



تأثیر پیش کرنش و موقعیت سیم آلیاژ حافظه‌دار بر خواص کمانشی کامپوزیت الیاف-فلز هوشمند

محمدرضا محاسب کریملو¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران
2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 19395-1999، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 شهریور 1396
پذیرش: 30 مهر 1396
ارائه در سایت: 06 آذر 1396
کلید واژگان:
کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز هوشمند
سیم آلیاژ حافظه‌دار
کمانش
پیش کرنش

چکیده

امروزه کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز به واسطه دارا بودن خواص مکانیکی خوب و وزن کم، مورد توجه قرار گرفته‌اند. بکارگیری آلیاژ حافظه‌دار در کامپوزیت‌های الیاف-فلز موجب می‌شود که این آلیاژها بتوانند تحت بارگذاری سیکلی، از طریق ایجاد حلقه برگشت پذیر هیستریزس، انرژی مکانیکی را جذب یا تلف کنند و باعث بهبود مقاومت در برابر ناپایداری‌های کمانشی کامپوزیت شوند. در این پژوهش، تأثیر افزایش پیش کرنش و همچنین اثر قرارگیری سیم آلیاژ حافظه‌دار در لایه‌های دور و نزدیک نسبت به تار خنثی الیاف-فلز، تحت کمانش استاتیکی، بررسی شد. کامپوزیت‌های الیاف-فلز شامل رزین اپوکسی و الیاف شیشه و آلیاژ آلومینیوم T3-2024 بودند. برای بررسی اثر پیش کرنش سیم‌های حافظه‌دار، پیش کرنش‌های 1، 2 و 3 درصد با تعداد ثابت 6 سیم در این کامپوزیت‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی محل قرارگیری سیم‌ها، تعداد 4 سیم با پیش کرنش ثابت 3 درصد، در لایه‌های دور و نزدیک نسبت به تار خنثی، استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش پیش کرنش به دلیل ایجاد کشش بیشتر سیم‌های حافظه‌دار در حین ساخت نمونه‌ها و تمایل سیم‌ها برای بازگشت به شکل اولیه خود در حین آزمون، سازه را در برابر بار فشاری، مقاوم‌تر و پایدارتر می‌سازد. همچنین قرارگیری سیم‌ها در لایه‌های دور از تار خنثی نسبت به حالت نزدیک به تار خنثی، به دلیل تأثیر بیشتر مقاومت در برابر خمش ایجاد شده در حین کمانش و اثر خاصیت بازگشت‌پذیری بهتر سیم‌های حافظه‌دار، موجب افزایش مقاومت در برابر ناپایداری و حد تحمل بار بیشتر در کامپوزیت‌های الیاف-فلز شدند.

Influence of pre-strain and position of shape memory alloy wire on buckling properties of smart fibers metal composite

Mohammadreza Mohaseb Karimlou¹, Reza Eslami-Farsani^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Faculty of Materials Science and Engineering, Kaje Nasiraldin Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P. O. Box 19395-1999, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 September 2017
Accepted 22 October 2017
Available Online 27 November 2017

Keywords:

Smart fiber metal laminate composite
Shape memory alloy wire
Buckling
Pre-strain

ABSTRACT

Today fiber metal laminates (FMLs) by having good mechanical properties and low weight have been attention. The use of shape memory alloy (SMA) in the FMLs causes these alloys, under mechanical cyclic loading, by creation reversible hysteresis loop, can absorb or waste mechanical energy and causes amelioration of resistance against buckling instabilities of FMLs. In this study, the effect of increasing pre-strain and embedment SMA wire in far and near layers to neutral axis of FML, under static buckling were investigated. FMLs were contained epoxy resin and glass fibers and 2024-T3 Aluminum alloy. To investigate effect of pre-strain of SMA, the pre-strain of 1, 2 and 3 percent with fixed quantity 6 wires in these FMLs were tested. Due to investigate the position of embedment, the quantity of 4 wires with fixed 3% pre-strain, in far and near layers to neutral axis, are used. The results showed that the increase of pre-strain due to creation more tension of SMA during the fabrication of the specimens and the tendency of wires to return to its original shape during the test makes the structure more resistant against pressure loading. Also, the wires were placed in layers far from the neutral axis of the specimen as compared to near the neutral axis due to the greater effect of the bending resistance of the specimen during the buckling and the effect of the better return properties of SMA wires, causes to increasing resistance against instability and load tolerance limit in FMLs.

مستحکم شده‌اند، در جهت تولید ساختارهای کم وزن با مقاومت خمشی و مقاومت کمانش زیاد کاربرد زیادی دارد [1].

کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز¹ از چسباندن لایه‌های فلزی و کامپوزیتی

1- مقدمه

در صنعت هوافضا، مساله‌ای کاهش وزن در سازه‌های حساس، موضوعی بسیار چالش برانگیز می‌باشد زیرا این امر منجر به کاهش هزینه‌ها می‌گردد. در این صنعت، استفاده از صفحاتی که بصورت لایه‌ای ساخته شده و با مواد تقویتی

¹ Fiber Metal Laminata

Please cite this article using:

M. Mohaseb Karimlou, R. Eslami-Farsani, Influence of pre-strain and position of shape memory alloy wire on buckling properties of smart fibers metal composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 429-436, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

حافظه‌دار می‌باشد، 3- گشتاور واکنشی القا شده توسط نیروی بازیابی شکلی، 4- اثرات موقعیت تعبیه شده سیم‌های حافظه‌دار در کامپوزیت.

وجود خواص فوق‌العاده‌ای مانند استحکام خمشی زیاد و وزن مخصوص پایین در کامپوزیت‌های صفحه‌ای منجر به استفاده‌ی گسترده از این مواد در سازه‌های صنعت هوافضا (که در آنها نسبت استحکام به وزن بالا مورد نیاز است)، شده است. به منظور کاهش وزن هواپیماها، از کامپوزیت‌های صفحه‌ای بعنوان جایگزین مناسبی برای فلزات سنتی در بدنه‌ی بال‌ها، استفاده می‌شود. بدنه‌ی هواپیماهای پرسرعت نه تنها تحت تأثیر نیروهای آیرودینامیکی قرار می‌گیرند، بلکه تحت گرمایش آیرودینامیکی نیز می‌باشند. افزایش دمای ایجاد شده ممکن است منجر به ایجاد کمانش در پوسته‌ی بدنه و کاهش ظرفیت تحمل بار گردند. از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌توان بصورت متصل شده به کامپوزیت‌های صفحه‌ای استفاده نمود و ظرفیت تحمل بار را در آنها بهبود بخشید [8].

اولین بار باز و چن [9]، به بررسی امکان سنجی در خصوص استفاده از فعال کننده‌های آلیاژ حافظه‌دار به منظور کنترل فعال کمانش و خصوصیات کمانش جانبی در تیرهای کامپوزیتی انعطاف پذیر پرداختند. در مطالعه آنها، سیم‌های آلیاژی حافظه‌دار شکلی در راستای صفحه‌ی میانی این تیرها جایگذاری شدند. رو و باز [10] در زمینه خصوصیات استاتیکی و رفتار کمانش صفحات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه تقویت شده با سیم حافظه‌دار نیتینول تحقیق کردند. سیم‌های نیتینول از قبل تحت تنش قرار گرفتند و برای ایجاد نیروی مورد نیاز برای بازیابی فازی، فعال شدند. باز و تمپ [11] نشان دادند که پایداری تیرهای نازک را می‌توان با استفاده از فعال کننده‌های آلیاژهای حافظه‌دار بهبود بخشید. تامپسون و لوقلان [12] با استفاده از نیروهای ترمیمی ایجاد شده توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، توانستند رفتار فراکمانش را در ساختارهای صفحه‌ای تحت تأثیر نیروهای تک محوره تقویت کنند. تحقیقات آنها نشان داد که با استفاده از درصد حجمی کوچکی از فعال کننده‌ها می‌توان جابجایی‌های خارج از صفحه‌ای را در صفحات تحت فراکمانش به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

در پژوهش تامپسون و لوقلان [12]، بهبود رفتار فراکمانشی ساختارهای چند لایه‌ای صفحه‌ای با استفاده از روش‌های کنترل انطباقی به همراه تکنولوژی مواد هوشمند بررسی شد. رفتار انطباقی مذکور با استفاده از قرار دادن فعال کننده‌های آلیاژی هوشمند شکلی نیکل-تیتانیوم (از قبل تحت کرنش قرار گرفته) درون نمونه‌های صفحه‌ای چند لایه‌ی پیش ساخته، مورد بررسی قرار گرفت و فعال کننده‌ها به میزان کافی مورد کشش قرار گرفته و دارای انرژی شدند [12].

در تحقیقی که چویی و همکارانش در زمینه کمانش روی کامپوزیت‌های چندلایه تقویت شده با سیم حافظه‌دار پرداختند، هدف اصلی تحقیق را می‌توان به این صورت بیان نمود که جهت اطمینان از تأثیرات نیروی فعالسازی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر روی رفتار فراکمانشی، این سیم‌ها برخلاف تحقیقات قبلی نه به یک تکیه‌گاه خارجی متصل شدند و نه درون یک غلاف قرار داده شدند. نکته‌ی دوم این است که در این تحقیق تأثیر خالص سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در رفتار کمانشی تیر کامپوزیتی صحت گذاری شده و بصورت کمی و کیفی توضیح داده شد. در نهایت، در این پژوهش بر مبنای آنالیزها و نتایج تجربی حاصله، فرمول‌های تئوری برای لحاظ کردن تأثیر سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر روی کنترل فعال رفتار کمانشی (که منجر به ایجاد یک تغییر شکل کوچک قبل از ایجاد فراکمانش می‌شود)، پیشنهاد شد [6].

متشکل از الیاف و رزین به هم ساخته می‌شوند. فلز به کار رفته اغلب، آلومینیوم است و الیاف به طور کلی بر اساس کارکرد مورد انتظار، الیاف آرامید، کربن یا شیشه هستند [2]. کامپوزیت‌های چند لایه آلومینیم تقویت شده با الیاف شیشه/اپوکسی¹ خواص منحصر به فردی از جمله مقاومت خستگی و خواص استاتیکی خوب، مقاومت به ضربه عالی و حساسیت به ترک خوب برخوردار هستند [3].

برخی از عوامل مؤثر بر کمانش بر روی چند لایه‌های الیاف-فلز که برخی از آنان با کامپوزیت‌های چند لایه نیز مشترک می‌باشند، به شرح زیر است: 1- تورق اولیه که می‌تواند به مسائلی چون خطای ساخت لایه‌ها، مهارت متصل کردن لایه‌ها به یکدیگر، ضربه و غیره وابسته باشد [4]، 2- چیدمان لایه‌های کامپوزیتی [5]، 3- شرایط مرزی، نوع و نحوه بارگذاری [6].

در حال حاضر، بررسی رفتار مکانیکی خصوصاً آنالیز پایداری چند لایه‌های الیاف-فلز چه از لحاظ تئوری و چه عملی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین به دلیل کاربرد گسترده‌ی این مواد، تحقیقات ارزشمند زیادی نیز در خصوص رفتارهای دیگر چند لایه‌های الیاف-فلز انجام شده است که رنگی بی و همکارانش نقش مؤثری را در این زمینه داشتند [7].

در تحقیق تجربی رمز و بورست [4] از تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای دستیابی به مکانیزم شکست در سطح میانی استفاده شد و جهت تفسیر مدل تخریب سطح میانی بکار رفت. در این تحقیق، کمانش محلی و رشد جدایش در یک صفحه‌ی تحت نیروی فشاری محاسبه شده است. به نظر می‌رسد مدل حاضر، پایدار و صحیح باشد. همچنین مشاهده شد که چقرمگی شکست در سطوح تماس، نقش مهمی در رفتار فراکمانشی و پیشروی جدایش در مدل ایفا می‌کند [4] از آنجایی که هم کمانش و هم رشد جدایش به دست آمد، می‌توان برای آنالیز رفتار کامپوزیت‌های چند لایه آلومینیم تقویت شده با الیاف شیشه/اپوکسی خاص تحت نیروی فشاری استفاده نمود. وجود تفاوت زیاد در واکنش‌ها نشان می‌دهد که مشخصات جدایش می‌تواند تأثیر زیادی بر روی سفتی فراکمانش در صفحات داشته باشد. بنابراین شناسایی پارامترهای مواد در کامپوزیت‌های چند لایه آلومینیم تقویت شده با الیاف شیشه/اپوکسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [4].

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی²، مواد هوشمند و بی‌همتابی هستند که در بازه‌ی گسترده‌ای از ساختارهای هوشمند یا انطباق پذیر بکار گرفته می‌شوند. به دلیل تغییر فاز حالت جامد (بدون نفوذ ماده و تحت تنش برشی) بین فازهای مارتنزیت و آستنیت، این مواد می‌توانند خواص ترمومکانیکی ویژه‌ای از خود نشان دهند. در بسیاری از کاربردهای مهندسی، از آلیاژهای حافظه‌دار برای کنترل مشخصات ساختاری مانند ارتعاش، شکل و صلبیت سازه استفاده می‌شود. در روش‌های موفق، از فعال کننده‌های آلیاژهای حافظه‌دار بصورت متصل شده به لایه‌ها روی سطح و یا جاسازی شده در داخل ماتریس فلزی کامپوزیت استفاده شده است. هنگامی که یک جریان الکتریکی به فعال کننده‌ها اعمال می‌شود، در آنها گرمای مقاومتی ایجاد می‌شود که باعث بازیابی شکل و القای تنش‌های بزرگ و تغییر شکل در ماتریس می‌گردد. از طرفی با اضافه کردن آلیاژ حافظه‌دار به کامپوزیت‌های چند لایه، موارد زیر به طور عمومی از عوامل مؤثر بر رفتار کمانش این کامپوزیت‌ها خواهد شد [6].

1- خصوصیات مکانیکی سیم حافظه‌دار که باعث افزایش حد تحمل بار بحرانی می‌گردد، 2- خصوصیت نیروی بازیابی شکلی، که وابسته به متغیرهای زیادی مانند پیش کرنش، کسر حجمی، دما، تنش و اثرات چرخشی سیم‌های

¹ Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy

² Shape memory alloys

3-2- ساخت چند لایه‌های الیاف-فلز حاوی سیم آلیاژ حافظه‌دار

به منظور ساخت نمونه‌های چند لایه الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار و اعمال پیش کرنش به سیم‌ها، قالب متناسب با نمونه‌ها، طراحی و ساخته شد که در شکل 2 نشان داده شده است. این قالب دارای دو صفحه بالایی و پایینی بود که توسط خارها و شیارهایی به منظور جلوگیری از لغزش چند لایه‌ها در هنگام پرس کاری، بر روی هم محکم شدند. به منظور اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، ابتدا سیم‌ها توسط یک گیره تحت کشش قرار گرفت و سپس به منظور جلوگیری از حرکت سیم‌ها، از طریق هادی‌هایی که بر روی قالب تعبیه شدند، عبور کرده و در سمت دیگر قالب توسط گیره‌ی دیگری محکم بسته شدند.

برای ساخت چند لایه‌های الیاف-فلز از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد. ابتدا در بخش کامپوزیتی چند لایه‌های الیاف-فلز، به ازای هر 10 واحد رزین اپوکسی، یک واحد هاردنر با آن مخلوط شد و سپس از این مخلوط جهت چسباندن لایه‌های آلومینیوم و الیاف شیشه بر روی هم استفاده شد. فرآیند پخت نیز در دمای محیط انجام گرفت. به منظور اتصال مطلوب لایه فلزی با قسمت کامپوزیتی، سطح ورق‌های آلومینیوم با چربی‌زدایی اولیه و سپس ایجاد خراش به وسیله سمباده نرم و در نهایت استفاده از استون به منظور تمیزکاری سطوح، آماده‌سازی شدند. پس از قرارگیری سیم‌ها در چندلایه، ابتدا سیم‌ها در دمای محیط توسط اسپری نیتروژن، سرد و به فاز مارتنزیت انتقال یافته و پس از اعمال پیش کرنش، توسط المنت حرارتی، به فاز آستنیت برده شدند. با گرم کردن سیم‌ها و تمایل آن‌ها به کاهش طول (که از ماهیت فاز آستنیت است) و همچنین ممانعت چندلایه در برابر تغییر طول سیم‌ها، تنش بازیابی در سیم بوجود می‌آید که منجر به ایجاد تنش و افزایش سفتی چندلایه می‌شود. در نهایت قالب به همراه نمونه‌های چند لایه الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار، داخل دستگاه پرس، تحت فرآیند پخت، در دمای محیط قرار گرفتند.

4-2- مشخصات نمونه‌های آزمایش

در شکل 3، نحوه قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در چند لایه‌های الیاف-فلز نشان داده شده است. خط‌چین‌ها در شکل 3، نشان‌دهنده‌ی محل تار خنثی در نمونه می‌باشند. با توجه به این که تار خنثی قسمتی از نمونه است که در اثر اعمال بار بر نمونه، تحت تأثیر کشش و فشار قرار نمی‌گیرد، چیدمان سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نسبت به تار خنثی نمونه (که همان مرکز ضخامت نمونه می‌باشد)، انجام شد. به منظور بررسی اثر موقعیت سیم‌های حافظه‌دار بر رفتار کمانشی چندلایه‌های الیاف-فلز، نمونه‌هایی با تعداد ثابت 4 سیم با پیش کرنش ثابت 3% و با قرارگیری سیم‌ها در لایه‌های دور و نزدیک

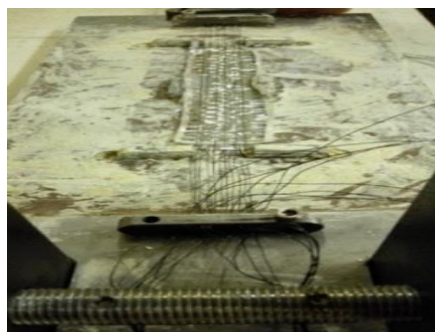


Fig. 2 Mould manufacturing of fiber metal laminate specimen

شکل 2 قالب ساخت نمونه چند لایه‌های الیاف - فلز

در راستای تحقیقات قبلی، در تحقیق حاضر، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم درون چندلایه‌های الیاف-فلز (آلومینیوم 2024-T3/ کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه) جایگذاری شده و اثر پیش کرنش‌های مختلف سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و همچنین تغییر در موقعیت قرارگیری سیم‌ها، بر رفتار کمانشی این چندلایه‌های الیاف-فلز بررسی شده است.

2- مواد و روش‌ها

1-2- مواد

در این پژوهش، قسمت کامپوزیتی چند لایه‌های الیاف-فلز شامل الیاف شیشه‌ی تک جهته و رزین اپوکسی اپون¹ 828 با هاردنر 10% بوده است. کسر حجمی الیاف و رزین نیز، هر کدام 50% می‌باشد. همچنین در قسمت فلزی این چند لایه‌ها از ورق آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0.5 میلی متر استفاده شد. آلیاژ حافظه‌دار (نیکل-تیتانیوم دما بالا) به صورت سیم و با قطر 0.4 میلی متر برای هوشمندسازی این چند لایه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تعیین دماهای استحاله سیم (دمای شروع و پایان آستنیت و مارتنزیت)، آزمون گرماسنجی پویایی تفاضلی² انجام شد. دمای استحاله فازی در سیم آلیاژ حافظه‌دار در جدول 1 آمده است.

2-2- دستگاه آزمون کمانش

دستگاه مورد استفاده برای آزمون کمانش نمونه‌های چند لایه الیاف-فلز، دستگاه هانسفیلد با قابلیت اعمال بار تا 25 kN بود (شکل 1). داده‌های دستگاه با استفاده از نیروسنج تعبیه شده بر فک بالایی متحرک، ثبت شد. نگهدارنده³ آزمون کمانش نیز مطابق با استاندارد ASTM C364-99 بر روی این دستگاه قرار گرفت. جهت انجام آزمایش، نمونه در میان و وسط دو جیگ واقع در فک‌های بالایی و پایینی نگهدارنده، قرار گرفته و پیچ شدند. سپس جیگ‌ها توسط پیچ‌های بلندتری که با آن‌ها درگیر است، محکم شده و مانع از سر خوردن جیگ شدند، به طوری که نمونه از بالا و پایین کاملاً گیردار و از لبه‌های جانبی آزاد بود. شکل 1 نمونه محکم شده در نگهدارنده‌ی متصل به دستگاه آزمون کمانش را نشان می‌دهد.

جدول 1 دماهای استحاله فازی در سیم آلیاژ حافظه‌دار

Table 1 Phase transformation temperatures of shape memory alloy wire			
دمای شروع استحاله مارتنزیتی	دمای پایان استحاله آستنیتی	دمای پایان استحاله مارتنزیتی	دمای شروع استحاله آستنیتی
M_s (°C)	A_f (°C)	M_f (°C)	A_s (°C)
5.6	75.9	-0.5	66.4

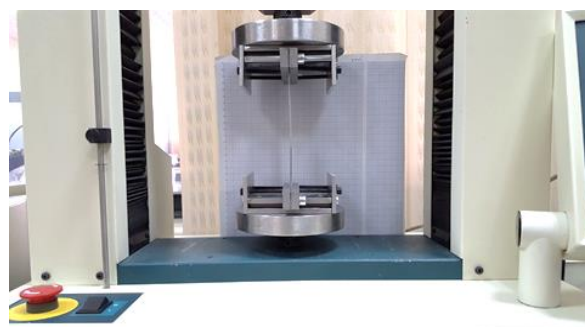


Fig. 1 Buckling test machine

شکل 1 دستگاه آزمون کمانش

¹ Epon

² Differential Scanning Calorimetry

³ Edgewise

شرایط محیطی، با استفاده از کامپیوتر دستگاه، سرعت پیشروی فک بالایی (فک متحرک) 0.05 mm/min تعیین شد که به صورت فشاری و رو به پایین پس از فشردن دکمه شروع دستگاه، حرکت می‌کند. از طرفی از آنجا که خیز ایجاد شده در نمونه‌ها برای به دست آوردن نمودار نیرو-جابجایی خارج از صفحه، ضروری است، با گذاشتن یک صفحه میلیمتری در پشت نمونه به جهت اندازه‌گیری خیز در هر لحظه، از نمونه‌ها در تمامی طول آزمایش، فیلم برداری شد.

لازم به ذکر است، برای بدست آوردن مقدار خیز در بازه‌ی زمانی مورد نظر، باید این زمان را با توجه به مقدار معلوم پیشروی دستگاه و با در نظر گرفتن سرعت پیشروی، طبق رابطه‌ی (1) بدست آورد.

$$t = \frac{x}{v} \quad (1)$$

در رابطه فوق، x ، پیشروی دستگاه (mm)، v ، سرعت پیشروی (mm/min) و t ، زمان پیشروی (s) می‌باشد. برای بدست آوردن زمان برحسب ثانیه، زمان حاصل در 60 ضرب شد.

دستگاه آزمایش.

با توجه به این که دستگاه مورد استفاده، نمودار نیروی فشاری را برحسب جابجایی (پیشروی فک بالایی) می‌دهد، در بررسی‌های نموداری، با استفاده از این نمودار و فیلم‌هایی که از نمونه‌ها گرفته شد، منحنی‌های نیرو-جابجایی خارج از صفحه، به ترتیب مراحل زیر بدست آمد:

1- تصویربرداری از فیلم نمونه مورد نظر در بازه زمانی و مقدار پیشروی معین رابطه (1)، در نرم افزار اکسل¹ و در نهایت، استخراج نمودار نیرو-جابجایی خارج از صفحه.

2- وارد کردن تصاویر در نرم افزار کتیا² جهت اندازه‌گیری خیز (جابجایی خارج از صفحه) نمونه (شکل 5).

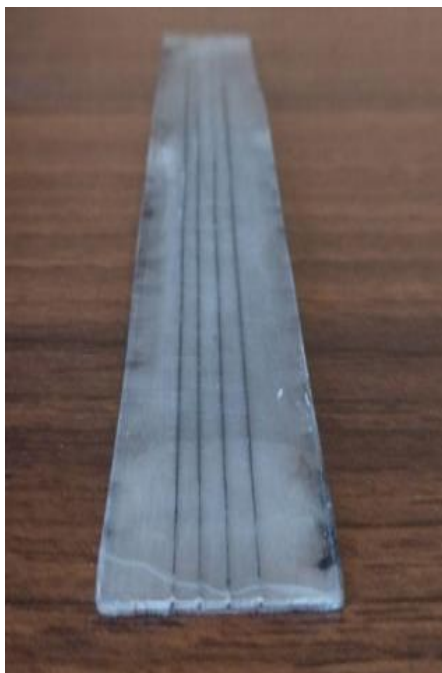


Fig. 4 Fiber metal laminate reinforced shape memory alloy wire specimen

شکل 4 نمونه چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار

نسبت به تار خنثی نمونه‌ها ساخته شدند (شکل 3-a و 3-b). همچنین جهت بررسی اثر پیش کرنش‌های مختلف سیم‌های حافظه‌دار، نمونه‌هایی با تعداد ثابت 6 سیم با پیش کرنش‌های 1، 2 و 3 درصد آماده شدند (شکل 3-c). ابعاد کلیه نمونه‌ها طبق استاندارد آزمون کمانش، $170 \times 23 \text{ mm}^2$ است.

مشخصات نمونه‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- نمونه 4 سیم با 3% پیش کرنش نزدیک به تار خنثی

- نمونه 4 سیم با 3% پیش کرنش دور از تار خنثی

- نمونه 6 سیم با 1% پیش کرنش

- نمونه 6 سیم با 2% پیش کرنش

- نمونه 6 سیم با 3% پیش کرنش

تمامی نمونه‌های 6 سیم، شامل 2 لایه فلز و 1 لایه کامپوزیت و نمونه‌های 4 سیم، شامل 3 لایه فلز و 2 لایه کامپوزیت هستند. افزایش تعداد لایه‌های فلز و کامپوزیت در نمونه‌های 4 سیم، به دلیل مقایسه اثر قرارگیری سیم‌ها در لایه‌های دور و نزدیک نسبت به تار خنثی است.

به دلیل جهت بارگذاری کمانشی در راستای الیاف 90 درجه بخش کامپوزیتی و در نهایت به منظور تقویت استحکام نمونه‌ها و تاخیر در لایه‌لایه شدن، سیم‌های حافظه‌دار در راستای بارگذاری قرار گرفتند. این سیم‌ها با فاصله 4 میلی متر از یکدیگر در نمونه‌ها تعبیه شدند (شکل 4).

5-2- شرایط آزمون کمانش

در آزمون کمانش پس از قرار دادن نمونه درون نگهدارنده دستگاه فشار، در

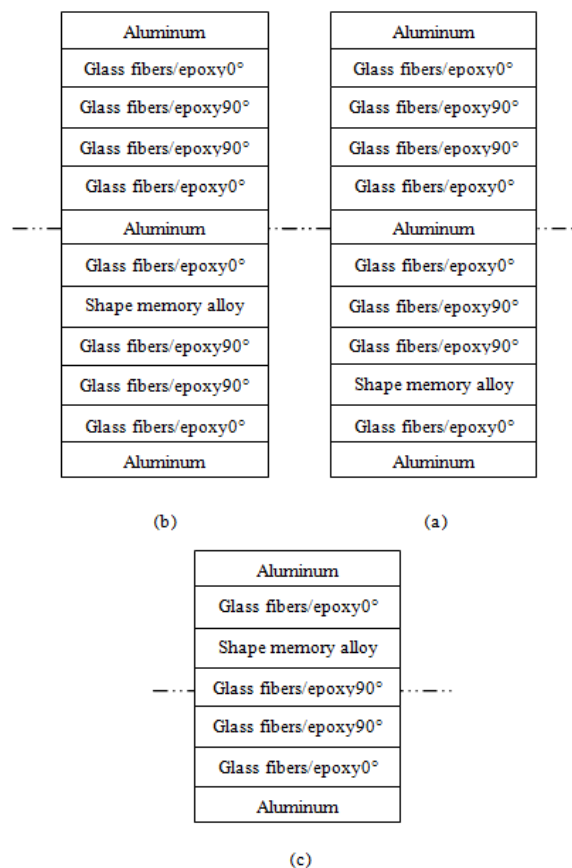


Fig. 3 Wrapping shape memory alloy wire in fiber metal laminate, (a) far from neutral axis, (b) near to neutral axis, (c) for pre-strain effect

شکل 3 نحوه قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در چند لایه‌های الیاف-فلز، (a) دور از تار خنثی، (b) نزدیک به تار خنثی، (c) جهت بررسی تأثیر پیش کرنش

¹ Excell

² Catia

نمونه‌های 1، 2 و 3 درصد پیش کرنش آمده است. همان‌طور که در شکل 6 مشهود است، نیروی بحرانی کمانشی در نمونه 1% پیش کرنش برابر با 0.837 kN، در نمونه 2% پیش کرنش، برابر 0.975 kN و همین‌طور در نمونه 3% پیش کرنش سیم، معادل 1.046 kN است. این نتایج حاکی از آن است که با توجه به روند افزایش پیش کرنش اعمالی بر روی سیم‌ها، بار بحرانی متحمل شده توسط نمونه‌ها در پیش کرنش 3% بیشتر از 2% و در نهایت 15 می‌باشد. همچنین با توجه به نمودار شکل 7، می‌توان گفت که نمونه 1% پیش-کرنش در بار 0.639 kN، وارد اولین ناپایداری خود می‌شود. همچنین نمونه 2% پیش کرنش، در بار اعمالی 0.729 kN و نمونه 3% پیش کرنش در بار کمانشی 1.013 kN وارد اولین لحظه از ناپایداری خود می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش پیش کرنش در نمونه‌ها سبب می‌شود تا بار کمانش برای ورود به ناپایداری دیرتر روی دهد.

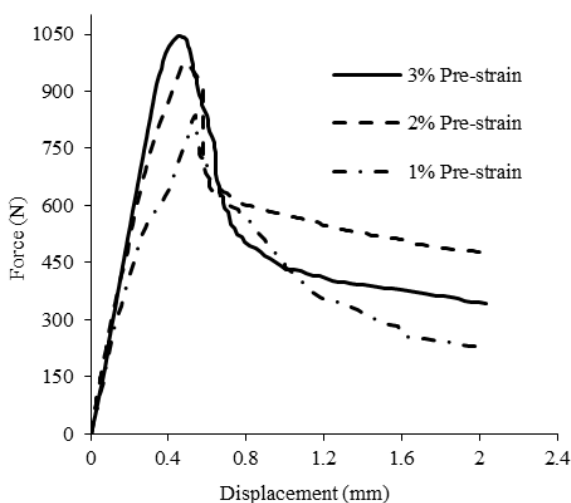


Fig. 6 Force-Displacement curves of FMLs reinforced shape memory alloy wire with 1, 2 and 3% of pre-strain

شکل 6 منحنی نیرو-جابجایی چندلایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار با 1، 2 و 3 درصد پیش کرنش

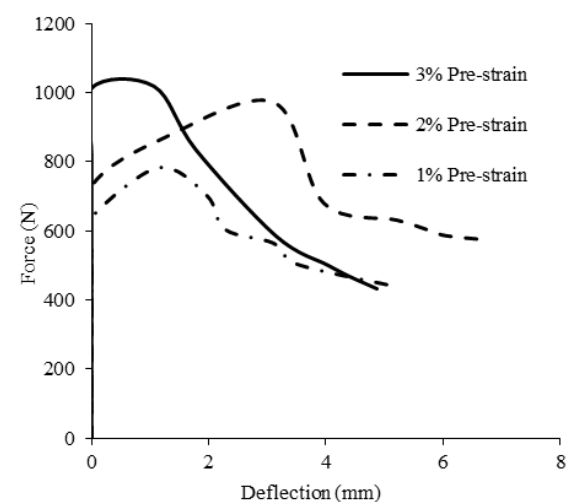


Fig. 7 Maximum deflection created from neutral axis of FMLs reinforced shape memory alloy wire with 1, 2 and 3% of pre-strain

شکل 7 بیشینه خیز ایجاد شده از تار خنثی چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار با 1، 2 و 3 درصد پیش کرنش

3- وارد کردن مقادیر خیز (برحسب mm) متناظر با زمان به دست آمده از رابطه (1)، در نرم افزار اکسل¹ و در نهایت، استخراج نمودار نیرو-جابجایی خارج از صفحه.

از طرفی برای اندازه گیری مقادیر خیز، از فیلم نمونه در بازه‌های زمانی یکسان، از لحظه‌ی شروع آزمون، عکس گرفته شد و این مقادیر در مرکز نمونه و از فاصله محور مرکزی، توسط نرم افزار کتیا، اندازه گیری شد (شکل 5). همان‌طور که در شکل 5 پیداست، به عنوان مثال برای اندازه گیری جابجایی خارج از صفحه‌ی این نمونه، ابتدا محورهای مرکزی در لحظه‌ی قبل از شروع تست، ترسیم شده و سپس در لحظه اعمال بار و ایجاد خیز، خیز در نقطه‌ی مرکزی نمونه، اندازه گیری شد.

3- نتایج و بحث

3-1- اثر افزایش پیش کرنش سیم آلیاژ حافظه‌دار در چند لایه‌های الیاف-فلز

به منظور انتخاب پیش کرنش‌های مختلف، تست کشش سیم آلیاژ حافظه‌دار در دمای مارتنزیت (-0.5 °C) انجام شد و با توجه به این که کرنش تسلیم سیم، در مقدار 3.18% رخ داد، کرنش‌های پایین‌تر از این میزان (1، 2 و 3 درصد) در نظر گرفته شدند. شکل 6 نمودار نیرو برحسب جابجایی طولی و شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی خارج از صفحه برای این سه نمونه را نشان می‌دهد. همچنین در جدول 2، مقایسه و بررسی نمودارهای شکل‌های 6 و 7، مقادیر بار ویژه، کمانش، اختلاف درصد بارهای کمانشی و بحرانی میان

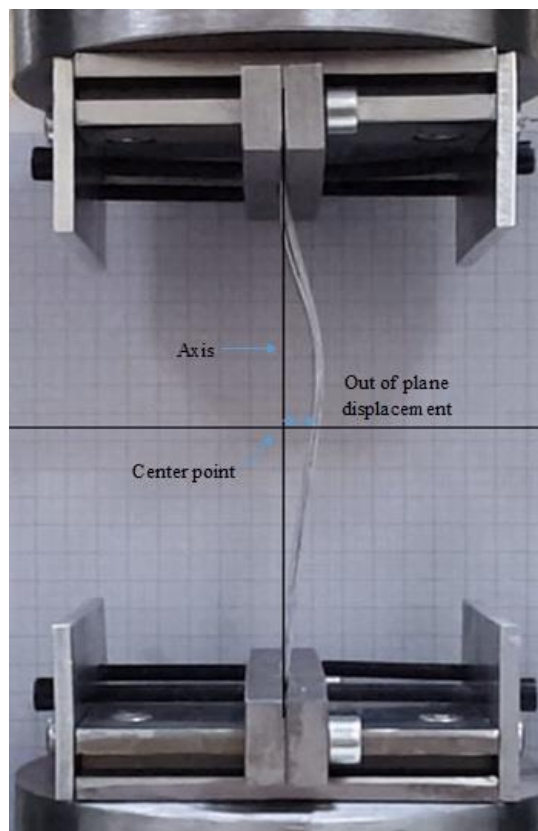


Fig. 5 Maximum deflection from neutral axis of FML specimen reinforced shape memory alloy wire in buckling test

شکل 5 بیشینه خیز ایجاد شده از تار خنثی نمونه چند لایه الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار در آزمون کمانش

¹ Excell

جدول 2 مقایسه‌ی مقادیر بدست آمده‌ی بار بحرانی، بار ویژه و بار کمانش چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار با 1، 2 و 3 درصد پیش کرنش

Table 2 The comparison value resulted of critical load, specific load and buckling load between FMLs reinforced shape memory alloy wire with 1, 2 and 3% of pre-strain

نمونه	جرم (kg)	بار بحرانی (kN)	بار ویژه (kN/kg)	بار کمانش (kN)	درصد اختلاف بار بحرانی نسبت به 1% پیش کرنش	درصد اختلاف بار ویژه نسبت به 1% پیش کرنش	درصد اختلاف بار کمانش نسبت به 1% پیش کرنش
1% پیش کرنش	0.0234	0.837	35.76	0.639	-----	-----	-----
2% پیش کرنش	0.0239	0.975	40.79	0.729	14.08%	14.06%	16.48%
3% پیش کرنش	0.0235	1.046	44.51	1.013	58.52%	24.46%	24.97%

گفت، که قرار دادن سیم در موقعیت دور از تار خنثی نمونه، سبب می شود تا نمونه دیرتر وارد اولین رفتار ناپایداری خود شود و در نتیجه با مشاهده‌ی این اختلاف زیاد در بار اعمالی اولین لحظه‌ی ناپایداری، نمونه با موقعیت سیم دور از تار خنثی، خواص مکانیکی بسیار مطلوبتری را داراست.

در جدول 3، مقایسه و بررسی نمودارهای شکل‌های 8 و 9، مقادیر بار ویژه، کمانش و اختلاف درصد بارهای کمانشی و بحرانی میان نمونه‌های با موقعیت سیم دور و نزدیک به تار خنثی ارائه شده است. مطابق با جدول 3، نمونه‌ی با موقعیت سیم دور از تار خنثی در مقایسه با نمونه‌ی با موقعیت سیم نزدیک به تار خنثی، به ترتیب دارای درصد اختلاف بار بحرانی، بار ویژه و بار کمانش معادل 12.15%، 12.22% و 204.98% می باشد.

نتایج حاصل از جداول 2 و 3، حاکی از آن است که دور بودن سیم‌ها از مرکز به طوری جدی منجر به پایداری زیاد سازه و ناپایداری‌هایی کمتر از نمونه‌ی متناظر آن که سیم‌ها در آن، نزدیک به محل تار خنثی نمونه تعبیه شده است، شده و خواص کمانش را بهبود می‌بخشد. در شکل‌های 10 تا 12 به ترتیب بار بحرانی و بار کمانشی در پیش‌کرنش‌ها و موقعیت‌های مختلف سیم نشان داده شده است. در شکل 10-a و 10-b، نمونه 3% پیش‌کرنش سیم آلیاژ حافظه‌دار، به ترتیب دارای بار بحرانی و بار کمانشی 1.046 kN و 1.013 می‌باشد که نسبت به نمونه 1% پیش‌کرنش، دارای اختلاف 24.97% و 58.52% می‌باشد. در شکل‌های 11 و 12 نیز بار بحرانی و بار کمانشی در نمونه ای که سیم در آن دور از تار خنثی قرار گرفت، به ترتیب 4.327 و 3.425 kN و در نمونه‌ای که سیم در آن در نزدیکی تار خنثی قرار گرفت، 3.858 kN و 1.123 kN می‌باشد که نشان دهنده اختلاف‌های 12.15% و 204.98% از یکدیگر هستند.

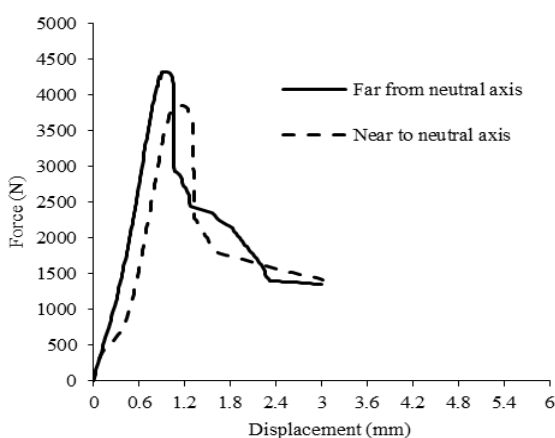


Fig. 8 Force-Displacement curve of FML specimens with far and near position of shape memory alloy wire to neutral axis

شکل 8 منحنی نیرو-جابجایی چند لایه‌های الیاف-فلز با موقعیت سیم آلیاژ حافظه‌دار دور و نزدیک به تار خنثی

ذکر این نکته لازم است که اگر پیش‌کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار از حدی بیشتر افزایش یابد، فاز مارتنزیت ناشی از القای تنش به طور کامل تشکیل نمی‌شود، در این صورت رفتار هیستریزیس نیز آشکار نمی‌شود و رفتار سیم آلیاژ حافظه‌دار همانند مواد الاستیک پیش‌کرنش یافته می‌باشد. این بدان معناست که اثر مثبت سیم آلیاژ حافظه‌دار که ذخیره تنش پسماند می‌باشد، کاهش یافته و اثر منفی سیم، یعنی ایجاد آسیب بین لایه‌ای و در نتیجه لایه-لایه شدگی و ترک را باعث می‌شود. این عوامل خود باعث کاهش نیروی بحرانی کمانشی و ورود سریعتر نمونه به ناپایداری کمانشی می‌شوند [13].

با توجه به نتایج جدول 2، برای نمونه‌ی 3% پیش‌کرنش، میزان حد تحمل بار بحرانی و بار ویژه به ترتیب افزایش 24.97% و 24.46% را نسبت به نمونه‌ی 1% پیش‌کرنش دارد. همچنین نمونه‌ی 2% پیش‌کرنش نیز برای این مقادیر به ترتیب دارای افزایش 16.48% و 14.06% نسبت به نمونه‌ی 1% پیش‌کرنش، می‌باشد. از طرف دیگر، برای بار کمانشی در نمونه‌ی 2% پیش‌کرنش نسبت به 1% پیش‌کرنش، این میزان 14.08% بیشتر و برای نمونه 3% پیش‌کرنش، 58.52% بیشتر است. در نتیجه می‌توان دریافت که نمونه 3% پیش‌کرنش، علاوه بر آن که حد تحمل بار بحرانی و بار ویژه بالایی را نسبت به سایرین دارد، بار کمانشی بیشتری را نیز تحمل می‌کند و دیرتر از سایر نمونه‌ها وارد ناپایداری می‌شود. به بیان کلی دیگر، با ایجاد پیش‌کرنش کششی در آلیاژ حافظه‌دار به این جهت که پس از قرارگیری در بستر کامپوزیت، این آلیاژ تمایل به برگشت به حالت اولیه خود را دارد، باعث می‌شود که کامپوزیت در حالت تنش فشاری قرار گیرد و لذا به همین دلیل نیروی بیشتری را نسبت به حالت بدون اعمال پیش‌کرنش جهت رخداد کمانش تحمل نماید.

3-2- اثر موقعیت سیم آلیاژ حافظه‌دار در چندلایه‌های الیاف-فلز

برای بررسی اثر موقعیت سیم‌های حافظه‌دار، نمونه‌های چندلایه الیاف-فلز حاوی 4 سیم با 3% پیش‌کرنش در موقعیت سیم‌های دور و نزدیک به تار خنثی مورد مطالعه قرار گرفتند. نمودار نیرو-جابجایی طولی نمونه‌های مذکور در شکل 8 آورده شده است.

با توجه به نمودار نیرو-جابجایی طولی در شکل 8 بار بحرانی متحمل شده توسط نمونه، با موقعیت سیم دور از تار خنثی برابر 4.327 kN و برای نمونه، با موقعیت سیم نزدیک به تار خنثی معادل 3.858 kN می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، نمونه با موقعیت سیم دور از تار خنثی، نسبت به نمونه با موقعیت سیم نزدیک به تار خنثی، بار بیشتری را تحمل می‌کند.

نمودار نیرو-جابجایی خارج از صفحه برای این دو نمونه نیز در شکل 9 آمده است. با توجه به نمودار، می‌توان ابراز داشت که نمونه‌ی با موقعیت سیم دور از تار خنثی در بار 3.425 kN، وارد اولین ناپایداری خود می‌شود.

همچنین نمونه‌ی با موقعیت سیم نزدیک به تار خنثی، در بار اعمالی 1.123 kN وارد اولین لحظه از ناپایداری خود می‌گردد. در نتیجه می‌توان

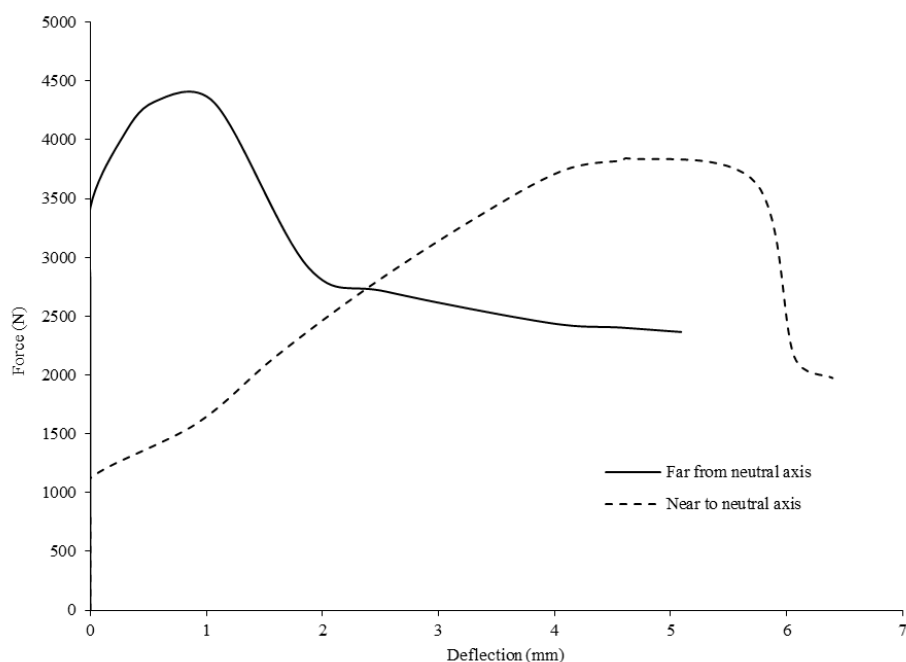


Fig. 9 Maximum deflection created from neutral axis of FMLs with far and near position of shape memory alloy wire to neutral axis

شکل 9 بیشینه خیز ایجاد شده از تار خنثی چند لایه‌های الیاف-فلز با موقعیت سیم آلیاژ حافظه‌دار دور و نزدیک به تار خنثی

جدول 3 مقایسه‌ی مقادیر بدست آمده‌ی بار بحرانی، بار ویژه و بار کمانش چند لایه‌های الیاف-فلز با موقعیت سیم آلیاژ حافظه‌دار دور و نزدیک به تار خنثی

Table 3 The comparison value resulted of critical load, specific load and buckling load between FMLs with far and near position of shape memory alloy wire to neutral axis

موقعیت سیم در نمونه	جرم (kg)	بار بحرانی (kN)	بار ویژه (kN/kg)	بار کمانش (kN)	درصد اختلاف بار بحرانی نسبت به نمونه نزدیک به تار خنثی	درصد اختلاف بار ویژه نسبت به نمونه نزدیک به تار خنثی	درصد اختلاف بار کمانش نسبت به نمونه نزدیک به تار خنثی
دور از تار خنثی	0.0381	4.327	113.56	3.425	12.15%	12.22%	204.98%
نزدیک به تار خنثی	0.0387	3.858	99.68	1.123	-----	-----	-----

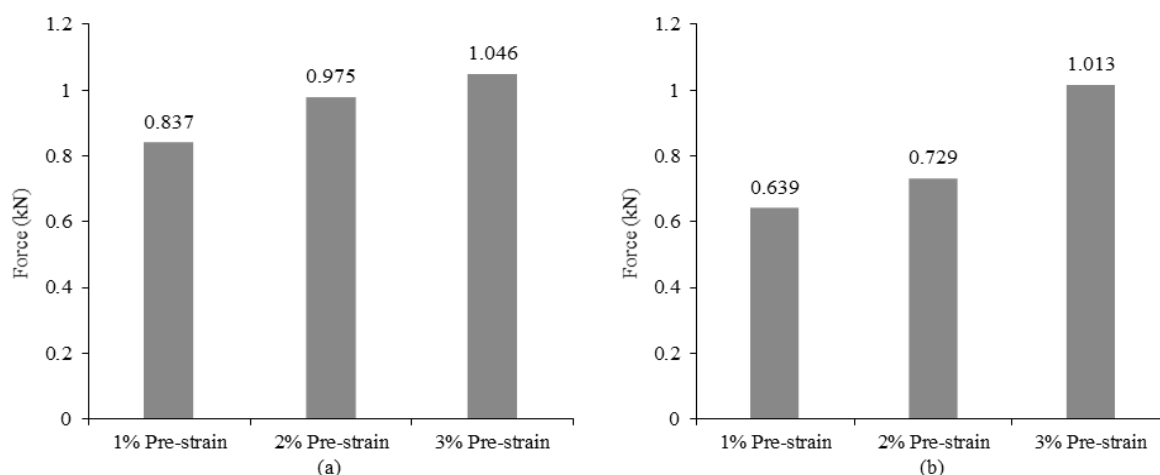


Fig. 10 Comparison chart of critical load (a) and maximum amount of deflection (b) of FMLs reinforced shape memory alloy wire with 1, 2 and 3% pre-strain

شکل 10 نمودار مقایسه‌ی بار بحرانی (a) و مقدار بیشینه خیز ایجاد شده از تار خنثی (b) برای چند لایه‌های الیاف-فلز تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار با 1، 2 و 3 درصد پیش-کرنش

4- نتیجه‌گیری

الیاف-فلز شامل کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه و در قسمت فلزی، آلیاژ آلومینیوم 2024-T3، بررسی شد. بدین منظور برای بررسی اثر پیش‌کرنش از جایگذاری 6 سیم دارای پیش‌کرنش‌های 1، 2 و 3 درصد و برای بررسی اثر

در این پژوهش اثر افزایش پیش‌کرنش و تغییر موقعیت سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم در بارگذاری استاتیکی فشاری روی چند لایه‌های

و 24.97 درصد و همچنین مقادیر بار کمانش با اختلاف 14.08 و 58.52 درصد، نسبت به نمونه‌ی با سیم 1% پیش‌کرنش، سیر صعودی داشتند. این موضوع به دلیل افزایش در تنش پسماند در پیش‌کرنش‌های بالاتر و نتیجتاً خاصیت بازگشت‌پذیری بهتر سیم‌های حافظه‌دار بود. در نتیجه با افزایش پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار، مقاومت در برابر ناپایداری نمونه‌های کامپوزیت چند لایه‌ی الیاف-فلز افزایش می‌یابد.

- بار بحرانی و بار کمانش در نمونه کامپوزیت چند لایه‌ی الیاف-فلز در حالت قرار دادن سیم‌های حافظه‌دار در لایه‌های دور از تار خنثی در مقایسه با حالت لایه‌های نزدیک به تار خنثی، افزایشی به میزان به ترتیب 12.15 و 204.98 درصد را نشان دادند. در نتیجه به دلیل اثرگذاری مطلوب تر سیم‌های حافظه‌دار در نمونه‌ای که سیم دورتر از تار خنثی قرار گرفت، این نمونه مقاومت در برابر ناپایداری و حد تحمل بار بیشتری را به همراه داشت.

5- مراجع

- [1] R. Degenhardt, C. S. M. A. Arbelo, R. Zimmerman, R. Khakimova, A. Kling, Future structural stability design for composite space and airframe structures, *Thin-Walled Structures*, Vol. 81, No. 3, pp. 29-38, 2014.
- [2] J. G. Carrillo, W. J. Cantwell, Scaling effects in the tensile behavior of Fiber-Metal Laminates, *Composite Science and Technology*, Vol. 67, No. 7, pp. 1684-1693, 2007.
- [3] R. Van Rooijen, J. Sinke, T. J. De Vries, S. Van Der Zwaag, Property optimization in fiber-metal laminates, *Applied Composite Materials*, Vol. 11, No. 2, pp. 63-76, 2004.
- [4] J. J. C. Remmers, R. De. Borst., Delamination Buckling of fibre-metal Laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 15, pp. 2207-2213, 2001.
- [5] J. M. Radoslaw, Z. Kolakowski, J. Bienias, P. Jakubczak, K. Majerski, Comparative study of FML profiles buckling and postbuckling behavior under axial loading, *Composite Structures*, Vol. 134, No. 1, pp. 216-225, 2015.
- [6] S. Choi, J. J. Lee, D. Ch. Seo, S. W. Choi, The active buckling control of laminated composite beams with embedded shape memory alloy wires, *Composite Structures*, Vol. 47, No. 4, pp. 679-686, 1999.
- [7] Bi. Rengui, Fu. Yiming, Y. Tian, J. Chao, Buckling and postbuckling analysis of elasto-plastic fiber metal laminates, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 27, No. 1, pp. 73-84, 2014.
- [8] K. Shih-Yao, S. Le-Chung, K. Chen, Buckling analysis of shape memory alloy reinforced composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 90, No. 2, pp. 188-195, 2009.
- [9] A. Baz, T. Chen, Active control of the lateral buckling of nitinol reinforced composite beams, *SPIE Proceedings*, Vol. 2427, No. 1, pp. 30-48, 1995.
- [10] J. Ro, A. Baz, Nitinol-reinforced plates: part II, Static and buckling characteristics, *Composites Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 77-90, 1995.
- [11] A. Baz, L. Tampe, Active control of buckling of flexible beams, *Proceedings of the Eighth Biennial Conference on Failure Prevention and Reliability*, Montreal, pp. 211-218, 1989.
- [12] S. P. Thompson, J. Loughlan, Adaptive post-buckling response of carbon fibre composite plates employing SMA actuators, *Composites Structures*, Vol. 38, No. 4, pp. 667-678, 1997.
- [13] W. Yongdong, Low velocity impact response analysis of shape memory alloy reinforced composite beam, *Wuhan University of Technology and Materials Science Edition*, Vol. 20, No. 3, pp. 70-73, 2005.

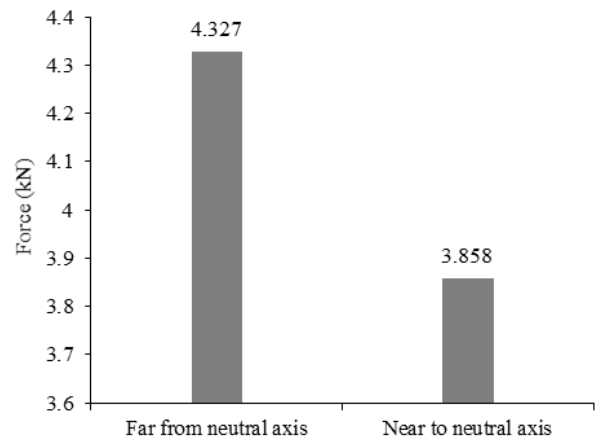


Fig. 11 Comparison chart of critical load of FML specimens with far and near position of shape memory alloy wire to neutral axis

شکل 11 نمودار مقایسه‌ی بار بحرانی چند لایه‌های الیاف-فلز با موقعیت با موقعیت سیم آلیاژ حافظه‌دار دور و نزدیک به تار خنثی

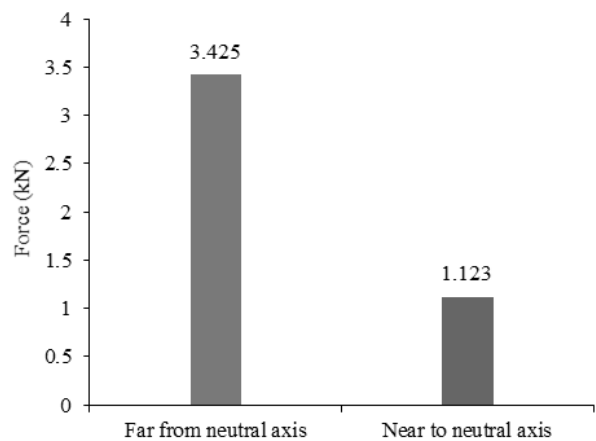


Fig. 12 maximum amount of deflection of FML specimens with far and near position of shape memory alloy wire to neutral axis

شکل 12 مقدار بیشینه خیز ایجاد شده از تار خنثی چند لایه‌های الیاف-فلز با موقعیت سیم آلیاژ حافظه‌دار دور و نزدیک به تار خنثی

موقعیت سیم‌ها، از جایگذاری 4 سیم با پیش‌کرنش ثابت 3% در مکان‌های مختلف نسبت به تار خنثی در چندلایه‌های الیاف-فلز استفاده شد. نتایج نهایی به شرح زیر هستند:

- با افزایش پیش‌کرنش سیم‌های حافظه‌دار از 2 به 3 درصد، مقادیر بار بحرانی نمونه‌های کامپوزیت چند لایه‌ی الیاف-فلز به ترتیب با اختلاف 16.48