مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1396، دوره 17، شماره 4، ص‌ص 322-330

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# تاثیر پیش کرنش سیم آلیاژ حافظه‌دار بر خواص ضربه‌ای کامپوزیت الیاف-فلز هوشمند

آرمین رمضانی پارسا[1]، رضا اسلامی فارسانی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران
2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 19991-43344، eslami@kntu.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 آذر 1395
پذیرش: 16 اسفند 1395
ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

*کلید واژگان:*
کامپوزیت الیاف-فلز هوشمند
سیم آلیاژ حافظه دار
پیش کرنش
ضربه افتان

**چکیده**

امروزه استفاده از چند لایه‌های الیاف-فلز به جهت مزایایی از قبیل نسبت استحکام بالا به وزن کم، ساخت آسان مولفه‌های ساختاری علی رغم هندسه‌های پیچیده مورد نظر صنایع مختلف همچون صنایع هوایی، به طور گسترده‌ای افزایش یافته است. چند لایه‌های الیاف-فلز، نوعی از کامپوزیت‌های ترکیبی می‌باشند که از اتصال لایه‌های فلز و الیاف توسط ماده‌ای واسطه در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و در پی این ترکیب، خصوصیات مثبت فلزات و کامپوزیت‌های الیافی به طور همزمان در ساختاری یکپارچه باعث ارائه قابلیت‌های چشمگیری شده است. افزودن آلیاژ حافظه دار در کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز، به دلیل خاصیت سوپرالاستیسیته آلیاژ، باعث می‌شود که این آلیاژ در حین ضربه با تشکیل حلقه هیسترزیس، انرژی زیادی را جذب کند و خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز افزایش یابد. در پژوهش حاضر، تاثیر پیش کرنش-های مختلف سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار از جنس نیکل-تیتانیم دما بالا به صورت تجربی در این نوع کامپوزیت‌ها در برابر ضربه کم سرعت با استفاده از دستگاه ضربه افتان، بررسی شد. در قسمت فلزی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز، از ورق آلیاژ آلومینیم 2024-T3 و در قسمت کامپوزیتی از الیاف شیشه و رزین اپوکسی استفاده شد. تعداد 6 سیم با پیش کرنش‌های 1، 2 و 3٪ به منظور قرارگیری در کامپوزیت‌های لایه-ای الیاف-فلز، بکار گرفته شدند. افزایش مقاومت در برابر ضربه این نوع کامپوزیت‌ها که شامل کاهش شوک نیروی ضربه، افزایش مدت زمان تماس، کاهش میزان جابجایی، کاهش انرژی جذب شده و کاهش میزان مساحت آسیب دیده به واسطه افزایش پیش کرنش و همچنین جذب انرژی توسط آلیاژ حافظه دار به هنگام ضربه می‌باشد، از نتایج این تحقیق بود.

# Influence of pre strain shape memory alloy wire on impact properties of smart fibers metal composite

**Armin Ramezani Parsa[1], Reza Eslami-Farsani[2*]**

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
*P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 30 November 2016
Accepted 06 March 2017
Available Online 29 April 2017

*Keywords:*
Smart fibers metal composite
Shape memory alloy wire
Pre strain
Impact falling

**ABSTRACT**

Nowadays the use of fiber-metal laminate due to advantages such as high strength to low weight ratio, easy fabrication of structural components despite complex geometries to various industries such as aviation industry, widely increased. The fiber-metal laminates are a kind of hybrid composites which connect the layers of metal and fibers which together are mediated by material and in the wake of this combination, positive characteristics of metals and fibers composites simultaneously in structural integration offer significant capabilities. Addition of shape memory alloy to fiber metal laminate composite, due to the super elasticity properties of alloy, causes the alloy to form during the impact hysteresis loop, and will attract considerable energy and the impact properties of the fiber metal laminate composites will increase. In this study, effects of different strains of nickel-titanium shaped memory alloy wire at high temperature, was investigated experimentally in this type of composites against low speed impact using the impact falling. In the metal part of fiber metal laminate composites, 2024-T3 aluminum alloy sheet and in composite part of glass fibers and epoxy resin is used. 6 wires with the pre strains 1, 2 and 3% were used in order to wrap the fibers in metal laminate composites. Increase in the impact resistance of such composites which include reducing the force shock of impact, increasing the contact time, reducing the amount of displacement, reducing absorbed energy and reducing the damaged area by increasing pre strain as well as the energy absorbed by the shape memory alloy when impact, were the results of this research.

## 1- مقدمه

مواد کامپوزیتی در دهه‌های اخیر به منظور ساخت سازه‌هایی با قابلیت‌های ویژه، بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. صنایع نظامی اولین مکان‌هایی بودند که پس از جنگ جهانی دوم، کامپوزیت‌ها را در ساخت هواپیماها و سایر سازه‌های هوافضا مورد استفاده قرار دادند. نوآوری‌هایی که در زمینه کامپوزیت‌ها رخ داده به طراحان این امکان را داده است که سازه‌هایی با وزن بسیار کمتر و مقاومت بیشتر طراحی کنند. کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات خواص بسیار خوبی نشان می‌دهند، به ویژه زمانی که نسبت مقاومت به وزن

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

**Please cite this article using:**

A. Ramezani Parsa, R. Eslami-Farsani, Influence of pre strain shape memory alloy wire on impact properties of smart fibers metal composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 322-330, 2017 (in Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

زیاد، مقاومت در برابر خستگی و ضربه یا خوردگی اهمیت پیدا می‌کند [1].

پیشرفت‌هایی که در زمینه بهبود خواص مکانیکی الیاف تقویت کننده حاصل شده، زمینه را در سال 2001 برای ساخت نسل جدیدی از کامپوزیت‌ها به نام کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز[1] مهیا کرده است. این کامپوزیت‌ها متشکل از لایه‌های نازک فلز هستند که در میان آنها الیاف با جنس مختلف قرار می‌گیرند و به وسیله رزین به هم متصل می‌شوند [2].

کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز ویژگی‌های مثبت فلزات و کامپوزیت‌های الیافی را هم زمان در خود دارند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان مقاومت خستگی عالی و مقاومت خوب در برابر بارهای استاتیک، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت به اشتعال، رطوبت و خوردگی، وزن کم، سفتی و استحکام زیاد و مقاومت به گسترش تخریب مناسب را نام برد. افزون بر این، کامپوزیت‌های مذکور مانند فلزات قابلیت ماشین کاری، شکل دهی و اتصال به هم را نیز دارند [3].

از پرکاربردترین کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز که تا به امروز ساخته شده اند، می‌توان چند لایه آلومینیم تقویت شده با الیاف شیشه/اپوکسی[2] را نام برد [4]. از مهم‌ترین موضوعات گزارش شده در مقالات می توان به بررسی تجربی و تحلیلی خواص ضربه، استاتیک و خستگی در این نوع کامپوزیت‌ها و نیز بررسی اثر عواملی مثل زاویه الیاف، لایه گذاری، جنس الیاف، ضخامت لایه فلزی و روش‌های پیش آماده سازی سطح بر خواص مکانیکی اشاره کرد [1].

نتایج کار لالیبرت و همکاران در سال 2000، روی چند لایه‌های آلومینیم تقویت شده با الیاف شیشه نشان می‌دهد، در حالی که مقاومت به ضربه لایه-های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه به طور قابل ملاحظه‌ای از آلومینیم هم کمتر است، ولی مقاومت به ضربه و مقاومت به رشد خرابی در کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف شیشه-آلومینیم از آلومینیم بهتر است [5].

امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع مختلف، به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فردشان توسعه پیدا کرده است. متأسفانه، میرایی ساختاری کامپوزیت‌ها برای جذب انرژی بارهای ضربه‌ای اندک است. آلیاژهای حافظه-دار گروه خاصی از مواد هوشمند می‌باشند که می‌توانند در اثر افزایش دما تحت یک استحاله فازی برگشت پذیر جامد به جامد به شکل اولیه خود باز گردند. این ویژگی بی‌نظیر آلیاژهای حافظه‌دار، آنها را برای کاربردهای حسگری، عملگری، جذب انرژی ضربه و میراسازی ارتعاشات مناسب ساخته است [6]. آلیاژ حافظه‌دار می‌تواند با شکل‌های هندسی متفاوت مانند الیاف ممتد، پارچه بافته شده، وصله در جهت ضخامت و همچنین الیاف کوتاه در تقویت پلیمرها بکار گرفته شود [7].

کیم و همکاران در سال 2011، اثر فیلم‌های نازک آلیاژ حافظه‌دار جاساز شده در ورق‌های کامپوزیتی را در بهبود مقاومت آسیب سازه‌های کامپوزیتی تحت ضربه کم سرعت، به صورت عددی مورد ارزیابی قرار دادند. افزایش مقاومت در برابر ضربه به دلیل افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و به دنبال آن کاهش انرژی جذب شده، از نتایج این تحقیق بود [8].

یانگ و همکاران در سال 2009، اثر سوپر الاستیک آلیاژ حافظه‌دار در بهبود مقاومت در برابر ضربه کم سرعت یک ورق کامپوزیتی تک لایه را با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از روش انتگرال‌گیری عددی نیومارک برای حل معادله المان محدود دینامیکی و از قانون تماس هرتز استفاده شد [9]. کوچی و همکاران در سال 2013، رفتار ورق کامپوزیتی تقویت شده با رشته‌های آلیاژ حافظه‌دار را در برابر ضربه سرعت پایین بررسی کردند. در این بررسی مشخص شد که با افزایش کسر حجمی سیم‌های حافظه دار به لایه‌های ورق کامپوزیتی و همچنین افزایش دمای کامپوزیت هوشمند، حداکثر خیز ایجاد شده در اثر ضربه کاهش یافته و از شوک نیروی ضربه‌ای نیز کاسته می‌شود و در نتیجه، مقاومت ضربه‌ای سازه افزایش خواهد یافت [10].

ژانگ و همکاران [11] در سال 2006، ورق‌های کامپوزیتی را در دو حالت دارای الیاف آلیاژ حافظه‌دار هم جهت الیاف کامپوزیتی و الیاف بافته شده آلیاژ حافظه‌دار مورد تحلیل ارتعاشی قرار دادند. مارک پیترزاکوسکی [12] در سال 2000، تغییرات خواص دینامیکی صفحات کامپوزیتی مستطیلی و ورق ساندویچی حاوی لایه‌های تقویت شده توسط الیاف آلیاژ حافظه‌دار را مورد تحلیل قرار داد. خلیلی و همکاران [13] در سال 2007، پاسخ ورق کامپوزیتی هیبرید آلیاژ حافظه‌دار را در برابر ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار دادند. چندین محقق نظیر تسوی و همکاران [14] در سال 2003، پاپادا و همکاران [15] در سال 2008، پین و راجرز [16] در سال 1994، جاسازی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در درون کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف برای دستیابی به یک کامپوزیت با آلیاژ حافظه‌دار با ظرفیت بیشتر در کاهش اثرات ضربه را مورد مطالعه قرار دادند. روه و کیم [17] در سال 2002، اثر پیش کرنش را بررسی و به بهینه‌سازی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار جاسازی شده در سازه کامپوزیتی پرداختند. آنها برای مدل سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار، از روابط تک بعدی استفاده کردند. مئو و همکاران [18] در سال 2005، اثر سوپر الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار را با یک مدل عددی ساده در نظر گرفتند.

با توجه به تحقیقات قبلی انجام شده که به آنها اشاره شد، موضوع بررسی رفتار ضربه سرعت پایین چند لایه‌های الیاف-فلز و همچنین تاثیر حضور آلیاژ حافظه‌دار در کامپوزیت‌ها به تفکیک بررسی شده است. اما حضور سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در چند لایه‌های الیاف-فلز و بررسی رفتار ضربه آنها تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. بر این اساس، در تحقیق حاضر هدف آن است که خواص ضربه‌ای چند لایه‌های الیاف-فلز در حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار تحت پیش کرنش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گیرد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- مواد

در این پژوهش، از پارچه تک جهته الیاف شیشه سری E و رزین اپوکسی اپون[3] 828 با هاردنر 10٪ برای قسمت کامپوزیتی چند لایه‌های الیاف-فلز استفاده شده است. ورق آلومینیم 2024-T3 با ضخامت 0.5 میلی متر نیز برای قسمت فلزی چند لایه‌های الیاف-فلز انتخاب شد. به منظور هوشمند کردن چند لایه‌های الیاف-فلز، سیم آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم دما بالا با قطر 0.4 میلی متر مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین دماهای استحاله مارتنزیت و آستنیت سیم آلیاژ حافظه‌دار، آزمون گرماسنجی پویشی تفاضلی[4] (استخراج دماهای شروع و پایان آستنیت و مارتنزیت به ترتیب از طریق ایجاد سیکل گرمایش و سرمایش بر روی سیم آلیاژ حافظه‌دار) انجام شد. دماهای استحاله فازی در سیم آلیاژ حافظه‌دار در جدول 1 آمده است.

### 2-2- دستگاه آزمون ضربه افتان

به منظور تعیین انرژی شکست فلزات و مواد کامپوزیتی از دستگاه آزمون

[1] Fiber Metal Laminate
[2] Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy
[3] Epon
[4] Differential Scanning Calorimetry



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

**جدول 1** دماهای استحاله فازی در سیم آلیاژ حافظه‌دار

**Table1** Phase transformation temperatures of shape memory alloy wire

| دمای شروع استحاله مارتنزیتی $M_s$ (°C) | دمای پایان استحاله مارتنزیتی $M_f$ (°C ) | دمای پایان استحاله آستنیتی $A_f$ (°C ) | دمای شروع استحاله آستنیتی $A_s$ (°C ) |
|---|---|---|---|
| 5.6 | -0.5 | 75.9 | 66.4 |

ضربه ثقلی یا وزنه افتان[1]، استفاده شد. این دستگاه پدیده ضربه را نه از طریق انرژی قبل و بعد از ضربه، بلکه با دادن اطلاعات در طی زمان برخورد[2] مشخص می‌کند. در این دستگاه بار ضربه، از طریق سقوط یک وزنه که وزن آن قابل تغییر است، اعمال می‌شود. دستگاه دارای موانعی است که قابلیت تنظیم ارتفاع سقوط را به کاربر می‌دهد، در نتیجه به راحتی می‌توان انرژی اولیه ضربه را تعیین کرده و به نمونه اعمال کرد. به منظور انجام تست، از دستگاه ضربه سرعت پایین (ضربه افتان) دانشگاه امیرکبیر استفاده شده است که مطابق با استاندارد تست ضربه می‌باشد. همچنین برای انتقال داده‌های ثبت شده توسط سنسور نیروسنج نصب شده بر روی ضربه زننده (شامل یک کلاهک به جرم 2.712 kg و از جنس فولاد سخت کاری شده) به کامپیوتر، از یک دستگاه جمع‌آوری اطلاعات استفاده شده است که نمودار نیرو بر حسب زمان را به کاربر تحویل می‌دهد. برای انجام آزمون، نمونه‌ها بین 2 صفحه قرار گرفته است، سپس با بسته شدن 4 گیره که به شاسی دستگاه متصل هستند، نمونه‌ها بین 2 صفحه ثابت شده و برای آزمایش آماده شدند و تحت ضربه قرار گرفتند. ضربه زننده نیز همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است، توسط 2 قفل به یک صفحه نگه داشته شده که برای انجام آزمون، قفل ها باز شده و ضربه زننده رها شد.

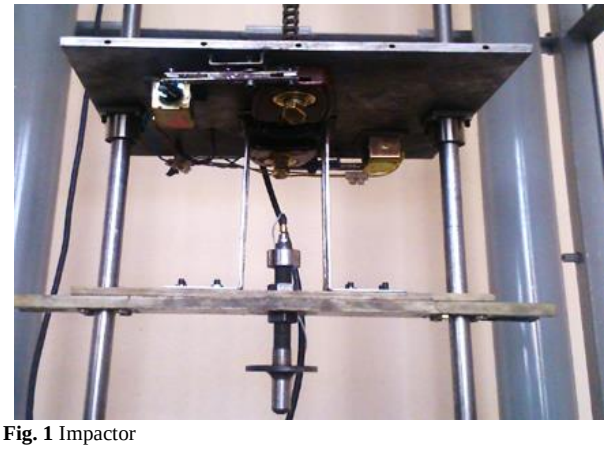


**Fig. 1** Impactor

**شکل 1** ضربه زننده

[1] Drop Weight Impact Tester
[2] Duration Contact



**Fig. 2** Mould Manufacturing of fiber metal laminate

**شکل 2** قالب ساخت چند لایه‌های الیاف – فلز

قالب قرار می‌گیرد)، در یکدیگر محکم شده تا مانع از لغزش چند لایه‌ها در داخل دستگاه پرس شوند. با توجه به این که سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار دارای پیش کرنش می‌باشند، بدین منظور ابتدا سیم‌ها توسط یک گیره تحت کشش قرار گرفته و سپس به منظور جلوگیری از حرکت سیم‌ها، از طریق هادی‌هایی که بر روی قالب تعبیه شده اند، عبور کرده و در سمت دیگر قالب توسط گیره دیگری محکم بسته می‌شوند.

برای ساخت چند لایه‌های الیاف–فلز، ابتدا به منظور افزایش قدرت اتصال لایه فلزی با قسمت کامپوزیتی چند لایه‌های الیاف-فلز، سطوح ورق-های آلومینیم با چربی زدایی اولیه، ایجاد خراش به وسیله سمباده نرم و سپس پاک کردن با حلالی قوی مثل استون آماده شدند. نمونه‌ها به روش لایه گذاری دستی ساخته شده، سپس سیم‌ها در دمای محیط آزمایشگاه (25°c) ابتدا به فاز مارتنزیت برده شده (توسط اسپری نیتروژن سرد شدند) و در داخل چند لایه قرار گرفتند و پس از اعمال پیش کرنش، به فاز آستینت برده شدند (سیم‌ها توسط المنت حرارت داده شدند). در این حالت با گرم کردن سیم‌ها و تمایل آنها به کاهش طول (ماهیت فاز آستنیت) و از طرفی ممانعت چند لایه، تنش بازیابی در سیم به وجود می‌آید که منجر به ایجاد تنش و افزایش سفتی چند لایه خواهد شد. این افزایش سفتی عاملی برای افزایش مقاومت در برابر ضربه می‌باشد. در نهایت قالب شامل چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار در داخل دستگاه پرس قرار داده شد و تحت فرآیند پخت در دمای محیط قرار گرفت.

## 2-3- قالب ساخت چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار

به منظور ساخت نمونه‌ها با توجه به وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار و همچنین برای اعمال پیش کرنش به آنها، اقدام به ساخت قالب متناسب با چند لایه-های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است، گردید.

قالب شکل 2 شامل دو نیمه قالب می‌باشد که چند لایه‌های الیاف-فلز بین این 2 قالب قرار گرفته و سپس توسط خارهایی (که در شیارهای این 2

## 2-4- مشخصات نمونه‌های آزمایش

ابعاد کلیه نمونه‌ها طبق استاندارد آزمون ضربه، $150\times100\ mm^2$ می‌باشد. مشخصات نمونه ها در جدول 2 آمده است. تمامی نمونه‌های جدول 2، شامل 2 لایه فلز و 1 لایه کامپوزیت می‌باشند.

نحوه قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در چند لایه‌های الیاف- فلز جدول 2 در شکل 3 نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها، سیم‌ها در مرکز نمونه و با فاصله 1 سانتی متر از یکدیگر قرار داده شدند. قرار گیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در مرکز نمونه به این دلیل است که چون آلیاژ حافظه‌دار نسبت به چند لایه دارای سفتی بیشتری می‌باشد، این عامل باعث افزایش سفتی ظاهری ناحیه تماس در هنگام برخورد ضربه زننده و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر ضربه می‌شود.

**جدول 2** نام گذاری نمونه‌ها

**Table 2** coding samples

| |
|---|
| نمونه بدون سیم (شاهد) |
| نمونه 6 سیم با 1٪ پیش کرنش |
| نمونه 6 سیم با 2٪ پیش کرنش |
| نمونه 6 سیم با 3٪ پیش کرنش |



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

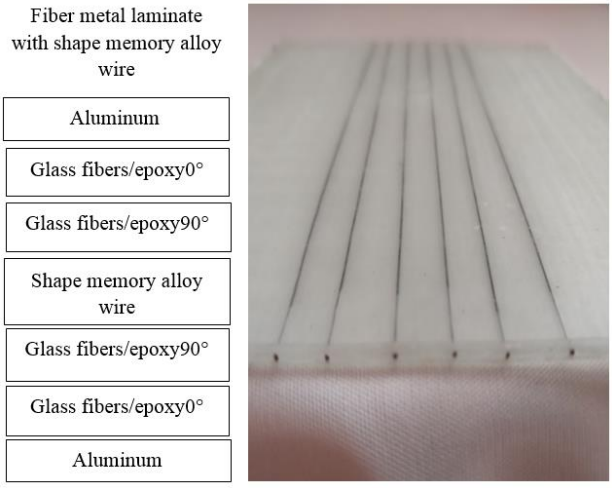



**Fig. 3** Wrapping shape memory alloy wire in fiber metal laminate
**شکل 3** قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در چند لایه‌های الیاف – فلز

سیم‌های حافظه‌دار باید در جهت الیاف کامپوزیت قرار داشته باشند زیرا عدم تطابق سیم‌ها با الیاف موجود در آن لایه، منجر به ایجاد فضای خالی از الیاف و تنها شامل رزین ترد می‌شود که خود این پدیده موجب تردی و کاهش مقاومت در برابر ضربه است.

### 2-5- شرایط آزمون

کلیه نمونه‌ها (جدول 2) توسط یک ضربه زننده نیم کروی و متعلقات متصل به آن (سنسور شتاب سنج، یاتاقان‌ها و ...) به جرم 2.712 kg و انرژی ضربه J 30 تحت ضربه قرار گرفتند. ارتفاع و سرعت ضربه نیز با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه شدند [19].

$$E = mgh \rightarrow 30 = 2/712 \times 9/81 \times h \rightarrow h = 1/12 \text{ m} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{2gh} \rightarrow V = \sqrt{2 \times 9/81 \times 1/12} \rightarrow V = 4/68 \text{ m/s} \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، $E$، انرژی ضربه، $m$، جرم ضربه زننده، $g$، شتاب گرانش، $h$، ارتفاع سقوط و $V$، سرعت ضربه می‌باشند. با برخورد ضربه زن به نمونه‌ها، داده‌های شتاب بر حسب زمان توسط سنسور نصب شده بر روی ضربه زننده ثبت و از طریق کنترل کننده به رایانه متصل به دستگاه منتقل می‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌ها، سیگنال‌های مزاحمی در خروجی مشاهده شد که با استفاده از روش متوسط‌گیری، یک منحنی برای کم کردن اثر سیگنال‌های مزاحم از خروجی‌های پاسخ گذرانده شد. افزون بر این، برای حذف سیگنال بسامد زیاد از فیلترهای مناسب پایین گذر استفاده شد. پس از انجام این کار داده‌های شتاب بر حسب زمان با استفاده از رابطه (3) به داده‌های نیروی تماسی بر حسب زمان تبدیل شدند [19].

$$F(t) = ma(t) \quad (3)$$

در رابطه (3)، $F(t)$، نیروی تماسی، $m$، جرم ضربه زننده و $a(t)$ شتاب ضربه زننده می‌باشند. پس از ثبت داده‌های نیروی تماسی بر حسب زمان، با استفاده از رابطه (4)، داده‌های سرعت بر حسب زمان به دست می‌آید [19].

$$V(t) = V_0 - \int a(t)dt \quad (4)$$

در رابطه (4)، $V(t)$، سرعت ضربه زننده، $V_0$، سرعت ضربه قبل از برخورد و $a(t)$ داده‌های شتاب بر حسب زمان می‌باشند. پس از ثبت داده‌های سرعت بر حسب زمان، اگر از نفوذ ضربه زننده درون چند لایه الیاف-فلز صرف نظر شود، می‌توان جابجایی ضربه زننده را معادل جابجایی چند لایه الیاف–فلز قرار داد که از رابطه (5) محاسبه می‌شود [19].

$$\delta(t) = \int V(t)dt \quad (5)$$

در رابطه (5)، $\delta(t)$، جابجایی ضربه زننده و $V(t)$، سرعت ضربه زننده می‌باشند. با ثبت داده‌های جابجایی بر حسب زمان، با استفاده از رابطه (6) می‌توان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها (که مساحت زیر نمودار نیرو تماسی بر حسب جابجایی می‌باشد) را محاسبه نمود [19].

$$E = \int F\delta(t)dt \quad (6)$$

در رابطه (6)، $E$، انرژی جذب شده، $F$، نیروی تماسی و $\delta(t)$ جابجایی ضربه زننده می‌باشند. ذکر این نکته لازم است که برای استخراج داده‌های فوق، از کد نویسی در نرم افزار متلب[1] استفاده شد. همچنین پس از استخراج داده‌های فوق به منظور بررسی آسیب نمونه‌ها، ابتدا عکس برداری حرارتی[2] با استفاده از دوربین ترموگرافی، که نوعی آزمون غیرمخرب است، از نمونه‌ها انجام شد و سپس برای محاسبه مساحت ناحیه آسیب دیده عملیات پردازش تصویر در نرم افزار متلب انجام شد. به عبارتی هدف از انجام عکس برداری حرارتی فقط محاسبه مساحت آسیب دیده قسمت فلزی چند لایه‌های الیاف-فلز پس از ضربه می‌باشد.

## 3- نتایج و بحث

به طور کلی دو نوع آسیب در نمونه‌ها ممکن است اتفاق بیفتد:

الف- آسیب قسمت کامپوزیتی نمونه‌ها که به چهار حالت می‌تواند قابل مشاهده باشد. این چهار حالت شامل، مود 1) تخریب ماتریس، مود 2) تخریب تورق، مود 3) گسیختگی الیاف و مود 4) نفوذ، می‌باشند. بدین منظور ابتدا قسمت فلزی نمونه‌ها جدا شده و سپس به بررسی آسیب قسمت کامپوزیتی پرداخته شده است.

ب- آسیب قسمت فلزی نمونه‌ها که می‌تواند به دو صورت قابل مشاهده باشد. این دو حالت شامل، مود 5) تغییر شکل پلاستیک صفحه فلزی که به صورت فرورفتگی یا برآمدگی خود را نشان می‌دهد و مود 6) ایجاد گسیختگی نهایی که به شکل پارگی صفحه فلزی نمایان می‌شود، می‌باشند.

شکل‌های 4 و 5 به ترتیب منحنی‌های نیرو تماسی– زمان و جابجایی-زمان را برای نمونه‌های فاقد سیم، پیش کرنش‌های 1، 2 و 3٪ سیم آلیاژ حافظه‌دار، نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل 4 نشان داده شده است، تاثیر وجود سیم نسبت به نمونه فاقد سیم، و افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، منجر به بروز پدیده‌های قابل توجهی در نیروی تماسی به وجود آمده ناشی از برخورد جسم ضربه زننده با چند لایه الیاف- فلز شده است. مقدار حداکثر نیروی تماسی، از مقدار 6800 N (فاقد سیم) تا 8400 N (پیش کرنش 3٪)، افزایش یافته است. از آنجا که این افزایش با انتقال نقطه به اوج رسیدن منحنی نیرو به سمت راست نمودار و نیز افزایش مدت زمان تماس از 203 µS تا 218 µS (7 درصد)، همراه است، لذا از شوک ضربه کاسته شده است. در نتیجه، مقاومت در برابر ضربه افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه دار، نرخ انتقال انرژی از جسم ضربه زننده به داخل چند لایه‌های الیاف- فلز با آهنگ کندتری صورت می‌پذیرد.

[1] Matlab
[2] Thermovision



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

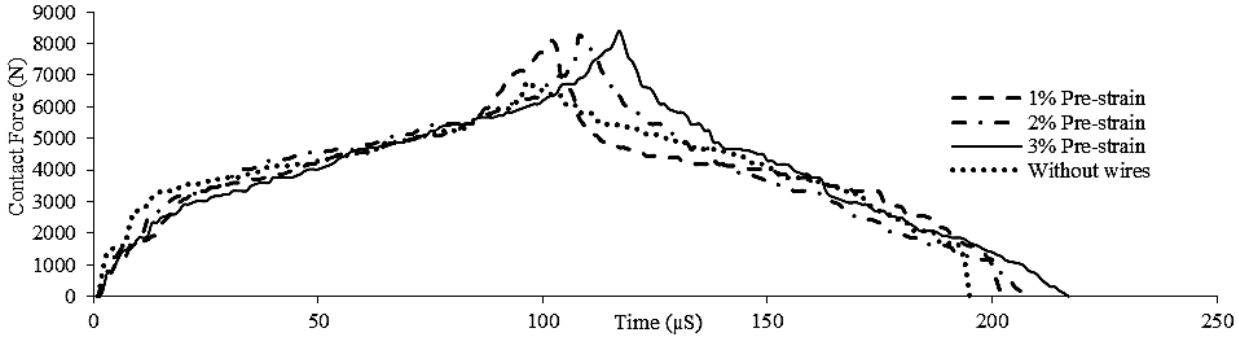



**Fig.4** Contact forcve-time curves of FML samples with and without shape memory alloy wire

**شکل 4** منحنی‌های نیروی تماسی- زمان نمونه‌های چند لایه الیاف- فلز با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار

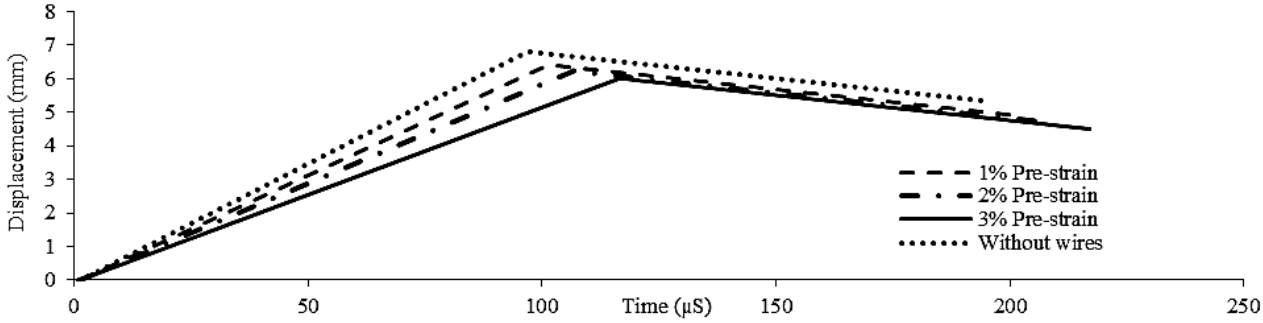



**Fig.5** Displacement-time curves of FML samples with and without shape memory alloy wire

**شکل 5** منحنی‌های جابجایی- زمان نمونه‌های چند لایه الیاف- فلز با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار

فراز و فرودهای به وجود آمده در شکل 4 را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با برخورد ضربه زننده به قطعه و شروع نفوذ در آن، نیرویی به ضربه زننده وارد می‌شود که توسط شتاب سنج متصل به آن اندازه گیری می‌شود. با شروع فرآیند برخورد و نفوذ ضربه زننده درون قطعه، نیروی برخورد نیز افزایش می‌یابد. با ادامه نفوذ ضربه زننده درون قطعه، آسیب‌هایی شامل تورق، ترک ماتریس و پارگی الیاف در کامپوزیت به وجود می‌آید که باعث کاهش مقاومت قطعه می‌گردد. این کاهش مقاومت درون قطعه به افت ناگهانی نمودار نیرو منجر می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت که با افزایش نفوذ، میزان نیرو افزایش می‌یابد تا آنجا که آسیبی درون کامپوزیت رخ دهد. به محض ایجاد آسیب، مقاومت قطعه کاهش می‌یابد و باعث کاهش ناگهانی نمودار نیرو نیز می‌گردد. بنابراین فراز و فرودهای مشاهده شده در شکل‌های نیرو تماسی– زمان را می‌توان به لحظات ایجاد آسیب در چند لایه‌های الیاف- فلز مرتبط دانست.

همان طور که در شکل 5 نشان داده شده است، با افزایش پیش کرنش سیم-های آلیاژ حافظه‌دار، نمونه پیش کرنش 3٪ سیم آلیاژ حافظه‌دار دارای کم-ترین میزان جابجایی می‌باشد. به منظور درک بهتر، جابجایی مرکزی نمونه پس از ضربه در شکل 6 نشان داده شده است.

شکل‌های 7 و 8 به ترتیب منحنی‌های نیروی تماسی–جابجایی و انرژی-زمان را برای نمونه‌های فاقد سیم، پیش کرنش‌های 1، 2 و 3٪ سیم آلیاژ حافظه‌دار، نشان می‌دهد.

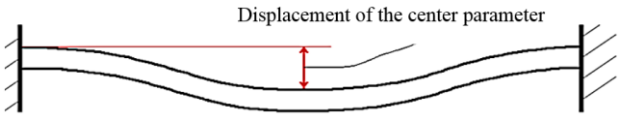



**Fig. 6** Displacement of the center of post-impact

**شکل 6** جابجایی مرکزی نمونه پس از ضربه

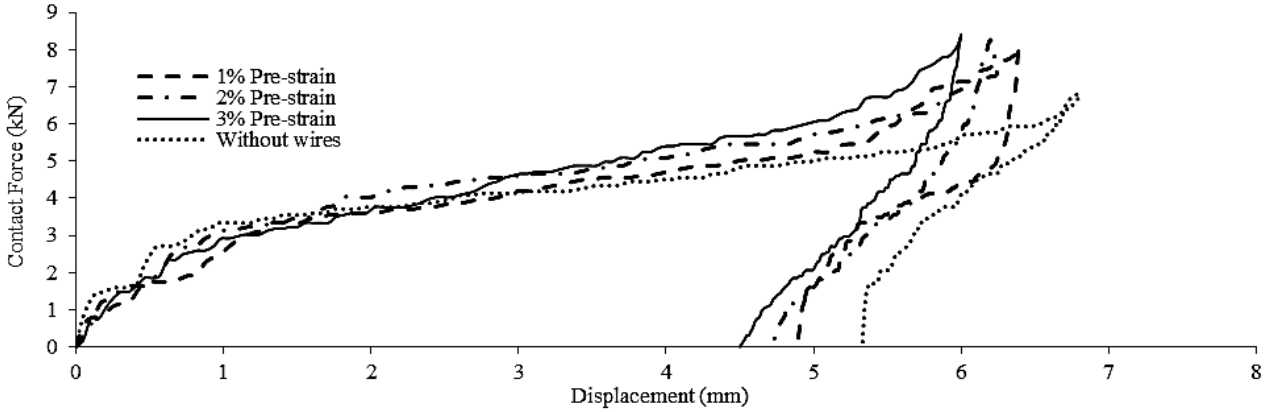



**Fig.7** Contact force-displacement curves of FML samples with and without shape memory alloy wire

**شکل 7** منحنی‌های نیروی تماسی- جابجایی نمونه‌های چند لایه الیاف- فلز با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

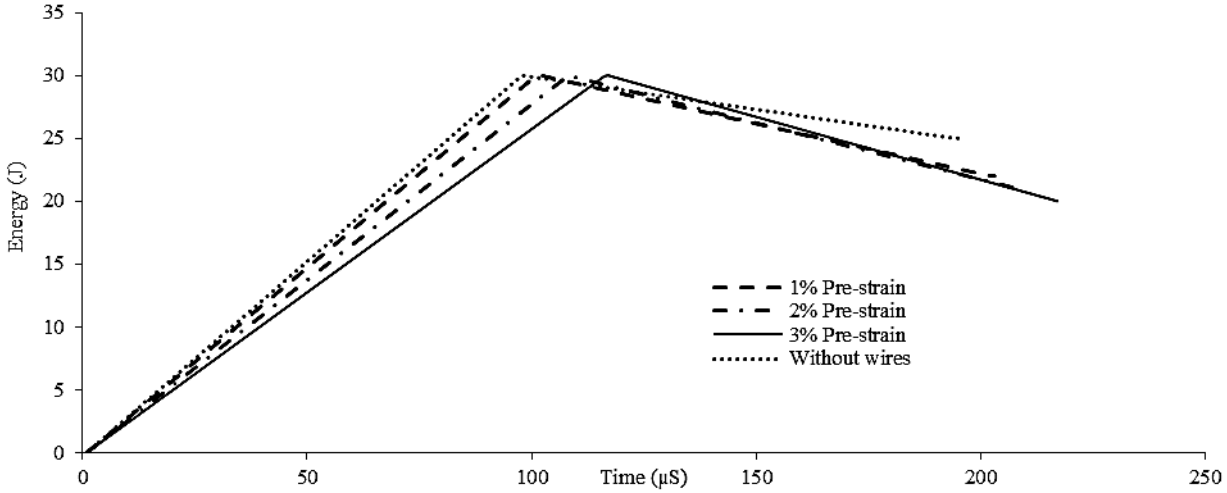



**Fig. 8** Energy-time curves of FML samples with and without shape memory alloy wire

**شکل 8** منحنی‌های انرژی- زمان نمونه‌های چند لایه الیاف- فلز با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار

در شکل 7، منحنی‌ها در ابتدا دارای یک قسمت نسبتا خطی می‌باشند که با افزایش میزان نفوذ، اندازه نیرو نیز افزایش می‌یابد. همچنین همان طور که در شکل 7 نشان داده شده است، با افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه-دار، نمونه پیش کرنش 3٪ نسبت به نمونه فاقد سیم دارای بیشینه نیروی تماسی بیشتر و جابجایی کم‌تری می‌باشد، در نتیجه قطعه رفتار مقاوم‌تری را از خود نشان می‌دهد. در قسمت بعدی شکل 7، با افزایش نفوذ، اندازه نیرو تقریباً ثابت می‌ماند. پس از این قسمت مرحله باربرداری آغاز می‌شود. در این مرحله با ثابت ماندن تقریبی میزان نفوذ، اندازه نیرو به تدریج کاهش می‌یابد؛ یعنی ضربه زننده دیگر درون قطعه نفوذ نمی‌کند و در حال جدا شدن از آن می‌باشد. سپس در مرحله آخر، ضربه زننده شروع به جدا شدن از قطعه می-کند. با جدا شدن ضربه زننده از قطعه، نیرو کاهش می‌یابد و در نتیجه اندازه نیرو به صفر می‌رسد. در نتیجه با افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه-دار، ماکزیمم نیروی تماسی افزایش یافته، ولی میزان جابجایی کاهش می‌یابد که به معنی افزایش مقاومت در برابر ضربه می‌باشد.

همان طور که در شکل 8 نشان داده شده است، در نمونه پیش کرنش 3٪ به دلیل افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و تشکیل حلقه هیسترزیس و در نتیجه جذب انرژی در حین ضربه، انرژی جذب شده توسط نمونه کاهش می‌یابد. همچنین انرژی کمتری را نسبت به نمونه فاقد سیم جذب کرده که نشان دهنده تاثیر وجود سیم و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر ضربه می‌باشد.

در حقیقت سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با فاز پایدار در دمای بالا و تنش پایین، یعنی آستنیت و فاز پایدار در دمای پایین و تنش بالا، یعنی مارتنزیت، با اعمال دما و یا تنش، قابل تبدیل به یکدیگر می‌باشند. اگر آلیاژ حافظه‌دار در فاز آستنیت باشد، اعمال تنش به این ماده موجب تبدیل آستنیت به مارتنزیت غیر دو قلویی می‌شود. با انجام باربرداری فاز مارتنزیت ناپایدار شده و تبدیل معکوس اتفاق می‌افتد که در نتیجه این تبدیل، ماده به حالت اولیه خود باز می‌گردد و هیچ کرنش پسماندی برجای نمی‌ماند، این رفتار به دلیل خاصیت فوق کشسانی سیم آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد [20].

ذکر این نکته لازم می‌باشد که اگر پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار از یک حدی بیشتر افزایش پیدا کند، اثر مثبت سیم آلیاژ حافظه‌دار که ذخیره شدن تنش پسماند می‌باشد، کاهش می‌یابد و اثر منفی سیم آلیاژ حافظه دار یعنی ایجاد آسیب بین لایه‌ای افزایش می‌یابد. در این حالت، انرژی ضربه کم‌تری توسط سیم آلیاژ حافظه‌دار جذب شده و در نتیجه انرژی جذب شده و همچنین مساحت ناحیه تخریب چند لایه الیاف–فلز، افزایش و مقاومت در برابر ضربه کاهش می‌یابد [21].

مناطق مختلف شکل 8 شامل مناطق انرژی ضربه، انرژی جذب شده و انرژی برجهندگی در شکل 9 نشان داده شده اند.

در شکل 10 تصاویر حقیقی و ترموگرافی نمونه‌های فاقد سیم، پیش کرنش‌های 1، 2 و 3٪ سیم آلیاژ حافظه‌دار، به همراه مساحت آسیب دیده، نشان داده شده است. همان طور که در شکل 10 آمده است، با افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نمونه پیش کرنش 3٪ سیم آلیاژ حافظه‌دار، کمترین میزان آسیب را دارا می‌باشد. همچنین نمونه فاقد سیم در قسمت کامپوزیتی دارای مود آسیب تخریب زمینه و گسیختگی الیاف و در قسمت فلزی دارای مود آسیب برآمدگی، ولی نمونه‌های دارای سیم آلیاژ حافظه‌دار به لحاظ نوع مودهای آسیب مشابه هستند (در قسمت کامپوزیتی دارای مود آسیب تخریب زمینه و در قسمت فلزی دارای مود آسیب برآمدگی)، و تنها اختلاف در مساحت آسیب دیده می‌باشد.

در شکل‌های 11 تا 13 به ترتیب پارامترهای آزمون ضربه (بیشینه نیروی تماسی و میزان جابجایی، انرژی جذب شده و مساحت آسیب دیده) نمونه‌های فاقد سیم، پیش کرنش‌های 1، 2 و 3٪ سیم آلیاژ حافظه‌دار استخراج شده است.

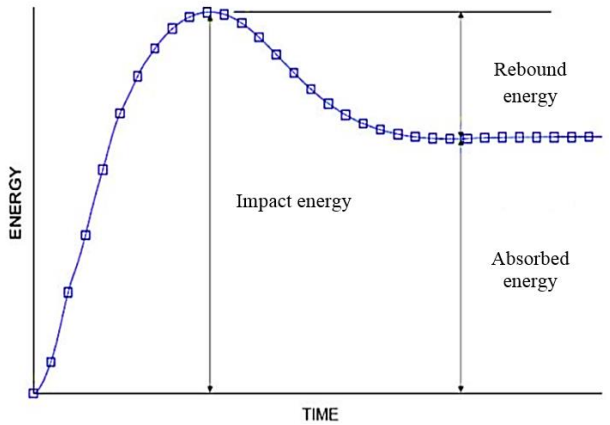



**Fig. 9** Different areas of the energy - time curve

**شکل 9** مناطق مختلف منحنی انرژی–زمان

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

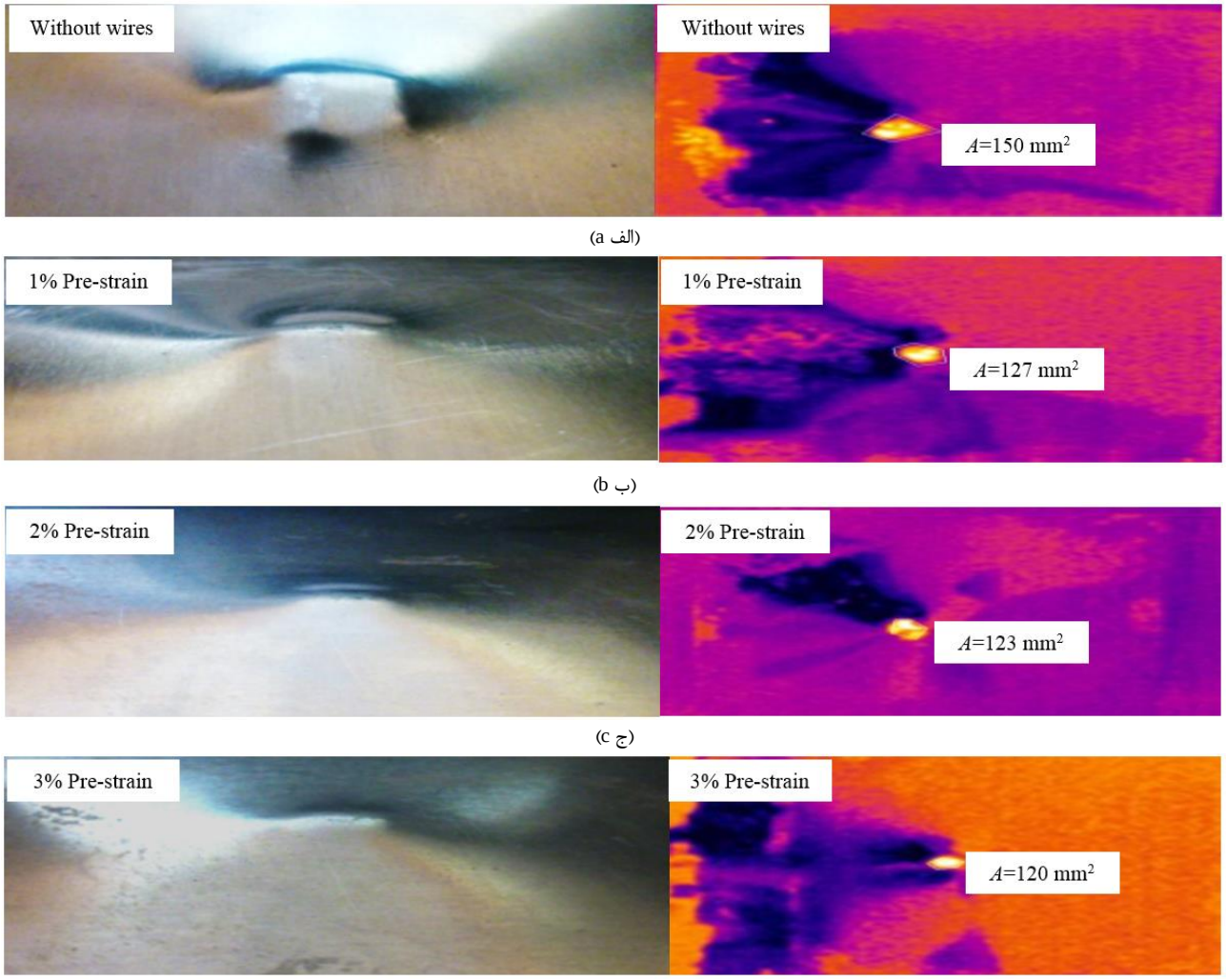



**Fig. 10** The real image and thermography of post-impact with damage area: a) Without wires sample, b) 1% Pre-strain sample, c) 2% Pre-strain sample, d) 3% Pre-strain sample

**شکل 10** تصاویر حقیقی و ترموگرافی پس از ضربه به همراه مساحت آسیب دیده: الف) نمونه فاقد سیم، ب) نمونه پیش کرنش 1٪، ج) نمونه پیش کرنش 2٪، د) نمونه پیش کرنش 3٪

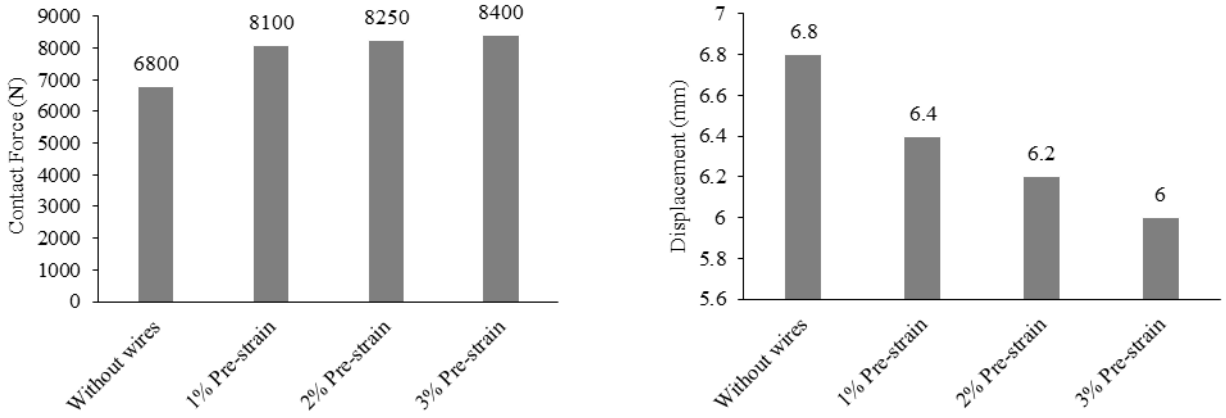



**Fig. 11** Maximum contact force and displacement of FML samples with and without shape memory alloy wire

**شکل 11** بیشینه نیروی تماسی و جابجایی نمونه‌های چند لایه الیاف-فلز با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار

همان طور که در شکل 11 آمده است، به دلیل وجود سیم و همچنین با افزایش پیش‌کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، بیشینه نیروی تماسی از N 6800 تا N 8400 (23.5 درصد) افزایش یافته، میزان جابجایی از mm 6.8به mm 6 (13 درصد) کاهش یافته، انرژی جذب شده در شکل 12 از J 25 به J 20 (25 درصد) کاهش یافته و همچنین مساحت آسیب دیده نیز در شکل 13 از $150mm^2$ به $120\ mm^2$(25 درصد) کاهش یافته است که در میان نمونه ها



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

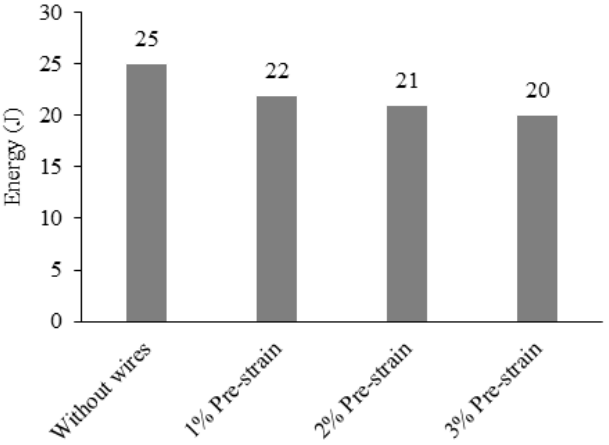



**Fig. 12** Absorbed energy of FML samples with and without shape memory alloy wire

**شکل 12** انرژی جذب شده نمونه‌های چند لایه الیاف-فلز با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار

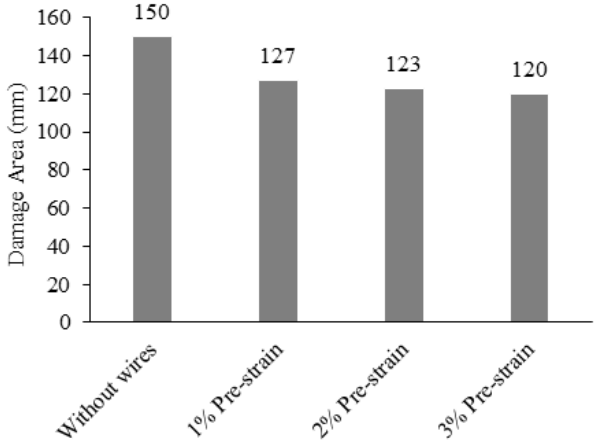



**Fig. 13** Damage area of FML samples with and without shape memory alloy wire

**شکل 13** مساحت آسیب دیده نمونه‌های چند لایه الیاف-فلز با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار

نمونه پیش کرنش 3٪ سیم آلیاژ حافظه‌دار به دلیل کمترین میزان آسیب، بالاترین مقاومت را در برابر ضربه ($120\ mm^2$) داشته است.

## 4- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر وجود و همچنین افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در بارگذاری سرعت پایین با استفاده از دستگاه وزنه افتان روی چند لایه‌های الیاف-فلز با جایگذاری 6 سیم آلیاژ حافظه‌دار و پیش کرنش-های 1، 2 و 3%، بررسی شد. نتایج نهایی به شرح زیر هستند:

1. برخلاف چند لایه الیاف–فلز فاقد سیم، با تعبیه سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در چند لایه‌های الیاف–فلز، با توجه به این که دقیقاً سیم‌های این آلیاژ در محل ضربه تعبیه شده‌اند، این عامل باعث افزایش سفتی ظاهری ناحیه تماس می‌شود. از طرفی این آلیاژ در حین ضربه با تشکیل حلقه هیسترزیس انرژی زیادی را جذب می‌کند. این امر باعث کاهش انرژی جذب شده توسط چند لایه الیاف–فلز می‌گردد که نتیجه آن افزایش مقاومت به ضربه چند لایه الیاف– فلز و کاهش آسیب پدید آمده می‌باشد.

2. افزایش پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش نیروی تماسی بیشینه، افزایش مدت زمان تماس، کاهش میزان جابجایی، کاهش انرژی جذب شده توسط نمونه و همچنین کاهش مساحت آسیب دیده می‌شود. در این میان، چند لایه الیاف-فلز با 6 سیم حافظه‌دار با پیش کرنش 3 درصد، دارای بالاترین مقاومت در برابر ضربه می‌باشد. همچنین باید توجه داشت که افزایش بیش از اندازه پیش کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث می‌شود تا اثر منفی آن یعنی ایجاد آسیب بین لایه‌ای بر اثر مثبت آن یعنی ذخیره شدن کرنش پسماند غلبه کند و در نتیجه انرژی بیشتری توسط چند لایه الیاف– فلز جذب شود و مقاومت در برابر ضربه کاهش یابد.

## 5- مراجع

[1] E. C. Botelho, R. S. Almeida, L. C. Pardini, M. C. Rezende, Elastic properties of hygrothermally conditioned glare laminate, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 45, No. 1, pp.163-172, 2007.

[2] M. Kawai, A. Hachinohe, K. Takumida, Y. Kawase, Off-axis fatigue behaviour and its damage mechanics modelling for unidirectional fibre-metal hybrid composite: GLARE 2, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 32, No. 1, pp.13-19, 2001.

[3] R. Van Rooijen, J. Sinke, T.J. De Vries, S. Van Der Zwaag, Property optimization in fibre metal laminates, *Applied Composite Materials*, Vol. 11, No. 2, pp. 63-76, 2004.

[4] J.G. Carrillo, W.J. Cantwell, Scaling effects in the tensile behavior of fiber-metal laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 7-8, pp. 1684-1693, 2007.

[5] J. F. Laliberte, C. Poon, P. V. Straznicky, A. Fahr, Applications of fiber-metal laminates, *Polymer Composites*, Vol. 21, No. 4, pp. 558-567, 2000.

[6] D. C. Lagoudas, *Shape memory alloys: Modeling and engineering applications*, pp. 232-250, New York: Springer, 2008.

[7] A. Ni Masuda, Q. Q. Sone, A. Zhang, T. Yamamura, Preliminary characterization and modeling of SMA-based textile composites, *Smart Structures and Materials* , Vol. 5383, No. 5, pp. 94-102, 2004.

[8] E.-H. Kim, Effects of shape memory alloys on low velocity impact characteristics of composite plate, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 11, pp. 2903-2909, 2011.

[9] Y. Wu, Y. Wang, W. Zhong, Study on the response to low-velocity impact of a composite plate improved by shape memory alloy, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 20, No. 4, pp. 357-362, 2007.

[10] H. Rashidi Kochi, M. Bodaghi, M. Shakeri, The behavior of the composite sheets reinforced with shape memory alloy fibers to low velocity impact test, *Mechanical Engineering Conference, International Institute for Education and Research Khwarizmi*, Shiraz, Iran, March 8, 2014. (in Persian فارسی)

[11] R. Zhang, Q. Ni, A. Masuda, T. Yamamura, M. Iwamoto, Vibration characteristics of laminated composite plates with embedded shape memory alloys, *Composite Structures*, Vol. 74, No. 4, pp. 389-398, 2006.

[12] M. Pietrzakowski, Natural frequency modification of thermally activated composite plates, *Mécanique & Industries*, Vol. 1, No. 3, pp. 313-320, 2000.

[13] S.M.R. Khalili, A. Shokuhfar, F. Ashenai Ghasemi, Effect of smart stiffening procedure on low-velocity impact response of smart structures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, No. 1-3, pp. 142-152, 2007.

[14] K. Tsoi, R. Stalmans, J. Schrooten, M. Wevers Y. Mai, Impact damage behaviour of shape memory alloy composites, *Materials Science and Engineering*, Vol. 342, No. 1-2, pp. 207-215, 2003.

[15] S. Pappada, R. Rametta, L. Toia, A. Coda, L. Fumagalli, A. Maffezzoli, Embedding of superelastic SMA wires into composite structures evaluation of impact properties, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18, No. 5, pp. 522-530, 2008.

[16] J. Paine, C. Rogers, The response of SMA hybrid composite materials to low velocity impact, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, No. 4, pp. 530-535, 1994.

[17] J. H. Roh, J. H. Kim, Hybrid smart composite plate under low velocity impact, *Composite Structures*, Vol. 56, No. 2, pp. 175-182, 2002.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]

[18] M. Meo, E. Antonucci, P. Duclaux, M. Giordano, Finite element simulation of low velocity impact on shape memory alloy composite plates, *Composite Structures*, Vol. 71, No. 3-4, pp. 337-342, 2005.

[19] R. Ghajar, A. Rassaf, Effect of impactor shape and temperature on the behavior of E-glass/epoxy composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014. (in Persian فارسی)

[20]V. Birman, Review of Mechanics of Shape Memory Alloy Structures, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 50, No. 11, pp. 629-645, 1997.

[21]W. Yongdong, , Low velocity impact response analysis of shape memory alloy reinforced composite beam, *Journal of Wuhan University of Technology Materials science*, Vol. 20, No. 3, pp. 70-73, 2005.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.4.55.1 ]