر زاویه الیاف باهم تفاوت ندارند، چرا که پودهای نمونه دارای الیاف تار 30 درجه در نقش تارهای نمونه دارای پودهای 60 درجه هستند و برعکس. لذا در هر دسته نمونه‌های دارای الیاف تار با زوایای 30 و 60 درجه فقط از نظر محل قرارگیری سیم‌ها باهم تفاوت دارند.

چنانچه در شکل شماره 11 مشاهده شد که در نمونه‌های با زاویه 30 درجه که در آن‌ها سیم‌های حافظه‌دار در نزدیک‌ترین فاصله به ضربه زنده قرار دارد، جدایش لایه‌ها به طوری است که تنها بخشی از لایه آلومینیومی وسطی به کامپوزیت بخش پشت متصل می‌ماند و بقیه لایه‌ها به‌طور کامل از هم جدا شده‌اند، دلیل این اتفاق می‌تواند به خاطر گسیختگی ایجاد شده به‌واسطه تعبیه سیم حافظه‌دار در بخش کامپوزیت جلویی چندلایه باشد.

در نمونه‌های مشابه که در آن‌ها سیم حافظه‌دار در بخش پشتی کامپوزیت قرار دارد نیز شرایط تخریب به شکل مشابه می‌باشد، با این تفاوت که تمام لایه‌های آن به‌طور کامل از هم جدا شدند.

در چندلایه می‌شود و پیرو این تنش خمشی، تنش برشی نیز درون چندلایه ایجاد خواهد شد.

با توجه به اینکه مقدار تنش برشی در روی خط 45 درجه بیشینه است، چندلایه‌ای که در این راستا تقویت شده باشد می‌تواند مقاومت بالایی از خود نشان دهد. به همین دلیل نمونه‌هایی که دارای الیاف تار 45 درجه می‌باشد، انرژی ضربه را بیشتر تحمل می‌کنند. با این وجود نمونه شماره 11 که در دسته نمونه‌های دارای پیش‌گرنش 2 درصد قرار دارد میزان جذب انرژی کمتری را در این دسته از خود نشان می‌دهد. داریوشی و همکاران [10] نیز در آزمایش‌ها خود دریافتند که وجود الیاف 45 درجه در بخش پشتی چندلایه باعث افزایش جذب انرژی ضربه شاری می‌شوند. همانطور که در شکل شماره 8 نیز مشاهده می‌شود، در دسته‌های شماره 1 و 2 که شامل نمونه‌های 1 تا 8 هستند، چندلایه‌های شماره 3 و 7 کمترین جدایش بین لایه‌ها کامپوزیت و آلومینیوم را دارا می‌باشند، این نمونه‌ها دارای زاویه الیاف تار 45 درجه هستند. نمودار شکل 7 نشان‌دهنده کمینه بودن میانگین جذب انرژی در نمونه‌های شماره 1 و 5 (اولین نمونه از دسته‌های اول و دوم) می‌باشد. این نمونه‌ها دارای الیاف تار با زاویه 0 درجه هستند. مشاهدات نشان داد که وجود الیاف با زاویه تار 0 درجه باعث جدایش لایه‌های پشتی چندلایه می‌شود. این مسئله به وضوح در نمونه نشان داده شده در شکل شماره 9 که دارای زاویه الیاف تار 0 درجه می‌باشد مشاهده می‌شود. از آنجایی که در نمونه‌های با زاویه تار 0 درجه، پودها دارای زاویه 90 درجه می‌باشند، وجود این پودها باعث جدایش سریع لایه‌های پشتی خود خواهد شد چراکه این الیاف بار ضربه را تحمل نکرده و انرژی ضربه را بیشتر انتقال می‌دهند و این انرژی صرف غلبه بر چسبندگی بین لایه‌ها می‌شود. این در حالی است که در حرکت رفت و برگشتی موج ضربه در داخل این دسته از نمونه‌ها، موج ضربه در لایه وسطی تشدید شده و جدایش قسمتی از آلومینیوم وسطی از کامپوزیت بخش پشتی چندلایه کاملاً مشهود می‌باشد.

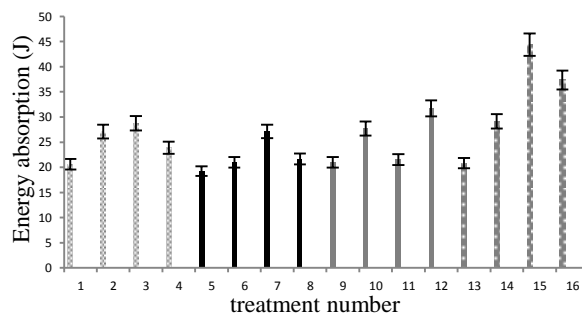


Fig. 7 Diagram showing the means of impact energy absorption of the treatments

شکل 7 نمودار میانگین جذب انرژی نمونه‌ها بر حسب شماره نمونه

از روی نمودار شکل شماره 7 مشخص است که استفاده از الیاف 2 جهت با زاویه تار 0 و پود 90 درجه باعث کمترین میزان جذب انرژی در بین چندلایه‌های تمام دسته‌ها می‌شود. چراکه الیاف 90 درجه موجود در ساختار آنها باری را تحمل نمی‌کنند. تحمل نکردن بار ضربه توسط این الیاف باعث شکستن الیاف دارای زاویه 0 درجه شده و بنابراین در این دسته از نمونه‌ها شکست الیاف، مود غالب تخریب می‌باشد (شکل شماره 10).

هرچند که روند کلی نتایج مربوط مقدار جذب انرژی با شیب کم صعودی است ولی در نمونه‌های دارای الیاف 30°C و 60°C (نمونه‌های شماره 2 و 4 و 6 و 8 و 10 و 12) تغییرات بسیار اندک می‌باشد.

مقادیر جذب انرژی این دسته از گلرها از میزان جذب انرژی نمونه‌های دارای الیاف با زاویه تار 45 درجه کمتر است ولیکن این مقادیر از گلرهای دارای زاویه الیاف تار 90 درجه بیشتر می‌باشد. دلیل این مشاهده این است که در نمونه‌های دارای زاویه الیاف تار یا پود 30 درجه، طول تصویر کل تارها و پودها بر خط 45 درجه بیشتر از نمونه‌هایی است که با الیاف تار 0 درجه ساخته شده‌اند، همچنین در این دسته از نمونه‌ها مجموع طول تصویر الیاف تار و پود بر زاویه 0 درجه (الیاف در این راستا بار ضربه را تحمل می‌کنند) بیشتر از الیاف 0 و 90 درجه می‌باشد. بنابراین این دسته از الیاف هم در برابر تنش برشی مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند هم در برابر خود ضربه‌زننده مقاومت می‌کنند.

جدایش لایه‌ها در دسته‌های سوم و چهارم نمودار شکل 7 از الگوی متفاوت پیروی می‌کند. چنانچه گفته شد در این 2 دسته از نمونه‌ها میزان پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب 2 درصد و 3 درصد می‌باشد و در هر دسته، زوایای الیاف تار نمونه‌ها به ترتیب مقادیر 0، 30، 45 و 60 درجه را شامل می‌شوند. تفاوت در محل قرارگیری سیم‌ها نیز در هر کدام از این 2 دسته به ترتیب بر طبق الگوی (دور، دور، نزدیک، نزدیک) می‌باشد. مشاهده می‌شود که نمونه‌های شماره 9 و 13 که دارای الیاف زاویه تار 0 درجه هستند، کمترین میزان جذب انرژی ضربه را در دسته مربوط به خود دارند. همچنین این چندلایه‌ها بیشترین میزان تخریب را در دسته خود نشان دادند. دلیل این مشاهده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در این نمونه‌ها پودهای دارای زاویه 90 درجه ضربه را تحمل نکرده و در آن‌ها بخش زیادی از انرژی ضربه صرف جدایش لایه‌ها می‌شود. در این دسته از نمونه‌ها برعکس نمونه‌های دارای الیاف تار با زاویه 0 درجه 2 دسته قبلی، آلومینیوم بخش جلویی به‌طور کامل جدا شده و نیمی از آلومینیوم بخش وسط نیز جدا شده است. جدا شدن آلومینیوم جلویی نشان از بازگرداندن امواج ضربه توسط این نمونه‌ها است (شکل شماره 12).

در دسته شماره 3، با وجود اینکه الیاف نمونه‌های شماره 10 و 12 زاویه برابر 30 درجه دارند و میزان پیش کرنش آن‌ها نیز برابر است ولی به دلیل تغییر در محل قرارگیری سیم حافظه‌دار مود تخریب لایه‌ها در آن‌ها تفاوت زیادی دارد (شکل‌های 12 و 13). نمونه‌ای که در آن‌ها سیم حافظه‌دار در سطح اول (نزدیک به ضربه‌زننده) قرار دارد، مساحت جدایش کمتری را از خود نشان داده است. در تمام تکرارهای این نمونه بازگشت موج ضربه به آلومینیوم لایه جلوی سیم حافظه‌دار مشهود است و مشاهده می‌شود قسمتی از لایه آلومینیومی میانی از کامپوزیت بخش پشتی نیز جدا شده است (شکل شماره 13).

این مشاهده را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با توجه به اینکه با افزایش در پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار سفتی قطعه افزایش می‌یابد، بنابراین سرعت امواج نیز در داخل ماده افزایش پیدا خواهد کرد، لذا تأثیر وجود سیم حافظه‌دار بر روی جذب انرژی چندلایه افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که سیم حافظه‌دار در نزدیکی ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، پالس‌های اولیه انرژی ضربه (که پرا انرژی‌ترین پالس‌های ضربه هستند) را زودتر از لایه‌های پشتی حس کرده و در اثر رفت‌وآمد موج ضربه، حلقه هیستریزس موجود در آلیاژ حافظه‌دار فعال شده و انرژی ضربه را هدر می‌دهند، بنابراین امواجی با دامنه کمتر از ضربه به لایه‌های بخش پشتی خواهد رسید.

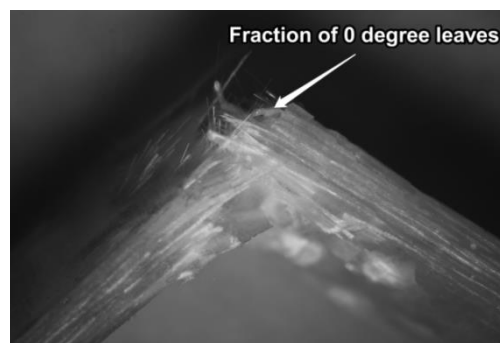


Fig. 10 90 degree fibers fractioning in treatments no. 1 and 5

شکل 10 شکستن الیاف 90 درجه در نمونه‌های شماره 1 و 5

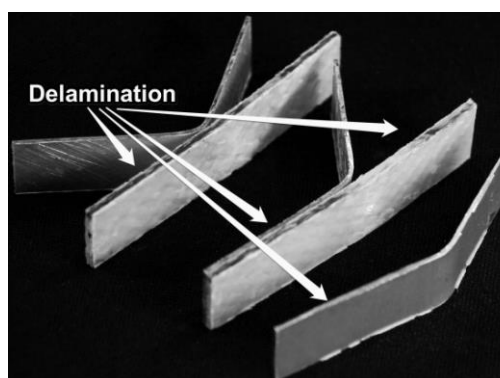


Fig. 11 Layers delamination style in treatments no. 2, 4, 6 and 8

شکل 11 نحوه تخریب و جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 2، 4، 6 و 8

از روی نمودار شکل 7 مشاهده می‌شود که میانگین جذب انرژی در نمونه‌هایی که دارای الیاف با زاویه‌های تار 30° و 60° هستند نیز نزدیک به هم هستند و تفاوت اندک میزان جذب انرژی در این چندلایه‌ها به خاطر تغییر در محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در این چندلایه‌ها می‌باشد. با اختلاف اندکی چندلایه‌های با الیاف 30 درجه‌ای که در آن‌ها سیم‌ها در نزدیکی ضربه‌زننده قرار دارند مقدار جذب انرژی بالاتری را نسبت به آن‌ها که سیم‌های تعبیه‌شده در آن‌ها در فاصله دور از ضربه‌زننده هستند، از خود نشان می‌دهند. این تفاوت در نمونه‌های 30 درجه و 60 درجه دسته شماره 4 مشهودتر است. دلیل این مشاهده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که وجود سیم در فاصله‌ای نزدیک به ضربه‌زننده می‌تواند باعث فعال شدن حلقه هیستریزس آن شود و انرژی اولیه را جذب کند بنابراین سرعت ضربه‌زننده کاهش یافته و ادامه روند ضربه با نرخ کرنش پایین‌تر انجام خواهد گرفت. همچنین جذب اولیه انرژی ضربه‌زننده توسط سیم حافظه‌دار می‌تواند باعث شود که پالس‌های بعدی انرژی ضربه‌زننده که از انرژی کمتری برخوردار هستند برای غلبه بر چسبندگی بین لایه‌ها هدر شود و برخلاف چندلایه‌هایی که سیم‌های آن‌ها در فاصله دوری از ضربه‌زننده قرار دارد و پس از دریافت اولین پالس‌های ضربه لایه‌های آنها از هم جدا شدند و افت مقاومت در برابر ضربه پیدا کردند، انرژی بیشتری را از ضربه‌زننده جذب نمایند. سان و همکاران [11] نیز در پژوهش خود دریافتند که در چندلایه‌هایی که میانگین فاصله‌های سیم‌های حافظه‌دار از ضربه‌زننده کمینه باشد میزان جذب انرژی ضربه سرعت‌پایین بیشینه خواهد بود. با توجه به نمودار شکل 7 مشاهده می‌شود که با افزایش پیش‌کرنش سیم‌ها از مقدار 0 درصد تا مقدار 2 درصد،

تعدادی موج در حرکت بوده‌اند که دامنه آنها کم بوده است، ولی این امواج باعث تشدید همدیگر شده‌اند لذا چنانچه در شکل 15 نیز مشاهده می‌شود حرکت تک تک این امواج باعث جدایش لایه آلومینیومی از لایه کامپوزیتی نشده است ولی این امواج باعث تقویت یکدیگر در 1 نقطه شده‌اند بنابراین در این نقطه لایه آلومینیوم تنش بسیار زیادی را تحمل کرده و در آخر از هم گسیخته شده است.

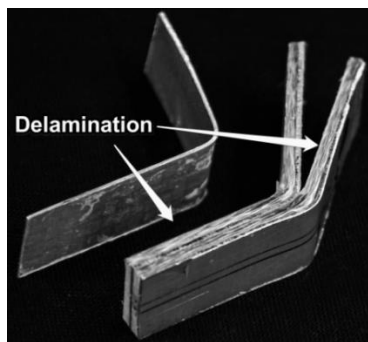


Fig. 12 Layers delamination style in treatments no. 9 and 13

شکل 12 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شماره 9 و 13

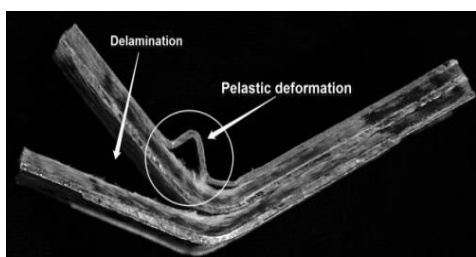


Fig. 13 Layers delamination style in treatment no. 12

شکل 13 جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 12

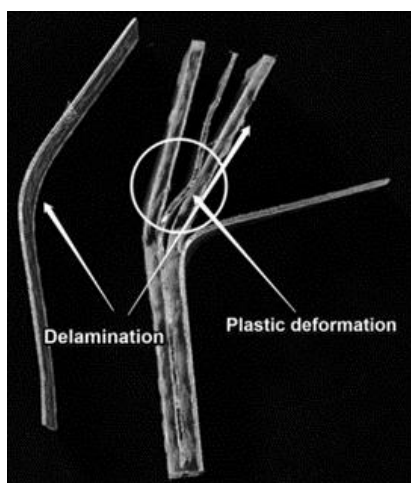


Fig. 14 Layers delamination style in treatment no. 10

شکل 14 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 10

در اینجا نیز مانند نتیجه‌ای که در بررسی تیمار قبلی گرفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار به مقدار 3 درصد، یا دامنه امواج حاصل از ضربه بیشتر شده است یا سرعت حرکت امواج تغییر کرده است. به طوری که امواج در حال حرکت در آلومینیوم یا کامپوزیت یا هر

این مشاهده را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با توجه به اینکه با افزایش در پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار سفتی قطعه افزایش می‌یابد، بنابراین سرعت امواج نیز در داخل ماده افزایش پیدا خواهد کرد، لذا تأثیر وجود سیم حافظه‌دار بر روی جذب انرژی چندلایه افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که سیم حافظه‌دار در نزدیکی ضربه زنده قرار می‌گیرد، پالس‌های اولیه انرژی ضربه (که پرنرژی‌ترین پالس‌های ضربه هستند) را زودتر از لایه‌های پشتی حس کرده و در اثر رفت‌وآمد موج ضربه، حلقه هیستریزس موجود در آلیاژ حافظه‌دار فعال شده و انرژی ضربه را هدر می‌دهند، بنابراین امواجی با دامنه کمتر از ضربه به لایه‌های بخش پشتی خواهد رسید. با افزایش پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار از 1 درصد به 2 درصد در تمامی نمونه‌های دارای زاویه الیاف 30 درجه و 60 درجه موج ضربه قابل رؤیت است، به نظر می‌رسد که با افزایش میزان پیش‌کرنش به مقدار 2 درصد فرکانس امواجی که در سیم حافظه‌دار در حال حرکت هستند با فرکانس امواجی که در آلومینیوم و کامپوزیت در حال آمد و شد هستند تداخل می‌کند و این تداخل باعث تشدید موج ضربه شده که اثر آن به شکل اعوجاج بر روی لایه آلومینیوم چندلایه مشاهده می‌شود.

در نمونه شماره 11 که در آن زاویه الیاف 45 درجه می‌باشد و سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 2 درصد در سطح نزدیک به ضربه زنده قرار دارد نیز مشاهده می‌شود که جدایش لایه‌ها به‌طور ناقص اتفاق می‌افتد و امواج ضربه به‌صورت نامتقارن روی آلومینیوم لایه جلویی دیده می‌شود بررسی آلومینیوم لایه پشتی نشان از فشردگی عرضی این لایه دارد و لایه پشتی تحت تغییر شکل پلاستیک عرضی قرار گرفته و مقداری از کامپوزیت لایه پشتی جدا شده است (شکل شماره 15)

نمونه‌های شماره 14 و 16 که دارای زوایای الیاف برابر 30 درجه و 60 درجه هستند و پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار تعبیه شده در آن‌ها 3 درصد می‌باشد رفتار مشابه رفتار نمونه‌های 10 و 12 دسته قبل، ولی با شدتی بیشتر از خود نشان دادند. در تکرارهای نمونه شماره 14 که در آن‌ها سیم‌های حافظه‌دار در دورترین فاصله از ضربه زنده قرار داشت، لایه پشتی به‌طور کامل جدا شد. بازگشت موج ضربه در روی آلومینیوم صفحه میانی این نمونه به‌خوبی مشهود می‌باشد (شکل شماره 16). در مقایسه شکل موج ایجاد شده در این نمونه با نمونه شماره 10 مشاهده می‌شود که موج ضربه شکلی واضح‌تر دارد بنابراین در این نمونه افزایش پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار یا باعث افزایش دامنه موج بازگشتی شده است یا باعث تغییر در سرعت حرکت امواج شده است به طوری که امواج در حال حرکت در آلومینیوم و کامپوزیت و سیم حافظه‌دار باهم تداخل کرده و شکل موجی واضح روی صفحه میانی ایجاد می‌کند.

در لایه‌های تکرارهای نمونه شماره 16 که دارای زاویه الیاف 30 درجه بوده و سیم‌های حافظه‌دار آن با مقدار پیش‌کرنش 3 درصد و در سطح نزدیک به ضربه زنده قرار دارد، مشاهده شد که سطح جدایش لایه‌ها کمترین مقدار را دارد. زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم تعبیه شده در داخل این نمونه دقیقاً مشابه نمونه شماره 14 می‌باشد. تغییر شکل ایجاد شده در این نمونه نیز مشابه شکل تخریب ایجاد شده در نمونه شماره 12 است، با این تفاوت که قدرت موج بازگشتی موجب پارگی آلومینیوم جلویی شده است.

چنانچه در شکل شماره 17 مشاهده می‌شود، جدایش لایه‌ها در این نمونه فقط در محل تشدید موج پدید آمده است. از اینکه جدایش در لایه اول به طور کامل اتفاق نیفتاده است میتوان اینطور نتیجه گرفت که در این نمونه

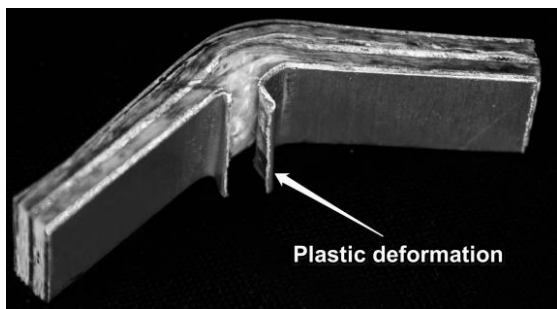


Fig. 17 Layers delamination style in treatment no. 16

شکل 17 جدایش لایه‌ها در تیمار شماره 16

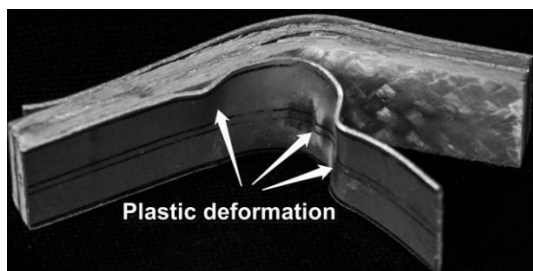


Fig. 18 Layers delamination style in treatment no. 15

شکل 18 نحوه جدایش لایه‌ها در تکرارهای تیمار 15

4-1- میزان تأثیر پارامترهای مؤثر در تغییرات میانگین میزان جذب انرژی برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای مؤثر در جذب انرژی چندلایه با استفاده از روش تحلیل تاگوچی که به وسیله نرم افزار مینی‌تب انجام گرفت، نمودار سیگنال به نویز برای پارامترهای مورد بررسی استخراج شد. برای استخراج این نمودارها، مشخصه کیفیت "هرچه بیشتر، بهتر" در نظر گرفته شد. 3 نمودار نشان داده شده در شکل 19، نمودارهای سیگنال به نویز هستند که 3 پارامتر مقدار پیش‌کرنش، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌حافظه‌دار در چندلایه را به مقدار جذب انرژی گلره تقویت شده با 2 رشته سیم‌حافظه‌دار مرتبط می‌کند. چنانچه از نمودارهای شکل 19 پیداست تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش و زاویه الیاف نسبت به محل قرارگیری سیم‌حافظه‌دار تأثیر بیشتری در تغییرات میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه دارد. با توجه به اینکه هرچه میزان سیگنال به نویز بیشتر باشد، آنگاه نتیجه موردنظر مطلوب‌تر است، نمودارهای سیگنال به نویز شکل 19 نشان می‌دهند که نمونه بهینه برای جذب بیشتر انرژی ضربه شاری، چندلایه‌ای است که در آن زاویه الیاف $\pm 45^\circ$ درجه و میزان پیش‌کرنش تقویت‌کننده حافظه‌دار 3 درصد باشد و سیم‌های حافظه‌دار در بین لایه‌های 5 و 6 قرار گیرند. خوشبختانه از بین 32 حالت ممکن برای ساخت کلیه نمونه‌ها، نمونه بهینه مذکور در بین نمونه‌های طراحی شده توسط روش تاگوچی قرار دارد و مشاهده می‌شود که این نمونه با میانگین جذب انرژی $J 44.367$ بیشترین جذب انرژی را از بین 16 نمونه آزمایش شده از خود نشان داده است. مقدار جذب انرژی نمونه‌ای با این مشخصات با استفاده از آنالیزهای آماری تاگوچی قابل پیش‌بینی است. با استفاده از پیش‌بینی تاگوچی مقدار جذب انرژی میانگین برای نمونه که بهینه‌ترین حالت از بین حالت‌های ممکن با استفاده از سطوح مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد، $J 38.8667$ پیش‌بینی شد. اگرچه مقدار پیش‌بینی شده

2 با امواج متحرک در سیم حافظه‌دار تداخل کرده و باعث تشدید موج ضربه شده است که این موج تشدید شده باعث گسیختگی آلومینیوم شده است.

تیمار شماره 15 که دارای زاویه الیاف 45 درجه بوده و در آن سیم‌های حافظه‌دار 3 درصد پیش‌کرنش شده در سطح نزدیک نسبت به ضربه زنده تعبیه شده است، در شکل شماره 18 مشاهده می‌شود. این تیمار بیشترین جذب انرژی ضربه را از خود نشان داد. در این نمونه 3 اعوجاج مبهم از امواج ضربه مشاهده شد و در هر 2 طرف خط ضربه بر روی تکرارهای این تیمار اثر موج دیده می‌شود به طوری که در 1 طرف از خط اعمال ضربه 2 قله موج نزدیک به هم وجود دارد و در طرف دیگر 1 قله موج قابل رویت است. در این دسته از نمونه‌ها نیز قسمتی از لایه آلومینیوم میانی از کامپوزیت بخش پشتی جدا شده است. در امتداد خط ضربه سطح اندکی از لایه آلومینیوم میانی و آلومینیوم پشتی نیز از کامپوزیت بخش جلویی جدا شده است.

با توجه به نتایج حاصل از جذب انرژی ضربه شاری بر روی نمونه‌های دارای سیم حافظه‌دار، با افزایش میزان پیش‌کرنش سیم‌ها، روندی صعودی در میزان جذب انرژی ضربه شاری در تیمارهای دارای زاویه الیاف $\pm 45^\circ$ درجه مشاهده می‌شود. این مشاهده ناشی از افزایش مقاومت سیم حافظه‌دار بر اثر افزایش میزان پیش‌کرنش آن است. همچنین مقدار بیشینه جذب انرژی از بین میانگین‌های تمام تیمارهای آزموده شده در تیمار شماره 15 با میزان پیش‌کرنش 3 درصد و زاویه الیاف $\pm 45^\circ$ اتفاق افتاد. رضانی پارسا و همکاران [17] نیز در بررسی‌های خود مشاهده کردند که با افزایش میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار در چندلایه‌های گلره مقدار جذب انرژی ضربه افزایش می‌یابد.

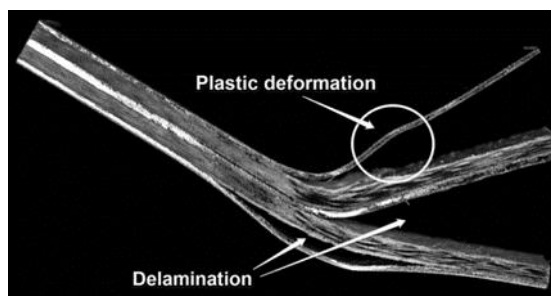


Fig. 15 Layers delamination style in treatment no.11

شکل 15 جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 11

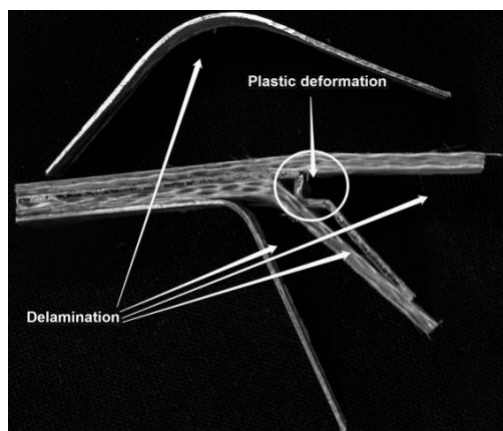


Fig. 16 Layers delamination style in treatment no.14

شکل 16 نحوه جدایش لایه‌ها در نمونه شماره 14

¹ Larger is better

92.91 معنی‌دار هستند. درحالی‌که تفاوت‌ها در جذب انرژی ضربه شاری برای پارامترهای زاویه قرارگیری الیاف در گلره و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار به ترتیب دارای سطوح اطمینان 90.6 درصد و 71 درصد می‌باشند. بنابراین به‌منظور استفاده از نتایج این تحقیق در صنعت، لازم است طراح این نکته را مورد توجه قرار دهد که میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار و زاویه الیافی که چندلایه از آن ساخته می‌شود جزو پارامترهای مؤثر در جذب انرژی ضربه شاری می‌باشند. درحالی‌که اطمینان کمتری برای تأثیر محل قرارگیری سیم حافظه‌دار در چندلایه به منظور جذب انرژی ضربه شاری، وجود دارد. این پژوهش به بررسی اثر تغییرات در پارامترهای زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار که پارامترهای مؤثر در مقاومت به ضربه گلره تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار می‌باشند، بر میزان جذب انرژی چندلایه در برابر ضربه شاری 200 J پرداخته است. از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های این پژوهش استفاده گردید و نمونه‌های مورد بررسی بر اساس آرایه متعامد L16 ساخته شدند. در استفاده از این آرایه پارامترهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در 2 سطح تغییر می‌کردند. گلره‌های مورد بررسی از 19 لایه که حاوی 3 لایه آلومینیومی بودند، ساخته شدند.

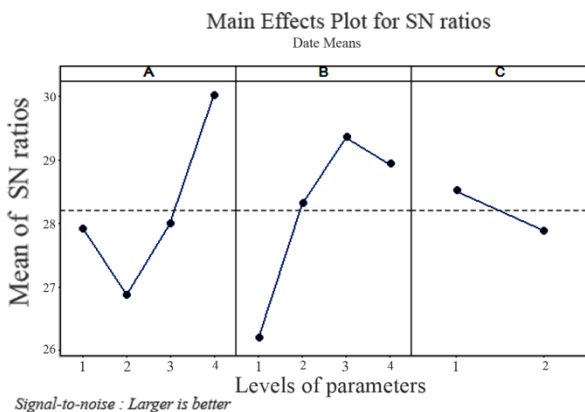


Fig. 19 Diagrams showing fiber metal laminates signal to noise ratio of investigated parameters in different levels

شکل 19 نمودارهای سیگنال به نویز برای سطوح پارامترهای درصد پیش‌کرنش، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در چندلایه

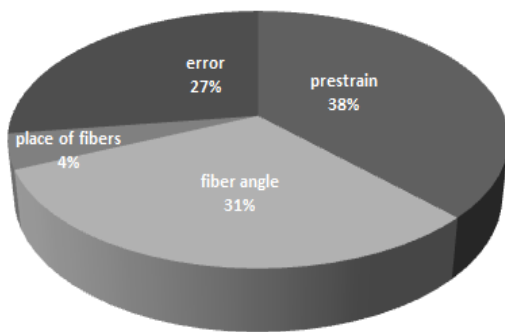


Fig. 20 The diagram of the efficacy percentage of experimented parameters and the error percentage on energy-absorption level of the laminate

شکل 20 نمودار درصد تاثیرگذاری پارامترهای آزمایش شده و خطا بر روی میزان

از مقدار آزمایش شده کمتر است، ولی مقدار آن همچنان از مقدار جذب انرژی سایر نمونه‌های آزمایش شده بزرگ‌تر است. اختلاف بین بزرگ‌ترین عدد سیگنال به نویز و کوچک‌ترین عدد حاصله، با پارامتر دلنا مشخص می‌شود. دلناهای مربوط به پارامترهای میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه قرارگیری الیاف در چندلایه و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در چندلایه به ترتیب مقادیر 10.68، 10.04 و 2.85 می‌باشند.

با تقسیم کردن دلنای مربوط به هر پارامتر به مجموع دلناها و مرتب‌سازی نتایج از بزرگ به کوچک ترتیب میزان مؤثر بودن تک‌تک پارامترها بر روی متغیر خروجی استخراج می‌شود. با این تفسیر تاثیرگذارترین پارامترها به ترتیب، میزان پیش‌کرنش سیم‌ها، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌ها درون چندلایه می‌باشند. برای پی بردن به درصد تاثیرگذاری پارامترها، روی داده‌های خروجی آنالیز واریانس با استفاده از مدل عمومی خطی¹ انجام گرفت. یکی از خروجی‌های این آنالیز مقادیر مجموع مربعات تعدیل یافته² واریانس می‌باشد. مجموع مربعات تعدیل یافته خطا نیز توسط نرم افزار مینی‌تب قابل استخراج می‌باشد. مقادیر مجموع مربعات برای پارامترهای میزان پیش‌کرنش، مقدار زاویه الیاف تار، محل قرارگیری سیم حافظه‌دار و خطا به ترتیب مقادیر 249.44، 229.55، 32.59 و 202.64 می‌باشد.

با تقسیم کردن مجموع مربعات اصلاح شده هر پارامتر به مجموع مربعات اصلاح شده کل (که از جمع کردن مجموع مربعات پارامترها و خطا به دست می‌آید) درصد تاثیر گذاری هر پارامتر حساب می‌شود. به این ترتیب درصد تاثیرگذاری پارامترهای پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم حافظه‌دار به ترتیب 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد می‌باشند. مقدار 28.37 درصد از تاثیر گذاری نیز برای خطا محاسبه گردید که ناشی از عوامل تاثیرگذاری می‌باشد که در این پژوهش بررسی نشده‌اند. لازم به ذکر است منظور از خطا صرفاً وجود اغتشاش در انجام آزمایش‌ها نبوده و قسمت اعظم خطا را پارامترهایی شامل می‌شود (پارامترهای دمای آزمایش، خطای دستگاه آزمایش، میزان بیشینه انرژی دستگاه آزمایش، درصد حجمی حباب‌های ایجاد شده در داخل چندلایه (در طی مراحل ساخت)، دمای پلیمریزاسیون رزین اپوکسی، تعداد تکرارهای آزمایش و...) که جز پارامترهای بررسی تحقیق نیستند (نمودار شکل 20).

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحلیل بر اساس آزمایش‌های انجام شده با 3 تکرار می‌توان گفت که میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار با بیش از 39 درصد از تأثیرگذاری، بیشترین تأثیر را در جذب انرژی چندلایه گلره تقویت‌شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار دارد و پس از این پارامتر، به ترتیب فاکتورهای زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار مؤثرترین فاکتورها در جذب انرژی ضربه شاری توسط گلره‌های تقویت شده با 2 رشته سیم حافظه‌دار می‌باشند. آنالیز تاگوچی نرم‌افزار مینی‌تب نیز با رتبه‌بندی فاکتورهای مؤثر همین نتیجه را نشان داد. پس از رتبه‌بندی تأثیر فاکتورها به‌منظور اطمینان از معنی‌دار بودن تفاوت‌های پاسخ‌های مرتبط با سطوح مختلف فاکتورها، از آنالیز واریانس با روش خطی عمومی استفاده شد.

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تغییرات جذب انرژی ضربه در نمونه‌های با سطوح مختلف پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار در سطح اطمینان

¹ General linear model

² Adjust SS.

جذب انرژی چندلایه

برای بررسی میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه نیز توسط تحلیل تاگوچی که بر روی داده‌های استخراجی انجام گرفت، مشخص شد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری این سیم‌ها در چندلایه به ترتیب به میزان 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد بر روی میزان جذب انرژی چندلایه تاثیرگذار می‌باشد. برای اطمینان از معنادار بودن تغییرات میزان جذب انرژی چندلایه با تغییرات تک تک پارامترها، روی داده‌های استخراجی، آنالیز واریانس انجام شد و مشخص شد که تغییرات میزان جذب انرژی برای پارامترهای مذکور دارای سطوح اطمینان به ترتیب 92.1 درصد، 90.6 درصد و 71 درصد می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی اثر تغییرات پارامترهای زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار که پارامترهای موثر در مقاومت به ضربه گلره تقویت شده با دو رشته سیم‌حافظه‌دار می‌باشند، بر میزان جذب انرژی چندلایه و مساحت جدایش لایه‌های گلره در برابر ضربه شاری 200 ژول پرداخته است. از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های این پژوهش استفاده گردید و نمونه‌های مورد بررسی بر اساس آرایه متعام L16 ساخته شدند. در استفاده از این آرایه پارامترهای زاویه الیاف و میزان پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار در 4 سطح و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در 2 سطح تغییر می‌کردند. گلره‌های مورد بررسی از 19 لایه که حاوی 3 لایه آلومینیومی بودند، ساخته شدند.

برای بررسی میزان جذب انرژی ضربه شاری چندلایه بر روی داده‌های استخراجی تحلیل تاگوچی انجام گرفت. مشخص شد که تغییرات پارامترهای پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار در چندلایه به ترتیب به میزان 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد بر روی میزان جذب انرژی چندلایه تاثیرگذار می‌باشند. برای مشخص شدن معنادار بودن تغییرات میزان جذب انرژی چندلایه با تغییرات تک تک پارامترهای مذکور، روی داده‌های استخراجی، آنالیز واریانس انجام شد و مشخص گردید که تغییرات میزان جذب انرژی برای پارامترهای مذکور دارای سطوح اطمینان به ترتیب 92.1 درصد، 90.6 درصد و 71 درصد می‌باشد.

همچنین نتیجه تست‌های تجربی این پژوهش نشان داد که به منظور استفاده از چندلایه گلره تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار بهترین حالت، در چندلایه‌ای اتفاق می‌افتد که در آن فاصله آلیاژ حافظه‌دار از ضربه‌زننده کمینه بوده و رشته‌های حافظه‌دار دارای بیشینه مقدار پیش‌کرنش خود باشند. همچنین زاویه الیاف آن 45 درجه نسبت به ضربه‌زننده باشد. از سوی دیگر وجود الیاف صفر درجه باعث ضعیف‌تر شدن چندلایه در برابر ضربه خواهد شد.

لازم به ذکر است که با افزایش میزان پیش‌کرنش سیم حافظه‌دار میزان جذب انرژی چندلایه افزایش خواهد یافت. همچنین هرچند تغییر در محل قرارگیری سیم حافظه‌دار در چندلایه تاثیر زیادی بر روی میزان جذب انرژی چندلایه ندارد اما قراردادن سیم حافظه‌دار در نزدیکی ضربه‌زننده می‌تواند منجر به افزایش میزان جذب انرژی چندلایه شود.

6- منابع

- [1] AU, Al., "Prediction of Low-Velocity Impact Damage in Thin Circular Laminates" AIAA journal, Vol. 23, pp. 442-449, 1985.
- [2] Cantwell, W. and Morton, J., "The Impact Resistance of Composite Materials—A Review" Composites, Vol. 22, pp. 347-362, 1991.
- [3] Richardson, M. and Wisheart, M., "Review of Low-Velocity Impact Properties of Composite Materials" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 27, pp. 1123-1131, 1996.
- [4] Sadighi, M. Alderliesten, R. and Benedictus, R., "Impact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review" International Journal of Impact Engineering, Vol. 49, pp. 77-90, 2012.
- [5] Ashenai, G. F. Malekzade, F. K. and Paknejad, R., "Response of Cantilever Fiber Metal Laminates (FML) Plates Using an Analytical-Numerical Method" Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, pp. 57-67, 2013.
- [6] Jaroslaw, B. Barbara, S. and Patryk, J., "The Comparison of Low Velocity Impact Resistance of Aluminum/Carbon and Glass Fiber Metal Laminates" Polymer Composites, Vol. 37, pp. 1056-1063, 2016.
- [7] Zhu, S. and Chai, G. B., "Low-Velocity Impact Response of Fibre-Metal Laminates—Experimental and Finite Element Analysis" Composites Science and Technology, Vol. 72, pp. 1793-1802, 2012.
- [8] Abdullah, M. and Cantwell, W., "The Impact Resistance of Polypropylene-based Fibre-Metal Laminates" Composites Science and Technology, Vol. 66, pp. 1682-1693, 2006.
- [9] Boroujerdy, M. S. Dariushi, S. and Sadighi, M., "Fiber Metal Laminates Under Low Velocity Impact: An Experimental/Analytical Approach" Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 24, pp. 69-78, 2011. (In Persian)
- [10] Sadighi, M. and Dariushi, S., "An Experimental Study on Impact Behavior of Fiber/Metal Laminates" Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 21, pp. 315-327, 2008. (In Persian)
- [11] Sun, M. Wang, Z. Yang, B. and Sun, X., "Experimental Investigation of GF/epoxy Laminates with Different SMAs Positions Subjected to Low-Velocity Impact" Composite Structures, Vol. 171, pp. 170-184, 2017.
- [12] Hu, D. Zhang, L. Wang, R. and Zhang, X., "Investigation on Low Velocity Impact Resistance of SMA Composite Material" In SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, pp. 97990Z-97990Z. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [13] Shen, C. Wu, Z. Gao, Z. Ma, X. Qiu, Sh. Liu, Y. and Sun, T., "Impact Protection Behavior of NiTi Shape Memory Alloy Wires" Materials Science and Engineering: A, Vol. 700, pp. 132-139, 2017.
- [14] Zhang, R.-x. Ni, Q. Masuda, A. Yamamura, T. and Iwamoto, M., "Vibration Characteristics of Laminated Composite Plates with Embedded Shape Memory Alloys" Composite Structures, Vol. 74, pp. 389-398, 2006.
- [15] Lau, K. T. Ling, H.Y. Zhou, L. M., "Low velocity Impact on Shape Memory Alloy Stitched Composite Plates" Smart Materials and Structures, Vol. 13, pp. 364-370, 2004.
- [16] Pappadà, S. Remetta, R. Toia, L. Coda, L. Fumagali, L. and Maffezzoli, A., "Embedding of Superelastic SMA Wires into Composite Structures: Evaluation of Impact Properties" Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 18, pp. 522-530, 2009.
- [17] Parsa, A. R. and Eslami-Farsani R., "Influence of Pre Strain Shape Memory Alloy Wire on Impact Properties of Smart Fibers Metal Composite" Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, pp. 322-330, 2017. (In Persian)
- [18] Ghasemi, Faramarz Ashenai, Lotfali Mozafari Vanani, and Ali Pourkamali Anaraki. "A Study on the Charpy Impact Response of the Cracked Aluminum Plates Repaired with FML Composite Patches." Journal of Failure Analysis and Prevention 16.4 (2016): 594-600.
- [19] Khalili, S. M. R. Mittal, R. K. Gharibi Kalibar. S., "A study of the mechanical properties of steel/aluminium/GRP laminates." Materials Science and Engineering: A 412.1 (2005): 137-140.