



اثر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز

حامد آقامحمدی¹، سیدنوید حسینی آب‌بندانک¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، سید محمد حسین سیادتی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*تهرآن، صندوق پستی 19991-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/02/08

پذیرش: 97/04/01

کلیدواژگان:

کامپوزیت الیاف/فلز

الیاف بازالت

عملیات سطحی

خوردگ خواص خمشی

چکیده

کامپوزیت‌های الیاف/فلز گروه جدیدی از مواد کامپوزیتی هیبریدی هستند که از ورق‌های فلزی و لایه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند. استفاده از کامپوزیت‌های الیاف/فلز موجب بهره‌وری از ترکیب مزایای فلزات و کامپوزیت‌های پلیمری می‌شود. به منظور بهبود چسبندگی بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی، از روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر روی سطح فلز استفاده می‌شود. در این تحقیق، کامپوزیت‌های آلومینیوم/اپوکسی-الیاف بازالت با روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد و اثر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی مکانیکی و شیمیایی (شامل فرآیند قلیایی و حکاکی با محلول سولفوکرومیک) بر خواص خمشی آن‌ها با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. از میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی مورفولوژی سطحی آلومینیوم استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش آماده‌سازی حکاکی با محلول سولفوکرومیک موجب بهبود قابل توجهی در مقادیر استحکام خمشی، کرنش شکست و انرژی جذب شده در مقایسه با روش‌های مکانیکی و قلیایی می‌شود. تفاوت در رفتار خمشی نمونه‌ها مرتبط با مورفولوژی سطحی لایه آلومینیوم آن‌ها می‌باشد. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده این است که روش آماده‌سازی حکاکی با محلول سولفوکرومیک موجب ایجاد یک ساختار متخلخل بر روی سطح آلومینیوم می‌شود. این لایه متخلخل با ایجاد مکان‌هایی برای پر شدن توسط رزین اپوکسی، چسبندگی بهتر و قفل مکانیکی قوی‌تر بین لایه‌ها را به همراه دارد.

Effect of various surface treatment methods on the flexural properties of fiber metal laminates

Hamed Aghamohammadi, S. Navid Hosseini Abbandanak, Reza Eslami-Farsani*, S. M. Hossein Siadati

Faculty of materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O. B. 19991-43344, Tehran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Fiber metal laminates
Basalt fibers
Surface treatment
Flexural properties

Abstract

Fiber metal laminates (FMLs) are a new group of composite materials that consist of alternating thin laminates of metals and fiber reinforced polymeric composites. FMLs combine the advantages of metals and polymeric composites. In order to enhance the interfacial bonding between the alternating laminates, various surface treatment methods can be used on the metal surfaces. In this research, FMLs of alternating laminates of aluminum/epoxy-basalt fibers were fabricated using hand lay-up method. The effect of various surface treatment methods of mechanical and chemical (consist of alkaline and sulfochromic etching) on the flexural properties of the fabricated FMLs were investigated with three-point bend tests. SEM were utilized to investigate surface morphology of aluminum. Results showed that the sulfochromic etch method brought about a significant improvement in the flexural strength, strain to failure and absorbed energy in comparison to the mechanical and alkaline methods. Difference in flexural behavior of samples is attributed to their aluminum surface morphology. SEM observations showed that sulfochromic etch method created a porous layer on the aluminum surfaces. This porous layer provided channels for the epoxy resin to fill in, creating better adhesion and a much stronger mechanical interlocking between the laminates.

1- مقدمه

اهمیت دارد، می‌باشند. به علاوه این مواد مقاومت به خستگی و خوردگی فوق‌العاده‌ای را در کاربردها ارائه می‌دهند. به دلیل این مزایا، کامپوزیت‌ها در دهه‌های گذشته کاربرد وسیعی در صنایع هوایی پیدا کرده‌اند [1].

با این وجود، اغلب، عملکرد مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه ضعیفتر از فلزات می‌باشد. نیاز به بهبود رفتار ضربه کامپوزیت‌های پلیمری موجب توسعه و ایجاد گروه جدیدی از کامپوزیت‌ها به نام کامپوزیت‌های

مواد کامپوزیتی در دهه‌های گذشته مورد توجه متخصصان زیادی بوده است. برای اولین بار بعد از جنگ جهانی دوم استفاده از مواد کامپوزیتی در کاربردهای نظامی، تجاری شد. نوآوری در بحث کامپوزیت‌ها موجب کاهش وزن در طراحی‌های ساختاری شده است. کامپوزیت‌ها دارای مزایای زیادی نسبت به آلیاژهای فلزی (مخصوصاً در مواردی که استحکام ویژه و سفتی ویژه

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Aghamohammadi, H. Hosseini-Abbandanak, S. N. Eslami-Farsani, R. and Siadati, S. M. H., "Effect of various surface treatment methods on the flexural properties of fiber metal laminates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 495-502, 2020.

کارال⁵ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش زبری سطح آلومینیوم به دلیل افزایش قفل‌های مکانیکی بین لایه پلیمری و لایه آلومینیومی، موجب افزایش استحکام کامپوزیت می‌شود.

اردکانی⁶ و همکاران [9] به بررسی رفتار ضربه کامپوزیت‌های الیاف/فلز نوع گلار با دو روش آماده‌سازی سطحی محلول حکاکی سولفوکرومیک و تلفیق روش سولفوکرومیک و یک عامل جفت‌کننده⁷ پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از عامل جفت‌کننده موجب بهبود رفتار ضربه در پارامترهایی مانند اندازه خسارت و بیشینه تغییر شکل مرکزی می‌شود. در یک مطالعه مشابه دیگر، لاوکاک⁸ [10] و همکاران به بررسی تاثیر محلول‌های سولفوکرومیک همراه با عامل جفت‌کننده و سولفوفریک بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/فلز نوع کارال پرداختند. نتایج نشان‌دهنده این بود که محلول حکاکی سولفوکرومیک اصلاح شده موجب چسبندگی بهتری در مقایسه با محلول حکاکی سولفوفریک می‌شود.

روش آندایزینگ⁹ به عنوان یک روش الکتروشیمیایی، به دلیل ایجاد لایه اکسیدی متخلخل میکرومتری بر روی سطح فلز، نقش بسزایی در اتصال بین لایه پلیمری و لایه فلزی دارد. استاپیوک¹⁰ [11] و همکاران گزارش دادند که استفاده از روش آندایزینگ در الکترولیت اسیدکرومیک موجب ایجاد ساختار متخلخل تری در مقایسه با آندایزینگ در الکترولیت اسیدسولفوریک می‌شود. تاثیر روش آندایزینگ با سه الکترولیت مختلف اسیدفسفریک، اسیدسولفوریک و اسیدنیتریک بر خواص مکانیکی کارال توسط محمد و همکاران [12] انجام شد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که فرایند آندایزینگ در محلول اسیدفسفریک موجب ایجاد سطح متخلخل تر و زبرتری در مقایسه با فرایند آندایزینگ در محلول‌های اسیدسولفوریک و اسیدنیتریک می‌شود. استحکام بالاتر گزارش‌شده در کامپوزیت الیاف/فلز آندایز شده در محلول اسیدفسفریک به دلیل پر شدن¹¹ بیشتر رزین در داخل کانال‌های متخلخل ایجاد شده با اسیدفسفریک می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعاتی مبنی بر جایگزینی الیاف بازالت با الیاف شیشه، به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص مکانیکی قابل مقایسه و خسارات محیطی کمتر انجام شده است. الیاف بازالت دارای مقاومت خوب در برابر واکنش‌های شیمیایی و بارگذاری ضربه، ایجاد بخارات سمی کمتر و همچنین کرنش شکست فوق‌العاده در مقایسه با الیاف کربن می‌باشد. از جمله مزایای الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه می‌توان به مقاومت حرارتی بالا، اشتعال‌پذیری پایین، سازگاری با بدن انسان، مقرون به صرفه بودن، دسترسی بالا و سهولت تولید اشاره کرد. همچنین در شرایطی که رطوبت زیاد باشد، الیاف بازالت چسبندگی خوبی به رزین‌های پلیمری دارند [13,14].

علی‌رغم مطالعات صورت‌گرفته، تقریباً در هیچ‌کدام از این مطالعات به مقایسه تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز به وضوح و با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پرداخته نشده است. بنابراین با توجه به تحقیقات انجام‌شده قبلی و در ادامه این تحقیقات، هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر روش‌های آماده‌سازی سطحی متفاوت بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز

الیاف/فلز¹ گردید. کامپوزیت‌های الیاف/فلز گروهی از مواد کامپوزیتی ترکیبی هستند که از اتصال بین لایه‌های فلزی و لایه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند. معمولاً در این نوع کامپوزیت‌ها، از فلزاتی مانند آلومینیوم، منیزیم یا تیتانیوم و الیافی مانند الیاف شیشه، کربن و کولار به عنوان الیاف تقویت‌کننده در لایه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. به طور کلی استفاده از کامپوزیت‌های الیاف/فلز موجب بهره‌مندی از ترکیب خواص هر دو جز می‌شود، به طوری که خواص ضعیف خستگی و خوردگی فلزات و خواص سایشی پایین و مقاومت به ضربه و تعمیرپذیری پایین کامپوزیت‌ها را می‌توان به وسیله ترکیب این دو ماده برطرف کرد [1-3].

امروزه با توجه به مزایای کامپوزیت‌های الیاف/فلز، این مواد کاربرد ویژه‌ای در صنعت هواپیماسازی پیدا کرده‌اند، به طوری که تعدادی از شرکت‌ها تمایل به تعویض قطعات آلومینیومی با این مواد را داشته‌اند. هر دو نوع کامپوزیت الیاف/فلز آرال² و گلار³ در حال حاضر جزو پرکاربردترین مواد در بدنه هواپیما به شمار می‌روند. کامپوزیت‌های الیاف/فلز به طور موفقیت‌آمیزی در ایرباس A380 استفاده شده‌اند. همچنین استفاده از آرال در پنل پوسته پایینی هواپیمای فوکر 27 و درب محموله در بوئینگ C17 گسترش یافته است [1].

با این وجود، با توجه به گزارشات شکست 71 هواپیمای بوئینگ 747، حدود 90 مورد از 688 تعمیرات به دلیل ضربه اجسام خارجی بوده است. بنابراین، بدنه هواپیما باید بر حسب مکان و احتمال ضربه، بتواند مقادیر معینی از انرژی ضربه را تحمل کند. بنابراین در سال‌های اخیر، توجه زیادی برای مشخصه‌یابی پاسخ کامپوزیت‌های الیاف/فلز پیدا شده است. در این مطالعات، تاثیر متغیرهایی مانند نوع فلزات، نوع الیاف، نوع زمینه، نحوه لایه‌گذاری، کسر حجمی فلز/کامپوزیت و غیره بر روی رفتار ضربه کامپوزیت-های الیاف/فلز مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل آن که جدایش سطحی، کشش و خمش لایه‌های آلومینیومی وابسته به چسبندگی لایه‌های مجاور می‌باشند، پیوند بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی نقش مهمی را در رفتار ضربه کامپوزیت‌های الیاف/فلز ایفا می‌کنند [2-4].

همچنین، کامپوزیت‌های الیاف/فلز مکرراً در معرض سیکل‌های حرارتی هستند و با توجه به این که ضربه انبساط حرارتی آلومینیوم پایین‌تر از پلیمرها می‌باشد، عدم تطابق حرارتی موجب جدایش بین لایه‌ها می‌شود [5]. بنابراین با توجه به این که جدایش بین لایه‌ها مهمترین دلیل شکست کامپوزیت‌های الیاف/فلز محسوب می‌شود، موضوع فصل مشترک در این مواد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [6,7].

پارامترهایی مانند مورفولوژی، زبری سطحی و ترشوندگی لایه فلزی بر روی چسبندگی بین لایه‌های کامپوزیت‌های الیاف/فلز تاثیر می‌گذارند. مطالعات متعددی مبنی بر تاثیر مورفولوژی سطحی لایه فلزی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/فلز صورت گرفته است، به طوری که به منظور بهبود خواص سطحی فلز از روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی استفاده می‌شود. معمولاً عملیات سطحی لایه فلزی در کامپوزیت‌های الیاف/فلز با روش‌های مکانیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی انجام می‌شود [1].

محمد⁴ و همکاران [8] با استفاده از سناده‌های با شماره‌های مختلف به بررسی تاثیر زبری سطح بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف/فلز نوع

⁵ CARALL (carbon fiber aluminum laminates)

⁶ Ardakani

⁷ Coupling agent

⁸ Lawcock

⁹ Anodizing

¹⁰ Ostapiuk

¹¹ Infiltration

¹ Fiber metal laminates (FMLs)

² Aramid Reinforced Aluminum Laminate (ARALL)

³ Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy

⁴ Mohamad

جدول 1 روش‌های آماده‌سازی سطحی مختلف

Table 1 Methods of different surface treatment

نوع آماده‌سازی سطحی	روش فرایند
مکانیکی	سنباده‌زنی با کاغذ سنباده شماره 80 و سپس تمیز کردن سطح آلومینیوم با استون به منظور پاک کردن مواد روغنی از روی سطح
قلیایی	پاک کردن سطح با استون و سپس غوطه‌وری در محلول 2 درصد هیدروکسید سدیم به مدت 2 دقیقه در دمای 60 درجه سانتی‌گراد و شستشو با آب مقطر
حکاکی با محلول سولفو کرومیک	پاک کردن سطح با استون، غوطه‌وری در محلول هیدروکسید سدیم و سپس عملیات حکاکی در محلول سولفو کرومیک به مدت 30 دقیقه در دمای 60 درجه سانتی‌گراد

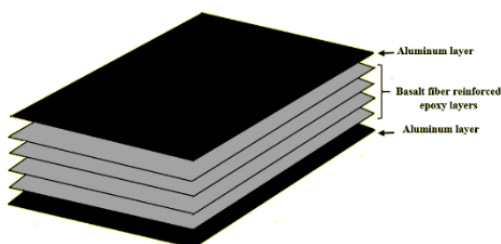


Fig. 1 Laminating configuration of fiber metal laminates

شکل 1 حالت لایه‌گذاری در کامپوزیت‌های الیاف/فلز

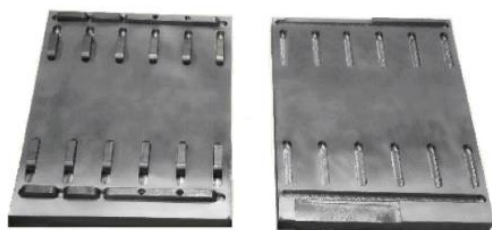


Fig. 2 Photograph of steel-mold

شکل 2 تصویر قالب فولادی

3- نتایج و بحث

منحنی‌های تنش-کرنش کامپوزیت‌های الیاف/فلز با روش‌های آماده‌سازی سطحی مکانیکی، قلیایی و حکاکی با محلول سولفو کرومیک در شکل 3 آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که منحنی‌های تنش-کرنش، حاصل از میانگین 3 آزمایش برای هر نمونه می‌باشند. همانطور که در بخش ساخت کامپوزیت‌های الیاف/فلز گفته شد نمونه‌ها دارای ابعاد 15×2.5 سانتی‌متر مربع و ضخامت 1.8 ± 0.05 می‌باشند. جدول 2 نیز مقادیر میانگین استحکام خمشی و کرنش شکست کامپوزیت‌های مذکور ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، در کامپوزیت‌های آماده‌سازی‌شده با روش مکانیکی، تنش خمشی به صورت خطی متناسب با کرنش افزایش پیدا می‌کند. استحکام خمشی و کرنش شکست این نمونه‌ها به ترتیب برابر با 396 مگاپاسکال و 0.0092 می‌باشد. در ناحیه خطی رفتار خمشی نمونه‌های آماده‌سازی‌شده با روش مکانیکی به صورت الاستیک بوده و به دلیل پدیده تورق (جدایش) بین لایه آلومینیومی و لایه‌های کامپوزیتی، شکست در بالاترین حد تنش رخ می‌دهد. این نمونه‌ها دارای کمترین استحکام خمشی در مقایسه با نمونه‌های آماده‌سازی‌شده با دو روش دیگر می‌باشند. کامپوزیت‌های آماده‌سازی‌شده با عملیات قلیایی دارای رفتار خمشی مشابهی با نمونه‌های آماده‌سازی‌شده با روش مکانیکی هستند،

متشکل از ورق آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 و رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بافته‌شده بازالت می‌باشد.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

مواد مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها شامل ورق آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0.5 میلی‌متر، الیاف بافته‌شده بازالت و رزین اپوکسی اپون¹ 828 با هاردنر تتا²، از شرکت مواد مهندسی مکرر می‌باشد. نسبت وزنی رزین به هاردنر برابر 100 به 13 است.

2-2- آماده‌سازی سطحی آلومینیوم

قبل از لایه‌گذاری به منظور بهبود چسبندگی سطحی بین آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، عملیات آماده‌سازی سطحی بر روی آلیاژهای آلومینیوم انجام گرفت. به منظور بررسی تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی مکانیکی و شیمیایی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز، 3 روش مکانیکی، قلیایی و فرایند حکاکی با محلول سولفو کرومیک استفاده شد. جزئیات این فرایندها در جدول 1 آورده شده است. محلول سولفو کرومیک مطابق با استاندارد ASTM D2674، از مخلوط کردن دی‌کرومات سدیم و اسیدسولفوریک به دست آمد.

2-3- ساخت کامپوزیت‌های الیاف/فلز

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، کامپوزیت‌های الیاف/فلز در حالت قرارگیری نوع 2.1 (دو لایه آلومینیوم و یک بین‌لایه³ ساخته‌شده از 4 لایه رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت) در ابعاد 15×2.5 سانتی‌متر مربع با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. بعد از لایه‌گذاری، نمونه‌ها درون قالب گذاشته شده و سپس در حین فرایند پخت⁴ رزین اپوکسی، با استفاده از دستگاه پرس تحت فشار قرار گرفتند. فشار اعمالی موجب کاهش حباب‌های موجود در رزین و خارج شدن رزین اضافی می‌شود. شکل 2 نشان‌دهنده تصویری از قالب مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌های الیاف/فلز در این مطالعه می‌باشد.

2-4- بررسی میکروساختاری و مکانیکی

بعد از عملیات آماده‌سازی، بررسی مورفولوژی سطحی آلومینیوم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN انجام پذیرفت. آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه کوپا⁵ 10 تنی در دمای محیط، مطابق با استاندارد ASTM D790 انجام شد. استحکام خمشی نمونه‌ها نیز مطابق با این استاندارد و با توجه به رابطه 1 محاسبه شد:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

در رابطه (1)، σ_f استحکام خمشی (مگاپاسکال)، P بیشترین نیرو در منحنی‌های تنش-کرنش (نیوتن)، L طول نمونه طبق استاندارد خمش که بر روی فک‌های دستگاه قرار می‌گیرد (میلی‌متر)، b عرض نمونه (میلی‌متر) و d ضخامت نمونه (میلی‌متر) می‌باشد. همچنین مقادیر انرژی جذب‌شده با استفاده از اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی تنش-کرنش به دست آمد.

1 Epon

2 Tetra

3 Interlayer

4 Curing

5 Koopa

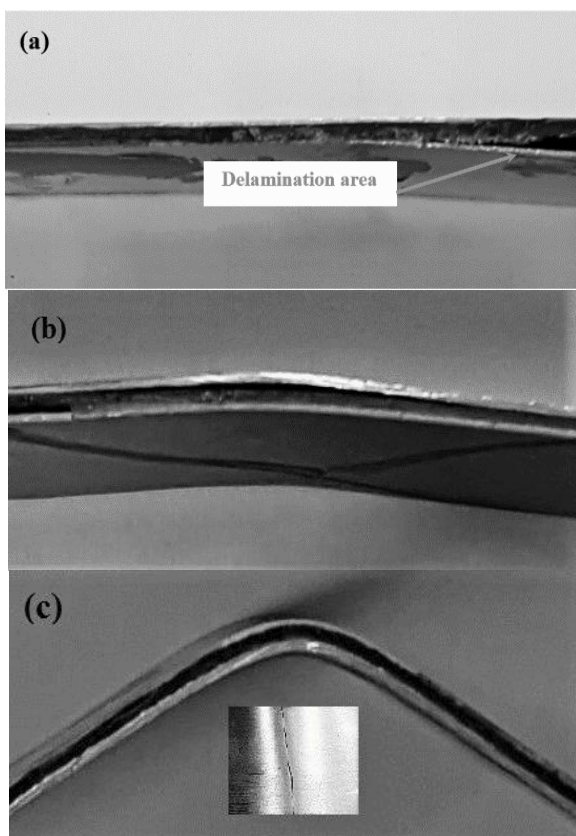


Fig. 4 Photograph of bending samples of basalt fiber metal laminates with a) mechanical treatment b) alkaline treatment and c) sulfochromic etch treatment

شکل 4 تصاویر نمونه‌های خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز با (الف) عملیات مکانیکی، (ب) عملیات قلیایی و (ج) عملیات حکاکی با محلول سولفوکرومیک

مقادیر انرژی جذب‌شده نمونه‌ها بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از مساحت زیر منحنی میانگین تنش-کرنش در شکل 5 ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، انرژی جذب‌شده نمونه‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفوکرومیک بسیار بالاتر از نمونه‌های مکانیکی و قلیایی می‌باشد. انرژی جذب‌شده نمونه‌ها با محلول سولفوکرومیک برابر با 25.42 ژول بر میلی‌مترمکعب می‌باشد که 12.5 برابر بیشتر از انرژی جذب‌شده نمونه‌های مکانیکی (2.02 ژول بر میلی‌متر مکعب) است.

شکل 6 نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی سطحی الیاف‌های آلومینیوم با عملیات سطحی متفاوت می‌باشد. مطابق با شکل 6-الف، آماده‌سازی سطحی با روش مکانیکی فقط موجب ایجاد زبری ماکرومتری بر روی سطح آلومینیوم می‌شود و با توجه به نتایج آزمون خمش می‌توان نتیجه گرفت که روش مکانیکی برای اتصال لایه فلزی و لایه پلیمری در کامپوزیت‌های الیاف/فلز مناسب نمی‌باشد.

با توجه به شکل 6-ب مشخص است که عملیات آماده‌سازی سطحی قلیایی به دلیل ایجاد لایه هیدروکسید آلومینیوم، موجب ایجاد یک ساختار پولکی شکل بر روی سطح می‌شود. رفتار بهتر نمونه‌های آماده‌سازی شده با روش قلیایی در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی، مرتبط با مورفولوژی سطحی آن می‌باشد، به طوری که این سطح دارای زبری میکرومتری بوده و در نتیجه ناحیه سطحی بیشتری را برای اتصال فراهم می‌کند و موجب بهبود مکانیزم قفل مکانیکی می‌شود.

اما این نمونه‌ها دارای استحکام خمشی و کرنش شکست به ترتیب برابر با 489 مگاپاسکال و 0.0146 می‌باشند، که این مقادیر در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی بالاتر است.

مطابق با نمودار شکل 3 و نتایج جدول 2، رفتار خمشی کامپوزیت‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفوکرومیک کاملاً متفاوت از نمونه‌های مکانیکی و قلیایی می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، این نمونه‌ها بعد از رسیدن به بیشینه تنش، قادر به تحمل این تنش تا حد بالایی از کرنش هستند. استحکام خمشی و کرنش شکست این نمونه‌ها به ترتیب برابر با 568 مگاپاسکال و 0.0532 می‌باشند. در مجموع، با مقایسه استحکام خمشی و کرنش شکست نمونه‌های با روش‌های آماده‌سازی سطحی مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حکاکی ورقه‌های آلومینیومی با محلول سولفوکرومیک موجب ایجاد چسبندگی عالی بین لایه آلومینیومی و لایه کامپوزیت پلیمری می‌شود.

تصاویر نمونه‌های مختلف بعد از تست خمش سه نقطه‌ای در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4-الف دیده می‌شود، نمونه‌های با عملیات سطحی مکانیکی تغییر شکل محدودی دارند و جدایش بین لایه‌های آن به وضوح قابل تشخیص است، که این نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف بین لایه‌های آن می‌باشد. همچنین تغییر شکل خمشی نمونه‌های با عملیات سطحی قلیایی بالاتر از نمونه‌های مکانیکی می‌باشد (شکل 4-ب). می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش قلیایی موجب چسبندگی بهتری در مقایسه با روش مکانیکی می‌شود. مطابق با شکل 4-ج، در نمونه‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفوکرومیک هیچ‌گونه تورق و یا ترک بین لایه‌های مشاهده نمی‌شود و شکست در این نمونه‌ها به دلیل ایجاد ترک در لایه پایینی آلومینیوم (که تحت کشش می‌باشد)، رخ می‌دهد.

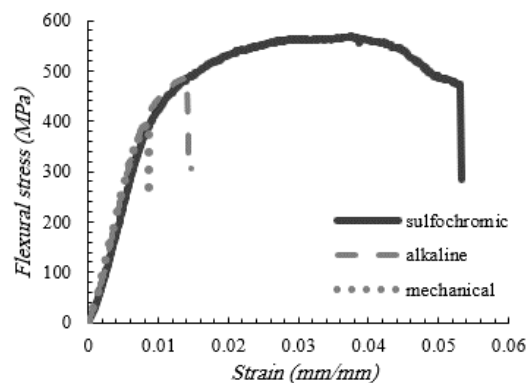


Fig. 3 Flexural stress-strain curves of fiber metal laminates with different surface treatment methods

شکل 3 منحنی‌های تنش-کرنش خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز با روش‌های عملیات آماده‌سازی مختلف

جدول 2 مقادیر استحکام خمشی و کرنش شکست کامپوزیت‌های الیاف/فلز

Table 2 Flexural strength and failure strain values of fiber metal laminates

نوع کامپوزیت الیاف/فلز	استحکام خمشی (مگاپاسکال)	درصد کرنش شکست
مکانیکی	396±4.1	0.92±0.02
قلیایی	498±6.4	1.46±0.12
سولفوکرومیک	568±20.1	5.32±0.23

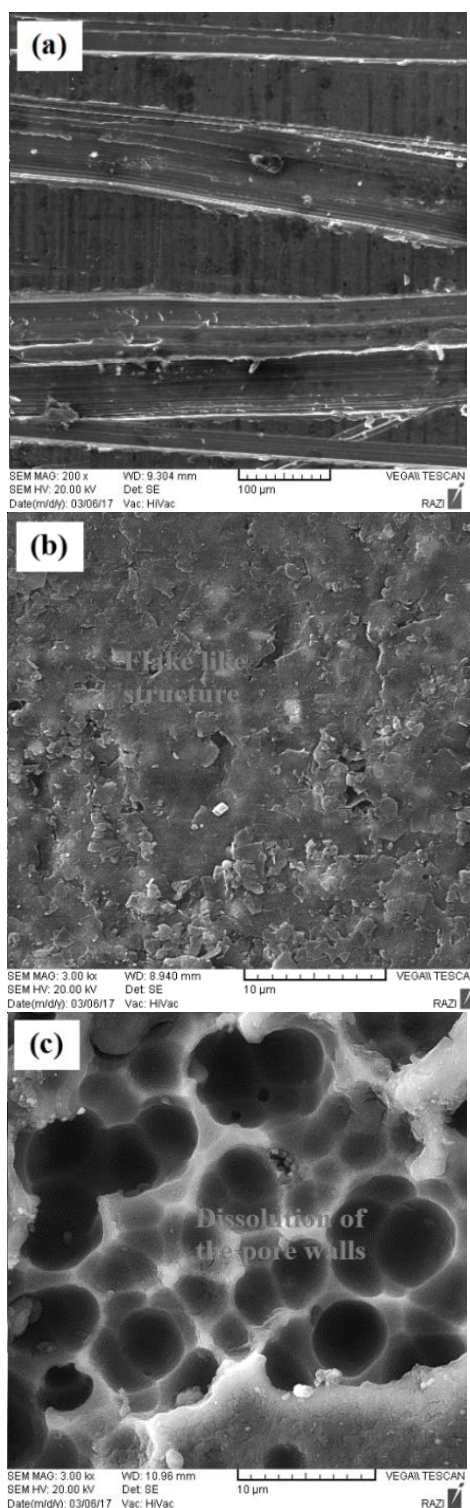


Fig. 6 The surface morphology of aluminum alloy after various surface (a) mechanical treatment, (b) alkaline treatment, (c) and (d) sulfochromic-etch treatment

شکل 6 مورفولوژی سطحی آلیاژ آلومینیوم بعد از عملیات سطحی متفاوت (الف) عملیات مکانیکی، (ب) عملیات قلیایی و (ج) عملیات حکاکی با محلول سولفوکرومیک

شکل 8 به صورت شماتیکی مورفولوژی سطحی آلومینیوم بعد از عملیات قلیایی و محلول سولفوکرومیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملیات قلیایی موجب ایجاد یک ساختار پولکی-شکل (تشکیل هیدروکسید آلومینیوم) بر روی سطح می‌شود، ولی عملیات حکاکی با محلول

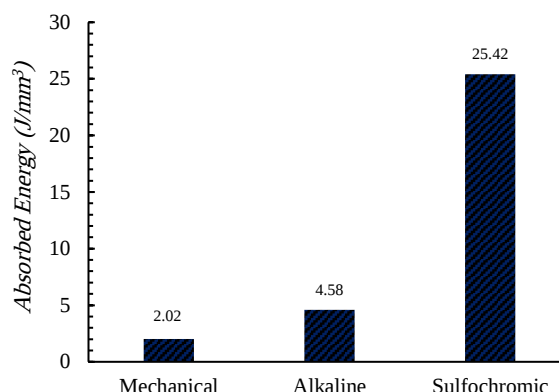
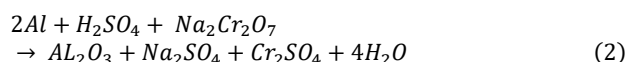


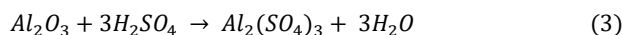
Fig. 5 Absorbed energy values of basalt fiber metal laminates

شکل 5 مقادیر انرژی جذب‌شده در کامپوزیت‌های الیاف/فلز

شکل 6-ج و 7 نشان‌دهنده سطح آلومینیوم بعد از عملیات حکاکی با محلول سولفوکرومیک با بزرگنمایی‌های مختلف می‌باشند. با توجه به معادله (2) مشخص است که در اثر واکنش محلول سولفوکرومیک با آلیاژ آلومینیوم، یک لایه اکسید آلومینیوم بر روی سطح تشکیل می‌شود:



همان‌طور که در معادله (3) بیان شده است، اکسید آلومینیوم تشکیل شده بر روی سطح در اثر واکنش با اسیدسولفوریک دچار انحلال می‌شود، ولی با توجه به آن که سرعت تشکیل اکسید آلومینیوم بالاتر از سرعت انحلال آن می‌باشد، بنابراین بر روی سطح یک لایه متخلخل اکسیدی باقی می‌ماند. هرچه سرعت انحلال لایه اکسیدی کمتر باشد، سطح آلومینیوم دارای حفرات منظم‌تری می‌باشد.



با توجه به شکل‌های 6-ج و 7 مشخص است که حفرات تشکیل‌شده بر روی سطح آلومینیوم دارای قطر میانگین 5 میکرومتر می‌باشند. همچنین مشخص است که در برخی از نواحی، به دلیل بالا بودن نرخ انحلال، دیواره بین حفرات دچار خوردگی شده است.

بهبود حاصل‌شده در خواص خمشی نمونه‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفوکرومیک در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی و قلیایی، مرتبط با تشکیل لایه اکسیدی بر روی سطح آن می‌باشد. لایه اکسید آلومینیوم که در حین عملیات آماده‌سازی با محلول سولفوکرومیک تشکیل می‌شود، دارای حفرات میکرومتری می‌باشد و این حفرات مکان مناسبی برای نفوذ رزین می‌باشند. پرشدن رزین اپوکسی درون این حفرات موجب ایجاد قفل‌های مکانیکی قوی بین آلومینیوم و لایه کامپوزیتی می‌شود، به طوری که بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای، پدیده جدایش مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که در شکل 6-ج نشان داده شده است، در اثر بالا بودن نرخ انحلال لایه اکسیدی، در برخی از نواحی، دیواره بین حفرات دچار خوردگی شده است، که این می‌تواند موجب تضعیف مکانیکی لایه آلومینیومی شود. بنابراین به نظر می‌رسد که، تغییر در پارامترهایی مانند زمان و دمای فرایند آماده‌سازی با محلول سولفوکرومیک، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/فلز را به سبب ایجاد حفرات مجزا از یکدیگر بر روی سطح، بهبود بخشد.

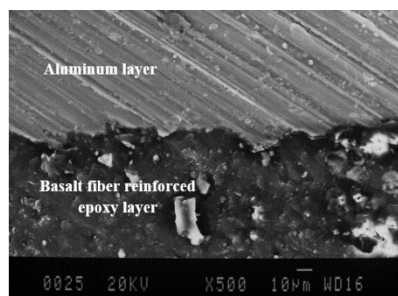


Fig. 9 SEM of the interface between aluminum layer and basalt fiber reinforced epoxy layer

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک بین لایه آلومینیومی و لایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت

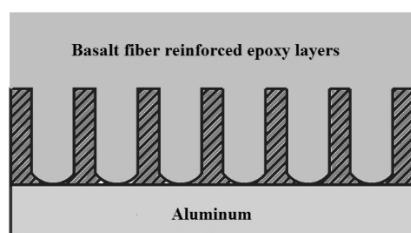


Fig. 10 Schematic illustration of penetration of the epoxy resin into the pores

شکل 10 نمایش شماتیکی از نفوذ رزین اپوکسی درون حفرات

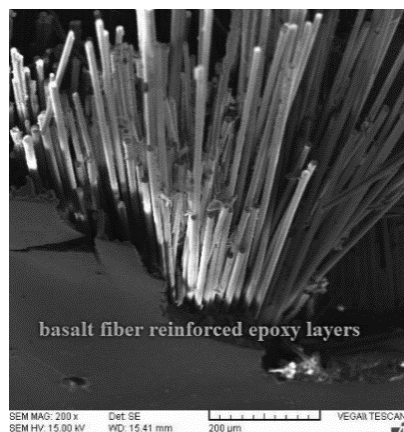


Fig. 11 SEM image of the fracture surface of basalt fibers/epoxy layers after flexural testing

شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست لایه‌های کامپوزیتی الیاف بازالت/اپوکسی بعد از آزمون خمشی

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز متشکل از ورق الیاف آلومینیوم 2024 و رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت بررسی شد. روش‌های آماده‌سازی سطحی شامل عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک، عملیات قلیایی و عملیات مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه‌های آماده‌سازی شده با روش مکانیکی، ضعیف‌ترین رفتار خمشی را از خود نشان می‌دهند، به طوری که نمونه بعد از تغییر شکل محدودی دچار تورق می‌شوند. نمونه‌های آماده‌سازی شده با روش قلیایی نسبت به نمونه‌های مکانیکی رفتار خمشی بهتری از خود نشان می‌دهند، اما رفتار کلی آن‌ها مشابه با نمونه‌های مکانیکی می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت

سولفو کرومیک موجب ایجاد یک ساختار متخلخل اکسیدی بر روی سطح می‌شود که از حفرات منظم و دیواره زبر بین حفرات تشکیل شده است. این ساختار متخلخل عملکرد بهتری در مقایسه با ساختار پولکی شکل در چسبندگی بین لایه‌ها ایفا می‌کند.

شکل 8 نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری در نمونه آماده‌سازی‌شده با محلول حکاکی سولفو کرومیک می‌باشد. مطابق با این شکل، چسبندگی قوی بین لایه آلومینیومی و لایه کامپوزیتی برقرار است و همان‌طور که مشخص است هیچ گونه ترک، حفره و یا فاصله‌ای بین این دو لایه وجود ندارد و مکانیزم قفل مکانیکی به وضوح قابل تشخیص می‌باشد. شکل 10 نیز، نشان‌دهنده شکل شماتیکی از نفوذ رزین اپوکسی درون حفرات موجود بر سطح آلومینیوم و همچنین پیوند قوی بین لایه‌ها از طریق مکانیزم قفل مکانیکی می‌باشد.

همچنین، شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست لایه‌های کامپوزیتی الیاف بازالت/اپوکسی بعد از آزمون خمشی را نشان می‌دهد.

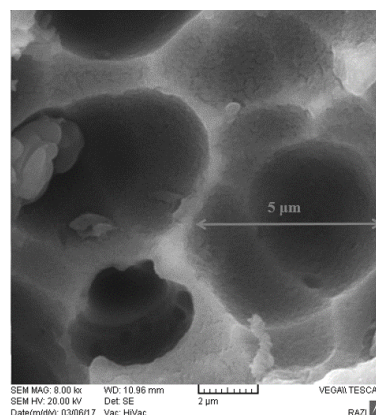


Fig. 7 The surface morphology of aluminum alloy after sulfochromic-etch treatment

شکل 7 مورفولوژی سطحی الیاف آلومینیوم بعد از عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک

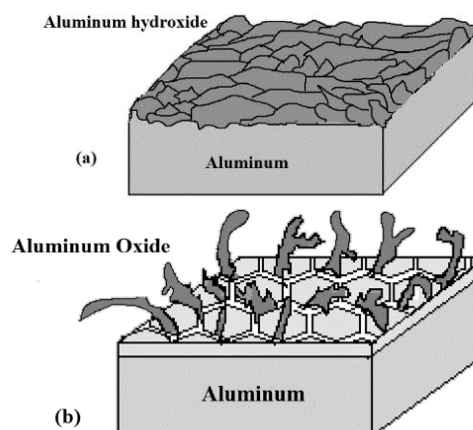


Fig. 8 Schematic illustration of surface morphology of aluminum after a) alkaline treatment and b) sulfochromic etch treatment

شکل 8 نمایش شماتیکی مورفولوژی سطحی آلومینیوم بعد از (الف) عملیات قلیایی و (ب) عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک

- [11] Ostapiuk, M. Surowska, B. and Bieniaś, J., "Interface Analysis of Fiber Metal Laminates" *Composite Interfaces*, Vol. 21, No. 4, pp. 309-318, 2013.
- [12] Mohamad, M. Marzuki, H. F. A. Bakar, S. N. A. Abdullah, A. N. Ubaidillah, E. A. E. Abidin, M. F. Z. and Omar, S., "Effect of Anodizing Electrolyte for Structural Adhesives Bonding Study of Aluminium-Carbon Laminates Composites" *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol. 10, pp. 2091-2101, 2014.
- [13] Khalili, S. M. R. Daghigh, V. and Eslami Farsani, R., "Mechanical Behavior of Basalt Fiber-Reinforced and Basalt Fiber Metal Laminate Composites under Tensile and Bending Loads" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 8, pp. 647-659, 2011.
- [14] Ferrante, L. Sarasini, F. Tirillò, J. Lampani, L. Valente, T. and Gaudenzi, P., "Low Velocity Impact Response of Basalt-Aluminium Fibre Metal Laminates" *Materials & Design*, Vol. 98, pp. 98-107, 2016.

که عملیات آماده‌سازی با محلول حکاکی سولفوکرومیک موجب بهبود چشمگیری در رفتار خمشی نسبت به نمونه‌های مکانیکی و قلیایی می‌شود. استحکام خمشی این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های مکانیکی 43 درصد افزایش پیدا کرده است و کرنش شکست نسبت به نمونه‌های مکانیکی 6 برابر افزایش پیدا کرده است. این تفاوت در رفتار مکانیکی نمونه‌ها می‌تواند در اثر تفاوت در مورفولوژی سطحی لایه آلومینیومی باشد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده این است که سطح آلومینیوم بعد از عملیات مکانیکی فقط دارای زبری ماکرومتری بوده که موجب پیوند ضعیف بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی شده است. بهبود خواص خمشی نمونه‌های قلیایی در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی می‌تواند به دلیل مورفولوژی پولکی شکل تشکیل شده بر روی سطح آن باشد که موجب ایجاد قفل‌های مکانیکی بین لایه‌ها شده است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حکاکی با محلول سولفوکرومیک موجب تشکیل یک لایه اکسیدی متخلخل بر روی سطح می‌شود. حفرات تشکیل شده بر روی سطح آلومینیوم به عنوان مکانی مناسب برای پر شدن توسط رزین اپوکسی محسوب می‌شوند، به طوری که بعد از اتمام فرایند پخت، چسبندگی قوی بین لایه‌ها برقرار می‌شود و در این نمونه‌ها تورق مشاهده نمی‌شود. این دلایل موجب شده که انرژی جذب‌شده نمونه آماده‌سازی شده با محلول سولفوکرومیک 12.5 برابر بیشتر از نمونه مکانیکی باشد.

5- مراجع

- [1] Sinmazçelik, T. Avcu, E. Bora, M. Ö. and Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods" *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] Chai, G. B. and Manikandan, P., "Low Velocity Impact Response of Fibre-Metal Laminates – a Review" *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 363-381, 2014.
- [3] Sadighi, M. Alderliesten, R. C. and Benedictus, R., "Impact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review" *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 49, pp. 77-90, 2012.
- [4] Ostapiuk, M. Surowska, B. and Bieniaś, J., "Interface Analysis of Fiber Metal Laminates" *Composite Interfaces*, pp. 309-318, 2014.
- [5] Zarei, H. Fallah, M. Minak, G. Bisadi, H. and Daneshmehr, A., "Low Velocity Impact Analysis of Fiber Metal Laminates (FMLs) in Thermal Environments with Various Boundary Conditions" *Composite Structures*, Vol. 149, pp. 170-183, 2016.
- [6] Gan, Y. X., "Effect of Interface Structure on Mechanical Properties of Advanced Composite Materials" *Int J Mol Sci*, Vol. 10, No. 12, pp. 5115-34, Nov 25, 2009.
- [7] Botelho, E. C. Silva, R. A. Pardini, L. C. and Rezende, M. C., "Evaluation of Adhesion of Continuous Fiber-Epoxy Composite/Aluminum Laminates" *J. Adhesion Sci. Technol*, Vol. 18, pp. 1799-1813, 2004.
- [8] Mohamad, M. Marzuki, H. F. A. Ubaidillah, E. A. E. Abidin, M. F. Z. Omar, S. and Rozi, I. M., "Effect of Surface Roughness on Mechanical Properties of Aluminium-Carbon Laminates Composites" *Advanced Materials Research*, Vol. 879, pp. 51-57, 2014.
- [9] Ardakani, M. A. Khatibi, A. A. and Ghazavi, S. A., "A Study on the Manufacturing of Glass-Fiber-Reinforced Aluminum Laminates and the Effect of Interfacial Adhesive Bonding on the Impact Behavior", *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition*, June 2-5, 2008.
- [10] Lawcock, G. Ye, L. Wing Mai, Y. and Teh Sun, C., "The Effect of Adhesive Bonding between Aluminum and Composite Prepreg on the Mechanical Properties of Carbon-FiberreinforcedMetal Laminates" *Composites Science and Technology*, Vol. 57, pp. 35-45, 1997.



بررسی اثر زمان بر رفتار ترمیمی کامپوزیت اپوکسی- الیاف شیشه خودترمیم حاوی میکروکانال‌های آوندی در شرایط بارگذاری‌های خمشی و کششی

محمد امین محمدی¹، محمدرضا باب الحوائجی¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، محمدرضا زمانی³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 19991-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 96/10/02	وقوع آسیب امری اجتناب‌ناپذیر در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است. آسیب‌ها در این کامپوزیت‌ها به صورت تورق، ترک‌های سطحی، ترک‌ها در زمینه‌ی پلیمر و غیره می‌باشند. وجود سیستم‌های خودترمیم از طریق جلوگیری از رشد آسیب‌ها موجب افزایش عمر کاری سازه می‌شود. در تحقیق حاضر، یک کامپوزیت زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده اپوکسی- الیاف شیشه مبتنی بر میکروکانال‌های آوندی ساخته شده و بر روی تعمیر سازه از طریق انتقال مواد ترمیمی تمرکز شده است. ساخت نمونه‌ها با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی و ساخت کانال‌های میکروآوندی از طریق ایجاد پیش‌شکل‌های جامد و سپس حذف آن‌ها صورت گرفت. از آنجایی که یک عامل مهم برای ترمیم موثر این سازه‌ها پس از ایجاد آسیب، سیالیت بالا و امتزاج‌پذیری مناسب در محل آسیب می‌باشد، لذا از سیستم رزین و هاردنر انیدریدی در این تحقیق به عنوان عامل ترمیم‌کننده استفاده شد که سیالیت بالاتری را نسبت به رزین و هاردنرهای آمینی دارند. هدف از پژوهش حاضر بررسی زمان مطلوب ترمیم جهت بدست آوردن راندمان ترمیم بهینه سیستم است. بدین منظور کانال‌های میکروآوندی با یک درصد حجمی ثابت (4٪) در ساختار کامپوزیت تعبیه شدند. خواص خمشی و کششی نمونه‌ها با گذشت زمان‌های مختلف (صفر، 4، 7 و 11 روز) پس از ایجاد آسیب اولیه به وسیله خمش، مورد بررسی قرار گرفتند. پس از شکست و ایجاد عیب در ساختار، مواد ترمیمی موجود در میکروکانال‌ها به محل ترک جریان یافته و با گذشت زمان، عملیات پلیمریزاسیون و ترمیم مجدد سازه تکمیل شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار بازیابی استحکام خمشی و کششی به ترتیب به میزان 59.07 درصد و 68.05 درصد برای نمونه حاوی 4 درصد حجمی ماده ترمیمی با گذشت 7 روز پس از ایجاد آسیب اولیه حاصل می‌شود.

Effect of time on healing behavior of microvascular channels based self-healing E-glass fibers/epoxy composite under flexural and tensile loadings condition

M. A. Mohammadi¹, M. R. Babolhavaeji¹, R. Eslami-Farsani^{1*}, M. R. Zamani²

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- School of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Polymer composite
Self-healing
Microvascular channels
Flexural strength
Tensile strength
Healing time

Abstract

The occurrence of damage is an unavoidable fact in fiber reinforced polymer composites. Damage modes in polymer composites are delamination, surface cracking, polymer matrix cracking, etc. The presence of self-healing systems could extend the service life time of structure via preventing of damage growth. In this study, a self-healing E-glass fibers/epoxy composite based on micro-vascular channels has been fabricated and focused on the repair of the structure through the delivery of self-healing agents. The specimens were fabricated by hand lay-up route, while the fabrication of microvascular channels was conducted through creating solid preforms and then removing them. Since an important factor for effective healing of these structures after damage creation is high fluidity and suitable miscibility in the damage area, so in the present work, anhydride resin-hardener system was used because of the higher fluidity in comparison to the amine resin-hardener systems. The aim of this study is to investigate the role of healing time for achieve of system optimum healing efficiency. To do so, microvascular channels with a constant volume fraction (4%) were incorporated in the structure of composites. The flexural and tensile behaviors of the specimens were assessed during the different time span (0, 4, 7 and 11 days) from the primary damage creation through bending method. After damage creation and break, healing agents present in the microvascular channels flowed in the damage area and over a time span local polymerization process and restoring of structure were completed. The results showed that, the highest flexural and tensile strength recovery was obtained 59.07% and 68.05% for the specimen with 4% healing agent after 7 days from initial damage creation.

1-مقدمه

اتمسفری مختلف، کاربردهای گوناگونی را در وسایل نقلیه (ماشین، سفینه‌های فضایی، کشتی و غیره)، کالاهای ورزشی، صنایع ساختمانی و الکترونیک دارند. با وجود تمام این مزیت‌ها، بشر هنگام استفاده از این مواد با

پلیمرها و سازه‌های کامپوزیتی به دلیل خواص منحصر به فردشان از جمله استحکام و مدول ویژه بالا، فرآیندپذیری خوب و پایداری شیمیایی در شرایط

Please cite this article using:

Mohammadi, M. A. Babolhavaeji, M. R. Eslami-Farsani, and R. Zamani, M. R., "Effect of time on healing behavior of microvascular channels based self-healing E-glass fibers/epoxy composite under flexural and tensile loadings condition", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 503-510, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

[8]. در ادامه، نوریس و همکارانش [9] از لوله‌های شیشه‌ای با قطر 0.5 میلیمتر در کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن استفاده کردند تا ساختاری با دو خاصیت خودترمیمی و سنجش آسیب را داشته باشند. زمان آسیب، میکروتُرک بین کانال‌ها با فشار متفاوت قرار گرفته و باعث تغییر در فشار میکروکانال‌ها می‌شود. این تغییر در فشار باعث می‌شود که مواد خودترمیم به محل ترک منتقل شوند. آن‌ها پس از این روش به ۹۴ درصد بازبازی در استحکام پس از ضربه دست یافتند.

بیلا و همکارانش [10] اولین بار از الیاف شیشه‌ای توخالی با قطر خارجی 15 میکرون و قطر داخلی 5 میکرون به عنوان میکروکانال جهت ذخیره‌ی مواد ترمیمی استفاده کردند. آن‌ها قابلیت پرکردن تنها نیمی از الیاف توخالی به علت قطر داخلی کم الیاف و رزین با ویسکوزیته بالا را داشتند. این پر کردن الیاف به صورت جزئی باعث شد که انتقال رزین به ناحیه آسیب دیده، ناکامل باشد و در نتیجه‌ی آن ترمیم ماده هنگام آزمون فشار پس از ضربه محدودیت داشته باشد. تراسک و ویلیامز [11-14] با هدف توسعه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده حاوی الیاف شیشه توخالی برای کاربردهای هوافضایی اقدام به بررسی بازده ترمیم در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن-اپوکسی و الیاف شیشه-اپوکسی تحت آزمون‌های خمش چهارنقطه‌ای و فشار پس از ضربه نمودند و به ترتیب به بازده ترمیم 97 و 100 درصد رسیدند.

همیلتون و همکارانش [15] از الیاف نایلون با قطر ۲۸۰ میکرون به عنوان یک پیش‌شکل جامد قابل برداشتن جهت ایجاد سیستم میکروآوندی بهره گرفتند. در ادامه‌ی تحقیقات، آن‌ها اثر پمپاژ برای انتقال پرفشار مواد خودترمیم در شبکه‌های آوندی را بررسی کرده و نتایج مطلوبی در این ارتباط حاصل شد. وو و همکارانش [16]، تک رشته‌های تریلن برای تولید شبکه‌های میکروآوندی با کانال‌های مستقیم حاوی نانولوله‌های کربنی را بکار بردند. آن‌ها از این شبکه‌ها جهت ذخیره عامل ترمیمی و انتقال آن‌ها به محل ترک استفاده کردند.

تراسک و باند [17] شبکه‌های آوندی را در کامپوزیت‌های الیاف کربن به وسیله‌ی ذوب آلیاژ لحیم دما پایین ایجاد کردند. دمای ذوب به اندازه‌ای بود که آلیاژ به راحتی خارج شود و پخت کامپوزیت نیز اتفاق بیافتد. نتایج نشان داد که استحکام فشاری پس از ضربه کامپوزیت به مقدار ۷۰ درصد کاهش یافته است. در ادامه نوریس و همکارانش [18] فعالیت ترسک و باند را گسترش دادند و با اعمال مواد خودترمیم در داخل میکروکانال‌ها توانستند استحکام پس از ضربه در کامپوزیت را تا 97 درصد بازبازی کنند.

در ادامه‌ی تحقیقات پیشین، هدف از پژوهش حاضر، بررسی زمان ترمیم مناسب جهت دستیابی به بیشترین بازدهی ترمیمی با استفاده از مواد ترمیمی انیدریدی با سیالیت بالا در کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف شیشه حاوی میکروکانال‌های آوندی تحت آزمون‌های کشش و خمش است. در این کامپوزیت‌ها از پیش شکل‌های جامد قابل حذف برای ایجاد میکروکانال‌های یک‌بعدی جهت ذخیره‌ی عوامل ترمیمی درون ساختار کامپوزیت استفاده شده است.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین اپوکسی بیسفنول اف ML-506 و هاردنر پلی‌آمین HA-11 (ساخت شرکت مواد مهندسی مکرر) به عنوان فاز زمینه و از پارچه الیاف شیشه دوجهته نوع E با دانسیته سطحی 400 g/m^2 محصول شرکت

عیوب مختلفی روبه‌رو است که این عیوب می‌توانند ناشی از رفتار مکانیکی، شیمیایی، حرارتی، تشعشعات ماورای بنفش یا ترکیبی از این موارد باشند [1]. یکی از این عیوب رایج، حضور میکروتُرک‌ها در سازه می‌باشد که با ادامه‌ی روند بارگذاری روی سازه، این میکروتُرک‌ها به هم می‌پیوندند و باعث انهدام و شکست قطعه می‌شوند. جهت جلوگیری از انهدام سازه‌ی مورد نظر ابتدا نیاز به تشخیص محل آسیب توسط بازرسی‌های معمول و نهایتاً تعمیر و یا تعویض سازه با یک سازه جدید می‌باشد. از آنجایی که تشخیص محل آسیب و همچنین تعمیر و تعویض آن زمان‌بر و پرهزینه خواهد بود، لذا می‌توان از کامپوزیت‌هایی استفاده کرد که قابلیت ترمیم به صورت خود به خودی را داشته باشند. این گونه از کامپوزیت‌ها تحت عنوان کامپوزیت‌های خودترمیم شناخته می‌شوند. کامپوزیت‌های دارای خاصیت خودترمیمی می‌توانند منجر به افزایش اطمینان خاطر بابت ترمیم درجای محل آسیب، کاهش هزینه و صرفه‌جویی در زمان ترمیم شوند [2].

به طور کلی دو نوع سیستم خودترمیم در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری وجود دارد. سیستم‌های خودترمیم ذاتی و غیرذاتی که در سیستم‌های خودترمیم ذاتی، بازبازی خواص مواد و ترمیم در اثر عواملی همچون واکنش‌های برگشت‌پذیر، نفوذ مولکولی و یا زوج شدن یونومرها به وجود می‌آید. در سیستم‌های غیرذاتی عوامل ترمیم توسط یک عامل خارجی ذخیره شده و پس از ایجاد آسیب به محل ترک جریان می‌یابند. روش میکروکپسول و استفاده از کانال‌های میکروآوندی جز روش‌های غیرذاتی بوده که جهت ذخیره عوامل ترمیم درون کامپوزیت استفاده می‌شوند. در روش استفاده از میکروکپسول‌ها، کپسول‌ها با عامل خودترمیمی پر شده و در ابعاد میکرو ساخته می‌شوند. با ایجاد ترک جداره کپسول‌ها شکسته شده و عامل ترمیم که به شکل مایع است، توسط نیروی موئینگی به محل ترک جاری می‌شود. سپس مایع آزاد شده در مجاورت کاتالیزوری که از قبل در محیط پراکنده شده است پلیمریزه شده و شکاف را ترمیم می‌کند [3]. روش دیگر خودترمیمی غیرذاتی، روش استفاده از کانال‌های میکروآوندی است که می‌توان با الگوبرداری از این سیستم‌های عروقی در بدن موجودات (سیستم‌های زیستی)، جهت ایجاد مواد مرکب خودترمیم (سیستم‌های سنتزی) استفاده کرد [4].

خودترمیمی به روش میکروآوندی برخلاف سایر روش‌ها، امکان رسانش پیوسته عامل ترمیمی به محل آسیب و ترمیم چندباره را فراهم می‌کند. در خودترمیمی به روش میکروآوندی عامل ترمیمی در کانال‌هایی توخالی قرار دارند که این کانال‌ها در یک تا سه بعد درون کامپوزیت می‌توانند تعبیه شوند. برخلاف سایر روش‌ها، در این روش به وسیله جریان نیمه پیوسته عامل ترمیمی در شبکه امکان ترمیم چندباره یک محل از کامپوزیت وجود دارد که این امر موجب جلوگیری از ایجاد ترک ثانویه در محل ترک اولیه خواهد شد [5].

جهت ایجاد کانال‌های میکروآوندی درون کامپوزیت‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که هر روش محدودیت‌های خودش را به لحاظ طراحی شبکه، ساده یا پیچیده، مجزا یا به هم پیوسته دارد [6]. در ابتدا، برای جهت استفاده از میکروکانال‌ها در نمونه‌های خودترمیم حاوی اپوکسی تلاش خود را انجام داد. او ابتدا لوله‌های پپت را به صورت جفت-جفت کنار هم قرار داد و در یک لوله رزین و در دیگری هاردنر تزریق کرد. سپس این نمونه‌ها تحت ضربه سرعت پایین قرار گرفتند و نمونه‌ی اپوکسی آسیب دید و لوله‌ها دچار شکست شدند. این امر باعث آن شد که محتویات درون لوله‌ها به محل ترک جریان پیدا کرده و باعث ترمیم و بهبود استحکام از دست رفته نمونه شوند

ثانیاً مواد ترمیمی به دلیل ویسکوزیته‌ای که دارند به زمان کافی جهت نفوذ توسط نیروی موئینگی به محل آسیب و همچنین ایجاد پیوند مجدد در محل آسیب نیازمندند.

2-3- ایجاد آسیب اولیه

از دستگاه خمش سه نقطه‌ای به منظور ایجاد آسیب نمونه‌های شاهد و همچنین نمونه‌های حاوی مواد خودترمیمی استفاده شد. ایجاد آسیب در نمونه‌ها با استفاده از خم کردن آن‌ها به میزان 8 میلی‌متر با نرخ بارگذاری 2 mm/min صورت گرفت. در شکل 2 مراحل انجام خمش سه نقطه‌ای و ایجاد آسیب در نمونه نشان داده شده است.

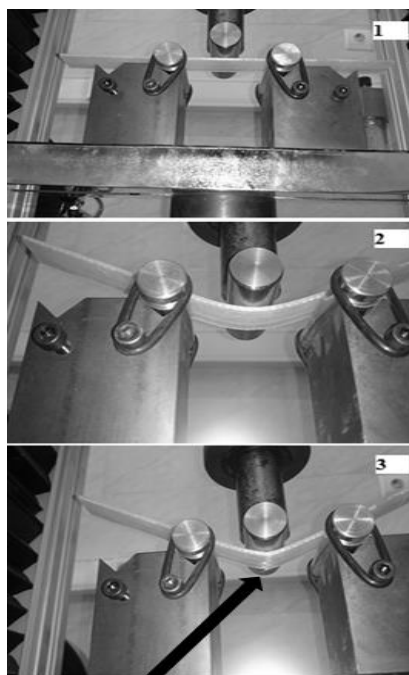
شکل 3 کامپوزیت حاوی میکروکانال‌های آوندی را در دو حالت قبل و پس از ایجاد آسیب، نشان می‌دهد. جهت تشخیص بهتر ناحیه‌ی آسیب دیده، مواد ترمیمی توسط مواد فلئوئورسانس ماورای بنفش رنگی شده‌اند.

2-4- آزمون خمش سه نقطه‌ای

برای بدست آوردن زمان ترمیم بهینه، نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب اولیه در چهار زمان مختلف (صفر، 4، 7 و 11 روز) تحت آزمون خمش مطابق استاندارد ASTM D790M قرار گرفتند. لازم به ذکر است که جهت صحت‌گذاری بر نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. آزمایش نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال مدل TB1 ساخت شرکت کوپا انجام شد. پس از آزمون خمش، نمودار نیرو-جابجایی برای هر یک از نمونه‌های ذکر شده بدست آمد. سپس محاسبه استحکام خمشی نمونه‌ها با توجه به استاندارد انجام شد.

2-5- آزمون کشش

برای به‌دست آوردن زمان ترمیم بهینه، نمونه‌ها پس از ایجاد آسیب در چهار زمان مختلف (0، 4، 7 و 11 روز) تحت آزمون کشش مطابق استاندارد شماره



Damage creation

Fig. 2 The initial damage process through 3- point bending method, 1) Before damage, 2) While damage creation, 3) Damage creation

شکل 2 مراحل ایجاد آسیب توسط خمش سه نقطه‌ای، (1) قبل ایجاد آسیب، (2) حین ایجاد آسیب، (3) ایجاد آسیب

لاینتکس چین به عنوان فاز تقویت‌کننده الیافی استفاده شد. همچنین از سیم‌های پلیمری با قطرهای 280 و 500 میکرون جهت ایجاد میکروکانال‌ها با کسر حجمی یکسان ماده ترمیمی در داخل ساختار کامپوزیت استفاده شد. عوامل ترمیم نیز شامل رزین اپوکسی بیسفنول اف ML-526 و هاردنر مالئیک انیدرید (محصول شرکت مواد مهندسی مکرر) بود که در میکروکانال‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- روش ساخت نمونه‌ها

ساخت کامپوزیت از طریق روش لایه‌گذاری دستی و ساخت کانال‌های میکروآوندی از طریق روش حذف پیش‌شکل‌های جامد انجام شد. ابتدا وزن مورد نیاز اپوکسی و هاردنر (با نسبت اختلاط 100 به 15) برای ساخت کامپوزیت 4 لایه (حاوی 30 درصد حجمی تقویت‌کننده) به دست آمد. همچنین سیم‌های پلیمری بین لایه‌های اول و دوم و همچنین لایه‌های سوم و چهارم پارچه الیاف شیشه قرار داده شدند.

در شکل 1 محل و موقعیت سیم‌های پلیمری جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل ساختار کامپوزیت نشان داده شده است. پس از این مراحل، مخلوط رزین و هاردنر روی الیاف تقویت‌کننده شیشه که پیش‌شکل‌های جامد در بین آن‌ها حضور داشتند، ریخته شد و زمان کافی جهت نفوذ رزین به تمامی لایه‌ها داده شد. از آنجایی که محبوس شدن هوا در داخل کامپوزیت در روش لایه‌گذاری دستی امری اجتناب ناپذیر است، لذا از پرس استاتیکی جهت نفوذ بهتر رزین و کاهش هوای محبوس شده در داخل کامپوزیت استفاده شد.

پس از پخت اولیه کامپوزیت به مدت 4 ساعت در دمای محیط، پیش‌شکل‌های جامد (سیم‌های پلیمری) از داخل کامپوزیت خارج شده و میکروکانال‌های توخالی جهت تزریق مواد خودترمیم در داخل ساختار باقی ماندند. کانال‌ها با رزین اپوکسی و هاردنر انیدریدی توسط سرنگ انسولین پر شدند. لازم به ذکر است که جهت مقایسه‌ی نتایج با یک مقدار مرجع، نمونه‌های شاهد (نمونه‌های بدون میکروکانال)، نیز مطابق روش فوق ساخته شدند. پس از شکست و ایجاد عیب در نمونه‌های خودترمیم، مواد ترمیمی موجود در میکروکانال‌ها به محل ترک جریان یافته و عملیات ترمیم سازه شروع می‌شود. در این پژوهش، چهار نمونه با درصد حجمی ثابت عوامل ترمیم (4%) و زمان‌های مختلف ترمیم (صفر، 4، 7 و 11 روز) جهت رسیدن به بالاترین راندمان ترمیم، پس از ایجاد آسیب اولیه با خمش مورد آزمایش قرار گرفتند. دلیل انتخاب این مدت زمان‌های ترمیم آن است که اولاً زمان پخت سیستم ترمیمی در این پژوهش 4 روز بود و لذا باید حداقل 4 روز برای مشاهده میزان استحکام بهبود یافته در نظر گرفته می‌شد.

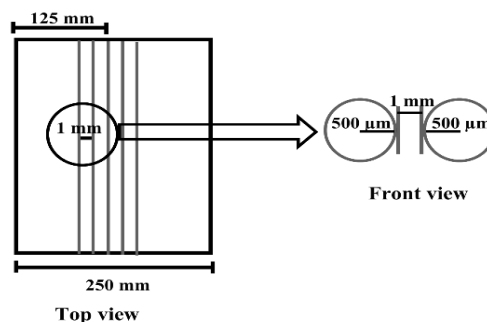


Fig. 1 The position of polymeric wires in specimens to create the microchannels

شکل 1 موقعیت سیم‌های پلیمری جهت ایجاد میکروکانال‌ها داخل نمونه‌ها

3-1-2- نمونه‌های خودترمیم

چهار نمونه با کسر حجمی یکسان ثابت مواد ترمیمی (4%) جهت بدست آوردن بهترین زمان ترمیم مورد آزمون خمش قرار گرفتند. با توجه به شکل 5، استحکام خمشی نمونه حاوی 4% عامل ترمیمی در بازه‌های صفر، 4، 7 و 11 روز پس از ایجاد آسیب به ترتیب 198، 253.14، 297.1 و 285.06 مگاپاسکال بدست آمد. با گذشت زمان از صفر روز به 4 روز نمونه ترمیم می‌شود، چرا که هنگام ایجاد آسیب در بین میکروکانال‌ها اختلاف فشار به وجود می‌آید و این اختلاف فشار و همچنین نیروی موئینگی باعث خروج عوامل ترمیم می‌شود. از آنجایی که 4 روز زمان کافی جهت خروج عوامل ترمیم و برقراری پیوند مجدد با زمینه نیست لذا در 4 روز، تنها ترمیم جزئی مناطق آسیب دیده مشاهده می‌شود و لذا حداکثر استحکام خمشی در این مدت زمان بدست نمی‌آید. با گذشت زمان، عوامل ترمیم فرصت لازم جهت نفوذ به مناطق آسیب دیده را پیدا می‌کنند، بنابراین در مدت زمان 7 و 11 روز وسعت ناحیه ترمیم بیشتر شده و حداکثر استحکام خمشی حاصل می‌شود.

3-2- نتایج آزمون کشش

3-2-1- نمونه‌های شاهد

در آزمون کشش بر روی نمونه‌های شاهد (نمونه‌ی بدون میکروکانال) مشابه آزمون خمش، دو نوع نمونه، یکی بدون ایجاد آسیب و دیگری با ایجاد آسیب تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند که در شکل 6، نمودار تنش- کرنش برای این نمونه‌ها آورده شده است. مطابق با نمودار شکل 6 و با استفاده از روابط مربوطه، استحکام کششی در نمونه‌ی بدون ایجاد آسیب 320.2 مگاپاسکال و در نمونه‌ی پس از ایجاد آسیب 160.5 مگاپاسکال بدست آمد.

3-2-2- نمونه‌های خودترمیم

چهار نمونه با کسر حجمی یکسان 4 درصد جهت به‌دست آوردن بهترین زمان ترمیم مورد آزمون کشش قرار گرفت.

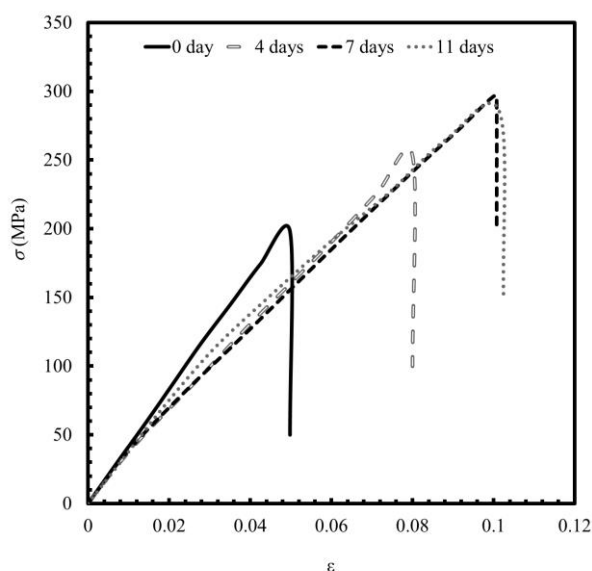


Fig. 5 The bending response of specimens with 4 vol% healing agent after 4 different healing time

شکل 5 رفتار خمشی نمونه حاوی 4 درصد حجمی عامل ترمیمی پس از گذشت چهار بازه زمانی مختلف پس از آسیب اولیه

ASTM D3039M قرار گرفتند. در این حالت نیز جهت صحت‌گذاری بر نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار شد. آزمایش نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال مدل TB1 ساخت شرکت کوپا انجام شد پس از آزمون کشش، نمودار نیرو- جابه‌جایی برای هر یک از نمونه‌های ذکر شده بدست آمد. سپس محاسبه استحکام کششی نمونه‌ها با توجه به استاندارد کشش انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمون خمش

3-1-1- نمونه‌ی شاهد

در ارتباط با نمونه‌های شاهد، دو نوع نمونه، یکی بدون ایجاد آسیب و دیگری با ایجاد آسیب تحت آزمون قرار گرفتند که در شکل 4، نمودار تنش بر حسب کرنش برای این نمونه‌ها آورده شده است. مطابق با نمودار شکل 4 و با استفاده از روابط مربوطه، استحکام خمشی در نمونه‌ی بدون ایجاد آسیب، 360 مگاپاسکال و در نمونه‌ی پس از ایجاد آسیب، 200 مگاپاسکال بدست آمد. این افت استحکام کاملاً طبیعی بوده چرا که آسیب اولیه توسط خمش صورت گرفته است و دو لایه‌ی پایینی و بالایی (لایه اول و چهارم) که به ترتیب تحت کشش و فشار می‌باشند، آسیب دیده‌اند.

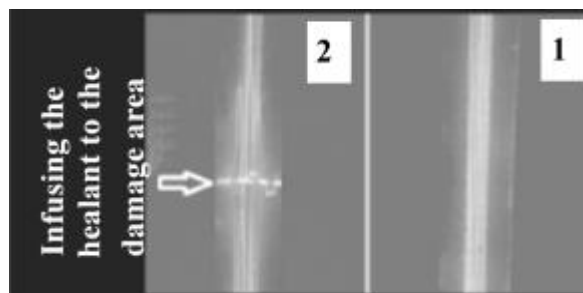


Fig. 3 Microvascular channels based composite under ultraviolet ray, 1) Before damage, 2) Infusing healant to the damage zones

شکل 3 کامپوزیت حاوی میکروکانال‌های آوندی زیر اشعه‌ی ماورای بنفش، 1) قبل آسیب، 2) نفوذ عوامل ترمیم به مناطق آسیب دیده

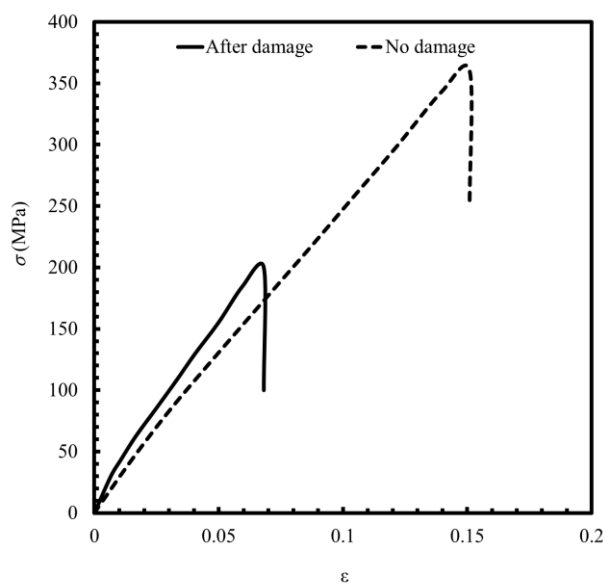


Fig. 4 Flexural strength of after damage case and no damage specimens case

شکل 4 استحکام خمشی نمونه‌ی شاهد در دو حالت بدون آسیب و پس از ایجاد آسیب

3-3-2- مقایسه نمونه‌های خودترمیم با نمونه‌های شاهد

به طور کلی استحکام نمونه‌های خودترمیم (حاوی میکروکانال‌های آوندی) در مقایسه با نمونه‌های شاهد (بدون میکروکانال‌های آوندی) در هر دو حالت خمش و کشش به علت گسستگی در آرایش و چیدمان لایه‌ها کمتر است [19]. همچنین با مقایسه نمونه‌های شاهد و خودترمیم در هر دو حالت خمش و کشش می‌توان به این نکته پی برد که حضور میکروکانال‌ها در بین لایه‌های کامپوزیت باعث به وجود آمدن تمرکز تنش شدیدتر اطراف میکروکانال‌ها می‌شود. این تنش‌های شدید به علت پیدایش پدیده موجدار شدن لایه‌ها¹ و ایجاد ناپیوستگی در ساختار، باعث به وجود آمدن نواحی غنی از رزین² می‌شوند و این نواحی به علت عدم وجود تقویت کننده باعث می‌شوند که ظرفیت تحمل بار کامپوزیت کاهش یابد. مسئله‌ی دیگری که مطرح است بحث استحکام برشی بین لایه‌ای³ هنگام ایجاد آسیب می‌باشد. استحکام برشی بین لایه‌ای به حضور جاهای خالی بین لایه‌ای، حفره‌ها و یا عیوبی که حین مراحل ساخت کامپوزیت ایجاد می‌شوند، حساس است. با توجه به این موضوع، میکروکانال‌ها به عنوان حفره‌های بین لایه‌ای عمل می‌کنند و به طور قابل توجهی استحکام برشی بین لایه‌ای را کاهش می‌دهند [20]. پس به طور کلی میکروکانال‌ها باعث افت خواص به مقدار جزئی می‌شوند، ولی از طرف دیگر، میکروکانال‌های حاوی عوامل ترمیمی این قابلیت را دارند تا آسیب ایجاد شده در سازه را ترمیم کرده و در نهایت از انهدام سازه جلوگیری به عمل بیاورند. بدین منظور لازم است تا راندمان ترمیم در هر دو حالت خمش و کشش محاسبه شود. برای محاسبه میزان بازدهی فرآیند ترمیم (η)، از رابطه (1) استفاده شده است [2]:

$$\eta = \frac{f_{healed} - f_{damaged}}{f_{virgin} - f_{damaged}} \quad (1)$$

که در این رابطه f بیانگر خاصیت مورد اندازه‌گیری است و اندیس‌های virgin, damaged و healed به ترتیب بیان‌گر نمونه‌های دست نخورده (نمونه‌های حاوی میکروکانال و آسیب ندیده)، نمونه‌های آسیب دیده و نمونه‌های ترمیم شده می‌باشند. با توجه به رابطه 1، بازده ترمیم برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد که در نمودار شکل 8 نشان داده شده است. مطابق این نمودار، پس از ایجاد آسیب در مدت زمان‌های مختلف ترمیم از صفر به 11 روز، روند صعودی افزایش استحکام و بهبود خواص مکانیکی وجود دارد، به طوری که در 4 روز، کمترین نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب و در نهایت کمترین راندمان ترمیم به میزان 56% و 38% به ترتیب در هر دو حالت کشش و خمش بدست آمده است. اما در مدت زمان 7 روز، بیشترین نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب و نهایتاً بیشترین راندمان ترمیم به میزان 68.05% و 59.07% به ترتیب در هر دو حالت کشش و خمش مشاهده شده است. همچنین زمان بیشتر (11 روز) تأثیری در نفوذ بیشتر عوامل ترمیم و نهایتاً افزایش راندمان ترمیم در مقایسه با 7 روز نداشته است. نتایج استریو موجود در شکل 9، صحت نتایج بدست آمده را تایید می‌کند. با توجه به شکل 9 مشخص است که بعد از 4 روز از ایجاد آسیب اولیه، نفوذ عوامل ترمیم در نواحی نزدیک به میکروکانال‌ها اتفاق افتاده است و نواحی دورتر، ترمیم نشده‌اند، اما وقتی زمان ترمیم بیشتر شود (7 روز)، نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب بیشتر شده و این عوامل ترمیم با خیس کردن کامل محل ترک باعث ترمیم سازه و حذف ترک‌های ایجاد شده می‌شوند.

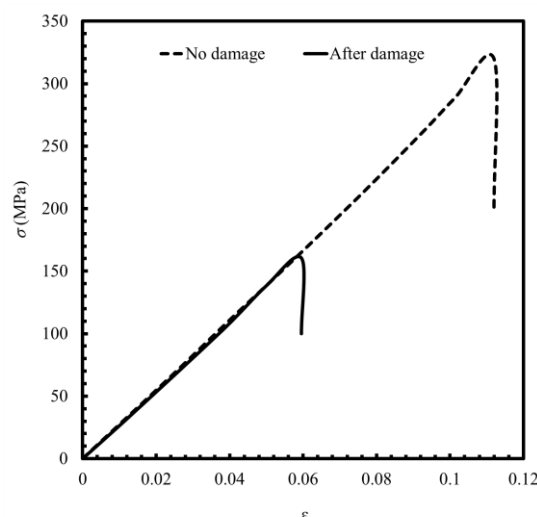


Fig. 6 Tensile strength of after damage and no damage specimens

شکل 6 استحکام کششی نمونه‌ی شاهد در دو حالت بدون آسیب و پس از ایجاد آسیب

با توجه به شکل 7، استحکام کششی نمونه حاوی 4 درصد حجمی ماده ترمیمی در بازه‌های صفر، 4 و 7 و 11 روز پس از ایجاد آسیب به ترتیب 149.7، 241.05، 261.6 و 261 مگاپاسکال به دست آمد. با گذشت زمان، نمونه ترمیم می‌شود و پس از گذشت 7 روز به حداکثر استحکام کششی 261.6 مگاپاسکال می‌رسد. دلیل روند صعودی افزایش استحکام با گذشت زمان، آزاد شدن عوامل ترمیم و جاری شدن آن‌ها به محل ترک توسط نیروی موئینگی و ایجاد پیوند با زمینه است. همچنین در اثر گذشت زمان، پخت کامل عوامل ترمیم و نفوذ زنجیره‌های مولکولی در هم اتفاق افتاده است که خود باعث افزایش استحکام می‌شود. با توجه به نمودار شکل 7 می‌توان مشاهده کرد که پخت تقریباً کامل رزین در زمان 7 روز اتفاق افتاده است و زمان بیشتر تأثیر زیادی بر ترمیم ندارد. پخت کامل عوامل ترمیم بعد از 7 روز نه تنها بیشترین استحکام را در پی دارد، بلکه باعث افزایش انرژی لازم تا شکست کامپوزیت می‌شود.

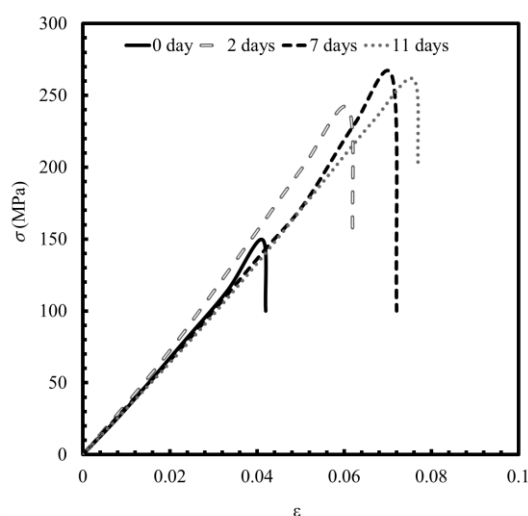


Fig. 7 Tensile strength of specimens with 4 vol.% healing agent after 4 different healing time

شکل 7 استحکام خمشی نمونه حاوی 4 درصد حجمی عامل ترمیمی پس از گذشت چهار بازه زمانی مختلف پس از آسیب

¹ Wavy plies² Resin rich³ Interlaminar shear strength

- با مقایسه زمان‌های ترمیم 4، 7 و 11 روز پس از آسیب اولیه، بهینه‌ترین زمان ترمیم کامپوزیت به ازای 7 روز بدست آمد.
- بیشترین مقدار بازیابی در استحکام خمشی و استحکام کششی کامپوزیت بعد از گذشت 7 روز از ایجاد آسیب اولیه حاصل شد.
- بازده ترمیم بهینه در آزمون‌های خمش و کشش به ترتیب به میزان 59.07 و 68.05 درصد بعد از گذشت 7 روز از ایجاد آسیب اولیه بدست آمد.

مراجع

- [1] Wu, D. Y., Meure, S. and Solomon, D., "Self-healing Polymeric Materials: A review of Recent Developments" Progress in Polymer Science, Vol. 33, No. 5, pp. 479-522, 2008.
- [2] Kaufmann, M., Zenkert, D., Mattei, C., "Cost Optimization of Composite Aircraft Structures Including Variable Laminate Qualities", Composite Science and Technology, Vol. 68, pp. 2748-2754, 2008.
- [3] Emami, M., Aram, E., Mahdavian, A., "Smart Polymers: Self Healing Polymers", Scientific Quarterly, Vol. 1, pp. 27-38, 1392. (in Persian)
- [4] White, S. R., Blaiszik, B. J., Kramer, S., Olugebefola, S. C., Moore, J. S. and Sottos, N. R., "Self-healing Polymers and Composites", American Science, Vol. 99, No. 5, pp. 392-399, 2011.
- [5] Blaiszik, B., Self-Healing Polymers and Composites, Annual Review of Materials Research, Vol. 40, pp. 179-211, 2010.
- [6] Saeed, M. U., Chen, Z. and Li, B., "Manufacturing Strategies For Microvascular Polymeric Composites: A review", Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 78, pp. 327-340, 2015.
- [7] Dry, C., "Procedures Developed for Self-Repair of Polymer Matrix Composite Materials", Composite Structures, Vol. 35, No. 3, pp. 263-269, 1996.
- [8] Dry, C. M., "Self-Repairing Reinforced Matrix Materials", US Pat. 6,261,360, 2001.
- [9] Norris, C. J., White, J. A. P., McCombe, G., Chatterjee, P., Bond, I. P., Trask, R. S., "Autonomous Stimulus Triggered Self-Healing in Smart Structural Composites", Smart Materials and Structures, Vol. 21, pp. 1-10, 2012.
- [10] Bleay, S. M., Loader, C. B., Hawyes, V. J., Humberstone, L., Curtis, P. T., "A Smart Repair System for Polymer Matrix Composites", Composites Part A, Vol. 32, No. 12, pp. 1767-1776, 2001.
- [11] Trask, R. S., Bond, I. P., "Biomimetic Self-Healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibres", Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 704-710, 2006.
- [12] Trask, R. S., Williams, G. J., Bond, I. P., "Bioinspired Self-Healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibres", Journal of Royal Society Interface, Vol. 4, pp. 363-371, 2007.
- [13] Williams, G., Trask, R. and Bond, I., "A Self-Healing Carbon Fibre Reinforced Polymer for Aerospace Applications", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 6, pp. 1525-1532, 2007.
- [14] Williams, G. J., Bond, I. P., Trask, R. S., "Compression After Impact Assessment of Self-Healing CFRP", Composites: Part A, Vol. 40, pp. 1399-1406, 2009.
- [15] Hamilton, A. R., Sottos, N. R., White, S. R., "Pressurized Vascular Systems for Self-Healing Materials", Journal of Royal Society Interface, Vol. 9, pp. 1020-1028, 2012.
- [16] Wu, A. S., Coppola, A. M., Sinnott, M. J., Chou, T.W., Thostenson, E. T., Byun, J. H., "Sensing of Damage and Healing in Three-Dimensional Braided Composites with Vascular Channels Composite Science and Technology, Vol. 72, No. 13, pp. 1618-1626, 2012.

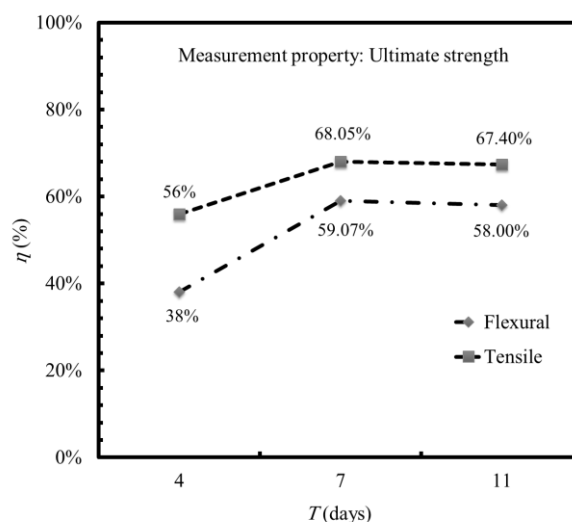


Fig. 8 The relation between healing efficiency and healing time.

شکل 8 ارتباط بین زمان ترمیم و بازده ترمیم در حالت کشش و خمش

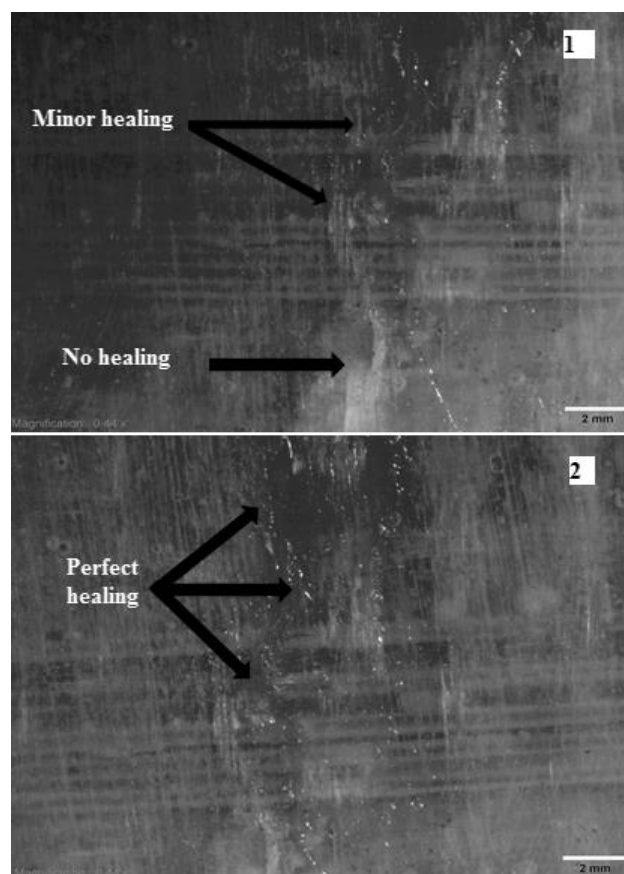


Fig. 9 Flowing of healing agent after, 1) 4 days, 2) 7 days

شکل 9 نفوذ عوامل ترمیم به محل آسیب بعد از، 1) 4 روز، 2) 7 روز

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر زمان بر رفتار ترمیمی کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه خودترمیم حاوی میکروکانال‌های آوندی در شرایط بارگذاری‌های خمشی و کششی بررسی شد. نتایج نهایی حاصل از این پژوهش به شرح ذیل است:

- [17] Trask, R. S., Bond, I. P., "Bioinspired Engineering Study of Plantae Vascules for Self-Healing Composite Structures", Journal of Royal Society Interface, Vol. 7, pp. 921-931, 2010.
- [18] Norris, C. J., Meadway, G. J., O'Sullivan, M. J., Bond, I. P., Trask, R. S. "Self-Healing Fibre Reinforced Composites Via a Bioinspired Vasculature", Advanced Functional Materials, vol. 21, pp. 3624-33, 2011.
- [19] Eslami-Farsani, R., Sari, A., Khosravi, H., "Mechanical properties of carbon fibers/epoxy composite containing anhydride self-healing material under transverse loading", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, pp. 285-290, 2017. (in Persian)
- [20] Muhammad-Umar, S., Li, B., Chen, Zh., "Mechanical Effects of Microchannels on Fiber-Reinforced Composite Structure", Composite Structures, Vol. 154, pp. 129-141, 2016.



مطالعه عددی اثر تقویت آهار الیاف شیشه توسط نانولوله‌های کربنی با توزیع تصادفی بر روی خواص مکانیکی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

احسان حیاتی¹، مجید صفرآبادی^{2*}، مهدی مقیمی زند³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، msafarabadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 98/03/01

پذیرش: 98/08/06

کلید واژگان:

تحلیل المان محدود

آهار

فاز مشترک

مدول الاستیسیته عرضی

استحکام کششی عرضی

چکیده

در این مطالعه، اثر تقویت مکانیکی آهار الیاف شیشه بر روی خواص مکانیکی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، به جهت تأثیر زیاد این ناحیه بر روی خواص مکانیکی کلی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، بررسی شده است. برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، به ترتیب یک المان حجمی نماینده و یک مدل سه‌بعدی پوسته در نرم‌افزار تجاری آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. خواص مکانیکی آهار به صورت ناهمگن و غیریکنواخت در طول ضخامت آن در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، تقویت آهار با استفاده از یک روش توزیع تصادفی و استفاده از نانولوله‌های کربنی انجام گرفته است. در این شبیه‌سازی، طول، قطر و کسر حجمی‌های مختلف برای نانولوله‌های کربنی در تقویت آهار در نظر گرفته شده است و سپس نتایج مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی موجود، نشان می‌دهد که شبیه‌سازی آهار با خواص مکانیکی غیریکنواخت نسبت به آهار با خواص مکانیکی ثابت، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. همچنین، نشان داده شده است که افزایش طول نانولوله‌های کربنی و یا کاهش قطر آن‌ها، که در آهار توزیع شده‌اند، باعث بهبود مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌شود.

Numerical study of the effect of glass fiber sizing reinforcement by randomly distributed CNTs on the glass/epoxy composite transverse mechanical properties

Ehsan Hayati, Majid Safarabadi*, Mahdi Moghimi-Zand

1- School of mechanical engineering, College of engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

Keywords

Finite Element Analysis
Sizing
Interphase
Transverse elastic modulus
Transverse tensile strength

Abstract

In this study, the effect of mechanical reinforcement of glass fiber sizing on the transverse mechanical properties of the glass/epoxy composite, due to the significant impact of this region on the overall mechanical properties of reinforced composites with fibers, has been investigated. To predict the transverse elastic modulus and tensile strength of the glass/epoxy composite, a representative volume element (RVE) and a three-dimensional shell model are simulated respectively, in ABAQUS commercial software. Sizing mechanical properties are held non-homogeneous and non-uniform along its thickness in the simulation. Furthermore, sizing reinforcement is done by a Random-Distribution method using carbon nanotubes (CNTs). Different lengths, diameters and, volume fractions are considered for the CNTs in sizing reinforcement in this simulation, and then the results are compared. The comparison between the results obtained from simulation and available experimental data illustrates that the sizing simulated by non-uniform mechanical properties provides more precise results than the sizing assumed by constant mechanical properties. Also, it is shown that increasing in CNTs length or decreasing in their diameter, which are distributed in sizing, would lead to improving the transverse elastic modulus and tensile strength of the glass/epoxy composite.

1- مقدمه

لوله‌های کربنی که این نانو لوله‌های کربنی به آهار الیاف افزوده شده است ضروری می‌باشد.

در این مطالعه، اولاً، با شبیه‌سازی عددی یک المان حجمی نماینده سه-بعدی در محیط نرم‌افزار تجاری آباکوس، متشکل از دو استوانه هم‌مرکز و یک مکعب، به نحوی که دو استوانه درون مکعب قرار گرفته و هر سه هم‌مرکز می‌باشند؛ در گام نخست، تأثیر خواص مکانیکی ناهمگن نسبت به حالت همگن برای آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/پوکسی مورد بررسی قرار گرفته و در گام بعد، اثرات کسر حجمی، طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به‌صورت تصادفی در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/پوکسی بررسی شده است. دوماً، برای بررسی اثرات کسر حجمی، طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به‌صورت تصادفی در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی استحکام عرضی کامپوزیت شیشه/پوکسی از یک مدل سه‌بعدی پوسته⁴ استفاده شده است. لازم به ذکر است که منظور از آهار در شبیه‌سازی، همان فاز مشترک است.

2- المان حجمی نماینده سه‌بعدی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته عرضی

برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/پوکسی به‌صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، دو استوانه و یک مکعب، به نحوی که دو استوانه درون مکعب قرار گرفته و هر سه هم‌مرکز می‌باشند، به‌عنوان المان حجمی نماینده در نظر گرفته شده است (شکل 1).

المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده از سه جزء اصلی تشکیل شده است. این اجزاء از داخلی‌ترین به بیرونی‌ترین جزء نمایانگر الیاف، آهار و ماتریس می‌باشند. جداول 1 و 2 به ترتیب ابعاد و خواص مکانیکی در نظر گرفته شده برای این اجزاء در تحلیل عددی انجام گرفته را ارائه می‌دهند.

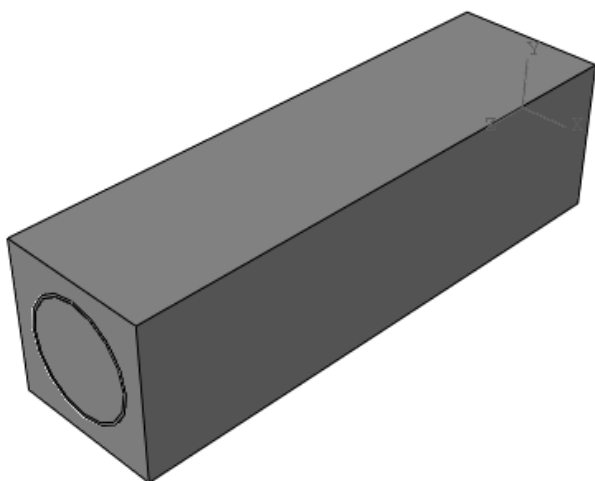


Fig. 1 Simulated RVE to determine the transverse elastic modulus

شکل 1 المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده برای تعیین مدول الاستیسیته عرضی

سه نوع رایج از ماده خام نانولوله کربنی¹ شامل نانولوله‌های کربنی تک‌جداره²، نانولوله‌های کربنی چندجداره³ و نانو الیاف‌های کربنی⁴ می‌باشند [1]. خواص مکانیکی این نانوذرات شامل مدول الاستیسیته، استحکام کششی و نسبت منظر (نسبت طول به قطر) بالا در کنار رسانایی الکتریکی و گرمایی [2]، علاقه به این مواد را در افزودن آن‌ها به دو جزء اصلی تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌ها شامل ماتریس و آهار، به‌جهت بهبود عملکرد مکانیکی کلی کامپوزیت‌ها افزایش داده است [3-5] (منظور از آهار پوشش الیاف در حین ساخت است).

با توجه به خواص متفاوت آهار نسبت به ماتریس و الیاف تقویت‌کننده و نقش آن در انتقال تنش از ماتریس به الیاف [6-7]، مطالعات آزمایشگاهی بسیاری بر روی افزودن این نانوذرات در آهار انجام گرفته است [7-9]. نتایج تجربی نشان داده است که افزودن این نانوذرات به آهار می‌تواند باعث افزایش اصطکاک و درگیری مکانیکی بین الیاف و ماتریس شده و لذا جدایش بین این دو را بعد از ایجاد ترک در فاز مشترک سخت‌تر کند و درواقع انرژی شکست در این ناحیه را افزایش دهد (منظور از فاز مشترک ناحیه فازی بین الیاف و ماتریس پس از ساخت کامپوزیت است). علاوه بر این، افزایش استحکام برشی درون لایه‌ای، افزایش مقاومت نسبت به سایش و غیره از دیگر مزیت‌های افزودن این نانوذرات به آهار است. بنابراین، به‌جای استفاده از این نانوذرات در تقویت ماتریس پلیمری، می‌توان از مقادیر بسیار کمتر از آن در آهار استفاده کرد و حتی نتایج بهتری را مشاهده کرد چراکه اساساً اولین آسیب‌ها در فاز مشترک به وجود می‌آیند و رفته‌رفته به نقاط مختلف کامپوزیت انتشار می‌یابند. بنابراین، با تقویت این ناحیه می‌توان قبل از انتشار آسیب به زمینه در برابر آن مقاومت کرد.

با توجه به اهمیت افزودن نانو لوله‌های کربنی در آهار، می‌توان از شبیه‌سازی عددی و با استفاده از روش المان محدود برای پیش‌بینی خواص و رفتار کلی کامپوزیت‌هایی که آهار الیاف آنها با استفاده از نانو لوله‌های کربنی تقویت شده است کمک گرفت. زیرا هر تغییری در پارامترهای نانو لوله‌های کربنی (شامل طول، قطر و کسر حجمی) که به آهار افزوده می‌شوند، بصورت آزمایشگاهی نیازمند اندازه‌گیری‌های اضافی برای تعیین رفتار کلی سازه و یا نمونه ماکروسکوپی است، که این عمل همراه با صرف هزینه و زمان می‌باشد. در همین راستا با مروری بر مطالعات عددی پیشین [10-12]، که به بررسی اثرات جهت‌گیری، قطر، طول و کسر حجمی نانوذرات بر روی خواص مکانیکی و همچنین خواص حرارتی نانو کامپوزیت‌ها پرداخته‌اند، مشاهده می‌شود که در این مطالعات با استفاده از چندین نوع المان حجمی نماینده⁵ و با استفاده از روش المان محدود، تنها خواص مکانیکی و حرارتی نانو کامپوزیت‌های دو فاز، متشکل از یک فاز تقویت‌شونده و یک فاز تقویت‌کننده که نانوذرات می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. هر چند، در برخی مطالعات عددی دیگر [13-14]، از این نانو ذرات در نانو کامپوزیت‌های سه‌فاز، متشکل از الیاف، ماتریس و نانو لوله‌های کربنی استفاده شده است اما در این مطالعات نیز تنها اثر افزودن نانو لوله‌های کربنی در ماتریس، بر روی رفتار کلی کامپوزیت بررسی شده است و اثر افزودن این نانو ذرات در آهار بر روی رفتار کلی کامپوزیت مشاهده نمی‌شود. بنابراین، تجزیه و تحلیل عددی و به‌ویژه تکنیک‌های میکرومکانیکی برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های چهار فاز، متشکل از الیاف، آهار، ماتریس و نانو

⁴ CNFs
⁵ RVE
⁶ Shell

¹ CNT
² SWCNTs
³ MWCNTs

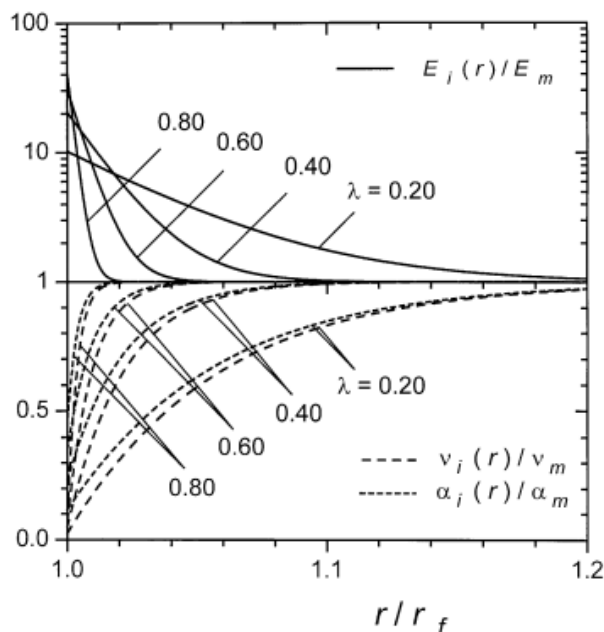


Fig. 2 Material properties variations in the sizing region [17]

شکل 2 تغییرات خواص ماده در ناحیه آهار [17]

همچنین، برای اختصاص دادن مدول الاستیسیته به آهار (به‌عنوان یک خاصیت غیرخطی در طول ضخامت آهار) در آباکوس، در ابتدا، هندسه آهار در طول ضخامت آن پارتیشن زده شده و به ترتیب به صورت 5، 10 و 15 قسمت با ضخامت ثابت در نظر گرفته شده است. سپس، با توجه به تعداد قسمت‌ها در هر حالت، یک مقدار متوسط مدول الاستیسیته برای هر قسمت با استفاده از نمودار $\lambda=0.6$ در نظر گرفته شده است.

روش کار به این صورت بوده است که محور افقی نمودار $\lambda=0.6$ برابر با تعداد قسمت‌های آهار در هر حالت تقسیم شده و سپس مقدار میانگین مدول الاستیسیته برای هر قسمت یا توجه به مقادیر محور عمودی این نمودار محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مقدار مدول الاستیسیته آهار در جدول 2، برای حالتی گزارش شده است که آهار در طول ضخامت خود تنها به صورت یک قسمت در نظر گرفته شده است.

ریانو و همکاران [18] در مطالعه خود نشان دادند که تغییرات ضریب پواسون بین 0.2 تا 0.5 برای آهار تأثیر بسیار ناچیزی بر مدول الاستیسیته عرضی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی دارد. به همین دلیل در شبیه‌سازی حاضر مقدار ضریب پواسون برای کل ناحیه آهار برابر با 0.3 لحاظ شده است. در این شبیه‌سازی اتصال بین الیاف و آهار و همچنین اتصال بین آهار و ماتریس در المان حجمی نماینده به صورت کامل در نظر گرفته شده است، به این معنی که از شرط قید گره² استفاده شده است. شرایط مرزی و بارگذاری برای این المان حجمی نماینده در شکل 3 نمایش داده شده است. شرایط مرزی در این المان حجمی نماینده به گونه‌ای است که شرط تقارن³ برای تمامی سطوح به جز سطح اعمال نیرو لحاظ گردیده است. با توجه به اهمیت چگونگی مش‌ریزی بر روی المان حجمی نماینده و تأثیر مستقیم آن بر روی نتایج عددی، در این شبیه سازی ابتدا اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده (شامل الیاف، آهار و ماتریس) به گونه‌ای مناسب پارتیشن زده شدند و سپس اعمال مش و همچنین حساسیت مش انجام گرفت.

جدول 1 ابعاد اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده

Table 1 The RVE components dimensions

الیاف	آهار	ماتریس
شعاع	طول	اضلاع وجه مربعی
60 μm	60 μm	determined
40%	0.3 μm	60 μm

جدول 2 خواص مکانیکی اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده

Table 2 The RVE components mechanical properties [15,16]

جزء	نوع	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
الیاف	E glass 92145	73	0.25
آهار	556/917 A1128	52.7	0.3
ماتریس	Epon 828 (TETA hardner)	3.4	0.3

طول سه جزء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده پنج برابر قطر الیاف در نظر گرفته شده است (جدول 1). این انتخاب به این دلیل انجام گرفته است که طول بیشتر این اجزاء تنها حجم محاسبات را افزایش داده و تأثیر ناچیزی بر روی نتایج عددی خواهد داشت.

ضمناً، با توجه به کسر حجمی الیاف و همچنین ضخامت آهار، اندازه اضلاع وجه مربعی هندسه ماتریس در المان حجمی نماینده برابر با مقدار مشخصی به دست می‌آید.

در این مطالعه، برای تعیین ضخامت و خواص مکانیکی آهار از شکل 2 که توسط پاپانیوکولا و همکاران [17] ارائه گردیده است استفاده شده است.

در شکل 2، محور افقی نمایانگر نسبت شعاع خارجی آهار به شعاع الیاف و محور عمودی نمایانگر نسبت مدول الاستیسیته آهار به مدول الاستیسیته ماتریس می‌باشد. با توجه به مقدار راندمان اتصال¹ چهار نمودار ارائه گردیده است.

راندمان اتصال نشان دهنده میزان کیفیت چسبندگی آهار به الیاف است. نمودار $\lambda=0.80$ برای قوی‌ترین حالت و نمودار $\lambda=0.20$ برای ضعیف‌ترین حالت چسبندگی آهار و الیاف، با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی به دست آمده‌اند.

در این مرحله برای شبیه‌سازی هندسه آهار از نمودار $\lambda=0.60$ به جهت تطابق خوب نتایج، استفاده شده است. بنابراین مقدار شعاع خارجی هندسه آهار برابر با 6.3 μm (رابطه 1) به دست می‌آید. در نتیجه ضخامت آهار برابر با 0.3 μm محاسبه می‌گردد.

$$\frac{r_s}{r_f} = 1.05(\text{diagram : } \lambda = 0.6) \rightarrow r_s = 6.3 \mu\text{m} \quad (1)$$

¹ Bonding efficiency (λ)² Tie constraint³ Symmetry constraint

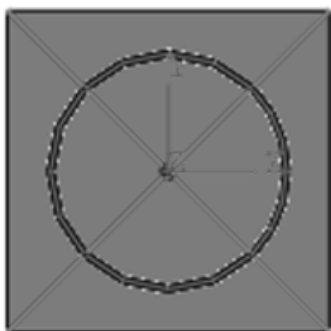


Fig. 4 Representation of the two fiber and matrix radial directions on the RVE

شکل 4 نمایش راستای شعاعی الیاف و ماتریس بر روی المان حجمی نماینده

در این شبیه‌سازی، المان‌ها از نوع المان هشت گره‌ای مکعبی شکل سه-بعدی با فرمول بندی کاهش یافته و با فرمولاسیون⁵ سی 3 دی 8 آر² می-باشند. همچنین، از بین دو نوع دسته هندسی³ یعنی درجه اول⁴ و درجه دوم⁵، درجه اول به دلیل زمان حل کوتاه‌تر و همگرایی مناسب نتایج مورد استفاده قرار گرفته است.

3- مدل سه‌بعدی پوسته برای پیش‌بینی استحکام کششی عرضی

برای پیش‌بینی استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به صورت عددی، نیاز است که از معیار تخریب هاشین در نرم‌افزار آباکوس استفاده گردد. با توجه به اینکه المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده برای تعیین مدول الاستیسیته عرضی از نوع توپر⁶ می‌باشد، نمی‌توان از معیار هاشین برای آن و در نتیجه تعیین استحکام کششی عرضی استفاده کرد. بنابراین، برای محاسبه استحکام کششی عرضی، تحلیلی بر پایه ماکرو مکانیک در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت. بدین صورت که یک مدل سه‌بعدی پوسته با لایه‌چینی 10 لایه 90 درجه (ضخامت کل 2mm) و ابعاد 90mm*25mm تحت بارگذاری کششی عرضی قرار گرفته است. شکل 6 مدل سه‌بعدی پوسته و همچنین شرایط مرزی آن را که به صورت⁷ متقارن در راستای طول پوسته⁷ شبیه‌سازی شده است نشان می‌دهد.



Fig. 6 Shell model along with its boundary and loading conditions

شکل 6 مدل پوسته به همراه شرایط مرزی و بارگذاری آن

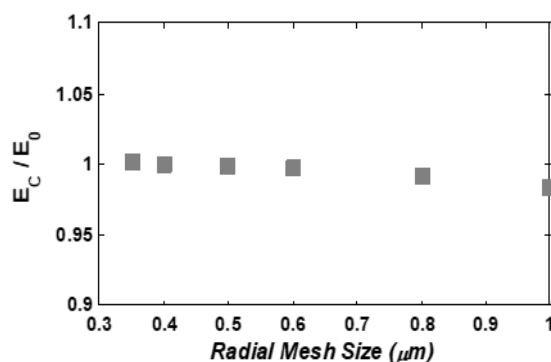


Fig. 5 Effect of mesh size in fiber and matrix radial directions on the numerical results

شکل 5 تأثیر اندازه مش در راستای شعاعی الیاف و ماتریس بر روی نتایج عددی

تغییر اندازه مش در راستای شعاعی (شکل 4) نسبت به راستای طولی و محیطی اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده، دارای حساسیت بیشتری بر روی نتایج عددی می‌باشد. از این رو، در شکل 5، تأثیر اندازه مش در راستای شعاعی دو جزء الیاف و ماتریس بر روی نتایج عددی نشان داده شده است. در ضمن، تعداد مش برای آهار در راستای شعاعی، متناسب با تعداد قسمت‌های آن در نظر گرفته شده است.

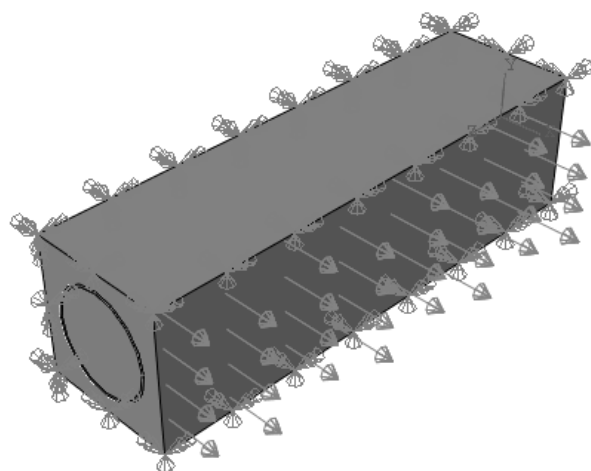


Fig. 3 Representation of the boundary and loading conditions on the RVE

شکل 3 نمایش شرایط مرزی و بارگذاری بر روی المان حجمی نماینده

شکل 5 نشان می‌دهد که حداقل اندازه مش 0.5 μm در راستای شعاعی المان حجمی نماینده برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر لازم است. در این شکل مدول الاستیسیته مرجع¹ نمایانگر مقدار همگرایی می‌باشد. تعداد مش کلی ریخته شده بر روی المان حجمی نماینده، در حالتی که آهار در راستای شعاعی به 15 قسمت تقسیم شده است، حدود 70000 المان می‌باشد.

⁵ Quadratic

⁶ Solid

⁷ XSymmetry

¹ E₀

² C3D8R

³ Geometric Order

⁴ Linear

جدول 5 مقادیر انرژی شکست در شبیه‌سازی [21]

Table 5 The fracture energy values in simulation [21]

$G_{m,c}$ (N/m)	$G_{m,c}$ (N/m)	$G_{f,c}$ (N/m)	$G_{f,c}$ (N/m)
1000	1000	12500	12500

نوع حلگر برای حل این مسئله از نوع دینامیک¹ می‌باشد. در نهایت پس از انجام حساسیت مش برای مدل سه‌بعدی پوسته نتایج گزارش شده‌اند. شکل 7، ضمن نمایش حساسیت مش انجام‌شده بر روی مدل سه‌بعدی پوسته نشان می‌دهد که حداقل اندازه مش کلی $0.6 \mu m$ برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر لازم است. در این شکل نیرو در لحظه شکست مرجع² نمایانگر مقدار همگرایی می‌باشد. تعداد مش کلی ریخته شده بر روی مدل سه‌بعدی پوسته حدود 10000 المان می‌باشد. همچنین، در این شبیه‌سازی المان‌ها از نوع المان چهار گره‌ای با فرمول‌بندی کاهش یافته و با فرمولاسیون³ اس 4 آر³ می‌باشند.

4-تقویت مکانیکی آهار

در این مطالعه برای تقویت مکانیکی آهار، خواص معادل آهار تقویت‌شده، با استفاده از روش توزیع تصادفی به دست آمده است و سپس این مقادیر برای ناحیه آهار، چه در المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده برای محاسبه مدول الاستیسیته عرضی و چه در روش ماکرومکانیک به کار گرفته شده برای محاسبه استحکام کششی عرضی مورد استفاده قرار گرفته است.

در روش توزیع تصادفی انجام‌گرفته، نانولوله‌های کربنی به‌صورت توپیر شبیه‌سازی شده‌اند. بنابراین، پیش از توضیح مراحل انجام‌گرفته در روش توزیع تصادفی، بیان نحوه شبیه‌سازی نانولوله‌های کربنی لازم به نظر می‌رسد.

4-1- معادل‌سازی نانولوله‌های کربنی توخالی به توپیر

ساختار یک نانولوله کربنی را می‌توان به‌صورت یک ورقه گرافین که به شکل یک استوانه درآمده است در نظر گرفت [10]. نانولوله‌های کربنی با توجه به تعداد دیواره‌هایشان به دو گروه نانولوله‌های کربنی تک جداره و نانولوله‌های کربنی چند جداره تقسیم می‌شوند. بنابراین، از آنجایی که این نانو ذرات به شکل استوانه‌های توخالی می‌باشند برای شبیه‌سازی آن‌ها به شکل استوانه توپیر نیاز به یک معادل‌سازی می‌باشد.

با فرض وجود نانولوله‌های کربنی چندجداره که انتقال بار از دیواره بیرونی به دیواره داخلی آن‌ها ناچیز است، تحمل بار تنها به‌وسیله دیواره بیرونی آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین برای معادل‌سازی این نانو ذرات توخالی به نانو ذرات توپیر (شکل 8)، می‌توان از رابطه 2 استفاده نمود [10].

$$E_{eqv} = \frac{4t}{D} E_{NT} \quad (2)$$

در این رابطه t و D به ترتیب ضخامت لایه بیرونی و قطر خارجی نانولوله کربنی هستند. همچنین eqv و NT به ترتیب به نانولوله و معادل آن اشاره دارند.

جدول 3 خواص مکانیکی معادل را برای هر یک از تک لایه‌های کامپوزیتی نشان می‌دهد. در این جدول به‌جز E_{22} [19] سایر خواص مکانیکی از میکرومکانیک به دست آمده‌اند. با توجه به اینکه داده‌های جدول 3 تقریباً با داده‌های موجود در مرجع [20] یکسان می‌باشند، لذا سایر خواص مکانیکی معادل برای تک‌لایه‌های کامپوزیتی که به‌جهت استفاده از معیار هاشین مورد نیاز می‌باشند از این مرجع مورد استفاده قرار گرفته است. جدول 4 این مقادیر را ارائه می‌دهد.

همچنین مقادیر انرژی شکست برای هر یک از تک لایه‌های کامپوزیتی در شبیه‌سازی به‌صورت جدول 5 در نظر گرفته شده است [21].

جدول 3 خواص مکانیکی برای هر تک لایه با استفاده از رویکرد میکرومکانیک

Table 3 Mechanical properties for a single layer using micromechanical approach

خاصیت	تعریف	مقدار
E_{11}	مدول الاستیسیته در جهت طولی	31.81 GPa
E_{22}	مدول الاستیسیته در جهت عرضی	9.05 GPa [24]
ν_{21}	ضریب پواسون	0.0797
G_{12}	مدول برشی درون صفحه	2.27 GPa

جدول 4 دیگر خواص مکانیکی برای هر تک لایه در شبیه‌سازی عددی [20]

Table 4 Other mechanical properties for a single layer in numerical simulation [20]

خاصیت	تعریف	مقدار
ρ	چگالی	1800 kg/m ³
G_{23}	مدول برشی برون صفحه	3 GPa
X_t	استحکام کششی طولی	798 MPa
X_c	استحکام فشاری طولی	480 MPa
Y_t	استحکام کششی عرضی	40 MPa
Y_c	استحکام فشاری عرضی	140 MPa
S_c	استحکام برشی درون صفحه	70 MPa

¹ Dynamic/Explicit² F_0 ³ S4R

بنابراین با توجه به طول نانولوله‌های کربنی در هر حالت، طول اضلاع مکعب مربع پنج برابر طول نانولوله‌های کربنی در نظر گرفته شده است. شکل 9، شبیه‌سازی انجام‌گرفته برای یکی از حالت‌ها را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی اتصال بین نانولوله‌های کربنی و محیط آهار به‌صورت کامل در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی در شکل 10 نمایش داده شده است.

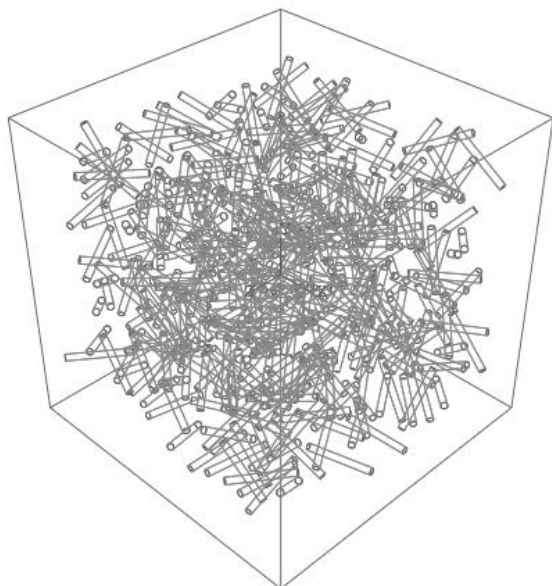


Fig. 9 Simulation of the CNTs random distribution in a region possessing the sizing mechanical properties

شکل 9 شبیه‌سازی توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی در ناحیه‌ای با خواص مکانیکی آهار

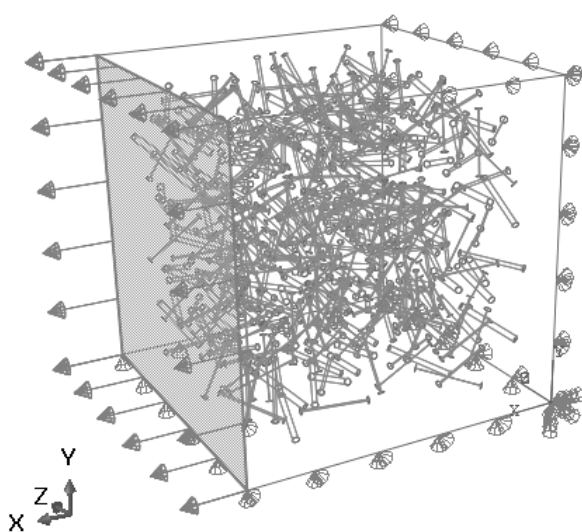


Fig. 10 Representation of the boundary and loading conditions for square-cube model

شکل 10 نمایش شرایط مرزی و بارگذاری برای مدل مکعب مربعی

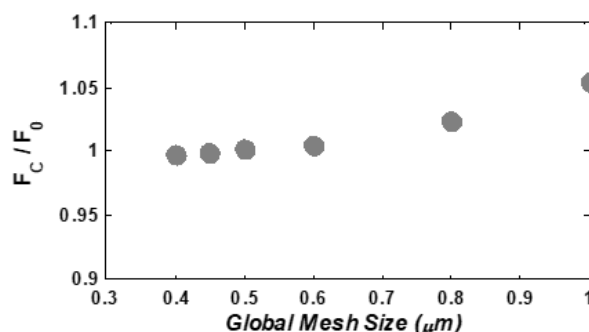


Fig. 7 Effect of overall mesh size on the numerical results

شکل 7 اثر اندازه مش کلی بر روی نتایج عددی

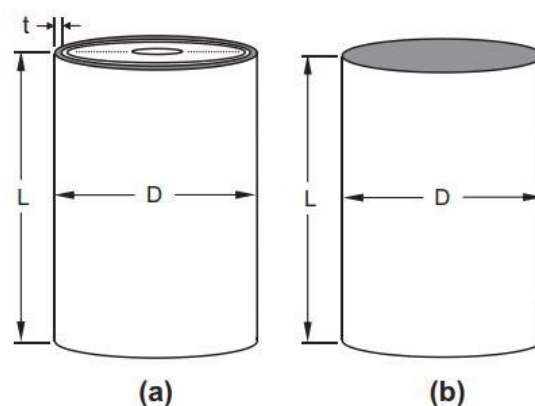


Fig. 8 Schematic of (a) MWNT and (b) equivalent solid fiber [10]

شکل 8 شماتیک (a) نانولوله کربنی چندجداره (b) الیاف توپر معادل [10]

بنابراین، در روش توزیع تصادفی انجام‌گرفته، تنها مدول الاستیسیته برای نانولوله‌های کربنی توپر با همان طول و قطر خارجی نانولوله‌های کربنی توخالی معادل‌سازی شده است.

4-2- روش توزیع تصادفی

در این روش، توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی در محیطی با خواص مکانیکی آهار در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. محیط در نظر گرفته‌شده به‌صورت یک مکعب مربع می‌باشد.

هر چه طول اضلاع مکعب مربع بیشتر باشد، توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی در این محیط به شکل مناسب‌تری اتفاق افتاده و نتایج عددی دقت بیشتری خواهند داشت. با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته در این مطالعه و همچنین مطالعات پیشین، مشاهده می‌شود که اگر طول اضلاع مکعب مربع، پنج برابر بزرگ‌ترین بعد نانولوله‌های کربنی (یعنی طول آن‌ها) در نظر گرفته شوند نتایج عددی از دقت خوبی برخوردار خواهند بود. مقادیر بیشتر از این برای اضلاع مکعب مربع، حجم محاسبات را بسیار افزایش داده و تأثیر ناچیزی بر روی نتایج خواهد داشت.

همچنین برای محاسبه استحکام کششی عرضی، با استفاده از خواص معادل آهار تقویت‌شده و روش میکرومکانیک می‌توان داده‌های موجود در جدول 3 را برای مدل سه‌بعدی پوسته در حالتی که تقویت آهار صورت گرفته است به دست آورد (تنها مقدار E22 از نتایج به‌دست‌آمده در همین شبیه‌سازی استفاده شده است). همان‌گونه که قبلاً بیان شد برای محاسبه استحکام کششی عرضی نیاز به داده‌هایی همانند جدول 4 برای حالتی که تقویت آهار صورت گرفته است می‌باشد.

با توجه به نوع آزمایش شبیه‌سازی‌شده در این مطالعه یعنی آزمایش کشش عرضی، نتایج عددی نشان می‌دهند که تنها اصلاح مقدار استحکام کششی عرضی² (از میان خواص مکانیکی در جدول 4) تک لایه با آهار تقویت نشده برای تک لایه با آهار تقویت‌شده، برای محاسبه استحکام نهایی کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با آهار تقویت‌شده کافی می‌باشد. بنابراین مقدار استحکام کششی عرضی برای تک لایه کامپوزیتی با آهار تقویت‌شده از رابطه 3 محاسبه می‌گردد و سایر خواص مکانیکی معادل، یکسان با مقادیر موجود در جدول 4 در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{Y_t}{E_{22t}}(Non - Reinf orced) = \frac{Y_t}{E_{22t}}(Reinf orced) \quad (3)$$

رابطه 3 به این دلیل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که مقادیر جابه‌جایی در لحظه شکست برای هر دو کامپوزیت شیشه/اپوکسی با و بدون تقویت آهار، همان‌گونه که نتایج عددی نشان می‌دهند یکسان است. لازم به ذکر است که مقادیر انرژی شکست برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالت تقویت آهار یکسان با مقادیر جدول 5 در نظر گرفته شده است.

6- مطالعه پارامتریک

در این مطالعه، هدف بررسی تأثیر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به‌صورت تصادفی در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدل الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌باشد. از این رو، ابعاد نانو ذرات کربنی در شبیه‌سازی مطابق با جداول 6 و 7 در نظر گرفته شده است. همچنین در بررسی انجام‌گرفته توزیع تصادفی نانو ذرات در کسرهای حجمی 1%، 2% و 3% انجام شده است.

باید در نظر داشت که ابعاد و همچنین کسرهای حجمی به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بررسی و شبیه‌سازی عملی آن در نرم‌افزار آباکوس مقدور بوده است. شکل 12، تعدادی از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته برای نانولوله‌های کربنی با طول‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول 6 طول‌های مختلف نانولوله‌های کربنی با قطر ثابت

Table 6 Different lengths of CNTs with constant diameter.

ثابت	قطر		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
10 nm	25 nm	50 nm	100 nm

² Y_t

شرایط مرزی به‌گونه‌ای است که سه وجه از وجوه مدل مکعب مربعی به‌صورت صفحات متقارن شبیه‌سازی شده‌اند و نقطه اشتراک این سه وجه به‌طور کامل پین شده است. همچنین، بارگذاری به گونه ایست که بر روی یک وجه کرنش یکنواخت اعمال شده است. در ضمن، سایر وجوه از هرگونه قید تنش و جابه‌جایی آزاد هستند [22].

درنهایت، مش اعمال‌شده بر روی مدل پس از انجام حساسیت مش به‌صورت شکل 11 می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهند که با کاهش اندازه مش ریخته شده بر روی دو انتهای دایروی نانولوله‌های کربنی توزیع شده در مکعب مربع، همگرایی نتایج اتفاق می‌افتد. بنابراین، حساسیت مش با توجه به حجم بالای محاسبات تا مرحله‌ای انجام شده است که اختلاف نتایج به کمتر از 3% کاهش یافته است.

در این شبیه‌سازی المان‌ها از نوع المان چهار وجهی هرمی شکل و با فرمولاسیون 'سی 3 دی 4' می‌باشند. همچنین، از بین دو نوع دسته هندسی یعنی درجه اول و درجه دوم، درجه اول مورد استفاده قرار گرفته است.

5- نحوه محاسبه مدول و استحکام کششی عرضی در حالت تقویت آهار

برای محاسبه مدول الاستیسیته عرضی در حالتی که تقویت آهار با استفاده از نانولوله‌های کربنی صورت گرفته است، کافی است خواص معادل آهار تقویت‌شده که با استفاده از روش توزیع تصادفی حاصل می‌شود برای ناحیه آهار در المان حجمی نماینده شبیه‌سازی‌شده مورد استفاده قرار گیرد.

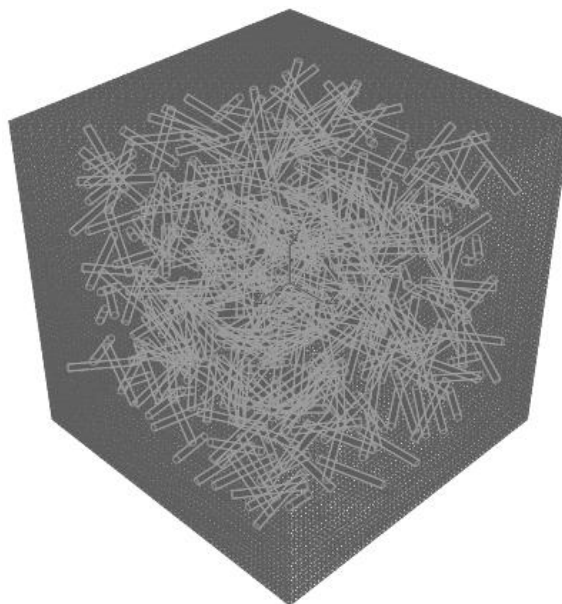


Fig. 11 Applied mesh on the square-cube model

شکل 11 مش اعمال‌شده بر روی مدل مکعب مربعی

¹ C3D4

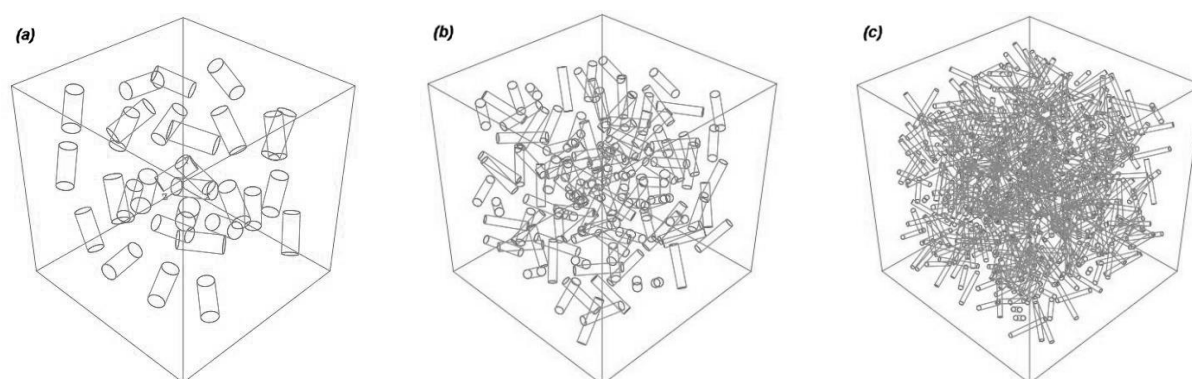


Fig. 12 Representation of the CNTs randomly distributed with 3% volume fraction and in different lengths including: (a) 25nm, (b) 50 nm and (c) 100 nm

شکل 12 نمایش توزیع تصادفی نانوذرات کربنی با کسر حجمی 3% و در طول‌های مختلف شامل: (a) 25 nm ، (b) 50 nm و (c) 100 nm

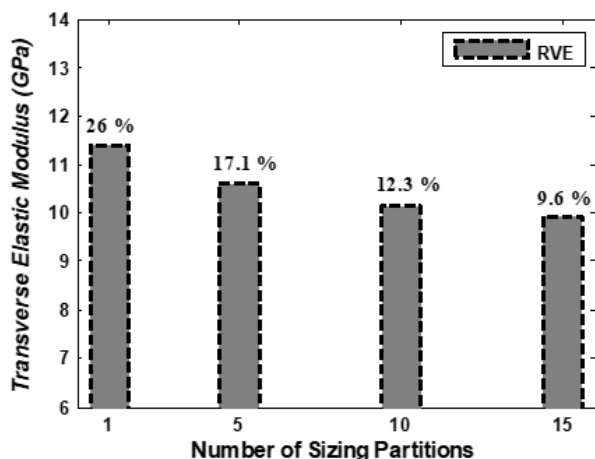


Fig. 13 Effect of sizing partitions increasing on the transverse elastic modulus

شکل 13 اثر افزایش قسمت‌های آهار بر مدول الاستیسیته عرضی

مدول الاستیسیته عرضی در حالتی که برای آهار خواص مکانیکی ثابت فرض شده است (1 قسمت)، 11.4 GPa به دست آمده است. این مقدار برای حالتی که آهار به 15 قسمت با ضخامت ثابت تقسیم شده است 9.92 GPa حاصل می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن خواص آهار به صورت ناهمگن و غیریکنواخت در طول ضخامت آن، نتایج به دست آمده برای مدول الاستیسیته عرضی تقریباً 15% تغییر یافته است.

مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و کار آزمایشگاهی [19] نشان می‌دهند که با فرض خواص مکانیکی همگن و ثابت برای آهار، مدول الاستیسیته عرضی به دست آمده از شبیه‌سازی برای المان حجمی نماینده 26% با نتیجه آزمایشگاهی (9.05 GPa) اختلاف دارد. اما با غیر همگن در نظر گرفتن خواص مکانیکی آهار این مقدار خطا به 9.6% کاهش می‌یابد. بنابراین، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، همواره نیاز است که در شبیه‌سازی عددی خواص مکانیکی آهار در ارزیابی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به صورت ناهمگن و غیریکنواخت لحاظ گردد.

با استناد بر نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، در ادامه به منظور بررسی تأثیر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به صورت تصادفی در آهار

جدول 7 قطرهای مختلف نانولوله‌های کربنی با طول ثابت.

Table 7 Different diameters of CNTs with constant length.

طول ثابت	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
100 nm	10 nm	20 nm	40 nm

7- نتایج عددی

در این بخش، در ابتدا، تأثیر خواص مکانیکی ناهمگن نسبت به حالت همگن برای آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی بررسی شده است. سپس، مقایسه نتایج مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی که در آن تقویت آهار با طول‌ها و قطرهای مختلف نانولوله‌های کربنی در کسر حجمی‌های 1%، 2% و 3% صورت گرفته است انجام شده است.

7-1- اثر افزایش تعداد قسمت‌های آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی

هر چند در برخی مراجع [18] برای ارزیابی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به صورت عددی، خواص مکانیکی آهار به صورت همگن و برابر با مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است اما همواره خواص مکانیکی آهار ناهمگن بوده و در طول ضخامت آن برابر با مقدار ثابتی نیست [23].

بنابراین در اینجا، برای مطالعه اثر غیر همگن در نظر گرفتن خواص مکانیکی آهار در طول ضخامت آن بر روی مدول الاستیسیته عرضی، از نمودار $\lambda=0.60$ در شکل 2 برای تعیین خواص مکانیکی آهار استفاده شد. در این مطالعه سعی شد با تقسیم ناحیه فاز مشترک به 5، 10 و 15 قسمت با ضخامت ثابت و همچنین استفاده از این نمودار در تعیین خواص هر یک از قسمت‌ها، اثر غیر همگن در نظر گرفتن خواص مکانیکی آهار مشاهده شود. شکل 13 نتایج این بررسی را نمایش می‌دهد.

منظر نانولوله‌های کربنی بیشتر می‌شود (با توجه به شیب نمودارهای ترسیم‌شده).

3-7- اثر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی در تقویت مکانیکی آهار بر روی استحکام کششی عرضی

همان‌گونه که بیان شد برای پیش‌بینی استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با آهار الیاف تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، از روش ماکرومکانیک استفاده شده است. شکل 15 نمودار نیرو-جاب‌جایی در جهت عرضی را برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالتی که تقویت مکانیکی آهار با نانولوله‌های کربنی صورت نگرفته است نشان می‌دهد.

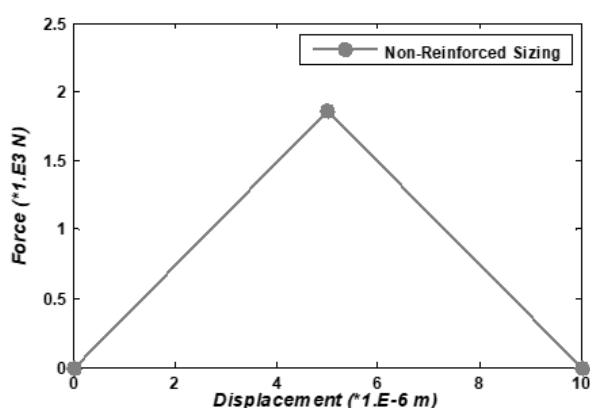


Fig. 15 The force-displacement diagram for glass/epoxy composite without sizing reinforcement

شکل 15 نمودار نیرو-جاب‌جایی برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی با آهار تقویت نشده

مقدار نیرو در لحظه شروع تخریب برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالت بدون تقویت مکانیکی آهار 1865 N به دست آمده است. با فرض این مقدار نیرو برای لحظه شکست کامپوزیت شیشه/اپوکسی و با استفاده از رابطه 4، استحکام نهایی کامپوزیت شیشه/اپوکسی برای این حالت به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{F}{A}, A = 0.025 \times 0.002m^2 \quad (4)$$

مقادیر استحکام کششی عرضی به‌دست‌آمده برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالت بدون تقویت آهار، در دو حالت آزمایشگاهی [19] و شبیه‌سازی عددی به ترتیب 36 MPa و 37.3 MPa محاسبه شده است. بنابراین، برای بررسی اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در تقویت آهار الیاف شیشه بر روی مدول استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، برای هر حالت نموداری همانند شکل 15 به دست آمد و سپس مقدار نیرو در لحظه شکست استخراج شده و با استفاده از رابطه 4، مقدار استحکام کششی عرضی محاسبه شده است. شکل 16 نتایج این بررسی را نمایش می‌دهد.

با توجه به اینکه مقدار مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت رابطه مستقیم با استحکام کششی عرضی آن دارد، بنابراین انتظار می‌رود که مقدار استحکام

الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، خواص مکانیکی آهار به‌صورت ناهمگن و متشکل از 15 قسمت با مدول‌های الاستیسیته معادل در حالت تقویت‌شده با استفاده از نانولوله‌های کربنی در نظر گرفته می‌شود.

2-7- اثر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی در تقویت مکانیکی آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی

نتایج به‌دست‌آمده برای بررسی اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی که در تقویت آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی در شکل 14 نمایش داده شده است.

شکل 14 نشان می‌دهد که افزایش طول نانولوله‌های کربنی در کسر حجمی ثابت، باعث افزایش مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌شود. درواقع، مقدار مدول الاستیسیته عرضی رابطه مستقیم با طول نانولوله‌های کربنی که در آهار توزیع شده‌اند دارد. همچنین، مشاهده می‌شود که مقدار مدول الاستیسیته عرضی رابطه عکس با قطر نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار دارد. درواقع، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که مقدار مدول الاستیسیته عرضی رابطه مستقیم با نسبت منظر (نسبت طول به قطر)

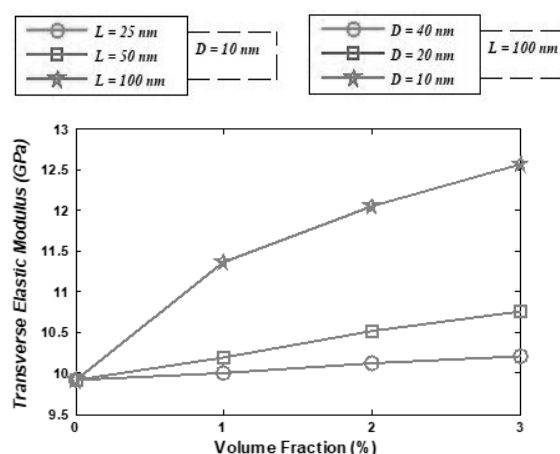


Fig. 14 Effect of CNTs dimensions and volumes variations, in sizing reinforcement, on the glass/epoxy composite transverse elastic modulus

شکل 14 اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی، در تقویت آهار، بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار دارد و در نسبت منظر یکسان برای نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار، مدول الاستیسیته عرضی مقدار ثابتی خواهد داشت. برای نمونه، در کسر حجمی 3%، با افزایش نسبت منظر از 2.5 به 5 و 10، مقدار مدول الاستیسیته عرضی به ترتیب از 10.22 GPa به 10.76 GPa و 12.57 GPa افزایش می‌یابد که نشانگر افزایش به ترتیب 5.3% و 23% در مقدار مدول الاستیسیته عرضی است.

علاوه بر این، مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش کسر حجمی نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی، با افزایش نسبت

- Materials“ Composites Part B: Engineering, Vol. 37, No. 6, pp. 382-394, 2006.
- [2] Yu, M. F., Files, B. S., Arepalli, S. and Ruoff, R. S., “Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and Their Mechanical Properties“ Physical Review Letters, Vol. 84, No. 24, pp. 5552-5555, 2000.
- [3] Setoodeh, A. R., Sokhandani, N. and Zebajrad, S. M., “Theoretical and experimental study on the effect of multi-walled carbon nanotubes on improving the tensile properties and toughness of Vinyl ester resin“ In Persion, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 539-550, 2019.
- [4] Tabatabaee-Ghomi, M., Taheri-Behrooz, F., Razavi, M. and Liaghat, G. H., “Electrical conductivity enhancement of Carbon/Epoxy composites using nanoparticles“ In Persion, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 605-614, 2019.
- [5] Hosseini Abbandanak, S. N., Siadati, M. H. and eslami-farsani, R., “Effects of functionalized graphene nanoplatelets on the flexural behaviors of basalt fibers/epoxy composites“ In Persion, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 315-324, 2018.
- [6] Khanna, S. K., Winter, R. M., Ranganathan, P., Yedla, S. B., Kalukanimuttam, M. and Paruchuri, K., “Sample Preparation Techniques for Nano-Mechanical Characterization of Glass Fiber Reinforced Polyester Matrix Composites“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 34, No. 1, pp. 53-65, 2003.
- [7] Tanoglu, M., McKnight, S. H., Palmese, G. R. and Gillespie, J. W., “A New Technique to Characterize the Fiber/Matrix Interphase Properties under High Strain Rates“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 31, No. 10, pp. 1127-1138, 2000.
- [8] Godara, A., Gorbatiikh, L., Kalinka, G., Warrier, A., Rochez, O., Mezzo, L., Luiz, F., van Vuure, A. W., Lomov, S. V. and Verpoest, I., “Interfacial Shear Strength of a Glass Fiber/Epoxy Bonding in Composites Modified with Carbon Nanotubes“ Composites Science and Technology, Vol. 70, No. 9, pp. 1346-1352, 2010.
- [9] Barber, A. H., Zhao, Q., Wagner, H. D. and Baillie, C. A., “Characterization of E-Glass-Polypropylene Interfaces Using Carbon Nanotubes as Strain Sensors“ Composites Science and Technology, Vol. 64, No. 13-14, pp. 1915-1919, 2004.
- [10] Chowdhury, S. C., Haque, B. Z. G., Okabe, T. and Gillespie Jr, J. W., “Modeling the Effect of Statistical Variations in Length and Diameter of Randomly Oriented Cnts on the Properties of Cnt Reinforced Nanocomposites“ Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 4, pp. 1756-1762, 2012.
- [11] Joshi, U. A., Sharma, S. C. and Harsha, S. P., “Effect of Carbon Nanotube Orientation on the Mechanical Properties of Nanocomposites“ Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 4, pp. 2063-2071, 2012.
- [12] Mahdavi, M., Yousefi, E., Baniassadi, M., Karimpour, M. and Baghani, M., “Effective Thermal and Mechanical Properties of Short Carbon Fiber/Natural Rubber Composites as a Function of Mechanical Loading“ Applied Thermal Engineering, Vol. 117, pp. 8-16, 2017.
- [13] El Moumen, A., Tarfaoui, M. and Lafdi, K., “Computational Homogenization of Mechanical Properties for Laminate Composites Reinforced with Thin Film Made of Carbon Nanotubes“ Applied Composite Materials, Vol. 20, No. 3, pp. 1-20, 2018.
- [14] Ghasemi, A. R. and Hosseinpour, K., “Thermo-Magneto-Mechanical Long-Term Creep Behavior of Three-Phase Nano-Composite Cylinder“ Composites Science and Technology, Vol. 167, No.83 pp. 71-78, 2018.
- [15] Zabihpoor, M. and Adibnazari, S., “A Micromechanics Approach for Fatigue of Unidirectional Fibrous Composites“ Iranian Polymer Journal (English Edition), Vol. 16, No. 4, pp. 219-232, 2007.
- [16] Rahimi, G.H., Zamani, R. and Pol, M.H., “Studies on the tensile and flexural properties of TETA-cured epoxy resins modified with

کشتی عرضی رابطه مستقیم با طول و رابطه عکس با قطر نانولوله‌های کربنی توزیع شده در آهار داشته باشد. درواقع، انتظار می‌رود که مقدار استحکام کششی عرضی رابطه مستقیم با نسبت منظر نانولوله‌های کربنی توزیع شده در آهار داشته باشد.

شکل 16 صحت این موضوع را نشان می‌دهد. برای نمونه مشاهده می‌شود که در کسر حجمی 3%، با افزایش نسبت منظر از 2.5 به 5 و 10، مقدار استحکام کششی عرضی به ترتیب از 41.76 MPa به 43.82 MPa و 50.48 MPa افزایش می‌یابد که نشانگر افزایش به ترتیب 4.9% و 20.9% در مقدار استحکام کششی عرضی است.

در اینجا نیز تأثیر افزایش کسر حجمی نانولوله‌های کربنی توزیع شده در آهار بر روی استحکام کششی عرضی، با افزایش نسبت منظر نانولوله‌های کربنی بیشتر می‌شود.

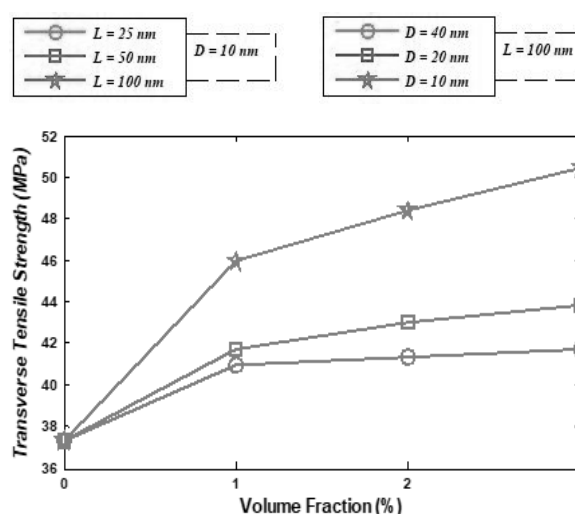


Fig. 16 Effect of CNTs dimensions and volumes variations, in sizing reinforcement, on the glass/epoxy composite transverse tensile strength

شکل 16 اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی، در تقویت آهار، بر روی استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

8- نتیجه‌گیری

نتایج عددی نشان داد که شبیه‌سازی ناحیه آهار با خواص مکانیکی غیریکنواخت در طول ضخامت آن، کمک شایانی در بهبود نتایج عددی در مقایسه با مقادیر حاصل از کار آزمایشگاهی دارد. همچنین، ملاحظه شد که افزایش نسبت منظر نانولوله‌های کربنی، در کسر حجمی ثابت، که در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند، می‌تواند باعث افزایش مدول و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی شود. بنابراین، آشکار است که افزودن این نانو ذرات به آهار برای افزایش خواص عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، با نسبت منظر بالاتر در کسر حجمی ثابت، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه می‌باشد.

9- مراجع

- [1] Kang, I., Heung, Y. Y., Kim, J. H., Lee, J. W., Gollapudi, R., Subramaniam, S., Narasimhadevara, S., Hurd, D., Kiriker, G. R., Shanov, V., Schulz, M. J., Shi, D., Boerio, J., Mall, S. and Ruggles-Wren, M., “Introduction to Carbon Nanotube and Nanofiber Smart

- clay“ In Persion, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 29-34, 2014.
- [17] Papanicolaou, G. C., Michalopoulou, M. V. and Anifantis, N. K., “Thermal Stresses in Fibrous Composites Incorporating Hybrid Interphase Regions“ Composites Science and Technology, Vol. 62, No. 14, pp. 1881-1894, 2002.
- [18] Riaño, L., Belec, L., Chailan, J. F. and Joliff, Y., “Effect of Interphase Region on the Elastic Behavior of Unidirectional Glass-Fiber/Epoxy Composites“ Composite Structures, Vol. 198, pp. 109-116, 2018.
- [19] Azad, E., “Mechanical reinforcement on glass/fiber sizing “ MSc Thesis, Iran University of Science & Technology, Iran, 2016.
- [20] El-Hage, H., Mallick, P. K. and Zamani, N., “A Numerical Study on the Quasi-Static Axial Crush Characteristics of Square Aluminum-Composite Hybrid Tubes“ Composite Structures, Vol. 73, No. 4, pp. 505-514, 2006.
- [21] Lapczyk, I. and Hurtado, J. A., “Progressive Damage Modeling in Fiber-Reinforced Materials“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 11, pp. 2333-2341, 2007.
- [22] Hbaieb, K., Wang, Q. X., Chia, Y. H. J. and Cotterell, B., “Modelling Stiffness of Polymer/Clay Nanocomposites“ Polymer, Vol. 48, No. 3, pp. 901-909, 2007.
- [23] Wang, J., Crouch, S. L. and Mogilevskaya, S. G., “Numerical Modeling of the Elastic Behavior of Fiber-Reinforced Composites with Inhomogeneous Interphases“ Composites Science and Technology, Vol. 66, No. 1, pp. 1-18, 2006.



بررسی عملکرد خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی-الیاف بازالت تقویت‌شده با نانوذرات خاک رس

ارسلان باقری تیرتاش¹، عباس منتظری²، رضا اسلامی فارسانی^{3*}، علیرضا شهرابی فراهانی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

4- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 119991-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 96/08/03 پذیرش: 97/07/19	در این تحقیق، تاثیر افزودن نانوذرات خاک رس بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمشی بررسی شد. برای بهبود توزیع این نانوذرات درون زمینه کامپوزیت، سطح آن‌ها توسط عامل کوپلینگ تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان اصلاح سطحی شد و روند انجام این فرآیند با استفاده از آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز مورد تایید قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای نشان داد که در درصد‌های وزنی 1، 3 و 5، بیشترین افزایش در خواص خمشی به ازای توزیع 5 درصد وزنی نانورس درون زمینه پلیمری کامپوزیت بدست می‌آید. در این درصد وزنی نانورس، استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست و انرژی جذب‌شده به ترتیب به میزان 30، 38، 15 و 40 درصد افزایش یافت. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که افزودن نانورس اصلاح سطحی شده منجر به بهبود انتقال تنش بین الیاف بازالت و زمینه اپوکسی می‌گردد که این امر، تاثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمشی دارد.
کلیدواژگان: کامپوزیت هیبریدی الیاف بازالت نانوذرات خاک رس اصلاح سطحی عملکرد خمشی	

An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles

Arsalan Bagheri Tirtash, Abbas Montazeri, Reza Eslami-Farsani*, Alireza Shahrabi-Farahani

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*Tehran, P.O.BOX: 19991-43344, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Hybrid composite
Basalt fibers
Nanoclay particles
Surface modification
Flexural performance

Abstract

In this investigation, consequence of introducing nanoclay particles on the flexural response of basalt fibers reinforced epoxy composites was examined. To improve the dispersion of nano reinforcements into the polymer matrix, their surface was modified with 3-glycidoxypolytrimethoxysilane coupling agent (3-GPTS). Accordingly, the surface functionalization was vouched using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Results of the three-point bending test suggested that at 1, 3, 5 Wt. % the highest enhancement of flexural properties was achieved via 5 Wt. % of nanoclay particles. In this case, with the addition of 5 Wt. % of nanofillers, flexural strength, flexural modulus, failure strain and energy absorption were increased by 30, 38, 15 and 40 percent, respectively. Microscopic investigations demonstrated that presence of nanoclay particles within the structure of basalt fibers reinforced epoxy composites enhances the stress transfer between epoxy matrix and basalt fibers which, in turn, causes a significant improvement in the mechanical properties of basalt fibers reinforced polymer composites.

1- مقدمه

زیست‌محیطی مرتبط با تولید است [2,1]. به همین دلیل، در دو دهه‌ی اخیر، گرایش به طراحی نوآورانه مواد و روش‌های جدید ضمن توسعه‌ی مواد و روش‌های موجود گسترش یافته است. یکی از مهم‌ترین موادی که در سال‌های اخیر بیشترین سهم تحقیقات با محوریت طراحی و توسعه را به خود اختصاص داده‌اند، مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف هستند. این مواد با هدف بهره‌مندی از قابلیت‌های چند ماده در کنار هم، توسعه یافته‌اند تا ضعف‌های هر یک از آن‌ها در صورت استفاده به صورت مجزا، پوشش داده

در سال‌های اخیر با پیشرفت چشمگیر حوزه‌ی مهندسی ساخت، توجه بیشتر به مسائل زیست محیطی و شتاب سرسام‌آور پدیده‌ی مصرف‌گرایی در جهان، انتخاب مواد مورد استفاده در ساخت محصولات، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و دستاوردهای مهمی را در بخش‌های مختلف صنعتی به ارمغان داشته است. انتخاب مواد و همچنین انتخاب روش‌ها و تکنیک‌های موجود برای ساخت، عامل اصلی تعیین‌کننده هزینه تولید، زمان مصرفی و تاثیرات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Bagheri Tirtash, A. Montazeri, A. Eslami-Farsani, R. and Shahrabi-Farahani, A., "An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 525-532, 2020.

شود [4,3]. دو ویژگی برجسته کامپوزیت‌های الیافی، استحکام ویژه (نسبت استحکام به وزن بالا) و کنترل خواص ناهمسانی آن‌ها یعنی تابعیت خواص به جهت اندازه‌گیری است. استحکام ویژه بالای این نوع کامپوزیت‌ها سبب گردیده است که بتوانند از این نظر با بسیاری از مواد رقابت کنند. ویژگی ناهمسان بودن خواص این امکان را فراهم کرده که طراح بتواند در مکان‌های مورد نظر بدون افزایش وزن به خواص مطلوب دست یابد. این ویژگی‌ها همراه با دوام، مقاومت محیطی عالی و مقاومت خوب در برابر نیروهای خستگی سبب جلب توجه صنعت‌گران و گسترش روز افزون استفاده از این دسته کامپوزیت‌ها شده است [3]. با پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه فناوری نانو و ورود آن به صنعت پلیمر و کامپوزیت، انقلابی در زمینه تولید نانو کامپوزیت‌ها و دسترسی به خواص منحصر به فرد آن‌ها صورت پذیرفت [6,5]. در میان انواع نانوکامپوزیت‌ها، بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری معطوف است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموماً دارای نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری حرارتی مناسب، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند. [7]

یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌های نانومتری برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها، ذرات نانوس^۱ هستند. این نانوذرات اساساً حاوی سیلیسیم، آلومینیم یا منیزیم، اکسیژن و هیدروکسیل با کاتیون وابسته گوناگون می‌باشند. این یون‌ها و گروه‌های هیدروکسیل در دو ساختار دوبعدی به صورت ورقه‌ای مرتب می‌شوند. ساختار نانوس از لایه‌های سیلیکات با ضخامت ۱ نانومتر شامل صفحات سیلیسیم و آلومینیم که در نسبت‌های گوناگون به هم متصل شده و به شیوه معین با فاصله بین لایه‌ای متغیر روی هم انباشته می‌شوند، تشکیل شده است. بین انواع مختلف کانی‌های رسی، مونت موریلونیت^۲ پرکاربردترین ماده برای تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانوس است. [8-10] در طی سالان اخیر، تحقیقات تجربی مطلوبی در رابطه با تأثیر توزیع ذرات نانوس بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تحت بارگذاری‌های مختلف انجام شده است که در این قسمت بدان پرداخته می‌شود. آیت‌اللهی و همکارانش [11]، نشان دادند که افزودن 5 درصد وزنی نانوس باعث افزایش 25 درصدی در چقرمگی شکست و افزایش 8 درصدی در مدول کششی در مقایسه با اپوکسی خالص می‌گردد. چان و همکارانش [12]، رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با نانوذرات رس را بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزودن 9 درصد وزنی ذرات نانو رس به زمینه اپوکسی، استحکام و مدول کششی فاز زمینه در مقایسه با کامپوزیت‌های فاقد نانوس، به ترتیب 29 و 34 درصد افزایش یافت. آلبدیری و همکارانش [13]، رفتار شکست کامپوزیت پلی‌استر/نانوس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق مشخص نمود که بالاترین مقدار افزایش در چقرمگی شکست به ازای افزودن 3 درصد وزنی نانوس حاصل می‌گردد که در این حالت، چقرمگی شکست به میزان 61 درصد نسبت به پلی‌استر خالص افزایش می‌یابد. چوداری و همکارش [14]، خواص مکانیکی کامپوزیت پلی‌استر/الیاف شیشه را تحت بارگذاری کششی و خمشی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان بهبود در خواص کششی به ازای افزودن 3 درصد وزنی نانوس حاصل می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از این مقدار فاز تقویتی، استحکام و مدول کششی کامپوزیت به ترتیب 14 و 30 درصد و استحکام و مدول خمشی آن نیز به ترتیب 28 و 26 درصد افزایش نشان داد. رافیق و همکارانش [15]، به بررسی

اثر نانوس در درصد‌های وزنی مختلف (0، 1.5 و 3) بر خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه پرداختند که در آن، بیشترین افزایش در خواص خمشی با افزودن 1.5 درصد وزنی نانوس حاصل شد. این در حالیست که مشاهدات آنها نشان داد که با افزودن 3 درصد وزنی نانوس، خواص کامپوزیت تقلیل می‌یابد. پل و همکارانش [16]، تأثیر نانوس بر رفتار کششی کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، به ازای افزودن 10 درصد وزنی نانوس، استحکام کششی کامپوزیت به میزان 8 درصد و مدول کششی آن به میزان 23 درصد نسبت به کامپوزیت فاقد فاز تقویتی افزایش یافت.

عملکرد نانوذرات خاک رس بر طبق تحقیقات صورت پذیرفته، وابسته به نحوه توزیع این نانوذرات درون ماده زمینه است. زیرا که اگر دارای توزیع مطلوب نباشند منجر به تنزل خواص مکانیکی تحت بارگذاری‌های مختلف می‌گردند. یکی از روش‌های مورد استفاده برای بهبود توزیع نانوس اصلاح سطحی آن‌ها با هدف کاهش تمایل به کلوخه‌ای شدن آن‌ها و دست یابی به توزیع مطلوب آن‌ها درون زمینه پلیمری می‌باشد. لذا رویکرد اصلی این تحقیق، بررسی اثر توزیع ذرات نانوس اصلاح سطحی شده با سیلان در زمینه پلیمری بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای است.

2- روش آزمایش

2-1- مواد اولیه

در این پژوهش از رزین اپوکسی با نام تجاری ML-506 همراه با هاردنر پلی‌آرئینی HA-11 متعلق به شرکت مواد مهندسی مکرر به عنوان ماده زمینه برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها استفاده شد. پارچه الیاف بازالت با بافت ساتن^۳ و دانسیته سطحی 300 گرم بر مترمربع به عنوان الیاف تقویت‌کننده بکار گرفته شد. ذرات نانوس مونت‌موریلونیت^۴ با ضخامت صفحات یک الی پنج نانومتر و طول 7 میکرومتر به عنوان تقویت‌کننده نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- اصلاح سطحی نانوس

در ابتدا 5 گرم از نانوس به 100 میلی‌لیتر محلول شامل 95 میلی‌لیتر اتانول اضافه شد. در گام بعدی، عامل سیلان تری گلیسید اکسی پروپیل تری منوکسی سیلان که دارای گروه اپوکسید بوده و می‌تواند با گروه اپوکسیدی زمینه در حضور هاردنر آمینی واکنش دهد [17]، با نسبت 1 به 1 نسبت به نانوس به مخلوط فوق اضافه شد. مخلوط به دست آمده به مدت 10 دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفته و سپس به مدت 8 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد عملیات رفلکس انجام شد. میزان PH محلول با استفاده از اسید کلریدریک 37 درصد در محدوده 4-5 تنظیم گردید. پس از انجام فرآیند رفلکس، به منظور جداسازی نانوس، مخلوط ساخته‌شده به مدت 30 دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ تحت سرعت 4000 دور بر دقیقه قرار گرفت. سپس، نانوس بدست آمده به منظور خارج شدن عامل سیلان اضافی سه مرتبه توسط اتانول شستشو داده شده و به منظور خشک شدن به مدت 12 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در داخل آون قرار داده شد [18].

³ Satin texture

⁴ Montmorillonite

¹ Nanoclay particles
Montmorillonite

3-2- روند ساخت نمونه‌ها

1055.4 به علت ارتعاشات کششی پیوند بین Si-O-Si و پیک جذبی در عدد موج 472.3 به علت ارتعاشات خمشی در گروه‌های Si-O-Si و Si-O-Al ایجاد شد [18]. برای نانورس اصلاح سطحی شده با عامل سیلان (شکل 1-ب) دو پیک اضافی در اعداد موج 2868 و 2923 ایجاد شد که به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های عاملی CH_2 و CH_3 بود. این موضوع نشان می‌دهد که CH موجود در ترکیب سیلانی روی نانوذرات قرار گرفته و نانورس اصلاح شده‌اند. [21]

2-3- نتایج آزمون خمش

منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمون خمش بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی تقویت‌شده با مقادیر مختلف نانورس اصلاح سطحی شده در شکل 2 نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد روند شکست همه نمونه مشابه به یکدیگر بوده و وارد کردن نانورس در ساختار کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت باعث تغییر در خواص خمشی نظیر استحکام، مدول و کرنش شکست شده است. در جدول 1 نتایج بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی نانورس آورده شده است. همچنین، با هدف مشاهده بهتر و موثرتر روند تغییرات استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست خمشی و انرژی شکست کامپوزیت‌های مورد نظر، تغییر این خواص در حضور درصدهای مختلف خاک رس در اشکال سه الی شش آورده شده است. لازم به ذکر است همان‌طور که عنوان شد برای اطمینان از جواب‌ها، کلیه آزمایش‌ها چند بار تکرار گردیده و در نتیجه برای مشخص شدن محدوده خطای نتایج، این اعداد در این جدول ذکر شده است.

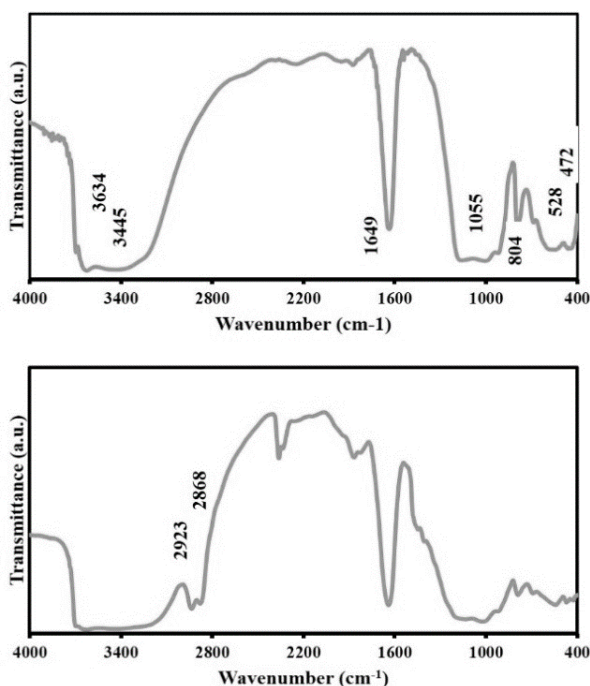


Fig. 1 FT-IR analysis results of a) non treated and b) silane treated nanoclay powders.

شکل 1 نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز پودرهای الف) نانورس اصلاح نشده و ب) اصلاح سطحی شده با عامل سیلان.

برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی تقویت‌شده با ذرات نانورس اصلاح سطحی شده، ابتدا نانورس در مقادیر 0، 1، 3 و 5 درصد وزنی به رزین اپوکسی اضافه شد. سپس با استفاده از همزن مکانیکی سرعت بالا³ مخلوط اپوکسی-نانوذرات به مدت 20 دقیقه با قدرت 2000 دور بر دقیقه هم زده شد. در مرحله بعد امواج التراسونیک با استفاده از دستگاه التراسونیک پروبی تحت توان 120 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز به مدت 1 ساعت به مخلوط اعمال شد. پس از اعمال امواج التراسونیک، به منظور از بین رفتن حباب‌های هوا ناشی از هم‌زدن سرعت بالا، مخلوط حاصل تحت شرایط خلا واقع شده، به عنوان ماده زمینه برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پس از توزیع ذرات نانورس درون زمینه پلیمری کامپوزیت، برای ساخت نمونه‌ها روش لایه‌گذاری دستی بکار گرفته شد که در طی آن 6 لایه پارچه الیاف بازالت با نسبت حجمی 50 درصد مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، نمونه‌های ساخته شده به مدت 3-4 ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا عملیات پخت رزین صورت پذیرد. لازم به ذکر است که مطابق دستورالعمل شرکت سازنده رزین اپوکسی، انجام آزمون مکانیکی بر روی نمونه‌ها 7 روز پس از پخت اولیه نمونه‌ها صورت پذیرفت.

4-2- آزمون خمشی سه نقطه‌ای

آزمون خمشی بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی با استفاده از دستگاه کوپا مطابق با استاندارد ASTM D790 انجام شد [19]. برای جلوگیری از سرخوردن نمونه‌ها حین آزمایش، هر طرف تکیه‌گاه باید حداقل 10 درصد از فاصله بین دو تکیه‌گاه بلندتر باشد. مطابق با استاندارد نسبت فاصله بین دو تکیه‌گاه به ضخامت نمونه برابر با 32 به 1 است. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی، هر آزمایش حداقل 3 بار تکرار شد.

5-2- بررسی میکروسکوپی

به منظور بررسی روند اصلاح سطحی ذرات نانورس و بررسی تشکیل گروه‌های عاملی بر روی سطح این نانوذرات از دستگاه طیف سنج مادون قرمز مدل Jasco-460 plus استفاده شد. همچنین برای بررسی سطح شکست نمونه‌ها و نحوه عملکرد ذرات نانورس از میکروسکوپ الکترونی عمق میدانی مدل Hitachi S-4160 با ولتاژ کاری 25 کیلوولت استفاده شد. برای بهبود رسانایی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، پوششی از جنس طلا در محفظه‌ای تحت خلأ بر روی آن‌ها اعمال شد.

3- نتایج و بحث

1-3- بررسی روند اصلاح سطحی نانورس

در شکل 1 نتایج آنالیز طیف سنجی مادون قرمز نانورس اصلاح نشده و اصلاح سطحی شده با سیلان نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد برای نانورس اصلاح سطحی نشده (شکل 1-الف) پیک ایجاد شده در عدد موج 3445.3 به دلیل ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل و پیک در عدد موج 1649.5 ناشی از ارتعاشات خمشی پیوندهای H-O-H بود. در مقابل، پیک به وجود آمده در عدد موج 3634.2، مربوط به ارتعاشات کششی پیوند Al-OH نسبت داده شد [20]. همچنین پیک قابل مشاهده در عدد موج

³ High speed shear mixing

مشترک الیاف-زمینه که از مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست تحت بارگذاری خمشی هستند، را افزایش می‌دهد [23]. موضوع مهم دیگر خاصیت آب‌دوستی¹ نانوذرات رس است. با توجه به این نکته که در ابعاد نانو سطح تماس افزایش می‌یابد نانوذرات رس تمایل زیادی به انباشتگی دارند که وقوع این مساله در فاز پلیمری مطلوب نبوده و به عنوان یک فاکتور موثر در جهت کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت عمل خواهد کرد. با اصلاح سطحی نانورس توسط عامل سیلان گروه‌های عاملی فعال با گروه‌های هیدروکسیل واقع بر روی سطح نانورس واکنش داده و در نتیجه با چسبیدن به سطح نانوذرات، سبب افزایش خاصیت آگریزی آن‌ها می‌شوند. سپس مونومرها با گروه‌های عاملی بر روی سطح نانورس واکنش داده و پلیمریزاسیون بر روی سطح نانورس ادامه می‌یابد. زنجیره‌های پلیمری با اتصال به سطح نانوذرات فضای خالی مابین آن‌ها را پر کرده و با کاهش سطح تماس نانوذرات، سبب کاهش آگلومره شدن آن‌ها می‌گردند که این موضوع، به نوبه خود منجر به بهبود عملکرد نانورس در افزایش خواص مکانیکی می‌شود [24].

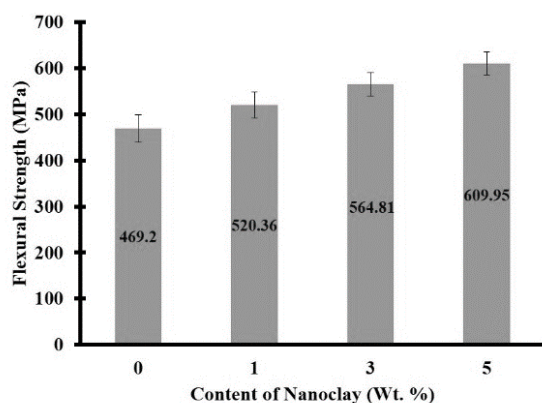


Fig. 3 Effect of adding modified nanoclay on the flexural strength of basalt fiber reinforced polymer composites.

شکل 3 تاثیر افزودن ذرات نانورس اصلاح شده بر استحکام خمشی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت

در شکل 4 اثر افزودن مقادیر مختلف نانورس اصلاح شده بر مدول خمشی نمایش داده شده است. مشابه استحکام خمشی، مدول خمشی نیز با افزودن نانورس به طور پیوسته افزایش یافت. برای کامپوزیت حاوی 1 درصد وزنی نانورس مدول خمشی با 11 درصد افزایش از 16.52 به 18.35 گیگاپاسکال افزایش یافت. اما بیشترین بهبود در مدول خمشی با توزیع 5 درصد وزنی نانورس داخل ساختار کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت حاصل شد که مدول خمشی به میزان 38 درصد در مقایسه با کامپوزیت فاقد نانورس افزایش یافت. افزایش مدول خمشی در اثر افزودن نانورس، به دلیل توزیع مناسب این ذرات داخل زمینه پلیمری رخ است. افزایش مقدار نانورس همراه با توزیع مناسب این ذرات، باعث افزایش پیوند و چسبندگی بین‌سطحی نانورس و زمینه پلیمری شده که این پدیده، موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری می‌گردد. نتیجه این امر افزایش مدول خمشی نانوکامپوزیت است. از طرفی به دلیل سفتی بالاتر نانورس در مقایسه با زمینه اپوکسی، افزایش در مدول خمشی کامپوزیت در نتیجه افزودن این ذرات قابل انتظار بود [25].

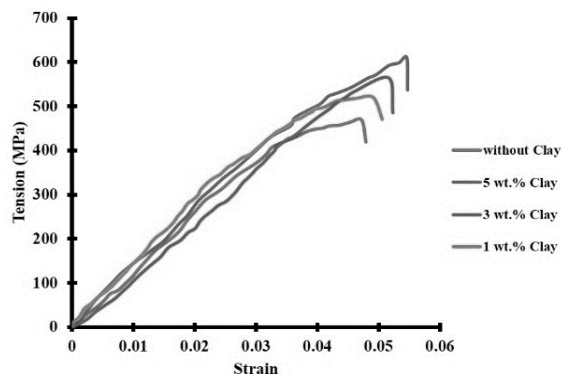


Fig. 2 Flexural stress-strain curves of the nanocomposite samples containing various weight percentages of nanoclay

شکل 2 منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانورس

جدول 1 نتایج مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای برای نانوکامپوزیت حاوی نانورس

Table 1 Results of three-point bending test for the samples reinforced with nanoclay

درصد وزنی نانورس	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)	انرژی شکست (J/mm ³)	کرنش شکست
0	469.2±30	16.52±1.8	13.49±1.2	0.047±0.0025
1	520.36±28	18.35±1.7	14.81±1.2	0.049±0.0025
3	564.81±25	20.98±1.7	17.71±1.4	0.051±0.003
5	609.95±25	22.68±1.5	18.94±1.3	0.054±0.0028

شکل 3 اثر افزودن نانورس اصلاح سطحی شده را بر استحکام خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توزیع نانورس داخل زمینه استحکام خمشی به صورت پیوسته افزایش یافته و کاهش در روند استحکام مشاهده نشد. در این خصوص برای کامپوزیت‌های کنترلی که فاقد نانورس هستند، استحکام خمشی به مقدار 469.2 مگاپاسکال محاسبه شد. بیشترین بهبود در استحکام خمشی به ازای افزودن 5 درصد وزنی نانورس برابر با 609.95 مگاپاسکال بدست آمد که در مقایسه با نمونه شاهد، 30 درصد به استحکام خمشی کامپوزیت افزوده شد. در کامپوزیت‌های الیافی، چسبندگی بین سطحی زمینه و الیاف دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. دلیل این مطلب آن است که هنگامی که کامپوزیت تحت بارگذاری قرار می‌گیرد انتقال تنش از طریق فصل مشترک زمینه و الیاف صورت می‌پذیرد. در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری باید بین زمینه و تقویت کننده اتصال کامل و محکم و استوار برقرار باشد تا نیرو بتواند از زمینه به الیاف منتقل شود. علاوه بر آن چنانچه اتصال بین الیاف و زمینه تضعیف شود، الیاف در حین اعمال نیرو می‌تواند از زمینه بیرون کشیده شوند و نتیجتاً استحکام و مقاومت به شکست کامپوزیت کاهش می‌یابد [22]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اضافه نمودن نانورس اصلاح سطحی شده به زمینه کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت منجر به افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف شده که این امر، باعث تقویت فصل مشترک و در نتیجه بهبود انتقال بار می‌گردد. تقویت زمینه پلیمری توسط نانورس، تمرکز تنش بر روی سطح الیاف را کاهش داده و تنش لازم برای پارگی الیاف و جدایش فصل

¹ Hydrophilic

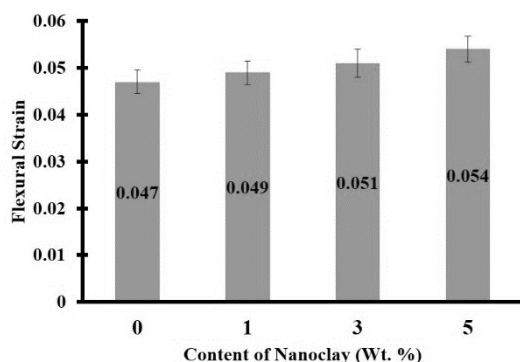


Fig. 5 Effect of modified nanoclay on the flexural strain of basalt fiber-epoxy composites

شکل 5 اثر نانورس اصلاح شده بر کرنش شکست خمشی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت

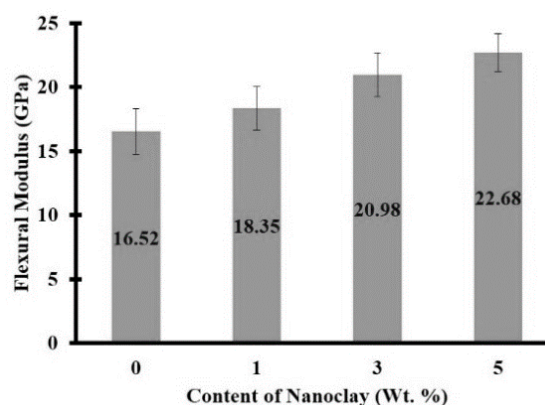


Fig. 4 Effect of modified nanoclay on the flexural modulus of basalt fiber-epoxy composites

شکل 4 اثر نانورس اصلاح شده بر مدول خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت

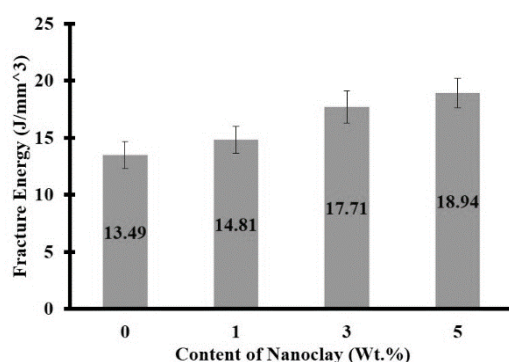


Fig. 6 Effect of modified nanoclay on the fracture energy of basalt fiber-epoxy composites

شکل 6 اثر نانورس اصلاح شده بر انرژی شکست کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت

در نهایت، به منظور بررسی تاثیر نقش عامل سیلان مورد استفاده در پراکندگی مناسب لایه‌های خاک رس، به مطالعه تاثیر حضور این عامل روی خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی مورد بحث در حضور فاز تقویتی نانولوله کربنی پرداخته شد. بدین منظور، نمونه‌های مورد نظر برای انجام آزمون خمش، دوباره با تکرار پروسه اشاره شده در بخش دوم برای نانوکامپوزیت هیبریدی جدید، ساخته شده، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مربوطه در جدول 2 آورده شده است. مهمترین نکته آن است که عامل سیلان معرفی شده در مقاله و پروسه افزودن آن برخلاف خاک رس در مورد نانولوله کربنی موثر نبوده و برخلاف نمونه‌های حاوی خاک رس، در این حالت مقدار بهینه برای نانولوله گزارش شده است. این مطلب نشان می‌دهد پروسه پراکندگی در مورد نانولوله کربنی به خوبی صفحات خاک رس صورت نگرفته است.

3-3- بررسی ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی ذرات نانورس توزیع شده درون زمینه در شکل 7 مشاهده می‌گردد. برای نمونه‌های شاهد که فاقد نانورس هستند (شکل 7-الف) صاف بودن سطح شکست الیاف نشان از فصل مشترک ضعیف بین زمینه پلیمری و الیاف بازالت دارد. درمقابل، برای نمونه‌های حاوی نانورس اصلاح شده (شکل

شکل 5 تاثیر افزودن نانورس بر کرنش شکست خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت را نشان می‌دهد. با افزودن نانورس به اپوکسی، کرنش شکست کامپوزیت به طور پیوسته بهبود یافت. با افزودن 1 درصد وزنی نانورس، کرنش شکست 4 درصد افزایش یافت. این در حالی است که افزودن 3 درصد وزنی نانورس منجر به افزایش 9 درصدی در کرنش شکست شد. اما بیشترین بهبود در کرنش شکست با افزودن 5 درصد وزنی نانورس حاصل شد که در طی آن کرنش شکست 15 درصد در مقایسه با نمونه شاهد (فاقد نانورس) ارتقا یافت. نانورس به دلیل داشتن استحکام و سفتی بالا به عنوان موانعی برای رشد ترک در مسیر مستقیم به حساب می‌آید. توزیع بهینه این نانوذرات درون زمینه اپوکسی باعث می‌شود که جوانه‌زنی و اشاعه ترک به تاخیر افتد که نتیجه آن افزایش کرنش شکست کامپوزیت است [26].

از طرفی یکی از عوامل موثر در بهبود کرنش شکست علاوه بر حضور نانورس درون زمینه، بهسازی سطحی این نانوذرات توسط عامل سیلان بود. با توجه به طبیعت آب دوست نانورس توزیع مطلوب آن‌ها درون زمینه پلیمری مشکل بوده و در نتیجه عملکرد آن‌ها برای بهبود خواص کاهش می‌یابد. با اصلاح سطحی آن‌ها روند توزیع آن‌ها درون زمینه بهبود یافته و با توزیع مناسب آن‌ها چقرمگی شکست کامپوزیت به طور موثرتری افزایش می‌یابد. در شکل 6 میزان انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت برحسب مقادیر مختلف نانورس آمده است. بیشترین میزان افزایش، مربوط به کامپوزیت حاوی 5 درصد وزنی نانورس حاصل شد. در کامپوزیت فاقد نانورس میزان انرژی شکست برابر با 13.49 ژول بر میلی‌متر مکعب بود. این در حالی است که با افزودن 5 درصد وزنی نانورس انرژی شکست به عدد 18.94 ژول بر میلی‌متر مکعب افزایش یافت. افزایش انرژی شکست در اثر بارگذاری خمشی به علت انحراف ترک در زمینه به وسیله نانورس باعث بهبود جذب انرژی در کامپوزیت می‌شود.

هنگامی که ترک به نانوذرات می‌رسد، برای اشاعه ترک نیاز به تغییر مسیر رشد ترک است که این امر سبب افزایش انرژی لازم برای اشاعه ترک و در نتیجه، افزایش جذب انرژی کامپوزیت می‌گردد. نکته مهم آن است که بخشی کمی از انرژی مصرف شده به دلیل طولانی شدن مسیر رشد ترک بوده و درصد عظیمی از آن مربوط به رشد ترک تحت مود ترکیبی I/II است. لازم به ذکر است که در این حالت، سهم عمده‌ای از انرژی داده شده به نمونه، صرف تغییر شکل آن شده که این موضوع، به نحو موثری رشد ترک را به تاخیر می‌اندازد [27].

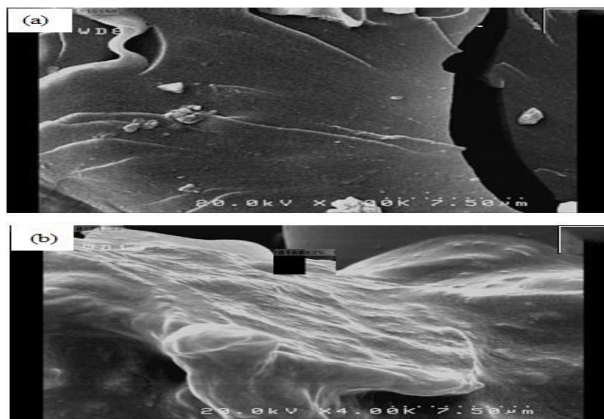


Fig. 8 Fracture surface of a) neat epoxy and b) sample containing 5 wt.% of modified nanoclay

شکل 8 سطح شکست الف) اپوکسی خالص و ب) نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانورس اصلاح شده

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر توزیع نانورس اصلاح شده با عامل سیلان بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمشی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ذرات نانورس اصلاح شده در مقادیر 0، 1، 3 و 5 درصد وزنی، داخل زمینه اپوکسی توزیع شدند که نتایج نهایی این تحقیق به شرح زیر است:

- 1- نتایج حاصل از طیف سنجی مادون قرمز روند اصلاح سطحی نانورس عامل سیلان را تایید نمود.
- 2- نتایج حاصل از آزمون خمش نشان داد که افزودن 5 درصد وزنی نانورس بیشترین بهبود را خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت ایجاد می‌نماید که به موجب آن استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست و انرژی شکست به ترتیب به میزان 30، 38، 15 و 40 درصد افزایش یافتند.
- 3- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی عمق میدانی مشخص نمود که بهبود عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت در اثر افزودن نانورس ناشی از بهبود انتقال بار بین الیاف تقویت‌کننده و زمینه پلیمری است.

5- مراجع

- [1] Barbero, E. J. "Introduction to Composite Materials Design: 2nd edition", CRC Press, 2010
- [2] Sano, T., Srivastan, T. S. and Peretti, M. W., "Advanced Composites for Aerospace, Marine, and Land Applications" Wiley TMS, 2014.
- [3] Deborah, D. L., "Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies" Springer London, 2003.
- [4] Hyer, M. W., "Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials" WCB/McGraw-Hill, New York, 1998.
- [5] Fischer, H., "Polymer Nanocomposites Fundamental Research to Specific Applications", Materials Science and Engineering C, Vol. 23, pp.763-772, 2003.
- [6] Kumar, M. S. S., Raju, N. M. S., Sampath, P. S. and Jayakumari, L. S., "Effects of Nanomaterials on Polymer Composites: An Expatriate View" Review Advanced Materials Science, Vol. 38, pp. 40-54, 2014.
- [7] Hussain, F. and Hojjati, M., "Review Article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview" Journal of Composite Materials, Vol. 40, No. 17, pp. 1511-1574, 2006.

7-ب) پس از شکست کامپوزیت ناشی از خمش سه نقطه‌ای مقداری از فاز زمینه پلیمری به سطح الیاف تقویت‌کننده بازالت الحاق یافته است که این موضوع نشان‌دهنده چسبندگی مطلوب بین زمینه اپوکسی و الیاف در نتیجه توزیع نانورس درون زمینه است.

جدول 2 نتایج مربوط به آزمون خمشی سه نقطه‌ای برای نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربنی

Table 2 Results of three-point bending test for the samples reinforced with carbon nanorubes

درصد وزنی نانولوله	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)	انرژی شکست (J/mm^2)	کرنش شکست
0	469.2±30	16.52±1.8	13.49±1.2	0.047±0.0025
0.1	534.4±25	19.34±1.6	16.16±1.3	0.051±0.0029
0.3	631.38±28	23.47±1.5	19.82±1.4	0.055±0.003
0.5	585.53±32	24.8±1.7	18.38±1.6	0.054±0.0034

نتیجه‌ای که از مقایسه این دو تصویر می‌توان برداشت نمود این است که در نمونه‌های کنترلی فاقد نانولوله‌های کربنی، جدایش فصل مشترک الیاف و زمینه مکانیزم غالب شکست است. این در حالی است که در نمونه‌های با زمینه نانوکامپوزیتی مکانیزم غالب شکست ترک خوردن زمینه است. در شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست زمینه اپوکسی خالص و تقویت‌شده با نانورس اصلاح شده نشان داده شده است. در ارتباط با نمونه‌های فاقد نانورس (شکل 8-الف)، سطح شکست زمینه صاف بوده که نشان‌دهنده شکست ترد زمینه بوده و ترک ایجادشده به صورت مستقیم درون زمینه اشاعه یافته است. برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با 5 درصد وزنی نانورس (شکل 8-ب)، ناهمواری ایجادشده در سطح شکست نشان‌دهنده این مطلب است که نانوذرات توزیع شده درون زمینه به عنوان مانعی در برابر اشاعه ترک در مسیر مستقیم عمل کرده، منجر به افزایش چقرمگی کامپوزیت شده‌اند.

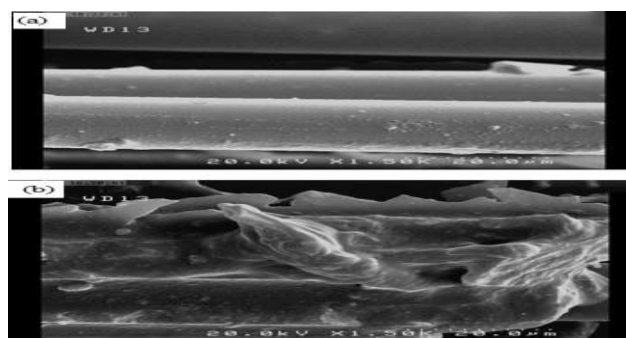


Fig. 7 Fracture surface of a) control specimen and b) sample containing 5 wt.% of modified nanoclay

شکل 7 سطح شکست الف) نمونه کنترلی و ب) نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانورس اصلاح شده

- [27] Han, J. T. and Cho, K., "Layered Silicate-Induced Enhancement of Fracture Toughness of Epoxy Molding Compounds over a Wide Temperature Range" *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 290, pp. 1184-1191, 2005.
- [8] Xu, Y., Peng, H., Wang, X., and Su, S., "Comparative Study of Different Polymerically modified Clays on Curing Reaction and Thermal Properties of Epoxy Resin" *Thermochemical Acta*, Vol. 516, pp. 13-18, 2011.
- [9] J Azeez, A. A., Rhee, K. Y., Park, S. J. and Hui, D., "Epoxy Clay Nanocomposites- Processing, Properties and Applications: A review" *Composites: Part B*, Vol. 45, pp. 308-320, 2013.
- [10] Uddin, F., "Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals" *Metallurgical and Materials Transactions, A*, Vol. 39, pp. 2804-2814, 2008.
- [11] Ayatollahi, M. R., Shokrieh, M. M., Shadlou, S., Kefayati, A. R. and Chitsazadeh, M., "Mechanical and Electrical Properties of Epoxy/Multi-walled Carbon Nanotube/ Nanoclay Nanocomposites" *Iranian Polymer Journal*, Vol. 20, pp. 835-843, 2011.
- [12] Chan, M. L., Lau, K. T., Wong, T. T., Ho, M. P. and Hui, D., "Mechanism of Reinforcement in a Nanoclay/Polymer Composite" *Composites Part B-Eng*, Vol. 42, pp. 1708-1712, 2011.
- [13] Albdiry, M. T., Yousif, B. F. and Ku, H., "Fracture Toughness and Toughening Mechanisms of Unsaturated Polyester-Based Clay Nanocomposites", 13TH International Conference on Fracture June 16-21, Beijing, China, 2013.
- [14] Chowdary, M. S. and Kumar, M. S. R. N., "Effect of Nanoclay on the Mechanical properties of Polyester and S-Glass Fiber (Al)" *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 74, pp. 35-42, 2015.
- [15] Rafiq, A., Al-Qadhib, M., Merahc, N., Ali, Y., "Mechanical Behavior of Hybrid Glass Fibre/Epoxy Clay Nanocomposites" *Advanced Materials Research*, Vol. 894, pp. 336-341, 2014.
- [16] Pol, M. H., Liaghat, Gh. H., Mehrabani, Yeganeh, E., Afrouzian, A., "Experimental Investigation of Nanoclay and Nanosilica Particles Effects on Mechanical Properties of Glass Epoxy Composites" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015.
- [17] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "On the mechanical characterizations of unidirectional basalt fiber/epoxy laminated composites with 3-glycidoxypolytrimethoxysilane functionalized multi-walled carbon nanotubes-enhanced matrix" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(5), 421-434, 2016
- [18] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites Using Silane-Modified Na⁺- Montmorillonite Nanoclay" *Polymer Testing*, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [19] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D790, 2003.
- [20] Mariche, R., Sanchez, M., Suarez, A. J., Prolongo, S. G. and Urena, A., "Electrically Conductive Functionalized- GNP/Epoxy Based Composites: From Nanocomposite to Multiscale Glass Fibre Composite Material" *Composites Part B*, Vol. 98, pp. 49-55, 2016.
- [21] Avila, A. F., Peixoto, L. G. Z., Silva Neto, A., De avila, J. and Carvalho, M. G. R., "Bending Investigation on Carbon Fiber/Epoxy Composites Nano- Modified by Graphene" *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 35, pp. 269- 275, 2012.
- [22] Kim, J. K. and Mai, Y. W., "Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites" Elsevier, 1998.
- [23] Singh, S. K., Singh, S., Sharma, and S., Sharma, V., "Strength Degradation of Mechanical Properties of Unidirectional E- glass Fiber Epoxy Resin Nanoclay Composites Under Hygrothermal Loading Conditions" *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 1114-1119, 2014.
- [24] Sharma, B., Khosravi, H., Chibber, S., and Mehta, R., "Effect of surface treatment of nanoclay on the mechanical properties of epoxy/glass fiber/clay nanocomposites" *Composite Interfaces*, Vol. 23, pp. 6323-640, 2016.
- [25] Rahimi, Gh.H., Zamani, R. and Pol, M. H., "Studies on The Tensile and Flexural Properties of TETA-Cured Epoxy Resins Modified With Clay" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 29-34, 2014 (In Persian).
- [26] Ngo, T. D., Nguyen, Q. T., Nguyen, T. P. and Tran, P., "Effect of Nanoclay on Thermomechanical Properties of Epoxy/Glass Fiber Composites" *Arabian Journal Science and Engineering*, Vol. 41, pp. 1251-1261, 2016.



اثر نانو لوله کربنی بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت هیبریدی الیاف کولار- پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا با چیدمان لایه لایه

منصور باوفا بیگدیلو¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، حسین ابراهیم نژاد خالجیری³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/02/23

پذیرش: 97/08/19

کلیدواژگان

نانو لوله کربنی چند جداره

الیاف کولار

الیاف پلی اتیلن

ضربه سرعت بالا

چکیده

در این تحقیق، تاثیر افزودن نانولوله کربنی چند جداره بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیتهای زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کولار و الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا با چیدمان لایه لایه بررسی شد. در ابتدا، نمونههای کامپوزیتی هیبریدی در درصدهای وزنی 0.1، 0.3، 0.5 و 0.9 از نانولوله کربنی به روش لایه گذاری دستی در دمای 200 درجه سانتیگراد و زمان 50 دقیقه ساخته شدند. سپس آزمایش ضربه سرعت بالا با پرتابه نوک تیز با سرعت 84 m/s بر روی کامپوزیتهای هیبریدی انجام پذیرفت. همچنین برای بررسی مکانیزم شکست نانو کامپوزیتهای هیبریدی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد جذب انرژی برای نمونه حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو به میزان 13.56 درصد افزایش یافته است. توزیع مناسب نانولوله کربنی و انتقال تنش بین الیاف و زمینه، باعث شدند تا افزایش لایه لایه شدگی و جذب انرژی بیشتر شود. همچنین نتایج میکروسکوپی نشان داد در 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی با ایجاد پدیده های پلزی ترک و بیرون کشیدگی نانولوله جذب انرژی در کامپوزیت هیبریدی افزایش یافته است.

The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar-ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration

Mansour Bavafa Bigdilou¹, Reza Eslami-Farsani^{2*}, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri²

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. 19919-43344, Tehran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Multi-walled carbon nanotubes
Kevlar fibers
Polyethylene fibers
High velocity impact

Abstract

In this research, the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on the high velocity impact behavior of epoxy matrix composites with kevlar fibers and ultra-high molecular weight polyethylene fibers layered arrangement was investigated. Initially, hybrid composite specimens were made in 0.1, 0.3, 0.5 and 0.9 wt.% carbon nanotube by hand lay-up method, in the temperature of 200 °C and 50 minutes. Therefore, high velocity impact test with a sharp projectile with velocity 84 m/s was performed on hybrid composites. Also, to investigate the failure mechanism of hybrid nanocomposites, a field emission scanning electron microscope (FESEM) was used. The results showed that an energy adsorption increased for the specimen containing 0.1 wt.% of carbon nanotubes by 13.56% in comparison with the without nano specimen. The proper distribution of carbon nanotubes and stress transfer between fibers and matrix were caused to increase the delamination and energy absorption. Also, microscopic results showed that in 0.1 wt.% of carbon nanotube, the energy absorption in the hybrid composite was increased by the cracking bridging and nanotube pulling out phenomena.

1- مقدمه

گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از این کاربردهای مناسب که در مورد کامپوزیت ها حاصل شده است، استفاده از آن ها در کاربردهای مقاوم به ضربه می باشد. محافظت در برابر عوامل مقاوم به ضربه یکی از مسائل همیشگی در تحقیقات مرتبط با مسایل و تحلیل های مکانیکی به شمار می رود و مطالعات

مواد کامپوزیتی یکی از پرمصرف ترین مواد در صنایع پیشرو، مواد کامپوزیتی با زمینه پلیمری هستند که به دلیل دارا بودن ویژگی های خاص مانند خواص خوب در دمای محیط، سهولت ساخت و هزینه کم در کاربردهای متنوع و

Please cite this article using:

Bavafa Bigdilou, M. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar- ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 533-540 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

انجام یافته در دهه‌های اخیر نقش و اهمیت این امر را در این زمینه به وضوح روشن ساخته است [1-3]. مزیت استفاده از کامپوزیت‌ها در طراحی‌های مرتبط با کاربرهای ضربه‌ای در وهله نخست، سبک بودن در مقایسه با سایر مواد مثل فولاد و در درجه دوم سازگاری بهتر و مناسب‌تر و همچنین راحتی کاربرد آنها در مقایسه با فلزات می‌باشد [4].

برای بهبود خواصی چون دانسیته، مدول الاستیسیته، چقرمگی و مقاومت در برابر خستگی و ضربه می‌توان از کامپوزیت‌های هیبریدی استفاده کرد. کامپوزیت‌های هیبریدی مواد چندکاره‌ای هستند که شامل دو یا چند جزء تقویت‌کننده هستند که اجزا از نظر شیمیایی و در مقیاس ماکرو از همدیگر متمایز هستند. این مواد دارای فصل مشترک‌های جداگانه هستند. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف هیبریدی در مقایسه با کامپوزیت‌هایی که با یک نوع از الیاف تقویت شده‌اند، خواص مکانیکی، حرارتی و ترشوندگی بهتری را از خود نشان می‌دهند. [6,5].

با معرفی الیاف کولار^۱ در سال 1972 توسط شرکت آمریکایی دوپونت^۲ تحول عظیمی در صنایع کامپوزیتی صورت گرفت. این الیاف با قابلیت‌های بالا و خواص بی‌نظیری هم‌چون دانسیته کم، استحکام کششی و مدول بالا، چقرمگی خوب و مقاوم به ضربه و با سفتی حدود نصف الیاف کربن هنوز هم به عنوان یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌ها در کاربردهای کامپوزیتی به شمار می‌رود [8,7]. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا^۳، چندین مزیت نسبت به کامپوزیت‌های حاوی الیاف کولار دارند. از آن جمله می‌توان به استحکام و مدول بالاتر، قابلیت جذب انرژی، نرمی بالا، مقاومت برش و میرایی بالای ضربه و سبکی این الیاف نسبت به کولار اشاره کرد [9-11].

لازم به ذکر است که وجود نانولوله‌های کربنی^۴ باعث شده تا این مواد گزینه‌ای ایده‌آل برای مقاوم‌سازی پلیمرها و سایر مواد باشند. این مواد می‌توانند برای ساخت کامپوزیت‌ها با خواص بهینه‌تر مورد استفاده قرار گیرند. مطالعه بر روی ظرفیت جذب انرژی نانولوله‌های کربنی تحت اثر برخورد با پرتابه، نشان می‌دهد که می‌توان از نانولوله‌های کربنی به عنوان فاز تقویت‌کننده در مواد کامپوزیتی استفاده کرد تا مقاومت آنها در برابر نفوذ پرتابه بالا رود [12,13].

میشلای^۵ و همکارانش [14] رفتار ضربه سرعت بالا و محافظ الکترومغناطیسی کامپوزیت اپوکسی- الیاف کولار حاوی نانولوله‌های کربنی را بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که این کامپوزیت‌ها به طور موثر می‌توانند برای برنامه‌های کاربردی چند منظوره به کار گرفته شوند. همچنین نانولوله کربنی سختی مکانیکی کامپوزیت را افزایش داده و در نتیجه رفتار موثری در ضربه سرعت بالا از طریق اثرات پخش شده انرژی دارد.

خاتیوادی^۶ و همکارانش [15] آزمایش ضربه سرعت بالا روی کامپوزیت‌اپوکسی- الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا حاوی نانولوله‌های کربنی تک جداره را در مقایسه با کامپوزیت بدون نانو و همچنین ورق‌های آلومینیوم بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت مذکور در مقایسه با سایر نمونه‌ها از خواص ضربه سرعت بالای بهتری برخوردار است.

خسروی^۷ و همکارانش [16] تاثیر افزودن نانولوله کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که بهبود خواص در درصدهای 0.3 و 0.5 نانولوله کربنی حاصل شده است. اینام^۸ و همکارانش [17] تاثیر مقادیر بسیار کم نانولوله کربنی (0.025، 0.05 و 0.1 درصد وزنی) را در کامپوزیت زمینه اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین خواص مکانیکی در مقدار 0.025 درصد وزنی نانولوله کربنی بدست آمده که موجب افزایش 35 درصدی مدول خمشی شده است. ترقی^۹ و همکارانش [18] پاسخ ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های چند لایه اپوکسی-الیاف کولار با درصدهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی چند جداره را در شرایط دمای محیط و دمای 40- درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که نانولوله کربنی رفتار مقاومت به ضربه را بهبود داده است و اندازه آسیب در الیاف کولار در دمای محیط و دمای پایین محدود شده است. علاوه بر این، 0.5 درصد وزنی نانولوله کربنی منجر به افزایش حدود 35 درصد در جذب انرژی در دمای محیط شده است، در حالی که 0.3 درصد وزنی نانولوله کربنی حدود 34 درصد جذب انرژی را در دمای پایین به همراه دارد.

چودری^{۱۰} و همکارانش [19] تاثیر بارهای محوری و عرضی بر روی استحکام و مدول کششی الیاف کولار و الیاف پلی‌اتیلن بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدول کششی و استحکام کششی برای الیاف کولار به ترتیب 4 و 9 درصد و برای الیاف پلی‌اتیلن به ترتیب 19 و 12 درصد کاهش یافتند. بوتولا^{۱۱} و همکارانش [20] چند لایه‌های کامپوزیتی بر پایه الیاف با کارایی بالا مانند کولار و پلی‌اتیلن برای کاربردهای مقاوم به ضربه را بررسی کردند. در میان کامپوزیت‌ها، نمونه‌هایی با الیاف کولار جذب انرژی ضربه بالاتری را از الیاف پلی‌اتیلن نشان دادند. با این حال، کامپوزیت حاوی پلی‌اتیلن، نیرو و انرژی بالاتری را تا شکست نشان داد.

با توجه به تجربه و دانش قبلی، در حال حاضر برای ساخت کامپوزیت‌ها با خاصیت مقاومت عالی در برابر بارهای ضربه‌ای، الیاف کولار و الیاف پلی‌اتیلن بیشترین کاربرد را دارند. افزودن نانوذرات باعث بهبود خواص مکانیکی از جمله خواص ضربه‌ای کامپوزیت می‌شود. تاکنون بررسی رفتار مکانیکی سازه‌های هیبریدی الیاف کولار و پلی‌اتیلن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری این کار پژوهشی افزودن نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت هیبریدی الیاف کولار- پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا و بررسی خواص مقاومت به ضربه این نوع از کامپوزیت‌ها می‌باشد. شایان ذکر است نوع چیدمان هیبریدی انتخاب شده چیدمان لایه لایه می‌باشد.

2- بخش تجربی

2-1- مواد اولیه

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی بیسفنول A^{۱۲} تحت نام تجاری اپوکسی 828 و هاردنر پلی‌آمین^{۱۳} CETEPOX1312-05 ساخت شرکت آدیپتیا بیرلا^{۱۴} و هاردنر پلی‌آمین^{۱۳} 100 به 10 به عنوان زمینه کامپوزیت انتخاب شد. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی از پارچه‌های الیاف کولار (ساخت شرکت کولان^{۱۵} کشور استرالیا) و الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا (ساخت

⁹ Taraghi

¹⁰ Chowdhury

¹¹ Butola

¹² Bisphenol A

¹³ Polyamine hardener

¹⁴ Aditya Birla

¹⁵ Colan

¹ Kevlar

² Dupont

³ Ultra High Molecular Weight Polyethylen

⁴ Carbon Nanotubes

⁵ Micheli

⁶ Khatiwada

⁷ Khosravi

⁸ Inam

در ادامه، مخلوط حاصل در دستگاه اولتراسونیک (ساخت شرکت فاپن ایران) به مدت 60 min با فرکانس 24 KHz قرار گرفته تا نانوذرات درون اپوکسی بهتر پخش شوند و از تشکیل کلوخه‌ها و حباب‌ها تا حد ممکن جلوگیری شود. انتخاب نوع روش هم زدن و انجام فرآیند التراسونیک براساس روش بهینه شده در کارهای تحقیقاتی قبلی انجام شده است [16]. در طی فرآیند اولتراسونیک، از آنجایی که انرژی زیادی به مخلوط منتقل می‌شود، باعث بالا رفتن قابل توجه دما و تخریب اپوکسی می‌شود، لذا لازم است بشر حاوی مخلوط در طی فرآیند اولتراسونیک، درون ظرف حمام آب و یخ قرار داده شود.

2-3- ساخت نمونه

برای تهیه نمونه‌ها چندین مرحله وجود دارد. ابتدا پارچه‌های الیاف کولار (K) و الیاف پلی اتیلن (P) در ابعاد مناسب برش داده شده و آماده شدند. سپس وزن مجموع الیاف کولار و پلی اتیلن توسط ترازو اندازه‌گیری شده و نمونه‌های کامپوزیتی با نسبت وزنی الیاف به رزین 20:80 (مطابق با معادله 1) ساخته شدند. شایان ذکر است که فرآیند تولید الیاف پلی اتیلن به گونه‌ای است که توسط یک رزین فعال‌شونده با گرما در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، همین امر باعث شده است تا میزان استفاده از رزین اپوکسی کاهش یابد. بعد از به دست آوردن مخلوطی کاملاً یکنواخت از رزین اپوکسی، هاردنر و نانولوله‌های کربنی (با درصد‌های وزنی 0، 0.1، 0.3، 0.5 و 0.9)، عملیات لایه چینی به صورت لایه‌گذاری دستی در حالت K/P/K/P/K/P/K/P انجام پذیرفت (شکل 1). در هر بار یک لایه پارچه درون قالب فلزی قرار گرفته و مخلوط کامپوزیت اپوکسی/نانو لوله کربنی بر روی آن توزیع می‌شود. قبل از شروع فرآیند آغشته‌سازی، لازم است در زیر اولین و آخرین لایه پارچه، دو عدد پارچه تفلون نفوذناپذیر قرار داده شود تا از چسبیدن رزین بعد از فرآیند پخت به سطح قالب جلوگیری به عمل آید. بعد از فرآیند لایه‌چینی، نمونه‌ها تحت پرس قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها برای حرارت دیدن در داخل آون قرار داده تا پخت شده و بهم بچسبند. همچنین جهت مقایسه نتایج، نمونه‌های کامپوزیتی بدون افزودن نانولوله‌های کربنی نیز ساخته شد. به منظور پخت نهایی و دستیابی به حداکثر میزان استحکام در نمونه‌ها، انجام آزمون تست ضربه پس از گذشت 5 روز از مرحله ساخت صورت گرفت.

$$(1) \quad 100 \times \frac{\text{وزن الیاف-وزن کامپوزیت}}{\text{وزن کامپوزیت}} = \text{نسبت رزین به الیاف}$$

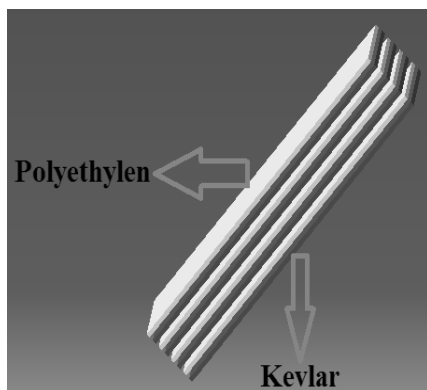


Fig. 1 Layer arrangement P/K/P/K/P/K/P/K

شکل 1 چیدمان لایه چینی P/K/P/K/P/K/P/K

شرکت داینما¹ کشور هلند) به عنوان تقویت کننده استفاده شد. در جدول‌های 1، 2، 3 و 4 به ترتیب برخی از مشخصات رزین اپوکسی، هاردنر، الیاف پلی اتیلن و الیاف کولار آورده شده است. نانولوله‌های کربنی حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیل² (COOH) متعلق به شرکت چیپ‌تیوپ³ کشور آمریکا نیز به عنوان تقویت کننده فاز نانو استفاده شد. در جدول 5 برخی از مشخصه‌های اصلی نانو لوله کربنی چند جداره بیان شده است.

جدول 1 مشخصات رزین اپوکسی

Table 1 Specification epoxy resin

زمان کارکرد پس از مخلوط (دقیقه)	رنگ	دانسیته (g/cm ³)	مقاومت حرارتی (m ² K/W)
120-1000	بی رنگ	1.17	140

جدول 2 مشخصات چسب هاردنر

Table 2 Specification hardener adhesive

چگالی (g/cm ³)	ویسکوزیته (mpas)	نقطه اشتغال (°C)	محتوای وزن جامد (%)
1.03±0.01	620±100	100<	100

جدول 3 مشخصات پارچه الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا

Table 3 Specifications of ultra-high molecular weight polyethylene fibers fabric

نام تجاری	چگالی (g/cm ³)	استحکام کششی (MPa)	نوع بافت
Dyneema sb21	0.97	2600	غیربافتنی

جدول 4 مشخصات پارچه الیاف کولار

Table 4 Specification of Kevlar fibers fabric

نوع بافت	چگالی سطحی (g/cm ²)	استحکام کششی (N/25mm)	چگالی (g/cm ³)
ساده	122	تار: 2560 پود: 2738	1.44

جدول 5 مشخصات نانولوله کربنی چند جداره

Table 5 Specification multi-walled carbon nanotubes

مقدار	مساحت سطحی ویژه (m ² /g)	طول (μm)	قطر خارجی (nm)	قطر داخلی (nm)	درصد COOH (wt.%)
2	233	10-30	10-20	5-10	>95

2-2- نحوه توزیع نانو لوله کربنی در اپوکسی

قبل از اختلاط رزین و هاردنر، باید نانولوله‌های کربنی به خوبی درون اپوکسی توزیع شده و کلوخه‌های موجود در آن‌ها شکسته شود. مقدار مورد نیاز از نانولوله‌ها با توجه به درصد وزنی مورد نظر (0.1، 0.3، 0.5 و 0.9) با ترازوی بسیار دقیق وزن شده، سپس نانولوله‌ها به رزین اضافه شده و مخلوط رزین و نانولوله‌ها به مدت 20 min با سرعت 2000 rpm با همزن مکانیکی دور بالا (مدل SD11-D محصول شرکت فاین تک کره جنوبی) به خوبی هم زده شدند. در طی هم زدن و به منظور کم کردن لزجت رزین و دستیابی به اختلاط بهتر، بشر بر روی گرمکن قرار می‌گیرد تا دمای مخلوط مقداری افزایش یافته و لزجت کاهش یابد.

³ Cheaptube

¹ Dyneema

² Carboxyl

2-4- ساخت فیکسچر

همان‌طور که در شکل 2 مشخص است، فیکسچر به شکل مربعی و دارای ابعاد $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ساخته شده است. فیکسچر با هشت پیچ 8 mm و سوراخی به قطر 10 mm و همچنین فاصله 4 cm از یکدیگر در طرفین برای تست ضربه ساخته شد تا شرایط مرزی گیردار در مرزهای ورق ایجاد شود.

2-5- ساخت نفوذ کننده‌ها

در این تحقیق، نفوذ کننده استوانه ای با شکل دماغه نوک تیز و با قطر 10 mm ساخته شد. به منظور اطمینان از عدم تغییر شکل و یا شکست حین فرآیند نفوذ نیز با انجام عملیات حرارتی، سختی حدود 52-53 HRC بدست آمد. شکل 3، نفوذ کننده ساخته شده با دماغه نوک تیز را نشان می‌دهد.

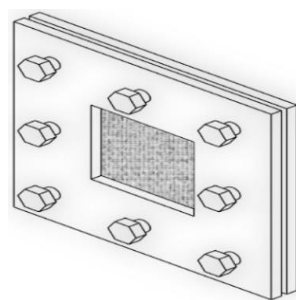


Fig. 2 Used fixture

شکل 2 فیکسچر مورد استفاده



Fig. 3 Sharp projectile

شکل 3 پرتابه نوک تیز

2-6- آزمایش ضربه سرعت بالا

نمونه‌های چند لایه کامپوزیتی هیبریدی تولید شده، توسط دستگاه تست ضربه سرعت بالا (مدل M211) موجود در آزمایشگاه مرکز عالی تحقیقات مواد و سازه‌های پیشرفته و هوشمند دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تحت ضربه قرار گرفتند. در این نوع دستگاه‌ها، پرتابه با جرم کم با استفاده از هوای فشرده در لوله تفنگ به جلو رانده می‌شود. هوای فشرده با فشار 3 bar به درون مخزن فرستاده شده و به وسیله تنظیم کننده فشار به فشار کنترل شده می‌رسد. با تغییر فشار هوا سرعت اولیه پرتابه 84 m/s تنظیم می‌شود. فشار به کمک یک شیر سلونوئیدی یا ساز و کارهای دیگر آزاد می‌شود. پرتابه از درون لوله تفنگ گذشته و در آستانه خروج از روی یک دستگاه سرعت سنج عبور می‌کند. بعد از برخورد پرتابه به هدف و در صورت عبور از آن، سرعت خروجی پرتابه، به دلیل امکان انحراف پرتابه، توسط دو ردیف لیزر که با فاصله از هم قرار دارند، اندازه‌گیری می‌شود.

در این تحقیق، جذب انرژی با محاسبه معادله (2) از طریق جذب انرژی قبل از برخورد و جذب انرژی پس از برخورد تعیین می‌شود. همچنین سرعت حد از معادله (3) بدست می‌آید.

$$E_a = \frac{1}{2} m_p V_i^2 - \frac{1}{2} m_p V_r^2 \quad (2)$$

$$V_b = \sqrt{V_i^2 - V_r^2} \quad (3)$$

در روابط (2) و (3)، E_a ، جذب انرژی کامپوزیت (ژول)، m_p ، جرم پرتابه (کیلوگرم)، V_i ، سرعت پرتابه قبل از برخورد (متر بر ثانیه)، V_r ، سرعت پرتابه پس از نفوذ و هنگام خارج شدن از قطعه (متر بر ثانیه) و V_b ، سرعت حد (متر بر ثانیه) می‌باشند.

2-7- بررسی ریز ساختاری با FESEM

جهت بررسی ساختار و نحوه قرارگیری الیاف در لایه‌ها و همچنین برای بررسی نوع شکست الیاف بعد از شلیک پرتابه از دستگاه میکروسکوپ روبشی الکترونی گسیل میدانی¹ FESEM مدل MIRA3TESCAN-XMU استفاده شده است.

3- نتایج و بحث

لازم به ذکر است که پیش از بررسی رفتار ضربه نیاز است که مناسب بودن نحوه توزیع نانوذرات در زمینه پلیمری مورد بررسی قرار گیرد. برای دستیابی به این هدف از آنالیز میکروسکوپی FESEM استفاده شد. شکل 4 توزیع نانولوله کربنی در زمینه اپوکسی را نشان می‌دهد. براساس این شکل می‌توان مشاهده کرد که نانولوله‌های کربنی به صورت یکنواخت در زمینه اپوکسی توزیع شده‌اند و پدیده آگلومره شدن مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان بیان کرد که روش مورد استفاده برای توزیع نانولوله‌های کربنی و ساخت نمونه کامپوزیتی مناسب می‌باشد.

نتایج آزمایش ضربه سرعت بالا، بر روی نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی الیاف کولار- الیاف پلی اتیلن با و بدون نانولوله کربنی به صورت خلاصه در جدول 6 و نمودارهای آن در شکل‌های 5 و 6 ارائه شده است.

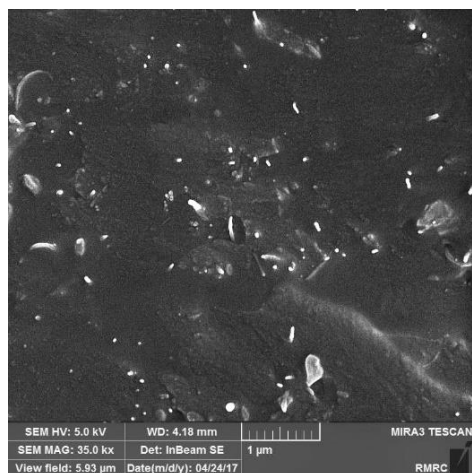


Fig. 4 Carbon nanotubes dispersion in epoxy matrix

شکل 4 توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه اپوکسی

¹ Field emission scanning electron microscope

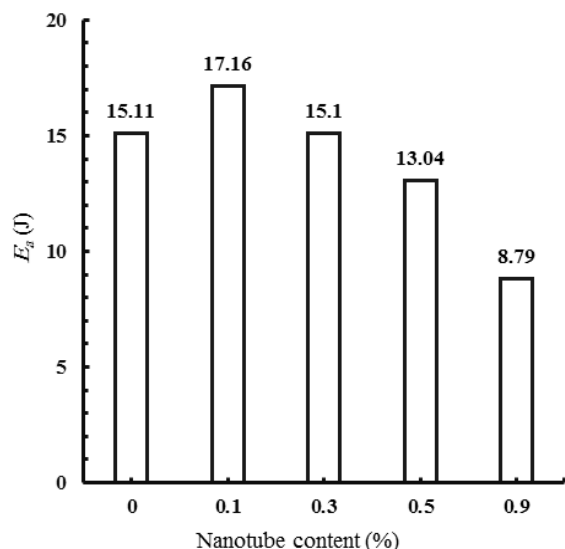


Fig. 5 Energy absorption after projectile encounters with hybrid composite specimens

شکل 5 جذب انرژی پس از برخورد پرتابه به نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی

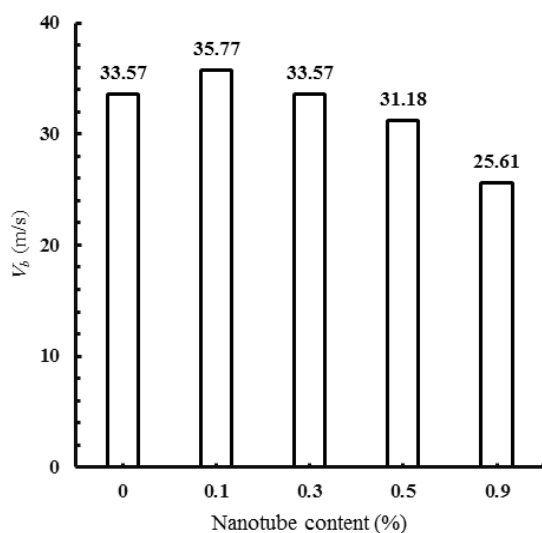


Fig. 6 Limit velocity after projectile encounters with hybrid composite specimens

شکل 6 سرعت حد پس از برخورد پرتابه به نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی

3-2- ارزیابی آسیب

مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی به علت نفوذ پرتابه نوک تیز به کامپوزیت هیبریدی شامل شکست الیاف، لایه‌لایه شدگی، ترک خوردگی زمینه و سوراخ شدن هستند. لایه‌لایه شدگی یکی از مهم‌ترین آسیب‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف است که ناشی از تنش برشی بین لایه‌ای است. این پدیده در ساختارهای کامپوزیت منجر به کاهش شدید ظرفیت باری آنها می‌شود. ترک خوردگی زمینه در حالت شکست اول در مواد کامپوزیتی به وسیله ترک خوردگی در امتداد الیاف به وجود می‌آید. سوراخ شدن کامپوزیت‌های هیبریدی تحت ضربه سرعت بالا، زمانی رخ می‌دهد که شکست الیاف به دلیل نفوذ پرتابه به یک مقدار بحرانی می‌رسد. به عنوان یک نتیجه، پرتابه پس از برخورد به هدف، به داخل آن نفوذ می‌کند [21].

جدول 6 نتایج آزمایش ضربه سرعت بالا

Table 6 Results of high velocity impact test

درصد وزنی نانو لوله کربنی	سرعت اولیه (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	جذب انرژی (J)	سرعت حد (m/s)	تخریب نمونه (cm ²)
0	84	77	15.11	33.57	12.1
0.1	84	76	17.16	35.77	47.3
0.3	84	77	15.11	33.57	15.8
0.5	84	78	13.04	31.18	9.5
0.9	84	80	8.79	25.61	8.3

K: کولار، P: پلی اتیلن

3-1- جذب انرژی و سرعت حد

شکل 5، نمودار جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی را نشان می‌دهد. نمونه 0.1 درصد نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو، 13.56 درصد افزایش در جذب انرژی را نشان می‌دهد، در حالی که در درصد نانو 0.3 نسبت به نمونه بدون نانو این افزایش برابر صفر می‌شود. درصدهای وزنی 0.5 و 0.9 نیز به ترتیب 13.69 و 41.28 درصد کاهش را نسبت به نمونه کامپوزیتی بدون نانو ارائه می‌دهند.

شکل 6، سرعت حد نمونه‌های آزمایش شده بعد از شلیک پرتابه در درصدهای مختلف نانولوله کربنی چند جداره را نشان می‌دهد. نمونه با 0.1 درصد نانو نسبت به نمونه بدون نانو 6.55 درصد افزایش سرعت حد و نمونه با درصدهای 0.5 و 0.9 نانو حدود 7.11 و 23.71 درصد کاهش سرعت حد نسبت به نمونه بدون نانو دارند.

در ضربه سرعت بالا، خاصیت مواد کامپوزیتی به پارامترهای مختلفی هم چون چقرمگی شکست، سرعت اولیه، جرم و نوک پرتابه، مدول، استحکام کششی، کرنش شکست الیاف و زمینه، رابطه بین الیاف و زمینه و لایه لایه شدگی کامپوزیت بستگی دارد. یکی از فاکتورهای مهم برای بهبود خاصیت ضربه سرعت بالا، افزایش انتقال تنش بین زمینه پلیمر و نانولوله کربنی چند جداره است [21].

در کامپوزیت‌های هیبریدی، فصل مشترک بین الیاف و زمینه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بار اعمال شده از طریق فصل مشترک انتقال داده می‌شود. بنابراین رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی تحت تاثیر فصل مشترک قرار دارد. فصل مشترک قوی بین الیاف و زمینه موجب بهبود استحکام کامپوزیت می‌شود. افزودن نانولوله کربنی چند جداره در داخل رزین و توزیع مناسب آن در زمینه، منجر به افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف شده و در نتیجه فصل مشترک بین الیاف و زمینه بهبود می‌یابد. از آنجا که انتقال تنش از طریق فصل مشترک صورت می‌گیرد، بهبود خواص فصل مشترک منجر به انتقال تنش موثری بین الیاف و زمینه می‌گردد. در نتیجه نانولوله کربنی به واسطه مکانیزم پل زنی و فصل مشترک زمینه-الیاف، استحکام و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های هیبریدی را افزایش می‌دهد [19-21].

به عبارتی دیگر، نمونه با 0.1 درصد وزنی نانو به دلیل اتصال قوی بین الیاف و زمینه و توزیع مناسب نانولوله کربنی تاثیر بیشتری بر خواص مکانیکی کامپوزیت هیبریدی داشته است. در نتیجه نمونه 0.1 درصد نانو در مقابل شلیک پرتابه، مقاومت و استحکام بیشتری نشان داده و باعث جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌هایی با درصد نانوهای مختلف شده است.

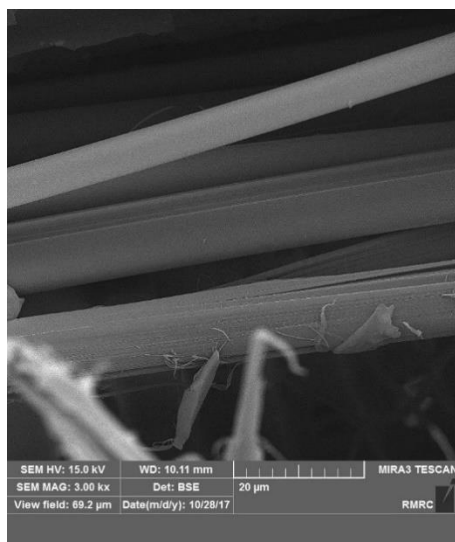


Fig. 8 Flat surface of Kevlar fibers in composite specimen without carbon nanotube

شکل 8 سطح صاف الیاف کولار در نمونه کامپوزیتی بدون نانو لوله کربنی

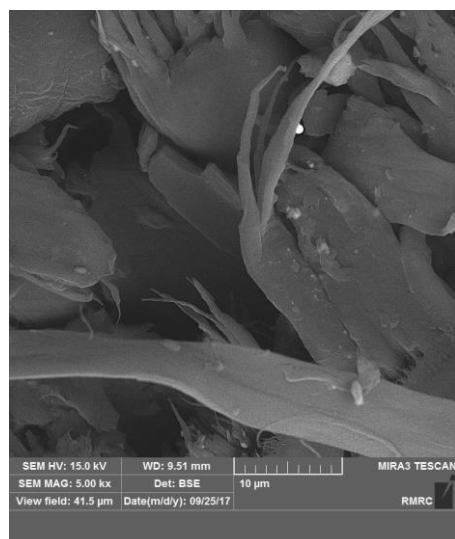


Fig. 9 Flat surface of polyethylene fibers in composite specimen without carbon nanotube

شکل 9 سطح صاف الیاف پلی اتیلن در نمونه کامپوزیتی بدون نانو لوله کربنی

شکل 10، سطح برشی الیاف در نمونه حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. وجود باندهای برشی به دلیل وجود نانولوله کربنی در زمینه است. به دلیل وجود باندهای برشی در کامپوزیت هیبریدی حاوی 0.1 درصد نانو پس از برخورد پرتابه، سرعت آن کمتر شده و مقداری کمی از انرژی آن گرفته می‌شود و یک مدخل در میان کامپوزیت برای ورود ایجاد می‌کند. در این حالت، لایه لایه شدگی اتفاق می‌افتد که نقش مهمی در جذب انرژی پرتابه بازی می‌کند، زمینه نیز نقش مهمی در میرایی ضربه و چسبندگی بین لایه‌ای دارد.

شکل 11، تشکیل آگلومره متشکل از نانولوله کربنی در زمینه حاوی 0.9 درصد وزنی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. وجود برخی آگلومره‌های نانولوله در زمینه، عامل اصلی افت برخی از خواص مکانیکی نمونه‌های حاوی 0.9 درصد تقویت کننده فاز نانو نسبت به درصد‌های دیگر می‌باشد. وجود آگلومره باعث کاهش لایه‌لایه شدگی و میزان تخریب کمتری شده و جذب انرژی کمتر در نمونه حاوی 0.9 درصد وزنی نانولوله کربنی را به همراه دارد.

شکل 7، ناحیه آسیب نمونه‌های کامپوزیتی مختلف پس از آزمایش ضربه سرعت بالا را نشان می‌دهد. در شکل 7b در نمونه با درصد نانوی 0.1، به دلیل جذب انرژی بیشتر، لایه لایه شدگی بیشتر شده [22] و در نتیجه ناحیه آسیب به 47.3 cm^2 رسیده است. در شکل 7c، برای نمونه با درصد نانو 0.3، ناحیه آسیب کم شده و به 15.8 cm^2 کاهش یافته است. در این حالت، اثر متقابل بین نانو و زمینه باعث جلوگیری از توسعه ناحیه آسیب شده است [23، 24]. در شکل 7d، برای درصد نانو 0.5، افزودن نانولوله‌ها بر اندازه آسیب تاثیر گذاشته و باعث کاهش سطح ناحیه آسیب تا 9.5 cm^2 شده است. در شکل 7e نیز برای درصد نانو 0.9، به دلیل توزیع نامطلوب نانو در اپوکسی، کلوخه ایجاد شده [25] و ناحیه آسیب به 8.3 cm^2 رسیده است.

یکی دیگر از عوامل مکانیزم شکست علاوه بر کلوخه شدن، گسترش حباب است. گسترش حباب از نقاط خلاء و جدایی ذرات نانو از زمینه شروع می‌شود که با افزایش درصد نانو زمینه برای گسترش حباب ایجاد شده است. مکانیزم گسترش حباب در اطراف نانو می‌تواند به خودی خود منجر به کاهش ناحیه آسیب شود، زیرا حباب به عنوان یک نقص عمل کرده و باعث افزایش سرعت جوانه زنی و رشد ترک می‌شود [26].

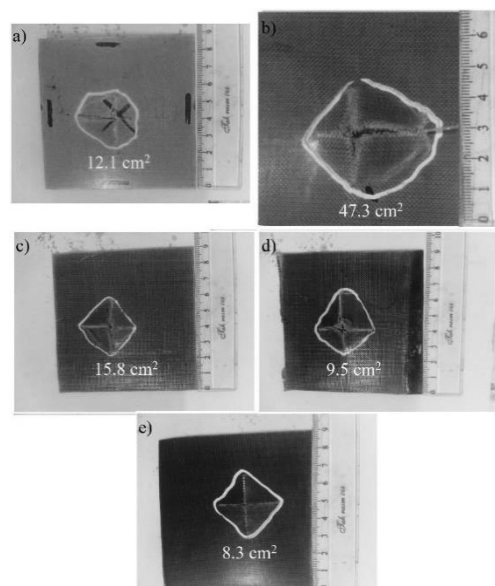


Fig. 7 Damage area in composites with different carbon nanotube: a) 0 wt.%, b) 0.1wt.%, c) 0.3 wt.%, d) 0.5 wt.%, e) 0.9 wt.%

شکل 7 ناحیه آسیب در کامپوزیت‌ها با مقادیر مختلف نانولوله کربنی: a) 0 wt.%, b) 0.1wt.%, c) 0.3 wt.%, d) 0.5 wt.%, e) 0.9 wt.%(b)

3-3- سطوح شکست

جهت بررسی سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی و تشخیص اثر نانو لوله کربنی بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های الیافی متشکل از کولار و پلی اتیلن، مطالعات میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ FESEM صورت گرفت که تصاویر آن در شکل‌های 8 تا 12 آورده شده است.

در شکل‌های 8 و 9، سطح شکست الیاف کولار و پلی اتیلن بدون افزودن نانولوله کربنی نشان داده شده است. شکل‌های 8 و 9 دارای سطوحی صاف و تمیز هستند. نبود زمینه بر روی سطوح الیاف نشان دهنده چسبندگی ضعیف تر الیاف می‌باشد. نتیجه‌ای که می‌توان گرفت، جدایش فصل مشترک بین الیاف و زمینه و جذب انرژی کمتر در این نوع کامپوزیت‌ها هنگام اصابت پرتابه خواهد بود.

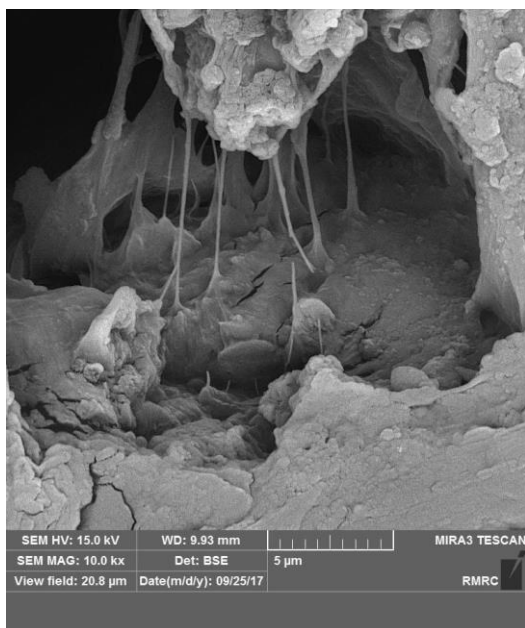


Fig. 12 Fracture surface crack bridging mechanism in composite containing 0.1 wt.% carbon nanotube

شکل 12 سطح شکست مکانیزم پل زنی ترک در نمونه کامپوزیتی حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی

4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، اثر افزودن نانولوله کربنی بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های هیبریدی الیافی زمینه اپوکسی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. کامپوزیت هیبریدی متشکل از الیاف کولار و الیاف پلی اتیلن با درصدهای وزنی 0، 0.1، 0.3، 0.5 و 0.9 نانو لوله کربنی چند جداره ساخته شد و با پرتابه نوک تیز تحت ضربه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت خلاصه در موارد زیر بیان کرد:

- بیشترین میزان اثر بخشی نانولوله کربنی در کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی 0.1 درصد وزنی حاصل شد. به طوری که میزان جذب انرژی، 13.56 درصد و سرعت حد، 6.55 درصد افزایش را نسبت به کامپوزیت مشابه فاقد نانو نشان می‌دهند.

- با افزودن نانولوله کربنی در درصد وزنی 0.1 در داخل اپوکسی، چسبندگی بین زمینه و الیاف تقویت کننده بهبود یافته است. به همین دلیل انتقال تنش موثری بین الیاف و زمینه ایجاد شده است. در نتیجه نانو لوله کربنی به واسطه مکانیزم پل زنی و رابط زمینه- الیاف، استحکام و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های هیبریدی را افزایش می‌دهد.

- وجود باندهای برشی در کامپوزیت هیبریدی حاوی 0.1 درصد نانولوله کربنی پس از برخورد پرتابه سبب می‌شود که سرعت پرتابه کمتر شده و مقداری کمی از انرژی آن گرفته شود و یک مدخل در میان کامپوزیت برای ورود ایجاد کند. در این حالت لایه لایه شدگی اتفاق می‌افتد که نقش مهمی در جذب انرژی پرتابه بازی می‌کند، زمینه نیز نقش مهمی در میرایی ضربه و چسبندگی بین لایه‌ای دارد.

5- مراجع

- [1] Del Rosso, S. Iannucci, L. and Curtis, P. T., "On the Ballistic Impact Response of Microbraided Reinforced Polymer Composites," Composite Structures, Vol. 137, pp. 70–84, 2016.

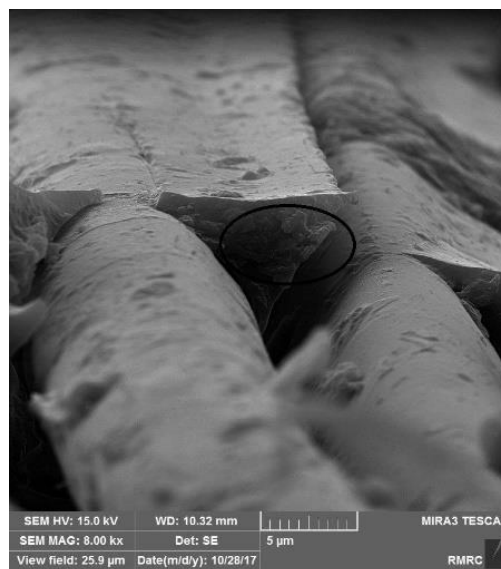


Fig. 10 Shear bond formed in composite specimen containing 0.1 wt.% carbon nanotube

شکل 10 باند برشی ایجاد شده در نمونه کامپوزیتی حاوی 0.1 درصد وزنی نانو لوله کربنی

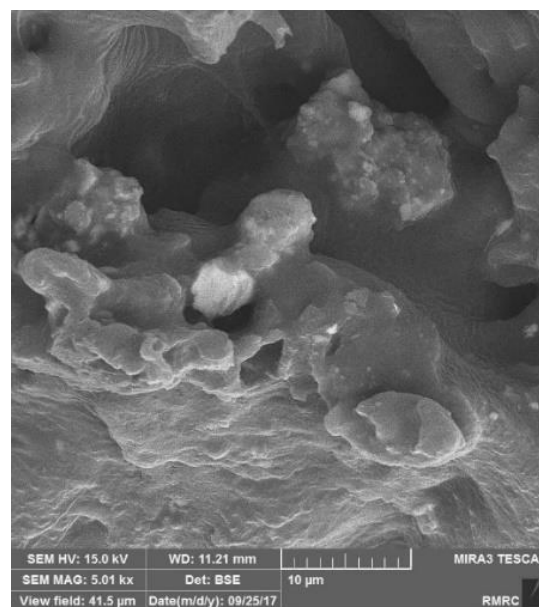


Fig. 11 Formation of an agglomerate composed of carbon nanotube in composite matrix containing 0.9 wt.% carbon nanotube

شکل 11 تشکیل آگلومره متشکل از نانولوله کربنی در زمینه کامپوزیت حاوی 0.9 درصد وزنی نانولوله کربنی

شکل 12، سطح شکست مکانیزم پل زنی ترک در درصد وزنی 0.1 نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. وجود نانولوله‌های کربنی بیرون زده شده از سطح زمینه یا شکسته شده نشان‌دهنده مکانیزم پل زنی ترک توسط نانولوله‌ها می‌باشد. با ایجاد پدیده پل زنی ترک و بیرون کشیدگی نانولوله کربنی، نانو ماده به عنوان عامل تقویت و چسبندگی بهتر بین زمینه و الیاف باعث جذب انرژی بیشتر در کامپوزیت می‌شود. همچنین سطح شکست نانولوله کربنی در نمونه کامپوزیت هیبریدی باعث اتصال زمینه به الیاف شده و بهبود چسبندگی بین زمینه و الیاف را به همراه دارد. وجود اتصال قوی بین الیاف و زمینه سبب لایه‌لایه شدگی شده و در نتیجه سبب جذب انرژی بیشتری در نمونه کامپوزیت هیبریدی می‌شود.

- [15] Khatiwada, S. Armada, C. A. and Barrera, E. V., "Hypervelocity Impact Experiments on Epoxy/Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber Composites Reinforced with Single-Walled Carbon Nanotubes," *Procedia Engineering*, Vol.58, pp. 4 – 10, 2013.
- [16] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.
- [17] Inam, F. Wong, D. W. Y. Kuwata, M. and Peijs, T., "Multiscale HybridMicro-Nanocomposites Based on Carbon Nanotubes and Carbon Fibers" *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2010, pp. 1-12, 2010.
- [18] Taraghi, I. Fereidoon, A. and Taheri-Behrooz, F., "Low-Velocity Impact Response of Woven Kevlar/Epoxy Laminated Composites Reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes at Ambient and low Temperatures," *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 152–158, 2014.
- [19] Chowdhury, S. C. Sockalingam, S. and Gillespie Jr, J. W., "Molecular Dynamics Modeling of the Effect of Axial and Transverse Compression on the Residual Tensile Properties of Ballistic Fiber," *Fibers*, Vol. 5, No. 1, 7, 2017.
- [20] Butola, B. S. Majumdar, A. Jain, A. and Kaur, G., "Multilayered Flexible Uni-Polymer and Hybrid Composites," *Fibers and Polymers*, Vol. 18, No. 4, pp. 786-794, 2017.
- [21] Eslami-Farsani, R. and Shahrabi-Farahani, A., "Improvement of High-velocity Impact Properties of Anisogrid Stiffened Composites by Multi-walled Carbon Nanotubes" *Fibers and Polymers*, Vol. 18, No. 5, pp. 965-970, 2017.
- [22] Soliman, M. E. Sheyka M. P. and Taha, M. R., "Low-Velocity Impact of Thin Woven Carbon Fabric Composites Incorporating Multi-walled Carbon Nanotubes" *International Journal of Impact Engineering*, vol.47, pp. 39-47, 2012.
- [23] Ibekwe, S. I. Mensah, P. F. Li, G. Pang, S.-S. and Stubblefield, M. A., "Impact and Post Impact Response of Laminated Beams at Low Temperatures," *Composite Structures*, Vol. 79, pp. 12-17, 2007.
- [24] Sharma, S. Pathak, A. Singh, V. N. Teotia, S. Dhakate, S. R. and Singh, B. P., "Excellent Mechanical Properties of Long Length Multiwalled Carbon Nanotube Bridged Kevlar Fabric," *Carbon*, Vol. 137, pp. 104-117, 2018.
- [25] Xu, P. Yu, Y. Liu, D. He, M. Li, G. and Yang, X., "Enhanced Interfacial and Mechanical Properties of High-Modulus Carbon Fiber Composites: Establishing Modulus Intermediate Layer Between Fiber and Matrix Based on Tailored-Modulus Epoxy" *Composites Science and Technology*, Vol. 163, pp. 26-33, 2018.
- [26] Yue, L. Pircheraghi, G. Monemian, S. A. and Manas-Zloczower, I., "Epoxy Composites with Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets – Dispersion and Synergy Effects" *Carbon*, Vol. 78, pp. 268-278, 2014.
- [2] Shokrieh, M. M. and Omid, J. M., "The Impact Resistance of fiber-Reinforced Polymer Composites," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 255-277, 2014.
- [3] Mehrabani-Yeganeh, E. Liaghat G. H. and Pol, M. H., "Experimental Investigation of Cylindrical Projectiles Nose Shape Effects on High Velocity Perforation of Woven Polymer Composite," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 9-99, 2014.
- [4] Arjangpay, A. Darvizeh, A. Yarmohammad-Tooski, M. and Ansari, R., "Modeling Damage Evolution of Composite Laminates Under Low Velocity off-Center Impact," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 243-252, 2016.
- [5] Sathishkumar, T. P. Navaneethakrishnan, P. Shankar, S. Rajasekar, R. and Rajini. N., "Characterization of Natural Fiber and Composites – A Review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 32, No. 19, pp. 1446–1465, 2013.
- [6] Ebrahimnezhad Khaljiri, H. Eslami Farsani, R. khorsand, H. and Abbas Banaie, K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [7] Pereira, J. M. and Revilock, D.M., "Ballistic Impact Response of Kevlar 49 and Zylon under Conditions Representing Jet Engine Fan Containment," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 240-248, 2009.
- [8] Tham, C.Y. Tan, V. B. C. and Lee, H.P., "Ballistic Impact of a Kevlar Helmet: Experiment and Simulations," *Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 5, pp. 304-318, 2008.
- [9] Chen, X., "Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection," Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 71–107, 2016.
- [10] Nguyen, L. H. Ryan, R. Cimpoeru, S. J. Mouritz, A. P. and Orifici, A. D., "The Effect of Target Thickness on the Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.75, pp. 174–83, 2015.
- [11] Hazzad, M. K. Hallett, S. Curtis, P. T. Iannucci, L. and Trask, R. S., "Effect of Fibre Orientation on the Low Velocity Impact Response of Thin Dyneema Composite Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 100, pp. 35-45, 2017.
- [12] Esbati, A. H. and Irani, S., "Multiscale Modeling of Fracture in Polymer Nanocomposite Reinforced by Intact and Functionalized CNTs," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 35-46, 2017.
- [13] Laurenzi, L. Pastore, R. Giannini, G. and Marchetti, M., "Experimental Study of Impact Resistance in Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy," *Composite Structures*, Vol. 99, pp. 62–68, 2013.
- [14] Micheli, D. Vricella, A. Pastore, R. Delfini, A. Giusti, A. Albano, M. Marchetti, M. Moglie, F. and Primiani, V. M., "Ballistic and Electromagnetic Shielding Behaviour of Multifunctional Kevlar Fiber Reinforced Epoxy Composites modified by carbon nanotubes," *Carbon*, Vol. 104, pp. 141–156, 2016.



تأثیر شرایط محیطی بر خواص خمشی کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم- اپوکسی / الیاف بازالت و الیاف شیشه

فردین اصغری آرپاتپه¹، مهدی عبدالحی آذغان¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/07/21

پذیرش: 98/05/12

کلیدواژگان:

کامپوزیت لایه‌ای الیاف- فلز

سیکل سرمایش

الیاف بازالت

لایه‌چینی الیاف

خواص خمشی

چکیده

در این پژوهش، تأثیر لایه‌چینی الیاف و سیکل سرمایش بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز (FML) حاوی الیاف شیشه و بازالت مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های FML متشکل از دو ورق آلومینیوم 2024-T3 و لایه‌ی میانی کامپوزیت زمینه اپوکسی با 4 لایه الیاف بازالت و شیشه در 5 حالت لایه‌چینی مختلف به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. به منظور افزایش چسبندگی بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، اصلاح سطحی آلومینیوم با روش الکتروشیمیایی (آندایز) صورت گرفت. هر سیکل دمایی در مدت زمان 3.5 دقیقه بین دمای 25 °C و 100 °C- انجام شد. خواص خمشی نمونه‌ها بعد از 40 سیکل سرمایش مورد ارزیابی قرار گرفت و با نمونه‌های بدون سیکل مقایسه شدند. به منظور مشخصه‌یابی مکانیزم شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و نوری استفاده شد. با توجه به نتایج، در نمونه‌های بدون سیکل دمایی، بیشترین و کمترین استحکام و مدول خمشی به ترتیب مربوط به کامپوزیت FML حاوی الیاف بازالت و الیاف شیشه (به علت خواص مکانیکی پایین‌تر الیاف شیشه نسبت به الیاف بازالت) بود. بعد از انجام سیکل سرمایش، بیشترین تغییرات استحکام و مدول خمشی به ترتیب با 6 و 4.9 درصد افزایش مربوط به نمونه حاوی الیاف بازالت و کم‌ترین آن‌ها با 2.5 و 1.6 درصد مربوط به نمونه حاوی الیاف شیشه می‌باشد. علت افزایش خواص خمشی، غلبه مکانیزم تنش فشاری (که باعث بهبود چسبندگی بین اجزای کامپوزیت می‌شود) بر جدایش بین اجزای کامپوزیت است.

Effect of Cryogenic Environmental Condition upon Flexural Properties of Aluminum- Epoxy/ Basalt Fibers- Glass Fibers Laminates

Fardin Asghari Arpatappeh, Mehdi Abdollahi Azghn, Reza Eslami-Farsani*

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*P. O. B. 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Fiber-metal laminate
Cryogenic cycling
Basalt fibers
Fibers arrangement
Flexural properties

Abstract

In this study, the effect of stacking sequence and cryogenic cycles on the flexural behavior of fiber metal laminates (FMLs) including glass and basalt fibers were investigated. The FMLs were composed of two aluminum 2024-T3 sheets as metal layers and epoxy matrix composite as the polymeric layers. The polymer composites consisted of 4 layers of basalt and glass fibers. These composites were prepared in 5 different laminates sequence by hand lay-up method. To improve the adhesion strength between aluminum and polymer composite layers, the surface of aluminum sheets was treated by electrochemical treatment (anodizing). Each cycle was carried out for 3.5 min between -100 and 25 °C. The FMLs were cycled for 40 times and their flexural performance was evaluated before and after cryogenic cycle. To characterize the failure mechanism of specimens, the scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy were used. Results of flexural tests indicated that the flexural strength and modulus values for FML samples with basalt fibers (BFML) were higher than those of FML samples with glass fibers (GFML). This phenomenon can be attributed to the weak mechanical properties of glass fibers in comparison to basalt fibers. After cryogenic cycles, the highest changes in the flexural properties was for BFML samples, while the lowest changing was for GFML samples. In fact, the increase percentages in flexural strength and modulus of BFML samples were respectively about 6% and 4.9%. On other hand, in the case of GFML, the increase percentages in flexural strength and flexural modulus were respectively 2.5% and 1.6%. In fact, when the hybrid FMLs were subjected by cryogenic cycles, due to the overcoming of the pressure stress mechanism on delamination between composite components, an enhancement in flexural behavior is observed

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Asghari Arpatappeh, F. Abdollahi Azghn, M. and Eslami Farsani, R., "Effect of Cryogenic Environmental Condition upon Flexural Properties of Aluminum- Epoxy/ Basalt Fibers- Glass Fibers Laminates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 541-548, 2020.

1- مقدمه

کامپوزیت‌ها یکی از موادی هستند که برای کاهش وزن قطعات (که قبلاً به طور عمده از فلزات ساخته می‌شدند)، مورد توجه قرار گرفتند. امروزه از این مواد در صنایع مختلف مانند صنایع هوافضا، نظامی، ساختمان‌سازی، حمل و نقل و غیره استفاده می‌شود. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری پرمصرف‌ترین مواد کامپوزیتی هستند که نسبت به دیگر کامپوزیت‌ها از مزایایی نظیر سادگی فرآیند تولید و کم هزینه بودن برخوردارند [1، 2].

کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز (FML^1)، ساختارهای کامپوزیتی هیبریدی بر پایه ورق‌های نازک از آلیاژهای فلزی (آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و فولاد) و کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف هستند [3]. خواصی مانند استحکام برشی و مقاومت به ضربه بالا و تعمیر آسان از مزیت‌های فلزات به شمار می‌آید؛ در حالی که کامپوزیت‌های پلیمری دارای خواص مقاومت به خستگی عالی و استحکام و سفتی بالا می‌باشند. مقاومت به خستگی پایین و خوردگی کم در میان آلیاژهای مورد استفاده در FML و استحکام برشی، مقاومت به ضربه و تعمیرپذیری پایین کامپوزیت‌ها آن مزایا را کمرنگ می‌کند. بر این اساس، کامپوزیت‌های FML به منظور ترکیب خواص مکانیکی مواد فلزی و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری توسعه یافتند [4].

در میان انواع آلیاژهای مختلف مورد استفاده در FML، آلومینیوم‌های آلیاژی به دلیل خواص مکانیکی خوب از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام مناسب، چگالی پایین و ارزان بودن، استفاده بیش‌تری نسبت به دیگر آلیاژها دارند [5، 6].

در طول چند دهه اخیر استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی به دلیل بهبود خواص آن‌ها نسبت به کامپوزیت‌های حاوی یک تقویت‌کننده، بیشتر شده است. به عنوان مثال، الیاف کربن به دلیل خواص مکانیکی بالا، مقاومت حرارتی خوب و چگالی پایین به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها در قسمت‌های مختلف صنعت کاربرد فراوانی دارند؛ اما تردی این الیاف حساسیت بیشتری را در هنگام اعمال تنش ایجاد می‌کند. علاوه بر این، هزینه بالای الیاف کربن باعث مقرون به صرفه نبودن کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن می‌شود. یکی از راه‌های بهبود خاصیت انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه تولیدی کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن ترکیب این الیاف با الیاف شیشه کم هزینه می‌باشد [7].

با توجه به حساسیت پلیمرها به مناطق با رطوبت بالا، زمانی که کامپوزیت‌ها در محیط مرطوب قرار می‌گیرند، رطوبت به داخل زمینه نفوذ کرده و باعث تورق در کامپوزیت می‌شود. در کامپوزیت‌های FML به دلیل وجود لایه‌های فلزی در اطراف کامپوزیت میزان جذب رطوبت نسبت به کامپوزیت‌های پلیمری کمتر می‌باشد. بوتلوو² و همکاران، میزان جذب رطوبت در نمونه‌های FML و کامپوزیت پلیمری با زمینه اپوکسی حاوی الیاف کربن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در یک زمان مشخص، میزان جذب رطوبت در کامپوزیت پلیمری هفت برابر بیش‌تر از کامپوزیت FML بود [8].

عدم چسبندگی مناسب بین ورق فلز و لایه کامپوزیتی، باعث افت خواص کامپوزیت‌های FML می‌شود. از این رو همواره در تقویت خواص مکانیکی و فیزیکی این کامپوزیت‌ها باید به فصل مشترک میان لایه کامپوزیتی و ورق فلزی و برهمکنش‌های موجود در این منطقه توجه ویژه‌ای داشت [6]. استفاده از ترموپلاست‌ها مانند پلی اتر ایمید³ به عنوان چسب، افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق فلزی را به دنبال دارد ولی باعث کاهش چقرمگی و استحکام خستگی کامپوزیت FML می‌شود [9]. عملیات مکانیکی به منظور

حذف لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم انجام می‌گیرد و باعث ایجاد یک سطح زبر با اندازه تخلخل‌های ماکرو می‌شود که بعد از چند دقیقه لایه اکسیدی دوباره تشکیل می‌شود. عملیات شیمیایی به منظور چربی‌زدایی و حذف لایه اکسیدی ضعیفی که روی سطح آلومینیوم قرار دارد، انجام می‌پذیرد و عملیات الکتروشیمیایی، یک لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌کند که شامل میزان زیادی از تخلخل در مقیاس میکرو است. چربی‌زدایی، حذف لایه اکسیدی و ایجاد سطح زبر، افزایش قفل مکانیکی و انتقال بهتر بار را به همراه دارد [10، 5].

در مواد کامپوزیتی، سیکل دمایی می‌تواند با عواملی مانند افزایش اتصالات عرضی پلیمر [5]، ایجاد تنش پسماند فشاری و جدایش بین اجزای کامپوزیت روی خواص مکانیکی تأثیر بگذارد [11]. اگر بعد از پخت اولیه پلیمر، نمونه کامپوزیتی تحت تأثیر دماهای نسبتاً بالا قرار گیرد، پخت ثانویه اتفاق خواهد افتاد که با افزایش چگالی اتصالات عرضی در پلیمر باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود. در اثر تغییر دمای ناگهانی در دماهای پایین، تنش پسماند فشاری ایجاد می‌شود که بهبود چسبندگی بین اجزای کامپوزیت را به همراه دارد. همچنین جدایش بین اجزای کامپوزیت در اثر تفاوت در ضریب انبساط/انقباض حرارتی اجزای تشکیل دهنده رخ می‌دهد [12].

عبدالهی و همکاران [5] تأثیر سیکل حرارتی و اصلاح سطحی آلومینیوم روی خواص خمشی کامپوزیت‌های FML را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند، سیکل حرارتی، استحکام خمشی FML با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش شیمیایی (حکاکی شده) را کاهش می‌دهد. در حالی که برای FML با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش الکتروشیمیایی (آندایز شده)، استحکام خمشی در اثر سیکل حرارتی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. آن‌ها علت این افزایش را بهبود اتصالات عرضی پلیمر گزارش کردند.

کاستا⁴ و همکاران [13]، تأثیر سیکل حرارتی بر خواص کششی و برشی کامپوزیت‌های FML را مورد بررسی قرار دادند. همچنین به منظور افزایش چسبندگی بین ورق‌های آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری از دو لایه پلیمر ترموپلاست استفاده کردند. سپس نمونه‌ها را تحت سیکل حرارتی بین دماهای -50°C تا 80°C با تعداد 1000 و 2000 سیکل قرار دادند. نتایج، تغییر زیادی در خواص کششی و برشی نسبت به نمونه بدون سیکل نشان ندادند.

سورندرا و همکاران [14] خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف شیشه را در دمای محیط و نیتروژن مایع (-196°C) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با انجام آزمایش در دمای پایین به علت افزایش چسبندگی بین رزین و الیاف در اثر تنش فشاری، خواص مکانیکی افزایش پیدا می‌کند. خلیلی و همکاران [15] تغییرات رفتار کششی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف کربن و بازالت را تحت سیکل‌های حرارتی مختلف قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی، استحکام کششی نهایی و مدول کششی در هر دو کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف بازالت و کربن کاهش می‌یابد، ولی میزان کاهش این خواص در کامپوزیت حاوی الیاف کربن بیشتر است.

مهدوی [11] تأثیر سیکل حرارتی بر استحکام برشی بین لایه‌های کامپوزیت‌های ترموست را مورد مطالعه قرار داد. نتایج آزمایش نشان داد با افزایش تعداد سیکل حرارتی بین دمای -196°C و 180°C ، استحکام برشی لایه‌ها ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش پیدا می‌کند.

³ Polyetherimide
⁴ Costa

¹ Fiber Metal Laminate
² Botelho

نمونه‌ها زوده شود. در این مرحله، سطح فلز، اکسید شده و به رنگ مشکی در آمد. به منظور از بین بردن ماده تشکیل شده در سطح و دی اکساید کردن، نمونه‌ها در محلول HNO_3 در دمای اتاق قرار داده شدند. بعد از مراحل آماده سازی اولیه و به منظور اصلاح سطحی، نمونه‌ها در محلول اسید کرومیک آندایز شدند و در نهایت با استون، تمیز و خشک شدند.

3-2- چیدمان الیاف بازالت و شیشه در ساختار FML

به منظور بررسی تاثیر چیدمان بر خواص خمشی کامپوزیت‌های FML، چهار لایه از الیاف بازالت و شیشه با چیدمان‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. در جدول 1، چیدمان الیاف بازالت و شیشه، کد نمونه و درصد وزنی اجزای سازنده FML آمده است.

4-2- ساخت نمونه‌ها

به منظور ساخت نمونه‌های FML، ابتدا رزین و هاردنر با نسبت وزنی 100 به 10 (به توصیه شرکت سازنده) با یکدیگر مخلوط شده و به مدت 5 دقیقه هم زده شدند. سپس مخلوط بدست آمده به عنوان زمینه همراه با 4 لایه الیاف بازالت و شیشه در 5 نوع چیدمان متفاوت با روش لایه‌گذاری دستی برای ساخت کامپوزیت استفاده شدند. کامپوزیت پلیمری حاصل با ضخامت میانگین 0.8 mm، پیش از پخت، بین دو لایه آلومینیوم 2024-T3 (با ضخامت هر کدام 0.5 mm)، قرار داده شد. در نهایت نیز به منظور پخت نهایی، نمونه‌های FML حاصل در دمای 25°C به مدت 18 ساعت قرار گرفتند.

5-2- سیکل سرمایش نمونه‌ها

جهت سیکل سرمایش، ابتدا نمونه‌ها از دمای اتاق با نرخ سرمایش 1.68°C/s در بخار نیتروژن مایع تا دمای 100°C رسیدند و سپس بلافاصله از این دما با نرخ تقریبی 1.68°C/s در آون به دمای محیط رسانده شدند و این سیکل سرمایشی 40 بار تکرار شد. به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری دمای نمونه‌ها از ترموکوپل مدل USB-4718 شرکت ادونتچ⁵ استفاده شد.

6-2- آزمایش مکانیکی

به منظور انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای، دستگاه خمش هانسفیلد⁶ مدل H25KS بکار رفت. در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، طبق استاندارد ASTM D790 [18]، نمونه‌ها با ابعاد $150 \times 25 \text{ mm}^2$ و در فاصله 32 میلی‌متری بین دو تکیه‌گاه تحت بارگذاری با نرخ بارگذاری 3 mm/min قرار گرفتند و نمودار

با توجه به تحقیقات انجام شده قبلی (که به آن‌ها اشاره شد)، رویکرد اصلی در تحقیق حاضر، بررسی تاثیر چیدمان الیاف و سیکل‌های سرمایشی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 و کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت و شیشه می‌باشد. تاکنون تحقیقات بسیار کمی در رابطه با تاثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش در حوزه کامپوزیت‌های FML انجام شده است. مزیت تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین تعیین تاثیر چیدمان الیاف قبل و بعد از سیکل‌های سرمایش بر رفتار خمشی FML می‌باشد که این امر نقش تعیین کننده‌ای در استفاده از این کامپوزیت‌ها در قسمت‌های مختلف صنعتی ایفا می‌کند. علاوه بر این شناسایی مکانیزم‌های تاثیرگذار روی رفتار خمشی کامپوزیت‌های FML بعد از سیکل سرمایش یکی دیگر از مزیت‌های تحقیق حاضر می‌باشد.

2- بخش تجربی

1-2- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی اپون¹ 828 همراه با هاردنر پلی آمینی² تا³ به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. طبق استاندارد ASTM D445، در دمای 25°C ، گرانروی این رزین 110-150 پواز و چگالی آن 1.16 g/ml می‌باشد [16]. این رزین، بعد از عمل پخت، خواص مکانیکی، چسبندگی و مقاومت شیمیایی خوبی از خود نشان می‌دهد و دمای تخریب این رزین بعد از پخت به 120°C می‌رسد [17]. الیاف شیشه نوع E، با چگالی سطحی 200 g/m^2 به صورت پارچه با جنس ساتن⁴ ریزافت محصول شرکت لینتکس⁵ چین به عنوان تقویت کننده استفاده شد. همچنین پارچه الیاف بازالت (با اسم تجاری BAS 350.1270.A) با چگالی سطحی 400 g/m^2 از شرکت بازالتکس⁶ کشور بلژیک نیز به عنوان تقویت کننده و آلومینیوم 2024-T3 به عنوان لایه‌های فلزی با ضخامت 0.5 mm مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- اصلاح سطحی آلومینیوم 2024-T3

اصلاح الکتروشیمیایی آلومینیوم به منظور افزایش میزان تخلخل سطح آلومینیوم و به دنبال آن، افزایش چسبندگی بین ورق آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری انجام شد. برای این منظور، سطح این لایه‌های فلزی توسط استون شست‌وشو داده شد تا چربی‌های موجود در سطح آلومینیوم از بین رود. بعد از این مرحله، ورق‌ها در محلول NaOH حکاکی شد تا ناخالصی‌های سطح آلومینیوم نیز از بین برود. بلافاصله پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از محلول قلیایی، سطح آن‌ها توسط آب مقطر اسپری شد تا محلول باقی مانده روی سطح

جدول 1 مشخصات کامپوزیت‌های FML ساخته شده با چیدمان‌های مختلف

Table 1 Specification of FMLs with different stacking sequence

کد نمونه	چیدمان*	آلومینیوم 2024-T3	رزین Epon 828	الیاف بازالت	الیاف شیشه
BBBB	Al/B/B/B/Al	63	12	25	0
BGGB	Al/B/G/G/B/Al	63	14	13	10
BGBG	Al/B/G/B/G/Al	63	14	13	10
BBGG	Al/B/B/G/G/Al	63	14	13	10
GGGG	Al/G/G/G/G/Al	63	16	0	21

* Al: ورق آلومینیوم، B: الیاف بازالت، G: الیاف شیشه

⁵ Lintex
⁶ Basaltex
⁷ Advantech
⁸ Hounsfield

¹ Epon
² Polyamine Hardener
³ TETA (EPIKURE 3234)
⁴ Satin

برابر است. با توجه به شکل 2 و این نکته که مقدار مدول به قسمت خطی نمودار تنش- کرنش وابسته است، لذا در کسر حجمی یکسان الیاف شیشه و بازالت، مدول خمشی با تغییر چیدمان الیاف تغییر زیادی نخواهد کرد.

نیروی خمشی بر حسب جابجایی محوری توسط دستگاه رسم شد که از آن برای تحلیل خواص خمشی استفاده شد. حداقل تکرار انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای هر گروه از نمونه‌ها 3 بار بود که داده‌های گزارش شده میانگین آزمایش‌های انجام شده است.

2-8- بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها

به منظور بررسی فصل مشترک و سطوح شکست کامپوزیت‌های FML و نوع مکانیزم شکست از میکروسکوپ نوری میجی تکنو¹ مدل IM 7200 با بزرگنمایی 100 استفاده شد. همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM²) مدل وگا تسکن³ به منظور مطالعه سطح آلومینیوم‌های اصلاح سطحی شده و مشخص کردن علت تفاوت در نوع مکانیزم‌های شکست در انواع نمونه‌های FML بکار گرفته شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی سطح آلومینیوم‌های عملیات سطحی شده

به منظور بررسی تأثیر عملیات سطحی از میکروسکوپ SEM استفاده شد. شکل 1، تأثیر عملیات سطحی مختلف بر میزان تخلخل روی ورق آلومینیومی را نشان می‌دهد. شکل 1-الف، سطح آلومینیوم بعد از مرحله حکاکی توسط NaOH و شکل 1-ب، سطح آلومینیوم بعد از آندایز را نشان می‌دهند. میزان تخلخل در آلومینیوم آندایز شده (شکل 1-ب) نسبت به آلومینیوم حکاکی شده (شکل 1-الف) در یک سطح مشخص بیشتر می‌باشد. همچنین هم هر یک از تخلخل‌ها نیز عمق بیشتری دارند. بنابراین نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده نسبت به دو نمونه دیگر تخلخل بیشتری را بر روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌کند که این باعث افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم شده و انتقال بار بهتر صورت می‌گیرد. در نتیجه خواص مکانیکی بهبود پیدا خواهد کرد.

3-2- تأثیر چیدمان الیاف مختلف بر خواص خمشی FML

نمودار استحکام و مدول خمشی قبل و بعد از سیکل سرمایش برای نمونه‌های FML با چیدمان‌های مختلف الیاف بازالت و شیشه به ترتیب در شکل‌های 2 و 3 و خلاصه نتایج آن‌ها در جدول 2 نشان داده شده است.

به علت خواص خمشی و ترشوندگی بالای الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه [19، 20]، استحکام و مدول خمشی کامپوزیت FML حاوی 4 لایه الیاف بازالت (BBBB) به ترتیب 687.5 MPa و 68.1 GPa می‌باشد که نسبت به کامپوزیت FML حاوی 4 لایه الیاف شیشه (GGGG)، به ترتیب 16 و 10 درصد بیشتر است. در نمونه‌هایی که درصد وزنی الیاف شیشه و بازالت در آن‌ها یکسان است، استحکام خمشی نمونه BBGG، 649.5 MPa و در نمونه‌های BGGG و BGGG به ترتیب 633.1 MPa و 621.4 MPa می‌باشند. بنابراین استحکام خمشی نمونه BBGG به ترتیب نسبت به نمونه‌های BGGG و BGGG، 2.5 و 4.3 درصد بیشتر است. در این حالت نیز با توجه به این که در آزمایش خمش، لایه‌های زیرین بیشتر تحت کشش بار اعمالی قرار می‌گیرند، لذا استحکام خمشی در نمونه‌هایی که الیاف بازالت نزدیک لایه‌های زیرین قرار داشته باشد، بیشتر خواهد بود. مدول خمشی نمونه BBGG، 63.6 GPa می‌باشد که تقریباً با نمونه‌های BGGG (63.3 GPa) و BGGG (63.2 GPa)

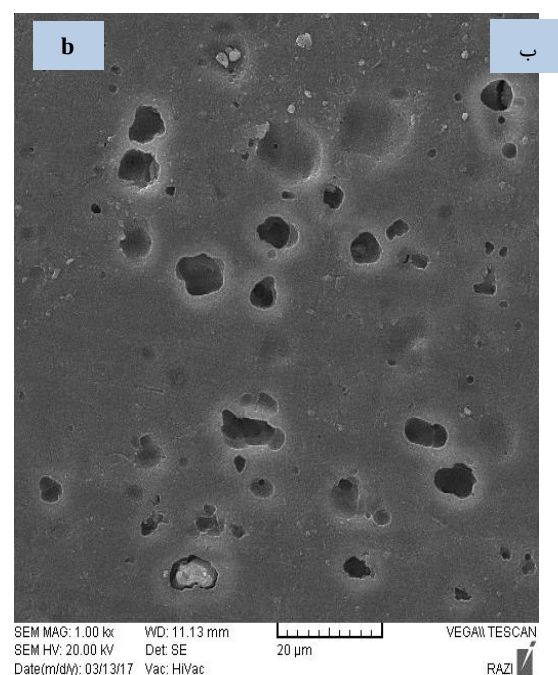
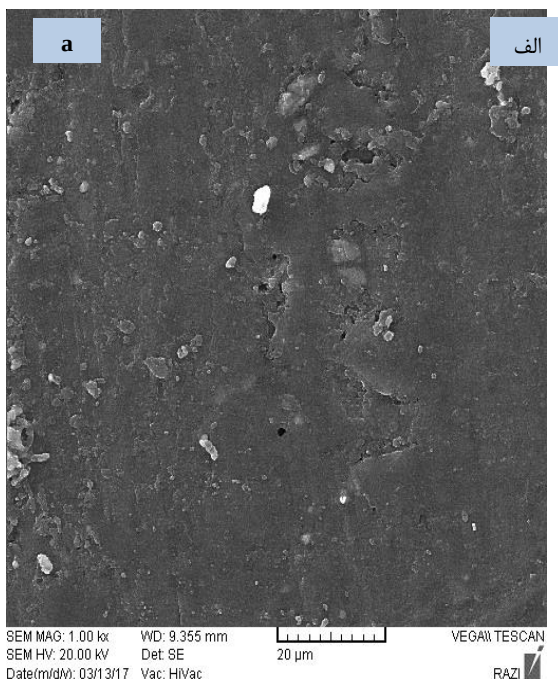


Fig. 1 SEM images of (a) etched aluminium surface, (b) anodized aluminium surface.

شکل 1 تصاویر SEM از، الف) آلومینیوم حکاکی شده، ب) آلومینیوم آندایز شده.

³ VEGA\\TESCAN-LMU

¹ Meiji Techno

² Scanning Electron Microscope

کامپوزیت GGGG، جدایش بین الیاف شیشه با آلومینیوم (فلش سفید در شکل 4-ب) باعث شکست زودرس کامپوزیت می‌شود که علت آن ترشوندگی [21] و چسبندگی مناسب اپوکسی و فلزات [22] با الیاف بازالت در مقایسه با الیاف شیشه می‌باشد.

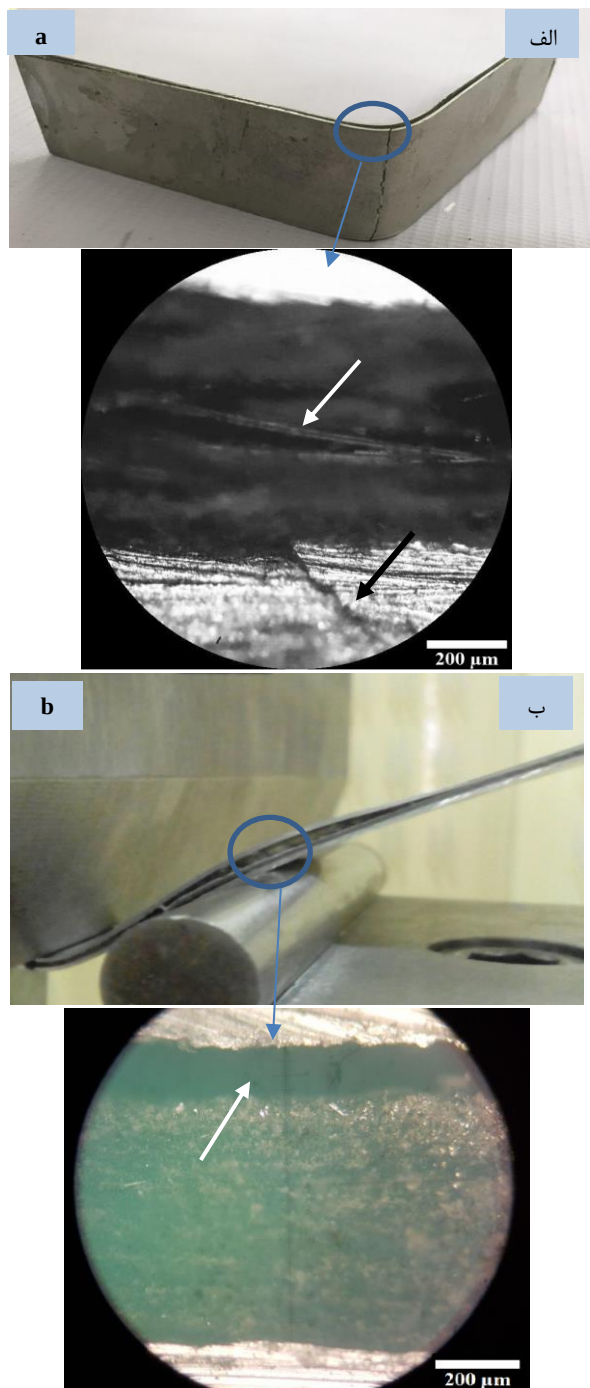


Fig. 4 Different types of failure modes of failed flexural FML specimens, a) aluminium breakage and delamination of fibres layers, b) the delamination of the glass fibres layer and aluminium sheet.

شکل 4 حالت‌های مختلف شکست کامپوزیت FML تحت بارگذاری خمشی، الف) شکست آلومینیوم و جدایش الیاف در BBBB، ب) جدایش موضعی بین الیاف شیشه و آلومینیوم در GGGG.

جدول 2 نتایج حاصل از خمش سه نقطه‌ای FMLs
Table 2 Results of three- point bending test of FMLs

انحراف	مدول	انحراف	استحکام	نمونه‌ها
معیار	خمشی	معیار	خمشی	
مدول	(GPa)	استحکام	(MPa)	
±3.1	61.0	±35.2	593.7	GGGG
±3.2	62.0 (+1.6%)*	±30.7	609.3 (+2.5%)*	GGGG ^C
±3.8	63.4	±30.4	633.1	BGBG
±2.9	65.4 (+3%)*	±40.2	652.6 (+2.9%)*	BGBG ^C
±3.4	63.7	±32.9	649.5	BBGG
±2.7	66.6 (+4.3%)*	±31.3	681.1 (+4.6%)*	BBGG ^C
±2.5	63.3	±28.6	621.4	BGGB
±2.9	64.8 (+2.3%)*	±33.4	642.9 (+3.3%)*	BGGB ^C
±3.3	68.1	±40.2	687.6	BBBB
±3	71.6 (+4.9%)*	±25.8	731.5 (+6%)*	BBBB ^C

^C نمونه‌های FML سیکل داده شده

* درصد افزایش خواص خمشی نسبت به نمونه‌های بدون سیکل

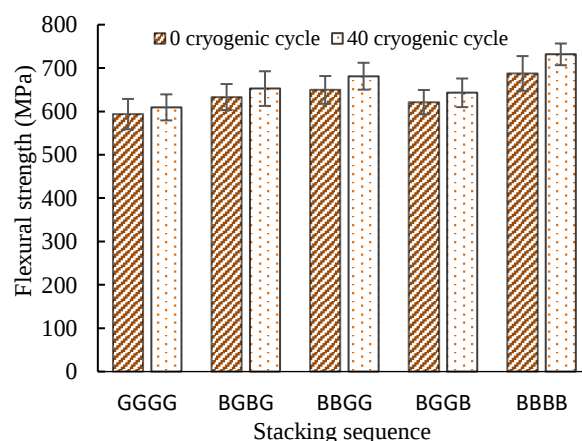


Fig. 2 The effect of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the flexural strength of FMLs.

شکل 2 تاثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر استحکام خمشی FMLs.

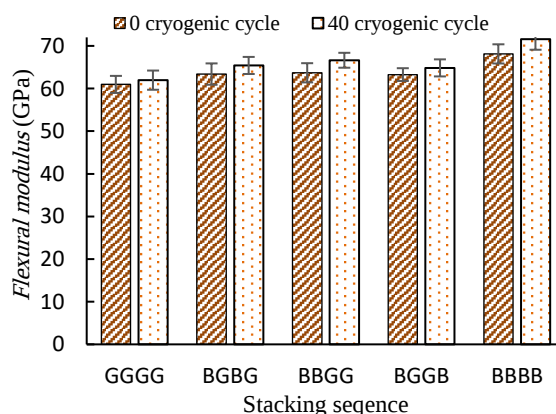


Fig. 3 The effect of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the flexural modulus of FMLs.

شکل 3 تاثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر مدول خمشی FMLs.

3-3- بررسی سطوح شکست با چیدمان الیاف مختلف تحت آزمایش خمشی

شکل 4 تفاوت در مکانیزم شکست کامپوزیت‌های GGGG و BBBB را نشان می‌دهد. در شکل 4-الف، ابتدا آلومینیوم شکسته شده (فلش سیاه)، سپس لایه‌های الیاف شروع به جدایش می‌کنند (فلش سفید). در حالی که در

4-3- بررسی فصل مشترک پلیمر و الیاف تقویت کننده

به منظور بررسی فصل مشترک پلیمر و الیاف، سطح مقطع کامپوزیت پلیمری بین دو ورق آلومینیوم در شکل 5 مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های 5-الف و 5-ب، به ترتیب سطح کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و بازالت را نشان می‌دهند. همان‌طور که نشان داده شده است، میزان چسبندگی پلیمر و الیاف بازالت نسبت به پلیمر و الیاف شیشه بیشتر می‌باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از سایزینگ مناسب‌تر الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه و در نتیجه میزان ترشوندگی بیشتر الیاف بازالت باشد که سبب می‌شود انتقال بار بهتری نیز صورت پذیرد. این موضوع به همراه خواص مکانیکی بالاتر الیاف بازالت باعث افزایش خواص خمشی کامپوزیت پلیمری و در نتیجه کامپوزیت FML در حالت استفاده از الیاف بازالت در مقایسه با الیاف شیشه می‌شود. همچنین چسبندگی بالای الیاف بازالت به مواد فلزی در مقایسه با الیاف شیشه [22] نیز استحکام خمشی بالای FML حاوی الیاف بازالت را به دنبال دارد.

3-5- مکانیزم شکست در کامپوزیت‌های FML حاوی الیاف مختلف در آزمایش

خمشی

به منظور بررسی مکانیزم شکست در کامپوزیت پلیمری بین دو ورق آلومینیوم از میکروسکوپ SEM استفاده شد (شکل 6). همان‌طور که در شکل 6-الف نشان داده شده است، میزان مکانیزم غالب در شکست کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف شیشه، شکست ترد الیاف همراه با جدایش بین الیاف و زمینه می‌باشد. ولی مکانیزم غالب شکست کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف بازالت، خروج الیاف از زمینه می‌باشد (شکل 6-ب) که این اتفاق باعث افزایش خواص خمشی از جمله انرژی شکست می‌شود. علاوه بر این چسبندگی بهتر الیاف بازالت به زمینه پلیمری نسبت به الیاف شیشه بعد از انجام آزمایش خمشی سه نقطه‌ای نیز قابل مشاهده است. در حالت کلی استفاده از الیاف بازالت به جای الیاف شیشه باعث تغییر در مکانیزم شکست کامپوزیت پلیمری شده و با مکانیزم خروج الیاف از زمینه باعث افزایش خواص خمشی می‌شود [23].

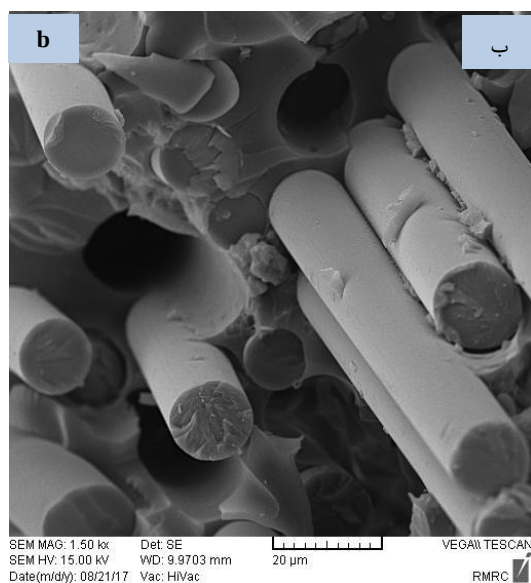
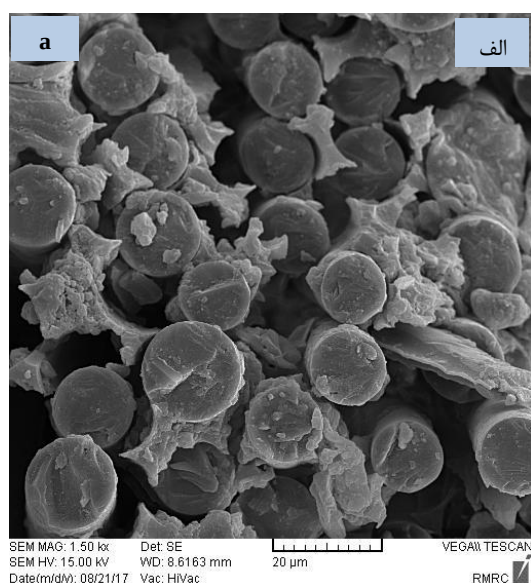


Fig. 6 SEM images of the fracture surfaces polymer composite containing of a) glass fibers, b) basalt fibers.

شکل 6 تصاویر SEM سطح شکست کامپوزیت پلیمری حاوی، الف) الیاف شیشه، ب) الیاف بازالت.

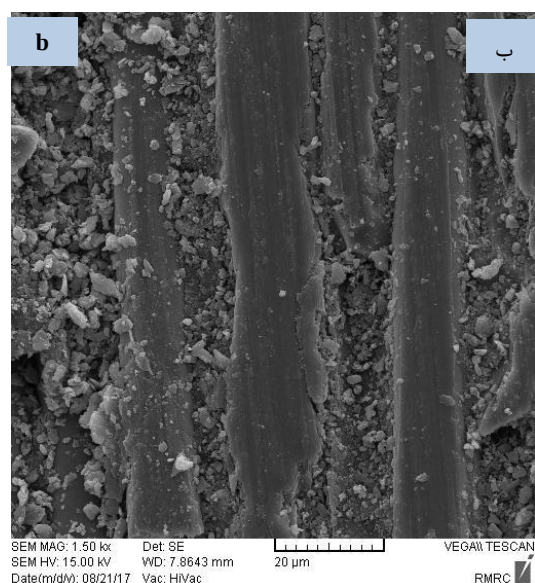
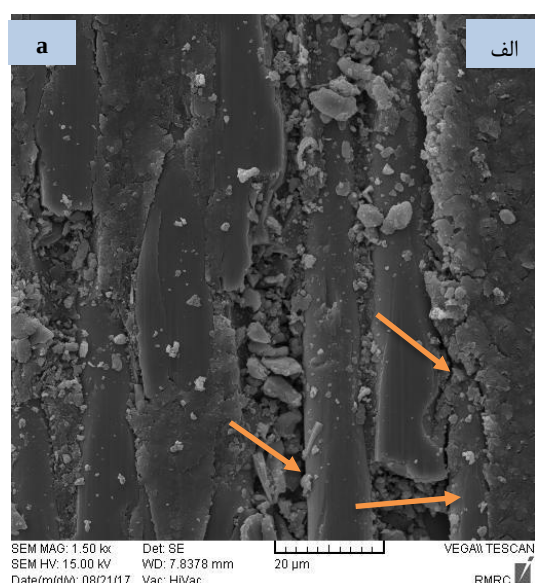


Fig. 5 SEM images of polymer composite containing of a) glass fibers, b) basalt fibers.

شکل 5 تصاویر SEM از کامپوزیت پلیمری حاوی، الف) الیاف شیشه، ب) الیاف بازالت.

اما در نمونه FML حاوی الیاف شیشه (شکل 7-ب) می‌توان به وضوح دید که ترشوندگی به صورت مطلوب نبوده و حالت کلوخه‌ای شدن اپوکسی بر سطح الیاف روی داده است. به عبارت دیگر، پیوند بین الیاف شیشه و پلیمر اپوکسی ضعیف بوده و مطلوب نیست.

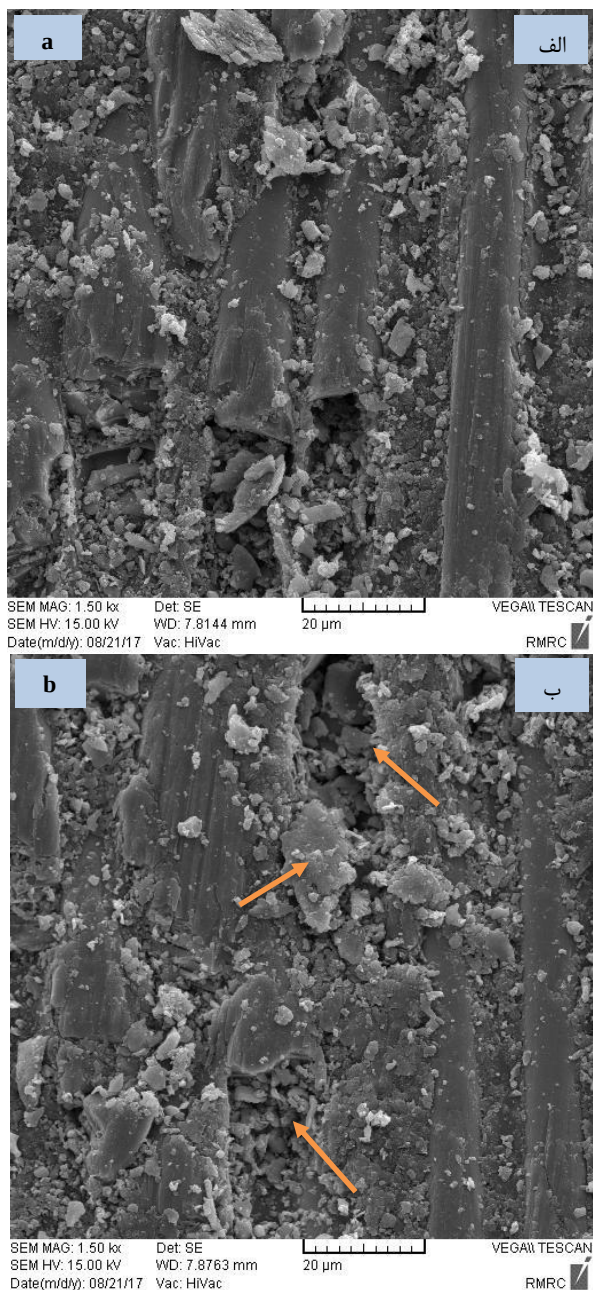


Fig. 7 SEM images of cross-section of FML containing of a) basalt fibers, b) glass fibers.

شکل ۷ تصویر SEM از سطح مقطع نمونه FML شامل، الف) الیاف بازالت، ب) الیاف شیشه.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر چیدمان مختلف الیاف و سیکل سرمایش بر کامپوزیت الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 (اصلاح سطحی شده به روش آندایز) و کامپوزیت پلیمری زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت و شیشه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

3-6- تاثیر سیکل سرمایش بر خواص خمشی کامپوزیت FML با الیاف هیبریدی

شکل 2 تاثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر استحکام خمشی نمونه‌های FML را نشان می‌دهد. بعد از اعمال سیکل سرمایش، در نمونه‌های FML با چیدمان‌های مختلف الیاف بازالت و شیشه، استحکام خمشی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش بهبود یافته است. در حالت کلی، سیکل سرمایش با دو مکانیزم ایجاد تنش پسماند فشاری و جدایش بین اجزای کامپوزیت روی خواص مکانیکی تاثیر می‌گذارد. در این مطالعه تنش پسماند فشاری بر جدایش بین اجزای کامپوزیت غلبه کرده و باعث افزایش خواص خمشی شده است. استحکام خمشی نمونه BBBB بعد از سیکل سرمایش، 731.53 MPa می‌باشد که در مقایسه با نوع مشابه بدون سیکل (687.56 MPa) حدود 6 درصد افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که استحکام خمشی نمونه GGGG بعد از سیکل سرمایشی، 609.28 MPa می‌باشد که در مقایسه با نوع مشابه بدون سیکل (593.73 MPa) حدود 2.5 درصد افزایش پیدا کرده است.

بالا بودن درصد بهبود استحکام خمشی نمونه BBBB نسبت به نمونه GGGG بعد از اعمال سیکل سرمایش به دلیل پایداری حرارتی پایین الیاف شیشه نسبت به الیاف بازالت است. در بین چیدمان‌های هیبریدی، بیش‌ترین بهبود در استحکام خمشی مربوط به نمونه با چیدمان BBGG می‌باشد که در حالت سیکل داده شده نسبت به حالت بدون سیکل نزدیک 5 درصد و 681.11 به 649.54 MPa می‌باشد. در حالی که درصد بهبود استحکام خمشی بعد از اعمال سیکل سرمایشی برای هر دو نمونه FML با چیدمان‌های BGBG و BBGG، 3 درصد می‌باشد. با توجه به این‌که لایه‌های زیرین کامپوزیت (که در آزمایش خمش متحمل بار کششی می‌شوند) وقتی از جنس الیاف بازالت باشند، رفتار خمشی بهتری را نشان می‌دهند؛ به همین خاطر نمونه BBGG بعد از سیکل سرمایش درصد بهبود بالاتری نسبت به نمونه‌های BBGG و BGBG دارا می‌باشد.

شکل 3 تاثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر مدول خمشی نمونه‌های FML را نشان می‌دهد. بعد از اعمال سیکل سرمایش، نتایج نشان داد که درصد بهبود مدول خمشی در FML حاوی الیاف بازالت بیش‌تر از نمونه حاوی الیاف شیشه است. مدول خمشی نمونه تقویت شده با الیاف بازالت 71.59 GPa می‌باشد که نسبت به نوع مشابه بدون سیکل (68.12 GPa)، 5 درصد بهبود و مدول خمشی در نمونه تقویت شده با الیاف شیشه 61.96 GPa می‌باشد که نسبت به نوع مشابه بدون سیکل (60.96 GPa)، 1.6 درصد بهبود را نشان می‌دهند. در نمونه‌های هیبریدی FML با لایه‌های متحمل بار کششی از جنس الیاف بازالت و لایه‌های متحمل بار فشاری از جنس الیاف شیشه، با اعمال سیکل سرمایشی، درصد بهبود افزایش یافته است. برای مثال در نمونه با چیدمان BBGG بهبود مدول نسبت به حالت بدون سیکل بیش از 4 درصد می‌باشد، در حالی که درصد بهبود مدول خمشی برای نمونه‌های با چیدمان BBGG و BGBG نسبت به حالت بدون سیکل به ترتیب برابر 3 و 2 درصد است.

3-7- تاثیر سیکل سرمایش بر ریزساختار FML

شکل 7-الف، ریزساختار نمونه BBBB و شکل 7-ب، ریزساختار نمونه GGGG را بعد از اعمال 40 سیکل سرمایش در محدوده دمایی 100- تا 25 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. در نمونه FML تقویت شده با الیاف بازالت (شکل 7-الف)، ترشوندگی الیاف بازالت با رزین اپوکسی به صورت مطلوب بوده و پیوند بین الیاف بازالت و زمینه بدون کلوخه شدن اپوکسی انجام گرفته است.

- [7] Subagia, I. A., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S. and Shon, H. K., "Effect of Stacking Sequence on the Flexural Properties of Hybrid Composites Reinforced with Carbon and Basalt Fibers", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 251-258, 2014.
- [8] Botelho, E., Pardini, L. and Rezende, M., "Hygrothermal Effects on Damping Behavior of Metal/Glass Fiber/Epoxy Hybrid Composites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 399, No. 1, pp. 190-198, 2005.
- [9] Marzuki, H. F. A., Mohamad, M., Ubaidillah, E., Ahmadhlimi, E., Nordin, M. N. a., Abidin, Z., Fadzlee, M., Roslani, N., Junos, Y. M. and Omar, S., "Effect of Anodizing on Strength of Carbon-Fibre Aluminium-Laminated Composites", In *Proceeding of Trans Tech Publ*, pp. 216-221.
- [10] W.-X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, "Galvanic Corrosion-Resistant Carbon Fiber Metal Laminates", In *Proceeding of The 16th International Conference on Composite Materials*, Kyoto, Japan, July 8-13, 2007.
- [11] Mahdavi, S., "Thermal Cycling of out-of-Autoclave Thermosetting Composite Materials", Thesis, Concordia University, 2017.
- [12] Abdollahi Azghan, M., Arpatapeh, F. A. and Eslami-Farsani, R., "Experimental Study of the Effect of Cryogenic Cycling and Metal Surface Treatment on Flexural Properties of Aluminum-Epoxy/Basalt Fibers Laminate Composite", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-24, 2017.
- [13] da Costa, A. A., da Silva, D. F., Travessa, D. N. and Botelho, E. C., "The Effect of Thermal Cycles on the Mechanical Properties of Fiber-Metal Laminates", *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 434-440, 2012.
- [14] Surendra Kumar, M., Sharma, N. and Ray, B., "Mechanical Behavior of Glass/Epoxy Composites at Liquid Nitrogen Temperature", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, No. 9, pp. 937-944, 2008.
- [15] Khalili, S. M. R., Najafi, M. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Thermal Cycling on the Tensile Behavior of Polymer Composites Reinforced by Basalt and Carbon Fibers", *Mechanics of Composite Materials*, pp. 1-10, 2017.
- [16] Testing, A. S. f. and Materials, "Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)", ASTM International, 2009.
- [17] Resin, E., "828 Data Sheet", Shell Chemical Co., sc, Vol. 60, 2005.
- [18] Standard Test Methods for Flexural Properties of Un-reinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, "Annual Book of ASTM Standard", 08. 01, D 790 – 00, 2000.
- [19] Lopresto, V., Leone, C. and De Iorio, I., "Mechanical Characterisation of Basalt Fibre Reinforced Plastic", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 717-723, 2011.
- [20] Amuthakkannan, P., Manikandan, V. and Uthayakumar, M., "Mechanical Properties of Basalt and Glass Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composites", *Journal of Advanced Microscopy Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 44-49, 2014.
- [21] Singha, K., "A Short Review on Basalt Fiber", *International Journal of Textile Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 19-28, 2012.
- [22] Jamshaid, H. and Mishra, R., "A Green Material from Rock: Basalt Fiber-a Review", *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 107, No. 7, pp. 923-937, 2016.
- [23] Najafi, M., Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., "Hybridization Effect of Basalt and Carbon Fibers on IMPact and Flexural Properties of Phenolic Composites", *Iranian Polymer Journal*, Vol. 23, No. 10, pp. 767-773, 2014.

1- اصلاح سطحی آلومینیوم به روش آندایز باعث افزایش تخلخل روی سطح آلومینیوم می‌شود و نفوذ پلیمر داخل این تخلخل‌ها را به دنبال دارد. این اتفاق باعث افزایش قفل مکانیکی شده و انتقال بار بهتر صورت می‌گیرد که در نتیجه خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد.

2- در حالت بدون سیکل سرمایش، نمونه FML حاوی الیاف بازالت با دارا بودن استحکام و مدول خمشی به ترتیب 687.5 MPa و 68.12 GPa، بیش‌ترین خواص خمشی را در مقایسه با نمونه FML حاوی الیاف شیشه و نمونه‌های FML هیبریدی الیاف شیشه و بازالت دارد. به طوری‌که استحکام و مدول خمشی نمونه حاوی الیاف بازالت به ترتیب 15 و 11 درصد بیش‌تر از استحکام و مدول خمشی نمونه حاوی الیاف شیشه می‌باشد. در مورد نمونه‌های FML با الیاف هیبریدی، بهترین عملکرد از لحاظ استحکام و مدول خمشی مربوط به نمونه‌ای است که دو لایه از الیاف بازالت در قسمت پایینی نمونه و دو لایه از الیاف شیشه در قسمت بالایی نمونه قرار گرفته باشد. استحکام و مدول خمشی این FML به ترتیب 9 و 4 درصد بیش‌تر از نمونه حاوی الیاف شیشه است.

3- بعد از اعمال سیکل سرمایش مشابه با حالت بدون سیکل، خواص خمشی نمونه FML حاوی الیاف بازالت در مقایسه با نمونه‌های FML حاوی الیاف شیشه و هیبریدی الیاف شیشه و بازالت، بالاتر است. همچنین در نمونه FML حاوی الیاف بازالت پس از اعمال سیکل حرارتی، استحکام خمشی 6 درصد بیش‌تر از نمونه مشابه اما بدون سیکل حرارتی است. مدول خمشی نمونه FML حاوی الیاف بازالت بعد از اعمال سیکل سرمایشی نیز به مقدار 5 درصد بیش‌تر از نمونه FML حاوی الیاف بازالت بدون سیکل می‌باشد. این افزایش ناشی از اعمال سیکل برای نمونه‌های حاوی الیاف شیشه نیز با درصد افزایش کمتر صادق است.

4- در کامپوزیت‌های FML با الیاف هیبریدی بعد از سیکل سرمایش، در مواردی که لایه‌های متحمل بار کششی از جنس الیاف بازالت و لایه‌های متحمل بار فشاری از جنس الیاف شیشه باشند، بهبود خواص خمشی نسبت به سایر چیدمان‌ها بیشتر است.

5- مراجع

- [1] Hosseini Abbandanak S.N., Siadati S.M.H., and Eslami-Farsani R., "Graphene Surface Treatment Effects on Mechanical Behavior of Basalt Fibers Epoxy Composites", In *Persian. Iran. J. Polym. Sci. Technol*, Vol 31, pp. 155-170, 2018.
- [2] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites Under Tensile and Flexural Loadings", In *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.
- [3] 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.
- [4] Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö. and Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods", *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [5] Abdollahi Azghan, M. and Eslami-Farsani, R., "Experimental Investigation of Effect of Thermal Cycling and Metal Surface Treatment on Flexural Properties Laminate Composite of Aluminium-Epoxy/Basalt Fibers", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 369-376, 2017.
- [6] Aghamohammadi, H. Hosseini-Abbandanak, S. N. Eslami-Farsani, R. and Siadati, S. M. H., "Effect of Various Surface Treatment Methods on the Flexural Properties of Fiber Metal Laminates", In *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, 2018.



مروری بر رفتار ترمیمی و مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری خودترمیم‌شونده به روش‌های ترمیم غیرذاتی

رضا اسلامی فارسانی^{1*}، حسین ابراهیم نژاد خالجیری²

1- دانشیار، مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- دانشجوی دکترا، مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، کدپستی 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 98/03/08 پذیرش: 98/10/18	یکی از بزرگ‌ترین مشکلات قطعات کامپوزیتی در حین کار، ایجاد و رشد میکروترک در آن‌ها می‌باشد. رشد این میکروترک‌ها و به هم پیوستن آن‌ها می‌تواند باعث شکست فاجعه‌بار سازه کامپوزیتی شود. برای حل این مشکل، محققان به خصوص در طی سال‌های گذشته تلاش بسیاری کرده‌اند تا با ساخت مواد خودترمیم‌شونده، ترک‌های ایجاد شده را ترمیم کنند و مانع شکست کل قطعه شوند. ماده خودترمیم‌شونده، ماده‌ای است که باعث ترمیم میکروترک به صورت خودبه‌خودی و بدون هیچ گونه دخالت خارجی می‌شود. براساس روش‌های خودترمیمی، این مواد هوشمند به دو دسته بزرگ ذاتی و غیرذاتی تقسیم‌بندی می‌شوند. در سیستم ترمیم‌شوندگی ذاتی، ترمیم به صورت واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و ابرمولکولی انجام می‌شود. در مقابل در سیستم غیرذاتی، عامل ترمیمی در داخل محفظه‌ای نظیر الیاف توخالی، شبکه میکروآوندی و میکروکپسول ذخیره می‌شود. تحقیق حاضر سعی دارد تا پیشرفت‌های اخیر در زمینه انواع سیستم‌های ترمیم غیرذاتی را با تاکید بر بکارگیری آن‌ها در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به خصوص در طی سال‌های 2009 تاکنون مورد بررسی قرار دهد. در این راستا و در این کار مروری، ضرورت ترمیم کامپوزیت، مفهوم خودترمیم‌شوندگی، انواع روش‌های ترمیم غیرذاتی، ارزیابی عملکرد ترمیم در آزمون‌های مکانیکی مختلف، و همچنین گزارش‌های آماری و سیر تکاملی مرتبط با خودترمیم‌شوندگی ارائه شده‌اند.
کلیدواژگان: مواد خود ترمیم شونده کامپوزیت زمینه پلیمری بازیابی خواص مکانیکی ترمیم غیرذاتی	

A review on healing and mechanical behaviors of self-healable polymer matrix composites by extrinsic healing methods

Reza Eslami-Farsani*, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords
Self-healable materials
Polymer matrix composite
Mechanical properties recovery
Extrinsic healing

Abstract

One of the major problems of composite parts during their services is the creating and growing microcracks into them. The growth of microcracks and incorporation of them together, can lead to the catastrophic failure of composite structure. To solve this problem, the researchers especially during the last years ago have made many efforts to fabricate self-healable materials to heal the microcracks and prevent the failure of whole part. The self-healable matter is the substance which is caused to heal the microcracks automatically and without any external intervention. According to self-healing methods, these smart materials are divided into two major group of intrinsic and extrinsic. In intrinsic healing system, the healing was carried out by physical, chemical and super molecular interactions. In contrast in extrinsic healing system, the healing agent is stored into the container such as hollow fibers, micro vascular and microcapsule. The present work tries to investigate the most recent breakthroughs in the various extrinsic healing systems with emphasis on using them into the polymeric matrix composites, especially in period time of 2009 up to now. In this regard and in the review work, the necessity composite healing, self-healing concept, different extrinsic self-healing system, and healing performance evaluation in the different mechanical exams, as well as the related statistical reports and development to the self-healing are exhibited.

1-مقدمه

نسبت استحکام به وزن پایین جایگاه، بسیار ویژه‌ای در صنایع مختلف مانند صنایع هوایی، دریایی، حمل‌ونقل و معدنی در طی دهه گذشته پیدا کرده‌اند.

امروزه کامپوزیت‌های پایه پلیمری به دلیل خواص منحصر بفرد از جمله

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Eslami-Farsani, R. Ebrahimnezhad-Khaljiri H., "A review on healing and mechanical behaviors of self-healable polymer matrix composites by extrinsic healing methods", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 549-570, 2020.

خودترمیم‌شونده است که قادر به افزایش عمر کاری استخوان مصنوعی، دندان مصنوعی و دیگر اجزای مصنوعی مورد استفاده در بدن می‌باشد. استفاده از مواد خودترمیم در ساخت تاپره‌های خودترمیم‌شونده نیز از جمله کاربردهای تجاری شده این مواد هوشمند است [13]. از دیگر کاربردهای این مواد هوشمند استفاده از آن‌ها در سازه‌های کامپوزیتی هوشمند (کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن با قابلیت ترمیم) است که روند رو به رشد خود را به منظور تجاری‌سازی در صنایع مختلف بخصوص هوافضا ادامه می‌دهد [10].

نتایج جستجو در منابع مطالعاتی موجود نشان می‌دهد که مواد و سازه‌های خودترمیم‌شونده سهم بزرگی از تحقیقات روز دنیا را به خود اختصاص داده‌اند. کاربردهای متنوع و گوناگون این مواد باعث شده است تا کشورهای صنعتی سرمایه‌گذاری‌های کلانی را در این بخش انجام دهند. با توجه به این که موضوع خودترمیم‌شوندگی از موضوعات جدید بوده و مدت زمان زیادی از تحقیقات بر روی آن نمی‌گذرد، کشور ایران نیز می‌تواند با شروع یک برنامه مدون در این زمینه، جای خود را در میان کشورهای برتر دنیا در زمینه مواد خودترمیم‌شونده پیدا کند. در این گزارش، بررسی جامع و کاملی در ارتباط با اطلاعات موجود در حوزه مواد و سازه‌های خودترمیم‌شونده غیرذاتی در صنایع کامپوزیتی صورت گرفته و سعی شده است ضمن معرفی جامع تحقیقات انجام شده در این زمینه، روش‌های ترمیم در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تحقیقات انجام شده درخصوص کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده در داخل کشور نیز جمع‌آوری و بررسی شده تا شمای کلی از روند پیشرفت علم خودترمیم‌شوندگی در سازه‌های کامپوزیتی حاصل شود.

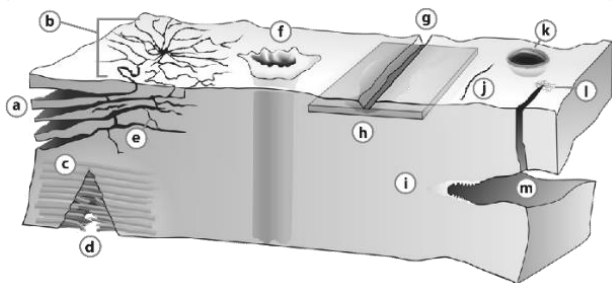


Fig. 1 Different damages in polymer materials and polymer matrix composites, a) delamination, b) impact/indentation surface cracking, c) fiber debonding, d) fiber rupture and pullout, e) transvers and shear cracking, f) puncture, g) deep cut in coating, h) corrosion in protected metal, i) crazing, j) scratch, k) ablation, l) microcracking, m) opening crack [10]

شکل 1 انواع آسیب‌ها در مواد پلیمری و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، (a) لایه‌لایه شدن، (b) ترک سطحی ناشی از ضربه/تورفتگی، (c) جدایش الیاف، (d) شکست و بیرون کشیدگی الیاف، (e) ترک برشی و عبوری، (f) سوراخ شدن، (g) برش عمیق در پوشش، (h) خوردگی در فلز محافظت شده، (i) شکاف، (j) خراش، (k) سایش، (l) میکروتُرک، (m) ترک باز [10]

2- تعریف خاصیت خودترمیم‌شوندگی

واژه‌ی خودترمیم‌شوندگی در علم مواد به معنی بازبایی خودبه‌خود خواص اولیه ماده پس از آسیب توسط عامل خارجی است. این اصطلاح به صورت نظری، سیستم هوشمندی است که بتواند در معرض حمله عامل تخریبی، عوامل ترمیم‌کننده آزاد کند، به صورتی که انسجام فیزیکی و استحکام مکانیکی خود را پس از آسیب بازابد. به این مواد هوشمند، در اصطلاح، خود

این کامپوزیت‌ها از یک زمینه پلیمری¹ و یک یا چند تقویت‌کننده² پلیمری، سرامیکی و یا فلزی تشکیل می‌شوند. از جمله پرکاربردترین کامپوزیت‌های پایه پلیمری، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف³ [1]، چند لایه الیاف-فلز⁴ [2]، پنل‌های ساندویچی⁵ [3]، سازه‌های هیبریدی⁶ [4] و چند مقیاسی⁷ [5] هستند که جایگاه بسیار ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده و توسعه یافته‌اند. شایان ذکر است که پلیمرهای ترد و سازه‌های کامپوزیتی ساخته شده از آن‌ها وقتی تحت بارگذاری‌های ترمومکانیکی مداوم قرار می‌گیرند، مستعد به ایجاد میکروتُرک در ساختار خود هستند. این میکروتُرک‌ها در ادامه به یکدیگر می‌پیوندند و باعث ورقه‌ای شدن در سازه‌های کامپوزیتی می‌شوند. مطالعات گسترده‌ای برای پیش‌بینی آسیب و نیز روش‌های رفع آن‌ها صورت گرفته است. عموماً تعیین این میکروتُرک‌ها در بدو پیدایش ناممکن است و تشخیص آن‌ها تنها پس از پیشرفت ترک در سازه ممکن خواهد بود که در این مرحله نیز ترمیم آسیب تقریباً ناممکن خواهد بود [6].

مواد خودترمیم‌شونده⁸ اولین بار در دهه‌ی 1970 برای ارزیابی و اطلاع از رفتار الاستومرهای پرکننده‌ای که در موشک‌های ماموریت‌های فضایی قرار داشتند، مورد توجه قرار گرفتند. در آن زمان دیده شد که رشد ترک در این الاستومرها، با حذف بار و گذشت زمان می‌تواند ترمیم شود [7]. مطالعات بیشتر در اواخر دهه‌ی 1980 و اوایل دهه‌ی 1990، قابلیت خودترمیم‌شوندگی پلیمرهای گرم‌انرم را آشکار کرد. در آن زمان مشاهده شد که در پلیمرهایی مانند پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA)⁹، افزایش دما تا بالای دمای شیشه‌ای شدن، ترک ایجاد شده به طور کامل ترمیم می‌شود [8].

کامپوزیت‌های خودترمیم دارای پتانسیل بالا برای حل مشکلات محدودکننده مثل میکروتُرک‌ها و ترک‌های مخفی در مواد پلیمری هستند [9]. زمانی که عامل ترمیم درون ماده پایه باشد، نیاز به بازرسی یا هرگونه دخالت خارجی به حداقل می‌رسد. در شکل 1 می‌توان انواع آسیب‌های وارده در مواد پلیمری و کامپوزیت‌های پلیمری را مشاهده نمود [10]. از این رو، افزایش طول عمر و اطمینان از عملکرد قطعات در صنایع پزشکی، ماموریت‌های فضایی، ناوگان حمل و نقل عمومی و تاسیسات عمرانی بسیار حائز اهمیت است. به عنوان مثال ایجاد مواد کامپوزیتی که بتوانند در مقابل آسیب‌های مکانیکی یا خوردگی مقاومت نشان دهند و در صورت آسیب، آن را ترمیم نمایند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [11].

استفاده از مواد خودترمیم‌شونده در شاخه‌های متفاوت علوم مواد، پلیمر و مکانیک روندی رو به رشد داشته است، به گونه‌ای که کاربرد صنعتی نیز پیدا کرده‌اند. از جمله آن می‌توان به پوشش‌های خودترمیم‌شونده اشاره کرد. در صنایع خودروسازی، به عنوان مثال، شرکت نسان¹⁰ برای اولین بار در جهان پوشش خودترمیم‌شونده را برای سطوح ماشین به صورت تجاری معرفی کرده است. نام تجاری این محصول پوشش ضدخراش¹¹ نام دارد و با توجه به عمق خراش و دما، بازبایی کامل بین ۱ تا ۷ روز انجام می‌شود [12]. یکی دیگر از کاربردهای مواد خودترمیم‌شونده در بخش پزشکی است. کامپوزیت خودترمیم‌شونده زیست سازگار یکی دیگر از کاربردهای مواد

¹ Polymeric matrix

² Reinforcement

³ Fibers reinforced composites

⁴ Fiber- metal laminate

⁵ Sandwich Panel

⁶ Hybrid structures

⁷ Multiscale structures

⁸ Self-healing materials

⁹ Poly (methyl-methacrylate)

¹⁰ Nissan

¹¹ Scratch guard coat

شکل 4، قابلیت کلی روش‌های ترمیم (که براساس محاسبه بازده ترمیم به حجم آسیب و نسبت نرخ ترمیم به نرخ آسیب بدست آمده است)، را نشان می‌دهد. هدف نهایی هر روش ترمیم دستیابی به بازده ترمیم 100 درصدی است. با این وجود و با توجه به شکل 4a، محدوده حجم آسیب برای هر نوع روش ترمیم متفاوت می‌باشد.

براساس شکل 4، نتایج حاصل از مقایسه بین قابلیت و بازده ترمیم سیستم‌های مختلف خودترمیم‌شونده نشان دهنده آن است که سیستم‌های ذاتی کمترین حجم ترمیم را به خود اختصاص می‌دهند، چرا که ترمیم در مقیاس مولکولی انجام می‌شود. سیستم‌های آوندی قابلیت پوشش حجم تخریب شده بزرگتری را دارند و سیستم‌های کپسولی به لحاظ سطح پوشش ناحیه تخریب‌شده بین سیستم‌های ذاتی و میکروآوندی قرار می‌گیرند. همچنین در تمام سیستم‌ها نسبت سرعت ترمیم به تخریب کم است. سیستم ترمیم‌کننده بهینه سیستمی است که در آن سرعت ترمیم متناسب با سرعت تخریب بوده و حجم قابل قبولی از نواحی تخریب شده در دفعات متعدد قابلیت ترمیم داشته باشند. صرف نظر از نوع سیستم خودترمیم‌شونده، کاربرد هوشمندانه این مواد در صنایع مختلف می‌تواند نتایج رضایت‌بخشی در کاهش هزینه‌ها، انرژی و افزایش ایمنی داشته باشد [10].

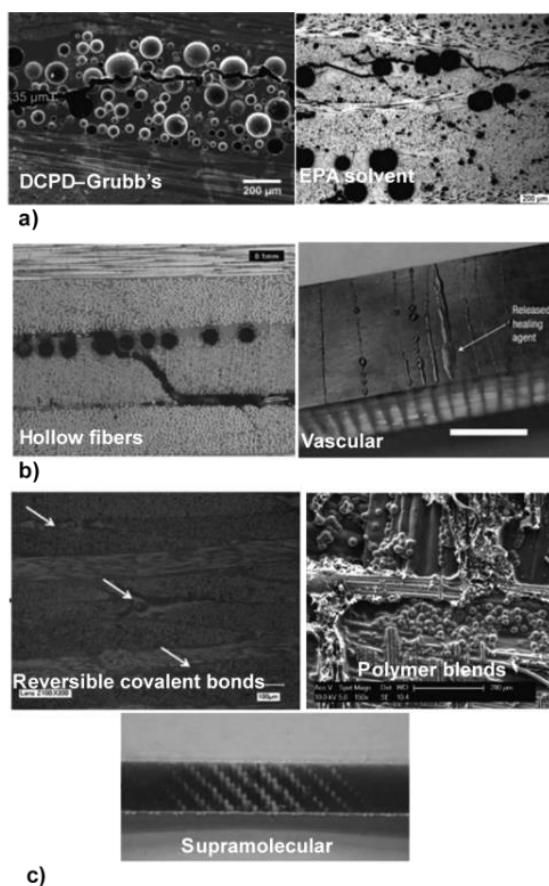


Fig. 2 Classes of self-healing systems within polymer composite structures, a) capsule based system, b) vascular system, c) intrinsic system [15]

شکل 2 دسته‌بندی سیستم‌های خودترمیمی در سازه‌های کامپوزیت پلیمری، (a) سیستم پایه کپسولی، (b) سیستم شبکه‌ای، (c) سیستم ذاتی [15]

تعمیری¹، خودترمیمی²، ترمیم خود به خودی³ و یا تعمیر خود به خودی⁴ اطلاق می‌شود [14].

روند ترمیم به نرخ هر سه مرحله راه‌اندازی، جایجایی و ترمیم وابسته می‌باشد. بنابراین تاثیر ترمیم توسط تعادل میان نرخ ترمیم در مقابل نرخ آسیب بدست می‌آید و برابر با مجموع زمان سه مرحله ذکر شده است. نرخ آسیب برای یک ماده توسط فاکتورهای خارجی نظیر فرکانس بار، نرخ کرنش و دامنه و بزرگی تنش تعیین می‌شود [10]. به هر حال، نرخ ترمیم می‌تواند برای مدهای آسیب خاصی تنظیم شود.

دسته‌بندی خودترمیم‌شوندگی در مواد پلیمری و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بر اساس ساز و کار ترمیم، شامل دو نوع خودترمیم‌شوندگی ذاتی⁵ و خودترمیم‌شوندگی غیرذاتی⁶ است. اصطلاح خودترمیم‌شوندگی ذاتی بر مبنای عملکرد خاص آن‌ها در قابلیت ترمیم ترک خود به خودی به وسیله محرک خاص و بدون دخالت عامل خارجی می‌باشد. روش خودترمیمی ذاتی بر طبق مکانیزم‌های مولکولی غالب که در فرآیند ترمیم دخالت دارند، به دو حالت روش‌های مبتنی بر واکنش‌های فیزیکی مانند توزیع یک ماده گرمانرم در زمینه و مواد ابرمولکولی با قابلیت ترمیم در اثر اعمال نیروی مکانیکی و روش‌های مبتنی بر واکنش‌های شیمیایی مانند واکنش‌های برگشت‌پذیر، ترمیم از طریق نفوذ مولکولی و ترمیم در اثر واکنش‌های یونی تقسیم‌بندی می‌شوند [9]. در روش‌های خودترمیم‌شوندگی غیرذاتی، ترمیم به صورت خود به خود انجام نمی‌شود. بلکه در این روش، عامل ترمیم به گونه‌ای در یک مخزن ذخیره می‌شود که پس از آسیب سطح، امکان خروج آن وجود داشته باشد و بتواند در مجاورت کاتالیزور آسیب وارده را ترمیم نماید. به طور کلی معمول‌ترین روش‌های غیرذاتی در کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده را می‌توان در قالب روش‌های کپسوله‌دار کردن⁷ عامل ترمیمی، استفاده از الیاف توخالی⁸ و ایجاد شبکه‌های میکروآوندی⁹ طبقه‌بندی کرد [10]. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که سیستم‌های خودترمیم‌شوندگی پلیمرها و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری را می‌توان براساس شکل ترمیم نیز طبقه‌بندی کرد که شامل خودترمیم‌شوندگی ذاتی، خودترمیم‌شوندگی با میکروکپسول و خودترمیم-شوندگی با استفاده از میکروآوند می‌باشند. شکل 2، این سیستم طبقه‌بندی را نشان می‌دهد [15].

3- ارزیابی عملکرد ترمیم

هدف خودترمیمی، بازیابی خواص موردنظر از دست رفته و یا تنزل یافته بر اثر آسیب در ماده است. پر شدن کامل آسیب وارده و شکل‌گیری دوباره اتصالات اطراف آسیب می‌تواند خواص شکست جسم را بازگرداند و علاوه بر خواص شکست، دیگر خواص ماده نیز بعد از ترمیم می‌توانند بهبود یابند. حجم آسیب‌های وارده به شرایط بارگذاری، هندسه و خواص جسم آسیب ندیده وابسته است. برای ارزیابی عملکرد ترمیم، محققان ضریبی به نام ضریب تاثیر ترمیم یا بازده ترمیم¹⁰ (η) معرفی کرده‌اند که نرخ ترمیم خاصیت مورد نظر (f) را نشان می‌دهد [16]. شکل 3 و جدول 1، به ترتیب، بازده ترمیم و پارامترهای مورد محاسبه برای رفتارهای مکانیکی متفاوت را نشان می‌دهند.

- ¹ Self-repairing
- ² Self-healing
- ³ Autonomic-healing
- ⁴ Autonomic-repairing
- ⁵ Intrinsic self-healing
- ⁶ Extrinsic self-healing
- ⁷ Capsulation
- ⁸ Hollow fibers
- ⁹ Microvascular network
- ¹⁰ Healing efficiency

4- گزارش‌های آماری مرتبط با خودترمیم‌شوندگی

با جستجو در میان منابع اطلاعاتی، حوزه‌های مختلفی در زمینه کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده شناسایی شدند. این کامپوزیت‌ها شامل انواع زمینه پلیمری (از جمله پوشش‌های و سازه‌ها) و زمینه‌های فلزی و سرامیکی هستند. این اطلاعات به صورت تعداد مقالات مرتبط با کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده، رتبه‌بندی کشورها، محققان فعال، دسته‌بندی علوم مختلف در زمینه کامپوزیت‌های مذکور و نوع سندهای چاپ شده (برای بازه زمانی 2009-April 2019) می‌باشند که به ترتیب در شکل‌های 5 تا 9 آورده شده‌اند [17].

با توجه به شکل 5، می‌توان فهمید که تعداد سندهای چاپ شده روند رو به رشدی دارد و با توجه به آن می‌توان پیش‌بینی کرد که در پایان سال 2019 این روند رو به رشد با سرعت بیش‌تری ادامه داشته باشد. شکل 6، کشورهای پیشرو در زمینه کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده را نشان می‌دهد که به ترتیب، جایگاه اول تا سوم به کشورهای چین، آمریکا و انگلستان اختصاص یافته است. همچنین محققان ایرانی با چاپ 44 مقاله در مجلات ISI، ایران را در رتبه 14 دنیا در زمینه کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده قرار داده‌اند. شکل 7، محققان فعال در زمینه کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده را معرفی می‌کند. با توجه به این شکل، ژانگ¹، رانگ² و باند³، فعال‌ترین محققان در زمینه کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده هستند. شکل 8، دسته‌بندی علوم مرتبط با کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده و سهم آن‌ها را نشان می‌دهد که رشته‌های مواد، مهندسی (بطور کلی) و پلیمر، بالاترین سهم را دارا هستند. در شکل 9 می‌توان نوع اسناد چاپ شده در مورد کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده را مشاهده کرد.

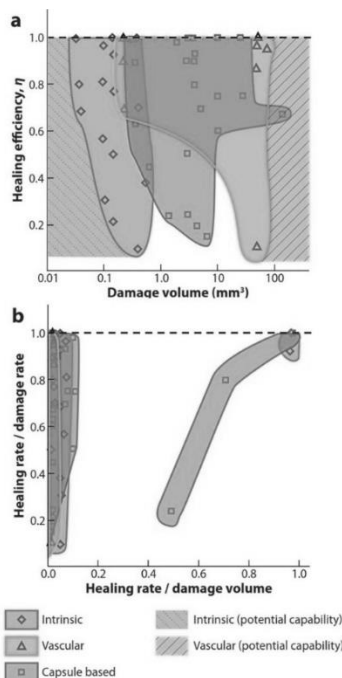


Fig. 4 Performance maps for self-healing materials, a) the healing efficiency vs. damage volume, b) the healing rate vs. damage rate [10]

شکل 4 نقشه کارایی مواد خودترمیم، (a) بازده ترمیم نسبت به حجم ناحیه آسیب، (b) نرخ ترمیم نسبت به نرخ آسیب [10]

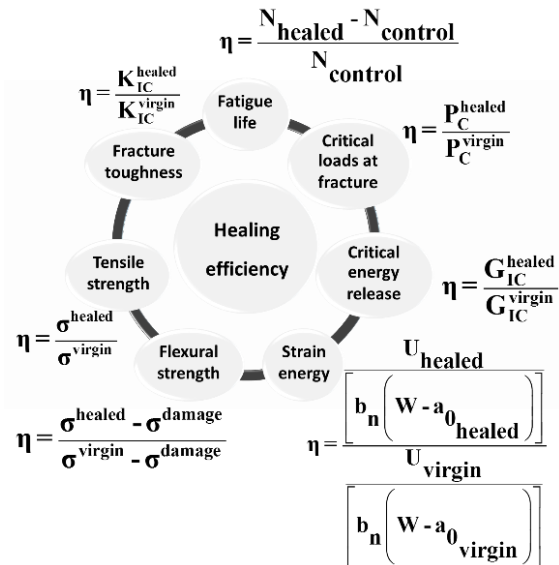


Fig. 3 The various modes of calculating healing efficiency [16]

شکل 3 روش‌های متفاوت محاسبه بازده ترمیم [16]

جدول 1 معرفی پارامترهای محاسبه بازده ترمیم برای انواع خواص مکانیکی [16]

Table 1 Introduction of calculating healing efficiency parameters for various mechanical properties [16]

نماد	پارامتر
K_{IC}^{healed}	چقرمگی شکست نمونه ترمیم شده
K_{IC}^{virgin}	چقرمگی شکست نمونه بدون آسیب
p_c^{healed}	بار بحرانی شکست نمونه ترمیم شده
p_c^{virgin}	بار بحرانی شکست نمونه بدون آسیب
G_{IC}^{healed}	سرعت رهاسازی انرژی بحرانی نمونه ترمیم شده
G_{IC}^{virgin}	سرعت رهاسازی انرژی بحرانی نمونه بدون آسیب
U_{healed}	انرژی کرنشی نمونه ترمیم شده
U_{virgin}	انرژی کرنشی نمونه بدون آسیب
W	فاصله از خط بارگذاری تا انتهای نمونه
b_n	عرض سطح ترک ایجاد شده
$a_{0healed}$	طول پیش ترک اولیه نمونه ترمیم شده
$a_{0virgin}$	طول پیش ترک اولیه نمونه ترمیم شده
σ_{healed}	استحکام نمونه ترمیم شده
σ_{virgin}	استحکام نمونه بدون آسیب
σ_{damage}	استحکام نمونه آسیب دیده
N_{healed}	تعداد سیکل تا شکست نمونه ترمیم شده
$N_{control}$	تعداد سیکل تا شکست نمونه بدون ترمیم

¹ Zhang

² Rong

³ Bond

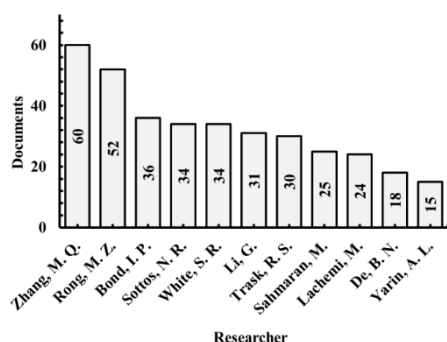


Fig. 7 The number of international published documents about self healing composites by different researchers

شکل 7 تعداد اسناد چاپ شده بین‌المللی توسط محققان مختلف در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده

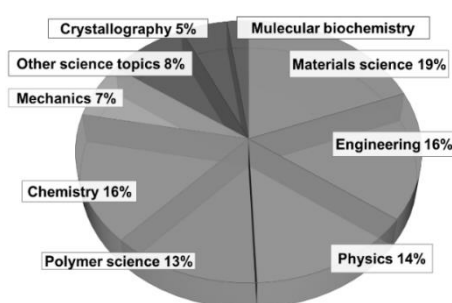


Fig. 8 The classification of sciences related to self healing composites

شکل 8 دسته‌بندی علوم مرتبط با کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده



Fig. 9 The published documents type in the subject of self healing composites

شکل 9 نوع اسناد چاپ شده در موضوع کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده

اما این آمار بیانگر دقیق مقالات این محققان نیست، چرا که آمار مقالات چاپ شده در مجلات علمی- پژوهشی داخلی و کنفرانس‌ها را پوشش نمی‌دهد. بنابراین نیاز است تا روند پژوهشی در مورد کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده در داخل کشور بطور جامع‌تر مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، در شکل ۱۲، تعداد مجموع اسناد چاپ شده توسط محققان ایرانی در داخل و خارج کشور آورده شده است. به صورت کلی با توجه به شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، می‌توان بیان کرد که روند تحقیقاتی در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده در کشور رو به رشد است. با توجه به شکل ۱۲ مشخص می‌شود که ۴ پژوهشگر اول از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و ۲ پژوهشگر دیگر از دانشگاه صنعتی اصفهان می‌باشند. این بدان معنی است که در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده این دو دانشگاه صنعتی در کشور پیشرو هستند.

شکل ۷، محققان فعال در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده را معرفی می‌کند. با توجه به این شکل، ژانگ^۱، رانگ^۲ و باند^۳، فعال‌ترین محققان در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده هستند. شکل ۸، دسته‌بندی علوم مرتبط با کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده و سهم آن‌ها را نشان می‌دهد که رشته‌های مواد، مهندسی (بطور کلی) و پلیمر، بالاترین سهم را دارا هستند. در شکل ۹ می‌توان نوع اسناد چاپ شده در مورد کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده را مشاهده کرد. مطابق انتظار، بیش‌ترین سند چاپ شده به صورت مقاله است.

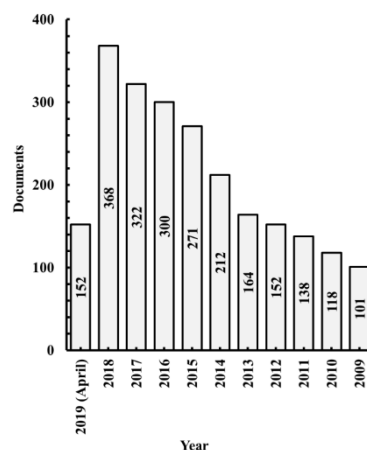


Fig. 5 The number of international published documents about self healing composites

شکل ۵ تعداد اسناد چاپ شده بین‌المللی در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده

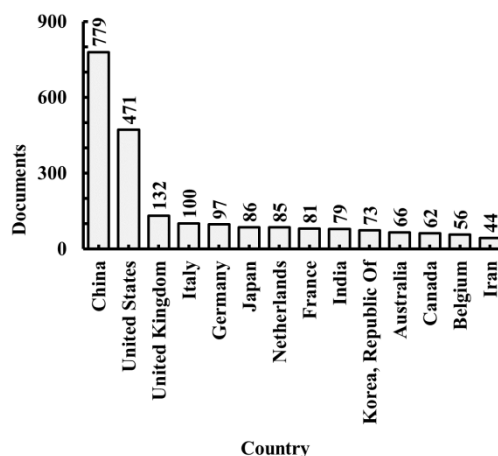


Fig. 6 The number of international published documents about self healing composites by different country (2009-April 2019)

شکل ۶ تعداد اسناد چاپ شده بین‌المللی توسط کشورهای مختلف در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده (2009-April 2019)

همانگونه که بیان شد محققان ایرانی توانسته‌اند ۴۴ مقاله در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده در نشریه‌های ISI چاپ نمایند. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب تعداد اسناد چاپ شده در فاصله زمانی 2009- April 2019 توسط محققان فعال ایرانی و همچنین تعداد اسناد به تفکیک این محققان را نشان می‌دهند.

¹ Zhang
² Rong
³ Bond

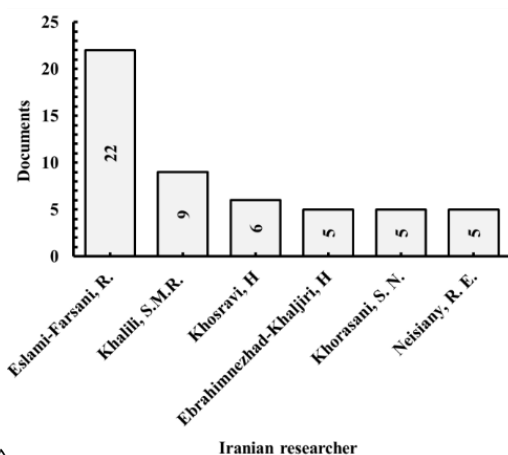


Fig. 12 The number of domestic and international published documents about self healing composites by Iranian researchers, based on the researcher's name

شکل 12 تعداد اسناد چاپ شده داخلی و بین‌المللی توسط محققان ایرانی به تفکیک نام محقق در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده

5- انواع روش‌های ترمیم سازه کامپوزیتی مبتنی بر روش‌های غیرذاتی

علی‌رغم نوپا بودن ایده کامپوزیت‌های پلیمری خود ترمیم شونده غیرذاتی، روش‌های مختلفی برای ایجاد این کامپوزیت‌ها معرفی شده‌اند. روش‌های ترمیم مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به روش غیرذاتی، بسیار شبیه روش‌های مورد استفاده در ترمیم پلیمرها می‌باشد. در تمامی این روش‌ها، عامل ترمیمی به گونه‌ای در یک مخزن ذخیره می‌شود که پس از آسیب به صورت میکروترک، امکان خروج آن وجود داشته باشد تا بتواند به صورت مستقیم و یا با کمک کاتالیزور، عمل ترمیم کامپوزیت را انجام دهد. به طور کلی، روش‌های ترمیم غیرذاتی در کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده را می‌توان در قالب روش‌های کپسوله‌دار کردن عامل ترمیمی، استفاده از الیاف توخالی و ایجاد شبکه‌های میکروآوندی طبقه‌بندی کرد (شکل 13).

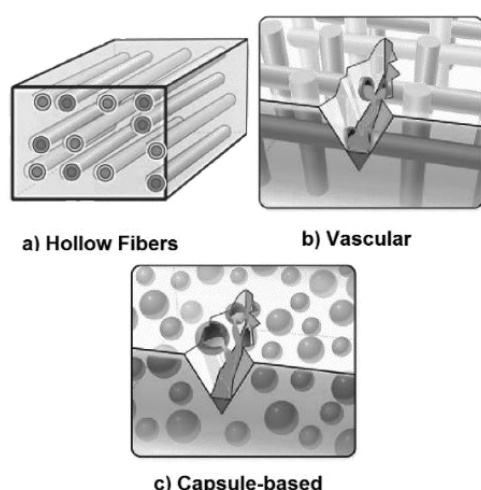


Fig. 13 Different extrinsic healing systems, a) hollow fibers, b) vascular, c) microcapsule [10]

شکل 13 انواع سیستم‌های ترمیم غیرذاتی، (a) الیاف توخالی، (b) میکروآوند، (c) میکروکپسول [10]

شایان ذکر است، آمار بیان شده مربوط به کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده می‌باشد که در آن پوشش‌های خود ترمیم شونده یا دیگر مواد خود ترمیم شونده در نظر گرفته نشده است. بررسی دقیق‌تر در زمینه مواد خود ترمیم شونده نشان می‌دهد که در داخل کشور، محققان دانشگاه صنعتی اصفهان فعالیت بسیار زیادی در حوزه پوشش‌های خود ترمیم شونده بخصوص پوشش‌های اپوکسی انجام داده‌اند که بیش‌تر نتایج به صورت مقاله در نشریه‌های ISI به چاپ رسیده‌اند [18]. محققان پژوهشگاه پلیمر و دانشگاه سمنان نیز در زمینه ساخت میکروکپسول با پوسته‌های مختلف به عنوان محفظه نگهدارنده عامل ترمیم تحقیقاتی انجام داده‌اند [20,19]. لازم به ذکر است که در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تحقیقاتی در زمینه کامپوزیت‌های زمینه فلزی خود ترمیم شونده انجام شده است [22,21]. همچنین در موضوعاتی مانند پلیمرهای خود ترمیم شونده ذاتی [23]، استفاده از سیم آلیاژ حافظه‌دار به منظور بازایی خواص مکانیکی [24] و کپسوله کردن عامل پخت [25] نیز تحقیقاتی توسط محققان داخلی در مجلات ISI به چاپ رسیده است.

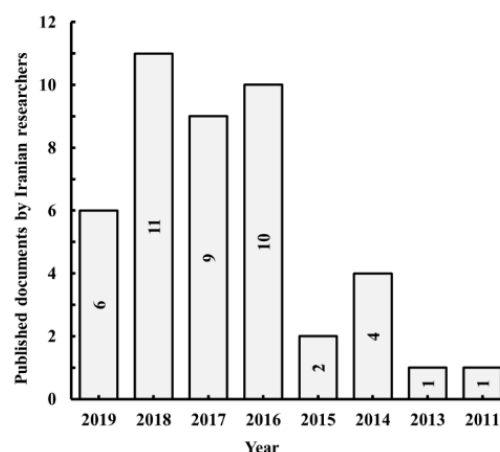


Fig. 10 The number of international published documents about self healing composites by Iranian researcher in different years

شکل 10 تعداد اسناد چاپ شده بین‌المللی در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده توسط محققان ایرانی در سال‌های مختلف

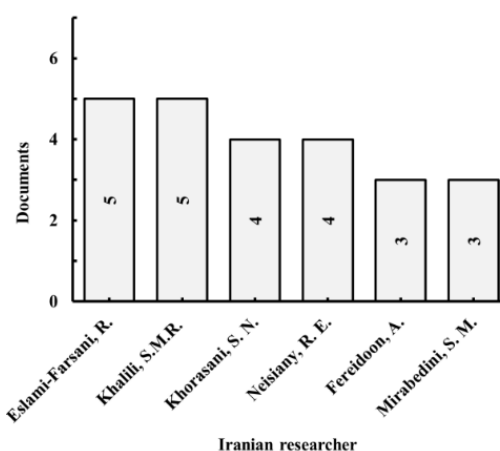


Fig. 11 The number of international published documents about self healing composites by Iranian researchers, based on the researcher's name

شکل 11 تعداد اسناد چاپ شده بین‌المللی توسط محققان ایرانی به تفکیک نام محقق در زمینه کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده

توخالی، ریزساختار و پاسخ مکانیکی لایه‌های خودترمیم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. موتوکو و همکاران بیان کردند که افزایش فاصله بین الیاف توخالی و استفاده از الیاف با قطر کوچک‌تر می‌تواند تا حدی از ایجاد حفره بین الیاف در طول فرآیند تولید جلوگیری کند. آن‌ها نشان دادند که به دلیل بزرگ‌تر بودن قطر الیاف شیشه (تا قطر 1.15 mm) که برای نگهداری عامل ترمیم استفاده می‌شوند، در مقایسه با قطر الیاف تقویت‌کننده (12 μm)، امکان ایجاد تمرکز تنش نامطلوب در ساختار کامپوزیت وجود دارد.

در سال 2001، بلی¹¹ و همکاران [31]، نوعی کامپوزیت پلیمری خودترمیم را با استفاده از الیاف شیشه توخالی با قطری کمتر از تحقیق موتوکو (با قطر خارجی 15 μm و قطر داخلی 5 μm) توسعه دادند. ایده جالب این کار تحقیقاتی نوع الیاف شیشه مورد استفاده بود که قابلیت دوگانه داشت. در واقع الیاف شیشه تقویت‌کننده در ساختار این کامپوزیت توخالی بود که به صورت هم‌زمان امکان استفاده به عنوان مخزن ذخیره عامل خودترمیم (سیانواکریلات¹² یا اپوکسی) و رنگ آشکارساز اشعه X را داشت. هر چند حضور عامل خودترمیم در الیاف توخالی تاثیر منفی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت نداشت، ولی بیان شده است که پر کردن و آزاد شدن عامل خودترمیم از الیاف شیشه به دلیل کوچک بودن ابعاد آن‌ها حتی با استفاده از نوعی روش خاص پخش مویرگی نیز مساله‌ساز است. استفاده از سیانواکریلات تک‌جزئی¹³ به عنوان عامل ترمیم موفقیت‌آمیز نبود، چرا که نرخ پخت رزین ترمیم‌کننده از نرخ پخش آن سریع‌تر بود که بسته شدن انتهای الیاف شیشه را در هنگام پر کردن آن‌ها به دنبال داشت. استفاده از اپوکسی دوجزئی¹⁴ به عنوان عامل ترمیم به مدد کاهش لزجت¹⁵ رزین موفقیت‌آمیزتر بود. کاهش لزجت با گرم کردن رزین و قطعه کامپوزیتی تا دمای 60 °C و افزودن 40% استون به رزین امکان‌پذیر شد. محققان، به دلیل مشکلات مشاهده شده، استفاده از الیاف شیشه بزرگ‌تر از قطر خارجی 40-60 μm و قطر داخلی تا اندازه 50 μm را برای کاهش مشکلات تولید پیشنهاد کردند.

در فاصله سال‌های 2005-2009، تحقیقات در زمینه تولید کامپوزیت‌های خودترمیم مبتنی بر الیاف توخالی ادامه یافت [32-34]. محققان پیشنهاد کردند که می‌توان از الیاف توخالی حاوی عامل خودترمیم پایه اپوکسی و رنگ آشکارساز ماوراء بنفش به صورت هم‌زمان برای تقویت ساختار کامپوزیت، خودترمیمی و شناسایی موقعیت آسیب وارد شده به قطعه استفاده کرد. ایده ارائه شده در این تحقیقات، امکان‌سنجی استفاده از سیستم‌های خودترمیم برای کاربردهای خاص مهندسی (مثل کاربردهای هوافضایی) با تغییر شیمی عامل خودترمیم و تعداد و محل قرارگیری الیاف توخالی در میان لایه‌های کامپوزیتی بوده است. در تحقیقی دیگر، پنگ¹⁶ و باند¹⁷ [35]، از الیاف شیشه توخالی با قطر خارجی 60 μm و 50% فضای خالی¹⁸ جهت نگهداری ماده خودترمیم استفاده کردند (شکل 14). الیاف شیشه توخالی تک‌جهته در یک ورق اپوکسی/الیاف شیشه نوع E جاگذاری شده بود. از رزین اپوکسی و سخت‌کننده¹⁹ نیز به عنوان عوامل ترمیم استفاده شد. الیاف توخالی پر شده با این دو ماده، با زاویه‌های صفر و 90 درجه در کامپوزیت قرار داده شدند. از آزمون خمش 4 نقطه‌ای به منظور بررسی رفتار

در روش کپسوله کردن، عامل ترمیم در داخل یک پوشش سرامیکی مانند سیلیکا و یا پلیمری مانند اوره-فرمالدئید¹ قرار می‌گیرد. در روش الیاف توخالی، عامل ترمیم به درون الیاف توخالی از جنس پلیمر (مانند پلی‌پروپیلن²)، سرامیک (مانند الیاف شیشه) و یا فلز (مانند الیاف فولاد) تزریق می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در روش شبکه میکروآوندی، هر دو روش فوق می‌تواند برای پر کردن عامل ترمیم استفاده شود. به عنوان مثال، با استفاده از چاپگر سه‌بعدی ابتدا شبکه میکروآوندی از الیاف توخالی ساخته و سپس توسط عامل ترمیم پر می‌شود. در حالی که در روش ساخت به وسیله الکتروریسی³، عامل ترمیم به همراه یک پلیمر دیگر به صورت مایع از یک سرنگ با قطر میکرونی به صورت پیوسته خارج شده و در اثر تبخیر حلال، پلیمر به صورت یک پوشش پلیمری بر روی سطح عامل ترمیم قرار می‌گیرد. در نهایت نیز شبکه میکروآوندی به صورت میکروالیاف⁴ حاوی عامل ترمیم حاصل می‌شود [26، 10]. به منظور بررسی دقیق‌تر و بیان ویژگی‌ها و تفاوت‌های هر یک از روش‌های مذکور، در ادامه، سیر تکاملی تحقیقات انجام شده درخصوص انواع روش‌های خودترمیم غیرذاتی بررسی شده است.

5-1- سیر تکاملی روش ترمیم الیاف توخالی

در روش‌های خودترمیمی مبتنی بر الیاف توخالی، ابتدا عامل ترمیم (مانند رزین زمینه کامپوزیت پلیمری) در الیاف توخالی (نظیر الیاف شیشه) پر شده، سپس با شکستن این الیاف تحت بارهای مکانیکی، عامل ترمیم آزاد شده که باعث پر شدن ترک‌های ایجاد شده در قطعه و سپس پخت درجا⁵ می‌شود. اولین بار در سال 1991، درای⁶ [27]، به بررسی تعمیر آسیب‌های وارد شده به قطعات ساختمانی با استفاده از عامل ترمیم شیمیایی ذخیره شده در الیاف توخالی پرداخت. در ابتدا وی از این روش تنها در مواد سیمانی و به منظور تغییر نفوذپذیری⁷ زمینه سیمانی، تعمیر ترک‌ها، جلوگیری از فرسایش و به عنوان حسگر استفاده کرد. اما در ادامه، استفاده از این روش در مواد پلیمری نیز توسعه یافت [28، 29].

در سال ۱۹۹۹، موتوکو⁸ و همکاران [30]، به بررسی پاسخ ورق‌های کامپوزیتی خودترمیم تحت ضربه سرعت پایین پرداختند. نمونه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه شامل الیاف توخالی (به عنوان مخزن خودترمیم) و الیاف شیشه تقویت‌کننده نوع S-2 در دو نوع زمینه مختلف اپوکسی و وینیل‌استر⁹ بودند. در این تحقیق، تاثیر عوامل مختلفی هم‌چون جنس الیاف توخالی (الیاف شیشه، آلومینیوم و مس)، تعداد و توزیع مکانی این الیاف و نوع عامل ترمیم (وینیل‌استر 411-C50 یا اپوکسی EPON-862) بررسی شد. آن‌ها ورق‌های تک‌جهته¹⁰ حاوی 1، 2 یا 3 عدد الیاف توخالی را با استفاده از نوعی روش قالب‌ریزی تحت خلاء ساختند. از میان انواع الیاف توخالی بررسی شده، الیاف شیشه به دو دلیل عملکرد بهتری نسبت به الیاف آلومینیومی و مسی از خود نشان دادند. جاگذاری الیاف توخالی از جنس شیشه در زمینه پلیمری تاثیر منفی بر استحکام مکانیکی ورق ندارد. همچنین الیاف شیشه در سطوح انرژی پایین‌تر از سایر مواد و با ایجاد ترک‌های خیلی ریز در ورق می‌شکند. نتایج به دست آمده نشان داد که تعداد و توزیع مکانی الیاف

¹ Urea-Formaldehyde

² Polypropylene

³ Electrospinning

⁴ Micro-fibers

⁵ In Situ cure

⁶ Dry

⁷ Permeability

⁸ Motuku

⁹ Vinyl Ester

¹⁰ Unidirectional Laminates

¹¹ Bleay

¹² Cyanoacrylate

¹³ One-Part

¹⁴ Two-Part

¹⁵ Viscosity

¹⁶ Pang

¹⁷ Band

¹⁸ Hollow Fraction

¹⁹ Hardener

بدون عامل ترمیم، با استفاده از روش μCT حجم نواحی آسیب‌دیده را تعیین و نقشه سه‌بعدی این نواحی را تهیه کردند. نتایج نشان داد که حجم ناحیه آسیب‌دیده از 50 mm^3 (در ضربه 3 J) تا 150 mm^3 (در ضربه 5 J) متغیر بوده و آسیب وارد شده به شکل درخت کاج⁷ بوده است. همچنین گفته شد که الیاف توخالی ترمیم (جاگذاری شده در سطوح سوم و سیزدهم)، تاثیر خنثی بر نحوه گسترش ترک داشته است. به نحوی که الیاف جاگذاری شده در لایه سوم سبب کاهش میزان آسیب در لایه‌های بعدی شده، اما الیاف جاگذاری شده در لایه سیزدهم تاثیر چندانی بر رشد آسیب در نمونه نداشته است.

در سال 2014، کلینگ و زیگانی⁸ [39]، به مطالعه خودترمیمی در کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه توخالی پرداختند. الیاف شیشه از نوع H با قطر خارجی $10\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ و قطر داخلی $5\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$ با عامل ترمیم رزین پلی‌استر (با نام تجاری Polimal 1058) پر شدند. علاوه بر عامل ترمیم، نوعی رنگ آشکارساز ماوراء بنفش نیز در الیاف توخالی ذخیره شد. کارایی سیستم خودترمیم با استفاده از آزمون ضربه مورد ارزیابی قرار گرفت و بعد از اعمال ضربه و برای انجام فرآیند ترمیم، نمونه‌ها تحت شرایط دمایی $60\text{ }^\circ\text{C}$ (12 ساعت) و $23\text{ }^\circ\text{C}$ (120 ساعت) قرار گرفتند. کارایی خودترمیمی از طریق بررسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی⁹ (SEM) تایید شد. همچنین نتایج آزمون خمش پس از ترمیم، بهبود 20 درصدی خواص نسبت به نمونه بدون آسیب را نشان داد.

افتخاری¹⁰ و همکاران [40]، رفتار ترمیمی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه توخالی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، رزین اپوکسی برای عامل ترمیم و الیاف شیشه توخالی به عنوان محفظه نگهدارنده عامل ترمیم استفاده شدند (شکل 15). تخریب توسط دستگاه پرس بر روی وسط نمونه که بر روی دو تکیه‌گاه قرار داشت، انجام شد. در این کار پژوهشی تاثیر درصد الیاف شیشه توخالی و زمان ترمیم و همچنین اثر آن‌ها بر خواص مکانیکی بررسی شدند. نتایج نشان داد که بهینه‌ترین درصد الیاف شیشه توخالی، 3 درصد حجمی و زمان بهینه برای عمل ترمیم، 7 روز است. همچنین بازده ترمیم کامپوزیت در شرایط بهینه مذکور، در آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه به ترتیب حدود 77، 54 و 92 درصد به دست آمد.

رحیم‌پور¹¹ و همکاران [41]، چقرمگی شکست در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه خودترمیم شونده با استفاده از الیاف شیشه توخالی را بررسی کردند. نوع عامل ترمیم، رزین اپوکسی زمینه به همراه سخت‌کننده پلی‌آمیني¹² بود. آزمون چقرمگی شکست با روش خمش سه نقطه، بر نمونه‌ها با رویکرد خودترمیمی در دمای محیط و در دمای $160\text{ }^\circ\text{C}$ انجام شد. با استخراج فاکتور چقرمگی شکست از نمودارهای نیرو-جابجایی، درصد اثربخشی ترمیم مورد محاسبه قرار گرفت که در دمای محیط، 89.5 درصد و در دمای $160\text{ }^\circ\text{C}$ ، 91.8 درصد گزارش شد.

قنبری¹³ و همکاران [42]، رفتار ترمیم کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی الیاف شیشه توخالی خرد شده را بررسی کردند. این محققان الیاف شیشه خرد شده با طول 10 mm و قطر $400\text{ }\mu\text{m}$ را به صورت تصادفی در داخل زمینه اپوکسی توزیع کردند. نوع عامل ترمیم همان رزین و سخت‌کننده

ترمیم استفاده شد. نتایج گزارش شده، بازیابی 93 درصدی استحکام خمشی را نشان داد.

در همین راستا، مطالعات تراستک¹ به همراه باند نشان داد که با استفاده از فرآیند اتوکلاو²، امکان قرار دادن الیاف شیشه توخالی پر شده از عامل ترمیم رزین و سخت‌کننده زمینه در 4 لایه در سازه کامپوزیتی تقویت‌شده با 16 لایه پارچه شیشه نوع E به راحتی امکان‌پذیر است. نتایج اولیه نشان داد که حضور الیاف توخالی شیشه باعث کاهش 16 درصدی استحکام خمشی نسبت به نمونه بدون الیاف شیشه توخالی شده است. در این کار پژوهشی بازده ترمیم برای بازیابی استحکام خمشی 87 درصد گزارش شد [33].

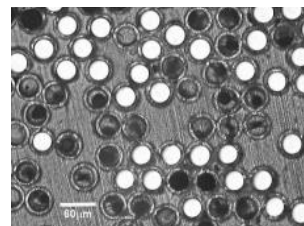


Fig. 14 Optical micrographs of filled hollow glass fibers by epoxy and hardener with $60\text{ }\mu\text{m}$ external diameter with a hollowness of 50% [35]
شکل 14 تصویر نوری الیاف شیشه توخالی پر شده با اپوکسی و سخت‌کننده با قطر خارجی $60\text{ }\mu\text{m}$ و کسر تهیگی 50% [35]

در سال 2008، تومیزوکا³ [36]، به امکان‌سنجی استفاده از ورق‌های کامپوزیتی زمینه اپوکسی حاوی الیاف شیشه خرد شده حاوی عامل ترمیم اپوکسی در ساخت قطعات هواپیما پرداخت. انواع مختلفی از الیاف شیشه با جاگذاری‌های مختلف و نیز انواع مختلف عامل ترمیم دوجزئی در این تحقیق بررسی شد. ورق‌های کامپوزیتی تحت فرآیند اتوکلاو در دمای $121\text{ }^\circ\text{C}$ (زمان 1 ساعت) و نیز دمای $171\text{ }^\circ\text{C}$ (زمان 2 ساعت) در شرایط خلاء قرار گرفتند که فرآیندی معمول در ساخت اجزای کامپوزیتی هواپیما محسوب می‌شود. بازدهی خودترمیمی با استفاده از آزمون ضربه و نیز آزمون استحکام خمشی بررسی شد. نتایج، بیانگر بازدهی 85% سیستم ترمیم در بازیابی استحکام خمشی و انجام فرآیند ترمیم در کمتر از یک دقیقه بود.

در سال 2010، کوسوراکیس و موریتز⁴ [37]، به ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر الیاف شیشه توخالی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف کربن پرداختند. در این تحقیق، هدف، طراحی و بهبود خواص الیاف توخالی در کامپوزیت به منظور استفاده در کاربردهای خودترمیمی بود. لذا الیاف توخالی با عامل ترمیم پر نشد، بلکه تاثیر قطر الیاف و نیز جهت قرارگیری الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت بررسی شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که خواص کششی و فشاری کامپوزیت در حالتی که جهت بارگذاری موازی الیاف است، چندان تغییر نمی‌کند. اما در حالت بارگذاری در جهت عمود بر الیاف با قطر بزرگ (بیشتر از $200\text{ }\mu\text{m}$)، استحکام قطعات تا حدی کاهش می‌یابد.

در سال 2012، مک‌کومب⁵ و همکاران [38]، بعد از اعمال ضربه به یک ورق کامپوزیتی 16 لایه الیاف کربن پیش‌آغشته دارای الیاف توخالی شیشه

⁶ Micro-X-Ray Computer Tomography

⁷ Pine Tree

⁸ Kling & Czigany

⁹ Scanning Electron Microscope

¹⁰ Eftekhari

¹¹ Rahimpour

¹² Triethylenetetramine (TETA)

¹³ Ghanbari

¹ Trask

² Autoclave Process

³ Tomizuka

⁴ Kousourakis & Mouritz

⁵ McCombe

کشتی نمونه‌های FML حاوی عامل ترمیم را بررسی کردند. در این حالت، بیش‌ترین بازده ترمیم برای نمونه 8 درصد حجمی الیاف شیشه توخالی حاوی عامل ترمیم پس از گذشت 3 روز از ایجاد آسیب اولیه گزارش شد که 58.3 درصد بود.

خلیلی⁵ و همکاران [48]، رفتار خمشی FML تحت سیکل‌های گرمایشی را بررسی کردند. از آلومینیوم به عنوان فلز و از الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده و از رزین اپوکسی به عنوان زمینه و همچنین عامل ترمیم کامپوزیت استفاده شد. سیکل گرمایشی در محدوده دمایی °C 25-70 و تعداد سیکل‌های اعمال شده، 1، 3 و 5 سیکل بود. نتایج تحقیق بیانگر آن بود که بازده ترمیم 74 درصدی با گذشت 7 روز در حالت بدون سیکل به دست آمد، در حالی که با اعمال 5 سیکل گرمایشی، این بازده با گذشت تنها 1 روز حاصل شد.

میرزاپور⁶ و همکارش [49]، رفتار دینامیکی پل ساندویچی حاوی عامل ترمیم اپوکسی درون الیاف شیشه توخالی را بررسی کردند. پوسته پل ساندویچی بررسی شده، کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن و هسته آن فوم پلی‌وینیل کلراید⁷ (PVC) بود. نوع رفتار دینامیکی، ضربه چارپی بود. همچنین در این تحقیق سیستم تخریب براساس آزمون خمش سه نقطه‌ای انجام شد. در این کار تحقیقاتی، بهترین نتیجه برای نمونه حاوی 6 جفت الیاف شیشه توخالی و مدت زمان 7 روز پس از تخریب با بازده 91.5 درصد گزارش شد. در تحقیقی دیگر، فعلی⁸ و همکاران [50]، رفتار ترمیم در پل ساندویچی اپوکسی-الیاف شیشه/ PVC حاوی الیاف شیشه توخالی پر شده با عامل ترمیم اپوکسی و سخت کننده آن را بررسی کردند. نتایج این کار تحقیقاتی، بازده‌های ترمیم بیش از 100 درصد را نشان داد.

آقامیرزاده⁹ و همکاران [51]، تاثیر هم‌زمان الیاف شیشه توخالی خرد شده (پر شده با عامل ترمیم اپوکسی و سخت کننده آن) و سیم آلیاژ حافظه-دار را در کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه تحت آزمون ضربه چارپی مورد بررسی قرار دادند. الیاف شیشه توخالی حاوی عامل ترمیم به صورت تصادفی و با درصد وزنی 8 درصد در لایه‌های 1، 2، 5 و 6 توزیع شدند. سپس سیم آلیاژ حافظه‌دار در داخل سازه قرار داده شد و تاثیر پیش-کرنش‌های 0، 2 و 4 درصد، بررسی و با نمونه بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بازیابی خواص ضربه در نمونه بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار و سیم با 0، 2 و 4 درصد پیش کرنش، به ترتیب، 35، 49، 55 و 34 درصد بود. در این تحقیق بدین گونه تحلیل شد که حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار باعث بسته تر شدن دهانه ترک و بهبود عملکرد ترمیم می‌شود. در تحقیقی دیگر، قنبری و همکاران [52]، کامپوزیت خودترمیم‌شونده-ای مشابه آقامیرزاده و همکاران [51] ساختند و رفتار ترمیم آن را تحت بارگذاری خمشی بررسی کردند. تنها تفاوت این کامپوزیت، قرار دادن تسمه آلیاژ حافظه‌دار به جای سیم آلیاژ حافظه‌دار به منظور افزایش چسبندگی و بهبود خواص مکانیکی آن بود. همچنین میزان 4 درصد پیش‌کرنش برای افزایش تاثیر بهبود خواص خمشی توسط تسمه آلیاژ حافظه‌دار در سازه خودترمیم‌شونده اعمال شد. نتایج به دست آمده نشان داد که نمونه بدون تسمه آلیاژ حافظه‌دار، 43 درصد استحکام خمشی را پس از گذشت 7 روز از زمان ترمیم بازیابی کرده است. افزودن 3 تسمه آلیاژ حافظه‌دار باعث شد که

زمینه بود. به منظور بررسی رفتار ترمیم از آزمون خمش استفاده شد. نتایج نشان داد که بازده ترمیم برای نمونه حاوی 8 درصد عامل ترمیم ذخیره شده در الیاف شیشه توخالی خرد شده پس از گذشت 7 روز، 65.8 درصد است.

اسلامی فارسانی¹ و همکاران [43] رفتار خمشی سازه‌های کامپوزیتی خودترمیم‌شونده الیاف کربن-اپوکسی را بررسی کردند. نوع سیستم ترمیم، الیاف شیشه توخالی پر شده با رزین اپوکسی و سخت کننده انیدریدی² (با کسرهای حجمی 2، 4 و 6 درصد) بود. همچنین تاثیر زمان‌های ترمیم 0، 5 و 8 روز در این کار پژوهشی مورد بررسی قرار گرفت. ایجاد آسیب اولیه در سازه نیز توسط آزمون خمش با نرخ بارگذاری 2 mm/min و میزان جابجایی 5 mm انجام شد. در این تحقیق، حداکثر بازده ترمیم در بارگذاری عرضی برای نمونه حاوی 4 درصد حجمی الیاف توخالی حاوی عامل ترمیم پس از گذشت 8 روز و به میزان 84 درصد به دست آمد.

ساری³ و همکاران [44] در تحقیقی مشابه، رفتار کششی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن حاوی سیستم ترمیم الیاف شیشه توخالی را بررسی کردند. کسر حجمی الیاف توخالی شیشه در این تحقیق، 0.75، 1.65 و 2.5 درصد حجمی در نظر گرفته شد. در این تحقیق، علاوه بر عامل ترمیم رزین اپوکسی و سخت کننده انیدریدی، از کاتالیزور به منظور افزایش سرعت ترمیم رزین اپوکسی استفاده شد. بیش‌ترین بازیابی خواص در بارگذاری کششی، برای نمونه 1.65 درصد حجمی پس از گذشت 8 روز گزارش شد که مقدار آن 89 درصد بود.

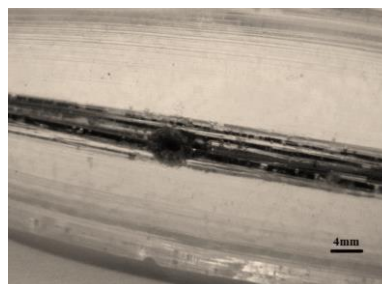


Fig. 15 Destructing the hollow glass fibers and diffusing the healing agent into damage area in the hollow glass fibers- epoxy composite [40]
شکل 15 تخریب الیاف شیشه توخالی و نفوذ عامل ترمیم در ناحیه تخریب در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه توخالی [40]

عباس‌نیا⁴ و همکاران [46،45]، رفتار ترمیمی در FML حاوی عامل ترمیم رزین اپوکسی و سخت کننده آن با درصد‌های حجمی متفاوت (5، 8 و 11 درصد) را که در الیاف شیشه توخالی قرار داده شده بودند، بررسی کردند. در این تحقیق همچنین از آلومینیوم 2024 به عنوان پوسته و کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه به عنوان هسته سازه استفاده شد. الیاف شیشه توخالی حاوی عامل ترمیم به صورت خرد شده در قسمت هسته سازه قرار داده شد و تاثیر آن بر بازده ترمیم استحکام خمشی پس از گذشت زمان‌های مختلف (3 و 5 روز) و بعد از آسیب اولیه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار بازیابی استحکام خمشی به میزان 89 درصد برای نمونه حاوی 8 درصد حجمی عامل ترمیمی با گذشت مدت زمان 5 روز پس از ایجاد آسیب است. اسلامی و همکاران [47]، در تحقیقی مشابه با مواد مذکور، رفتار

⁵ Khalili

⁶ Mirzapour

⁷ Poly vinyl chloride (PVC)

⁸ Feli

⁹ Aghamirzadeh

¹ Eslami-Farsani

² Anhydride

³ Sari

⁴ Abbasnia

بررسی قرار گرفت که به صورت تعداد سیکل‌های ترمیمی معرفی شده است. نمونه‌های آماده شده تحت آزمون کشش دو سر شکاف^۷ قرار گرفتند و با پیشروی ترک و شکست میکروکانال‌ها عامل ترمیمی به درون محل آسیب جریان پیدا کردند که این امر با استفاده از رنگ‌های فلئورسنت به خوبی در شکل 18 نشان داده شده است. در پژوهش صورت گرفته، ارزیابی رفتار ترمیمی برحسب چقرمگی شکست نمونه پس از ترمیم در نظر گرفته شد، به گونه‌ای که در اولین سیکل ترمیم، متوسط بازده ترمیم، 86% و حداکثر مقدار آن نیز 120% بود. در این پژوهش، ویسکوزیته و ترکندگی سطحی از پارامترهای مهمی بودند که بر روی بسته شدن تدریجی میکروکانال‌ها بررسی شدند که نتیجه آن در عدم پوشش کامل سطح توسط عامل ترمیمی گزارش شد.

در پژوهشی که توسط امسولا^[56] روی کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه انجام پذیرفت، رفتار خودترمیمی این کامپوزیت تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بررسی شد. در این پژوهش، شبکه میکروآوندی با قطر 400 میکرون بر مبنای جلوگیری از کاهش حجم موثر کامپوزیت و افزایش تاثیر تقویت‌کنندگی الیاف طراحی شد. به منظور ایجاد آسیب و ارزیابی بازده ترمیم، آسیب اولیه‌ای به صورت شیار بر روی نمونه‌ها ایجاد شد و نمونه‌ها تحت آزمون خمش سه نقطه قرار گرفتند. با رسیدن به کاهش 30% در منحنی بار-جابجایی، آزمون متوقف شد و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شدند تا ترمیم توسط عامل پلی‌استر و کاتالیزور آن به عنوان عامل ترمیم انجام شود. نتایج حاصل از ترمیم، بیانگر بازایی 84% در مقاومت خمشی بود.

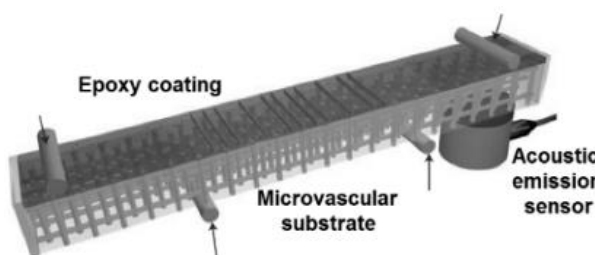


Fig. 16 schematic of designed 3D microvascular healing system by Toohey et al. [53]

شکل 16 تصویری شماتیک از سیستم شبکه میکروآوندی سه بعدی طراحی شده توسط توهی و همکارانش [53]

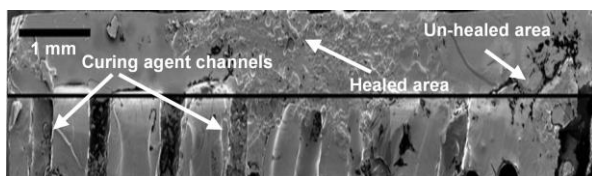


Fig. 17 SEM micrograph from internal surface of healed and unhealed areas [54]

شکل 17 تصویر SEM از سطح درونی ترک به همراه مناطق ترمیم‌شده و ترمیم نیافته [54]

بازایی استحکام خمشی تا 78 درصد افزایش یابد. این بهبود بازده ترمیم، ناشی از تاثیر تسمه آلیاژ حافظه‌دار در بستن نوک ترک و جلوگیری از روند رشد آن تحلیل شده است. همچنین بیان شد که بستن نوک ترک توسط تسمه آلیاژ حافظه‌دار باعث شده تا نیاز به ماده ترمیم‌شونده برای ترمیم ترک کاهش یابد.

5-2- سیر تکاملی روش ترمیم شبکه میکروآوندی

توهی^[53] و همکارانش در سال 2007 اولین سیستم میکروآوندی را طراحی کردند. در این سیستم از دی‌سایکلوپنتادین^۳ به عنوان عامل ترمیمی و از گراب^۴ به عنوان کاتالیزور استفاده کردند. سیستم از اعمال یک پوشش 700 میکرونی کاتالیزوری بر روی زیرلایه میکروآوندی تشکیل شده بود که کانال‌های 200 میکرونی آن با عامل ترمیمی پر و آب‌بندی شدند. شکل 16، سیستم طراحی شده توسط این محققان شامل اپوکسی- شبکه میکروآوندی (60% ژله پتروشیمی^۵ - 40% موم میکروکریستالی^۶) را نشان می‌دهد. آن‌ها دریافتند که با افزایش مقدار کاتالیزور مصرفی، امکان دستیابی به تعداد سیکل ترمیمی بیشتر وجود دارد، به گونه‌ای که برای نمونه حاوی 10% کاتالیزور به 7 سیکل ترمیم دست یافتند. ولی این افزایش در مقدار کاتالیزور تاثیر چندانی بر روی بازده ترمیمی یک نمونه طی سیکل‌های متعدد ندارد. از طرفی آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد کاتالیزور، کسر بیش‌تری از محل آسیب توسط عامل ترمیمی پوشانده شده و بعد از تکرار سیکل‌های ترمیم، لبه‌های ترک به طور کامل پوشانده می‌شوند. از طرفی هر چه ذرات کاتالیزور درشت‌تر باشند، پوشاندگی سطحی محل آسیب بیش‌تر خواهد بود. حداکثر کارایی ترمیمی این سیستم در حدود 70% گزارش شده است.

در ادامه پژوهش قبلی، توهی و همکاران [54]، آزمون‌های خودترمیمی مبتنی بر شبکه میکروآوندی را انجام دادند. اساس طراحی شبکه میکروآوندی مورد استفاده در این پژوهش افزایش احتمال دسترسی عامل ترمیمی به محل آسیب در مقایسه با پژوهش قبلی بود، به گونه‌ای که عامل ترمیمی درون شبکه میکروآوندی و عامل کاتالیزور به طور مستقیم درون زمینه کامپوزیت توزیع شدند. در پژوهش مذکور، میزان بازدهی ترمیم توسط دو عامل ترمیم متفاوت بررسی شد که اولی رزین اپوکسی Epon 813 و سخت‌کننده Ancamide 503 و دومی رزین اپوکسی Epon 8132 به همراه سخت‌کننده Epicure 3046 بودند. شکل 17، نحوه ترمیم ترک توسط این روش را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که برخی نواحی ترک هنوز ترمیم نشده‌اند. با بررسی دقیق پژوهش انجام شده، مشخص شد که تاثیر عواملی هم‌چون تامین و حضور پیوسته هر دو جز ترمیمی، آمیزش نامناسب اجزای ترکیبی در محل ترک ناشی از تجمع مواد ترمیمی بر روی کانال‌ها، کشش سطحی نامناسب مواد ترمیمی و توزیع غیراستوکیومتری اجزای ترمیم بر روی میزان بازده ترمیم و به تبع آن میزان پوشاندگی محل آسیب به خوبی مطالعه نشده است.

در پژوهشی که توسط همیلتون^[55] و همکارانش انجام شد، نمونه ترمیمی رزین اپوکسی حاوی کانال‌هایی با قطر 200 میکرونی مورد آزمایش قرار گرفتند. این کانال‌ها به طور جداگانه با رزین اپوکسی و عامل پخت تغذیه شدند. در این کار پژوهشی، قابلیت ترمیم چندباره سیستم طراحی شده مورد

³ Toohey

⁴ Dicyclopentadiene

⁵ Grubbs

⁶ Petroleum jelly (Vaseline)

⁷ Microcrystalline wax

⁸ Hamilton

⁹ Double Cleavage Drilled Compression (DCDC)

¹ Omosola

است. از طرفی با افزایش قطر کانال، نیروی لازم برای خارج شدن ماده ترمیمی و نفوذ آن به محل آسیب تامین شد.

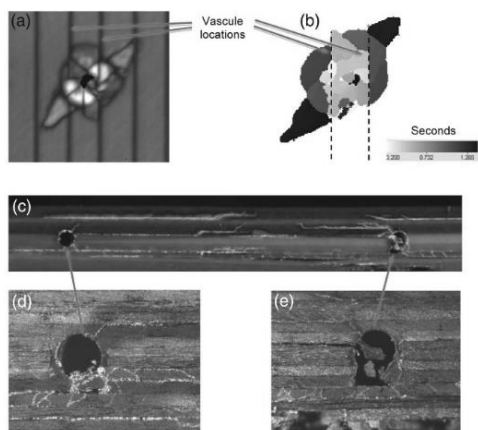


Fig. 19 Impact damage characterization, a) ultrasonic scan image of the vascular network and damage profile, b) ultrasonic scan image of the damage site, c) optical microscopy under UV illumination illustrating the infusion paths through the damage site, d and e) optical microscopy at higher magnification illustrating the impact damage-vascular interaction [59]

شکل 19 مشخصه‌یابی آسیب ضربه، (a) تصویر التراسونیک شبکه آوندی و پروفیل آسیب، (b) تصویر التراسونیک ناحیه آسیب، (c) تصویر نوری تحت نور ماوراء بنفش نشان‌دهنده مسیرهای نفوذ در ناحیه آسیب، (d و e) تصویر نوری با بزرگنمایی بیشتر نشان‌دهنده اندرکنش آسیب-آوند [59]

افزایش قطر کانال تاثیر به‌سزایی در ترمیم هرچه بیشتر مناطق آسیب دیده داشت، به گونه‌ای که با ترمیم نواحی حاوی تورق ناشی از ضربه، نوع شکست ماده را از حالات فروپاشی⁵ و بشکته‌ای شدن⁶ در آزمون فشار پس از ضربه به نوعی به جاروب نهایی⁷ انتقال داد. در بررسی موقعیت شبکه کامپوزیت مشخص شد، نمونه‌هایی که شبکه میکروآوندی آن‌ها در مرکز قرار گرفته‌اند، رفتار ترمیمی بهتری را از خود نشان دادند. زیرا با قرارگیری در مرکز، احتمال رسیدن آسیب به محل شبکه بیشتر شده و بازده ترمیمی افزایش می‌یابد. میانگین بازده ترمیمی بدست آمده در این تحقیق بیش از 96% گزارش شد که بیانگر سیالیت موثر عامل ترمیمی به منظور رسیدن و نفوذ به محل آسیب و اتصال مناسب آسیب و شبکه میکروآوندی است [58]. در تحقیق دیگری از همین گروه تحقیقاتی [60]، رهاسازی مستقل عامل ترمیمی بوسیله سه روش مختلف صورت پذیرفت. از کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن و عامل ترمیمی RT151 (اپوکسی با ویسکوزیته بسیار کم) استفاده شد و شبکه آوندی نیز بوسیله بیرون کشیدن سیم فلزی با قطر 500 میکرون ایجاد شد. به منظور ایجاد آسیب و بررسی رفتار ترمیم در این پژوهش از آزمون فشار پس از ضربه استفاده شد. هدف این تحقیق بررسی هم‌زمان روند ترمیم و ایجاد آسیب در نمونه بود. بدین منظور از دو روش مجزا استفاده شد. در روش اول، عامل ترمیم داخل آوندها تزریق شد و فشار ورودی و خروجی آوند توسط دستگاه اندازه‌گیری شد. کاهش فشار خروجی نشان‌دهنده شکسته شدن آوند و تزریق عامل ترمیم به محل ترک بود. با استفاده از کاهش فشار و عامل ترمیم حاوی رنگ اپوکسی، محل و اندازه آسیب در سازه مشخص شد. در روش دوم، عامل ترمیم به صورت پیوسته در

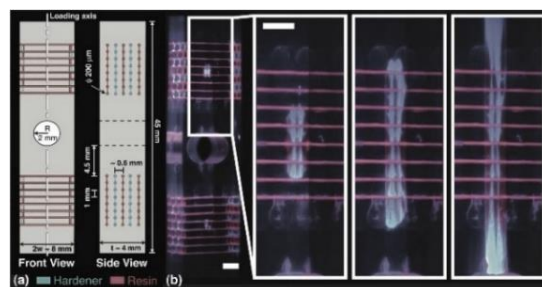


Fig. 18 Microvascular system, a) sample geometry, b) released healing agent containing fluorescent dye [55]

شکل 18 سیستم میکروآوندی، (a) هندسه نمونه، (b) عامل ترمیم آزاد شده حاوی رنگ فلوئورسنت [55]

یکی از اهداف این پژوهش، بررسی تاثیر کاهش ویسکوزیته عامل ترمیمی بود که این امر موجب افزایش نفوذ عامل ترمیمی به محل آسیب و در مقابل کاهش در استحکام پیوندها شد. از طرفی شکستن الیاف شیشه حین بارگذاری یک امر اجتناب‌ناپذیر بود که موجب کاهش در بازده ترمیم (به دلیل عدم اتصال کامل بعد از فرآیند ترمیم) شد.

در تحقیقی که بوسیله کپ¹ [57] انجام شد، مطالعه بر روی تاثیر مقدار حلال و کاتالیزور در دماهای مختلف صورت گرفت. در این پژوهش از رزین اپوکسی و حلال اتیل‌فنیل‌استات² به همراه الیاف شیشه به عنوان مواد تشکیل‌دهنده کامپوزیت استفاده شد. کاتالیزورهای فلزی مختلفی نیز برای بررسی مورد آزمایش قرار گرفتند. شبکه میکروآوندی مورد استفاده در این پژوهش دارای قطر 500 میکرون بود که در جهت الیاف درون کامپوزیت ایجاد شدند. آزمون صورت گرفته در این تحقیق، آزمون کشش دو سر شکاف بود که برای تمام نمونه‌ها اعمال شد. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر آن بود که با فرض ثابت بودن مقدار کاتالیزور و با افزایش مقدار حلال، دمای شروع پخت کاهش یافته است. ولی افزایش بیش از حد آن، این اثر را کم رنگ‌تر کرده است، زیرا موجب افزایش تحرک و کاهش تماس نواحی فعال شده‌اند. از طرفی، زمانی که مقدار حلال ثابت بود، با افزایش مقدار کاتالیزور تا یک حد معین، دمای شروع پخت کامپوزیت، کاهش یافته و با افزایش آن تا مقادیر بیشتر، این دما افزایش یافت. همچنین بازده ترمیم نیز با افزایش مقدار کاتالیزور با بهبود همراه بود.

در تحقیقی که بوسیله نوریس³، تراسک و همکاران [59,58] صورت گرفت، رفتار خودترمیمی کامپوزیت اپوکسی- شبکه آوندی الیاف شیشه توخالی حاوی عامل ترمیم (رزین اپوکسی به همراه حلال اتیل‌فنیل‌استات) تحت آزمون فشار پس از ضربه⁴ (CAI) بررسی شد. شکل 19 محل قرارگیری شبکه آوندی، نحوه ایجاد آسیب توسط ضربه و نفوذ عامل ترمیم به محل آسیب را نشان می‌دهد. اهداف مورد نظر در این آزمایش بررسی تاثیر قطر شبکه و مکان قرارگیری آن در کامپوزیت بود، به گونه‌ای که از دو قطر 250 و 500 میکرون برای شبکه میکروآوندی بین الیاف و به صورت آشیانه‌ای در جهت قرارگیری الیاف استفاده شد. از طرفی موقعیت قرارگیری شبکه در دو حالت متقارن و نامتقارن بود. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر آن بود که با افزایش قطر شبکه میکروآوندی، به دلیل افزایش سطح تماس شبکه با الیاف و افزایش احتمال رسیدن آسیب به کانال‌ها، میزان بازده ترمیمی افزایش یافته

² Coope

³ Ethyl phenylacetate

⁴ Norris

⁵ Compression After Impact

¹ Collapse

² Buckling

³ End brooming

نانو [68]، و ساخت شبکه میکروآوندی با استفاده از روش الکتروریسی [70.69] می‌باشند. همچنین انتخاب نوع ماده ترمیم در شبکه میکروآوندی (نظیر اپوکسی، سخت‌کننده تتا و پلی‌پروپیلن‌گلاکول دی‌گلیسیدیل‌اتر⁵) به صورت کامل توسط کوویلیر⁶ [71] بررسی شده است. کارهای خلافتانه معرفی شده هنوز جای کار بسیاری به منظور استفاده در شبکه میکروآوندی و توسعه آن در سازه کامپوزیتی دارند. لذا در سال‌های آتی با توسعه این ایده‌ها و نوآوری‌ها، پیشرفت بسیاری در زمینه شبکه میکروآوندی حاصل خواهد شد.



Fig. 20 Specimens of self-healable glass fibers- epoxy composite containing 3D microvascular network [64]

شکل 20 نمونه‌های کامپوزیت خودترمیم‌شونده اپوکسی-الیاف شیشه حاوی شبکه سه‌بعدی میکروآوندی [64]

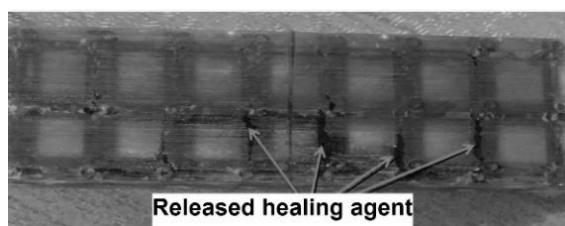


Fig. 21 Filling the cracks with the releasing the healing agent from 3D microvascular network into the glass fibers- epoxy composite [64]

شکل 21 پر شدن ترک با آزاد شدن عامل ترمیم از شبکه میکروآوندی سه‌بعدی در کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه [64]

5-3- سیر تکاملی روش ترمیم ریزکپسول

در روش ترمیم به وسیله کپسول‌ها، عوامل مایع واکنش‌گر مانند مونومرها، رنگدانه‌ها، کاتالیزورها و سخت‌کننده‌ها به روش‌های پلیمره شدن درج⁷، پلیمره شدن بین‌سطحی⁸ و تبخیر حلالی⁹ در داخل پوششی پلیمری قرار داده می‌شوند. سپس این میکروکپسول‌ها در پلیمر یا کامپوزیت زمینه پلیمری به منظور ایجاد خاصیت خودترمیم در آن‌ها توزیع می‌شوند. در زمان بروز ترک، این کپسول‌ها گسیخته شده و عوامل واکنش‌پذیر (ترمیم) به وسیله نیروهای موثرین به درون ترک‌ها نفوذ می‌کنند و در حضور کاتالیزورهای از پیش پراکنده شده، واکنش پلیمره شدن به منظور ترمیم صورت می‌گیرد. گسترش ترک‌ها نیروی محرکه اصلی برای این فرآیند است. به منظور ایجاد خاصیت خودترمیم‌شوندگی، میکروکپسول‌های سنتز شده باید از شرایط برخورددار باشند:

داخل میکروآوندها در جریان بودند و میزان آسیب و روند ترمیم توسط روش اسکن التراسونیک¹ شناسایی شدند.

بعد از ایجاد آسیب و به منظور ارزیابی بازده ترمیم، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در دمای محیط قرار داده شدند. نتایج نشان داد که در روش اول، میانگین بازده ترمیم، 94% و در روش دوم، 100% بود. دلیل بالاتر بودن نتیجه روش دوم، در تاثیرگذاری گردش مدام عامل ترمیم بر روی شکل‌گیری آسیب و نفوذ بهتر عامل ترمیم گزارش شده است. در روش اول، برخلاف روش دوم، تمام نواحی موجود در تورق‌های ایجاد شده، ترمیم نشده‌اند. از طرفی با توجه به بررسی‌های عددی صورت گرفته، ترمیم 30% از مناطق آسیب برای رسیدن به بازده 90% کافی بوده است.

محمدی² و همکاران [62.61]، تاثیر زمان ترمیم بر رفتار ترمیم کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه تحت بارگذاری‌های کششی و خمشی با استفاده از روش ترمیم میکروکانال را بررسی کردند. سیستم ترمیم شبکه میکروآوندی شامل ایجاد 280 کانال برای تزریق عامل ترمیم (اپوکسی و سخت‌کننده) از طریق تعبیه الیاف پلیمری در هنگام ساخت در سازه کامپوزیت و سپس بیرون کشیدن آن بود. آسیب اولیه نیز در نمونه‌ها توسط سیستمی مشابه آزمون خمش ایجاد شد و پس از قرارگیری نمونه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف (4، 7 و 11 روز) به منظور ترمیم، خواص خمشی و کششی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار بازیابی استحکام خمشی و کششی، به ترتیب، به میزان 59.07 درصد و 68.05 درصد برای نمونه حاوی 4 درصد حجمی ماده ترمیمی با گذشت 7 روز پس از ایجاد آسیب اولیه حاصل شد.

در تحقیقی مشابه، باب‌الحوائجی³ و همکاران [63]، رفتار مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی حاوی میکروکانال‌های پر شده با عامل ترمیمی اپوکسی و سخت‌کننده انیدریدی را تحت بارگذاری عرضی بررسی کردند. بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده، 4، 8 و 11 روز بود. در این کار پژوهشی، بازیابی 46 درصدی خواص خمشی برای نمونه حاوی 3.2 درصد حجمی عامل ترمیم پس از گذشت 8 روز مشاهده شد.

اسلامی و همکاران [64]، با استفاده از فناوری چاپگر سه‌بعدی، شبکه میکروآوندی سه‌بعدی از پلی لاکتیک اسید⁴ (PLA) ساختند. سپس عامل ترمیم (همان رزین اپوکسی و سخت‌کننده پلی‌آمین زمینه کامپوزیت)، به داخل شبکه تزریق شد و پس از ساخت سازه کامپوزیتی خودترمیم، رفتار ترمیمی آن تحت آزمون‌های کششی و خزش مورد بررسی قرار گرفت. شکل-های 20 و 21، به ترتیب، سازه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه حاوی شبکه میکروآوندی سه‌بعدی و نحوه پر شدن ترک با آزاد شدن عامل ترمیم در سازه پس از تخریب اولیه را نشان می‌دهند. نتایج بدست آمده، دستیابی به بازده ترمیم 83% برای آزمون کشش و 89% برای آزمون خزش را نشان داد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شبکه میکروآوندی به دلیل دستیابی به ترمیم چندگانه بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. ایده-های نوآورانه و کارهای تحقیقاتی جدید بسیاری در زمینه شبکه میکروآوندی ارائه شده که باعث رشد، بهینه‌سازی و ساخت انواع جدید شبکه شده است که مهم‌ترین آن‌ها شامل غشاءهای خودترمیم شونده میکروآوندی [65]، شبکه میکروآوندی ساخته شده با الیاف توخالی پلی‌استر [66]، ساخت شبکه سه‌بعدی با استفاده از پلی وینیل الکل [67]، شبکه میکروآوندی در مقیاس

⁵ poly(propylene glycol) diglycidyl ether (PPGDE)

⁶ Cuvelier

⁷ In situ polymerization

⁸ Interfacial polymerization

⁹ Solvent evaporation

¹ Ultrasonic C-scanning

² Mohammadi

³ Babolhavaeji

⁴ Polylactic acid (PLA)

- 1- از استحکام کافی برخوردار باشند تا در طول مراحل تولید زمینه پلیمری دچار آسیب نشوند.
- 2- در زمان ایجاد ترک در قطعه به راحتی بشکنند.
- 3- قادر به آزاد کردن عامل ترمیم یا کاتالیزور به داخل ترک باشند.
- 4- کمترین تاثیر مخرب را بر خواص رزین پلیمری خالص یا کامپوزیت تقویت شده داشته باشند [10].

تلاش‌های اولیه در زمینه سیستم خودترمیم مبتنی بر میکروکپسول‌ها، توسط وایت¹ و همکاران [9] در سال 2001 در کامپوزیت اپوکسی- میکروکپسول/ کاتالیزور گراز گزارش شد. آن‌ها بیان کردند که این سیستم دارای مزایایی همچون طول عمر بالای پوسته کپسول، لزجت پایین مونومر، تکمیل پلیمریزاسیون در شرایط محیطی تنها در چند دقیقه و تشکیل ماده پلیمری سفت در ترک‌ها هستند.

براون و همکاران [72] در سال 2002 نشان دادند که میکروکپسول‌هایی با ضخامت پوسته 160-220 nm برای استفاده در سیستم‌های خودترمیم مناسب هستند، چرا که در عین داشتن استحکام کافی برای سالم ماندن در طول فرآیند تولید پلیمر، در زمان ایجاد میکروترک‌ها در کامپوزیت اپوکسی- میکروکپسول (حاوی عامل ترمیم دی‌سایکلوپنتادین و کاتالیزور گراز) به راحتی شکسته شده و عامل ترمیم را آزاد می‌کنند. مشاهده شد که در طول مراحل تولید میکروکپسول‌ها، نانوذرات اوره- فرمالدئید بر روی سطح میکروکپسول ته‌نشین شده و یک سطح زبر ایجاد کرده است. از آنجایی که افزایش زبری سطح میکروکپسول‌ها می‌تواند باعث افزایش چسبندگی مکانیکی آن‌ها به زمینه پلیمری شود، لذا می‌توان با افزایش سطح تماس آب و هسته دی‌سایکلوپنتادین از ته‌نشینی نانوذرات اوره- فرمالدئید بر روی سطح میکروکپسول‌ها جلوگیری کرد. آنالیز عنصری بر روی میکروکپسول‌ها بلافاصله بعد از تولید و خشک شدن نشان داد که میکروکپسول‌ها حاوی 83-92 درصد وزنی دی‌سایکلوپنتادین و 12-6 درصد وزنی اوره- فرمالدئید بودند. مشخص شد که بعد از گذشت سی روز در شرایط محیطی، مقدار دی-سایکلوپنتادین در میکروکپسول‌ها تا 2.3% وزنی کاهش یافت. دلیل آن احتمالاً نشت دی‌سایکلوپنتادین از دیواره میکروکپسول‌ها بوده است.

شایان ذکر است که کاتالیزور گراز، پودری ریز و بنفش رنگ با میل به آگلومراسیون² می‌باشد. توزیع مناسب کاتالیزور در زمینه پلیمری به عامل‌هایی مثل میزان اختلاط، نوع رزین زمینه، نوع عامل ترمیم، اندازه ذرات کاتالیزور و مقدار کاتالیزور بستگی دارد. از دیدگاه عملی، به یک مطالعه سیستماتیک دیگر برای فهم سرعت و دامنه کاهش محتویات میکروکپسول‌ها در شرایط عملیاتی نمونه خودترمیم نیاز است. این مطالعه پیشنهادی می‌تواند شامل بررسی پارامترهایی مثل ضخامت دیواره یا جنس دیواره میکروکپسول باشد [72].

در سال 2002، کسلر³ [73]، برای اولین بار به ارزیابی پایداری گرمایی کامپوزیت اپوکسی- میکروکپسول دی‌سایکلوپنتادین/گراز پرداخت. نتایج به دست آمده با استفاده از روش گرماسنجی تفاضلی⁴ (DSC) نشان داد که تجزیه گرمایی کاتالیزور گراز در دماهای بالای 120 °C رخ می‌دهد. در ادامه این تحقیقات، کسلر و همکاران [74]، میکروکپسول حاوی به ترتیب 20 و 5 درصد وزنی عامل ترمیم دی‌سایکلوپنتادین و کاتالیزور گراز را به کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن اضافه کردند. میکروکپسول‌های پر شده از دی-

سایکلوپنتادین با قطر میانگین 50-460 μm و ضخامت دیواره 240 nm بودند. این محققان بیان کردند که سیستم ترمیم دی‌سایکلوپنتادین- گراز در دمای محیط امکان بازیابی خواص اولیه تا 45 درصد را دارد. با اعمال حرارت در محدوده دمایی 80 °C، میزان بازیابی خواص مکانیکی بیش از 80 درصد گزارش شد. همچنین بیان شد افزودن 5 درصد وزنی کاتالیزور گراز منجر به ایجاد ساختار آگلومره شده و در نتیجه باعث کاهش خواص شده است. در سال 2002، سیرام⁵ [75]، امکان استفاده از کاتالیزورهای فعال‌شونده با نور (نظیر دی‌کلرو پی‌سایمن روتونیوم (II) دی‌مر⁶ و تری‌سایکلو هگزیل فسفین⁷) را به جای کاتالیزورهای مرسوم گزارش کرد. سیستم‌های خودترمیم فعال‌شونده با نور به دلیل سرعت واکنش بالا، سادگی و دوست‌دار محیط زیست بودن دارای جذابیت‌های ذاتی هستند.

در سال 2003، براون و همکاران [76]، به صورت سیستماتیک به بررسی پارامترهای مختلف تولید میکروکپسول‌ها نظیر سرعت هم‌زدن، دما و pH بر قطر، ضخامت دیواره، مورفولوژی سطح و محتویات آن‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که میکروکپسول‌هایی با قطر میانگین 10-1000 μm با تغییر سرعت هم‌زدن در محدوده 200-2000 rpm قابل تولید است و قطر متوسط آن‌ها با افزایش سرعت هم‌زدن کاهش می‌یابد. شکل 22، میکروکپسول‌های اوره- فرمالدئید سنتز شده با سرعت هم‌زدن 550 rpm را نشان می‌دهد که اندازه آن‌ها به صورت میانگین 200 μm می‌باشد. بررسی‌های انجام شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مشخص کرد که ضخامت دیواره کپسول‌ها تقریباً مستقل از پارامترهای تولید بوده و بین 160-220 nm متغیر است (شکل 23).

در سال 2004، اسکپور⁸ و همکاران [77]، تغییراتی در سیستم‌های سنتی خودترمیمی مبتنی بر میکروکپسول‌ها ارائه کردند. در این روش جدید، مولکول‌های کاتالیزور به سطح خارجی میکروکپسول‌های حاوی عامل ترمیم چسبانده شدند. ادعا شد که در این روش به دلیل نزدیکی کاتالیزورها به عامل ترمیم، بازده خودترمیمی افزایش یافته است. براون و همکاران در سال 2005 [78]، روش دیگری پیشنهاد کردند که نیاز به کاتالیزور را با ایجاد پیوند بین عامل ترمیم و سطح آسیب‌دیده کاهش می‌داد. داده‌های آزمایشگاهی محدودی از هر دو روش گزارش شد و کارایی سیستم ترمیم نیز منتشر نشده است.

در سال 2004، لی⁹ و همکاران [79]، تلاش‌هایی برای افزایش کارایی سیستم‌های خودترمیم با تعویض دی‌سایکلوپنتادین با 5-اتیلن-2-نوربورن¹⁰ انجام دادند. تلاش‌هایی نیز توسط همین گروه تحقیقاتی برای تعویض دی-سایکلوپنتادین با مخلوطی از دی‌سایکلوپنتادین و 5-اتیلن-2-نوربورن انجام شد [80]. کپسوله‌کردن 5-اتیلن-2-نوربورن نیز با پلیمریزاسیون درجای اوره- فرمالدئید حاصل شد. بیان شده است که این سیستم جدید، برخی از محدودیت‌های سیستم دی‌سایکلوپنتادین نظیر نقطه ذوب پایین و نیاز به مقادیر زیاد کاتالیزور را از بین برده است. در تحقیقات دیگری نیز اثبات شد که دی‌سایکلوپنتادین قادر به تشکیل ساختار شبکه‌ای با استحکام و چقرمگی بالا است [82،81]، درحالی‌که پلیمرهای 5-اتیلن-2-نوربورن به دلیل ساختار زنجیره‌ای خطی خواص مکانیکی ضعیف‌تری دارند. با این وجود، سیستم 5-اتیلن-2-نوربورن مزایایی نظیر نیاز به مقادیر کمتر کاتالیزور، نداشتن نقطه

⁵ Sriram

⁶ Dichloro(p-cymene)ruthenium(II) dimer

⁷ Tricyclohexylphosphine

⁸ Skipor

⁹ Lee

¹⁰ 5-Ethylidene-2-norbornene (ENB)

¹ White

² Agglomeration

³ Kessler

⁴ Differential Scanning Calorimetry

موجود (برای نمونه دی‌اتیلن‌تری‌آمین⁴) در زمینه اپوکسی بیشتر است [87,86]. بنابراین کلید دست‌یابی به بازدهی بهینه در این نوع سیستم‌ها، تعادل تأثیرات متقابل کریستال‌های کوچک و بزرگ می‌باشد. در سال 2006، چو⁵ و همکاران [88]، به مطالعه و توسعه یک سیستم خودترمیم کاملاً متفاوت پرداختند. در این سیستم از دی‌ان‌بوتیل‌تین‌دی-لورات⁶ به عنوان کاتالیزور و از مخلوط پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان⁷ و پلی-دی‌اتوکسی‌سیلوکسان⁸ به عنوان عامل ترمیم استفاده شد. تحقیقات پیشین نشان داد که چگالش چندگانه⁹ پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و پلی‌دی‌اتوکسی-سیلوکسان در دمای اتاق و در حضور کاتالیزور آلی قلع¹⁰ به سرعت انجام می‌شود [90,89]. این محققان همچنین بیان کردند که سیستم مذکور از مزایای مهمی نسبت به سیستم دی‌سایکلوپنتادین-گراز به شرح زیر برخوردار است:

- 1- فرآیند ترمیم در هوای خشک یا مرطوب پایدار است.
 - 2- فرآیند ترمیم حتی در دماهای بالا (بیشتر از 120 °C) نیز پایدار است که استفاده از این سیستم در پلیمرهای ترموست دما بالا را ممکن می‌سازد.
 - 3- مواد مورد نیاز این سیستم در دسترس و نسبتاً ارزان است.
 - 4- ایده جداسازی فازی¹¹ عامل ترمیم، فرآیند ترمیم را ساده‌تر می‌سازد، چرا که عامل ترمیم به راحتی می‌تواند با زمینه پلیمری مخلوط شود.
- در این سیستم جدید، به جای عامل ترمیم پایه سیلیکون، کاتالیزورهای دی‌ان‌بوتیل‌تین‌دی‌لورات و کلروبنزن¹² کپسوله شده و سپس عامل ترمیم و میکروکپسول‌های حاوی کاتالیزور در زمینه وینیل‌استر توزیع شدند. شایان ذکر است که در این تحقیق، پوسته میکروکپسول‌های سنتز شده از جنس پلی‌بورتان¹³ بود که توسط فرآیند پلیمریزاسیون بین سطحی تولید شدند. قطر میانگین این میکروکپسول‌ها 50-450 μm بود که با تغییر نرخ اختلاط در طول فرآیند پلیمریزاسیون کنترل شدند. از مزایای این روش، توزیع یکنواخت کاتالیزورهای کپسوله شده و عامل ترمیم پایه سیلیکونی (به دلیل انحلال کم) در زمینه پلی‌استر بود. برخلاف پتانسیل و مزایای این سیستم جدید، بازدهی خودترمیمی آن در حدود 46% گزارش شد که پایین‌تر از مقادیر 75-90% گزارش شده برای سیستم‌های خودترمیم دی‌سایکلوپنتادین-گراز است [92,91].

رول و همکاران در سال 2007 [93]، تأثیر اندازه میکروکپسول‌ها را بر کارایی خود ترمیمی بررسی کردند. در این پژوهش در شرایط یکسان، سه نمونه با اندازه‌های متفاوت کپسول آزمایش شدند. براساس نتایج بدست آمده، در یک کسر حجمی ثابت، هر چه اندازه کپسول‌ها بیشتر باشد، انرژی جذب شده برای شکست بالاتر است. دلیل این موضوع، وجود عامل ترمیم بیشتر در کپسول گزارش شد و این که با آزاد شدن بیشتر این عامل، ترمیم بهتر صورت گرفت.

در سال 2010، کاروسو¹⁴ و همکاران [94]، پوشش دیواره دو لایه‌ای میکروکپسول‌ها را برای مواد خود ترمیم مطالعه کردند. در این تحقیق، میکروکپسول‌های با دو لایه پوشش پلی‌اوره/ پلی‌اوره-فرمالدئید ساخته شد

ذوب و تولید رزین با دمای انتقال شیشه‌ای¹ (T_g) بالاتر را دارد [83,79]. بنابراین استفاده از مخلوطی از دی‌سایکلوپنتادین با 5-اتیلن-2-نوربورن با هدف دست‌یابی به یک سیستم خودترمیم فعال‌تر با خواص مکانیکی قابل قبول پیشنهاد شده است.

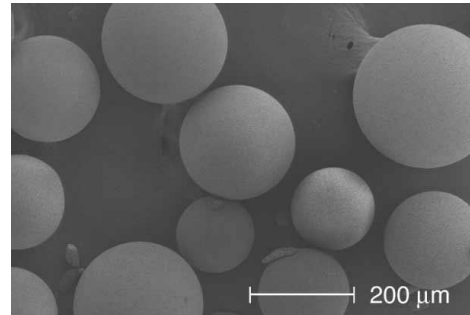


Fig. 22 Synthesized urea- formaldehyde microcapsules with agitation rate of 550 rpm [76]

شکل 22 میکروکپسول‌های اوره-فرمالدئید سنتز شده با سرعت هم‌زدن 550 rpm [76]

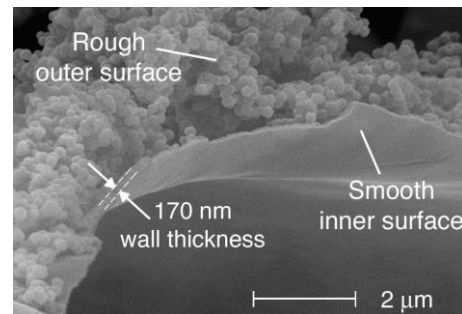


Fig. 23 Microcapsule surface morphology, the rough outer surface is composed of urea- formaldehyde nanoparticles (~150 nm) attached to the microcapsule shell [76]

شکل 23 مورفولوژی سطح میکروکپسول، سطح زیر خارجی تشکیل شده از نانوذرات اوره-فرمالدئید (~150 nm) چسبیده به پوسته میکروکپسول [76]

در سال 2005، رول² و همکاران [84]، برای حل مشکل غیرفعال شدن کاتالیزورها، پیشنهاد کپسوله کردن کاتالیزور گراز را دادند. این کار با استفاده از نوعی فرآیند کپسوله کردن که در داروسازی کاربرد دارد، عملی شد. قطر میانگین کپسول‌های کاتالیزور، 50-150 μm متغیر بود. تحلیل‌های انجام شده تأیید کرد که کاتالیزورهای کپسوله شده در مقابل غیرفعال شدن توسط عامل پخت دی‌اتیلن‌تری‌آمین به خوبی محافظت می‌شوند. به علاوه این محققان ادعا کردند که کاتالیزور کپسوله شده به صورت یکنواخت‌تر در زمینه کامپوزیت اپوکسی-میکروکپسول پخش می‌شود.

در سال 2006، جونز³ و همکاران [85] نشان دادند که ساختار کاتالیزور گراز، نحوه انحلال، پایداری حرارتی و میزان مقاومت آن در مقابل غیرفعال شدن توسط عامل آمین موجود در زمینه اپوکسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آن‌ها نشان دادند که کریستال‌های کوچک‌تر کاتالیزور، سریع‌تر در مونومر دی‌سایکلوپنتادین حل می‌شوند. با وجود این مزیت، کریستال‌های کوچک‌تر بازدهی ترمیمی بالاتری نسبت به کریستال‌های بزرگ‌تر ندارند. چرا که امکان غیرفعال شدن کاتالیزورهای کوچک‌تر در تماس با عامل آمین

⁴ Diethylenetriamine

⁵ Cho

⁶ Di-n-butyltin dilaurate (DBLT)

⁷ Poly(dimethylsiloxane) (PDMS)

⁸ Poly(diethoxysiloxane) (PDES)

⁹ Polycondensation

¹⁰ Organotin catalyst

¹¹ Phase separation

¹² Chlorobenzene

¹³ Polyurethane

¹⁴ Caruso

¹ Glass transition temperature

² Rule

³ Jones

اوره- فرمالدئید، 20-25 nm و ضخامت دیواره سیلیکا، 20-40 nm گزارش شد.

در سال 2011، جین⁴ و همکاران [96]، خودترمیمی با کپسوله کردن دو عامل ترمیم اپوکسی و آمین در زمینه ترموست را بررسی کردند. در ابتدا مونومر اپوکسی رقیق توسط اوره- فرمالدئید کپسوله شد. به منظور ساخت میکروکپسول حاوی آمین نیز ابتدا میکروکپسول توخالی سنتز شد و سپس پلی‌آمین آلیفاتیک اصلاح شده⁵ توسط خلاء در داخل میکروکپسول قرار داده شد. هر دو نوع کپسول در زمینه اپوکسی با سخت‌کننده دی‌اتیلن‌تری‌آمین قرار گرفتند. پس از آماده‌سازی نمونه، میزان بازیابی به کمک آزمون شکست مد I (TDCB)⁶ اندازه‌گیری شد. نسبت وزنی بهینه اندازه‌گیری شده برای اپوکسی به آمین، 6 به 4 گزارش شد که در این حالت، بازده آن 91% با 7 درصد وزنی کپسول آمین و 10.5 درصد وزنی کپسول اپوکسی بدست آمد. پایداری حرارتی پس از سخت‌شدن نمونه‌ها در دمای 121 °C و ارزیابی بهبود عملکرد مورد بررسی قرار گرفت. پخت در این دما به مدت 1 ساعت، باعث کاهش کارایی ترمیم از 85% به 46% و به مدت 8 ساعت، کاهش ترمیم تا 36% را به همراه داشت که دلیل آن نفوذ آمین در دمای بالا گزارش شد.

در سال 2011، جین و همکاران [97]، شکست و خستگی را در کامپوزیت اپوکسی- میکروکپسول حاوی مواد ترمیم کننده دی‌سیکلوپنتادین بررسی کردند. در این تحقیق از کپسول‌های حاوی مونومرهای دی-سیکلوپنتادین به عنوان مواد ترمیم و ذرات گراز به عنوان کاتالیزور استفاده شد. پس از انجام آزمون‌های شکست استاتیک و شکست دینامیک و مقایسه با اپوکسی بدون کپسول، نتایج بدست آمده حاکی از بهبود این خواص بود. از نمونه دوطرفه مخروطی- عرضی (WTDCB)⁷ که در آن طول ترک مستقل از چقرمگی شکست مد I است، برای بررسی شکست استاتیک استفاده شد. جهت بررسی بهتر، عوامل ترمیم را به صورت مستقیم به ناحیه تخریب وارد کردند. نتایج بدست آمده، بازیابی 56% در حالت شکست استاتیک را نشان داد. همچنین با توجه به پایین بودن فرکانس نیروی خستگی، برطرف شدن کامل ترک خستگی مشاهده شد. تصاویر SEM نیز پلیمره شدن دی-سیکلوپنتادین در سطح شکست را نشان دادند.

در سال 2012، ژاوو⁸ و همکاران [98]، نانوکپسول حاوی مواد خودترمیم را تهیه نمودند. از آنجایی که اکثر تولیدات کپسول در مقیاس‌های بالاتر از میکرون است، در این تحقیق، هدف تولید نانوکپسول برای مواد خودترمیم نازک و یا پوشش‌های میکروالکترونیک بود. نانوکپسول‌ها با استفاده از اختلاط با سرعت‌های بالا و یا اختلاط التراسونیک و سپس تبخیر رسوبی تهیه شدند و اندازه‌ی آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)⁹ بررسی شد.

در سال 2012، لی و همکاران [99]، رفتار میکرومکانیکی اپوکسی حاوی میکروکپسول‌های خودترمیم را به وسیله نانواینندنتور¹⁰ مورد بررسی قرار دادند. این روش به صورت گسترده در اندازه‌گیری خواص مکانیکی در مقیاس میکرو استفاده می‌شود. در این تحقیق، میکروکپسول‌های حاوی اپوکسی (رزین) و مرکپتان¹¹ به عنوان عامل سخت‌کننده و با پوشش پلی‌ملامین-فرمالدئید تهیه شدند. بررسی خواص میکرومکانیکی نشان داد که دیواره پلی-ملامین-فرمالدئید رفتار ویسکوالاستیک-پلاستیک از خود نشان می‌دهد.

و سپس مورد بررسی قرار گرفت. شکل 24، مورفولوژی میکروکپسول‌های دو لایه توسط آنالیز SEM و میکروسکوپ نیروی اتمی¹ (AFM) را نشان می‌دهد. تشکیل دو لایه دیواره کپسول با پلیمریزاسیون بین سطحی پلی‌اوره و پلیمریزاسیون درجای اوره- فرمالدئید صورت گرفت که باعث ایجاد دو لایه مجزا در دیواره کپسول شد. در مقایسه با پوشش اوره- فرمالدئید معمول، ضخامت دیواره از 200 به 675 نانومتر به صورت تابعی از مقدار پلی‌اوره اضافه شده به مایع تغییر کرد.

در این کار پژوهشی، پایداری حرارتی میکروکپسول‌های دو لایه با مقادیر مختلف پلی‌اوره و کپسول تک لایه اوره- فرمالدئید بررسی شد. آنالیز توزین حرارتی² (TGA) نشان داد که کپسول‌های دو لایه در شرایطی که ماده داخل آن‌ها با کپسول‌های تک لایه یکسان باشد، پایداری بیشتری نسبت به کپسول تک لایه دارد. خواص مکانیکی کپسول‌های دو لایه و تک لایه با استفاده از آزمون فشار در این پژوهش مطالعه شد. نتایج نشان داد که دو لایه شدن پوشش کپسول باعث بهبود خواص مکانیکی شده است. همچنین با افزایش مقدار پلی‌اوره در مواد درون هسته، ضخامت لایه داخلی زیاد شد که در نتیجه، افزایش ضخامت دیواره کپسول‌ها را به همراه داشت.

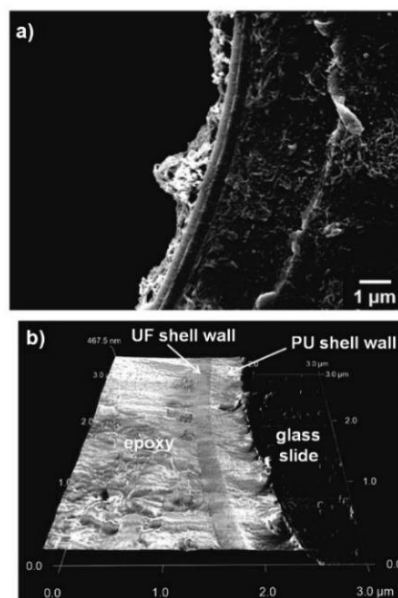


Fig. 24 Double wall microcapsule image, a) SEM, b) AFM [94]

شکل 24 تصویر میکروکپسول دو دیواره‌ای، (a) SEM، (b) AFM [94]

در سال 2011، جکسون³ و همکاران [95]، سیلیکا را برای پوشش میکروکپسول‌های نگهداری مواد خودترمیم بکار بردند. دیواره سیلیکاتی برای پوشش‌دهی مونومرهای دی‌سیکلو پنتادین به صورت کپسول و ذرات کاتالیزور گراز، مورد استفاده قرار گرفت و از اختلاط این مواد با زمینه پلیمری جلوگیری کرد. پوشش سیلیکا توسط میعان سیلیکا با استفاده از کاتالیزور فلورید سنتز شد و این روش بهبود پراکندگی در اپوکسی را به همراه داشت. بازیابی خواص مکانیکی در این حالت بطور متوسط، 108 درصد بود. در این تحقیق از کپسول‌هایی با قطر 1.5 μm استفاده شده و ضخامت دیواره پلی-

⁴ Jin

⁵ Modified aliphatic polyamine

⁶ Tapered-double-cantileverbeam (TDCB)

⁷ Width-Tapered-Double-Cantilever-Beam (WTDCB)

⁸ Zhao

⁹ Transmission Electron Microscope (TEM)

¹⁰ Nanoindentation

¹¹ Mercaptan

¹ Atomic Force Microscope

² Thermo-Gravimetric Analysis

³ Jackson

مدول الاستیک و سختی میکروکپسول‌ها به صورت کمی محاسبه شد. مدول برای اندازه کپسول $100\ \mu\text{m}$ ، حدود $2.5\ \text{GPa}$ گزارش شد. با افزایش اندازه میکروکپسول، مدول و سختی افزایش یافتند. در مجموع، اندازه و ترکیب میکروکپسول‌ها تاثیر زیادی بر خواص میکرومکانیکی کامپوزیت مذکور داشتند.

در سال 2012، نستراوا¹ و همکاران [100]، پارامترهای مرتبط با سنتز میکروکپسول‌های حاوی عامل ترمیم از قبیل هندسه همزن، سرعت اختلاط، دما و غلظت پایدارکننده‌ها را مورد بحث و بررسی قرار دادند. در این تحقیق، عامل ترمیم، روغن لینسید² بود که برای ترمیم پوشش‌های کامپوزیتی اپوکسی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که افزایش سرعت اختلاط، انتخاب صحیح دما، هندسه مناسب همزن و غلظت بالای پایدارکننده‌ها باعث کاهش اندازه میکروکپسول شدند. این کاهش اندازه همراه با تشکیل نانوذرات پلیمری به عنوان محصول جانبی بود. جدا کردن نانوذرات با استفاده از روش فیلتراسیون خلاء باعث تولید محصولی چگال شد که برای پراکندگی در پوشش مناسب نیست. نشان داده شد که جدایی بسیار خوبی از میکروکپسول‌ها، براساس قطر آن‌ها، با استفاده از فلوروپلیمر³ کم انرژی بدست می‌آید. همچنین گزارش شد که کمترین دمایی که در آن واکنش قابل انجام است، کوچک‌ترین کپسول را می‌دهد، اما در این دما سرعت انجام واکنش کم بود. علاوه بر این، پروانه همزن با 4 تیغه، کمترین اندازه کپسول را تشکیل داد. تخمین مقدار درصد حجمی بحرانی میکروکپسول‌ها نیز اندازه-گیری شد که حدود 30% بدست آمد. همچنین کارایی پوشش‌ها در معرض اسپری نمک و آزمایش ضربه بررسی شد. نتایج ضربه، تفاوت چندانی در خواص مکانیکی نشان نداد، اما نتایج آزمون اسپری نمک به مدت سه هفته، افزایش مقاومت به خوردگی و کاهش لایه‌ای شدن را با افزایش کسر حجمی میکروکپسول‌ها (بین 30-50 درصد) نشان داد.

در سال 2012، حاتمی بورا⁴ و همکاران [101]، استحکام چسبندگی کپسول‌ها در مقیاس‌های نانو و میکرو را به زمینه اپوکسی بررسی کردند. کپسول اوره-فرمالدئید (حاوی روغن لینسید) در اندازه‌های میکرو و نانو ساخته شد. میکرو و نانوکپسول در پوشش اپوکسی قرار داده شد و پوشش کامپوزیتی در صفحه فولاد کربنی مورد استفاده قرار گرفت. سپس عملکرد خود ترمیمی پوشش مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت به خوردگی، استحکام و چسبندگی پوشش‌های حاوی نانوکپسول با پوشش‌های حاوی میکروکپسول مقایسه شدند. نتایج بدست آمده حاکی از کاهش استحکام چسبندگی پوشش در حالت میکروکپسول نسبت به نانوکپسول بود. همچنین با افزایش درصد وزنی میکروکپسول، استحکام چسبندگی کاهش بیشتری یافت. عامل موثر دیگر، نرخ اختلاط بود که هر چه این نرخ بیشتر باشد، کاهش کمتری در استحکام چسبندگی پوشش دیده می‌شود. استفاده از اختلاط التراسونیک بجای اختلاط مکانیکی باعث دستیابی به اندازه‌های کوچک‌تر کپسول و نانو شدن آن‌ها شد و استفاده از نانو کپسول‌ها در پوشش، بهبود خواص چسبندگی و مقاومت به خوردگی را به همراه داشت.

در سال 2013، ژو⁵ و همکارانش [102]، میکروکپسول‌های چند لایه را تولید و خواص آن‌ها را بررسی کردند. از میکروکپسول برای ساخت مکان واکنش پلیمره شدن رادیکالی انتقال اتمی⁶ استفاده شد. تشکیل این

⁷ Glycidylmethacrylate (GMA)

⁸ Poly (methyl-methacrylate)

⁹ Zhong

¹⁰ Polyetheramine

¹ Nesterova

² Linseed oil

³ Fluoropolymer

⁴ Hatami Boura

⁵ Zhu

⁶ Atom Transfer Radical Polymerization (ATRP)

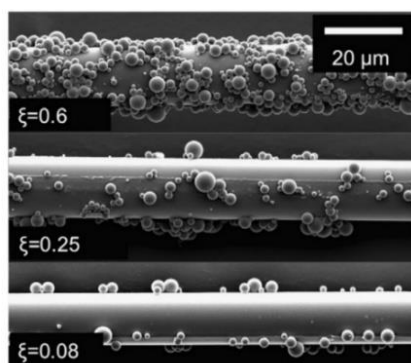


Fig. 25 SEM micrographs of the covered glass fibers with different ratio of microcapsule [106]

شکل 25 تصاویر SEM الیاف شیشه پوشش داده شده با نسبت‌های متفاوت میکروکپسول [106]

اسلامی فارسانی و همکاران [110]، در سال 2019، رفتار ترمیم در سازه ساندویچی تشکیل شده از پوسته اپوکسی-الیاف شیشه و هسته فومی PVC را تحت بارگذاری کششی بررسی کردند. در این تحقیق، عامل ترمیم، رزین اپوکسی زمینه بود که توسط روش پلیمره شدن درجا به وسیله پوشش پلیمری اوره-فرمالدئید کپسوله شد. همچنین از کاتالیزور به عنوان عامل دوم ترمیم استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که ایجاد آسیب باعث کاهش 21 درصدی در استحکام کششی سازه شده است. پس از ترمیم، استحکام کششی سازه نسبت به نمونه بدون تخریب افزایش یافته بود، به گونه‌ای که بازده ترمیم در این کار پژوهشی 105 درصد گزارش شد.

ابراهیم‌نژاد خالگیری⁴ و همکاران [111]، در سال 2019، رفتار کششی کامپوزیت خودترمیم‌شونده اپوکسی-الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. نوع عامل ترمیم، اپوکسی زمینه کپسوله شده توسط اوره-فرمالدئید به همراه کاتالیزور اپوکسی گزارش شد. مکانیزم ترمیم در این کار پژوهشی استفاده از گرما بود، به گونه‌ای که با حرارت دادن در دمای 130 °C، کاتالیزور فعال شده و عمل ترمیم انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که نمونه بدون آسیب دارای استحکام کششی 270 MPa بود که با ایجاد آسیب در نمونه، استحکام تا 224 MPa کاهش یافت. پس از ترمیم، نمونه خواص اولیه خود را بازیابی نمود و استحکام نمونه به 273 MPa رسید. بازده ترمیم در این کار پژوهشی، 107 درصد گزارش شد.

نجفی⁵ و همکاران [112] در تحقیقی مشابه، رفتار کامپوزیت خودترمیم-شونده اپوکسی-الیاف کربن را تحت بارگذاری عرضی مورد بررسی قرار دادند. بیشینه نیرو در آزمون خمش برای نمونه‌های بدون آسیب، آسیب دیده و ترمیم شده به ترتیب 126، 48 و 125 N گزارش شد. همچنین استحکام خمشی در آزمون خمش برای نمونه‌های بدون آسیب، آسیب دیده و ترمیم شده به ترتیب 227، 92 و 173 MPa بدست آمد. بازده ترمیم در این سازه کامپوزیتی، 60 درصد گزارش شد. دلیل پایین بودن این بازده ترمیم، حساس بودن الیاف کربن به بار ضربه‌ای ناشی از ضربه افتان به منظور ایجاد آسیب اولیه بیان شد.

علم کپسوله کردن و ترمیم سازه‌های کامپوزیت پلیمری، نوپا بوده و ایده‌ها و خلاقیت‌های بسیاری برای دستیابی به ترمیم بهتر و بهینه‌تر وجود دارد. ساخت میکروکپسول حاوی بنزیل پراکساید⁶ [113]، رسیدن به ساختار

میکروکپسول بررسی کردند. دو گروه میکروکپسول یکی حاوی اپوکسی و دیگری حاوی سخت‌کننده پلی‌اترآمین با دیواره پلی‌متیل‌متاکریلات تهیه شدند و پس از قرار دادن میکروکپسول‌ها در زمینه اپوکسی، کارایی آن‌ها در خود ترمیمی مورد مطالعه قرار گرفت. بازیابی حدود 43.5% در زمینه حاوی 5 درصد وزنی میکروکپسول و 84.5% در زمینه حاوی 15 درصد وزنی میکروکپسول بدون تاثیرگذاری چندانی روی خواص مکانیکی در دمای اتاق به مدت 24 ساعت پخت گزارش شد. همچنین مشخص شد که با افزایش دما، میزان بازده افزایش می‌یابد. بازده ترمیم در کامپوزیت‌های حاوی دو گروه کپسول بیشتر از کامپوزیت‌های تک کپسوله گزارش شد، چرا که انجام واکنش بین رزین و سخت‌کننده مایع آسان‌تر بود. استحکام کششی اپوکسی حاوی دو گروه کپسول با افزایش درصد وزنی کپسول‌ها، ابتدا افزایش نشان داد و در 5 درصد وزنی به میزان ماکزیمم خود رسید و سپس کاهش استحکام با شیب ملایم مشاهده شد.

در سال 2013، جونز و همکاران [106]، بازیابی کامل استحکام فصل مشترک کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه به وسیله میکروکپسول‌ها را مشاهده کردند. در این تحقیق پس از شکستن کامل پیوندهای فصل مشترک، بازیابی پیوندها با بهره‌گیری از میکروکپسول‌های حاوی مواد ترمیم کننده صورت گرفت. میکروکپسول‌ها در اطراف الیاف شیشه و حاوی غلظت‌های متفاوتی از رزین اپوکسی و محلول اتیل‌فنیل‌استات تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند (شکل 25). با استفاده از نسبت 70:30 محلول به رزین اپوکسی، بازیابی 100% تنش برشی فصل مشترک مشاهده شد، در حالی که در استفاده از دی‌سیکلوپنتادین بازیابی حدود 44% گزارش شده بود.

در سال 2016، بولیموسکی¹ و همکاران [107]، میزان بهینه برای ساخت میکروکپسول اوره-فرمالدئید را بدست آوردند. میزان آب استفاده شده در این نوع بهینه، 62.5 ml، میزان اوره، 1.25 g و فرمالدئید، 3.16 g گزارش شد. همچنین در این کار تحقیقاتی از اسید لوئیز² و کاتالیزور Sc(OTf)₃ برای انجام عمل ترمیم استفاده شد.

تریفاتی³ و همکاران [108]، توانستند سخت‌کننده آمینی زمینه اپوکسی را توسط پوسته‌ای از جنس خود اپوکسی کپسوله کنند. بهترین نسبت زمینه اپوکسی به سخت‌کننده آمینی برای دستیابی به بازده ترمیم 100 درصد، 10 به 3.2 گزارش شد.

در سال 2018، محمدی و همکاران [109]، در ابتدا میکروکپسول‌های حاوی رزین اپوکسی را توسط پوسته اوره-فرمالدئید سنتز کردند. در گام بعدی، ابتدا میکروکپسول متخلخل با دیواره اوره-فرمالدئید تولید شده و با استفاده از سیستم خلاء، سخت‌کننده آمینی در داخل آن ذخیره شد. سپس میکروکپسول حاوی سخت‌کننده آمینی و رزین اپوکسی را در سازه ساندویچی استفاده کردند. از رزین اپوکسی و سخت‌کننده آمینی به عنوان زمینه، از الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده و از فوم PVC به عنوان لایه میانی سازه ساندویچی استفاده شد. میکروکپسول‌ها در فصل مشترک بین هسته و پوسته سازه ساندویچی قرار داده شدند. سپس توسط ضربه افتان، آسیب اولیه ایجاد شد و پس از ترمیم، رفتار فشاری سازه ساندویچی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده، بازده ترمیم 70 درصدی را در سازه ساندویچی نشان داد.

⁴ Ebrahimnezhad-Khaljiri

⁵ Najafi

⁶ Benzoyl Peroxide

¹ Bolimowski

² Lewis acid

³ Tripathi

از پلیمرهای مورد استفاده در چاپگر سه‌بعدی نظیر ژله پتروشیمی، موم میکروکریستالی و پلی لاکتیک اسید به منظور ساخت محفظه نگهدارنده عامل ترمیم استفاده می‌شود. در روش کپسوله کردن عامل ترمیم، استفاده از پلیمرهای پایه فرمالدئیدی مانند اوره-فرمالدئید بسیار رایج است. در رابطه با نوع عامل ترمیم، مواد بسیار متنوعی استفاده شده‌اند، اما تحقیقات نشان داده است که در بسیاری موارد، استفاده از پلیمر زمینه به عنوان عامل ترمیم مناسب‌تر از دیگر مواد به منظور ترمیم زمینه می‌باشد.

با توجه به دانش ایجاد شده در حوزه ترمیم غیرذاتی توسط محققان ایرانی، می‌توان بیان کرد که در آینده‌ای نزدیک در داخل کشور سازه‌های کامپوزیتی هوشمند با قابلیت ترمیم‌شوندگی در بسیاری کاربردها جایگزین سازه‌های رایج کامپوزیتی شوند. شایان ذکر است که شناسایی و حساسیت به ترک یا نقص ایجاد شده به منظور ترمیم بسیار مهم است، لذا به نظر می‌رسد که پژوهش‌های آتی در زمینه ساخت مواد خودترمیم‌شونده با قابلیت تحریک‌شوندگی چندگانه با عواملی مانند نور، تغییر pH، پیشروی ترک و موارد دیگر باشد.

مراجع

- [1] Khalili, S.M.R. Eslami Farsani, R. Dastmard, A. and Saeedi, A., "Experimental Investigation of Creep Behavior in Phenolic Based Polymer Composites" In Persian, Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 2, pp. 37-42, 2015.
- [2] Bahari-Sambran, F. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "Experimental Investigation of Flexural Behavior of Basalt Fibers/Epoxy-Aluminum Laminate Composites Containing Nanoclay Particles," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 45-54, 2018.
- [3] Malekinejad Bahabadi, H. Farrokhhabadi, A. Khatibi, M. M. and Rahmani, R., "The Influence of Skin/Core Debonding Effects on the Natural Frequencies of Composite Sandwich Structures Using Experimental and Numerical Modal Analysis," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 91-98, 2018.
- [4] Ebrahimnezhad Khaljiri, H. Eslami Farsani, R., "Investigation of Tensile and Burning Rate Behavior of Hybrid Glass-Semiconductor Fibers/Epoxy Composite," In Persian, Journal of Mechanical Engineering (Tabriz University), Vol. 78, No. 1, pp. 29-36, 2017.
- [5] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites Under Tensile and Flexural Loadings," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.
- [6] Zhang, M. Q. and Rong, M. Z., "Self-Healing Polymers and Polymer Composites," First ed., John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 1-5, 2011.
- [7] Wool, R. P., "Self-Healing Aaterials: a Review," Soft Matter, Vol. 4, No. 3, pp. 400-418, 2008.
- [8] Dry, C. and Sottos, R., "Passive Smart Self-Repair in Polymer Matrix Composite Materials," North American Conference on Smart Structures and Materials, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Proc. SPIE 1916, Albuquerque, 1993.
- [9] White, S. R. Sottos, N. R. Geubelle, P. H. Moore, J. S. Kessler, M. R. Sriram, S. R. Brown, E. N. and Viswanathan, S., "Autonomic Healing of Polymer Composites," Nature, Vol. 409, pp. 794-797, 2001.
- [10] Blaiszik, B. J. Kramer, S. L. B. Olugebefola, S. C. Moore, J. S. Sottos, N. R. and White, S. R., "Self-Healing Polymers and Composites," Annual Review of Materials Research, Vol. 40, No. 1, pp. 179-211, 2010.
- [11] Gibson, R. F., "A Review of Recent Research on Mechanics of Multifunctional Composite Materials and Structures," Composite Structures, Vol. 92, No. 12, pp. 2793-2810, 2010.
- [12] Tanasa, F. and Zanoaga, M., "Self-Healing Materials - From Design To Specific Applications," International Conference of Scientific Paper of AFASES, Brasov, 2012.

نانوکپسول [114]، ساخت میکروکپسول حاوی پلی دی‌متیل‌سیلوکسان [115]، میکروکپسول حاوی روغن پالم¹ برای ترمیم زمینه اپوکسی [116]، ساخت میکروکپسول حاوی روغن لینسید [117] و تاثیر عامل سیلانی بر روی میکروکپسول [118] و همچنین میکروکپسول چند هسته‌ای [119]، از جمله جدیدترین زمینه‌های تحقیقاتی در زمینه بهبود رفتار خودترمیمی می‌باشند. این تحقیقات هنوز به بهبود و بهینه‌سازی برای استفاده از آن در سازه‌های کامپوزیتی نیاز دارند.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مروری، در ابتدا، انواع سیستم‌های ترمیم و دسته‌بندی آن‌ها براساس پیشرفت‌های اخیر در زمینه علم خودترمیمی بخصوص خودترمیمی در سازه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. دو دیدگاه کلی در زمینه تقسیم‌بندی سیستم‌های خودترمیم شونده وجود دارد. اولین دیدگاه، تقسیم‌بندی براساس ترمیم ذاتی و غیرذاتی است. تقسیم‌بندی دوم بر مبنای روش ترمیم است که به سه دسته بزرگ خودترمیم‌شوندگی براساس میکروکپسول، شبکه آوندی و ذاتی تقسیم می‌شود.

در گام بعدی سعی شد تا ارزیابی عملکرد ترمیم در انواع خواص مکانیکی، و قابلیت و بازده ترمیم، مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در این کار مروری، روند رو به رشد تحقیقات در زمینه مواد خودترمیم‌شونده، تعداد اسناد بین‌المللی چاپ شده در این زمینه، محققان فعال، کشورهای فعال و نقش رشته‌های متفاوت علوم در توسعه خودترمیم‌شوندگی مطالعه شد.

از آنجایی که هدف اصلی این کار پژوهشی بررسی پیشرفت‌های اخیر در مورد خودترمیم‌شوندگی غیرذاتی با تاکید بر استفاده از مواد خودترمیم در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بود، لذا سیر تکاملی خودترمیم‌شوندگی‌های غیرذاتی مبتنی بر الیاف شیشه توخالی، شبکه میکروآوندی و میکروکپسول مورد بررسی قرار گرفت. در هر سه روش بیان شده، عامل ترمیم در یک محفظه در داخل سازه کامپوزیتی نگهداری می‌شود و به محض رسیدن ترک به آن ناحیه، این محفظه شکسته شده و با رهاسازی عامل ترمیم، ترمیم در ناحیه نوک ترک اتفاق می‌افتد. هر یک از روش‌های مذکور دارای ویژگی‌ها و مزایای خاص خود هستند. به عنوان مثال در سیستم ترمیم‌شوندگی مبتنی بر شبکه میکروآوندی، امکان ترمیم چندگانه سازه وجود دارد. مهم‌ترین ویژگی خودترمیم‌شوندگی مبتنی بر میکروکپسول، توزیع یکنواخت و سهولت طراحی سازه کامپوزیتی در مقایسه با دو روش غیرذاتی دیگر است. در روش‌های ترمیم‌شوندگی مبتنی بر الیاف توخالی، این الیاف می‌توانند نقش تقویت‌کننده و عامل ترمیم را به صورت هم‌زمان انجام دهند.

همچنین در این کار مروری سعی شد تا عوامل تاثیرگذار بر عملکرد هر یک از سیستم‌های ترمیم (بازده ترمیم) مورد بررسی قرار گیرد. نوع قرارگیری محفظه عامل ترمیم در سازه، نوع کاتالیزور استفاده شده در روش ترمیم، حلال مورد استفاده، سرعت نفوذ عامل ترمیم، سرعت ترمیم، تناسب ترک و میزان عامل ترمیم، انتخاب عامل ترمیم با ساختاری مشابه زمینه پلیمری و انتخاب روش ساخت مناسب، از جمله عواملی هستند که بر انتخاب نوع سیستم و بازده ترمیم بسیار تاثیرگذار می‌باشند.

با توجه به مطالب بیان شده، مهم‌ترین مواد ساخت محفظه نگهدارنده عامل ترمیم فرآیندهای غیرذاتی در روش الیاف توخالی شامل الیاف توخالی شیشه و پلی‌پروپیلن هستند. در روش شبکه میکروآوندی بخصوص سه‌بعدی

¹ Palm oil

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 36, No. 2, pp. 183-188, 2005.
- [33] Trask, R. S. and Bond, I. P., "Biomimetic Self-Healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibres," Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 704-710, 2006.
- [34] Williams, G. J. Bond, I. P. and Trask, R. S., "Compression After Impact Assessment of Self-Healing CFRP," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 40, No. 9, pp. 1399-1406, 2009.
- [35] Pang, J. W. C. and Bond, I. P., "A Hollow Fibre Reinforced Polymer Composite Encompassing Self-Healing and Enhanced Damage Visibility," Composites Science and Technology, Vol. 65, No. 11-12, pp. 1791-1799, 2005.
- [36] Tomizuka, M. and Dry, C., "Self-Repairing Composites for Airplane Components," Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Proc. SPIE 6932, San Diego, 2008.
- [37] Kousourakis, A. and Mouritz, A. P., "The Effect of Self-Healing Hollow Fibres on the Mechanical Properties of Polymer Composites," Smart Materials and Structures, Vol. 19, 085021, 2010.
- [38] McCombe, G. P. Rouse, J. Trask, R. S. Withers, P. J. and Bond, I. P., "X-ray Damage Characterisation in Self-Healing Fibre Reinforced Polymers," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 43, No. 4, pp. 613-620, 2012.
- [39] Kling, S. and Czigan, T., "Damage Detection and Self-Repair in Hollow Glass Fiber Fabric-Reinforced Epoxy Composites via Fiber Filling," Composites Science and Technology, Vol. 99, pp. 82-88, 2014.
- [40] Eftekhari, H. Eslami-Farsani, R. Khalili, S. M. R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "Optimizing the Self-Healing Behavior of Hollow Glass Fibers Reinforced Epoxy Matrix Composite," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 182-190, 2017.
- [41] Rahimpour, L. Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., "Fabrication and Determination of the Failure Toughness in Self-Healing Polymeric Composite by Hollow Fibers," In Persian, Third National and First International Conference in Applied Research on Electrical, Mechanical and Mechatronics Engineering, COI: ELEMECHCONF03_1040, Tehran, 2016.
- [42] H. Ghanbari, H. Aghamirzadeh, G. R. Khalili, S.M.R. and Eslami Farsani, R., "Experimental Investigation on Flexural Properties of Self-Healing Composites Fabricated by Short Hollow Fibers," The Biennial International Conference on Experimental Solid Mechanics, COI: WMECH03_036, Tehran, 2016.
- [43] Eslami-Farsani, R. Sari, A. and Khosravi, H., "Mechanical Properties of Carbon Fibers/Epoxy Composite Containing Anhydride Self-Healing Material Under Transverse Loading," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 285-290, 2016.
- [44] Sari, A. Eslami Farsani, R. and Zamani, M. R., "An Experimental Investigation on the Tensile Behavior of Epoxy/Carbon Fibers Composites Containing Anhydride Self-Healing Material," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 336-342, 2017.
- [45] Abbasnia, Sh. And Eslami-Farsani, R., "Experimental Investigation on Flexural Properties of Self-Healing Fiber Metal Laminate by Short Hollow Fibers," In Persian, The 16th International Conference of Iranian Aerospace Society, COI: AEROSPACE16_402, Tehran, 2017.
- [46] Abbasnia, Sh. Eslami-Farsani, R. Khosravi, H. "Mechanical Performance of Self-Healing Fiber-Metal Laminates Under Transverse Loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 2, pp. 185-190, 2018.
- [47] Eslami-Farsani, R. Mohabbati, F. and Khosravi, H., "Experimental Study of Tensile Behavior of Self-Healing Fiber-Metal Laminates Composites with Chopped Hollow Glass Fibers," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 399-404, 2018.
- [48] Khalili, S. M. R. Zarei, M. and Eslami-Farsani, R., "Experimental Study of the Mechanical Behavior of Self-Healing Polymer Composite Under Heating Cycles," In Persian, Journal of Science
- [13] Nagaya, K. Ikai, S. Chiba, M. and Chao X., "Tire with Self-Repairing Mechanism," JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 2, pp. 379-384, 2006.
- [14] Martin, D. Greil, P. Leyens, C. Van der Zwaag, S. and Schubert, U.S., "Self-Healing Materials," Advanced Materials, Vol. 22, No. 47, pp. 5424-5430, 2010.
- [15] Cohades, A. Branfoot, C. Rae, S. Bond, I. and Michaud, V., "Progress in Self-Healing Fiber-Reinforced Polymer Composites," Advanced Materials Interfaces, Vol. 5, No. 17, 1800177, 2018.
- [16] Ponnammma, D. Sadasivuni, K. K. Cabibihan, J. J. and Al-Maadeed, M. A., "Smart Polymer Nanocomposites," Smart Polymer Nanocomposites. Springer Series on Polymer and Composite Materials, Cham, pp. 119-152, 2017.
- [17] <https://www.engineeringvillage.com>.
- [18] Ataei, S. Khorasani, S. N. and Neisiany, R. E., "Biofriendly Vegetable Oil Healing Agents Used for Developing Self-Healing Coatings: A Review," Progress in Organic Coatings, Vol. 129, pp. 77-95, 2019.
- [19] Es-haghi, H. Mirabedini, S. M. Imani, M. and Farnood, R. R., "Preparation and Characterization of Pre-Silane Modified Ethyl Cellulose-Based Microcapsules Containing Linseed Oil," Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 447, pp. 71-80, 2014.
- [20] Eferidoon, A. Ghorbanzadeh Ahangari, M. and Jahanshahi, M., "Effect of Nanoparticles on the Morphology and Thermal Properties of Self-Healing Poly(Urea-Formaldehyde) Microcapsules," Journal of Polymer Research, Vol. 20, 151, 2013.
- [21] Poormir, M. A. Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., "Optimal Design of a Bio-Inspired Self-Healing Metal Matrix Composite Reinforced with NiTi Shape Memory Alloy Strips," Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, Vol. 29, No. 20, pp. 3972-3982, 2018.
- [22] Poormir, M. A. Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., "Investigation of the Self-Healing Behavior of Sn-Bi Metal Matrix Composite Reinforced with NiTi Shape Memory Alloy Strips Under Flexural Loading," JOM, Vol. 70, No. 6, pp. 806-810, 2018.
- [23] Shabani, P. Shokrieh, M. M. and Zibaei, I., "Effect of the Conversion Degree and Multiple Healing on the Healing Efficiency of a Thermally Reversible Self-Healing Polymer," Polymer Advanced Technology, published online, 2019.
- [24] Saeedi, A. and Shokrieh, M. M., "A Novel Self-Healing Composite Made of Thermally Reversible Polymer and Shape Memory Alloy Reinforcement," Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, Vol. 30, No. 10, pp. 1585-1593, 2019.
- [25] Mozaffari, S. M. Beheshty, M. H. and Mirabedini, S. M., "Effect of Processing Conditions on the Microencapsulation of 1-Methylimidazole Curing Agent Using Solid Epoxy Resins," Iranian Polymer Journal, Vol. 26, No. 8, pp. 629-637, 2017.
- [26] Aguilar, M. R. and Román, J. S., Smart Polymers and their Applications, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 271-300, 2014.
- [27] Dry, C., "Procedures Developed For Self-Repair of Polymer Matrix Composite Materials," Composite Structures, Vol. 35, No. 3, pp. 263-269, 1996.
- [28] Dry, C., "Smart Materials Which Sense, Activate and Repair Damage; Hollow Porous Fibers in Composites Release Chemicals from Fibers for Self-Healing, Damage Prevention, and/or Dynamic Control," First European Conference on Smart Structures and Materials, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Proc. SPIE 1777, Glasgow, 1992.
- [29] Dry, C., "Passive Smart Materials for Sensing and Actuation," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, No. 3, pp. 420-425, 2016.
- [30] Motuku, M. J. G. M. Vaidya, U. K. and Janowski, G. M., "Parametric Studies on Self-Repairing Approaches for Resin Infused Composites Subjected to Low Velocity Impact," Smart Materials and Structures, Vol. 8, pp. 623-638, 1999.
- [31] Bleay, S. M. Loader, C. B. Hawyes, V. J. Humberstone, L. and Curtis, P. T., "A Smart Repair System for Polymer Matrix Composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 32, No. 12, pp. 1767-1776, 2001.
- [32] Pang, J. W. C. and Bond, I. P., "Bleeding Composites Damage Detection and Self-Repair Using a Biomimetic Approach,"

- Composites," *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 47, No. 7, pp. 1528-1542, 2018.
- [67] Postiglione, G. Alberini, M. Leigh, S. Levi, M. and Turri, S., "Effect of 3D-Printed Microvascular Network Design on the Self-Healing Behavior of Cross-Linked Polymers," *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 9, No. 16, pp. 14371-14378, 2017.
- [68] Lee, M. W. Sett, S. An, S. Yoon, S. S. and Yarin, A. L., "Self-Healing Nanotextured Vascular-Like Materials: Mode I Crack Propagation," *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 9, No. 32, pp. 27223-27231, 2017.
- [69] Cuvelier, A. orre-Muruzabal, A. Kizildag, N. Daelemans L. Ba Y. De Clerck K. and Rahier, H., "Coaxial Electrospinning of Epoxy and Amine Monomers in a Pullulan Shell for Selfhealing Nanovascular Systems," *Polymer Testing*, Vol. 69, pp. 146-156, 2018.
- [70] An, S. Lee, M. W. Yarin, A. L. and Yoon, S. S., "A Review on Corrosion-Protective Extrinsic Self-Healing: Comparison of Microcapsule-Based Systems and Those Based on Core-Shell Vascular Networks," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 344, pp. 206-220, 2018.
- [71] Cuvelier, A. Torre-Muruzabal, A. Van Assche, G. De Clerck, K. and Rahier, H., "Selection of Healing Agents for a Vascular Self-Healing Application," *Polymer Testing*, Vol. 62, pp. 302-310, 2017.
- [72] Brown, E. N. Sottos, N. R. and White, S. R., "Fracture Testing of a Self-Healing Polymer Composite," *Experimental Mechanics*, Vol. 42, No. 4, pp. 372-379, 2002.
- [73] Kessler, M., "Characterization and Performance of a Self-Healing Composite Material," PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, USA, 2002.
- [74] Kessler, M. R. Sottos, N. R. and White, S. R., "Self-Healing Structural Composite Materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, No. 8, pp. 743-753, 2003.
- [75] Sriram, S. R., "Development of Self-Healing Polymer Composites and Photoinduced Ring Opening Metathesis Polymerisation," PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, USA, 2002.
- [76] Brown, E. N. Kessler, M. R. Sottos, N. R. and White, S. R., "In Situ Poly (Urea-Formaldehyde) Microencapsulation of Dicyclopentadiene," *Journal of Microencapsulation*, Vol. 20, No. 6, pp. 719-730, 2003.
- [77] Skipor, A. Scheifer, S. and Olson, B., "Self Healing Polymer Compositions," US Pat. 7108914B2, 2004.
- [78] Scheifers, S. M. Estates, H. Skiper, A. F. and Brown, A., "Method and Chemistry for Automatic Self-Joining of Failures in Polymers," US Pat. 6588660B1, 2005.
- [79] Lee, J. K. Hong, S. J. and Liu X., "Characterization of Dicyclopentadiene and 5-Ethylidene-2-Norbornene as Self-Healing Agents for Polymer Composite and Its Microcapsules," *Macromolecular Research*, Vol. 12, No. 5, pp. 478-483, 2004.
- [80] Liu, X. Lee, J. K. Yoon, S. H. and Kessler, M. R., "Characterization of Diene Monomers as Healing Agents for Autonomic Damage Repair," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 101, No. 3, pp. 1266-1272, 2006.
- [81] Yang, Y. -S. Lafontaine, E. and Mortaigne, B., "Curing Study of Dicyclopentadiene Resin and Effect of Elastomer on Its Polymer Network," *Polymer*, Vol. 38, No. 5, pp. 1121-1130, 1997.
- [82] Mol, J., "Industrial Applications of Olefin Metathesis," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, Vol. 213, No. 1, pp. 39-45, 2004.
- [83] Khosravi, E. and Szymanska-Buzar, T., "Ring Opening Metathesis Polymerisation and Related Chemistry: State of the Art and Visions for the New Century," Vol. 56, First ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 17-21, 2002.
- [84] Rule, J. D. Brown, E. R. Sottos, N. R. White, S. R. and Moore, J. S., "Wax-Protected Catalyst Microspheres for Efficient Self-Healing Materials," *Advanced Materials*, Vol. 17, No. 2, pp. 205-208, 2005.
- [85] Jones, A. S. Rule, J. D. Moore, J. S. White, S. R. and Sottos, N. R., "Catalyst Morphology and Dissolution Kinetics of Self-Healing Polymers," *Chemistry of Materials*, Vol. 18, No 5, pp. 1312-1317, 2006.
- [86] Fu, G. C. Nguyen, S. T. and Grubbs, R. H., "Catalytic Ring-Closing Metathesis of Functionalized Dienes by a Ruthenium and Technology of Composites, Article in Press, Published online: 16 July 2018.
- [49] Mirzapour, N. and Yarmohammad-Toski, M., "Experimental Investigation of Dynamic Behavior of Composite Sandwich Panel Using Self-Healing Materials under Charpy Impact and 3-Point Bending Destruction," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 434-442, 2018.
- [50] Feli, M. Eslami-Farsani, R. and Khosravi, H., "Self-Healing Capability in Foam Based Sandwich Panels using Hollow Glass Fibers," *The Biennial International Conference on Experimental Solid Mechanics*, COI: WMECH03_044, Tehran, 2016.
- [51] Aghamirzadeh, Gh. R. Khalili, S. M. R. Eslami-Farsani, R. and Saeedi. A., "Experimental Investigation on the Smart Self-Healing Composites Based on the Short Hollow Glass Fibers and Shape Memory Alloy Strips," *Polymer Composites*, Published online: 09 November 2018.
- [52] Ghanbari, H. Khalili, S. M. R. Eslami-Farsani, R. and Mahajan. P., "Experimental Investigation on Flexural Properties of Self-Healing Composites Reinforced by Shape Memory Strip," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Published online: 15 April 2019.
- [53] Toohey, K. S. Sottos, N. R. Lewis, J. A. Moore, J. S. and White, S. R., "Self-Healing Materials with Microvascular Networks," *Nature materials*, Vol. 6, pp. 581-585, 2007.
- [54] Toohey, K. S. Hansen, C. J. Lewis, J. A. White, S. R. and Sottos, N. R., "Delivery of Two-Part Self-Healing Chemistry via Microvascular Networks," *Advanced Functional Materials*, Vol. 19, No. 9, pp. 1399-1405, 2009.
- [55] Hamilton, A. R. Sottos, N. R. and White, S. R., "Self-Healing of Internal Damage in Synthetic Vascular Materials," *Advanced Materials*, Vol. 22, No. 45, pp. 5159-5163, 2010.
- [56] Fifo, O. Ryan, K. and Basu, B., "Glass Fibre Polyester Composite within Vivo Vascular Channel for Use in Self-Healing," *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, 095017, 2014.
- [57] Coope, T. S. Wass, D. F. Trask, R. S. and Bond, I. P., "Metal Triflates as Catalytic Curing Agents in Self-Healing Fibre Reinforced Polymer Composite Materials," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 299, No. 2, pp. 208-218, 2014.
- [58] Norris, C. J. Meadway, G. J. O'Sullivan, M. J. Bond, I. P. and Trask, R. S., "Self-Healing Fibre Reinforced Composites via a Bioinspired Vasculature," *Advanced Functional Materials*, Vol. 21, No. 19, pp. 3624-3633, 2011.
- [59] Trask, R. S. Norris, C. J. and Bond, I. P., "Stimuli-Triggered Self-Healing Functionality in Advanced Fibre-Reinforced Composites," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 1, pp. 87-97, 2013.
- [60] C J Norris, C. J. White, J. A. P. McCombe, G. Chatterjee, P. Bond, I. P. and Trask R. S., "Autonomous Stimulus Triggered Self-Healing in Smart Structural Composites," *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, 094027, 2012.
- [61] Mohammadi, M. A. Babolhavaeji, M. R. Eslami-Farsani, R. and Zamani, M. R., "Effect of Time on Healing Behavior of Microvascular Channels Based Self-Healing E-glass Fibers/Epoxy Composite Under Flexural and Tensile Loadings Condition," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Article in Press, Published online: 11 July 2018.
- [62] Mohammadi, M. A. Eslami-Farsani, R. and Khosravi, H., "On the Mechanical Response of Microvascular-Based Self-Healing E-glass Fiber/Epoxy Composites under Tensile Testing Condition," In Persian, *Journal of Mechanical Engineering (Tabriz University)*, Vol. 49, No. 2, pp. 323-329, 2019.
- [63] Babolhavaeji, M. R. Eslami-Farsani, R. and Khosravi, H., "Micro-Vascular Channel Based Self-Healing Fibrous Composites Under Transverse Loading," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 63-68, 2017.
- [64] Eslami-Farsani, R. Khalili, S. M. R. Khademoltoliat, A. and Saeedi, A., "Tensile and Creep Behavior of Microvascular Based Self-Healing Composites- Experimental Study," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Accepted.
- [65] Kim, S. -R. Getachew, B. A. and Kim, J. -H., "Toward Microvascular Network-Embedded Self-Healing Membranes," *Journal of Membrane Science*, Vol. 531, pp. 94-102, 2017.
- [66] Nasr-Isfahani, M. Tehran, M. A. Latifi, M. Halvaei, M. and Warnet, L., "Experimental and Theoretical Investigation of Hollow Polyester Fibers Effect on Impact Behavior of

- Agent on the Self-Healing Efficiency of Epoxy," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 55, pp. 79-85, 2013.
- [106] Jones, A. R. Blaiszik, B. J. White, S. R. and Sottos, N. R., "Full Recovery of Fiber/Matrix Interfacial Bond Strength Using a Microencapsulated Solvent-Based Healing System," *Composites Science and Technology*, Vol. 79, pp. 1-7, 2013.
- [107] Bolimowski, P. A. Bond, I. P. and Wass, D. F., "Robust Synthesis of Epoxy Resin-Filled Microcapsules for Application to Self-Healing Materials," *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, Vol. 374, 20150083, 2016.
- [108] Tripathi, M. Kumar, D. and Roy, P. K., "Microencapsulation of Reactive Amine by Interfacially Engineered Epoxy Microcapsules for Smart Applications," *Iranian Polymer Journal*, Vol. 26, No. 7, pp. 489-497, 2017.
- [109] Mohammadi, M. A. Eslami-Farsani, R. Ebrahimnezhad-Khaljiri, H. Mirzamohammadi, S. and Zamani, M. R., "Investigating Compression Properties of Healed Sandwich Structure via Epoxy and TETA Microcapsules," *The Biennial International Conference on Experimental Solid Mechanics*, COI: WMECH04_012, Tehran, 2018.
- [110] Eslami-Farsani, R. Najafi, A. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "Investigating the Tensile Behavior of Glass Fibers-Epoxy/Poly Vinyl Chloride Self-Healable Sandwich Panel Containing Capsulated Healing Agent," In Persian, The 27th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers, Tehran, 2019.
- [111] Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., Eslami-Farsani, R. and Arbab Chirani, Sh., "Investigating the Healing Behavior of Glass Fibers-Epoxy/ Capsulated Healing Agent Composite under Tensile Loading," In Persian, The 27th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers, Tehran, 2019.
- [112] Najafi, A. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "Investigating the Healing Behavior of Carbon Fibers-Epoxy/ Capsulated Healing Agent Composite under Transverse Loading," In Persian, The 27th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers, Tehran, 2019.
- [113] Raeesi, M. Mirabedini, S. M. and Farnood, R. R., "Preparation of Microcapsules Containing Benzoyl Peroxide Initiator with Gelatin-Gum Arabic /Polyurea Formaldehyde Shell and Evaluating their Storage Stability," *Applied Materials & Interfaces*, Vol. 9, No. 24, pp. 20818-20825, 2017.
- [114] Silva, A. C. M. Moghadam, A. D. Singh, P. and Rohatgi, P. K., "Self-Healing Composite Coatings Based on In Situ Micro-Nanoencapsulation Process for Corrosion Protection," *Journal of Coatings Technology and Research*, published online, 2017.
- [115] Ullah, H. Azizli, K. Man, Z. B. and Ismail, M. B. C., "Synthesis and Characterization of Urea-Formaldehyde Microcapsules Containing Functionalized Polydimethylsiloxanes," *Procedia Engineering*, Vol. 148, pp. 168-175, 2016.
- [116] Shahabudin, N. Yahya, R. and Gan, S., "Microcapsules Filled with a Palm Oil-based Alkyd as Healing Agent for Epoxy Matrix," *Polymers*, Vol. 8, No. 4, 125, 2016.
- [117] Khalaj Asadi, A. Ebrahimi, M. and Mohseni, M., "Preparation and Characterisation of Melamine-Urea-Formaldehyde Microcapsules Containing Linseed Oil in the Presence of Polyvinylpyrrolidone as Emulsifier," *Pigment & Resin Technology*, Vol. 46, No. 4, pp. 318-326, 2017.
- [118] Cai, X. Fu, D. and Qu, A., "Effects of Fluorinated Silane Compound on the Repeated Self- Healing Properties of Nanocapsules," *Journal of Polymer Research*, Vol. 23, No. 2, 18, 2016.
- [119] Hia, I. L. Chan E.- S. Chai S.- P. and Pasbakhsh P., "Novel Repeated Self-Healing Epoxy Composite with Alginate Multicore Microcapsules," *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 6, pp. 8470-8478, 2018.
- [120] *Composites: Part B* Vol. 43, pp. 95-98, 2012. Park, S. J. Kim, B. J. Seo, D. I. Rhee, K. Y. and Lyu, Y. Y., "Effects of a Silane Treatment on the Mechanical Interfacial Properties of Montmorillonite/Epoxy Nanocomposites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 526, pp. 74-78, 2009.
- [121] ASTM D2344/D2344M: Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. Carbene Complex," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 115, No. 21, pp. 9856-9857, 1993.
- [87] Wright, D. L. Schulte, J. P. and Page, M. A., "An Imine Addition/Ring-Closing Metathesis Approach to the Spirocyclic Core of Halichlorine and Pinnaic Acid," *Organic letters*, Vol. 2, No. 13, pp. 1847-1850, 2000.
- [88] Cho, S. H. Andersson, H. M. White, S. R. Sottos, N. R. and Braun, P. V., "Polydimethylsiloxane- Based Self-Healing Materials," *Advanced Materials*, Vol. 18, No. 8, pp. 997-1000, 2006.
- [89] Van der Weij, F. W., "The Action of Tin Compounds in Condensation-Type RTV Silicone Rubbers," *Die Makromolekulare Chemie*, Vol. 181, No. 12, pp. 2541-2548, 1980.
- [90] Shah, G. B., "Effect of Length of Ligand in Organotin Compounds on Their Catalytic Activity for the Polycondensation of Silicone," *Journal of applied polymer science*, Vol. 70, No. 11, pp. 2235-2239, 1998.
- [91] Frere, Y. Danicher, L. and Gramain, P., "Preparation of Polyurethane Microcapsules by Interfacial Polycondensation," *European polymer journal*, Vol. 34, No. 2, pp. 193-199, 1998.
- [92] Hegeman, A., "Self Repairing Polymers: Repair Mechanisms and Micromechanical Modelling," MSc Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, USA, 1997.
- [93] Rule, J. D. Sottos, N. R. and White, S. R., "Effect of Microcapsule Size on the Performance of Self-Healing Polymers," *Polymer*, Vol. 48, No. 12, pp. 3520-3529, 2007.
- [94] Caruso, M. M. Blaiszik, B. J. Jin, H. Schelkopf, S. R. Stradley, D. S. Sottos, N. R. White, S. R. and Moore, J. S., "Robust, Double-Walled Microcapsules for Self-Healing Polymeric Materials," *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 2, No. 4, pp. 1195-1199, 2010.
- [95] Jackson, A. C. Bartelt, J. A. Marczewski, K. Sottos, N. R. and Braun, P. V., "Silica-Protected Micron and Sub-Micron Capsules and Particles for Self-Healing at the Microscale," *Macromolecular Rapid Communications*, Vol. 32, No. 1, pp. 82-87, 2011.
- [96] Jin, H. Mangun, C. L. Stradley, D. S. Moore, J. S. Sottos, N. R. and White, S. R., "Self-Healing Thermoset Using Encapsulated Epoxy-Amine Healing Chemistry," *Polymer*, Vol. 53, No. 2, pp. 581-587, 2012.
- [97] Jin, H. Miller, G. M. Sottos, N. R. and White, S. R., "Fracture and Fatigue Response of a Self-Healing Epoxy Adhesive," *Polymer*, Vol. 52, No. 7, pp. 1628-1634, 2011.
- [98] Zhao, Y. Fickert, J. Landfester, K. and Crespy, D., "Encapsulation of Self-Healing Agents in Polymer Nanocapsules," *Small*, Vol. 8, No. 19, pp. 2954-2958, 2012.
- [99] Lee, J. Zhang, M. Bhattacharyya, D. Yuan, Y. C. Jayaraman, K. and Mai, Y. W., "Micromechanical Behavior of Self-Healing Epoxy and Hardener-Loaded Microcapsules by Nanoindentation," *Materials Letters*, Vol. 76, pp. 62-65, 2012.
- [100] Nesterova, T. Dam-Johansen, K. Pedersen, L. T. and Kiil, S., "Microcapsule-Based Self-Healing Anticorrosive Coatings: Capsule Size, Coating Formulation, and Exposure Testing," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 75, No. 4, pp. 309-318, 2012.
- [101] Hatami Boura, S. Peikari, M. Ashrafi, A. and Samadzadeh, M., "Self-Healing Ability and Adhesion Strength of Capsule Embedded Coatings-Micro and Nano sized Capsules Containing Linseed Oil," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 75, No. 4, pp. 292-300, 2012.
- [102] Zhu, D. Y. Rong, M. Z. and Zhang, M. Q., "Preparation and Characterization of Multilayered Microcapsule-Like Microreactor for Self-Healing Polymers," *Polymer*, Vol. 54, No. 16, pp. 4227-4236, 2013.
- [103] Lv, Z. and Chen, H., "Analytical Models for Determining the Dosage of Capsules Embedded in Self-Healing Materials," *Computational Materials Science*, Vol. 68, pp. 81-89, 2013.
- [104] Li, Q. Mishra, A. K. Kim, N. H. Kuila, T. Lau, K. -T. and Lee, J. H., "Effects of Processing Conditions of Poly(Methylmethacrylate) Encapsulated Liquid Curing Agent on the Properties of Self-Healing Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 49, pp. 6-15, 2013.
- [105] Li, Q. Siddaramaiah, Q. Li, Kim, N. H. Hui, D. and Lee, J. H., "Effects of Dual Component Microcapsules of Resin and Curing

- [122] ASTM 790–10: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- [123] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., “Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites using Silane-Modified Na⁺-Montmorillonite Nanoclay”, *Polymer Testing*, Vol. 55, 135-142, 2016.
- [124] Kathi, J. and Rhee, K.Y., “Surface Modification of Multi-Walled Carbon Nanotubes using 3-Aminopropyltriethoxysilane”, *Journal of Materials Science*, Vol. 43, pp. 33-37, 2008.
- [125] Sanchez, M. Campo, M. and Jimenez-Suarez, A., “Effect of the Carbon Nanotube Functionalization on Flexural Properties of Multiscale Carbon Fiber/Epoxy Composites Manufactured by VARIM”, *Composite Part B Engineering*, Vol. 45, pp. 1613-1619, 2013.
- [126] He, H. and Gao, F., “Resin modification on Interlaminar Shear Property of Carbon Fiber/Epoxy/Nano-CaCO₃ Hybrid Composites”, *Polymer Composites*, Vol. 38, No. 90, pp. 2035-2042, 2017.



بررسی تجربی رفتار دینامیکی ضربه با سرعت کم در کامپوزیت‌های بافتی ماتریس اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن

فرزین عظیم‌پور شیشه‌ان¹، بابک عبا‌زاده^{2*}

1- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مراغه، واحد مراغه دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب

* صندوق پستی 55517-61167، abazadeh@bonabu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 97/11/15 پذیرش: 98/12/14	در این مقاله عکس‌العمل ضربه با سرعت کم کامپوزیت‌های بافتی تقویت شده با الیاف کربن و ماتریس اپوکسی به صورت تجربی بررسی شده است. صفحات کامپوزیت پس از ساخت تحت تست ضربه با سرعت کم در مقادیر انرژی 20، 30، 50، 60 و 80 ژول قرار گرفته و انرژی آستانه نفوذ و سوراخ شدگی با استفاده از روش پروفایل انرژی مشخص و رفتار کامپوزیت‌های ساخته شده در مواجهه با بارهای ضربه‌ای، با ترسیم نمودارهای نیروی تماس-خیز، نیروی تماس-زمان، خیز-زمان و انرژی-زمان مطالعه گردیده است. نهایتاً اثرات تغییر انرژی بر مقادیر بیشینه نیروی تماس، انرژی جذب شده و خیز نیز بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده روندهای مختلف افزایش نیروی تماس، انرژی جذب شده و خیز با افزایش انرژی ضربه می‌باشد، بطوریکه با افزایش انرژی ضربه تا حدود 60 ژول (آستانه سوراخ شدگی)، انرژی جذب شده روند صعودی داشته و سپس کاهش می‌یابد درحالیکه مقدار نیروی تماس پس از این مقدار ثابت بوده و مقدار خیز با افزایش انرژی ضربه روند صعودی خود را حفظ می‌کند.
کلیدواژگان: ضربه با سرعت کم، کامپوزیت بافتی، الیاف کربن، ماتریس اپوکسی	

An experimental investigation of the low velocity impact behavior of woven carbon-fiber-epoxy composites

Farzin Azimpour Shishevan¹, Babak Abazadeh^{2*}

1-Mechanical Engineering Department, Maragheh Faculty, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

2-Mechanical Engineering Department, University of Bonab, Bonab, Iran.

* P.O.B. 55517-61167, Bonab, Iran, abazadeh@bonabu.ac.ir

Keywords

Low Velocity Impact,
Woven Composite,
Carbon Fiber,
Epoxy Matrix.

Abstract

In this paper, the low velocity impact of woven carbon-fiber-epoxy composites have been investigated experimentally using a number of impact tests. The woven laminates are twill and made by vacuum infusion technique (VARIM). The low velocity impact tests were carried out with different impact energies of 20, 30, 50, 60 and 80 J to find the penetration and perforation threshold energies using profile energy method. Then the impact behavior of the samples was studied using drawn diagrams of contact force-deflection, contact force-time, deflection-time, and energy-time to investigate the effect of the energy of impact and its' variations on the maximum contact force, absorbed energy and deflection in the woven Carbon-Fiber-Epoxy Composites. The results show that the contact force, absorbed energy and deflection increases when the applied impact energy increases up to 60 J. It is worth mentioning that the observed enhancement trends of the contact force, absorbed energy and deflection are different from each other.

1- مقدمه

کامپوزیت‌ها شونده که با چشم غیرمسلح قابل‌رؤیت نباشند ولی آسیب‌های ایجاد شده در ساختار داخلی آن‌ها ممکن است باعث کاهش خصوصیات مکانیکی این مواد گردیده و در نهایت خسارات جبران‌ناپذیری را در حین کار به وجود بیاورند. از این‌رو بررسی دلایل و نحوه به وجود آمدن این نوع آسیب‌دیدگی‌ها جهت پیش‌بینی عواقب و کاهش خسارات به وجود آمده بسیار ضروری می‌باشد. استفاده از الیاف کربن در ساختار قطعات ساخته شده از

به‌طور کلی می‌توان گفت که تمام مواد کامپوزیتی در طول فرآیند ساخت و کاربرد در معرض بارهای ضربه‌ای با انرژی‌های مختلف قرار می‌گیرند [1، 2]. این بارهای ضربه‌ای ممکن است از برخوردهای بسیار طبیعی روزانه و یا حتی افتادن ابزارآلات ناشی شوند. اعمال بارهای ضربه‌ای (حتی با انرژی‌های پایین) ممکن است باعث به وجود آمدن خسارت‌هایی در ساختار خارجی و داخلی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Azimpour Shishevan, F. and Abazadeh, B., "An experimental investigation of the low velocity impact behavior of woven carbon-fiber-epoxy composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 571-580, 2020.

کامپوزیت‌های پلیمری در صنایع هوافضا، دریانوردی و اتومبیل‌سازی به دلیل خصوصیات مکانیکی مناسب آن‌ها گسترش یافته است که می‌توان به چگالی کم، مقاومت ویژه و مدول الاستیسیته بالای این الیاف اشاره نمود [3، 4]. این نوع کامپوزیت‌ها علاوه بر خصوصیات مکانیکی بالا به دلیل خصوصیات حرارتی الیاف کربن همانند هدایت حرارتی بالا¹ و پایداری حرارتی² دارای مشخصات حرارتی قابل قبولی نیز می‌باشند. علاوه بر این، این نوع از کامپوزیت‌ها دارای پایداری ابعادی خوب³ [5، 6] و مقاومت به خستگی مکانیکی⁴ بالایی نیز می‌باشند. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن و حساسیت این نوع کامپوزیت‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای که از حساسیت الیاف کربن در مقابل ضربه ناشی می‌شود، مطالعات گسترده‌ای در مورد رفتار این نوع کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای صورت پذیرفته است [7-9]. تست‌های ضربه بر اساس انرژی و سرعت پرتابه در سه نوع مختلف دسته‌بندی می‌شوند. تست ضربه با سرعت کم⁵، تست ضربه با سرعت زیاد⁶ و تست ضربه با سرعت خیلی زیاد⁷، هسور و همکارانش [10] در تحقیقی که در این زمینه انجام داده‌اند به بررسی رفتار تجربی ضربه با سرعت پایین بر روی کامپوزیت‌های با زمینه اپوکسی و تقویت‌شده با دو نوع الیاف کربن و شیشه پرداخته‌اند. آن‌ها به بررسی تأثیرات نوع بافت الیاف در رفتار ضربه با سرعت کم کامپوزیت پرداخته و در این زمینه رفتار کامپوزیت‌ها با دو نوع بافت مختلف شامل بافت ساده⁸ و بافت جناغی⁹ را مقایسه کرده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده کامپوزیت‌های با نوع بافت جناغی رفتار ضربه بهتری نسبت به نوع بافت ساده از خود نشان داده‌اند. الهه کاظمی خسرق و همکارانش [11] اثر اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن با عامل سیلان بر روی رفتار ضربه سرعت بالای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نانوصفحات گرافن اصلاح نشده و اصلاح شده برای تقویت نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت استفاده شدند و در ادامه اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن با استفاده از طیف سنجی مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون ضربه سرعت بالا نشان داد که استفاده از نانوصفحات گرافن اصلاح شده با عامل سیلان تأثیر بسزایی بر عملکرد مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف بازالت داشته است. مطالعات میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده این مطلب بود که افزایش انتقال بار بین الیاف تقویت‌کننده و زمینه پلیمری کامپوزیت ناشی از توزیع نانوصفحات گرافن تأثیر خصوصی در بهبود رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها داشته است. ایچتن و همکارانش [12] رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت‌های تک‌جهته پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه را با استفاده از روش پروفایل انرژی¹⁰ در دمای پایین بررسی کردند. فرامرز آشنای قاسمی و همکارانش [13] تأثیر نانو ذرات اکسید تیتانیوم بر استحکام ضربه، کشش و مدول الاستیک ترکیبات پایه پلی پروپیلن/پلی اتیلن خطی با چگالی کم را بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم تا 2 درصد وزنی مدول الاستیسیته و استحکام ضربه را افزایش می‌دهد اما تأثیر چندانی بر استحکام کششی ندارد و حضور بیش از 2 درصد وزنی نانو ذرات تا 4 درصد وزنی باعث کاهش خواص مذکور می‌شود. همچنین مشاهده گردید که حضور نانو ذرات با درصد وزنی کم (حدود 2 درصد وزنی)، تقریباً 7 درصد استحکام ضربه و مدول الاستیک ترکیبات را افزایش می‌دهد. منصور باوفا بیگدیلو و همکاران [14] تأثیر افزودن نانولوله کربنی چند

جداره بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کولار و الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا با چیدمان لایه لایه را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که جذب انرژی برای نمونه حاوی 10 درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو افزایش یافته است. توزیع مناسب نانولوله کربنی و انتقال تنش بین الیاف و زمینه باعث افزایش لایه لایه شدگی و جذب انرژی بیشتر شد. همچنین نتایج میکروسکوپی نشان داد در 10 درصد وزنی نانولوله کربنی با ایجاد پدیده‌های پل زنی ترک و بیرون کشیدگی نانولوله جذب انرژی در کامپوزیت هیبریدی افزایش یافته است. عمویی دیزجی و همکارانش [15] تأثیر افزودن نانو ذرات سیلیکا و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره بر پاسخ ضربه سرعت پایین مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش ضربه سرعت پایین نشان دهنده این بود که نانو لوله‌های کربنی موجب بهبود عملکرد مواد مرکب فیبر-فلز شده، همچنین تأثیر نانو لوله‌های کربنی چند دیواره در بهبود خواص ضربه کامپوزیت چند لایه فیبر-فلز بهتر از تأثیر نانو سیلیکا است. چسبندگی و پخش شوندگی بهتر نانو لوله‌های کربنی و ایجاد اتصال بین لایه‌های قوی یکی دیگر از عوامل تأثیر گذار در پاسخ ضربه نمونه تقویت شده با نانو لوله کربن چند دیواره نسبت به نانو سیلیکا می‌باشد. در تحقیق دیگری حامد خسروی و همکارانش [16] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت را بررسی نمودند. به منظور بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها آزمون‌های کشش و خمش سه‌نقطه‌ای روی آن‌ها صورت پذیرفت. همچنین برای بررسی مکانیزم شکست کامپوزیت‌ها از میکروسکوپ روبشی الکترونی گسیل میدانی استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیشترین میزان بهبود در خواص استحکام کششی، استحکام خمشی و همچنین جذب انرژی مربوط به نمونه حاوی 0/3 درصد وزنی نانولوله کربنی بود و از طرفی مدول کششی و خمشی نمونه‌ها با افزودن نانولوله‌ها روند افزایشی از خود نشان دادند. بررسی‌های میکروسکوپی موید این واقعیت بودند که افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در زمینه باعث بهبود خواص فصل مشترکی بین الیاف بازالت و زمینه نانوکامپوزیتی شده است. سید امیرحسین کرسوی کاشانی و رضا اسلامی فارسانی [17] کامپوزیت چند مقیاسی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت حاوی مجموعاً 1٪ وزنی زمینه از نانو ذرات سیلیکا و نانو صفحات گرافن اصلاح سطحی شده را تحت آزمون ضربه سرعت بالا قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه حاوی 0/7٪ نانوسیلیکا و 0/3٪ نانوغرافن بهترین عملکرد را در جذب انرژی حاصل از ضربه سرعت بالا نسبت به نمونه بدون نانو مواد از خود نشان می‌دهد. میثم نوری نیارکی و همکارانش [18]، خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه ماتریسی از دو فاز پلیمری پلی‌پروپیلن و اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر، تقویت شده با نانوصفحات گرافن و الیاف شیشه را بررسی کردند. مشاهده شد که با حضور الیاف شیشه، استحکام ضربه 46 درصد افزایش یافته و استحکام کششی نسبت به ترکیب پایه پلی‌پروپیلن اندکی افزایش می‌یابد. همچنین حضور مقادیر پایین نانو صفحات گرافن، استحکام ضربه را 16 درصد افزایش می‌دهد. این در حالی است حضور مقادیر بالای این میزان، استحکام ضربه و استحکام کششی را می‌کاهد. در تحقیق حاضر، رفتار کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن با نسبت حجمی الیاف به ماتریس 60 به 40 و تعداد 10 لایه تشکیل‌دهنده

⁶ High velocity impact⁷ Ballistic impact⁸ Plain weave⁹ Twill weave¹⁰ Profile energy method¹ Thermal conductivity² Thermal stability³ Dimensional stability⁴ Mechanical fatigue strength⁵ Low velocity impact

مقاومت کششی و مدول الاستیسیته اپوکسی مورد استفاده به ترتیب 72 و 2940 مگاپاسکال بوده و عملیات پخت^{۱۲} آن در دمای 80 °C و به مدت 8 ساعت انجام گردید.

نسبت حجمی الیاف به ماتریس در ساختار کامپوزیت 60 به 40 بوده و تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده کامپوزیت 10 لایه می‌باشد. صفحات کامپوزیتی در ابعاد 700×700 میلی‌متر مربع ساخته شده و عملیات برشکاری جهت ساخت نمونه‌های تست با استفاده از جت آب^{۱۳} انجام شده که بر اساس استاندارد ASTM D 7136 برای تست ضربه ابعاد 10×10×8 سانتی‌متر مکعب و برای تست کشش^{۱۴} ابعاد 25×2/5×0/25 سانتی‌متر مکعب بر اساس استاندارد ASTM D 3039 انتخاب شده است (شکل 3b) [19].

3- تست ضربه با سرعت کم

تست ضربه با سرعت کم بر اساس استاندارد ASTM D7136 و با استفاده از دستگاه ضربه سقوط آزاد^{۱۵} فرکتویس پلاس^{۱۶} در آزمایشگاه ضربه گروه مهندسی مکانیک دانشگاه دوکوز ایلول واقع در ازمریر ترکیه انجام شد. این دستگاه متصل به یک نرم‌افزار اندازه‌گیری خودکار بوده و قادر به انجام تست ضربه در انرژی‌های مختلف و ثبت اطلاعات تست از جمله نیروی تماس، انرژی جذب‌شده، خیز و سرعت پرتابه بر حسب زمان می‌باشد. دستگاه دارای قابلیت تحمل بار 22/4 کیلو نیوتن بوده و قطر سوراخ فیکسچر پنوماتیکی نگهدارنده نمونه آن 76/2 میلی‌متر می‌باشد. دماغه پرتابه از نوع کروی^{۱۷} با قطر 12/76 میلی‌متر بوده و جرم آن 4/906 کیلوگرم می‌باشد. در این تحقیق جهت تشخیص انرژی آستانه شکست کامپوزیت از روش پروفایل انرژی استفاده گردید و نمونه‌ها تحت ضربات با میزان انرژی‌های مختلف مورد هدف قرار گرفت و با استفاده از تعداد تست‌های مختلف و روش سعی و خطا، انرژی آستانه فرورفتگی و سوراخ شدگی تعیین گردید.

4- تست کشش

تست کشش بر اساس استاندارد ASTM D3039 و با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال شیمادز^{۱۸} مدل AGIS100 در لابراتوار مقاومت مصالح گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آتاتورک واقع در ارزروم ترکیه انجام شد. ظرفیت اعمال نیروی دستگاه کشش مورد استفاده 10 کیلو نیوتن بوده و سرعت اعمال بار 1 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. تصویر دستگاه کشش و ضربه استفاده شده در شکل 4 نشان داده شده است.

5- نتایج و بحث

مقدار انرژی لازم جهت انجام تست ضربه از مهم‌ترین پارامترهایی است که بایستی قبل از آغاز تست‌های اصلی مشخص شود که در تحقیق حاضر، این انرژی با استفاده از روش پروفایل انرژی تعیین گردید [20]. در این روش، نمونه‌های ماده مورد نظر با انرژی‌های مختلف که از مقادیر کم آغاز می‌شدند مورد اصابت پرتابه قرار گرفتند. هدف از این مرحله تشخیص انرژی آستانه فرورفتگی^{۱۹} و سوراخ شدگی^{۲۰} می‌باشد. انرژی آستانه فرورفتگی مقدار انرژی

کامپوزیت، در انرژی‌های مختلف ضربه مورد بررسی قرار گرفته اند. با انجام این تست‌های آزمایشگاهی، منحنی‌های نیروی تماسی-خیز، نیروی تماسی-زمان، انرژی جذب‌شده-زمان و خیز-زمان برای انرژی‌های مختلف بدست آمده و ترسیم شده تا رفتار کامپوزیت با به کارگیری پارامترهای کلیدی ضربه با سرعت کم از جمله بیشینه نیروی تماسی، بیشینه انرژی جذب‌شده و بیشینه خیز در انرژی‌های مختلف بدست آید.

2- ساخت کامپوزیت

کامپوزیت مورد استفاده جهت انجام تست ضربه از نوع بافتی با شکل بافت جناغی^{۱۲/۲} می‌باشد که مطابق شکل 1 در این نوع بافت دو عدد پود^۲ از زیر یک تار^۳ عبور کرده است و این روش بافت برای کل سیستم تقویت‌کننده تکرار شده است. الیاف کربن مورد استفاده جهت تقویت کامپوزیت از شرکت اسپینتکس واقع در دنیزلی ترکیه خریداری گردیده و با استفاده از روش وکیوم اینفیوژن^۴ در شرکت فیبرمارک واقع در شهر ازمریر ترکیه ساخته شد. برای این منظور، پارچه‌های بافته شده الیاف^۵ در اندازه‌های یکسان بریده شده و مطابق شکل شماتیک 2، بر روی لایه جداکننده^۶ در دستگاه وکیوم اینفیوژن چیده شدند.

سپس لایه تسهیل‌کننده^۷ نفوذ اپوکسی و لایه خلأ^۸ بر روی آن‌ها کشیده شده و با استفاده از باندهای خلأ^۹ به صورت کامل از محیط ایزوله گردیده و تحت فشار 1- اتمسفر قرار گرفتند. در طول پروسه تولید، اپوکسی در اثر کشش ایجاد شده توسط خلأ به وجود آمده توسط پمپ خلأ در سوی دیگر دستگاه، وارد فضای ایزوله شده گردیده و با عبور از میان طبقات کامپوزیت سبب پخش متقارن اپوکسی میان الیاف گردید (شکل 3a). اپوکسی مورد استفاده از نوع آرال دیت^{۱۱} 1564 با سخت کننده آرادور^{۱۱} 3487 بوده و از شرکت هانتسمن واقع در ایالات متحده خریداری گردید.

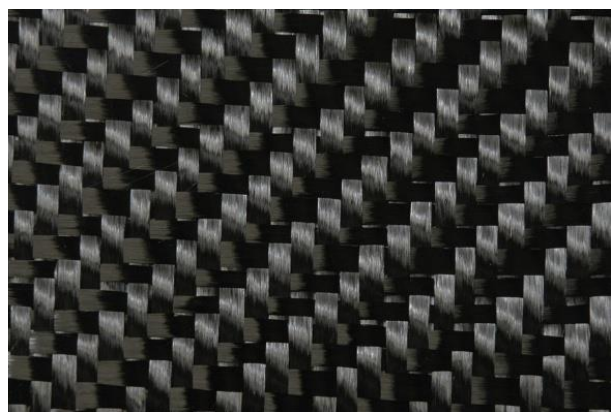


Fig. 1 Twill 2/2 shape of carbon fibres

شکل 1 تصویر بافت جناغی 2/2 الیاف کربن

- 1 Twill 2/2
- 2 Weft
- 3 Warp
- 4 Vacuum Assisted Resin Infusion Molding
- 5 Woven fabrics
- 6 Separator
- 7 Peel-ply
- 8 Plastics bag
- 9 Sealant tape
- 10 Araldite 1564

- 11 Aradur 3487
- 12 Curing
- 13 Water jet
- 14 Tensile test
- 15 Drop weight
- 16 Fractvis plus
- 17 Hemispherical
- 18 Shimadzu
- 19 Penetration threshold energy
- 20 Perforation threshold energy

می‌باشد که در این حالت پرتابه در داخل نمونه فرو می‌رود و بدین ترتیب تمام انرژی پرتابه توسط نمونه جذب می‌شود [21].

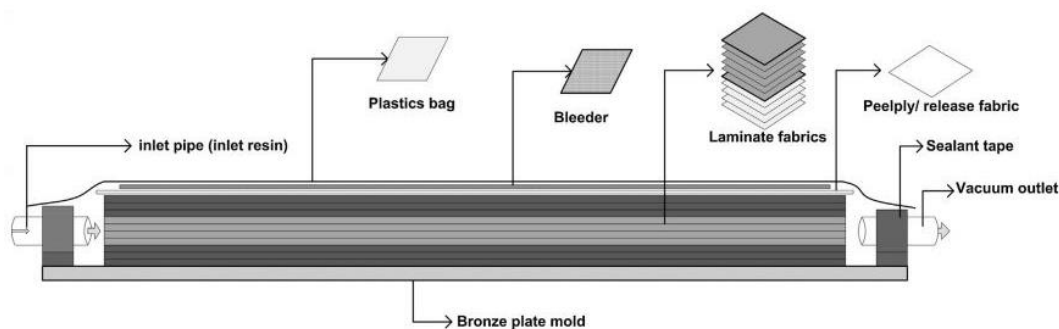


Fig. 2 Schematic layout of the VARTM set-up

شکل 2 شکل شماتیک ساخت کامپوزیت به روش وکیوم اینفیوژن

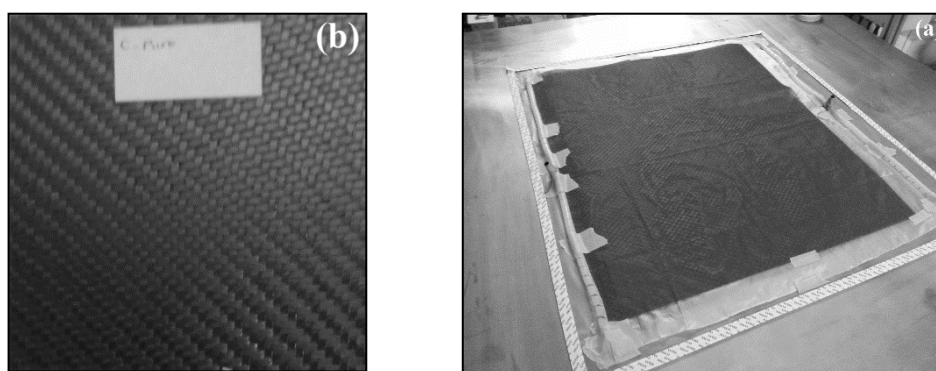


Fig. 3 a) Composite plate made by vacuum infusion technique, b) composite specimen for impact test

شکل 3 (a) ساخت کامپوزیت با روش وکیوم اینفیوژن، (b) نمونه کامپوزیتی تست ضربه

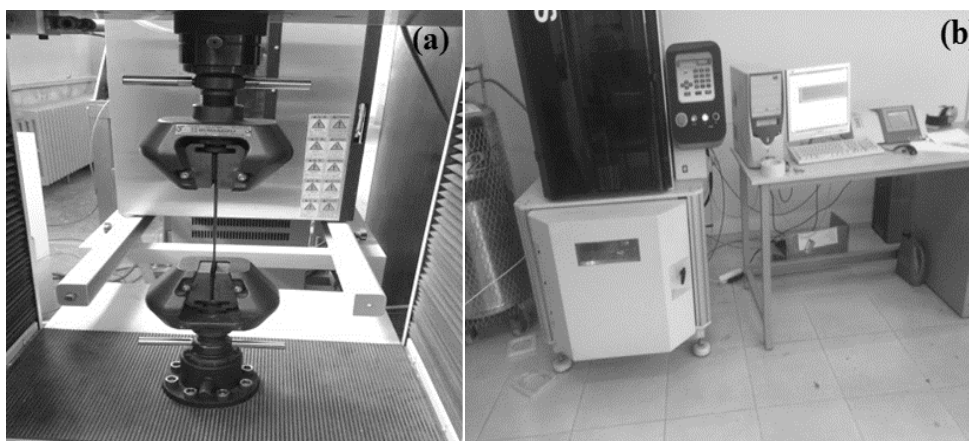


Fig. 4 a) Tensile test instrument, b) impact test instrument

شکل 4 تصویر دستگاه‌های استفاده شده، (a) تست کشش، (b) تست ضربه

جهت به دست آوردن انرژی آستانه فرو رفتگی و سوراخ شدگی ورق کامپوزیتی، 5 تست با انرژی‌های مختلف انجام شد. سه تست اول با انرژی‌های 20، 30 و 50 ژول انجام شد که در این تست‌ها مقدار انرژی ضربه جهت سوراخ کردن نمونه کافی نبود و پرتابه پس از برخورد با نمونه مقداری از انرژی خود

در این حالت مقدار انرژی جذب شده با انرژی ضربه برابر بوده و نقطه انرژی¹ بر روی خط انرژی معادل² قرار می‌گیرد. انرژی آستانه سوراخ شدگی حداقل انرژی لازم برای عبور پرتابه از نمونه می‌باشد [22]. نمودار پروفایل انرژی برای کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن در شکل 5 داده شده است.

² Equal energy line

¹ Energy point

در ساختار کامپوزیت نسبت به انرژی لازم جهت ترک^۴ است که این نسبت اصطلاحاً ضریب سستی^۵ نامیده می‌شود [5]. تغییرات خیز برحسب زمان برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول بارگذاری ضربه با سرعت کم در شکل 8 نمایش داده شده است.

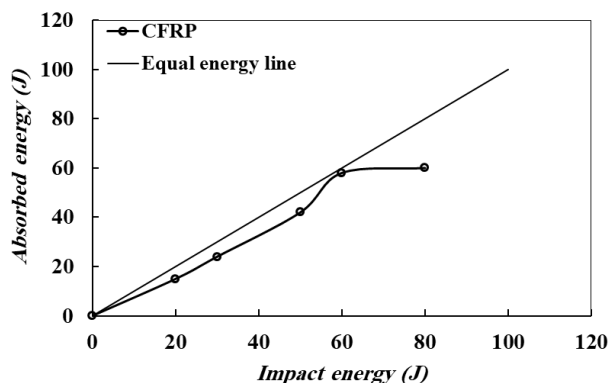


Fig. 5 Energy profile of carbon-fiber-epoxy composites

شکل 5 پروفایل انرژی کامپوزیت با زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن

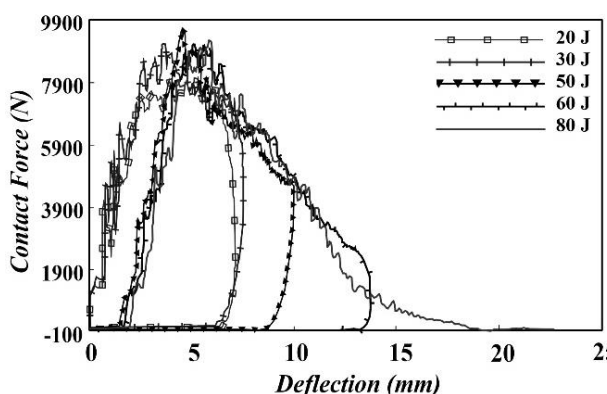
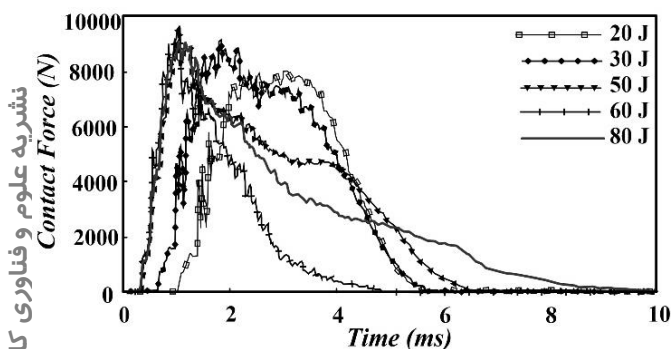


Fig. 6 Contact force- deflection diagram of carbon-fiber-epoxy composites

شکل 6 منحنی نیروی تماس-خیز کامپوزیت با زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن



⁴ Crack initiation

⁵ Ductility index

¹ Rebounding

² Peak load

³ Cracks

را به آن داده و از سطح نمونه بازگردید. در این حالت نقطه انرژی در قسمت زیر خط انرژی معادل قرار گرفت. با افزایش مقدار انرژی ضربه تا مقدار 60 ژول همان‌گونه که از شکل 5 نیز قابل مشاهده است نقطه انرژی بر روی خط انرژی معادل قرار گرفت که در این حالت تمامی انرژی پرتابه توسط نمونه جذب شده و پرتابه در نمونه فرو رفت. به این مقدار انرژی آستانه فرورفتگی گفته می‌شود. با افزایش انرژی ضربه تا مقدار 80 ژول پرتابه پس از برخورد با نمونه آن را سوراخ کرده و از آن عبور کرد. در این حالت که با نقطه انرژی 5 نمایش داده شده است انرژی جذب‌شده توسط نمونه در طی فرایند ضربه کمتر از انرژی ضربه بوده است. به عبارت دیگر پروفایل انرژی نشان داده شده در شکل 5 حاصل تست‌هایی است که برای هر جنس نمونه قبل از تست ضربه اصلی برای مشخص شدن مقاومت آن انجام می‌شود. در این نمودار انرژی ضربه در ابتدا کم بوده و رفته رفته انرژی اعمالی بیشتر می‌شود تا جایی که وزنه در نمونه فرو رود که در این حالت انرژی ضربه با انرژی جذب شده توسط نمونه برابر خواهد بود. در انرژی‌های پایین‌تر از این مقدار انرژی جذب شده کمتر از انرژی ضربه بوده و بعد از این نقطه به دلیل نفوذ وزنه در نمونه، مجدداً انرژی جذب شده کم می‌شود.

نمودار نیروی تماس-خیز نمونه کامپوزیتی که در انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول تحت بارگذاری ضربه با سرعت کم قرار گرفته‌اند، در شکل 6 نشان داده شده است. در حالت کلی نمودار نیروی تماس-خیز دارای دو حالت باز و بسته می‌باشد [23]. در هنگام برخورد پرتابه با سطح نمونه در طی فرایند ضربه سه حالت ممکن است رخ دهد. در حالت اول، انرژی ضربه جهت ورود پرتابه به نمونه کافی نمی‌باشد که در این حالت پرتابه پس از برخورد با نمونه مقداری از انرژی خود را به آن داده و پس از برخورد در جهت مخالف حرکت می‌کند. در این حالت ممکن است نمونه در طی فرایند ضربه دچار آسیب‌دیدگی‌های جزئی و یا کلی شود که به این حالت بازخورد^۱ گفته می‌شود [24]. همان‌گونه که از شکل 6 مشخص است منحنی نیروی تماس-خیز در این حالت بسته می‌باشد و منحنی پس از صفر شدن مقدار نیرو تا مبدأ یعنی مقدار خیز صفر ادامه پیدا کرده است و برای ضربه با انرژی‌های کمتر از 60 ژول حالت بازخورد رخ داده است.

با افزایش انرژی ضربه تا 80 ژول (همان‌گونه که در پروفایل انرژی در شکل 3 نیز قابل مشاهده است) پرتابه در داخل نمونه فرورفته و حالت نفوذ رخ می‌دهد. در این حالت نیز منحنی نیروی تماس-خیز بسته است با این تفاوت که با صفر شدن نیرو مقدار خیز صفر نمی‌شود. با افزایش انرژی ضربه منحنی نیروی تماس-خیز از حالت بسته به حالت باز تبدیل می‌شود که در این حالت مقداری از انرژی ضربه در اثر اصطکاک بین پرتابه و نمونه تلف می‌شود. نتایج دیگر تست ضربه نمودار نیروی تماس-زمان می‌باشد که برای نمونه‌های کامپوزیتی که در انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول تحت بارگذاری ضربه با سرعت کم قرار گرفته‌اند در شکل 7 نشان داده شده است.

با توجه به منحنی‌های نیرو برحسب زمان نمایش داده شده در شکل 7، با افزایش مقدار انرژی ضربه، مقادیر بیشینه نیرو نیز افزایش می‌یابد. درعین حال با افزایش انرژی ضربه، زمان رخ دادن بیشینه نیرو^۲ کاهش یافته و در انرژی 80 ژول به کمترین مقدار خود می‌رسد [10]. از دیگر اثرات افزایش انرژی ضربه می‌توان به خروج منحنی نیرو برحسب زمان از حالت متقارن اشاره نمود که بیانگر افزایش نسبت انرژی لازم برای به وجود آمدن ترک‌ها^۳ و لایه‌لایه شدن

رسیده است. با ادامه افزایش انرژی ضربه تا آستانه فرورفتگی نرخ افزایش نیروی تماسی میان پرتابه و نمونه کاهش یافته و به حدود 5 درصد می‌رسد. نهایتاً با افزایش انرژی ضربه به مقدار 80 ژول که آستانه سوراخ شدگی می‌باشد این روند ادامه یافته و مقدار نیروی تماسی با 2/37 درصد افزایش به 9960 نیوتن می‌رسد. مقادیر بیشینه انرژی جذب‌شده برای ضربات با انرژی‌های مختلف در شکل 11 مقایسه شده‌اند.

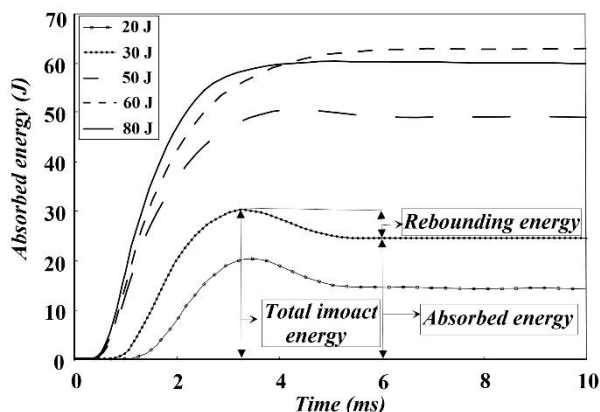


Fig. 9 Absorbed energy- time diagram of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 9 نمودار انرژی-زمان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های مختلف

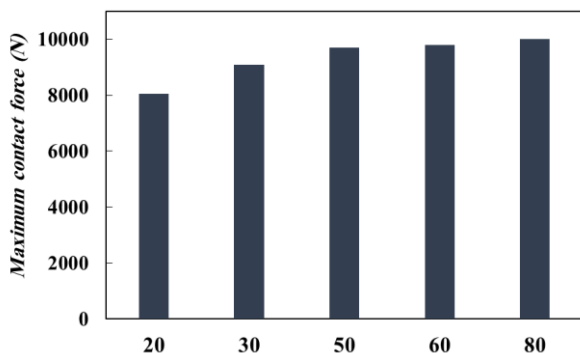


Fig. 10 Maximum contact force of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 10 مقادیر ماکزیمم نیروی تماس در ضربه با انرژی‌های مختلف

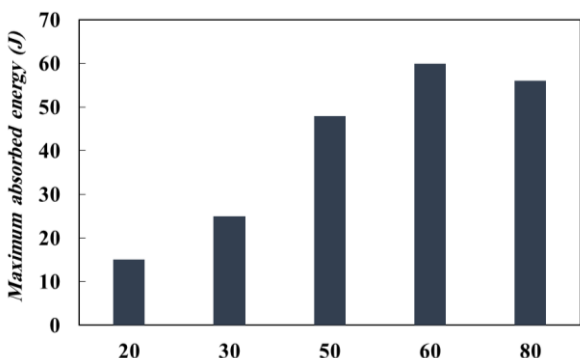


Fig. 11 Maximum absorbed energy of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 11 مقادیر بیشینه انرژی جذب‌شده در ضربه با مقادیر انرژی‌های مختلف

Fig. 7 Contact force- time diagram of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 7 نمودار نیروی تماس-زمان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های مختلف

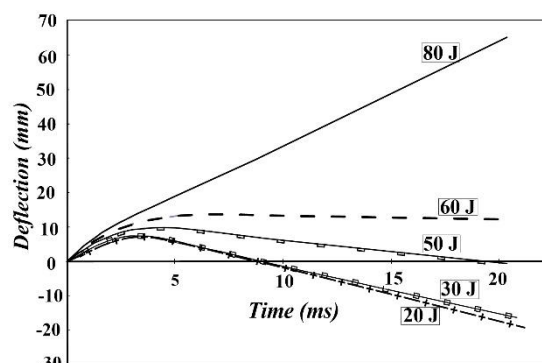


Fig. 8 Deflection- time diagram of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 8 نمودار خیز برحسب زمان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های مختلف

نمودار خیز-زمان نیز مشابه نیرو-خیز می‌تواند حاوی اطلاعاتی در مورد عکس‌العمل نمونه در مقابل بار ضربه‌ای باشد. با توجه به منحنی‌های موجود در نمودار شکل 6 می‌توان به تفاوت حالت‌های مختلف بارگذاری ضربه‌ای شامل بازخورد، فرورفتگی و سوراخ شدگی پی برد. در آزمایش‌های انجام‌شده با انرژی‌های 20، 30، و 50 ژول، پرتابه پس از برخورد به سطح نمونه تغییر جهت داده و به حرکت خود ادامه داده است که در این حالت منحنی ضربه در ابتدا صعودی بوده و دارای شیب مثبت می‌باشد ولی پس از برخورد با سطح نمونه تغییر جهت داده و شیب نمودار منفی می‌شود. در حالت فرورفتگی منحنی در ابتدای حرکت دارای شیب مثبت است و پس از برخورد با نمونه و فرو رفتن در آن شیب تقریباً صفر شده و نمودار افقی می‌شود که این حالت در ضربه با انرژی 50 ژول رخ داده است. در ضربه با انرژی 80 ژول سوراخ شدگی روی داده و شیب منحنی خیز-زمان در کل فرایند تست ضربه مثبت می‌ماند با این تفاوت که شیب منحنی در زمان‌های قبل از برخورد بیشتر از حالت بعد از سوراخ شدگی است. شکل 9 نمودارهای انرژی جذب‌شده-زمان نمونه‌های کامپوزیتی را برای انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول تحت بارگذاری با سرعت کم نشان می‌دهد. به‌طور کلی منحنی انرژی برحسب زمان بیانگر تمامی نکات موجود در مورد وضعیت انرژی‌های جذب‌شده، انرژی برگشت و انرژی کل ضربه است. با توجه به نتایج شکل 9 و با در نظر گرفتن منحنی انرژی برای تست ضربه با انرژی 30 ژول می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت انرژی کل ضربه برای نفوذ به نمونه کافی نبوده و پس از تماس پرتابه با سطح نمونه در طی فرایند ضربه، مقداری از انرژی آن توسط نمونه جذب‌شده و سپس جهت حرکت پرتابه عوض می‌شود. میزان انرژی صرف شده در این مرحله انرژی بازخورد نامیده می‌شود که تبدیل به انرژی جنبشی شده و سبب بازگشت پرتابه از سطح نمونه می‌گردد. همچنین مقدار انرژی برگشت تفاضل انرژی کل ضربه و انرژی جذب‌شده توسط نمونه معادل خواهد بود [25].

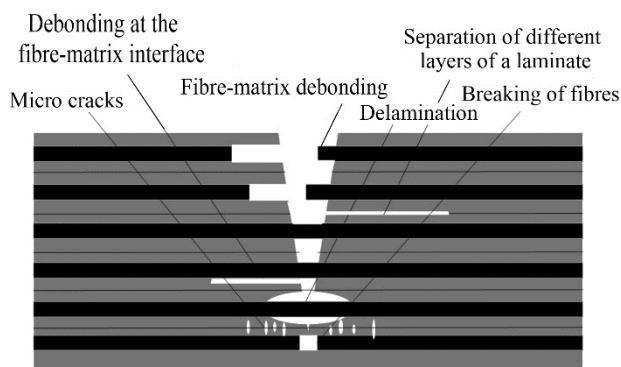
در حالت کلی همان‌گونه که از نتایج شکل 10 می‌توان استنباط نمود نیروی تماس بیشینه میان پرتابه و نمونه، با افزایش مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد. مقدار نیروی تماسی در حالت ضربه با انرژی 20 ژول 8040 نیوتن بوده که با افزایش انرژی ضربه به 30 ژول با 14/18 درصد افزایش به 9180 نیوتن

Fig. 12 Maximum deflection of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

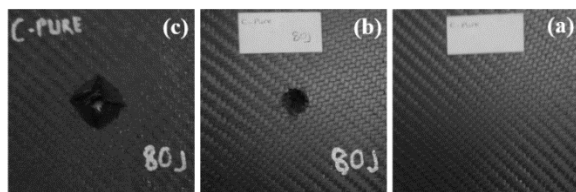
شکل 12 مقادیر ماکزیمم خیز در ضربه با انرژی‌های مختلف

Table 1 Maximum contact force and deflection of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

انرژی ضربه (ژول)	20	30	50	60	80
بیشینه نیروی تماس (نیوتن)	8.04	9.18	9.64	9.73	9.96
بیشینه خیز (میلی‌متر)	6.99	5.86	5.54	5.04	4.85
بیشینه انرژی جذب‌شده (ژول)	14.71	24.64	49.15	59.87	55.4

**Fig. 13** Failure modes of composite specimens in impact tests

شکل 13 موده‌های شکست مواد کامپوزیت در تست ضربه

**Fig. 14** Carbon-fiber-epoxy composite impact test specimen, a) rough test specimen, b) front face of damaged specimen, c) back face of damaged specimen

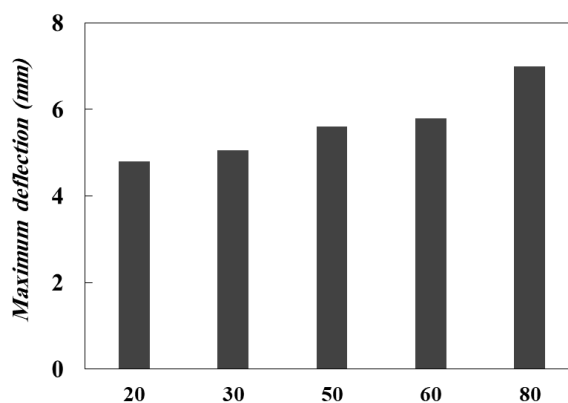
شکل 14 نمونه تست ضربه از جنس کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن، (a) نمونه تست ضربه، (b) سطح جلویی نمونه آسیب دیده، (c) سطح پشت نمونه آسیب دیده

تصاویر مربوط به جلو و پشت نمونه آسیب دیده کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن در اثر تست ضربه با سرعت پایین در شکل 14 نمایش داده شده است. با توجه به سطوح شکست به وجود آمده در نمونه نمایش داده شده در شکل 14 می‌توان به ماهیت شکست کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در اثر ضربه تا حدودی پی برد. با دقت در نوع سوراخ ایجادشده که در سطح جلویی نمونه که به شکل دایره است و با توجه به سطح پشت نمونه می‌توان به وقوع شکست ترد در این نوع از کامپوزیت‌ها اذعان کرد. اکثر مدهای شکست بحث شده در شکل 13 در این نمونه‌ها رخ داده است اما نتایج نشان دادند که اصلی‌ترین مود شکست رخ داده، شکست ترد فاز تقویت‌کننده یا همان الیاف کربن می‌باشد.

همان‌گونه که نتایج شکل 11 نشان می‌دهند بیشینه انرژی جذب‌شده توسط نمونه با افزایش مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه انرژی در حالت ضربه با انرژی 20 ژول 14/71 ژول بوده که با افزایش انرژی ضربه به 30 ژول با 67/5 درصد افزایش به 22/64 ژول رسیده است. با ادامه افزایش انرژی ضربه تا 50 و 60 ژول که آستانه فرورفتگی می‌باشد بیشینه انرژی جذب‌شده 50 و 143 درصد افزایش یافته و به ترتیب به مقادیر 49/15 و 59/87 ژول می‌رسد. به عبارت دیگر با نزدیک شدن به مرحله فرورفتگی، نرخ افزایش انرژی جذب‌شده بیشتر می‌شود و نسبت بزرگ‌تری از کل انرژی جذب می‌شود. درحالی‌که با افزایش انرژی ضربه به مقدار 80 ژول که آستانه سوراخ شدگی می‌باشد مقدار بیشینه انرژی با 6/77 درصد کاهش به 55/43 ژول می‌رسد که نشان‌دهنده کاهش انرژی جذب‌شده ضربه توسط نمونه می‌باشد. مقادیر ماکزیمم خیز برای انرژی‌های مختلف در شکل 12 مقایسه شده‌اند.

با توجه به نتایج، افزایش مقدار خیز ناشی از ضربه در نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن کاملاً مشهود است. مقدار کمینه خیز برای تست ضربه با انرژی 20 ژول 4/85 میلی‌متر بوده که با افزایش انرژی ضربه این مقدار نیز افزایش می‌یابد. البته این افزایش خطی نبوده و با نزدیک شدن به آستانه سوراخ شدگی مقدار افزایش خیز شیب تندتری به خود می‌گیرد. مقادیر دقیق نتایج تست برای به دست آوردن بیشینه نیروی تماسی، بیشینه انرژی جذب‌شده و بیشینه خیز در انرژی‌های مختلف برای کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن در جدول 1 داده شده است.

شکل 13 موده‌های شکست احتمالی مواد کامپوزیت در فرایند تست ضربه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در بارگذاری ضربه‌ای پرتابه با مقدار انرژی مشخص (که می‌تواند از دستگاه ضربه به جسم منتقل شده و یا اینکه در اثر سقوط آزاد پرتابه از یک ارتفاع و تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی در آن ذخیره شده باشد) با نمونه هدف برخورد کرده و انرژی خود را به نمونه انتقال می‌دهد. انرژی جذب‌شده توسط نمونه می‌تواند به طرق مختلف در داخل نمونه مصرف گردد. از موارد مصرف انرژی در داخل نمونه کامپوزیتی می‌توان به مواردی همچون ایجاد میکروترک‌ها در داخل ماتریس و یا فصل مشترک بین الیاف و ماتریس، جدایش، لایه‌لایه شدن در ناحیه فصل مشترک بین الیاف و ماتریس، لایه‌لایه شدن بین لایه‌های تشکیل‌دهنده کامپوزیت اشاره کرد که در این حالت‌ها انرژی جذب‌شده توسط نمونه صرف ایجاد سطوح جدید می‌گردد [26]. کشیده شدن الیاف از داخل ماتریس، شکست الیاف در اثر به وجود آمدن نیروهای کششی و فشاری در ساختار داخلی کامپوزیت در اثر برخورد جسم ضربه زننده از دیگر موارد مصرف انرژی در داخل نمونه می‌باشد.



۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت کم مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج حاصل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مقدار انرژی آستانه فرورفتگی و سوراخ‌شدگی کامپوزیت با روش پروفایل انرژی به دست آمد که برای این نوع کامپوزیت مقادیر 60 و 80 ژول استخراج گردید.

- در مقادیر انرژی کمتر از 60 ژول، حالت بازخورد رخ داده و پرتابه پس از برخورد با نمونه قسمتی از انرژی خود را به نمونه داده و سبب آسیب‌دیدگی داخلی و خارجی نمونه شده و از سطح نمونه برگشت داده شده است. در انرژی 80 ژول، پرتابه در نمونه فرورفته و تمام انرژی خود را به نمونه داده است. در انرژی‌های بالای 80 ژول سوراخ‌شدگی رخ داده و انرژی جذب‌شده توسط نمونه کمتر از انرژی ضربه است.

- کاهش انرژی جذب‌شده در 80 ژول به علت ایجاد پدیده لایه لایه شدن در تعداد سیکل بالا می‌باشد که باعث کاهش مقاومت کامپوزیت نیز می‌شود. لذا در این نمونه‌ها مقاومت در مقابل ضربه کم شده و انرژی جذب‌شده نیز کمتر خواهد بود. از طرفی افزایش مقدار ماکزیم نیرو و خیز نشان دهنده شروع نفوذ و شروع سوراخ‌شدن نمونه می‌باشد.

- منحنی نیرو-خیز برای انرژی‌های کمتر از 60 ژول بسته بوده و انتهای نمونه تا مبدأ یا خیز صفر ادامه پیدا کرده است. با افزایش انرژی ضربه شیب منحنی‌های نیرو-خیز و نیرو-زمان افزایش یافته و زمان رخ دادن بیشینه نیرو کاهش یافته است. سطح زیر نمودار نیرو-خیز معادل با انرژی جذب‌شده توسط نمونه بوده و برای ضربه با انرژی 60 ژول دارای بیشترین مقدار است. با افزایش انرژی ضربه، بیشینه نیروی تماسی، انرژی جذب‌شده و خیز افزایش یافته است. کم بودن چقرمگی الیاف کربن و بدین ترتیب ترد بودن کامپوزیت ساخته‌شده مهم‌ترین عامل ضعف این نوع کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای می‌باشد.

- با توجه به سطوح شکست تقریباً تمامی مودهای شکست از جمله ترک در ماتریس، جدایش، کشیده شدن الیاف از ماتریس و شکست الیاف در طی بارگذاری ضربه رخ داده است، ولی آنچه مسلم است عمده‌ترین مود، شکست ترد فاز تقویت‌کننده یا همان الیاف کربن می‌باشد.

۷- مراجع

- Integrated Carbon Fiber/Epoxy Hybrid Composites Manufactured by Ooa-Vbo Process" Composite Structures, Vol. 120, pp. 32-40, 2015.
- [6] Farahat, H. and Brooghani, S. Y. A., "Studying the Behavior of A356/Sicp Composite Foam under Low-Velocity Impact Loading" Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 2, pp.129-147, 2017.
- [7] Sarasini, F., Tirillo, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., Gaudenzi, P., Cioffi, S., Iannace, S. and Sorrentino, L., "Drop-Weight Impact Behaviour of Woven Hybrid Basalt-Carbon/Epoxy Composites" Composites Part B-Engineering, Vol. 59, pp. 204-220, 2014.
- [8] Ghajar, R. and Sohi, A. R., "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).
- [9] Eslami-Farsani, R. and Shahrabi-Farahani, A., "Investigation on the High-Velocity Impact Resistance in Grid Composite Plates Containing Carbon Nanotubes" Tabriz journal of mechanical engineering, Vol. 48, No. 1, pp. 19-26, 2018 (In Persian).
- [10] Hosur, M. V. and Abdullah, M., "Studies on the Low-Velocity Impact Response of Woven Hybrid Composites" Composite Structures, Vol. 67, No. 3, pp. 253-262, 2005.
- [11] Khasrag, E. K., Siadati, H. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Surface Modification of Graphene Nanoplatelets on the High Velocity Impact Behavior of Basalt Fibers Reinforced Polymer-Based Composites" J Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 109-116, 2018 (In Persian).
- [12] Icten, B. M., Atas, C., Aktas, M. and Karakuzu, R., "Low Temperature Effect on Impact Response of Quasi-Isotropic Glass/Epoxy Laminated Plates" Composite Structures, Vol. 91, pp. 318-323, 2009.
- [13] Ghasemi, F. A., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "A Study on Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Elastic Modulus, Impact and Tensile Strengths of Polypropylene/Linear Low Density Polyethylene (Pp/Lldpe) Blends" J Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 386-390, 2018 (In Persian).
- [14] Bigdilou, M. B., Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "The Effect of Carbon Nanotubes on High Velocity Impact Behavior of Hybrid Kevlar- Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fibers Composite with Interlayer Configuration" J Journal of Science and Technology of Composites, pp. -, 2018 (In Persian).
- [15] Dizaji, R. A. and M.Yazdani, "Low Velocity Impact Response of Carall Composites Reinforced with Nano Particles" Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 58-64, 2017 (In Persian).
- [16] Khosravi, H., Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings" J Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016 (In Persian).
- [17] Korsavi-Kashani, S. A., "Exprimental Investigation on Effect of Functionalized Nano Silica and Nano Graphene on Basalt Fibers-Epoxy Composite under High Velocity Impact" J Journal of Science and Technology of Composites, pp. -, 2019 (In Persian).
- [18] Nouri-Niyaraki, M., Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental Analysis of Graphene Nanoparticles and Glass Fibers Effect on Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/Epdm Based Nanocomposites" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 2, pp. 169-176, 2018. (In Persian)
- [19] ASTM, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, , ASTM International . ,
- [20] Sayer, M., Bektaş, N. B. and Sayman, O., "An Experimental Investigation on the Impact Behavior of Hybrid Composite Plates" Composite Structures .Vol. 92, No. 5, pp. 1256-1262, 2010.
- [1] Izigany, T., "Special Manufacturing and Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polypropylene Composites: Mechanical Properties and Acoustic Emission Study" Composites Science and Technology, Vol. 66, No. 16, pp. 3210-3220, Dec, 2006.
- [2] Iahmoud, B., Manseri, L., Rogani, A., Navarro, P., Marguet, S., Ferrero, J. F. and Tawk, I., "Experimental and Numerical Study of the Damage Mechanisms in Hybrid Unidirectional/Woven Composites under Impact Loading" Composite Structures, Vol. 209, pp. 606-615, 2019.
- [3] Han, S. H., Oh, H. J., Lee, H. C. and Kim, S. S., "The Effect of Post-Processing of Carbon Fibers on the Mechanical Properties of Epoxy-Based Composites" Composites Part B-Engineering, Vol. 45, No. 1, pp. 172-177, 2013.
- [4] de Vasconcellos, D. S., Sarasini, F., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., Pucci, M., Santulli, C., Tirillò, J., Iannace, S. and Sorrentino, L., "Influence of Low Velocity Impact on Fatigue Behaviour of Woven Hemp Fibre Reinforced Epoxy Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 66, pp. 46-57, 2014.
- [5] Rahman, M. M., Hosur, M., Hsiao, K.-T., Wallace, L. and Jeelani, S., "Low Velocity Impact Properties of Carbon Nanofibers

- [21] Atas, C. and Sayman, O., "An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates" *Composite Structures*, Vol. 82, No. 3, pp. 336–345, 2008.
- [22] Aktaş, M., Atas, C., İçten, B. M. and Karakuzu, R., "An Experimental Investigation of the Impact Response of Composite Laminates" *Composite Structures*, Vol. 87, No. 4, pp. 307–313, 2009.
- [23] Ideon, R. K., Hu, H., Wambua, P. and Gu, B., "Characterizations of Basalt Unsaturated Polyester Laminates under Static Three-Point Bending and Low-Velocity Impact Loadings" *Polymer Composites*, Vol. 35, No. 11, pp. 2203–2213, 2014.
- [24] Sayer, M., Bektas, N. B. and Sayman, O., "An Experimental Investigation on the Impact Behavior of Hybrid Composite Plates" *Composite Structures*, Vol. 92, No. 5, pp. 1256–1262, Apr, 2010.
- [25] Sarasini, F., Tirillo, J., Valente, M., Ferrante, L., Cioffi, S., Iannace, S. and Sorrentino, L., "Hybrid Composites Based on Aramid and Basalt Woven Fabrics: Impact Damage Modes and Residual Flexural Properties" *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 290–302, Aug, 2013.
- [26] Richardson, M. O. W. and Wisheart, M. J., "Review of Low-Velocity Impact Properties of Composite Materials" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27, No. 12, pp. 1123–1131, 1996.



ارزیابی خواص الاستیک و پلاستیک کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با اتصال نوردی به روش همبستگی تصاویر دیجیتال

داود رحمت آبادی¹، علی شاهمیرزالو²، مسلم طیبی³، محمدرضا فراهانی⁴، رامین هاشمی^{5*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

5- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/10/10

پذیرش: 98/12/14

کلیدواژگان:

فرآیند اتصال نوردی

روش همبستگی تصاویر دیجیتال

پارامترهای الاستیک و پلاستیک

ضریب ناهمسانگردی

در این مقاله، برای اولین بار مدول یانگ، ضریب ناهمسانگردی و پارامترهای الاستیک و پلاستیک کامپوزیت‌های سه لایه آلومینیوم-برنج-آلومینیوم تولیدشده با فرآیند اتصال نوردی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال ارزیابی شده است. همبستگی تصاویر دیجیتال یک روش نسبتاً جدید است که برای اندازه‌گیری میدان کرنش و تعیین پارامترهای مختلف مانند ناهمسانگردی و مدول یانگ برای مواد و آلیاژهای زیادی آزموده شده است. ساختار، خواص مکانیکی، پارامترهای الاستیک و پلاستیک، کامپوزیت‌های سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با روش اتصال سرد نوردی با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسختی و آزمون کشش همراه با ستاپ دوبعدی روش همبستگی تصاویر دیجیتال تعیین شد. با استفاده از کرنش طولی و عرضی بدست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و روابط پلاستیسیته، کرنش در راستای ضخامت، ضریب ناهمسانگردی و سایر پارامترهای الاستیک و پلاستیک محاسبه شد. نتایج نشان داد که به دلیل کارسختی ناشی از افزایش چگالی ناهنجاری در حین نورد خواص مکانیکی نسبت به نمونه‌های اولیه بهبود یافت به طوری که استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی کامپوزیت، نسبت به آلومینیوم اولیه بیش از پنج برابر و میکروسختی هر دولایه آلومینیوم و برنج بیش از دو برابر افزایش یافت. مقدار مدول الاستیسیته محاسبه شده با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال 77.8GPa بدست آمد که نسبت به مقادیر بدست آمده از روابط تئوری بر اساس حجم مواد تشکیل‌دهنده دارای اختلاف اندک است. همچنین مقدار ضریب ناهمسانگردی در حین آزمون کشش، پس از نوسان اولیه تا نقطه گلوئی، افزایش و سپس روند کاهشی به خود گرفت و کمی قبل از شکست ثابت شد.

Evaluation of the elastic and plastic properties of Al/Brass/Al composite fabricated by roll bonding process via digital image correlation method

Davood Rahmatatabadi¹, Ali Shahmirzaloo², Moslem Tayyebi³, Mohammad Reza Farahani², Ramin Hashemi^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Department of material engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

Keywords

CRB
DIC method
elastic and plastic parameters
anisotropy coefficient

Abstract

In the present study, for the first time the Young's modulus, anisotropy coefficient and elastic and plastic parameters of multi-layered Al/Br/Al composite produced by cold roll bonding process were assessed by digital image correlation method. The digital image correlation (DIC) is a relatively new method used to measure strain fields to determine various parameters such as anisotropy and Young's modulus for many materials and alloys. Structure, mechanical properties, elastic and plastic parameters are determined by optical microscopy (OM), micro-hardness measurements and tensile tests equipped by 2D DIC system. Using longitudinal and transverse strains from DIC and plasticity theory thickness strain, anisotropy coefficient and other elastic and plastic parameters were calculated. The results showed that mechanical properties were improved compared to the primary samples, so that the yield strength and ultimate tensile strength of the composite were more than five times the original aluminum, and microhardness of both layers of aluminum and brass improved more than two times due to cold working caused by increasing the dislocation density during rolling. The value of the calculated elastic modulus was obtained 77.8GPa by digital image correlation method, which are little difference from the values obtained from theoretical relationships based on the volume of the composite materials. Also, the anisotropy coefficient during the tensile test, after the initial oscillation increased to the necking point, then decreased and a little before the failure point fixed

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Rahmatatabadi, D. Shahmirzaloo, A. Tayyebi, M. Farahani, M. R. and Hashemi, R., "Evaluation of the elastic and plastic properties of Al/Brass/Al composite fabricated by roll bonding process via digital image correlation method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 581-590, 2020.

1-مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد سبک و کامپوزیت‌های پایه فلزی به شدت افزایش یافته است، تا علاوه بر کاهش وزن سازه، بهره‌وری سیستم مورد نظر در صنایع مختلف را افزایش دهند. البته استفاده از فلزات سبک و کامپوزیت‌های زمینه فلزی مانند آلایژها و کامپوزیت‌های پایه آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم و غیره، علاوه بر داشتن چگالی پایین، متناسب با سازه و یا صنعت مورد استفاده باید خواص تکمیل‌کننده دیگر مانند استحکام کافی، مقاومت خوردگی و سایش، شکل‌پذیری مطلوب و غیره را داشته باشند.

به عبارت دیگر، در طراحی قطعات مهندسی عمدتاً استفاده از یک نوع فلز یا آلایژ رواج دارد، اما هنگامی که شاخص‌های مکانیکی، سازه‌ای، خوردگی و الکتریکی خاصی مطرح می‌شود، این روش چندان کارآمد نخواهد بود و مواد جدید مانند کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلایژهای آلومینیوم به دلیل خواص گوناگون به طور گسترده برای مصارف متفاوت استفاده می‌شود و پرکاربردترین فلز در کامپوزیت‌ها می‌باشد. آلومینیوم و آلایژهای آن به سبب چگالی پایین، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و نیز مقاومت به خوردگی قابل قبول شناخته شده‌اند [1, 2]. از طرف دیگر، آلایژهای مس به علت خواص الکتریکی و حرارتی عالی که دارند در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته مس و آلایژهای آن دارای خواص مکانیکی و شکل‌پذیری مطلوب می‌باشند ولی به دلیل چگالی بالا، عموماً در صنایع و قطعات الکتریکی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [3, 4]. از میان آلایژهای پایه مس، برنج‌ها به دلیل مقاومت به خوردگی عالی، استحکام و شکل‌پذیری خوب و قابلیت ماشین‌کاری فوق‌العاده از دیگر مواد مهندسی متمایز شده برای کاربردهای خاص و مهم نظیر اجزای الکتریکی، لوله و اتصالات استفاده می‌شوند. آلومینیوم و برنج هر دو دارای مقاومت به خوردگی بالا و هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب هستند و از اتصال این دو فلز می‌توان در سیستم‌های انتقال حرارت مکانیکی و کاربردهای الکتریکی استفاده کرد. تاکنون برای اتصال آلومینیوم به برنج از روش‌های مختلفی نظیر ریخته‌گری گریز از مرکز، اتصال نفوذی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری فراصوتی استفاده شده است. در مقایسه با سایر فرآیندهای اتصال‌دهی فلزات، اتصال نوردی یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی لایه‌ای است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین و صنایع مختلف قرار گرفته است. قابل ذکر است که این فرآیند از چند دهه قبل مورد استفاده قرار گرفته شده و با افزایش کاربرد کامپوزیت‌های فلزی و نیاز به روش‌های تولید ساده، بهینه و کارآمد، روش اتصال نوردی توجه بیشتری یافت. فرآیند اتصال نوردی در سال 1959 توسط توسط وایدیاناث¹ مورد بررسی قرار گرفت. این فرآیند جوشکاری حالت جامد است که برای اتصال فلزات مشابه یا غیر مشابه استفاده کاربرد دارد [5]. در این فرآیند دو یا چند فلز یا آلایژ روی هم قرار داده می‌شود و مقدار تغییر شکل لازم برای برقراری اتصال مناسب با عبور دادن نمونه از غلطک‌های نورد اعمال می‌شود [2, 3, 6-8]. قابل ذکر است که قبل از اعمال نورد، باید سطوح در تماس کاملاً تمیز شوند و آماده‌سازی سطحی مهم‌ترین مرحله برای برقراری پیوند مناسب بین لایه‌ها می‌باشد. مطابق با نظر بای² و ژانگ³، دو روش رایج برای حذف آلاینده‌ها و اکسیدهای سطحی، تمیز کردن شیمیایی و مکانیکی است [9]. جوش نوردی از سالیان دور تاکنون مورد

توجه و استفاده محققین قرار گرفته است و پارامترهای مختلفی بررسی شده است. در اولین تحقیقات در این زمینه، وایدیاناث در سال 1959 به بررسی نرخ کرنش یا زمان جوشکاری نوردی پرداخت گرفت [10] و در سال‌های بعد نیز پن⁴ و همکاران به بررسی اثر دما بر استحکام پیوند پرداختند [11]. دانش‌منش و کریمی به بررسی اثر درصد تغییر شکل در حین نورد در دماهای مختلف پرداختند [12]. وایدیاناث و همکاران در سال 1959 و بعدها محمد⁵ و واشبرن⁶ در سال 1975 ادعا کردند که مکانیزم اتصال نوردی بر اساس تئوری فیلم است و به دلیل دمای پایین فرآیند تئوری فیلم نقش اصلی در ایجاد اتصال را ایفا می‌کند [10, 13]. با توجه به این نظریه، لایه‌های سطحی از فلز ترد در حین نورد به دلیل اعمال کرنش بالا در دمای محیط شکسته می‌شوند و فلز پایه در شکاف لایه‌های شکسته اکستروود می‌شود. علاوه بر این تحقیقات در سالیان اخیر نیز محققین به بررسی پارامترهای مختلف در فرآیند اتصال نوردی و تولید کامپوزیت‌ها و آلایژهای مختلف پرداخته‌اند. در این بین، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی عالی آلومینیوم، در دسترس و ارزان بودن و همچنین قابلیت جوش نوردی بسیار بالا دارای بیشترین کاربرد است. در حالت کلی، فرآیند اتصال سرد نوردی قابل استفاده برای اکثر فلزات است و در مواردی که پیوند مناسب بین لایه‌ها برقرار نمی‌شود از تکنیک‌های مختلف مانند افزایش دما، افزایش کاهش ضخامت، آماده‌سازی سطحی پیشرفته‌تر برای بهبود پیوند استفاده می‌شود. نتیجه بسیاری از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که اتصال نوردی علاوه بر دارا بودن قابلیت ایجاد اتصال بین اکثر فلزات و تولید کامپوزیت‌ها، می‌تواند استحکام کششی، چقرمگی شکست، میکروسختی را تا چند برابر نمونه‌های اولیه بهبود دهد.

پارامترهای الاستیک و پلاستیک مانند مدول الاستیسیته، توان کارسختی و ناهمسانگردی از عوامل تعیین‌کننده رفتار مواد در هنگام بارگذاری هستند که تاکنون برای آلایژها و کامپوزیت‌های تولید شده به روش اتصال نوردی مورد توجه و بررسی قرار نگرفته‌اند. البته یکی از دلایل این امر، نبود روش مناسب و دقیق برای بررسی است و عمدتاً به دلیل سختی کار، همان خواص الاستیک و پلاستیک ماده اولیه برای نمونه‌های تولید شده به روش اتصال نوردی در نظر گرفته می‌شود، یا برای کامپوزیت‌های تولید شده از روابط تئوری مبتنی بر حجم مواد تشکیل‌دهنده کامپوزیت استفاده می‌شود که قاعدتاً نمی‌تواند مورد اطمینان باشد.

مدول الاستیسیته (E) یا همان مدول یانگ برابر است با نسبت تنش بر کرنش ایجاد شده به واسطه‌ی تنش وارده بر جسم در حالتی که جسم در ناحیه الاستیک قرار گرفته باشد و معیاری برای توصیف صلبیت مواد جامد است. مدول الاستیسیته توسط نیروهای اتصال بین اتم‌ها تعیین می‌شود. چون این نیروها نمی‌توانند بدون تغییر ماهیت اصلی ماده تغییر کنند، در نتیجه مدول الاستیسیته یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی حساس به ساختار است و عناصر آلایژی، عملیات حرارتی، یا کار سرد تاثیر کمی بر این مدول دارند. واحد مدول الاستیسیته در SI پاسکال (هم‌واحد با تنش) است.

تاکنون تحقیقی در زمینه شناسایی پارامترهای الاستیک و پلاستیک برای استفاده در نرم‌افزارهای عددی جهت پیش‌بینی رفتار ماده تولید شده به روش اتصال نوردی در شرایط مختلف انجام نشده است. درک درست از خواص مکانیکی مواد به خصوص مواد جدید نظیر مواد تولید شده به روش اتصال

⁴ Pan⁵ Mohamed⁶ Washburn¹ Vaidyanath² Bay³ Zhang

نوردی در طراحی و مدل سازی اجزایی که از این مواد استفاده می شود بسیار مهم و حیاتی است.

محاسبه پارامترهای الاستیک معمولاً از طریق اندازه گیری کرنش در جهات مختلف انجام می شود و روش های مختلفی برای اندازه گیری کرنش وجود دارد. روش کرنش سنج یکی از روش های ساده و قابل استفاده است ولی میزان خطا در کرنش اندازه گیری شده در ناحیه گلوئی تا شکست بسیار زیاد بوده و گزارش شده است که فقط تا نقطه گلوئی دارای دقت مناسب است [14]. روش دیگر که در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، روش همبستگی تصاویر دیجیتال است که در آن محدودیت اندازه گیری کرنش با دقت بالا وجود ندارد و می تواند میدان کامل جابه جایی و کرنش در کل ناحیه تغییر شکل پلاستیک را اندازه گیری کند.

شاهمیرزآلو و همکاران از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای تعیین خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم/آلیاژی 6065، استفاده کردند [15]. آنها با استفاده از دو روش تغییر شکل یکنواخت و میدان مجازی، پارامترهای الاستیک و پلاستیک را استخراج کردند و نشان دادند که این دو روش تطابق خوبی با هم دارند [15]. همچنین در این کار به بررسی اندازه زیر مجموعه روی ضریب همبستگی پرداخته شد و مقدار بهینه برای پردازش تصویر را تعیین نمودند. همچنین با توجه با قابلیت منحصر به فرد این روش مطالعات گسترده ای در زمینه تعیین خواص مواد به صورت موضعی و در نواحی مختلف جوش شده انجام شده است؛ در سال 2018، فوهرینگ¹ و همکاران، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، خواص مکانیکی تیتانیوم تولید شده با فرآیند روش های تولید افزودنی² حین آزمون کشش تک محوره را محاسبه کردند [16]. در سال 2018، ازل³ و همکاران، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، ثابت الاستیک و ضریب ناهمسانگردی در جهت های مختلف را برای کامپوزیت ها محاسبه کردند [17]. سانچز⁴ [18] نیز از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای شناسایی خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژهای حافظه دار استفاده کرد و این روش را یک روش مناسب، با دقت کافی و ارزان قیمت برای شناسایی خواص ماده معرفی کرد. همان طور که اشاره شد، استفاده از این روش برای ارزیابی پارامترهای الاستیک و پلاستیک مواد مختلف در حال گسترش است.

در این تحقیق، برای اولین بار پارامترهای الاستیک و پلاستیک شامل مدول الاستیسیته، توان کرنش سختی، ثابت استحکام و ضریب ناهمسانگردی کامپوزیت لایه ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با اتصال نوردی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، در ابتدا ورق سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با فرآیند اتصال نوردی در دمای محیط و کاهش ضخامت 66% تولید شد و سپس با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در حین آزمون کشش تک محوره در جهت نورد مقادیر کرنش در دو جهت طولی و عرضی محاسبه شد و با استفاده از روابط تئوری پارامترهای مختلف محاسبه شد.

2- روش همبستگی تصاویر دیجیتال

DIC یک روش اندازه گیری است که بر اساس اصول فوتوگرامتری، برای اندازه گیری میدان کامل جابجایی روی سطح جسم توسعه پیدا کرده است. مشابه فوتوگرامتری، تصاویر دیجیتال از نمونه تحت آزمایش در طی بارگذاری

مختلف گرفته می شود. اگرچه، به جای ردیابی حرکت هدف های مجزا که روی جسم قرار گرفته، DIC از الگوی خالی تصادفی که روی سطح جسم وجود دارد برای ارزیابی میدان جابجایی استفاده می کند. بنابراین اگر سطح جسم که بررسی می شود یک الگوی تصادفی خالی خاکستری داشته باشد، آماده- سازی سطح نیاز نیست. استفاده از DIC برای مشخصات ماده اصالتاً در اوایل دهه 1980، که به عنوان یک روشی برای دستیابی به میدان کرنش و جابجایی پیوسته در مواد کامپوزیتی شروع شده است؛ اگرچه، تجهیزات عکس برداری و سخت افزاری در آن زمان فاکتورهای عمده در جلوگیری از پیشرفت این روش بودند. پیشرفت های تکنولوژیکی سه دهه گذشته منجر به دوربین های با وضوح بالاتر و پردازش داده ها بسیار سریع تر شده است. در نتیجه، علاقه جدیدی به استفاده از همبستگی تصویر دیجیتال برای مکانیک تجربی اخیراً نشان داده شده است. تحقیقات گسترده ای در مورد استفاده از DIC، از جمله آزمایش کشش چند محوره روی نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه ای انجام شده است [19، 20]. DIC ابتدا در دهه 1980 به عنوان یک روش برای اندازه گیری جابجایی توسط پترس و همکاران در دانشگاه کارلینا معرفی شد [21]. پترس و رانسون یک الگوریتم همبستگی را برای همبستگی یک مجموعه از پیکسل ها بین عکس مرجع و تصاویر تغییر شکل استفاده کردند. در سال های بعد، روش همبستگی تصاویر دیجیتال در افزایش سرعت، بهبود دقت همبستگی و غیره شدیداً توسعه یافته است. بیشتر تلاش ها روی بهبود الگوریتم های همبستگی متمرکز شده است. به عنوان مثال، روش درونیایی بیلینر، روش راه حل عددی نیوتن-رافسون، جستجوی دقیق درشت و غیره [22]. ترتیب کار تابع همبستگی تصاویر دیجیتال جهت ردگیری موقعیت الگوی عکس اول در عکس های بعدی نیز بر اساس تطابق میزان شدت نور خاکستری می باشد. از آنجا که اغلب استفاده از یک پیکسل منفرد برای یافتن نقطه انطباق غیر ممکن است از یک ناحیه با چندین پیکسل⁵ استفاده می شود تا فرآیند انطباق انجام پذیرد. این ناحیه دارای یک توزیع منحصر به فرد از شدت نور است که بعد از فرآیند تغییر شکل، با یافتن ناحیه ای با شدت نور مشابه در تصویر بعد از تغییر شکل، جابجایی زیرمجموعه مذکور پیدا می شود. همچنین در این روش برای افزایش رزولوشن اندازه گیری مقادیر شدت نور برای هر پیکسل توسط توابع درونیایی می شود تا بتوان جابه جایی در گستره صدم پیکسل را نیز شناسایی نمود. دقت در این روش تحت تأثیر تعداد پیکسل های داخل عکس و اندازه سلول های مورد بررسی، تابع درونیاب و غیره است. از مزیت های روش همبستگی تصاویر دیجیتال می توان به دقت بالای روش، چیدمان ساده سیستم، اندازه گیری پیوسته، حساسیت کمتر به شرایط آزمایش سخت، مانند دمای بالا، فشار بالا و مواد تهاجمی، غیر مخرب بودن و عدم نیاز به تماس به سطح قطعه اشاره نمود. طبق شکل 1، تطابق الگو مبتنی بر دریافت حداکثر همبستگی بین زیر مجموعه ای از تصویر در حالت های تغییر شکل نیافته و تغییر شکل یافته است. از معادله (1) به عنوان تابع همبستگی برای تطبیق استفاده می شود [23]. جابه جایی مرکز زیرمجموعه پیکسل ها هنگامی که بهترین تطابق را شناسایی می شود، ثبت می شود. میدان های کرنش از گرادیان میدان های جابه جایی با استفاده از یک روش تمایز عددی مطابق با از معادلات (2) و (3) بدست می آید [23].

⁴ Sánchez

⁵ subset

¹ Foehring

² Additively Manufactured (AM)

³ Orell

گوشه‌ها با استفاده از مته به قطر 1.5 میلی‌متر سوراخ شده و با سیم فولادی نرم محکم بهم بسته می‌شوند. در مرحله پایانی عملیات نورد با سرعت ۱۴ دور بر دقیقه در دمای محیط و بدون پیشگرم با اعمال کاهش ضخامت 66% انجام شد و پیوند مناسب بین لایه‌ها برقرار شد و کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با موفقیت تولید شد [6-8]. درصد حجمی کامپوزیت تولید شده حدود ۳۳٪ برنج و ۶۷٪ آلومینیوم خالص تجاری می‌باشد. محققین پیشنهاد کرده‌اند که با کاهش زمان بین عملیات آماده‌سازی سطحی و نورد و جلوگیری از اکسید سطحی لایه‌های برس خورده، می‌توان به پیوند قوی‌تر دست یافت [1, 24, 25]. همچنین لایه‌برداری به وسیله برس خورشدی و اعمال کاهش ضخامت بالا در حین نورد، مهم‌ترین عوامل جهت برقراری پیوند مناسب بین لایه‌ها در فرآیند جوش سرد نوردی می‌باشند. البته پارامترهای دیگر مانند، سرعت نورد، ضخامت اولیه، دمای فرآیند و غیره نیز بر استحکام پیوند موثر هستند.

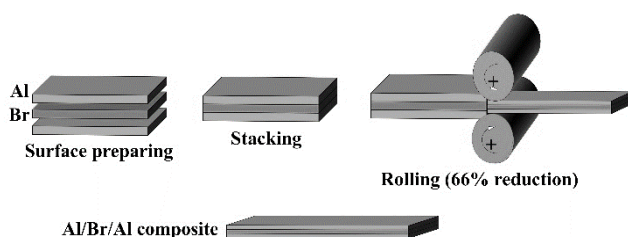


Fig 2 A schematic illustration of CRB process

شکل 2 شماتیک فرآیند اتصال سرد نوردی

3-2- آزمایش کشش تک‌محوره و میکروسختی

به منظور بررسی خواص الاستیک و پلاستیک، ورق دولایه آلومینیومی تولید شده به روش اتصال نوردی، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد به وسیله ماشین وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M-9 در ابعاد 12 در 6 میلی‌متر آماده شد. نمونه‌ها مطابق با ابعاد نشان داده شده در شکل 3 بریده شده و برای آزمون DIC استفاده شد. قبل از تست کشش، نمونه‌ها با اسپری سفید پوشش داده شده، و بعد از خشک شدن، خال‌های سیاه به صورت رندم روی نمونه‌ها ایجاد شده‌اند. بعد از آماده‌سازی سطح، نمونه‌ها در دمای اتاق توسط دستگاه کشش اینسترون با ظرفیت 150 کیلو نیوتن و با سرعت پیشروی 0.5 میلی‌متر بر ثانیه تحت کشش واقع شده‌اند. سیستم DIC دوبعدی در این تحقیق استفاده شده است. ستاپ مورد استفاده در این آزمایش در شکل 4 نشان داده شده است. به منظور بررسی میکروسختی لایه‌های آلومینیوم و برنج، نمونه‌هایی از آلومینیوم و برنج اولیه و کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم، در جهت عمود بر نورد (صفحه ضخامت-طول) آماده شد و به منظور سهولت در جابه‌جایی و انجام آزمون میکروسختی ویکرز از مانت سرد استفاده شد. قبل از انجام آزمون، آماده‌سازی با سنباده‌زنی با شماره‌های 800-1200 جهت ایجاد سطحی صاف و هموار انجام شد. آزمون میکروسختی، با اعمال نیروی 1.96N، در دمای اتاق و زمان اعمال بار 10 ثانیه برای بیش از 10 نقطه مختلف به صورت تصادفی برای هر لایه انجام شد. نهایتاً، مقادیر میکروسختی با حذف بزرگترین و کوچکترین داده و میانگین‌گیری از مابقی داده‌ها برای آلومینیوم و برنج اولیه و لایه‌های آلومینیوم و برنج در کامپوزیت تولید تولید شده به روش اتصال سرد نوردی گزارش شد. همچنین مقدار میکروسختی برای لایه‌های آلومینیوم و برنج در راستای ضخامت بررسی و مورد مقایسه قرار گرفت.

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

$$x' = x + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (2)$$

$$y' = y + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \quad (3)$$

در معادلات بالا، $\bar{f}$ متوسط مقدار شدت زیر مجموعه مرجع $\bar{g}$ متوسط مقدار شدت از زیرمجموعه‌های تغییر شکل؛ m پهنای زیر مجموعه در پیکسل، u_0 و v_0 تغییر شکل از مرکز زیر مجموعه در جهات x و y است.

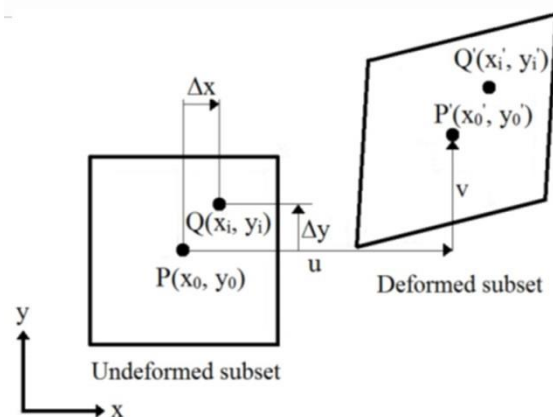


Fig 1 Schematic of subset in DIC before and deformed [15]

شکل 1 شماتیک زیرمجموعه در روش همبستگی تصاویر دیجیتال قبل و بعد از تغییر شکل [15]

3- روش تحقیق

1-3- اتصال نوردی

در این مقاله، از آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژ برنج (متشکل از 63% مس و 37 درصد روی) با ضخامت یکسان یک میلی‌متر به عنوان ورق‌های اولیه استفاده شد. به منظور افزایش کارپذیری و یکنواختی در ساختار، ورق‌های آلومینیوم خالص تجاری 1050 به مدت یک ساعت در دمای 380 درجه سانتی‌گراد و ورق‌های برنج به مدت یک ساعت در دمای 800 درجه سانتی‌گراد تحت عملیات آنیل قرار گرفتند و در کوره خنک شدند. فرآیند جوش سرد نوردی دارای سه مرحله، آماده‌سازی اولیه شامل چربی‌زدایی شیمیایی و مکانیکی، روی هم قرار دادن و بستن ورق‌ها، و انجام عملیات نورد با کاهش ضخامت مطلوب جهت ایجاد پیوند مناسب است که همه‌ی این مراحل در شکل 2 به صورت شماتیک ارائه شده است. برای انجام فرآیند جوش سرد نوردی، یک ورق آلیاژ برنج و دو ورق آلومینیوم خالص تجاری در ابعاد یکسان 8 در 16 سانتی‌متر آماده شد. همان‌طور که اشاره شد، عملیات آماده‌سازی سطحی شامل شست‌وشو با آب و صابون، چربی‌زدایی در حمام استون و لایه‌برداری با استفاده از برس خورشدی از جنس فولاد می‌باشد و این عملیات برای هردو طرف آلیاژ برنج و لایه‌های در تماس آلومینیومی انجام شد. پس از اتمام عملیات آماده‌سازی، سه ورق روی هم قرار گرفتند به طوری که ورق‌های آلومینیوم لایه‌های خارجی و آلیاژ برنج لایه‌ی درونی کامپوزیت را تشکیل می‌داد. به منظور جلوگیری از سر خوردن لایه‌ها در حین نورد، هر سه ورق از

در شرایط تنش صفحه‌ای که حالت تنش دوبعدی است، با فرض اینکه هیچ نوع تغییر تنشی در امتداد ضخامت نداریم معادله (5) می‌تواند به معادله (6) تغییر کند. پارامتر b ضخامت نمونه است [23].

$$b \int_{S_v} \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dS_v = b \int_w \bar{T}_i \cdot u_i^* dw \quad (6)$$

همچنین نیروی عکس‌العمل F مربوط به زمان t_i می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$b \int_w \bar{T}_i dw = F(t_i) \quad (7)$$

با جایگذاری معادله (7) در معادله (6) معادله (8) بدست می‌آید:

$$\int_{S_v} \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dS_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot u_i^* \quad (8)$$

معادله بالا ساده شده معادله VFM است که برای شناسایی پارامترهای الاستیک و پلاستیک استفاده می‌شود.

5- ارائه نتایج و بحث

1-5- تصاویر میکروسکوپ نوری

در شکل 5، میکروساختار کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم را بعد از فرآیند اتصال سرد نوردی نشان می‌دهد. مطابق با شکل 5، لایه‌های آلومینیوم در سطوح خارجی قرار گرفته و از فلز برنج به عنوان تقویت‌کننده در مرکز دو ورق آلومینیوم خالص استفاده شده است. با اعمال کاهش ضخامت 66%، یک اتصال مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و برنج ایجاد شده است. مطابق با شکل 5، لایه‌ها به صورت پیوسته بوده و ناحیه گردنی شکل موضعی (تحت تنش زیاد) دیده نمی‌شود؛ زیرا مقادیر کرنش اعمالی برای ایجاد ناحیه گردنی شکل موضعی کافی نمی‌باشد. همچنین به علت ضخامت کم لایه‌ها و تاثیر لایه‌ها بر یکدیگر در حین اعمال بار، ترکیب این سه لایه پس از اتصال، یک کامپوزیت لایه‌ای است.



Fig 5 microstructure of primary sandwich of multi-layered Al/Brass composite

شکل 5 ریزساختار کامپوزیت چند لایه آلومینیوم و برنج در نورد اولیه

2-5- پارامترهای الاستیک و پلاستیک

مقدار کرنش در راستای عرض و طول نمونه در حین آزمون کشش از قسمت قبلی و با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه شد. برای بدست آوردن کرنش در راستای ضخامت از رابطه ثابت بودن حجم (معادله

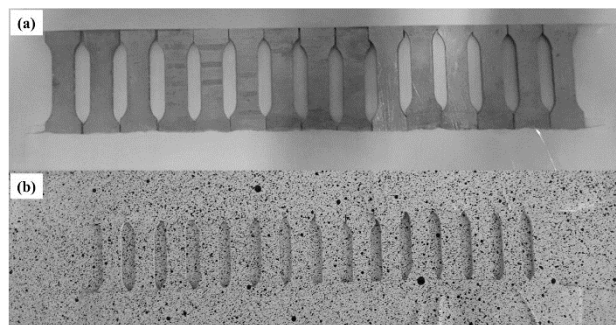


Fig 3 The tensile test samples: (a) before and (b) after surface preparation

شکل 3 نمونه‌های آزمون کشش: (a) قبل و (b) بعد از آماده‌سازی سطحی



Fig 4 A set up of tensile test with DIC equipment's

شکل 4 راه‌اندازی آزمون کشش همراه با تجهیزات همبستگی تصاویر دیجیتال

4- اندازه‌گیری خواص الاستیک و پلاستیک نمونه‌ها

1-4- روش میدان مجازی

روش میدان مجازی¹، براساس اصل کار مجازی است که شکل ضعیف شده از معادلات تعادلی موضعی و میدان‌های جابه‌جایی مجازی و قابل قبول جنبشی است و برای استخراج پارامترها بکار برده می‌شود. در اینجا اساس معادلات و روش استفاده شده برای حل پارامترهای الاستیک و پلاستیک با استفاده از VFM به صورت جزئی مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادله اساسی حاکم از VFM در معادله (4) ارائه شده است. این معادله شکل ضعیف شده از مشتق معادله تعادلی با استفاده از اصل کار مجازی است [23, 15].

$$\begin{aligned} \int_v \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dv + \int_{S_f} \bar{T}_i \cdot u_i^* ds \\ + \int_v b_i \cdot u_i^* dv \\ = \int_v \rho a_i \cdot u_i^* dv \end{aligned} \quad (4)$$

چون، حجم و نیروهای اینرسی سهم ناچیزی نسبت به کل کار انجام شده دارند، بنابراین معادله (4) می‌تواند به صورت معادله (5) ساده شود [23, 15].

$$\int_v \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dv = \int_{S_f} \bar{T}_i \cdot u_i^* ds \quad (5)$$

¹ Virtual Field Method (VFM)

کامپوزیت‌های لایه‌ای، نمی‌توان به روابط تئوری اطمینان کرد و نیازمند بررسی تجربی و یا ارائه روابط تئوری جدید و دقیق‌تر با در نظر گرفتن ساختار لایه‌ای این مواد است. همچنین ضریب پواسون کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم نیز برابر 0.349 بدست آمد.

جدول 1 پارامترهای الاستیک محاسبه شده با همبستگی تصاویر دیجیتال برای کامپوزیت آلومینیوم برنج چند لایه

Table 1 The elastic parameters calculated by DIC for multilayered Al/Brass composite

ماده	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
آلومینیوم خالص تجاری	37	69.3	0.310
آلومینیوم/برنج/آلومینیوم	186	77.4	0.349

با استفاده از نتایج آزمون کشش (شکل 6)، پارامترهای پلاستیک شامل استحکام کششی نهایی، ضریب استحکام، توان کارسختی و ضریب ناهمسانگردی محاسبه شد و در جدول 3 ارائه شد. مطابق با نتایج جدول 3، کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم در مقایسه با ورق‌های اولیه آلومینیوم و برنج استحکام بالاتری از خود نشان داد. استحکام کامپوزیت تولید شده به حدود 274MPa رسید که نسبت به آلومینیوم اولیه بیش از پنج برابر افزایش یافته است. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، مقدار استحکام کششی نهایی نیز مانند استحکام تسلیم، به دلیل نقش تقویت‌کننده آلیاژ برنج و کارسرد در حین نورد، نسبت به آلومینیوم خالص تجاری 1050 به شدت افزایش یافته است.

جدول 2 روابط تئوری ارائه شده برای تخمین مقدار مدول الاستیسیته آلومینیوم/برنج بر اساس حجم مواد تشکیل دهنده

Table 2 presented theoretical relationships to estimate value of the elastic modulus of aluminum/brass based on the volume of constituent materials.

مدول (GPa)	یانگ مدول تئوری
82.7	$E_{Al/Brass} = V_{Al}E_{Al} + V_{Brass}E_{Brass}$
78.8	$\frac{1}{E_{Al/Brass}} = \frac{V_{Al}}{E_{Al}} + \frac{V_{Brass}}{E_{Brass}}$
80.6	$\log E_{Al/Brass} = V_{Al} \times \log E_{Al} + V_{Brass} \times \log E_{Brass}$

همچنین نتایج آزمون میکروسختی ویکرز نشان داد که مقدار میکروسختی برای هر دو لایه آلومینیوم و برنج پس از نورد به شدت افزایش می‌یابد و میکروسختی لایه آلومینیوم از 24 به حدود 49 ویکرز و برای آلیاژ برنج از 95 به حدود 221 ویکرز می‌رسد که نشان می‌دهد مقدار سختی ویکرز برای هر دو لایه آلومینیوم خالص تجاری و برنج بیش از دو برابر شده است. البته مقدار افزایش میکروسختی برای لایه برنج بیشتر از آلومینیوم خالص تجاری است که به دلیل توان کارسختی بیشتر و انرژی نقص در چینش کمتر در آلیاژ برنج، نرخ کارسختی در کرنش برابر در حین نورد برای لایه برنج بیشتر از آلومینیوم است. نسبت این تغییرات خواص مکانیکی به دلیل افزایش چگالی ناهنجاری ناشی از اعمال کارسرد مکانیکی (کاهش ضخامت بالا در دمای محیط) می‌باشد [28-30]. در مقابل افزایش قابل توجه استحکام کششی و میکروسختی، مقدار ازدیاد طول کامپوزیت تولید شده نسبت به آلیاژهای آنیل

(9) در تغییر شکل پلاستیک استفاده می‌شود. در شکل 6، نمودار تنش کرنش مهندسی برای کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده به روش اتصال نوردی برای کرنش در هر سه جهت طول، عرض و ضخامت ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تنش در ناحیه الاستیک و پلاستیک، میزان کرنش افزایش می‌یابد و پس از یک رابطه خطی بین تنش کرنش در ناحیه الاستیک، کرنش وارد منطقه پلاستیک می‌شود. این روند برای هر سه کرنش عرضی، طولی و ضخامتی تقریباً مشابه است. همچنین مطابق با شکل 6، شیب ناحیه الاستیک در هر کرنش در راستاهای مختلف متفاوت بوده و بیشترین شیب خطی برای کرنش عرضی مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش بار اعمالی و ورود به ناحیه پلاستیک، اختلاف کرنش در جهات مختلف افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن، وجود ناهمسانگردی تقریباً زیاد در نمونه به دلیل عملیات نورد و کشیده شدن دانه‌ها در جهت نورد است. همچنین مطابق با شکل 6، مشاهده می‌شود که مقدار کرنش در سه راستا در حداکثر استحکام کششی متفاوت است. بیشترین و کمترین کرنش در راستای طولی و ضخامتی است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، بزرگ بودن کرنش در راستای طولی نسبت به عرضی و ضخامتی به دلیل بزرگ بودن طول نمونه کشش، نسبت به عرض و ضخامت و همچنین همراستا بودن جهت اعمال نیرو با راستای طولی است. در ادامه در رابطه با ضریب ناهمسانگردی توضیحات بیشتری ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned}\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t &= 0 \\ \varepsilon_t &= -(\varepsilon_l + \varepsilon_w)\end{aligned}\quad (9)$$

در جدول 1، نتایج بررسی پارامترهای الاستیک ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تنش تسلیم کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج نسبت به آلومینیوم خالص تجاری افزایش یافته است. مقدار تنش تسلیم بدست آمده برابر با 186MPa است که نسبت به آلومینیوم خالص تجاری 1050 بیش از پنج برابر افزایش یافته است. استفاده از آلیاژ برنج با استحکام بالا به عنوان تقویت‌کننده، افزایش چگالی ناهنجاری به دلیل کارسختی در حین نورد با اعمال کرنش بالا، از دلایل اصلی افزایش چند برابری استحکام تسلیم در کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم نسبت به آلومینیوم اولیه است [26, 27].

همچنین در جدول 1، مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون گزارش شده است. مدول یانگ برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با روش پیوستگی تصاویر دیجیتال 77.4 GPa بدست آمد که به ترتیب نسبت به آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژ برنج، بیشتر و کمتر می‌باشد. با توجه به درصد حجمی مواد تشکیل دهنده (قانون اختلاط) و روابط تئوری موجود، مقدار مدول یانگ کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم باید در محدوده مدول یانگ آلومینیوم خالص تجاری و برنج باشد. روابط تئوری براساس قوانین اختلاط و حجم مواد تشکیل دهنده، در جدول 2 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار مدول یانگ بدست آمده از روابط تئوری در محدوده 78.8GPa تا 82.7GPa است که نسبت به نتیجه بررسی پیوستگی تصاویر دیجیتال بیشتر می‌باشد، هرچند اختلاف بین آن‌ها ناچیز است. مقایسه روابط تئوری و نتیجه آزمون همبستگی تصاویر دیجیتال نشان می‌دهد که این روابط، فقط محدوده مدول الاستیسیته را مشخص می‌کند که برای مواد و ساختارهای مختلف روابط متفاوتی پیشنهاد شده است که می‌تواند به مقادیر واقعی نزدیک‌تر باشد و به منظور درک درست و دقیق از مدول الاستیسیته

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_l^2 + \varepsilon_w^2 + \varepsilon_t^2)} \quad (11)$$

جدول 3 پارامترهای پلاستیک محاسبه شده با همبستگی تصاویر دیجیتال

Table 3 The plastic parameters calculated by DIC

ماده	ضریب استحکام	توان	ضریب استحکام نهایی	ضریب کارسختی
آلومینیوم	120.7 (MPa)	0.214	61.3 (MPa)	1.51
آلومینیوم-برنج	1093 (MPa)	0.034	274 (MPa)	0.273

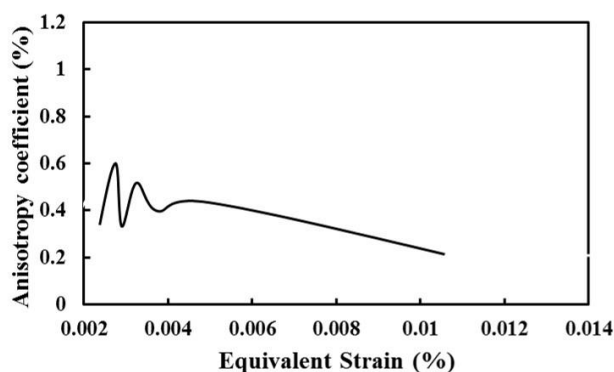


Fig. 7 Variation of anisotropy at equivalent strain during uniaxial tensile test for multilayered Al/Brass composite produced by ARB

شکل 7 تغییرات ناهمسانگردی بر حسب کرنش موثر در حین آزمون کشش تک‌محوره برای آلومینیوم و برنج دولایه تولید شده به روش اتصال نوردی

6- نتایج

در این تحقیق برای اولین بار، پارامترهای الاستیک و پلاستیک یک کامپوزیت لایه‌ای تولید شده به روش جوش سرد نوردی مورد مطالعه تجربی قرار گرفت و با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال به عنوان یک روش نوین، دقیق و غیرتماسی، مدول یانگ، ضریب پواسون، ضریب استحکام، توان کارسختی، ضریب ناهمسانگردی، استحکام تسلیم و کششی نهایی کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم استخراج شد. روش همبستگی تصاویر دیجیتال یک روش نوین، با دقت بالا برای اندازه‌گیری میدان‌های جابه‌جایی می‌باشد که با ردیابی نقاط مشابه از تصاویر دیجیتال قبل و بعد از تغییر شکل میزان جابه‌جایی را محاسبه می‌کند و دارای سه مرحله پوشش الگو روی سطح نمونه، ثبت تصاویر دیجیتال از سطح تغییر شکل یافته و سطح اولیه و نهایتاً استفاده از نرم‌افزار برای اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی و کرنش است. همچنین آزمون میکروسختی ویکرز و میکروسکوپ نوری برای بررسی پیوند بین لایه‌ها و تغییرات میکروسختی هر دو لایه آلومینیوم و برنج مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد.

تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار کامپوزیت نشان داد که یک ساختار کاملاً لایه‌ای با پیوند مناسب بین آلومینیوم و برنج برقرار شده است. این پیوند با استفاده از جوش سرد نوردی با کاهش ضخامت 66% بدست آمد. سختی لایه‌های آلومینیوم و برنج به ترتیب از 24 و 95 برای حالت قبل از نورد (ورق‌های اولیه)، به حدود 48 و 222 ویکرز برای لایه‌های کامپوزیت تولید شده رسید که بیانگر افزایش بیش از دوبرابری برای هر دولایه می‌باشد.

شده اولیه به شدت کاهش می‌یابد که با توجه به افزایش استحکام و میکروسختی و کار سرد مکانیکی منطقی به نظر می‌رسد [26, 31, 32].

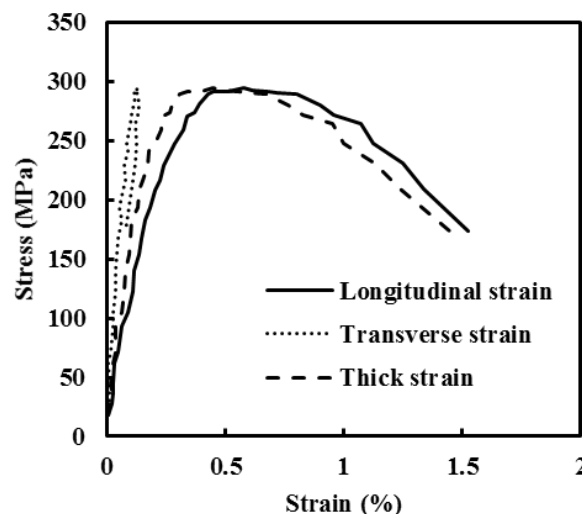


Fig 6 The engineering stress-strain curves of different longitudinal, transverse and thickness strains for Al/Brass composite produced by CRB

شکل 6 نمودارهای تنش کرنش مهندسی در کرنش‌های مختلف طولی، عرضی و ضخامتی برای آلومینیوم/برنج دولایه تولید شده به روش اتصال سرد نوردی

یکی دیگر از پارامترهای مهم در فرآیندهای شکل‌دهی، ضریب ناهمسانگردی می‌باشد که در این مقاله با استفاده از روابط پلاستیسیته و روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه شد. ضریب ناهمسانگردی در کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده به روش جوش سرد نوردی، مطابق با معادله (10) به صورت نسبت کرنش پلاستیک در راستای عرض به کرنش پلاستیک در ضخامت محاسبه شد. مقدار کرنش طولی و عرضی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال استخراج شد و با استفاده از معادله (9) مقدار کرنش در راستای ضخامت بدست آمد. در شکل 7، مقدار ناهمسانگردی پلاستیک بر حسب کرنش موثر برای کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده به روش جوش سرد نوردی ارائه شده است. برای محاسبه کرنش موثر از معادله (11) استفاده شده است. مطابق با شکل 7، مشاهده می‌شود که مقدار ناهمسانگردی برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج، با افزایش کرنش افزایش می‌یابد و کمی پس از نقطه‌ی گلویی کاهش می‌یابد. مطابق با جدول 3، مقدار ناهمسانگردی بر حسب کرنش مهندسی ارائه شده و ضریب ناهمسانگردی در نقطه‌ی گلویی 0.273 بدست آمد. در جدول 3، مقدار توان کرنش سختی و ضریب استحکام نیز ارائه شده است که از مقایسه توان کرنش سختی آلومینیوم خالص تجاری و کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با اتصال سرد نوردی می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال کارسرد و تغییر شکل شدید در کامپوزیت مقدار توان کارسختی کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر قابلیت کارمکانیکی در آن کاهش می‌یابد [33].

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_l + \varepsilon_w)} \quad (10)$$

8- مراجع

- [1] Rahmatabadi, D., Hashemi, R., Mohammadi, B. and Shojaee, T., "Experimental Evaluation of the Plane Stress Fracture Toughness for Ultra-Fine Grained Aluminum Specimens Prepared by Accumulative Roll Bonding Process" Materials Science and Engineering: A, Vol. 708, pp. 301-310, 2017.
- [2] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "Experimental Investigation of Fracture Surfaces and Mechanical Properties of Aa1050 Aluminum Produced by Accumulative Roll Bonding Process" Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016.
- [3] Rahmatabadi, D., Mohammadi, B., Hashemi, R. and Shojaee, T., "Experimental Investigation of Plane Stress Fracture Toughness for Al/Cu/Al Multilayer Produced by Cold Roll Bonding Method" Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 166-174, 2017.
- [4] Rahmatabadi, D., Mohammadi, B., Hashemi, R. and Shojaee, T., "An Experimental Study of Fracture Toughness for Nano/Ultrafine Grained Al5052/Cu Multilayered Composite Processed by Accumulative Roll Bonding" Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 140, No. 10, pp. 101001-101001-11, 2018.
- [5] Milner, D. and VAIDYANATH, L., "Significance of Surface Preparation in Cold Pressure Welding" MET CONSTR BR WELD J, Vol. 7, pp. 1-6, 1960.
- [6] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M. and Hashemi, R., "Investigation of Mechanical Properties, Fractography and Microstructure of Layered Al/Cu Composite Produced by Cold Roll Bonding", 2017.
- [7] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "Experimental Investigation of Formability of Aluminum Sheets Produced by Cold Roll Bonding Process Used by Nakazima Test" Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 451-454, 2017.
- [8] Rahmatabadi, D., Hashemi, R., Mohammadi, B. and Shojaee, T., "Experiment Investigation of Plane Stress Fracture Toughness for Aluminum Sheets Produced by Cold Roll Bonding Process" Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 101-108, 2017.
- [9] Zhang, W. and Bay, N., "Influence of Different Surface Preparation Methods on the Bond Formation in Cold Pressure Welding" in Proceeding of 379-388.
- [10] Vaidyarath, L., Nicholas, M. and Milner, D., "Pressure Welding by Rolling Brit" Welding J, Vol. 6, pp. 13-28, 1959.
- [11] Pan, D., Gao, K. and Yu, J., "Cold Roll Bonding of Bimetallic Sheets and Strips" Materials science and technology, Vol. 5, No. 9, pp. 934-939, 1989.
- [12] Danesh Manesh, H. and Karimi Taheri, A., "Study of Mechanisms of Cold Roll Welding of Aluminium Alloy to Steel Strip" Materials science and technology, Vol. 20, No. 8, pp. 1064-1068, 2004.
- [13] Mohamed, H. and Washburn, J., "Mechanism of Solid State Pressure Welding" Welding J, Vol. 55, pp. 302s-310s, 1975.
- [14] Nguyen, V.-T., Kwon, S.-J., Kwon, O.-H. and Kim, Y.-S., "Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2d-Digital Image Correlation Method" Procedia Engineering, Vol. 184, pp. 381-389, 2017/01/01/, 2017.
- [15] Shahmirzaloo, A. and Farahani, M., "Determination of Local Constitutive Properties of Aluminum Using Digital Image Correlation: A Comparative Study between Uniform Stress and Virtual Fields", 2018.
- [16] Foehring, D., Chew, H. B. and Lambros, J., "Characterizing the Tensile Behavior of Additively Manufactured Ti-6Al-4v Using Multiscale Digital Image Correlation" Materials Science and Engineering: A, Vol. 724, pp. 536-546, 2018/05/02/, 2018.
- [17] Orell, O., Vuorinen, J., Jokinen, J., Kettunen, H., Hytönen, P., Turunen, J. and Kanerva, M., "Characterization of Elastic Constants of Anisotropic Composites in Compression Using Digital Image Correlation" Composite Structures, Vol. 185, pp. 176-185, 2018/02/01/, 2018.
- [18] Sánchez-Arévalo, F. M. and Pulos, G., "Use of Digital Image Correlation to Determine the Mechanical Behavior of Materials" Materials Characterization, Vol. 59, No. 11, pp. 1572-1579, 2008/11/01/, 2008.
- [19] Claire, D., Hild, F. and Roux, S., "A Finite Element Formulation to Identify Damage Fields: The Equilibrium Gap Method" International journal for numerical methods in engineering, Vol. 61, No. 2, pp. 189-208, 2004.
- [20] Hedayati, N., Madoliat, R. and Hashemi, R., "Strain Measurement and Determining Coefficient of Plastic Anisotropy Using Digital Image Correlation (Dic)" Mechanics & Industry, Vol. 18, No. 3, pp. 311, 2017.
- [21] Peters, W. and Ranson, W., "Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis" Optical engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 213427, 1982.
- [22] Tong, W., "Formulation of Lucas-Kanade Digital Image Correlation Algorithms for Non-Contact Deformation Measurements: A Review" Strain, Vol. 49, No. 4, pp. 313-334, 2013.

همچنین نرخ افزایش بیشتر در لایه ی برنج به دلیل توان کارسختی بیشتر و انرژی نقص در چش کمر الیاز برنج نسبت به آلومینیوم خالص تجاری است. مقدار مدول الاستیسیته کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم بین مقادیر مدول الاستیسیته آلومینیوم و برنج بدست آمد و نسبت به مقادیر بدست آمده از روابط تئوری بر اساس قانون اختلاط و حجم مواد تشکیل دهنده دارای اختلاف بود که این اختلاف به دلیل عدم در نظر گرفتن ساختار و پیوند بین لایه ها می باشد و بررسی دقیق مدول الاستیسیته نیازمند استفاده از آزمایشات تجربی یا استفاده معادلات تئوری جدید است. مقدار مدول الاستیسیته برای کامپوزیت لایه ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با روش همبستگی تصاویر دیجیتال حدود 77.8GPa محاسبه شد.

کامپوزیت تولید شده دارای استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی به مراتب بالاتر از مواد اولیه به خصوص آلومینیوم است که به دلیل افزایش چگالی ناهنجاری ناشی از کارسرد، پیوند مناسب بین لایه های، نقش تقویت کننده و کارسختی بالای الیاز برنج تشخیص داده شد. مقدار استحکام کششی نهایی حدود 274MPa بدست آمد که نسبت به آلومینیوم خالص بیش از پنج برابر بهبود یافته است.

برای بررسی ضریب ناهمسانگردی در حین آزمون کشش، کرنش در راستای طول، عرض، ضخامت و ضریب ناهمسانگردی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و روابط پلاستیسیت بدست آمد و نتایج آن نشات داد که مقدار ناهمسانگردی در حین آزمون کشش تا نقطه گلویی افزایش می یابد و کمی پس از آن، با افزایش کرنش تا نقطه شکست روند کاهشی دارد.

7- فهرست علائم

b	ضخامت نمونه (mm)
E	مدول یانگ (GPa)
F	نیرو (N)
r	ضریب ناهمسانگردی
S_f	ناحیه اعمال شرایط مرزی (mm^2)
S_v	ناحیه اندازه گیری کرنش سطحی (mm^2)
u_0	جابجایی در جهت x (mm)
u_i^*	میدان جابجایی مجازی (mm)
v_0	جابجایی در جهت y (mm)
V	حجم ابتدایی است (mm^3)
w	عرض نمونه (mm)

علائم یونانی

ϵ_{ij}	کرنش
ϵ_{ij}^*	تانسور کرنش مجازی
$\bar{\epsilon}$	کرنش موثر
ϵ_l	کرنش طولی
ϵ_t	کرنش ضخامتی
ϵ_w	کرنش عرضی
σ_{ij}	تانسور تنش (MPa)
σ_y	تنش تسلیم (MPa)
σ_{UTS}	تنش کششی نهایی (MPa)
ν	ضریب پواسون

- [23] Saranath, K. and Ramji, M., "Local Zone Wise Elastic and Plastic Properties of Electron Beam Welded Ti-6Al-4V Alloy Using Digital Image Correlation Technique: A Comparative Study between Uniform Stress and Virtual Fields Method" Optics and Lasers in Engineering, Vol. 68, pp. 222-234, 2015.
- [24] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Hashemi, R. and Faraji, G., "Microstructure and Mechanical Properties of Al/Cu/Mg Laminated Composite Sheets Produced by the Arb Proces" International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, Vol. 25, No. 5, pp. 564-572, 2018.
- [25] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "Experimental Evaluation of Forming Limit Diagram and Mechanical Properties of Nano/Ultra-Fine Grained Aluminum Strips Fabricated by Accumulative Roll Bonding" International Journal of Materials Research, 2017.
- [26] Jamaati, R. and Toroghinejad, M., "Cold Roll Bonding Bond Strengths: Review" Materials Science and Technology, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
- [27] Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K. and Alexandrov, I. V., "Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation" Progress in materials science, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.
- [28] Pasebani, S. and Toroghinejad, M. R., "Nano-Grained 70/30 Brass Strip Produced by Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, No. 3, pp. 491-497, 2010.
- [29] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Hashemi, R. and Eghbali, B., "Investigation of Mechanical Properties and Microstructure for Al/Cu/Sic Composite Produced by Cross Accumulative Roll Bonding Process" Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 180-184, 2017.
- [30] Motevalli, P. D. and Eghbali, B., "Microstructure and Mechanical Properties of Tri-Metal Al/Ti/Mg Laminated Composite Processed by Accumulative Roll Bonding" Materials Science and Engineering: A, Vol. 628, pp. 135-142, 3/25/, 2015.
- [31] tayyebi, m., Rahmatabadi, D., rashidi, r. and Hashemi, R., "Evaluation of Mechanical Properties and Microstructure for Al/Ni %5 Produced by Cross Accumulative Roll Bonding Process" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 2, pp. 279-288, 2018.
- [32] tayyebi, M., Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "Review of Mechanical and Microstructural Properties of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Ceramic Particles Produced by Spd Processes" Journal of Science and Technology of Composites, pp. -, 2018.
- [33] Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Farahani, M. and Hashemi, R., "Characterization of the Plastic and Elastic Properties of Aluminum Sheet Produced by Crb Process Via Dic Method" Modares Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 505-513, 2019.



شبیه‌سازی عددی و تجربی دمانگاری برای شناسایی جدایش در آلومینیوم ترمیم شده با وصله کامپوزیتی

مرتضی مرادی¹، میرسعید صفی‌زاده^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، safizadeh@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 97/12/09	در سازه‌های مهم و حساسی مانند هواپیما، کشتی و خطوط انتقال گاز تعویض قطعات آسیب دیده امری پرهزینه و زمان‌بر است. در نتیجه، ترمیم سازه معیوب، یک روند قابل قبول می‌باشد. به منظور ترمیم سازه‌های آسیب دیده در صنایع مختلف و به ویژه صنعت هوافضا، از وصله‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. ارزیابی سازه ترمیم شده برای اطمینان از بازسازی، موضوعی چالش‌برانگیز است. تکنیک دمانگاری یکی از قدرتمندترین روش‌های آزمون غیرمخرب است که برای ارزیابی سازه‌های ترمیم شده استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر، عیوب نوع جدایش بین سازه مادر آلومینیومی و وصله کربن/اپوکسی 4 لایه با لایه‌چینی [0 ₄] به وسیله روش دمانگاری گامی ارزیابی شده است. عیوب نزدیک لبه وصله قرار گرفته‌اند چرا که در عمل، شروع جدایش در یک سازه ترمیم شده از لبه‌ها محتمل‌تر است. علاوه بر این، به دلیل اثرات لبه، شناسایی عیوب لبه نسبت به عیوب میانی دشوارتر می‌باشد. نتایج آزمون دمانگاری گامی با استفاده از روش دمانگاری فاز پالسی پردازش شده است. همچنین شبیه‌سازی روند آزمون دمانگاری به وسیله مدل‌سازی اجزا محدود انجام شده است. در نهایت، نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزا محدود مقایسه شده‌اند و دقت خوبی در دمانگاری گامی و الگوریتم دمانگاری فاز پالسی بدست آمده است.
پذیرش: 98/01/25	
کلیدواژگان:	
وصله‌های کامپوزیتی	
دمانگاری	
جدایش	
مدل‌سازی اجزا محدود	
دمانگاری فاز پالسی	

Experimental and numerical simulation of thermography for detection of disbond in repaired aluminum by composite patch

Morteza Moradi, Mir Saeed Safizadeh*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, safizadeh@iust.ac.ir

Keywords

Composite patches
Thermography
Disbond
Finite element modeling
Pulse phase thermography

Abstract

The replacement of damaged components is not affordable in important structures such as aircraft, ship or gas pipelines. So, the repair of a defective structure is an acceptable process. Composite patches are used to repair the damaged metal and composite structures in different industries, especially the aerospace industry. Assessment of the repaired structure is a challenging topic in order to ensure the restoration. The thermography technique is one of the most powerful non-destructive testing methods that is used to survey the repaired structures. In the present study, the defects of the de-bonding type between the based aluminum structure and the carbon/epoxy patch made by 4 layers with layup configuration [0₄] have been investigated by step heating thermography method. Defects locate close to the patch edges because it is more likely that debond onset in a repaired structure at edges in practice. Furthermore, detection of the edge defects is more difficult than the middle defects because of edge effects. The step heating thermography results have been processed by using pulse phase thermography (PPT) approach. Also, the simulation of thermography testing procedure carried out by finite element modeling (FEM). Finally, the results of the experiment and finite element modeling have been compared and good accuracy has been obtained in step heating thermography and PPT algorithm.

1- مقدمه

بارهای مکانیکی (از جمله ضربه) قرار دارند و یا تحت اثر عوامل محیطی (از جمله رطوبت و حرارت) شروع شوند. ترمیم‌ها مبحث گسترده و روبه گسترشی هستند که جایگاه خود را در صنایع مختلف یافته‌اند. به طور عمده، ترمیم سازه‌های فلزی و کامپوزیتی با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی صورت

کارایی سازه‌های مختلف و به خصوص سازه‌های کامپوزیتی در تمامی صنایع، ممکن است تحت تاثیر عواملی تغییر یابد. آسیب‌های سازه، ممکن است در مرحله ساخت (از جمله حفره‌ها، اتصال‌های ضعیف) یا زمانی که تحت

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Moradi, M. and Safizadeh, M. R., "Experimental and numerical simulation of thermography for detection of disbond in repaired aluminum by composite patch", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 591-600, 2020.

هم می‌تواند غیرفعال⁵ یا فعال⁶ باشد، گرادیان دما برای تشخیص عیب، اندازه‌گیری می‌شود. اگر دمانگاری غیرفعال برای موادی که دارای دمای متفاوت با محیط اطراف خود هستند استفاده شود، دمانگاری فعال با گرمادهی سریع به سطح تجهیزات با استفاده از منبع خارجی و بررسی چگونگی کاهش دما با زمان، صورت می‌پذیرد. از آنجایی که مواد کامپوزیتی دارای هدایت گرمایی کمی هستند، تکنیک دمانگاری برای بازرسی سازه‌های کامپوزیتی مناسب است. در رابطه با آسیب‌های زیرسطحی در کامپوزیت‌ها (مانند تورق، جدایش، ترک‌ها یا رطوبت) هدایت گرمایی محلی ظاهر گرادیان دما را درون ناحیه عیب تغییر می‌دهد. دمانگاری توانایی بازرسی ناحیه وسیعی را به منظور شناسایی عیوب زیرسطحی دارد. دمانگاری یک تکنیک مناسب برای بازرسی وصله‌های ترمیمی است. ویژگی اصلی دمانگاری، بازرسی غیرمخرب بدون تماس با دسترسی فقط به یک طرف، بازرسی سطوح بزرگ و پیچیده در زمان سریع و پردازش کردن داده‌ها در فرمت تصویر برای تصمیم‌گیری آنی است [15].

در مورد دمانگاری ترمیم‌ها نیز، تحقیقاتی صورت گرفته است. از آن جمله تحقیقات بالادیس و همکاران [16] است، که نقش بازسازی سیگنال دمانگاری را در بهبود یافتن انواع مختلفی از عیوب سازه ترمیم‌شده، نشان می‌دهد. با استفاده از این تکنیک، زمان عیب‌یابی در عین حفظ کیفیت بالای عیب‌یابی، کاهش یافته است. ولی سیگنال‌های نویز در کیفیت بازرسی تأثیر چشم‌گیری داشته است. آودلیدیس و همکاران [17] به طور مشابه، از دمانگاری برای عیب‌یابی وصله متصل به پنل هواپیمای کامپوزیتی با الیاف کربن یا برم استفاده کرده‌اند. نتایج این تحقیق نیز قوت این روش را در یافتن تورق‌ها و ناچ‌های نزدیک به سطح نشان می‌دهد. با این وجود، درصد خطای مربوط به محاسبه مساحت عیب، با افزایش عمق عیب، افزایش داشته است. آودلیدیس و همکاران همچنین [14] مروری بر نحوه استفاده از دمانگاری به منظور بررسی پیوستگی اتصال وصله داشته‌اند. جینست و همکاران [18] نیز در پژوهش خود از دمانگاری پالسی برای یافتن عدم اتصال و نمایش رشد آن در وصله گرافیتی متصل شده به سازه بهره برده‌اند. در مورد جدایش‌های کمتر از 30 میلی‌متر، خطای اندازه‌گیری این روش، حدود 25 درصد تخمین زده شده است، در حالی که در مورد عیوب بزرگ‌تر خطا به کمتر از 10 درصد رسیده است. دریاپر و صفی‌زاده [19-22] با استفاده از دمانگاری گامی، عیوب تورق و جدایش در وصله‌های کامپوزیتی را ارزیابی کردند. در مراجع ذکر شده از دمانگاری به منظور بررسی عیوب مختلفی از جمله جدایش استفاده شده و نتایج قابل قبولی حاصل شده است.

در پژوهش پیش‌رو، آسیب نوع جدایش بین سازه آلومینیومی مادر و وصله کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی و با لایه‌چینی [04] به وسیله روش دمانگاری گامی بررسی شده است. آسیب‌های جدایش نزدیک لبه وصله در نظر گرفته شده‌اند چرا که در عمل، شروع جدایش در یک وصله ترمیمی از لبه‌ها محتمل‌تر است. برای پردازش نتایج آزمون دمانگاری از روش دمانگاری فاز پالسی به همراه تکنیک‌های پردازش تصویر رایج استفاده شده است. به منظور تخمین مساحت نواحی معیوب استخراج شده از آزمون دمانگاری، با تعیین مقدار آستانه مطابق با دو روش آستانه‌بندی کلی و محلی برای تغییرات میدان حرارتی در تصویر، تصویر دامنه فوری به یک تصویر سیاه و سفید تبدیل شد و نتایج به صورت کمی مقایسه شدند. همچنین مدل‌سازی

می‌پذیرد. چرا که تأمین استحکام مورد نظر در راستای دلخواه از ویژگی اصلی ورق‌های کامپوزیتی می‌باشد. رایج‌ترین ترمیم‌هایی که در صنعت استفاده می‌شود، اتصال وصله کامپوزیتی به سازه‌های آسیب‌دیده فلزی است.

اولین موضوع مورد بررسی در هر تکنیک ترمیم سازه، حفظ استحکام و سفتی تجهیز آسیب دیده است، تا بتواند سرویس اولیه خود را تا آنجا که ممکن است، انجام دهد. بازرسی یک سازه ترمیم شده، یک عملیات مهم و حیاتی است که به منظور ارزیابی کیفیت فرآیند ترمیم و اتصال وصله باید انجام شود. آسیب‌های زیرسطحی در مواد کامپوزیتی می‌تواند به فرم ترک ماتریس¹، جدایش الیاف و ماتریس²، گسیختگی الیاف³ و تورق⁴ با ابعاد مختلف از چند میکرون تا چند سانتی‌متر باشند. برای ارزیابی آسیب‌های کامپوزیتی از عیب‌یابی غیرمخرب استفاده شده [1، 2] و می‌شود.

تغییر در ویژگی‌ها و نوع ترمیم ممکن است در ویژگی‌های سازه ترمیم‌شده، تغییر ایجاد کند. نحوه تغییر در رفتار مکانیکی سازه ترمیم‌شده، در برخی تحقیقات بررسی شده است [3-7]. نتایج بررسی‌های صورت گرفته توسط این مراجع، نشان داده که وصله‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر استحکام سازه‌های معیوب دارند. انتقال انرژی مکانیکی از ناحیه معیوب سازه مادر به وصله متصل به آن، عامل افزایش عمر سازه ترمیم شده است. در صورت رخ دادن جدایش در وصله، انتقال تنش به‌درستی رخ نمی‌دهد و عملکرد ترمیم به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از آنجایی که وجود عیب در سازه‌های ترمیم‌شده، چالش جدی به حساب می‌آید، تحقیقاتی نیز در زمینه روش‌های ساخت مناسب به منظور کاهش احتمال رخ دادن عیوب رایج در وصله‌ها و اتصالات آن‌ها، ارائه شده است. به عنوان مثال، جوکیچ و همکاران [8] به منظور به‌دست آوردن بهترین فرآیند اتصال وصله، تحقیقاتی را ارائه کرده‌اند. با وجود این، باز هم رخ دادن عیوب در هنگام ساخت و اتصال وصله‌ها اجتناب‌ناپذیر است. سابلکین و همکاران [9]، نحوه تغییر در رفتار خستگی یک پنل آلومینیومی ترک‌دار ترمیم‌شده با وصله آلومینیومی را به روش تجربی و تحلیلی بررسی کرده‌اند. نتایج، نشان داده است که هر یک از این عوامل به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای منجر به کاهش عمر باقی‌مانده سازه ترمیم‌شده، می‌شوند. در نتیجه وجود بازرسی مناسب برای اطمینان از پیوستگی وصله بسیار اهمیت می‌یابد. برای مثال، احمدی نجف‌آبادی و همکاران [10] خرابی در اتصالات آلومینیوم/کامپوزیت را با استفاده از آزمون غیرمخرب آکوستیک امیشن ارزیابی کردند. اخیراً به منظور بررسی اتصالات و ترمیم‌ها از مدل‌سازی‌های عددی استفاده شده است. به عنوان نمونه، تخریب در اتصالات چسبی [11، 12] و رشد ترک‌های ترمیم‌شده به‌وسیله وصله‌های کامپوزیتی [13] با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود بررسی شده‌اند.

تکنیک دمانگاری می‌تواند برای تشخیص حفره‌ها، عدم اتصال‌ها، نفوذ مایع یا آلودگی، اجسام خارجی و بخش‌های شکسته یا آسیب دیده بکار رود. معمولاً دمانگاری در تشخیص عیوب سطحی و نزدیک به سطح، توانمند است. چراکه تأثیر عیوب نزدیک به سطح در تغییر توزیع دمای سطح جسم بیشتر است. این روش آزمون غیرمخرب بر پایه این اصل که جریان گرما در یک ماده با وجود برخی غیریکنواختی‌ها تغییر می‌کند، پایه‌ریزی می‌شود. این تغییرات در جریان حرارت منجر به ایجاد اختلاف دمای محلی در ماده می‌شود. در نهایت، اندازه‌گیری عیوب تشخیص داده شده با به‌کارگیری برخی روش‌های پردازش تصویر و آنالیز داده، میسر می‌گردد [14]. در دمانگاری که

¹ Matrix cracking

² Fiber matrix debonding

³ Fiber breakage

⁴ Delamination

⁵ Passive

⁶ Active

که $k_{1,2,3}$ ضرایب هدایت حرارتی در جهات اصلی (براساس جهت الیاف هر لایه) لایه کامپوزیت هستند [19, 23]:

$$\begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \\ k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 \\ n^2 & m^2 & 0 \\ mn & -mn & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

که $m = \cos(\theta)$, $n = \sin(\theta)$ و θ زاویه جهت الیاف نسبت به محور x است. این زاویه در پژوهش حاضر صفر است، بنابراین:

$$\begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \\ k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ 0 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

به منظور محاسبه تابع توزیع دمای مدل، این معادلات باید به صورت همزمان حل شوند. در قسمت بعدی جزئیات مدل‌سازی المان محدود مورد بحث قرار خواهد گرفت.

3- مدل‌سازی اجزا محدود

در مطالعه حاضر، چندلایه کامپوزیتی از 6 لایه ساخته شده است: یک لایه آلومینیوم با ضخامت 2 میلی‌متر، یک لایه چسب با ضخامت 0.125 میلی‌متر و یک چندلایه کربن/اپوکسی با لایه‌چینی [04] که ضخامت کل آن 1 میلی‌متر است. ابعاد آلومینیوم مادر و وصله روی آن به ترتیب برابر با 300×170 و 150×50 میلی‌متر مربع است. عیوب ارزیابی شده در این مدل، آسیب نوع جدایش هستند که نزدیک به لبه وصله واقع شده‌اند. مدل‌سازی المان محدود به وسیله نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. ابعاد، شکل و موقعیت این عیوب در شکل 1 نمایش داده شده و همچنین مدل کلی در شکل 2 ارائه شده است.

خواص حرارتی کامپوزیت، چسب، عیوب و آلومینیوم که در مدل‌سازی اجزا محدود استفاده شده‌اند، در جدول 1 ارائه شده است. برای حرارت‌دهی سطح نمونه از یک لامپ هالوژن استفاده شد. توان اسمی این لامپ 2 کیلووات است که در مدت زمان 7 ثانیه حرارت‌دهی در این پژوهش حدود 1400 وات بر متر مربع شار حرارتی تولید می‌کند. تابع اعمال شار حرارتی به صورت یک تابع پله‌ای مطابق با شکل 3 در نظر گرفته شده است. مطابق با دمای اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاهی، دمای محیط 32.5 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

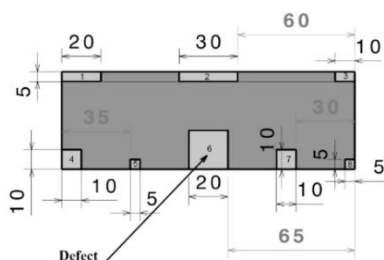


Fig. 1 The patch containing eight flaws. All dimensions are in millimeters. The defects have been labeled from 1 to 8 inside their region.

شکل 1 وصله حاوی 8 عیب. همه ابعاد برحسب میلی‌متر هستند. عیوب از شماره 1 تا 8 علامت‌گذاری شده‌اند

اجزا محدود روند آزمون دمانگاری به کمک نرم‌افزار آباکوس 2017 انجام شده است. در نهایت، نتایج تجربی و مدل‌سازی اجزا محدود مقایسه شده‌اند.

2- اصول انتقال حرارت

مدل مطالعه حاضر شامل 6 لایه (4 لایه کامپوزیت، 1 لایه چسب و 1 لایه آلومینیوم) است. به دلیل صفحات متقارن در مدل، ضرایب انتقال حرارت در ماتریس k_{ij} مطابق با رابطه (1) به 5 مولفه غیرصفر کاهش می‌یابد:

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{symmetric}} \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & 0 \\ k_{yx} & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

مطابق با رابطه (2)، معادلات انتقال حرارت گذرا بایستی برای هر لایه به صورت جداگانه ارضا شود [19]:

$$k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + 2k_{xy} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

که k نسبت هدایت حرارتی و C_p ظرفیت گرمای ویژه است. برای هر سطح تماس بین لایه‌های n ام و $(n+1)$ ام، رابطه (3) برقرار است [19]:

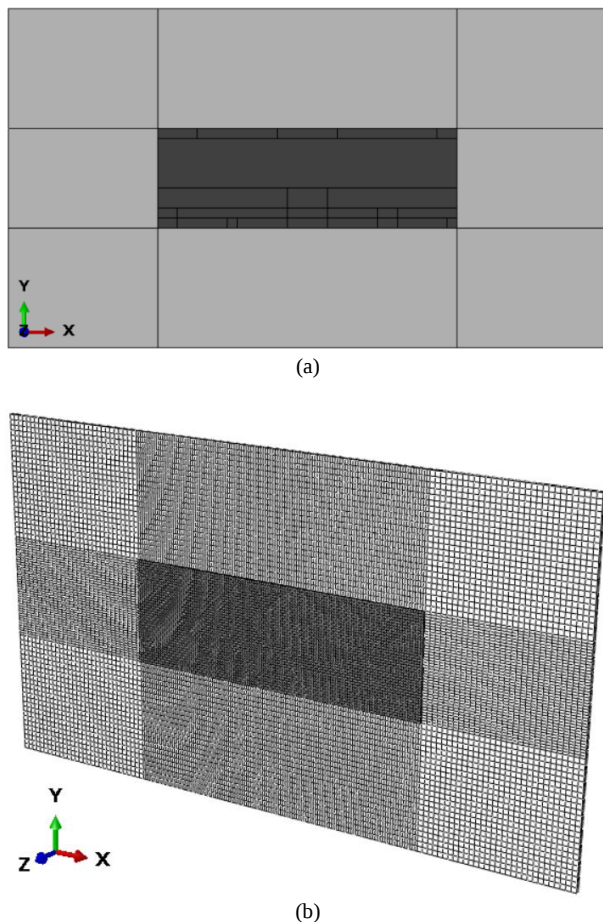
$$T_n \left(x, y, \frac{H}{2} \right) = T_{n+1} \left(x, y, -\frac{H}{2} \right) \\ k_{zz}^n \frac{\partial T_n}{\partial z} \left(x, y, \frac{H}{2} \right) = -k_{zz}^{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial z} \left(x, y, -\frac{H}{2} \right) \quad (3)$$

که H ضخامت لایه است. برای تماس با هوا در هر سطح که شرایط مرزی آزاد دارد، می‌توان رابطه (4) را بازنویسی کرد [19]:

$$\begin{aligned} & - \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & = h_1 \left(T_{\infty} - T_{\left(\pm \frac{L}{2}, y, z \right)} \right) \\ & + \varepsilon \sigma \left(T_{\left(\pm \frac{L}{2}, y, z \right)}^4 - T_{\infty}^4 \right) \\ & - \left(k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ & = h_2 \left(T_{\infty} - T_{\left(x, \pm \frac{L}{2}, z \right)} \right) \\ & + \varepsilon \sigma \left(T_{\left(x, \pm \frac{L}{2}, z \right)}^4 - T_{\infty}^4 \right) \\ & - \left(k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = h_3 \left(T_{\infty} - T_{\left(x, y, \pm \frac{L}{2} \right)} \right) \\ & + \varepsilon \sigma \left(T_{\left(x, y, \pm \frac{L}{2} \right)}^4 - T_{\infty}^4 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

رابطه (4) مربوط به 6 سطح آزاد جانبی است که با محیط در تماس هستند. در این معادله دمای محیط T_{∞} است، ضرایب همرفت هوا در سطوح آزاد x , y و z هستند و ε ضریب تشعشع سطح کامپوزیت و σ ثابت استفان-بولتزمن می‌باشند. برای تبدیل ضرایب انتقال حرارت از جهات مرجع به دیگر جهات دلخواه می‌توان از تانسور انتقال استفاده کرد. ماتریس مولفه‌های ضرایب انتقال حرارت در جهات دلخواه مطابق با رابطه (5) قابل محاسبه است

نمایش شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود، که در این بخش شرح داده شد، به منظور مقایسه با داده‌های بدست آمده از آزمایش در قسمت بحث و نتایج ارائه شده است.



شکل 4 (a) طرح تقسیم‌بندی مدل (b) مدل شبکه‌بندی شده نهایی

در ادامه روش مورد استفاده برای پردازش داده‌های خام دمانگاری شرح داده می‌شود.

4- تکنیک پس‌پردازش

نتایج حاصل از آزمون دمانگاری عموماً در حالت خام و پردازش نشده قابل تفسیر نیستند و تنها در شرایطی عیوب قابل مشاهده هستند که عمق آن‌ها بسیار کم و ابعاد آن‌ها بسیار بزرگ باشد، اما در غیر این صورت نتایج باید پردازش شوند. حتی در مواقعی که بدون پردازش نتایج، عیوب قابل شناسایی هستند، مرز و ناحیه دقیق آن‌ها قابل تفکیک نیست. تکنیک دمانگاری فاز پالسی^۱ یا تحلیل فوریه فاز^۲، یک پردازش قوی و پیشرفته دمانگاری پالسی است. در این تکنیک، تصاویر حرارتی با پردازش یک تابع دما به وسیله تبدیل فوریه گسسته، از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند. به عبارت دیگر:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} = Re_n + iIm_n \quad (7)$$

همچنین انتقال حرارت همرفت و تابشی برای تمامی سطوح در نظر گرفته شده است. ضریب تشعشع سطح وصله کربن/اپوکسی و آلومینیوم به ترتیب 0.95 و 0.09 در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت همرفت نیز 20 وات بر مترمربع کلونین فرض شده است [19].

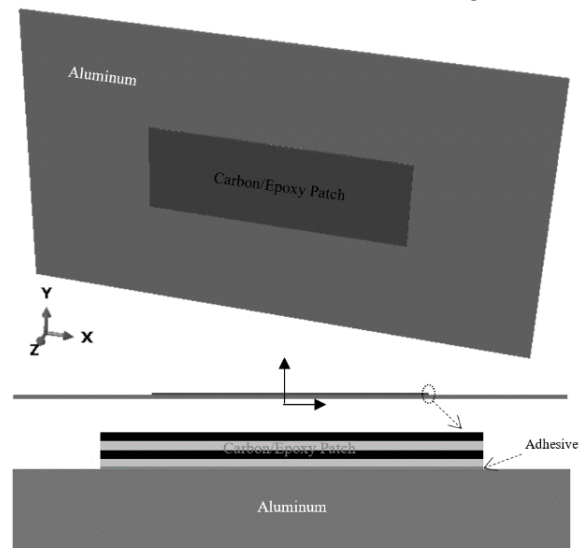


Fig. 2 The overall model of aluminum and patch.

شکل 2 مدل کلی آلومینیوم و وصله.

جدول 1 خواص حرارتی مواد استفاده شده.

Table 1 The thermal properties of utilized materials [19].

Material	Density (ρ) (kg/m ³)	Heat specific capacity (Cp) (J/kg.K)	Conductivity (K) (W/K.m)		
			K ₁	K ₂	K ₃
Carbon/epoxy	1600	900	5	0.5	0.5
Aluminum	2700	900	250		
Adhesive	1100	1100	0.2		
Air	1.2	1	0.025		

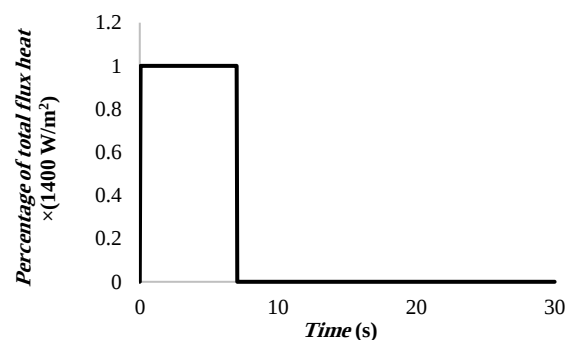


Fig. 3 The function of the applied heat flux for FE simulation.

شکل 3 تابع شار حرارتی اعمال شده برای شبیه‌سازی اجزا محدود.

مدل شبکه‌بندی نقشی حیاتی در این شبیه‌سازی بازی می‌کند. به‌منظور دستیابی به حل و همگرایی مناسب‌تر، ابتدا هندسه مدل به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم شده (شکل 4-ا) و سپس شبکه‌بندی انجام شده است. در نهایت، تعداد المان‌های نمونه 60480 عدد است و المان از نوع 6 وجهی خطی DC3D8 می‌باشد که یک المان توپر سه‌بعدی متداول برای انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شود. مدل شبکه‌بندی شده نهایی در شکل 4-ب

¹ Pulse Phase Thermography

² Phase Fourier Analysis

دوربین که مطابق با جدول 2 حدود 0.08 در 30 درجه سانتی‌گراد است، زمان حرارت‌دهی با لامپ هالوژن موجود، در بهترین حالت باید بزرگتر از 2 ثانیه باشد. چرا که حرارت‌دهی با مقادیر کمتر، حداکثر اختلاف دمایی که بین نواحی معیوب و سالم ایجاد می‌کند، در محدود شناسایی دوربین نیست. علاوه بر این، برای شناسایی عیوب به‌صورت قابل قبول، زمان حرارت‌دهی باید بزرگتر از مقدار حداقل باشد.

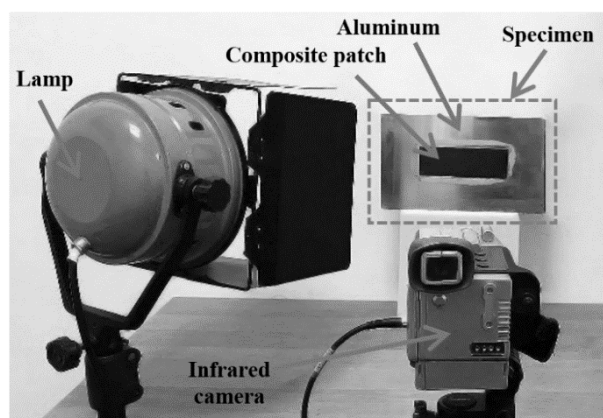


Fig. 5 Step heating thermography layout.

شکل 5 چیدمان آزمون دمانگاری گامی.

در نتیجه حرارت‌دهی به مدت 7 ثانیه انتخاب می‌شود، زیرا علاوه بر ارضا کردن شرایط ذکر شده، این زمان به‌صورت متداول در تحقیقات مشابه [19-21] استفاده شده است. در تحقیق حاضر فاصله تقریبی تنظیم شده بین دوربین حرارتی و نمونه حدود 0.75 متر است. این فاصله به نحوی تنظیم شده است که دوربین قادر به ثبت ناحیه قابل قبول مربوط به یک وصله را داشته باشد. نمونه مورد بازرسی به‌صورت عمودی روبروی دوربین مادون‌قرمز قرار داده شد. ثبت فیلم‌های دمانگاری چند ثانیه قبل از شروع حرارت‌دهی، آغاز شده و تا حدود 1 دقیقه بعد از خاموش شدن لامپ‌ها (مرحله خنک شدن) ادامه یافته است. برای انتقال داده‌های تصویری به رایانه، از یک پورت چند کاناله استفاده شده است. به این ترتیب قابلیت ذخیره تصاویر به‌صورت ویدئو نیز فراهم می‌شود. داده‌های دوربین حرارتی به‌صورت فیلم با استفاده از برنامه مولتی‌ویوور روی رایانه ذخیره می‌شود که در این فرآیند، وضوح فیلم‌های ذخیره شده 240×320 پیکسل می‌باشد. دقت شود که عواملی همچون، دمای محیط و تغییرات آن، شرایط تهویه محیط، هم‌دمایی یا اختلاف دمای قطعه با محیط و دمای بدن محقق یا محققین که پشت دوربین حرارتی هستند، در نتایج آزمایش تأثیر گذار است. همچنین انعکاس نور از بدنه خود دوربین حرارتی مؤثر می‌باشد. در نتیجه در مراحل آزمایش، تا حد امکان از تشدید موارد ذکر شده جلوگیری شد. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آزمایش و پردازش داده‌های تجربی ارائه و تفسیر می‌شوند.

6- بحث و نتایج

به‌منظور بررسی مناسب‌تر نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود، بایستی تغییرات دمای سطح وصله کامپوزیتی در زمانی استخراج شود که تغییر میدان حرارتی بین نواحی معیوب و سالم در آن زمان حداکثر باشد. برای دستیابی به این هدف، یک مسیر از روی عیوب پایین وصله (عیوب شماره 4 تا 8) تعریف شده و تغییرات دما به ازای زمان‌های مختلف (با دقت 1 ثانیه) ثبت گردیده است.

در رابطه $(\gamma) = \sqrt{-1}$ ، j ، عدد موهومی، N ، تعداد فرکانس‌ها (تعداد فریم‌ها) و n ، فرکانس (شماره فریم) مورد ارزیابی است $(n = 0, 1, \dots, N)$ ، Δt ، فاصله زمانی نمونه‌برداری و Re و Im به ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی تبدیل فوریه گسسته می‌باشند. به‌منظور سادگی، تبدیل فوریه سریع به جای تبدیل فوریه گسسته به کار می‌رود چرا که تبدیل فوریه سریع یک الگوریتم محاسباتی کارآمد می‌باشد. با تبدیل داده‌ها به حوزه فرکانس، تصاویر دامنه (A_n) و فاز (ϕ_n) در فرکانس‌های مختلف، با استفاده از رابطه (8) قابل محاسبه است.

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \quad ; \quad \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right) \quad (8)$$

با انتخاب تصاویر دامنه و فاز مناسب با تفکیک‌پذیری بالا میان نواحی سالم و معیوب، نواحی معیوب قابل شناسایی است. در مطالعه حاضر، داده‌های حرارتی خام با استفاده از روش تحلیل فوریه و به کمک نرم‌افزار متلب پردازش شدند و تصاویر دامنه و فاز حاصل، با تفکیک‌پذیری قابل قبول میان نواحی سالم و معیوب انتخاب شده و در قسمت بحث و نتایج، ارائه شده‌اند.

5- آزمایش

برای ساخت وصله‌های کامپوزیتی از الیاف کربن SkiaWarp-230C ساخت هلند و رزین اپوکسی و همچنین از روش ساخت لایه‌چینی دستی استفاده شد. وصله‌های کامپوزیتی بر اساس دستورالعمل سازنده رزین پخت شدند. مطابق اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در پایان مراحل ساخت، ضخامت وصله حدود 1 میلی‌متر می‌باشد که نشان‌دهنده ضخامت 0.25 میلی‌متری هر لایه کامپوزیت است. در تمام مراحل ساخت دقت شده است که به‌جز مناطق موردنظر، در تمام سطوح اتصال کامل ایجاد شود.

به‌منظور بازرسی نمونه به روش دمانگاری، از دوربین مادون‌قرمز IR928+ محصول شرکت وان گایدر¹ با مشخصات موجود در جدول 2 استفاده شده است.

جدول 2 مشخصات دوربین مادون قرمز.

Table 2 The properties of infrared camera.

Property	Value
Visibility	15×21 degree
Minimum setting distance	15 inch (0.38 m)
Temperature sensitivity	0.08 centigrade in 30 centigrade
Digital Image Dimensions	480×640 pixels with 2 ²⁴ colors
Temperature range	20 to 500 centigrade
Sampling rate	25 Hz

نحوه چیدمان دوربین و لامپ هالوژن نسبت به نمونه مورد بازرسی در شکل 5 نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده، از یک لامپ هالوژن به‌عنوان منبع حرارتی استفاده شده است که توان مصرفی 2000 وات دارد. مطابق با نتایج حاصل از فصل شبیه‌سازی عددی فرآیند آزمون دمانگاری، مدت زمان حرارت‌دهی مجاز برای نمونه‌های آزمایش به وسیله لامپ‌های هالوژن حاضر باید کمتر از 30 ثانیه باشد و حرارت‌دهی بیشتر به وصله‌های کامپوزیتی آسیب می‌رساند. با توجه به حساسیت دمایی

¹ Wuhan Guider

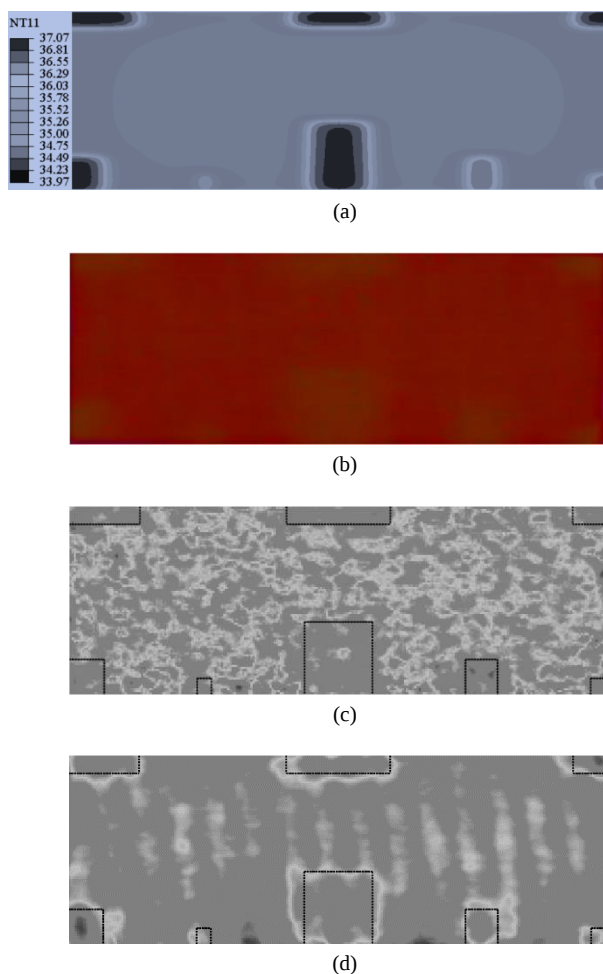


Fig. 7 Results of (a) the numerical simulation, (b) the raw thermal data, (c) the Fourier phase image and (d) the Fourier amplitude image.

شکل 7 نتایج (a) شبیه‌سازی عددی، (b) داده‌های خام حرارتی، (c) تصویر فاز فوری، (d) تصویر دامنه فوری.

برای افزایش تضاد و تباین در تغییرات شدت نور تصویر دامنه فوری که متناسب با تغییرات دما است، می‌توان از تابع افزایش کنتراست تعریف شده در نرم‌افزار متلب استفاده کرد. به عبارت دیگر، با این فرآیند شیب تغییرات شدت نور (متناسب با دما) افزایش می‌یابد و مرز مناطقی که تغییر رنگ داده‌اند برجسته‌تر می‌شود. در نتیجه تفکیک پذیری نواحی معیوب از نواحی سالم افزایش می‌یابد. این تابع با برابری هیستوگرام داده‌ها، تباین را افزایش می‌دهد. نتیجه حاصل از اعمال این تابع روی تصویر دامنه فوری، در شکل 8-a نمایش داده شده است. مناطق معیوب در این تصویر برجسته‌تر شده ولی برخی از نواحی سالم سطح وصله نیز به صورت گمراه کننده‌ای هم‌رنگ این مناطق شده است. این موضوع به دلیل همسان‌سازی هیستوگرام به صورت خودکار، توسط نرم‌افزار است. با انتخاب بازه مناسب همسان‌سازی به صورت دستی در نرم‌افزار، تصویر حاصل (شکل 8-b) عیوب جدایش لبه‌ای را با تفکیک قابل قبولی آشکار می‌سازد. همچنین با تعیین یک مقدار آستانه، می‌توان تصویر دامنه فوری را به یک تصویر دودویی سیاه و سفید تبدیل کرد. بدین منظور بایستی از روش‌های آستانه‌بندی استفاده شود. در مطالعه حاضر از دو روش به منظور تعیین مقدار آستانه استفاده شده است که عبارتند از:

مقدار انحراف معیار برای این تغییرات دمایی به ازای زمان‌های مختلف محاسبه شده، که نتیجه آن در شکل 6 قابل مشاهده است.

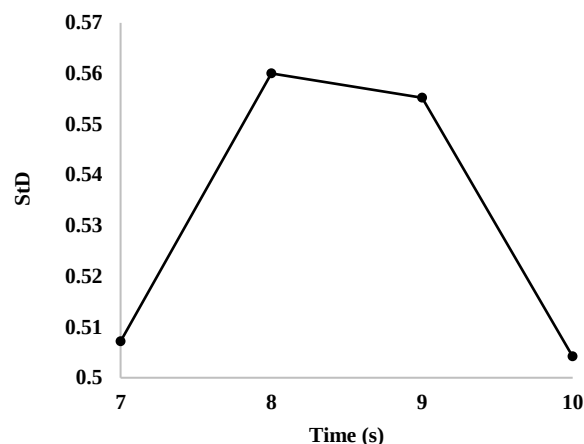


Fig. 6 The standard deviation values resulting from temperature variations (on the defined path which passes on the lower debondings of the patch) over passing time from the moment of heating initiation.

شکل 6 مقادیر انحراف معیار حاصل از تغییرات دمایی (روی مسیر تعریف شده که از جدایش‌های پایین وصله عبور می‌کند) به ازای گذشت زمان از لحظه شروع حرارت‌دهی.

با توجه به شکل 6، بیشترین مقدار انحراف معیار مربوط به ثانیه هشتم است. به عبارت دیگر، تفکیک‌پذیری بین مناطق معیوب و سالم در ثانیه هشتم بیشترین مقدار را دارد. در نتیجه تغییرات دمای حاصل از شبیه‌سازی عددی در سطح وصله در ثانیه هشتم، برای مقایسه با نتایج تجربی انتخاب شده است. این میدان دمایی در شکل 7-a قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، پخش حرارتی در مرزهای نواحی معیوب و سالم محسوس است و با مشاهده و دقت بیشتر این پدیده در راستای طولی و عرضی وصله کامپوزیتی، می‌توان دریافت که پخش حرارتی در راستای طولی کمی بیشتر است. این موضوع به دلیل بیشتر بودن ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت در جهت الیاف نسبت به جهت عمود بر آن‌ها است. مطابق با نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود، عیوب شماره 7، 8 و به خصوص 5 به سختی قابل شناسایی خواهند بود. این موضوع به دلیل ابعاد کوچک‌تر این عیوب نسبت به جدایش‌های دیگر است.

تصویر خام حاصل از آزمون دمانگاری که در شکل 7-b نمایش داده شده، قابل تفسیر نیست و تفکیک محسوسی میان نواحی معیوب و سالم مشاهده نمی‌شود.

پس از پردازش داده‌های خام حرارتی با روش شرح داده شده در قسمت تکنیک پس‌پردازش، تصاویر فاز و دامنه تبدیل فوری بدست آمد که به ترتیب در شکل‌های 7-c و 7-d نمایش داده شده‌اند. در این شکل‌ها مرز دقیق عیوب جدایش به منظور مقایسه بهتر اضافه شده است. با مقایسه چشمی تصاویر شکل‌های 7-c و 7-d می‌توان دریافت که تصویر دامنه تبدیل فوری نسبت به تصویر فاز، تفکیک قابل قبول‌تری به وجود آورده است. همانند نتایج شبیه‌سازی عددی، عیوب شماره 7، 8 و به خصوص 5 در تصویر دامنه فوری به سختی متمایز می‌شوند. به منظور بهبود نتایج تصویر دامنه فوری، می‌توان از تکنیک‌های پردازش تصویر استفاده کرد که در ادامه روند و نتیجه اعمال برخی از آن‌ها به صورت مختصر ارائه شده است.

همسایه خود به واسطه یکی از سه روش مقدار شدت میانگین محلی، میانه محلی و میانگین وزنی گوسی، مقادیر آستانه محلی محاسبه می‌شوند. پس از بررسی‌های انجام شده روی سه روش ذکر شده، روش میانگین وزنی گوسی در خصوص آستانه‌بندی محلی اعمال شد که تصویر حاصل از آن در شکل ۸-d نمایش داده شده است. لازم بذکر است که دو روش شدت میانگین محلی و میانه محلی منجر به نتایج نسبتاً غیر قابل قبولی شدند.

با استفاده از شکل‌های ۸-c و ۸-d می‌توان مساحت نواحی معیوب تخمین زده شده را محاسبه کرد چرا که رنگ سفید مطلق، نمایانگر نواحی سالم و رنگ سیاه مطلق، نمایانگر نواحی معیوب است. لازم بذکر است که برخی مناطق سالم همچنان به عنوان ناحیه آسیب دیده شناسایی شده که این موضوع ناشی از نویز با شدت زیاد می‌باشد. این اثرات را می‌توان در آینده با استفاده از دیگر تکنیک‌های پیشرفته پردازش تصویر و سیگنال مانند الگوریتم‌های مورفولوژی کاهش داد. با این حال، مساحت نواحی آسیب دیده تخمین زده شد که نتایج به همراه خطای تشخیص در قیاس با مساحت‌های دقیق، برای هر دو روش آستانه‌بندی کلی و محلی اعمال شده به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ گزارش شده است.

جدول ۳ مساحت و خطای عیوب تخمین زده شده به وسیله تصویر دامنه فوریه پس از

تبدیل تصویر خاکستری به تصویر سیاه و سفید با استفاده از روش آستانه‌بندی کلی اوتسا.

Table 3 The area and error approximated by Fourier amplitude image after converting the gray image to the binary image by the global thresholding in accordance with Otsu's method.

No. defect	Exact area (mm ²)	Approximated area (mm ²)	Error
1	100	122.6	23%
2	150	203.9	36%
3	50	62.8	26%
4	100	135.16	35%
5	25	7.3	71%
6	400	466	17%
7	100	140.8	41%
8	25	23.8	5%

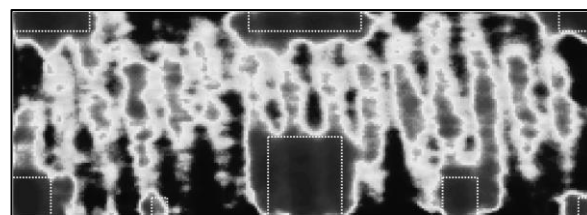
جدول ۴ مساحت و خطای عیوب تخمین زده شده به وسیله تصویر دامنه فوریه پس از

تبدیل تصویر خاکستری به تصویر سیاه و سفید با استفاده از روش آستانه‌بندی محلی.

Table 4 The area and error approximated by Fourier amplitude image after converting the gray image to the binary image by the local thresholding.

No. defect	Exact area (mm ²)	Approximated area (mm ²)	Error
1	100	102.4	2%
2	150	145.1	3%
3	50	42.6	15%
4	100	74.6	25%
5	25	12.6	50%
6	400	406.8	2%
7	100	140.4	40%
8	25	25.4	2%

مطابق با جداول ۳ و ۴، بیشترین خطا مربوط به جدایش شماره ۵ می‌باشد که جزء کوچک‌ترین عیوب می‌باشد و در میانه لبه وصله قرار دارد (نه در گوشه



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Results of (a) the Fourier amplitude image with applying automatic contrast function, (b) the Fourier amplitude image with setting manual contrast, (c) the converted Fourier amplitude image to black and white image by the global thresholding in accordance with Otsu's method, (d) the converted Fourier amplitude image to black and white image by the local thresholding.

شکل ۸ نتایج (a) تصویر دامنه فوریه با اعمال تابع تباین خودکار، (b) تصویر دامنه فوریه با تنظیم تباین به صورت دستی، (c) تبدیل تصویر دامنه فوریه به تصویر سیاه و سفید با استفاده از مقدار آستانه کلی مطابق با روش اوتسا، (d) تبدیل تصویر دامنه فوریه به تصویر سیاه و سفید با استفاده از مقدار آستانه محلی.

روش اول (آستانه‌بندی کلی تصویر): به منظور انتخاب یک مقدار آستانه برای تبدیل تصویر خاکستری به تصویر سیاه و سفید از روش آقای اوتسا [24] که رایج‌ترین روش تعیین مقدار آستانه کلی یک تصویر خاکستری می‌باشد، استفاده شده است (شکل ۸-c).

روش دوم (آستانه‌بندی محلی تصویر): به منظور انتخاب مقادیر آستانه برای تبدیل تصویر خاکستری به تصویر سیاه و سفید از روش آستانه‌بندی محلی [25] که روشی نسبتاً جدید است، می‌توان استفاده کرد. این روش برای تبدیل تصاویر خاکستری که توزیع شدت نور غیریکنواختی دارد به تصاویر سیاه و سفید بسیار کاربردی است. در این روش برای کل تصویر یک مقدار آستانه انتخاب نمی‌شود، بلکه برای هر پیکسل نسبت به پیکسل‌های

غیرمخرب برای آستانه‌بندی کلی (روش اوتسا) 3.3% و برای آستانه‌بندی محلی 0.6% است.

7- نتیجه‌گیری

در صنایع متفاوت بخصوص صنعت هوافضا، تعویض قطعات معیوب فرآیندی مقرون‌به‌صرفه نیست. به عنوان فرآیند جایگزین تعویض قطعات آسیب دیده، ترمیم سازه‌های آسیب دیده، انجام شده و می‌شود. رایج‌ترین نوع ترمیم، استفاده از وصله‌های کامپوزیتی است چرا که قابلیت طراحی و تحمل تنش در جهات متفاوت را دارند. آزمون غیرمخرب دمانگاری یکی از رایج‌ترین و قدرتمندترین تکنیک‌ها برای ارزیابی سازه‌های ترمیم شده می‌باشد. در تحقیق صورت گرفته، عیوب جدایش با ابعاد متفاوت، بین سازه مادر آلومینیومی و وصله کربن/اپوکسی 4 لایه تک‌جهته به وسیله روش دمانگاری گامی بررسی شد. به دلیل این‌که در عمل، شروع جدایش در یک قطعه ترمیم شده از لبه‌ها محتمل‌تر است، جدایش‌های مدنظر نزدیک لبه و گوشه‌های وصله قرار گرفتند. پس از پردازش داده‌های خام دمانگاری با استفاده از تحلیل فوری، تصاویر فاز و دامنه فوری به تصویر خام حرارتی مقایسه شدند که تصویر دامنه فوری نسبت به فاز عیوب را با تفکیک مناسب‌تری آشکار ساخت. علاوه‌براین، شبیه‌سازی اجزا محدود روند آزمون دمانگاری صورت گرفت و نتایج با تصاویر تجربی مقایسه شدند که مطابقت قابل قبولی بدست آمد. پس از افزایش تضاد و تباین تصویر دامنه فوری به کمک تکنیک‌های رایج پردازش تصویر، تفکیک‌پذیری نواحی معیوب از نواحی سالم افزایش یافت. در نهایت، با تعیین مقدار آستانه مطابق با دو روش آستانه‌بندی کلی و محلی برای تغییرات میدان حرارتی در تصویر، تصویر دامنه فوری به یک تصویر سیاه و سفید تبدیل شد و مساحت تخمین زده شده مربوط به نواحی معیوب، بدست آمد. بیشترین خطا مطابق با مقدار آستانه کلی (71%) و محلی (50%) مربوط به عیب شماره 5 بود که ابعاد 5×5 میلی‌متر دارد و جزء کوچک‌ترین جدایش‌های لبه‌ای جاسازی شده در تحقیق حاضر است. این جدایش لبه‌ای نسبت به جدایش متناظر خود با ابعاد برابر در گوشه وصله، با دقت کمتری شناسایی شد. در نتیجه، شناسایی عیوب لبه‌ای میانه وصله کامپوزیتی نسبت به عیوب لبه‌ای گوشه‌ها، با دقت کمتری همراه بود. در کل، تکنیک دمانگاری گامی به همراه روش پس‌پردازش تحلیل فوری، نتایج قابل قبولی ارائه داد و استفاده از روش آستانه‌بندی محلی به منظور تبدیل تصویر خاکستری حاصل به تصویر سیاه و سفید منجر به خطای کمتری نسبت به روش آستانه‌بندی کلی شد.

8- مراجع

- [1] Riahi, M. and Ahmadi, A., "Utilization of artificial neural networks for detection and classification of damages in composite plate-like structures via ultrasonic guided waves", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, 2018.
- [2] Ashory, M. R. Gasemi-ghalebahman, A. and Kokabi, M. J., "Increasing robustness of solution to noise for identifying delamination damage in composite plates using a hybrid method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 2, pp. 125-134, 2017.
- [3] Barut, A., Hanauska, J., Madenci, E. and Ambur, D., "Analysis Method for Bonded Patch Repair of a Skin with a Cutout" Composite structures, Vol. 55, No. 3, pp. 277-294, 2002.
- [4] Caminero, M. A., Pavlopoulou, S., Lopez-Pedrosa, M., Nicolaïsson, B., Pinna, C. and Soutis, C., "Analysis of Adhesively Bonded Repairs in Composites: Damage Detection and Prognosis" Composite Structures, Vol. 95, pp. 500-517, 2013.

وصله). با مقایسه دو به دو عیوب شماره 4 و 8 (گوشه‌ها) با عیوب متناظر شماره 7 و 5 (لبه‌های میانی) که ابعاد برابر دارند، می‌توان دریافت که شناسایی عیوب گوشه‌ها نسبت به عیوب لبه‌های میانی با تکنیک تبدیل فوری، دشوارتر است. مطابق با جدول 3 برای همه عیوب به جز عیب شماره 5 و 8، مقدار مساحت تخمینی بزرگ‌تر از مساحت دقیق است. این موضوع به دلیل اثر پخش حرارتی در ماده می‌باشد، چرا که تغییر جنس ناحیه معیوب (هوا) به ناحیه سالم (کامپوزیت) باعث تغییر ضریب هدایت حرارتی و به تبع تغییر انتقال حرارت شده است. این اختلاف دما در زیر وصله و دقیقاً در مرز نواحی معیوب و سالم به وجود می‌آید، اما دوربین مادون‌قرمز تغییرات دمایی سطح وصله کامپوزیتی را ثبت می‌کند و تغییرات دما تا رسیدن به سطح نمونه، پخش می‌شود. در نتیجه عیوب بزرگ‌تر از مقادیر واقعی دیده می‌شوند. این مسئله در روش آستانه‌بندی کلی تصویر محسوس است در صورتی که مطابق با جدول 4، در خصوص روش آستانه‌بندی محلی، نه تنها نمی‌توان نتیجه گرفت که مقدار مساحت تخمینی برای اکثر عیوب بزرگ‌تر از مساحت دقیق است، بلکه با مقایسه مقادیر متناظر دو جدول 3 و 4، واضح است که تبدیل تصویر خاکستری به تصویر سیاه و سفید با استفاده از روش آستانه‌بندی محلی، خطای تخمین نواحی معیوب را کاهش داده است. به عبارت دیگر، میانگین خطای تخمین مساحت عیوب جدایش پس از دودویی کردن تصویر به واسطه آستانه‌بندی کلی 32% می‌باشد و با تغییر روش آستانه‌بندی کلی به محلی، این مقدار خطا به 17% کاهش می‌یابد. در نتیجه استفاده از روش مناسب آستانه‌بندی تصویر به منظور تبدیل تصویر خاکستری نهایی به تصویر سیاه و سفید اثر قابل توجهی در ارزیابی عملکرد بازرسی انجام شده می‌گذارد.

از آنجایی که هدف این مطالعه، ارزیابی سلامت ترمیم با وصله کامپوزیتی در اتصال به آلومینیوم ترمیم‌شده است، می‌توان مجموع کل سطح معیوب تخمین زده شده وصله را (اعم از ناحیه معیوب تخمین زده شده صحیح یا غلط) نسبت به کل سطح اتصال (وصله) را ملاک حساسیت آزمون غیرمخرب در نظر گرفت. همچنین، می‌توان نسبت کل سطح سالم تخمین زده شده وصله را (اعم از ناحیه سالم تخمین زده شده صحیح یا غلط) به کل سطح اتصال (وصله) بدست آورد. بدین صورت اثر شدت نویز و حساسیت اندازه‌گیری نیز تا حدودی قابل درک است. نسبت‌های ذکر شده پس از تخمین با استفاده از آزمون غیرمخرب به همراه مقادیر دقیقشان در جدول 5 ارائه شده است.

جدول 5 نسبت کل سطح معیوب (اعم از ناحیه معیوب تخمین زده شده صحیح یا غلط) و سالم (اعم از ناحیه سالم تخمین زده شده صحیح یا غلط) وصله به کل سطح اتصال (وصله).

Kind of Ratio	Exact	Estimation	
		Otsu thresholding	Local thresholding
Sound Region Ratio	87.3%	84%	86.7%
Defective Region Ratio	12.7%	16%	13.3%

با توجه به جدول 5، تبدیل تصاویر خاکستری به سیاه و سفید با استفاده از آستانه‌بندی محلی نسبت به آستانه‌بندی کلی (روش اوتسا) منجر به نتایج بهتری شده است. با توجه به توضیحات داده شده، خطای حساسیت آزمون

- Composites Using Thermography“ *Infrared Physics & Technology*, 2019.
- [24] Otsu, N., “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms“ *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 1979.
- [25] Adaptive image threshold using local first-order statistics: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/adaptthresh.html>.
- [5] Pavlopoulou, S., Soutis, C. and Staszewski, W. J., “Structural Health Monitoring of Composite Scarf Repairs with Guided Waves“ in *Proceeding of Trans Tech Publ*, pp. 328-337.
- [6] Ricci, F., Franco, F. and Montefusco, N., “Bonded Composite Patch Repairs on Cracked Aluminum Plates: Theory, Modeling and Experiments“ in: *Advances in Composite Materials-Ecodesign and Analysis*, Eds.: InTech, 2011.
- [7] Azad, H., “Investigating Effect of Composite Patch on Strength of Cracked Cylindrical Tubes,” MSc Thesis, Iran University of Science and Technology, Iran, 2008.
- [8] Djokic, D., Johnston, A., Rogers, A., Lee-Sullivan, P. and Mrad, N., “Residual Stress Development During the Composite Patch Bonding Process: Measurement and Modeling“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, No. 2, pp. 277-288, 2002.
- [9] Sabelkin, V., Mall, S., Hansen, M., Vandawaker, R. and Derriso, M., “Investigation into Cracked Aluminum Plate Repaired with Bonded Composite Patch“ *Composite Structures*, Vol. 79, No. 1, pp. 55-66, 2007.
- [10] Ahmadi Najabadi, M. Sedighi, M. Salehi, M. and Hosseini Toudeshky, H., “Analysis and Detection of Failure in Aluminium/E-glass Prepreg Interface with Acoustic Emission”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 1, No. 1, pp. 13-22, 2014.
- [11] Heidari, M. Salimi-Majd, D. and Mohammadi, B., “Failure analysis of composite wing adhesive joints using 3D cohesive interface element”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 31-40, 2015.
- [12] Mohammadi, B., Salimi-Majd, D. and Ali-Bakhshi, M. H., “Analysis of Composite Skin/Stringer Debonding and Failure under Static Loading Using Cohesive Zone Model“ *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 17-25, 2014.
- [13] Ghiasvand, S. and Mohammadi, B., “Mixed mode fatigue crack growth analysis of cracked aluminium panel repaired with composite patches using extended finite element method”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 321-332, 2017.
- [14] Avdelidis, N., Moropoulou, A. and Riga, Z. M., “The Technology of Composite Patches and Their Structural Reliability Inspection Using Infrared Imaging“ *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 39, No. 4, pp. 317-328, 2003.
- [15] Katnam, K. B., Da Silva, L. and Young, T., “Bonded Repair of Composite Aircraft Structures: A Review of Scientific Challenges and Opportunities“ *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 61, pp. 26-42, 2013.
- [16] Balageas, D., Chapuis, B., Deban, G. and Passilly, F., “Improvement of the Detection of Defects by Pulse Thermography Thanks to the Tsr Approach in the Case of a Smart Composite Repair Patch“ *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 167-187, 2010.
- [17] Avdelidis, N., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X., Marioli-Riga, Z. and Almond, D. P., “A Thermographic Comparison Study for the Assessment of Composite Patches“ *Infrared Physics & Technology*, Vol. 45, No. 4, pp. 291-299, 2004.
- [18] Genest, M., Martinez, M., Mrad, N., Renaud, G. and Fahr, A., “Pulsed Thermography for Non-Destructive Evaluation and Damage Growth Monitoring of Bonded Repairs“ *Composite Structures*, Vol. 88, No. 1, pp. 112-120, 2009.
- [19] Daryabor, P. and Safizadeh, M., “Investigation of Defect Characteristics and Heat Transfer in Step Heating Thermography of Metal Plates Repaired with Composite Patches“ *Infrared Physics & Technology*, Vol. 76, pp. 608-620, 2016.
- [20] Daryabor, P. and Safizadeh, M., “Comparison of Three Thermographic Post Processing Methods for the Assessment of a Repaired Aluminum Plate with Composite Patch“ *Infrared Physics & Technology*, Vol. 79, pp. 58-67, 2016.
- [21] Daryabor, P. and Safizadeh, M., “Image Fusion of Ultrasonic and Thermographic Inspection of Carbon/Epoxy Patches Bonded to an Aluminum Plate“ *NDT & E International*, Vol. 90, pp. 1-10, 2017.
- [22] Daryabor, P., “Fusion of Ultrasonic and Thermographic Data to Increase Accuracy of Non-destructive Inspection of Composite Patches,” Phd Thesis, Iran University of Science and Technology, Iran, 2016.
- [23] Bayat, M., Safizadeh, S. and Moradi, M., “Numerical and Experimental Study for Assessing Stress in Carbon Epoxy



تحلیل مد شکست کششی و سازوکار حاکم بر تخریب کامپوزیت پلیمری

محمد امینی^{1*}، شیرین کلانتری¹، علیرضا خاوندی²

1-دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2-دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، m_yarmohammad@azad.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 98/02/11

پذیرش: 98/12/14

چکیده

علیرغم تحقیقات پیشین در زمینه رفتار خوردگی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه، هنوز بررسی ارتباط مابین میزان تخریب فصل مشترک رزین/الیاف و خواص مکانیکی آن‌ها امری ضروری است. در این پژوهش، تحقیقاتی تجربی به منظور ارزیابی این موضوع انجام می‌شود. بدین منظور، نمونه‌های پلی‌استر/شیشه در هیدروکلریک اسید 10 درصد وزنی با سه دمای مختلف 25 °C، 50 °C و 70 °C غوطه‌ور می‌شوند و تغییرات در خواص مکانیکی نمونه‌ها و تغییرات ظاهری محلول در بازه‌های زمانی یک تا چهار هفته‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد که استحکام کششی نهایی و مدول ینگ نمونه‌های کامپوزیتی، زمانی که در محلول با دمای بالاتر و یا زمان غوطه‌وری بیشتر قرار می‌گیرد کاهش می‌یابد. بعلاوه، ایجاد ترک ناشی از خوردگی در فصل مشترک رزین/الیاف به کمک عکس‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری نشان داده شد و تخریب رزین پلی‌استر با مشاهده‌ی افزایش ترک‌های سطحی و تغییر در رنگ محلول مورد تأیید قرار گرفت. همچنین، بازرسی چشمی سطوح شکست نمونه بعد از آزمون کشش نشان داد که شکست رخ داده از نوع DGM می‌باشد. در نهایت آنالیز طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) به منظور اثبات وقوع سازوکار تبادل یونی انجام پذیرفت. نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از رخداد سازوکارهای خوردگی در ناحیه فصل مشترک نمونه‌های کامپوزیتی است.

کلیدواژگان:

کامپوزیت پلیمری
سازوکار خوردگی
فصل مشترک
خواص مکانیکی

Analysis of tensile failure mode and the mechanism dominated over polymer composite degradation

Mohammad Amini^{1*}, Shirin Kalantari¹, Alireza Khavandi²

1-Department of Material Science and Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2-School of Material Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* M_aminia@email.kntu.ac.ir

Keywords

Polymer composites
Corrosion mechanisms
Interface
Mechanical properties

Abstract

Despite previous research on the corrosion behavior of glass fiber reinforced polymer composites, the relationship between the degree of weakening of the resin/fiber interface bond and their mechanical properties is still necessary. In this research, empirical research is conducted to evaluate this issue. For this purpose, the polyester/glass samples were immersed in 10% HCl with three different temperatures of 25 °C, 50 °C and 70 °C, and changes in the mechanical properties of the samples and the apparent variations of the solution at time intervals of one up to four weeks are examined. The results showed that the ultimate tensile strength and Young modulus of composite specimens were reduced when placed in a solution with higher temperature or immersion time. Cracking caused by corrosion was shown in the resin/fiber interface using scanning electron microscope (SEM) photographs, and the degradation of the polyester resin was confirmed by observing the increase in surface cracks and changes in the solution color. Furthermore, visual inspection of sample failure surfaces after a tensile test showed that the failure occurred as DGM type. Finally, atomic absorption spectroscopy (AAS) analysis was performed to prove the occurrence of ion exchange mechanism. The results of this study indicate the occurrence of corrosion mechanisms in the interface area of composite specimens.

1-مقدمه

می‌باشد. از آنجایی که پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه، مقاومت بهتری در برابر حملات شیمیایی کلر از خود نشان می‌دهد به عنوان جایگزین مناسبی به جای فلزات رایج در زمینه‌های مختلف صنعتی مطرح می‌شود [3]. به عنوان مثال، لوله‌های کامپوزیتی پلی‌استر/الیاف شیشه به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله صنعت نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این صنعت، رسوبات آلی و معدنی مختلفی ایجاد می‌شود. به منظور جلوگیری از تشکیل و یا حذف این رسوبات از افزودنی‌های مختلفی استفاده می‌کنند که

رزین پلی‌استر غیراشباع و کامپوزیت‌هایش به علت نسبت استحکام به وزن بالا، خواص مکانیکی مناسب و مقاومت به خوردگی بیشتر نسبت به فولاد کربنی، به حیطه تحقیقاتی مهمی در چند دهه‌ی اخیر تبدیل شده است که می‌تواند در کاربردهای مختلف مهندسی از قبیل سازه‌ها، تانک‌های مایع و گاز و لوله‌های انتقال نفت به کار گرفته شود [1، 2]. مطالعات تجربی اخیر نشان داده‌اند که بسیاری از خوردگی‌های تجهیزات صنعتی ناشی از حضور یون کلر

Please cite this article using:

Amini, M. Kalantari S. and Khavandi, A., "Analysis of tensile failure mode and the mechanism dominated over polymer composite degradation", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 601-608, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

همچنین خوردگی به قدرت اسیدی محیط ذکرشده به عنوان غلظت یون هیدروژن مربوط می شود [16].

در این مطالعه، مقایسه‌ای مابین استحکام کششی و مدول یانگ کامپوزیت‌های پلیمری در دمای پایین و بالا صورت می‌گیرد. علاوه بر این مقادیر عناصر لیج شده در دماهای مختلف مطالعه خواهد شد. در ادامه به کمک بازرسی چشمی، نوع شکست نمونه کامپوزیتی تعیین شده و به کمک مشاهدات میکروسکوپی، خسارات وارد بر سطح نمونه‌های کامپوزیتی ارزیابی می‌شود. در تحقیقات پیشین، صرفاً بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و ریزساختار آن‌ها تمرکز شده و مطالعه مد شکست آن‌ها به کمک بازرسی چشمی موردبررسی واقع نشده است.

2- مواد و روش تحقیق

در این مطالعه، از کامپوزیت پلی‌استر ایزوفتالیک غیراشباع تقویت شده با الیاف شیشه از نوع E (ساخته شده در شرکت آسیا کامپوزیت، ایران) استفاده شده است. نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش پالتروژن، از پنج لایه تشکیل شده است. لایه میانی، مت⁵ می باشد که توسط دولایه از راوینگ بافته شده⁶ در دو طرف احاطه شده است؛ و در نهایت، دولایه بیرونی مشابه همان لایه میانی می باشد. کامپوزیت‌های مورد استفاده شامل الیاف شیشه تک جهت در راستای میله در زمینه پلی‌استر است. شکل 1a مربوط به تصویر سطح مقطع نمونه کامپوزیتی است. همان گونه که در تصاویر مشخص است این کامپوزیت‌ها دارای الیاف هم‌راستا با قطر میانگین حدود 20 میکرومتر هستند که به صورت همگن از سطح تا مرکز پروفیل پخش شده است. شکل 1b نیز تصویر الکترون برگشتی از سطح کامپوزیت پلی‌استر در راستای الیاف است که توزیع الیاف را در این راستا نشان می‌دهد. ماهیت فصل مشترک تقویت کننده و زمینه در کامپوزیت‌ها تأثیر زیادی روی خواص آن‌ها دارد.

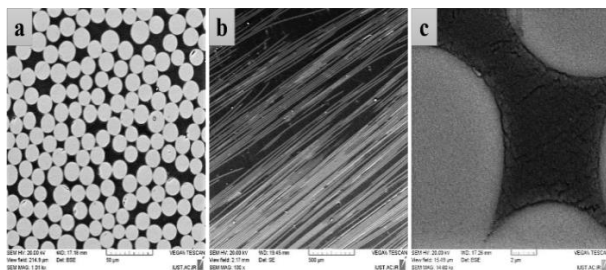


Fig. 1 The images of back scatter electron Perpendicular to the fiber surface (a), in line with fiber surface and (c) resin/fiber interface of polyester composite.

شکل 1 تصاویر الکترون برگشتی از سطح مقطع (a)، سطح در راستای الیاف (b) و فصل مشترک الیاف/زمینه (c) کامپوزیت با زمینه پلی‌استر

در کامپوزیت‌های مورد استفاده در این پژوهش، فصل مشترک از طریق پیوندهای فیزیکی (چسبندگی) ایجاد می‌شود؛ بنابراین اتصال الیاف شیشه با زمینه پلیمر (پلی‌استر) نسبت به کامپوزیت‌هایی که دارای فصل مشترک نفوذی هستند، ضعیف تر است و در نتیجه در حین بارگذاری شکست در فصل مشترک اتفاق می‌افتد. در شکل 1c فصل مشترک الیاف و زمینه در کامپوزیت

هیدروکلریک اسید از مهم ترین آن‌ها می باشد. از آنجایی که حفظ خواص مکانیکی و ایجاد کمترین تخریب برای این مواد کامپوزیتی بسیار حائز اهمیت است، آنالیز عملکرد آن‌ها به هنگام تماس با محیط اسیدی امری ضروری می باشد [4]. از آنجایی که فصل مشترک زمینه/الیاف نقش حیاتی در ظرفیت انتقال بار کامپوزیت‌ها ایفا می کند یکی از مهم ترین نگرانی‌های موجود در این زمینه، اثری است که محیط اسیدی مذکور بر روی استحکام فصل مشترک می گذارد. درواقع در حضور محیط‌های اسیدی، این فصل مشترک بواسطه لیچینگ کاتیون‌های فلزی (مانند Na^+) از سطوح الیاف شیشه حذف شده و تخریب آن را در پی خواهد داشت [4, 5]. GFRPs¹ اغلب در تماس با سیکل‌های رطوبتی و دمایی‌اند که این امر بلندگاری مورد انتظار آن‌ها را می‌کاهد. این گونه مطرح شده است که نفوذ یون‌های آزاد با وزن اتمی کم مانند H^+ و همچنین یون Cl^- و مولکول‌های آب به داخل زمینه پلیمری منجر به تخریب این کامپوزیت‌ها خواهد شد [6]. عمل جذب، به واسطه‌ی ترک‌ها و حفره‌های موجود در زمینه تسریع شده و منجر به هیدرولیز زمینه می‌شود که کاهش خواص مکانیکی پلیمر را در پی خواهد داشت [7]. به منظور رسیدن به حالت تعادل، پلیمر از نظر ترمودینامیکی گرایش دارد که با اجزایی دیگر مانند مولکول‌های آب پر شود. لازم به ذکر است که خارج شدن یون‌های بازی الیاف شیشه از داخل ساختار آن (لیچینگ)، مهم ترین واکنش انحلال این الیاف در آب می باشد [8]. به واسطه‌ی غوطه‌وری در آب، مولکول‌های آب می‌توانند به واسطه فضاهای خالی داخل رزین وارد آن شده و سپس به واسطه‌ی نیروهای موئینگی، در راستای فصل مشترک رزین/الیاف نفوذ کنند و افزایش وزن نمونه را در پی داشته باشد. هرچند، غوطه‌وری طولانی مدت، به سبب خارج شدن اجزای قابل حل منجر به کاهش وزن نمونه خواهد شد.

تحقیقات بسیاری به منظور یافتن عوامل اصلی مؤثر بر خوردگی کامپوزیت‌ها، ناشی از تخریب پلیمر در صنایع شیمیایی انجام شده است. از جمله بررسی‌های انجام شده می‌توان به غلظت و دمای محیط خورنده [9]، نوع رزین و الیاف [10]، اعمال بارهای خارجی [11] و رفتار خوردگی و سازوکار تشکیل ترک در محیط اسیدی [12] اشاره کرد. جونز² [13] به بررسی مکانیزم‌های تخریب ناشی از غوطه‌وری در محیط آبی و اسیدی پرداخت و بیان کرد که به واسطه‌ی کاهش قطر حمل بار الیاف که ناشی از لیچینگ³ یون‌هایی از قبیل Ca^{2+} و Al^{3+} می باشد، افت خواص مکانیکی را مشاهده خواهیم کرد. همچنین بیان کردند که تفاوت در قطر یون‌های الیاف شیشه و یون H^+ که در ساختار الیاف نفوذ می‌کند، منجر به ایجاد تنش در ساختار الیاف خواهد شد و فرایند تخریب را تسریع خواهد کرد. اسیدها کاتالیست‌های مناسبی برای هیدرولیز کردن پیوندهای (-Si-O-) شکل گرفته مابین زمینه و تقویت کننده که به وسیله عوامل اتصال مانند سیلان‌ها ایجاد می‌شوند، هستند؛ بنابراین در این محیط‌ها، خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد. در این زمینه، وی⁴ و همکاران [14] وزن و استحکام کششی رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه را موردبررسی قرار دادند و افزایش در وزن و کاهش در استحکام کششی را با افزایش زمان غوطه‌وری، گزارش کردند. در ادامه با توجه به تحقیقات انجام شده بیان شد که احتمالاً الیاف شیشه مسئول شکست حاصل از خوردگی در GFRP باشد و رزین اثر کمتری داشته باشد، چون رزین در برابر محیط خورنده در نقش یک محافظ ظاهر می‌شود [15].

⁴ Wei

⁵ Mat

⁶ Woven roving

¹ Glass fibers reinforced polymers (GFRPs)

² Jones

³ Leaching

2-2- مشاهدات ریزساختاری

سطوح نمونه‌های کامپوزیتی قبل و بعد از غوطه‌وری در محلول اسیدی، به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (XMU 5136 model, TESCAN-VEGA Company, USA) مشاهده شد. این میکروسکوپ به منظور تشخیص تغییر ساختار فیزیکی ناشی از غوطه‌وری به یک دستگاه طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS³, manufactured by EDAX Inc., USA) مجهز شده است. قبل از مشاهدات میکروسکوپی، یک لایه‌ی ده نانومتری از طلا بر روی سطح نمونه‌ها پاشش شد.

2-3- آزمون طیف‌سنجی جذب اتمی

به منظور حصول اطمینان از وقوع سازوکار تعویض یونی، از هیدروکلریک اسید، بعد از قرارگیری نمونه در آن به مدت چهار هفته، آزمون طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS⁴) گرفته شد و مقدار عناصر منیزیم و کلسیم داخل شده به اسید از کامپوزیت، اندازه‌گیری شد. در این روش محلول به میزان لازم رقیق شده و به کمک یک دستگاه پاشنده به داخل شعله پاشیده می‌شود. جریان گاز خروجی از یک محفظه‌ی گاز پرفشار، مایع را به ذرات بسیار ریز تبدیل می‌کند. بعد از تبخیر شدن ذرات جامد بخشی از مولکول‌های گازی شکسته شده اتم‌های آزاد پدید می‌آید. قسمتی از اتم‌های آزاد، در اثر برخورد به اجزای دیگر موجود در شعله، به حالت برانگیخته درمی‌آید. پرتوی حاصل از گرانتینگ عبور کرده و بعد از تفکیک شدن، یک طول موج که همان پرتو موردنظر است از آن خارج می‌شود. این آنالیز با استفاده از دستگاه طیف‌سنج PHI5300 ساخت کشور آمریکا صورت گرفت.

3- نتایج و بحث

اسید رقیق حاوی کاتالیست اسیدی (H_3O^+) و مایع هیدرولیز کننده (H_2O) می‌باشد. در ابتدا، به واسطه‌ی غوطه‌وری، استر یک یون هیدروژن (پروتون) از یون هیدروکسینیوم (H_3O^+) می‌گیرد. در مرحله‌ی بعدی یون هیدروژن مابین اتم‌های اکسیژن جابجا می‌شود. در نهایت به اکسیژن موجود در گروه R' متصل شده و منجر به جدا شدن $R'OH$ می‌شود. همه‌ی مراحل و سازوکارهای مذکور را می‌توان در قالب واکنش 1 نشان داد. از آنجایی که این واکنش برگشت پذیر است، مخلوطی در تعادل، شامل همه‌ی 4 ماده‌ی موجود در واکنش، تولید می‌شود. این محصولات واکنش پذیر می‌توانند منجر به تخریب بیشتر پلیمر شود و با بریدن زنجیره‌ها، درجه درهم فرو رفتگی زنجیره‌ها، وزن مولکولی و استحکام پیوندهای بین مولکولی را کاهش دهد [18-20].

واکنش (1)



یکی دیگر از عوامل مؤثر در چسبندگی الیاف و زمینه و افزایش استحکام فصل مشترک، قفل‌های مکانیکی است که به دلیل زبری سطح الیاف به وجود می‌آید. هنگامی که شیشه در تماس با محلول آبی قرار می‌گیرد، یون‌های قلیایی الیاف شیشه وارد محلول شده و بر روی سطح الیاف لایه‌ای غنی از

پلی‌استر نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 1 نیز مشهود است فصل مشترک فاقد منطقه نفوذی است.

ترکیب شیمیایی نمونه‌های کامپوزیتی و الیاف شیشه که توسط شرکت سازنده ارائه شده است به ترتیب در جدول 1 و 2 قابل مشاهده است. به منظور ارزیابی اثر غوطه‌وری بر خواص GFRP، صفحات کامپوزیتی به ابعاد $260 \times 3 \times 120$ mm در محلول هیدروکلریک اسید 10wt% برای بازه‌های زمانی متفاوت قرار گرفتند. دماهای محیط غوطه‌وری $25^\circ C$ ، $50^\circ C$ و $70^\circ C$ و زمان غوطه‌وری، یک تا چهار هفته در نظر گرفته شد. از آنجایی که کامپوزیت‌های GFRP ویسکوالاستیک می‌باشند، خواص آن‌ها وابسته به زمان و دما می‌باشد [15]؛ بنابراین به منظور مطالعه‌ی دوام کامپوزیت‌ها در زمان‌های مختلف، از دماهای بالا به عنوان عامل تسریع کننده استفاده شد [16, 17]. مطابق با استاندارد ASTM C 581 نمونه‌ها با فاصله‌ی 6.35 mm نسبت به هم در داخل محفظه حاوی اسید قرار داده شدند و سپس این محفظه در داخل آون با دمای ثابت قرار گرفت. بعد از گذشت زمان معین نمونه‌ها از محفظه خارج شده، با آب شسته و در ادامه خشک می‌شوند و در نهایت برای آزمون کشش آماده می‌شوند. علاوه بر این، محلول هیدروکلریک اسید نیز بعد از خروج نمونه‌ها تحت آنالیز طیف‌سنجی جذب اتمی¹ قرار می‌گیرد.

Table 1 The chemical composition of composite samples used in this investigation.

جدول 1 ترکیب شیمیایی نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده در این پژوهش		
کامپوزیت	ترکیبات	درصد وزنی (wt%)
زمینه	رزین پلی‌استر	60-65
	کلسیم کربنات	25-30
تقویت کننده	الیاف شیشه نوع E	55-60

Table 2 Chemical composition of E-glass fiber

جدول 2 اجزاء سازنده الیاف شیشه از نوع E								
ترکیب	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe _x O _y	TiO ₂	K ₂ O	MgO
درصد	7-9	13-15	20-22	52-55	0-0.8	0-1	0-1	4-5

2-1- آزمون کشش

خواص کششی نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه Hounsfield-H100ks (10 تن)، مورد بررسی قرار گرفت. آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D3032 انجام شد به صورتی که سرعت کشش 2 mm/min و ابعاد نمونه برابر با $250 \times 3 \times 25$ mm در نظر گرفته شدند. به منظور جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش و شکست نمونه‌ها از ناحیه فک دستگاه، در دو انتهای همه‌ی نمونه‌ها تب‌هایی به ابعاد $60 \times 25 \times 3$ mm چسبانده شد. تغییرات کرنش در حین آزمون کشش به کمک اکستنسومتر با طول گیج 25 mm به دست آمده و نیرو، استحکام کششی، مدول ینانگ و تغییر طول تا نقطه شکست به کمک دستگاه کشش محاسبه شدند. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، از هر یک از شرایط غوطه‌وری، سه نمونه مورد تست قرار گرفت و میانگین نتایج گزارش شد.

¹ Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

² Tab

³ Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS)

غوطه‌ور شده در دماهای مختلف تقریباً ثبات و بدون تغییر است، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما اثر قابل‌توجهی بر روی مدول ینگ کامپوزیت نداشته و این مدول بیشتر تحت تأثیر زمان غوطه‌وری می‌باشد.

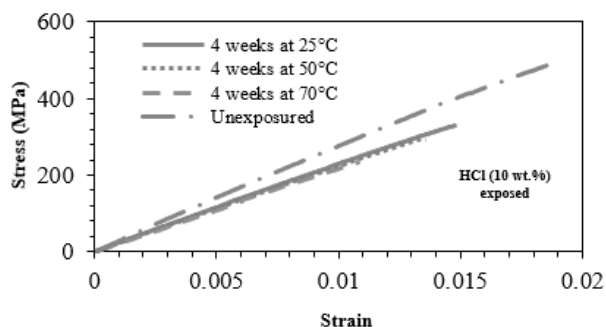


Fig. 2 Tensile stress-strain curves.

شکل 2 منحنی‌های تنش-کرنش آزمون کشش

از آنجایی که نرخ نفوذ آب به داخل کامپوزیت وابسته به زمان می‌باشد، هرچه زمان غوطه‌وری در محلول اسیدی بیشتر شود میزان آب بیشتری به داخل کامپوزیت نفوذ می‌کند؛ بنابراین، استحکام کششی بعد از غوطه‌وری در هیدروکلریک اسید کاهش می‌یابد و میزان این کاهش برای همه‌ی شرایط غوطه‌وری به‌جز غوطه‌وری در دمای 70°C، با افزایش زمان غوطه‌وری افزایش می‌یابد.

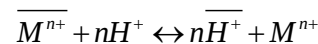
افزایش استحکام کششی کامپوزیت غوطه‌ور در دمای 70°C، می‌تواند به علت تکمیل فرایند پخت منومرها و افزایش وزن مولکولی در دمای بالا رخ دهد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش در جدول 3 درج شده است. بعد از چهار هفته غوطه‌وری، بیشترین کاهش در استحکام کششی و مدول ینگ برای نمونه‌های غوطه‌ور در دمای 70°C به دست آمد که این کاهش به ترتیب از 493.69 MPa به 274.07 MPa و از 27.98 GPa به 21.541 GPa می‌باشد.

این نتایج مشابیه نتایج به‌دست‌آمده از سایر محققین می‌باشد. به‌عنوان مثال باقرپور و همکاران¹ اثر جذب آب کامپوزیت‌های GFRP ساخته‌شده به روش پالترژن را مورد بررسی قرار دادند و کاهش استحکام کششی و مدول ینگ نمونه‌ها را بعد از 7 تا 21 روز غوطه‌وری در هیدروکلریک اسید 33 درصد وزنی گزارش کردند [21]. در پژوهش دیگری، کاهش استحکام کششی رزین وینیل استر و پلی‌استر تقویت‌شده با الیاف شیشه غوطه‌ور در آب دریا مشاهده شد [19].

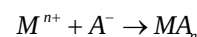
شکل‌های 3 و 4 خواص مکانیکی باقیمانده نمونه‌های کامپوزیتی را به تصویر می‌کشد. با توجه به شکل‌های 3 و 4، در طی هفته اول، دمای محیط تأثیر ویژه‌ای بر روی استحکام کششی و مدول ینگ نمونه‌ها می‌گذارد. ولی با افزایش زمان غوطه‌وری، اختلاف بین مقادیر خواص مکانیکی نمونه‌های غوطه‌ور در دماهای مختلف کاهش می‌یابد.

سیلیس تشکیل می‌شود. طبق تحقیقات پیشین، خوردگی الیاف شیشه از نوع E در محیط اسیدی، به سازوکار انتقال یون نسبت داده شده است؛ ولی نه تنها میزان این خوردگی با غلظت اسید کنترل می‌شود بلکه شکل یون‌های پیچیده یا نمک‌های نامحلول نیز بر آن تأثیرگذار است. کاهش کاتیون بر روی سطح الیاف شیشه می‌تواند پیوستگی شبکه شیشه‌ای را مختل کند و در نتیجه استحکام الیاف کاهش می‌یابد. سازوکار پذیرفته‌شده برای فرآیند خوردگی الیاف شیشه از نوع E، واکنش تبادل یونی هست که در آن یون فلز با سطح شیشه تعویض می‌شوند. به‌عنوان مثال Ca^{2+} و Al^{3+} با H^{+} از محیط اسید جایگزین می‌شود که واکنش کلی را می‌توان در قالب واکنش 2 نوشت. خط افقی نشان‌دهنده گونه مربوطه در فاز شیشه است. در ابتدا فرض بر این بود اثر خوردگی مربوط به قدرت اسیدی محلول و غلظت یون هیدروژن است. باین حال در پژوهش‌های بعدی مشخص شد آنیون موجود در اسید نیز می‌تواند با تشکیل یون‌های کمپلکس یا ترکیبات نامحلول با کاتیون‌های شیشه نقش مهمی را ایفا کند که با واکنش 3 مشخص می‌شود. تشکیل چنین کمپلکس‌هایی کاتیون‌های حل‌شده را به‌طور مؤثری از سمت راست رابطه قبلی حذف کرده و واکنش به سمت راست می‌رود [18-20].

واکنش (2)



واکنش (3)



هنگام ساخت کامپوزیت، به‌منظور ایجاد اتصال بین رزین و الیاف شیشه از یک عامل جفت‌کننده مانند سیلان استفاده می‌شود که شامل یک گروه آلی است که با رزین و الیاف اتصال برقرار می‌کند. این گروه آلی نیز در اثر قرار گرفتن در محیط آبی می‌تواند هیدرولیز شود که باعث می‌شود چسبندگی فصل مشترک کاهش یابد. در محیط‌های اسیدی، سرعت واکنش هیدرولیز نسبت به آب بیشتر است. از این‌رو تخریب و در نتیجه افت استحکام کششی در این محیط با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد.

3-1- خواص کششی

نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های غوطه‌ور در هیدروکلریک اسید 10 درصد وزنی به مدت چهار هفته در سه دمای متفاوت در شکل 2 مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان پی برد که رفتار کلی نمودارهای تنش-کرنش متأثر از زمان و دمای غوطه‌وری نمی‌باشد.

بعلاوه، این نمودارها نشان می‌دهد که همه‌ی نمونه‌های اولیه و نمونه‌های در معرض اسید قرارگرفته، صرف‌نظر از زمان و دمای غوطه‌وری، در تنش بیشینه می‌شکنند. مقادیر تنش شکست بیشینه و کمینه، به ترتیب از نمونه‌های اولیه و نمونه‌های به مدت 4 هفته غوطه‌ور شده به دست می‌آید. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های کامپوزیتی اولیه، به سبب داشتن بیشترین مقادیر کرنش، داکتیلیته بیشتری از نمونه‌های غوطه‌ور دارند. شایان ذکر است، از آنجایی که شیب نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های

¹ Bagherpour et al.

جدول ۳ خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی در شرایط غوطه‌وری مختلف

Table 3 Tensile properties of the composite samples at various exposure conditions.

شماره	نمونه	زمان (هفته)	نیرو (N)	ازدیاد طول (mm)	کرنش	استحکام کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
1	نمونه اولیه	0	37027	0.468	0.019	493.691	27.980
2	HCl (10% wt.)(25°C)	1	33060	0.487	0.019	440.802	25.208
3	HCl (10% wt.)(25°C)	2	30670	0.433	0.017	408.934	25.297
4	HCl (10% wt.)(25°C)	3	26645	0.395	0.016	355.270	23.433
5	HCl (10% wt.)(25°C)	4	21100	0.321	0.013	307.011	22.163
6	HCl (10% wt.)(50°C)	1	27517	0.382	0.015	366.892	23.448
7	HCl (10% wt.)(50°C)	2	26511	0.418	0.017	353.484	23.620
8	HCl (10% wt.)(50°C)	3	25098	0.375	0.015	344.640	22.727
9	HCl (10% wt.)(50°C)	4	22100	0.353	0.014	294.676	22.117
10	HCl (10% wt.)(70°C)	1	22890	0.425	0.017	305.201	22.597
11	HCl (10% wt.)(70°C)	2	24941	0.396	0.016	332.552	22.587
12	HCl (10% wt.)(70°C)	3	24005	0.409	0.016	320.071	22.520
13	HCl (10% wt.)(70°C)	4	20555	0.355	0.014	274.072	21.541

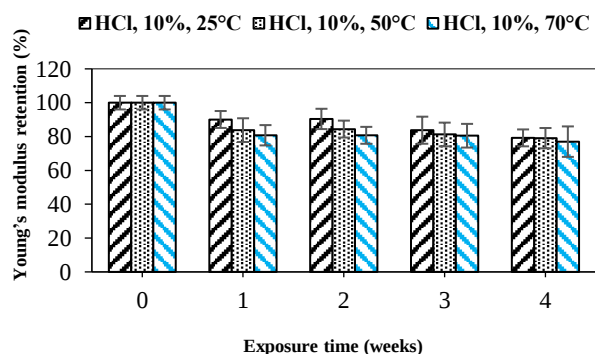


Fig. 4 Young's modulus retention values of exposed and unexposed GFRP specimens.

شکل 4 مقادیر مدول یانگ باقیمانده برای نمونه‌های کامپوزیتی اولیه و غوطه‌ور شده.

در این تحقیق از مت به‌عنوان لایه‌های بیرونی نمونه‌های GFRP استفاده شد. این لایه خواص ضد خوردگی و ضد ترک مناسبی دارد؛ اما به علت اینکه منجر به حبس هوا و همچنین ایجاد غیریکنواختی در ساختار کامپوزیت می‌شود، می‌تواند محل مناسبی برای ایجاد و اشاعه ترک شود [22]. بعد از غوطه‌وری در محلول آبی، خارجی‌ترین لایه که مت می‌باشد، به‌شدت در معرض

به‌عبارت‌دیگر با ادامه‌ی فرایند تخریب، پارامتر زمان اهمیت بیشتری نسبت به دما خواهد داشت. همانطور که در جدول 3 و شکل‌های 3 و 4 نشان داده‌شده است، مقادیر نهایی مدول و استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی، بعد از چهار هفته غوطه‌وری در دماهای مختلف، بسیار به هم نزدیک هستند؛ به این صورت که در دماهای 25°C و 50°C و 70°C استحکام کششی باقی‌مانده به ترتیب برابر با 62%، 60% و 56% و همچنین مدول یانگ باقی‌مانده به ترتیب برابر با 79%، 79% و 77% می‌باشد.

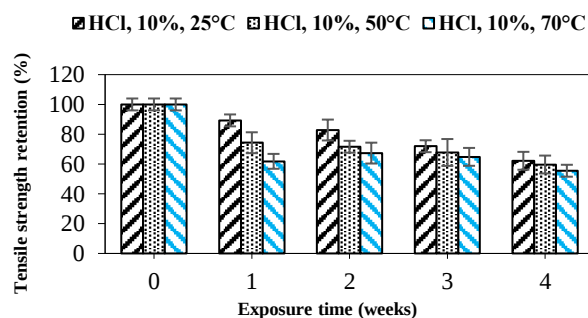


Fig. 3 Tensile strength retention values of exposed and unexposed GFRP specimens.

شکل 3 مقادیر استحکام کششی باقیمانده برای نمونه‌های کامپوزیتی اولیه و غوطه‌ور شده.

نمایانگر نوع شکست، سطح شکست و موقعیت شکست می‌باشد. با مشاهده سطوح مختلف نمونه‌های کامپوزیتی بعد از آزمون کششی می‌توان پی برد که حالت شکست رخ داده از نوع DGM بوده است. به عبارت دیگر، لایه‌لایه شدن نمونه در وسط ناحیه گيج رخ داده است. شایان ذکر است که افزایش زمان و دمای غوطه‌وری، موجب تغییر در نوع شکست نخواهد شد و فقط میزان شدت تخریب را بیشتر خواهد کرد.

تخریب‌هایی از قبیل لایه‌لایه شدن¹ قرار می‌گیرد که به‌طور قلیل توجهی از استحکام مکانیکی نمونه می‌کاهد. ارزیابی سطوح شکست می‌تواند تأییدی بر این مطلب باشد. شکل‌های 5 و 6 سطوح نمونه‌های کامپوزیتی را در راستای طول و ضخامت، بعد از تخریب نمونه در اثر آزمون کششی، نشان می‌دهد. بعلاوه، حالت‌های مختلف شکست در جدول 4 درج شده است. هر حالت با یک کد سه حرفی شناخته می‌شود که این سه حرف از چپ به راست به ترتیب

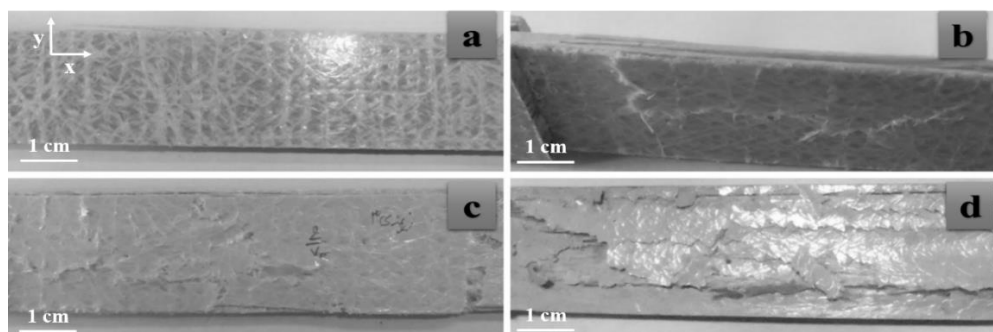


Fig. 5 The surface areas of the samples after fracture in the length direction. Neat specimen (a, b) and the exposed specimen after 4 weeks of immersion at 70 °C (c, d).

شکل 5 سطح کامپوزیت در راستای طولی بعد از شکست کششی. نمونه اولیه (a و b) و نمونه غوطه‌ور در اسید 70 °C به مدت چهار هفته (c و d)

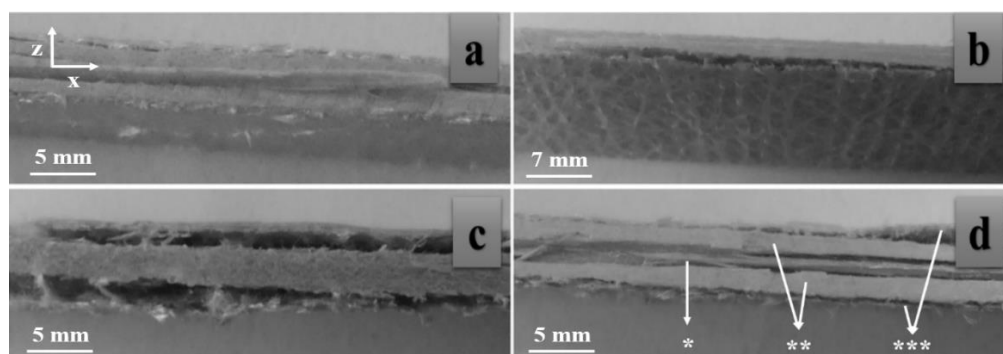


Fig. 6 The tensile fracture surfaces of the neat specimen (a, b) and exposed specimen after 4 weeks of immersion at 70 °C (c, d) in the thickness zone. The middle layer-a mat (*), woven roving glass fiber layer (**), and outermost mat layer (***).

شکل 6 سطوح شکست کششی نمونه اولیه (a و b) و نمونه غوطه‌ور در اسید 70 °C به مدت چهار هفته (c و d). لایه وسط از مت (*)، لایه الیاف شیشه راوپنگ بافته شده (***) و بیرونی‌ترین لایه از مت (****) می‌باشد.

جدول 4 کدهای سه حرفی مرتبط با نوع شکست کششی کامپوزیت پلیمری (بر اساس استاندارد ASTM D3039)

Table 4 Three letter codes related to tensile failure modes (based on ASTM D3039).

حرف سوم		حرف دوم		حرف اول	
Code	Failure type	Code	Failure Area	Code	Failure location
B	Bottom	I	Inside grip/tab	A	Angled
T	Top	A	At grip/tab	D	Edge delamination
L	Left	W	<1W from grip/tab	G	Grip/tab
R	Right	G	Gage	L	Lateral
M	Middle	M	Multi areas	M(xyz)	Multi-mode
V	Various	V	Various	S	long-Splitting
U	Unknown	U	Unkown	X	eXplosive
---	---	---	---	O	Other

اسیدی شدند، آنالیز طیف‌سنجی جذب اتمی بعد از چهار هفته غوطه‌وری برای همه شرایط انجام شد. نتایج حاصل از این آزمون که در جدول 5 درج شده است به‌وضوح نشان می‌دهد که بعد از خارج کردن نمونه‌های

3-2- نتایج آزمون طیف‌سنجی جذب اتمی
به‌منظور حصول اطمینان از وقوع سازوکار تبادل یونی و همچنین مقایسه مقادیر عناصر مختلف موجود در الیاف شیشه (Mg و Ca، Mg) که وارد محلول

¹ Delamination

EDS (جدول 6) نشان می‌دهد که مقادیر عنصرهای Mg, Ca و Al بعد از غوطه‌وری کاهش یافته و این کاهش، با افزایش دمای غوطه‌وری، افزایش می‌یابد.

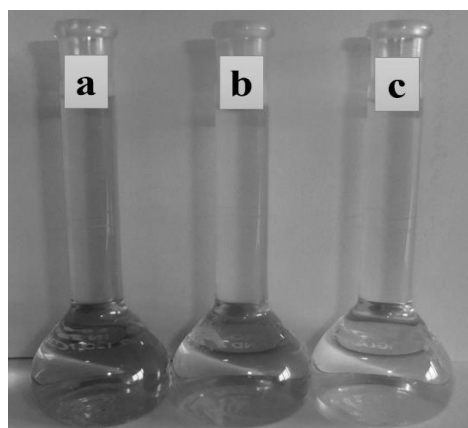


Fig. 7 Color change of HCl solution at (a) 70°C, (b) 50°C, and (c) room temperature after four weeks exposure.

شکل 7 تغییر رنگ محلول هیدروکلریک اسید در دمای 70°C (a) و 50°C (b) و دمای اتاق (c) بعد از چهار هفته غوطه‌وری.

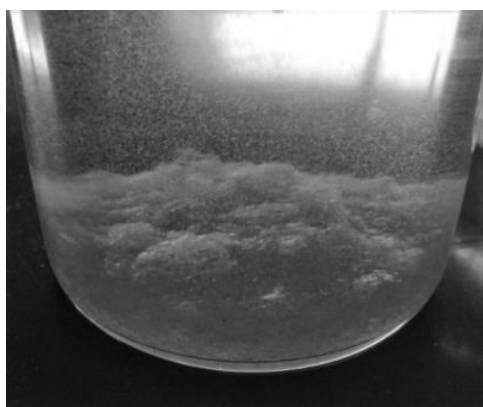


Fig. 8 Leached and deposited glass fibers from the composite specimen surfaces.

شکل 8 الیاف شیشه لیچ شده و ته‌نشین شده از سطوح نمونه‌های کامپوزیتی.

کامپوزیتی از داخل هیدروکلریک اسید، عناصر جدیدی از قبیل کلسیم و آلومینیوم در آن پدیدار شده است. با مقایسه این نتایج می‌توان پی برد که مقدار این عناصر با افزایش دمای غوطه‌وری افزایش یافته است. به عنوان مثال مقدار کلسیم حل شده در داخل محلول در دمای 50 و 70 به ترتیب 1.87 برابر و 3.1 برابر دمای اتاق می‌باشد. همین روند برای آلومینیوم و منیزیم نیز مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد که حجم هیدراته¹ بالاتر و ظرفیت شیمیایی² کمتر باعث می‌شود که جدا شدن یون آلومینیوم از الیاف شیشه با سختی بیشتری نسبت به یون کلسیم انجام شود [23]. در نتیجه لیچینگ آلومینیوم به میزان بسیار کمتری رخ می‌دهد و بنابراین مقدار این عنصر در داخل محلول کمتر از کلسیم می‌باشد. مقدار کم منیزیم در داخل محلول نیز به علت کم بودن مقدار آن در الیاف شیشه است.

جدول 5 غلظت عناصر موجود در اسید بر طبق آزمون طیف‌سنجی جذب اتمی.

Table 5 Concentration of the elements by AAS test.

مقدار در محلول (ppm)	ماده مورد تجزیه	نمونه
1.68 9.53 79.28	Mg Al Ca	HCl (Room Temp.)
2.16 21.44 148.48	Mg Al Ca	HCl (50°C)
6.48 33.96 246.56	Mg Al Ca	HCl (70°C)

به واسطه‌ی غوطه‌وری نمونه‌های کامپوزیتی، به مرور زمان محلول اسیدی سطح رزین را اچ می‌کند و باعث جدایش رزین از سطح نمونه و حل شدن در داخل محلول اسیدی می‌شود. همانطور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، برای همه‌ی شرایط غوطه‌وری، رنگ هیدروکلریک اسید از حالت بی‌رنگ اولیه به زرد تغییر می‌کند و هرچه دمای محلول بیشتر باشد، تغییر رنگ انجام شده بیشتر خواهد بود که این نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان تخریب و لیچینگ نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. در ادامه‌ی مشاهدات مبتنی بر خوردگی کامپوزیت، شکل 8 نشان می‌دهد که بعد از چهار هفته غوطه‌وری، الیاف از روی سطح نمونه لیچ شده و در پایین ظرف ته‌نشین شدند. علاوه بر این، نتایج حاصل از آزمون

Table 6 Element weight percent of E-glass fibers before and after immersion.

عنصر	الیاف اولیه	خورده شده (در دمای اتاق)	خورده شده (در دمای 50°C)	خورده شده (در دمای 70°C)
Al	4.04	4	3.98	3.56
Ca	13.36	13.25	12.94	12.28
Mg	23.18	22.46	21.84	21.03

جدول 6 درصد وزنی عناصر موجود در الیاف شیشه، قبل و بعد از غوطه‌وری

4- نتیجه‌گیری

با توجه به قابلیت کاربرد کامپوزیت‌های پلی‌استر/الیاف شیشه در صنایع شیمیایی و نفت، در این تحقیق، خواص کششی این کامپوزیت‌ها را بعد از

غوطه‌وری در محلول اسیدی مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج، مبنی بر آن است که پارامترهای زمان و دمای غوطه‌وری مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کاهش خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها هستند. به طوری که کامپوزیت‌ها استحکام کششی و مدول ینگ کمتری را بعد از غوطه‌وری در دماهای بالاتر و

² Valence

¹ Hydrated volume

- زمان‌های طولانی‌تر از خود نشان می‌دهند. با توجه به نتایج می‌توان چنین برداشت کرد که افزایش دما تأثیر کمی بر روی مدول یلنگ داشته و این خاصیت بیشتر تحت تأثیر زمان غوطه‌وری می‌باشد. بازرسی چشمی از سطوح شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کشش نشان داد که تنش، منجر به لایه‌لایه شدن کامپوزیت در ناحیه‌ی وسط طول گیج شده است. به‌منظور درک سازوکارهای مربوطه، برخی از تجهیزات تعیین خواص میکرو ساختاری بکار گرفته شد تا پدیده‌های رخ داده در فصل مشترک زمینه/الیاف ارزیابی شود. متعاقباً، تصاویر SEM و آنالیز EDS به‌منظور تشخیص نفوذ اسید به داخل کامپوزیت و تخریب آن‌ها مورد استفاده واقع شد. با توجه به تصاویر SEM، ترک‌های زیادی در فصل مشترک رزین/الیاف ایجاد شده است که نشان‌دهنده‌ی تخریب نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. سازوکار حاکم بر این تخریب‌ها، تبادل یونی، به‌ویژه در ناحیه فصل مشترک بوده و نتایج حاصل از آزمون AAS تأییدیه‌ای برای وقوع این سازوکار است. با توجه به نتایج حاصل، یون‌های کلسیم و آلومینیوم از سطح الیاف شیشه در طی غوطه‌وری لیچ شده و لایه‌ای غنی از سیلیس بر روی آن ایجاد می‌شود. مطابق با نتایج آزمون AAS، به علت حجم هیدراته بزرگ‌تر و والانس کمتر، مقدار Ca^{2+} در محلول‌ها بیشتر از Al^{3+} می‌باشد.
- 7- مراجع**
- [1] Lila, M. K., Saini, G. K., Kannan, M., and Singh, I., "Effect of fiber type on thermal and mechanical behavior of epoxy based composites," *Fibers and Polymers*, Vol. 18, No. 4, pp. 806-810, 2017.
 - [2] Movhed, H.R., Arefazar, A., Eskandarnejad, S., Beheshty, M.H., "Study of the Effect of Core-Twist Hybrid Yarn Glass/PET on Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 16, Issue 1, 2003.
 - [3] Mouritz, A. P., Gallagher, J., and Goodwin, A. A., "Flexural strength and interlaminar shear strength of stitched GRP laminates following repeated impacts," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, No. 5, pp. 509-522, 1997.
 - [4] Groysman, A., "Corrosion problems and solutions in oil refining and petrochemical industry," Cham: Springer, 2017.
 - [5] Kajorncheappunngam, S., Gupta, R. K., and GangaRao, H. V., "Effect of aging environment on degradation of glass-reinforced epoxy," *Journal of composites for construction*, Vol. 6, No. 1, pp. 61-69, 2002.
 - [6] Selvan, M. G. A., and Athijayamani, A., "Mechanical properties of fragrant screwpine fiber reinforced unsaturated polyester composite: Effect of fiber length, fiber treatment and water absorption," *Fibers and Polymers*, Vol. 17, No. 1, pp. 104-116, 2016.
 - [7] Amini M., and Khavandi, A., "Evaluation of the electrical properties and mechanical behavior of insulator's composite core in harsh environments," *Material Research Express.*, Vol. 5, 2018.
 - [8] Solis-Ramos, E., and Kumosa, M., "Synergistic effects in stress corrosion cracking of glass reinforced polymer composites," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 136, pp. 146-157, 2017.
 - [9] Sapalidis, S. N., Hogg, P. J., and Youd, S. J., "High temperature acidic stress corrosion of glass fibre composites: Part I Effect of fibre type," *Journal of Materials Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 309-316, 1997.
 - [10] Ely, T., and Kumosa, M., "The stress corrosion experiments on an E-glass/epoxy unidirectional composite," *Journal of composite materials*, Vol. 34, No. 10, pp. 841-878, 2000.
 - [11] Hogg, P. J., Hull, D., and Spencer, B., "Stress and strain corrosion of glass-reinforced plastics" *Composites*, Vol. 12, No. 3, pp. 166-172, 1981.
 - [12] Qiu, Q., & Kumosa, M., "Corrosion of E-glass fibers in acidic environments. *Composites Science and Technology*, Vol. 57, No. 5, pp. 497-507, 1997.
 - [13] Jones, F. R., "Durability of reinforced plastics in liquid environments," *Reinforced plastics durability*, pp. 70-110, 1999.
 - [14] Wei, B., Cao, H., and Song, S., "Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater," *Corrosion Science*, Vol. 53, No. 1, pp. 426-431, 2011.
 - [15] Shokrieh, M. M., Omid, M. J., "The Impact Resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, Issue 4, pp. 255-277, 2011.
 - [16] Alsayed, S., Al-Salloum, Y., Almusallam, T., El-Gamal, S., and Aqel, M., "Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperatures," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 5, pp. 2265-2271, 2012.
 - [17] Maru, P., Latane, V., Puja, C., Vikas, K., Kumar, P., and Neogi, S., "Lifetime estimation of glass reinforced epoxy pipes in acidic and alkaline environment using accelerated test methodology," *Fibers and Polymers*, Vol. 15, No. 9, pp. 1935-1940, 2014.
 - [18] Amini, M., & Khavandi, A., "Degradation of polymer-based composites in corrosive media: experimental attempts towards underlying mechanisms," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, pp. 1-20, 2019.
 - [19] Pour-Ghaz, M., Miller, B. L., Alla, O. K., and Rizkalla, S., "Do mechanical and environmental loading have a synergistic effect on the degradation of pultruded glass fiber reinforced polymers?," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 106, pp. 344-355, 2016.
 - [20] Visakh, P. M., and Nazarenko, O. B., "Thermal degradation of polymer blends, composites and nanocomposites. In *Thermal Degradation of Polymer Blends*," *Composites and Nanocomposites*, pp. 1-16, 2015.
 - [21] Bagherpour, S., Bagheri, R., and Saatchi, A., "Effects of concentrated HCl on the mechanical properties of storage aged fiber glass polyester composite," *Materials & Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 271-274, 2009.
 - [22] Fereidoon, A., Sabet, A.R., Dolati, S.H., and Esmaceli, M.R., "The influence of stacking sequence on mode I interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy composite panels," In Persian, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 4, No. 2, pp. 183-187, 2014.
 - [23] Li, H., Yan, M., Qi, D., Zhang, S., Ding, N., Cai, X., ... and Deng, J., "Corrosion of E-glass fiber in simulated oilfield environments," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 78, No. 2, pp. 371-375, 2011.



بررسی آسیب پیشرونده در کامپوزیت تقویت شده با الیاف بافته شده تار و پودی تحت بارگذاری کششی

مهران شه روز¹، عباسعلی سبکتکین^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

* زاهدان، صندوق پستی 987-98155، saboktakin@eng.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 98/05/09	در این پژوهش به توسعه یک مدل سلول واحد جهت تعیین خواص مکانیکی و بررسی آسیب پیشرونده در کامپوزیت های تار و پودی به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. همچنین بمنظور تعریف هندسه مدل از اندازه گیری های واقعی و دقیق الیاف پارچه و سطح مقطع آن به کمک عکسبرداری میکروسکوپی استفاده گردیده است. در مرحله اول سلول واحد با نرم افزار کتیا در مقیاس مزو ایجاد شده و به نرم افزار آباکوس فراخوانی می گردد. در این مدل خواص مکانیکی الیاف از نوع رفتار همسانگرد عرضی و برای رزین رفتار همسانگرد در نظر گرفته شده و جهت محاسبه ضرایب مکانیکی کلی کامپوزیت، از روش همگن سازی بر اساس کرنش یکنواخت استفاده شده است. در ادامه برای اعمال رفتار آسیب و پیش بینی استحکام کششی کامپوزیت تار و پودی، از یک زیر برنامه (USDFLD) برای کدنویسی استفاده گردید. در این مدل برای پیش بینی شروع آسیب معیار تخریب هاشین سه بعدی و برای پیشروی آسیب، تئوری کاهش آبی خواص ماده به کار برده شد. تطابق مناسب نتایج تئوری مورد استفاده در این تحقیق با داده های آزمایشگاهی، توانمندی مدل و سابروتین ارائه شده در این تحقیق را نشان میدهد.
پذیرش: 98/12/14	
کلیدواژگان:	
کامپوزیت تار و پودی	
تحلیل اجزاء محدود	
آسیب پیشرونده	
آزمون کشش	

Progressive damage analysis of plain woven composites under tensile loading

Mehran shahrooz, Abbasali saboktakin*

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, zahedan, iran.

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

Plain woven composite
Finite element analysis
Progressive damage
Tensile test
RVE

Abstract

In this study, develop accurate finite element models of plain woven fabrics to determine their mechanical properties and progressive damage analysis. In addition, in order to describe the internal geometry from actual measurements of tow geometry made on photomicrographs of sectioned laminates. In the first step, a unit-cell of composite was created in CATIA software in meso scale. After that, unit-cell was imported in ABAQUS software to finite element (FE) analysis. For each architecture, the yarns are assumed to be transversely isotropic and the resin assumed isotropic. After that a stress averaging technique based on an iso-strain assumption is used to determine the effective moduli of the unit cells. Afterwards, The damage model is implemented in the FE code by a user-defined (USDFLD). In this damage model, in order to predict damage initiation of composite plates, 3D Hashin's failure criterion is chosen. And in order to evolution damage instantaneous Material Property Degradation Method is applied. The good agreement between the theoretical results and experimental data, introduces the ability of the applied model and provided subroutine.

1-مقدمه

[2]، آزمایشی استفاده از این نوع الیاف سه بعدی در ساخت کامپوزیت است. با وجود این مزایا، هندسه پیچیده الیاف سه بعدی، چالش های زیادی را در تحلیل کامپوزیت های ساخته شده با این نوع الیاف بوجود آورده است. مدل سازی خواص الاستیک کامپوزیت های با الیاف بافته شده مورد توجه برخی از محققین قرار گرفته است. کروکستون و همکاران [3] و انگوتی و همکاران [4] در مقالاتی مروری به برسی انواع مختلف مدل های موجود برای پیش بینی خواص کامپوزیت های با الیاف بافته شده پرداختند. این مدل ها را میتوان در دو

استفاده از کامپوزیت های با الیاف بافته شده تار و پودی، سال هاست که مورد توجه متخصصین حوزه مواد مرکب قرار گرفته است. هزینه پایین ساخت این نوع الیاف، امکان استفاده از طیف وسیعی از مواد در تولید این الیاف، به کارگیری ساده، ایجاد امکان ساخت قطعات با هندسه و سطوح پیچیده، خواص مکانیکی متوازن، تقویت کنندگی خوب در همه جهات [1]، خواص خارج از صفحه ای بهتر و مقاومت به ضربه بیشتر نسبت به کامپوزیت های تک جهته

Please cite this article using:

Shahrooz, M. and Saboktakin, A., "Progressive damage analysis of plain woven composites under tensile loading", in persian, journal of science and technology of composites, Vol. 6, No. 4, pp. 609-614, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

شاخه‌ی عمده مدل‌های تحلیلی و مدل‌های عددی (مبتنی بر تحلیل اجزاء محدود) دسته‌بندی کرد [5]. یکی از قدیمی‌ترین مدل‌های تحلیلی ارائه شده برای پیش‌بینی خواص کامپوزیت‌های با پارچه بافته شده، مدل ارائه شده توسط ایشیکاوا و چو [6] است. آنها در مدل خود به نام اعوجاج الیاف، با تقسیم‌بندی حجمی معرف به چند ناحیه که به صورت یک چند لایه قابل در نظر گرفتن باشد، خواص معادل هر ناحیه را با استفاده از تئوری کلاسیک چندلایه‌ها محاسبه کردند. سپس با انتگرال‌گیری در کل المان حجمی معرف خواص معادل المان حجمی معرف را استخراج کردند. پانومله و همکاران [7] و وایت کمب [8] روش اجزاء محدود را به عنوان یک ابزار برای پیش‌بینی سفتی و استحکام کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده مورد بررسی قرار دادند. وو و وایت کمب [9] با مطالعه بر روی توزیع تنش‌های داخلی، به تجزیه و تحلیل مواد مرکب بافته شده ساده توسط المان‌های دو بعدی پرداختند. آن‌ها جهت کاهش محاسبات یک روش معتبر با المان‌های مخصوص در ابعاد ماکرو به جای روش تحلیلی متعارف معرفی کردند. در این روش از مش بندی کلی با ویژگی تک میدانی و ماکروسکوپی برای تعیین واکنش کلی از ساختار و از مش بندی محلی طبق قوانین اجزاء محدود برای به دست آوردن اطلاعات دقیق از مناطق دلخواه مورد استفاده قرار می‌گیرد. وو و وایت کمب [10] این روش را برای مدل‌های سه بعدی اجزاء محدود نیز به کار بردند و با مطالعه بر روی حالت‌های تنش و رفتار شکست در کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده تار و پودی به روش (کلی/محلی) با المان‌های در مقیاس ماکرو) پرداختند. آن‌ها در یافتند که تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از این روش و اصول تحلیل به روش اجزاء محدود وجود دارد. آن‌ها توانستند رفتار شکست در سلول واحد کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده که به علت انحنای تارها تحت تنش‌های متغیر قرار می‌گیرند را نشان دهند. بلاکتر و همکاران [11] روشی مبتنی بر روش اجزاء محدود ارائه دادند که شروع و گسترش آسیب در کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده تحت بار کششی و برشی را پیش‌بینی می‌کرد. روش بلاکتر توسط وایت کمب و سریرنگان [12] توسعه داده شد. این محققین نشان دادند که پاسخ‌های عددی که از کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده می‌گیرند به برخی از پارامترها همچون تعداد المان‌ها، مدل آسیب، شکل و انحنای تارها بسیار حساس است. گاسر و همکاران [13] به مطالعه رفتار مکانیکی پارچه‌های خشک جهت درک بهتر تاثیر رفتار محلی (مقیاس مزو) بر روی رفتار کلی (مقیاس ماکرو) پرداختند. آن‌ها مدل اجزاء محدود غیرخطی خاصی را طراحی کردند که به مطالعه رفتار مکانیکی الیاف خشک بر اساس اجزاء سازنده آن می‌پرداخت. نتایج بدست آمده آن‌ها با آزمون‌های مکانیکی در دو جهت مقایسه شد و دقت مطلوب این روش را برای پیش‌بینی رفتار کلی مواد در مقیاس ماکرو نشان داد. علاوه بر این، آنها قادر شدند اساس کلی شبیه‌سازی و طراحی پارچه‌های بافته شده در فرایندهای تولید را دست یابند. اوایل آزمایش‌های مکانیکی در دو جهت برای بررسی اثر غیر خطی بودن در مقیاس مزو به روی رفتار ماکرو استفاده می‌شد. سپس بویس و همکاران [14] و هیوت و همکاران [15] یک روش اجزاء محدود سه بعدی در مقیاس مزو ارائه دادند که تاثیرات محلی در مقیاس مزو را بهتر نشان دهد از جمله لهیدگی الیاف که به عنوان یکی از دلایل اصلی غیر خطی بودن است. هم چنین نشان داده شد که رفتار غیرخطی عمدتاً به دلیل تغییرات هندسی الیاف است نه به دلیل تماس بین الیاف. این مولفان از تست‌های مجازی بر روی مدل المان نماینده حجم (RVE)¹ تحت بارهای دو جهته و برشی در مقیاس مزو، جهت توسعه مدل

در این پژوهش به توسعه یک مدل سلول واحد جهت تعیین خواص مکانیکی و بررسی آسیب پیشرونده در کامپوزیت‌های تار و پودی به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. همچنین بمنظور تعریف هندسه مدل از اندازه‌گیری‌های دقیق الیاف پارچه و سطح مقطع آن به کمک عکسبرداری میکروسکوپی استفاده گردیده است. در ادامه برای اعمال رفتار آسیب و پیش‌بینی استحکام کششی کامپوزیت تار و پودی، از یک زیربرنامه (USFLD) برای کدنویسی استفاده شد. در این مدل برای پیش‌بینی شروع آسیب مخرب هاشین سه بعدی و برای پیشروی آسیب، تئوری کاهش آنی خواص ماده به کار برده شده است.

2- شبیه سازی اجزاء محدود

هندسه و ابعاد مدل المان نماینده حجم براساس عکس‌برداری‌های میکروسکوپی تعیین، اندازه‌گیری و در محیط نرم افزار کتیا به صورت مدل سه بعدی طراحی شد.

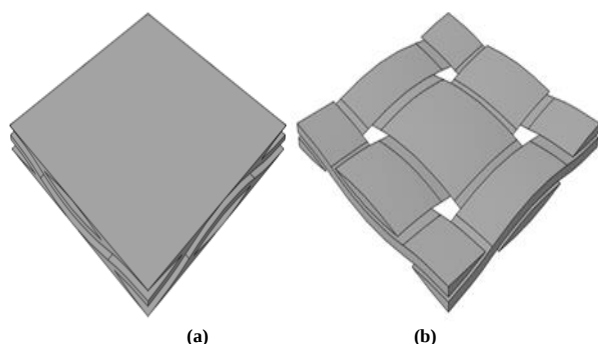


Fig.1 Mesoscale finite element model: (a) fiber yarns (b) resin pocket
 شکل 1- مدل سلول واحد کامپوزیت بافته شده تار و پودی در مقیاس مزو: (a) نخ (b) رزین

² textile

¹ representative volume element

استفاده گردید که نمایی از آن در شکل 3، نشان داده شده است. مشریری از نوع (C3D10) انتخاب و به صورت بی‌سازمان روی مدل ریخته شده است.

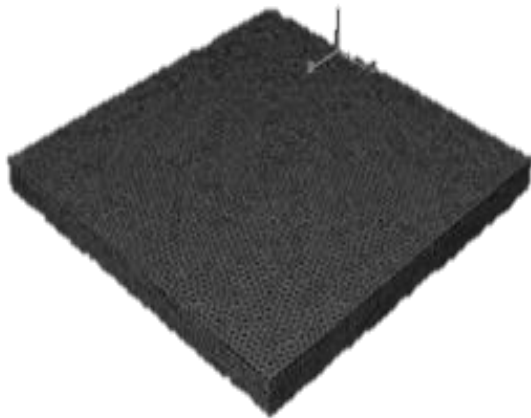


Fig.3 Mesoscale finite element mode (Whole RVE)

شکل 3 مشریری مدل کلی سلول واحد

3- بررسی نتایج

کامپوزیت‌های تار و پودی را عمدتاً میتوان جز مواد اورتوتروپیک در نظر گرفت. در این مواد ارتباط بین تنش و کرنش به صورت رابطه‌ی (۱) برقرار است.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{14} \\ \sigma_{15} \\ \sigma_{16} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{14} \\ \varepsilon_{15} \\ \varepsilon_{16} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{11} = (1 - \nu_{23}\nu_{32})\Delta E_1 \quad (2)$$

$$C_{22} = (1 - \nu_{31}\nu_{13})\Delta E_1 \quad (3)$$

$$C_{33} = (1 - \nu_{21}\nu_{12})\Delta E_1 \quad (4)$$

$$C_{12} = (\nu_{12} - \nu_{13}\nu_{32})\Delta E_1 = (\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{31})\Delta E_1 \quad (5)$$

$$C_{13} = (\nu_{13} - \nu_{12}\nu_{23})\Delta E_1 = (\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{31})\Delta E_1 \quad (6)$$

$$C_{23} = (\nu_{31} - \nu_{23}\nu_{13})\Delta E_1 = (\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{12})\Delta E_1 \quad (7)$$

$$C_{44} = G_{23} \cdot C_{55} = G_{31} \cdot C_{66} = G_{12} \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{32}\nu_{23} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32}} \quad (9)$$

همچنین هر یک از ضرایب ماتریس سختی نیز از رابطه‌ی (10) محاسبه می‌شود. جهت اعمال شرایط مرزی در هر مرحله از حل، تمام درجات آزادی در راستای صفحات عمود بسته شده و تنها در یک راستا بار به صورت جابه جایی به سلول واحد طراحی شده وارد گردید.

$$C_{\alpha\beta} = \overline{\sigma_{\alpha}} = \frac{1}{V} \int \sigma_{\alpha} (x_1, x_2, x_3) dV \quad (10)$$

حال که درایه‌های ماتریس سختی به دست آمدند با استفاده از روابط (9-2) ضرایب مهندسی معادل خواص همگن شده کامپوزیت به دست می‌آیند [21]. ضرایب مکانیک کلی کامپوزیت از حل دستگاه شش معادله و شش مجهول در نرم افزار متلب محاسبه شدند.

این مدل نخ‌های^۱ در جهت طول و عرض یا تار و پود قرار گرفتند و فضای بین آن‌ها توسط رزین احاطه شده است. مدل المان نماینده حجم ایجاد شده در کتیا به نرم افزار آباکوس فراخوانی می‌شود. در مدلسازی در ابعاد مزو نخ‌ها درون ماتریس کاملاً چسبیده‌اند و سرشی بین آنها وجود ندارد. شکل 1، ابعاد هندسی مدل را نشان می‌دهد. خواص الاستیک الیاف فایبر همسانگرد عرضی و از نوع کامپوزیت شیشه-اپوکسی لایه ای تک جهته و خواص الاستیکی ماتریس نیز همسانگرد از نوع اپوکسی انتخاب شده است. از آنجا که به دست آوردن تمامی خواص از آزمایش [25] مقدور نبود، لذا با بررسی نتایج موجود در مقالات متعدد، از خواص موجود در مرجع [20] که شباهت بیشتری به کامپوزیت مورد بررسی ما دارد، استفاده شده است. این خواص در جدول 1، آمده است. جهت گیری خواص ناهمسانگرد نخ در شکل 2، نشان داده شده است. راستای محور 1 در جهت طولی نخ‌های تار و راستای محورهای 2 و 3، جهت‌های عرضی هستند.

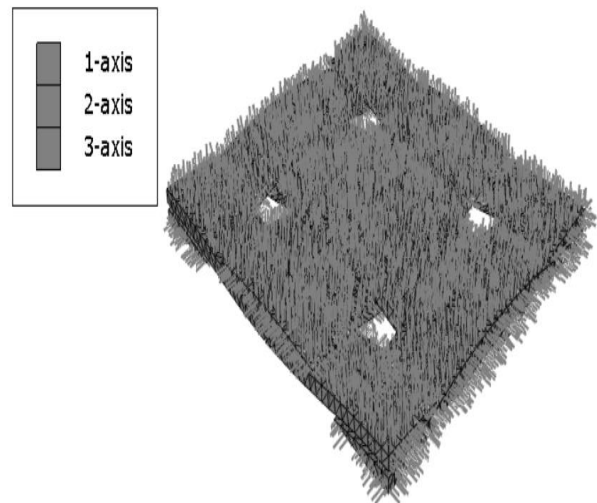


Fig.2 Local orientations prescribed in fiber yarns

شکل 2 جهت گیری خواص نخ‌های شیشه-اپوکسی

جدول 1 خواص مکانیکی نخ شیشه-اپوکسی [20]

Table1 Material Parameters used in simulation (Moduli in GPa)[20]					
اپوکسی			خواص مکانیکی شیشه/اپوکسی		
3.2	E (GPa)	1551	Xt (MPa)	55.7	E_{11} (GPa)
0.38	ν	721	Xc (MPa)	18.5	E_{22} (GPa)
70	Sut (MPa)	46	Yt (MPa)	6.8	G_{12} (GPa)
		141	Yc (MPa)	6.04	G_{23} (GPa)
		85	S12(MPa)	0.22	ν_{12} (GPa)
		57.5	S23(MPa)	0.34	ν_{23} (GPa)

مش ریزی نیز درون نرم افزار آباکوس انجام گرفت. در مجموع تعداد 54653 المان با در نظر گرفتن هزینه محاسباتی و دقت نتایج، به منظور مش‌ریزی

¹ yarn

جدول ۲ ضرایب مکانیکی کامپوزیت بافته شده تار و پودی

Table2 Predicted values of elastic properties of plain weave composite

ضرایب مکانیکی	نتایج مدل سازی (GPa)
E_{11}	16.49
E_{22}	16.94
E_{33}	7.63
ν_{12}	0.136
ν_{13}	0.406
ν_{23}	0.406
G_{12}	3.14
G_{13}	2.01
G_{23}	2.01

جدول 4 کاهش کامل خواص برای نخ [23]

Table 4 Complete Degradation of properties for all damage modes

کاهش خواص	مود واماندگی
$E_{11} = E_{22} = E_{33} = G_{12} = G_{13} = G_{23} = \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0$	واماندگی در جهت الیاف
$E_{22} = E_{33} = \nu_{12} = 0$	واماندگی در جهت رزین
$G_{12} = \nu_{12} = 0$	برش بین الیاف و زمینه

آسیب ماتریس موجب افت مدول سفتی در جهت عرضی E2 و E3 و برش بین ماتریس و الیاف موجب افت مدول برشی G12, G13, G23 در لایه آسیب دیده می شود. (در اینجا منظور از اندیس 1 جهت طولی و اندیس 2 و 3 جهت عرضی می باشد.) و نتیجه آسیب الیاف از دست دادن قابلیت تحمل بار در تمام جهات (کاهش سفتی ماده در تمام جهات) است. بعد از کاهش سفتی لایه آسیب دیده تنش های جدید برای لایه آسیب دیده محاسبه می شود. سپس روند کاهش سفتی به صورت تکراری روی تنش های جدید اعمال می شود و تا پیش بینی آسیب در لایه بعدی ادامه پیدا می کند. این تئوری به طور خلاصه در جدول 4 بیان شده است. مدول الاستیسیته رزین نیز پس از شروع واماندگی به سمت صفر میل می کند. در ادامه بررسی نتایج بدست آمده، شکل 4 توزیع کانتورهای تنش فون-میسز روی مدل سلول واحد تحت بارگذاری کششی در راستای نخ های تار را نشان می دهد.

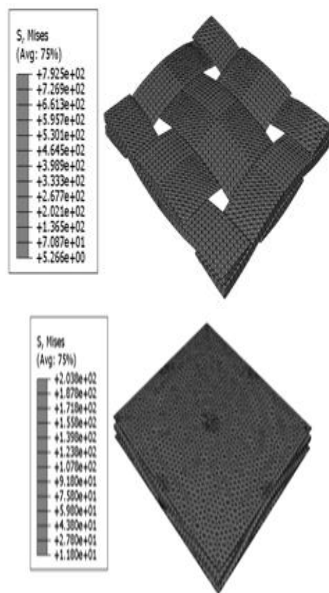


Fig.4 tensile stress contours in meso model

شکل 4 توزیع تنش کششی روی مدل سلول واحد در اثر بارگذاری کششی

همچنین الگوهای آسیب پیشرونده به صورت کانتورهای رنگی در شکل های 5 و 6، نشان داده شده است. شکل 5.a، آسیب ماتریس در نخ های پود و مناطق اعوجاج تارها را در کرنش 0.5٪ نشان می دهد. شکل 5.b

در این تحقیق برای تعیین رفتار کششی، توزیع تنش و کرنش روی سلول واحد توسط نرم افزار المان محدود آباکوس بدست آمد (شکل 4). در ادامه با استفاده از زیروال نویسی در نرم افزار آباکوس جهت توسعه مدل ساختاری مادی (USDFLD) معادلات ساختاری با هدف شبیه سازی رفتار واماندگی بر اساس معیارهای واماندگی و قوانین کاهش خواص مربوطه برای دستیابی به دقیق ترین روش تعریف شده است. با توجه به ویژگی غیرهمسانگردی خواص الیاف پارچه، برای تعیین مناطق بحرانی تنش از معیار مناسب برای این مواد استفاده می شود که معمولاً برای کامپوزیت های لایه ای تک جهته نیز به کار می رود و به دلیل خواص همسانگردی ماتریس زمینه از معیار مناسب برای این مواد استفاده می شود. در این مطالعه برای تعیین شروع آسیب روی نخ ها معیار هاشین سه بعدی [22] (جدول 3) و برای بررسی آسیب رزین معیار فون میسز (رابطه 11) به کار برده شده است. در تجزیه و تحلیل کامپوزیت های پارچه ای تنها پیش بینی شروع شکست کافی نیست. شروع آسیب معمولاً در بار پایین تر از بار شکست نهایی رخ می دهد بنابراین روش خرابی پیشرونده جهت مطالعه تاثیر تجمع آسیب بر عملکرد مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرد. تئوری کاهش آنی خواص در این بخش بر اساس کار شکریه [23] انجام شده است. در روش کاهش خواص ماده، ماده آسیب دیده به عنوان یک ماده همگن بدون آسیب اما با خواص مکانیکی کاهش داده شده در نظر گرفته می شود [24]. در این روش معمولاً چند لایه های کامپوزیتی به سه نوع آسیب الیاف و ترک در ماتریس و برش بین الیاف و ماتریس طبقه بندی می شوند. تحلیل تنش در چند لایه های کامپوزیتی نیز معمولاً برای تشخیص اولین لایه آسیب دیده انجام می شود.

جدول 3 معیار واماندگی هشین [22]

Table 3 Hashin failure criterion

معیار تخریب	حالت تنش واماندگی
$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1$	$\sigma_1 > 0$
$-\frac{\sigma_{11}}{X_C} = 1$	$\sigma_1 < 0$
$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{12}^2} = 1$	$\sigma_2 + \sigma_3 > 0$
$\frac{1}{Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{1}{S_{23}^2} (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_{12}^2} (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) = 1$	$\sigma_2 + \sigma_3 < 0$

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{22})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2) \geq 2S_{ut} \quad (11)$$

Fig.7 Comparison of the stress-strain relations between simulation and experiment

شکل 7 مقایسه منحنی تنش-کرنش بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی

جدول 5 نتایج به دست آمده از آزمایش و مدل سازی در ابعاد مش مختلف.

Table 5 Experimental and simulation results for plain woven composite in different mesh size.

نمونه	اندازه مش	مدول کشش (Gpa)	استحکام کششی (Mpa)
آزمایشگاهی [25]		15.5	271
مدل سازی درشت		16.8	298
مدل سازی متوسط		16.90	292
مدل سازی ریز		16.9	291
خطا (%)	8		7

خواص کششی کامپوزیت بدست آمده از آزمون [25] به همراه نتایج مدل سازی مستقل از مش در جدول 5، آمده است. بر طبق جدول 5، خطای بوجود آمده از مقایسه نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی کم بوده که نشان از صحت مدل سازی در این تحقیق می باشد. علت اختلاف بوجود آمده در جدول 5، را می توان چسبندگی کامل بین الیاف و ماتریس در مدل سازی دانست. در صورتی که در قسمت آزمایشگاهی چسبندگی به صورت کامل نبوده و همین امر سبب شده خواص مکانیکی کامپوزیت در قسمت آزمایشگاهی نسبت به بخش مدل سازی پایین تر باشد. از طرفی مش ریزی و محاسبات اجزاء محدود خود نیز سبب ایجاد خطایی جزئی در محاسبات شده است.

4- نتیجه گیری

در این مطالعه به تحلیل کامپوزیت بافته شده تار و پودی تحت بارگذاری کششی تک جهته به روش اجزاء محدود پرداخته و توزیع تنش و کرنش بر روی یک مدل نماینده حجم را بررسی نمودیم. همچنین ضرایب مکانیکی، شروع آسیب و استحکام کششی کامپوزیت به روش آسیب پیشرونده با استفاده از زیروال نویسی در نرم افزار آباکوس (USDFLD) پیش بینی شد. از طرفی استفاده از یک مدل سلول واحد در ابعاد مزو با طراحی تمامی اجزاء که شامل ماتریس و قسمت تقویت کننده می شود سبب شده پیش بینی خواص مکانیکی کامپوزیت به خوبی صورت گیرد و حجم محاسبات برای مدل ماکرو کاهش یابد و بتوان آزمون های مختلف را برای پیش بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت روی آن انجام داد.

5- منابع و مراجع

- [1] Tanov, R., Tabiei A., "Computationally efficient micromechanical models for woven fabric composite elastic moduli," Journal of Applied Mechanics, Vol. 68, No. 4, pp. 553-560, 2001.
- [2] Naik, N., Shembekar P., "Elastic behavior of woven fabric composites: I—Lamina analysis", Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 15, pp. 2196-2225, 1992.
- [3] Crookston, J., Long, A., Jones, I., "A summary review of mechanical properties prediction methods for textile reinforced polymer composites," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, Vol. 219, No. 2, pp. 91-109, 2005.

آسیب رزین در کرنش 0.5٪ را نشان می دهد. گسترش آسیب ماتریس در جهت تارها بسیار کم تر از گسترش آسیب در جهت پود و رزین اتفاق می افتد.

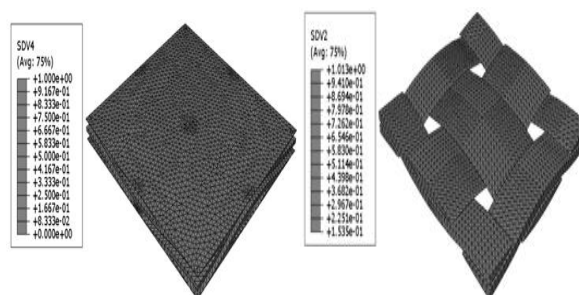


Fig.5 Damage patterns at: (a) fiber failure initiation in warp yarns (b) first significant load drop in resin pocket

شکل 5 الگوی شروع آسیب در نخ و رزین (در کرنش 0.5٪)

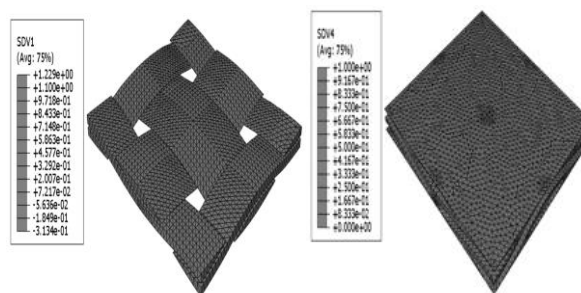
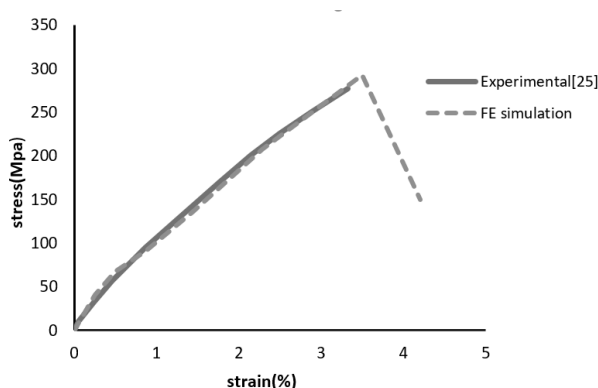


Fig.6 Damage patterns at: (a) fiber failure initiation in warp yarns (b) first significant load drop in resin pocket.

شکل 6 الگوی شروع آسیب در نخ و رزین (در کرنش 2.75٪)

شکل 6.a، الگوی آسیب الیاف را در زمان شروع وقوع آسیب نخ های تار در کرنش 2.75٪ را نشان می دهد. شروع شکست از مناطق اعوجاج تار شروع و به دیگر مناطق تار و پود گسترش میابد. همچنین در کرنش 2.75٪ افت محسوس خواص مکانیکی رزین اتفاق افتاده است (شکل 6.b). همانطور که در شکل 7، مشخص است نمودار منحنی تنش-کرنش با نمودار بدست آمده از آزمون تجربی [25] انطباق مناسبی دارد که خود نشان دهنده نزدیک بودن خواص مکانیکی بدست آمده از مقیاس مزو با خواص مکانیکی کل کامپوزیت می باشد.



- [4] Angioni, S., Meo, M., Foreman, A., "A comparison of homogenization methods for 2-D woven composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 2, pp. 181-189, 2011.
- [5] Adumitroaie, A., Barbero, E. J., "Stiffness and strength prediction for plain weave textile reinforced composites," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 19, No. 1-3, pp. 169-183, 2012.
- [6] Ishikawa, T., Chou, T.-W., "Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 17, No. 11, pp. 3211-3220, 1982.
- [7] Paumelle, P., Hassim A., & Lone, F., "Microstress analysis in woven composite structures", *La Recherche Aérospatiale*, Vol. 6, pp. 47-62, 1991.
- [8] Whitcomb, J., "Three-dimensional stress analysis of plain weave composites," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM STP1110, pp. 417-438, 1991.
- [9] Whitcomb, J., Woo, K. & Gundapaneni, S., "Macro finite element for analysis of textile composites," *Journal of Composite Materials*, Vol.28, pp. 607-618, 1994.
- [10] Woo, K., & Whitcomb, J., "Three-dimensional failure analysis of plain weave textile composites using a global/local finite element method," *Journal of Composite Materials*, Vol.30, pp. 984- 1003, 1996.
- [11] Blackketter, D., Walrath, D., & Hansen, A., "Modeling damage in a plain weave fabric reinforced composite material" *Journal of Composites Technology and Research*, Vol.15, pp. 136-142, 1993.
- [12] Whitcomb, J., & Srengan, K. "Effect of various approximations on predicted progressive failure in plan weave composites" *Composite Structures*, Vol.34, pp. 13-20, 1996.
- [13] Gasser, A., Boisse, P., & Hanklar, S "Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements 3D simulations versus biaxial tests", *Computational Materials Science*, Vol.17, pp.7-20, 2000.
- [14] Boisse, P., Buet, K, Gasser, A., & Launay, J Meso/macro-mechanical behaviour of textile reinforcements for thin composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 395-401, 2001.
- [15] Hivet, G., Launay, J., Gasser, A., Daniel, J.L., & Boisse, P., "Mechanical Behavior of Woven Composite Reinforcements While Forming", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol.15, pp. 545-555, 2002.
- [16] Lomov, S., Huysmans, G., Luo, Y., Parnas, R., Prodromou, A., Verpoest, I. & Phelan, F., "Textile composites: modelling strategies", *Composites part A*, Vol. 32, pp.1379-1394, 2001.
- [17] Torabizadeh, M. A. Shokrieh, M. M. and Fereidoon A., "Progressive Damage Modeling of Glass/Epoxy Laminated Composites under Static Load at Low Temperature," In Persian, *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 8, No. 21, pp. 33-43, 2010.
- [18] Hassanifard, S. and Feyzi, M., "Progressive Damage Investigation of Glass-Epoxy Composite Laminates under Fatigue Loading " In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 339-347, 2015.
- [19] Shokrieh, M. M. Ghajar, M. Salamattalab, M. and Madoliat, R., "Progressive Damage Modeling of Laminated Composites by Considering Simultaneous Effects of Interlaminar and Intralaminar Damage Mechanisms," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015.
- [20] Scida, D., Aboura, Z., Benzeggagh, M. L., and Bocherens, E., "A Micromechanics Model for 3D Elasticity and Failure of Woven-fibre Composite Materials", *Composites Science and Technology*, Vol. 59, No. 4, pp. 505-517, 1999.
- [21] Ansar, M., Xinwei, W. and Chouwei, Z., "Modeling Strategies of 3d Woven Composites: A Review" *Composite structures*, Vol. 93, No. 8, pp. 1947-1963, 2011.
- [22] Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", *Journal of Applied Mechanics*, Vol.47, No. 2, pp. 329-334, 1980.
- [23] Shokrieh, M. M., "Progressive Fatigue Damage Modeling of Composite Materials", Ph.D Thesis, McGill University, 1996.
- [24] Gorbatiikh, L. Ivanov, D. Lomov, S.V and Verpoest, I. "On Modelling of damage evolution in textile composites on meso-level via property degradation approach." *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 38, pp 2433-2442, 2007.
- [25] Saboktakin, A., "Integrity assessment of preforms and thick textile reinforced composites for aerospace applications" PhD Thesis École de technologie supérieure Université du Québec, 2013.



تحلیل تجربی و عددی ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی

علی داور¹، رضا آذرآفزا^{2*}، جواد فرجی شعاع³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-1774، azarmut@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

دریافت: 98/04/14

پذیرش: 98/07/29

کلیدواژگان

پانل ساندویچی

هسته مشبک

ضربه سرعت پایین

آسیب پیشرونده

زیر برنامه نویسی VUMAT

پانل ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی، پانلی متشکل از یک هسته با ساختار مشبک کامپوزیتی از نوع کاگوم، به همراه دو صفحه فوقانی و تحتانی در دو طرف این هسته می‌باشد. این سازه‌ها می‌توانند جایگزین سازه‌های تقویت شده با استرینگر، پانل‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری و سازه‌های مشبک آلومینیومی گردند. در این پژوهش، با انجام تست‌های تجربی و با کمک نرم‌افزار آباکوس، به بررسی تجربی و عددی ضربه سرعت پایین در پانل ساندویچی با هسته مشبک پرداخته شده است. برای انجام تست ضربه سرعت پایین، دو پانل ساندویچی با هسته مشبک ساخته شده و تحت بارگذاری سقوط آزاد ضربه‌زننده فولادی با نوک نیم کروی قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی عددی، از انواع المان‌های سه بعدی و حل آسیب پیشرونده به کمک زیربرنامه‌نویسی با زبان فرترن در نرم‌افزار آباکوس، کمک گرفته شده است. مقایسه بین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد که روش المان محدود، روشی کارآمد جهت کاهش زمان و هزینه برای پیش‌گویی رفتار این نوع سازه‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای است. در بارگذاری ضربه، آنچه که موجب جذب انرژی در سازه می‌شود، آسیب دیدن بخشی از سازه است که در مقابل ضربه‌زننده قرار دارد. بسته به میزان انرژی وارده، این آسیب دیدگی می‌تواند شامل صفحه فوقانی یک پانل ساندویچی و یا ریب‌های درون هسته آن باشد و صلبیت بیشتر محل برخورد ضربه‌زننده، موجب کاهش سطح آسیب قابل مشاهده در سازه شده است. همچنین در اثر ضربه روی نقاطی مانند محل تقاطع ریب‌ها که نسبت به فضای بین ریب‌ها، از سفتی بیشتری برخوردارند، مدت زمان برخورد کاهش و حداکثر نیروی تماس افزایش می‌یابد.

Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core

Ali Davar, Reza Azarafza*, Javad Faraji Shooa

Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

*P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, azarmut@mut.ac.ir

Keywords

Sandwich panel
Grid-stiffened core
Low-velocity impact
Progressive damage
VUMAT subroutines

Abstract

Composite sandwich panels with grid stiffened core, are composed of composite face sheets and kagome type lattice core. These structures can be used as alternative to the structures reinforced with stringer, sandwich panels with honeycomb and aluminum grid structures. In this study, experimental tests and finite element analysis using ABAQUS software are applied for low-velocity impact on grid stiffened sandwich panels. In the experimental method, two sandwich panels with grid stiffened core are manufactured and undergo drop weight impact with a hemispherical steel impactor. Also, in the numerical method, the results are compared with the three-dimensional elements and progressive damage model is applied by employing user defined material subroutines in finite element method using ABAQUS software. Making comparison between the present numerical results with experimental results, shows that the finite element method is an efficient way to reduce the time and cost for understanding the behavior of this type of structure against impact loads. The energy absorption occurs in the structures mainly due to the induced damage in the impact region of the structure. This damage may affect the top face sheets or the ribs within the core of the sandwich panel and the rigidity of the impact position, reduces the visible damaged area in the structure. Also, the impact on the points such as the ribs' intersections, which are more rigid than the space between the ribs, causes the contact time to be decreased and the maximum contact force to be increased.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Davar, A. Azarafza, R. Faraji Shooa, J., "Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No.4, pp. 615-626, 2020.

۱- مقدمه

پانل‌های ساندویچی اصطلاحاً به آن دسته از سازه‌هایی اطلاق می‌شوند که از یک هسته مرکزی ضعیف و لایه‌های خارجی قوی تشکیل شده‌اند. معمولاً هسته ضعیف میانی از جنس فوم یا لانه زنبوری می‌باشد و پوسته‌های واقع در دو طرف هسته، از کامپوزیت‌هایی با الیاف شیشه و یا الیاف‌های دیگر هستند. امروزه استفاده از سازه‌های مشبک از جنس خود الیاف در هسته این پانل‌ها رو به افزایش است و مطالعات زیادی در مورد شناخت ویژگی‌ها و رفتارهای این سازه‌ها در مقابل انواع بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی، در دنیا انجام گرفته است.

مطالعه اثرات بارهای ضربه‌ای بر روی سازه‌های صفحه‌ای دارای سابقه‌ای طولانی از حدود 200 سال قبل می‌باشد که البته 150 سال اول آن تقریباً به طور انحصاری به مطالعات تجربی اختصاص داشته است. اولین کار تحقیقاتی در مورد بارهای فشاری درون صفحه‌ای در سازه‌های ساندویچی توسط مارگور¹ در سال 1944 انجام شده است [1]. از آن زمان به بعد، تحقیق در مورد کامپوزیت‌ها و پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی رونق گرفت و کتاب‌های بسیاری راجع به سازه‌های کامپوزیتی منتشر شد که یکی از این کتاب‌ها توسط آلن² در سال 1969 [2] نوشته شده است که هنوز هم به عنوان یکی از مراجع اصلی در این زمینه، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تاکنون پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی در معرض بارهای ضربه‌ای، به روش‌های تجربی، مدلسازی ریاضی و عددی، به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فن³ و همکارش با استفاده از مدل آسیب پیش‌رونده⁴ با زیربرنامه⁵ نویسی در نرم‌افزار آباکوس⁶، و با در نظر گرفتن الیاف‌های چسب بین لایه‌ها، به بررسی پاسخ ضربه سرعت پایین و مکانیزم‌های شکست در یک صفحه کامپوزیتی به روش تجربی و عددی پرداخته‌اند. تحلیل‌های عددی آن‌ها نشان می‌دهد که پیاده‌سازی مود تورق صفحه کامپوزیتی بر اثر ضربه، نیاز به یک شبیه‌سازی دقیق سه بعدی دارد [3]. مطالعات سایتو و کیمپارا⁷ تأثیرات ضربه در پانل‌های کامپوزیتی دوخته شده چند محوری، ساخته شده به روش تزریق خلاء و قالبگیری انتقالی رزین را نشان می‌دهد [4]. بیوون⁸ و همکارانش آزمون ضربه سرعت پایین را بر روی صفحات کامپوزیتی سه بعدی انجام دادند و دریافتند که سطح آسیب در کامپوزیت‌های سه بعدی نسبت به پانل‌های دو بعدی، به طور قابل توجهی کمتر است [5]. ایبکوی⁹ و همکارانش تأثیر ضربه سرعت پایین برای تیرهای کامپوزیتی با الیاف تک جهته و عمود بر هم را تحت دماهای مختلف مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که دما تأثیر زیادی بر روی پاسخ ضربه دارد و میزان آسیب بر اثر ضربه، هنگامی که دما کمتر است، افزایش می‌یابد [6].

یانگ¹⁰ و همکارانش به بررسی عددی و تجربی صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/پوکسی در ضخامت‌های مختلف و تحت انرژی‌های مختلف در معرض ضربه سرعت پایین پرداختند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که انرژی ضربه‌زننده تأثیر بسیار زیادی بر شکل تاریخچه نیروی تماس دارد، به گونه‌ای که هنگامی که انرژی ضربه‌زننده کم است، نمودار نیرو-زمان بدون نوسان و به

شکل نیم سینوسی است. در حالی که افزایش انرژی ضربه باعث می‌شود نمودار، دارای نوسانات بالایی باشد و اغلب پس از حداکثر نیروی تماس، یک افت ناگهانی در نمودار اتفاق می‌افتد. همچنین، حداکثر نیروی تماس، با افزایش انرژی ضربه و افزایش ضخامت صفحات، افزایش می‌یابد. معمولاً پس از ضربه با انرژی ضربه پایین، در سطح صفحه فرو رفتگی و آسیبی قابل مشاهده نیست، تا اینکه انرژی ضربه‌زننده، به اندازه کافی افزایش یابد. همچنین سطح آسیب به وجود آمده در سطح پایینی صفحات، پس از ضربه، به شکل واضح و معمولاً به صورت بیضوی و در راستای الیاف صفحه پایینی است [7].

لی و جونز¹¹ با بررسی پاسخ ضربه در سرعت‌های پایین برای یک سازه ساندویچی با هسته هیبریدی با پوشش لاستیکی، دریافتند که استفاده از چنین هسته‌ای در مقایسه با یک هسته از جنس اپوکسی خالص و یا هر جنس دیگری بدون پوشش لاستیکی، انرژی ضربه‌ای خیلی بیشتری جذب می‌کند [8]. در مطالعه‌ای دیگر، استفاده از لاستیک خرد شده در هسته پانل‌ها وضعیت را بهبود داده است [9]. چن و سای¹² یک مدل المان محدود با دقت مناسب برای سازه مشبک ارائه دادند و از این مدل برای مقایسه عملکرد سازه‌های مشبک با چندلایه‌ها و ساندویچ‌ها استفاده کردند [10]. آن‌ها همچنین از این مدل برای بهینه‌سازی سازه‌های مشبک استفاده کردند. پاسخ ضربه سرعت پایین در پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری¹³ توسط کاستینی¹⁴ و همکارانش به روش المان محدود مدلسازی شده است و دقت خوبی بین نتایج عددی با نتایج تجربی به دست آمده است [11]. تأثیر بارهای عرضی بر روی پانل‌های کامپوزیتی با ساختار مشبک توسط جدها و¹⁵ و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت و با یک تحلیل پارامتری، با تغییر ضخامت ریب‌ها، ضخامت پوسته‌ها و فاصله ریب‌ها، پانل را بهینه‌سازی کردند [12]. آنالیزهای عددی استفاده شده در این تحلیل پارامتری نشان داد که هنگامی که پانل از سمتی که پوسته وجود دارد، مورد بارگذاری قرار بگیرد، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.

ماتیا¹⁶ نیز با مطالعه تجربی بر روی یک پانل ساندویچی با هسته مشبک مربعی که فضاهای خالی هسته مشبک آن با استفاده از پرکننده‌هایی پر شده بود، به این نتیجه دست یافت که پانل‌های ساندویچی با ساختار شبکه‌ای کوچکتر در هسته، ظرفیت تحمل بار ضربه‌ای بیشتری دارند و آسیب‌های محلی وارده ناشی از ضربه نیز کم‌تر می‌شود [13].

گیوکیانگ لی¹⁷ و همکارش ضربه سرعت پایین را بر روی پانل ساندویچی تمام کامپوزیتی با هسته مشبک مورد بررسی قرار دادند. برای ساخت هسته پانل، ابتدا به روش رشته پیچی خشک، الیاف در قالب مورد نظر و حول پین‌های در نظر گرفته شده، پیچیده شده و سپس ماده فوم مخلوط با رزین به آن اضافه می‌شود. برخی از نتایج بدست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- 1- هر سلول از هسته مشبک در مقابل ضربه، یک رفتار شبه استاتیکی از خود نشان می‌دهد.
- 2- هسته مشبک و فوم پر شده درون آن، تأثیر هم‌افزا بر روی مواردی چون انتقال انرژی ضربه، جذب انرژی و ظرفیت تحمل بار دارند.

¹¹ Li and Jones¹² Chen and Tsai¹³ honeycomb¹⁴ Castanied¹⁵ Jadhav¹⁶ Muthyala¹⁷ Guoqiang Li¹ Marguerre² Allen³ Feng⁴ Progressive Damage⁵ Subroutine⁶ ABAQUS⁷ Saito and Kimpara⁸ Byun⁹ Ibekwe¹⁰ Yang

پیچی ساختار مشبک هسته، با استفاده از روش لایه‌گذاری تَر و به صورت دستی درون یک قالب صورت گرفته است. در شکل 1، قالب و قید و بند ساخته شده برای لایه‌گذاری هسته، جهت ایجاد نیروی کششی ثابت در الیاف، نشان داده شده است. از جنس لاستیک سیلیکونی با طرح شیارها با عمق و ابعاد مقطع، مطابق نقشه، برای قالب استفاده شده است. الیاف مورد استفاده برای پیچش، ابتدا در حمام رزین به طور کامل با رزین آغشته شده‌اند. به منظور آغشته‌سازی بهتر الیاف در مدت زمان حضور در حمام، دمای رزین توسط یک گرم‌کن، 40 درجه سانتی‌گراد نگه داده شده است.

پس از پایان لایه‌چینی هسته مشبک، به منظور پخت رزین، سازه در اتوکلاوی مطابق شکل 2 و تحت سیکل پخت با شرایط دو ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سه ساعت در دمای 140 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است. هسته مشبک ساخته شده، در شکل 3 نشان داده شده است.

پس از ساخت هسته مشبک، صفحات طرفین پانل ساخته شده است. به منظور یکسان بودن شرایط ساخت این صفحات، طی یک مرحله و به صورت یک صفحه واحد ساخته شده‌اند. پس از آماده شدن هسته مشبک و صفحات، می‌توان این دو جزء را به یکدیگر چسباند تا پانل ساندویچی کامل شود. صفحات فوقانی و تحتانی توسط رزین اپوکسی سرد، به هسته چسبانده شده‌اند و با قرار دادن وزنه‌هایی بر روی آن‌ها، زمان کافی برای پخت کامل رزین و برقراری اتصال کامل، داده شده است. شکل 4 پانل ساندویچی نهایی را پس از تکمیل شدن فرآیند پخت و برش لبه‌ها تا رسیدن به اندازه نهایی نشان می‌دهد.

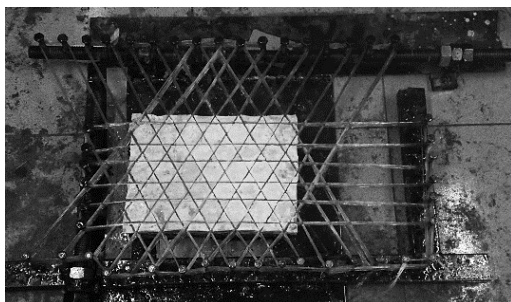


Fig. 1 Fixtures for tensioning fibers after placement in the rubber mold
شکل 1 قید و بند جهت اعمال کشش الیاف پس از لایه‌گذاری درون قالب لاستیکی



Fig. 2. Curing grid stiffened core in autoclave

شکل 2 پخت هسته مشبک در درون اتوکلاو

3- افزایش مساحت سلول باعث کاهش جذب انرژی آن می‌شود و استحکام باقیمانده پانل را کاهش می‌دهد. لذا برای مساحت سلول‌ها باید مقدار بهینه را به دست آورد.

آذرفزا و همکارانش تست خمش سه نقطه‌ای ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک را به صورت تجربی بررسی نمودند و نشان دادند که حتی بعد از واماندگی رویه‌ها، هسته مشبک به تحمل بار ادامه می‌دهد. و همچنین نشان دادند که تغییر جنس رویه‌ها از پارچه با الیاف شیشه به کربن، به جای افزایش ضخامت رویه‌های الیاف شیشه، در سازه‌های ساندویچی نتیجه بهتری دارد [14]. احمد رضا قادری و همکارانش به بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی بر روی پانل ساندویچی کامپوزیتی ساخته شده از الیاف بازالت با لحاظ نانوگرافن پرداختند و نشان دادند که میزان جذب انرژی پانل ساندویچی کامپوزیتی حاوی نانوگرافن بالاست و نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن بیشترین جذب انرژی را قبل از شکست پانل ساندویچی کامپوزیتی و کمترین آسیب را بعد از نفوذ کامل دارد [15]. محمد هدایتیان و همکارانش به بررسی عددی و تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا در کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای پرداختند و نشان دادند که در سازه‌های مشبک، تقویت‌کننده‌ها برای هر سلول، همانند تکیه‌گاه الاستیک عمل می‌کنند، که نتیجه آن، کاهش جابجایی سازه در محل برخورد و کاهش تغییر شکل کلی و موضعی سازه می‌باشد [16]. کرامت ملک‌زاده و همکارانش مدل تحلیلی را برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی با صفحات فوقانی و تحتانی از جنس الیاف-فلز تحت ضربه با سرعت پایین ارائه دادند. نتایج نشان داد که در انرژی ثابت، افزایش مقاومت به ضربه در سازه، مستقل از سرعت و جرم ضربه‌زننده می‌باشد. همچنین با کاهش ضخامت صفحات در سازه‌های ساندویچی منحنی تغییرات ماکزیمم نیروی برخورد-فرورفتگی، به حالت خطی نزدیک‌تر می‌شود [17].

تحقیقات گذشته در زمینه ضربه سرعت پایین در پانل‌های ساندویچی، عموماً بر روی پانل‌هایی با هسته‌های لانه‌زنبوری و یا ساختارهای خاصی از هسته بوده است. پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی در کاربردهای عملی، برتری خوبی نسبت به پانل‌های ساندویچی با سایر هسته‌ها از خود نشان داده‌اند. به منظور شناخت بیشتر این پانل‌ها، لازم است رفتار این نوع سازه‌ها در مقابل بارهای دینامیکی و ضربه نیز مورد بررسی قرار گیرد. این تحقیق با رویکرد ساخت پانل ساندویچی تمام کامپوزیت با هسته مشبک، و همچنین استفاده از مدل‌های عددی دقیق و سه بعدی، به بررسی تجربی و عددی این پانل‌ها پرداخته است. هسته مشبک پانل ساندویچی، با استفاده از روش رشته پیچی دستی و با الیاف پیوسته و آغشته‌سازی همزمان، ساخته شده است. پیچش پیوسته به همراه کشش در الیاف، می‌تواند یک ساختار مشبک مستحکم را به وجود آورد. همچنین در این تحقیق برای مدل‌سازی عددی ضربه و آسیب، از مدل‌های سه بعدی آسیب پیش‌رونده در مواد کامپوزیتی و با کمک برنامه‌نویسی در نرم‌افزار آباکوس، استفاده شده است.

2- ساخت پانل ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی

برای ساخت هسته پانل‌ها از الیاف شیشه و رزین اپوکسی با پخت گرم¹ استفاده شده است. برای ساخت صفحات دو طرف پانل‌های ساندویچی نیز الیاف شیشه‌ای به صورت پارچه تک جهت استفاده شده است و رزین مورد استفاده در این صفحات از نوع رزین اپوکسی با پخت سرد² می‌باشد. رشته

¹ Hot Cure

² Cold Cure

نتایج به شمار می‌آیند. به طوری که می‌توان گفت امروزه هر یک از شاخه‌های علوم، به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم از این ابزار قوی بهره می‌گیرند. با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس، در تحقیق حاضر، مدلسازی ضربه و آسیب ناشی از آن، به کمک این نرم‌افزار صورت پذیرفته است.

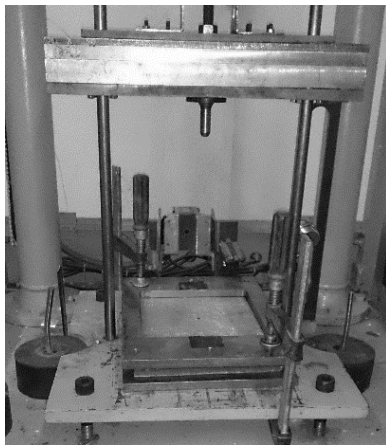


Fig. 5 Drop weight impact tester

شکل 5 دستگاه تست ضربه سقوط آزاد

3-1- اعتبارسنجی روش مدل‌سازی عددی ضربه بر روی کامپوزیت‌ها به کمک تحقیقات گذشته

جهت حصول اطمینان از قابلیت داده‌برداری کامل توسط دستگاه تست ضربه، ابتدا باید به کمک نرم‌افزار، حداکثر نیرو و مدت زمان تماس ضربه روی نمونه ساخته شده، پیش‌گویی شوند. لذا ابتدا روش مدلسازی در نرم‌افزار، باید اعتبارسنجی شود. به این منظور، در این بخش به مقایسه نتایج تحلیل ضربه سرعت پایین روی صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/اپوکسی¹ با نتایج تجربی و عددی مرجع [7] پرداخته شده است. در این مسأله، ضربه‌زننده عبارت است از یک کره به قطر 12.7 میلی‌متر و جرم 5.34 کیلوگرم که با سرعت 1.94 متر بر ثانیه (معادل انرژی برخورد 10 ژول) به صفحه کامپوزیتی برخورد می‌کند. همچنین آرایش الیاف به صورت $45/0/-45/90_2s$ ، ضخامت هر لایه 0.125 میلی‌متر و ضخامت کل صفحه، 2 میلی‌متر است. در شکل 6، مدل صفحه کامپوزیتی و ضربه‌زننده نمایش داده شده‌اند.

در تحقیق حاضر، برای مش‌بندی صفحه کامپوزیتی از المان‌های سه بعدی (C3D8R) برای استفاده شده است. بین لایه‌های کامپوزیتی به ضخامت 0.01 میلی‌متر، لایه چسب با المان‌های COHD8 در نظر گرفته شده است. تماس بین گلوله و صفحه از نوع صفحه به صفحه اختیار شده، ضریب اصطکاک برابر 0.5 [18]، بین گوی ضربه‌زننده و صفحه کامپوزیتی اعمال گردیده است. همچنین با کمک زبان برنامه‌نویسی فرترن، معادلات آسیب، بر مبنای تئوری هاشین [19] اعمال شده‌اند. در شکل 7، نتایج تحلیل عددی انجام شده در تحقیق حاضر با استفاده از دو نوع المان دو بعدی (SC8R) و سه بعدی (C3D8R)، در مقایسه با نتایج مرجع [7]، نشان داده شده‌اند.

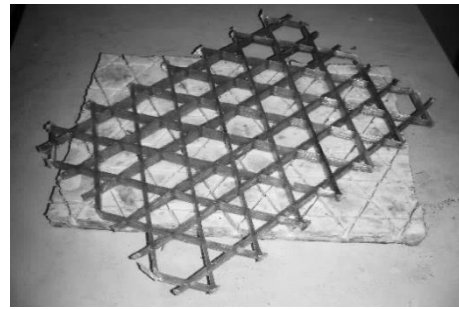


Fig. 3. Composite grid stiffened core made for sandwich panel

شکل 3 هسته مشبک کامپوزیتی ساخته شده برای پانل ساندویچی

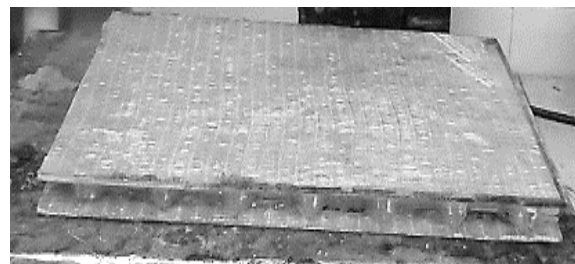


Fig. 4 Sandwich panels after complete curing process and trimming

شکل 4 پانل ساندویچی تکمیل شده پس از فرآیند پخت و برش لبه‌ها

2-1- تست تجربی ضربه سقوط آزاد

پس از آماده‌سازی پانل ساندویچی، تست ضربه سقوط آزاد بر روی پانل انجام شده است. دستگاه تست ضربه مطابق شکل می‌باشد.

تست ضربه با انتخاب پارامترهای زیر بر روی هر سه پانل، به صورت مشابه انجام شده است:

- جرم ضربه‌زننده: 11.6 کیلوگرم

- ارتفاع ضربه‌زننده: 30 سانتی‌متر

- شکل ضربه‌زننده: سنبه با نوک نیم‌کروی به قطر 16 میلی‌متر

برای انجام تست ضربه، از قید و بند مخصوص استفاده شده است که لبه‌های پانل را در برگرفته، به نحوی که در وسط آن یک مربع به ابعاد 20×20 سانتی‌متر، قابل رؤیت است. پس از قرار گرفتن پانل‌ها به همراه قید و بند در دستگاه تست، با دو عدد گیره بسته شده، فشار تماسی در راستای عمودی روی سطوح لبه‌های پانل، به صورت یکنواخت اعمال شده است (شکل 5). بدین منظور، صاف بودن سطح قطعه و صفحات قید و بند، حائز اهمیت است. این مهم به کمک ابزار تراز حبابی انجام شده است. برخی محدودیت‌های دستگاه تست ضربه عبارتند از حداکثر شتاب قابل ثبت 100g (متر بر مجذور ثانیه) و حداکثر زمان ثبت اطلاعات، 26 میلی‌ثانیه است. گام‌های زمانی داده‌برداری برای ثبت نیروی تماس، برابر $1.3e-5$ ثانیه است. برای محاسبه نیروی ضربه، جرم ضربه‌زننده در شتاب اندازه‌گیری شده ضرب شده است.

3- بررسی عددی

در دنیای صنعتی امروز، همزمان با پیشرفت تکنولوژی و تولید وسایل و قطعات پیچیده و حساس، لزوم استفاده از روش‌های علمی مناسب برای کاهش هزینه و زمان، مطرح می‌باشد. استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی در تحلیل مسائل تحقیقاتی و صنعتی، ابزاری قوی برای تخمین و پیش‌بینی

¹ Aramid/epoxy

میلی متر می باشد. صفحات طرفین پانل هر کدام دارای سه میلی متر ضخامت بوده، هسته مشبک 15 میلی متر از ضخامت پانل ساندویچی را به خود اختصاص داده است. برای مدل کردن هسته به صورت یک مدل سه بعدی، ابتدا یک سلول واحد از کل هسته مدل شده، سپس با تکرار در دو جهت، کل هسته، مدل شده است. در شکل 8 سلول واحد مورد استفاده برای تشکیل هسته پانل ها نشان داده شده است.

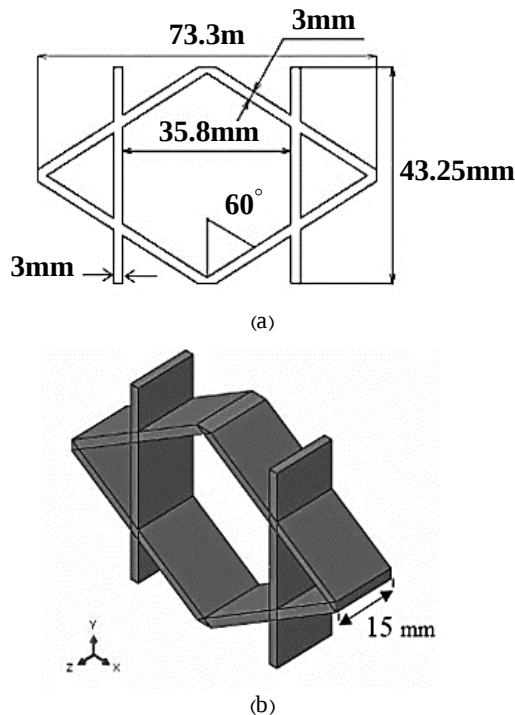


Fig. 8 Geometric dimensions of the unit cells of the core panel; a) Front view; b) Isometric view

شکل 8 ابعاد هندسی سلول واحد تشکیل دهنده هسته پانل، الف) نمای روبرو، ب) نمای ایزومتریک

همچنین شکل 9، هسته مشبک کامل نهایی را نشان می دهد.

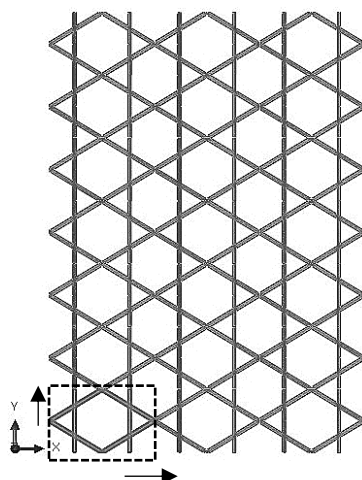


Fig. 9 Modeling core of the sandwich panels using a rectangular array of the unit cell

شکل 9 مدل سازی هسته پانل ساندویچی با استفاده از آرایه مستطیلی سلول واحد

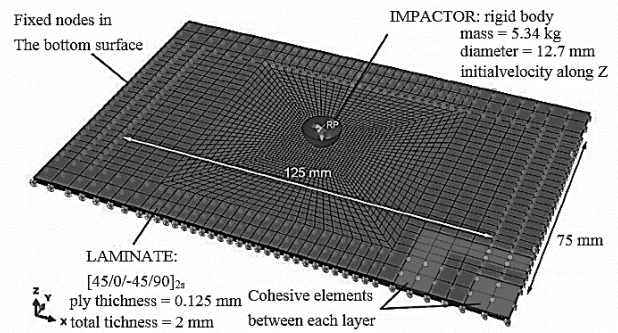


Fig. 6 Detailed finite element model of composite plate made of aramid / epoxy [7]

شکل 6 جزئیات مدل المان محدود صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/پوکسی [7]

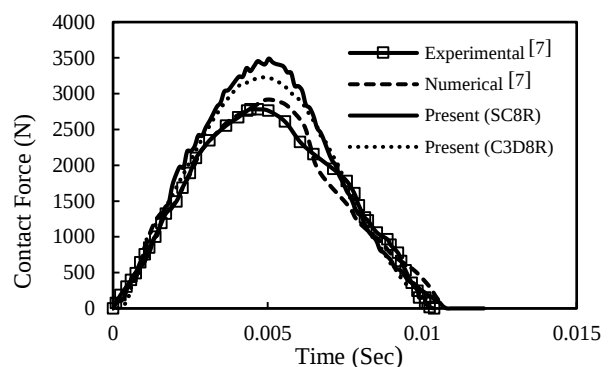


Fig. 7 Comparing the results of the impact response for composite plate made of aramid / epoxy (considering the effect of impact damage)

شکل 7 مقایسه نتایج پاسخ ضربه برای صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/پوکسی (با در نظر گرفتن اثر آسیب ناشی از ضربه)

2-3- حل عددی ضربه بر روی پانل ساندویچی

در این بخش، به مسأله اصلی در تحقیق حاضر یعنی شبیه سازی تست تجربی ضربه سقوط آزاد ذکر شده در بخش 1-2 پرداخته شده، موضوع پاسخ ضربه سرعت پایین و آسیب بر روی پانل ساندویچی با هسته مشبک و از جنس کامپوزیت شیشه/پوکسی، مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. فرضیات زیر در این تحلیل مد نظر قرار گرفته اند:

- ضربه زننده به صورت یک جسم صلب کروی در نظر گرفته شده است و تمامی جرم های متعلق به دستگاه تست ضربه، به صورت معادل و در مرکز جرم کره در نظر گرفته شده است.
- تماس بین ضربه زننده و پانل ساندویچی، از نوع صفحه به صفحه و با ضریب اصطکاک 0.5 در نظر گرفته شده است.
- از اثر نیروی گرانش در حین ضربه صرف نظر شده است.
- شرایط مرزی اعمال شده در تحلیل عددی، با توجه به شرایط واقعی تست، معادل سازی شده اند.

1-2-3- مدل سازی هندسی پانل ساندویچی

پانل های ساندویچی مورد مطالعه در این تحقیق، از دو بخش هسته مشبک و صفحات فوقانی و تحتانی تشکیل شده است. با توجه به نمونه پانل های ساخته شده، ابعاد کلی پانل 220×303 میلی متر مربع بوده و ضخامت کلی پانل 21

مدل نهایی پانل ساندویچی مطابق شکل 10 می‌باشد.

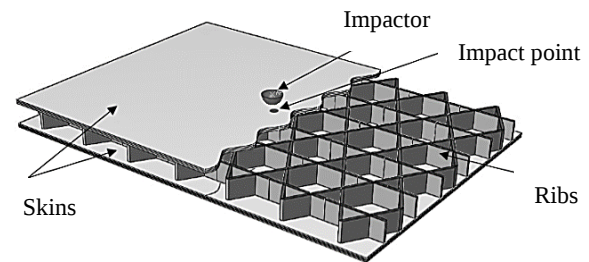


Fig. 10 The impact model of the sandwich panel

شکل 10 مدل ضربه روی پانل ساندویچی

کلی تغییر خواهد داد. لذا در تعیین خواص، باید به هر دو موضوع لایه‌چینی و جهت لایه‌ها توجه داشت.

برای مواد کامپوزیتی، در صورتی که هندسه جسم در نرم‌افزار به صورت سه بعدی مدل شده باشد، می‌توان از المان‌های پوسته‌ای پیوسته² و از تئوری شکست هاشین موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده کرد. همچنین می‌توان از المان‌های آجری³ نیز استفاده نمود. در این المان‌ها برای مدل‌سازی شکست، باید از زیربرنامه‌نویسی کمک گرفت.

در این تحقیق برای مدل‌سازی صفحات دو طرف پانل ساندویچی، طبق مدل تجربی ساخته شده، سه لایه از الیاف تک‌جهته با چینش متقارن [0/90/0] در نرم‌افزار ایجاد شده و خواص الاستیک و شکست مواد، مطابق با جدول 1 وارد شده‌اند. در صورتی که برای مش‌بندی بخواهیم از المان‌های آجری استفاده کنیم، می‌بایست هر لایه به صورت یک مکعب مستطیل مجزا مدل‌سازی شود و با استفاده از قابلیت نرم‌افزار، جهت یا زاویه لایه، به آن اختصاص یابد. در صورت استفاده از المان پوسته‌ای پیوسته، می‌توان هر سه لایه را باهم و به عنوان یک صفحه با ضخامت معادل با ضخامت سه لایه، مدل کرد و ترتیب لایه‌ها و همچنین جهت الیاف، توسط نرم‌افزار به مدل تخصیص داده می‌شود. برای مدل‌سازی هسته مشبک، تعیین جهت در هر یک از ریب‌ها (دستگاه مختصات مادی) باید مطابق شکل 11، به صورت جداگانه انجام شود. در محل‌های تقاطع نیز از همین دستگاه مختصات استفاده شده است. لیکن تصویر مدول‌های سفتی دو ریب متقاطع، به عنوان مدول در محل تقاطع وارد شده است.

مطالعات انجام شده و نتایج تجربی نشان داده است که در سازه‌های مشبک، محل تقاطع ریب‌ها نسبت به سایر نقاط ساختار مشبک، ضعیف‌تر می‌باشند و در بارگذاری‌های استاتیکی، معمولاً آغاز شکست‌ها در مجاورت محل‌های تقاطع صورت می‌گیرند [21]. لذا بر این اساس، در این تحقیق به منظور مدل‌سازی واقعی‌تر شکست یا خرابی، خواص استحکام در محل تقاطع ریب‌ها، معادل 70٪ خواص استحکام در محل ریب‌ها در نظر گرفته شده است. خواص مواد مورد استفاده در ریب‌ها، مطابق جدول 2 می‌باشد.

جدول 1 خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده صفحات طرفین پانل ساندویچی

Table 1 Mechanical properties measured for side facesheets of the sandwich panel

خواص الاستیک	استحکام		
E_1 (GPa)	17.8	X_t (MPa)	450
$E_{2=3}$ (GPa)	4.2	X_c (MPa)	283
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.275	Y_t (MPa)	24
ν_{23}	0.38	Y_c (MPa)	80
$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	3.6	S_L (MPa)	21
G_{23} (GPa)	2.2	S_T (MPa)	21

² Continuum shell

³ Solid

¹ Hard Contact

3-2-2- مدل‌سازی ضربه‌زننده

در ادامه به مدل‌سازی ضربه‌زننده پرداخته شده است. سه روش برای مدل‌سازی ضربه‌زننده وجود دارد [20]:

1- در روش اول که کاربرد بیشتری دارد، ضربه‌زننده به صورت صلب فرض می‌شود و هیچ‌گونه خواص مکانیکی برای ضربه‌زننده تعریف نمی‌شود، که در نتیجه، یک صلبیت بی‌نهایت به ضربه‌زننده اعمال می‌شود.

2- در روش دوم که یکی از روش‌های متداول مدل‌سازی ضربه‌زننده می‌باشد، ضربه‌زننده به صورت صلب فرض می‌شود، ولی خواص مکانیکی مورد نظر نیز برای آن تعریف می‌شود. در نتیجه، صلبیت واقعی برای ضربه‌زننده تعریف می‌شود.

3- در روش سوم، ضربه‌زننده به صورت جسمی شکل‌پذیر و با خواص فیزیکی معین تعریف می‌شود. استفاده از این روش، منجر به شبیه‌سازی واقعی‌تر برخورد می‌شود، اما نیاز به مدل سه بعدی ضربه‌زننده بوده و زمان حل مسأله را به طور قابل توجهی افزایش خواهد داد.

در این تحقیق نیز به منظور کاهش زمان حل، ضربه‌زننده با استفاده از روش دوم و به عنوان یک جسم صلب مدل‌سازی شده است.

3-2-3- مدل‌سازی تماس ضربه

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی ضربه بین ضربه‌زننده و پانل ساندویچی، تماس صفحه به صفحه در نظر گرفته شده است. برای تعریف خواص تماس در راستای مماسی بین گلوله ضربه‌زننده و صفحه پانل ساندویچی، ضریب اصطکاک مساوی 0.5 انتخاب شده است [18]. همچنین برای راستای عمودی بین ضربه‌زننده و پانل ساندویچی، شرایط تماس، از نوع سخت¹ انتخاب شده است.

3-2-4- اختصاص دادن خواص مواد و لایه‌چینی

تعیین مواد برای سازه‌های کامپوزیتی نسبت به سازه‌های فلزی از اهمیت بیشتری برخوردار است. چرا که در سازه‌های کامپوزیتی، علاوه بر این که نحوه لایه‌چینی، تأثیر زیادی بر نتایج تحلیل دارد، انتخاب جهت نیز، به دلیل متفاوت بودن خواص کامپوزیت‌ها در جهات مختلف، پاسخ‌ها را به طور

که برهم کنش تنش در لایه‌ها را در نظر گرفته است. در ذیل، مدهای مختلف این معیار آورده شده است:

$$\sigma_{22} > 0 \text{ برای مود شکست کششی ماتریس}$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22T}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

$$\sigma_{22} < 0 \text{ برای مود شکست فشاری ماتریس}$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22C}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

$$\sigma_{11} > 0 \text{ برای مود شکست کششی الیاف}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11T}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

$$\sigma_{11} < 0 \text{ برای مود شکست فشاری الیاف}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11C}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

$$\sigma_{11} < 0 \text{ مود شکست برشی الیاف-ماتریس}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11C}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

$$\sigma_{33} > 0 \text{ مود شکست تورق برای}$$

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33T}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

$$\sigma_{33} < 0 \text{ مود شکست تورق برای}$$

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33C}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (7)$$

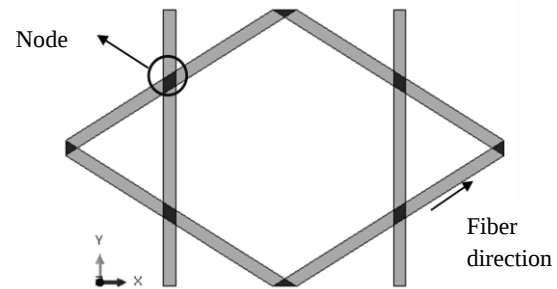


Fig. 11 Determination of material orientation for assigning material properties for the ribs

شکل 11 تعیین جهت برای تخصیص خواص مواد برای ریب‌ها

جدول 2 خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده ریب‌های هسته مشبک پانل ساندویچی

Table 2 Mechanical properties measured for ribs of the grid stiffened core of the sandwich panel

خواص الاستیک		استحکام	
E_1 (GPa)	22.5	X_t (MPa)	514
$E_2 = E_3$ (GPa)	7.63	X_c (MPa)	300
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.22	Y_t (MPa)	81.7
ν_{23}	0.29	Y_c (MPa)	197
$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	2.37	S_t (MPa)	69
G_{23} (GPa)	3.13	S_T (MPa)	69

3-2-5- اعمال آسیب برای مواد کامپوزیتی به کمک زیربرنامه‌نویسی

در شبیه‌سازی عددی به کار گرفته شده در این تحقیق، به منظور حصول حل‌های دقیق از پاسخ ضربه، از روابط سه بعدی آسیب پیشرونده در مواد کامپوزیتی با کمک تئوری هاشین¹ استفاده شده است. بررسی مدهای شکست، به کمک زیربرنامه به زبان فرترن² انجام شده است که قابلیت ارتباط بین زیربرنامه موجود در حین حل، در نرم افزار آباکوس وجود دارد. در این زیربرنامه، پس از فراخوانی تنش‌ها، به بررسی مدهای شکست پرداخته شده است. در صورتی که هر یک از مدهای مورد نظر رخ دهد، با توجه به قوانینی که به منظور کاهش خواص ماده با توجه به آن مود شکست وجود دارد، خواص مواد کاهش می‌یابد. در صورتی که مود شکستی رخ ندهد و یا پس از اعمال کاهش خواص مواد، بار افزایش می‌یابد و سپس تنش‌ها و مدهای شکست، مجدداً بررسی می‌شوند و این فرآیند، تا شکست نهایی ادامه می‌یابد. این معیار که به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده است، از مدهای شکست مختلفی شامل مود شکست کششی و فشاری الیاف، مود شکست کششی و فشاری ماتریس، مود شکست برشی و مود شکست کششی و فشاری تورق تشکیل شده است. معیار هاشین [15,18,19] از جمله معیارهایی است

¹ Hashin

² Fortran

استفاده شده است. در واقع، برای ریب‌ها از المان‌های شش وجهی^۱ و تکنیک المان‌بندی جارویی^۲ و برای صفحات طرفین پانل، از المان‌های شش وجهی و تکنیک المان‌بندی ساختار یافته^۳ استفاده شده است. همه‌ی المان‌های فوق، سه بعدی بوده و در نرم‌افزار آباکوس با عنوان المان C3D8R شناخته می‌شوند. در شکل 13 و شکل 14 به ترتیب، یک سلول واحد از ریب‌های هسته مشبک و صفحات پانل ساندویچی، پس از مش‌بندی نشان داده شده‌اند. نکته‌ی قابل ذکر برای مش‌بندی صفحات طرفین پانل این است که با حرکت از سمت مرزها به طرف مرکز محل برخورد گلوله، ابعاد المان‌ها به صورت تدریجی کوچک‌تر انتخاب شده است که باعث افزایش دقت پاسخ‌ها و همچنین کاهش زمان حل نرم‌افزار در مقایسه با مدل غیربهرینه‌ای که در آن، ابعاد تمام المان‌ها به کوچکی ابعاد المان‌های مرکز برخورد باشد، خواهد شد.

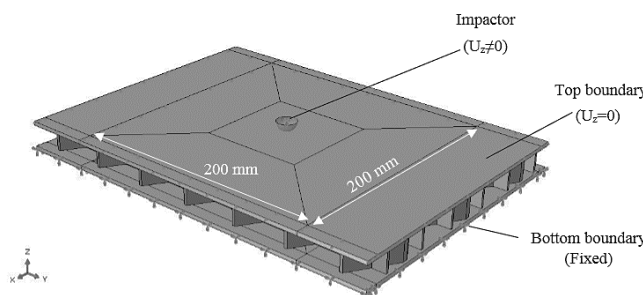


Fig. 12 Detailed boundary conditions in the finite element model

شکل 12 جزئیات شرایط مرزی در مدل المان محدود

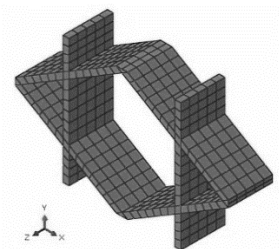


Fig. 13 Element mesh of a unit cell of the ribs of grid core of sandwich panels

شکل 13 مش‌بندی یک سلول واحد از ریب‌های هسته مشبک پانل ساندویچی

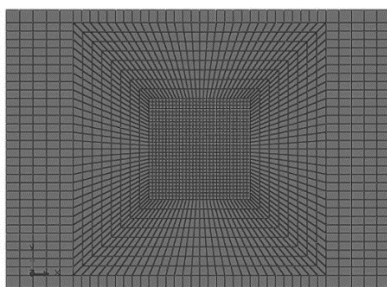


Fig. 14 Element mesh pattern of the facesheets at the two sides of the sandwich panel

شکل 14 الگوی مش‌بندی صفحات طرفین پانل ساندویچی

دادن تمامی مودها، نیاز به استفاده ترکیبی از مدل‌ها وجود ندارد و در سال‌های اخیر، این مدل مورد استفاده قرار گرفته است [25]. مطابق جدول 3، بر اساس هر نوع مود شکستی که رخ می‌دهد، ضرایب کاهش خواص در نظر گرفته شده است تا پس از ایجاد مود شکست مورد نظر، خواص مکانیکی ماده با اعمال این ضرایب، کاهش یابند. در مورد ضرایب پواسون، با توجه به کاهش‌ی که در مدول مربوط به آنها رخ داده است، کاهش می‌یابند.

جدول 3 ضرایب کاهش خواص ماده در مودهای مختلف شکست [24]

Table 3 Degradation coefficients for material properties at different failure modes [24]

مود شکست	ضرایب کاهش					
	E ₁₁	E ₂₂	E ₃₃	G ₁₂	G ₂₃	G ₁₃
کششی الیاف	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
فشاری الیاف	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
کششی ماتریس	1.00	0.01	1.00	0.20	0.01	0.20
فشاری ماتریس	1.00	0.01	1.00	0.20	0.01	0.20
برشی الیاف	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01

3-2-7- شرایط مرزی و بارگذاری

در این بخش، بارگذاری و شرایط مرزی مشابه و مطابق با شرایط عملی در تست‌های تجربی اعمال شده است. در این تحقیق، تنها بارگذاری اعمالی، سقوط آزاد یک وزنه افتان با جرم مشخص می‌باشد. همان‌گونه که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، در تحلیل المان محدود، می‌توان به جای قرار دادن وزنه در یک ارتفاع مشخص، سرعت لحظه برخورد را برای جسم ضربه‌زننده تعریف نمود. لذا برای ضربه‌زننده در راستای برخورد، سرعت معادل ارتفاع‌رها شدن (طبق رابطه $V = \sqrt{2gh}$) تعریف شده است.

مطابق با تست تجربی، به منظور انجام تست ضربه، پانل ساندویچی در یک فیکسچر با ابعاد داخلی 200×200 میلی‌متر مربع قرار گرفته است. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، ابعاد پانل‌ها حدود 220×303 میلی‌متر مربع می‌باشد که با قرار دادن در این فیکسچر، یک مربع به ابعاد گفته شده در وسط پانل، در معرض ضربه خواهد بود و مابقی پانل در میان دو صفحه بالایی و پایینی فیکسچر، کاملاً تثبیت شده است. هنگام انجام تست ضربه، صفحه زیرین این فیکسچر، بر روی صفحه‌ی صلب دستگاه تست قرار داده شده است و صفحه بالایی فیکسچر نیز توسط دو عدد گیره، به صورت قطری در دو نقطه، این صفحه را محکم به پایه صلب، نگه داشته است.

به منظور اعمال شرایط مرزی در نرم‌افزار، بخش‌هایی از صفحه زیرین پانل ساندویچی که در تماس با صفحه پایینی فیکسچر قرار می‌گیرد، در تمام جهات مقید شده است و بخش‌هایی از صفحه فوقانی پانل ساندویچی که در تماس با صفحه بالایی فیکسچر قرار می‌گیرد، در جهت عمود بر صفحه پانل، مقید شده است. شکل 12، جزئیات شرایط مرزی اعمال شده در نرم‌افزار المان محدود را نشان می‌دهد.

3-2-8 - مش‌بندی

مش‌بندی سازه از نظر رسیدن به پاسخ‌های صحیح، حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق، به منظور مش‌بندی پانل ساندویچی، از المان‌های سه بعدی

¹ Hexagonal
² Sweep
³ Structured

3-2-9- مطالعه همگرایی مش

تعداد و اندازه مناسب المان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و در استخراج نتایج صحیح، تأثیر به سزایی دارد. لذا رسیدن به تعداد و نوع المان‌های مناسب باید در فرآیند مش‌بندی، مورد توجه قرار گیرد. نوع المان‌ها بر اساس مطالعات گذشته و راهنمای نرم‌افزار انتخاب شده، اندازه المان‌ها با استفاده از مطالعه همگرایی مش به دست آمده است. در نمودار شکل 15، با افزایش تعداد المان‌ها، حداکثر نیروی تماس حاصل از ضربه، مورد مطالعه قرار گرفته است. حداقل تعداد المان برای دستیابی به دقت کافی برای هندسه پانل مورد نظر، با توجه به شکل 15، تعداد حدود 4000 تعیین شده است. چون از این تعداد المان به بعد، شیب نمودار، به حالت افقی تغییر یافته است.

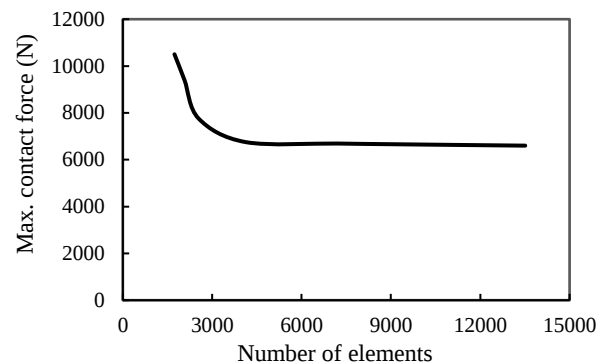


Fig. 15 Study of mesh convergence

شکل 15 مطالعه همگرایی مش

آسیب خورده در مدل عددی، با نتیجه تست تجربی مقایسه شده و انطباق مناسبی مشاهده شده است.

شکل 18، نمودار انرژی جنبشی ضربه‌زننده حین برخورد آن با پانل ساندویچی را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص است، انرژی جنبشی از 34.24 ژول که معادل با ارتفاع رها شدن ضربه‌زننده می‌باشد، تا مقدار صفر، در لحظه‌ای که بیشترین نفوذ در پانل ساندویچی رخ می‌دهد، کاهش می‌یابد و سپس انرژی جنبشی ضربه‌زننده تا 27.27 ژول افزایش می‌یابد. در حین برخورد ضربه‌زننده با پانل ساندویچی، بخشی از این انرژی اولیه، با آسیب زدن به سطح تماس پانل و انتشار امواج الاستیک در آن ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در پانل ساندویچی در این برخورد، بر اساس نتایج عددی، 6.97 ژول می‌باشد که حدود 20% از انرژی اولیه ضربه‌زننده می‌باشد.

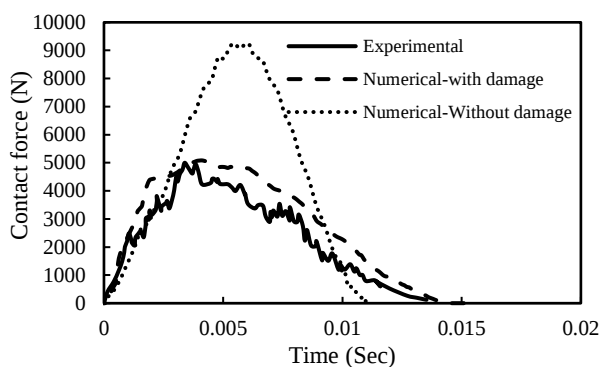


Fig. 16 Experimental and numerical histories of impact force on the sandwich panel at the middle point between the ribs distance

شکل 16 نمودار تجربی و عددی تاریخچه نیروی ضربه بر روی پانل ساندویچی در نقطه وسط فاصله بین ریب‌ها

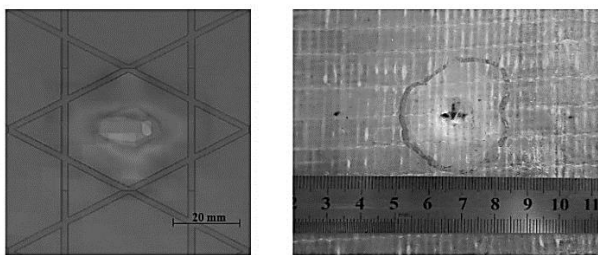


Fig. 17 Comparison of impact damaged area between the numerical and experimental models (impact point at the middle distance between the ribs)

شکل 17 مقایسه ناحیه متأثر از آسیب ضربه بین مدل‌های عددی و تجربی (محل اعمال ضربه در نقطه وسط فاصله بین ریب‌ها)

در شکل 19، نمودار نیروی تماس ضربه برای پانل ساندویچی در حالت بدون فوم و برای اعمال ضربه در فضای بین سلول نشان داده شده است. در این نمودار، نتایج حل عددی برای سرعت‌های مختلف ضربه‌زننده و برای سطح انرژی مشخص، استخراج شده و با یکدیگر مقایسه شده است. در این مطالعه، جرم ضربه‌زننده 11.6 kg در نظر گرفته شده و ضربه با سرعت‌های مختلف و در نتیجه، سطوح انرژی مختلف به پانل ساندویچی اعمال شده است. همان طور که از شکل 19 مشخص است، با افزایش سرعت برخورد ضربه‌زننده با

4- نتایج و بحث

در نهایت پس از طی تمام مراحل مدل‌سازی، اختصاص خواص مواد، شرایط مرزی و بارگذاری و همچنین مش‌بندی، تحلیل‌های مورد نیاز بر روی دو پانل ساندویچی ساخته شده، انجام شده و نتایج حل عددی حاضر با نتایج تست‌های تجربی حاضر مقایسه شده‌اند که در ادامه، به بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده، پرداخته شده است.

1-4- ضربه به پانل روی محل دور از ریب (فضای بین ریب‌ها در هسته)

شکل 16، نمودار نیروی تماس بین ضربه‌زننده و صفحه فوقانی پانل ساندویچی را بر حسب زمان نمایش می‌دهد. محل اعمال ضربه، نقطه‌ای است که زیر آن، ریب تقویتی در ناحیه نزدیک وجود ندارد. در این نمودار، نتایج تست تجربی با حل عددی مقایسه شده است.

در بررسی پاسخ ضربه، دو پارامتر زمان برخورد و حداکثر نیروی تماس ناشی از ضربه، حائز اهمیت می‌باشند. همانطور که در شکل 16 مشاهده می‌شود، بین زمان برخورد و حداکثر نیروی تماس در مدل عددی، با نتیجه تست تجربی مطابقت خوبی وجود دارد. تفاوت کم بین نتایج می‌تواند بر اثر عواملی چون اختلاف هندسی مدل تجربی و عددی، اختلاف جزئی در خواص مواد ساخته شده و یا نواقص موجود در ساخت مدل تجربی به وجود آمده باشد. همچنین، در شکل 16 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه، بدون در نظر گرفتن اثر آسیب پیش‌رونده با حالت واقعی در نظر گرفتن این آسیب، نشان دهنده اهمیت مدل‌سازی اثر آسیب است. شکل 17 محل ضربه در فضای بین سلول پانل ساندویچی را پس از برخورد نمایش می‌دهد. در این شکل، سطح

تست، در شکل 21، نمودار مقایسه تاریخچه نیروی تماس بین مدل عددی و تجربی نشان داده شده است. در این تست نیز مشاهده می‌شود که صلبیت موضعی بیشتر در نقطه تقاطع ریب‌ها در راستای ضخامت پانل، نسبت به صلبیت موضعی در فضای بین ریب‌ها، موجب کاهش زمان تماس و افزایش نیروی تماس شده است.

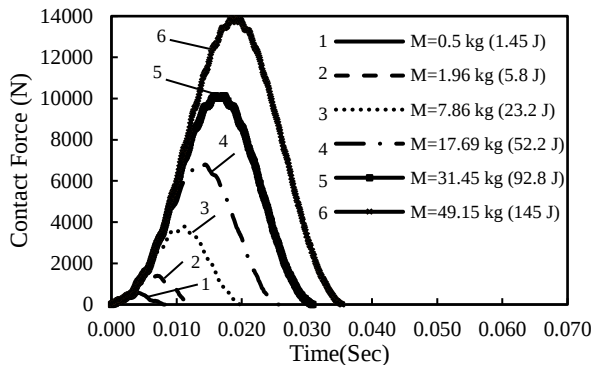


Fig. 20 Numerical impact solution on the sandwich panel for various masses of the impactor

شکل 20 نمودار حل عددی ضربه در پانل ساندویچی برای جرم‌های مختلف ضربه زننده

شکل 22، سطح آسیب را در محل برخورد ضربه‌زننده نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در این تست، سطح آسیب و میزان فرورفتگی، نسبت به تست قبل، به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در واقع، صلبیت حاصل از حضور ریب در محل برخورد، کمتر به ضربه‌زننده اجازه نفوذ در سازه را داده است و سازه دچار فرورفتگی و آسیب کمتری شده است.

شکل 23، نمودار انرژی جنبشی ضربه‌زننده حین برخورد در این نقطه با پانل ساندویچی را نشان می‌دهد. مطابق نمودار، انرژی جنبشی از 34.24 ژول در لحظه شروع برخورد به 28.17 ژول در انتهای زمان برخورد کاهش یافته است. لذا مقدار انرژی ذخیره شده در پانل ساندویچی در این برخورد، بر اساس نتایج عددی 6.07 ژول می‌باشد که حدود 17.5% انرژی اولیه ضربه‌زننده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این پانل نیز با توجه به آسیب کمتر بوجود آمده، انرژی کمتری جذب سازه شده است.

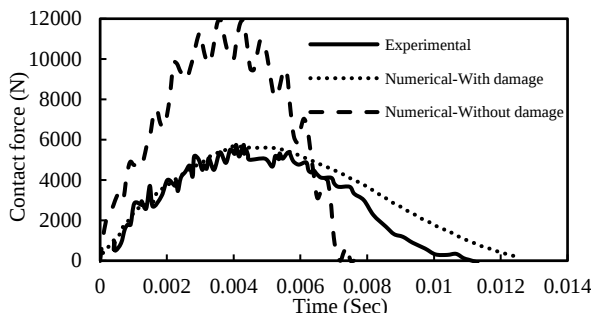


Fig. 21 Experimental and numerical histories of impact force on the sandwich panel at the intersection point of the ribs in the core

شکل 21 نمودار تجربی و عددی تاریخچه نیروی ضربه بر روی پانل ساندویچی در نقطه تقاطع ریب‌ها در هسته

پانل ساندویچی، مدت زمان تماس بین ضربه‌زننده و پانل ساندویچی کاهش می‌یابد و بالعکس، حداکثر نیروی تماس افزایش می‌یابد.

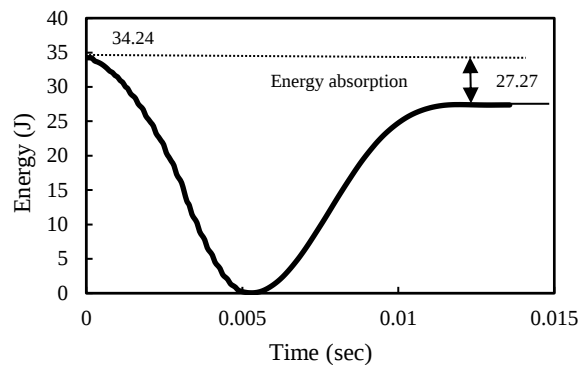


Fig. 18 Kinetic energy of the impactor vs. time of impact force on the sandwich panel at the middle point of the bay between the ribs

شکل 18 نمودار انرژی جنبشی ضربه‌زننده بر حسب زمان به ازای ضربه روی پانل ساندویچی در نقطه وسط حدفاصل بین ریب‌ها

در شکل 20، نمودار نیروی تماس ضربه برای پانل ساندویچی به ازای جرم‌های مختلف ضربه‌زننده نشان داده شده است. در این مطالعه، سرعت ضربه‌زننده ثابت و برابر با 2.43 m/s در نظر گرفته شده است و اعمال ضربه بر روی پانل، با تغییر در جرم ضربه‌زننده و در همان سطوح انرژی مورد بررسی در شکل 19 انجام شده است. مطابق شکل 20، با افزایش جرم ضربه‌زننده، مدت زمان تماس بین ضربه‌زننده و پانل ساندویچی و همچنین حداکثر نیروی تماس افزایش پیدا کرده‌اند. اگر نتایج شکل 19 و شکل 20 را با یکدیگر مقایسه کنیم، خواهیم دید که برای سطوح انرژی برخورد یکسان، حداکثر نیروی تماس، تقریباً برابر است ولی مدت زمان تماس، بین دو حالت سرعت متغیر و جرم متغیر، متفاوت است.

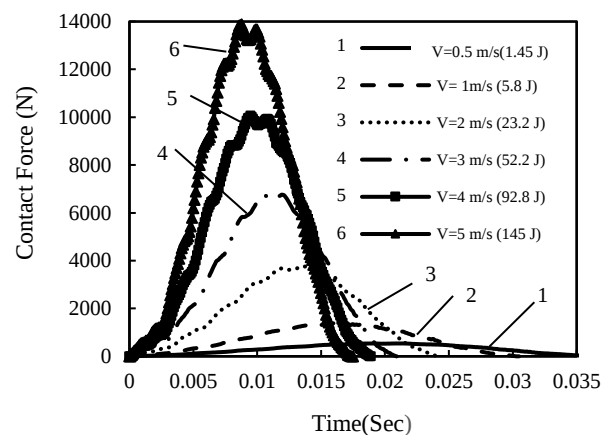


Fig. 19 Numerical impact solution on the sandwich panel for various velocities of the impactor

شکل 19 نمودار حل عددی ضربه در پانل ساندویچی برای سرعت‌های مختلف ضربه زننده

4-2- ضربه به پانل روی محل تقاطع ریب‌های هسته

در این تست، محل اعمال ضربه در پانل ساندویچی نسبت به تست اول تغییر نموده، به جای فضای بین ریب‌ها در سلول واحد، ضربه روی محل تقاطع دو ریب مایل هسته و نزدیک به مرکز پانل ساندویچی اعمال شده است. برای این

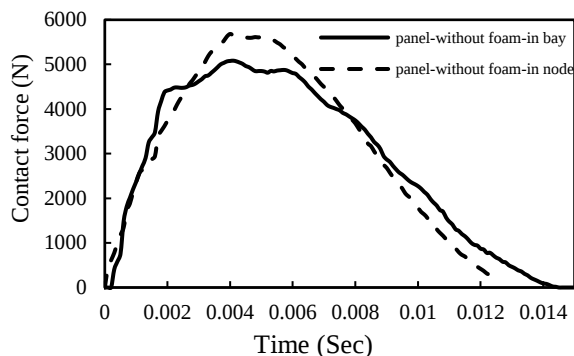


Fig. 25 Comparison of the impact force history for impacts on two locations (at the middle point of the bay between the ribs and at the intersection point of the ribs in the core) using numerical method
 شکل 25 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه برای ضربه روی دو نقطه (نقطه حدواسط بین دو ریب مجاور و نقطه تقاطع دو ریب در هسته) به روش عددی

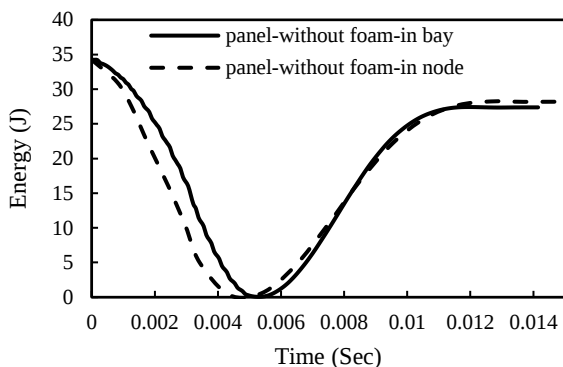


Fig. 26 Comparison of the history of kinetic energy of the impactor for impacts on two locations (at the middle point of the bay between the ribs and at the intersection point of the ribs in the core) using numerical method

شکل 26 مقایسه تاریخچه انرژی جنبشی ضربه‌زنده برای ضربه روی دو نقطه (نقطه حدواسط بین دو ریب مجاور و نقطه تقاطع دو ریب در هسته) به روش عددی

همان‌طور که در شکل‌های 24 تا 26 مشاهده می‌شود، برخورد در نقطه تقاطع ریب‌ها در مقایسه با برخورد در فضای بین دو ریب مجاور در هسته پانل ساندویچی، حداکثر نیروی تماس بیشتری ایجاد می‌کند و زمان تماس را کاهش می‌دهد. در مورد جذب انرژی، مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی بین جذب انرژی در این دو برخورد وجود ندارد. در نقطه تقاطع ریب‌ها، هرچند در صفحه فوقانی پانل آسیب کمتری مشاهده می‌شود، اما بخشی از ریب درون هسته، دچار آسیب شده و در مکانیزم جذب انرژی ضربه‌زنده، مشارکت داشته است. در واقع، صلبیت موضعی در راستای ضخامت، در محل برخورد ضربه‌زنده، موجب کاهش سطح آسیب قابل مشاهده و افزایش عمق آسیب شده است. به طور کلی جذب انرژی، وابسته به میزان آسیب وارده به صفحه فوقانی و ریب‌های درون هسته است.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پاسخ ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی با هسته مشبک، به روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. هسته‌ی مشبک و صفحات فوقانی و تحتانی پانل، از جنس شیشه/اپوکسی هستند.

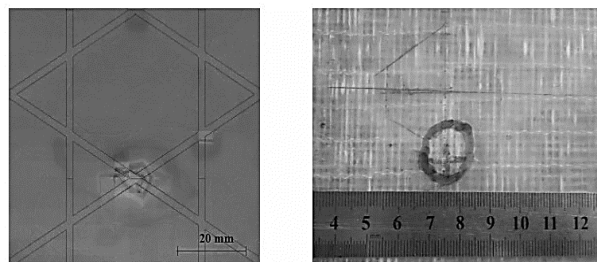


Fig. 22 Comparison of impact damaged area between the numerical and experimental models (impact point at the intersection of the ribs)

شکل 22 مقایسه ناحیه متأثر از آسیب ضربه بین مدل‌های عددی و تجربی (محل اعمال ضربه در نقطه تقاطع ریب‌ها)

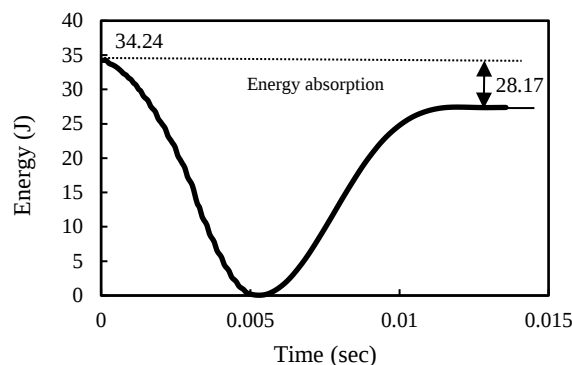


Fig. 23 Variation of the internal and kinetic energy for impact point at the intersection of the ribs in the core

شکل 23 نمودار انرژی درونی و جنبشی برای ضربه در نقطه تقاطع ریب‌های پانل ساندویچی

در ادامه، نتایج دو پانل ساندویچی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل‌های 24 تا 26، به ترتیب، نمودار پاسخ ضربه حاصل از روش تجربی و نمودارهای پاسخ ضربه و انرژی جنبشی حاصل از حل عددی برای این دو پانل ساندویچی مقایسه شده‌اند.

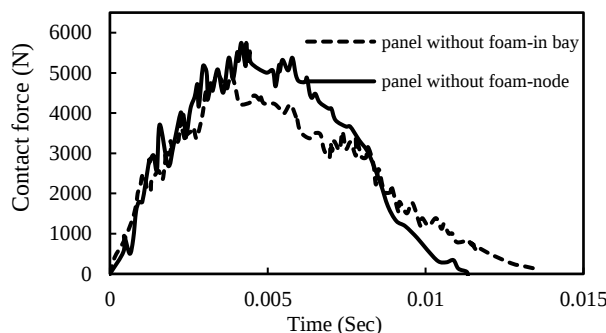


Fig. 24 Comparison of the impact force history for impacts on two locations (at the middle point of the bay between the ribs and at the intersection point of the ribs in the core) using experimental method

شکل 24 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه برای ضربه روی دو نقطه (نقطه حدواسط بین دو ریب مجاور و نقطه تقاطع دو ریب در هسته) به روش تجربی

- [15] Ghaderi, A. M., Ghasemi, A. and Yarmohammadi-Toski, M., "An experimental investigation of quasi-static indentation on a composite sandwich panel made of basalt fiber using nanographene", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 109-118, 2019.
- [16] Hedayatian, M., Liaghat, Gh., Rahimi, Gh., Pol, M. H., "Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity impact", (In Persian) Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014
- [17] Malekzadeh-Fard, K. Azarnia, A. H. and Zolghadr, N., "Analytical modeling to predict dynamic response of Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 331-342, 2018.
- [18] Lopes, C., Camanho, P., Gürdal, Z., Maimí, P. and González, E., "Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations," Composites Science and Technology, Vol. 69, pp. 937-947, 2009.
- [19] Hashin, Z., "Failure criteria for unidirectional fiber composites," Journal of applied mechanics, Vol. 47, pp. 329-334, 1980.
- [20] Tarfaoui, M., Gning, P. B. and Hamitouche, L., "Dynamic response and damage modeling of glass/epoxy tubular structures: Numerical investigation," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 39, pp. 1-12, 2008.
- [21] Buragohain, M. and Velmurugan, R., "Study of filament wound grid-stiffened composite cylindrical structures," Composite Structures, Vol. 93, pp. 1031-1038, 2011.
- [22] Chang, F. K. and Lessard, L. B., "Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to compressive loadings. I: Analysis," Journal of Composite Materials, Vol. 25, pp. 2-43, 1991.
- [23] Camanho, P. and Matthews, F., "A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates," Journal of Composite Materials, Vol. 33, pp. 2248-2280, 1999.
- [24] Blackketter, D., Walrath, D. and Hansen, A., "Modeling damage in a plain weave fabric-reinforced composite material," Journal of composites technology & research, Vol. 15, pp. 136-142, 1993.
- [25] Tserpes, K. and Labeas, G., "Mesomechanical analysis of non-crimp fabric composite structural parts," Composite Structures, Vol. 87, pp. 358-369, 2009.

آسیب پیش‌رونده ناشی از ضربه، با در نظر گرفتن پارامترهای آسیب سه بعدی برای جنس ماده، مورد تحلیل قرار گرفته است. در نظر گرفتن آسیب پیش‌رونده برای مواد کامپوزیتی، باعث کاهش گام به گام سفتی آن‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای می‌شود. این کاهش سفتی، موجب افزایش مدت زمان تماس ضربه‌زننده با سازه کامپوزیتی و کاهش حداکثر نیروی تماس می‌شود. کاهش سفتی ناشی از آسیب پیش‌رونده، به ازای ضربه در نقاط مختلف سازه، تأثیری متفاوت داشته است. به عنوان مثال، مشاهده شده است که در ضربه روی نقاطی مانند محل تقاطع ریب‌ها که نسبت به فضای بین ریب‌ها، از سفتی بیشتری برخوردارند، مدت زمان تماس ضربه کاهش و حداکثر نیروی تماس، افزایش دارد. همچنین مشاهده شده است که مقدار جذب انرژی ضربه، وابسته به میزان آسیب وارده به صفحه فوقانی پانل و ریب‌های درون هسته است و صلبیت محل برخورد ضربه‌زننده، موجب کاهش سطح آسیب قابل مشاهده در سازه می‌شود.

6- مراجع

- [1] Marguerre, K., "The optimum buckling load of a flexibly supported plate composed of two sheets joined by a light weight filler when under longitudinal compression," Deutsche Vierteljahrsschrift für Literaturwissenschaft und Geistes Geschichte. DVL (ZWB UM1360/2), 1944.
- [2] Allen, H. G., "Analysis and design of structural sandwich panels Vol. 51: Pergamon press Oxford, 1969.
- [3] D. Feng, D. and Aymerich, F., "Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates," Composite Structures, Vol. 108, pp. 161-171, 2014.
- [4] H. Saito, H. and Kimpara, I., "Evaluation of impact damage mechanism of multi-axial stitched CFRP laminate," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 37, pp. 2226-2235, 2006.
- [5] Byun, J. H., Song, S. W., Lee, C. H., Um, M. K. and Hwang, B. S., "Impact properties of laminated composites with stitching fibers," Composite structures, Vol. 76, pp. 21-27, 2006.
- [6] Ibeke, S. I., Mensah, P. F., Li, G., Pang, S. S. and Stubblefield, M. A., "Impact and post impact response of laminated beams at low temperatures," Composite structures, Vol. 79, pp. 12-17, 2007.
- [7] Yang, L., Yan, y. and Kuang, N., "Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact," Polymer Testing, Vol. 32, pp. 1163-1173, 2013.
- [8] Li, G. and Jones, N., "Development of rubberized syntactic foam," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 6, pp. 1483-1492, 2007.
- [9] Li, G. and John, M., "A crumb rubber modified syntactic foam," Materials Science and Engineering: A, Vol. 474, pp. 390-399, 2008.
- [10] Chen, H. J. and Tsai, S. W., "Analysis and optimum design of composite grid structures," Journal of composite materials, Vol. 30, pp. 503-534, 1996.
- [11] Castanié, B., Bouvet, C., Aminanda, Y., Barrau, J. J. and Thévenet, P., "Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins," International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, pp. 620-634, 2008.
- [12] Jadhav, P. and Mantena, P. R., "Parametric optimization of grid-stiffened composite panels for maximizing their performance under transverse loading," Composite structures, Vol. 77, pp. 353-363, 2007.
- [13] Muthyala, V. D., "Composite sandwich structure with grid stiffened core," Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College In partial fulfillment of the requirements for the degree of MSc in Mechanical Engineering in The Department of Mechanical Engineering By Venkata Dinesh Muthyala BE, Osmania University, 2007.
- [14] Azarafza, R., Davar, A., and Mahmoodi, A., "Three-point bending test of metal and composite sandwich panels with grid stiffened core", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017.



تحلیل قابلیت اطمینان بر اساس روش بسط چند جمله‌ای آشوب در سازه‌های کامپوزیتی

محمد نوریان¹، محمد راوندی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 19395-1999، ravandi@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 98/02/19	در دهه های اخیر، نظر به اهمیت کاهش هزینه ها، افزایش بهره وری و بقا در رقابت فزاینده صنایع مختلف، و همچنین به دلیل وجود منابع
پذیرش: 98/12/14	عدم قطعیت متعدد، توجه به تحلیل قابلیت اطمینان در رشته های مختلف رشد چشمگیری داشته است. با توجه به مزیت های فراوان
کلیدواژگان:	استفاده از سازه های کامپوزیتی در صنایع مختلف و رشد روزافزون بکارگیری آن، توجه به مسئله قابلیت اطمینان در سازه های کامپوزیتی از
نانو کامپوزیت	اهمیت بسزایی برخوردار می باشد. برای تحلیل قابلیت اطمینان سازه ها، روش های مختلفی از جمله روش شبیه سازی مستقیم مونت کارلو
نانو گرافن	ارائه شده است که به دلیل هزینه محاسباتی بسیار بالا، استفاده از آن فقط برای مسائل ساده امکان پذیر می باشد. در مقاله حاضر، برای
نانو لوله کربنی	تحلیل قابلیت اطمینان یک سازه ی کامپوزیتی با وجود منابع عدم قطعیت گسترده در پارامترهای ورودی مانند خواص مکانیکی، خواص
شارپی	هندسی، استحکام و بارگذاری، روش توسعه یافته ای مبنی بر روش بسط چند جمله ای های آشوب ارائه شده است که نسبت به روش های
میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل	قدیمی از جمله مونت کارلو، از هزینه محاسباتی بسیار پائینی برخوردار بوده و دارای دقت بالایی می باشد. در نهایت با انجام یک مثال
میدانی	عددی در دو مرحله با افزایش پارامترهای ورودی غیر قطعی کارایی این روش در تحلیل مسائل با منابع عدم قطعیت گسترده از لحاظ تعداد
	پارامترها نشان داده شده و با بررسی نتایج حاصله با روش مونت کارلو، مزیت این روش از نظر دقت و سرعت محاسباتی مورد ارزیابی قرار
	گرفته است.

Reliability analysis based on polynomial chaos expansion method in composite structures

Mohammad Noorian, Mohammad Ravandi*

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, ravandi@kntu.ac.ir

Keywords

Composite structures
Reliability analysis
Polynomial chaos expansion
Sparse grid collocation
Uncertainty analysis

Abstract

Reliability analysis of composite structures has gained increased attention due to the growing use of composite materials in many industries such as aerospace, automotive and construction in recent decades. Uncertainty analysis approaches are effective tools in order to probabilistically assess the behavior and evaluate the reliability of composite structures with variabilities in material properties. In this study, a computationally efficient surrogate model based on the polynomial chaos expansion for reliability analysis of composite structures with a large number of uncertain parameters is presented. The uncertain input parameters including composite material properties, geometry and loads, are assumed as random variables with a normal distribution and are taken into account for reliability evaluation. A sparse grid collocation strategy is used to determine the sample points for constructing the surrogate model relating the uncertain variables to the structural response. In the end, a numerical example is performed to demonstrate the accuracy and efficiency of this methodology for a higher number of uncertain variables by comparing the results with the direct Monte Carlo simulation method.

1-مقدمه

و پراکندگی هایی ایجاد می گردد. کامپوزیتها امروز به دلیل مزیت های متعدد نسبت به مواد سنتی [1]، در صنایع مختلف مانند صنایع هوایی، دریایی، اتومبیل و غیره، به فراوانی مورد استفاده قرار می گیرند. ترکیب ناهمگن مواد کامپوزیتی و تغییر پذیری ذاتی در خواص مواد تشکیل دهنده و پارامترهای هندسی و همچنین عیوب ناخواسته ایجاد شده در فرایند ساخت، همواره عدم قطعیت هایی در خواص نهایی سازه کامپوزیتی ایجاد می کند که در کاربردهای

امروزه نظریه قابلیت اطمینان سازه ای، تحقیقات بسیاری را به خود اختصاص داده است. در حقیقت توصیف واقعی رفتار سیستم های سازه ای به طور اجتناب ناپذیری به عدم قطعیت های موجود در مسائل بستگی دارد. این عدم قطعیت ها می تواند به صورت تغییرات و پراکندگی ها در پارامترهای هندسی، خواص مواد، بارگذاری خارجی و.. ظاهر گردد که در نتیجه آن، در رفتار سیستم نیز تغییرات

Please cite this article using:

Nooria. M, and Ravandi, M., "Reliability analysis based on polynomial chaos expansion method in composite structures ", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 627-636, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

ارائه دادند که در آن از سه نوع عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی برای تعیین عدم قطعیت رفتار صفحات کامپوزیتی استفاده شده است. در سال 2015 ساسیکومار و همکاران [8]، برای تحلیل عدم قطعیت و تخمین احتمال شکست صفحات کامپوزیتی یک روش المان محدود آماری بر اساس چند جمله‌ای آشوب، ارائه دادند. اساس این روش، مدلسازی ناهمگونی‌ها در خواص مکانیکی با یک توزیع غیر گوسین در فضای دو بعدی و نمایش آن‌ها با چند جمله‌ای آشوب می‌باشد. در سال 2018 بالکاس و همکاران [9]، به بررسی عدم قطعیت خواص کامپوزیت‌های سه بعدی پرداختند که به دلیل پیچیدگی این کامپوزیت‌ها و همچنین کاهش محاسبات از روش شبکه عصبی برای ساخت مدل جایگزین استفاده نمودند. همچنین در سال 2018 ناسکار [10] یک رویه احتمالی برای تعیین پارامترهای پایداری و دینامیکی صفحات کامپوزیتی حاوی تغییر پذیری خواص ماکرو و میکرو مکانیکی سیستم ارائه دادند که در آن برای تعیین عدم قطعیت خواص، از مدل جایگزین و روش نمایش مدل ابعاد بالا² استفاده شده است. قاسمی [11] در سال 2014 بازده محاسباتی را با ساخت یک مدل جایگزین با روش کریگینگ³ چند مقیاسی آماری برای ساختار کامپوزیت پلیمری بهبود بخشید.

در تمام پژوهش‌های انجام شده تحلیل عدم قطعیت با استفاده از مدل‌های جایگزین با تعداد محدودی از پارامترهای دارای عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین افزایش پارامترها و ورودی‌های مسئله باعث پیچیدگی محاسبات و کاهش دقت محاسباتی خواهد شد. ازاینرو در این پژوهش، با بهره‌گیری از یک روش توسعه یافته مبتنی بر چند جمله‌ای آشوب، آنالیز قابلیت اطمینان سازه‌های کامپوزیتی با در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت با گستردگی بالا شامل عدم قطعیت در تمام خواص مکانیکی و هندسی انجام گرفته است که از دقت و سرعت محاسباتی بالایی برخوردار می‌باشد. سرانجام جهت نمایش اعتبار سنجی روش فوق، نتایج حاصله با نتایج شبیه سازی مستقیم مونت کارلو مورد بررسی و قیاس قرار گرفته است.

2- قابلیت اطمینان در سازه‌های کامپوزیتی

در طراحی سازه‌های کامپوزیتی، اعمال عدم قطعیت موجود در خواص اجزا تشکیل دهنده، عیوب ناشی از ساخت، بارگذاری، و هندسه به دلیل تغییر پذیری بالای آنها، از اهمیت بالایی برخوردار است. ازاینرو در تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌های کامپوزیتی عموماً پارامترهای استحکام، خواص مکانیکی الیاف، جهت گیری الیاف و ... به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و با مدلسازی تابع عملکرد، قابلیت اطمینان سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادله تابع عملکرد در حالت کلی به صورت اختلاف پارامترهای استحکام و بارگذاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g = g(x_1, x_2, \dots, x_m) = STRENGTH - LOAD \quad (1)$$

که در آن $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ نشان دهنده m متغیر تصادفی ورودی و g نشان دهنده رابطه بین m متغیر تصادفی و شکست سازه است. براساس رابطه (1)، مقادیر منفی g نشان دهنده شکست سازه و مقادیر مثبت آن نشان دهنده

مهندسی و برآورد این عدم قطعیت بر روی قابلیت اطمینان سازه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. برآورد و تحلیل عدم قطعیت خواص نهایی و رفتار مکانیکی مواد و سازه‌های کامپوزیتی در طول چند دهه اخیر با استفاده از روش‌های شبیه سازی مستقیم صورت گرفته است. اما با وجود پیشرفت ظرفیت و سرعت کامپیوترها، به دلیل پیچیدگی محاسبات و شبیه سازی‌ها، استفاده از این روش‌های سنتی برای تحلیل عدم قطعیت گاه‌ها غیر ممکن می‌باشد. برای مثال تحلیل عدم قطعیت بر اساس روش مونت کارلو برای دستیابی به یک پاسخ مطلوب نیازمند هزاران بار تکرار می‌باشد که بسته به پیچیدگی مسئله، می‌تواند بسیار زمانبر و گاه‌ها غیر قابل دست یابی باشد. در حالت کلی این روش‌های پیچیده و سنتی می‌تواند به عنوان یک سیستم ورودی/خروجی در نظر گرفته شود که در آن کمیت خروجی متناظر با مجموعه‌ای از پارامترهای ورودی ارزیابی می‌شود. ازاینرو تحلیل عدم قطعیت بر اساس روش‌های سنتی چون مونت کارلو دارای هزینه محاسباتی بالایی می‌باشد [2].

در تحلیل‌هایی که نیاز به تکرار بالا می‌باشد می‌توان از مدل‌های جایگزین برای تجزیه و تحلیل استفاده نمود که در آن پاسخ مطلوب تنها برای مجموعه محدودی از پارامترهای ورودی، ارزیابی می‌شود و در نهایت یک مدل ریاضی معادل، که از سیستم ورودی/خروجی تبعیت می‌کند، ساخته می‌شود [2]. در حالت کلی این مدل‌های جایگزین نشان دهنده نتایج حاصل از تحلیل سازه‌ای است، که در برگیرنده‌ی همه ترکیبات ممکن از پارامترهای ورودی و همچنین یک رابط بین ورودی و خروجی می‌باشد [3]. امروزه تحلیل عدم قطعیت بر اساس مدل‌های جایگزین برای ارزیابی پاسخ سازه‌ای کامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. برای تشکیل مدل‌های جایگزین روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به بسط چند جمله‌ای آشوب اشاره کرد. بسط چند جمله‌ای آشوب برای اولین بار توسط وینر معرفی شد که در آن از چند جمله‌ای‌های متعامد هرمیتی برای مدل سازی فرایند آماری با متغیر-های تصادفی گوسین استفاده شده بود [4]. بسط چند جمله‌ای آشوب یک ابزار مفید برای شبیه سازی سیستم‌های آماری بوده و اساس کار آن لقاء پارامترهای تصادفی بر روی فضای آماری ایجاد شده با چند جمله‌ای‌های متعامد می‌باشد [2]. در ادامه مروری اجمالی بر کارهای پیشین محققان در مورد تحلیل عدم قطعیت مواد کامپوزیتی آورده شده است.

در سال 2018 چن و همکاران [5]، تحلیل عدم قطعیت بر مبنای چند جمله‌ای‌های آشوب را برای سازه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار دادند که در آن از ترکیب عدم قطعیت‌ها شامل متغیرهای تصادفی نرمال و بازه‌ای استفاده نمودند. آن‌ها در این پژوهش تنها عدم قطعیت موجود در ثوابت الاستیک را در نظر گرفتند. همچنین در سال 2019 تاپا و همکاران [6]، یک قالب مدلسازی چند مقیاسی آماری برای تعیین عدم قطعیت کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن با یک روش غیر نفوذی¹، که به اصطلاح تجزیه چند جمله‌ای آشوب با مشتق‌گیری نامیده شده، ارائه دادند. آن‌ها برای کاهش محاسبات، تحلیل عدم قطعیت صفحات کامپوزیتی را در دو مرحله بررسی نمودند. در مرحله اول با مدلسازی آماری با مقیاس میکرو، خواص مکانیکی یک لایه تحت تاثیر عدم قطعیت اجزاء تشکیل دهنده لایه و در مرحله دوم عدم قطعیت موجود در خواص هندسی چندلایه‌ای‌ها، جهت تعیین عملکرد تصادفی چندلایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در سال 2019 پنگ و همکاران [7]، روش بسط چند جمله‌ای آشوب مبتنی بر داده را برای تحلیل عدم قطعیت صفحات کامپوزیتی

³ Kriging method

¹ Non-intrusive

² High-dimensional model representation (HDMR)

که $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_m)^T$ و $i_1, i_2, \dots, i_p \in \{1, 2, \dots, m\}$ بردار متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال استاندارد می باشد. متغیرهای استاندارد ρ با استفاده از رابطه تبدیل توزیع نرمال استاندارد، به صورت زیر بدست می آیند:

$$\rho_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{f \sigma_{x_i}} \quad (7)$$

که در آن μ_{x_i} و σ_{x_i} پارامترهای توزیع نرمال می باشد و ضریب f براساس بازه اطمینان مورد نظر تعیین می شود. ضرایب چند جمله‌ای رابطه (5) با استفاده از نقاط نمونه برای پارامترهای تصادفی در نظر گرفته شده در کامپوزیت ها، محاسبه می شوند. این نقاط نمونه به صورت $(\rho_1^i, \rho_2^i, \dots, \rho_m^i), i \in \{1, 2, \dots, N\}$ نمایش داده می شود که در آن N تعداد نقاط نمونه بوده و بالا نویس i نشان دهنده N امین نمونه می باشد که مقادیر آن ها با استفاده از روش - های نمونه گیری محاسبه می شود [16]. رابطه (5) را می توان به فرم ماتریسی زیر بیان کرد:

$$HC = g \quad (8)$$

که در آن H ماتریس هرمیتی، g بردار پاسخ سازه ای و C ماتریس ضرایب چند جمله‌ای، را می توان به صورت زیر تعیین کرد [5]:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & H_1(\rho_1^1) & \dots & H_2(\rho_{i_1}^1, \rho_{i_2}^1) & \dots & H_p(\rho_{i_1}^1, \dots, \rho_{i_p}^1) & \dots \\ 1 & H_1(\rho_1^2) & \dots & H_2(\rho_{i_1}^2, \rho_{i_2}^2) & \dots & H_p(\rho_{i_1}^2, \dots, \rho_{i_p}^2) & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\ 1 & H_1(\rho_1^N) & \dots & H_2(\rho_{i_1}^N, \rho_{i_2}^N) & \dots & H_p(\rho_{i_1}^N, \dots, \rho_{i_p}^N) & \dots \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$g = (g_1, g_2, \dots, g_N)^T \quad (10)$$

$$C = (H^T H)^{-1} H^T g \quad (11)$$

با توجه به روابط (9) - (11)، رابطه (5) را می توان به فرم سری زیر بازنویسی کرد:

$$g = g(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m) = \sum_{j=0}^{M-1} C_j Q_j(\rho) \quad (12)$$

که Q_j چند جمله‌ای های هرمیتی، C_j ضرایب متناظر چند جمله‌ای و M تعداد ضرایب چند جمله‌ای می باشد. تعداد ضرایب چند جمله‌ای از ترکیب زیر قابل محاسبه می باشد:

$$M = \binom{m+p}{p} \quad (13)$$

برای مثال چند جمله‌ای هرمیتی دو بعدی از مرتبه p می تواند به صورت زیر بیان شود [17]:

$$g = g(\rho_1, \rho_2) = C_0 H_0 + C_1 H_1(\rho_1) + C_2 H_1(\rho_2) + C_3 H_2(\rho_1, \rho_1) + C_4 H_2(\rho_2, \rho_1) + C_5 H_2(\rho_2, \rho_2) + \dots \quad (14)$$

ایمن بودن سازه می باشد. احتمال شکست سازه با انتگرال گیری بر روی ناحیه $g \leq 0$ قابل محاسبه خواهد بود [12].

$$p_f = \int \int \dots \int f_x(x_1, \dots, x_m) dx_1 \dots dx_m \quad (2)$$

که در آن f_x تابع پیوسته چگالی احتمال شکست می باشد. با استفاده از رابطه (2) قابلیت اطمینان سازه به صورت زیر بدست می آید:

$$P_s = 1 - P_f \quad (3)$$

در سیستم های پیچیده محاسبه رابطه (2) به دلیل افزایش متغیرها و پیچیدگی مسئله بسیار دشوار و گاهی غیرممکن می باشد. در چنین شرایطی، می توان احتمال شکست سازه را توسط تعداد متناهی از ورودی های تصادفی به فرم ناپیوسته زیر برآورد کرد:

$$p_f = P[g \leq 0] = \frac{N_f}{N} \quad (4)$$

که در آن N تعداد کل سیکل های شبیه سازی و N_f تعداد سیکل های شبیه سازی با $g \leq 0$ می باشد.

3- بسط چند جمله‌ای آشوب

در روش بسط چند جمله‌ای آشوب، پارامترهای نامشخص به عنوان بسطی از تجزیه ضرایب قطعی و پایه های متعامد تصادفی بیان می شوند [13] با استفاده از روش بسط چند جمله‌ای آشوب، پاسخ سازه ای g را می توان به صورت سری همگرایی از چند جمله‌ای های متعامد به صورت زیر بیان کرد [14]:

$$g = C_0 + \sum_{i_1=1}^m C_{i_1} H_1(\rho_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^m \sum_{i_2=1}^{i_1} C_{i_1 i_2} H_2(\rho_{i_1}, \rho_{i_2}) + \dots \quad (5)$$

که در آن $\{\rho_i\}_{i=1}^{\infty}$ مجموعه ای از متغیرهای مستقل و تصادفی با توزیع نرمال استاندارد، $H_p(\rho_{i_1}, \rho_{i_2}, \dots, \rho_{i_m})$ مجموعه ای از چند جمله‌ای های چند بعدی هرمیتی از متغیرهای تصادفی نرمال p با مرتبه p ، و $C_{i_1 i_2 \dots}$ ضرایب ثابت می باشند. بسط چند جمله‌ای آشوب یک بسط همگرا از لحاظ میانگین مربعات بوده و بسته به درجه آن، p ، همه چند جمله‌ای های متعامد از همان درجه را در قالب چند جمله‌ای هرمیتی شامل می شود. علاوه بر این، خود چند جمله‌ای هرمیتی موجود در بسط آشوب، با درجه های نابرابر، دارای خاصیت تعامد نسبت به هم هستند. این ویژگی جالب سبب می شود که این بسط، علاوه بر توزیع نرمال، قابلیت برآورد انواع توزیع های غیر گوسین را هم دارا باشد [15]. رابطه کلی برای بدست آوردن چند جمله‌ای هرمیتی از مرتبه p برای m متغیر تصادفی نرمالی p ، به صورت زیر بیان می شود:

$$H_p(\rho_{i_1}, \rho_{i_2}, \dots, \rho_{i_p}) = (-1)^p e^{\frac{1}{2} \rho^T \rho} \frac{\partial^p e^{-\frac{1}{2} \rho^T \rho}}{\partial \rho_{i_1} \partial \rho_{i_2} \dots \partial \rho_{i_p}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 A(2,2) &= U_{3 \leq i_1+i_2 \leq 4} (\rho^{i_1} \times \rho^{i_2}) \\
 &= (\rho^1 \times \rho^2) \cup (\rho^1 \times \rho^3) \\
 &\quad \cup (\rho^2 \times \rho^1) \cup (\rho^2 \times \rho^2) \\
 &\quad \cup (\rho^3 \times \rho^1) \\
 A(3,2) &= U_{4 \leq i_1+i_2 \leq 5} (\rho^{i_1} \times \rho^{i_2}) \\
 &= (\rho^1 \times \rho^3) \cup (\rho^1 \times \rho^4) \\
 &\quad \cup (\rho^2 \times \rho^2) \cup (\rho^2 \times \rho^3) \\
 &\quad \cup (\rho^3 \times \rho^1) \cup (\rho^3 \times \rho^2) \\
 &\quad \cup (\rho^4 \times \rho^1) \\
 A(4,2) &= U_{5 \leq i_1+i_2 \leq 6} (\rho^{i_1} \times \rho^{i_2}) \\
 &= (\rho^1 \times \rho^4) \cup (\rho^1 \times \rho^5) \\
 &\quad \cup (\rho^2 \times \rho^3) \cup (\rho^2 \times \rho^4) \\
 &\quad \cup (\rho^3 \times \rho^2) \cup (\rho^3 \times \rho^3) \\
 &\quad \cup (\rho^4 \times \rho^1) \cup (\rho^4 \times \rho^2) \\
 &\quad \cup (\rho^5 \times \rho^1)
 \end{aligned} \quad (19)$$

که در آن مکان نقاط $\rho^1, \rho^2, \rho^3, \rho^4, \rho^5$ با توجه به رابطه (17) به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 \rho^1 &= \{0\} \\
 \rho^2 &= \{-1, 0, 1\} \\
 \rho^3 &= \{-1, -0.7, 0, 0.7, 1\} \\
 \rho^4 &= \{-1, -0.9, -0.7, -0.3, 0, 0.3, 0.7, 0.9, 1\} \\
 \rho^5 &= \{-1, -0.98, -0.92, -0.8, -0.7, -0.5, \dots \\
 &\quad -0.3, -0.1, 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, \dots \\
 &\quad 0.92, 0.98, 1\}
 \end{aligned} \quad (20)$$

با استفاده از روابط (19) و (20) مجموعه نقاط کلینشو در فضای دو بعدی با سطوح ترتیب مختلف به طور واضح در شکل 1 مشهود می‌باشد.

2- در مرحله دوم ضرایب چند جمله‌ای $C_j = 1, 2, \dots, M$ با استفاده از روابط (9) و (10) تعیین می‌گردد. در ابتدا برای محاسبه بردار پاسخ صحیح g, N تحلیل پاسخ سازه‌ای قطعی بر اساس نقاط نمونه انجام شده و سپس با استفاده از رابطه (11) ماتریس ضرایب تعیین می‌گردد. پارامترهای ورودی بر اساس تبدیل توزیع نرمال استاندارد رابطه (7) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x_j^i = \rho_j^i * (f\sigma_{x_j}) + \mu_{x_j} \quad (21)$$

$i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, m$

3- در این مرحله میزان دقت مد نظر باید مورد بررسی قرار گیرد. برای تعیین میزان دقت، پاسخ پیش بینی شده رابطه (12) که با استفاده از ماتریس ضرایب حاصل شده است، باید توسط پاسخ صحیح که بر اساس شبیه سازی مستقیم بدست آمده مورد قیاس قرار گیرد. اگر میزان دقت مورد نظر ارضاء شود به مرحله بعد رفته و در غیر این صورت باید تعداد نقاط نمونه با استفاده از بهبود سطح ترتیب پراکندگی شبکه‌ای افزایش یابد و همه فرایندهای تشریح شده از مرحله اول تکرار شود تا دقت مورد نظر حاصل گردد. برای بررسی دقت مورد نظر، از خطای جذر میانگین مربعات⁵ بصورت زیر استفاده می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i - g_{id})^2} \quad (22)$$

که در آن g_i مقدار پیش بینی شده و g_{id} مقدار واقعی می‌باشد. برای دستیابی به یک دقت مطلوب $RMSE$ باید دارای مقداری کمتر از 0.005 باشد [21].

که در آن ρ_1 و ρ_2 دو پارامتر تصادفی مستقل از هم می‌باشد. با توجه به فرم سری رابطه (12) می‌توان بسط چند جمله‌ای آشوب رابطه (14) را به فرم زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned}
 g &= g(\rho_1, \rho_2) = C_0 + C_1\rho_1 + C_2\rho_2 \\
 &\quad + C_4\rho_1\rho_2 \\
 &\quad + C_3(\rho_1^2 - 1) \\
 &\quad + C_5(\rho_2^2 - 1) + \dots \\
 &= \sum_{j=0}^{M-1} C_j Q_j
 \end{aligned} \quad (15)$$

4- تحلیل قابلیت اطمینان بر اساس روش چند جمله‌ای آشوب برای سازه‌های کامپوزیتی

برای تعیین پاسخ سیستم‌های نامعین می‌توان از بسط چند جمله‌ای آشوب رابطه (12) به عنوان یک مدل جایگزین در فرمول بندی غیر نفوذی¹ استفاده نمود [14]. از اینرو بسط چند جمله‌ای آشوب می‌تواند برای آنالیز قابلیت اطمینان و تقریب پاسخ سازه‌ای کامپوزیت‌ها با وجود متغیرهای تصادفی نرمال مورد استفاده قرار گیرد. در ابتدا نقاط نمونه برای متغیرهای تصادفی نرمال با استفاده از یک روش ترتیب پراکندگی شبکه‌ای² تعیین گردیده و پاسخ دقیق سازه (g) برای این نقاط محاسبه می‌گردد. سپس با جایگذاری این نقاط در چند جمله‌ای‌های متعامد H و استخراج ضرایب چند جمله‌ای با استفاده از رابطه (11)، پاسخ سازه‌ای کامپوزیت‌ها با وجود عدم قطعیت‌ها در متغیرهای ورودی به صورت سطح پاسخ³ مدل شده و میزان خطا برآورد می‌شود. روند تفصیلی این فرایند بشرح زیر است:

1- در مرحله اول نقاط نمونه با استفاده از روش ترتیب پراکندگی شبکه‌ای کلینشو-کرتیس⁴ تعیین می‌گردد. در این روش، برای هر متغیر تصادفی نرمال زمانی که k سطح ترتیب در نظر گرفته شده باشد، m_i تعداد نقاط و $\rho_j^{(i)}$ مکان آن نقاط در بازه $[-1, 1]$ به صورت زیر تعیین می‌شوند [18-20]:

$$m_i = \begin{cases} 1, & k = 1 \\ 2^{k-1} + 1, & k > 1 \end{cases} \quad (16)$$

$$\rho_j^{(i)} = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ -\cos\left(\frac{\pi(j-1)}{m_i-1}\right), & j = 1, 2, \dots, m_i \quad k > 1 \end{cases} \quad (17)$$

که اندیس j نشان دهنده z امین متغیر تصادفی نرمال و i نشان دهنده i امین مکان نقطه می‌باشد. بنابراین مجموعه نقاط کلینشو با سطح ترتیب k با ترکیبات ایجاد شده بین سطوح $k+1$ و $m+k$ به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$A(k, m) = U_{k+1 \leq i_1 + \dots + i_m \leq m+k} (\rho^{i_1} \times \dots \times \rho^{i_m}) \quad (18)$$

که در آن $i_1, i_2, \dots, i_m \in \{1, 2, \dots, k+1\}$ می‌باشد. در نهایت نقاط نمونه برای متغیرهای تصادفی به صورت بردار $(\rho_1^i, \rho_2^i, \dots, \rho_m^i), i = 1, 2, \dots, N$ قابل بیان است که N تعداد نقاط نمونه می‌باشد. برای مثال مجموعه نقاط کلینشو با سطوح ترتیب 2، 3، 4 و با در نظر گرفتن یک فضای دو بعدی به صورت زیر تعیین می‌شود:

⁴ Sparse Cleanshaw-Curtis (SCC)

⁵ Root Mean Square Error (RMSE)

¹ Non-intrusive formulation

² Sparse collocation method

³ Response surface

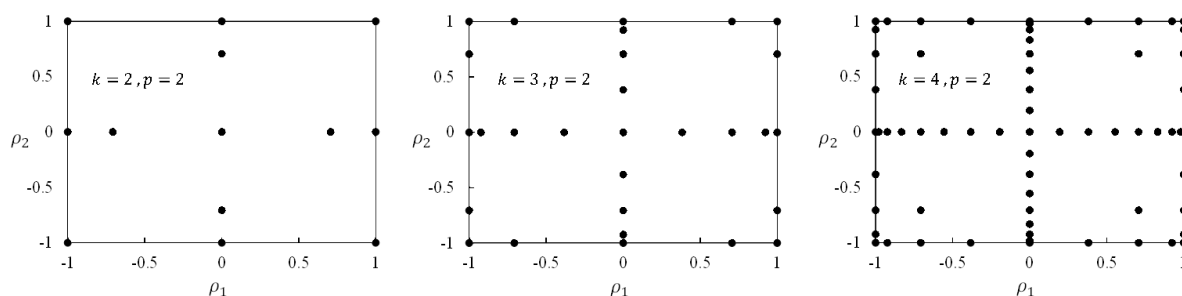


Fig.1. Two-dimensional Cleanshaw-Curtis nodes with different collocation levels

شکل 1 مجموعه نقاط کلینشو-کرتیس در فضای دو بعدی با سطح ترتیب های مختلف

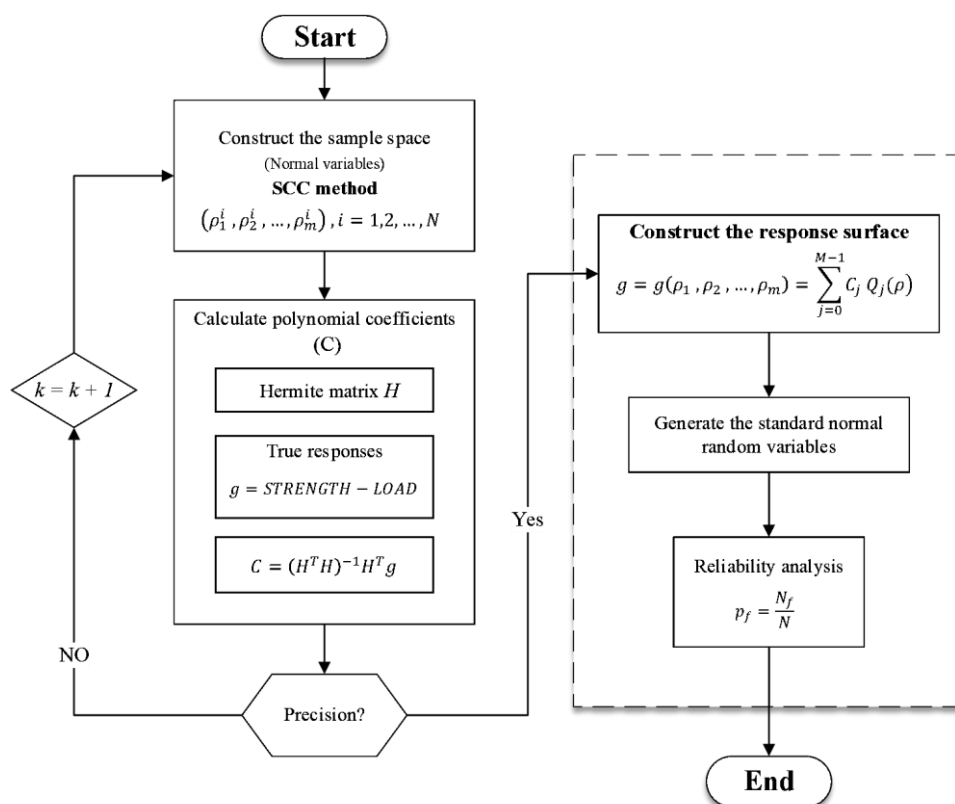


Fig.2. The flow chart of reliability analysis of composite structures based on the polynomial chaos expansion method

شکل 2 فلوچارت تحلیل عدم قطعیت سازه‌های کامپوزیتی با استفاده از بسط چند جمله‌ای آشوب

5-1- تعریف مسئله

یک صفحه کامپوزیتی از الیاف شیشه با ابعاد 150×150 میلیمتر در معرض بارگذاری عرضی یکنواخت q و تکیه گاه ساده در لبه ها در نظر گرفته شده است (شکل 3). لایه چینی و ضخامت هر لایه به ترتیب $[0^\circ/30^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ]$ و 0.329 میلیمتر می‌باشد و همچنین تمام خواص غیرقطعی اجزاء تشکیل دهنده در جدول 1 ارائه شده است. برای تحلیل قابلیت اطمینان صفحه کامپوزیتی مورد نظر و محاسبه احتمال شکست لایه‌ها، ابتدا معادلات حاکم بر صفحه استخراج شده و سپس تنش‌های ایجاد شده تحت بار عرضی یکنواخت q در هر لایه محاسبه گردیده است. سپس با تعریف یک تابع عملکرد به فرم رابطه (1) با استفاده از روش توسعه یافته مبنی بر بسط چند جمله‌ای آشوب و

4- سرانجام مدل سطح پاسخ با استفاده از رابطه (12) برای سازه کامپوزیتی با وجود عدم قطعیت در رفتار آن، قابل بیان خواهد بود. پس از ساخت مدل سطح پاسخ و تولید متغیرهای تصادفی در فضای استاندارد و اعمال این متغیرها بر روی مدل سطح پاسخ، قابلیت اطمینان سازه کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تمامی فرایندهای تشریح شده در فلوچارت شکل 2 ارائه شده است.

5- مثال عددی

در این بخش به منظور اعتبار سنجی روش توسعه یافته مبتنی بر روش بسط چند جمله‌ای آشوب با تعداد پارامترهای ورودی با گستردگی بالا، یک مثال عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} X_m(x) Y_n(y) \quad (27)$$

که در آن X_m و Y_n توابع تقریبی مجاز برای مسئله مقدار مرزی و ضرایب A_{mn} ثابت می‌باشند که با اعمال روش ریلی-ریتز¹ و حل معادله جبری $M \times N$ زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} & \sum_i^M \sum_j^N \left\{ D_{11} \int_0^a \frac{d^2 X_i}{dx^2} \frac{d^2 X_m}{dx^2} dx \int_0^b Y_j Y_n dy \right. \\ & + D_{12} \left[\int_0^a X_m \frac{d^2 X_i}{dx^2} dx \int_0^b Y_j \frac{d^2 Y_n}{dy^2} dy \right. \\ & \quad \left. + \int_0^a X_i \frac{d^2 X_m}{dx^2} dx \int_0^b Y_n \frac{d^2 Y_j}{dy^2} dy \right] \\ & + D_{22} \int_0^a X_i X_m dx \int_0^b \frac{d^2 Y_j}{dy^2} \frac{d^2 Y_n}{dy^2} dy \\ & + 4D_{66} \int_0^a \frac{dX_i}{dx} \frac{dX_m}{dx} dx \int_0^b \frac{dY_j}{dy} \frac{dY_n}{dy} dy \\ & + 2D_{16} \left[\int_0^b \frac{d^2 X_i}{dx^2} \frac{dX_m}{dx} dx \int_0^b Y_j \frac{dY_n}{dy} dy \right. \\ & \quad \left. + \int_0^a \frac{dX_i}{dx} \frac{d^2 X_m}{dx^2} dx \int_0^b Y_n \frac{dY_j}{dy} dy \right] \\ & + 2D_{26} \left[\int_0^a X_m \frac{dX_i}{dx} dx \int_0^b \frac{dY_j}{dy} \frac{d^2 Y_n}{dy^2} dy \right. \\ & \quad \left. + \int_0^a \frac{dX_m}{dx} \frac{d^2 X_i}{dx^2} dx \int_0^b \frac{d^2 Y_j}{dy^2} \frac{dY_n}{dy} dy \right] \Big\} A_{ij} \\ & = q_0 \int_0^a X_m dx \int_0^b Y_n dy \\ & (m = 1, 2, \dots, M \text{ و } n = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (28)$$

برای صفحه مستطیلی با شرایط مرزی تکیه گاه ساده در لبه ها، توابع X و Y را می‌توان به صورت توابع مثلثاتی زیر در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} X_m(x) &= \sin \frac{m\pi x}{a} & Y_n(y) &= \sin \frac{n\pi y}{b} \\ X_i(x) &= \sin \frac{m\pi i}{a} & Y_j(y) &= \sin \frac{n\pi j}{b} \end{aligned} \quad (29)$$

با جایگذاری معادلات (29) و حل معادله (28)، ضرایب ثابت رابطه (27) قابل محاسبه خواهند بود. با استفاده از معادلات ساختاری مولفه‌های تنش برای هر لایه به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

ساخت مدل سطح پاسخ، تحلیل قابلیت اطمینان صفحه کامپوزیتی در دو مرحله (مرحله اول شامل عدم قطعیت خواص مکانیکی و استحکام‌های فشاری و کششی و بارگذاری جمعا شامل 13 پارامتر و مرحله دوم شامل عدم قطعیت خواص مکانیکی و استحکام‌های فشاری و کششی، بارگذاری و عدم قطعیت هندسی جمعا شامل 18 پارامتر) انجام خواهد گرفت و احتمال شکست سازه محاسبه می‌گردد به طوری که این احتمال شکست تابعی از عدم قطعیت خواص مکانیکی، هندسی و استحکام سازه به فرم زیر قابل بیان می‌باشد.

$$p_f = p_f(\text{elastic properties, strengths, and loading uncertainties}) \quad (23)$$

$$p_f = p_f(\text{elastic properties, strengths, loading, and geometrical uncertainties}) \quad (24)$$

شایان ذکر است که هدف از تحلیل قابلیت اطمینان سازه در دو مرحله با بهره‌گیری از روش توسعه یافته، بررسی کارایی و برتری روش توسعه یافته با افزایش تعداد پارامترهای دارای عدم قطعیت نسبت به روش مونت کارلو می‌باشد.

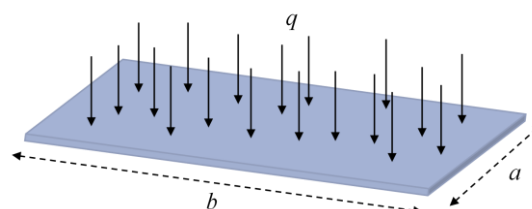


Fig.3. Schematic of a composite plate subjected to a uniform transverse load of q

شکل 3 صفحه کامپوزیتی تحت بار عرضی یکنواخت q

2-5- استخراج معادلات حاکم بر مسئله

برای استخراج معادلات حاکم بر صفحه کامپوزیتی شکل 3 که در معرض بارگذاری عرضی یکنواخت q قرار دارد از تئوری کلاسیک چندلایه‌های ناهمسانگرد استفاده شده است. با توجه به لایه چینی متقارن چند لایه مورد نظر، ماتریس سفتی کوپلینگ [B] ثابت و برابر صفر می‌باشد. در این حالت، معادله حرکت بر حسب خیز صفحه کامپوزیتی به صورت زیر بیان می‌شود [22-24]:

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{16}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \\ + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q \end{aligned} \quad (25)$$

که در آن D_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) ماتریس سفتی خمشی و w خیز صفحه می‌باشد. بارگذاری عرضی یکنواخت q را می‌توان به صورت یک سری فوریه به صورت زیر نوشت:

$$q = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (26)$$

با توجه به رابطه (26)، حل معادله دیفرانسیل رابطه (25) را می‌توان به فرم زیر در نظر گرفت:

¹ Rayleigh-Ritz

جدول 1 داده‌های غیر قطعی برای صفحه کامپوزیتی مورد مطالعه

Table 1. Probabilistic information of the uncertain input parameters for the composite plate [25].

Uncertain Parameter	Mean values	Standard deviations	Uncertain Parameter	Mean values	Standard deviations
q	0.0394 MPa	0.00985 MPa	X_T	0.345 GPa	0.043125 GPa
E_{11}	24.51 GPa	1.2255 GPa	X_C	0.345 GPa	0.043125 GPa
E_{22}	7.77 GPa	0.3885 GPa	Y_T	0.0345 GPa	0.004313 GPa
G_{12}	3.34 GPa	0.167 GPa	Y_C	0.0965 GPa	0.012063 GPa
ν_{12}	0.078	0.0039	S	0.0138 GPa	0.001725 GPa
ν_{21}	0.246	0.0123	a	150 mm	1.5 mm
b	150 mm	1.5 mm	θ_i $i \in \{1, 2, \dots, 5\}$	$[0^\circ/30^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$	3°

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} & F_2 &= \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \\ F_{11} &= \frac{1}{X_T X_C} & F_{22} &= \frac{1}{Y_T Y_C} \\ F_{66} &= \frac{1}{S^2} & F_{12} &= -0.5 \sqrt{F_{11} F_{22}} \end{aligned} \quad (34)$$

در رابطه (33) به ازاء مقادیر مثبت تابع عملکرد، لایه کامپوزیتی در حالت امن و به ازاء مقادیر منفی آن، لایه دچار شکست می‌شود. به منظور تحلیل قابلیت اطمینان این صفحه کامپوزیتی، از مدل سطح پاسخ مربوط به تابع عملکرد (33)، بر اساس بسط چند جمله‌ای آشوب استفاده شده و در نهایت احتمال شکست هر لایه‌ها برآورد می‌شود.

3-5- نتایج و بحث و بررسی

3-5-1- عدم قطعیت خواص مکانیکی، بارگذاری و ابعاد سازه (13 پارامتر غیر قطعی)

در این بخش تحلیل قابلیت اطمینان براساس تابعی از عدم قطعیت خواص مکانیکی، بارگذاری و ابعاد هندسی سازه (مجموعاً 13 پارامتر غیر قطعی) انجام گرفته و نتایج حاصل از این تحلیل و احتمال شکست لایه‌ها با استفاده از روش توسعه یافته مبتنی بر روش بسط چند جمله‌ای آشوب در جدول 2 ارائه شده است. این احتمال شکست به صورت تابعی از منابع عدم قطعیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_f = p_f(q, E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{21}, X_T, X_C, Y_T, Y_C, S, a, b) \quad (35)$$

تعداد سیکل‌های شبیه‌سازی از 500 تا 10000 سیکل افزایش یافته است و در هر مورد احتمال شکست هر لایه محاسبه شده است. ضریب واریانس (CoV) نیز برای بررسی دقت احتمال شکست تخمین زده شده، ارائه شده است. در اینجا مرتبه ماتریس هرمیتی از چند جمله‌ای آشوب (p) برابر 4 و سطح ترتیب (k) برابر 3 در نظر گرفته شده است.

مشاهده می‌شود که شکست لایه‌ها از لایه زیرین (لایه 10) شروع شده و پایداری این ترتیب با افزایش تعداد سیکل‌های شبیه‌سازی به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. همچنین متناظر با همگرایی ضریب واریانس و افزایش تعداد

$$\begin{aligned} \sigma^{(k)}_x &= -z(\bar{Q}^{(K)}_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2\bar{Q}^{(K)}_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ &\quad + \bar{Q}^{(K)}_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) \\ \sigma^{(k)}_y &= -z(\bar{Q}^{(K)}_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2\bar{Q}^{(K)}_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ &\quad + \bar{Q}^{(K)}_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) \\ \sigma^{(k)}_{xy} &= -z(\bar{Q}^{(K)}_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2\bar{Q}^{(K)}_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ &\quad + \bar{Q}^{(K)}_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) \end{aligned} \quad (30)$$

که در آن K شماره لایه، $\bar{Q}$ ماتریس سفتی دوران یافته هر لایه و z فاصله لایه مورد نظر از لایه میانی می‌باشد. ماتریس سفتی دوران یافته به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][T]^{-T} \quad (31)$$

که در آن $[Q]$ ماتریس سفتی هر لایه، بالانویس T نمایانگر ترانزاده ماتریس، و $[T]$ ماتریس دوران به عنوان تابعی از θ که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (32)$$

برای تخمین احتمال شکست صفحه کامپوزیتی، تابع عملکرد با استفاده از معیار شکست سای-وو¹ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g = 1 - (F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2) \quad (33)$$

که در آن ضرایب استحکام F_i و F_{ij} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

¹ Tsai-Wu

جدول 2 احتمال شکست لایه‌ها براساس روش سطح پاسخ

Table.2. Failure probability of layers based on the response surface

Ply number	Number of simulation					
	500	1000	3000	5000	9800	10000
ply-1	0.4291 (0.0519*)	0.4274 (0.0369)	0.4302 (0.0212)	0.4383 (0.0162)	0.4383 (0.0115)	0.4379 (0.0114)
ply-2	0	0	0	0	0	0
ply-3	0	0	0	0	0	0
ply-4	0	0	0	0	0	0
ply-5	0	0	0	0	0	0
ply-6	0	0	0	0	0	0
ply-7	0	0	0	0	0	0
ply-8	0	0	0	0	0	0
ply-9	0	0.001 (0.995)	0.0037 (0.3009)	0.0031 (0.2587)	0.0032 (0.0115)	0.0033 (0.0114)
ply-10	0.4551 (0.0494)	0.4526 (0.0351)	0.4471 (0.0205)	0.4447 (0.016)	0.4395 (0.0115)	0.4383 (0.0114)

* مقدار داخل پرانتز نشانگر ضریب واریانس (CoV) می باشد.

معیار اعتبار سنجی، به خوبی واضح است که روش سطح پاسخ دارای دقت محاسباتی بالا و خطایی برابر 0.6 درصد می باشد.

مزیت دوم روش سطح پاسخ، یعنی زمان اجرای شبیه سازی، از نمودار شکل 6 به خوبی مشهود است. همان طور که مشاهده می شود زمان اجرای مدل سطح پاسخ با افزایش تعداد سیکل های شبیه سازی نسبت به روش مونت کارلو بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی می باشد. ولی ملاحظه می شود که با افزایش تعداد سیکل های شبیه سازی زمان اجرای روش مونت کارلو دچار تغییرات بالایی شده و به صورت غیر خطی افزایش می یابد. این بدان دلیل است که در شبیه سازی مونت کارلو، معادلات دیفراسیل حاکم بر مسئله می بایست به طور کامل به تعداد سیکل های شبیه سازی حل شود در حالیکه در مورد مدل سطح پاسخ فقط یک معادله جبری که هزینه محاسباتی بسیار پایینی دارد حل می شود. یک حقیقت جالب دیگر از مقایسه زمان اجرای این دو روش این است که در تعداد سیکل های شبیه سازی پایین زمان اجرای مونت کارلو کمتر از زمان اجرای مدل سطح می باشد، اما باید در نظر داشت که در این تعداد سیکل شبیه سازی، میزان همگرایی مطلوب حاصل نشده است. به همین دلیل برای رسیدن به یک همگرایی مطلوب باید تعداد سیکل های شبیه سازی افزایش یابد که به تبع آن زمان اجرا نیز افزایش می یابد. در مقابل، زمان اجرای مدل سطح پاسخ در تمام سیکل ها تا رسیدن به همگرایی مطلوب تقریباً ثابت می باشد. سیستم مورد استفاده دارای پردازشگر 4 هسته ای Intel Core i7-7500U 2.5GHz و 8 GB DDR4 RAM می باشد و شبیه سازی با بهره گیری از الگوریتم پردازش موازی نرم افزار متلب انجام گرفته است

سیکل های شبیه سازی، ملاحظه می شود که در تعداد سیکل 9800 احتمال شکست لایه ها تقریباً همگرا می شوند. 43 درصد احتمال شکست در لایه یکم و دهم در صفحاتی که تحت بار فشاری عرضی یکنواخت قرار دارند پیش بینی شده است. همچنین 0.3 درصد احتمال شکست در لایه نهم وجود دارد و بقیه لایه ها در حالت امن می باشند. در شکل 4 نحوه انتخاب مقدار پارامتر سطح ترتیب k مربوط به تعیین نقاط کلینشو-کرتیس نشان داده شده است. همچنین مشاهده می شود با افزایش k ، احتمال شکست افزایش یافته و زمانی که سطح ترتیب دارای مقادیری برابر 3 و 4 می باشد احتمال شکست دارای مقداری برابر و ثابت 0.438 می باشد. این نشان دهنده آن است که در $k = 3$ احتمال شکست به یک مقدار ثابت همگرا شده است. بنابراین برای کاهش هزینه های محاسباتی مقدار سطح ترتیب برای تعیین نقاط کلینشو-کرتیس برابر 3 در نظر گرفته شده است. تحلیل قابلیت اطمینان بر اساس روش بسط چند جمله ای آشوب و ساخت مدل سطح پاسخ، نسبت به روش مونت کارلو از دو لحاظ، نرخ همگرایی و زمان همگرایی، بسیار حائز اهمیت است. در شکل 5 نرخ همگرایی روش مونت کارلو و مدل سطح پاسخ و در شکل 6 زمان همگرایی این دو روش مورد مقایسه قرار گرفته است. در نمودار شکل 5 مشاهده می شود که با افزایش تعداد سیکل های شبیه سازی، احتمال شکست لایه دهم با روش مونت کارلو در تعداد سیکل 15000 و در روش سطح پاسخ با 9800 سیکل شبیه سازی همگرا شده است.

پر واضح است که روش سطح پاسخ نسبت به روش مونت کارلو از نرخ همگرایی بالاتری برخوردار می باشد چرا که در تعداد سیکل شبیه سازی پایین تری به همگرایی رسیده است. همچنین با مقایسه دقت نتایج روش سطح پاسخ نسبت به نتایج بدست آمده از روش شبیه سازی مستقیم مونت کارلو به عنوان

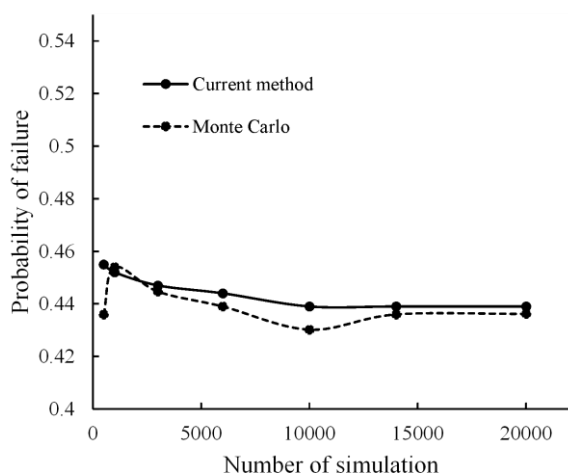


Fig.5. Comparison between the convergence rate of the response surface method and MCS

شکل 5 مقایسه همگرایی روش مونت کارلو و روش سطح پاسخ

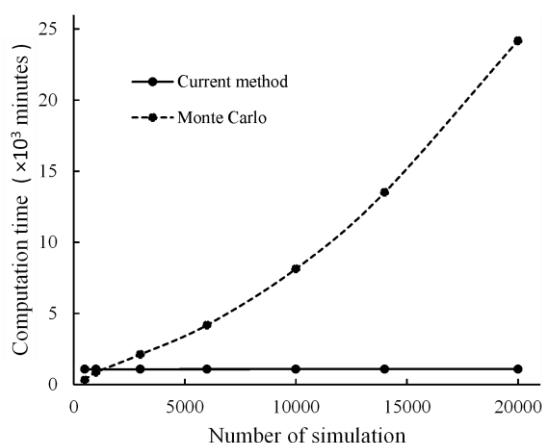


Fig.6. Comparison between the computation times of the response surface method and MCS

شکل 6 نمودار مقایسه زمان اجرای مونت کارلو و مدل سطح پاسخ

6- نتیجه‌گیری

هدف از مقاله حاضر ارائه یک روش توسعه یافته مبتنی بر روش بسط چند جمله‌ای آشوب برای تحلیل قابلیت اطمینان با وجود منابع عدم قطعیت گسترده در خواص فیزیکی و مکانیکی سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد. همان‌طور که واضح است تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از روش‌های سنتی از جمله مونت کارلو دارای هزینه محاسباتی بسیار بالا می‌باشد. در این مقاله سعی بر آن شده که با ارائه یک روش توسعه یافته برای تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌های کامپوزیتی مشکلات حاصل از روش مونت کارلو چون هزینه محاسباتی بالا، کاهش یابد. در نهایت با انجام یک مثال عددی در دو حالت با افزایش پارامترهای دارای عدم قطعیت و بررسی نتایج مشاهده شد که روش توسعه یافته از میزان دقت محاسباتی 0.6 درصد نسبت به روش مونت کارلو برخوردار بوده و میزان نرخ همگرایی نسبت به روش مونت کارلو با وجود افزایش پارامترهای دارای عدم قطعیت 33.66 درصد بهبود یافته است. همچنین هزینه محاسباتی این روش نسبت به روش مونت کارلو تا رسیدن به همگرایی 91.98

5-2-3 عدم قطعیت خواص مکانیکی، بارگذاری، ابعاد سازه و جهت-گیری لایه‌ها (18 پارامتر غیر قطعی)

در این بخش علاوه بر عدم قطعیت خواص مکانیکی، بارگذاری و ابعاد سازه، عدم قطعیت جهت‌گیری لایه‌ها نیز در تحلیل قابلیت اطمینان سازه و محاسبه احتمال شکست لایه‌ها با استفاده از روش توسعه یافته در نظر گرفته شده است (مجموعاً 18 پارامتر غیر قطعی). این احتمال شکست به صورت تابعی از عدم قطعیت‌ها به فرم زیر بیان می‌شود:

$$p_f = p_f(q, E_1, E_2, G_{12}, v_{12}, v_{21}, X_T, X_C, Y_T, Y_C, S, a, b, \theta_i)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, 5\}$$

با توجه به رابطه (31) و (32)، ماتریس دوران به فرم رابطه (37) بیان می‌شود:

$$[T] = [T(\sigma_\theta, \mu_\theta)] \quad (37)$$

که در آن σ_θ مقدار متوسط جهت‌گیری هر لایه و μ_θ انحراف معیار جهت-گیری لایه‌ها می‌باشد که در این مطالعه 3° در نظر گرفته شده است. مرتبه ماتریس هرمیتی از چند جمله‌ای آشوب برابر 4 و همچنین سطح ترتیب برابر 3 انتخاب گردیده است. در جدول 3 نتایج حاصل تحلیل قابلیت اطمینان احتمال شکست لایه دهم با استفاده از روش توسعه یافته و روش مونت کارلو مورد قیاس قرار گرفته است. ملاحظه می‌شود که احتمال شکست با استفاده از روش توسعه یافته و روش مونت کارلو به ترتیب در تعداد سیکل 14000 و 24000 همگرا شده است و دارای مقادیری به ترتیب برابر 0.4220 و 0.4231 می‌باشند. همان‌طور که انتظار می‌رفت این احتمال شکست نسبت به حالتی که عدم قطعیت جهت‌گیری لایه‌ها در نظر گرفته نشده بود، کاهش یافته است. همان‌طور که مشهود است با افزایش منابع عدم قطعیت، نرخ همگرایی در هر دو روش کاهش یافته است. با این حال، با وجود افزایش پارامترهای ورودی، نرخ همگرایی روش جاری، با حفظ دقت، در مقایسه با روش مونت کارلو بسیار بالاتر می‌باشد.

از نقطه نظر هزینه محاسباتی، با وجود افزایش تعداد نقاط کلینشو-کرتیس و به تبع آن افزایش زمان محاسباتی اولیه جهت ساخت مدل سطح پاسخ، روش سطح پاسخ مزیت خود را نسبت به روش مونت کارلو حفظ کرده و هزینه محاسباتی آن به مراتب از این روش پایین‌تر می‌باشد. لذا می‌توان روش مدل سطح پاسخ مبتنی بر بسط چند جمله‌ای آشوب را به عنوان یک روش کارآمد در تحلیل قابلیت اطمینان و پاسخ غیر قطعی در سازه‌های کامپوزیتی در نظر گرفت.

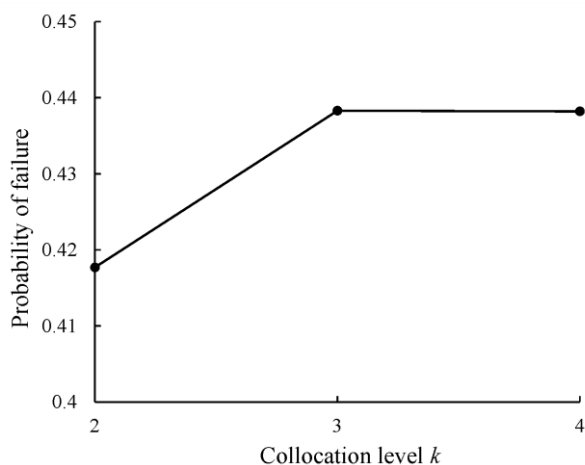


Fig.4. The Convergence of results against the collocation level
شکل 4 نمودار همگرایی بر حسب سطح ترتیب

- [15] Choi, S-K. Grandhi, RV. Canfield, RA. Pettit, CL., "Polynomial Chaos Expansion with Latin Hypercube Sampling for Estimating Response Variability," AIAA Journal, Vol. 42, pp. 1191–1198, 2004.
- [16] Xiu, D. Hesthaven, JS., "High-Order Collocation Methods for Differential Equations with Random Inputs," SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 27, pp. 1118–1139, 2005.
- [17] Xiu, D. Karniadakis, GE., "Modeling uncertainty in flow simulations via generalized polynomial chaos," Journal of Computational Physics, Vol. 187, pp. 137–167, 2003.
- [18] Nobile, F. Tempone, R. Webster, CG., "A Sparse Grid Stochastic Collocation Method for Partial Differential Equations with Random Input Data," SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 46, pp. 2309–2345, 2008.
- [19] Burkard, J., "Slow Exponential Growth for Clenshaw Curtis Sparse Grids," 2014.
- [20] Bhaduri, A. Graham-Brady, L., "An efficient adaptive sparse grid collocation method through derivative estimation. Probabilistic Engineering Mechanics," Vol. 51, pp. 11–22, 2018.
- [21] Dey, S. Mukhopadhyay, T. Spickenheuer, A. Gohs, U. Adhikari, S., "Uncertainty Quantification in Natural Frequency of Composite Plates - An Artificial Neural Network Based Approach," Advanced Composites Letters, Vol. 25, pp. 43–48, 2016.
- [22] Reddy, JN., "Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis," 2nd ed. USA, CRC Press, 2004.
- [23] Ghannadpour, AM. Kurkaani Barvaj, A., "Ultimate strength analysis of imperfect composite plates under both in-plane compressive load and lateral pressure using Ritz method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, pp. 1–10, 2018.
- [24] Ghannadpour, A. Barekati, M., "Post-buckling analysis of anti-symmetric cross-ply composite plates under end-shortening," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, pp. 35–42, 2018.
- [25] Jeong, HK. Sheno, RA., "Reliability analysis of mid-plane symmetric laminated plates using direct simulation method," Composite Structures, Vol. 43, pp. 1–13, 1998.;43:1–13.

درصد کمتر می باشد. ازینرو براساس نتایج حاصل شده، برتری این روش بر روش‌های سنتی چون مونت کارلو به وضوح قابل مشاهده می‌باشد و می‌توان روش مدل سطح پاسخ مبتنی بر بسط چند جمله‌ای آشوب را به عنوان یک روش کارآمد در تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌های کامپوزیتی با گستردگی بالا در منابع عدم قطعیت در نظر گرفت.

جدول 3 احتمال شکست بر اساس روش سطح پاسخ

Table 3. Failure probability based on the response

Method	Probability of failure	Number of Simulation	Computation time (minutes)
Current method	0.4220	14000	1990
Monte Carlo	0.4231	24000	26145

7- مراجع

- [1] Saeedifar, M. Najafabadi, MA. Toudeshky, HH. Mohammadi, R., "Investigation of Initiation and Evolution of Delamination in Glass/Epoxy Laminated Composites Using Acoustic Emission Method," In Persian, AmirKabir Journal of Science & Research Mechanical Engineering, Vol. 48, No. 4, pp. 153–156, 2017.
- [2] Dey, S. Mukhopadhyay, T. Adhikari, S., "Metamodel based high-fidelity stochastic analysis of composite laminates: A concise review with critical comparative assessment," Composite Structures, Vol. 171, pp. 227–250, 2017.
- [3] Baran, I. Cinar, K. Ersoy, N. Akkerman, R. Hattel, JH., "A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes," Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 24, pp. 365–395, 2017.
- [4] Fisher, J. Bhattacharya, R., "Linear quadratic regulation of systems with stochastic parameter uncertainties," Automatica Vol. 45, pp. 2831–2841, 2017.
- [5] Chen, X. Qiu, Z., "A novel uncertainty analysis method for composite structures with mixed uncertainties including random and interval variables," Composite Structures Vol. 184, pp. 400–410, 2018.
- [6] Thapa, M. Mulani, SB. Walters, RW., "Stochastic multi-scale modeling of carbon fiber reinforced composites with polynomial chaos," Composite Structures,
- [7] Peng, X. Li, D. Wu, H. Liu, Z. Li, J. Jiang, S. et al., "Uncertainty analysis of composite laminated plate with data-driven polynomial chaos expansion method under insufficient input data of uncertain parameters," Composite Structures, Vol. 209, pp. 625–633, 2019.
- [8] Sasikumar, P. Venketeswaran, A. Suresh, R. Gupta, S., "A data driven polynomial chaos based approach for stochastic analysis of CFRP laminated composite plates," Composite Structures, Vol. 125, pp. 212–227, 2015.
- [9] Balokas, G. Czichon, S. Rolfes, R., "Neural network assisted multiscale analysis for the elastic properties prediction of 3D braided composites under uncertainty," Composite Structures, Vol. 183, pp. 550–562, 2018.
- [10] Naskar, S. Mukhopadhyay, T. Sriramula, S., "Probabilistic micromechanical spatial variability quantification in laminated composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 151, pp. 291–325, 2018.
- [11] Ghasemi, H. Rafiee, R. Zhuang, X. Muthu, J. Rabczuk, T., "Uncertainties propagation in metamodel-based probabilistic optimization of CNT/polymer composite structure using stochastic multi-scale modeling," Computational Materials Science, Vol. 85, pp. 295–305, 2014.
- [12] Whiteside MB., "Stochastic Analysis of Composite Materials. Doctoral dissertation," Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2012.
- [13] Marburg, S. Hardtke, H-J., "Uncertainty quantification in stochastic systems using polynomial chaos expansion," International Journal of Applied Mechanics, Vol. 02, pp. 305–353, 2010.
- [14] Choi, S-K. Grandhi, RV. Canfield, RA., "Structural reliability under non-Gaussian stochastic behavior," Computers & Structures, Vol. 82, pp. 1113–1121, 2004.



تحلیل ارتعاش آزاد غیرخطی ورق مستطیلی از جنس مواد مدرج تابعی با استفاده از روش لیندشتد پوانکاره بهبود یافته

سهیل هاشمی¹، علی اصغر جعفری^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* * تهران، صندوق پستی 16765-3381، A.Jafari@Kntu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در تحقیق حاضر، تحلیل ارتعاش آزاد غیرخطی ورق مستطیلی از جنس مواد مدرج تابعی با استفاده از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول برای اولین بار مورد بررسی واقع شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از اصل هامیلتون، معادلات دیفرانسیل جزئی حرکت براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و با در نظر گرفتن روابط کرنش جابجایی غیرخطی و کرنش استخراج شده اند. پس از آن با اعمال روش گالرکین، معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی حرکت به معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی تبدیل می شوند. سپس با استفاده از روش لیندشتد پوانکاره بهبود یافته، معادله غیرخطی حرکت عرضی ورق مدرج تابعی بصورت تحلیلی حل گشته و فرکانس های غیرخطی استخراج می شوند. خواص مواد مدرج تابعی ورق به صورت تابع توانی و پیوسته در راستای ضخامت فرض گردیده است. در نهایت، اثرات برخی پارامتر های کلیدی سیستم همچون دامنه ارتعاش بدون بعد، توان کسر حجمی ماده تابعی و همچنین نسبت ابعاد ورق روی نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی به فرکانس خطی مورد بحث قرار گرفته است. برای تایید و صحت فرمولاسیون مساله، نتایج این مطالعه با نتایج مقالات منتشر شده قبلی و همچنین راه حل عددی مقایسه گشته و تطابق خوبی دیده شده است.	دریافت: 98/02/14 پذیرش: 98/12/14 کلیدواژگان: ارتعاش غیرخطی ورق مستطیلی مواد مدرج تابعی تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، روش لیندشتد پوانکاره بهبود یافته

Nonlinear free vibration analysis of functionally graded rectangular plate using modified Lindstedt-Poincare method

Soheil Hashemi¹, Ali Asghar Jafari^{2*}

1- MSc. Student, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16765-3381, Tehran, Iran, A.Jafari@Kntu.ac.ir

Keywords

Nonlinear vibrations
Rectangular plate
Functionally graded materials
First order shear deformation theory
modified Lindstedt-Poincare method

Abstract

In this research, the nonlinear free vibration analysis of functionally graded (FG) rectangular plate is investigated analytically using first order shear deformation theory (FSDT) for the first time. For this purpose, firstly, using Hamilton principle, the partial differential equations of motion are developed based on first order shear deformation theory (FSDT) and von Karman nonlinearity strain displacement relations. Afterward, by applying Galerkin method, the nonlinear partial differential equations are transformed into nonlinear ordinary differential equations. Then, using the modified Lindstedt-Poincare method, the nonlinear equation of transverse motion of the FG plate is solved analytically to determine nonlinear frequency ratio. The material properties of the plate are assumed to be graded continuously according to power law distribution in the thickness direction. The effects of some key system parameters such as vibration amplitude, volume fraction index and aspect ratio on the nonlinear natural frequency ratio to linear natural frequency are discussed. To validate the analysis, the results of this study are compared with the results of previously published papers and numerical solution and good agreement has been observed.

1-مقدمه

و پیوسته تغییر می کند. استفاده از مواد مدرج تابعی در دهه های اخیر افزایش چشم گیری داشته است. این مواد به دلیل مقاومت حرارتی بالا و دیگر خواصی که دارند کاربرد های مهندسی زیادی در صنایع مختلفی همچون صنایع دفاعی و صنایع هوافضایی دارند. همچنین از این مواد در ساخت تجهیزات

مواد هدفمند یا همان مواد مدرج تابعی (FGM¹) نوعی کامپوزیت هستند که خواص مکانیکی یا حرارتی آنها از یک سطح تا سطح دیگر بصورت تابعی

¹ Functionally graded material

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Hashemi, S. and Asghar Jafari, A., "Nonlinear free vibration analysis of functionally graded rectangular plate using modified Lindstedt-Poincare method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 637-648, 2020.

هدفمند روی بستر الاستیک را بر اساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول مورد تحقیق قرار دادند. ژائو⁹ و همکاران [12] با استفاده از روش المان آزاد کی-پی-ریتر⁴ به مطالعه ارتعاش آزاد ورق مستطیلی از جنس مواد هوشمند براساس تئوری برشی مرتبه اول پرداختند. آنها در این تحقیق چهار نوع ماده هدفمند را مورد بررسی قرار دادند. یانگ و شن⁵ [13] به تحلیل ارتعاش آزاد و اجباری ورق های مدرج تابعی که تحت پیش تنش بوده و در محیط حرارتی قرار دارند، پرداختند. آنها از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه بالاتر استفاده کردند و همچنین شرایط مرزی گوناگونی را مورد بررسی قرار دادند. گوپتا⁶ و همکاران [14] با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه بالاتر به استخراج فرکانس های طبیعی ورق از جنس مواد هدفمند با شرایط مرزی مختلف پرداختند.

با توجه به اینکه برای طراحی و تحلیل دقیق و قابل اطمینان یک سازه نیاز است تا ارتعاش با دامنه بزرگ مورد بررسی واقع شود چراکه در واقعیت همه پدیده ها غیرخطی هستند لذا تحلیل غیرخطی به واقعیت نزدیکتر از تحلیل خطی می باشد. لذا برخی دیگر از محققان به بررسی ارتعاش غیرخطی ورق ها پرداختند. نشیر و قاهری [15] به مطالعه ارتعاش اجباری غیرخطی ورق های نازک دایروی از جنس مواد هدفمند پرداختند. آنها شرایط مرزی را دورگیردار در نظر گرفته و از روش اغتشاشات برای حل معادلات غیرخطی استفاده کردند. نورالدین خسرویان و همکاران [16] به شبیه سازی دینامیکی ارتعاش غیرخطی ورق مربع شکل چهار سر گیردار با جابجایی بزرگ پرداختند. یان کینگ و انگ و جین زو⁷ [17] بر اساس تئوری کلاسیک، به بررسی ارتعاش غیرخطی ورق مستطیلی از جنس مواد هدفمند متخلخل پرداختند. آنها با استفاده از اصل آلمبرت⁸ معادله غیرخطی جزئی حاکم بر ورق را استخراج و در نهایت پس از تبدیل به معادله دیفرانسیل معمولی به روش گالرکین⁹ آن را با روش هارمونیک بالانس حل نمودند. علی امین یزدی [18] با استفاده از تئوری کلاسیک و روابط کرنش جابجایی ون کارمن¹⁰ به بررسی ارتعاش آزاد غیرخطی ورق مستطیلی از جنس مواد هدفمند پرداخت. او از روش اغتشاشی هوموتوپ¹¹ برای استخراج نسبت فرکانس طبیعی غیر خطی استفاده کرد. لطف آور و همکاران [19] با استفاده از تئوری کلاسیک و روابط کرنش جابجایی ون کارمن¹² به بررسی ارتعاش آزاد غیرخطی ورق مستطیلی کامپوزیتی پرداخت. آنها از دو روش تحلیلی تقریبی برای استخراج نسبت فرکانس طبیعی غیر خطی استفاده کردند. جی. وو¹³ و همکاران [20] به بررسی ارتعاش آزاد غیرخطی ورق ساخته شده از جنس مواد هدفمند پرداختند. آنها براساس تئوری کلاسیک ورق ها و با استفاده از یک بسط فوریه، اثر خواص مواد، شرایط مرزی و بار های حرارتی را روی رفتار دینامیکی ورق مورد مطالعه قرار دادند. ملک زاده و منجم زاده [21] با به کارگیری تئوری کلاسیک ورق ها، به تحلیل پاسخ غیرخطی ورق از جنس مواد هدفمند تحت نیروی در حال حرکت پرداختند. نوین دیندانه و فام هونگ کونگ¹⁴ [22] با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول و تابع تنش به بررسی ارتعاش غیرخطی ورق مستطیلی از جنس مواد هدفمند پرداختند. آنها فرض کردند ورق روی بستر الاستیک و تحت بار های مکانیکی، حرارتی و میرایی باشد، سپس پاسخ دینامیکی ورق را با استفاده از روش عددی رانج گوتا¹⁵ استخراج کردند. چین پینگ فانگ و چان شنگ چنگ¹⁶ [23] براساس تئوری

همچون مخازن تحت فشار، پره های توربین، مبدل های حرارتی، مواد بیوپزشکی مثل ایمپلنت دندان استفاده می شود. با توجه به اهمیت و کاربرد مواد مدرج تابعی برخی محققان مطالعاتی در این زمینه انجام دادند.

خورشیدی و همکاران [1] ارتعاش آزاد الکترومکانیکی نانورق مستطیلی کامپوزیتی با لایه پیزوالکتریک را با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی بهبود یافته مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. خورشیدی و همکاران [2] ارتعاش نانورق های مستطیلی مدرج تابعی را براساس تئوری تغییرشکل برشی نمایی غیرمحلی مورد تحلیل قرار دارند. خورشیدی و بخششی [3] ارتعاش آزاد ورق مستطیلی مدرج تابعی در تماس با سیال را مطالعه کردند.

یکی از سازه های رایج ساخته شده از مواد مدرج تابعی که کاربرد های زیادی در سازه های مهندسی همچون وسایل نقلیه فضایی و غیره دارد، ورق ها می باشند. بسیاری از کاربردهای ورق های ساخته شده از مواد مختلف در مهندسی یافت می شود به عنوان مثال: صفحات دایره ای بسیار نازک در هارد دیسک های رایانه ای استفاده می شود. صفحات مستطیلی و دوزنقه ای را می توان در پوست بال، سطوح دم افقی، فلپ و باله های عمودی هواپیما یافت. صفحات مستطیلی یکسرگیردار در تشدیدکننده های نانو برای تشخیص مواد مخدر استفاده می شوند. همچنین پانل های مستطیل مسطح تا حد زیادی در ساختمانهای عمرانی استفاده می شود. لذا بدلیل اهمیت بالایی که دارند مطالعات زیادی روی دینامیک ورق های مدرج تابعی انجام شده است. برخی محققان روی ارتعاش ورق های ساخته شده از جنس مواد هدفمند براساس تئوری کلاسیک کار کردند. ژانگ و ژوو¹ [4] ارتعاش آزاد، کماتش و خیز ورق نازک از جنس مواد هدفمند را براساس تئوری کلاسیک ورق و سطح خنثی فیزیکی تحلیل کردند. ابریت² [5] فرکانس های طبیعی ورق های نازک با تکیه گاه ساده و گیردار را با استفاده از تئوری کلاسیک ورق ها استخراج کرد.

با توجه به اینکه در تئوری کلاسیک از تغییرشکل های برشی در ضخامت ورق صرف نظر می گردد، فرکانس های طبیعی با کمی تقریب بدست می آیند. به منظور حل این مشکل برخی پژوهشگران با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول و یا مرتبه بالاتر به مطالعه ارتعاش خطی ورق ها پرداختند. برای نمونه، نجفی زاده و عیالوار [6] با استفاده از تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی به بررسی ارتعاش آزاد ورق مستطیلی شکل ساخته شده از جنس مواد تابعی پرداختند. کوروش خورشیدی و همکاران [7] به بررسی تاثیرات محیط حرارتی بر ارتعاش آزاد ورق مستطیلی از جنس مواد تابعی مدرج دو بعدی مستقر بر بستر پسترناک براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه سوم پرداختند. حسینی هاشمی و همکاران [8] با ارائه یک حل دقیق پاسخ بسته به تحلیل ارتعاش آزاد ورق مستطیلی نسبتاً ضخیم هدفمند با لایه های هوشمند براساس تئوری میندیلین پرداختند. محمد عباسی بیات و همکاران [9] براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول و با استفاده از روش دیفرانسیل کوادرچر به برسی ارتعاش ورق تابعی مندرج دوبعدی پرداختند. سیاوش عظیمی عراقی و همکاران [10] براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه سوم و با استفاده از روش انرژی و اصل هامیلتون به برسی ارتعاش ورق تابعی مندرج دوبعدی پرداختند. حسینی هاشمی و همکاران [11] ارتعاش آزاد ورق مستطیلی ساخته شده از جنس مواد

⁹ Galerkin method¹⁰ Von karman¹¹ Homotopy Perturbation Method¹² Von karman¹³ J. Woo¹⁴ Nguyen Dinh Duc and Pham Hong Cong¹⁵ Runge kutta method¹⁶ Chin-Ping Fung and Chun-Sheng Chen¹ Zhang and Zhou² Abrate³ Zhao⁴ Element-free *kp*-Ritz method⁵ Yang and Shen⁶ Gupta⁷ Yan Qing Wang And Jean W. Zu⁸ Alembert's principle

روش لیندشتد پوانکاره بهبودیافته^۴ بصورت تحلیلی حل شده و نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی به فرکانس طبیعی خطی ورق استخراج شده است. برای اطمینان از صحت محاسبات مساله، نتایج این تحقیق با ادبیات گذشته و همچنین حل عددی مقایسه و اعتبارسنجی شده است.

2- فلوجارت فرایند حل مساله

شکل ۱ فلوجارت فرایند حل مساله را در این تحقیق نشان می دهد.

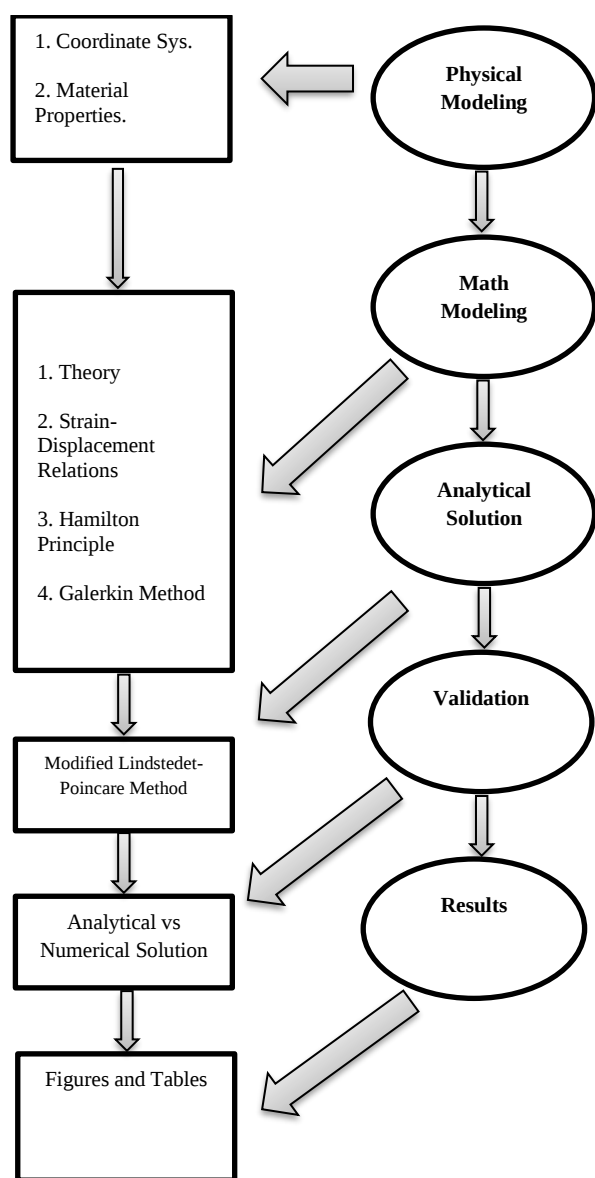


Fig. 1 Flowchart of problem solving process

شکل ۱ فلوجارت فرایند حل مساله

۳- هندسه و خواص ورق

شکل ۲ یک ورق مستطیلی نازک از جنس مواد مدرج تابعی را نشان می دهد که دارای طول a ، عرض b و ضخامت h می باشد. این ورق از هر چهار طرف

مرتبه اول، ارتعاش غیرخطی ورق مستطیلی از جنس مواد هدفمند را مورد بررسی قرار دادند. آنها ناصاف بودن ورق و همچنین وجود تنش اولیه در ورق را لحاظ نموده و با استفاده از روش گالرکین و روش عددی رانج گوتا به حل معادلات پرداختند. وحید فخاری و همکاران [24] به مطالعه ارتعاش غیرخطی آزاد و اجباری ورق های از جنس مواد هدفمند براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه بالاتر و روش المان محدود پرداختند. آنها دولایه پیزوالکتریک روی سطوح بالایی و پایینی ورق در نظر گرفته و همچنین آن را تحت بار های مکانیکی، حرارتی و الکتریکی قرار دادند. هائو^۱ و همکاران [25] به تحلیل دینامیک غیرخطی ورق مستطیلی یکسرگیردار از جنس مواد هدفمند که در یک محیط حرارتی تحت بارگذاری عرضی قرار دارد، پرداختند. آنها از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه بالاتر استفاده کردند و در نهایت با بهره گیری از یک روش اغتشاشی تقریبی و با استفاده از روش عددی رانج گوتا، رزونانس^۲ های دینامیکی غیرخطی ورق را پیدا کردند. وی ژانگ^۳ و همکاران [26] براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه بالاتر و با استفاده از یک روش اغتشاشی تقریبی بسط فوری به تحلیل دینامیک بی نظم و غیرخطی یک ورق دورمفصل از جنس مواد هدفمند که تحت بار های خارجی و پارامتری قرار دارد پرداختند. نوین دین داک و همکاران [27] پاسخ دینامیکی غیرخطی و ارتعاش ورق مستطیلی ناصاف از جنس مواد هدفمند که روی بستر الاستیک واقع بوده و تحت بارگذاری حرارتی و بارگذاری ضربه ای است را براساس تئوری برشی مرتبه بالاتر محاسبه کردند.

برای حل معادلات و مسائل غیرخطی، محققان از روش های مختلفی برای حل تحلیلی آنها از معایب روش های اغتشاشی مرسوم (استریت فوروارد، هارمونیک بالانس، مقیاس های زمانی چندگانه، متوسط گیری و...) میتوان به دومورد اشاره کرد. اولاً این روش ها معمولاً زمانی نتایج خوبی می دهند که ضرایب و پارامتری های معادله از ترم های غیرخطی کوچک تشکیل شده باشند. ثانیاً این روش ها دارای حجم محاسبات سنگین و ریاضیات پیچیده ای می باشند. اما روش لیندشتد پوانکاره بهبودیافته نه تنها برای ضرایب غیرخطی کوچک بلکه برای ضرایب غیرخطی بزرگ هم قابل استفاده است. همچنین این روش یک ابزار تحلیلی نسبتاً ساده است که پیچیدگی خاصی ندارد و درعین حال نتایج بسیار خوبی ارائه می دهد.

در این تحقیق، تحلیل ارتعاش آزاد غیرخطی ورق مستطیلی مدرج تابعی با استفاده از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول برای اولین بار بررسی می شود. نوآوری تحقیق حاضر نسبت به مطالعات پیشین شامل موارد زیر می باشد: الف) ارتعاشات غیرخطی با استفاده از تئوری مرتبه اول برای مساله ورق مدرج تابعی بصورت تحلیلی تاحال کار نشده است که در این مقاله مورد بررسی واقع شده است. ب) در این نوع مساله برای اولین بار از روش تحلیلی لیندشتد پوانکاره بهبود یافته استفاده شده است و مشاهده شد که تطابق بسیار خوبی با روش های دیگر همچنین حل عددی رانج گوتا مرتبه چهار دارد. ج) اثر برخی پارامتر های سیستم از جمله نسبت ابعاد، اندیس توانی مدرج تابعی و همچنین دامنه ارتعاش روی نسبت فرکانسی غیرخطی برای اولین بار در تئوری مرتبه اول برشی مورد تحلیل قرار می گیرد. برای این منظور، معادلات غیرخطی حرکت براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول و روابط کرنش جابجایی غیرخطی ون کارمن استخراج شده است. سپس معادلات غیرخطی حرکت با استفاده توابع شکل مود و روش گالرکین به معادلات دیفرانسیل غیرخطی معمولی تبدیل شده اند. و در نهایت معادله ارتعاش عرضی ورق با استفاده از

³ Wei Zhang

⁴ Modified Lindstedt-Poincare method

¹ Y.X. Hao

² Resonance

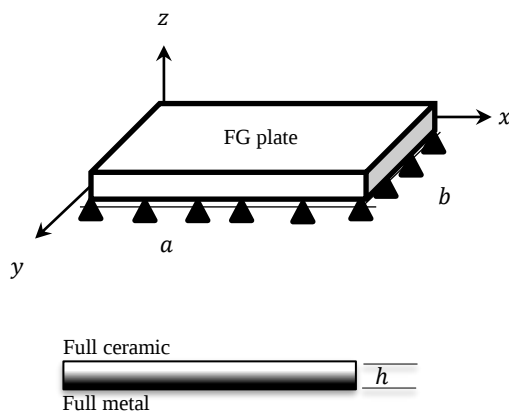


Fig. 2 Geometry of an FG rectangular plate

شکل 2 هندسه یک ورق مستطیلی از جنس مواد هدفمند

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

که در آن ضرایب سختی ماتریس هستند که به شکل زیر بیان می‌شوند:

$$Q_{11}(z) = Q_{22}(z) = \frac{E(z)}{1 - \nu(z)^2} \quad (12)$$

$$Q_{12}(z) = \frac{E(z)\nu(z)}{1 - \nu(z)^2} \quad (13)$$

$$Q_{44}(z) = Q_{55}(z) = Q_{66}(z) = \frac{E(z)}{2(1 + \nu(z))} \quad (14)$$

در روابط بالا ضریب پواسون ثابت و برابر با مقدار ۰.۳ فرض می‌شود.

معادلات حرکت ورق براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول به صورت زیر می‌باشند [28]:

$$\frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = I_0 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = I_0 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \mathcal{N}(w_0) + q(x, y, t) = I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \quad (17)$$

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = I_1 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + I_2 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y = I_1 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} + I_2 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} \quad (19)$$

که $\mathcal{N}(w_0)$ در معادلات بالا بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}(w_0) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{xx} \frac{\partial w_0}{\partial x} + N_{xy} \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_{yy} \frac{\partial w_0}{\partial y} + N_{xy} \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

در معادلات بالا N_{xx} , N_{yy} , N_{xy} نیروهای متوجه در صفحه، M_{xx} , M_{yy} , M_{xy} ممان های متوجه و Q_x , Q_y نیروهای عرضی متوجه می‌باشند. I_0 , I_1 , I_2 ممان اینرسی جرمی و q نیروی تحریک عرضی وارد بر ورق می‌باشد که در تحلیل ارتعاش آزاد، صفر در نظر گرفته می‌شود. لازم بذکر است، باتوجه به نازک بودن

دارای تکیه‌گاه مفصلی می‌باشد. دستگاه مختصات کارتزین^۱ در گوشه ورق و روی صفحه میانی آن قرار دارد.

با توجه به اینکه جنس ورق از نوع مواد هدفمند است، فرض می‌شود که خواص آن از جمله چگالی و مدول یانگ^۲ در راستای ضخامت بصورت پیوسته و با قانون توانی تغییر کند:

$$E(z) = (E_c - E_m) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^n + E_m \quad (1)$$

$$\rho(z) = (\rho_c - \rho_m) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^n + \rho_m \quad (2)$$

که در آن n ضریب توانی کسر حجمی، E_c و E_m به ترتیب بیانگر مدول یانگ سرامیک و فلز و همچنین ρ_c و ρ_m به ترتیب بیانگر چگالی سرامیک و فلز می‌باشد که مقادیر آن در جدول ۱ آورده شده است.

4- معادلات حرکت

براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول، جابجایی هر نقطه از ورق در راستای محورهای x , y و z از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$u(x, y, z, t) = u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \quad (3)$$

$$v(x, y, z, t) = v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \quad (4)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \quad (5)$$

در معادلات بالا، u, v, w به ترتیب جابجایی های یک نقطه دلخواه از ورق در راستای محور های x, y, z و u_0, v_0, w_0 جابجایی های نقطه متناظر با همان نقطه بر روی صفحه میانی می‌باشند. همچنین ϕ_x, ϕ_y به ترتیب چرخش حول محور x, y می‌باشند. با فرض تغییرشکل های بزرگ، روابط کرنش جابجایی غیرخطی ون کارمن بصورت زیر بیان می‌شوند [28]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 + z \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 + z \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \quad (7)$$

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) + z \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \quad (9)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \quad (10)$$

براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول، روابط تنش کرنش برای ورق از جنس مواد هدفمند را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

جدول 1 خواص مواد برای ورق از جنس مواد هدفمند

Table 1 Material properties for FG plate

خواص	سرامیک (Al_2O_3)	فلز (Al)
مدول یانگ	380 Gpa	70 Gpa
چگالی	3800 $\frac{kg}{m^3}$	2702 $\frac{kg}{m^3}$

² Young's modulus

¹ Cartesian coordinate system

$$\begin{aligned}
& + B_{66} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial w_0}{\partial y} \left(A_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} \right) \right. \\
& + \left. \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + B_{66} \left(\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x^2} \right) \\
& + \frac{\partial w_0}{\partial x} \left(A_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) \right. \\
& + \left. \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) + B_{66} \left(\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x \partial y} \right) \\
& + \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \left(A_{12} \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{12} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \right. \\
& + \left. A_{22} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{22} \left(\frac{\partial \phi_y}{\partial y} \right) \right) \\
& + \frac{\partial w_0}{\partial y} \left(A_{12} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + B_{12} \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x \partial y} \right. \\
& + \left. A_{22} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) + B_{22} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} \right) \right) \\
& = I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}
\end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned}
& B_{11} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + D_{11} \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} \\
& + B_{12} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + D_{12} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x \partial y} \right) \\
& + B_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) \\
& + D_{66} \left(\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x \partial y} \right) - K A_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \right) = 0 \\
& B_{12} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + D_{12} \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x \partial y} \\
& + B_{22} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} \right) \\
& + B_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) \\
& + D_{66} \left(\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x^2} \right) - K A_{44} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \right) = 0
\end{aligned} \quad (33)$$

در معادلات بالا ضرایب A_{ij} , B_{ij} , D_{ij} از رابطه زیر محاسبه می گردند:

$$\begin{Bmatrix} A_{ij} \\ B_{ij} \\ D_{ij} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \end{Bmatrix} Q_{ij}(z) dz, \quad i, j = 1, 2, 4, 5, 6 \quad (35)$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی دور مفصل بدون جابجایی صفحه ای روابط زیر برقرار هستند:

$$(36) \text{ at } x = 0, a \quad v_0 = w_0 = N_{xx} = M_{xx} = \phi_y = 0$$

$$(37) \text{ at } y = 0, b \quad u_0 = w_0 = N_{yy} = M_{yy} = \phi_x = 0$$

توابع جابجایی زیر به منظور ارضا شدن شرایط مرزی تعریف می گردند [22]:

$$u_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} U_{mn}(t) \cos(\alpha x) \sin(\beta y) \quad (38)$$

$$v_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} V_{mn}(t) \sin(\alpha x) \cos(\beta y) \quad (39)$$

$$w_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} W_{mn}(t) \sin(\alpha x) \sin(\beta y) \quad (40)$$

$$\phi_x(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} X_{mn}(t) \cos(\alpha x) \sin(\beta y) \quad (41)$$

$$\phi_y(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} Y_{mn}(t) \sin(\alpha x) \cos(\beta y) \quad (42)$$

ورق می توان از ترم های اینرسی صفحه ای در معادلات ۱۹ تا ۱۵ صرف نظر نمود [29]. در نهایت این معادلات به شکل زیر بدست می آیند:

$$\frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \mathcal{N}(w_0) = I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \quad (23)$$

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y = 0 \quad (25)$$

برای محاسبه نیرو و ممان متوجه از روابط زیر استفاده می شود:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad (26)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (27)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix} = K \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} dz \quad (28)$$

$$\begin{Bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \end{Bmatrix} \rho(z) dz \quad (29)$$

K در رابطه ۲۸ ضریب اصلاح برشی است که برابر با مقدار $\frac{5}{6}$ در نظر گرفته شده است.

با جایگذاری معادلات ۲۹ تا ۲۶ در معادلات حرکت ۲۵ تا ۲۵:

$$\begin{aligned}
& A_{11} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + B_{11} \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} \\
& + A_{12} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + B_{12} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x \partial y} \right) \\
& + A_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) \\
& + B_{66} \left(\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x \partial y} \right) = 0
\end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
& A_{12} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + B_{12} \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x \partial y} \\
& + A_{22} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) + B_{22} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} \right) \\
& + A_{66} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) \\
& + B_{66} \left(\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x^2} \right) = 0
\end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
& K A_{55} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \right) + K A_{44} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \right) \\
& + \frac{\partial w_0}{\partial x} \left(A_{11} \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + B_{11} \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} \right. \\
& + \left. A_{12} \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + B_{12} \left(\frac{\partial^2 \phi_y}{\partial x \partial y} \right) \right) \\
& + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \left(A_{11} \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{11} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \right. \\
& + \left. A_{12} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{12} \left(\frac{\partial \phi_y}{\partial y} \right) \right) \\
& + 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \left(A_{66} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) \right.
\end{aligned}$$

$$\alpha = \omega^2 + \epsilon c_1 + \epsilon^2 c_2 + \dots \quad (55)$$

ضرایب c_i, ω در معادله ۵۵ مجهول هستند که در ادامه محاسبه خواهند شد. به منظور دقت بیشتر، معادله ۵۰ تا تقریب مرتبه دوم یا به بیان دیگر تا سه جمله حل می گردند. برای این منظور با جایگذاری معادله ۵۴ و ۵۵ در معادله ۵۲، و با صفر برابر قرار دادن ضرایب $\epsilon^0, \epsilon^1, \epsilon^2$ معادلات زیر استخراج می شوند:

$$p^0: \quad \ddot{W}_0 + \omega^2 \bar{W}_0 = 0 \quad (56)$$

$$\bar{W}_0(0) = A \quad \frac{d\bar{W}_0}{d\tau}(0) = 0$$

$$p^1: \quad \ddot{W}_1 + \omega^2 \bar{W}_1 = -c_1 \bar{W}_0 - \beta \bar{W}_0^2 - \gamma \bar{W}_0^3 \quad (57)$$

$$\bar{W}_1(0) = 0 \quad \frac{d\bar{W}_1}{d\tau}(0) = 0$$

$$p^2: \quad \ddot{W}_2 + \omega^2 \bar{W}_2 = -c_2 \bar{W}_0 - c_1 \bar{W}_1 - 2\beta \bar{W}_0 \bar{W}_1 - 3\gamma \bar{W}_1 \bar{W}_0^2 \quad (58)$$

$$\bar{W}_2(0) = 0 \quad \frac{d\bar{W}_2}{d\tau}(0) = 0$$

حل معادله ۵۶ با شرایط اولیه مربوطه به صورت زیر می باشد:

$$\bar{W}_0 = A \cos(\omega\tau) \quad (59)$$

سپس با جایگذاری معادله ۵۹ در معادله ۵۷:

$$\ddot{W}_1 + \omega^2 \bar{W}_1 = \left(-c_1 A - \frac{3}{4} \gamma A^3\right) \cos(\omega\tau) - \frac{1}{2} \beta A^2 \cos(2\omega\tau) - \frac{\beta A^2}{2} \quad (60)$$

با صفر قرار دادن ترم سکولار در معادله ۶۰ ضریب c_1 بدست می آید:

$$c_1 = -\frac{3}{4} \gamma A^2 \quad (61)$$

حل معادله ۶۰ به صورت زیر می باشد:

$$\bar{W}_1 = \left(\frac{\beta A^2}{3\omega^2} - \frac{\gamma A^3}{32\omega^2}\right) \cos(\omega\tau) + \frac{\beta A^2}{6\omega^2} \cos(2\omega\tau) + \frac{\gamma A^3}{32\omega^2} \cos(3\omega\tau) - \frac{\beta A^2}{2\omega^2} \quad (62)$$

همچنین بطور مشابه با جایگذاری معادلات ۵۹ و ۶۲ در معادله ۵۸ و حذف ترم سکولار، ضریب c_2 بصورت زیر استخراج می شود:

$$c_2 = \frac{\beta \gamma A^3}{4\omega^2} - \frac{3\gamma^2 A^4}{128\omega^2} + \frac{5\beta^2 A^2}{6\omega^2} - \frac{3\beta \gamma A^3}{4\omega^2} + \frac{3\gamma^2 A^4}{64\omega^2} \quad (63)$$

در نهایت، از رابطه ۵۵ فرکانس طبیعی غیرخطی به صورت زیر بدست می آید:

$$\omega_{NL} = \sqrt{\frac{\left(\alpha + \frac{3}{4} \gamma \epsilon A^2\right) + \Lambda}{2}} \quad (64)$$

$$\Lambda = \sqrt{\left(\alpha + \frac{3}{4} \gamma \epsilon A^2\right)^2 + \left(2\beta \gamma A^3 - \frac{10\beta^2 A^2}{3} - \frac{3\gamma^2 A^4}{32}\right) \epsilon^2}$$

پس از حل معادله ۵۸ مقدار $\bar{W}_2$ بصورت زیر استخراج می شوند:

$$\bar{W}_2 = \left(\frac{c_1 \beta A^2}{2\omega^4} - \frac{\beta^2 A^3}{3\omega^4} + \frac{21\beta \gamma A^4}{32\omega^4}\right) + \left(-\frac{5c_1 \beta A^2}{9\omega^4} - \frac{c_1 \gamma A^3}{256\omega^4} + \frac{61\beta^2 A^3}{144\omega^4} - \frac{17\beta \gamma A^4}{32\omega^4} - \frac{\gamma^2 A^5}{256\omega^4}\right) \cos(\omega\tau) \quad (65)$$

$$+ \left(\frac{c_1 \beta A^2}{18\omega^2} - \frac{\beta^2 A^3}{9\omega^2} - \frac{\beta \gamma A^4}{6\omega^2}\right) \cos(2\omega\tau)$$

در روابط بالا U, V, W, X, Y و m, n ترم های زمانی مجهول، $\alpha = \frac{m\pi}{a}$ ، $\beta = \frac{n\pi}{b}$ و همچنین m, n شماره نیم موج می باشند.

با در نظر گرفتن فقط یک جمله در معادلات ۳۸ تا ۴۲ ارتعاش در مود اول مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور با قرار دادن $m = n = 1$ در معادلات ۳۸ تا ۴۲ و جایگذاری آنها در معادلات حرکت ۳۰ و ۳۵ و اعمال روش گالرکین معادلات دیفرانسیل معمولی و غیرخطی حرکت بصورت زیر استخراج می گردند:

$$C_{11}W^2 - C_{12}U - C_{13}V - C_{14}X - C_{15}Y = 0 \quad (43)$$

$$C_{21}W^2 - C_{22}U - C_{23}V - C_{24}X - C_{25}Y = 0 \quad (44)$$

$$I_0 \ddot{W} + C_{31}W^3 + C_{32}W + C_{33}X + C_{34}Y - C_{35}UW - C_{36}VW - C_{37}XW - C_{38}YW = 0 \quad (45)$$

$$C_{41}W^2 - C_{42}W - C_{43}U - C_{44}V - C_{45}X - C_{46}Y = 0 \quad (46)$$

$$C_{51}W^2 - C_{52}W - C_{53}U - C_{54}V - C_{55}X - C_{56}Y = 0 \quad (47)$$

ضرایب C_{ij} در معادلات بالا وابسته به هندسه و خواص ورق می باشند که در پیوست (الف) آورده شده اند. از چهار معادله ۴۳، ۴۴، ۴۶، ۴۷ چهار مجهول U, V, X, Y را بر حسب W بدست آورده و با جایگذاری در معادله ۴۵، معادله دیفرانسیل غیرخطی زیر استخراج می شود:

$$\frac{d^2W}{dt^2} + a_1 W + a_2 W^2 + a_3 W^3 = 0 \quad (48)$$

پارامتر های بی بعد زیر به منظور ساده سازی معرفی می شوند:

$$\tau = \frac{t}{h} \sqrt{\frac{E_m}{\rho_m}}, \quad \frac{W}{h} = \bar{W} \quad (49)$$

پس از اعمال پارامترهای بی بعد، معادله بی بعد زیر استخراج می گردد:

$$\frac{d^2\bar{W}}{d\tau^2} + \alpha \bar{W} + \beta' \bar{W}^2 + \gamma' \bar{W}^3 = 0 \quad (50)$$

ضرایب α, β', γ' در پیوست (ب) آورده شده اند.

5- حل تحلیلی: روش لیندشتد پوانکاره بهبود یافته

در این پژوهش، از روش لیندشتد پوانکاره بهبود یافته برای حل معادله ۵۰ استفاده می شود. وسط ورق تحت شرایط اولیه زیر می باشد:

$$\bar{W}(0) = \frac{W_{max}}{h} = A, \quad \frac{d\bar{W}(0)}{d\tau} = 0 \quad (51)$$

A بیشترین جابجایی وسط ورق می باشد. با توجه به ملزومات روش حل، بایستی یک پارامتر کوچک، مثبت و بی بعد معرفی گردد. بنابراین، معادله ۵۰ بصورت زیر بازنویسی می شود:

$$\ddot{W} + \alpha \bar{W} + \epsilon \beta \bar{W}^2 + \epsilon \gamma \bar{W}^3 = 0 \quad (52a)$$

که ϵ پارامتر مورد نظر می باشد. ضرایب ϵ, β و γ بصورت زیر تعریف می گردند:

$$\epsilon = \frac{h}{a}, \quad \beta = \frac{\beta'}{\epsilon}, \quad \gamma = \frac{\gamma'}{\epsilon} \quad (52b)$$

لازم به ذکر است فرکانس خطی ورق از معادله ۵۲ قابل استخراج است که بصورت زیر می باشد:

$$\alpha = \omega_L^2 \quad (53)$$

براساس مراجع [30,31]، ضریب α و ترم تابع زمانی $\bar{W}(\tau)$ میتوانند بصورت یک سری توانی از ϵ نوشته شوند:

$$\bar{W} = \bar{W}_0 + \epsilon \bar{W}_1 + \epsilon^2 \bar{W}_2 + \dots \quad (54)$$

شکل 4 که به نمودار پشتواره¹ معروف است، تاثیر دامنه ارتعاش روی نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی به فرکانس طبیعی خطی برای مقادیر مختلف نسبت طول به عرض را در ورق مدرج تابعی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت طول به عرض ورق، منحنی از محور عمودی دورتر شده یا به بیان دیگر در دامنه های بزرگ، منحنی رفتار غیرخطی از نوع فنر سخت را از خود نشان می‌دهد.

جدول 2 مقایسه پارامتر بدون بعد فرکانس طبیعی پایه برای ورق مربعی آلومینیوم/آلومینا

Table 2 Comparison of fundamental frequency parameter for

Al/Al_2O_3 square plates ($\beta = \omega h \sqrt{\frac{\rho_c}{E_c}}$)

منابع	$\frac{a}{h}$	n				
		0	0.5	1	4	10
[11]		0.0148	0.0128	0.0115	0.0101	0.0096
[12]	20	0.0146	0.0124	0.0112	0.0097	0.0093
تحقیق حاضر		0.0148	0.0126	0.0113	0.0098	0.0094
[11]		0.0577	0.0492	0.0445	0.0383	0.0363
[12]	10	0.0567	0.0482	0.0435	0.0376	0.0359
تحقیق حاضر		0.0581	0.0494	0.0445	0.386	0.0369
[11]		0.2112	0.1806	0.1650	0.1371	0.1304
[12]	5	0.2055	0.1757	0.1587	0.1356	0.1284
تحقیق حاضر		0.2158	0.1847	0.1672	0.1435	0.1356

جدول 3 مقایسه نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی برای ورق مربعی از جنس مواد مدرج تابعی

Table 3 Comparison of nonlinear to linear frequency ratio for square FGM plate ($\frac{a}{h} = 40$)

$\frac{W_{max}}{h}$	$n = 0.2$		$n = 10$	
	FSDT	CPT [18]	FSDT	CPT [18]
0.25	1.0529	1.0467	1.0473	1.0413
0.5	1.1962	1.1758	1.1766	1.1563
0.75	1.4005	1.3641	1.3630	1.3266
1.0	1.6428	1.5911	1.5860	1.5335
1.25	1.9086	1.8426	1.8323	1.7645
1.5	2.1895	2.1103	2.0937	2.0115
1.75	2.4805	2.3890	2.3654	2.2996
2	2.7785	2.6755	2.6442	2.5355

$$+ \left(\frac{c_1 \gamma A^3}{256 \omega^2} + \frac{\beta^2 A^3}{48 \omega^2} + \frac{\beta \gamma A^4}{32 \omega^2} + \frac{3 \gamma^2 A^5}{1024 \omega^2} \right) \cos(3 \omega \tau) \\ + \left(\frac{\beta \gamma A^4}{96 \omega^2} \right) \cos(4 \omega \tau) + \left(\frac{\gamma^2 A^5}{1024 \omega^2} \right) \cos(5 \omega \tau)$$

در نهایت از رابطه ۵۴ حل کلی تا تقریب مرتبه دوم معادله ۵۰ به صورت زیر می‌باشد:

$$\bar{W}_{2nd} = \bar{W}_0 + \bar{W}_1 + \bar{W}_2 \quad (66)$$

6- اعتبارسنجی و نتایج

در این بخش، ابتدا به منظور اطمینان از صحت نتایج بدست آمده تحقیق، نتایج این پژوهش با ادبیات پیشین و همچنین حل عددی مقایسه گشته و پس از آن تاثیر پارامترهای مختلف روی فرکانس های طبیعی غیرخطی ورق مورد بررسی قرار گرفته است.

با در نظر گرفتن ترم های خطی و حذف ترم های غیرخطی از معادلات حرکت ورق مدرج تابعی میتوان فرکانس های طبیعی خطی سیستم را بدست آورد. در جدول 2 فرکانس طبیعی بدون بعد برای ورق مستطیلی از جنس مواد هدفمند استخراج شده و با ادبیات موجود مقایسه گردیده است.

در مرجع [11] حسینی هاشمی و همکاران از تئوری میندیلین ورق و یک تابع جابجایی برای حل مساله استفاده کردند و همچنین در مرجع [12] ژائو و همکاران با بهره گیری از تئوری میندیلین ورق و با استفاده از یک روش عددی به استخراج فرکانس های طبیعی پرداختند. همانطور که از این جدول ملاحظه می گردد برای نسبت ابعادی های بزرگ نتایج از دقت بسیار خوبی برخوردار می باشد و با کاهش این نسبت دقت نتایج کمتر شده که دلیل آن صرف نظر کردن از ترم های اینرسی صفحه ای در ورق نازک می باشد.

باتوجه به اینکه معادله غیرخطی حرکت از روش لیندشتد پوانکاره بهبود یافته حل شده است لذا به منظور اطمینان از صحت روش حل، نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی به فرکانس طبیعی خطی استخراج شده از مساله حاضر با نتایج مرجع [18] مقایسه شده است. همانطور که از جدول 3 مشاهده می گردد نتایج از دقت خوبی برخوردار می باشد. در مرجع [18] نویسنده از تئوری کلاسیک ورق استفاده کرده است لذا با توجه به اینکه در تحقیق حاضر از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول استفاده شده است و اثرات برشی در در نظر گرفته شده اند در نتیجه اختلاف بین نتایج بدلیل تئوری های حل می باشد که نتایج این مطالعه دقیق تر از مرجع [18] است.

جدول 4 نسبت فرکانس های طبیعی غیرخطی به فرکانس طبیعی خطی ورق مستطیلی از جنس مواد هدفمند را برای مقادیر مختلف دامنه ارتعاش ضریب n نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد، نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی به فرکانس طبیعی خطی به دامنه ارتعاش وابسته بوده و با افزایش دامنه ارتعاش، اثر غیرخطی سازی افزایش یافته و به دنبال آن این نسبت افزایش میابد. به منظور اعتبار سنجی بیشتر روش حل استفاده شده در تحقیق حاضر، پاسخ دینامیکی وسط ورق مربعی از جنس مواد هدفمند با استفاده از دو روش لیندشتد پوانکاره بهبود یافته و حل عددی رانج گوتا مرتبه چهارم حل گردیده و نتایج در شکل 3 مقایسه شده است. همانطور که از این نمودار مشاهده می شود حل تحلیلی و حل عددی تطابق بسیار خوبی باهم دارند.

¹ Backbone curve

همچنین برای مقادیر $1 < \frac{a}{b} < 5$ با افزایش مقدار نسبت طول به عرض ورق، نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی به فرکانس طبیعی خطی افزایش میابد. یا به بیان دیگر نسبت فرکانس غیر خطی به فرکانس خطی در اطراف نقطه ۱ رفتار کاهشی دارد و در این نقطه که ورق مربعی است نسبت فرکانس غیر خطی به فرکانس خطی مینیمم می‌باشد. دلیل این رفتار این است که با فاصله گرفتن ورق از هندسه مربعی، اثر ترم های غیرخطی هندسی مساله شدیدتر شده و نسبت فرکانس غیر خطی به فرکانس خطی افزایش میابد.

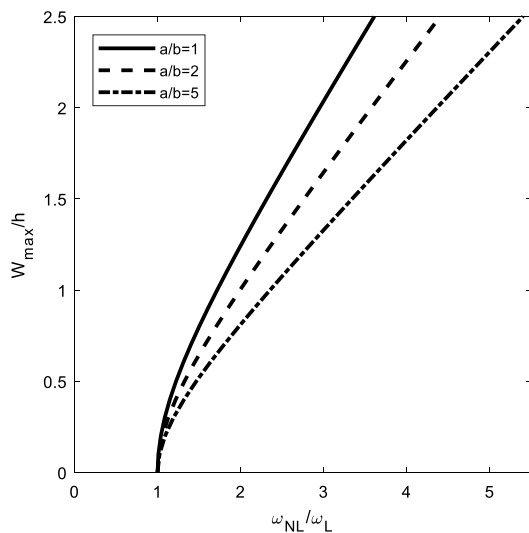


Fig. 4 Effect of vibration amplitude on nonlinear to linear frequency ratio for different values of aspect ratio ($\frac{a}{b}$)

شکل 4 تاثیر دامنه ارتعاش روی نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی برای مقادیر مختلف نسبت ابعاد

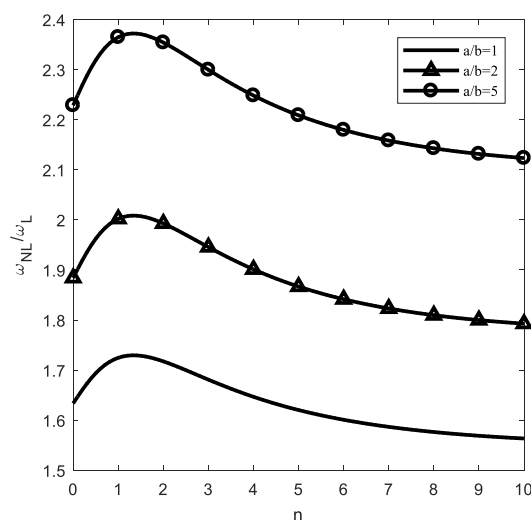


Fig. 5 Variation of nonlinear to linear frequency ratio versus the values of n for different values of aspect ratio ($\frac{W_{max}}{h} = 1$)

شکل 5 تغییرات نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی برحسب مقادیر مختلف n برای ضرایب مختلف نسبت ابعاد

جدول 4 نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی برای ورق از جنس مواد هدفمند

Table 4 Nonlinear to linear frequency ratio for FG plate ($\frac{a}{h} = 20$, $\frac{a}{b} = 5$)

A	n				
	0	2	5	10	100
0.25	1.1201	1.1364	1.1175	1.1069	1.1135
0.5	1.4161	1.4664	1.4081	1.3746	1.3954
0.75	1.8007	1.8885	1.7868	1.7274	1.7644
1	2.2287	2.3541	2.2087	2.1234	2.1766
1.5	3.1439	3.3430	3.1121	2.9758	3.0608
2	4.0942	4.3656	4.0509	3.8645	3.9808

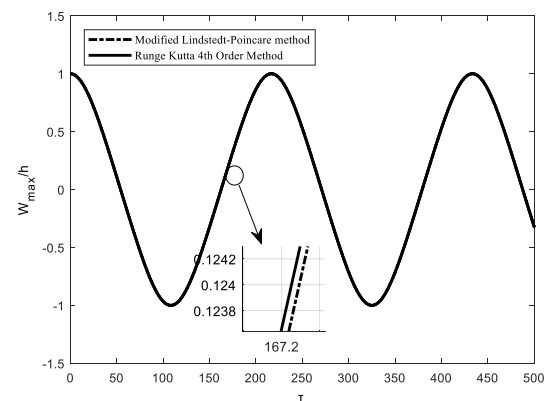


Fig. 3 Comparison of numerical and analytical solutions of FG square plate for ($\frac{a}{h} = 20$, $n = 10$, $\frac{W_{max}}{h} = 1$)

شکل 3 مقایسه حل تحلیلی و عددی ورق مربعی از جنس مواد هدفمند

شکل 5 تغییرات نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی برحسب مقدار n برای ضرایب مختلف نسبت ابعاد را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشاهده می‌شود، در بازه $0 < n < 1$ با افزایش مقدار n نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی افزایش میابد و در بازه $n > 1$ ، این نسبت با افزایش مقدار n کاهش یافته و تقریباً به یک مقدار همگرا می‌شود.

این رفتار را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که با افزایش مقدار n چگالی و همچنین ضرایب A_{ij} و D_{ij} میابد درحالی که ضریب B_{ij} افزایش میابد که نتیجه این تغییرات منجر به افزایش نسبت فرکانسی می‌شود. علاوه، این نکته قابل توجه است که با افزایش n اختلاف خواص بالا برای مقادیر $n < 1$ قابل توجه‌تر است درحالی که برای مقادیر $n > 1$ این تغییرات قابل چشم‌پوشی است.

شکل 6 تاثیر نسبت طول به عرض ورق ($\frac{a}{b}$) روی نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی را برای مقادیر مختلف اندیس n نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود برای مقادیر $0.5 < \frac{a}{b} < 1$ با افزایش مقدار نسبت طول به عرض ورق، نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی به فرکانس طبیعی خطی کاهش میابد.

$$\begin{aligned}
C_{21} &= \frac{4C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right) (A_{12} - A_{66}) - 2A_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^3 \right) \\
C_{22} &= \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) (A_{12} + A_{66}) \\
C_{23} &= A_{66} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + A_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \\
C_{24} &= \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) (B_{12} + B_{66}) \\
C_{25} &= B_{66} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + B_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \\
C_{31} &= \frac{9}{32} \left(A_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 + A_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^4 \right) \\
&+ \frac{1}{16} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 (A_{12} + 2A_{66}) \right) \\
C_{32} &= K \left(A_{55} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + A_{44} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right) \\
C_{33} &= KA_{55} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \\
C_{34} &= KA_{44} \left(\frac{n\pi}{b} \right) \\
C_{35} &= \frac{8C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \left(\frac{m\pi}{a} \right) (A_{12} - A_{66}) + A_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^3 \right) \\
C_{36} &= \frac{8C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right) (A_{12} - A_{66}) + A_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^3 \right) \\
C_{37} &= \frac{8C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \left(\frac{m\pi}{a} \right) (B_{12} - B_{66}) + B_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^3 \right) \\
C_{38} &= \frac{8C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right) (B_{12} - B_{66}) + B_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^3 \right) \\
C_{41} &= \frac{4C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \left(\frac{m\pi}{a} \right) (B_{12} - B_{66}) - 2B_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^3 \right) \\
C_{42} &= KA_{55} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \\
C_{43} &= B_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + B_{66} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \\
C_{44} &= \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) (B_{12} + B_{66}) \\
C_{45} &= D_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + D_{66} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + KA_{55} \\
C_{46} &= \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) (D_{12} + D_{66}) \\
C_{51} &= \frac{4C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right) (B_{12} - B_{66}) - 2B_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^3 \right) \\
C_{52} &= KA_{44} \left(\frac{n\pi}{b} \right) \\
C_{53} &= \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) (B_{12} + B_{66}) \\
C_{54} &= B_{66} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + B_{22} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2
\end{aligned}$$

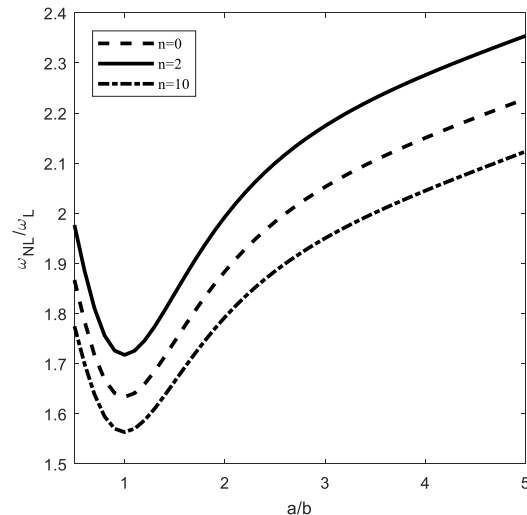


Fig. 6 Variation of nonlinear to linear frequency ratio versus the aspect ratio for different values of n ($\frac{W_{max}}{h} = 1$)

شکل 6 تغییرات نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی برحسب نسبت ابعاد برای مقادیر مختلف n

7- نتیجه گیری

در این تحقیق به تحلیل ارتعاش آزاد غیرخطی ورق مستطیلی از جنس مواد هدمند پرداخته شد. با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی کرنش و براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول، معادلات غیرخطی حرکت استخراج شدند. در نهایت معادله غیرخطی ارتعاش عرضی ورق با روش تحلیلی لیندشتد پوانکاره بهبودیافته حل گردید و نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی محاسبه شد. برای اعتبارسنجی تحقیق حاضر، نتایج این پژوهش با نتایج مقالات منتشر شده قبلی و همچنین حل عددی مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج از دقت بسیار خوبی برخوردار می باشند. در ادامه اثرات برخی پارامترهای سیستم نظیر دامنه ارتعاش، توان کسر حجمی ماده تابعی و نسبت ابعاد روی نسبت فرکانس طبیعی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. به طور خلاصه از نتایج این تحقیق می توان مشاهده نمود که دامنه ارتعاش بدون بعد ورق تاثیر چشم گیری روی نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی دارد. با افزایش n اختلاف خواص ورق برای مقادیر $n < 1$ قابل توجه تر است در حالی که برای مقادیر $n > 1$ این تغییرات قابل چشم پوشی است. همچنین دیده شد که نسبت فرکانس غیر خطی به فرکانس خطی ورق برای هندسه مربعی مینیمم می باشد.

پیوست الف

$$\begin{aligned}
C_{11} &= \frac{4C_{mn}}{9mn\pi^2} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 (A_{12} - A_{66}) - 2A_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^3 \right) \\
C_{12} &= A_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + A_{66} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \\
C_{13} &= \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) (A_{12} + A_{66}) \\
C_{14} &= B_{11} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + B_{66} \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \\
C_{15} &= \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) (B_{12} + B_{66})
\end{aligned}$$

$$-C_{23}C_{43}C_{56} + C_{22}C_{44}C_{56})/G$$

$$T_{32} = (C_{15}C_{44}C_{53} - C_{13}C_{46}C_{53} - C_{15}C_{43}C_{54} + C_{12}C_{46}C_{54}$$

$$+ C_{13}C_{43}C_{56} - C_{12}C_{44}C_{56})/G$$

$$T_{33} = (-C_{15}C_{23}C_{53} + C_{13}C_{25}C_{53} + C_{15}C_{22}C_{54} - C_{12}C_{25}C_{54}$$

$$- C_{13}C_{22}C_{56} + C_{12}C_{23}C_{56})/G$$

$$T_{34} = (C_{15}C_{23}C_{43} - C_{13}C_{25}C_{43} - C_{15}C_{22}C_{44} + C_{12}C_{25}C_{44}$$

$$+ C_{13}C_{22}C_{46} - C_{12}C_{23}C_{46})/G$$

$$T_{41} = (C_{24}C_{44}C_{53} - C_{23}C_{45}C_{53} - C_{24}C_{43}C_{54} + C_{22}C_{45}C_{54}$$

$$+ C_{23}C_{43}C_{55} - C_{22}C_{44}C_{55})/G$$

$$T_{42} = (-C_{14}C_{44}C_{53} + C_{13}C_{45}C_{53} + C_{14}C_{43}C_{54} - C_{12}C_{45}C_{54}$$

$$- C_{13}C_{43}C_{55} + C_{12}C_{44}C_{55})/G$$

$$T_{43} = (C_{14}C_{23}C_{53} - C_{13}C_{24}C_{53} - C_{14}C_{22}C_{54} + C_{12}C_{24}C_{54}$$

$$+ C_{13}C_{22}C_{55} - C_{12}C_{23}C_{55})/G$$

$$T_{44} = (-C_{14}C_{23}C_{43} + C_{13}C_{24}C_{43} + C_{14}C_{22}C_{44} - C_{12}C_{24}C_{44}$$

$$- C_{13}C_{22}C_{45} + C_{12}C_{23}C_{45})/G$$

$$G = (C_{15}C_{24}C_{44}C_{53} - C_{14}C_{25}C_{44}C_{53} - C_{15}C_{23}C_{45}C_{53}$$

$$+ C_{13}C_{25}C_{45}C_{53} + C_{14}C_{23}C_{46}C_{53} - C_{13}C_{24}C_{46}C_{53}$$

$$- C_{15}C_{24}C_{43}C_{54} + C_{14}C_{25}C_{43}C_{54} + C_{15}C_{22}C_{45}C_{54}$$

$$- C_{12}C_{25}C_{45}C_{54} - C_{14}C_{22}C_{46}C_{54} + C_{12}C_{24}C_{46}C_{54}$$

$$+ C_{15}C_{23}C_{43}C_{55} - C_{13}C_{25}C_{43}C_{55} - C_{15}C_{22}C_{44}C_{55}$$

$$+ C_{12}C_{25}C_{44}C_{55} + C_{13}C_{22}C_{46}C_{55} - C_{12}C_{23}C_{46}C_{55}$$

$$- C_{14}C_{23}C_{43}C_{56} + C_{13}C_{24}C_{43}C_{56} + C_{14}C_{22}C_{44}C_{56}$$

$$- C_{12}C_{24}C_{44}C_{56} - C_{13}C_{22}C_{45}C_{56} + C_{12}C_{23}C_{45}C_{56})$$

$$C_{55} = \left(\frac{m\pi}{a}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)(D_{12} + D_{66})$$

$$C_{56} = D_{66}\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + D_{22}\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + KA_{44}$$

$$C_{mn} = (1 - (-1)^m)(1 - (-1)^n), \quad m = n = 1$$

پیوست ب

$$\alpha = \left(\frac{\sqrt{\rho_m}}{E_m}h\right)\left(\frac{C_{32} - C_{33}C_{42}T_{33} - C_{33}C_{52}T_{34} - C_{34}C_{42}T_{43} - C_{34}C_{52}T_{44}}{I_0}\right)$$

$$\beta' = \left(\frac{\sqrt{\rho_m}}{E_m}h^2\right)(C_{35}C_{42}T_{13} + C_{35}C_{52}T_{14} + C_{36}C_{42}T_{23} \\ + C_{36}C_{52}T_{24} + C_{11}C_{33}T_{31} + C_{21}C_{33}T_{32} \\ + C_{33}C_{41}T_{33} + C_{37}C_{42}T_{33} + C_{33}C_{51}T_{34} \\ + C_{37}C_{52}T_{34} + C_{11}C_{34}T_{41} + C_{21}C_{34}T_{42} \\ + C_{34}C_{41}T_{43} + C_{38}C_{42}T_{43} + C_{34}C_{51}T_{44} \\ + C_{38}C_{52}T_{44})/I_0$$

$$\gamma' = \left(\frac{\sqrt{\rho_m}}{E_m}h^3\right)(C_{31} - C_{21}C_{35}T_{12} - C_{35}C_{41}T_{13}$$

$$- C_{35}C_{51}T_{14} - C_{11}C_{36}T_{21} - C_{21}C_{36}T_{22} - C_{36}C_{41}T_{23}$$

$$- C_{36}C_{51}T_{24} - C_{11}C_{37}T_{31} - C_{21}C_{37}T_{32} - C_{37}C_{41}T_{33}$$

$$- C_{37}C_{51}T_{34} - C_{11}C_{38}T_{41} - C_{21}C_{38}T_{42} - C_{38}C_{41}T_{43} \\ - C_{38}C_{51}T_{44} - C_{11}C_{35}T_{11})/I_0$$

$$T_{11} = (-C_{25}C_{45}C_{54} + C_{24}C_{46}C_{54} + C_{25}C_{44}C_{55} - C_{23}C_{46}C_{55}$$

$$- C_{24}C_{44}C_{56} + C_{23}C_{45}C_{56})/G$$

$$T_{12} = (C_{15}C_{45}C_{54} - C_{14}C_{46}C_{54} - C_{15}C_{44}C_{55} + C_{13}C_{46}C_{55}$$

$$+ C_{14}C_{44}C_{56} - C_{13}C_{45}C_{56})/G$$

$$T_{13} = (-C_{15}C_{24}C_{54} + C_{14}C_{25}C_{54} + C_{15}C_{23}C_{55} - C_{13}C_{25}C_{55}$$

$$- C_{14}C_{23}C_{56} + C_{13}C_{24}C_{56})/G$$

$$T_{14} = (C_{15}C_{24}C_{44} - C_{14}C_{25}C_{44} - C_{15}C_{23}C_{45} + C_{13}C_{25}C_{45}$$

$$+ C_{14}C_{23}C_{46} - C_{13}C_{24}C_{46})/G$$

$$T_{21} = (C_{25}C_{45}C_{53} - C_{24}C_{46}C_{53} - C_{25}C_{43}C_{55} + C_{22}C_{46}C_{55}$$

$$+ C_{24}C_{43}C_{56} - C_{22}C_{45}C_{56})/G$$

$$T_{22} = (-C_{15}C_{45}C_{53} + C_{14}C_{46}C_{53} + C_{15}C_{43}C_{55} - C_{12}C_{46}C_{55}$$

$$- C_{14}C_{43}C_{56} + C_{12}C_{45}C_{56})/G$$

$$T_{23} = (C_{15}C_{24}C_{53} - C_{14}C_{25}C_{53} - C_{15}C_{22}C_{55} + C_{12}C_{25}C_{55}$$

$$+ C_{14}C_{22}C_{56} - C_{12}C_{24}C_{56})/G$$

$$T_{24} = (-C_{15}C_{24}C_{43} + C_{14}C_{25}C_{43} + C_{15}C_{22}C_{45} - C_{12}C_{25}C_{45}$$

$$- C_{14}C_{22}C_{46} + C_{12}C_{24}C_{46})/G$$

$$T_{31} = (-C_{25}C_{44}C_{53} + C_{23}C_{46}C_{53} + C_{25}C_{43}C_{54} - C_{22}C_{46}C_{54}$$

8- مراجع

- [1] Khorshidi, K., Siahpush, A., & Fallah, A. "Electro-Mechanical free vibrations analysis of composite rectangular piezoelectric nanoplate using modified shear deformation theories," In Persian, Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 4, No. 1, pp. 151- 160, 2017.
- [2] Khorshidi, K., Asgari, T., & Fallah, A. "Free vibrations analysis of functionally graded rectangular nano-plates based on nonlocal exponential shear deformation theory," Mechanics of Advanced Composite Structures, Vol. 2, No. 2, pp. 79- 93, 2015.
- [3] Khorshidi, K., & Bakhsheshy, A. "Free vibration analysis of a functionally graded rectangular plate in contact with a bounded fluid," Acta Mechanica, Vol. 226, No. 10, pp. 3401-3423, 2015.
- [4] Zhang, D.G. and Zhou, Y.H., "A theoretical analysis of FGM thin plates based on physical neutral surface," Computational Materials Science, Vol. 44, No. 2, pp. 716-720, 2008.
- [5] Abrate, S., "Functionally graded plates behave like homogeneous plates," Composites Part B: Engineering, Vol. 39, No. 1, pp. 151-158, 2008.

- [21] Malekzadeh, P. and Monajjemzadeh S.M., "Nonlinear response of functionally graded plates under moving load," *Thin-Walled Structures*, Vol. 96, No. 1, pp. 120–129, 2015.
- [22] Duc, N.D. and Cong, P.H., "Nonlinear vibration of thick FGM plates on elastic foundation subjected to thermal and mechanical loads using the first-order shear deformation plate theory," *Cogent Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1045222, 2015.
- [23] Fung, C.P. and Chen, C.S., "Imperfection sensitivity in the nonlinear vibration of functionally graded plates," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 25, No. 3, pp 425–461, 2006.
- [24] Fakhari, V., Ohadi and A., Yousefian, P., "Nonlinear free and forced vibration behaviour of functionally graded plate with piezoelectric layers in thermal environment," *Composite Structures*, 93 (2011) 2310–2321.
- [25] Hao, Y.X., Zhang W., and Yang J., "Nonlinear oscillation of a cantilever FGM rectangular plate based on third-order plate theory and asymptotic perturbation method," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 3, pp 402–413, 2011.
- [26] Zhang, W., Hao, Y., Guo, X. and Chen, L., "Complicated nonlinear responses of a simply supported FGM rectangular plate under combined parametric and external excitations," *Meccanica*, Vol. 47, No. 4, pp 985–1014, 2012.
- [27] Dinh Duc, N., Tuan, N.D., Tran, P. and Quan, T.Q., "Nonlinear dynamic response and vibration of imperfect shear deformable functionally graded plates subjected to blast and thermal loads," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 24, No. 4, pp 318-329, 2017.
- [28] Reddy JN, "Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis," CRC press, 2004.
- [29] Chia CY, "Nonlinear analysis of plates," McGraw-Hill International, Book Company, 1980.
- [30] Nayfeh, A.H. and Mook, D.T., "Nonlinear oscillation," John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [31] He, J.H., "Modified Lindstedt–Poincare methods for some strongly non-linear oscillations: Part I: expansion of a constant," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 37, No. 2, pp 309-314, 2002.
- [6] Najafizadeh, M.M. and Alayval, A., "Investigation of free vibrations of functionally graded rectangular plate using first-order shear deformation theory," In Persian, *Iranian society of mechanical engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 52- 68, 2006.
- [7] Khorshidi, K., Bakhsheshi, A. and Ghadrian, H., "The Study of the Effects of Thermal Environment on Free Vibration Analysis of Two Dimensional Functionally Graded Rectangular Plates on Pasternak Elastic Foundation," In Persian, *Journal of solid and fluid mechanics*, Vol. 6, No. 3, pp. 137-147, 2017.
- [8] Hosseini Hashemi, SH., Akhavan and Fadaee, M. "Exact closed-form free vibration analysis of moderately thick rectangular functionally graded plates with two bonded piezoelectric layers," In Persian, *Journal of Modares mechanical engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 57-74, 2012.
- [9] Abbasi, M., Najafizadeh, S.S.M. and Nezamabadi, A., "Vibration of two-dimensional functionally graded plate based on first-order shear deformation theory" *International Conference on New Research Findings in Industrial Engineering and Mechanical Engineering*, Tehran, Nikan Institute of Higher Education, 2015.
- [10] Azimiaraghi, S., Najafizadeh, S.M.M. and Nezamabadi, A., "Vibration of two-dimensional functionally graded plate based on third-order shear deformation theory" *International Conference on New Research Findings in Industrial Engineering and Mechanical Engineering*, Tehran, Nikan Institute of Higher Education, 2015.
- [11] Hosseini-Hashemi, S., Taher, H.R., Akhavan, H., and Omid, M., "Free vibration of functionally graded rectangular plates using first-order shear deformation plate theory," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 5, pp. 1276–1291, 2010.
- [12] Zhao, X., Lee, Y.Y. and Liew K.M., "Free vibration analysis of functionally graded plates using the element-free kp-Ritz method," *Journal of sound and Vibration*, Vol. 319, No. 3-5, pp. 918–939, 2009.
- [13] Yang, J. and Shen, H.S., "Vibration characteristics and transient response of shear-deformable functionally graded plates in thermal environments," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 255, No. 3, pp. 579–602, 2002.
- [14] Gupta, A., Talha, M. and Singh, B.N., "Vibration characteristics of functionally graded material plate with various boundary constraints using higher order shear deformation theory," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 94, No. 1, pp. 64–74, 2016.
- [15] Ghaheri, A. and Nosier, A., "Nonlinear forced vibrations of thin circular functionally graded plates," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 1- 10, 2015.
- [16] Khosravian, N., Tavakolpour, A., Roozegar, S. and Roozegar, J. "Dynamic simulation of nonlinear vibration of square plate with large displacement," *First National Conference on Mechanical and Mechatronics Engineering of Iran*, Shahrekord, Islamic Azad University, Shahrekord Branch, 2016.
- [17] Wang, Y.Q. and Zu, J.W., "Large-amplitude vibration of sigmoid functionally graded thin plates with porosities," *Thin-Walled Structures*, Vol. 119, No. 1, pp. 911–924, 2017.
- [18] Yazdi, A.A., "Homotopy perturbation method for nonlinear vibration analysis of functionally graded plate," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 135, No. 2, pp. 12–21, 2013.
- [19] Lotfavar, A., Rafiei Pour, H., Hamze Shalamdari, S. and Mohammadi, T., "Nonlinear vibration analysis of laminated composite plates using approximate and analytical methods," In Persian, *Iranian society of mechanical engineering*, Vol. 1, No. 17, pp. 16- 39, 2015.
- [20] Woo, J., Meguid S.A. and Ong L.S., "Nonlinear free vibration behavior of functionally graded plates," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 289, No. 3, pp. 595–611, 2006.



بررسی تاثیر افزودن ذرات زیرکونیا بر مقاومت به سایش و سختی پلی تترا فلورو اتیلن

محمد ملازاده¹، رضا ارغوانیان^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، گروه مهندسی ساخت و تولید، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

2- استادیار، مهندسی مواد، گروه مهندسی ساخت و تولید، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51579-44533، arghavanian@iaut.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 98/02/12

پذیرش: 98/12/14

کلیدواژگان:

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری

پلی تترا فلورو اتیلن زیرکونیا

مقاومت به سایش

چکیده

پلی تترا فلورو اتیلن (تفلون) به دلیل خواص منحصر به فرد کاربرد بسیاری بعنوان زمینه در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری دارد. در این تحقیق به تاثیر افزودن ذرات زیرکونیا بر نرخ سایش و ضریب اصطکاک تفلون خالص پرداخته شده است. برای این منظور نمونه‌های کامپوزیتی با افزودن 5 الی 30 wt.% زیرکونیا به زمینه تفلون دارای 10 wt.% گرافیت ساخته شد. ساخت نمونه‌ها به روش پرس سرد و پخت با استفاده از استاندارد ASTM D4894 و 4745 صورت پذیرفت. برای بررسی مقاومت به سایش نمونه‌ها آزمایش پین روی دیسک چرخان مطابق استاندارد ASTM G99 انجام شد. در نهایت سختی نمونه‌ها با استفاده از استاندارد ASTM D2240 (Shore D) بدست آمد. برای بررسی توزیع ذرات فاز ثانوی و همچنین بررسی محل سائیده شده پس از تست سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. کمترین نرخ سایش و ضریب اصطکاک به همراه بیشترین سختی در نمونه دارای 20wt.% زیرکونیا حاصل گردید. این نمونه تقریباً 3 برابر نرخ سایش کمتر و 12% سختی بیشتر نسبت به تفلون خالص نشان داد. این بهبود خواص در نتیجه ارتقاء توان حمل بار در نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل وجود ذرات زیرکونیا در زمینه پلیمری حاصل شده است.

Study of the zirconia particles incorporation effects on the wear resistance and hardness of polytetrafluoroethylene

Mohammad Mollazadeh, Reza Arghavanian*

Department of Manufacturing Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

* P.O.B. 51579-44533, Tabriz, Iran, arghavanian@iaut.ac.ir

Keywords

Polymer-matrix composites

Polytetrafluoroethylene

Zirconia

Wear resistance

Abstract

Polytetrafluoroethylene (Teflon) is one of the most widely used materials as the matrix in polymer-matrix composites due to its unique properties. In this study, the effect of zirconia particles addition on the wear rate and friction coefficient of pure Teflon has been investigated. For this, composite samples were manufactured by adding of 5 to 30wt.% zirconia into the PTFE matrix containing 10wt% graphite. Production of the samples were done by cold press and sintering method according ASTM D4894 and 4745 standards. To evaluate the wear resistance of the samples, pin on disk test was performed according to ASTM G99 standard. Finally, the hardness of the samples was measured using ASTM D2240 (Shore D) standard. The scanning electron microscope was applied to investigate the distribution of second phase particles and worn surfaces of the samples. The lowest wear rate and friction coefficient and the highest hardness were obtained for the sample containing 20wt.% zirconia. This sample had approximately 3 times lower wear rate and 1% higher hardness with respect to pure PTFE. This improvement is due to the higher load carrying capability of composite samples as a result of zirconia particles incorporation in the polymer matrix.

1-مقدمه

سخت ارتقاء داده می‌شود. افزودن دو یا چند ماده پرکننده دارای قابلیت مشخص در زمینه تفلون می‌تواند یک کامپوزیت با خواص سطحی مناسبتر ایجاد کند [2,1].

1-1- تحقیقات پیشین در زمینه افزودن ذرات فاز ثانوی به زمینه PTFE

تاکنون تحقیقات مهمی در زمینه تاثیر انواع افزودنی‌های معدنی، آلی، ترکیبی از هر دو و پارامترهای ساخت بر روی خواص مکانیکی و رفتار سطحی کامپوزیت

پلی تترا فلورو اتیلن¹ (PTFE) به دلیل خواص منحصر به فرد و ضریب اصطکاک پائین استفاده گسترده‌ای در سیستم‌های آبیندی و به عنوان روانکار خشک صنعتی، افزودنی به گریسهای آبیندی، کاهنده ضریب اصطکاک در صفحات خورشیدی و واشرهای مخصوص آبیندی دارد. عمده‌ترین ایراد تفلون خالص نرخ سایش بالا و جریان سرد (خزش) آن می‌باشد، که با افزودن فاز دوم

¹ Polytetrafluoroethylene

زیرکونیا تا دمای تقریبی 950°C می باشد و اندازه ذرات زیر $60\mu\text{m}$ خریداری شده از شرکت توسعه تفلون، و گرافیت (Gr) با اندازه ذرات زیر $300\mu\text{m}$ استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-VEGA\TECAN-LMUTM) از این ذرات در شکل 1 ارائه شده است. برای ساخت نمونه ها، مقادیر مورد نیاز از پودرهای مصرفی جهت ساخت نمونه های کامپوزیتی به شکل دیسک با قطر 30mm و ضخامت 10mm و بر اساس درصد های وزنی آورده شده در جدول 1، توسط ترازوی دیجیتالی با دقت 0.0001g اندازه گیری و آماده شد. پس از عبور ذرات تفلون از الک با مش 70، جهت همگن سازی کامل، ابتدا پودرها به مدت 3 دقیقه به طور مکانیکی، سپس بمدت 30 دقیقه به صورت لرزشی و متعاقباً 3 دقیقه به طور مکانیکی در ظروف شیشه ای تمیز و خشک مخلوط شدند. کد و ترکیب نمونه ها در جدول 1 ارائه شده است. برای ساخت نمونه های کامپوزیتی با دانسیته یکنواخت از قالب با دو سنبه متحرک (پرس دو جهته)، و فرآیند فشرده سازی به روش پرس سرد دو مرحله ای مطابق استاندارد ASTM D4894 استفاده شد. عملیات فشرده سازی برای نمونه های کامپوزیتی حاوی کمتر از 15wt.% ذرات سخت (زیرکونیا) بر اساس استاندارد ASTM D4894 با فشار پرس اولیه 500psi و مدت زمان توقف یک دقیقه در این فشار، و با فشار ثانویه 5000psi و زمان اعمال سه دقیقه انجام شد. برای نمونه های کامپوزیتی دارای بیش از 15wt.% زیرکونیا، عملیات فشرده سازی طبق استاندارد ASTM D 4745 با فشار و زمان توقف اولیه نظیر شرایط قبلی و در مرحله دوم با فشار ثانویه 10050psi به مدت سه دقیقه انجام شد. تمامی فرآیند فشرده سازی در دمای محیط و رطوبت محیط انجام گردید. پخت نمونه ها در کوره JUMO DTRON مدل 70304 با شرایط مندرج در استاندارد ASTM D4894، با زمان توقف دو ساعت در دمای 290°C و نیم ساعت در دمای نهائی پخت برابر با $380\pm 5^{\circ}\text{C}$ انجام شد. برای آماده سازی سطحی نمونه ها جهت مطالعات میکروسکوپی (SEM) از سنباده زنی و پولیش کاری استفاده شد. سنباده زنی با استفاده از سنباده های 800، 1000 و 2000 به همراه جریان آب انجام گردید. سپس پولیش کاری با پارچه مخصوص پولیش و اکسید آلومینیم مخلوط با آب در چندین مرحله صورت پذیرفت. پس از سنباده زنی و پولیش کاری، ابعاد متوسط نمونه ها توسط میکرومتر اندازه گیری و حجم نمونه ها محاسبه شد. چگالی تجربی با استفاده از جرم و حجم نمونه بدست آمد. چگالی تئوری نمونه ها نیز با استفاده از رابطه 1 محاسبه شد.

$$\frac{1}{\rho_{th}} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \frac{x_3}{\rho_3} \quad (1)$$

که در این رابطه ρ_{th} چگالی تئوری کامپوزیت، ρ_1 و x_1 به ترتیب چگالی و درصد وزنی PTFE، ρ_2 و x_2 به ترتیب چگالی و درصد وزنی گرافیت و ρ_3 و x_3 به ترتیب چگالی و درصد وزنی زیرکونیا می باشد. درصد تخلخل نمونه ها از رابطه 2 محاسبه شد.

$$v_{pro} = \left(\frac{\rho_{th} - \rho_{ex}}{\rho_{th}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه v_{pro} درصد حجمی تخلخل ها، ρ_{th} چگالی تئوری و ρ_{ex} چگالی تجربی کامپوزیت می باشند.

زمینه تفلون انجام شده است. از جمله می توان به بررسی تاثیر افزودنی های کربن، فیبرشیشه، گرافیت، مولیدین دی سولفید (MoS_2) [5,4,3]، نانو فیبر کربن (CNF) [5]، ویسکر تیتانات پتاسیم [6]، نانو ذرات آلومینا (Al_2O_3) [7]، ZnO [8]، برنز [9] و پلی اتر اتر کتون¹ (PEEK) [10] با درصد های مختلف وزنی اشاره کرد. همچنین تاثیر مقدار افزودنی ها بر میزان کریستالیزاسیون کامپوزیت [11] و تاثیر انواع افزودنی های اورگانیک و غیر اورگانیک بر نرخ سایش و ضریب اصطکاک [12] نیز بررسی شده است. علاوه بر این، در تحقیقاتی جداگانه تاثیر پارامترهای ساخت از قبیل شرایط پرس و نقش هوای حبس شده در ساختار کامپوزیت [13]، تاثیر افزودنی کربن و گرافیت بر نرخ سایش، با در نظر گرفتن تغییرات دما [14] و تاثیر مقدار کربن و همچنین تغییرات بار و سرعت در تست سایش بر روی حجم کاهش یافته در نتیجه سایش [16,15] مورد مطالعه قرار گرفته است. از سوی دیگر تاثیر دمای پخت بر مقدار کریستالیزاسیون کامپوزیت برپایه PTFE [17] نیز مطالعه شده است.

نتایج تحقیقات مذکور نشان می دهد، کربن و بویژه گرافیت با خاصیت روانکاری، جذب انرژی و انتقال حرارتی خوب باعث کاهش نرخ سایش و ضریب اصطکاک و افزایش خواص چکش خواری می شود، بطوری که نرخ سایش کامپوزیت حاوی 7wt.% گرافیت و 18wt.% کربن به مراتب کمتر از تفلون خالص است. افزودن فیبر شیشه، MoS_2 ، nano- Al_2O_3 ، CNF، ویسکر تیتانات پتاسیم و ZnO منجر به افزایش مقاومت به سایش تفلون در شده و افزودن فیبرها شکست زیر سطحی را به نصف کاهش می دهند. افزودن برنز قابلیت چکش خواری و مقاومت به سایش تفلون را افزایش می دهد. افزودن PEEK به میزان 10wt.% نرخ سایش PTFE را به نصف کاهش می دهد. بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر فرآیند ساخت تفلون از قبیل فشار پرس، دمای پخت و نرخ خنک کاری بر ریز ساختار، مقدار کریستالیزاسیون، خواص مکانیکی و رفتار سطحی تفلون نشان داد که بهترین نتیجه در پرس چند مرحله ای حاصل می شود که این امر در نتیجه کاهش حبس هوا در داخل کامپوزیت می باشد. همچنین بررسی تاثیر افزودن کربن، برنز و فیبر شیشه بر روی درجه کریستالیزاسیون تفلون نشان داد که با افزایش درصد فاز ثانوی در زمینه تفلون، درصد کریستالیزاسیون زمینه پلیمری کاهش می یابد. همچنین نتایج تحقیقات مذکور نشان داده است که بیشترین درصد کریستالیزاسیون و دانسیته برای PTFE در نتیجه پخت در دمای 380°C حاصل می شود.

2-1- هدف از تحقیق حاضر

زیرکونیا (ZrO_2) یکی از سرامیک های مهم صنعتی با خواص مکانیکی مناسب و پایداری شیمیایی و الکتروشیمیایی بالا می باشد و افزودن ذرات زیرکونیا به زمینه های مختلف باعث بهبود خواص کامپوزیتهای حاصله شده است [18-23]. با این وجود تاکنون تحقیق در مورد اثر افزودن این ذرات به زمینه PTFE انجام نشده و یا تحقیقات بسیار کمی در این موضوع انجام شده است. لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر افزودن ذرات زیرکونیا بر رفتار سطحی (مقاومت به سایش، ضریب اصطکاک و سختی) کامپوزیت زمینه PTFE دارای 10wt.% گرافیت (Gr) پرداخته شده است.

2- مواد و روش ها

در این تحقیق از ذرات PTFE نوع گلوله ای با اندازه ذرات زیر $180\mu\text{m}$ (TP5NC)، ذرات زیرکونیا با ساختار کریستالی مونوکلینیک (که ساختار پایدار

¹ Polyetheretherketone

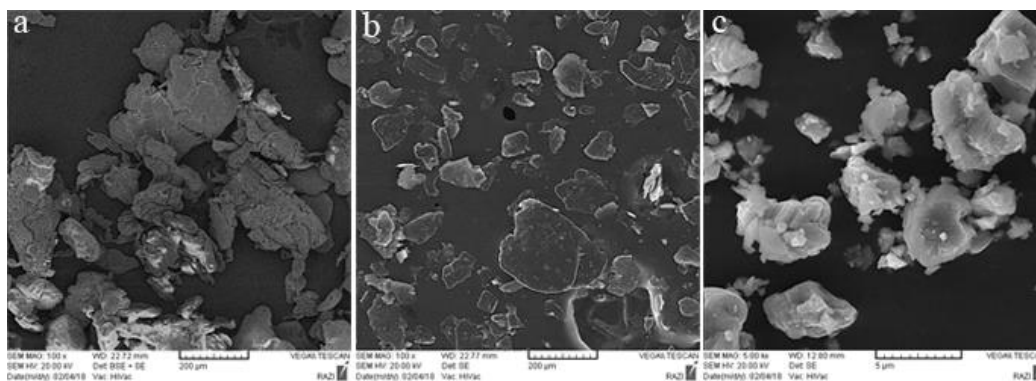


Fig. 1 SEM micrographs of applied powders for composite samples manufacturing: a) PTFE, b) Graphite and c) ZrO₂

شکل 1 تصاویر SEM از پودرهای مصرفی برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی: (a) PTFE، (b) گرافیت و (c) ZrO₂

کاهش می‌دهد. این کاهش دانسیته در جدول 1 برای نمونه‌های دارای بیش از 20wt.% زیرکونیا قابل رویت است.

شکل 3 توزیع عنصر زیرکونیم در تعدادی از نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد. این توزیع می‌تواند بیانگر توزیع ذرات زیرکونیا در این نمونه‌ها باشد. کلوخه‌ای شدن ذرات زیرکونیا تا حدودی در مرز دانه‌های تفلون در نمونه دارای 20wt.% زیرکونیا رخ داده است (شکل 3b). کلوخه‌ای شدن شدید این ذرات در نمونه دارای 30wt.% زیرکونیا مشهود است (شکل 3c). از تصاویر 2 و 3 می‌توان چنین استنباط نمود که با افزایش مقدار زیرکونیا تا 20wt.% در زمینه PTFE دارای 10wt.% گرافیت، توزیع این ذرات تقریباً یکنواخت و بدون کلوخه‌ای شدن شدید باقی می‌ماند اما افزایش بیشتر زیرکونیا منجر به پدیدار شدن کلوخه‌های شدید می‌شود.

3-2- بررسی خواص نمونه‌ها

3-2-1- نرخ سایش

در جدول 1 نتایج آزمایشات دانسیته سنجی، سایش و سختی سنجی بیان شده است. بر اساس نتایج تست سایش بین روی دیسک، نمونه F (دارای 20wt.% زیرکونیا) بیشترین مقاومت به سایش را دارد. افزودن 20wt.% ذرات سخت زیرکونیا منجر به کاهش نرخ سایش به میزان 63% در مقایسه با نمونه A (PTFE خالص) و کاهش 57% در مقایسه با نمونه کامپوزیت B (تفلون حاوی 10wt.% گرافیت بدون زیرکونیا) شده است. بر اساس نتایج تحقیقات گذشته [3، 1] حضور ذرات سخت در زمینه تفلون، که دارای توانایی حمل بار بالاتری نسبت به زمینه می‌باشند، موجب جلوگیری از لغزش راحت مولکولهای تفلون و در نتیجه کوچکتر شدن اندازه تکه‌های جدا شده ناشی از سایش می‌شود. همچنین نشست ذرات ریز جدا شده فاز سخت در زبری‌های سطح محل سایش، موجب افزایش طول عمر فیلم نازک سایش روی پین ساینده می‌شود.

در شکل 4 تصاویر SEM از محل سائیده شده نمونه‌های B و F پس از تست سایش ارائه شده است. در نمونه B پدیده جریان سرد و جدا شدن تکه‌ای دانه‌های تفلون از سطح به صورت بشقابی و ترکهای سطحی ناشی از تست سایش پین روی دیسک مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر نمونه F، حضور ذرات سخت زیرکونیا در زمینه تفلون باعث کاهش جدا شدن بشقابی ذرات می‌شود؛ این امر می‌تواند موجب کاهش نرخ سایش و بهبود رفتار سطحی شود.

برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سختی سنجی مدل Swick Roell مطابق استاندارد ASTM D2240 Shore D از 5 قسمت هر نمونه با بار 50N و زمان اعمال 10s در دمای محیط سختی سنجی صورت پذیرفته و میانگین نتایج محاسبه شد.

بررسی رفتار سطحی با دستگاه تست سایش پین روی دیسک چرخان طبق استاندارد G99 ASTM با پین فولادی 100 Cr6 (AISI 52 100)، با سرعت 0.1ms⁻¹، مسافت 200m و بار 1050g انجام گردید. نرخ سایش با استفاده از رابطه 3 محاسبه شد.

$$\omega = \Delta M / (L \cdot \rho \cdot W) \quad (3)$$

که در این رابطه ω نرخ سایش بر حسب $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ ، ΔM جرم مواد کم شده بر حسب g، L مسافت بر حسب m، ρ دانسیته بر حسب gmm^{-3} و W مقدار بار اعمالی بر حسب N می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- مطالعه ریز ساختار و توزیع ذرات در نمونه‌ها

شکل 2 تصاویر SEM از نمونه‌های کامپوزیتی دارای مقادیر مختلف زیرکونیا را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که از نمونه b (دارای 5wt.% زیرکونیا) تا نمونه g (دارای 30wt.% زیرکونیا) میزان زیرکونیا در ساختار افزایش یافته است. با افزایش مقدار زیرکونیا در ساختار، تجمع و کلوخه‌ای شدن این ذرات در مرز دانه‌های تفلون رخ داده است. احاطه شدن ذرات زیرکونیا توسط PTFE، به دلیل سازگاری مناسب تفلون با انواع فازهای ثانوی، و عدم کلوخه شدن زیاد این ذرات تا نمونه دارای 20wt.% زیرکونیا نیز قابل مشاهده است. می‌توان گفت که پخت مناسب منجر به احاطه خوب ذرات زیرکونیا توسط فاز زمینه (تفلون) شده و این امر، سطحی همگن و بدون تخلخل را بوجود آورده است. بر اساس نتایج تحقیق کنته و همکارانش [11]، افزایش مواد سخت در زمینه تفلون باعث کاهش اندازه دانه‌های زمینه می‌شود. مصداق این امر در تصاویر SEM قابل مشاهده است (شکل 2). در نمونه‌های دارای بیش از 20wt.% زیرکونیا، تجمع بیش از حد زیرکونیا در بین دانه‌های تفلون باعث کلوخه‌ای شدن زیاد این ذرات می‌شود. این امر منجر به عدم نفوذ فاز زمینه به داخل کلوخه‌ها شده و تخلخل‌های باقیمانده در بین ذرات دانسیته نمونه‌ها را

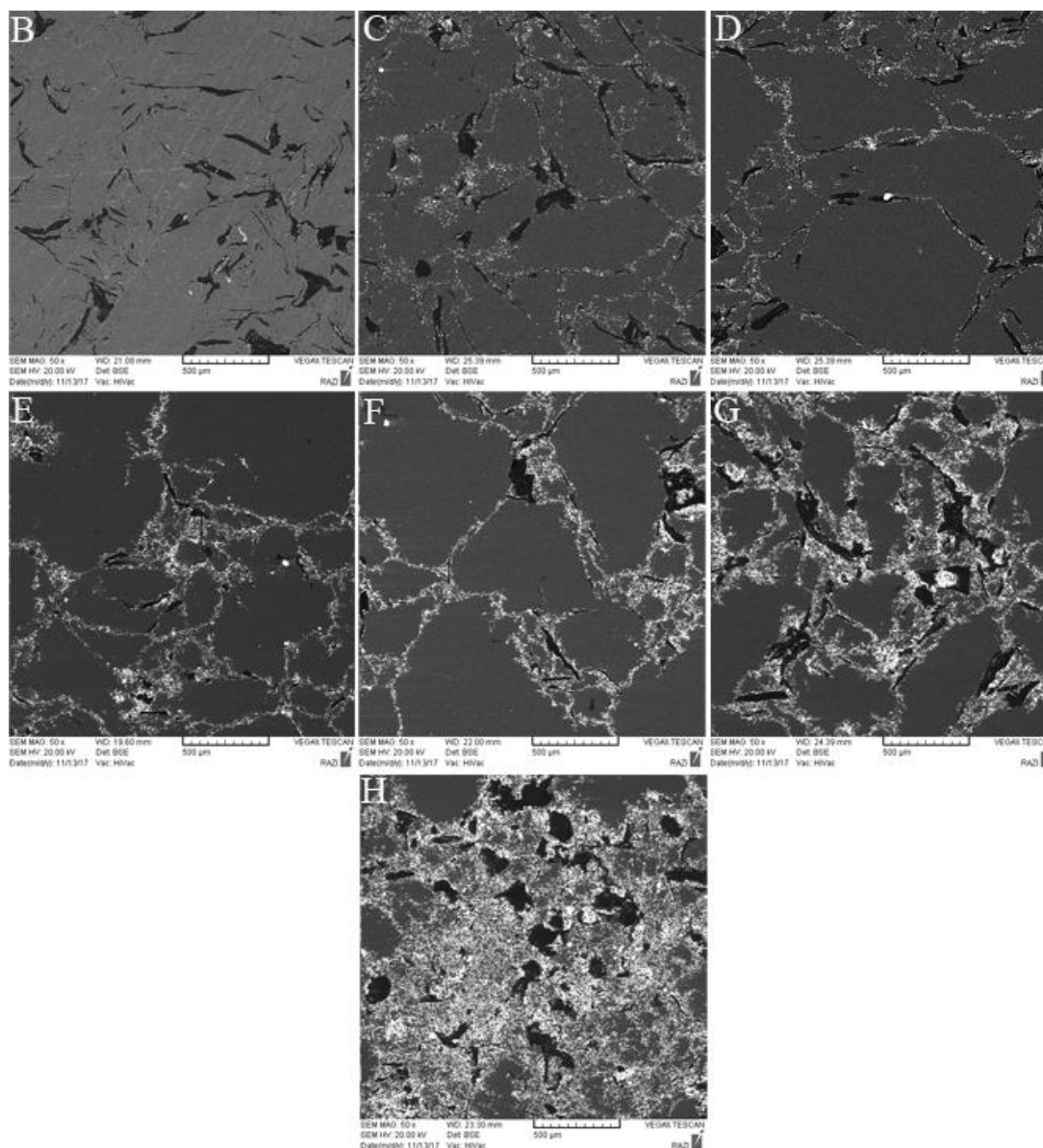


Fig. 2 SEM micrographs from PTFE containing 10wt.% graphite without zirconia (B) and with various zirconia contents of: C) 5wt.%, D) 10wt.%, E) 15wt.%, F) 20wt.%, G) 25wt.% and H) 30wt.%

شکل 2 تصاویر SEM از نمونه‌های PTFE دارای 10wt.% گرافیت بدون زیرکونیا (B) و کامپوزیتی حاوی مقادیر مختلف زیرکونیا: (C) 5wt.%, (D) 10wt.%, (E) 15wt.%, (F) 20wt.%, (G) 25wt.% و (H) 30wt.%

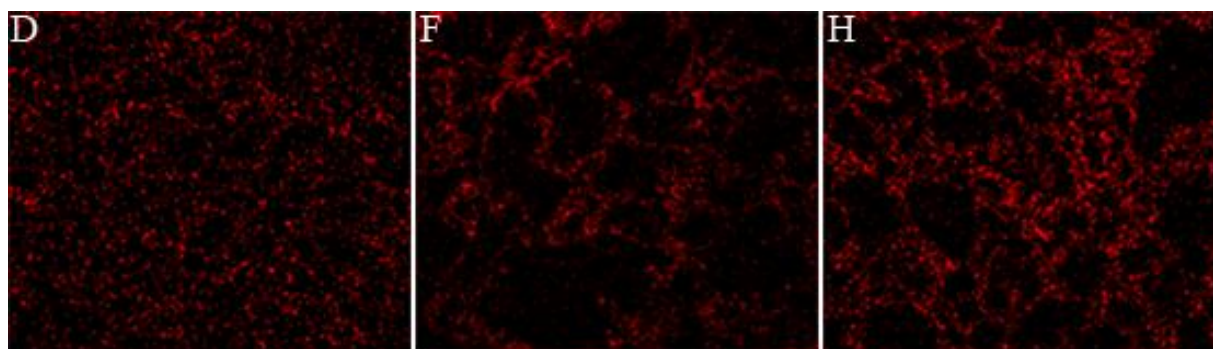


Fig. 3 Zirconium elemental distribution patterns in PTFE containing 10wt.% graphite composites with various zirconia contents of: D) 10wt.%, F) 20wt.% and H) 30wt.%

شکل 3 الگوی توزیع عنصری زیرکونیم در کامپوزیتهای PTFE دارای 10wt.% گرافیت حاوی مقادیر مختلف زیرکونیا: (D) 10wt.%, (F) 20wt.% و (H) 30wt.%

جدول 1 ترکیب، دانسیته، سختی و پارامترهای حاصل از تست سایش برای نمونه‌های مختلف

Table 1 Composition, density, hardness and wear test parameters for various samples

کد نمونه	ترکیب نمونه	دانسیته تجربی (gcm ⁻³)	دانسیته تئوری (gcm ⁻³)	درصد تخلخل	سختی (shore D)	ضریب اصطکاک	کاهش وزن (g)	کاهش حجم (mm ³)	نرخ سایش (×10 ⁻⁵ mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹)
A	PTFE	2.1611	2.2	1.76	50	0.150	0.00321	1.48200	73.755
B	PTFE-10Gr	2.1475	2.2043	2.57	53	0.015	0.00272	1.26795	63.082
C	PTFE-10Gr/5ZrO ₂	2.1887	2.2757	3.82	53	0.250	0.00223	1.02306	50.067
D	PTFE-10Gr/10ZrO ₂	2.2449	2.3502	4.33	54	0.340	0.00192	0.85527	42.550
E	PTFE-10Gr/15ZrO ₂	2.2995	2.4297	5.36	54	0.180	0.00154	0.74022	36.830
F	PTFE-10Gr/20ZrO ₂	2.3861	2.5148	5.12	56	0.020	0.00142	0.54200	26.968
G	PTFE-10Gr/25ZrO ₂	2.4320	2.6060	6.67	55	0.200	0.00170	0.69850	34.750
H	PTFE-10Gr/30ZrO ₂	2.4489	2.7042	9.44	53	0.250	0.00230	0.93919	46.726

و در نتیجه کلوخه‌ای شدن این ذرات در مرز دانه‌های تفلون شده است (شکل‌های 2 و 3). این امر می‌تواند موجب افزایش فاصله مولکول‌های زنجیری تفلون (تخلخل)، کاهش دانسیته، ضعیف شدن پیوند بین دانه‌ها و در نتیجه کاهش توان حمل بار کامپوزیت و افزایش نرخ سایش شود. در واقع جدا شدن تکه‌ای ذرات و عدم تشکیل فیلم مداوم نازک بین پین و دیسک، که ناشی از کاهش قدرت پیوند بین دانه‌ها است، می‌تواند منجر به افزایش نرخ سایش شود.

لذا می‌توان نتیجه گرفت که حضور ذرات سخت زیرکونیا تا 20wt.% در زمینه PTFE-10Gr، با کاهش پدیده جریان سرد و جدا شدن تکه‌ای موجب کاهش نرخ سایش می‌شود. در واقع افزایش فصل مشترک بین دانه‌های تفلون و زیرکونیا مانع از جابجایی راحت مولکول‌های تفلون (جریان سرد) شده و به دلیل توان حمل بار بالای ذرات زیرکونیا، حضور این ذرات منجر به افزایش توان حمل بار کامپوزیت شده است. افزودن بیش از 20wt.% زیرکونیا به زمینه تفلون (نمونه‌های G و H) موجب تجمع بیش از حد این ذرات در مرز دانه‌ها

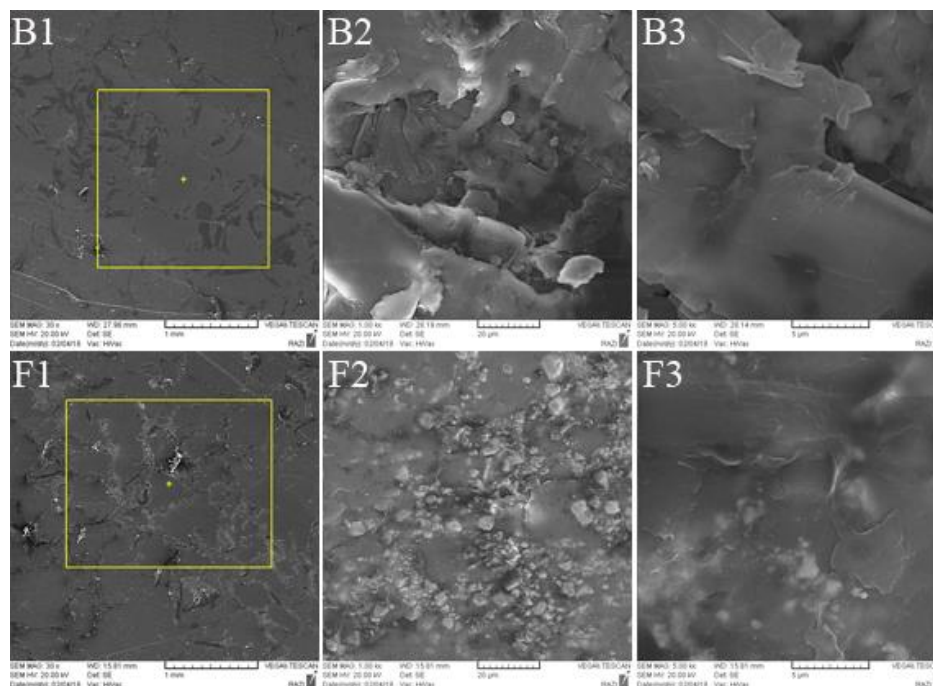


Fig. 3 SEM micrographs from worn surfaces of B (PTFE-10Gr) and F (PTFE-10Gr/20ZrO₂) samples with various magnifications of: series-1: 30×, series-2: 1000× and series-3: 5000×

شکل 4 تصاویر SEM از سطوح سائیده شده نمونه‌های B (PTFE-10Gr) و F (PTFE-10Gr/20ZrO₂) در بزرگنماییهای مختلف: سری 1: 30×، سری 2: 1000× و سری 3: 5000×

طور معمول به منظور کاهش نرخ سایش و ضریب اصطکاک در کامپوزیت‌های زمینه تفلون استفاده می‌شوند [2]. افزودن ذرات کربن و گرافیت به زمینه تفلون

همچنین بر اساس نتایج مندرج در جدول 1، حضور 10wt.% گرافیت (نمونه B) موجب افزایش مقاومت به سایش به میزان 14% و کاهش ضریب اصطکاک به میزان 90% نسبت به تفلون خالص شده است. گرافیت و کربن به

تفلون، باعث کاهش نرخ سایش به میزان 63%، افزایش سختی به میزان 12% و کاهش ضریب اصطکاک در حدود 87% نسبت به PTFE خالص می‌شود. کمترین نرخ سایش به همراه بیشترین سختی و کمترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه تفلون دارای 10wt.% گرافیت و 20wt.% زیر کونیا است.

✓ افزودن مقادیر بیشتر از 20wt.% زیر کونیا به PTFE-10Gr منجر به کاهش سختی و افزایش نرخ سایش و ضریب اصطکاک نسبت به نمونه PTFE-10Gr/20ZrO₂ می‌شود که این امر در نتیجه کلوخه‌ای شدن بیش از حد ذرات ZrO₂ در مرز دانه‌های تفلون می‌باشد.

✓

5- مراجع

- [1] Suh, J. and Bae, D., "Mechanical Properties of Polytetrafluoroethylene Composite with Graphene Nanoplate by Solid Processing," Composites Part B: Engineering, Vol. 95, No. C, pp. 317-323, 2016.
- [2] Ebnasajjad, S., "Expanded PTFE Applications Handbook: Technology, Manufacturing and Application," First ed., Matthew Deans Acquisition, Cambridge, pp. 9-116, 2016.
- [3] Conte, M. and Igartua, A., "Study of PTFE Composite Tribological Behavior," Wear, Vol. 296, No. 1-2, pp. 568-574, 2012.
- [4] Khedkar, J., Negulescu, I. and Meletis, E. I., "Sliding Wear Behavior of PTFE Composite," Wear, Vol. 252, No. 5-6, pp. 361-369, 2002.
- [5] Shi, Y., Feng, X., Wang, H., and Lu, X., "The Effect of Surface Modification on the Friction and Wear Behavior of Carbon Nano Fiber Filled PTFE Composite," Wear, Vol. 264, No. 11-12, pp. 934-939, 2008.
- [6] Xin, F., Xiaosong, D. Yijun, S., Huaiyuan, W., Shenghua, S. and Xiaohua, L., "A Study on the Friction and Wear Behavior of Polytetrafluoroethylen Filled with Potassium Titanate Whisker," Wear, Vol. 261, No. 11-12, pp. 1208-1212, 2006.
- [7] Burris, D. L. and Gregory Sawyer, W., "Improved Wear Resistance in Alumina PTFE Nano Composite with Irregular Shaped Nano Particles," Wear, Vol. 260, No. 7-8, pp. 915-918, 2006.
- [8] Su, F. H., Zhang, Z. Z. and Liu, W. M., "Friction and Wear Behavior of Hybrid Glass/PTFE Fabric Composite Reinforced with Surface Modified Nanometer ZnO," Wear, Vol. 265, No. 3-4, pp. 311-318, 2008.
- [9] Wang, Y. and Yan, F., "A Study on Tribological Behavior of Transfer Film of PTFE/Bronze Composite," Wear, Vol. 262, No. 7-8, pp. 876-882, 2007.
- [10] Burris, D. L. and Sawyer, W. G., "Tribological Behavior of PEEK Components with Compositionally Graded PEEK/PTFE Surfaces," Wear, Vol. 262, No. 1-2, pp. 220-224, 2007.
- [11] Conte, M., Pinedo, B. and Igartua, A., "Role of Crystallinity on Wear Behavior of PTFE Composites," Wear, Vol. 307, No. 1-2, pp. 81-86, 2013.
- [12] Panda, A. and Dyadyura, K., Valíček, J., Harníčárová, M., Zajac, J., Modrák, V., Pandová, I., Vrabel, P., Nováková-Marcínčinová, E. and Pavelek, Z., "Manufacturing Technology of Composite Materials-Principles of Modification of Polymer Composite Materials Technology Based on Polytetrafluoroethylene," Materials (Basel), Vol. 10, No. 4, pp. 377-396, 2017.
- [13] Gamboni, O. C., Riul, C., Billardon, R., Filho, W. W. B., Schmitt, N. and Canto, R. B., "On the Formation of Defects Induced by Air Trapping During Cold Pressing of PTFE Powder," Polymer, Vol. 82, pp. 75-86, 2016.
- [14] Kowandy, C., Richard, C. and Chen, Y. M., "Characterization of Wear Particles for Comprehension of Wear Mechanism: Case of PTFE against Cast Iron," Wear, Vol. 265, No. 11-12, pp. 1714-1719, 2008.
- [15] Gujrathi, S. M., Dhamande, L. S. and Patore, p. M., "Wear Studies on Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composites: Taguchi Approach," Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 3, No. 2, pp. 47-51, 2013.
- [16] Wang, Y. and Yan, F., "Tribological Properties of Transfer Film of PTFE Based Composite," Wear, Vol. 261, No. 11-12, pp. 1359-1366, 2006.
- [17] Feng, B., Fang, X., Wang, H. X., Dong, W. and Li, Y. C., "The

باعث افزایش هدایت حرارتی به میزان 10% نسبت به تفلون خالص می‌شود. افزایش هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی، مقاومت به سایش را ارتقاء می‌دهد.

3-2-2- ضریب اصطکاک

تفلون به دلیل ساختار مولکولی خاص کمترین انرژی سطحی و کمترین ضریب اصطکاک را در بین پلیمرهای رایج صنعتی دارد [1]. بر اساس نتایج تست سایش موجود در جدول 1، افزودن زیر کونیا تا 10wt.% منجر به افزایش ضریب اصطکاک نسبت به نمونه PTFE-10Gr شده است. افزایش ضریب اصطکاک می‌تواند به دلیل عدم تشکیل فیلم نازک مداوم بین پین سایش با دیسک (نمونه‌ها) به دلیل مقدار کم ذرات سخت زیر کونیا و عدم پیوند محکم در بین دانه‌های تفلون باشد. در ادامه با افزایش مقدار زیر کونیا در نمونه تا 20wt.%، ضریب اصطکاک کاهش یافته است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش فاز سخت زیر کونیا در مرز دانه‌ها، کاهش جدا شدن تکه‌ای و در نتیجه تشکیل فیلم لایه‌ای نازک مداوم باشد. این کاهش ضریب اصطکاک در نتیجه افزودن فازهای ثانوی با نتایج تحقیقات قبلی همخوانی دارد [9,8,6]. می‌توان مشاهده نمود که نمونه F (دارای 20wt.% زیر کونیا) کمترین ضریب اصطکاک در بین نمونه‌های کامپوزیتی دارای زیر کونیا را به خود اختصاص داده است و ضریب اصطکاک آن اندکی بیشتر از نمونه PTFE-10Gr می‌باشد. همانطوریکه نتایج قبلی نشان می‌دهد، افزودن بیشتر ZrO₂ به تفلون منجر به کلوخه‌ای شدن این ذرات در بین مرز دانه‌ها شده و در نتیجه موجب افزایش تخلخل و کاهش دانسیته می‌شود. افزایش کلوخه‌ای شدن باعث جدا شدن راحت ذرات زیر کونیا و تجمع این ذرات جدا شده پشت پین ساینده شده، و احتمالاً این امر موجب افزایش ضریب اصطکاک در نمونه‌های G و H شده است.

3-2-3- سختی

بر اساس نتایج سختی سنجی مندرج در جدول 1، افزودن گرافیت به تفلون منجر به افزایش سختی شده است به طوریکه سختی نمونه B (دارای 10wt.% گرافیت) نسبت به نمونه A (تفلون خالص) به میزان 6% افزایش یافته است. همچنین افزودن زیر کونیا تا 20wt.% سختی را باز هم افزایش داده و سختی نمونه F به میزان 12% بیشتر از نمونه A است. افزودن ذرات سخت بعنوان عوامل تقویت کننده، به دلیل افزایش توان حمل بار، می‌تواند سختی را افزایش دهد. این افزایش سختی باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود [2,1]. همچنین ممانعت ذرات سخت ZrO₂ از تغییر فرم دانه‌های PTFE نیز عامل دیگری برای افزایش سختی است.

4- نتیجه‌گیری

- ✓ کامپوزیت PTFE-Gr را می‌توان به شیوه پرس سرد و پخت تولید کرد. افزودن 10wt.% گرافیت به تفلون موجب کاهش ضریب اصطکاک به میزان 90%، کاهش نرخ سایش تا حدود 14% و افزایش سختی در حد 6% نسبت به PTFE خالص می‌شود.
- ✓ کامپوزیت PTFE-10Gr/ZrO₂ را نیز می‌توان به شیوه پرس سرد و پخت تولید کرد. بیشینه مقدار ممکن برای زیر کونیا در این کامپوزیت، که توزیع تقریباً یکنواخت و قابل قبولی در ساختار داشته باشد، برابر با 20wt.% است. در مقادیر بیشتر، کلوخه‌ای شدن شدید ذرات زیر کونیا در مرز دانه‌های تفلون به وقوع می‌پیوندد.
- ✓ حضور ذرات سخت زیر کونیا به همراه گرافیت در زمینه تفلون، به دلیل ارتقاء توان حمل بار زمینه و جلوگیری از لغزش راحت مولکولهای

- Effect of Crystallinity on Compressive Properties of Al-PTFE," *Polymers (Basel)*, Vol. 8, No. 10, pp. 356-369, 2016.
- [18] Salahi, E., Alidoostie, M., Isafi, S. and Mobasherpoor, I., "The Effects of Temperature on the Hardness and Microstructural properties of Hydroxyapatite/Zirconia-Alumina Nano Composites," In Persian, *Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-8, 2012.
- [19] Aziziyan, M., Rabiee, S. M. and Novroozi, S., "Investigations on the YSZ Additions' Effects on the Microstructure of Calcium Phosphate-Zirconia Glass-Ceramic Nano Composite," In Persian, *Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 9-16, 2012.
- [20] Pahnaneh, F., Naeimi, F. and Aghakhani, M., "Improvement of Surface Properties of Ti64 Alloy in the Presence of ZrO₂ Nano-Particles by Using of Tungsten Inert Gas Welding," In Persian, *Iranian Journal of Surface Science and Engineering*, Vol. 13, No. 33, pp. 89-100, 2017.
- [21] Salehi, S., Fathi, M. H., and Raeissi, K., "Fabrication and characterization of nanostructured hydroxyapatite (HA)/ yttria stabilized zirconia (YSZ) composite coatings with various contents of yttria," In Persian, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 29, No. 1, pp. 31-43, 2010.
- [22] Salehi, H. R., Salami, S., Atarian, M. and Ozhdelnia, O., "Fabrication and Characterization of Pyrolyzed Phenolic/Carbon Nanocomposite Reinforced by Metal Oxide Nanoparticles," In Persian, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 32, No. 1, pp. 39-53, 2013.
- [23] Jamshidi-Alashti, R., Borouni, M. and Niroumand, B., "Production and microstructural investigation of cast ZrO₂/AZ91 nanocomposite," In Persian, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 32, No. 2, pp. 55-66, 2013..



قالب پیش نویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرم افزار ورد (استایل عنوان)

نام و نام خانوادگی نگارنده اول¹، نام و نام خانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و ... نگارنده سوم³، ... (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمی نگارنده، رشته تخصصی، نام سازمان، نام شهر (استایل مشخصات نویسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 13114-16846، پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

چکیده (سبک عنوان چکیده)

اطلاعات مقاله:

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژگان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:
Composites, Foam, Shear, Deflection

Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

1- مقدمه (استایل عنوان سطح 1)

انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن

می توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:

Paste option → match with Destination format

پاراگراف های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه ۵ میلی متر

از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

برای آماده سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت¹) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با کپی و سپس چسباندن (پیست²) متن خود در این فایل، سبک³ مربوط را

³ Style

¹ Template

² Paste

به همگی شکل‌ها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکل‌ها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سبک متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

شکل‌ها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکان‌های ذکر شده، مشخص نمایید:

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند. عناوین افقی و عمودی شکل‌ها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک می‌آیند (توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن^۳ با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین^۳) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد. از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

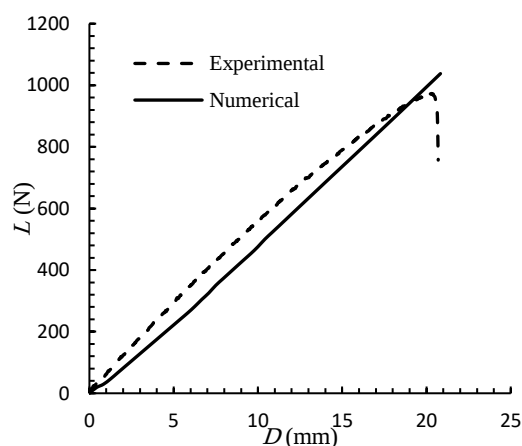


Fig. 1 Results of three- point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

• موقع استفاده از علایمی نظیر ، ، ، و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علایم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

• حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک‌تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,7,5].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

1-2- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی^۱ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال ۱.۲ صحیح و ۱/۲ غلط می‌باشد.

• اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

1-2- شکل‌ها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکل‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، شکل‌ها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در زیر شکل قرار می‌گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می‌گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپ‌چین باشد.

³ Gridlines

¹ English (Style: Sub Title)

² Times New Roman

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
 - عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
 - جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
 - به همهی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
 - جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
 - استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
 - در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
 - متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
 - جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.
- برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم	10	9
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها ^(*)	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

^(*)فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله¹ موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث² 9pt و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدرو برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ³ استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطری بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله $(a.b)$ به جای نقطه ضرب $(a \cdot b)$ استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املاي زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است. در مورد «ها»ی جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهات» و «اساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

1-4- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنوت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان³ مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علایم باید دقیقاً یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست علایم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

E مدول یانگ (Nm^{-2})

P نیرو (Nm^{-2})

T دما (K)

علایم یونانی

σ تنش (Nm^{-2})

ε کرنش

بالانویس‌ها

k تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کروشه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً تاکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.
- ✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.
- ✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به‌طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote