



مطالعه رفتار پیوستگی میلگرد آجدار فولادی با بتن فوق توانمند تقویت شده با میکروالیاف فولادی با استفاده از روش المان محدود چندمقیاسی

محمدرضا اقدمی ثانی¹، عادل فردوسی^{2*}، مسعود پوربابا³، یوسف زندی⁴، سید سعید میرزایی²

1- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

2- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

3- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه

4- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 69718-76119، a_ferdousi@iaut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در تحقیق حاضر با توسعه مدل المان محدود به بررسی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد فولادی آجدار از بتن فوق توانمند الیافی پرداخته شد. مدل المان محدود چندمقیاسی به صورت سه فاز مجزا شامل بتن فوق توانمند به صورت ماده ایزوتروپ، میکروالیاف فولادی و میلگرد شبیه سازی شد. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع بینانه تر، برای اولین بار آج های میلگرد نیز شبیه سازی شده و اندرکنش بین میلگرد و الیاف با بتن توسط مدل ناحیه تماس چسبنده اعمال شده است. پارامترهای مدل رفتاری ناحیه تماس چسبنده با کالیبره کردن نتایج مدل المان محدود و نتایج آزمون تجربی تعیین شد. در نهایت، پس از صحت سنجی نتایج المان محدود چندمقیاسی، بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، جابجایی متناظر و کار انجام لازم برای بیرون کشیدگی میلگرد با استفاده از منحنی های نیرو-لغزش تعیین شد. عواملی نظیر درصد حجمی میکروالیاف فولادی، طول مهارشدگی و قطر میلگرد، بر مقاومت پیوستگی میلگرد و بتن فوق توانمند الیافی ارزیابی گردید. نتایج نشان می دهد که طول مهارشدگی تأثیر قابل ملاحظه ای بر رفتار پیوستگی میلگرد داشته و با افزایش طول مهارشدگی، نیروی بیرون کشیدگی نیز بیشتر می شود. با توجه به نتایج مشاهده می شود برای میلگرد با قطر 20 mm، با افزایش میزان الیاف از 0% به 2% نیروی بیرون کشیدگی و کار بیرون کشیدگی به ترتیب در حدود 30% و 22% افزایش می یابد.

دریافت: 1400/08/17

پذیرش: 1400/12/08

کلیدواژگان

رفتار پیوستگی، بتن فوق توانمند الیافی، المان محدود چندمقیاسی، میکروالیاف فولادی، نیروی بیرون کشیدگی.

Investigation of bonding behavior of steel ribbed rebar embedded in ultra-high performance concrete reinforced with steel microfiber using multi-scale finite element method

Mohammad Reza Aghdami Sani^{1*}, Adel Ferdousi^{1*}, Masoud Porbaba², Yousef Zandi¹, Seyed Saeed Mirrezaei¹

1- Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

* P.O.B. 69718-76119, Tabriz, Iran, a_ferdousi@iaut.ac.ir

Keywords

Bond behavior, Ultra high performance concrete, Multi-scale finite element, Steel microfibers, Pull-out force.

Abstract

In this study, by developing the finite element model, the pull-out behavior of ribbed steel rebar from ultra-high performance fiber reinforced concrete was investigated. For this purpose, the multi-scale finite element model was simulated in three separate phases, including ultra-high performance concrete in the form of isotropic material, steel microfibers and ribbed rebar. In order to consider more realistic assumptions, Rib pattern of rebar were simulated for the first time and the interaction between concrete with rebar and fibers was modeled by using the adhesive contact zone model. The constant parameters of the adhesive contact zone model were determined by calibrating the results of the finite element model and those of the experimental pull-out test. Finally, after validating the multi-scale finite element results, the maximum pull-out force, the corresponding displacement and the work required for the rebar pull-out were determined using the force-slip curves. Effective parameters such as bond length and rebar diameter, and the volume percentage of steel microfibers, on the bond strength were evaluated. The results show that the bond length has a significant effect on the bonding behavior of the rebar and with increasing the bond length the pull-out force also increases. According to the results, for rebar with a diameter of 20 mm, by increasing the amount of fibers volume from 0 to 2%, the pull-out force and the work increase by about 30% and 22%, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Aghdami Sani, M. R., Ferdousi, A., Porbaba, M., Zandi, Y., Mirrezaei, S. S., "Investigation of bonding behavior of steel ribbed rebar embedded in ultra-high performance concrete reinforced with steel microfiber using multi-scale finite element method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1632-1642, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.540625.1753>

1-مقدمه

خصوصیات منحصر بفرد کامپوزیت‌های پایه سیمان مانند هزینه کم ساخت، در دسترس بودن تمام و یا بخش اعظم منابع تولید آن در طبیعت، سازگار بودن در بسیاری از محیط‌ها و شرایط اقلیمی و وزن نسبتاً پایین، باعث شده است تا این ماده به عنوان یکی از مصالح اصلی مورد استفاده در صنعت ساختمان باشد [1-3]. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در تکنولوژی کامپوزیت‌های پایه سیمان، توسعه استفاده از انواع مختلف الیاف و نانوذرات در آن می‌باشد [4-7]. نسل جدید این نوع مواد بنام بتن فوق‌توانمند الیافی¹ می‌باشد که نسبت به بتن‌های معمولی، بتن فوق‌توانمند و بتن‌های الیافی بهبود قابل توجهی در مشخصات مکانیکی داشته و کاربردهای بسیار مفیدی در صنعت ساخت‌وساز پیدا کرده است [7-9]. تقویت با الیاف برای تضمین رفتار غیر ترد و افزایش شکل‌پذیری و همچنین نسبت چسباننده زیاد با سنگ‌دانه‌های خاص از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن‌های فوق‌توانمند الیافی است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود اختصاص داده است [10].

به علت افزایش استفاده از بتن‌های فوق‌توانمند الیافی در ساختمان‌های خاص، این نوع بتن‌ها می‌توانند نقش مهمی در نجات جان افراد در کنار صرفه اقتصادی و بهره‌گیری بهتر از فضا را داشته باشند. افزودن الیاف به بتن فوق‌توانمند شکل‌پذیری، مقاومت به ضربه، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و استحکام آن در برابر بارهای دینامیکی و گسیختگی نرم را افزایش می‌دهد [11-14]. علاوه بر آن، استفاده از انواع مختلف الیاف امکان گسیختگی زود هنگام و آسیب‌های پوسته‌پوسته شدن بتن را کاهش داده و از انتشار ترک جلوگیری می‌کند و ناحیه نرم‌شدگی در ماتریس بتن را توسعه می‌دهد [15]. تأثیر استفاده از دسته الیاف در تقویت بتن توسط کماتی و همکاران [16] به صورت تجربی مطالعه شده است. آن‌ها کارایی پارچه‌های حلقوی تار پود گذاری شده در تقویت‌کننده بتن، میزان باربری و چقرمگی بتن تقویت شده با منسوج تحت آزمون خمشی چهار نقطه را بررسی کردند. سزازی و اشکذری [17] به بررسی عملکرد ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا و بتن فوق‌توانمند الیافی تحت برخورد پرتابه پرداختند و نشان دادند بتن فوق‌توانمند الیافی با دو درصد الیاف رفتاری شکل‌پذیر بروز می‌دهد و قادر به تحمل حداقل ده ضربه پی در پی چکش است. پرتان و همکاران [18] به مطالعه تجربی آثار ناشی از افزودن الیاف فورتا و پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، الگوی رشد ترک‌ها و انرژی جذب‌شده نمونه‌های استوانه‌ای بتنی پرداختند. آن‌ها برای بررسی دقیق‌تر جابجایی و تغییرشکل نمونه‌ها، روش همبستگی تصاویر دیجیتال را به کار گرفته و برای صحت سنجی این نتایج از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس استفاده نمودند. در مدل‌سازی المان محدود ارائه شده توسط آن‌ها، بتن الیافی به صورت یک ماده ایزوتروپ در نظر گرفته شده است. صباغیان و خیرالدین [19] به بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف بر مشخصات مکانیکی و سن کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی پرداختند. حج فروش و همکاران [20] با استفاده از آزمون بیرون‌کشیدن میلگرد از داخل نمونه استوانه‌ای بتن حاوی 1.5 درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن را در نمونه‌های بتنی که مدت 2 دقیقه در معرض مستقیم میدان مغناطیسی قرار گرفتند، را مطالعه کردند.

نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که مشخصه‌های مکانیکی بتن‌های فوق‌توانمند به رفتار چسبندگی بین الیاف و میلگرد با بتن، شکل هندسی الیاف

و میلگرد و همچنین مقاومت فشاری بتن بستگی دارد. کالتوف و راباچ [21] رفتار بیرون‌کشیدگی پیچ از بتن فوق‌توانمند را به صورت تجربی مطالعه کردند. رفتار چسبندگی بین میلگرد با بتن معمولی و بتن فوق‌توانمند الیافی توسط خاکسفيد و همکاران [22] مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها با استفاده از آزمون بیرون‌کشیدگی، منحنی‌های نیرو-جابجایی را برای نمونه‌های مختلف استخراج کرده و به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی نیروی بیرون‌کشیدگی پرداختند. ژائو و گیائو [23] رفتار چسبندگی میلگرد پوشش داده شده با اپوکسی و بتن فوق‌توانمند الیافی را بررسی کردند و مدل تحلیلی را به منظور تخمین منحنی‌های نیرو-جابجایی ارائه کردند.

با توجه به اینکه انجام آزمون‌های تجربی در این زمینه دارای محدودیت‌های زمانی بوده و هزینه‌های زیادی دارد، بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از روش المان محدود به منظور پیش‌بینی رفتار مکانیکی این مواد توسعه پیدا کرده است. خانی و همکاران [24] با استفاده از روش المان محدود به بررسی خواص الاستیک کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربنی مارپیچ و رشته‌ای پرداختند. اسماعیلی و عندلیبی [25] به توسعه مدل المان محدود چندمقیاسی سه‌بعدی به منظور مطالعه رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با میکروالیاف فلزی پرداختند. آن‌ها جهت انجام شبیه‌سازی‌ها از روش المان محدود غیرخطی سه‌بعدی استفاده و اندرکنش بین الیاف و ماتریس را با استفاده از مدل ناحیه چسبنده شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که چسبندگی بین الیاف و ماتریس بتن به پارامترهای مختلفی مانند جهت الیاف، طول گیرداری الیاف، شکل هندسی آن‌ها و مقاومت ماتریس بستگی دارد. بر این اساس، در مدل‌سازی عددی برای اینکه بتن و الیاف توأم و صحیح عمل کند باید قانونی ایجاد شود که خصوصیات این ناحیه را به صورت صحیح نمایش دهد. کریم‌زاده و همکارانش [26] یک روند مدل‌سازی محاسباتی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت پلیمر/نانولوله را پیشنهاد دادند که در آن‌ها برهم‌کنش بین نانولوله و ماتریس با استفاده از تئوری مکانیک پیوسته و المان محدود مدل شده است. آیت‌اللهی و همکاران [27] مدل‌سازی چندمقیاسی را برای پیش‌بینی خواص نانوکامپوزیت پلیمری تحت شرایط بارگذاری خمشی و پیچشی ارائه دادند که در مدل پیشنهادی آن‌ها فاز میانی به صورت پیوسته شبیه‌سازی شده و مدول‌های یانگ مختلفی برای آن فرض شده است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که مشخصات مکانیکی فصل مشترک بین الیاف و ماتریس اثر اندکی بر سفتی نانوکامپوزیت دارد، ولی نسبت ظاهری² الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مدول یانگ آن دارد.

مطالعات عددی زیادی به منظور فهم رفتار میکرومکانیکی سیستم الیاف و ماتریس و با استفاده از تکنیک‌های مختلف مانند روش المان مرزی [28-30]، روش المان محدود توسعه‌یافته [31] و روش ترک پخشی و مکانیک شکست به منظور تحلیل جدایش در سطح تماس و متعاقباً ورود خرابی به ماتریس انجام شده است. در یکی از جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه، اسماعیلی و همکاران [32] با استفاده از روش المان محدود بر مبنای مقیاس مزو و در نظر گرفتن اجزای مختلف بکار رفته در بتن، رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف فولادی از کامپوزیت پلیمری را با در نظر گرفتن شکل‌های هندسی مختلف انتهای الیاف مطالعه کردند. آن‌ها در مطالعه خود الگوریتم جدیدی را به منظور توزیع تصادفی الیاف در داخل ماتریس پلیمری ارائه دادند و با در نظر گرفتن اندرکنش بین الیاف و ماتریس به استخراج نتایج با استفاده

¹ UHPFRC² Aspect ratio

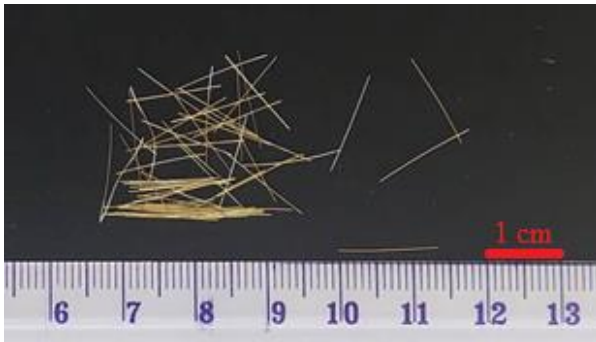


Fig. 1 Geometry of the steel micro-fiber

شکل 1 میکروالیاف فولادی مورد استفاده

جدول 1 مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فولادی [34]

Table 1 Mechanical and geometrical properties of the steel fiber [34]

نوع الیاف	E_f (GPa)	f_p (MPa)	f_t (MPa)	نسبت ظاهری $[L/d_f]$	L (mm)	d_f (mm)
فولادی	200	430	2240	30	13	0.2

2-2- طرح اختلاط بتن

به منظور ساخت بتن فوق‌توانمند الیافی با مقاومت 120 MPa، طرح اختلاط‌های مختلفی طرح شد و جهت تعیین مقاومت فشاری از هر مخلوط ساخته شده، سه نمونه مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ تهیه گردید. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها به مدت 2 دقیقه روی میز لرزان متراکم و سپس مطابق با الزامات استاندارد ملی ایران شماره 17040 به مدت 24 ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند و سپس از قالب‌ها خارج شده و تحت شرایط مرطوب و درون حوضچه تا سن آزمایش 28 روزه نگهداری شدند. در انتها، نمونه‌ها مورد آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی تک محوره قرار گرفتند. طرح اختلاط نهایی با توجه به نتایج آزمون مقاومت فشاری انتخاب شده و مشخصات آن در جدول 2 ارائه شده است. به منظور ساخت نمونه بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن الیافی، 2 درصد الیاف فولادی در مرحله اختلاط به بتن فوق‌توانمند اضافه شده است.

2-3- میلگردهای مورد استفاده

میلگردهای مصرفی برای آزمایش بیرون‌کشیدگی الیاف بر اساس استاندارد ASTM A615 و با مقاومت تسلیم 400 MPa استفاده شدند. در این تحقیق از میلگردهای آجدار با قطر 16 mm استفاده گردیده است و منحنی تنش-کرنش آن با استفاده از آزمون کشش و بر اساس استاندارد ASTM A615 استخراج و در شکل 2 منحنی تنش-کرنش و میلگرد آن نشان داده شده است.

جدول 2 طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند

Table 2 UHPC Mix Design and Ratios

مشخصه‌های طرح مخلوط	مقدار (kg/m^3)
سیمان پرتلند نوع II	670
میکروسلیس	200
پودر کوارتز	285
ماسه سیلیکا	1020
فوق روان‌کننده (3%)	20.1
آب (لیتر)	178

از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. همچنین، در برخی از مطالعات از مدل‌های ناحیه چسبیده در قالب کدهای روش المان محدود برای مدل‌سازی ناحیه اتصال الیاف و ماتریس و همچنین مطالعه پیدایش و رشد جدایش در این ناحیه استفاده شده است. مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از مدل ناحیه چسبیده به منظور شبیه‌سازی ناحیه فصل مشترک در مواد کامپوزیتی نشان می‌دهد که استفاده از این روش با دقت مناسبی رفتار چسبندگی الیاف و ماتریس را پیش‌بینی می‌کند. به عنوان نمونه بوهالا و همکاران [33] با استفاده از مدل ناحیه چسبیده و روش المان محدود، پارامترهای خرابی کامپوزیت‌ها را تعیین نموده‌اند. در این روش ضخامت المان‌های بین سطحی صفر بوده و می‌توان رفتار جدایش الیاف و ماتریس را شبیه‌سازی نمود. با توجه به دقت این روش، در مقاله حاضر نیز فصل مشترک بین الیاف و ماتریس با مدل ناحیه چسبیده شبیه‌سازی خواهد شد.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در زمینه شبیه‌سازی مکانیکی رفتار بتن فوق‌توانمند الیافی تحقیقات محدودی صورت پذیرفته است و در هیچ یک از این مطالعات، رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بررسی نشده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر، به توسعه مدل المان محدود چندمقیاسی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی پرداخته می‌شود. بدین منظور، از میکروالیاف فولادی جهت چسبندگی اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت بتنی استفاده شده و سپس استحکام کششی، فشاری و مدول یانگ این مواد با انجام آزمون‌های تجربی به دست آمده است. در ادامه، آزمون بیرون کشیدگی میلگرد بر روی نمونه‌های مختلف انجام پذیرفته است. در ادامه با مدنظر قرار دادن خواص مکانیکی به دست آمده و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، به ارائه روشی به منظور شبیه‌سازی المان محدود بتن‌های فوق‌توانمند تقویت شده با میکروالیاف فولادی پرداخته شد. در این تحقیق برای اولین بار و با استفاده از مدل چندمقیاسی، مشخصات چسبندگی میلگرد آجدار با بتن فوق‌توانمند تقویت شده با میکروالیاف تعیین می‌شود. به منظور شبیه‌سازی اندرکنش بین میکروالیاف/میلگرد و بتن از مدل ناحیه چسبیده (CZM) استفاده شده و پارامترهای این مدل رفتاری با استفاده از نتایج آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد تعیین می‌شود. سپس با شبیه‌سازی مجزای بتن فوق‌توانمند و الیاف و استفاده از مدل المان محدود چندمقیاسی، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند درصد وزنی الیاف، قطر میلگرد و عمق مدفون‌شدگی آن بر روی خواص چسبندگی میلگرد با بتن فوق‌توانمند الیافی پرداخته می‌شود. در نهایت، برای ارزیابی مدل چندمقیاسی ارائه شده، نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و صحت مدل ارائه شده مورد بحث قرار می‌گیرد.

2- آزمون‌های تجربی

در این بخش، نحوه ساخت بتن فوق‌توانمند الیافی و همچنین انجام آزمون‌های تجربی بیرون کشیدگی میلگرد بیان می‌شود.

2-1- مشخصات الیاف

در این تحقیق به منظور تقویت بتن فوق‌توانمند از میکروالیاف فولادی ساخت شرکت یوجیان¹ چین که در شکل 1 نشان داده شده است، استفاده شده است. جنس الیاف از فولاد St37 می‌باشد و مشخصات مکانیکی و هندسی این الیاف در جدول 1 ارائه شده است [34]. به منظور بررسی تأثیر پارامترها، کسرهای حجمی مختلف الیاف در محدوده 0% تا 2% مورد مطالعه قرار داده می‌شود.

¹ Yujian

حجمی میکرو الیاف و قطر میلگرد بر روی رفتار چسبندگی آن، کامپوزیت بتن فوق‌توانمند تقویت شده با میکرو الیاف فلزی از سه بخش میکرو الیاف فولادی، بتن فوق‌توانمند و سطح مشترک الیاف و بتن تشکیل شده است. میکرو الیاف فولادی به صورت استوانه‌هایی با قطر و طول نشان داده شده در جدول 1 شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین، بتن فوق‌توانمند به صورت یک مکعب مستطیل با مواد همگن و یکنواخت در نظر گرفته شده که خواص مکانیکی آن از انجام آزمون تجربی بر روی نمونه آزمایشگاهی تعیین شده است. خواص مکانیکی بتن فوق‌توانمند بدون الیاف با انجام آزمون‌های فشار و کشش تک‌جهته به دست آمده است و نتایج آن به همراه نحوه انجام آزمایش در شکل 5 نشان داده شده است. جهت تعریف مشخصات مکانیکی بتن فوق‌توانمند که مدول الاستیک آن برابر 44 GPa می‌باشد، از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن¹ موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. به منظور تشکیل مدل هندسی کامپوزیت الیافی، الیاف با توزیع تصادفی در مدل ایجاد و سپس حجم مجموعه الیاف از بتن حذف شده است. در ادامه جزئیات المان محدود بیان می‌شود.

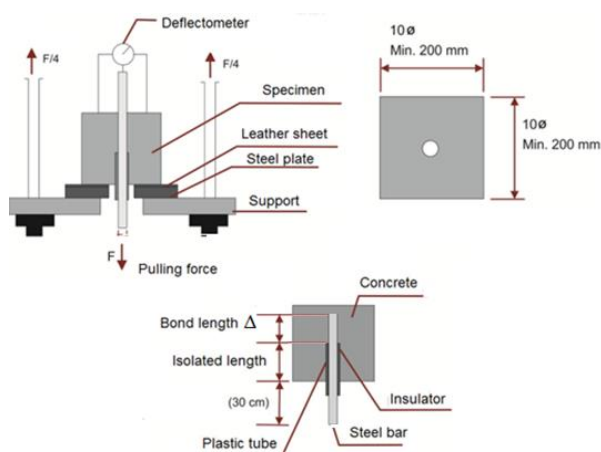


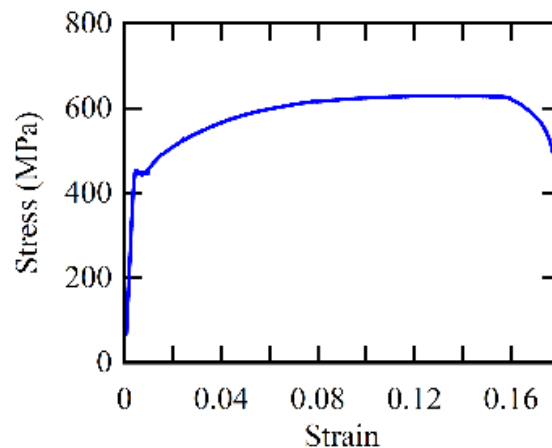
Fig. 3 Pull-out test set up details and views based on RILEM-RC6 standard [35, 36]

شکل 3 مشخصات هندسی نمونه‌های بیرون کشیدگی تحت بررسی بر اساس استاندارد RILEM-RC6 [35, 36]



Fig. 4 (a) Test set up details (b) displacement sensor

شکل 4 (الف) چیدمان آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و (ب) نحوه قرارگیری سنسور جابجایی سنج



(الف)-a



(ب)-b

Fig. 2 (a) stress-strain curve of the rebar and (b) deformed rebar after direct tensile testing

شکل 2 (الف) منحنی تنش-کرنش میلگرد مورد استفاده و (ب) میلگرد پس از آزمایش کشش مستقیم میلگرد

4-2- آزمون بیرون کشیدگی میلگرد

در این تحقیق برای دسترسی به خصوصیات استحکام میان فازی مابین میلگرد و ماتریس بتن فوق‌توانمند الیافی، آزمایش بیرون کشیدگی ترتیب داده شد. آزمون بیرون کشیدگی شامل خارج کردن میلگرد از داخل بتن می‌باشد. نیروی بیرون کشیدگی از یک طرف و جابجایی نیز از انتهای دیگر میلگرد اندازه‌گیری می‌شود. در تحقیق حاضر ساخت نمونه‌های بیرون کشیدگی بر اساس استاندارد RILEM-RC6 [35 و 36] انجام پذیرفته است. بر اساس این استاندارد نمونه‌های بتنی مورد استفاده در تحقیق حاضر دارای طول و عرض 200mm می‌باشد و مشخصات هندسی نمونه‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. در این شکل، Δ طول مهارشدگی میلگرد در بتن و ϕ قطر میلگرد می‌باشد. مطابق شکل 3، در این پیکربندی نمونه‌های بتنی بر روی یک جعبه فولادی قرار گرفته و انتهای آزاد میلگرد داخل فک‌های دستگاه ثابت می‌شود. به منظور انجام آزمون‌های تجربی از دستگاه کشش یونیورسال با ظرفیت حداکثر نیروی 10kN و با نرخ جابجایی 0.1 mm/min استفاده شده است. به منظور ثبت جابجایی از سنسور جابجایی سنج LVDT که مطابق شکل 5b بر روی سطح بالایی نمونه بتنی قرار داده شده و جابجایی نسبی بین قاب فولادی و نمونه بتنی را اندازه می‌گیرد، استفاده شده است. اختلاف دو جابجایی نسبی، نشان دهنده لغزش بین میله و بتن می‌باشد. در نهایت با انجام آزمون‌های تجربی، منحنی نیرو-لغزش برای نمونه‌های بتن فوق‌توانمند دارای 0 و 2 درصد الیاف به دست می‌آید.

3- شبیه‌سازی‌های المان محدود چندمقیاسی

هدف اصلی پژوهش حاضر، توسعه روش المان محدود به منظور بررسی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند تقویت شده با الیاف و مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار مکانیکی آن می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر کسر

¹ Concrete Damage Plasticity

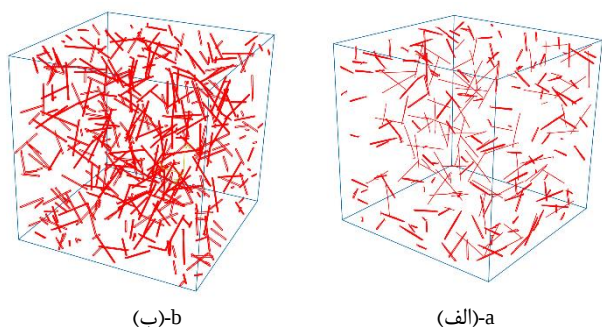


Fig. 6 Geometry of microfibers with random distribution (a) 1% volume fraction and (b) 2% volume fraction

شکل 6 هندسه میکروالیاف با توزیع تصادفی برای الیاف با نسبت ظاهری 30 (الف) کسر حجمی 1% و (ب) کسر حجمی 2%

تنش ماکزیمم برشی یا استحکام ناحیه چسبنده (σ_{max})، (ب) حداکثر کرنش جدایش بحرانی δ_{in} ، که به ازای مقادیر بیشتر از آن سطح چسبنده ظرفیت تحمل تنش خود را از دست داده و ترک رشد می‌کند و G_c که انرژی جدایش می‌باشد نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مدل ناحیه چسبنده می‌باشد. با توجه به اینکه در مسئله حاضر، بارگذاری روی الیاف به صورت مود ترکیبی می‌باشد بنابراین، هر دو مؤلفه تنش‌های مماسی و عمودی تماس در انرژی شکست مشارکت دارند و از فرم توانی انرژی شکست به صورت رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\left(\frac{G_n}{G_{cn}}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{ct}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

که در آن G_n و G_t به ترتیب، انرژی‌های شکست عمودی و مماسی می‌باشند و برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی هستند که از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$G_n = \int_0^{\delta_{fin}} \sigma_n(\delta) d\delta \quad (2)$$

$$G_t = \int_0^{\delta_{fin}} \tau_t(\delta) d\delta \quad (3)$$

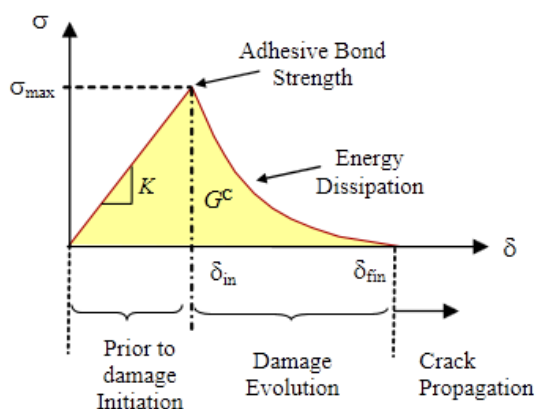


Fig. 7 Shear stress changes in the adhesion zone in terms of slip [37]

شکل 7 تغییرات تنش برشی ناحیه چسبندگی برحسب میزان لغزش [37]

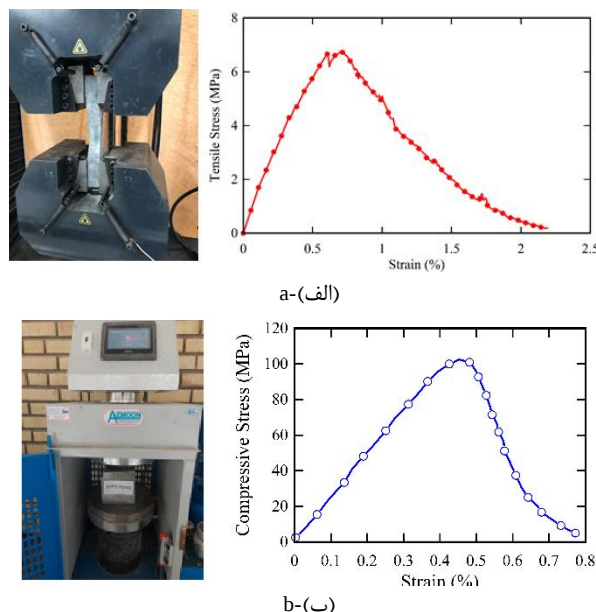


Fig. 5 (a) Direct tensile test and tensile stress-strain curve, (b) Unidirectional compressive test and compressive stress-strain curve

شکل 5 الف) نحوه انجام آزمون کشش مستقیم و منحنی تنش-کرنش کششی و (ب) نحوه انجام آزمون فشار و منحنی تنش-کرنش فشاری

1-3 ایجاد الیاف با توزیع تصادفی

به منظور ایجاد الیاف با توزیع تصادفی گاوسی از نرم‌افزار Digimat استفاده شده است. اندازه، توزیع و موقعیت ذرات در ماتریس را می‌توان با استفاده از پارامترهای موجود در نرم‌افزار تعیین نمود. با توجه به اینکه یکی از اهداف تحقیق حاضر بررسی اثر کسر حجمی بر رفتار چسبندگی میلگرد با بتن می‌باشد، بنابراین با در نظر گرفتن مشخصات الیاف مطابق جدول 1، الیاف با کسر حجمی برابر 0، 1% و 2% ایجاد شده است. به عنوان نمونه، در شکل 6 تولید الیاف با توزیع تصادفی برای الیاف با نسبت ظاهری (نسبت طول به قطر الیاف) 30 و دو کسر وزنی 1 و 2 درصد، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الیاف به صورت تصادفی در حجم نمونه توزیع شده و این پراکندگی به نحوی می‌باشد که هیچ یک از الیاف با همدیگر تداخل ندارند.

2-3 تعریف اندرکنش بین الیاف و کامپوزیت

برای مدل‌سازی آسیب و پدیده جدایش در ناحیه تماس بین میکرو الیاف و کامپوزیت از تئوری مدل ناحیه چسبنده که بر پایه نمودارهای نیرو-جابجایی هستند، استفاده شده است. در مدل ناحیه چسبنده، رفتار ترک با قانون کشش-جدایش¹ که رابطه بین تنش و جابجایی دو سطح چسبنده را نشان می‌دهد، بیان می‌شود. تعریف خواص مواد در مدل ناحیه چسبنده به دو صورت نمایی و دوخطی انجام می‌پذیرد که هر کدام دارای توابع پتانسیل مربوط به خود هستند. در مقاله حاضر، تحلیل جدایش اتصال الیاف از کامپوزیت با استفاده از سطوح چسبنده در نرم‌افزار ABAQUS انجام می‌شود. رفتار مکانیکی مربوط به سطح تماس با استفاده از قانون تنش-جدایش و مبتنی بر مدل نمایی آن شبیه‌سازی می‌شود. همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است، در غیاب هر نوع خرابی رفتار سطح تماس خطی فرض می‌شود که این رفتار خطی با پیدایش خرابی از بین می‌رود. در این مدل فرض می‌شود که تمامی مکانیزم‌های ساختار میکرو و فرایند شکست را می‌توان به وسیله سه پارامتر مورد توجه قرار داد:

¹ Traction-separation Law

3-3- بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی

در تحقیق حاضر جهت گسترش نتایج آزمایشگاهی، به مدل‌سازی المان محدود آزمایش بیرون کشیدن میلگرد آجدار پرداخته شده است. آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر در مدل‌های سه‌بعدی، از المان چسب برای تعریف چسبندگی شیمیایی بین میلگرد و بتن کمک گرفته شده و جهت معتبرسازی مدل‌های عددی، نتایج اولیه المان محدود با نتایج آزمایشگاهی مربوط به بتن فوق‌توانمند بدون الیاف مقایسه شده و اقدام به کالیبره کردن مدل‌های المان محدود شده است. در این تحقیق، برای اولین بار میلگرد به صورت آجدار شبیه‌سازی شده و در شکل 8 مدل المان محدود یک نمونه به همراه شرایط مرزی و بارگذاری مورد استفاده نشان داده شده است. به منظور تعریف درگیری مکانیکی بین آج‌های میلگرد با بتن از قید تماسی Contact و معیار تماس سطح-به-سطح¹ استفاده شده است و ضریب اصطکاک برابر 0.3 در نظر گرفته شده است. در مدل‌های تحت بررسی با توجه به مدل آزمایشگاهی سطح بالایی نمونه‌های بتنی به صورت کامل مقید شده است و جابجایی تا حداکثر 20 mm به قسمت بالایی میلگرد اعمال می‌شود. با توجه به اینکه نواحی اطراف میلگرد دارای حساسیت بیشتری می‌باشد، بنابراین در این نواحی از المان‌های ریزتری استفاده شده است. در مدل‌های المان محدود برای مش‌بندی بتن، میلگرد و الیاف از المان‌های هرمی سه‌بعدی غیرخطی 10 گرهی (C3D10M) استفاده و به منظور تحلیل مسأله روش شبه استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. ابعاد مناسب المان‌ها پس از بررسی استقلال از شبکه تعیین شده است.

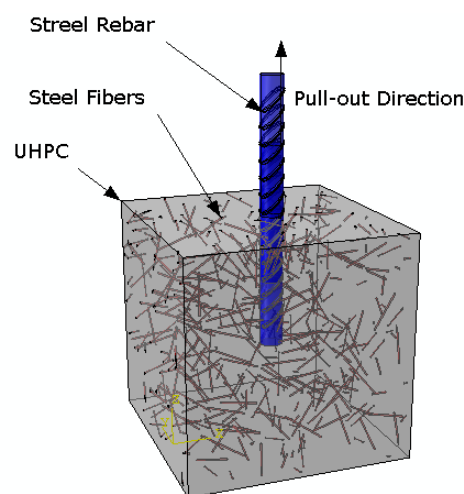


Fig. 8 Multi-scales Finite element model of pull-out test with boundary and loading conditions

شکل 8 مدل المان محدود چندمقیاسی آزمایش بیرون کشیدگی به همراه شرایط مرزی و بارگذاری

4- بررسی نتایج

در این بخش ابتدا با استفاده از آزمون‌های تجربی انجام شده به تعیین پارامترهای مدل ناحیه چسبنده پرداخته می‌شود و سپس تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار بیرون کشیدگی و مقاومت پیوستگی² میلگرد آجدار با بتن مطالعه می‌شود. اندرکنش بین الیاف و بتن با استفاده از قید تماسی و تعریف

المان‌های چسبنده صورت پذیرفت که پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به نحوی تعیین شدند که منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از مدل المان محدود بر نتایج تجربی آزمون بیرون کشیدگی میلگرد فولادی با قطر 16 mm از بتن فوق‌توانمند الیافی منطبق باشد (شکل 9). پارامترهای ناحیه چسبنده بین میلگرد و بتن با استفاده از نتایج آزمون تجربی بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بدون الیاف به دست آمده است که نتایج آن مطابق شکل 9الف می‌باشد. پس از تأیید صحت مدل بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بدون الیاف، در ادامه پارامترهای ناحیه تماس چسبنده بین الیاف و بتن با استفاده از نتایج آزمون‌های تجربی مربوط به آزمون بیرون کشیدگی میلگرد از بتن الیافی به دست آمده است و نتایج آن در شکل 9ب آمده است. پس از کالیبره کردن نتایج، مشخصات رفتاری مدل ناحیه چسبنده مشخص شده در شکل 7، مطابق جدول 3 به دست آمده است. با استفاده از مقادیر ارائه شده در جدول 3، منحنی نیرو-لغزش مدل نهایی المان محدود و نتایج حاصل از آزمون تجربی نمونه‌های دارای 0 و 2 درصد الیاف در شکل 9 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همپوشانی مطلوبی هم از لحاظ شکل منحنی و هم از لحاظ میزان حداکثر نیروی بیرون کشیدگی نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود برقرار است و کمتر از 4% خطا در حداکثر نیروی بیرون کشیدگی در نمونه آزمایشگاهی نسبت به نمونه المان محدود وجود دارد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که مدل المان محدود با دقت بسیار مناسبی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی را پیش‌بینی می‌کند و می‌توان با استفاده از آن تأثیر پارامترهای مختلف را مورد مطالعه قرار داد.

بررسی منحنی‌های نیرو-لغزش نشان داده شده در شکل 9 نشان می‌دهد که به ازای مشخصات یکسان میلگرد، استفاده از الیاف باعث بهبود قابل توجهی در نیروی چسبندگی و پیوستگی میلگرد با بتن می‌شود. به عنوان نمونه برای میلگرد با قطر 16 mm حداکثر نیروی چسبندگی بتن فوق‌توانمند دارای 0 و 2 درصد وزنی الیاف به ترتیب برابر 70.6 kN و 78.5 kN می‌باشد که نشان می‌دهد استفاده از 2 درصد الیاف باعث افزایش 12 درصدی نیروی پیوستگی می‌شود که علت این امر را می‌توان در افزایش نیروهای مکانیکی در نتیجه اضافه کردن الیاف به بتن دانست. با توجه به شکل 9 مشاهده می‌شود که منحنی نیرو-لغزش میلگرد آجدار از سه بخش چسبندگی شیمیایی، پایداری اصطکاکی و پیوستگی برشی تشکیل می‌شود. در ابتدای بارگذاری، بخش OA، مکانیزم اصلی مقاومت در برابر نیروهای خارجی چسبندگی شیمیایی بین میلگرد و بتن می‌شود و در این مرحله هیچ لغزشی قابل اندازه‌گیری نیست. با افزایش نیرو، چسبندگی شیمیایی از بین رفته و عواملی مانند پایداری اصطکاکی و درگیری مکانیکی بین بتن و آج‌های میلگرد باعث بالا رفتن مقاومت پیوستگی می‌شود (بخش AB). در ادامه به علت وجود پیوستگی برشی میلگرد پیوستگی خود را با بتن حفظ می‌کند. در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی مکانیکی میلگرد آجدار با بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج‌های میلگرد و کلیدهای بتنی بین آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه در محل تماس آج میلگرد و بتن، تنش فشاری ایجاد می‌شود که در اثر آن در مقطع عرضی بتن اطراف میلگرد تنش‌های حلقوی کششی و در کلیدهای بتن بین آج‌ها تنش برشی تولید می‌شود. با توجه به این میدان تنش، دو نوع مود شکست پیوستگی قابل پیش‌بینی است. اگر تنش برشی موجود در

¹ Surface-to-surface contact

² Bond Resistance

پیوستگی با نام شکافت¹ خوانده می‌شود. در شکل 10 دو نوع شکست متفاوت در نمونه‌های بتن فوق‌توانمند بدون الیاف و دارای 2 درصد وزنی الیاف نشان داده شده است.

در شکل‌های 11 و 12 توزیع تنش در سه فاز مجزای الیاف، میلگرد و بتن برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف و به ازای نیروی 60 kN نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در حضور الیاف و در نتیجه عمل پل‌زنی بین الیاف و بتن نیروی اعمالی به بتن در الیاف نیز توزیع شده و در نتیجه آن تنش‌های قابل ملاحظه‌ای در الیاف به وجود می‌آید. به عنوان نمونه در این حالت خاص نشان داده شده، حداکثر تنش ایجاد شده در سه فاز مجزای الیاف، میلگرد و بتن به ترتیب برابر 519.1 MPa، 289.3 MPa و 49.9 MPa به دست می‌آید. بر این اساس، مشاهده می‌شود که الیاف بخش قابل ملاحظه‌ای از نیروی انتقالی به بتن را دریافت کرده و در نتیجه باعث بهبود قابل توجهی در مشخصات مکانیکی بتن و رفتار پیوستگی آن با میلگرد می‌شود. با توجه به توزیع تنش به وجود آمده در میلگرد آجدار که در شکل 12 نشان داده شده است مشاهده می‌شود که به علت بیشتر بودن مهار مکانیکی میلگرد با بتن، حداکثر تنش ایجاد شده در میلگرد در محل آج‌ها می‌باشد.



Fig. 10 (a) Cracking and splitting path of UHPC specimen without fibers (b) Splitting failure for UHPC specimen with 2% of fibers by volume

شکل 10 (الف) مسیر ترک و شکافته شدن بتن برای نمونه بتن فوق‌توانمند بدون الیاف (ب) خرابی از نوع بیرون کشیدگی برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف

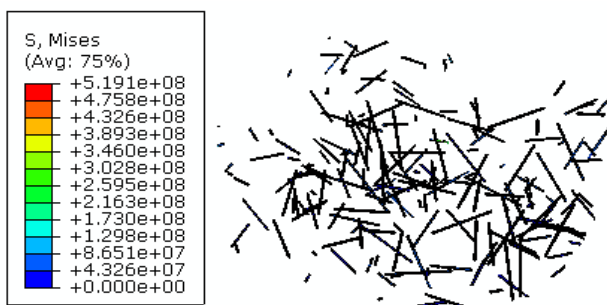


Fig. 11 Stress distribution in steel microfibers of UHPC for a sample with 2% by volume of fibers in force of 60 kN

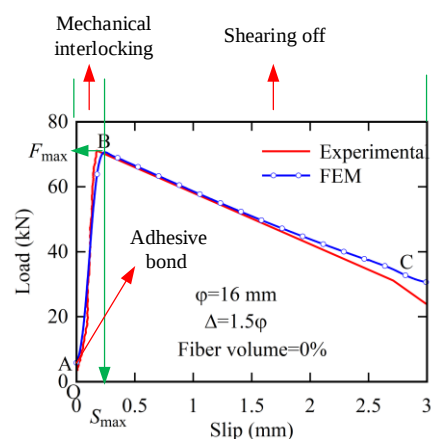
شکل 11 توزیع تنش در الیاف برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف و به ازای نیروی 60 kN

کلیدهای بتنی بین آج‌های میلگرد از حد مقاومت برشی بتن بگذرد، میلگرد به سمت خارج حرکت می‌کند و شکست از نوع بیرون کشیده شدن میلگرد از بتن خواهد بود.

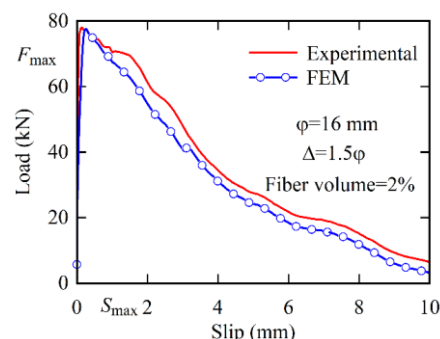
جدول 3 پارامترهای مدل ناحیه چسبیده به منظور تعریف اندرکنش میکرو الیاف فولادی و میلگرد آجدار با بتن فوق‌توانمند

Table 3 Adhesive zone model parameters to define the interaction of steel microfibers and ribbed rebar with UHPC

$\sigma_{\max}$	δ_{in}	G_c	
8.23 MPa	$2.8 \times 10^{-3} \text{mm}$	0.23 MPa.mm	الیاف فولادی
130 MPa	$1.1 \times 10^{-3} \text{mm}$	2.32 MPa.mm	میلگرد آجدار



(الف)-a



(ب)-b

Fig. 9 Force-slip curve of the final finite element model and the results of the experimental test of ribbed rebar pull-out test of fiber-reinforced UHPC with (a) 0% fiber contents (b) 2% fiber contents

شکل 9 منحنی نیرو- لغزش مدل نهایی المان محدود و نتایج حاصل از آزمون تجربی بیرون کشیدگی میلگرد آجدار (الف) بتن فوق‌توانمند بدون الیاف و (ب) بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد الیاف

اگر تنش‌های حلقوی کششی، پیش از آنکه کلید بتن بین دو آج مجاور به صورت برشی کنده شود، از حد مقاومت کششی بتن تجاوز کند، ترک‌های شعاعی در بتن اطراف میلگرد ایجاد و نهایتاً موجب خردشدگی پوشش بتنی اطراف میلگرد و گسیختگی و شکافت بتن می‌شود. در این مرحله از رفتار پیوستگی بتن و میلگرد آجدار، تأثیر اصطکاک در ظرفیت نیروی پیوستگی نهایی ناچیز است که در نتیجه شکست ترد و ناگهانی است. این نوع شکست

¹ Splitting

طول مهارشدگی و قطر میلگرد بر منحنی‌های نیرو-لغزش ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول مهارشدگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار پیوستگی میلگرد داشته و با افزایش طول مهارشدگی، نیروی بیرون کشیدگی نیز بیشتر می‌شود. با توجه به نتایج شکل 14 مشاهده می‌شود که به ازای طول مهارشدگی برابر 1.5φ و 4φ حداکثر نیروی بیرون کشیدگی به ترتیب برابر 70.3 kN و 98.3 kN به دست می‌آید که نشان دهنده افزایش حدود 40 درصدی در نیروی بیرون کشیدگی می‌باشد. نتایج مشابهی در خصوص تأثیر قطر میلگرد بر مقاومت پیوستگی با توجه به شکل 15 نیز مشاهده می‌شود. یعنی افزایش قطر میلگرد مقدار نیروی لازم برای ایجاد شکست پیوستگی را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه با افزایش قطر میلگرد، سطح پیوستگی و درگیری مکانیکی میلگرد و بتن بیشتر می‌شود بنابراین افزایش نیروی پیوستگی نهایی منطقی می‌باشد. به ازای طول مهارشدگی برابر 2.5φ با افزایش قطر میلگرد از 12 mm به 18 mm، نیروی پیوستگی نهایی از مقدار 48.2 kN به 93.8 kN افزایش می‌یابد که نشان دهنده بیشتر شدن حدود 95 درصدی نیروی بیرون کشیدگی می‌باشد. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود، زمانی که حداکثر تنش پیوستگی حاصل می‌شود، مکانیزم تحمل بار از بین رفته و مقاومت اتصال باقیمانده اساساً به مقاومت اصطکاکی وابسته می‌شود. پس از انجام تحلیل‌های امان محدود و بررسی نحوه شکست نمونه‌ها مشخص گردید که مطابق شکل 16 میلگردهای فولادی به صورت لغزشی از بتن فوق‌توانمند الیافی خارج می‌گردند و هیچکدام از میلگردهای فولادی به مرز تنش جاری شدن نرسیدند. همچنین، با توجه به شکل 16 مشاهده می‌شود که با افزایش الیاف مورد استفاده در بتن، حداکثر تنش ایجاد شده در میلگرد نیز افزایش می‌یابد و بیشترین تنش در اطراف آج‌های میلگرد ایجاد می‌شود.

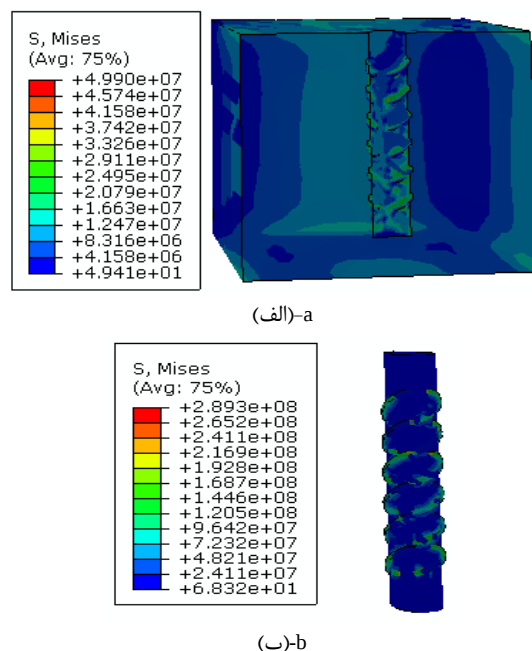


Fig. 12 Stress distribution in three separate phases of fibers, rebar and UHPC for a sample with 2% by volume of fibers in force of 60 kN (a) UHPC and (b) ribbed rebar

شکل 12 توزیع تنش در سه فاز مجزای الیاف، میلگرد و بتن برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف و به ازای نیروی 60 kN (الف) بتن فوق‌توانمند و (ب) میلگرد آجدار

در ادامه تأثیر طول مهارشدگی و قطر میلگرد بر رفتار پیوستگی میلگرد و بتن فوق‌توانمند الیافی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل‌های 13 و 14 تأثیر

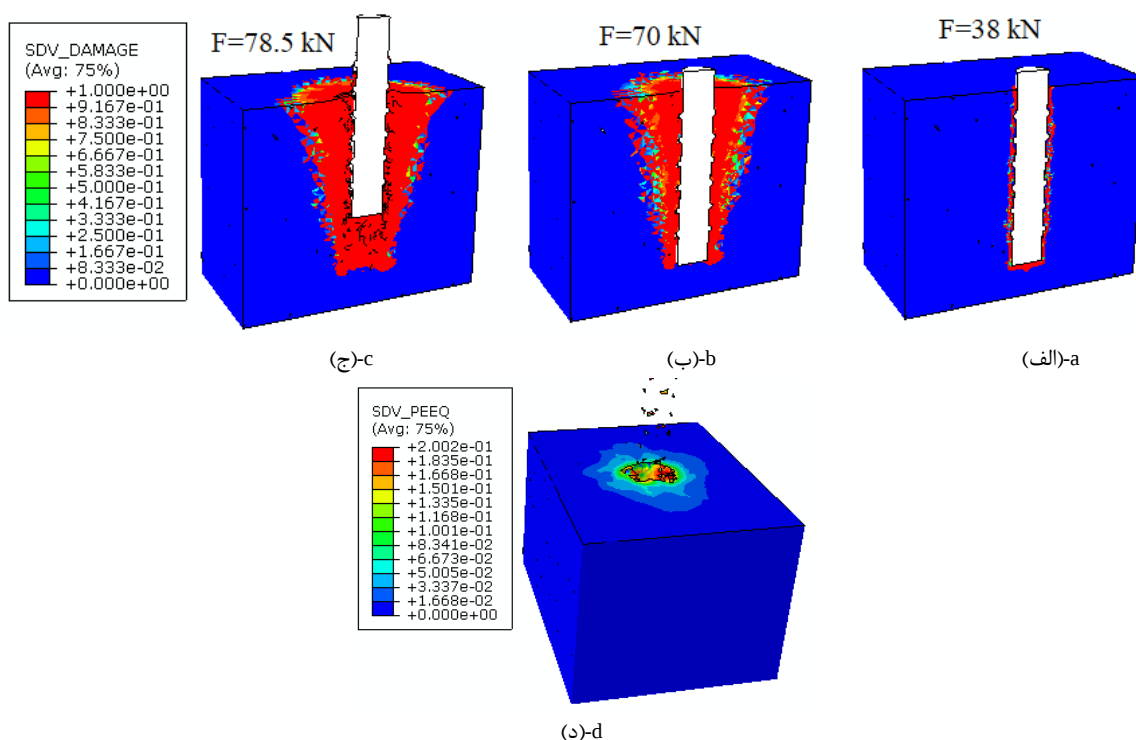


Fig. 13 failure distribution and pull-out of ribbed rebar from UHPC with 2% of steel fibers in three areas: (a) chemical bonding, (b) mechanical bonding, (c) maximum pull-out force and (d) final state after pull-out

شکل 13 توزیع خرابی و نحوه بیرون کشیدگی میلگرد آجدار از بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف در سه ناحیه (الف) پیوستگی شیمیایی، (ب) پیوستگی مکانیکی، (ج) حداکثر نیروی بیرون کشیدگی و (د) حالت نهایی پس از بیرون کشیدگی

آن بر بیشتر شدن نیروی پیوستگی نهایی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش میزان الیاف از 0% به 1.5% نیروی پیوستگی نهایی در حدود 28% بیشتر می‌شود، در صورتی که با افزایش الیاف از 1.5% به 2%، نیروی پیوستگی نهایی تنها در حدود 3% افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در ناحیه چسبندگی مکانیکی میلگرد و بتن، الیاف باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شوند، بنابراین استفاده از الیاف در این ناحیه بیشترین تأثیر را داشته و در ناحیه پیوستگی برشی به علت کاهش درگیری الیاف و بتن، تأثیر الیاف بر نیروی بیرون کشیدگی تقریباً قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

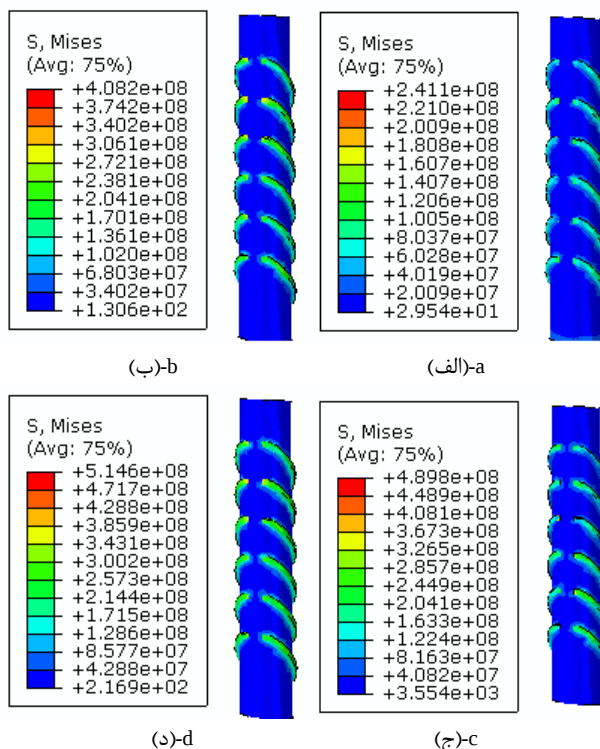


Fig. 16 Stress distribution in rebar in UHPC containing (a) 0% fibers, (b) 1% fibers, (c) 1.5% fibers and (d) 2% fibers

شکل 16 توزیع تنش در میلگرد واقع در بتن فوق‌توانمند الیافی حاوی 0 درصد الیاف، (ب) 1 درصد الیاف، (ج) 1.5 درصد الیاف و (د) 2 درصد الیاف

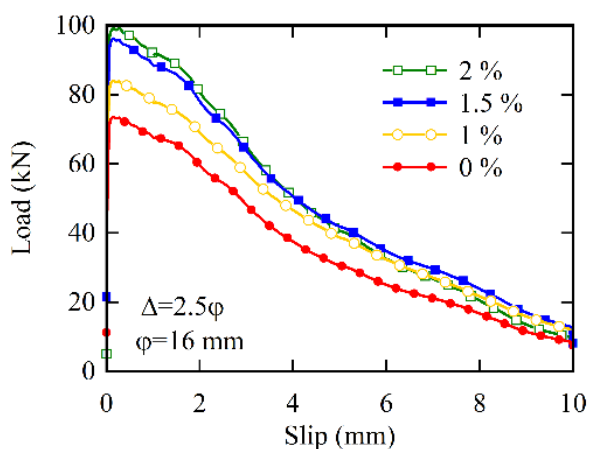


Fig. 17 Force-slip curve in samples with different content of steel microfibers

شکل 17 منحنی نیرو-لغزش در نمونه‌های دارای مقادیر مختلف میکروالیاف فولادی

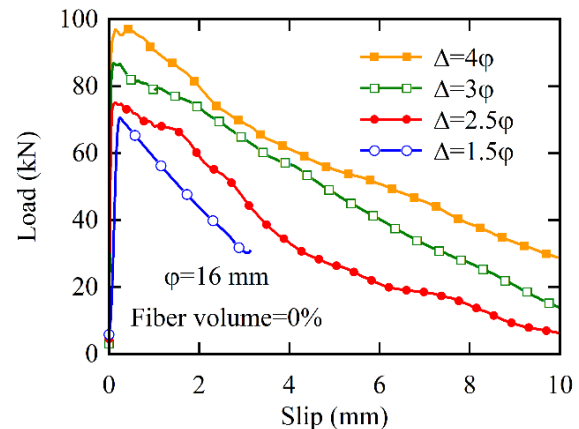


Fig. 14 Effect of bound length on the force-slip curve of rebar and UHPC

شکل 14 تأثیر طول مهارشدگی بر منحنی نیرو-لغزش میلگرد و بتن فوق‌توانمند

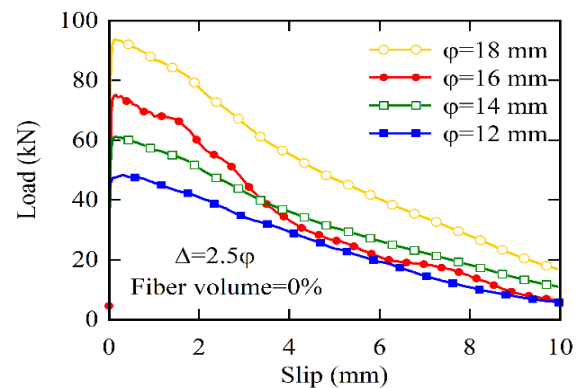


Figure 15 Effect of rebar diameter on the force-slip curve of rebar and UHPC

شکل 15 تأثیر قطر میلگرد بر منحنی نیرو-لغزش میلگرد و بتن فوق‌توانمند

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌های چسبندگی میلگرد با بتن فوق‌توانمند الیافی در جدول 4 اثر طول مهارشدگی، قطر میلگرد و کسر وزنی الیاف بر پاسخ بیرون کشیدگی از جمله نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، تنش مؤثر بیرون کشیدگی در هر حالت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیروی بیرون کشیدگی و کل کار بیرون کشیدگی (مساحت زیر منحنی نیرو-لغزش) با افزایش قطر، طول مهارشدگی و میزان الیاف افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود برای میلگرد با قطر 20 mm، با افزایش میزان الیاف از 0 به 2% نیروی بیرون کشیدگی و کار بیرون کشیدگی به ترتیب در حدود 30% و 22% افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که تنش پیوستگی با افزایش قطر میلگرد کاهش می‌یابد ولی عکس این نتیجه در مورد کسر حجمی الیاف صادق بوده و با بیشتر شدن میزان الیاف مورد استفاده در بتن فوق‌توانمند الیافی، تنش پیوستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف فولادی بیرون کشیدگی میلگرد از بتن را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشند. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر پیوستگی میلگرد و بتن فوق‌توانمند، کسر وزنی الیاف مورد استفاده می‌باشد که در شکل 17 منحنی نیرو-لغزش در نمونه‌های دارای مقادیر مختلف میکروالیاف فولادی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف باعث بیشتر شدن نیروی پیوستگی نهایی می‌شود ولی با افزایش بیشتر کسر وزنی الیاف اثر افزودن

جدول 4 اثر طول مهارشدگی، قطر میلگرد و میزان الیاف بر نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، تنش مؤثر بیرون کشیدگی

Table 4 Effect of bound length, rebar diameter and fibers content on pull-out force, slip related to maximum pull-out force, pull-out energy and effective pull-out stress

میزان الیاف (%)	طول مهارشدگی (Δ/ϕ)	قطر میلگرد ϕ (mm)	تنش مؤثر (MPa)	انرژی بیرون کشیدگی (N/mm)	لغزش (mm)	نیروی بیرون کشیدگی (kN)
0	1.5	12	427.3	281	0.311	48.3
		14	397.8	328	0.236	61.2
		16	348.8	359	0.145	70.1
		18	341.8	526	0.139	86.8
		20	338.9	604	0.132	106.4
1	2.5	12	511.3	308	0.296	57.8
		14	451.7	384	0.220	69.5
		16	439.6	440	0.142	88.3
		18	412.4	603	0.123	104.9
		20	385.4	671	0.105	121.0
2	2.5	20	431.8	659	0.139	135.6
			453.5	743	0.134	142.4
			540.1	781	0.120	169.6
			564.6	804	0.114	177.3

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش المان محدود چندمقیاسی به بررسی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد آجدار از بتن فوق‌توانمند الیافی پرداخته شد. اندرکنش بین الیاف و میلگرد با بتن با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی شده است که پارامترهای آن با استفاده از روش المان محدود معکوس و استفاده از نتایج آزمون تجربی بیرون کشیدگی میلگرد به دست آمده است. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود با نتایج آزمون تجربی انجام شده، تأثیر طول مهارشدگی، قطر و کسر حجمی الیاف بر مشخصه‌های چسبندگی میلگرد آجدار با بتن مطالعه شد. خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر عبارت است از:

- نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که روش المان محدود چندمقیاسی ارائه شده با دقت مناسبی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی را پیش‌بینی می‌کند و با استفاده از آن می‌توان بدون نیاز به انجام آزمون‌های تجربی زمان‌بر و پرهزینه تأثیر بسیاری از پارامترهای مؤثر را با دقت مناسبی مورد مطالعه قرار داد.
- با افزایش میزان الیاف از 0% به 1.5% نیروی پیوستگی نهایی در حدود 28% بیشتر می‌شود، در صورتی که با افزایش الیاف از 1.5% به 2%، نیروی پیوستگی نهایی تنها در حدود 3% افزایش می‌یابد.
- بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به هزینه بالای الیاف و همچنین مشکلات موجود در مخلوط کردن مقادیر بالای الیاف در بتن، استفاده از 1.5% میکروالیاف فولادی جهت دستیابی به مقاومت پیوستگی مناسب بین میلگرد و بتن هم به لحاظ اقتصادی و هم به لحاظ اجرایی مطلوب می‌باشد.
- با افزایش میزان الیاف، تنش ایجاد شده بر روی میلگرد افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد به طوری که برای بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد الیاف، حداکثر تنش ایجاد شده در میلگرد در حدود 113 درصد نسبت به حالت متناظر در نمونه بدون الیاف بیشتر می‌باشد. بر این اساس در طراحی میلگردهای مورد استفاده در بتن‌های فوق‌توانمند الیافی باید میزان تنش اعمالی بر آن‌ها نیز در نظر گرفته شود تا بتوان از حداکثر ظرفیت عملکرد پیوستگی میلگرد با بتن استفاده نمود.

6- مراجع

- [1] Ghaderi, M., Ghaffarzadeh, H. and Maleki, V. A., "Investigation of Vibration and Stability of Cracked Columns under Axial Load" *Earthquakes and Structures*, Vol. 9, No. 6, pp. 1181-1192, 2015.
- [2] Makul, N., "Principles of Cement and Concrete Composites", Springer Nature, 2021.
- [3] Gencel, O., Karadag, O., Oren, O. H. and Bilir, T., "Steel Slag and Its Applications in Cement and Concrete Technology: A Review" *Construction and Building Materials*, Vol. 283, pp. 34-56, 2021.
- [4] Rezaee, M., Vahid A. Maleki. "An analytical solution for vibration analysis of carbon nanotube conveying viscose fluid embedded in visco-elastic medium." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* Vol. 229, No. 4, pp. 644-650, 2015.
- [5] Wang, L., He, T., Zhou, Y., Tang, S., Tan, J., Liu, Z. and Su, J., "The Influence of Fiber Type and Length on the Cracking Resistance, Durability and Pore Structure of Face Slab Concrete" *Construction and Building Materials*, Vol. 282, pp. 34-56, 2021.
- [6] Ghaderi, M., Maleki, V. A. and Andalibi, K., "Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls under Blast Loading by Frp and Spray on Polyurea" *Cumhuriyet Science Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 462-477, 2015.
- [7] Vahidi Pashaki, Pooyan, Milad Pouya, Vahid A. Maleki. "High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 232, No. 11, pp. 1927-1936, 2018.
- [8] Wang, J., Yu, R., Xu, W., Hu, C., Shui, Z., Qian, D., Leng, Y., Liu, K., Hou, D. and Wang, X., "A Novel Design of Low Carbon Footprint Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Based on Full Scale Recycling of Gold Tailings" *Construction and Building Materials*, Vol. 304, pp. 78-95, 2021.
- [9] Guan, D., Chen, Z., Liu, J., Lin, Z. and Guo, Z., "Seismic Performance of Precast Concrete Columns with Prefabricated Uhpj Jackets in Plastic Hinge Zone" *Engineering Structures*, Vol. 245, pp. 45-67, 2021.
- [10] Hung, C.-C., El-Tawil, S. and Chao, S.-H., "A Review of Developments and Challenges for Uhpj in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design" *Journal of Structural Engineering*, Vol. 147, No. 9, pp. 12-42, 2021.

- Loading" Composite Structures, Vol. 93, No. 9, pp. 2250-2259, 2011
- [28] Budhe, S., Banea, M., De Barros, S. and Da Silva, L., "An Updated Review of Adhesively Bonded Joints in Composite Materials" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 72, pp. 30-42, 2017.
- [29] Velasco, M., Graciani, E., Távora, L., Correa, E. and París, F., "Bem Multiscale Modelling Involving Micromechanical Damage in Fibrous Composites" Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 93, pp. 1-9, 2018.
- [30] París, F., Correa, E. and Mantić, V., "Micromechanical Evidences on Interfibre Failure of Composites" in: The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites, Eds., pp. 359-390: Springer, 2017.
- [31] Vahidi Pashaki, P., Pouya, M. and Maleki, V. A., "High-Speed Cryogenic Machining of the Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites: Finite Element Analysis and Simulation" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 232, No. 11, pp. 1927-1936, 2018.
- [32] Esmaeili, J., Andalibi, K., Gencel, O., Maleki, F. K. and Maleki, V. A., "Pull-out and Bond-Slip Performance of Steel Fibers with Various Ends Shapes Embedded in Polymer-Modified Concrete" Construction and Building Materials, Vol. 271, pp. 121-131, 2021.
- [33] Bouhala, L., Makradi, A., Belouettar, S., Younes, A. and Natarajan, S., "An Xfem/Czm Based Inverse Method for Identification of Composite Failure Parameters" Computers & Structures, Vol. 153, pp. 91-97, 2015.
- [34] Ren, G. M., Wu, H., Fang, Q., Liu, J. Z., "Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC" Construction and Building Materials, Vol. 163, pp. 826-839, 2018.
- [35] RILEM-CEB-FIP-RC6., Recommendation Rc 6: Bond Test Reinforcement Steel. 2. Pull-out Test, Georgi Publishing Company Paris, 1983 .
- [36] Carvalho, E. P., Ferreira, E. G., Cunha, J. C. d., Rodrigues, C. d. S. and Maia, N. d. S., "Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars" Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 14, pp. 1932-1951, 2017.
- [37] Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., Little, D. and Sanchez-Silva, M., "Probabilistic Modeling of the Effect of Air Voids on the Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Subjected to Moisture Diffusion" Asphalt Paving Technology-Proceedings Association of Asphalt Technologists, Vol. 79, pp. 221, 2010.
- [11] Ashrafiyan, A., Berenjian, J. and Asghari Tilaki, F., "Optimization of Mixture Proportions of Self-Compacted Fiber Reinforced Concrete Incorporating Polypropylene Using Genetic and Crow Search Algorithms" Modares Civil Engineering journal, Vol. 20, No. 3, pp. 1-12, 2020.
- [12] Hosseini, M. and Fakhri, D., "Experimental Study of Effect of Glass and Polypropylene Hybrid Fibers on the Physical and Mechanical Properties of Concrete and Cement Mortar" Journal of Mineral Resources Engineering ,Vol. 34, pp. 34-56, 2021.
- [13] adlparvar, m., Taghavi Parsa, M. H. and Mahmoodabadi, M., "Study and Design of Prefabricated Fiber Concrete Segments of Metro Tunnels Using with the Beam-Spring Method" Road, Vol. 134, pp. 45-67, 2020.
- [14] Gholhaki, M., Pachideh, G. and Rezayfar, O., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers at High Temperatures" Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 167-179, 2017.
- [15] Esmaeili, J., Sharifi, I., Andalibi, K. and Kasaei, J., "Effect of Different Matrix Compositions and Micro Steel Fibers on Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete" in *Proceeding of IOP Publishing*, pp. 012031 .
- [16] Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Asgharian Jeddi, A. A. and Nasrollahzadeh, K., "Increasing the Efficiency of Carbon Fiber Bundles in Reinforcing Fine Grained Concrete: An Experimental Study of Flexural Bearing Capacity" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 310-318, 2019.
- [17] Sezari, M. and Ashkezari, G. D., "Investigation of Impact Behavior of High Strength Concrete and Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact of Projectile" Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology Vol. 23, No. 9, pp. 23-45, 2018.
- [18] Aram Partan, M., Eskandari, H., Lezgy-Nazargah, M. and Gharouni Nik, M., "Evaluating the Effect of Forta and Polypropylene Fibers on Compressive Strength, Ductility and Energy Absorption of Cylindrical Concrete Specimens" Concrete Research, Vol. 14, No. 2, pp. 53-67, 2021.
- [19] sabbaghian, m. and Kheyroddin, A., "Experimental Investigation of the Effect of Fiber on Mechanical Properties and the Age of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites" Concrete Research, Vol. 12, No. 4, pp. 53-68, 2019.
- [20] Hajforoush, M., Kheyroddin, A. and Rezaifar, O., "The Effect of Magnetic Field on Bond Strength between Reinforcing Steel Bar and Steel Fiber Reinforced Concrete by Means of Pull-out Test" Concrete Research, Vol. 13, No. 4, pp. 5-16, 2020.
- [21] Kalthoff, M. and Raupach, M., "Pull-out Behaviour of Threaded Anchors in Fibre Reinforced Ordinary Concrete and Uhpc for Machine Tool Constructions" Journal of Building Engineering, Vol. 33, pp. 89-96, 2021.
- [22] Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M. and de Brito, J., "Bond Behaviour of High-Strength Steel Rebars in Normal (NSC) and Ultra-High Performance Concrete (UHPC)" Journal of Building Engineering, Vol. 33, pp. 34-57, 2021.
- [23] Zhou, Z. and Qiao, P., "Bond Behavior of Epoxy-Coated Rebar in Ultra-High Performance Concrete" Construction and Building Materials, Vol. 182, pp. 406-417, 2018.
- [24] Khani, N., Yildiz, M. and Koc, B., "Elastic Properties of Coiled Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposite: A Finite Element Study" Materials & Design, Vol. 109, pp. 123-132, 2016.
- [25] Esmaeili, J. and Andalibia, K., "Development of 3d Meso-Scale Finite Element Model to Study the Mechanical Behavior of Steel Microfiber-Reinforced Polymer Concrete" Computers and Concrete, Vol. 24, No. 5, pp. 413-422, 2019.
- [26] Karimzadeh, F., Ziaei-Rad, S. and Adibi, S., "Modeling Considerations and Material Properties Evaluation in Analysis of Carbon Nano-Tubes Composite" Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 38, No. 4, pp. 695-705, 2007.
- [27] Ayatollahi, M., Shadlou, S. and Shokrieh, M., "Multiscale Modeling for Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites Subjected to Different Types of



مطالعه اثرات بارگذاری حرارتی خستگی بر رشد ترک و شکست در مود اول تورق چندلایه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش برهم‌کنش تصاویر دیجیتالی

بهزاد مسلمی ابیان¹، احمد رضا قاسمی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* کاشان، صندوق پستی 87317-53153، ghasemi@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/08/20

پذیرش: 1400/12/29

کلیدواژگان

تورق، سیکل حرارتی، تیر یک سر گیردار، چقرمگی شکست بین لایه‌ای، کامپوزیت لایه‌ای.

در این پژوهش اثرات سیکل حرارتی خستگی بر روی چقرمگی شکست و بیشینه نیرو در مود اول تورق کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به صورت تحلیلی و تجربی بررسی شده است. برای مطالعه تحلیلی و تجربی بارگذاری حرارتی، نمونه‌هایی شبیه تیر یک سر گیردار با چیدمان 16 لایه تک‌جهته با استفاده از الیاف شیشه تک‌جهته و رزین اپوکسی ساخته شدند. نمونه‌ها تحت سیکل حرارتی بین دو دمای 15 و 65 درجه سانتی‌گراد برای بارگذاری 50 تا 150 سیکل قرار گرفتند. یک گروه از نمونه‌های بدون بارگذاری حرارتی سیکلی، بعنوان گروه کنترل نیز مورد بررسی قرار گرفتند. در هنگام آزمایش و دریافت نتایج از دستگاه آزمون کشش، نمونه‌ها با استفاده از روش برهم‌کنش تصاویر دیجیتالی دو دوربین به منظور اندازه‌گیری طول ترک و بازشدگی دهانه ترک اولیه به دقت مورد ارزیابی و مشاهده دقیق قرار گرفتند و نرخ‌هایی انرژی کرنشی برای محاسبه چقرمگی شکست بحرانی از داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از روش توالی تصاویر، پروفایل جدایش نوک پیش‌ترک اولیه به دست آمد. قوانین المان‌های ناحیه چسبناک برای مدل کردن دقیق نتایج آزمون‌های تجربی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفت. بررسی تغییرات نیرو نشان داد که چقرمگی شکست بحرانی در مود اول تورق به شدت متأثر از پروسه خستگی حرارتی می‌باشد، و به‌صورت غیرخطی با بارگذاری سیکلی حرارتی کاهش می‌یابد.

Investigation of thermal fatigue effects on crack propagation and mode I delamination of multilayer laminated composites using digital image correlation

Behzad Moslemi-Abyaneh¹, Ahmad Reza Ghasemi^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

* P.O.B. 8731753153, Kashan, Iran, ghasemi@kashanu.ac.ir

Keywords

Delamination, Thermal cycling, Double cantilever beam, Interlaminar fracture toughness, Laminated composite.

Abstract

In this research, the influence of thermal cycling on the fracture toughness and maximum load in mode I delamination of polymer matrix composites (PMCs) was investigated experimentally and analytically. To eliminate the effect of the remote ply orientation on the fracture toughness during delamination initiation and propagation, double cantilever beam (DCB) specimens with a stacking sequence of $[0]_{16}$ using unidirectional glass fibers and epoxy resin were considered. The specimens were thermal-cycled between 15°C and 65°C for 50-150 cycles. One group of uncycled specimens were tested at the commencement of the investigation as a control group. During the DCB test and receiving universal tensile machine results, the specimens were inspected by 2 real-time cameras to record the delamination length and initial crack tip opening displacement (ICTOD). The strain energy release rate (SERR) approach was used for obtaining the critical fracture toughness (G_{IC}) from the experimental data. By employing the digital image correlation (DIC) method, the initial crack tip separation profile was obtained. The measured bridging laws were used with cohesive elements in ABAQUS commercial software to accurately model the delamination propagation in DCB specimens. Investigation of load variations revealed that critical fracture toughness in mode I of delamination is firmly affected by the thermal fatigue process.

1- مقدمه

امروزه مواد کامپوزیتی به واسطه خواص مکانیکی فوق‌العاده مانند نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی و امکان طراحی و ساخت منعطف در صنایع متنوعی مانند صنایع مهندسی مکانیک، هوانوردی، خودرو، صنایع دریایی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل تشخیص و مطالعه مودهای مختلف شکست از اهمیت بالایی برخوردار است. تورق یکی از مهم‌ترین مودهای شکست در سازه‌های کامپوزیتی بوده که می‌تواند کارایی و استحکام این مواد را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. روش نرخ رهایی انرژی کرنشی برای تخمین چقرمگی شکست بحرانی برای فهم مقاومت سازه در برابر تورق مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]، به منظور محاسبه مقاومت سازه‌های کامپوزیتی لایه‌ای در برابر مود اول تورق، ساخت تیر یک سر گیردار توسط استاندارد ASTM D5528 برای آزمون شکست پیشنهاد می‌شود [2].

در تحقیقات پیشین محققان بسیاری تأثیر برخی از پارامترهای اساسی مانند عرض نمونه، ضخامت، چیدمان و طول ترک اولیه تیر بر مقاومت تورق سازه‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. در زمینه تأثیرات ضخامت، چقرمگی شکست مود اول کامپوزیت‌های لایه‌ای در [3، 4]، مورد مطالعه قرار گرفته است. کراوچنکو و همکاران [3]، وابستگی چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود اول در کامپوزیت‌های الیاف کربن به ضخامت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که چقرمگی شکست در ضخامت‌های بالا کاهش می‌یابد. به منظور توجیه این پدیده، آن‌ها یک راه‌حل الاستیک خطی که شامل یک معادله غیر تکیین با استفاده از روش المان محدود کرنش صفحه‌ای دوبعدی ارائه دادند. فرمند آشتیانی و همکاران [4]، تأثیرات ضخامت نمونه بر پل‌زنی الیاف در مود اول تورق را مطالعه نمودند. با بررسی تغییرات نرخ رهایی انرژی کرنشی در ضخامت‌های متفاوت، آن‌ها دریافتند که چقرمگی شکست در حالت پایدار و یا پایاروند با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. آن‌ها با استفاده از مشاهده میکروسکوپی دریافتند که تغییرات ضخامت نوع مکانیزم شکست را تغییر نمی‌دهد. شکریه و همکاران [5]، نمودار مقاومت تورق کامپوزیت‌های الیاف تک‌جهته-اپوکسی با طول پیش‌ترک اولیه مختلف را بررسی نمودند. آن‌ها نمونه‌های تیر یک سر گیردار با طول اولیه و ضخامت‌های متفاوت ساختند، سپس به معادله‌ای جهت پیش‌بینی رفتار رشد ترک در این نمونه‌ها دست یافتند. در پژوهش یاد شده تأثیر هندسه و خواص ماده نیز مورد بررسی قرار گرفت.

سازه‌های کامپوزیتی و اتصالات چسبی در معرض مودهای بارگذاری مختلفی هستند. این بارگذاری‌ها می‌توانند شامل بارگذاری استاتیکی، شبه استاتیکی و خستگی در جهات مختلف مانند بازشدگی، برش درون صفحه‌ای، برش بیرون صفحه‌ای و یا ترکیبی از این جهات باشد. روکاندیو و همکاران [6]، رفتار خستگی کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی تحت مود ترکیبی یک و دو را بررسی نمودند. آن‌ها چقرمگی شکست شروع و رشد ترک در نسبت‌های مختلف مودهای بارگذاری را محاسبه نموده و به این نتیجه رسیدند که در مقادیر بالاتری از نسبت مود اول، ترک در نیروهای کمتری شروع به رشد می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که بارگذاری مود اول می‌تواند مود بحرانی‌تری برای سازه‌های مهندسی باشد.

گروه دیگری از محققین نرخ‌های متفاوت بارگذاری را مورد بررسی قرار دادند [7-9]. برای مثال لو و همکاران [7]، آزمون تیر یک سر گیردار را در سرعت‌های 1، 10، 100 و 500 میلی‌متر بر دقیقه انجام دادند. آن‌ها چقرمگی شکست بحرانی نمونه‌های کربن-اپوکسی را با استفاده از روش‌های داده‌کاهی موجود در استاندارد [2]، محاسبه نموده و اذعان داشتند که در محدوده پژوهش انجام شده پارامتر چقرمگی شکست ثابت بوده است.

عده‌ای دیگر از پژوهشگران [8-12]، بر روی پیاده‌سازی آزمون‌های تجربی تیر یک سر گیردار در نرم‌افزارهای المان محدود به منظور افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی و کاهش اختلاف بین این نتایج با نتایج تجربی کار کردند. کامانهو و همکاران [8]، روش ارائه شده توسط دویلا و همکاران [13]، که از سه پارامتر اساسی چقرمگی شکست اولیه، چقرمگی شکست رشد ترک و طول ناحیه آسیب به دست آمده از نمودار مقاومت استفاده می‌نماید، را دنبال نموده تا به قوانین کشش-جدایش هنگام وجود پل‌زنی الیاف دست یابند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی داشت. دمورا و همکاران [12]، مدل طول ترک معادل در آزمون‌های تیر یک سر گیردار را پیشنهاد دادند تا دیگر نیازی به اندازه‌گیری طول ترک حین انجام آزمون نباشد. آن‌ها یک روش داده‌کاهی را افزون بر روش‌های موجود در استاندارد [2]، ارائه نمودند که به جای طول ترک اندازه‌گیری شده از آزمایش تجربی، از همان طول ترک معادل استفاده می‌نماید. پس از به دست آمدن یک رابطه بین چقرمگی شکست و جدایش، کشش قابل محاسبه خواهد بود. فلورس و همکاران [14]، رفتار مود اول، دوم و ترکیبی اتصالات چسبی کامپوزیت‌ها را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نمونه‌های 16 لایه تیر یک سر گیردار، خمش با ترک انتهایی و خمش مود ترکیبی را برای آزمایش‌های تجربی آماده نمودند. با استفاده از روش‌های داده‌کاهی مرسوم، چقرمگی شکست را محاسبه کرده و با استفاده از روش مدل ناحیه چسبناک این آزمون‌ها را در نرم‌افزار المان محدود پیاده‌سازی نمودند. در مورد مود اول نتایج تجربی و عددی، همبستگی بسیار خوبی با یکدیگر داشته، اما در مود دوم و ترکیبی به علت رفتار شکست پیچیده، اختلاف‌هایی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده شد.

شرایط محیطی می‌تواند بر خواص مختلف مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای تأثیر بگذارد. عواملی مانند رطوبت و چرخه حرارتی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین موارد هستند. این عوامل می‌توانند استحکام کششی و خمشی را کاهش داده، خستگی و رشد ترک را تسریع نموده و عمر نهایی سازه‌ها را کاهش دهند. دمورا و همکاران [15]، تأثیرات رطوبت بر خواص شکست کامپوزیت‌های لایه‌ای را با قرار دادن نمونه‌ها تحت تأثیر سه سطح رطوبت نسبی بررسی نمودند. آن‌ها همچنین با استفاده از یک مدل ناحیه چسبناک، رفتار تجربی شکست را مدل‌سازی کردند. کورونادو و همکاران [16]، تأثیرات دما بر کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت بارگذاری مود اول استاتیکی و خستگی را مطالعه نمودند. بدین منظور آزمون‌های تیر یک سر گیردار تحت بارگذاری خستگی و استاتیکی را در دماهای مختلف و متغیر انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در دماهای بسیار پایین، رفتار شکست نمونه‌ها به سمت ترد بودن رفته و پروسه رشد ترک سریع‌تر از زمانی که نمونه‌ها در دمای اتاق هستند، اتفاق می‌افتد. بنابراین شروع تورق در سطوح پایین‌تری از چقرمگی شکست اتفاق می‌افتد. در دماهای بالاتر،

پژوهش‌ها در زمینه بارگذاری حرارتی سیکلی با در نظر گرفتن شرایط محیطی خاص برای سازه‌های کامپوزیتی انجام شده‌اند. بر اساس شرایط محیطی کویر مرکزی ایران حداقل و حداکثر دما به ترتیب 15 و 65 درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. تمامی سازه‌های مهندسی مانند هواپیما در آشیانه چنین تغییرات دمایی را طی یک روز تابستانی تجربه می‌کنند. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی که در بخش قبل توضیح داده شد، تحت تأثیر پروفایل تغییرات دمایی که در شکل 3 نشان داده شده است، قرار گرفتند. به منظور اطمینان از رسیدن دمای قطعه به دمای مورد نظر، دمای نمونه‌ها با استفاده از حس گر دمایی، اندازه‌گیری شده است.

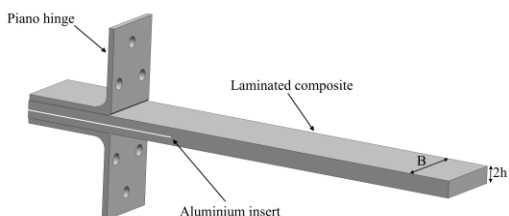


Fig. 1 Double cantilever beam specimen

شکل 1 نمونه تیر یک سر گیردار



Fig. 2 Thermal cycling apparatus

شکل 2 دستگاه سیکل حرارتی

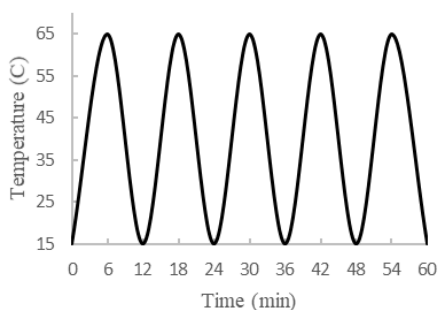


Fig. 3 specimens temperature change profile

شکل 3 پروفایل تغییرات دمای نمونه‌ها

رفتار نرم ماده باعث به دست آمدن مقادیر بالاتری از چقرمگی شکست شده است.

قاسمی و طباطباییان [17]، تأثیرات سیکل حرارتی بر انحنای و کاهش وزن صفحات کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی را مطالعه نمودند. آن‌ها در پژوهش خود نمونه‌ها را به سه دسته کلی نمونه‌ها پس از ساخت، پس از 5 ماه بدون سیکل حرارتی و پس از 5 ماه تحت سیکل حرارتی تقسیم کردند. آن‌ها تعدادی صفحه را نیز تحت 200 سیکل حرارتی بین دمای 20 و 70 درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. با در نظر گرفتن نوع رزین، صفحات کامپوزیتی بین 1.53 تا 1.81 درصد وزن خود را از دست دادند. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین تغییرات در انحنای در 50 سیکل اول رخ می‌دهد.

قاسمی و مرادی [18]، کاهش استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی تحت تأثیر سیکل حرارتی را مورد بحث قرار دادند. تفاوت دماهای مختلف، چیدمان و نسبت حجمی الیاف مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات قابل توجهی در برخی موارد گزارش شد.

اگرچه تحقیقات مختلفی در رابطه با تأثیرات سیکل حرارتی بر خواص مکانیکی وجود دارد، محققان تاکنون تأثیر این مقوله بر چقرمگی شکست و رفتار تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای را کمتر مورد مطالعه قرار داده‌اند. با توجه به اینکه تغییرات دمایی پدیده‌ای قابل توجه و تأثیرگذار در صنایع گوناگون می‌باشد، پژوهش ارائه شده به ارائه تأثیرات تغییرات دما و سیکل حرارتی بر استحکام تورق کامپوزیت‌های چندلایه الیاف اپوکسی می‌پردازد. بر اساس استاندارد، نمونه‌های تیر یک سر گیردار ساخته خواهند شد، و تحت تأثیر 50 تا 150 سیکل حرارتی بین دماهای 15 تا 65 درجه سانتی‌گراد قرار خواهند گرفت. همچنین انجام آزمایش و دریافت داده‌های تجربی از دستگاه آزمون کشش، و رصد نمونه‌ها و گسترش ترک در آن‌ها با استفاده از دوربین‌های متعدد و مناسب، و مطالعه طول تورق و بازشدگی دهانه نوک پیش‌ترک از اهداف این تحقیق است. در پایان چقرمگی شکست بین لایه‌ای با استفاده از روش تئوری تیر اصلاح شده، محاسبه خواهد شد و قوانین کشش-جدایش با استفاده از روش توسعه داده شده به دست می‌آید.

2- بررسی‌های تجربی

1- مشخصات مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

الیاف تک‌جهته شیشه از نوع E با چگالی سطحی 240 گرم بر مترمربع و رزین اپوکسی با چگالی 1.15 گرم بر سانتی‌متر مکعب برای ساخت پنل‌های کامپوزیتی 16 لایه تک‌جهته استفاده شد. برای ایجاد پیش‌ترک اولیه فویل آلومینیومی نازک با ضخامت 15 میکرون در صفحه میانی پنل کامپوزیتی قرار گرفت، تا از ایجاد اتصال بین لایه‌ها در طول مشخص جلوگیری شود. برای ساخت پنل‌های کامپوزیتی مطابق دستورالعمل، رزین ابتدا 24 ساعت در دمای محیط و سپس 6 ساعت در آون پخت شدند. مطابق شکل 1 نمونه‌ها با ابعاد استفاده از سنگ الماسه از صفحه کامپوزیتی جدا شدند.

2-2 اعمال سیکل حرارتی

دستگاه سیکل حرارتی نشان داده شده در شکل 2 متشکل از یک محفظه سرد و یک محفظه گرم برای اعمال بارگذاری حرارتی سیکلی بر روی نمونه‌ها، مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات فنی این دستگاه در [19] آمده است. اکثر

3-2- انجام آزمون‌های تجربی

بر اساس استاندارد سطح نمونه‌ها با استفاده از سمباده از هرگونه مواد اضافه پاک شد. سطوح جانبی برای مشاهده بهتر رشد ترک به لاک غلط‌گیر مایع آغشته شد. در این پژوهش از روش همبستگی تصاویر دیجیتال به‌عنوان یک روش غیرتماسی و اپتیک به منظور تحلیل میدان‌های جابجایی نوک پیش‌ترک یا محاسبه اندازه جدایش دهانه نوک پیش‌ترک استفاده شد. اساس این روش مقایسه تصاویر قبل و بعد از بارگذاری قطعه بوده و به منظور انجام این فرآیند، لازم است تا روی سطح نمونه الگویی رنگی ایجاد شود. بدین منظور یک الگوی سفید و مشکی نقطه-نقطه نیز مطابق شکل 4 در مجاورت نوک پیش‌ترک با استفاده از رنگ سفید و مشکی مات، به ترتیب به عنوان پس زمینه و الگو ایجاد شد.

لولاهای در دو سمت قسمت انتهایی نمونه با استفاده از سوپرچسب چسبانده شدند تا بتوان نیرو را با استفاده از لولاهای به نمونه وارد نمود. سطح لولاهای و نمونه پیش از چسباندن با استفاده از استون چربی زدایی و با استفاده از کاغذ سمباده 200 گریتی زبر گردید. همان‌طور که در شکل 5 قابل مشاهده است، کاغذ شطرنجی با فواصل یک میلی‌متری به لبه کناری نمونه چسبانده شد، تا طول ترک در هر زمان قابل اندازه‌گیری باشد.

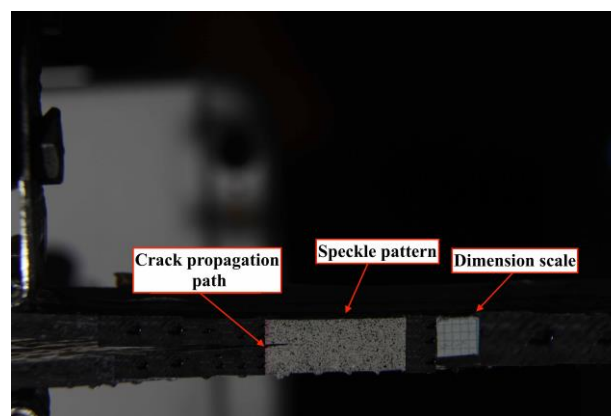


Fig. 4 Speckle pattern for ICTOD measurement

شکل 4 الگوی نقطه-نقطه برای اندازه‌گیری بازشدگی دهانه نوک پیش‌ترک

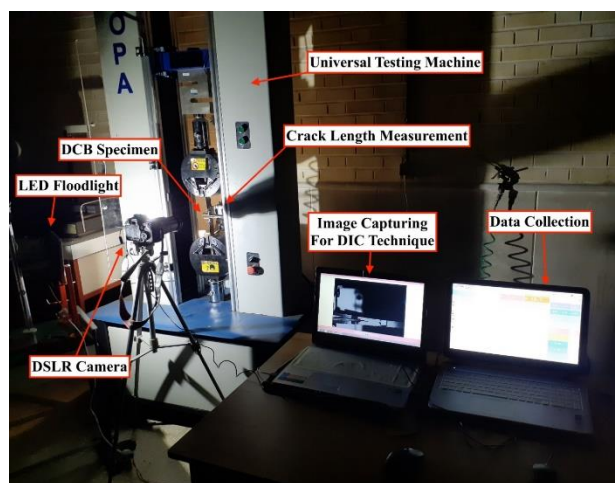


Fig. 6 Experimental tests set up

شکل 6 پیکربندی تجهیزات آزمون تجربی

برای به دست آوردن خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و مدول کششی، نمونه‌های کامپوزیتی بدون پیش‌ترک با استفاده از استاندارد ASTM D3039 [22] آماده گردیدند. برای ساخت نمونه تک فازی رزین جهت محاسبه استحکام و مدول کششی ماتریس، مطابق با استاندارد ASTM D638 [23] از قالب سیلیکونی استفاده شد. به منظور اطمینان از صحت نتایج برای هر آزمایش پنج نمونه ساخته شد. خواص مکانیکی به دست آمده از آزمون‌های تجربی و دیتاشیت مواد که برای محاسبه چقرمگی شکست و شبیه‌سازی المان محدود مورد نیاز است، در جدول 1 قابل مشاهده است.

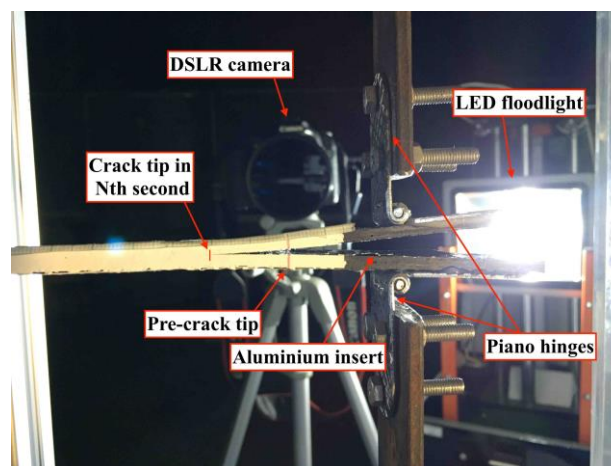


Fig. 5 DCB specimen from crack length recorder point of view

شکل 5 نمونه تیر یک سر گیردار از نمای دید دوربین ثبت اندازه طول ترک

جدول 1 خواص مکانیکی مواد

Table 1 Mechanical properties of materials

E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	ν_{12}	E _{fx} (GPa)	
29.3	10.8	4.2	0.27	33	کامپوزیت شیشه/پوکسی
2.7	2.7	2.1	0.33	3.6	رزین

4-2- محاسبه چقرمگی شکست

اکنون لازم است چقرمگی شکست برای شروع و رشد ترک محاسبه گردد. سه روش متفاوت برای پیدا کردن نقطه شروع تورق ارائه شده است: بر روی نمودار نیرو برحسب جابجایی، الف) نقطه‌ای که شروع رشد ترک با چشم دیده شده است، ب) نقطه‌ای که نرمی، 5 درصد افزایش یافته یا نیرو به بیشینه مقدار خود رسیده است، و ج) در نقطه‌ای که نمودار نیرو جابجایی از حالت خطی خارج می‌شود. برای رزین‌های سخت و ترد یک ناحیه با رفتار غیرخطی ممکن است، پیش از نقطه‌ای که رشد ترک از لبه‌های نمونه با چشم دیده می‌شود، اتفاق بیفتد. همان‌گونه که در حین ضبط داده‌ها از دستگاه آزمون کشش مشاهده شد، یک کاهش کوچک و ناگهانی در اندازه نیرو هم‌زمان با مشاهده شروع رشد ترک روی نمونه پیش از رسیدن به بیشینه نیرو اتفاق افتاد. این مهم می‌تواند ناشی از رفتار ترد ماتریس مورد استفاده در این پژوهش باشد.

اروین [24] انرژی مورد نیاز برای شروع تورق را با نرخ‌های انرژی کرنشی تحت شرایط کنترل جابجایی به صورت زیر تعریف نمود:

$$G = -\frac{dU}{da} \quad (1)$$

که U انرژی پتانسیل کل و A مساحت کل ترک می‌باشد. زمانی که تورق آغاز می‌شود، چقرمگی شکست G_I با نرخ‌های انرژی کرنشی بحرانی برابر می‌گردد، (G_{IC}). چقرمگی شکست بحرانی عموماً با استفاده از رابطه اروین-کیز بیان می‌گردد:

$$G = \frac{P^2 dc}{2B da} \quad (2)$$

که P اندازه نیرو در نقطه شروع تورق، B عرض نمونه، a طول ترک تورق و dC/da تغییرات نرمی حین رشد تورق می‌باشد.

به منظور آنالیز و کاهش تعداد داده‌های تجربی از آزمون‌های تیر یک سر گیردار و همچنین محاسبه چقرمگی شکست مود اول تورق، در استاندارد سه روش الف) تئوری تیر اصلاح شده، ب) روش کالیبراسیون نرمی و ج) روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده ارائه شده است. در این تحقیق، تمامی روش‌ها برای محاسبه چقرمگی شکست مورد استفاده قرار گرفته و نتایج در اکثر موارد بسیار نزدیک بودند. از طرفی بنا بر پیشنهاد استاندارد نتایج مستخرج از روش تئوری تیر اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفتند:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \quad (3)$$

که δ جابجایی خط اثر نیرو و Δ پارامتر اصلاح طول ترک بوده که همان عرض از مبدأ نمودار ریشه سوم نرمی بر حسب طول ترک می‌باشد. نرمی C نیز با استفاده از رابطه δ / P محاسبه می‌گردد.

3- نتایج و بحث

در این پژوهش، نمونه‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم شدند. الف) نمونه‌هایی که در معرض سیکل حرارتی قرار گرفتند. ب) نمونه‌های بدون سیکل حرارتی که به عنوان گروه کنترل در نظر گرفته شدند. نمونه‌های سیکل شده تحت تأثیر بارگذاری حرارتی سیکلی 50، 100 و 150 سیکل حرارتی قرار گرفتند. منحنی‌های نیرو برحسب جابجایی، برای تمامی نمونه‌های کامپوزیت دوفازی الیاف-ماتریس تیر یک سر گیردار 16 لایه تک‌جهته پیش‌ترک‌دار استخراج شد. چقرمگی شکست بین لایه‌های تورق نیز با استفاده از روش تئوری تیر اصلاح شده به دست آمد. یکی از پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه چقرمگی شکست طول ترک می‌باشد که برای دستیابی به این هدف تصاویر با رزولوشن بالا هنگام آزمایش از سطح جانبی نمونه‌ها گرفته شد و با استفاده از این تصاویر طول ترک در هر لحظه به دست آمد. شکل 7 نمونه‌ای از تصاویر ضبط شده جهت به دست آمدن طول ترک را نشان می‌دهد:

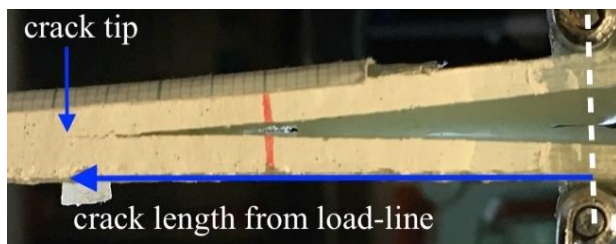


Fig. 7 crack length measurement

شکل 7 اندازه‌گیری طول ترک

شروع ثبت تصاویر لبه جانبی نمونه‌ها و آزمون تیر یک سر گیردار با دقت زیاد همگام‌سازی شد، تا بتوان تصاویر ضبط شده را به نقاط مشخصی بر روی نمودار نیرو-جابجایی نسبت داد. بر اساس پارامترهای به دست آمده، چقرمگی شکست شروع و رشد ترک محاسبه شد و در ادامه مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

3-1- نیروی اعمالی

شکل 8 منحنی‌های نیرو برحسب جابجایی را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. در شکل 8 افت‌های ناگهانی و در برخی موارد پراکندگی‌هایی قابل مشاهده است، که با استفاده از نرم‌افزار متلب همان‌طور که در شکل 9 دیده می‌شود خطوطی بین اعداد نیروها به‌صورت پوش ترسیم شده است. با استفاده از روش احتراق رزین یا آنالیز TGA کسر حجمی الیاف برای تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری و به‌طور میانگین عددی در حدود 48.8 درصد گزارش شد. اندازه نیرو در نقطه شروع رشد ترک که با چشم دیده شد پس از 50، 100 و 150 سیکل به ترتیب 30، 45.4 و 54.5 درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش تعداد چرخه حرارتی، افت‌های شدیدتر و ناگهانی در طول آزمون مشاهده شد، که این موضوع می‌تواند ناشی از افت خواص رزین پس از قرارگیری در تغییرات دمایی متعدد باشد که نهایتاً منجر به بروز رفتار ترد و کاهش جذب انرژی توسط نمونه شود.

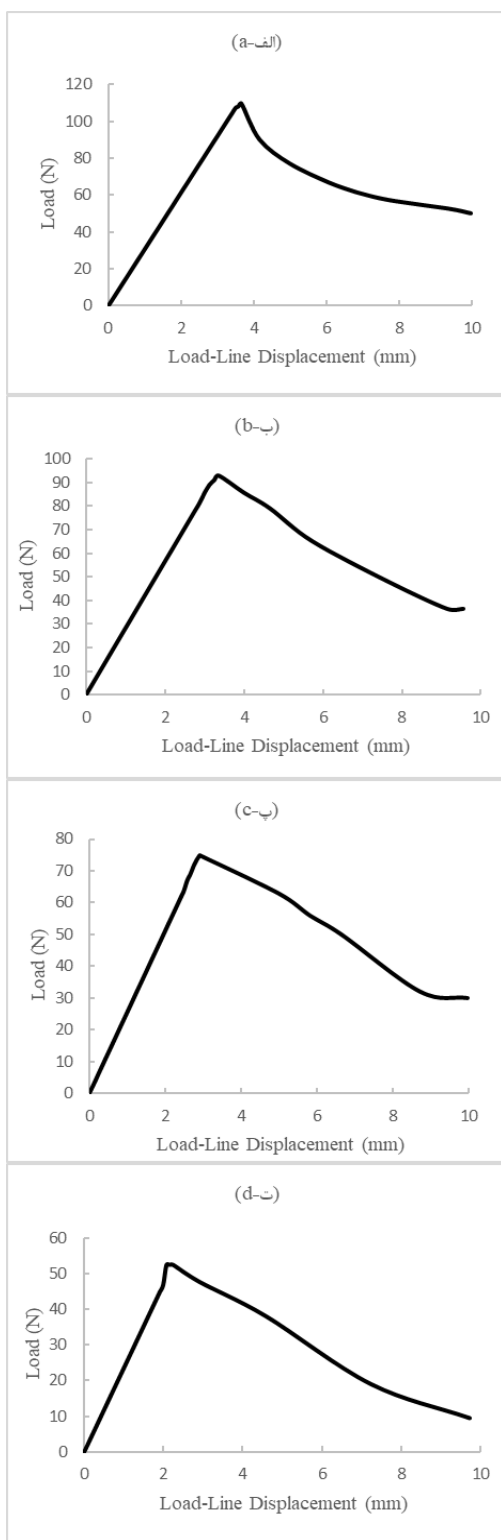


Fig. 9 Load-displacement curves fitted on maximum amounts for specimens under different number of cycles: a) uncycled, b) after 50 cycles, c) after 100 cycles, d) after 150 cycles

شکل 9 نمودارهای نیرو-جابجایی پس از حذف داده‌های پراکنده برای نمونه‌های الف (بدون سیکل، ب) 50 سیکل، پ) 100 سیکل، ت) 150 سیکل حرارتی

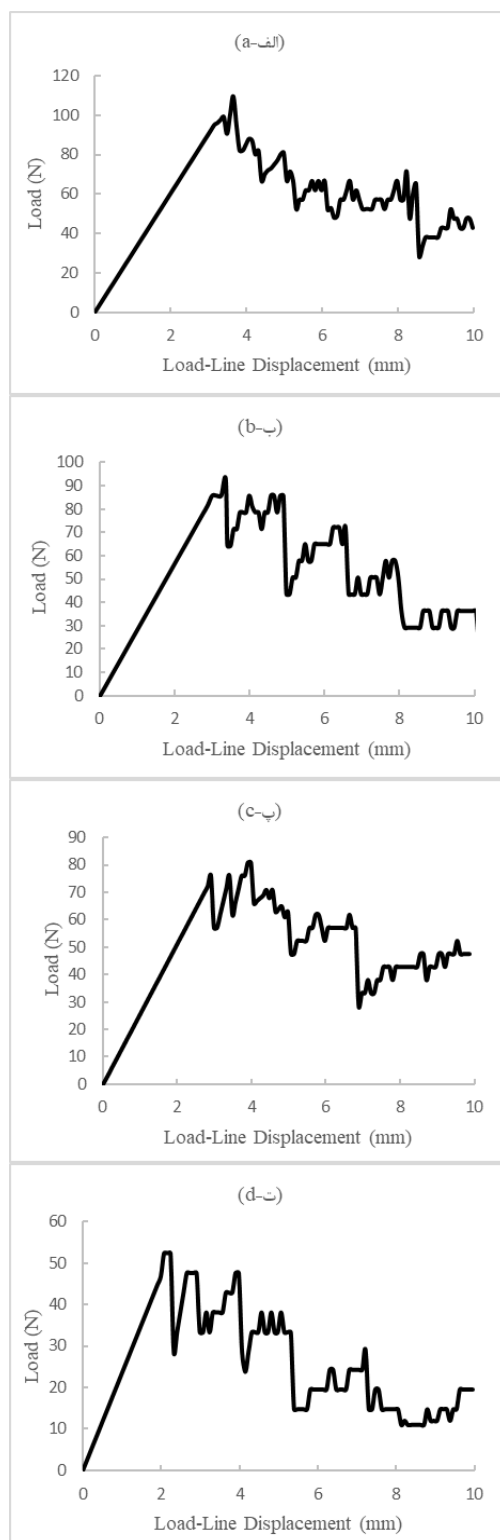


Fig. 8 Load-displacement curves from universal testing machine for specimens under different number of cycles: a) uncycled, b) after 50 cycles, c) after 100 cycles, d) after 150 cycles

شکل 8 نمودارهای اولیه نیرو-جابجایی دریافتی از دستگاه آزمون کشش برای نمونه‌های الف (بدون سیکل، ب) 50 سیکل، پ) 100 سیکل، ت) 150 سیکل حرارتی

جدول 2 نیرو و جابجایی در نقاط شروع رشد ترک و در نقاط پیک نمودار تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول 2 نیرو و جابجایی در نقاط پیک و VIS روی نمودار

Table 2 Load and displacement at VIS and peak points of the curves

تعداد سیکل	نیرو در نقطه VIS	جابجایی در نقطه VIS	نیرو در پیک نمودار	جابجایی در پیک نمودار
0 سیکل	52.39	1.660	109.5	3.652
50 سیکل	36.64	1.411	92.87	3.369
100 سیکل	28.57	1.079	75.31	2.905
150 سیکل	23.81	0.996	52.39	2.241

نتایج تجربی نشان داد بیشترین افت نیرو در 50 سیکل اول اتفاق می‌افتد و با افزایش تعداد سیکل‌های اعمالی، نیرو و جابجایی که در آن تورق آغاز می‌شود به عددی ثابت میل می‌کند. این موضوع می‌تواند ناشی از تأثیر وجود نوک فویل آلومینیومی در مجاورت رزین در صفحه میانی باشد. در دماهای بالاتر، آلومینیوم حرارت را به رزین در مجاورت نوک پیش‌ترک به نحوی انتقال می‌دهد که خواص مکانیکی در سیکل‌های پایین‌تر در این ناحیه نسبت به سایر نقاط بیشتر کاهش پیدا کند. تمامی گروه‌های نمونه‌ها افزایش خطی نیرو تا رسیدن به نقطه شروع رشد ترک را تجربه کردند. نمونه‌های مرجع (سیکل حرارتی نشده) افزایش نیرو و افت نیروی نسبتاً منظمی را پس از شروع رشد ترک تجربه کرده، اما نتایج برای نمونه‌هایی که تحت تأثیر بارگذاری سیکل حرارتی قرار گرفتند، قدری متفاوت بود. بی‌نظمی‌ها و غیرخطی شدن روند افزایش و کاهش نیرو در این نمونه‌ها مشاهده شد، که می‌تواند ناشی از آثار ترمومکانیکی ماده باشد.

2-3- چقرمگی شکست اولیه تورق

شروع تورق با استفاده از تصویربرداری با کیفیت مطلوب، همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است، تعیین شد. به واسطه همگام بودن عکس‌برداری و شروع آزمون تجربی، تمامی پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه چقرمگی شکست اولیه به طور دقیق در دسترس قرار گرفت و با استفاده از همین داده‌ها چقرمگی شکست اولیه برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید. همچنین نظر به ارتباط مستقیم نقطه آغازین و اندازه چقرمگی شکست اولیه، هرگاه رشد ترک در نیروهای کمتر رخ دهد، به دنبال آن چقرمگی شکست نیز کاهش می‌یابد.

3-3- چقرمگی شکست رشد ترک

در این قسمت رفتار چقرمگی شکست در هنگام رشد ترک در نمونه‌ها مطالعه گردید. در نمونه‌های بدون اثرات سیکل حرارتی، میانگین چقرمگی شکست در ناحیه ماندگار برابر با $G_{IC} = 360 \pm 40 \text{ J/m}^2$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل 9 قابل مشاهده است، بزرگی چقرمگی شکست در حین رشد ترک به حدی ثابت میل می‌کند و افت و خیز شدیدی در این ناحیه مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که در مرجع [5] مشاهده شده است، برای طول ترک اولیه و ضخامت نمونه تیر یک سر گیردار در محدوده $8.5 < a_0/h < 19$ ، یک ناحیه مسطح در نمودار مقاومت دیده می‌شود. تأثیر پدیده سیکل حرارتی بر چقرمگی شکست رشد ترک نیز علاوه بر شروع رشد ترک بسیار حائز اهمیت می‌باشد، زیرا برای چقرمگی شکست اولیه صرفاً کاهش مقادیر، موضوعی است

که جلب توجه می‌نماید، اما حین رشد ترک در نمونه‌هایی که تحت سیکل حرارتی قرار گرفتند، افزون بر کاهش مقدار، رفتارهای غیرعادی در شکل نمودار و روند تغییرات مقادیر نیز مشاهده می‌شود. در این آزمون‌ها به صورت چشمی دیده شد که با افزایش تعداد سیکل‌ها، پل‌زنی الیاف کاهش چشمگیری پیدا کرد. این مشاهدات با بررسی نمودارهای مقاومت نمونه‌های کامپوزیتی در شکل 10 تأیید می‌شوند. در این نمودارها با افزایش تعداد سیکل حرارتی، مقاومت نمونه نسبت به پیشروی ترک تا رسیدن به 150 سیکل، که به واسطه تغییرات دمای متعدد پل‌زنی الیاف به کمترین مقدار خود رسید، کاهش یافته است.

3-4- قوانین مدل ناحیه چسبناک

به منظور پیاده‌سازی آزمون تجربی تیر یک سر گیردار در نرم‌افزار المان محدود، از قوانین مدل ناحیه چسبناک دوزنقه‌ای استفاده شد. به منظور تعیین قوانین، از روش ارائه شده در مرجع [12] استفاده شد، که در این روش به جای استفاده از مدول یانگ در جهت طولی، یک مدول خمشی اصلاح شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه و مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$E_f = \frac{8(a_0 + \Delta)}{C_0 B h} \left(\frac{(a_0 + \Delta)^2}{h^2} + \frac{3(1 + \nu)}{5} \right) \quad (4)$$

که در این رابطه a_0 طول ترک اولیه، Δ پارامتر اصلاح طول ترک محاسبه شده از طریق روش تئوری تیر اصلاح شده و C_0 نرمی قسمت سخت‌شوندگی می‌باشد. با محاسبه نرمی در هر نقطه از منحنی نیرو-جابجایی و وارد نمودن آن در رابطه، طول ترک معادل به دست می‌آید:

$$\frac{8a_e^3}{E_f B h^3} + \frac{24(1 + \nu)a_e}{5E_f B h} - C = 0 \quad (5)$$

با داشتن طول ترک معادل برای هر نقطه روی منحنی، نمودار انرژی شکست نسبت به جدایش قابل رسم خواهد بود. از آنجا که انرژی شکست تابعی از جدایش رسم شده است، مقادیر کشش با مشتق‌گیری از رابطه انرژی شکست به دست خواهد آمد. هر قانون کشش جدایش دارای 5 پارامتر کلیدی است: مساحت زیر منحنی برابر است با چقرمگی شکست G_I ، مقدار بیشینه کشش T ، و 3 پارامتر جابجایی نسبی اولیه $\delta_{1,I}$ و ثانویه $\delta_{2,I}$ در نقطه جدایش و بیشینه جابجایی نسبی $\delta_{II,I}$. نمودارهای کشش-جدایش برای چهار دسته نمونه با تعداد سیکل حرارتی متفاوت در شکل 11 قابل مشاهده هستند.

پارامترهای یادشده با استفاده از یک کد رایانه‌ای در نرم‌افزار پیاده‌سازی شده و نمودارهای نیرو-جابجایی به عنوان خروجی دریافت شد که در شکل 12 نشان داده شده است.

4- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، مطالعه تأثیرات سیکل حرارتی بر مقاومت تورق نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. به همین منظور نمونه‌های کامپوزیتی متعدد ساخته شدند، و تحت تأثیر بارگذاری سیکل حرارتی مشخص قرار گرفته و نهایتاً آزمون مود اول شکست بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین یک روش المان محدود به منظور صحت‌گذاری نتایج تجربی و مطالعه اثرات سیکل حرارتی بر تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای، به کار گرفته شد. تعیین قوانین کشش-جدایش، به دست آوردن نمودارهای نیرو-جابجایی از نرم‌افزار المان محدود را ممکن ساخت. بخشی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق به شرح ذیل دسته بندی شده است:

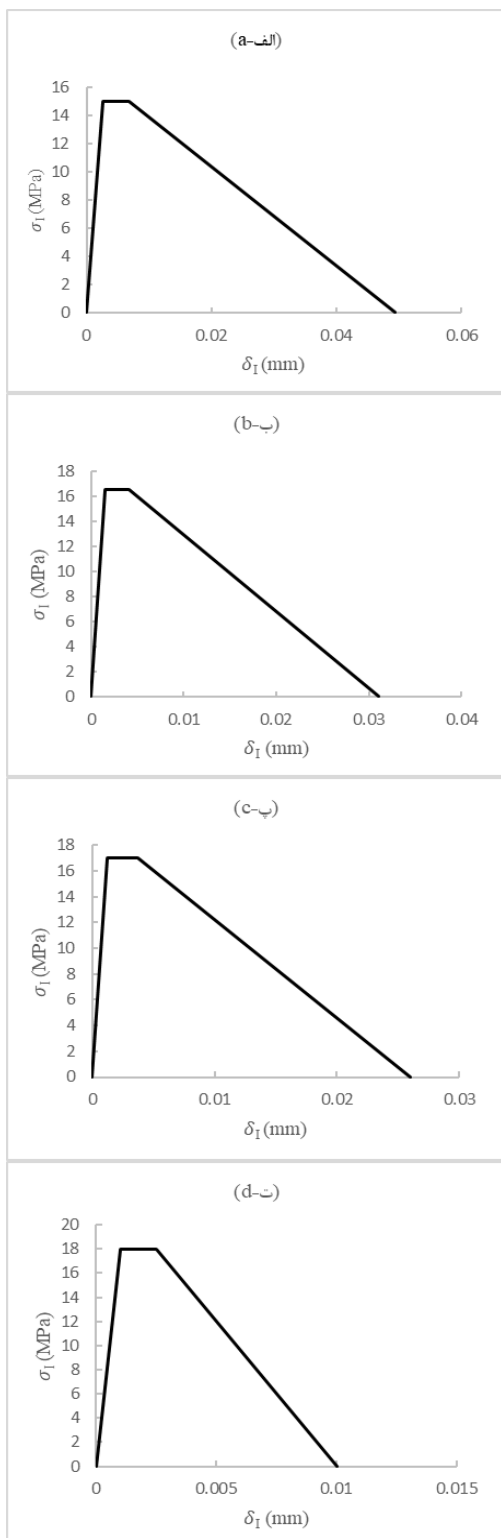


Fig. 11 Traction-Separation Laws for specimens under different number of cycles: a.uncycled, b.after 50 cycles, c.after 100 cycles, d.after 150 cycles

شکل 11 قوانین کشش-جدایش برای نمونه‌های تحت تعداد سیکل‌های مختلف
الف- بدون سیکل، ب- 50 سیکل، پ - 100 سیکل، ت- 150 سیکل حرارتی

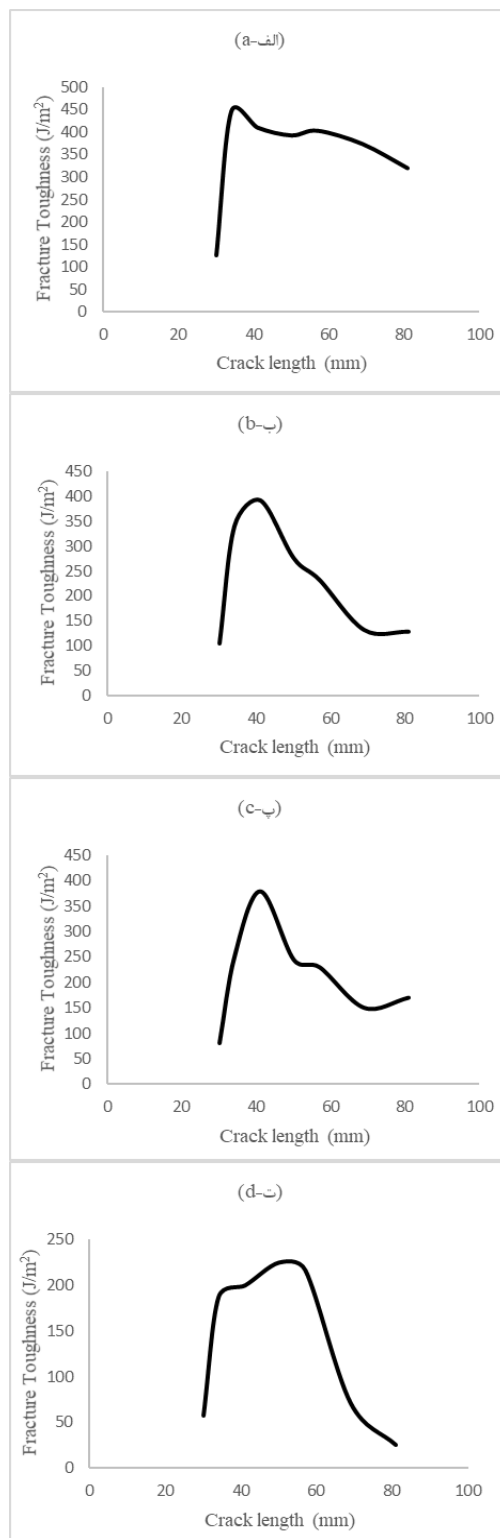


Fig. 10 Resistance curves of specimens under different number of cycles: a) uncycled, b) after 50 cycles, c) after 100 cycles, d) after 150 cycles

شکل 10 نمودارهای مقاومت نمونه‌ها تحت سیکل‌های حرارتی متفاوت الف) بدون سیکل، ب) 50 سیکل، پ) 100 سیکل، ت) 150 سیکل حرارتی

- بیشینه نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌ها با قرارگیری در معرض تغییرات دما کاهش می‌یابد.
- شروع تورق با افزایش تعداد سیکل حرارتی در سطوح کمتری از نیرو اتفاق می‌افتد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت سیکل حرارتی می‌تواند باعث ایجاد آسیب و یا شکست زودرس در سازه‌های کامپوزیتی شود. مطالعه نمونه‌ها تحت سطوح گوناگون سیکل حرارتی نشان داد که این پدیده می‌تواند چقرمگی شکست را در جنبه‌های گوناگون تحت تأثیر قرار دهد.
- چقرمگی شکست اولیه پس از 150 سیکل در حدود 54 درصد کاهش یافت، که این موضوع مستقیماً به کاهش خواص تحت شرایط دمایی مربوط است.
- در قسمت صعودی نمودار مقاومت، نمونه‌های مرجع به یک حد بیشینه رسیده سپس با افزایش طول ترک حالت پایاروند را تجربه کردند، لیکن با اعمال و افزایش تعداد سیکل حرارتی، قله نمودار کاهش پیدا کرد تا در 150 سیکل به کمترین مقدار خود رسید.
- بی‌نظمی‌هایی در نمودارهای نیرو برحسب جابجایی و چقرمگی شکست نمونه‌های تحت 150 سیکل مشاهده شد که نشان می‌دهد تعداد سیکل حرارتی بالا می‌تواند باعث ایجاد آسیب شدید و فعل و انفعالات شیمیایی در رزین شود. قوانین مدل ناحیه چسبناک به دست آمده نشان داد که با افزایش تعداد سیکل حرارتی بیشینه جابجایی که در آن جدایش کامل اتفاق می‌افتد، کاهش یافته و کشش موضعی افزایش می‌یابد. این پدیده نشان می‌دهد سیکل حرارتی می‌تواند رفتار ماده را تغییر داده، به رفتار ترد نزدیک نموده و انرژی جذب شده توسط ماده کاهش یابد.

5- مراجع

- [1] Shokrieh, M., Salamat-Talab, M. and Heidari-Rarani, M., "Dependency of Bridging Traction of Dcb Composite Specimen on Interface Fiber Angle" Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 90, pp. 22-32, 2017.
- [2] ASTM, D., "5528-01: Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites" Annual book of ASTM standards, Vol. 15, 2001.
- [3] Kravchenko, O. G., Kravchenko, S. G. and Sun, C.-T., "Thickness Dependence of Mode I Interlaminar Fracture Toughness in a Carbon Fiber Thermosetting Composite" Composite Structures, Vol. 160, pp. 538-546, 2017.
- [4] Farmand-Ashtiani, E., Cugnoni, J. and Botsis, J., "Specimen Thickness Dependence of Large Scale Fiber Bridging in Mode I Interlaminar Fracture of Carbon Epoxy Composite" International Journal of Solids and Structures, Vol. 55, pp. 58-65, 2015.
- [5] Shokrieh, M., Heidari-Rarani, M. and Ayatollahi, M., "Delamination R-Curve as a Material Property of Unidirectional Glass/Epoxy Composites" Materials & Design, Vol. 34, pp. 211-218, 2012.
- [6] Rocandio, C., Viña, J., Argüelles, A. and Rubiera, S., "Study of Fatigue Behavior of Epoxy-Carbon Composites under Mixed Mode I/II Loading" Advanced Engineering Materials, Vol. 20, No. 2, pp. 1700569, 2018.
- [7] Low, K., Teng, S., Johar, M., Israr, H. and Wong, K., "Mode I Delamination Behaviour of Carbon/Epoxy Composite at Different

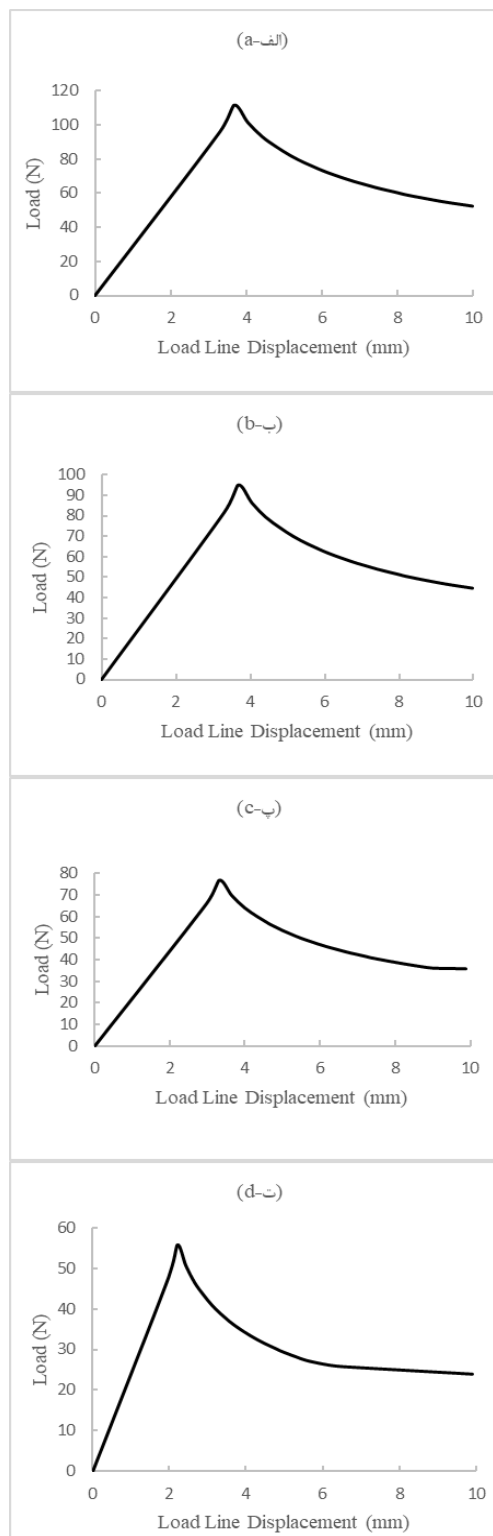


Fig. 12 Load-displacement curves from FEA for specimens under different number of cycles: a.uncycled, b.after 50 cycles, c.after 100 cycles, d.after 150 cycles

شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی دریافت شده از شبیه‌سازی المان محدود نمونه‌های الف-بدون سیکل، ب-50 سیکل، پ - 100 سیکل، ت-150 سیکل حرارتی

- Displacement Rates“ Composites Part B: Engineering, Vol. 176, pp. 107293, 2019.
- [8] Heidari-Rarani, M., Shokrieh, M. and Camanho, P., “Finite Element Modeling of Mode I Delamination Growth in Laminated Dcb Specimens with R-Curve Effects“ Composites Part B: Engineering, Vol. 45, No. 1, pp. 897-903, 2013.
- [9] Bae, H., Kang, M., Woo, K., Kim, I.-G. and In, K.-h., “Test and Analysis of Modes I, II and Mixed-Mode I/II Delamination for Carbon/Epoxy Composite Laminates“ International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 20, No. 3, pp. 636-652, 2019.
- [10] Wang, Z., Zhao, J., Ma, X., Wang, S. and Yang, X., “Numerical Simulation of Progressive Delamination in Composite Laminates under Mode I and Mode II Loadings“ Mechanics of Composite Materials, Vol. 56, No. 6, pp. 735-746, 2021.
- [11] Gong, Y., Chen, X., Tao, J., Zhao, L., Zhang, J. and Hu, N., “A Simple Procedure for Determining the Mode I Bridging Stress of Composite Dcb Laminates without Measuring the Crack Opening Displacement“ Composite Structures, Vol. 243, pp. 112147, 2020.
- [12] De Moura, M., Campilho, R. and Gonçalves, J., “Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mode I Loading“ Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 10-11, pp. 2224-2230, 2008.
- [13] Dávila, C. G., Rose, C. A. and Camanho, P. P., “A Procedure for Superposing Linear Cohesive Laws to Represent Multiple Damage Mechanisms in the Fracture of Composites“ International Journal of Fracture, Vol. 158, No. 2, pp. 211-223, 2009.
- [14] Floros, I., Tserpes, K. and Löbel, T., “Mode-I, Mode-II and Mixed-Mode I+ II Fracture Behavior of Composite Bonded Joints: Experimental Characterization and Numerical Simulation“ Composites Part B: Engineering, Vol. 78, pp. 459-468, 2015.
- [15] Fernandes, R. L., De Moura, M. and Moreira, R., “Effect of Moisture on Pure Mode I and II Fracture Behaviour of Composite Bonded Joints“ International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 68, pp. 30-38, 2016.
- [16] Coronado, P., Argüelles, A., Viña, J., Mollón, V. and Viña, I., “Influence of Temperature on a Carbon-Fibre Epoxy Composite Subjected to Static and Fatigue Loading under Mode-I Delamination“ International Journal of Solids and Structures, Vol. 49, No. 21, pp. 2934-2940, 2012.
- [17] Tabatabaeian, A. and Ghasemi, A. R., “Curvature Changes and Weight Loss of Polymeric Nano-Composite Plates with Consideration of the Thermal Cycle Fatigue Effects and Different Resin Types: An Experimental Approach“ Mechanics of Materials, Vol. 131, pp. 69-77, 2019.
- [18] Ghasemi, A. and Moradi, M., “Effect of Thermal Cycling and Open-Hole Size on Mechanical Properties of Polymer Matrix Composites“ Polymer Testing, Vol. 59, pp. 20-28, 2017.
- [19] Ghasemi, A. and Moradi, M., “Low Thermal Cycling Effects on Mechanical Properties of Laminated Composite Materials“ Mechanics of Materials, Vol. 96, pp. 126-137, 2016.
- [20] Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S. and Schmid, B., “Fiji: An Open-Source Platform for Biological-Image Analysis“ Nature methods, Vol. 9, No. 7, pp. 676-682, 2012.
- [21] GmbH, G., Digital Image Correlation and Strain Computation Basics, GOM GmbH Braunschweig, Germany, 2016.
- [22] Testing, A. S. f. and Materials, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials“, ASTM international, 2006.
- [23] International, A., “Astm D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics“, ASTM International, 2015.
- [24] Wells, A. A., George Rankin Irwin. 26 February 1907—9 October 1998: Elected For. Mem. Rs 1987, The Royal Society, 2000.



امکان‌سنجی ساخت کامپوزیت سخت پایه آهنی با رخنه‌دهی مذاب چدن خاکستری درون اسکلت متخلخل از براده فولاد زنگ‌نزن 304

راضیه آوند¹، احمد قادری حمیدی^{2*}، مهدی پور عبدلی²

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

2- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

* همدان، صندوق پستی 65155-579، ghaderi@hut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله:
کامپوزیت‌های زمینه آهنی حاوی ذرات سخت در برابر سایش خراشان مقاومت خوبی دارند و یکی از روش‌های تولید آنها ریخته‌گری- رخنه‌دهی است که توانایی ساخت قطعات تقویت شده موضعی با کامپوزیت‌ها را دارد. در این پژوهش رخنه‌دهی مذاب چدن خاکستری درون اسکلت متخلخلی از براده‌های فولاد زنگ‌نزن 304 بررسی شده است. مذاب چدن توسط نیروهای موئینگی به درون اسکلت متخلخل کشیده شد. در دمای رخنه‌دهی مذاب چدن خاکستری با براده جامد فولاد 304 در تماس بود. به دلیل نفوذ عنصر کروم به عنوان یک عنصر کاربیدزا و نیکل به درون مذاب چدن خاکستری، ترکیب شیمیایی آن تغییر کرده و مشابه ترکیب چدن‌های سفید Ni-Hard شده بود. با نفوذ و تبادل عناصر آلیاژی کامپوزیت زمینه آهنی با ذرات سخت کاربید M_7C_3 (M: آهن و کروم) و زمینه‌ی فریتی-آستنیتی به دست آمد. مکانیسم تشکیل و نوع و سختی فازها و نواحی مختلف با میکروسکوپ نوری و الکترونی و XRD و میکروسختی سنجی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به قیمت نسبتاً پایین چدن خاکستری و ضایعاتی بودن براده‌های تراشکاری فولاد زنگ‌نزن می‌توان گفت که روشی برای تولید قطعات اقتصادی تقویت شده با کامپوزیت‌های سطحی پیشنهاد شده است.	دریافت: 1400/08/26 پذیرش: 1400/12/06 کلیدواژگان کامپوزیت پایه آهنی، کاربید کروم، ریخته‌گری- رخنه‌دهی.

Feasibility of Production of an Iron-base Metal Matrix Composite by Infiltration of molten Gray Cast Iron into a 304 Stainless Steel Porous Skeleton

Raziye Avand¹, Ahmad Ghaderi Hamidi^{1*}, Mahdi Pourabdoli¹

1- Department of Materials Science and Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

* P.O.B. 65155-579, Hamedan, Iran, ghaderi@hut.ac.ir

Keywords

Iran-Matrix Composites, Chromium Carbides, Infiltration-Casting

Abstract

Iron-based metal matrix composites containing hard particles have good resistance to abrasive wear. One of their production methods is infiltration-casting, which has the ability to produce surface composites reinforced parts. In this Article, the infiltration of molten gray cast iron into a porous skeleton of compacted swarfs of 304 stainless steel has been investigated. The molten cast iron was pulled into the porous skeleton by capillary forces. At the infiltration temperature of the molten gray cast iron, it was in contact with the solid skeleton of 304 steel. Due to the diffusion of chromium as a carbide-maker element and nickel element into the molten gray cast iron, its chemical composition changed and became similar to the composition of white Ni-Hard cast irons. By diffusion and exchange of alloying elements, an iron matrix with hard chromium-iron carbide (M_7C_3) particles and a ferritic-austenitic matrix were obtained. The microstructure formation, type, and hardness of different phases were examined with light and electron microscopy, XRD, and microhardness measurement. Due to the relatively low price of gray cast iron and the waste stainless steel turning chips, it can be said that a method has been proposed to produce economical parts reinforced with surface composites.

1- مقدمه

می‌شوند و از لحاظ جایگزینی قطعات و وقفه در انجام کار، هزینه زیادی را تحمیل می‌کنند. قطعات در معرض سایش باید دارای فازهایی سخت‌تر از مواد معدنی مورد فرآوری باشند و همچنین چقرمگی کافی در مقاومت برابر ضربات

قطعات فلزی که در صنایع استخراج و فرآوری مواد معدنی و ماشین آلات راه‌سازی استفاده می‌شوند، به دلیل تماس با مواد سخت دچار سایش خراشان¹

¹ Abrasive Wear

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "Feasibility of Production of an Iron-base Metal Matrix Composite by Infiltration of molten Gray Cast Iron into a 304 Stainless Steel Porous Skeleton", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1653-1658, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.542882.1757>

تشکیل دارند که M عناصر آهن و کروم است. کاربید M_7C_3 درای سختی 1500-1050 ویکرز است به مقاومت به سایش خوبی ایجاد می‌کند و همچنین به دلیل ساختار ذرات غیرپیوسته مقاومت به ضربه خوبی ایجاد می‌کند [33]. در پژوهش‌های قبلی برای ایجاد کامپوزیت ضد سایش موضعی کمتر از کروم استفاده شده است. برخلاف پژوهش‌های قبلی که از فلزات کاربیدزا به صورت خالص استفاده شده است، در این پژوهش برای تامین عنصر کاربیدزا کروم از براده‌های تراشکاری فولاد ضد زنگ استفاده شد که به دلیل ضایعاتی بودن براده‌ها مزیت اقتصادی زیادی دارد. در این پژوهش برای تامین کربن و عنصر کاربیدزا برای اولین بار از مجاورت دو آلیاژ مختلف چدن خاکستری مذاب و فولاد زنگ نزن جامد استفاده شده است. این فرآیند به دلیل مصرف انرژی کمتر نیز دارای مزایای اقتصادی و زیست محیطی است.

2- روش انجام آزمایش‌ها

2-1- مواد اولیه

برای ساخت کامپوزیت موضعی دارای کاربیدهای سخت کروم به روش ریخته‌گری-رخنه‌دهی به دو ماده مختلف نیاز است که یکی تامین کننده‌ی عنصر کاربیدزای کروم و یکی تامین کننده‌ی کربن باشد. برای تامین کربن از ذوب و رخنه قطعات چدن خاکستری استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 ارائه شده است. کربن معادل چدن مورد استفاده تقریباً برابر با نقطه یوتکتیک است. برای تامین کروم نیز از براده فولاد زنگ‌نزن 304 با ترکیب شیمیایی جدول 2 استفاده شد. براده‌برداری از فولاد 304 توسط ماشین تراشکاری و با جابجایی ابزار به مقدار 0.5 میلیمتر در هر پاس انجام شد. تراشکاری از روی یک میله با قطر 20 میلیمتر و با سرعت 50 دور بر دقیقه انجام شد. برای تهیه اسکلت متخلخل، 2.5 گرم براده فولاد 304 درون قالب فولادی با قطر 10 میلی متر با فشار 310 MPa فشرده می‌شد تا اسکلت‌هایی با چگالی نسبی 50 درصدی تهیه شود.

جدول 1 ترکیب شیمیایی چدن خاکستری مورد استفاده در آزمایش

Table 1 Chemical composition of the cast iron parts

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S
wt. %	93.1	3.54	2.61	0.34	0.015	0.016
Element	Ni	Al	Co	Cu	Mg	Nb
wt. %	0.05	0.028	0.007	0.041	0.043	0.004
Element	W	V	Sn	B	Ca	Ce
wt. %	0.023	0.007	0.011	0.002	0.004	0.016
Element	Bi	As	Ti	Te	Sb	La
wt. %	0.003	0.001	0.008	0.005	0.002	0.01

جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن 304

Table 2 Chemical composition in the used 304 Stainless steel

Element	C	Mn	Si	P
wt. %	0.08	2.0	0.75	0.045
Element	S	Cr	Ni	N
wt. %	0.030	19	9.5	0.10

2-2- ساخت کامپوزیت

برای رخنه‌دهی مذاب چدن خاکستری به دور اسکلت متخلخل فولاد ضد زنگ، یک قطعه چدن خاکستری بعد از برشکاری و تمیزکاری در مجاورت اسکلت متخلخل درون قایقک آلومینایی قرار می‌گرفت. وزن قطعه چدن 20%

وارد را نیز داشته باشند. برای ایجاد مقاومت به سایش کافی در قطعات فلزی به مقادیر زیادی عنصر آلیاژی مانند کروم یا منگنز نیاز است و هزینه تولید این قطعات بالا است [1].

معمولاً فقط بخش خاصی از یک قطعه در معرض شرایط سخت سایشی قرار دارد. اگر فقط این بخش دارای مقاومت سایشی بالا باشد، مقدار مصرف عناصر آلیاژی یا ذرات سخت تقویت کننده کاهش می‌یابد و علاوه بر آن چقرمگی سایر بخش‌های قطعه بالاتر است و در برابر بارهای دینامیکی مقاومت بهتری دارد [2]. بدین منظور از روش کامپوزیت‌سازی سطحی استفاده می‌شود و آلیاژهای مختلفی مانند چدن سفید پرکرم [3-5] و فولاد آستنیتی منگنزی [6] برای مابقی حجم قطعه ضد سایش به جز بخش کامپوزیتی استفاده می‌شود ولی آلیاژهای پایه آهنی کم آلیاژ مانند چدن‌های خاکستری دارای مزایای اقتصادی بالاتری هستند.

برای ایجاد یک بخش مقاوم به سایش موضعی درون یک قطعه دو رهیافت کلی وجود دارد. رهیافت اول روش خارج از موقعیت¹ است. در برخی از فرآیندهای این روش، ذرات سخت سرامیکی سخت مانند آلومینای چقرمه شده یا زیرکونیا (ZTA)² [7,8]، TiC [9,10] یا WC [11,12] از قبل تهیه شده‌اند و یا به صورت قطعه کامپوزیتی پیش‌ساخته³ [13] و یا قطعه متخلخل [14] درون محفظه قالب قرار می‌گیرند. سپس مذاب به وسیله فرآیند ریخته‌گری فوم فداشونده⁴ [15] و یا ریخته‌گری-رخنه‌دهی [16] و یا ریخته‌گری معمولی سایر بخش‌های محفظه قالب را پر می‌کند [2]. در برخی فرآیندهای دیگر از روش خارج از موقعیت، ذرات سخت به همراه مذاب وارد قالب شده و طی فرآیندهایی مانند ریخته‌گری گریز از مرکز⁵ [17] و یا ریخته‌گری-سوپ گذاری⁶ [18] تمرکز موضعی مورد نظر را پیدا می‌کنند. در رهیافت دوم که روش درجا⁷ است ترکیبات سخت ضد سایش در درون کامپوزیت سنتز می‌شوند. فرآیند سنتز خود پیش‌رونده دما بالا⁸ (SHS) یکی از روش‌های سنتز درجا ترکیبات سخت است که واکنش سنتز احتراقی با حرارت اولیه مذاب در حین پر کردن قالب فعال می‌شود و با واکنش بین اجزاء خود، ترکیبات سختی مانند TiC، TiB₂ و B₄C ایجاد می‌کند [19,20].

در فرآیند ریخته‌گری-رخنه‌دهی⁹ مذاب در حین پر کردن محفظه قالب به درون یک قطعه متخلخل پیش‌ساخته نیز نفوذ می‌کند و کامپوزیت تقویت شده با ذرات سخت را به صورت موضعی تولید می‌کند. پیش‌ساخته‌های متخلخل ممکن است حاوی ذرات سخت کاربیدی یا اکسیدی باشند و جزء تقویت کننده از قبل فراهم شده باشد (خارج از محل) [21,22] و یا اینکه در اثر واکنش بین مذاب و ماده پیش‌ساخته، ذرات سخت عمدتاً کاربیدی سنتز شوند و مقاومت به سایش مورد نیاز فراهم شود. پیش‌ساخته‌های حاوی عنصر کاربیدزا مانند وانادیوم [23]، نایوبیم [24]، تانتالم [25]، و کروم [26] می‌تواند به صورت مفتول‌های موازی [27,28]، ورق [29] یا یک پوشش بر روی دیواره قالب [30] باشند و معمولاً کربن توسط مذاب چدن خاکستری [21,31] و یا پودر گرافیت [32] تامین می‌شود و در اثر نفوذ کربن و واکنش با عنصر کاربیدزا، کاربیدهای سخت تشکیل می‌شوند.

از میان عناصر کاربیدزا، کروم به دلیل قیمت پایین‌تر دارای کاربرد فراوانی است. انواع مختلفی از کاربیدها با رابطه کلی M_3C ، M_7C_3 ، $M_{23}C_7$ امکان

⁶ Sedimentation Casting

⁷ In-Situ

⁸ Self-propagating High-temperature Synthesis

⁹ Infiltration-Casting

¹ Ex-situ

² Zirconia Toughened Alumina

³ Pre-form

⁴ Lost-Foam Casting

⁵ Centrifugal Casting

3-2- بررسی کامپوزیت

خصوصیات کامپوزیت ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA ساخت شرکت TESCAN مجهز به تحلیل گر طیف‌سنج اشعه ایکس (EDS) برای بررسی ریزساختار کامپوزیت و آنالیز عنصری فازهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت. میکروسختی فازها با دستگاه میکروسختی سنجی مدل MICROMET ساخت شرکت BUEHLER اندازه‌گیری شد. برای هر داده حداقل سه بار سختی سنجی طبق استاندارد ASTM E 384-17 و با بارگذاری 10g انجام شد. به منظور آشکارسازی فاز آستنیت در نمونه کامپوزیتی از روش الکترو اچ (محلول اچ شامل 50% اسید نیتریک و 50% آب مقطر با ولتاژ 0.3V به مدت حدود 40 ثانیه) استفاده شد.

3- نتایج و تحلیل

1-3- ساخت کامپوزیت و توسعه ریزساختاری

با فرآیند رخنه دهی، کامپوزیتی با سختی 360 HV و چگالی 7.46 g/cm^3 تهیه شد. در حین گرمایش اسکلت متخلخل براده فولاد 304 در مجاورت قطعه چدن خاکستری، در دماهایی حدود 1150°C قطعه چدنی کاملاً ذوب شده و توسط نیروهای موئینگی به درون اسکلت کشیده شده است. ترکیب شیمیایی قطعه چدن اولیه با $\text{C}_{\text{Cl},0}$ در نمودار آهن-کربن در شکل 2 نمایش داده شده است. در لحظه ورود مذاب به درون اسکلت و قبل از تبادل عناصر آلیاژی، نسبت تقریباً برابری از مذاب چدن و اسکلت جامد وجود دارد. از شروع ذوب شدن چدن تا پایان چرخه گرمایش حدود 30 دقیقه طول می‌کشد و با توجه به ابعاد براده‌ها و دمای بالای مجموعه امکان نفوذ عناصر آلیاژی کاملاً فراهم بوده است. در دمای حدود 1150°C فاز آستنیت دارای بیشترین حد حلالیت کربن یعنی حدود 2.14 wt.% است و بخشی از کربن به درون اسکلت جذب شده است و منجر به انجماد هم‌دمای بخشی از مذاب شده است. شماتیکی از تبادل عناصر آلیاژی و انجماد هم‌دما در شکل 3 نشان داده شده است. با افزایش دما تا دمای حداکثر حد حلالیت کربن در آستنیت کاهش می‌یابد و و نهایتاً کسر جامد و مذاب دوباره به نسبت برابر می‌رسند. در دمای حداکثری (1290°C)، مقدار کربن معادل تعادلی در آستنیت و مذاب به ترتیب حدود 1.5wt.% و 3wt.% بوده است.

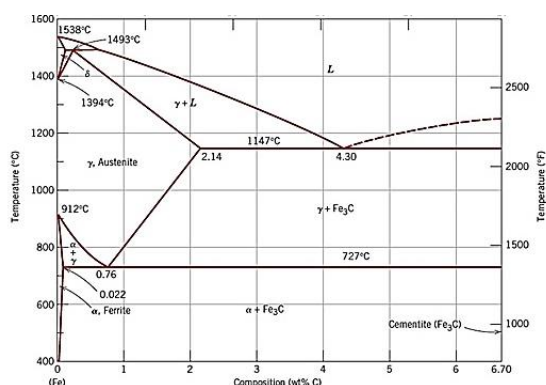


Fig. 2 The phase diagram of Fe-C and demonstration of chemical compositions; $\text{C}_{\text{Cl},0}$: primary cast iron parts, C_{com} : composite, $\text{C}_{\text{s},\text{eq}}$: solid phase in equilibrium at the infiltration temperature, $\text{C}_{\text{l},\text{eq}}$: liquid phase in equilibrium at the infiltration temperature.

شکل 2 نمودار آهن-کربن. $\text{C}_{\text{Cl},0}$: ترکیب شیمیایی چدن اولیه، C_{com} : ترکیب شیمیایی متوسط کامپوزیت، $\text{C}_{\text{l},\text{eq}}$: ترکیب شیمیایی مذاب در تعادل در دمای حداکثر، $\text{C}_{\text{s},\text{eq}}$: ترکیب شیمیایی اسکلت جامد در دمای حدکثر.

بیشتر از چدن مورد نیاز برای پر کردن حفرات اسکلت متخلخل بود. قایقک درون تیوب کوارتزی کوره تیوبی قرار می‌گرفت و تا دمای 1290°C حرارت داده می‌شد تا چدن ذوب شده و با کمک نیروهای موئینگی به درون اسکلت متخلخل وارد شود. زمان نگهداری در دمای حداکثر 15 دقیقه بود و تمام چرخه حرارت دهی با نرخ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ و تحت اتمسفر هیدروژن انجام شد. اتمسفر هیدروژن برای احیا اکسیدهای سطحی و ترشوندگی اسکلت الزامی است. شکل 1 براده اولیه و اسکلت متخلخل و قطعه چدنی را قبل و بعد از رخنه‌دهی نشان می‌دهد.



الف-ا



ب-ب



ج-ج

Fig. 1 a) The machining swarf of 304 Stainless steel, b) a weighted gray cast iron in contact with a compacted part from 304 swarf before infiltration, c) The specimen after infiltration.

شکل 1 الف) براده تراشکاری فولاد 304، ب) اسکلت متخلخل براده فولاد 304 فشرده شده در مجاورت قطعه چدن خاکستری، ج) قطعه رخنه‌دهی شده.

جدایش به سمت مذاب داشته است و نیکل تاحدی به سمت آستنیت نفوذ کرده است. در مورد کاربید می‌توان گفت که یک کاربید دوتایی از نسبت تقریباً مساوی از آهن و کروم تشکیل شده است.

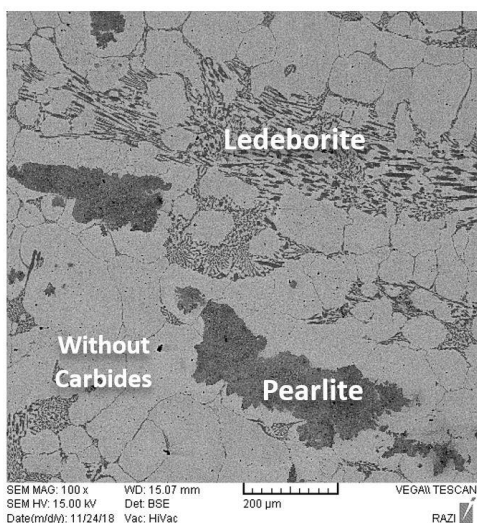


Fig. 5 BS-SEM micrograph of the infiltrated composite.

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی BS-SEM ریزساختار کامپوزیت رخنه‌دهی شده.

آنالیز XRD از یک نمونه کامپوزیت در شکل 6 ارائه شده است. دو نوع کاربید در میان فازها مشاهده می‌شود. کاربید سمنتیت با فرمول Fe_3C در ساختار پرلیت ظاهر می‌شود. دو ویژگی نواحی تیره مرکزی، دلیل بر پرلیت بودن این نواحی است:

1. محل تشکیل و مکانیسم تشکیل که در چدن های مالیبیل نیز به همین صورت مشاهده می شود.
2. ترکیب شیمیایی این نواحی که منطبق با ترکیب پرلیت است و نه سمنتیت.

برای اثبات محل تشکیل کاربید M_7C_3 به مستندات بیشتری نیاز است. اگر در واکنش یوتکتیک مذاب به سمنتیت تبدیل شود دارای مورفولوژی پوست پلنگی با زمینه به هم پیوسته کاربیدی سمنتیت خواهد بود ولی کاربیدهایی M_7C_3 در واکنش یوتکتیک به صورت ذرات مجزا تشکیل می‌شوند و چقرمگی بالاتری خواهند داشت [33]. شکل 7 مورفولوژی ذرات کاربیدی مجزا در ریزساختار ناحیه لدبوریت را تایید می‌کند. نتایج میکروسختی فازهای مختلف در جدول 4 ارائه شده است. سختی کاربیدهایی ناحیه لدبوریت در حد کاربیدهایی M_7C_3 می‌باشد. بنابراین با نفوذ کروم به ناحیه مذاب، ترکیب شیمیایی ناحیه مذاب از محدوده‌ی چدن‌های خاکستری به محدوده‌ی چدن‌های Ni-Hard تغییر کرده است و در حین انجماد کاربیدهایی سخت M_7C_3 تشکیل شده است.

جدول 3 ترکیب شیمیایی نواحی مختلف کامپوزیت برحسب درصد وزنی

Table 3 Chemical composition of the composite phases

ناحیه	C	Si	Mn	Cr	Fe	Ni
کل کامپوزیت	1.8	1.05	1.73	11.93	73.96	4.02
بدون کاربید	0	1.24	1.61	7.32	84.68	4.94
لدبوریت	1.44	1.15	1.57	17.4	74.67	3.15
کاربید	3.22	-	-	49.55	42.87	-

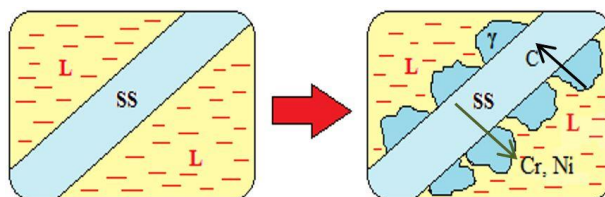


Fig. 3 A schematic of elements diffusion at earlier stages of the infiltration, a. Infiltration of molten iron, b. Diffusion of the elements
شکل 3 رخنه‌دهی مذاب چدن به درون اسکلت براده فولاد 304 به صورت شمتیک، الف) لحظه ورود مذاب، ب) تبادل عناصر آلیاژی در لحظات اول باعث افزایش کسر جامد شده است.

شکل 4 شمتیک تحولات ریزساختاری در انجماد کامپوزیت را نشان می‌دهد. با کاهش دما، فاز آستنیت پرویوتکتیک (قبل از یوتکتیک) به صورت ذرات هم محور از مذاب جدا می‌شوند. با رسیدن دما به دمای یوتکتیک، مذاب طی واکنش یوتکتیک به آستنیت و کاربید تبدیل می‌شود. این بخش به صورت ناحیه سیاه و سفید در تصویر مشاهده می‌شود و لدبوریت نام دارد.

در پایان انجماد آستنیت باید دارای حدود 2.5wt.% کربن باشد. با کاهش دما باید مقدار کربن در این فاز کاهش یابد و ذرات کاربیدی در ناحیه لدبوریت این کربن را دریافت می‌کنند. کربن از نواحی نزدیک به کاربیدها تا حدی تخلیه شده بودند که در ادامه سرمایش آستنیت به فریت تبدیل شده است. این مسئله برای آستنیت درون لدبوریت و آستنیت‌های مجاور آن صدق می‌کند. سرمایش با خاموش شدن کوره و سرعت نسبتاً بالایی صورت گرفته است و زمان کافی برای مهاجرت کربن‌های نواحی دور از کاربیدها وجود نداشته است. به همین دلیل مقدار کربن در نواحی مرکزی اسکلت جامد بالا باقی مانده است و در سرمایش به پرلیت تبدیل شده است. شکل 5 ریزساختار یک کامپوزیت پس از انجماد را نشان می‌دهد.

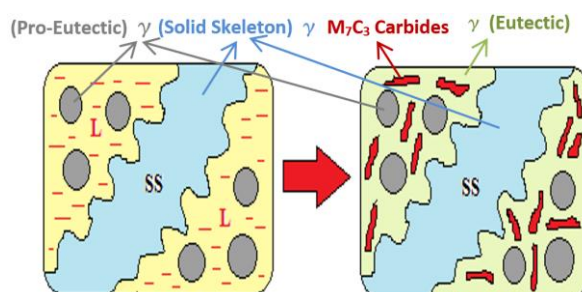


Fig. 4 Microstructure formation during solidification, a) cooling until the eutectic temperature, b) after the eutectic solidification.

شکل 4 تحولات ریزساختاری کامپوزیت در حین سرمایش؛ الف) از دمای حداکثر تا دمای یوتکتیک، ب) از دمای یوتکتیک تا پایان انجماد.

2-3- جدایش عناصر آلیاژی

به منظور بررسی رفتار عناصر آلیاژی در فرآیند ساخت کامپوزیت، آنالیز نواحی مختلف به روش EDS بررسی شد. ترکیب شیمیایی سه ناحیه بدون کاربید، لدبوریت و کاربید به همراه ترکیب شیمیایی کلی کامپوزیت در جدول 3 ارائه شده است. با توجه به اینکه 50 درصد وزنی کامپوزیت از فولاد زنگ‌زن 304 و 50% وزنی آن از چدن خاکستری است، ترکیب شیمیایی کامپوزیت به صورت محاسباتی تعیین شد. باید توجه شود که روش EDS یک روش نیمه کمی است و دقت بالایی ندارد و اینجا صرفاً جهت مقایسه کلی استفاده می‌شود. با توجه به نتایج، عناصری مانند سیلیسیم و منگنز به صورت یکنواخت در نواحی اسکلت و مذاب توزیع شده بودند ولی عنصر کروم تمایل زیادی برای

دلیل پایداری آستنیت در نواحی یوتکتیک به دلیل پس زده شدن نیکل در حین انجماد یوتکتیک و غلظت بالای نیکل در آستنیت مربوطه است.

4- نتیجه گیری

1. با رخنه‌دهی مذاب چدن خاکستری درون اسکلت متخلخل براده فولاد زنگ نزن، کامپوزیت پایه آهنی حاوی کاربید سخت M_7C_3 با موفقیت ساخته شد.

2. استفاده از اتمسفر احیایی نقش کلیدی در ترشوندگی اسکلت جامد و قابلیت نفوذ مذاب درون اسکلت جامد داشت. سختی و چگالی کامپوزیت به ترتیب 360 HV و 7.46 g/cm^3 گزارش شد.

3. نتایج XRD نشان داد که کامپوزیت زمینه آهنی تولید شده به روش رخنه‌دهی عمدتاً شامل فاز فریت ($\alpha\text{-Fe}$)، آستنیت ($\gamma\text{-Fe}$)، سمنتیت (Fe_3C) و کاربید M_7C_3 بود.

4. مقدار متوسط میکروسختی نواحی مختلف کامپوزیت به شرح زیر بود: فاز فریت: 283 HV، پرلیت: 405 HV و کاربید M_7C_3 : 1104 HV.

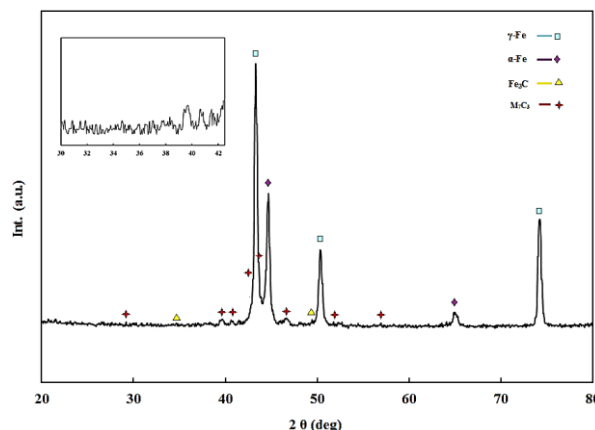
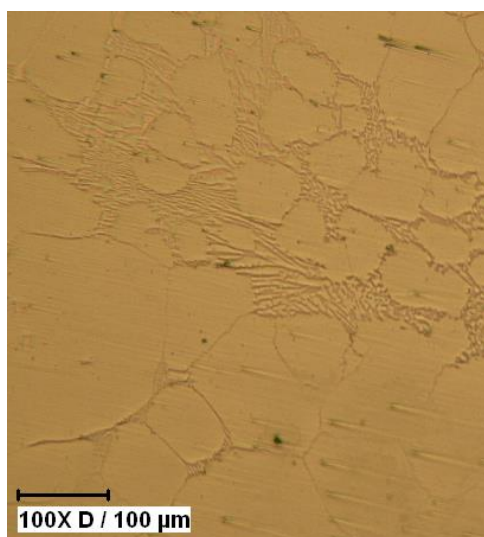
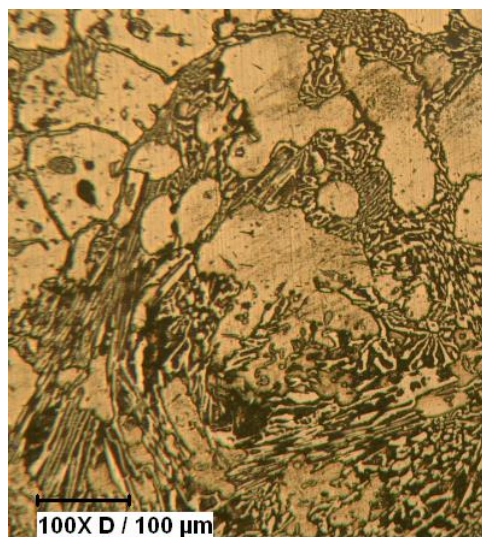


Fig. 6 X-Ray Diffraction of the composite demonstrates α , Fe_3C , γ , and M_7C_3 .

شکل 6 الگوی XRD کامپوزیت ساخته شده نشان دهنده فازهای فریت، آستنیت، سمنتیت و کاربید سخت M_7C_3 در کامپوزیت.



الف-ا



ب-ب

Fig. 8 Optical micrographs of composites, a) without etching, b) electro etched to show austenite (dark zones).

شکل 8 تصویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت، الف) بدون اچ، ب) بعد آشکارسازی با الکترواچ برای آشکار شدن آستنیت به صورت نواحی تیره.

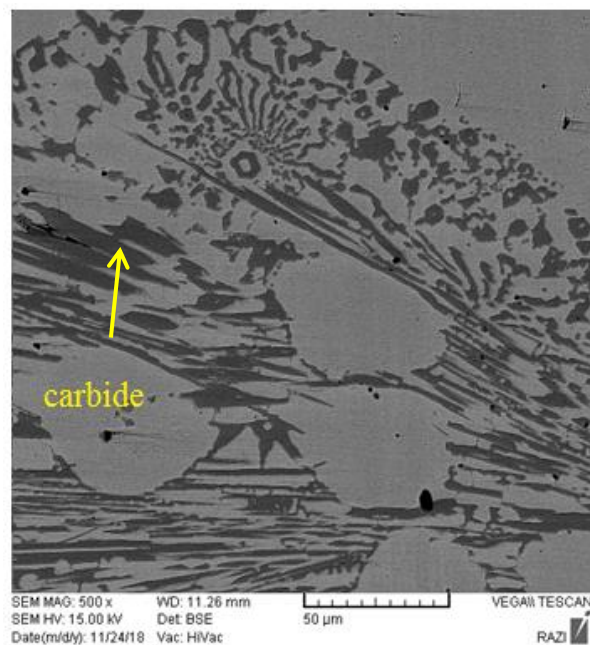


Fig. 7 BS-SEM micrograph shows discrete carbides of the eutectic region.

شکل 7 تصویر BS-SEM از ناحیه لدریوریت نشان دهنده ذرات کاربید مجزا.

جدول 4 نتایج میکرو سختی از نواحی مختلف کامپوزیت

Table 4 The micro-hardness of constituting phases

فاز بدون کاربید	فاز پرلیت	فاز کاربید	موقعیت سختی سنجی
283	405	1104	سختی (HV)

فاز دیگری که در نمودار پراش اشعه X مشاهده شد فاز آستنیت بود. اگر فاز آستنیت و فریت در مجاورت یکدیگر حضور داشته باشند به روش‌های اچ مخصوص مانند الکترو اچ نیاز است. شکل 8 تصویر متالوگرافی نوری ریزساختار کامپوزیت قبل و بعد از الکترو اچ را نشان می‌دهد. با این روش آشکارسازی، ناحیه آستنیت تیره‌تر از فریت دیده می‌شود و ناحیه‌ای که در تصویر بدون اچ ناحیه روشن بود به دو ناحیه فریت و آستنیت تقسیم می‌شود. ناحیه تک فاز مجاور یوتکتیک عمدتاً آستنیت باقیمانده است ولی نواحی دورتر فریت است.

5- مراجع

- A, vol. 435–436, pp. 187–192, 2006.
- [19] Chang, C., Hsieh, C., Lin, C., Chen, J., Fan, C. and Wu, W. "Effect of carbon content on microstructure and corrosion behavior of hypereutectic Fe–Cr–C claddings," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 123, no. 1, pp. 241–246, 2010.
- [20] Bhadeshia, H. K. D. H., Svensson, L. E. and Grefott, B. "A Model for The Development of Microstructure in Low-Alloy Steel (Fe-Mn-Si-C) Weld Deposits," *Acta Metall.*, vol. 33, no. 7, pp. 1271–1283, 1985.
- [21] Zhong, L., Hojamberdiev, M., Ye, F., Wu, H., and Xu, Y. "Fabrication and microstructure of in Situ Vanadium Carbide Ceramic Particulates-Reinforced Iron Matrix Composites," *Ceram. Int.*, vol. 39, no. 1, pp. 731–736, 2013.
- [22] Zheng, B., Li, W., Tu, X., Song, S. and Huang, W. "Effect of ZTA Ceramic Particles Strengthened High Chromium White Cast Iron on Three-body Abrasion Behavior," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 11, 2019.
- [23] Zhong, L., Ye, F., Xu, Y. and Li, J. "Microstructure and Abrasive Wear Characteristics of in Situ Vanadium Carbide Particulate-Reinforced Iron matrix Composites," *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 564–569, 2014.
- [24] Zhong, L., Xu, Y. and Ye, F. "In Situ NbC Particulate-Reinforced Iron Matrix Composite: Microstructure and Abrasive Wear Characteristics," *Tribol. Lett.*, vol. 47, no. 2, pp. 253–259, 2012.
- [25] Zhong, L., Xu, Y., Li, C., Ye, F., Liu, X. and Hojamberdiev, M. "Infiltration Casting and in Situ Fabrication of Tantalum Carbide Particulate-Reinforced Iron Matrix Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 8, pp. 895–901, 2012.
- [26] Niu, L., Xu, Y., Wu, H. and Wang, W. "Preparation of in Situ (Fe,Cr) 7 C 3 /Fe Composite Coating by Centrifugal Casting," *Surf. Eng.*, vol. 27, no. 8, pp. 587–590, 2011.
- [27] Ye, F., Hojamberdiev, M., Xu, Y., Zhong, L., Yan, H. and Chen, Z. "Volume Fraction Effect of V8C7 Particulates on Impact Toughness and Wear Performance of V8C7/Fe Monolithic Composites," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 4, pp. 1402–1407, Apr. 2014.
- [28] Zhong, L., Xu, Y., Hojamberdiev, M., Wang, J. and Wang, J. "In Situ Fabrication of Titanium Carbide Particulates-Reinforced Iron Matrix Composites," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 7, pp. 3790–3795, 2011.
- [29] Ye, F., Hojamberdiev, M., Xu, Y., Zhong, L., Zhao, N., Li, Y. and Huang, X. "Microstructure, Microhardness and Wear Resistance of VCp/Fe Surface Composites Fabricated in Situ," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 280, no. 2013.
- [30] Liu, J. and Li, Y. "Study on Surface Infiltration Casting of Low-carbon Ductile Iron," *Adv. Mater. Res.*, vol. 529, pp. 519–523, 2012.
- [31] Zhong, L., Ye, F., Xu, Y. and Li, J. "Microstructure and Abrasive Wear Characteristics of in Situ Vanadium Carbide Particulate-Reinforced Iron Matrix Composites," *Mater. Des.*, vol. 54, no. 2014, pp. 564–569, 2014.
- [32] Olejnik, E., Szymański, Tokarski, T., Opitek, B. and Kurtyka, P. "Local Composite Reinforcements of TiC/FeMn Type Obtained in Situ in Steel Castings," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 997–1005, 2019.
- [33] Buytoz, S. "Microstructural Properties of M7C3 Eutectic Carbides in a Fe–Cr–C Alloy," *Mater. Lett.*, vol. 60, pp. 605–608, 2006.
- [1] Hutchings, I and Shipway, W. "Tribology Friction and Wear of Engineering Materials" Butterworth-Heinemann, 2017.
- [2] Tang, S. L., Gao, Y. M. and Li, Y. F. "Recent Developments in Fabrication of Ceramic Particle Reinforced Iron Matrix Wear Resistant Surface Composite Using Infiltration Casting Technology," *Ironmak. Steelmak.*, vol. 41, no. 8, pp. 633–640, 2014.
- [3] Vijaya Ramnath, B., Parswajinan, C., Dharmaseelan, R., Thileepan, K. and Nithin Krishna, K. "A Review on Aluminium Metal Matrix Composites," in *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 4341–4343, 2020.
- [4] Ravichandran, M., Naveen Sait, A. and Anandakrishnan, V. "Al–TiO₂–Gr powder metallurgy hybrid composites with cold upset forging," *Rare Met.*, vol. 33, no. 6, pp. 686–696, 2014.
- [5] Li, Z., Jiang, Y., Zhou, R., Lu, D. and Zhou, R. "Dry Three-body Abrasive Wear Behavior of WC Reinforced Iron Matrix Surface Composites Produced by V-EPC Infiltration Casting Process," *Wear*, vol. 262, no. 5–6, pp. 649–654, 2007.
- [6] Hu, S. W., Zhao, Y. G., Wang, Z., Li, Y. G. and Jiang, Q. C. "Fabrication of in Situ TiC Locally Reinforced Manganese Steel Matrix Composite via Combustion Synthesis during Casting," *Mater. Des.*, vol. 44, pp. 340–345, 2013.
- [7] Ma, X., feng Li, L., Zhang, F., Hua Zhang, Z., Wang, H. and E. ze Wang, "Microstructure and Wear Characteristics of ATZ Ceramic Particle Reinforced Gray Iron Matrix Surface Composites," *China Foundry*, vol. 15, no. 3. pp. 167–172.
- [8] Li, Y. and Gao, Y. "Three-body Abrasive Wear Behavior of CC/high-Cr WCI Composite and its Interfacial Characteristics," *Wear*, vol. 268, no. 3–4, pp. 511–518, 2010.
- [9] Moreira, A. B., Ribeiro, L. M. M. and Vieira, M. F. "Production of TiC-MMCs Reinforcements in Cast Ferrous Alloys Using in situ Methods," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 17, pp. 1–19, 2021.
- [10] Moreira, A. B. , Sousa, R. O., Lacerda, P., Ribeiro, L. M. M., Pinto, A. M. P. and Vieira, M. F. "Microstructural Characterization of TiC-White Cast-Iron Composites Fabricated by in Situ Technique," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 1, pp. 5–8, 2020.
- [11] Li, P., Li, X. , Li, Y., Gong, M., Tian, C. and W. Tong, "Microstructure and Mechanical Properties of Millimeter WC Particle-Reinforced High-Chromium Cast Iron Composites," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 28, no. 12, pp. 7816–7827, 2019.
- [12] Kambakas K. and Tsakiroopoulos, P. "Solidification of High-Cr White Cast Iron-WC Particle Reinforced Composites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 413–414, pp. 538–544, 2005.
- [13] Moreira, A. B., Ribeiro, L. M. M., Lacerda, P., Sousa, R. O., Pinto, A. M. P. and Vieira, M. F. "Preparation and Microstructural Characterization of a High-Cr White Cast Iron Reinforced with WC Particles," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 11, pp. 4–6, 2020.
- [14] Cao G., Guo, E., Feng, Y. and Wang, L. "Abrasion Behavior of WC Reinforced Cast Iron Surface Composite Fabricated by Cast-Infiltration Method," *Adv. Mater. Res.*, vol. 476–478, pp. 555–559, 2012.
- [15] Leibholz, R., Robert, M. H., Leibholz, H. and Bayraktar, E. "Development of Functionally Graded Nodular Cast Iron Reinforced with Recycled WC Particles," *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 7, pp. 241–249, 2017.
- [16] Zeng, H., Sui, Y., Niu, G., He, H., Jiang, Y. and Zhou, M. "Effect of Alloy Powder on the Properties of ZTA Particles Reinforced High Chromium Cast Iron Composites," *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 3, 2021.
- [17] Song, Y. and Wang, H. "High Speed Sliding Wear Behavior of Recycled WCP-Reinforced Ferrous Matrix Composites Fabricated by Centrifugal Cast," *Wear*, vol. 276–277, pp. 105–110, 2012.
- [18] Kambakas, K. and Tsakiroopoulos, P. "Sedimentation Casting of Wear Resistant Metal Matrix Composites," *Mater. Sci. Eng.*



بررسی تجربی استحکام اتصال بین هسته و لایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های کششی و برشی در روش‌های مختلف ساخت سازه‌های کامپوزیتی دارای هسته

علیرضا لزیوسفی¹، بیژن محمدی^{2*}، احسان عنبرزاده³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* ایران، تهران، صندوق پستی: 1968936916، bijan_mohammadi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

چکیده

دریافت: 1400/08/27

پذیرش: 1400/11/27

کلیدواژگان

چندلایه‌های هسته‌دار، هسته‌های لانه زنبوری، روش‌های ساخت، اتصال بین هسته و لایه‌ها

هسته‌های لانه‌زنبوری در سازه‌های کامپوزیتی دارای هسته، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مسائل مهم به کارگیری هسته‌ها به خصوص لانه زنبوری‌ها، اطمینان از اتصال مناسب بین لایه‌های دو سمت سازه به هسته می‌باشد؛ چراکه عدم اتصال مناسب، منجر به جدایی لایه از هسته خواهد شد. هدف از این پژوهش، بررسی و پیشنهاد مناسب‌ترین روش برای ساخت قطعه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری تحت استانداردهای ASTM C297 و ASTM C273 می‌باشد. از نتایج این پژوهش، دریافت شد که مناسب‌ترین راه برای ساخت یک قطعه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری، روش ساخت دومرحله‌ای می‌باشد. چراکه در روش دومرحله‌ای با استفاده از دستگاه وکیوم، بعد از ایجاد خلأ در قطعه، رزین تا دیواره‌های هسته بالا می‌آید و اتصال بین هسته و لایه‌ها به‌خوبی برقرار می‌شود. ناحیه اتصال هسته با لایه‌ها در روش دومرحله‌ای دو برابر بیشتر از روش تک‌مرحله‌ای و روش ساخت دستی می‌باشد. به طوری که از تعداد 30 نمونه‌ای که برای هر یک از سه روش ساخت مذکور استفاده گردید، در روش دومرحله‌ای این جدایش در خود هسته لانه‌زنبوری در 28 نمونه از 30 نمونه رخ داد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن این روش (جدایش مورد قبول با بیش از 90 درصد) می‌باشد. اما در روش تک مرحله‌ای و روش دستی به ترتیب 18 عدد از 30 نمونه و همچنین 9 عدد از 30 نمونه هسته دچار شکست در ناحیه هسته تحت آزمون کشش و برش شد. لازم به ذکر است که مفهوم روش دومرحله‌ای، یک مرحله‌ای و روش دومرحله‌ای بدون وکیوم در متن مقاله توضیح داده شده است

Experimental study of bond strength between core and composite layers under tensile and shear loads in different methods of fabricating nucleate composite structures

Alireza Lazar Yousefi, Bijan Mohammadi*, Ehsan Anbarzadeh

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 19689-36916, Iran, Tehran, bijan_mohammadi@iust.ac.ir

Keywords

Nucleate sandwich panels, Honeycomb cores, Manufacturing methods, Connection between core and layers

Abstract

Honeycombs cores are widely used in nucleate composite structures. One of the important issues in using cores, especially honeycombs, is to ensure proper connection between the layers on both sides of the structure to the core; Because improper connection will lead to separating the layer from the core. The purpose of this study is to investigate and propose the most suitable method for making composite parts with honeycomb core under ASTM C273 and ASTM C297 standards. As a result, it was concluded that the most appropriate way to make a composite piece with honeycomb core is a two-step fabrication method. This is because in the two-stage method, using a vacuum device, after creating a vacuum in the part, the resin rises to the walls of the core and the connection between the core and the layers is established well. The area of connection of the core with the layers in the two-stage method is twice as large as the single-stage method and the manual construction method. So that out of 30 samples that were used for each of the three mentioned construction methods, in the two-stage method, this separation occurred in the honeycomb core itself in 28 samples out of 30 samples, which indicates the suitability of this method. (Separation is acceptable with more than 90%). However, in the one-step method and the manual method, 18 out of 30 samples and also 9 out of 30 core samples failed in the core area under the tensile and shear test, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Jafari Vardanjani, M., Safavi, M., Karevan, M., "Design and Characterization of Thermal and Optical Properties of Nano-Composite Self-Cleaning Refractive Transparent-Opaque Smart Window", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1659-1667, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.542940.1758>

1-مقدمه

امروزه، استفاده از کامپوزیت‌ها¹ به طرز خیره کننده‌ای رو به افزایش است، چراکه بشر به وسعت کاربرد این سازه‌ها پی برده و لزوم استفاده از آن را درک نموده است. کامپوزیت‌ها از قرن‌ها پیش مورد استفاده قرار گرفته‌اند به طوری که تاریخ مشخصی به عنوان شروع استفاده از کامپوزیت ثبت نشده است [1]. در مصر باستان، آجرهای ساخته شده از گل و کاه برای محاصره و تقویت سازه‌های چوبی مانند قلعه‌ها و آثار تاریخی کشف شده است که به نوعی سازه کامپوزیتی محسوب می‌شوند [2]. در بخش‌هایی از آسیا، اروپا، آفریقا و قاره آمریکا، افراد بومی ساختارهایی از چوب (تخته یا نوارهای چوبی) و سرمه‌ای (ترکیبی از گل یا خاک، کاه، شن، آهک، یونجه و سایر مواد) می‌ساختند [3]. برخی از اولین اطلاعات ثبت شده بیانگر استفاده مصریان از تخته چندلا، خمیر کاغذ و استفاده از کاه، جهت بالا بردن مقاومت آجرهای گلی و همچنین ساخت کمان‌های تقویت شده از چوب، استخوان و چسب طبیعی می‌باشد که با پوست به هم پیچیده شده بود. در نتیجه این کمان‌ها بسیار قوی‌تر و دقیق‌تر از کمان‌های چوبی ساده بودند [4]. در پنج هزار سال قبل از میلاد در خاورمیانه، اولین ماده کامپوزیت که در آن از پلیمر استفاده شده بود، برای قیر اندود کردن قایق‌ها استفاده شد. اسکیموها از خزها برای مقاوم کردن بلوک‌های یخی استفاده می‌کردند که آن را نیز نمونه‌ای از کامپوزیت می‌توان به حساب آورد [5]. تمدن بشر به طور چشم گیری تحت تاثیر فناوری مواد قرار گرفته و در حقیقت، بیشترین دوره توسعه فناوری با تغییر در کاربرد مواد همراه بوده است [6]. امروزه در کاربردهای مهندسی، اغلب به تلفیق خواص مواد، جهت ایجاد ماده ای با خصوصیات مورد نظر نیاز است و این در حالی است که مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی، کنترل خواص آن می‌باشد [7]. کامپوزیت‌ها متشکل از چند ماده هستند که خواص آن‌ها در مجموع از هر کدام از مواد سازنده اولیه بهتر می‌باشد، زیرا کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. عموماً کامپوزیت را برای به دست آوردن خواص مهندسی بهتر، از جمله سفتی بالاتر، استحکام بیشتر، وزن کمتر، مقاومت در برابر حرارت، رطوبت و خوردگی که در مواد همگن همچون فلزات، نمی‌توان همگی این خواص را در کنار یکدیگر داشت، در طراحی‌ها استفاده می‌کنند [8]. ابتدا این مواد را به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و زنگ‌زدگی، وزن سبک برای بدنه و قاب هواپیماها در نظر گرفتند. رفته‌رفته با آشنایی و شناخت بیشتر محققان و مهندسان این صنعت نسبت به این سازه‌ها، استفاده از کامپوزیت‌ها کاربرد گسترده‌تری در صنایع هوایی پیدا کردند [9]. ورق کامپوزیت دارای ابعاد متنوع می‌باشد. این نوع ورق کامپوزیت هزینه‌های زیرسازی و اتصالات را کاهش می‌دهد و به دلیل وزن سبکی که داراست حمل و نقل و نصب آن ساده است [10]. هسته کامپوزیتی عضو مرکزی یک قطعه کامپوزیتی بوده و مابین دو صفحه یا دو ورقه نازک قرار گرفته و یک سازه سبک و سخت ایجاد می‌کند. این نوع هسته ساختاری به شکل طبیعی لانه زنبوری² بوده و از نسبت استحکام به وزن بالایی برخوردار است [11]. واژه‌ی لانه زنبوری یا هانی کامب نوعی سازه‌ی لانه زنبوری است که با ورق‌های مختلف با قطرهای متفاوت ساخته می‌شود. طبیعتاً هر چه خانه‌های شش ضلعی آن ریزتر باشد، سطح بیشتری برای انتقال و تقسیم فشارهای عمودی وجود دارد که نتجتاً مقاومت آن بالاتر می‌برد [12]. سازه‌های کامپوزیت که به این شکل ساخته می‌شوند به سازه‌های ساندویچی³ معروف می‌باشند. این نوع سازه‌ها در مقابل نیروی فشاری و تحت خمش مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند [13]. استحکام چندلایه هسته‌دار به اندازه‌ی قطعه، مواد مورد استفاده، تعداد و تراکم

سلول‌های لانه زنبوری در درون آن بستگی دارد [14]. این کامپوزیت‌ها به طور گسترده‌ای در بسیاری از صنایع استفاده می‌شود. این نوع سازه‌ها از یک هسته میانی که ضعیف و حجیم است و یک پوسته قوی و نازک در دو طرف هسته تشکیل شده‌اند. هسته ضعیف میانی از جنس فوم، چوب، هسته لانه زنبوری، نومکس یا... می‌باشد و پوسته‌های واقع در دو طرف هسته از جنس الیاف شیشه، کربن می‌باشد [15]. این چندلایه‌های هسته‌دار مقاومت بسیار بالاتری در برابر خمش دارند و علاوه بر آن بسیار سبک هستند. به همین دلیل محبوبیت زیادی در بین صنایع هوایی دارند. قطعات بال، دم، ملخ‌ها و پره‌های چرخان در هواپیما عمدتاً از این نوع سازه‌ها ساخته شده‌اند. هسته کامپوزیت لانه زنبوری را می‌توان از فلز آلومینیوم، الیاف کولار، الیاف کربن، الیاف شیشه، کاغذ، نومکس یا استیل ساخته شود [16]. مواد لایه‌ی مغزی (هسته) به طور معمول موادی با استحکام کم می‌باشند، اما ضخامت بیشتر آن برای چندلایه‌های هسته‌دار سفتی خمشی بالا و چگالی کم را فراهم می‌کند. هسته‌های لانه زنبوری، ساختارهایی از ورق-های به هم چسبیده هستند که اکثراً اشکالی شش وجهی مشابه کندوی زنبور عسل دارند. داشتن فضای خالی بسیار زیاد در ساختارشان مصرف ماده را کاهش داده و باعث کاهش وزن و چگالی نهایی قطعه می‌شود [17]. سازه‌های کامپوزیتی دارای هسته لانه زنبوری، از رویه‌های کامپوزیتی و یک ساختار مشبک که هر دو از جنس کامپوزیت می‌باشند، تشکیل شده‌اند، با این تفاوت که چندلایه هسته‌دار ساخته شده، بجای یک هسته سبک، یک ساختار مشبک را در مرکز خود دارند. به دلیل مشبک بودن هسته، مزیت توزیع بار و همچنین تحمل به خسارت را دارا بوده و به علت هسته‌دار بودن، دارای مقاومت خمشی بالا می‌باشد. همچنین به علت جنس کامپوزیتی کل سازه، از خواص چندگانه کامپوزیت‌ها نیز برخوردار هستند [18]. سازه‌های کامپوزیتی هسته‌دار در صنعت با هسته‌های متفاوتی ساخته می‌شوند، در صنایع کم اهمیت‌تر، از هسته‌های فومی، چوبی و غیره در این سازه‌ها به کار می‌رود و در صنایع مهم به خصوص صنایع هوایی به دلیل اهمیت بیشتر و ضریب اطمینان بالاتر، از هسته-های آلومینیومی لانه زنبوری یا هسته‌های لانه زنبوری از جنس آرامید یا به عبارتی دیگر هسته‌های لانه زنبوری نومکس استفاده می‌شود [19]. این نوع هسته‌ها به دلیل ساختار لانه زنبوری شکل خود، سطح تماس کمی با لایه‌های نکه دارند ایجاد می‌کنند و مانند هسته‌های فومی و چوبی با کل سطح لایه در تماس نیستند [20]. به همین دلیل روش ساخت چندلایه‌های هسته‌دار شکل به منظور اتصال هرچه بهتر هسته به لایه‌های مجاور اهمیت پیدا می‌کند. در صنعت علاوه بر هسته‌های متفاوت، از روش‌های ساخت متفاوتی نیز برای ساخت این نوع سازه‌ها استفاده می‌شود [21]. این مواد در عین ظرافت، از مقاومت فشاری و برشی و سفتی برشی بالایی برخوردارند و می‌توانند جلوی نفوذ امواج و تشعشعات را بگیرند [22]. این مواد عموماً به عنوان هسته در چندلایه‌های هسته‌دار بین دو ورقه مستحکم قرار می‌گیرند و قطعات سبک با مقاومت مکانیکی بالا تولید می‌کنند [23]. از انواع ورق کامپوزیت لانه زنبوری که تولید می‌شوند، می‌توان به ورق کامپوزیت طرح سنگ، ورق کامپوزیت طرح چوب و ورق کامپوزیت آینه‌ای اشاره کرد. به صورت کلی از ویژگی‌ها و مزایای ورق کامپوزیت لانه زنبوری می‌توان به وزن سبک، مقاومت بالا، تراکم زیاد، دارای قابلیت عایق، ضد حریق اشاره کرد [24]. لانه زنبوری‌ها، بسته به جنسشان می‌توانند خواص متفاوتی از قبیل مقاومت در برابر حرارت و آتش، مقاومت شیمیایی و غیره نیز داشته باشند. از بارزترین مزایای ورق کامپوزیت لانه زنبوری، قابلیت ضد حریق آن می‌باشد که به دلیل حذف هسته پلی‌اتیلنی، در

³ Sandwich Panels¹ Composites² Honey comb

آتش‌سوزی، به هیچ وجه آتش نگرفته و مشتعل نمی‌شود در صورتی که ورق - های کامپوزیت معمولی در برابر حرارت و آتش تغییر شکل می‌دهند [25]. ورق کامپوزیت هسته لانه زنبوری، به دلیل قابلیت ضد حریق بودن آن بهترین گزینه برای استفاده در پمپ‌های بنزین و برج‌ها می‌باشد [26]. از دیگر ویژگی‌های ورق کامپوزیت هسته لانه زنبوری، قابلیت عایق گرما و سرما می‌باشد که باعث جلوگیری از هدر رفت هوای گرم محیط ساختمان در زمستان و هوای سرد در تابستان خواهد شد و کاهش هزینه‌های ساختمان را موجب شده و باعث کاهش مصرف انرژی به میزان نود درصد خواهد شد [27]. از دیگر مشخصه‌های ورق کامپوزیت لانه زنبوری می‌توان به قابلیت آکوستیک یا عایق صوتی آن اشاره کرد که از وارد و خارج شدن صوت به محیط مورد نظر جلوگیری می‌کند؛ این ویژگی در ساخت سالن‌های سمینار و کنفرانس، سینما و تئاتر و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد [28]. وزن سبک این ورق‌ها باعث کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری می‌شود، همچنین باعث کاهش وزن ساختمان شده که در نتیجه در زمان وقوع زلزله ایمن بوده و خسارت پایین‌تری نسبت به دیگر متریال‌ها به ساختمان وارد می‌شود [29]. این نوع ورق‌ها در حد فولاد مقاوم هستند و در برابر خوردگی، باران‌های اسیدی، اشعه فرابنفش نور خورشید، باد و غیره از مقاومت بالایی برخوردار می‌باشند [30]. تنوع رنگ در ورق کامپوزیت لانه زنبوری بسیار بالا بوده و نیازی به هزینه‌های رنگ‌آمیزی نمی‌باشد؛ زیرا خود ورق دارای رنگ مقاوم در برابر ضربه و خط و خش می‌باشد [31]. این نوع ورق به دلیل قابلیت انعطاف پذیری و خم شوندگی به راحتی به شکل مورد نظر، شکل داده می‌شود. ورق کامپوزیت قابلیت نصب بر روی سازه‌هایی از جنس چوب، بتن و اسکلت‌های فلزی را دارا می‌باشد که با شرایط زیست محیطی سازگار بوده و به راحتی بازیافت می‌شود و از این روی دوست‌دار محیط زیست می‌باشد [32]. کاربرد لانه‌زنبوری در صنایع هوایی، دریایی، نظامی، خودرو سازی، حمل و نقل، تجهیزات مخابراتی و ورزشی است. مواد کامپوزیت هسته لانه زنبوری، علیرغم تمام مزایایی که نسبت به مواد سنتی دارند، استفاده از این مواد در مقیاس‌های بزرگ همیشه از نگرانی‌های محققین این حوزه بوده است [33]. این مواد ساختار فیزیکی و رفتار مکانیکی به مراتب پیچیده‌تری نسبت به مواد سنتی از خود نشان می‌دهند؛ که این عوامل به کارگیری آن‌ها را با محدودیت‌ها و مشکلاتی روبرو می‌سازد [34]. به عنوان مثال، یکی از رایج‌ترین اتفاقاتی که در اتصالات هواپیما مانند اتصال پرچ به پوسته یا تیرک‌های مقاومتی رخ می‌دهد، شکست و جدایش لایه‌ها از یکدیگر است. این اتفاق در اثر بارگذاری‌های مختلف در شرایط مختلف عملیاتی هواپیما رخ می‌دهد [35]. ترک ابتدا از نواحی آزاد شروع به رشد کرده و رفته‌رفته به محل اتصالات می‌رسد و با رسیدن به محل اتصالات و افزایش بارهای اعمالی، باعث شکست در ناحیه اتصالات می‌شوند [36]. با این وجود در بسیاری از موارد، با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان بالا، سعی در جبران این کمبودها می‌شود، از طرفی استفاده از ضریب اطمینان بالا در زمان طراحی، خود باعث افزایش وزن نهایی سازه شده و از مزیت نسبی مواد کامپوزیتی می‌کاهد [37]. لذا بررسی و شناخت دقیق‌تر خواص این مواد، می‌تواند امکان استفاده مناسب‌تر از آن‌ها را افزایش دهد. ناهمگنی ذاتی کامپوزیت‌ها، طراحی سازه‌هایی با سفتی و استحکام بهینه در مکان‌ها و جهت‌های خاص با توجه به شرایط خاص را، تسهیل می‌کند [38]. بنابراین، هنگام طراحی سازه‌ی کامپوزیتی، متغیرهای طراحی اضافی مربوط به پیکربندی کامپوزیت مانند (لایه

چینی)¹ باید در نظر گرفته شوند [39]. با این وجود، ناهمگنی کامپوزیت‌ها صرف‌نظر از ماهیت اجزا، منبع اصلی ضعف آن‌ها است. بنا به گفته‌ی اکثر محققان فعال در زمینه تحلیل مواد کامپوزیت، جدایی بین‌لایه‌ای² به‌عنوان یکی از انواع تخریب سه‌بعدی اتفاق افتاده در مواد کامپوزیت لایه‌ای، مهم - ترین مد تخریب در این نوع مواد است. جدایی بین‌لایه‌ای در حقیقت ترکی است که بین دولایه‌ی مجاور از مواد کامپوزیتی شکل می‌گیرد [40]. این دولایه می‌تواند دارای خواص مکانیکی و جهت الیاف گوناگون باشد. علت تعیین جدایی بین‌لایه‌ای به عنوان مهم‌ترین مد تخریب این است که سفتی و استحکام را در سازه‌های کامپوزیتی، به شدت کاهش می‌دهد [41]. به عبارت دیگر ایجاد جدایی بین‌لایه‌ای عملاً قطعه را تخریب نمی‌کند و در ظاهر قطعه تخریبی مشاهده نمی‌شود ولی قطعه را به چنان درجه‌ای نزول می‌دهد که دیگر توانایی تحمل بارگذاری را نداشته و در بارگذاری‌های بسیار کمتر از حد طراحی، مقاومت خود را ازدست‌داده و تخریب می‌شود [42]. در چندلایه‌های کامپوزیتی به دلیل وجود لایه چینی‌های مختلف، عوامل مختلفی رخ می‌دهد که برخی باعث خرابی در این سازه‌های می‌شوند. به دلیل تفاوت میان زاویه قرارگیری الیاف، تفاوت میان ضرایب پواسن لایه‌ها به وجود می‌آید که این تفاوت باعث به وجود آمدن تنش‌های بین لایه‌ای می‌شود [43]. می‌توان گفت که رشد ترک در یک ماده همگن زمانی رخ می‌دهد که ترک مورد نظر عمود بر جهت بارگذاری ایجاد شده باشد؛ اما در سازه‌های لایه‌ای، راستای رشد ترک، پیوسته توسط ماده تقویت‌شده تعیین می‌شود. لذا بررسی و شناخت دقیق‌تر خواص این مواد، می‌تواند امکان استفاده مناسب‌تر از آن‌ها را افزایش دهد [44]. اصولاً هسته‌ها به منظور افزایش گشتاور دوم سطح و افزایش ظرفیت خمشی چندلایه‌ها به کار می‌روند. از مسائل مهم در به کارگیری هسته‌ها به خصوص لانه زنبوری‌ها، اطمینان از اتصال مناسب بین لایه‌های دو سمت هسته با آن است؛ چراکه عدم اتصال مناسب، منجر به جدایی لایه از هسته شده و با کم‌اندامش موضعی رویه، عملاً فلسفه وجود هسته زیر سوال خواهد رفت. از این‌رو آگاهی از خواص مکانیکی و استحکامی اتصالات بین لایه و هسته ضروری است [45]. این اتصال هنگامی مناسب خواهد بود که ظرفیت استحکامی اتصال بیش از خود هسته باشد و به عبارت دیگر ناحیه جدایش در سازه از هسته شروع شود. نحوه ساندویچ کردن لانه‌زنبوری بین لایه‌ها می‌تواند متفاوت باشد. مورایس³ [46] در سال 2002 استفاده از یک چسب مجزا برای چسباندن هسته به لایه را توصیه نمود. گراو⁴ و همکاران [47] در سال 2006 معتقد به استفاده از یک لایه واسط ظریف بین هسته و لایه‌های اصلی بودند. حلیمی و همکارانش در سال 2011 [48] امکان ساخت قطعات چندلایه‌های هسته‌دار با هسته‌ای از جنس فوم PVC و رویه‌هایی از جنس شیشه/اپوکسی را با استفاده از تکنیک انتقال رزین به کمک خلأ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای بررسی و بهینه‌سازی ساخت چندلایه‌های هسته‌دار با استفاده از روش متغیرهای: استفاده از الیاف با نفوذپذیری بالا، ایجاد الگوهای مختلف تکرار سوراخ بر روی هسته و ایجاد انواع مختلف شیار بر سطح پایینی هسته فومی را مورد مطالعه قرار دادند. تأثیر سوراخ و شیارهای ایجاد شده در هسته بر نحوه جریان رزین، زمان تولید، وزن نهایی قطعه، خواص مکانیکی و استحکام چسبندگی رویه به هسته، بررسی شد. ساسیندران⁵ و همکاران [49] در سال 2020 چسباندن هسته به صورت مجزا روی سطوح را پیشنهاد دادند و راتو و همکاران⁶ [50] در سال 2016، چسباندن هسته بر روی لایه‌های آغشته به رزین و خیس

⁴ Grau
⁵ Saseendran
⁶ Rao

¹ Stacking sequence
² Delamination
³ Morais

50 میلی‌متر کمتر بود و نمونه چندلایه ساخته شده توسط دو صفحه فولادی مطابق شکل 2 مهار شده و با زاویه مناسب به گونه‌ای در دستگاه متصل شد که راستای اعمال بار از خط میانی چندلایه عبور کند. تغییرات دمایی در هنگام انجام آزمون در محدوده 3 ± 23 درجه سانتی‌گراد و همچنین درصد رطوبت نسبی محیط در بازه 5 ± 50 درصد قرار داشت. سرعت باردهی به نمونه حداکثر تا 2 میلی‌متر بر دقیقه بود و ثبت داده‌ها در طول انجام آزمون به طور پیوسته برقرار و ترجیحاً در نزدیک زمان به شکست نمونه بار حداکثر، نیروی شکست و نرخ باردهی ثبت شد. همچنین تنها مود شکست قابل قبول برای نمونه جداولی چندلایه از محل هسته لانه‌زنبوری، آزمون بار برشی خواهد بود و نمونه‌هایی که جداولی بین لایه و هسته و یا واماندگی چسب رخ داده مردود است.

جدول 1 شرایط نمونه برای آزمون کششی

Table 1 Sample conditions for tensile testing

نوع مقطع	مستطیلی
جنس هسته	لانه‌زنبوری نومکس
مشخصات هسته	سایز 5 میلی‌متر، چگالی 48 کیلوگرم بر مترمکعب
جنس لایه‌ها	پارچه کربن
ضخامت هسته	5 میلی‌متر
ضخامت لایه‌ها	1 میلی‌متر
نوع چسب و رزین	اپوکسی / Araldite LY5052
عرض چندلایه	50 میلی‌متر
طول چندلایه	50 میلی‌متر
نرخ باردهی	2 میلی‌متر بر دقیقه



Fig. 1 Sample test of composite plate tension with honeycomb core
شکل 1 نمونه آزمون کشش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری

جدول 2 شرایط نمونه برای آزمون برشی

Table 2 Sample conditions for shear test

نوع مقطع	مستطیلی
جنس هسته	لانه‌زنبوری نومکس
مشخصات هسته	سایز 5 میلی‌متر، چگالی 48 کیلوگرم بر مترمکعب
جنس لایه‌ها	پارچه کربن
ضخامت هسته	5 میلی‌متر
ضخامت لایه‌ها	1 میلی‌متر
نوع چسب و رزین	اپوکسی / Araldite LY5052
عرض چندلایه	50 میلی‌متر
طول چندلایه	120 میلی‌متر
نرخ باردهی	2 میلی‌متر بر دقیقه

را ترجیح دادند. هدف از این پژوهش، یافتن بهترین راه برای چسباندن هسته به لایه‌های کامپوزیتی است. در همین راستا، پس از بررسی چسبندگی لایه‌های الیاف به هسته لانه زنبوری با استفاده از استانداردهای ASTM C273 و ASTM C297 به میزان اتصال هسته به لایه برای سه روش متداول ساخت چندلایه‌های هسته‌دار در صنایع ایران شامل: روش دستی، روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای پرداخته خواهد شد.

2-روش تحقیق

اتصال بین هسته و لایه از دو دیدگاه کشش و برش می‌تواند حائز اهمیت باشد. آزمون‌های به کار رفته در این پژوهش، برگرفته از استاندارد ASTM C273 و ASTM C297 به منظور استخراج خواص کششی و برشی خود هسته می‌باشد؛ با این حال این آزمون‌ها را می‌توان هم‌زمان جهت ارزیابی اتصالات واصل هسته و لایه‌ها نیز به کار گرفت. بدین منظور دو آزمون یکی به صورت کششی به منظور یافتن خواص استحکامی هسته لانه‌زنبوری در راستای ضخامت و همچنین بررسی اتصال بین هسته و چندلایه در حالت کشش و دیگری به صورت برشی با هدف محاسبه و بررسی استحکام برشی و چسبندگی بین هسته و چندلایه براساس استانداردهای مربوط به هر بخش تعریف و انجام شده است و همان‌گونه که اشاره شد، فراتر از محاسبه کمی مقادیر استحکامی چندلایه کامپوزیتی، مقایسه و بررسی کیفی استحکام اتصال لایه‌ها و هسته مدنظر بوده است. به این ترتیب که با انجام آزمون، در صورتی که هسته کامپوزیتی زودتر از چسب اتصال دچار واماندگی شود، می‌توان نتیجه گرفت که استحکام چسبندگی بین لایه و هسته بالاتر از استحکام هسته بوده است. لازم به ذکر است که برای هر آزمون، تعداد 30 نمونه به صورت 6 پارت 5 تایی همراه گیره نگهدارنده ساخته و آرموده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های 5 تایی 6 مرتبه ساخته شدند تا تاثیر خطاهایی نظیر خطای انسانی، شرایط محیطی، شرایط پخت و... به حداقل برسد. الزامات هر آزمون از موارد متعددی تشکیل شده است از جمله آن می‌توان به: 1) مشخصات نمونه ساخته شده برای آزمون 2) نحوه اتصال نمونه در دستگاه 3) نوع و میزان باردهی یا به عبارتی سرعت باردهی به نمونه 4) شرایط محیطی در هنگام آزمون اشاره کرد. در این پژوهش، آزمون کششی در راستای ضخامت برای یک چندلایه هسته‌دار با توجه به استاندارد C297 تنظیم شده است. مطابق با آن، میکرومتر استفاده شده برای ثبت میزان تغییر شکل نمونه از دقت حداقل 1 درصد در طول، عرض و ضخامت نمونه برخوردار می‌باشد. با توجه به ابعاد نمونه، دقت به میزان ± 0.25 میلی‌متر است. لودسل مورد استفاده در آزمون دقت 1 درصد در اندازه‌گیری نیروی اعمالی به نمونه را داراست. گیره نگهدارنده اعمال بار، دارای استحکام لازم به منظور ایجاد اتصال مناسب با سطوح چندلایه را دارد، لذا بلوک با ضخامت 40 تا 50 میلی‌متر است. تغییرات دمایی در هنگام انجام آزمون از 30 درجه سانتی‌گراد فراتر نرفت و همچنین درصد رطوبت محیط در بازه 3 درصدی قرار داشت. سطح دارای اتصال با گیره نگهدارنده، حداقل 625 mm^2 و سرعت باردهی به نمونه حداکثر تا 2 میلی‌متر بر دقیقه بود. جدول 1، مشخصات نمونه آزمون کشش و شکل 1، نمونه آزمون کشش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری را نشان می‌دهد. دو لایه کربن بافته شده با گرماژ 200 گرم، نوع بافت توپیل در دو سمت هسته مورد استفاده قرار گرفته است؛ لازم به ذکر است که زاویه الیاف صفر و نود درجه می‌باشد.

همچنین در این پژوهش، آزمون برشی برای یک چندلایه‌های هسته‌دار با توجه به استاندارد C273 تنظیم شده توسط ASTM انجام شد. در جدول 2 مشخصات قطعه آزمون برشی و شکل 2، نمونه آزمون برش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری را نشان می‌دهد. ضخامت نمونه ساخته شده از

ویسکوزیته رزین را به خوبی بشناسد و زمان مناسبی را برای وکیوم قطعه انتخاب نماید.

روش ساخت دیگری که آزمایش گردید، روش ساخت یک مرحله‌ای بود، به این ترتیب که ابتدا لایه‌گذاری انجام می‌شود و لایه‌ها یک به یک به رزین آغشته می‌گردند و سپس هسته روی لایه‌ها قرار می‌گیرد و پس از آن، مجدداً روی هسته لایه‌گذاری انجام می‌گیرد. نهایتاً قطعه با کمک دستگاه ایجاد خلأ، وکیوم می‌شود. روش سوم (ساخت دستی) نیز به مانند روش دوم، در آن ابتدا لایه چینی صورت می‌گیرد و لایه‌ها به رزین آغشته می‌گردند و سپس هسته روی لایه‌ها قرار می‌گیرد.

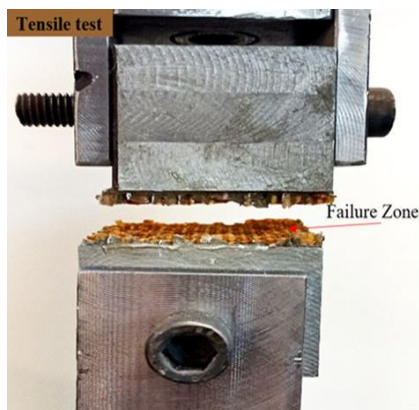


Fig. 3 Sample test of cutting a composite plate with a honeycomb core

شکل 3 ناحیه جدایش در آزمون کششی نمونه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

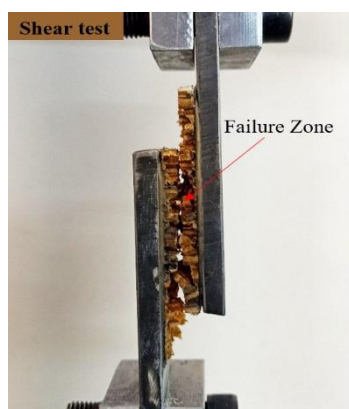


Fig. 4 Sample test of cutting a composite plate with a honeycomb core

شکل 4 ناحیه جدایش در آزمون برشی نمونه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

نهایتاً در این روش، روی هسته لایه‌گذاری انجام گرفته و ساخت نمونه به اتمام می‌رسد، با این تفاوت که در ساخت، از دستگاه ایجاد خلأ استفاده نمی‌شود. می‌توان گفت که روش ساخت دومرحله‌ای، روش مطمئن‌تری نسبت به سایر روش‌های آزمون شده است، ولی نسبت به روش‌های دیگر، زمان بیشتری را صرف خود می‌کند. همچنین هزینه ساخت به مراتب بالاتری دارد.

3- نتایج

همانطور که پیش‌تر گفته شد، روش ساخت چندلایه‌های هسته‌دار دو مرحله‌ای، ضریب اطمینان بالاتری نسبت به سایر روش‌های آزمون شده دارد. زیرا در مرحله‌ی اول ساخت در این روش، پس از قرارگیری هسته روی لایه‌های آغشته به رزین و وکیوم کردن آن، رزین طی چندین ساعت، فرصت این را دارد که به واسطه تحت خلأ قرار گرفتن قطعه به سمت دیواره‌های هسته حرکت کرده و



Fig. 2 Sample test of cutting a composite plate with a honeycomb core

شکل 2 نمونه آزمون برش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

جدول 3 خصوصیت‌های روش‌های مختلف ساخت چندلایه هسته‌دار

Table 3 Characteristics of different methods of making sandwich panels

روش ساخت نمونه	فراوانی مودهای شکست در ناحیه جدایش	زمان ساخت نمونه (ساعت)	جدایش مورد پذیرش (درصد)
دومرحله‌ای با کیسه خلأ	هسته	12	بالای 90
یک‌مرحله‌ای با کیسه خلأ	هسته	6	نزدیک 50
ساخت دستی	سطح مشترک هسته و لایه	5	زیر 50

در این پژوهش سه نمونه از متداول‌ترین روش‌های ساخت چندلایه‌های هسته‌دار در صنایع کشور بررسی شد و مطابق با نتایج به دست آمده از این پژوهش در جدول 3، دریافت شد که بهترین راه برای ساخت یک قطعه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری، بین سه روش آزمون شده، روش ساخت دومرحله‌ای است.

در روش دومرحله‌ای، ابتدا لایه‌های کربن یا الیاف شیشه (در این پژوهش از الیاف کربن استفاده شده است) به رزین آغشته شده و بعد از لایه چینی تعداد لایه مدنظر، هسته کامپوزیتی روی لایه‌ها قرار می‌گیرد و پس از آن، کل قطعه با کمک دستگاه ایجاد خلأ، خالی از هوا شده و به آن فشار وارد می‌شود تا تحت پرس، هسته به خوبی با لایه‌ها اتصال ایجاد کند. با استفاده از دستگاه خلأ، رزین‌ها تا دیواره‌های هسته بالا می‌آیند و اتصال مناسبی را ایجاد می‌کنند. در مرحله دوم که 24 ساعت پس از شروع ساخت مرحله اول آغاز می‌شود، لایه‌های مربوط به سمت دیگر هسته جانمایی شده و به رزین آغشته می‌شوند. پس از اتمام لایه‌چینی، مجدداً به قطعه با کمک کیسه خلأ، فشار وارد می‌شود تا دو سمت هسته به خوبی به آن بچسبند. شکل‌های 3 و 4 ناحیه جدایش در آزمون‌های کشش و برش نمونه ساخته شده از این روش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در صنایع مهمی مانند صنایع هوافضا پارامتر وزن بسیار مهم می‌باشد. در این صنایع خیلی مطلوب نمی‌باشد که تمامی سطوح یا شبکه‌های هسته پر از رزین شوند، زیرا هم وزن سازه بالا می‌رود و هم هسته شکننده خواهد شد. در نتیجه باید ساخت دو مرحله‌ای به گونه‌ای انجام گیرد که رزین‌ها تمام سطح شبکه‌ها را نپوشانند و این امر زمانی میسر می‌شود که سازنده

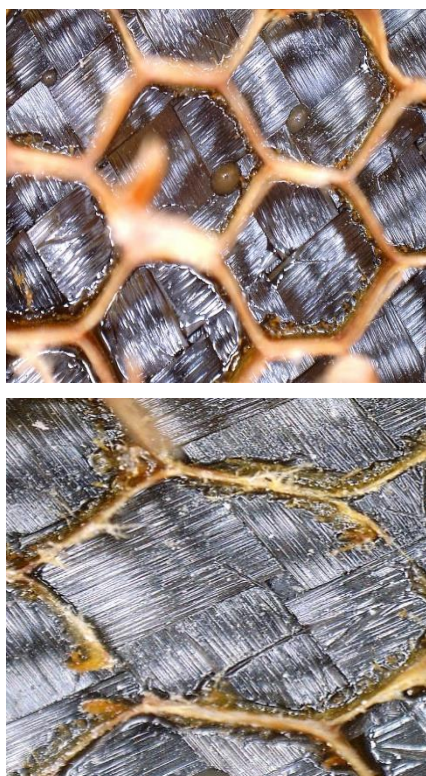


Fig. 6 Area images of a composite structure with a honeycomb core made in a single-step method (Magnification $\times 200$)

شکل 6 تصاویر ناحیه‌ای از سازه کامپوزیتی دارای هسته لانه‌زنبوری ساخته‌شده با روش تک‌مرحله‌ای (بزرگنمایی 200 بار)

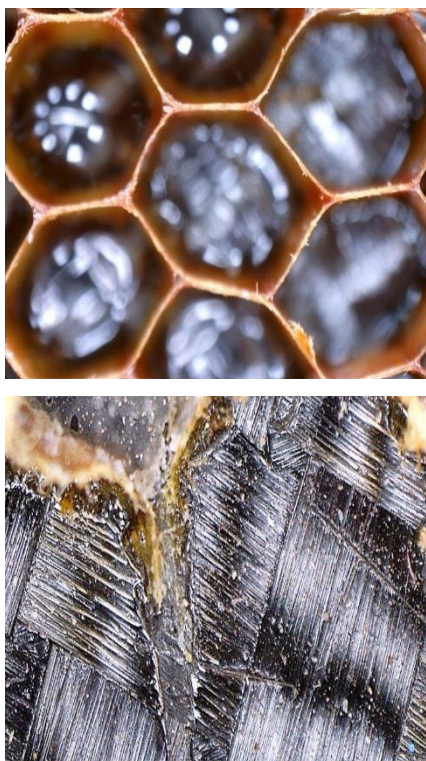


Fig. 7 Area images of a composite structure with a honeycomb core made in a Hand-Layup method (Magnification $\times 200$)

شکل 7 تصاویر ناحیه‌ای از سازه کامپوزیتی دارای هسته لانه‌زنبوری ساخته‌شده با روش دستی بدون استفاده از وکیوم (بزرگنمایی 200 بار)

اتصال را به خوبی مستحکم سازد. همین شرایط برای مرحله بعدی ساخت نیز حاکم می‌باشد و نهایتاً دیواره‌های دو سمت هسته با رزین پوشانده می‌شود و به خوبی این اتصال، صورت می‌گیرد. تصاویر بزرگ‌شده‌ی یک ناحیه از نمونه ساخته‌شده به روش دومرحله‌ای با استفاده از دستگاه وکیوم در شکل 5، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از ایجاد خلأ در قطعه، رزین تا دیواره‌های هسته بالا می‌آید و اتصال بین هسته و لایه‌ها به خوبی برقرار می‌شود.

در روش ساخت چندلایه‌های هسته‌دار یک مرحله‌ای، به واسطه اینکه بلافاصله پس از لایه چینی، هسته روی لایه‌ها قرار می‌گیرد و سپس روی هسته مجدداً لایه‌گذاری می‌شود، پس از وکیوم قطعه، رزین نمی‌تواند به خوبی روش قبل آزادانه بین دیواره‌های هسته حرکت کند و بیشتر رزین اضافی به وسیله‌ی لایه‌ای به نام بلیدر جذب می‌شود. نهایتاً طی این روش، سازه موجود از سازه ساخته شده با روش دو مرحله‌ای سبک‌تر می‌شود، ولی اتصال بین هسته و لایه‌ها، اتصال سست‌تری می‌باشد. در روش ساخت دستی نیز به دلیل اینکه برای چسباندن بهتر لایه‌ها به هسته از دستگاه وکیوم استفاده نمی‌شود، نه سازه مورد نظر به سبکی سازه ساخته شده به روش دومرحله‌ای و یک مرحله‌ای می‌باشد و نه اتصال بین لایه و هسته به خوبی دو روش مذکور برقرار می‌شود. در نتیجه ساخت چندلایه‌های هسته‌دار با این روش برای صنایع مهم به خصوص صنایع هوایی توصیه نمی‌شود. شکل 6 و شکل 7 به ترتیب تصاویر بزرگنمایی نمونه‌های ساخته‌شده از روش یک مرحله‌ای و روش ساخت دستی را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی دو تصویر 5 و 6 می‌توان دریافت که اتصال هسته با لایه‌ها در شکل 5 بسیار بیشتر از شکل 6 است و این نشان‌دهنده‌ی ضریب اطمینان بیشتر روش ساخت دومرحله‌ای نسبت به روش تک‌مرحله‌ای می‌باشد.



Fig. 5 Area images of a composite structure with a honeycomb core made in a Two-step method (Magnification $\times 200$)

شکل 5 تصاویر ناحیه‌ای از سازه کامپوزیتی دارای هسته لانه‌زنبوری ساخته‌شده با روش دومرحله‌ای (بزرگنمایی 200 بار)

لانه‌زنبوری رخ ندهد، نشان دهنده‌ی آن است که اتصال بین هسته و لایه‌ها به خوبی برقرار نشده است. در این پژوهش از تعداد 30 نمونه‌ای که برای هر یک از سه روش ساخت مذکور استفاده گردید، در روش دوم مرحله این جدایش در خود هسته لانه‌زنبوری در 28 نمونه از 30 نمونه رخ داد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن این روش (با بیش از 90 درصد جدایش مورد قبول) می‌باشد. اما در روش تک مرحله‌ای و روش دستی به ترتیب 18 عدد از 30 نمونه و همچنین 9 عدد از 30 نمونه هسته دچار شکست در آزمون کشش و برش شد. در نتیجه روش دو مرحله‌ای با استفاده از دستگاه وکیوم، روش مناسب‌تری برای ساخت این نوع سازه‌های پیش‌بینی می‌شود به دلیل اینکه بعد از ایجاد خلأ در قطعه، رزین فرصت این را دارد تا از دیواره‌های هسته بالا رود و اتصال بین هسته و لایه‌ها به خوبی برقرار می‌شود و این فرآیند در دو سمت هسته رخ می‌دهد. پس از آن روش ساخت یک مرحله‌ای ضریب اطمینان بهتری نسبت به روش ساخت دستی دارد و نتیجتاً می‌توان گفت که با استخراج و مشاهده نتایج پژوهش حاضر از 28 نمونه جدایش مربوط به خود هسته لانه‌زنبوری از 30 نمونه، مناسب‌ترین روش برای ساخت هسته‌های لانه زنبوری ساندویچ چندلایه‌های کامپوزیتی، روش دوم مرحله‌ای می‌باشد و روش ساخت دستی بدون استفاده از دستگاه وکیوم برای استفاده در صنایع مهم پیشنهاد نمی‌شود.

5-مراجع

- [1] Taheri-Behrooz, F., Kiani, A., "Simulation of thermo-mechanical behavior of glass-epoxy composites containing shape memory alloy under static loading", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 111-122, 2016.
- [2] Mohammadi, B., Asl Kamkar, S., Farrokhhabadi, A., "Matrix cracking and induced delamination in symmetrically laminated composites subjected to static loading by using multi scale damage mechanics", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 9-24, 2017.
- [3] Shokrieh, M. M., Ghajar, M., Salamattalab, M., Madoliat, R., "Progressive damage modeling of laminated composites by considering simultaneous effects of interlaminar and intralaminar damage mechanisms", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015.
- [4] He, L., Cheng, Y. S., Liu, J., "Precise bending stress analysis of corrugated-core, honeycomb-core and X-core sandwich panels", Composite Structures, Vol. 94, No. 5, pp. 1656-1668, 2012.
- [5] Mohammadi, B., Fazlali, B., "Fatigue life prediction of laminated composites under multiaxial fatigue loading condition by using developed continuum damage mechanics model", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 215-224, 2016.
- [6] Taheri-Behrooz, F., Mohammad Javad Mahdavi, S., Gholami, M. J., "Micromechanics of stress transfer through the interphase in pull out test of fiber through the resin", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 283-294, 2017.
- [7] Raju, K. S., Smith, B. L., Tomblin, J. S., Liew, K. H., Guarddon, J. C., "Impact damage resistance and tolerance of honeycomb core sandwich panels", Journal of Composite Materials, 42, No. 4, pp. 385-412, 2008.
- [8] Tabatabaee, M., Taheri-Behrooz, F., Razavi, S. M., Liaghat, G. H., "Electrical conductivity enhancement of Carbon/Epoxy composites using nanoparticles", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 605-614, 2019.
- [9] Mohammadi, B., Kazemi, A., Ghasemi, R., "Damage analysis of holed composite laminates using continuum damage mechanics", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 3, pp. 22-34, 2015.
- [10] Chen, Z., Yan, N., "Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels. Composites Part B: Engineering", Vol. 43, No. 5, pp. 2107-2114, 2012.

با توجه به شکل 7 مشخص است که هسته از لایه‌ها جدا شده و در واقع اتصال بین هسته و لایه‌ها در چندلایه‌های هسته‌دار نتوانسته است به خوبی بار اعمالی را تحمل کند و واماندگی در آن رخ داده است. نمودار آزمون کششی و برشی نمونه‌های ساخته شده به سه روش نام‌برده شده به ترتیب در شکل 8 و شکل 9 آمده است. ناحیه جدایش در دو روش اول که از دستگاه وکیوم استفاده شد از هسته بوده است. ولی در روش ساخت دستی و بدون استفاده از دستگاه مکش، جدایش از فصل مشترک هسته و لایه رخ داده است.

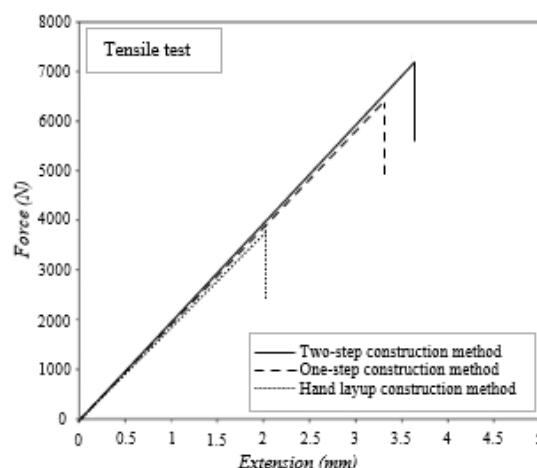


Fig. 8 Shear test diagram in composite samples with honeycomb core

شکل 8 نمودار آزمون کشش در نمونه‌های کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

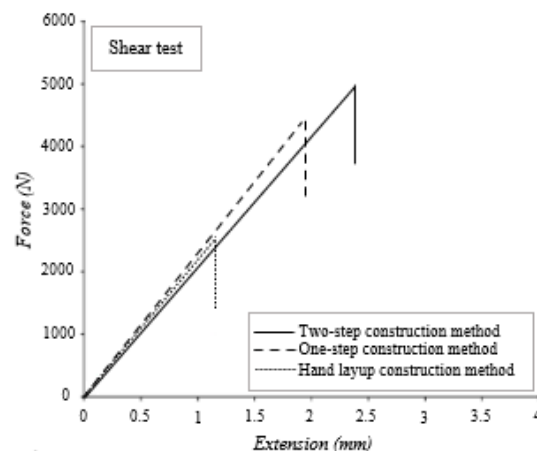


Fig. 9 Shear test diagram in composite samples with honeycomb core

شکل 9 نمودار آزمون برشی در نمونه‌های کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

با بررسی نمودارهای می‌توان میانگین استحکام کششی هسته لانه‌زنبوری را حدود 2.7 مگاپاسکال و همچنین استحکام برشی آن حدود 0.75 مگاپاسکال محاسبه کرد. در نتیجه می‌توان دریافت که ناحیه فصل مشترک بین لایه‌ها و هسته بیشتر از این مقدار بوده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از بررسی چسبندگی لایه‌های الیاف به هسته لانه زنبوری با استفاده از استانداردهای ASTM C297 و ASTM C273 به سه روش متداول ساخت چندلایه‌های هسته‌دار در صنایع ایران شامل: روش دستی، روش یک مرحله‌ای، روش دو مرحله‌ای، دریافت شد که اگر نمونه از خود هسته لانه زنبوری دچار جدایش یا شکستگی شود، نشان دهنده‌ی آن است که اتصال بین لایه‌ها و هسته لانه‌زنبوری مناسب بوده است. اما اگر جدایش بین لایه و هسته

- granular matter impact. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 13-31, 2018.
- [28] Elhami, M., Habibi, S., "A Study on morphology of Poly (vinyl alcohol)-organoclay nanocomposite nanofibers", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 325-330, 2018.
- [29] Murthy, O., Munirudrappa, N., Srikanth, L., Rao, R. M. V. G. K., "Strength and stiffness optimization studies on honeycomb core sandwich panels", *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 25, No. 6, pp. 663-671, 2006.
- [30] Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., "Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core", *Computational Materials Science*, Vol. 56, No. 1, pp. 69-78, 2012.
- [31] Nayak, S. K., Singh, A. K., Belegundu, A. D., Yen, C. F., "Process for design optimization of honeycomb core sandwich panels for blast load mitigation", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 47, No. 5, pp. 749-763, 2013.
- [32] Najafi, M., Darvizeh, A., Ansari, R., "Evaluation of impact strength of composites and fiber metal laminates hybridized with nanoclay after exposure to high temperature thermal shock. *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 263-274, 2017.
- [33] Karagiozova, D., Nurick, G. N., Langdon, G. S., "Behaviour of sandwich panels subject to intense air blasts-Part 2: Numerical simulation", *Composite structures*, Vol. 91, No. 4, pp. 442-450, 2009.
- [34] Shokrieh, M. M., Zeinedini, A., "Analytical prediction of mode I strain energy release rate at crack growth initiation of polymeric nanocomposites", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10, 2016.
- [35] Tanimoto, Y., Nishiwaki, T., Shiomi, T., Maekawa, Z., "A numerical modeling for eigenvibration analysis of honeycomb sandwich panels", *Composite Interfaces*, Vol. 8, No. 6, pp. 393-402, 2001.
- [36] Foo, C. C., Seah, L. K., Chai, G. B., "Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels", *Composite structures*, Vol. 85, No. 1, pp. 20-28, 2008.
- [37] Mohieddin Ghomshei, M. M., Shahi, R., "Stress analysis of single-lap bonded joints in composite tubes under torsion and hygrothermal effects using DQM", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 375-385, 2018.
- [38] Towsyfy, H., Biguri, A., Boardman, R., Blumensath, T., "Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 33, No. 3, pp. 771-791, 2020.
- [39] Davar, A., Azarafza, R., Faraji Shoa, J., "Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 615-626, 2020.
- [40] Rahmani, M., Farrokhabadi, A., "Evaluation the energy release rate of induced delamination due to matrix cracking in symmetric composite laminate", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 53-68, 2019.
- [41] Sun, G., Chen, D., Huo, X., Zheng, G., Li, Q., "Experimental and numerical studies on indentation and perforation characteristics of honeycomb sandwich panels", *Composite Structures*, Vol. 184, No. 1, pp. 110-124, 2018.
- [42] Li, H., Fan, M., Yue, Y., Hu, G., He, Q., Yu, M., "Motion control of capsule-like underwater robot utilizing the swing properties of ionic polymer metal composite actuators", *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 17, 2, pp. 281-289, 2020.
- [43] Rajkumar, S., Arulmurugan, B., Manikandan, M., Karthick, R., Kaviprasath, S., "Analysis of physical and mechanical properties of A3003 aluminum honeycomb core sandwich panels", *In Applied Mechanics and Materials*, Vol. 867, No. 1, pp. 245-253, 2017.
- [44] Davalos, J. F., Qiao, P., Xu, X. F., Robinson, J., Barth, K. E., "Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications", *Composite structures*, Vol. 52, No. 3, pp. 441-452, 2001.
- [11] Mohammadi, B., Fazlali, B., Madoliat, R., "Fatigue life prediction of symmetric cross ply laminated composite using a developed continuum damage mechanics-based model", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 13-22, 2015.
- [12] Ebadi, S., K. Shahbazi, E. Anbarzadeh., "Investigation of Aluminum and Composite Aircraft Wings Under the Influence of Aerodynamic Forces and their Effects on Environmental Impacts", *Journal of Environmental Friendly Materials*, Vol. 5, No. 1, pp. 13-21, 2021.
- [13] Starace, F., Orlando, S. D., Guida, M., Marulo, F., "Experimental study of a virtual allowables approach for the design of composite aircraft structures", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, No. 14, pp. 2529-2541, 2021.
- [14] Salehi Kolahi, M. R., Moekinkah, H., "A theoretical model for analysis of ionic polymer metal composite sensors in fluid environments", *Journal of Computational Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 1, pp. 21-29, 2020.
- [15] Du, Y., Yan, N., Kortschot, M. T., "Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: Fabrication and evaluation", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 7, pp. 2875-2882, 2012.
- [16] Gafarova, V. A., Kuzev, I. R., "Destruction of Epoxy-Based Composite Materials under the Influence of Impact Load", *In Materials Science Forum*, Vol. 992, pp. 331-335, 2020.
- [17] Sun, G., Huo, X., Wang, H., Hazell, P. J., Li, Q. (2021). On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 216, 108881.
- [18] Theobald, M. D., Langdon, G. S., Nurick, G. N., Pillay, S., Heyns, A., Merrett, R. P., "Large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading", *Composite structures*, Vol. 92, No. 10, pp. 2465-2475, 2010.
- [19] Shojae, T., Mohammadi, B., Madoliat, R., "Experimental and numerical investigation of effects of stiffener in buckling resistance of square laminated composites with circular hole" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 43-52, 2019.
- [20] Amirshajae, K., Fakhreddini-Najafabadi, S., Taheri-Behrooz, F., "Numerical and experimental study of carbon/epoxy composite laminate response to low velocity impact", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1461-1472, 2021.
- [21] Esmaili, A., Taheri-Behrooz, F., "Comparison of numerical and analytical cohesive zone length models in the delamination of composite laminates", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1235-1242, 2021.
- [22] Delshad Gholami, Mohammad, et al., "Evaluation of mechanical properties and fracture toughness of aluminum-magnesium-aluminum composite produced by cold roll bonding process", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1317-1326, 2021.
- [23] Shahbakhsh, S., Khosravi, H., Tohidlou, E., "Improvement in interlaminar shear strength and flexural properties of carbon fiber/epoxy composite using surface-modified carbonate calcium", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 343-350, 2019.
- [24] Abedi, M., Aliabadi, A., Mosavei, S. E., Sarfaraz, R., "Dimensional characteristic of glass/epoxy composite plate with edge notch under wet freeze-thaw cycles", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 3, pp. 219-231, 2020.
- [25] Feli, S., Pour, M. N., "An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43 No. 5, pp. 2439-2447, 2012.
- [26] Bashiri Goodarzi, H., Yarmohammad Tooski, M., "An experimental study of the effects of carbon nanotube and graphene addition on the impact strength of Epoxy/Basalt fiber composite", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 411-418, 2019.
- [27] Kyner, A., Dharmasena, K., Williams, K., Deshpande, V., Wadley, H., "Response of square honeycomb core sandwich panels to

- [45] Pirmohammad, N., Liaghat, G. H., Pol, M. H., Sabouri, H., "Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 153-164, 2014.
- [46] Morais, A. B., et al., "Mode-I interlaminar fracture of carbon/epoxy cross-ply composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 5, pp. 679-686, 2002.
- [47] Grau, D. L., X. S. Qiu, B. V. Sankar., "Relation between interfacial fracture toughness and mode-mixity in honeycomb core sandwich composites", *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 8, No. 3, pp. 187-203, 2006.
- [48] F. Halimi, M. Golzar, M.H. Beheshti, "Effect of distribution media on mold filling and quality of the final part in a vacuum assisted resin transfer molding, M.Sc thesis", Department of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Vol. 1, No. 4, pp.51-57, 2011.
- [49] Saseendran, V., Berggreen, C., "Mixed-mode fracture evaluation of aerospace grade honeycomb core sandwich specimens using the Double Cantilever Beam–Uneven Bending Moment test method", *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 22, No. 4, pp. 991-1018, 2020.
- [50] Rao, K. K., Rao, K. J., Sarwade, A. G., & Chandra, M. S., "Strength analysis on honeycomb sandwich panels of different materials", *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, No. 3, pp. 365-374, 2012.



تحلیل تجربی استحکام ضربه، استحکام کششی و مدول الاستیک نانوکامپوزیت‌های سه تایی پلی آمید 6 / الاستومر / نانولوله‌های کربن

سعید مظفری¹، ولی اله پناهی زاده^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* صندوق پستی 136-16785، v.panahizadeh@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/09/15

پذیرش: 1400/12/09

کلیدواژگان

نانوکامپوزیت

خواص مکانیکی

پلی آمید

نانولوله‌های کربن

چکیده

در این تحقیق، خواص مکانیکی ترکیبات پایه پلی آمید 6 / پلی اولفین الاستومر (PA6/POE) تقویت شده با نانولوله‌های کربن مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوکامپوزیت‌ها شامل 10 و 20 درصد وزنی پلی اولفین الاستومر، 0، 1، 2 و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن (MWCNT) و 5 و 10 درصد وزنی پلی اولفین مالئیک آنیدرید ساخته شدند. برای مشاهده و بررسی کیفیت توزیع نانولوله‌ها در ماتریس پلیمری از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. تصاویر SEM نشان دادند که حضور نانولوله‌های کربن تا 2 درصد وزنی در هر دو ماتریس پلی آمید حاوی 10 و 20 درصد وزنی پلی اولفین با توزیع و پراکندگی قابل قبولی همراه شده است. در حالی که افزودن 3 درصد وزنی نانولوله‌ها در هر دو ماتریس موجب تجمع و کلوخگی آن‌ها شده است. نتایج نشان دادند که افزودن 2 درصد وزنی نانولوله‌های کربن استحکام کششی و مدول الاستیک ترکیبات را به ترتیب به میزان‌های 21٪ و 23٪ به خوبی بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، افزودن تنها 1 درصد وزنی از نانولوله‌های کربن توانسته است استحکام ضربه ترکیبات را به میزان 9٪ افزایش دهد. از طرفی، حضور 20 درصد وزنی از پلی اولفین و 10 درصد وزنی از عامل سازگار کننده، استحکام ضربه را به ترتیب به میزان 20٪ و 16٪ افزایش داده است. همچنین، رویه‌های استخراج شده نشان دادند که عموماً بین اثر فاکتورهای ورودی بر خواص مکانیکی مورد بررسی برهم‌کنش خاصی وجود ندارد. نهایتاً، مقدار ضریب تعیین بالای 92٪ برای همه خواص مکانیکی نشان داد که همخوانی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های رگرسیون استخراج شده وجود دارد.

Experimental analysis of impact strength, tensile strength and elastic modulus of polyamide 6 / polyolefin elastomer / carbon nanotubes / carbon nanotubes

Saeed Mozaffari, Valiollah Panahizadeh*

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16785-136, Tehran, Iran v.panahizadeh@sru.ac.ir

Keywords

Nanocomposites
Mechanical properties
Polyamide
Carbon Nanotubes

Abstract

In this research, the mechanical properties of polyamide 6/polyolefin elastomer (PA6/POE) blends reinforced with carbon nanotubes have been studied. Nanocomposites consisted of 10 and 20 wt% polyolefin elastomer, 0, 1, 2 and 3 wt% carbon nanotubes (MWCNT) and 5 and 10 wt% poly olefin elastomer maleic anhydride (POE-Gma) were made. Scanning electron microscope (SEM) were used to observe the dispersion and distribution quality of MWCNT in the matrix. SEM images showed an acceptable distribution of carbon nanotubes up to 2 wt% in both polyamide matrices with 10 and 20 wt%, while adding 3 wt% of nanotubes in both matrices was associated with nanotubes accumulation. The results showed that the addition of 2 wt% of carbon nanotubes improved the tensile strength and elastic modulus of the compounds by 21% and 23%, respectively. Moreover, the addition of only 1wt.% of carbon nanotubes has been able to increase the impact strength of the compounds by 9%. On the other hand, the presence of 20wt.% of polyolefin and 10wt.% of coupling agent increased the impact strength by 20% and 16%, respectively. The surfaces extracted from full factorial design method showed that there are no notable interaction between the input parameters in the case of mechanical properties. Finally, the *R-squared* above 92% for all mechanical properties showed that there is a good agreement between the experimental results and the extracted regression models.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mozaffari, S., Panahizadeh, V., "Experimental analysis of impact strength, tensile strength and elastic modulus of polyamide 6 / polyolefin elastomer / carbon nanotubes / carbon nanotubes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1668-1676, 2022.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.544381.1759

1-مقدمه

پلی آمید جزء پلیمرهای پرکاربردی است که به‌طور قابل توجه در صنایع لوازم خانگی، پزشکی و بسته‌بندی استفاده می‌شود [1,2]. استحکام و سفتی نسبتاً خوب پلی آمید باعث شده است که به‌عنوان یک پلاستیک مهندسی پرکاربرد در صنایع مختلف مورد استفاده قرار بگیرد [3]. از سوی دیگر، این پلیمر دارای معایبی همچون جذب زیاد آب، ناپایداری ابعادی و حساسیت به ترک در دمای پایین بوده و همچنین در کاربردهایی که نیاز به مقاومت ضربه‌ای بالا می‌باشند، دارای محدودیت است که این خواص منفی باعث شده کاربرد پلی آمید در برخی صنایع با مشکل مواجه شود [4]. برخی از محققان با افزودن الاستومرها به ترموپلاستیک‌ها به عنوان یک‌فاز تقویت کننده خواص مکانیکی باعث افزایش استحکام شکست و چقرمگی شدند.

چپو و همکاران [5] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری پلی آمید 6 و ترموپلاستیک الاستومری پلی یورتان و سازگار کننده POE-g-MA پرداختند. با ساختن این ترکیب (80PA/20TPU/20POE-g-MA) استحکام کششی به میزان 18٪ و استحکام خمشی به میزان 42٪ کاهش یافته است. آزارات و همکاران [6] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری پلی آمید 6 و پلی‌اتیلن سبک و عامل سازگار کننده LDPE-g-MH پرداختند. به‌منظور به دست آوردن ترکیبات از هر دو پلیمر به میزان 50 درصد وزنی و عامل سازگار کننده به میزان 5، 10، 15 و 20 درصد وزنی ترکیب کردند. مدول الاستیک و استحکام کششی به خاطر حضور عامل سازگار کننده به ترتیب از 241 MPa به 200 MPa و از 12.5 MPa به 11.8 MPa کاهش پیدا کرده‌اند. چپو و همکارانش با افزودن 5٪ POE به پلی آمید، به 36٪ افزایش استحکام ضربه، 26٪ ازدیاد طول در شکست، 15٪ کاهش مدول الاستیک، دست پیدا کردند [7]. در تحقیق دیگری وانگ و همکارانش [8] نشان دادند که حضور تنها 25 درصد وزنی از لاستیک EPDM می‌تواند استحکام ضربه پلی آمید را به مقدار چشمگیر 700٪ بهبود بخشد.

به‌طور کلی پلی آمید و لاستیک اصلاح نشده از نظر ترمودینامیکی قابل اختلاط نیستند بنابراین، دانه‌های بزرگ ذرات لاستیک در طی فرآوری مذاب تشکیل می‌شوند. لاستیک فرآوری شده همیشه گزینه خوبی برای بهبود سازگاری بین فاز لاستیک و ماتریس پلیمر است [9]. بنابراین، الاستومرهای اتیلن - پروپیلن پیوند یافته با مالئیک انیدرید، مانند POE g-MA اغلب برای سازگار شدن الاستومرها با پلی آمید‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با توجه تحقیقات انجام شده مشاهده می‌شود با بهبود استحکام ضربه و چقرمه تر شدن کامپوزیت خواصی مانند مدول الاستیک و استحکام کششی کاهش داشته است. بنابراین، برای بهبود فعل و انفعال سطحی بین پلیمر ماتریس و فاز پراکنده، با معرفی یک نانوذره به عنوان جز سوم انتظار می‌رود که مدول و استحکام ترکیبات افزایش پیدا کند یا از دست دادن استحکام را به حداقل میزان کاهش دهد. گزارش شده است که افزودن ۱ phr از نانولوله‌های کربن چند جداره می‌تواند مدول الاستیک و استحکام کششی پلی آمید را به ترتیب به میزان‌های 77٪ و 20٪ افزایش دهد [10]. همچنین، چن و همکارانش [11] دریافتند که با افزودن 1٪ وزنی نانولوله کربنی، مدول الاستیک، استحکام کششی و سختی پلی آمید 6 خالص به ترتیب 162٪، 149٪ و 106٪ افزایش پیدا می‌کند. اسماعیلی و همکاران [12] به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی آمید 6 و نانولوله‌های کربن پرداختند. مشخص شد که درصد وزنی نانولوله‌های کربن مؤثرترین پارامتر روی استحکام کششی و سختی می‌باشد. با افزودن نانولوله‌های کربنی به ماتریس پلیمری به میزان 1 درصد، بیشترین افزایش استحکام و سختی را خواهد داشت. توشی هیرا و همکارانش

[13] در طی تحقیقی تأثیر ذرات نانولوله‌های کربن را بر الیاف پلی آمید 6 را بررسی کردند. با افزودن نانولوله‌های کربن مدول کششی 6 درصد و استحکام کششی 10٪ افزایش نشان داد. بهبود خواص مکانیکی به نسبت برهم‌کنش ذرات نانولوله‌های کربن با زنجیره پلی آمید 6 خود را نشان می‌دهد. از سوی دیگر در قسمت‌های از پلی آمید 6 فازهای سختی به دلیل کلوخه شدن نانوذرات دیده می‌شود.

برای به دست آوردن خصوصیات مکانیکی متعادل، ترکیبات سه‌گانه در زمینه‌های تحقیقاتی دانشگاهی و صنعتی بسیار موردتوجه بوده‌اند. برای دهه‌های طولانی پرکننده‌هایی مانند دوده و سلیکا برای جبران خواص کاهش یافته ناشی از آلیاژسازی پلیمری استفاده می‌شده است؛ اما در دو دهه گذشته، استفاده از مواد در مقیاس نانوذرات شامل خاک رس ورقه‌ای و نانولوله‌های کربن به‌عنوان پرکننده در مواد پلیمری برای این منظور مورد توجه تحقیقات دانشگاهی و صنعتی قرار گرفته است [14].

نتایج حاصل از تحقیق میسترنا و همکارانش [15] نشان داده است که با حضور همزمان پلی‌اتیلن و نانوذرات خاک رس در زمینه پلیمری پلی آمید، مدول الاستیک به میزان 22٪ و استحکام کششی به میزان 20٪ افزایش می‌یابد و از طرفی ازدیاد طول در شکست ترکیبات دچار کاهش 78 درصدی شده است. بیکشامای و همکاران [16] به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت سه‌تایی PA6/PMMA/MWCNT در حضور هیدروکسیل و اسید کربوکسیلیک با نسبت‌های متفاوت پرداختند. مدول کششی با افزایش درصد وزنی پلی متیل متاکریلات در مخلوط‌ها از 810 MPa به 1335 MPa افزایش یافت. همچنین نانوکامپوزیت PA6/PMMA با حضور 1٪ وزنی از نانولوله‌های کربن بیشترین مدول کشش به مقدار 1298 MPa را به نمایش گذاشت. در جدیدترین تحقیق انجام شده توسط دانش پایه و همکاران [17] مشخص شد حضور الاستومر تا 20 درصد وزنی در ماتریس پلی لاکتیک اسید موجب افزایش 120 درصدی استحکام ضربه و کاهش 23 درصدی استحکام کششی شده است. همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد حضور همزمان نانولوله‌های کربن و در زمینه پلیمری مذکور باعث ایجاد یک تعادل مناسب در استحکام و چقرمگی ترکیبات شده است. به طور کلی بررسی و مقایسه تحقیقات پیشین در زمینه نانوکامپوزیت‌های سه تایی با زمینه متشکل از دو پلیمر نشان می‌دهد که الاستومر و نانولوله‌های کربن می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای بهبود خواص مکانیکی پلی آمید 6 باشند.

در مقاله حاضر نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی پلی آمید 6/الاستومر/نانولوله‌های کربن توسط یک مخلوط‌کن داخلی تهیه شدند. درصد‌های وزنی مختلفی از (10 و 20)، عامل سازگار کننده (5 و 10) و نانولوله‌های کربن (0، 1، 2 و 3) در ماتریس پایه پلی آمید 6 استفاده شدند. آنگاه تأثیر غلظت نانولوله‌های کربن، الاستومر و عامل سازگار کننده بر خواص مکانیکی (شامل استحکام کششی، استحکام ضربه و مدول الاستیک) پلی آمید 6 به کمک روش عاملی کامل بررسی شدند.

2-مطالعات آزمایشگاهی

1-2-طراحی آزمایش

طراحی کامل فاکتوریل با استفاده از همه‌ی ترکیبات احتمالی سطوح عوامل در هر آزمایش یا تکرار کامل آزمایش، نقاط تجربی ایجاد می‌کند. نقاط طراحی آزمایشی در یک طرح کامل فاکتوریل، رأس‌های یک ابر مکعب در فضای طراحی n بعدی است که با حداقل و حداکثر مقادیر هر یک از عوامل تعریف شده است. این نقاط تجربی را نقاط فاکتوریل نیز می‌نامند. به عنوان مثال، برای a عامل دارای b سطحی از هر عامل، با در نظر گرفتن طرح کامل فاکتوریل،

پس از آماده شدن همه‌ی ترکیبات به کمک مخلوط‌کن داخلی، به کمک یک دستگاه پرس داغ به شکل ورقه با ضخامت مشخص درآمدند. دمای دستگاه پرس داغ 190°C تنظیم می‌شد. هر ترکیب به کمک قالب‌های مخصوص و کاغذهای نسوز بین دو فک پرس داغ قرار می‌گرفتند. هر ترکیب در ابتدا با اعمال یک فشار اولیه و به مدت 5 دقیقه تحت همان فشار گرم می‌شد؛ و در ادامه جهت خارج شدن حباب‌های ایجاد شده به مدت 2 دقیقه تحت یک فشار نهایی قرار می‌گرفتند. در نهایت ترکیب ورقه شده از پرس داغ خارج شده و بلافاصله توسط یک پرس دیگر سرد شده و ترکیب نهایی به شکل یک ورقه مهیا می‌شد. در آخرین مرحله از هر ورقه (ترکیب) بر اساس استانداردهای ASTM D638 برای آزمون کشش و ASTM D256 برای آزمون ضربه، پنج نمونه به کمک یک دستگاه پانچ مخصوص استخراج شد. به‌طور کلی مواد اولیه در 16 حالت اختلاط مطابق با جدول 1 ساخته شدند.

3-2- آزمون‌ها و روش‌ها

برای انجام آزمون کشش دستگاه زوییک رول Z100 ساخت آلمان مورد استفاده قرار گرفت و این آزمون در دمایی اتاق و با سرعت فک متحرک 5 mm/min و تعداد 5 تکرار از هر ترکیب انجام شد. کشش نمونه‌ها تا زمان گسیختگی کامل آن‌ها ادامه پیدا می‌کرد. آزمون ضربه توسط دستگاه زوییک مدل ML2953 ساخت کشور آلمان با وزنه 2 ژول در دمایی اتاق انجام شد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت کره جنوبی با ولتاژ 25 kw و جریان 3 A تا 2.5 A جهت شناسایی فازهای پلیمر زمینه پلی آمید 6 و نحوه توزیع و پراکندگی نانولوله‌های کربن و میزان از هم باز شدن صفحات استفاده شد. برای انجام بهتر آنالیز، نمونه‌های مورد بررسی در نیتروژن مایع شکسته شدند. برای این منظور نمونه‌ها ابتدا یک دقیقه در نیتروژن مایع غوطه‌ور شد و سپس شکسته شدند. برای جلوگیری از تجمع الکترونی و افزایش هدایت الکترونی و برای جلوگیری از پالس‌های زائد، سطح شکست نمونه‌ها توسط طلا به ضخامت 15 nm روکش دهی شدند.

3- نتایج و بحث

3-1- مطالعات ریخت‌شناسی

جهت بررسی کیفیت توزیع و پراکندگی نانولوله‌های کربن در زمینه دوتایی پلی آمید 6/6، از سطح شکست نمونه‌های ساخته شده تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شدند. شکل 1 الف تا ج تصاویر سطح شکست نمونه‌های شامل 1، 2 و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه پلیمری پلی آمید حاوی 10 درصد وزنی را نشان می‌دهد. همچنین، شکل 1 د تا و تصاویر سطح شکست نمونه‌های شامل 1، 2 و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه پلیمری پلی آمید حاوی 20 درصد وزنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از قسمت‌های مختلف شکل 1 مشخص است، نانولوله‌های کربن به‌صورت لوله‌های کوتاه و با رنگ روشن‌تر نسبت به زمینه قابل مشاهده هستند.

قسمت‌های الف و ب شکل 1 نشان می‌دهند که افزودن 1 و 2 درصد وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه دوتایی پلی آمید 10/6 درصد وزنی با توزیع و پراکندگی خوبی همراه شده است. در حالی که افزودن 3 درصد وزنی آن‌ها در زمینه مذکور (شکل 1-ج) با تجمع نانولوله‌ها در برخی مکان‌ها همراه شده است. محل تجمع نانولوله‌ها و کلوخه‌های تشکیل شده به کمک دایره‌های در شکل 1-ج مشخص شده‌اند.

باید ba تعداد آزمایش انجام شود. اگر n تکرار از آزمایش‌های کامل وجود داشته باشد، در این صورت n بار آزمایش‌های تک تکراری وجود خواهد داشت. در آزمایش، اگر همه فعل و انفعالات احتمالی در مدل گنجانده شود، باید حداقل دو تکرار داشته باشد تا مجموع مربع‌ها را به دلیل خطا تعیین کند [18].

در تحقیق حاضر، در دو سطح 10٪ و 20٪ درصد وزنی، نانولوله‌های کربن در چهار سطح 0، 1، 2 و 3 درصد وزنی و عامل سازگار کننده در دو سطح 5 و 10 درصد وزنی تغییر می‌کنند. بنابراین، باید بر اساس طرح عاملی کامل تمامی حالت‌های اختلاط به تعداد $2 \times 4 \times 2 = 16$ ساخته شوند. تمامی حالت‌های اختلاط بر پایه روش عاملی کامل در جدول 1 ارائه شده‌اند.

جدول 1 فرمولاسیون نانو کامپوزیت‌های تهیه شده

Table 1 Sample formulations of materials

شماره ترکیب	درصد وزنی نانولوله‌ها	درصد وزنی POE g-MA	درصد وزنی POE	درصد وزنی پلی آمید 6
1	0	5	10	85
2	1	5	10	84
3	2	5	10	83
4	3	5	10	82
5	0	10	10	80
6	1	10	10	79
7	2	10	10	78
8	3	10	10	77
9	0	5	20	75
10	1	5	20	74
11	2	5	20	73
12	3	5	20	72
13	0	10	20	70
14	1	10	20	69
15	2	10	20	68
16	3	10	20	67

2-2- مواد

در این تحقیق از پلی آمید 6 با نام تجاری F223-D محصول شرکت آکولن با چگالی 31.113 g/cm^3 ساخت کشور هلند به‌عنوان ماتریس زمینه استفاده شد. ماده الاستومر مورد استفاده در این تحقیق از نوع LC370 ساخت شرکت LG CHAMS کره جنوبی با چگالی 0.87 g/cm^3 و شاخص جریان مذاب 3 g/10 min می‌باشد. همچنین نانولوله‌های کربن ساخت کشور چین با چگالی 2.1 g/cm^3 و درجه خلوص بالای 98 درصد تهیه شده است. بر اساس اطلاعات داده شده توسط شرکت سازنده قطر ذرات 10 nm و طول آن‌ها $30\text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد.

2-3- تهیه نمونه‌ها

برای تهیه ترکیبات از دستگاه مخلوط‌کن داخلی HBI SYS90 شرکت هک ساخته شده کشور آمریکا استفاده شده است. ظرفیت هر بار ترکیب کردن مخلوط‌کن داخلی 55 g گزارش شده است. بر همین اساس هر ترکیب 50 g گرم در نظر گرفته شد. برای شروع کار ترکیب‌سازی، دستگاه روی دمای 220°C ، سرعت چرخش مارپیچ $1/\text{min}$ 60 تنظیم شد. بر اساس ترکیب پایه 50 g ، توزین مواد بر اساس مقدار هر مورد نیاز برای حالت انجام شد. در ادامه، ابتدا پلیمرهای پایه هر ترکیب به مدت 3 دقیقه مخلوط شده و زمانی که کاملاً به شکل مخلوط یکدست و ساختار خمیری شکل درآمدند نانوذرات به ترکیب پلیمری اضافه می‌شدند و عملیات ترکیب شدن مجموعه 7 دقیقه دیگر ادامه پیدا می‌کرد. در انتها، دستگاه مخلوط‌کن خاموش می‌شد و نانو کامپوزیت حاصل به‌صورت یک ترکیب نرم و خمیری به سرعت جمع‌آوری شده و با کمک یک غلتک ورقه می‌شدند.

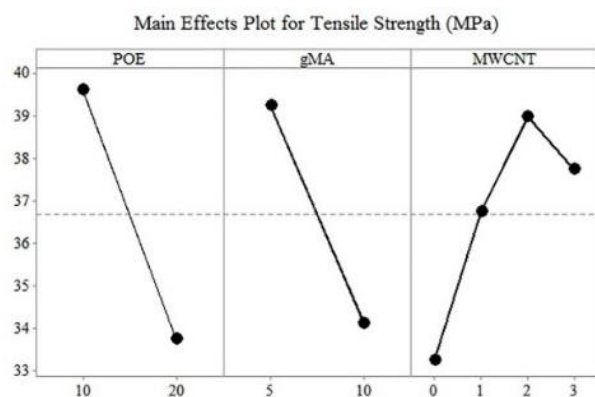


Fig. 2 Main effect plots for Tensile strength

شکل 2 نمودار اثر اصلی برای استحکام کششی

همان‌طور که از شکل 2 مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن از 0 تا حدود 2 درصد وزنی موجب افزایش استحکام کششی ترکیبات پایه از 34 تا حدود 40 MPa شده است. و در ادامه با افزایش 3 درصد وزنی از آن‌ها استحکام کششی ترکیبات اندکی دچار کاهش شده است. دلیل این افزایش در استحکام کششی به توزیع و پراکندگی مناسب نانولوله‌ها در زمینه پلیمری مربوط می‌شود. هرگاه نانولوله‌های کربن با سطح ویژه زیاد و نسبت ابعاد بالا به خوبی در زمینه‌های پلیمری پراکنده شوند یک برهم‌کنش قوی بین آن‌ها و زمینه ایجاد می‌شود که به دنبال آن استحکام زمینه دچار افزایش می‌شود [19]. نتایج و تفسیرهای مشابهی در مورد افزایش استحکام کششی پلی آمید به دلیل حضور نانولوله‌های کربن در تحقیقات جداگانه‌ای ارائه شده‌اند [12,20].

از طرف دیگر، همان‌گونه که انتظار می‌رفت افزودن هر مقداری از و عامل سازگار کننده استحکام کششی ترکیبات را ضعیف‌تر کرده است. به‌طوری که، افزودن 20 درصد وزنی و 10 درصد وزنی عامل سازگار کننده به ترتیب استحکام کششی ترکیبات را 15٪ و 12٪ کاهش داده‌اند. کاملاً واضح است که هرگاه یک پلیمر با خاصیت الاستومری و استحکام پایین‌تر با یک پلیمر پایه با استحکام بالاتر ترکیب شود ترکیب حاصل نسبت به پلیمر پایه استحکام کمتری خواهد داشت [21]. نتایج حاصل از کار دانش پایه [17] و همکاران نشان می‌دهد که افزودن الاستومر به زمینه‌های پلیمری منجر به کاهش استحکام کششی آن‌ها می‌شود.

برهم‌کنش‌های دو به دو فاکتورهای ورودی بر استحکام کششی ترکیبات پایه در قالب رویه‌هایی در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 3-الف مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن تا 3 درصد وزنی در حضور هر مقداری از به زمینه پلی آمید یک روند ثابت و بدون تغییر در استحکام کششی را نشان می‌دهد به‌گونه‌ای ابتدا استحکام کششی افزایش یافته و سپس دچار اندکی کاهش شده است. روند افزایش - کاهش مشابهی از حضور هم‌زمان نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده در شکل 3-ب قابل مشاهده است. بنابراین، در مورد استحکام کششی ترکیبات پایه می‌توان گفت که بین نانولوله‌های کربن- و نانولوله‌های کربن-عامل سازگار کننده برهم‌کنشی وجود ندارد. همچنین، قسمت‌های الف و ب شکل 3 نشان می‌دهند که بیشترین استحکام کششی زمینه در حضور کمترین سطوح و عامل سازگار کننده و مقدار 2 درصد وزنی نانولوله‌ها حاصل شده است.

در شکل 3-ج تغییرات استحکام کششی در برابر الاستومر و عامل سازگار کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این رویه ملاحظه می‌شود، افزایش مقدار عامل سازگار کننده (از 5 تا 10 درصد وزنی) در حضور هر مقداری از

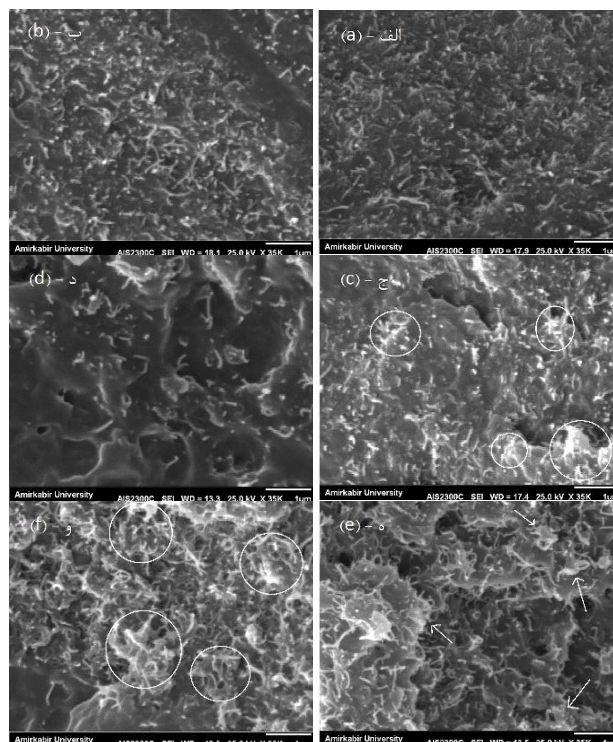


Fig. 1 Images from samples based PLA/10POE including a) 1 wt.% CNT, b) 2 wt.% CNT, c) 3 wt.% CNT and samples based PAL/20POE including d) 1 wt.% CNT, e) 2 wt.% CNT, f) 3 wt.% CNT

شکل 1 تصویر نمونه‌های پایه PA6/10POE شامل الف) 1٪ نانولوله‌ها، ب) 2٪ نانولوله‌ها، ج) 3٪ نانولوله‌ها و نمونه‌های پایه PA6/20POE شامل د) 1٪ نانولوله‌ها، ه) 2٪ نانولوله‌ها، و) 3٪ نانولوله‌ها.

از طرف دیگر، کیفیت پراکندگی نانولوله‌های کربن در زمینه پلی آمید حاوی 20٪ وزنی نسبت به زمینه پلی آمید حاوی 10٪ وزنی نانولوله‌ها ضعیف‌تر می‌باشد. به‌گونه‌ای که تنها حضور 1٪ وزنی نانولوله‌ها در زمینه پلی آمید حاوی 20٪ وزنی (شکل 1-د) از توزیع و پراکندگی خوبی برخوردار است و در ادامه با افزودن 2٪ وزنی نانولوله‌ها به زمینه مذکور (شکل 1-ه) به هم چسبیدگی نانولوله‌ها در حجم کم شروع شده است. محل‌های چسبیدگی نانولوله‌ها در حجم کم در قسمت ه شکل 1 به کمک فلش‌هایی مشخص شده‌اند. نهایتاً، در شکل 1-و کلوخگی شدید 3٪ وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه پلی آمید حاوی 20٪ وزنی به وضوح قابل مشاهده است. حجم زیادی از تجمع شدید نانولوله‌های کربن در زمینه دوتایی پلی آمید 20/6 درصد وزنی در شکل 1 قسمت و به کمک دایره‌هایی مشخص شده است. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که نانولوله‌های کربن تا بارگذاری 2 درصد وزنی در روش اختلاط مذاب موقع شکسته شدن نمونه نه تنها از زمینه خارج نشده‌اند بلکه به‌خوبی به زمینه پلیمری دوتایی چسبیده‌اند. و این مسئله می‌تواند نویدبخش بهبود خواص مکانیکی پلیمر هدف به خاطر حضور نانولوله‌های کربن باشد.

2-3- استحکام کششی

برای بررسی تأثیر میزان بارگذاری پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی شامل نانولوله‌های کربن، و عامل سازگار کننده و همچنین برای بررسی برهم‌کنش‌های بین آن‌ها از نمودارهای استخراج شده از روش عاملی کامل استفاده شده است. شکل 2 استحکام کششی ترکیبات در مقابل تغییرات پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد.

با افزودن نانولوله‌های کربن (با وجود توزیع و پراکندگی مناسب) منجر به افزایش مناسب مدول الاستیک آن می‌شود.

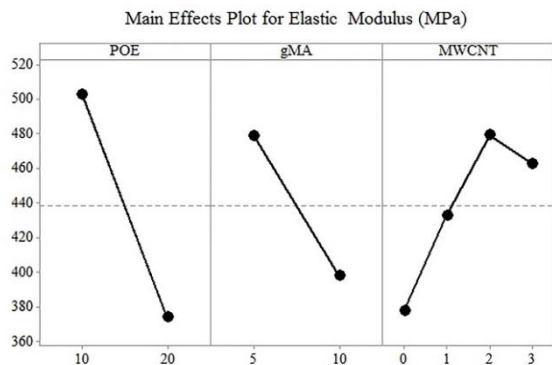


Fig. 4 Main effect plots for Elastic Modulus

شکل 4 نمودار اثر اصلی برای مدول الاستیک

از طرف دیگر، همان‌گونه که انتظار می‌رفت افزودن هر مقداری از و عامل سازگار کننده مدول الاستیک ترکیبات را ضعیف‌تر کرده است. به‌طوری‌که، افزودن 20 درصد وزنی و 10 درصد وزنی عامل سازگار کننده به ترتیب مدول الاستیک ترکیبات را 24٪ و 20٪ کاهش داده‌اند. کاملاً واضح است که هرگاه یک پلیمر با خاصیت الاستومری و مدول الاستیک پایین‌تر با یک پلیمر پایه با مدول الاستیک بالاتر ترکیب شود ترکیب حاصل نسبت به پلیمر پایه مدول الاستیک کمتر خواهد داشت [24]. نتایج مشابهی از تأثیر بر استحکام کششی زمینه‌های پلیمری گزارش شده است [25].

تغییرات مدول الاستیک زمینه در مقابل - نانولوله‌های کربن، عامل سازگار کننده- نانولوله‌های کربن و -عامل سازگار کننده به ترتیب در قسمت‌های الف، ب و ج شکل 5 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل 5-الف مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن تا 3 درصد وزنی در حضور هر مقداری از به زمینه پلی آمید یک روند ثابت و بدون تغییر در مدول الاستیک را نشان می‌دهد به‌گونه‌ای ابتدا مدول الاستیک افزایش یافته و سپس دچار اندکی کاهش شده است. روند افزایش - کاهشی مشابهی از حضور هم‌زمان نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده در شکل 5-ب قابل مشاهده است. بنابراین، در مورد مدول الاستیک ترکیبات پایه می‌توان گفت که بین نانولوله‌های کربن- و نانولوله‌های کربن-عامل سازگار کننده برهم‌کنشی وجود ندارد. همچنین، قسمت‌های الف و ب شکل 5 نشان می‌دهند که بیشترین مدول الاستیک زمینه در حضور کمترین سطوح و عامل سازگار کننده و مقدار 2 درصد وزنی نانولوله‌ها حاصل شده است.

نهایتاً شکل 5-ج نشان می‌دهد که افزودن عامل سازگار کننده از 5 تا 10 درصد وزنی در حضور 10 درصد وزنی موجب ایجاد یک روند کاهشی در مدول الاستیک ترکیبات شده است. در حالی که این روند کاهشی ناشی از حضور عامل سازگار کننده در حضور 20 درصد وزنی به یک روند بی‌اثر (اثر کاهشی بسیار ضعیف) تبدیل شده است. بنابراین، همان‌طور که از شکل 5-ج مشاهده می‌شود حضور هم‌زمان مقادیر بالای سازگار کننده و در زمینه پلیمری مدول الاستیک آن را با شدت کمتری کاهش داده است و این بدین معنی است که در مورد مدول الاستیک ترکیبات بین عامل سازگار کننده و یک برهم‌کنش مثبت وجود دارد.

استحکام کششی زمینه را دچار کاهش می‌کند. بنابراین، می‌توان گفت که در مورد استحکام کششی زمینه بین این دو فاکتور برهم‌کنش خاصی وجود ندارد.

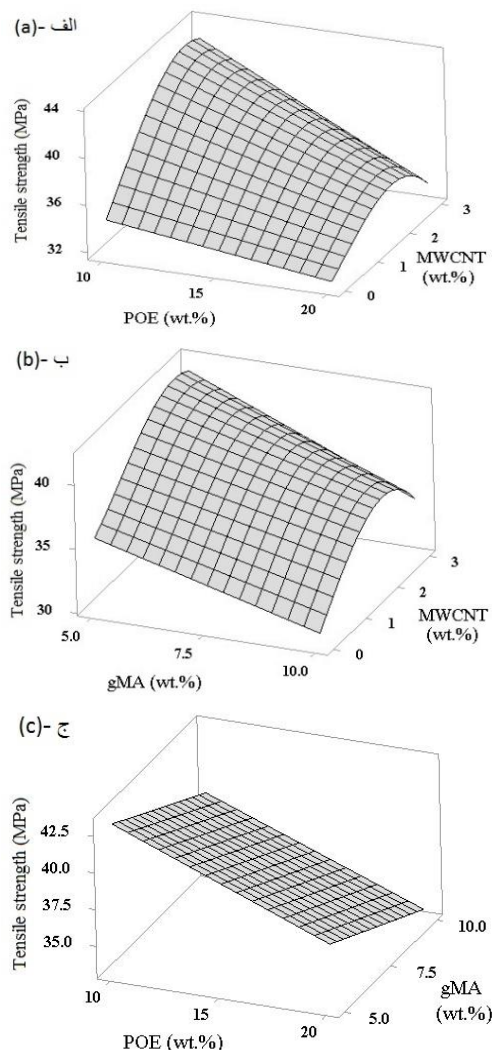


Fig. 3 Surfaces related to tensile strength versus (a) Carbon and polyolefin elastomer nanotubes (b) Carbon nanotubes and compatible agent (c) Elastomeric polyolefin and compatible agent

شکل 3 رویه‌های مربوط به استحکام کششی در مقابل (الف) نانولوله‌های کربن و الاستومر (ب) نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده (ج) الاستومر و عامل سازگار کننده

3-3-مدول الاستیک

مدول الاستیک ترکیبات در مقابل تغییرات پارامترهای ورودی در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن از 0 تا حدود 2 درصد وزنی موجب افزایش مدول الاستیک ترکیبات پایه از 380 تا حدود 500 MPa شده است. و در ادامه با افزایش 3 درصد وزنی از آن‌ها مدول الاستیک ترکیبات اندکی دچار کاهش شده است. دلیل این افزایش در مدول الاستیک به توزیع و پراکندگی مناسب نانولوله‌ها در زمینه پلیمری مربوط می‌شود. هرگاه پراکندگی مناسبی در جهت‌های تصادفی همراه زمینه پلیمری اضافه شوند و با پراکندگی مناسبی در جهت‌های تصادفی همراه باشد سفتی زمینه پلیمری به‌خوبی دچار افزایش خواهد شد. [22] در تحقیق مشابهی پالاری [23] و همکارانش نشان دادند که مدول الاستیک پلی آمید 6

همان‌طور که از شکل 6 مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن از 0 تا 1 درصد وزنی موجب افزایش اندک 4 درصدی استحکام ضربه ترکیبات پایه از حدود 45 J/m تا حدود 47 J/m شده است. در ادامه با افزایش مقادیر بیشتر از 2 درصد وزنی از آن‌ها استحکام ضربه ترکیبات دچار کاهش شدیدی شده است. دسا و همکارانش [26] در یک تحقیق نشان دادند که افزودن نانولوله‌های کربن چند جداره در بارگذاری‌های کم به زمینه پلیمری پلی لاکتیک توانسته است استحکام ضربه پلیمر هدف را اندکی افزایش دهد.

از طرف دیگر، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، افزودن هر مقداری از و عامل سازگار کننده، خاصیت تردی زمینه را کاهش داده و استحکام ضربه ترکیبات را بهبود بخشیده است. به‌طوری که، افزودن 20 درصد وزنی و 10 درصد وزنی عامل سازگار کننده به ترتیب استحکام ضربه ترکیبات را 27٪ و 13٪ افزایش داده‌اند. کاملاً واضح است که هرگاه یک پلیمر با خاصیت الاستومری و چقرمه‌تر با یک پلیمر پایه با خاصیت شکنندگی بیشتر ترکیب شود ترکیب حاصل نسبت به پلیمر پایه استحکام ضربه بیشتری خواهد داشت [27]. به‌طور کلی، افزودن با خاصیت الاستومری بسیار بالا به زمینه‌های پلیمری شکننده، باعث افزایش استحکام ضربه و چقرمگی آن‌ها می‌شود [28].

شکل 7 رویه‌های استخراج شده اثر دو به دو فاکتورهای ورودی بر استحکام ترکیبات زمینه را نشان می‌دهد. شکل 7-الف استحکام ضربه بر اساس دو متغیر نانولوله‌های کربن و الاستومر را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حضور 10 و 20 درصد الاستومر، با افزایش نانولوله‌های کربن از 0 تا 3 درصد وزنی استحکام ضربه ابتدا اندکی افزایش یافته و سپس دچار کاهش شده است. روند مشابهی از تأثیر هم‌زمان نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده بر استحکام ضربه پلیمر زمینه در شکل 7-ب قابل مشاهده است. بنابراین، هیچ برهم‌کنشی بین - نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده-نانولوله‌های کربن برای استحکام ضربه وجود ندارد.

در شکل 7-ج تغییرات استحکام ضربه در برابر الاستومر و عامل سازگار کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این رویه مشاهده می‌شود، افزایش هر مقدار از عامل سازگار کننده در حضور هر مقداری از استحکام ضربه زمینه را به‌خوبی بهبود می‌بخشد. بنابراین، می‌توان گفت که در مورد استحکام ضربه زمینه بین این دو فاکتور یک برهم‌کنش مثبت وجود دارد. این برهم‌کنش مثبت بین و عامل سازگار کننده منجر به یک هم‌افزایی مناسب در استحکام ضربه شده است.

5-3- پیش‌بینی خواص مکانیکی

برای تحلیل مدل‌های رگرسیون در روش فول فاکتوریل نرم‌افزار مینی تب جدول آنالیز واریانس و ضریب تعیین مورد بررسی قرار می‌گیرند. جدول آنالیز واریانس یک روش آماری است که مجموعه‌ای نتایج ضروری را بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی ارائه می‌دهد. در این جدول F به عنوان نرخ واریانس فیشر¹ است که مقدار آن معیار تغییر در داده‌ها در مورد میانگین است. مقدار احتمال (P-value) به عنوان پایین‌ترین سطح اهمیت منجر به رد فرضیه در نظر گرفته می‌شود. به‌گونه‌ای که، اثر یک پارامتر بر یک پاسخ خروجی زمانی معنی‌دار است که مقدار P آن برابر یا کمتر از 0.05 باشد [29]. همچنین مقدار 0.05 برای P یعنی مدل برازش شده با اطمینان 95٪ مورد تأیید است. مقادیر P و F مربوط به آنالیز واریانس و تحلیل آماری خواص مکانیکی در جدول 2 ارائه شده است.

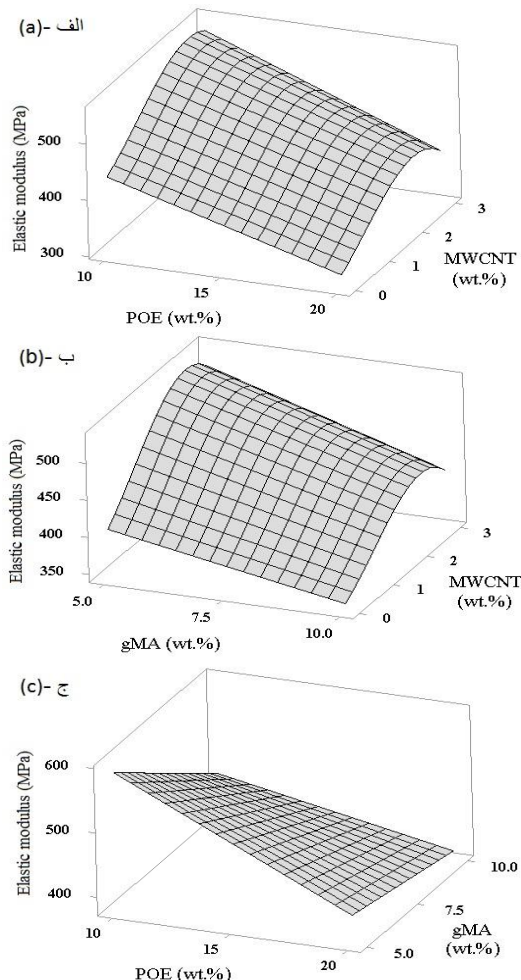


Fig. 5 Surfaces related to elastic modulus versus (a) Carbon and polyolefin elastomer nanotubes (b) Carbon nanotubes and compatible agent (c) Elastomeric polyolefin and compatible agent

شکل 5 رویه‌های مربوط به مدول الاستیک در مقابل الف) الاستومر و عامل سازگار کننده ب) نانولوله‌های کربن و الاستومر ج) نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده

4-3- استحکام ضربه

شکل 6 استحکام ضربه ترکیبات در مقابل تغییرات پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد.

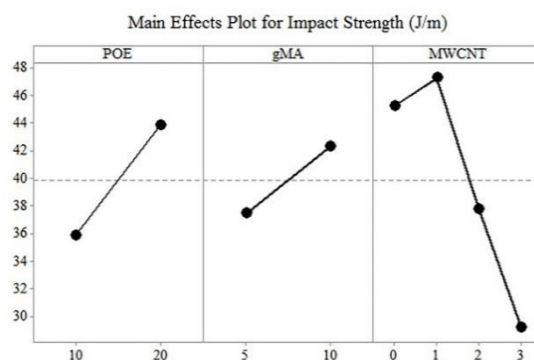


Fig. 6 Main effect plots for Impact Strength

شکل 6 نمودار اثر اصلی برای استحکام ضربه

¹ - Fisher's variance ratio

همان‌طور که از جدول 2 مشخص است هر سه فاکتور اصلی نانولوله‌ها، و عامل سازگار کننده با مقادیر p قابل قبول با درصد اطمینان بالای بر خواص مکانیکی مورد بررسی مؤثر هستند. در بین فاکتورهای اصلی عامل سازگار کننده با مقادیر 0.812 و 0.692 کمترین اثر را در استحکام کششی و استحکام ضربه ترکیبات دارد. همچنین، مقدار P نانولوله‌های کربن برای مدول الاستیک 0.614 به دست آمده است. در نهایت جدول نشان می‌دهد که برهم‌کنش‌های دوتایی، سه‌تایی، مربعات و برخی مکعبات فاکتورها مقادیر P متفاوتی را ارائه کرده‌اند. از طرف دیگر، بررسی مقادیر F در جدول مشخص می‌کند که در بین سه فاکتور اصلی برای استحکام کششی نانولوله‌ها با کمترین مقدار P دارای بیشترین مقدار $F=12.54$ ، برای مدول الاستیک و استحکام ضربه با کمترین مقادیر P به ترتیب دارای بیشترین مقادیر $F=71.26$ و $f=2.5$ را به خود اختصاص داده‌اند.

در ارائه مدل‌های رگرسیون، ضریب تعیین¹ قدرت توضیح دهنده‌ی مدل را نشان می‌دهد. این ضریب نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. یا به عبارت دیگر ضریب تعیین نشان دهنده این است که چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تأثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می‌باشد [30]. مدل‌های رگرسیون استخراج شده از روش عاملی کامل به همراه مقادیر ضریب تعیین برای خواص مکانیکی مورد بررسی در جدول 3 ارائه شده‌اند.

همان‌طور که از جدول 3 مشاهده می‌شود مقدار ضریب تعیین برای همه مدل‌های رگرسیون استخراج شده دارای مقدار بالاتر از 92٪ به دست آمده است. این مسئله نشان می‌دهد که برای همه‌ی مدل‌های رگرسیون، منحنی رگرسیون به خوبی بیشتر خوانده‌ها رو معرفی کرده است. در واقع خط رگرسیون توانسته است در همه موارد از بیشتر نقاط عبور کند. همچنین دقت در ضرایب مدل‌های ارائه شده در جدول مشخص می‌کند که نانولوله‌های کربن با ضرایب 8.4 و 9.75 بیشترین تأثیر را در تعیین استحکام کششی و استحکام ضربه ترکیبات دارا هستند. همچنین عامل سازگار کننده با ضریب 48.75- بیشترین تأثیر را بر مدول الاستیک ترکیبات دارد.

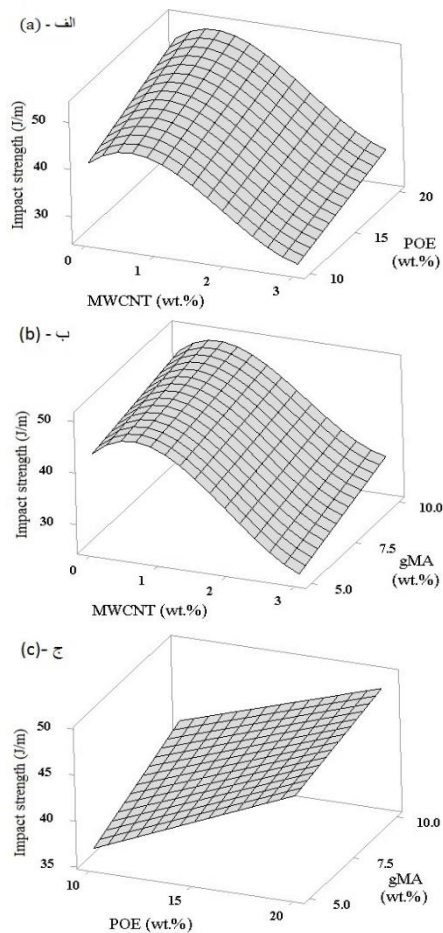


Fig. 7 Surfaces related to impact strength versus (a) Carbon and polyolefin elastomer nanotubes (b) Carbon nanotubes and compatible agent (c) Elastomeric polyolefin and compatible agent

شکل 7 رویه‌های مربوط به استحکام ضربه در مقابل الف) نانولوله‌های کربن و الاستومر، ب) نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده، ج) الاستومر و عامل سازگار کننده

جدول 2 نتایج آنالیز واریانس

Source	استحکام کششی		مدول الاستیک		استحکام ضربه	
	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
Regression	107.95	0.000	66.27	0.001	42.29	0.001
POE	1.62	0.272	71.26	0.001	2.50	0.189
Gma	0.06	0.812	46.20	0.002	0.18	0.692
MWCNT	12.54	0.024	0.30	0.614	1.93	0.237
MWCNT*MWCNT	3.33	0.142	1.07	0.359	17.18	0.014
POE*Gma	10.01	0.034	31.14	0.005	0.35	0.585
POE*MWCNT	20.60	0.011	1.19	0.336	0.80	0.421
gMA*MWCNT	1.48	0.290	0.00	0.996	0.55	0.499
MWCNT*MWCNT*MWCNT	3.38	0.140	3.31	0.143	12.26	0.025
POE*gMA*MWCNT	18.38	0.013	1.73	0.259	3.16	0.150
POE*MWCNT*MWCNT	0.21	0.672	0.96	0.383	0.00	0.965
gMA*MWCNT*MWCNT	10.21	0.033	0.24	0.650	0.92	0.392

¹ - R square

جدول 3. مدل‌های رگرسیون ارائه شده از روش عاملی کامل

Table 3 Regression models presented from full factorial method

مدل رگرسیون	ضریب تعیین
Tensile = $37.52 + 0.188x - 0.075y + 8.40z + 2.00z^2 - 0.0580xy - 0.513xz - 0.275yz - 0.375z^3 + 0.04200xyz - 0.0125xz^2 - 0.1750yz^2$	92/96%
Modulus = $915.9 - 30.16x - 48.57y + 31.4z + 27.5z^2 + 2.478xy + 2.99xz + 0.03yz - 9.00x^3 - 0.312xyz - 0.650xz^2 + 0.65yz^2$	99.45%
Impact = $28.78 + 0.678x + 0.364y + 9.57z - 13.18z^2 + 0.0316xy + 0.294xz + 0.486yz + 2.075z^3 - 0.0506xyz + 0.153yz^2$	95/15%
x=POE y=Gma z=MWCNT	

4-نتایج

در این تحقیق، خواص مکانیکی ترکیبات پایه پلی آمید 6/ تقویت شده با نانولوله‌های کربن با کمک روش طراحی آزمایش عاملی کامل مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل به صورت خلاصه در زیر ارائه شده‌اند:

1- نتایج آزمون کشش نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربن تا بارگذاری حدود 2 درصد وزنی استحکام کششی و مدول الاستیک را به ترتیب به میزان‌های 21٪ و 32٪ بهبود بخشیده است.

2- نتایج حاصل از آزمون ضربه نشان دادند که افزودن تنها 1 درصد وزنی از نانولوله‌های کربن توانسته است استحکام ضربه ترکیبات را به میزان 9٪ افزایش دهد. از طرفی، حضور 20 درصد وزنی از 10 درصد وزنی از عامل سازگار کننده، استحکام ضربه را ب ترتیب به میزان 20٪ و 16٪ افزایش داده است.

3- نتایج حاصل از تعامل‌ها نشان داد که در بیشتر موارد در مورد خواص مکانیکی بین 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن- عامل سازگار کننده و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن- یک برهم‌کنش منفی وجود دارد.

4- رویه‌های استخراج شده از روش فاکتوریل نشان داد که در بیشتر خواص مکانیکی مورد بررسی بین فاکتورهای ورودی برهم‌کنش خاصی وجود ندارد و در مورد مدول الاستیک ترکیبات بین حضور هم‌زمان - عامل سازگار کننده یک برهم‌کنش مثبت وجود دارد.

5- ضریب تعیین بالای 92٪ درصد برای مدل‌های رگرسیون استخراج شده نشان دادند که همخوانی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌ها وجود دارد.

7-مراجع

- [6] Ararat, C. A., Percino, M. J., and Murillo, E. A., "Compatibilization of LDPE/PA6 by Using a LDPE Functionalized with a Maleinized Hyperbranched Polyester Polyol", *Macromolecular Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 203–210, 2019.
- [7] Chiu, F.C., and Deng, T.L., "Polyamide 4,6 Nanocomposites With and Without the use of a Maleated Polyolefin Elastomer as a Toughener", *Journal of Materials Chemistry and Physics*, Vol. 125, No 3, pp. 769-776, 2011.
- [8] Wang, C., Su, J.X., Li, J., Yang, H., Zhang, Q., Du, R.N., and Fu, Q., "Phase morphology and toughening mechanism of polyamide6/EPDM-g-MA blends obtained via dynamic packing injection molding", *Polymer*, Vol. 47, No. 9, pp. 3197-3206, 2006.
- [9] R. Potts Jeffrey, "Preparation, Properties, and Structure-Property Relationships of Graphene-Polymer Nanocomposites", Ph.D. Thesis, University of Texas, USA, 2012.
- [10] Yuen, S.M., Ma, C.C.M., Chiang, C.L., Lin, Y., and Teng, C.C., "Preparation and Morphological, Electrical, and Mechanical Properties of Polyimide-Grafted MWCNT/Polyimide Composite," *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 45, No. 15, pp. 3349-3358, 2007.
- [11] Chen, P., Kim, H.S., Jin, H.J., "Preparation, Properties and Application of Polyamide/Carbon Nanotube Nanocomposites," *Journal of Macromolecular Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 207-217, 2009.
- [12] Esmaili, P., Azdast, T., Doniavi, A., Hasanzadeh, R., Mamaghani, S., and Eungkee Lee, R., "Experimental investigation of mechanical properties of injected polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes according to design of experiments", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 3, pp. 67-74, 2015.
- [13] Irisawa, T., Shimamoto, D., Takeshige, K., Doi, G., Tanabe, Y., and Hotta, Y., "The effects of pulverization treatment for the mechanical properties of polyamide 6 fiber filled with carbon nanotubes", *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 254, No. 114514, 2020.
- [14] Wang, Q., Zhu, J., Wang, P., Li, L., Yang, Q., Huang, Y., "Effect of Blending Sequence on the Morphology and Properties of Polyamide 6/EPDM-g-MA/Epoxy Blends", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 124, pp. 5064–5070, 2012.
- [15] Mistretta, M.C., Morreale, M., and La Mantia, F.P., "Thermomechanical degradation of polyethylene/polyamide 6 blend-clay nanocomposites," *Polymer degradation and stability*, Vol. 99, pp. 61-67, 2014.
- [16] Bikshamaiah, N., Babu, N.M., Kumar, D.S., Ramesh, S., Dumpala, M., Sainath, V., and Madhukar, K., "Carbon nanotube functional group-dependent compatibilization of polyamide 6 and poly(methyl methacrylate)
- [1] Ghorbankhan, A., Nakhaei, M.R., and Safarpour, P., "Modeling and Optimization of Mechanical Properties of PA6/NBR Nanocomposite Reinforced with Perlite Nanoparticles", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1421-1430, 2021.
- [2] Mirzaei, J., Fereidoon, A., and Ghasemi-Ghalebahman, A., "Experimental analysis of mechanical properties of graphene/kenaf/basalt reinforced hybrid nanocomposites using response surface methodology", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 43, No. 215, 2021.
- [3] Hamidi, E., and Panahizadeh, V., "Experimental Analysis of Mechanical Properties of Nanocomposites Based on Poly amide 6/ EPDM /Carbon Nanotubes", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1453-1460, 2021.
- [4] Utracki, L.A., "Polymer blends handbook, First ed. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 1045-1070, 2002.
- [5] Chiu, H.-T., and Chuang, C.-Y., "The mechanical and rheological behavior of the PA/TPU blend with POE-g-MA modifier", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 115, No. 3, pp. 1278–1282, 2010.

- [29] Scheffe, H., "The analysis of variance". New York, John Wiley and Sons, 1999.
- [30] Frost, J., "Multiple regression analysis: Use adjusted R-squared and predicted R-squared to include the correct number of variables. Minitab Blog 13:6, 2013.
- nanocomposites", Iranian Polymer Journal, Vol. 30, No. 8, pp. 789–799, 2021.
- [17] Daneshpayeh, S., Ghasemi, I., Ashenai Ghasemi, F., and Panahizadeh, V., "Achieve balanced stiffness and toughness properties of nanocomposites based on poly(lactic acid)/polyolefin by using fuzzy rule-based system", Express polymer letters, Vol. 16, No. 2, pp. 152-170, 2022.
- [18] Saberian, M. H., "Investigation on Mechanical Properties of Epoxy Resin/ XNBR/ Graphene Ternary Nanocomposite", MSc Thesis, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, 2017.
- [19] Liu, T., Phang, I.Y., Shen, L., Chow, S.Y., Zhang, W.D., "Morphology and Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composites", Journal of Macromolecules, Vol. 37, No. 19, pp. 127-139, 2004.
- [20] Jahed, M., Naderi, Gh., Ghoreishy, M.H.R., "Microstructure, Mechanical, and Rheological Properties of Natural Rubber/Ethylene Propylene Diene Monomer Nanocomposites Reinforced by Multi-Wall Carbon Nanotubes", Journal of Polymer Composites, Vol. 39, No. (S2), pp. E745–E753, 2018.
- [21] AshenaiGhasemi, F., Ghasemi, I., Basiri, M., "Experimental analysis of mechanical properties of polypropylene in presence of graphene nano plates and polyolefine elastomer in different manufacturing times", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 225-232, 2015.
- [22] Irisawaa, T., Shimamoto, D., Takeshigea, K., Doia, G., Tanabea, Y., and Hottab, Y., "The effects of pulverization treatment for the mechanical properties of polyamide 6 fiber filled with carbon nanotube", Materials Science & Engineering B, Vol. 254, No. 114514, 2020.
- [23] Palardy, G., Trudel-Boucher, D., Hubert, P., "Investigation of a Postprocessing Method to Tailor the Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Polyamide Fibers, Investigation of a Postprocessing Method to Tailor the Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Polyamide Fiber," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 130, No. 5, pp. 4375–4382, 2013.
- [24] Hsien-Tang, C., Chao-Yin, C., "The Mechanical and Rheological Behavior of the PA/TPU Blend with POE-g-MA Modifier. Graduate School of Polymer Engineering", National Taiwan University of Science and Technology, Taipei 106, Taiwan, Republic of China, 2003.
- [25] Do, V.T.; Nguyen-Tran, H.D.; Chun, D.M. Effect of polypropylene on the mechanical properties and water absorption of carbon-fiber-reinforced-polyamide-6/polypropylene composite", Composite Structures, Vol. 150, pp. 240–245, 2016.
- [26] Mat Desa, M.S.Z., Hassan, A., and Arsad, A., "The Effect of Natural Rubber Toughening on Mechanical Properties of Poly (lactic Acid)/ Multi-walled Carbon Nanotube Nanocomposite," Advanced Materials Research, Vol. 747, pp. 639-642, 2013.
- [27] Shoartz, S.S., and Godman, S.H., "Thermoplastic," Translation by Abasian, A. and Manochehri, S. and Nazokdast, H., First edition., Behrozan Publication Company, Tehran, pp.1-276, 1377.
- [28] Tjong, S.C., "The falling weight impact properties of maleic anhydride compatibilized polypropylene– polyamide blends", Journal of Materials Science, Vol. 32, pp. 4613–4617, 1997.



تحلیل ارتعاش آزاد پانل مستطیلی دو انحنایی ساندویچی با هسته آگزتیک و رویه‌های کامپوزیتی تقویت شده توسط نانولوله‌های کربنی با روش گالرکین

یاسین شعبانی¹، کوروش خورشیدی^{2*}

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

* اراک، صندوق پستی 88349-38156، k-khorshidi@araku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/10/03

پذیرش: 1401/01/10

کلیدواژگان

پانلهای دوانحنایی، نانولوله کربنی، فراماده آگزتیک، ضریب پواسن منفی، روش گالرکین

در این مقاله، ارتعاشات آزاد پانل دو انحنایی سه‌لایه با هسته لانه‌زنبوری آگزتیک و صفحات جانبی کامپوزیتی تقویت شده با توزیع‌های مختلف نانولوله‌های کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر مسئله بر اساس تئوری تغییر شکل برشی جدید مرتبه پنجم استخراج شده‌اند. پانل ساندویچی سه‌لایه شامل هسته با ساختار لانه‌زنبوری و سلول درون‌رو با ضریب پواسن منفی از جنس آلومینیوم و رویه‌های فوقانی و تحتانی کامپوزیتی با دو حالت توزیع یکنواخت (UD) و مدرج تابعی (FG) نانولوله کربنی در شرایط مرزی ساده بررسی شده است. خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی با استفاده از قانون اختلاط بهبودیافته برای نانولوله کربنی تک جداره محاسبه شده‌اند. معادلات حرکت با استفاده از اصل همپلتون استخراج گردیده و فرکانس‌های طبیعی سازه با استفاده از روش باقیمانده وزنی گالرکین به دست آمده‌اند. تاثیر پارامترهای سلول آگزتیک شامل زاویه سلول، نسبت طول لبه عمودی به لبه مورب و همچنین نسبت شعاع انحنا به طول پانل، نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل پانل و در نهایت کسر حجمی نانولوله‌های کربنی مورد بحث قرار گرفته است. در انتها نیز ارتعاش آزاد برای دیگر شکل‌های پانل‌های ساندویچی از جمله پانل‌های سهمی‌گون هذلولوی ساندویچی، پانل‌های سیلندری ساندویچی و ورق‌های تخت ساندویچی به دست آمدند و مقایسه شدند. نتایج حاصل شده نشان دادند هسته با ضریب پواسن منفی و همچنین توزیع مدرج تابعی (FG) نانولوله کربنی در رویه‌های کامپوزیتی فوقانی و تحتانی باعث کاهش فرکانس طبیعی پانل ساندویچی مورد مطالعه شدند.

Free vibration analysis of rectangular doubly curved auxetic-core sandwich panels integrated with CNT-reinforced composite layers using Galerkin method

Yasin Shabani¹, Korosh Khorshidi^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

* P.O.B. 38156-88349, Arak, Iran, k-khorshidi@araku.ac.ir

Keywords

Doubly curved panels, Carbon nanotubes, Auxetic metamaterials, Negative Poisson's ratio, Galerkin method

Abstract

In this paper, the free vibrations of a three-layer doubly curved panel with honeycomb auxetic core and reinforced composite face sheets by carbon nanotubes with different distributions are investigated. The governing equations of the structure are derived based on the new fifth-order shear deformation theory. The sandwich panel consists of three layers, aluminum core layer with cell inclined angle which creates negative Poisson's ratio in the honeycomb structure, composites skins with a uniform distribution (UD) as well as functionally graded (FG) distributions of carbon nanotubes (CNTs) in the simply supported boundary condition. Effective material properties of single-walled (SW) carbon nanotube reinforced composite skins are achieved by applying the extended rule of mixtures. The equations of motion are obtained using the Hamilton principle and solved using the Galerkin residual weight method. The effect of auxetic cell parameters including cell angle, cell aspect ratio, as well as distribution and content of carbon nanotubes, length to thickness ratio, and core thickness to total panel thickness ratio are examined and discussed. Furthermore, free vibration was obtained and compared for other shapes of sandwich panels such as hyperbolic parabolic sandwich panels, cylindrical sandwich panels and sandwich plates. The results showed that the core with negative Poisson's ratio as well as the functionally graded distribution (FG) of carbon nanotubes in the upper and lower composite surfaces reduced the natural frequency of the studied sandwich panel.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Shabani, Y., Khorshidi, K., "Free vibration analysis of rectangular doubly curved auxetic-core sandwich panels integrated with CNT-reinforced composite layers using Galerkin method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1677-1686, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.545477.1762>

1- مقدمه

در سال‌های اخیر نانولوله‌های کربنی با توجه به خواص ویژه‌ای که دارند، در مرکز توجه محققین حوزه مهندسی مکانیک و مواد قرار گرفته‌اند. و همچنین استفاده از نانولوله‌های کربنی به‌عنوان تقویت‌کننده در سازه‌ها گسترش پیدا کرده است [1]. علاوه بر عملکرد تقویتی، خواص مکانیکی را می‌توان از طریق توزیع‌های مدرج تابعی نانولوله‌های کربنی در جهت ضخامت سازه‌ها افزایش داد [2، 3]. با مرور ادبیات مشاهده می‌شود پاسخ مکانیکی، ارتعاش و دینامیکی نانولوله‌های خالص در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، به عنوان مثال امسخ و همکارانش [4] استحکام کششی ماکروسکوپی و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های نانو را پیش‌بینی و رفتار بین فاز ماتریس پلیمری و تقویت‌کننده رسی را محاسبه کردند. سیلوستر و همکارانش [5] به مروری بر بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سرامیکی پرداختند. در تحقیقی دیگر آرش و وانگ [6] به بررسی تحقیقات اخیر در مورد کاربرد تئوری پیوسته غیرمحلّی در مدل‌سازی نانولوله‌های کربنی و صفحات گرافن پرداختند. کنترل ارتعاش تیر ساندويچي کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله مدرج تابعي با استفاده از دولایه محرک مغناطیسی توسط طالبی‌توتی و فدایی انجام گرفت [7]. وانگ و ورادان [8] یک مدل مکانیک پیوسته غیرمحلّی برای مطالعه ارتعاش نانولوله‌های تک جداره (SWNTs) و نانولوله‌های دوجداره (DWNT) از طریق تئوری‌های تیر الاستیک ارائه و به کار بردند. همچنین بسیاری از مطالعات تحقیقاتی ویژگی‌های ارتعاشی صفحات، پانل‌ها و پوسته‌های کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله‌های کربنی را بررسی کردند. به عنوان مثال لی و همکارانش [9] رفتار ارتعاشی ورق‌های نانوکامپوزيتي مدرج تابعي تقويت شده با نانولوله‌های تک جداره (SWCNTs) را با روش المان آزاد کبیی ریتز مورد بررسی قرار داده است. یاس و همکارانش [10] خواص ارتعاشی پانل‌های استوانه‌ای نانوکامپوزيتي مدرج تابعي تقويت شده توسط نانولوله‌های کربنی تک جداره (SWCNTs) بر اساس تئوری سه‌بعدی الاستیسیته مطالعه کرده است. در تحقیقی دیگر لیو و همکارانش [11] ارتعاش آزاد پانل استوانه‌ای تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را با روش اشلبی - موری - تاناکا مطالعه کردند. کار و پاندا [12] با استفاده از روش المان محدود غیرخطی به بررسی پاسخ‌های خمشی پوسته‌های دوانحنايه مدرج تابعي پرداختند. کیانی [13] پاسخ دینامیکی پانل‌های استوانه‌ای کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله مدرج تابعي را تحت بار متحرک به دست آورده است. در پژوهشی دیگر زیگل و همکارانش [14] استحکام خمشی و ارتعاش آزاد پانل‌های استوانه‌ای کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله کربنی به دست آورده‌اند. ارتعاش آزاد ورق‌های مستطیلی ضخیم کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله‌های کربنی توسط مرکان و همکارانش [15] مورد بررسی قرار گرفته شد.

سازه‌های ساندويچي لانه‌زنبوري نیز به دلیل ویژگی‌های مهم مانند استحکام و سختی ویژه بالا، قابلیت جذب انرژی بالا و قیمت مناسب توجه زیادی را به خود جذب کرده‌اند. پژوهشگران مختلفی بر روی این سازه‌های کار و تحقیق انجام داده‌اند، که می‌توان گیبسون و اشلی [16] و لیم [17] را محققین پیشرو در بررسی سازه‌های ساندويچي نام برد. در زمینه سازه‌های ساندويچي، خورشیدی و همکارانش ارتعاش میکروورق‌های مدرج تابعي ساندويچي با لایه‌های پیزوالتریک [18] و ورق‌های ساندويچي با رويه‌های مدرج تابعي در محیط حرارتی [19] را بررسی کرده‌اند. آگرتیک‌های لانه‌زنبوري با ضریب پواسن منفی به عنوان یک متاماده، خواص مکانیکی بهتری از جمله مدول برشی، چقرمگی شکست و مقاومت در برابر فرورفتگی بیشتری نسبت به مواد معمولی دارند. اخیراً لیو و همکارانش [20] پاسخ‌های خرد کردن

آلومینیوم لانه‌زنبوري را از طریق آزمایش‌های تجربی بررسی کرده‌اند. وانگ و جین [21] رفتار فشاری شش ضلعی آلومینیومی لانه‌زنبوري با سوراخ‌های روی دیواره سلول را با آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنالیز ارتعاش حرارتی پانل‌های ساندويچي دو انحنايه با صفحات جانبی کامپوزيتي همراه سیم‌های آلیاژی حافظه‌دار توسط تورنابن و همکارانش [22] صورت پذیرفت. با استفاده از حل تحلیلی، دوک و همکارانش [23] پاسخ دینامیکی و ارتعاش کامپوزيتي پانل‌های استوانه‌ای آگرتیک را بر اساس تئوری مرتبه اول برشی ردی بررسی کردند.

به علت همین گسترش استفاده از مواد کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله کربنی در سازه‌های گوناگون و پیدایش کاربردهای جدید برای متاماده‌های آگرتیکی در حوزه‌های مختلف [24] و بررسی سابقه پژوهش‌ها در این باب که نشان‌دهنده عدم وجود پژوهش‌های کافی در مورد کاهش و بررسی ارتعاش سازه‌های دوانحنايه است، در این مقاله ما به بررسی ارتعاش آزاد پانل‌های ساندويچي دوانحنايه، سهمی‌گون هذلولوی، سیلندری و ورق‌های تخت ساندويچي سه‌لایه با هسته لانه‌زنبوري آگرتیک و رويه‌های کامپوزيتي تقويت شده توسط نانولوله‌های کربنی با توزیع یکنواخت و مدرج تابعي پرداختیم.

2- استخراج معادلات حاکم

نمای کلی پانل دو انحنايه با هسته شبکه‌ای لانه‌زنبوري و صفحات کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله کربنی مورد بررسی در شکل 1 با طول (b)، عرض (a) نمایش داده شده است. مطابق شکل دستگاه مختصات $O(x,y,z)$ از نوع دکارتی و در گوشه پانل در صفحه میانی ضخامت در نظر گرفته شده است.

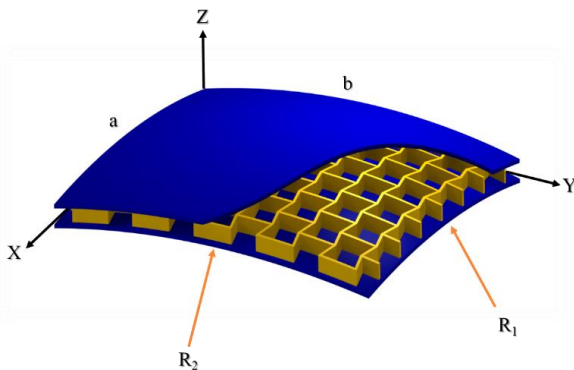


Fig. 1 Doubly curved sandwich panel(DCSP) with Auxetic core

شکل 1 پانل ساندويچي دو انحنايه آگرتیکی

2-1- روابط ساختاری و خواص مواد

در این پژوهش برای به دست آوردن خواص مکانیکی صفحات کامپوزيتي تقويت شده با نانولوله کربنی تک جداره از قانون اختلاط بهبودیافته بهره می‌گیریم. مطابق آن روابط کسر حجمی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [25]:

$$V_{CNT} = w(z)V_{CNT}^* \quad (1)$$

$$V_{CNT} = \frac{w_{CNT}}{w_{CNT} + \left(\frac{\rho_{CNT}}{\rho^m}\right)(1 - w_{CNT})} \quad (2)$$

$$V_{CNT} + V_m = 1 \quad (3)$$

در روابط فوق ρ^m ، ρ_{CNT} ، w_{CNT} ، V_{CNT} به ترتیب بیان‌کننده کسر حجمی نانولوله کربنی، کسر جرمی نانولوله کربنی، چگالی نانولوله کربنی و چگالی ماتریس می‌باشند. $w(z)$ نیز مبین تابع توزیع حجمی نانولوله‌ها در جهت

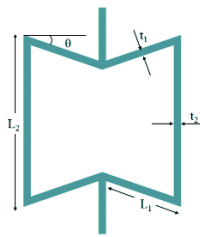


Fig. 3 The re-entrant unit cell of Auxetic core

شکل 3 سلول درون‌رو هسته آگرتیک

$$E_{11}^c = E_s \frac{\gamma_3^3 (1 - \sin\theta)}{\cos^3\theta [1 + (\tan^2\theta + \gamma_1 \sec^2\theta) \gamma_3^2]} \quad (a-11)$$

$$E_{22}^c = E_s \frac{\gamma_3^3}{\cos^3\theta (\gamma_1 - \sin\theta) [1 + (\tan^2\theta + \gamma_3^2)]} \quad (b-11)$$

$$G_{12}^c = E_s \frac{\gamma_3^3}{\gamma_1 (1 + 2\gamma_1) \cos\theta} \quad (c-11)$$

$$G_{23}^c = G_s \frac{\gamma_3 \cos\theta}{\gamma_1 - \sin\theta} \quad (d-11)$$

$$G_{31}^c = G_s \frac{\gamma_3}{2 \cos\theta} \left[\frac{\gamma_1 - \sin\theta}{1 + 2\gamma_1} + \frac{\gamma_1 + 2 \sin^2\theta}{2(\gamma_1 - \sin\theta)} \right] \quad (e-11)$$

$$v_{12}^c = - \frac{\sin\theta (1 - \gamma_3^2) (\gamma_1 - \sin\theta)}{\cos^2\theta [1 + (\tan^2\theta + \gamma_1 \sec^2\theta) \gamma_3^2]} \quad (f-11)$$

$$v_{21}^c = - \frac{\sin\theta (1 - \gamma_3^2)}{(\tan^2\theta + \gamma_3^2) (\gamma_1 - \sin\theta)} \quad (g-11)$$

$$\rho^c = \rho_s \frac{\gamma_3 (\gamma_1 + 2)}{2 \cos\theta (\gamma_1 - \sin\theta)} \quad (h-11)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{Bmatrix} Q_{11}^{(k)} & Q_{12}^{(k)} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21}^{(k)} & Q_{22}^{(k)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44}^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55}^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66}^{(k)} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}$$

, k = t, c, b (12)

که در رابطه 12.

$$Q_{11}^{(k)} = \frac{E_{11}^{(k)}}{1 - v_{12}^{(k)} v_{21}^{(k)}} \quad (a-13)$$

$$Q_{12}^{(k)} = \frac{v_{12} E_{11}^{(k)}}{1 - v_{12}^{(k)} v_{21}^{(k)}} \quad (b-13)$$

$$Q_{22}^{(k)} = \frac{E_{22}^{(k)}}{1 - v_{12}^{(k)} v_{21}^{(k)}} \quad (c-13)$$

$$Q_{66}^{(k)} = G_{12}^{(k)} \quad (d-13)$$

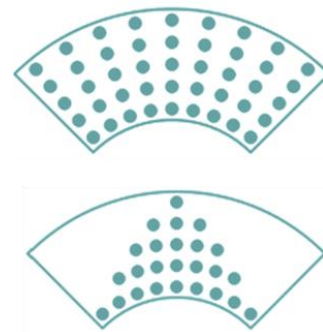
$$Q_{55}^{(k)} = G_{13}^{(k)} \quad (e-13)$$

$$Q_{44}^{(k)} = G_{23}^{(k)} \quad (f-13)$$

ضخامت پانل می‌باشد. برای دو حالت توزیع یکنواخت (UD) و مدرج تابعی (FG) این تابع به‌صورت رابطه 4 و 5 تعریف می‌شود [26, 27]. نحوه توزیع نانولوله‌های تقویت‌کننده لایه‌های فوقانی و تحتانی در شکل 2 نشان داده شده است.

$$V_{CNT} = V_{CNT}^* \quad (4)$$

$$V_{CNT} = \left(1 - \frac{2z}{h}\right) V_{CNT}^* \quad (5)$$



Uniformly distributed

Functionally graded distributed

Fig. 2 Distribution types of CNTs across the thickness of face sheets

شکل 2 نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی در ضخامت رویه‌ها

بر اساس قانون بهبودیافته اختلاط چگالی، مدول یانگ و مدول برشی مطابق روابط (6-9) قابل محاسبه می‌باشند [28].

$$\rho = V_{CNT} \rho^{CNT} + V_m \rho^m \quad (6)$$

$$E_{11} = \eta_1 V_{CNT} E_{11}^{CNT} + V_m E^m \quad (7)$$

$$E_{22} = \frac{\eta_2}{\frac{V_{CNT}}{E_{22}^{CNT}} + \frac{V_m}{E^m}} \quad (8)$$

$$G_{11} = \frac{\eta_3}{\frac{V_{CNT}}{G_{12}^{CNT}} + \frac{V_m}{G^m}} \quad (9)$$

در معادلات 6 تا 9، η_i ($i = 1, 2, 3$) پارامتر کارایی نانولوله کربنی هستند که مقادیر آن‌ها با توجه به روش دینامیک مولکولی و قانون اختلاط تعیین می‌گردد. همچنین E_{11}^{CNT} ، E_{22}^{CNT} و G_{12}^{CNT} به ترتیب نشان‌دهنده مدول یانگ نانولوله‌های کربنی در جهت الیاف، عمود بر الیاف و مدول برشی نانولوله‌های کربنی هستند. E^m و G^m نیز خواص متناظر ماتریس می‌باشند. نسبت پواسون صفحات کامپوزیتی را به‌صورت زیر می‌توان به دست آورد.

$$v_{12} = V_{CNT} v_{12}^{CNT} + V_m v^m \quad (10)$$

هندسه سلول شبکه لانه‌زنبوری مورد استفاده در این پژوهش را می‌توان در شکل 3 مشاهده کرد. خواص مکانیکی هسته ساندویچ پانل از رابطه 11 محاسبه می‌شود [29].

در رابطه 11، $\gamma_1 = \frac{t_2}{t_1}$ ، $\gamma_2 = \frac{t_2}{t_1}$ و $\gamma_3 = \frac{t_1}{L_1}$ خواص مکانیکی هسته آگرتیک برای هندسه تخت و انحنادار یکسان می‌باشد [30, 31]. روابط ساختاری برای پانل ساندویچی مفروض در رابطه 12 آورده شده است [32].

در روابط ساختاری $K = t, c, b$ به ترتیب نشان‌دهنده لایه فوقانی، هسته و لایه تحتانی می‌باشد.

2-2- معادلات حرکت

میدان جابه‌جایی برای پانل دو انحنایی ساندویچی مطابق رابطه 14 در نظر گرفته شده است [33]:

$$U(x,y,z,t) = \left(1 + \frac{z}{R_1}\right) u(x,y,t) + G(z) \frac{\partial w(x,y,t)}{\partial x} + F(z) \xi(x,y,t) \quad (a-14)$$

$$V(x,y,z,t) = \left(1 + \frac{z}{R_2}\right) v(x,y,t) + G(z) \frac{\partial w(x,y,t)}{\partial x} + F(z) \psi(x,y,t) \quad (b-14)$$

$$W(x,y,z,t) = w(x,y,t) \quad (c-14)$$

که مقادیر $F(z)$ و $G(z)$ مطابق تئوری جدید تغییر شکل برشی مرتبه پنجم ارائه شده معادل رابطه 15 در نظر گرفته می‌شوند.

$$G(z) = -z, F(z) = \left(\frac{19z}{22} - \frac{9z^3}{4h^2} + \frac{10z^5}{3h^4}\right) \quad (15)$$

3-2- روابط کرنش-جابه‌جایی

کرنش‌های خطی برای پانل دو انحنایی طبق میدان جابه‌جایی مذکور مطابق رابطه 16 محاسبه می‌شوند:

$$\varepsilon_x = \left(1 + \frac{z}{R_1}\right) \frac{\partial u}{\partial x} + G(z) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + F(z) \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{w}{R_1} \quad (a-16)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + G(z) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + F(z) \frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{w}{R_2} \quad (b-16)$$

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) + 2G(z) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + F(z) \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial \psi}{\partial x}\right) \quad (c-16)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial G(z)}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \xi \frac{\partial F(z)}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (d-16)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial G(z)}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} + \psi \frac{\partial F(z)}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (e-16)$$

4-2- استخراج معادلات حاکم

در این مقاله برای استخراج معادلات بر حرکت پانل دو انحنایی از اصل همیلتون مطابق رابطه 17 کمک می‌گیریم [34, 35].

$$\int_0^t (\delta T + \delta W - \delta U) dt = 0 \quad (17)$$

در رابطه (17) δT و δU به ترتیب بیانگر تغییرات انرژی پتانسیل کرنشی و جنبشی می‌باشند. δW نیز کار ناشی از نیروهای خارجی است. انرژی پتانسیل کرنشی و جنبشی برای پانل مورد بررسی مطابق روابط a-18 و b-18 به دست می‌آیند:

$$\delta U = \frac{1}{2} \int \left(-\delta u \left(\frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \right) - \delta v \left(\frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \right) - \delta \xi \left(\frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{xy}}{\partial y} - Q_{xz} \right) + \delta w \left(\frac{\partial^2 S_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 S_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 S_{yy}}{\partial y^2} - \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{N_{xx}}{R_1} + \frac{N_{yy}}{R_2} \right) \right) \quad (a-18)$$

$$\begin{aligned} & -\delta \psi \left(\frac{\partial P_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial P_{yy}}{\partial y} - Q_{yz} \right)) dA \\ \delta T = & \frac{1}{2} \int \left[-\delta u \left(I_1 \ddot{u} + I_7 \frac{1}{R_1} \ddot{u} + I_4 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} + I_5 \ddot{\xi} \right. \right. \\ & \left. \left. + I_7 \frac{1}{R_1} \ddot{u} + I_8 \left(\frac{1}{R_1} \right)^2 \ddot{u} + I_9 \frac{1}{R_1} \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} + I_{10} \frac{1}{R_1} \ddot{\xi} \right) \right. \\ & \left. + \delta w \left(I_4 \frac{\partial \ddot{u}}{\partial x} + I_9 \frac{1}{R_1} \frac{\partial \ddot{u}}{\partial x} + I_2 \frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial x^2} + I_6 \frac{\partial \ddot{\xi}}{\partial x} - I_1 \ddot{w} \right. \right. \\ & \left. \left. + I_4 \frac{\partial \ddot{v}}{\partial y} + I_9 \frac{1}{R_2} \frac{\partial \ddot{v}}{\partial y} + I_2 \frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial y^2} + I_6 \frac{\partial \ddot{\psi}}{\partial y} \right) - \delta \xi (I_5 \ddot{u} \right. \\ & \left. + I_{10} \frac{1}{R_1} \ddot{u} + I_6 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} + I_3 \ddot{\xi}) - \delta v \left(I_1 \ddot{v} + I_7 \frac{1}{R_2} \ddot{v} \right. \right. \\ & \left. \left. + I_4 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} + I_5 \ddot{\psi} + I_7 \frac{1}{R_2} \ddot{v} + I_8 \left(\frac{1}{R_2} \right)^2 \ddot{v} + I_9 \frac{1}{R_2} \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} \right. \right. \\ & \left. \left. + I_{10} \frac{1}{R_2} \ddot{\psi} \right) - \delta \psi \left(I_5 \ddot{v} + I_{10} \frac{1}{R_2} \ddot{v} + I_6 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} \right. \right. \\ & \left. \left. + I_3 \ddot{\psi} \right) \right] dV \quad (b-18) \end{aligned}$$

که در آن‌ها منته‌های تنش و ممان‌های اینرسی جرمی به شکل رابطه 19 تعریف شده‌اند.

$$\begin{aligned} (N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}) = & \int_{-(h_b + \frac{h_c}{2})}^{-\frac{h_c}{2}} (\sigma_x^b, \sigma_y^b, \sigma_{xy}^b) dz + \\ & \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} (\sigma_x^c, \sigma_y^c, \sigma_{xy}^c) dz + \int_{\frac{h_c}{2} + h_t}^{h_t} (\sigma_x^t, \sigma_y^t, \sigma_{xy}^t) dz \quad (a-19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (S_{xx}, S_{yy}, S_{xy}) = & \int_{-(h_b + \frac{h_c}{2})}^{-\frac{h_c}{2}} (\sigma_x^b, \sigma_y^b, \sigma_{xy}^b) G(z) dz + \\ & \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} (\sigma_x^c, \sigma_y^c, \sigma_{xy}^c) G(z) dz + \int_{\frac{h_c}{2} + h_t}^{h_t} (\sigma_x^t, \sigma_y^t, \sigma_{xy}^t) G(z) dz \quad (b-19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (P_{xx}, P_{yy}, P_{xy}) = & \int_{-(h_b + \frac{h_c}{2})}^{-\frac{h_c}{2}} (\sigma_x^b, \sigma_y^b, \sigma_{xy}^b) F(z) dz + \\ & \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} (\sigma_x^c, \sigma_y^c, \sigma_{xy}^c) F(z) dz + \int_{\frac{h_c}{2} + h_t}^{h_t} (\sigma_x^t, \sigma_y^t, \sigma_{xy}^t) F(z) dz \quad (c-19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (Q_{xz}, Q_{yz}) = & \int_{-(h_b + \frac{h_c}{2})}^{-\frac{h_c}{2}} (\sigma_{xz}^b, \sigma_{yz}^b) \frac{\partial F(z)}{\partial z} dz + \\ & \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} (\sigma_{xz}^c, \sigma_{yz}^c) \frac{\partial F(z)}{\partial z} dz + \int_{\frac{h_c}{2} + h_t}^{h_t} (\sigma_{xz}^t, \sigma_{yz}^t) \frac{\partial F(z)}{\partial z} dz \quad (d-19) \end{aligned}$$

$$u(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N u_{mn} \bar{u}(x, y) e^{i\omega t} \quad (a-21)$$

$$v(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N v_{mn} \bar{v}(x, y) e^{i\omega t} \quad (b-21)$$

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} \bar{w}(x, y) e^{i\omega t} \quad (c-21)$$

$$\xi(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \xi_{mn} \bar{\xi}(x, y) e^{i\omega t} \quad (d-21)$$

$$\psi(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \psi_{mn} \bar{\psi}(x, y) e^{i\omega t} \quad (e-21)$$

در رابطه 21، m و n به ترتیب نمایانگر تعداد نیم موج‌های طولی و محیطی هستند. و u_{mn} ، v_{mn} ، w_{mn} ، ξ_{mn} و ψ_{mn} ضرایب سری فوریه می‌باشند که با کمینه شدن باقیمانده‌ها محاسبه خواهند شد. $\bar{u}(x, y)$ ، $\bar{v}(x, y)$ ، $\bar{w}(x, y)$ ، $\bar{\xi}(x, y)$ و $\bar{\psi}(x, y)$ برای ارضای شرایط مرزی ساده به شکل زیر فرض می‌شوند [36]:

$$\bar{u}(x, y) = \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \quad (a-22)$$

$$\bar{v}(x, y) = \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \quad (b-22)$$

$$\bar{w}(x, y) = \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \quad (c-22)$$

$$\bar{\xi}(x, y) = \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \quad (d-22)$$

$$\bar{\psi}(x, y) = \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \quad (e-22)$$

برای به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی بایستی رابطه 23 که با ساده‌سازی به شکل معادلات ماتریسی بسته نمایش داده شده است، حل گردد [37].

$$([K] - \omega^2 [M])\{\Delta\} = 0 \quad (23)$$

که $\{\Delta\}$ بردار ضرایب مجهول، $[K]$ ماتریس سختی، $[M]$ ماتریس جرم و ω فرکانس طبیعی پانل ساندویچی دو انحنایی می‌باشند. برای به دست آوردن مجهولات مشابه رابطه (24) ابتدا طرفین معادلات حاکم را از یکدیگر جدا می‌کنیم.

$$\begin{aligned} Y_1(u, v, w, \xi, \psi) &= I_1 u + I_7 \frac{2}{R_1} u + I_4 \frac{\partial w}{\partial x} + I_5 \xi \\ &+ I_8 \left(\frac{1}{R_1}\right)^2 + I_9 \frac{1}{R_1} \frac{\partial w}{\partial x} + I_{10} \frac{1}{R_1} \xi \\ Y_2(u, v, w, \xi, \psi) &= I_1 v + I_7 \frac{2}{R_2} v + I_4 \frac{\partial w}{\partial y} + I_5 \psi \\ &+ I_8 \left(\frac{1}{R_2}\right)^2 v + I_9 \frac{1}{R_2} \frac{\partial w}{\partial y} + I_{10} \frac{1}{R_2} \psi \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} (T_{xz}, T_{yz}) &= \int_{-(h_b + \frac{h_c}{2})}^{\frac{h_c}{2}} (\sigma_{xz}^b, \sigma_{yz}^b) \left(\frac{\partial G(z)}{\partial z} + 1 \right) dz + \\ &\int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} (\sigma_{xz}^c, \sigma_{yz}^c) \left(\frac{\partial G(z)}{\partial z} + 1 \right) dz + \int_{\frac{h_c}{2}}^{h_t} (\sigma_{xz}^t, \sigma_{yz}^t) \\ &\left(\frac{\partial G(z)}{\partial z} + 1 \right) dz \end{aligned} \quad (e-19)$$

$$I_j = \int_{-(h_b + \frac{h_c}{2})}^{\frac{h_c}{2}} \rho^b J_j dz + \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} \rho^c J_j dz + \int_{\frac{h_c}{2}}^{h_t} \rho^t J_j dz \quad (f-19)$$

$$J_j = \left(1 \cdot (G(z))^2 \cdot (F(z))^2 \cdot G(z) \cdot F(z) \cdot F(z) G(z) \cdot z \cdot z^2 \cdot z G(z) \cdot z F(z) \right) \quad (g-19)$$

حال با جایگذاری روابط a-18 و b-18 در اصل همیلتون معادلات حاکم به صورت رابطه 20 استخراج می‌شوند.

$$\begin{aligned} \delta u: \quad \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= I_1 \ddot{u} + I_7 \frac{2}{R_1} \ddot{u} + I_4 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} \\ &+ I_5 \ddot{\xi} + I_8 \left(\frac{1}{R_1}\right)^2 \ddot{u} + I_9 \frac{1}{R_1} \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} + I_{10} \frac{1}{R_1} \ddot{\xi} \end{aligned} \quad (a-20)$$

$$\begin{aligned} \delta v: \quad \frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} &= I_1 \ddot{v} + I_7 \frac{2}{R_2} \ddot{v} + I_4 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} + I_5 \ddot{\psi} \\ &+ I_8 \left(\frac{1}{R_2}\right)^2 \ddot{v} + I_9 \frac{1}{R_2} \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} + I_{10} \frac{1}{R_2} \ddot{\psi} \end{aligned} \quad (b-20)$$

$$\begin{aligned} \delta w: \quad \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial^2 S_{xx}}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 S_{xy}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 S_{yy}}{\partial y^2} \\ - \frac{N_{xx}}{R_1} - \frac{N_{yy}}{R_2} = -I_1 \ddot{w} + I_2 \left(\frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial y^2} \right) \\ + I_4 \left(\frac{\partial \ddot{u}}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{v}}{\partial y} \right) + I_6 \left(\frac{\partial \ddot{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{\psi}}{\partial y} \right) + I_9 \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial \ddot{u}}{\partial x} \right. \\ \left. + \frac{1}{R_2} \frac{\partial \ddot{v}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (c-20)$$

$$\delta \xi: \quad \frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{xy}}{\partial y} - Q_{xz} = I_5 \ddot{u} + I_{10} \frac{1}{R_1} \ddot{u} + I_6 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial x} + I_3 \ddot{\xi} \quad (d-20)$$

$$\delta \psi: \quad \frac{\partial P_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial P_{yy}}{\partial y} - Q_{yz} = I_5 \ddot{v} + I_{10} \frac{1}{R_2} \ddot{v} + I_6 \frac{\partial \ddot{w}}{\partial y} + I_3 \ddot{\psi} \quad (e-20)$$

3- حل مسئله

3-1 روش حل

برای محاسبه ارتعاش آزاد پانل ساندویچی دو انحنایی در این پژوهش از روش گالرکین بهره می‌بریم. بر اساس این روش شکل تابع حدس جابه‌جایی به صورت رابطه 21 در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع سعی ارائه شده برای شرایط مرزی ساده همگرایی سریع به ازای افزایش شمار جمله‌های تخمین با M و N برابر برای فرکانس اول بی‌بعد شده دارد. با توجه به نتایج حاصل شده برای فرکانس‌ها M و N را برابر 10 در نظر گرفتیم.

جدول 1 مقایسه نتایج با منابع معتبر

Table 1 Comparison of results with other research

Vcnt		UD	FG
0.11	تحقیق حاضر	19.9915	17.9637
	وانگ و همکاران [39]	19.5954	17.6852
	فاضل‌زاده و پوراسماعیلی [40]	20.2381	18.2514
0.14	تحقیق حاضر	21.4508	19.2709
	وانگ و همکاران [39]	20.9984	18.9536
	فاضل‌زاده و پوراسماعیلی [40]	21.6551	19.5458
0.17	تحقیق حاضر	24.7901	22.3108
	وانگ و همکاران [39]	24.3042	21.9784
	فاضل‌زاده و پوراسماعیلی [40]	25.0512	22.6250

وانگ و همکارانش [39] از تئوری برشی مرتبه اول ردی و از روش گالرکین ارتعاش آزاد را محاسبه کرده‌اند. اما روش حل در کار فاضل‌زاده و پوراسماعیلی [40] متفاوت است و آن‌ها از روش فوریه برای به دست آوردن ارتعاش آزاد بهره گرفته‌اند. همان‌طور که در جدول مشخص است همگرایی بسیار خوبی بین نتایج مراجع معتبر و مقادیر به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود.

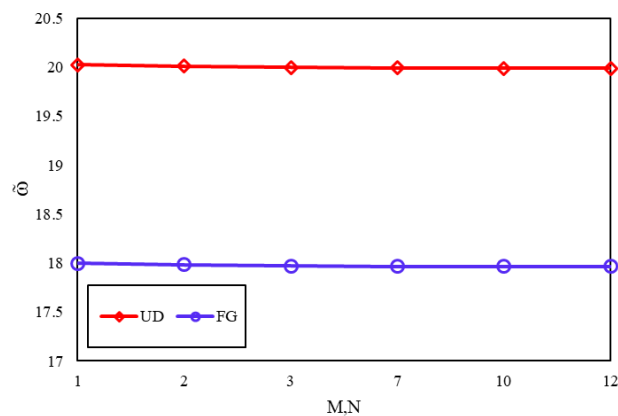


Fig. 4 Convergence of results the non-dimensional natural frequency of the doubly curved panel

شکل 4 همگرایی نتایج فرکانس طبیعی بی‌بعد برای پانل دو انحنايي

جنس لایه‌های فوقانی و تحتانی پانل مورد بررسی کامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی تک جداره می‌باشند. خواص مواد به‌کاررفته در رويه‌ها را می‌توان در جدول 2 مشاهده نمود [41, 42]. پارامترهای کارایی برای مقادیر مختلف $V_{CNT}=0.11$ برابر با $\eta_1=0.149$ و $V_{CNT}=0.14$ برابر با $\eta_1=0.15$ و $\eta_2=\eta_3=0.934$ و $V_{CNT}=0.17$ برابر با $\eta_1=0.149$ و $\eta_2=\eta_3=1.381$ می‌باشد [41]. همچنین خواص هسته پانل عبارتند از:

$$E_s = 69 \text{ (GPa)}, G_s = 26 \text{ (GPa)}, \rho_s = 2700 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right), \nu = 0.33$$

$$\begin{aligned} Y_3(u, v, w, \xi, \psi) = & -I_1 w + I_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \\ & I_4 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + I_6 \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + I_9 \left(\frac{1}{R_1} \frac{\partial u}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{1}{R_2} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

$$Y_4(u, v, w, \xi, \psi) = I_5 \ddot{u} + I_{10} \frac{1}{R_1} \ddot{u} + I_6 \frac{\partial w}{\partial x} + I_3 \xi$$

$$Y_5(u, v, w, \xi, \psi) = I_5 v + I_{10} \frac{1}{R_2} v + I_6 \frac{\partial w}{\partial y} + I_3 \psi$$

در رابطه 24، Y_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) طرف راست معادلات حاکم می‌باشند. با جایگذاری توابع فرضی در درون معادلات حاکم و انتگرال‌گیری روی سطح به تعداد مجهولات توابع فرضی معادله به وجود می‌آید که با حل آن‌ها، مجهولات درون توابع به دست می‌آیند و ماتریس سختی حاصل می‌شود.

$$\int_0^b \int_0^a Y_1(u, v, w, \xi, \psi) \bar{u}(x, y) dx dy = 0 \quad (\text{a-25})$$

$$\int_0^b \int_0^a Y_2(u, v, w, \xi, \psi) \bar{v}(x, y) dx dy = 0 \quad (\text{b-25})$$

$$\int_0^b \int_0^a Y_3(u, v, w, \xi, \psi) \bar{w}(x, y) dx dy = 0 \quad (\text{c-25})$$

$$\int_0^b \int_0^a Y_4(u, v, w, \xi, \psi) \bar{\xi}(x, y) dx dy = 0 \quad (\text{d-25})$$

$$\int_0^b \int_0^a Y_5(u, v, w, \xi, \psi) \bar{\psi}(x, y) dx dy = 0 \quad (\text{e-25})$$

به طریق مشابه با جایگذاری و ضرب توابع سعی در طرف دیگر معادلات حاکم و انتگرال‌گیری روی سطح و کمینه‌سازی نسبت به ضرایب مودال u_{mn} ، ξ_{mn} ، w_{mn} ، v_{mn} ، ماتریس جرم حاصل می‌شود. با داشتن این دو ماتریس با کمک رابطه 23 فرکانس‌های طبیعی به دست می‌آیند.

3-2- بحث و بررسی نتایج عددی

در این بخش علاوه بر صحت‌گذاری نتایج به‌دست‌آمده به بررسی اثر پارامترهای مختلف نیز می‌پردازیم. در ادامه ارتعاشات آزاد به‌دست‌آمده برای پانل دو انحنا، با در نظر گرفتن پارامتر بی‌بعدی مطابق رابطه (26) ارائه شده است [38].

$$\bar{\omega} = \omega \frac{a^2}{h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu_c^2)}{E}} \quad (26)$$

برای اطمینان از صحت روابط به‌دست‌آمده و روش حل، نتایج حاصل از ارتعاش پانل دو انحنايي کامپوزيتي را با نتایج ارائه شده در مراجع معتبر مقایسه می‌کنیم. در جدول 1 ارتعاش آزاد پانل دو انحنايي کامپوزيتي با اتخاذ $a/h=20$ ، $b/a=1$ و $a/R_1=b/R_2=0.5$ برای نسبت‌های مختلف V_{CNT} برابر 11.0، 14.0 و 17.0 همچنین با دو نوع توزیع یکنواخت و مدرج تابعی نانولوله کربنی محاسبه و مقایسه شده است. پارامتر بی‌بعدی برای این جدول مشابه مرجع در نظر گرفته شده است. همچنین همگرایی نتایج برای پانل دو انحنايي به ازای V_{CNT} برابر 11.0 و با فرض $a/h=20$ و $b/a=1$ و $a/R_1=b/R_2=0.5$ برای دو توزیع مدرج تابعی و یکنواخت نانولوله کربنی در شکل 4 قابل مشاهده است.

جدول 2 خواص مواد

Table 2 Material properties

خواص نانو لوله کربنی	خواص زمینه پلیمر اپوکسی
$E_{11}^{CNT} = 5646.6 \text{ (GPa)}$	$E^m = 2.1 \text{ (GPa)}$
$E_{22}^{CNT} = 7080 \text{ (GPa)}$	$\nu^m = 0.34$
$G_{12}^{CNT} = 194.45 \text{ (GPa)}$	$\rho^m = 1150 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$
$\nu_{12}^{CNT} = 0.175$	
$\rho^{CNT} = 1400 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	

V_{cnt} در شکل‌های 5 تا 8 برابر 11.0 و شعاع انحنای پانل معادل $R_1=2a$ و $R_2=2b$ و برابر فرض شده‌اند. شکل 5 و 6 به ترتیب تأثیر زاویه سلول و نسبت اندازه طول لبه مورب به عمودی هسته لانه‌زنبوری بر ارتعاش آزاد پانل دو انحنايي نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود ارتعاش آزاد با افزایش زاویه سلول لانه‌زنبوری از منفی 60 درجه تا حدود منفی 30 درجه افزایش می‌یابد و بعد از آن به دلیل خواص ویژه مواد آگرتیک در تأثیرپذیری خواص مکانیکی از شکل سلول کاهش می‌یابد. اما در پانل با توزیع مدرج تابعی به جهت نحوه توزیع نانو لوله کربنی در ضخامت رويه‌ها در این بازه زاویه‌ای افزایشی مشاهده نمی‌شود. در واقع می‌توان گفت نوع توزیع نانو لوله کربنی در ضخامت رويه‌های فوقانی و تحتانی اثر زاویه هسته در افزایش فرکانس طبیعی پانل را خنثی کرده است. در سلول آگرتیک مفروض زوایای مثبت باعث تغییر در خواص مکانیکی و منفی شدن ضریب پواسن هسته هستند. در نمودار پنجم علاوه بر نشان دادن تأثیر نسبت اندازه طول لبه مورب به عمودی، با فرض زاویه سلول $\theta = \pm 30^\circ$ با توجه به شماتیک سلول آگرتیک، تأثیر منفی بودن ضریب پواسن لایه هسته بر ارتعاش آزاد پانل ساندويچي سه‌لایه نیز نشان داده شده است. در شکل‌های 5 و 6 مشاهده می‌شود زمانی که ضریب پواسن لایه میانی منفی است ارتعاش پانل مفروض کمتر می‌شود.

در شکل 7 با فرض برابر بودن طول و عرض پانل ساندويچي تأثیر نسبت طول به ضخامت کل پانل دو انحنايي محاسبه و نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر ارتعاش آزاد در نسبت‌های پایین طول به ضخامت وابستگی کمتری به زاویه سلول آگرتیک دارد. شکل ششم همچنین نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ضخامت به طول فرکانس طبیعی پانل دو انحنايي کاهش می‌یابد.

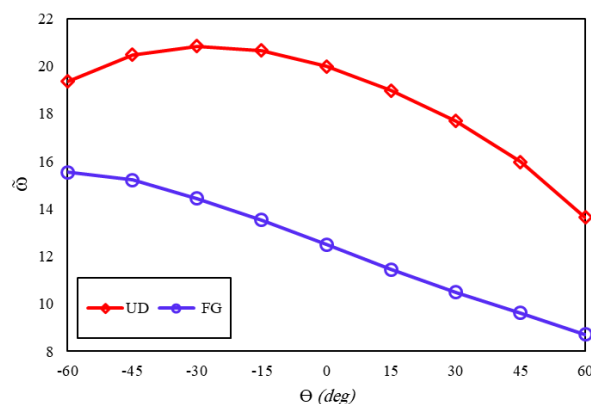


Fig. 5 The effect of the angle of the core cell on the non-dimensional natural frequency of DCSP

شکل 5 اثر تغییرات زاویه سلول آگرتیک بر فرکانس طبیعی پانل دو انحنايي

شکل 8 نشان می‌دهد با افزایش نسبت ضخامت هسته لانه‌زنبوری به ضخامت کل پانل دو انحنايي فرکانس طبیعی بی‌بعد کمتر می‌شود. در نسبت‌های مساوی و پارامترهای مؤثر یکسان، به‌طور کلی ارتعاش آزاد پانل با رويه‌های کامپوزيتي همراه توزیع یکنواخت نانو لوله کربنی در مقایسه با توزیع مدرج تابعی مذکور بیشتر خواهد بود. هرچه نسبت ضخامت هسته آگرتیکی به ضخامت کل پانل کمتر باشد اثر خواص مکانیکی ناشی از سلول لانه‌زنبوری کمتر خواهد بود لذا در نسبت 4.0 فاصله بین خطوط کمتر و هر چه این نسبت بیشتر می‌شود خط‌ها نمودار با جنس رويه‌های یکسان بیشتر از هم فاصله می‌گیرند. همچنین ارتعاش آزاد پانل در هر دو نوع توزیع در زمانی که ضریب پواسن هسته پانل منفی و زاویه سلول برابر با 30 درجه است کمتر از زمانی که با ضریب پواسن مثبت حاصل از زاویه سلول -30 درجه می‌باشد. در شکل 9، تأثیر دو پارامتر مهم نسبت ضخامت‌های هسته به ضخامت کل و همچنین مقادیر مختلف V_{cnt} بر فرکانس طبیعی نشان داده شده است. در این شکل دو نوع توزیع یکنواخت و مدرج تابعی در نظر گرفته شده است و زاویه سلول آگرتیک برابر 30 درجه فرض شده است. در شکل 9 مشاهده می‌گردد ارتعاش آزاد پانل ساندويچي دو انحنايي برای مقادیر بزرگ‌تر V_{cnt} بیشتر است. هرچه نسبت ضخامت هسته به کل بیشتر می‌شود ارتعاش آزاد کاهش می‌یابد. فرکانس طبیعی بی‌بعد پانل با رويه‌های با توزیع یکنواخت از توزیع مدرج تابعی مذکور به‌طور کلی بیشتر است.

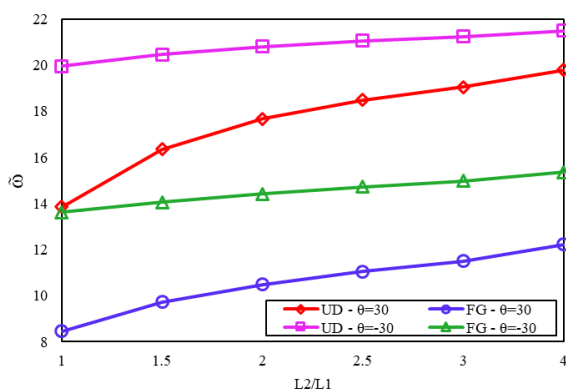


Fig. 6 The effect of the vertical cell rib length to inclined cell rib length on the non-dimensional natural frequency of the DCSP

شکل 6 اثر تغییرات نسبت‌های مختلف طول لبه عمودی به مورب سلول آگرتیک بر فرکانس طبیعی پانل دو انحنايي

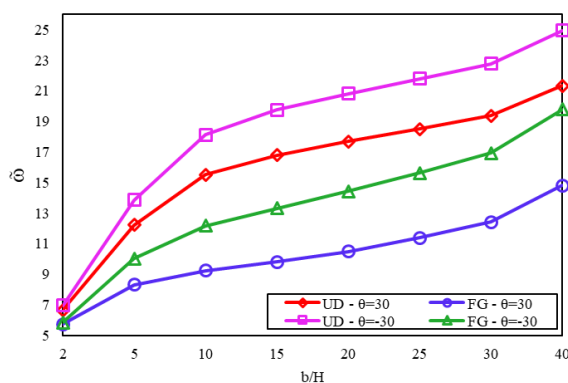


Fig. 7 The effect of the length to total thickness the DCSP on the non-dimensional natural frequency

شکل 7 اثر تغییرات نسبت طول به ضخامت کل پانل دو انحنايي بر فرکانس طبیعی

(زین اسبی) دارای یک انحنای منفی و یک انحنای مثبت (شکل 11-b) و سیلندری شکل دارای تنها یک انحنای (شکل 11-c) و پانل تخت فاقد انحنای (شکل 11-d) می‌باشند. فرکانس طبیعی پانل ساندویچی سیلندری شکل نسبت به ورق‌های تخت و پانل‌های سهمی‌گون هذلولی بیشتر می‌باشد. هندسه سازه‌های مورد بررسی در شکل 10 نشان داده شده است.

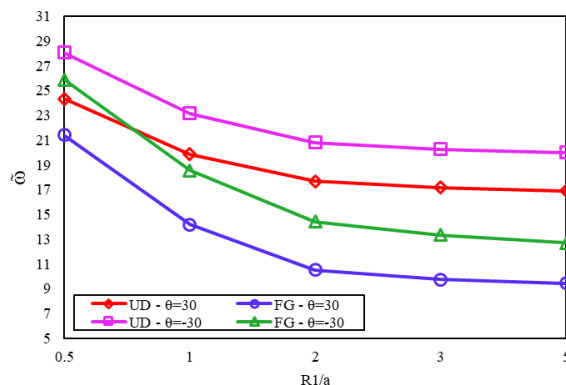


Fig. 10 The effect of the radius to the length of the DCSP on the non-dimensional natural frequency

شکل 10 اثر تغییرات نسبت شعاع به طول پانل بر فرکانس طبیعی پانل دو انحنایی

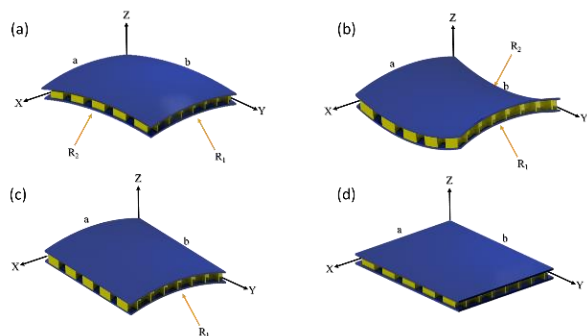


Fig. 11 Geometry of structures with different curvatures

شکل 11 شماتیک سازه‌ها با انواع انحنای

جدول 3 فرکانس طبیعی پانل ساندویچی با انحنای مختلف

Table 3 Natural frequency of sandwich panels with different curvatures

a/R1	b/R2	Vcnt	UD	FG
5.0	0.5	11.0	17.5271	9.94001
		14.0	4424.19	6791.10
		17.0	21.2751	11.87
5.0	0	11.0	18.1143	10.1905
		14.0	032.20	9714.10
		17.0	22.004	12.2951
		11.0	17.9675	10.1231
0	0	14.0	9326.19	10.8761
		17.0	21.8126	0848.12

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارتعاش آزاد پانل دو انحنایی ساندویچی سه‌لایه با هسته آگرتیکی و رویه‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی تک جداره بررسی گردید. معادلات حرکت بر مبنای تئوری برشی مرتبه پنجم که برای اولین بار ارائه شده است به دست آمدند و سپس با روش گالرکین معادلات حل و ارتعاش

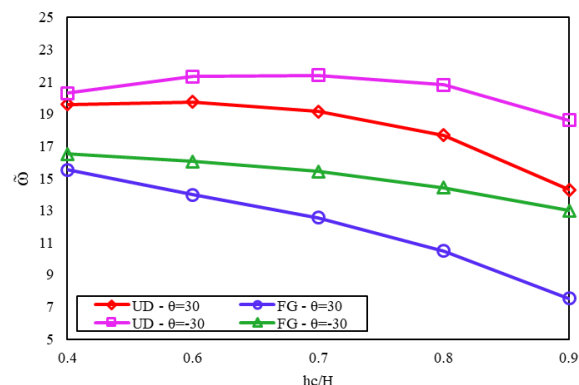


Fig. 8 The effect of the core thickness to total thickness the DCSP on the non-dimensional natural frequency

شکل 8 اثر تغییرات نسبت ضخامت هسته آگرتیکی به ضخامت کل بر ارتعاش آزاد پانل دو انحنایی

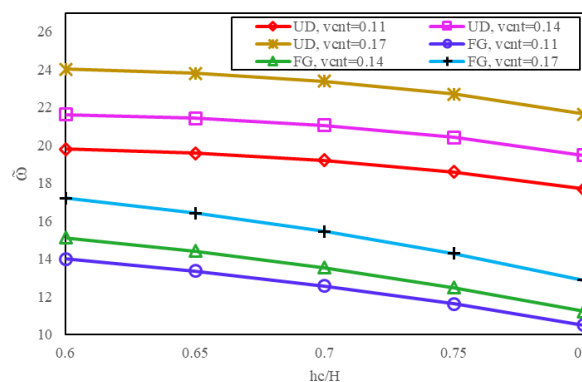


Fig. 9 The Effect of amount and distribution of carbon nanotubes on the natural frequency of the DCSP with different inclined cell rib thickness to vertical cell rib thickness ratio

شکل 9 اثر میزان و نحوه توزیع نانولوله کربنی بر فرکانس طبیعی پانل دو انحنایی با نسبت‌های مختلف ضخامت لایه مورب به لایه عمودی سلول هسته

بررسی اثر تغییر شعاع انحنای پانل ساندویچی با فرض برابر بودن شعاع‌ها در طول و عرض پانل برای هر دو نوع توزیع نانولوله تقویت‌کننده کربنی در رویه‌ها و نیز هسته آگرتیک با دو زاویه 30 و 30- درجه، در شکل 10 ارائه شده است. در این شکل ضخامت رویه‌ها و هسته به ترتیب 0.01 و 0.08 متر می‌باشد. همچنین نسبت t_1 به t_2 برابر یک و نسبت طول به ضخامت کل پانل 20 در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود با افزایش نسبت شعاع پانل به طول فرکانس طبیعی بی‌بعد شده کاهش می‌یابد. در واقع، با کاهش انحنای پانل تخت‌تر شدن پانل مفروض فرکانس طبیعی آن هم کمتر می‌شود و این موضوع برای هر چهار نوع پانل بررسی شده صادق می‌باشد. بیشتر شدن انحنای پانل سبب افزایش سختی آن می‌شود که می‌توان گفت دلیل بیشتر بودن فرکانس طبیعی پانل در این حالت است.

فرکانس طبیعی پانل‌های ساندویچی دو انحنایی و تأثیر پارامترهای مختلف روی آن در نمودارهای 4 تا 9 مورد بررسی قرار گرفت. حال تأثیر شکل پانل در میزان ارتعاش آزاد در جدول 3 برای پانل‌های ساندویچی با انحنای مختلف از جمله سیلندری شکل، سهمی‌گون هذلولی و پانل‌های ساندویچی تخت ارائه شده است. در جدول 3 زاویه هسته آگرتیک برابر 15 درجه و ضخامت رویه‌ها و هسته به ترتیب 0.01 و 0.08 متر فرض شده است. پانل سهمی‌گون هذلولی

- [12] Kar, V. R. and Panda, S. K., "Large Deformation Bending Analysis of Functionally Graded Spherical Shell Using Fem" *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 53, No. 4, pp. 661-679, 2015.
- [13] Kiani, Y., "Dynamics of Fg-Cnt Reinforced Composite Cylindrical Panel Subjected to Moving Load" *Thin-Walled Structures*, Vol. 111, pp. 48-57, 2017.
- [14] Zghal, S., Frikha, A. and Dammak, F., "Free Vibration Analysis of Carbon Nanotube-Reinforced Functionally Graded Composite Shell Structures" *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 53, pp. 132-155, 2018.
- [15] Mercan, K., Baltacıoglu, A. K. and Civalek, Ö., "Free Vibration of Laminated and Fgm/Cnt Composites Annular Thick Plates with Shear Deformation by Discrete Singular Convolution Method" *Composite Structures*, Vol. 186, pp. 139-153, 2018/02/15/.
- [16] Gibson, L. J. and Ashby, M. F., "Cellular Solids : Structure and Properties", Cambridge University Press, 1997.
- [17] Lim, T.-C., "Auxetic Materials and Structures", 2015.
- [18] Khorshidi, K., Bahrami, M., Karimi, M. and Ghasemi, M., "A Theoretical Approach for Flexural Behavior of Fg Vibrating Micro-Plates with Piezoelectric Layers Considering a Hybrid Length Scale Parameter" *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, Vol. 6, No. 1, pp. 51-68, 2020.
- [19] Khorshidi, K. and Karimi, M., "Flutter Analysis of Sandwich Plates with Functionally Graded Face Sheets in Thermal Environment" *Aerospace Science and Technology*, Vol. 95, pp. 105461-105461, 2019.
- [20] Liu, Q., Fu, J., Wang, J., Ma, J., Chen, H., Li, Q. and Hui, D., "Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with Epp Foam" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 130, pp. 236-247, 2017.
- [21] Wang, Z., Qin, Q., Chen, S., Yu, X., Li, H. and Wang, T. J., "Compressive Crushing of Novel Aluminum Hexagonal Honeycombs with Perforations: Experimental and Numerical Investigations" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 126-127, pp. 187-195, 2017.
- [22] Nejati, M., Ghasemi-Ghalebahman, A., Soltanmaleki, A., Dimitri, R. and Tornabene, F., "Thermal Vibration Analysis of Sma Hybrid Composite Double Curved Sandwich Panels" *Composite Structures*, Vol. 224, pp. 111035, 2019/09/15/.
- [23] Duc, N. D., Seung-Eock, K., Tuan, N. D., Tran, P. and Khoa, N. D., "New Approach to Study Nonlinear Dynamic Response and Vibration of Sandwich Composite Cylindrical Panels with Auxetic Honeycomb Core Layer" *Aerospace Science and Technology*, Vol. 70, pp. 396-404, 2017.
- [24] Wang, Z., Zulifqar, A. and Hu, H., "Auxetic Composites in Aerospace Engineering" *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, pp. 213-240, 2016.
- [25] Heidari-Rarani, M., Alimirzaei, S. and Torabi, K., "Analytical Solution for Free Vibration of Functionally Graded Carbon Nanotubes (Fg-Cnt) Reinforced Double-Layered Nano-Plates Resting on Elastic Medium" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 3, pp. 55-66, 2015.
- [26] Amini, A., Faraji, A. and Mohammadimehr, M., "Vibration Suppression of Composite Plate Reinforced by Cnts on Elastic Foundation Using Active Control Method" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1243-1254, 2021.
- [27] Shen, H.-S., "Nonlinear Bending of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Plates in Thermal Environments" *Composite Structures*, Vol. 91, No. 1, pp. 9-19, 2009/11/01/.
- [28] Zhu, P., Lei, Z. X. and Liew, K. M., "Static and Free Vibration Analyses of Carbon Nanotube-Reinforced Composite Plates Using Finite Element Method with First Order Shear Deformation Plate Theory" *Composite Structures*, Vol. 94, No. 4, pp. 1450-1460, 2012/03/01/.
- [29] Zhu, X., Zhang, J., Zhang, W. and Chen, J., "Vibration Frequencies and Energies of an Auxetic Honeycomb Sandwich Plate" *Mechanics*

آزاد محاسبه گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که ارتعاش آزاد پانل ساندویچی بررسی شده زمانی که ضریب پواسن هسته، ناشی از زوایای سلول آگرتیک منفی باشد، کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی اثر پارامترهای مؤثر رویه‌های کامپوزیتی و پارامترهای هندسی هسته لانه‌زنبوری مشخص شد که فرکانس طبیعی پانل ساندویچی را می‌توان با توجه به کاربرد خواسته شده تغییر داد. به‌نحوی که با کاهش $vcnt$ و استفاده از مدل توزیع بار مدرج تابعی نانولوله کربنی معرفی شده در طول ضخامت پانل می‌توان فرکانس طبیعی آن را کاهش داد. همچنین نشان دادیم افزایش نسبت طول لبه عمودی به مورب در سلول آگرتیکی هسته باعث افزایش فرکانس طبیعی پانل می‌شود. همچنین نشان دادیم افزایش ضخامت هسته آگرتیکی در حالتی که ضخامت کلی پانل ثابت باشد باعث کاهش فرکانس طبیعی می‌گردد در صورتی که با افزایش نسبت طول به ضخامت پانل باعث بیشتر شدن فرکانس طبیعی می‌شود. همچنین فرکانس طبیعی بی‌بعد برای دیگر شکل‌های پانل‌های ساندویچی از جمله سهمی‌گون هذلولی، سیلندری شکل و ورق‌های سخت ساندویچی ارائه گردید.

5- مراجع

- [1] Haghighi, m., Ansari Khalkhali, R. and Hassanzadeh-Aghdam, m. k., "Micromechanical Analysis of Electro-Elastic Response of Polymer Composites Reinforced with Fuzzy Fiber Containing Cnts" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 485-498, 2019.
- [2] Liew, K. M., Lei, Z. X. and Zhang, L. W., "Mechanical Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube Reinforced Composites: A Review" *Composite Structures*, Vol. 120, pp. 90-97, 2015.
- [3] Liew, K. M., Pan, Z., Zhang, L.-W., Liew, K. M., Pan, Z. and Zhang, L.-W., "The Recent Progress of Functionally Graded Cnt Reinforced Composites and Structures" *SCPMA*, Vol. 63, No. 3, pp. 234601-234601, 2020.
- [4] Msekh, M. A., Cuong, N. H., Zi, G., Areias, P., Zhuang, X. and Rabczuk, T., "Fracture Properties Prediction of Clay/Epoxy Nanocomposites with Interphase Zones Using a Phase Field Model" *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 188, pp. 287-299, 2018.
- [5] Silvestre, J., Silvestre, N. and De Brito, J., "An Overview on the Improvement of Mechanical Properties of Ceramics Nanocomposites" *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2015, 2015.
- [6] Arash, B. and Wang, Q., "A Review on the Application of Nonlocal Elastic Models in Modeling of Carbon Nanotubes and Graphenes" *Computational Materials Science*, Vol. 51, No. 1, pp. 303-313, 2012.
- [7] Talebitooti, M. and Fadaee, M., "A Magnetostrictive Active Vibration Control Approach for Rotating Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Sandwich Composite Beam" *Smart Materials and Structures*, Vol. 28, No. 7, pp. 075007, 2019/05/21/.
- [8] Wang, Q. and Varadan, V. K., "Vibration of Carbon Nanotubes Studied Using Nonlocal Continuum Mechanics" *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 2, pp. 659-659, 2006.
- [9] Lei, Z. X., Liew, K. M. and Yu, J. L., "Free Vibration Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Plates Using the Element-Free Kp-Ritz Method in Thermal Environment" *Composite Structures*, Vol. 106, pp. 128-138, 2013.
- [10] Yas, M. H., Pourasghar, A., Kamarian, S. and Heshmatia, M., "Three-Dimensional Free Vibration Analysis of Functionally Graded Nanocomposite Cylindrical Panels Reinforced by Carbon Nanotube" *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 583-590, 2013.
- [11] Zhang, L. W., Lei, Z. X., Liew, K. M. and Yu, J. L., "Static and Dynamic of Carbon Nanotube Reinforced Functionally Graded Cylindrical Panels" *Composite Structures*, Vol. 111, No. 1, pp. 205-212, 2014.

- of Advanced Materials and Structures, Vol. 26, No. 23, pp. 1951-1957, 2019/12/02, 2019.
- [30] Tornabene, F., Viscoti, M. and Dimitri, R., "Higher Order Theory for the Modal Analysis of Doubly-Curved Shells with Lattice Layers and Honeycomb Cores" in: Eds., 2021.
- [31] Eipakchi, H. and mahboubi nasrekani, F., "Geometrically Nonlinear Frequency Analysis of Composite Cylinders with Metamaterial Honeycomb Layer and Adjustable Poisson's Ratio Using the Multiple Scale Method" Thin-Walled Structures, Vol. 169, 09/24, 2021.
- [32] Hashemi, S. and Jafari, A.-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.
- [33] Reddy, J. N. and Liu, C. F., "A Higher-Order Shear Deformation Theory of Laminated Elastic Shells" International Journal of Engineering Science, Vol. 23, No. 3, pp. 319-330, 1985/01/01/, 1985.
- [34] Nasrollah Barati, A. H., jafari, A. A., Etemadi Haghighi, S. and Maghsoudpour, A., "The Effect of Fluid Column Pressure on the Natural Frequencies of an Annular Sector Plate Made of Functionally Graded Material" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, pp. -, 2021.
- [35] Moraveji Tabasi, H., Eskandari -Jam, J., Malekzadeh, k., Heydari - Beni, M. and Shahmohammadi -Beni, S., "Free Vibration Analysis of Orthogonal Multi-Layer Hybrid Composite Plate Using Generalized Differential Quadrature Method" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 779-790, 2020.
- [36] Khorshidi, K., Taheri, M. and Ghasemi, M., "Sensitivity Analysis of Vibrating Laminated Composite Rectangular Plates in Interaction with Inviscid Fluid Using Efast Method" Mechanics of Advanced Composite Structures, Vol. 7, No. 2, pp. 219-231, 2020.
- [37] Khorshidi, K. and 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.
- [38] Khorshidi, K., Fallah, A. and Siahpush, A., "Free Vibrations Analysis of Functionally Graded Composite Rectangular Nanoplate Based on Nonlocal Exponential Shear Deformation Theory in Thermal Environment" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 109-120, 2017.
- [39] Wang, Q., Cui, X., Qin, B. and Liang, Q., "Vibration Analysis of the Functionally Graded Carbon Nanotube Reinforced Composite Shallow Shells with Arbitrary Boundary Conditions" Composite Structures, Vol. 182, pp. 364-379, 2017.
- [40] Pouresmaeeli, S. and Fazelzadeh, S. A., "Frequency Analysis of Doubly Curved Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Panels" Acta Mechanica 2016 227:10, Vol. 227, No. 10, pp. 2765-2794, 2016.
- [41] Emdadi, M., Mohammadimehr, M. and Navi, B., "Free Vibration of an Annular Sandwich Plate with Centric Facesheets and Fg Porous Cores Using Ritz Method" Advances in Nano Research, Vol. 7, pp. 109-123, 03/01, 2019.
- [42] Zeighami, V. and Golmakani, M. E., "Buckling Analysis of Nano Composite Plates Based on Combination of the Incremental Load Technique and Dynamic Relaxation Method" Mechanics of Advanced Composite Structures, Vol. 8, No. 1, pp. 133-148, 2021.



بررسی تجربی، عددی و بهینه‌سازی اثر اتصال چسبی تقویت‌کننده‌ها بر رفتار خمشی ورق‌های مشبک کامپوزیتی

علی عارفی اسگویی¹، علی داور^{2*}، محمدحسین علایی³، امین میرزایی¹، محسن حیدری بنی⁴، جعفر اسکندری جم⁵

- 1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
- 2- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
- 3- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
- 4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
- 5- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

* تهران، صندوق پستی 1774-15875، a_davar@mut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این پژوهش به بررسی تجربی و عددی اثر اتصال چسبی بر رفتار خمشی ورق کامپوزیتی مشبک پرداخته شده است. به منظور ساخت پانل کامپوزیتی مشبک، قالب فومی طراحی و ساخته شد و سپس از روش لایه‌چینی دستی برای ساخت تقویت‌کننده‌ها استفاده گردید. پس از اتمام ساخت تقویت‌کننده‌ها، در سطح تماس تقویت‌کننده‌ها با پوسته کامپوزیتی، از چسب آکسون H 9940 BK به عنوان ایجاد سطح اتصال بین صفحه کامپوزیتی و تقویت‌کننده برای نمونه اول و رزین LR520 برای نمونه دوم استفاده شد. نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمون تجربی خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. در این راستا به جهت تعیین خواص مکانیکی پارچه کربن، الیاف کربن، رزین و چسب، از آزمون‌های استاندارد استفاده شد. از نتایج حل عددی، جهت بررسی اندازه هندسه سلولی، پهنا و ضخامت، به منظور بهینه‌سازی و دست یافتن به استحکام خمشی ویژه و سفتی ویژه بالا در هندسه سلولی مربعی استفاده گردید. روش طراحی آزمایش به جهت تعیین تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است. از مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی، مشاهده شد که اتصال چسب آکسون نسبت به رزین، نیروی بیشتری را قبل از شروع تخریب و ایجاد آسیب در سازه تحمل می‌کند. در بررسی اثرات ضخامت و پهنا تقویت‌کننده بر رفتار خمشی پانل مشبک مشخص شد که افزایش ضخامت تا مقدار 14.87 میلی‌متر و پهنا تا مقدار 8.7 میلی‌متر باعث افزایش نیروی بی‌شینه ویژه می‌گردند.

دریافت: 1400/10/08

پذیرش: 1400/12/23

کلیدواژگان

ورق مشبک کامپوزیتی، اتصال چسبی، استحکام خمشی، اتصال مکانیکی

Experimental, Numerical Investigation and Optimization of Effect of Adhesive Joint on Flexural Behavior of grid-stiffened Composite Plates

Ali Arefi Osgoui¹, Ali Davar^{2*}, Mohammad Hossein Alaei³, Amin Mirzaei¹, Mohsen Heydari Beni¹, Jafar Eskandari Jam¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, a_davar@mut.ac.ir

Keywords

Lattice Composite Plates, Adhesive Joint, Flexural Strength, Mechanical Joint

Abstract

In this research, numerical and experimental investigations were performed to study the effect of the adhesive joint on the fractural behavior of the grid-stiffened composite plates. Foam format was designed to construct two samples of lattice composite plates, and the hand layup technique was used to prepare the ribs. Finally, the obtained ribs were connected to the composite shell in the interface of ribs with shell using Axson H9940 BK for first sample and LR520 resin adhesives for second sample. The prepared samples were analyzed using the three-point bending test. For this purpose, a test fixture was designed and constructed. The standard test of the crack release energy in the first and second mode, tensile test, and nol test were performed to evaluate the mechanical properties of the carbon cloth, carbon fibres, resin, and adhesive. The numerical solution of the problem and comparing the obtained results with experimental data revealed that the Axson adhesive connections can tolerate more force in comparison with resin adhesive connections before structure destruction.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Arefi Osgoui, A., Davar, A., Alaei, M. H., Mirzaei, A., Heydari Beni, M., Eskandari Jam, J., "Experimental, Numerical Investigation and Optimization of Effect of Adhesive Joint on Flexural Behavior of grid-stiffened Composite Plates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1687-1699, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.544900.1764>

1- مقدمه

یک سازه کاربردی متشکل از چند قسمت مختلف است که برحسب نیاز با تنوعی از اتصالات به یکدیگر متصل می‌شوند. با جایگزینی کامپوزیت‌های پلیمری بجای فولاد و آلومینیوم، باهدف سبک‌سازی در سازه‌های هوایی گرچه برخی از مشکلات بهبود می‌یابد اما موضوع اتصال در کامپوزیت به‌سادگی اتصال فلزات نیست. سوراخ‌کاری و رزوه زنی باعث ایجاد نقاط بحرانی در سازه‌های کامپوزیت پایه پلیمری می‌شود [1]. تقسیم‌بندی‌های گوناگونی از اتصالات کامپوزیتی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به سه دسته اتصال مکانیکی، اتصال چسبی و اتصال ترکیبی تقسیم‌بندی کرد. اتصالات مکانیکی نظیر پیچ و مهره، دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند. از مزایای این‌گونه اتصالات می‌توان به مواردی همچون سادگی انجام اتصال، آسیب‌پذیری کمتر نسبت به عوامل محیطی، امکان باز و بسته کردن اشاره کرد. همچنین از معایب این‌گونه اتصالات می‌توان به مواردی نظیر ایجاد تمرکز تنش در اطراف سوراخ‌ها، از بین رفتن پیوستگی الیاف در اثر سوراخ‌کاری و مقاومت کم آن‌ها در برابر بارهای نوسانی و خستگی اشاره کرد [2]. در اتصالات چسبی تنش بر روی کل سطح ناحیه اتصال توزیع می‌شود و برخلاف اتصال مکانیکی تمرکز تنش در محل اتصال ایجاد نمی‌شود. همچنین این‌گونه اتصالات مقاومت خوبی در برابر بارهای نوسانی و خستگی دارند. در مقابل، چسب‌ها نسبت به‌قرار گرفتن در معرض رطوبت دچار افت خواص می‌شوند و تغییرات دما نیز بر روی سفتی آن‌ها تأثیرگذار است. به‌گونه‌ای که در دماهای بالاتر از دمای گذار شیشه‌ای چسب، کاملاً منعطف خواهد شد. ازجمله معایب دیگر چسب‌ها می‌توان به ضعف آن‌ها در برابر تنش‌های پوسته کنی اشاره کرد [3]. در اتصالات چسبی، چسب با ایجاد یک لایه بین دو قطعه مورد اتصال، آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌نماید. اتصال چسبی متداول‌ترین نوع اتصال در سازه‌های کامپوزیتی است و به‌منظور برطرف کردن مشکلات مربوط به خواص لهدیگی، لمینیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن، توسعه داده شده‌اند.

چوان هر^۲ [4] در تحقیقی، مدل دوبعدی اتصال یک‌طرفه و همچنین اتصال دوطرفه دو فلز تحت کشش را در حالت الاستیک مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، معادلات حاکم بر تنش برشی ایجاد شده در لایه چسبی موردبررسی قرار داده شد. هارت اسمیت^۳ [5] در تحقیق خود لایه‌ها را به‌صورت الاستیک و از یک جنس و با ضخامت یکسان و لایه چسب میانی را به‌صورت پلاستیک مدل نمود. وی در ادامه، شکست در این اتصال را در اثر اعمال کشش بررسی کرد. احمد و همکاران [6] برخلاف سایر تحلیل‌های انجام‌شده، ضخامت لایه چسبی را متفاوت در نظر گرفته و همچنین لایه‌ها را به‌صورت ساده مدل‌سازی نمودند. زو^۴ و همکاران [7] مدل دوبعدی اتصال چسبی یک‌طرفه و اتصال تسمه‌های یک‌طرفه فلز با ماده مرکب تحت کشش را مورد بررسی قرار دادند. آویلا^۵ و همکارش [8] در تحقیق خود دو اتصال یک‌طرفه از مواد مرکب شیشه-اپوکسی تحت کشش را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایج به‌دست‌آمده را با روش عددی مقایسه نمودند. مورا^۶ و همکاران [9] در سال 2008 خواص مکانیکی چسب Resin Tech RT153FC را موردبررسی قرار داده و بر اساس آزمون‌های تجربی، استاندارد انرژی شکست مود اول و دوم را بیان کردند. آن‌ها هدف از انجام این تحقیق را بررسی ضخامت چسب، جهت مقایسه خواص مکانیکی عنوان کردند. جادهاو^۷ و همکاران [10] در تحقیقی

جهت بررسی مشخصات جذب انرژی پانل‌های کامپوزیتی مشبک با هندسه سلول مثلثی^۸ تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی پرداختند. در این تحقیق، از الیاف شیشه و از پروپیلن به‌عنوان ماتریس و اتصال چسبی استفاده کرده بودند. آن‌ها آزمون و شبیه‌سازی‌های المان محدود را بر روی پانل‌های ایزوگرید تحت بار خمشی سه‌نقطه‌ای انجام دادند. ژانگ^۹ و همکاران [11] روش شکست پیشرفته‌ای را به‌منظور شبیه‌سازی و پیشرفت مدهای شکست چندگانه صفحات و پوسته‌های کامپوزیتی مشبک، بر اساس یک مدل المان تقویت‌شده مثلثی بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق چسبندگی بین ورق و مشبک را از جنس اپوکسی انتخاب کردند. طحانی و همکاران [12] اولویت قرار گرفتن تقویت‌کننده‌ها را از لحاظ بیشینه استحکام ورق مشبک کامپوزیتی، به ترتیب نمونه با سلول واحد به شکل مربعی درشت، مربعی ریز، مثلثی و لوزی و از لحاظ حداکثر سفتی ویژه، به ترتیب نمونه مربعی درشت، مربعی ریز، لوزی و مثلثی ارزیابی نمودند. آذر افزا و همکاران [13] در تحقیقی به بررسی ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک پرداختند. در این تحقیق، سه نمونه کامپوزیت با جنس و ضخامت مختلف با روش لایه‌گذاری دستی در قالب سیلیکونی صورت گرفت و تحت آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای، نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش تجربی نشان داد که حتی بعد از واماندگی پوسته، هسته مشبک به تحمل بار ادامه می‌دهد و پس از شکست تقویت‌کننده‌ها آسیب وارد پوسته می‌شود. داور و همکاران [14] با انجام آزمون‌های 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 آزمون ضربه سرعت پایین، دو پانل ساندویچی با هسته مشبک ساخته‌شده و تحت بارگذاری سقوط آزاد ضربه زننده با نوک نیم کرووی قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی عددی، از انواع المان‌های سه‌بعدی و حل آسیب پیش‌رونده به کمک برنامه‌نویسی با زبان فورترن در نرم‌افزار، کمک گرفته شده است.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تجربی و عددی اثر اتصال چسبی در ورق‌های کامپوزیتی مشبک بر رفتار خمشی است. برای این منظور دو نوع ورق کامپوزیتی مشبک با اتصال چسب اکسون H 9940 BK و رزین LR520 در نظر گرفته شد. برای ساخت این ورق‌ها، قالب فومی طراحی و ساخته شد. از روش لایه‌چینی دستی جهت فرآیند ساخت استفاده شد. نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمون تجربی خمشی سه‌نقطه‌ای قرار گرفت که برای این منظور قید و بند طراحی و ساخته شد. برای بررسی درستی نتایج به‌دست‌آمده تحلیل عددی نیز انجام‌شده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. از حل عددی، به بررسی اندازه هندسه سلولی، پهنا و ضخامت، جهت بهینه‌سازی و دست یافتن به استحکام خمشی ویژه و سفتی ویژه بالا در هندسه سلولی مربعی استفاده گردید. به کمک روش طراحی آزمایش تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی عددی، تعیین شده است.

2- روش پژوهش

در این پژوهش، ابتدا مراحل ساخت سازه‌ی پانل مشبک کامپوزیتی شامل مدل‌سازی و تهیه‌ی نقشه ساخت برای قالب، نحوه‌ی رشته‌پیچی و پخت سازه تشریح شده است. در بخش بعدی، مراحل مدل‌سازی عددی این نوع سازه‌ها تشریح شد. سپس اصول بهینه‌سازی و روش طراحی آزمایش‌ها تبیین شده است. در بخش آخر به بهینه‌سازی متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده در

⁶ De Moura

⁷ Jadhav

⁸ Isogrid

⁹ Zhang

¹ TG

² Shih-Chuan Her

³ Hart Smith

⁴ Zou

⁵ Avila

این پژوهش اشاره شده است.

1-2- طراحی و ساخت نمونه تجربی

مراحل ساخت سازه‌ی موردنظر بدین ترتیب است که ابتدا طرح دوبعدی سازه مشبک از برنامه استخراج شده و به کمک دستگاه CNC یک قالب از جنس فوم ساخته شد، سپس با استفاده از روش لایه‌چینی دستی، الیاف درون شیارهای قالب فومی رشته‌پیچی شده تا سازه مشبک شکل بگیرد. پس از اتمام رشته‌پیچی، صفحه لمینیت کامپوزیتی بر روی سازه مشبک لایه‌چینی می‌شود. به کمک روش ایجاد خلأ، رزین اضافی و حفره‌های هوای موجود در سازه تخلیه می‌شود. در آخرین مرحله سازه در کوره پخت می‌گردد.

ابعاد ورق کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM D7264، 300×125 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سلول‌ها با هندسه مربعی 50 میلی‌متری با ضخامت تقویت‌کننده 8 میلی‌متر و پهنای ریب 6 میلی‌متر و همچنین ضخامت پوسته 4 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

1-1-2- مواد و ترکیبات

برای ساخت صفحه مشبک از الیاف کربن T700 استفاده شده است. رزین مورد استفاده معادل رزین اپوکسی و سخت‌کننده بوده و به نسبت 4 به 1 طبق دستور سازنده مخلوط شده‌اند. در جدول 1 نوع الیاف و رزین به کار رفته ارائه شده است.

جدول 1 مشخصات الیاف و رزین

Table 1 Specifications of fibers and resins

پارامتر	سازنده	مشخصه
رزین	پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران	LR520 (4)
هاردنر	پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران	HY520 (1)
پارچه کربن	ACP	Carbon Fabric T300
الیاف کربن	ACP	Carbon Fiber T700
چسب آکسون	Sika	H 9940 BK

2-1-2- ساخت نمونه‌ها

به‌منظور ساخت کامپوزیت‌های مشبک از روش لایه‌چینی دستی بر روی قالب فومی استفاده گردید. در این روش یک بلوک فومی به کمک دستگاه CNC تراش داده شده و به‌عنوان قالب فومی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در شکل 1 نمونه قالب فومی نشان داده شده‌است.



Fig. 1 Sample of grooved foam mold

شکل 1 نمونه قالب فومی شیاردار

در مرحله ساخت نمونه، به جهت جلوگیری از اتصال مخرب بین سازه و قالب فومی از واکس HL620 استفاده شد تا یک لایه بسیار نازک بر روی قالب فومی شکل بگیرد. رزین و هاردنر با نسب جرمی 4 به 1 به‌منظور ساخت فاز

زمینه کامپوزیت مشبک با یکدیگر ترکیب شده است. رزین استفاده شده LR520 و هاردنر استفاده شده HY 520 می‌باشد. در مرحله بعد الیاف کربن T700 12K را به رزین آماده شده آغشته و در شیارهای قالب فومی که به‌اصطلاح ریب گفته می‌شود، جای گذاری می‌شوند که در شکل 2 نشان داده شده است. این مرحله تا زمان ایجاد ضخامت مورد نیاز تکرار می‌شود. پس از اتمام این مرحله بر روی سطح ایجاد شده از رشته‌های کربن، چسب آکسون H 9940 BK به‌صورت یکنواخت زده می‌شود و هدف از این کار ایجاد اتصال چسبی است که در شکل 3 نشان داده شده است.

پارچه‌های کربن T300 بریده شده به‌منظور ساخت پوسته به رزین آغشته شده و بر روی قالب فومی قرار می‌گیرند. این عمل تا ایجاد ضخامت 4 میلی‌متری تکرار می‌شود، که در شکل 4 نشان داده شده‌است.

به‌منظور تکمیل فرآیند ساخت، پس از اتمام لایه‌چینی، به کمک روش وکیوم رزین اضافی و حفره‌های هوای موجود در سازه تخلیه می‌شود. در این روش با استفاده از نایلون یک محیط ایزوله و عایق ایجاد می‌شود و با ایجاد فشار 0.9- بار هوای داخل سازه به‌صورت کامل تخلیه می‌شود. این کار در دمای محیط و به مدت 3 ساعت انجام می‌گیرد. شکل 5 نحوه استفاده از روش وکیوم را نشان می‌دهد.



Fig. 2 Lay-up of sample grid stiffness and resin joint

شکل 2 لایه‌چینی تقویت‌کننده‌های نمونه و ایجاد اتصال رزین



Fig. 3 Lay-up of sample grid stiffness and adhesive joint

شکل 3 لایه‌چینی تقویت‌کننده‌های نمونه و ایجاد اتصال چسبی



Fig. 4 Lay-up shell on grid stiffness

شکل 4 لایه‌چینی پوسته بر روی تقویت‌کننده‌ها

سنتام به کد STM-150 با ظرفیت 15 تن انجام شده است. شکل 8 نحوه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

2-2-1- آزمون‌های خواص مواد

به منظور مدل کردن نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس، نیاز به ثوابت مهندسی تقویت‌کننده و پوسته است. آزمون‌های تجربی جهت تعیین خواص مواد با استفاده از دستگاه سنتام و بر اساس استاندارد مربوطه انجام شده است. در ابتدا بر اساس آزمون استاندارد کشش ASTM D3039، 3 نمونه چندلایه کامپوزیتی جهت کشش آماده شده است که در شکل 9 قابل مشاهده است. بر اساس آزمون کششی انجام شده، ثوابت مهندسی پارچه و الیاف کربن در جدول 2 آورده شده است. و در شکل 10 نمودار تنش-کرنش قابل مشاهده می‌باشد.



Fig. 8 Perform three-point bending test

شکل 8 انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای



Fig. 9 Multi-layer composite samples for tensile testing

شکل 9 نمونه‌های چندلایه کامپوزیت جهت آزمون کشش

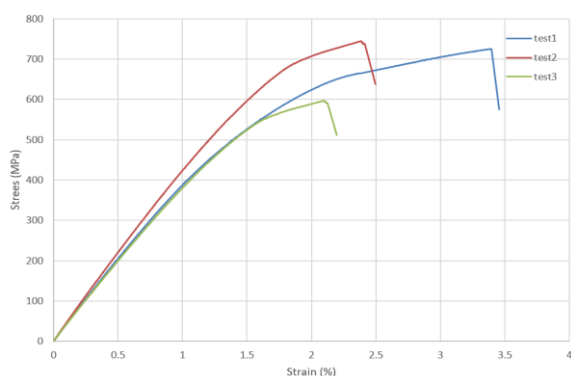


Fig. 10 Stress-strain diagram of laminated composite

شکل 10 نمودار تنش-کرنش چندلایه کامپوزیتی

پس از اتمام مرحله وکیوم سازه آماده شده، سیکل پخت خود را در دمای محیط می‌گذرانند. سپس در آن با دمای 60 درجه به مدت 10 ساعت پخت می‌شود. در شکل 6 نمایی از آن نشان داده شده است. شکل 7 نمونه آماده شده ورق کامپوزیتی مشبک را نشان می‌دهد. جهت ساخت نمونه دوم در ناحیه اتصال بین پوسته و تقویت‌کننده از رزین اپوکسی LR520 استفاده گردیده و فرآیند ساخت مطابق نمونه اول تکرار شده است.

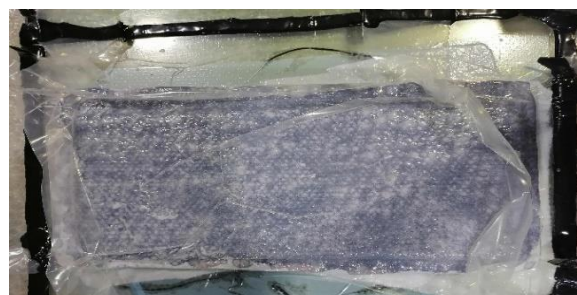


Fig. 5 Using the vacuum method to drain excess air and resin

شکل 5 استفاده از روش وکیوم جهت تخلیه هوا و رزین اضافی



Fig. 6 View of the the Oven to apply temperature

شکل 6 نمایی از آن جهت اعمال دما

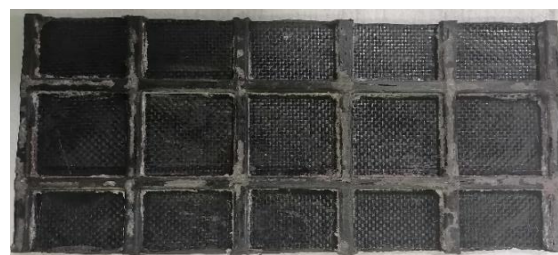


Fig. 7 Grid stiffened composite plate after completing the manufacturing process

شکل 7 ورق کامپوزیتی مشبک پس از تکمیل فرآیند ساخت

2-2-2- آزمون‌های تجربی

پس از اتمام ساخت نمونه‌ها، به منظور بررسی رفتار خمشی، از آزمون خمش سه نقطه‌ای استفاده گردیده است. در این آزمون، ورق کامپوزیتی مشبک بر اساس استاندارد ASTM D7264 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری مورد نیاز برای آزمون خمش سه نقطه‌ای، قید و بندی طراحی و ساخته شد. سرعت بارگذاری طبق استاندارد ذکر شده 2 میلی‌متر بر دقیقه است که شرایط بارگذاری شبه استاتیکی را فراهم می‌سازد. آزمون خمش سه نقطه‌ای، توسط دستگاه آزمون کشش و فشار شرکت

بر اساس آزمون استاندارد نتایج DCB و ENF با روابط 1 و 2 به ترتیب انرژی شکست مود اول و انرژی شکست مود دوم در جدول 3 و جدول 4 بیان گردیده است. و نمودار نیرو-جابجایی برای آزمون‌های استاندارد DCB در شکل 15 و شکل 16 و برای آزمون ENF در شکل 17 و شکل 18 قابل مشاهده است.

$$G_I = \frac{3 P^2 C_3^2}{2 A_1 b h} \quad (1)$$

$$G_{II} = \frac{3 m P_{max}^2 a_{pc}^2}{2 B} \quad (2)$$



Fig. 13 Samples prepared for DCB and ENF tests

شکل 13 نمونه‌های تهیه شده برای آزمون ENF و DCB

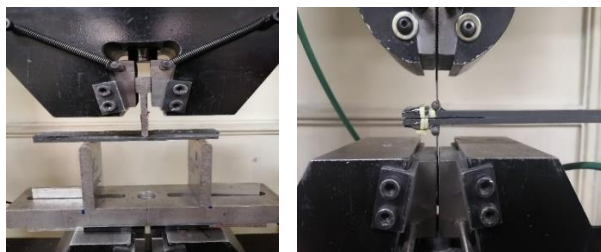


Fig. 14 To the right of the DCB standard test and to the left of the ENF standard test

شکل 14 سمت راست آزمون استاندارد DCB و سمت چپ آزمون استاندارد ENF

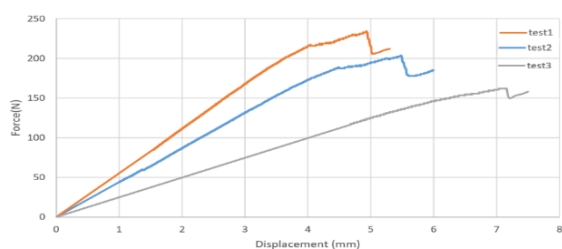


Fig. 15 Force- displacement diagram of DCB test adhesive

شکل 15 نمودار نیرو-جابجایی چسب آزمون DCB جهت تعیین انرژی شکست مود اول

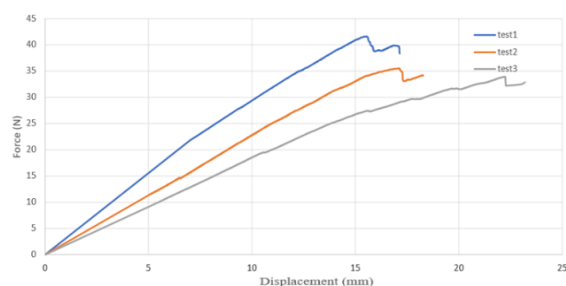


Fig. 16 Force- displacement diagram of DCB test resin

شکل 16 نمودار نیرو-جابجایی رزین آزمون DCB جهت تعیین انرژی شکست مود اول

جهت تعیین مدول الاستیک و استحکام کششی ریب‌های تقویت‌شده کامپوزیتی از آزمون حلقه استفاده می‌شود. نمونه‌های این آزمون طبق استاندارد ASTM D2290 ساخته و با کمک دستگاه کشش مورد آزمون قرار می‌گیرد. در شکل 11 نحوه آزمون کشش حلقه و نمونه‌های آزمون حلقه قابل مشاهده است.

نتایج آزمون حلقه بر اساس استاندارد ذکر شده برای نمونه‌های الیاف کربن به صورت منحنی‌های تنش- کرنش در شکل 12 نشان داده شده است. بر اساس شیب نمودار تنش- کرنش پارامتر مدول طولی تعیین می‌گردد که در جدول 2 قابل مشاهده است.

در ادامه بر اساس آزمون تجربی DCB و ENF در اتصال چسب و رزین بر اساس استاندارد ASTM D5528 و ASTM D7905، 3 نمونه از هر آزمون آماده گردیده است که نحوه آماده‌سازی نمونه هر دو آزمون یکسان بوده و در شکل 13 قابل مشاهده می‌باشد. سپس با استفاده از دستگاه ستنام ذکر شده مورد آزمایش قرار می‌گیرد که در شکل 14 قابل مشاهده است.

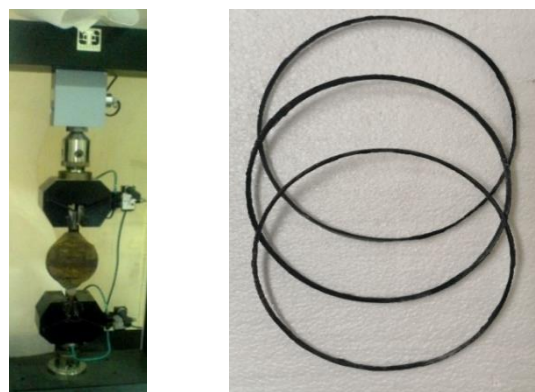


Fig. 11 Samples of ring test and ring tension test

شکل 11 نمونه‌های آزمون حلقه و آزمون کشش حلقه

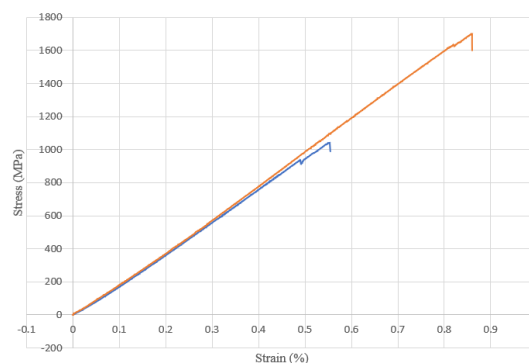


Fig. 12 Stress-strain diagram of the ring test

شکل 12 نمودار تنش- کرنش آزمون حلقه

جدول 2 ثوابت مهندسی پارچه و الیاف کربن

Table 2 Engineering constants of carbon fibers and textile

مقدار (MPa)	ثوابت مهندسی الیاف کربن	مقدار (MPa)	ثوابت مهندسی پارچه کربن
E ₁	170000	E ₁	42000
E ₂	10000	E ₂	42000
G ₁₂	5000	G ₁₂	5000
V ₁₂	0.3	V ₁₂	0.1

شده است. برای مش‌بندی از المان پوسته پیوسته SC8R استفاده شده است. از تئوری تخریب هشین¹ به‌منظور پیش‌بینی تخریب در سازه استفاده شده است. شکل 19 نمای شماتیک از مدل‌سازی، مش‌بندی و شرایط تکیه‌گاهی سازه را نشان می‌دهد. شکل 20 شرایط مرزی و نقاط مرجع را نشان می‌دهد.

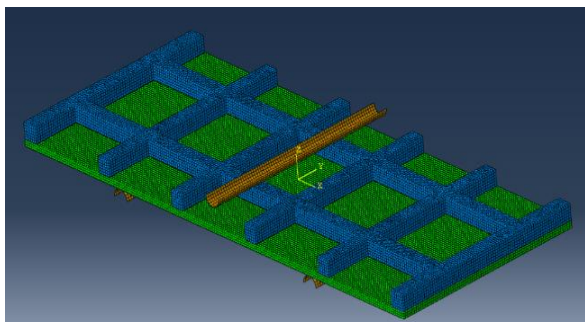


Fig. 19 Schematic view of modeling

شکل 19 نمای شماتیک مدل‌سازی

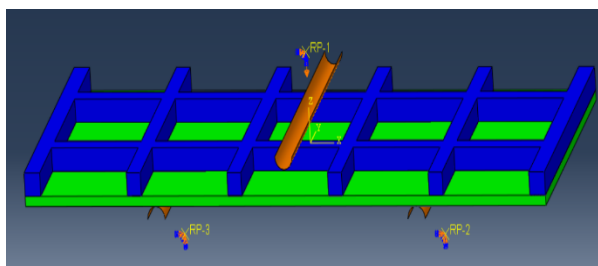


Fig. 20 Boundary conditions and reference points

شکل 20 شرایط مرزی و نقاط مرجع

پس از مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی، با توجه به اعمال بارگذاری با یک نرخ ثابت جابجایی و همچنین شبه استاتیکی بودن مسئله، در مرحله تعیین نوع آنالیز، تحلیل به‌صورت استاتیکی انتخاب شد و در ادامه به‌منظور اتصال بین تقویت‌کننده‌ها از اتصال چسبی استفاده شده است. به‌منظور دستیابی به بهترین نتایج حل عددی مسئله، این تحلیل با تعداد المان‌های متفاوت انجام شد. در انتها با افزایش تعداد المان‌های در نظر گرفته شده، جواب‌های به‌دست‌آمده همگرایی مناسبی داشته‌اند. با توجه به شکل 21 تعداد 19500 المان برای رسیدن به جواب مناسب کافی است.

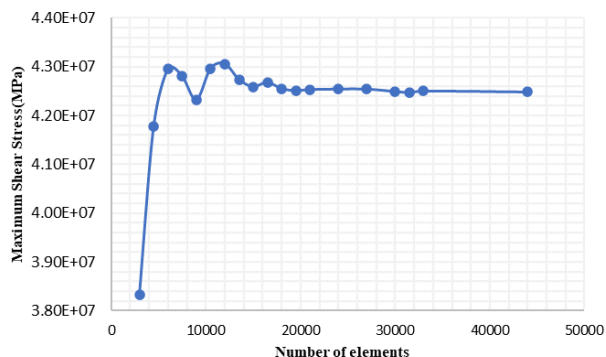


Fig. 21 Convergence diagram of the number of elements

شکل 21 نمودار همگرایی تعداد المان

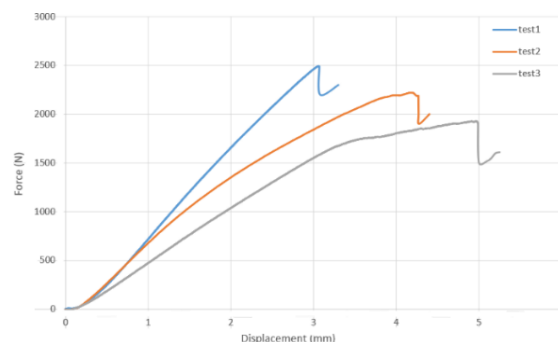


Fig. 17 Force-displacement diagram of ENF test adhesive

شکل 17 نمودار نیرو-جابجایی چسب آزمون ENF جهت تعیین انرژی شکست مود دوم

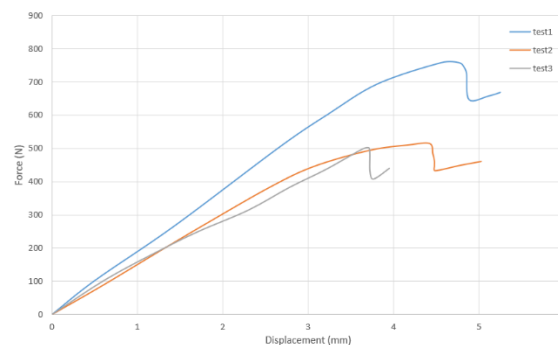


Fig. 18 Force-displacement diagram of ENF test resin

شکل 18 نمودار نیرو-جابجایی رزین آزمون ENF جهت تعیین انرژی شکست مود دوم

جدول 3 مقادیر آزمون DCB برای چسب و رزین جهت تعیین انرژی شکست مود اول
Table 3 DCB test values for adhesives and resins to determine the failure energy of the first mode

نمونه	مقادیر مود اول چسب (KJ/m ²)	مقادیر مود اول رزین (KJ/m ²)
نمونه اول	0.45	0.5
نمونه دوم	0.35	0.4
نمونه سوم	0.25	0.3

جدول 4 مقادیر آزمون ENF برای رزین و چسب جهت تعیین انرژی شکست مود دوم
Table 4 ENF test values for adhesives and resins to determine the failure energy of the second mode

نمونه	مقادیر مود اول چسب (KJ/m ²)	مقادیر مود اول رزین (KJ/m ²)
نمونه اول	2.7	1.12
نمونه دوم	2.9	1.23
نمونه سوم	3.12	1.4

3-2- شبیه‌سازی اجزاء محدود

به‌منظور بررسی صحت نتایج تجربی از شبیه‌سازی اجزاء محدود استفاده شده و شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. در مرحله مدل‌سازی، با توجه به ابعاد و اندازه‌های ذکرشده برای پوسته و تقویت‌کننده‌ها در محیط گرافیکی نرم‌افزار آباکوس سازه مدل‌سازی هندسی شده و مدل‌سازی شرایط تکیه‌گاهی بر اساس استاندارد ASTM D7264 مدل

¹ Hashin

4-2- طراحی آزمایش¹

به دلیل وجود مقادیر کمی زیاد در هر یک از متغیرهای ذکر شده، و عدم توانایی در انجام شبیه‌سازی و استخراج نتایج جهت تعیین نمونه بهینه، بحث طراحی آزمایش جهت کاهش زمان و سهولت در انتخاب تعداد نمونه شبیه‌سازی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته شده است.

در راستای انجام این پژوهش، از طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح استفاده شده است.

1-4-2 روش سطح پاسخ

این روش برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مورد استفاده است. در این روش، پاسخ به صورت یک رویه یکپارچه ارائه می‌شود. بسته به آن که طراحی آزمایش فقط بین دو محدوده (حد بالا و حد پایین) و یا خارج باشد، به ترتیب از دو روش باکس-بنکن² و مرکب مرکزی استفاده می‌شود.

در راستای پژوهش انجام‌شده جهت بررسی اندازه سلول، ضخامت و پهنای تقویت‌کننده از روش سطح پاسخ استفاده شده است که در جدول 5 پارامترها و متغیرها نشان داده شده است.

بر اساس استفاده از روش سطح پاسخ، و داده‌های متغیر به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت³ آزمایش‌ها مشخص می‌گردد. جدول 6 تعداد آزمایش‌ها را بر اساس ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و سائز هندسه ابعادی نشان می‌دهد.

جدول 5 پارامترها و سطوح تعیین‌شده

Table 5 Parameters and levels set

پارامتر	سطوح	واحد
ضخامت	5 الی 20	میلی متر
پهنای تقویت‌کننده	6 الی 10	میلی متر
سائز سلول	50 الی 100	میلی متر

جدول 6 جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها

Table 6 Experimental design table

شماره نمونه	عامل شماره 1 ضخامت ریب (mm)	عامل شماره 2 عرض ریب (mm)	عامل شماره 3 هندسه تقویت‌کننده (Cm ²)
1	8.8	7.81057	5
2	6.28	8.20492	7.25
3	11.6	10	7.925
4	20	10	8.125
5	6.28	8.20492	7.25
6	6	10	10
7	13.7	6.08	7.25
8	15.8	6	5
9	20	7.6	8.125
10	20	7.48	5
11	14.4	8.2	6.5
12	6	6	5
13	6	6	10
14	13.7	6.08	7.25
15	13.7	8.2	9.90813
16	20	10	8.125
17	13.7	8.2	9.90813
18	20	6	10
19	13.7	8.2	9.90813
20	11.25	10	5

3- نتایج و بررسی

در این قسمت نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمون تجربی ورق کامپوزیتی مشبک ارائه شده است. شکل 22 نمونه آزمون شده را بعد از آسیب نشان می‌دهد.

مطابق شکل 23 نمودار نیرو-جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی، نمونه کامپوزیت مشبک با اتصال چسب آکسون قابل مشاهده است. نتایج تجربی و عددی که شامل نیرو، جابجایی و جذب انرژی در جدول 7 بررسی و مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در شکل 23 نمودار عددی و تجربی تا نقطه تخریب که بیانگر بیشترین نیروی قابل تحمل سازه است، رسم شده است.



(الف - ا)



(ب - ب)

Fig. 22 a) Tested sample for adhesive joint structure b) Tested sample for resin joint structure

شکل 22 الف) نمونه بعد از انجام آزمون برای سازه اتصال چسبی ب) نمونه بعد از انجام آزمون برای سازه اتصال رزین

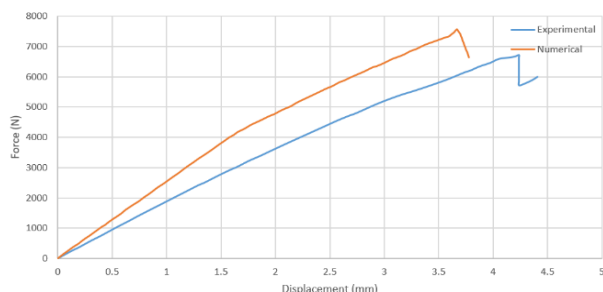


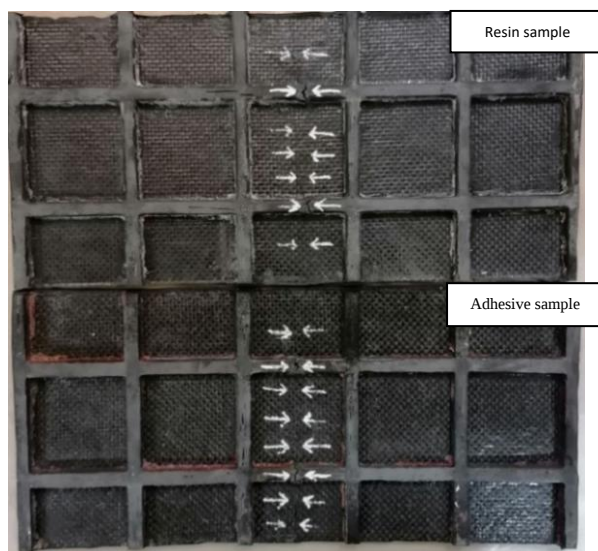
Fig. 23 Numerical and experimental results of joint samples with Axson adhesive

شکل 23 نتایج عددی و تجربی نمونه اتصال با چسب آکسون

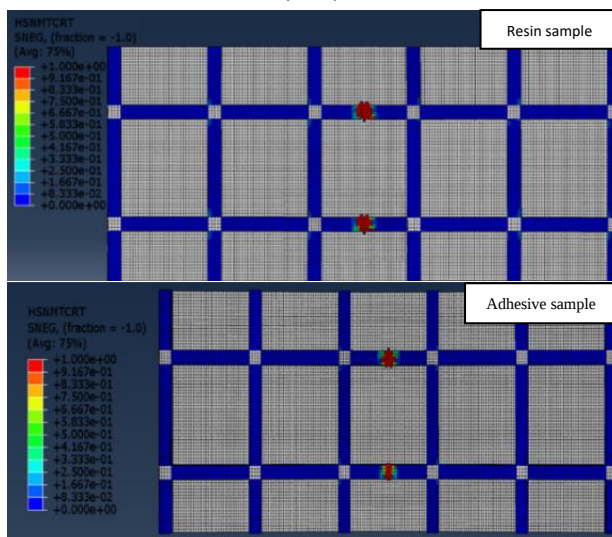
³ Design Expert

¹ Design of Experiment

² Box-Behnken



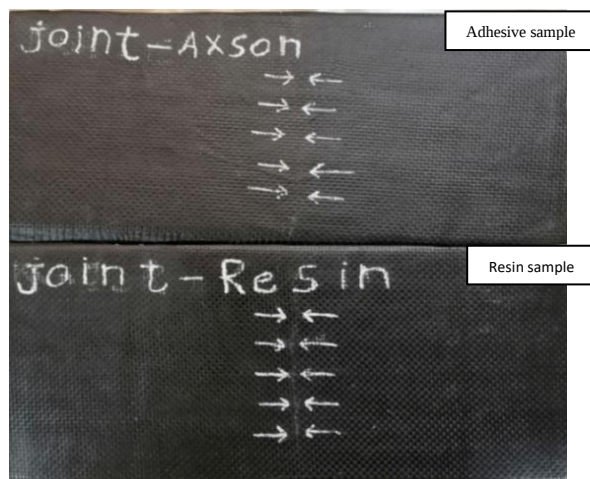
(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 25 a) Failure of composite grid-stiffened plate in experimental test b) Failure of composite grid-stiffened plate in numerical simulation with adhesive joint and resin

شکل 25 الف) شکست ورق کامپوزیت مشبک در آزمون تجربی ب) شکست ورق کامپوزیتی مشبک در شبیه‌سازی عددی با اتصال چسبی و رزین



(الف-ا)

جدول 7 بررسی نتایج تجربی و عددی اتصال چسب آکسون

Table 7 Investigation of experimental and numerical results of axson adhesive joint

نیروی بیشینه (N)	جذب انرژی (N.mm)	بیشترین جابجایی (mm)	
6700	15900	4.3	تجربی
7500	16181	3.8	عددی

بر اساس جدول 7 مقدار اختلاف نیرو بین گزارش آزمون تجربی و عددی 12٪، برای جذب انرژی 6٪ و برای جابجایی 11٪ است. در شکل 24 نمودار نیرو-جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی نمونه کامپوزیت مشبک با اتصال رزین قابل مشاهده است. نتایج تجربی و عددی در این شبیه‌سازی دارای اختلاف بسیار کمی می‌باشند. از آنجاکه همواره شرایط در فرایند ساخت سازه کاملاً ایده‌آل نبوده و با اشکالاتی همراه است و از طرفی شرایط مدل‌سازی و تحلیل در شبیه‌سازی عددی ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود، مقدار نیروی تحمل شده در شبیه‌سازی‌های عددی کمی بیشتر از نتایج تحلیل‌های تجربی متناظر است که این امر قابل پیش‌بینی بود. در جدول 8 نتایج تجربی و عددی اتصال با رزین ارائه شده‌است. بر اساس جدول 8، مقدار بیشینه نیرو آزمون تجربی و عددی 11٪، برای جذب انرژی 13٪ و برای جابجایی 5٪ است.

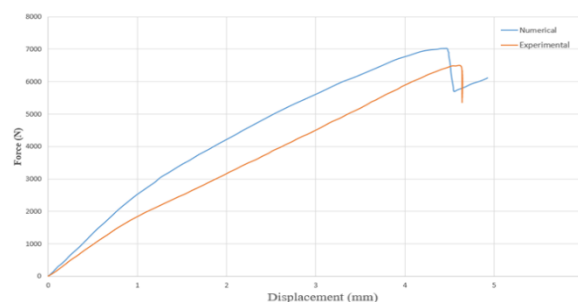


Fig. 24 Numerical and experimental results of resin joint samples

شکل 24 نتایج عددی و تجربی نمونه اتصال با رزین

جدول 8 بررسی نتایج عددی و تجربی اتصال با رزین

Table 8 Evaluation of numerical and experimental results of resin joint

نیروی بیشینه (N)	جذب انرژی (N.mm)	بیشترین جابجایی (mm)	
6300	16100	4.7	تجربی
7000	18483	4.5	عددی

بر اساس داده‌های ذکر شده در مورد بررسی اتصال دهنده‌ها، چسب آکسون به دلیل مقاومت در برابر خمش و تحمل نیرویی بیشتر نسبت به رزین، به عنوان اتصال دهنده انتخاب گردیده و در راستای انجام پژوهش از پارامترها و خواص تعیین شده برای چسب استفاده شده است. شکل 25 شکست ورق کامپوزیتی مشبک در شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی را نشان می‌دهد. بر این اساس شکست در سازه مشبک کامپوزیتی در قسمت تقویت‌کننده‌ها اتفاق می‌افتد و در صورت ادامه بارگذاری، پوسته شروع به شکست می‌کند. شکل 26 عدم شکست پوسته در زمان شکست تقویت‌کننده‌ها را نشان می‌دهد.

در شکل 27 نحوه جدایش اتصال، با در نظر گرفتن خواص و ضخامت برای اتصال دهنده قابل مشاهده است. در راستای این تحقیق به دلیل عدم توانایی در کنترل ضخامت برای اتصال دهنده از روش انتخاب ضخامت برای اتصال دهنده استفاده نشده است.

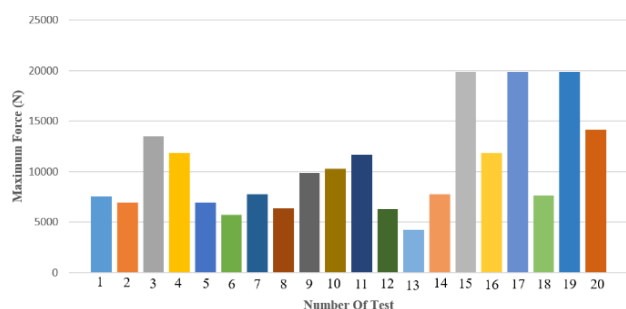


Fig. 28 Results of maximum force in Abaqus analysis

شکل 28 نتایج نیروی بیشینه حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس

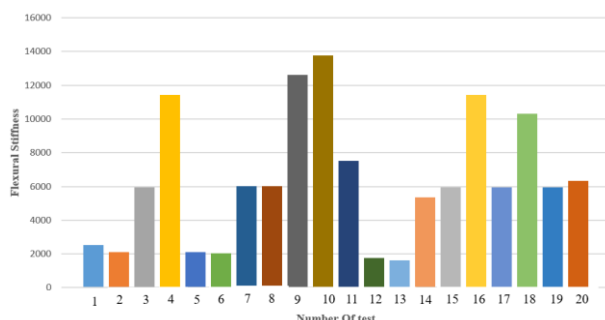


Fig. 29 Results of Stiffness in Abaqus analysis

شکل 29 نتایج سفتی حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌های 15، 17 و 19 که آزمایش‌های تکراری می‌باشند دارای حالت بیشینه در بحث تحمل نیرویی و نمونه شماره 10 دارای حالت بیشینه در بحث سفتی خمشی می‌باشد. جدول 9 پارامترهای این نمونه را بیان می‌کند.

با توجه به ویژگی مهم انواع ساختارهای کامپوزیتی مشبک، یعنی استحکام و سفتی ویژه بالای آن‌ها به‌ویژه در کاربردهای هوایی، فضایی و دریایی که عامل وزن یک پارامتر مهم و غیرقابل‌انکار به شمار می‌رود، توجه به پارامتر وزن و میزان افزایش آن نسبت به نمونه‌های دیگر ضروری است. بدین منظور وزن تخمینی سازه‌های شبیه‌سازی‌شده پیش از شروع تحلیل بر اساس چگالی بیان شده توسط تحقیقات [15] در جدول 10 نشان داده شده است.

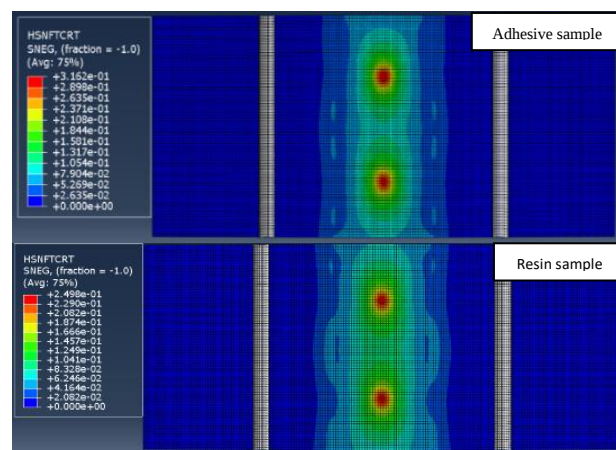
در شکل 30 و 31 نتایج تحلیل المان محدود نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده بر اساس بار بیشینه ویژه و سفتی خمشی ویژه نشان داده شده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌های 15، 17 و 19 که آزمایش‌های تکراری می‌باشند دارای حالت بیشینه ویژه در بحث تحمل نیرویی و نمونه شماره 9، 10 و 18 دارای حالت بیشینه ویژه در بحث سفتی خمشی می‌باشد. جدول 11 پارامترهای این نمونه را بیان می‌کند.

جدول 9 پارامترهای تعیین‌شده برای سازه با تحمل نیرویی و سفتی بیشینه

Table 9 Parameters set for structures with maximum force tolerance and stiffness

نوع تحلیل	ضخامت تقویت‌کننده (mm)	پهنای تقویت‌کننده (mm)	ابعاد هندسه سلولی (cm)	مقدار
بار بیشینه	13.7	8.2	9.9	1995 (N)
سفتی بیشینه	20	7.48	5	13752 (N/mm)



(b-ب)

Fig. 26 a) Start of failure in shells if loading continues b) No failure of shells at the time of failure of amplifiers

شکل 26 الف) شروع شکست در پوسته‌ها در صورت ادامه بارگذاری ب) عدم شکست پوسته‌ها در زمان شکست تقویت‌کننده‌ها

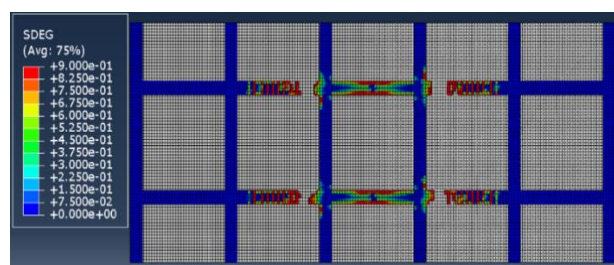


Fig. 27 How to separate the joint, taking into account the properties and thickness of the connector

شکل 27 نحوه جدایش در اتصال با در نظر گرفتن خواص و ضخامت برای اتصال‌دهنده

3-3- نتایج بهینه‌سازی طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود پرداخته شده است. ابتدا نتایج حاصل از هر شبیه‌سازی و سپس پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر روی خواص ورق کامپوزیتی مشبک، نظیر بار بیشینه و سفتی سازه و همچنین بار بیشینه و سفتی ویژه سازه بررسی شده است. در ابتدا لازم است برخی اصطلاحات استفاده شده در این بخش به‌صورت مختصر توضیح داده شود.

- 1- نیروی بیشینه: بیشترین بار تحمل شده توسط ورق کامپوزیتی مشبک که واحد آن نیوتن (N) است.
- 2- نیروی بیشینه ویژه: نسبت بار بیشینه به جرم ورق‌های تقویت‌شده مشبک کامپوزیتی که واحد نیوتن بر گرم (N/gr) است.
- 3- سفتی: شیب نمودار بار-جابجایی در ناحیه الاستیک که واحد آن نیوتن بر میلی‌متر (N/mm) است.
- 4- سفتی ویژه: نسبت سفتی به جرم ورق کامپوزیتی مشبک که واحد آن نیوتن بر میلی‌متر گرم (N/mm.gr) است.

پس از بررسی اتصال بین تقویت‌کننده و پوسته و انتخاب پارامترهای اتصال‌دهنده مناسب، شبیه‌سازی عددی برای تمام حالت‌های پیشنهادی طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح مورد تحلیل قرار گرفت. شکل 28 نتایج نیروی بیشینه و شکل 29 نتایج سفتی خمشی حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

سازه‌های کامپوزیتی مشبک به‌طور عمده به‌وسیله فاکتورهای وزن، ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و ابعاد هندسه سلولی کنترل می‌شود. در ادامه به بررسی اثرات فاکتورها بر بار بیشینه ویژه و سفتی ویژه پرداخته شده است.

3-4-1- شناسایی اثرات فاکتورها بر نیرو بیشینه ویژه و بهینه‌سازی سازه
در این پژوهش از روش پاسخ سطح (RSM) برای تجزیه و تحلیل اثرات فاکتورهای ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و هندسه سلولی تقویت‌کننده بر بار بیشینه ویژه استفاده شده است. تأثیر ضخامت تقویت‌کننده بر بار بیشینه ویژه سازه کامپوزیتی مشبک در شکل 32 مشاهده می‌شود. با افزایش ضخامت تقویت‌کننده تا ضخامت 14.87 میلی‌متر نیروی بیشینه ویژه تا مقدار 53.44 N/gr افزایش پیدا کرده و سپس به خاطر پارامترهای تأثیرگذار مانند وزن سازه، کاهش پیدا می‌کند.

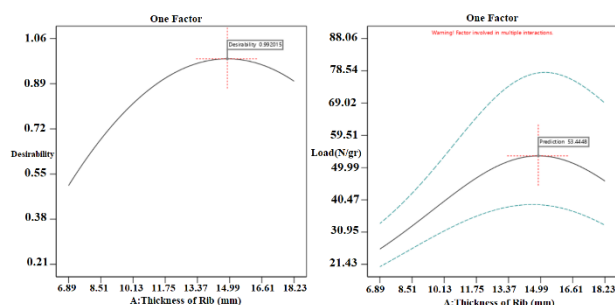


Fig. 32 Effect of reinforcement thickness on maximum specific force
شکل 32 رابطه بین ضخامت تقویت‌کننده بر نیرو بیشینه ویژه

تأثیر پهنای تقویت‌کننده بر بار بیشینه ویژه در شکل 33 قابل مشاهده است. همان‌طور که در نمودار بیان شده است با افزایش پهنای تقویت‌کننده تا مقدار 8.7 میلی‌متر نیرو بیشینه نیز افزایش یافته است و سپس به دلیل تأثیرات وزن سازه با افزایش پهنای کاهش پیدا کرده است.

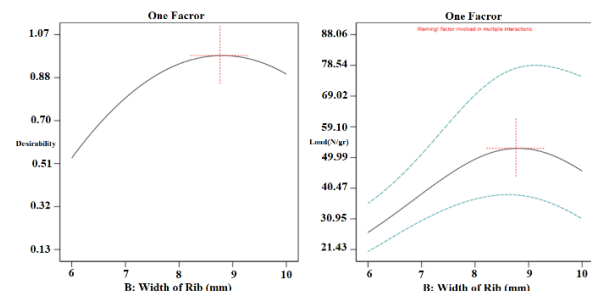


Fig. 33 Effect of reinforcement width on maximum specific force
شکل 33 رابطه پهنای تقویت‌کننده و نیرو بیشینه ویژه

جدول 10 وزن نمونه‌های شبیه‌سازی شده [15]
Table 10 Weight of simulated samples [15]

شماره تحلیل	وزن (gr)	شماره تحلیل	وزن (gr)
1	334.4	11	430
2	320	12	308.6
3	424	13	283
4	561	14	370
5	320	15	382
6	312.8	16	561
7	370	17	382
8	429	18	394
9	488	19	382
10	531	20	437

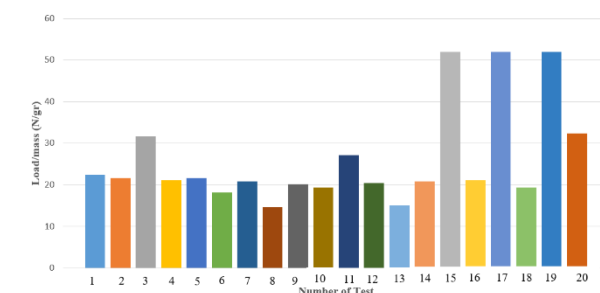


Fig. 30 Results of specific maximum force in Abaqus analysis
شکل 30 نتایج نیروی بیشینه ویژه در تحلیل آباکوس

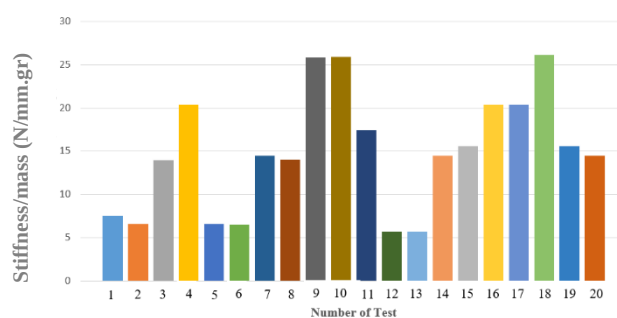


Fig. 31 Results of specific stiffness in Abaqus analysis
شکل 31 نتایج سفتی ویژه در تحلیل آباکوس

3-4- تحلیل آزمایش‌ها به روش پاسخ سطح
اندازه‌گیری مقدار بار بیشینه ویژه و سفتی ویژه یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌ها در تحلیل استحکام سازه‌های کامپوزیتی مشبک است. به‌طوری‌که به‌عنوان بااهمیت‌ترین معیار کیفیت استحکام در نظر گرفته شده است.

جدول 11 پارامترهای تعیین‌شده برای سازه با تحمل نیرویی و سفتی بیشینه

نوع تحلیل	ضخامت تقویت‌کننده (mm)	پهنای تقویت‌کننده (mm)	ابعاد هندسه سلولی (cm)	مقدار
بار بیشینه ویژه	13.7	8.2	9.9	51(N/gr)
سفتی بیشینه ویژه نمونه شماره 9	20	7.6	8.1	26(N/mm.gr)
سفتی بیشینه ویژه نمونه شماره 10	20	7.48	5	26(N/mm.gr)
سفتی بیشینه ویژه نمونه شماره 18	20	6	10	26(N/mm.gr)

تأثیر پهنای تقویت‌کننده بر سفتی ویژه در شکل 37 قابل مشاهده است. همان‌طور که در نمودار بیان شده است تأثیر پهنای تقویت‌کننده‌ها بر سفتی ویژه سازه با شیب ملایم رو پایین تعریف می‌شود که یکی از دلایل کاهش شیب نمودار بالا رفتن وزن سازه است.

اثر فاکتور اندازه هندسه سلولی بر سفتی ویژه سازه، در شکل 38 قابل مشاهده است. همان‌طور در شکل قابل مشاهده و بررسی است تأثیر هندسه سلول مربعی در ساخت تقویت‌کننده‌ها با شیب ملایم صعودی بوده و سپس به‌صورت خط صاف مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حالت بهینه هندسه سلول بوده و افزایش ابعاد در روند سفتی ویژه سازه، تأثیر چندانی نخواهد داشت.

درنهایت نمونه بهینه تابع استخراج‌شده باهدف بیشینه کردن سفتی ویژه استخراج گردید که در شکل 39 قابل مشاهده است. مقدار عددی مطلوبیت² نشان از شرایط مطلوب و دقت طراحی آزمایش را بیان می‌کند که در راستای بررسی حالت بهینه بار بیشینه ویژه مقدار 0.97 به دست آمده است که نشان‌دهنده دقت قابل قبول تحلیل است.

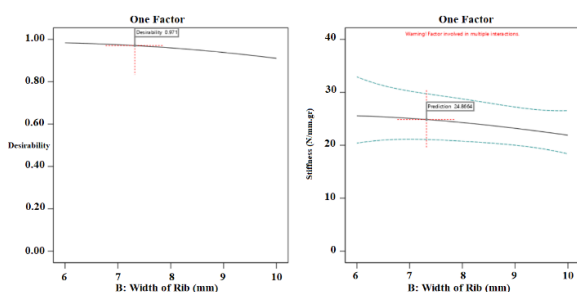


Fig. 37 The effect of reinforcing width on the specific stiffness of the structure

شکل 37 تأثیر پهنای تقویت‌کننده بر سفتی ویژه سازه

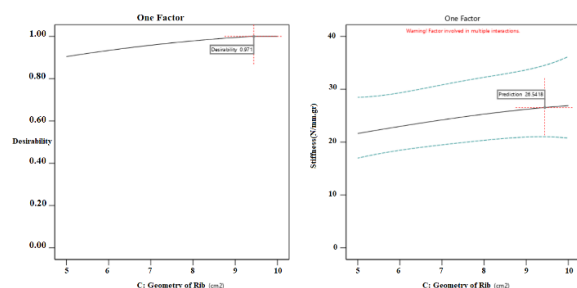


Fig. 38 The effect of structural cell geometry dimensions on the specific stiffness of the structure

شکل 38 تأثیر ابعاد هندسه سلولی سازه بر سفتی ویژه سازه

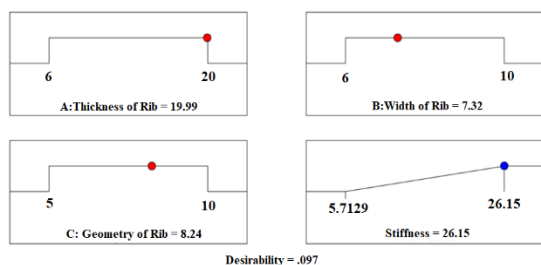


Fig. 39 Optimal results of parameters to determine the structure with maximum specific stiffness

شکل 39 نتایج بهینه پارامترها جهت تعیین سازه با سفتی ویژه بیشینه

اثر فاکتور اندازه هندسه سلولی بر نیرو بیشینه ویژه سازه، در شکل 34 قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از بزرگ‌ترین هندسه سلولی مربعی بر اساس مقالات و تحقیقات گذشته باعث افزایش بار بیشینه ویژه در سازه می‌شود.

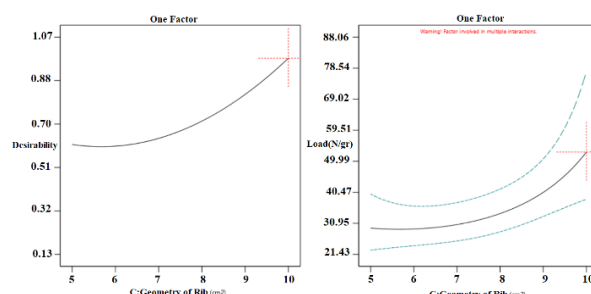


Fig. 34 Effect of cell geometry on maximum specific force

شکل 34 رابطه هندسه سلولی بر نیرو بیشینه ویژه

درنهایت نمونه بهینه تابع استخراج‌شده باهدف بیشینه کردن بار ویژه استخراج گردید که در شکل 35 قابل مشاهده است. مقدار عددی مطلوبیت¹ نشان از شرایط مطلوب و دقت طراحی آزمایش را بیان می‌کند که در راستای بررسی حالت بهینه بار بیشینه ویژه مقدار 0.92 به دست آمده است که نشان‌دهنده دقت قابل قبول تحلیل است.

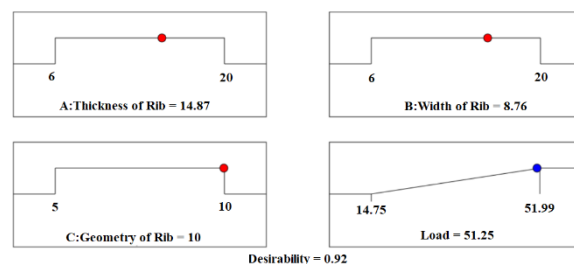


Fig. 35 Optimal results for special maximum load

شکل 35 نتایج بهینه جهت تحمل بار بیشینه ویژه

3-4-2- شناسایی اثرات فاکتورها بر سفتی ویژه و بهینه‌سازی سازه

بررسی اثرات فاکتورها بر سفتی ویژه سازه طبق روند بار بیشینه ویژه موردبررسی قرار گرفته است. تأثیر ضخامت تقویت‌کننده بر سفتی ویژه در شکل 36 قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت تقویت‌کننده‌ها تا ضخامت بیشینه سفتی ویژه سازه افزایش پیدا می‌کند. در این راستا با در نظر گرفتن ضخامت 20 میلی‌متری برای تقویت‌کننده‌ها سفتی ویژه سازه 24.86 N/mm.gr مقدار است.

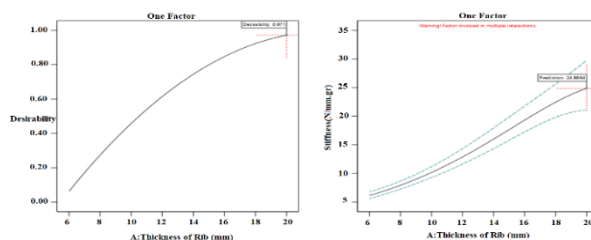


Fig. 36 The effect of reinforcement thickness on the specific stiffness of the structure

شکل 36 تأثیر ضخامت تقویت‌کننده بر سفتی ویژه سازه

² Desirability

¹ Desirability

تحلیل شده است. در شکل 42 نمودار نیرو-جابجایی قابل مشاهده است و در جدول 12 مقدار نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه با نتایج طراحی آزمایش مقایسه شده است. با توجه به مقادیر شبیه‌سازی عددی و مقایسه با مقادیر تعیین شده از طراحی آزمایش با درصد خطای کم نمونه شبیه‌سازی عددی مورد قبول است.

همچنین در نمونه بهینه، شکست ابتدا در ناحیه تقویت‌کننده‌ها اتفاق افتاده و با ادامه بارگذاری صفحه شروع به شکست می‌کند. در شکل 43 ناحیه شکست بر روی تقویت‌کننده‌ها، قابل مشاهده است.

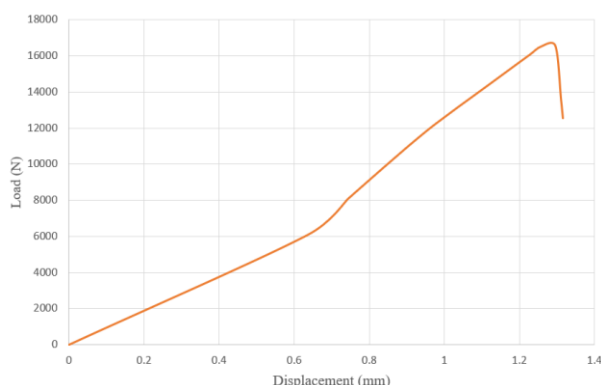


Fig. 42 numerical simulation of Optimal sample

شکل 42 شبیه‌سازی عددی نمونه بهینه

جدول 12 مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و طراحی آزمایش

Table 12 Comparison of numerical simulation results and experimental design

نوع نمونه بهینه	طراحی آزمایش	شبیه‌سازی عددی	درصد اختلاف
نیروی بیشینه ویژه (N/gr)	41/07	37/67	9٪
سفتی ویژه (N/mm.gr)	21/58	23/1	7٪

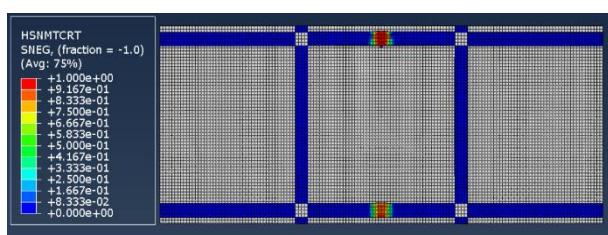


Fig. 43 Failure of grid stiffness in the optimal sample

شکل 43 شکست تقویت‌کننده‌ها در نمونه بهینه

4- نتیجه‌گیری

با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی به خاطر داشتن ویژگی‌های این مواد، بررسی‌ها و تحقیقات مختلف سبب ساخت سازه‌های کامپوزیتی مشبک شد. خواص مکانیکی ایده‌آل، تحمل نیروی بیشتر نسبت به سازه‌های دیگر، مقاومت در برابر ضربه و رفتارهای خمشی مناسب این سازه را منحصربه‌فرد کرده است. در این تحقیق، رفتار خمشی ورق مشبک کامپوزیتی به‌صورت تجربی و عددی با آزمون خمش سه‌نقطه‌ای موردبررسی قرار گرفت. و هدف اصلی تحقیق،

3-4-3- بررسی سازه بهینه از نظر نیرو و سفتی بیشینه ویژه

تأثیر پارامترهای ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و هندسه سلولی به‌صورت جداگانه بر روی سفتی ویژه و نیروی بیشینه ویژه در توضیحات ذکر شده موردبررسی قرار گرفته و سازه‌های بهینه معرفی گردید. در برخی از سازه‌های مشبک کامپوزیتی اثر سفتی و نیروی بیشینه هر دو بایستی به‌صورت آمیخته در هم بررسی و تحلیل شوند.

تأثیر اثرات فاکتورها بر سازه‌ای که نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه هر دو در کنار هم اهمیت دارند در شکل 40 قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بررسی تأثیر رفتار فاکتورها به دلیل وجود دو پاسخ مرتبط به یکدیگر قابل مقایسه به‌صورت مجزا نمی‌باشد. در شکل 41 مقادیر پارامترهای بهینه نشان داده شده است.

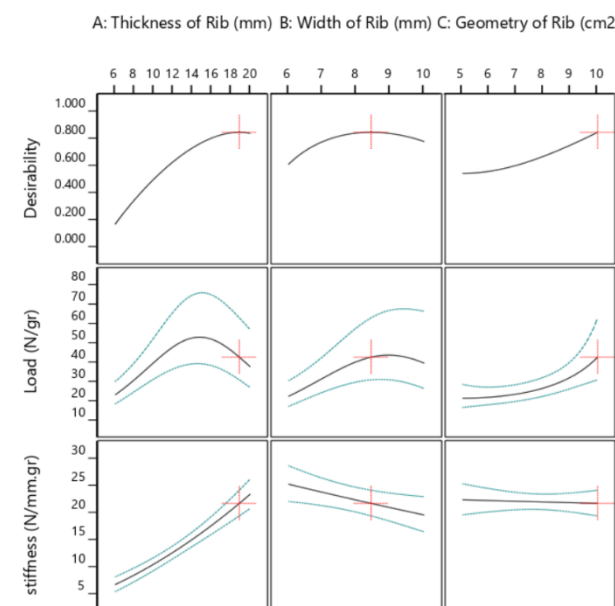


Fig. 40 Effects of factors for specific maximum force response and specific stiffness

شکل 40 اثرات فاکتورها برای پاسخ نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه

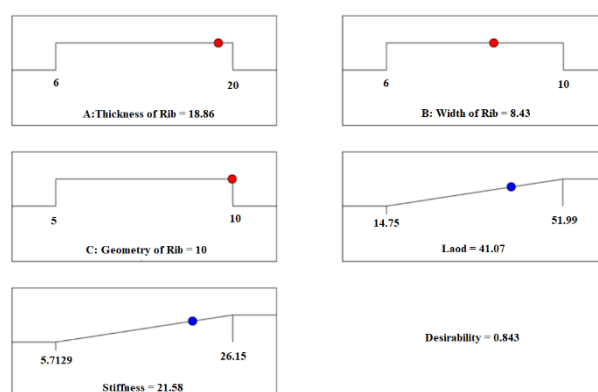


Fig. 41 Optimal results of parameters to determine the structure with specific maximum force and specific stiffness

شکل 41 نتایج بهینه پارامترها جهت تعیین سازه با نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه

3-3- شبیه‌سازی عددی و تحلیل مدل بهینه

پس از بررسی اثرات فاکتورها و تعیین پارامترهای بهینه، به جهت اطمینان از نتایج طراحی آزمایش، پارامترهای تعیین شده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و

- [8] Avila, A.F., Bueno, Plinio de O., (6772), "An experimental and numerical study on adhesive joints for composites," composites", Vol. 22, pp. 511-510, 2004.
- [9] De Moura, M., et al., "Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints," International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 28, No. 8, pp. 419-426, 2008.
- [10] Jadhav, P., P.R. Mantena, and R.F. Gibson, "Energy absorption and damage evaluation of grid stiffened composite panels under transverse loading," Composites Part B: Engineering, Vol. 37, No. 2-3, pp. 191-199, 2005.
- [11] Zhang, Z., Chen, H., and Ye, L., "Progressive failure analysis for advanced grid stiffened composite plates/shells," Composite Structures, Vol. 86, No. 1-3, pp. 45-54, 2008.
- [12] Tahanie, V., Shahgholian, D., Rahimi, Gh., "Experimental and numerical study of the effect of the shape of reinforcements on the bending behavior of composite mesh sheets," in persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 303-311, 2016.
- [13] Azarafza, R., Davar, A., Mahmoudi, A., "Three-point bending test of metal and composite sandwich sheets with mesh core," in persian, Composite Science and Technology (JSTC), Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2016.
- [14] Davar, A., Azarafza, R., Faraji Shoa, J., "Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core," in persian, Composite Science and Technology (JSTC), Vol. 6, No. 4, pp. 615-626, 2020.
- [15] Guénon, V. A., Chou, T. W. and Gillespie, J. W., "Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite," Journal of materials science, Vol. 24, No. 11, pp. 4168-4175, 1989.

بررسی اتصال چسبی پوسته با مشبک در نظر گرفته شد. و در این راستا دو سازه مختلف که یکی با رزین اپوکسی LR520 و دیگری با چسب آکسون H 9940 BK به پوسته اتصال داده شده بودند، مورد آزمون خمشی سه نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که اتصال چسب آکسون نسبت به اتصال رزین 16٪ بر نیروی قابل تحمل، قبل از شروع تخریب می‌افزاید. و در نمونه اتصال با چسب آکسون نسبت به اتصال رزین، جذب انرژی 10٪ افزایش را نشان می‌دهد.

در بحث بهینه‌سازی سازه‌ها، بررسی پارامتر اقتصادی جایگاه مورد توجه دارد. اما در برخی مواقع در صنایع مختلف همچون صنایع هوایی افزایش خواص مکانیکی سازه نسبت به صرفه اقتصادی ارجحیت دارد. در این تحقیق، در صورت استفاده از چسب آکسون H 9940 BK به عنوان اتصال چسبی هزینه‌های جاری مواد حدود 8٪ افزایش پیدا می‌کند.

افزایش ضخامت و پهنا در صورت نادیده گرفتن اثر وزنی باعث کوچک‌تر شدن هندسه سلولی شده و بر استحکام سازه می‌افزاید. اما با در نظر گرفتن اثر وزنی، افزایش ضخامت و پهنا در جهت افزایش استحکام سازه نمی‌باشد. در بررسی اثر ضخامت بر رفتار خمشی ورق‌های تقویت شده مشبک مشخص شد که افزایش ضخامت تا مقدار 14.87 میلی‌متر باعث افزایش نیروی بیشینه ویژه می‌گردد و سپس به جهت تأثیر افزایش وزن نسبت به تحمل نیرویی این پاسخ وارد روند کاهش می‌شود. و در بررسی اثر ضخامت بر سفتی ویژه مشخص شد، که دارای رابطه مستقیم بوده و با افزایش ضخامت سفتی ویژه افزایش می‌گردد.

در بررسی اثر پهنا بر رفتار خمشی ورق‌های تقویت شده مشبک مشخص شد، با افزایش پهنا تا مقدار 8.7 میلی‌متر باعث افزایش نیرو بیشینه ویژه می‌گردد و سپس به جهت تأثیر افزایش وزن نسبت به تحمل نیرویی این پاسخ وارد روند کاهش می‌شود. و بررسی اثر پهنا بر سفتی ویژه نشان می‌دهد با افزایش پهنا به دلیل افزایش وزن سفتی ویژه سازه وارد روند کاهشی می‌گردد. در بررسی اثر هندسه سلول بر رفتار خمشی ورق‌های تقویت شده مشبک مشخص شد، استفاده از بزرگ‌ترین هندسه سلولی مربعی بر اساس مقالات و نتایج ذکر شده باعث افزایش نیرو بیشینه ویژه و سفتی ویژه سازه می‌گردد.

5- مراجع

- [1] Silva, L.F., "Design rules and methods to improve joint strength," in Handbook of Adhesion Technology, 2011.
- [2] Andersson, T. and Stigh, U., "The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces," International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, No. 2, pp. 413-434, 2004.
- [3] De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading," Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 10-11, pp. 2224-2230, 2008.
- [4] Her, S.-C., "Stress analysis of adhesively-bonded lap joints," Composite structures, Vol. 47, No. 1-4, pp. 673-678, 1999.
- [5] Hart-Smith, L., "Adhesive-bonded single-lap joints: NASA Langley Research Center," Report NASA CR-112236, 1973.
- [6] Hadj-Ahmed, R., Foret, G., and Ehrlicher, A., "Stress analysis in adhesive joints with a multiparticle model of multilayered materials (M4)," International journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 21, No. 4, pp. 297-307, 2001.
- [7] Zou, G., Shahin, K., Taheri, F., "An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints," Composite Structures, Vol. 65, No. 3-4, pp. 499-510, 2004.



ارزیابی غیرمخرب سازه‌های دو لایه فلز-کامپوزیت به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت شونده لمب

یوسف پروری¹، حسن رمضانی²، سیاوش کاظمی‌راد^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* skazemirad@iust.ac.ir 16846-13114 صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/10/18

پذیرش: 1401/01/01

کلیدواژگان

امواج هدایت شونده، موج لمب، پوشش کامپوزیتی، سازه‌های پوشش دهی شده، مدل‌سازی اجزای محدود

ارزیابی غیرمخرب افت خواص مکانیکی و ضخامت سازه‌های دو لایه به منظور پایش سلامت این سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف این پژوهش پیشنهاد یک روش ارزیابی غیرمخرب بر پایه گسترش امواج لمب برای بررسی سازه‌های دو لایه فلز-کامپوزیت بوده است. بدین منظور، مدل اجزای محدود یک صفحه فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت ایجاد شد که در آن پوشش کامپوزیتی از لایه‌های نمد الیاف شیشه خرد شده و پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده تشکیل شده بود. مود پادمتقارن اصلی موج لمب (A_0) با فرکانسهای تحریک مختلف در نمونه‌های دو لایه مدل شده گسترش یافتند. نمودارهای پراکندگی مود A_0 موج لمب با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف و افت خواص مکانیکی لایه فلزی و پوشش کامپوزیتی به دست آمدند. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که تأثیر ضخامت و افت خواص مکانیکی صفحه فولادی بر سرعت مود A_0 موج لمب بیشتر از تأثیر ضخامت و افت خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی بود. همچنین، تخمین ضخامت پوشش کامپوزیتی در فرکانس‌های پایین بهتر انجام شد، در حالی که شناسایی افت خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی و صفحه فولادی در فرکانس‌های بالاتر بهتر صورت گرفت. در نتیجه، روش شبیه‌سازی گسترش امواج لمب می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی برای ایجاد روشهایی برای ارزیابی غیرمخرب سازه‌های دو لایه فلز-کامپوزیت با خواص مکانیکی و ضخامت‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

Nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures using finite element simulation of guided Lamb wave propagation

Yousef Parvari¹, Hasan Ramezani¹, Siavash Kazemirad^{1*}

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

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, skazemirad@iust.ac.ir

Keywords

Guided waves, Lamb wave, Composite coating, Coated structures, Finite element modeling

Abstract

Nondestructive evaluation (NDE) of the mechanical properties and thickness loss of bilayer structures is of great importance for health monitoring purposes. This study aimed to propose an NDE method based on the Lamb wave propagation for the inspection of bilayer metal-composite structures. The finite element model of a steel substrate coated with a layered composite material was developed, where the composite coating constituted by chopped strand glass fiber mat and woven roving glass fiber cloth layers. The fundamental antisymmetric Lamb wave mode (A_0) with different excitation frequencies were generated and propagated on the modeled bilayer specimens. The dispersion curves for the A_0 Lamb wave mode were obtained for the simulated specimens, considering different thicknesses and a range of material properties decay for the metal substrate and composite coating. The obtained results showed that the effect of the thickness and decay in the mechanical properties of the substrate on the A_0 Lamb wave mode velocity was more than the effect of the thickness and decay in the mechanical properties of the composite coating. Besides, the estimation of coating thickness was performed more accurately at low frequencies, while the decay in the mechanical properties of the coating and substrate was better evaluated at higher frequencies. It was concluded that the simulated Lamb wave propagation method can be used as a virtual lab for the development of methods for nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures with different material properties and thicknesses.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Parvari, Y., Ramezani, H., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures using finite element simulation of guided Lamb wave propagation", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1700-1707, 2022.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.546257.1765

1- مقدمه

فرآیند پوشش‌دهی¹ به منظور تقویت سازه‌های مهندسی و محافظت از آن‌ها در برابر خوردگی و زنگ زدگی کاربردهای زیادی دارد. بازرسی مداوم پوشش‌ها و سازه‌های پوشش داده شده برای نظارت بر وضعیت آن‌ها و اطمینان از سلامت و یکپارچگی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است [1]. در بسیاری از کاربردها مواد کامپوزیت² به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت مکانیکی، شیمیایی و خوردگی نسبت به فلزات رایج ترجیح داده می‌شوند. بنابراین از کامپوزیت‌ها معمولاً برای پوشش‌دهی سازه‌های فلزی به ویژه در صنایع هوافضا و نفت استفاده می‌شود [2]. بازرسی کارآمد سازه‌های فلزی پوشش‌دهی شده با کامپوزیت‌ها مسئله‌ای مهم در چنین کاربردهایی است. به عنوان مثال، ارزیابی کم شدن ضخامت (خوردگی) و خواص مکانیکی سازه‌های فلزی پوشش‌دهی شده در مخازن نفت و مخازن تحت فشار که به طور مستقیم برای بررسی در دسترس نیستند، بسیار مورد نیاز است.

استفاده از روش‌های مبتنی بر گسترش امواج لمب³ برای ارزیابی و آزمایش غیر مخرب⁴ سازه‌های صفحه‌ای شکل بسیار رایج است [3-10]. میرایی کم و ماهیت فرکانس بالای امواج لمب، آن‌ها را برای ارزیابی سریع سازه‌ها و تشخیص عیوب کوچک در آن‌ها به عنوان یک گزینه مناسب مطرح می‌سازد. برای مثال، ژنوت و همکاران از مود S_0 امواج لمب برای محاسبه ضخامت صفحاتی که دچار خوردگی شده بودند، استفاده کردند [11]. در تحقیقی دیگر راثو و همکاران از امواج هدایت شونده⁵ لمب جهت محاسبه نقشه خوردگی در سازه‌های صفحه‌ای شکل استفاده کردند [12]. از دیگر ویژگی‌های بارز استفاده از این روش، محاسبه سرعت وابسته به جهت در مواد ناهمسانگرد⁶ می‌باشد که با توجه به تفاوت خواص در جهات مختلف بسیار سودمند است و مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. برای مثال، داتا برای تخمین موقعیت دقیق آسیب در کامپوزیت‌ها، از سرعت و جهت انتشار امواج استفاده کرد [13]. همچنین از گسترش امواج لمب بعنوان یکی از روش‌های غیر مخرب برای تشخیص آسیب و مشخصه‌یابی خواص کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [14-18]. برای مثال، کستینگز و همکاران برای محاسبه ابعاد ترک ایجاد شده توسط ضربه در کامپوزیت، از مود S_0 امواج لمب استفاده کردند [19]. ژائو و همکاران از مود A_0 امواج لمب برای تخمین آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه‌شدگی⁷ و از هم گسیختگی⁸ کامپوزیت استفاده کردند [20].

در تحقیقات بسیاری از گسترش امواج هدایت شونده در محیط‌های چند لایه استفاده شد. به طور مثال وانگ و رولین به بررسی گسترش امواج در محیط چند لایه ناهمسانگرد پرداختند [21]. کستینگز و هوستن گسترش امواج در صفحات ساندویچی که در آن‌ها از لایه‌های مواد ویسکوالاستیک استفاده شده و تشکیل یک ماده ناهمسانگرد را داده بودند را بررسی کردند [22]. داهمن و همکاران گسترش امواج لمب در نمونه‌های کامپوزیتی چند لایه ناهمسانگرد و ویسکوالاستیک را بررسی نمودند [23]. مسئله مستقیم گسترش موج لمب در محیط‌های چند لایه، که در آن خواص پراکندگی موج گسترش یافته با داشتن هندسه و خواص مواد هر لایه به دست می‌آید، به

طور قابل توجهی در ادبیات موضوع مطالعه شده است. با این حال، توجه کمتری به مسئله معکوس گسترش موج لمب در محیط‌های چند لایه شده است، جایی که خواص مواد و سازه باید با داشتن ویژگی‌های موج گسترش یافته ارزیابی شوند. همچنین، ارزیابی خوردگی و اندازه‌گیری ضخامت سازه‌های پوشش داده شده توسط گسترش امواج لمب در مقالات پیشین انجام نشده است.

محققین زیادی از روش شبیه‌سازی المان محدود بعنوان یکی از روش‌های حل عددی برای مطالعه گسترش امواج هدایت شونده در سازه‌های متفاوت استفاده می‌کنند [24]. برای مثال، الین و کاولی برهمکنش امواج لمب و آسیب در سازه‌های صفحه‌ای را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند [25]. راماداس و همکاران به دو صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی المان محدود ضریب میرایی امواج لمب در لایه‌های مختلف یک نمونه چند لایه کامپوزیتی محاسبه نمودند [26]. یانگ و همکاران از نرم‌افزار عددی آباکوس⁹ برای شبیه‌سازی مدل‌های المان محدود گسترش امواج لمب در صفحات کامپوزیتی استفاده کردند، که بخش‌های اصلی مدل‌های ایجاد شده شامل عملگرهای پیزوالکتریک و حسگرها بودند و برای ایجاد تحریک از سه طریق گشتاور خمشی، نیروهای برشی و جابجایی استفاده کردند [27].

شبیه‌سازی عددی گسترش امواج لمب در سازه‌های صفحه‌ای شکل پوشش داده شده با کامپوزیت به درک بهتری از برهمکنش امواج و این سازه‌ها کمک می‌کند، که این امر می‌تواند به توسعه روش‌های دقیق برای ارزیابی سریع و غیر مخرب این سازه‌ها بینجامد. هدف این مطالعه شبیه‌سازی المان محدود گسترش امواج لمب در صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت است. آزمایش کشش بر روی لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده انجام پذیرفت تا خواص مکانیکی آن‌ها که برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی گسترش امواج مورد نیاز است به دست آیند. اثر تغییرات ضخامت و خواص مکانیکی سازه فولادی و پوشش کامپوزیتی بر سرعت فاز مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های مختلف بررسی شده است. در واقع فضای شبیه‌سازی عددی بعنوان یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیر مخرب سازه‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است.

2- مواد و روش‌ها

1-2- نمونه‌های دولایه فلز-کامپوزیت

یک صفحه فولادی با ابعاد $300 \times 300 \text{ mm}^2$ و با ضخامت متغیر 2، 4، 6 و 8 میلی‌متر که با یک کامپوزیت لایه‌ای پوشش داده شده است برای این مطالعه در نظر گرفته شد. پوشش کامپوزیتی از چهار لایه نمد الیاف شیشه خرد شده¹⁰ با وزن مشخصه 450 g/m^2 ، دولایه پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده¹¹ با وزن مشخصه 400 g/m^2 و رزین و رزین وینیل استر Hetron 922 تشکیل شده است. لایه فولادی در اولین لایه، در لایه دوم نمد با ضخامت 0.6 mm ، در لایه سوم پارچه بافته شده یا ضخامت 0.38 mm ، در لایه چهارم و پنجم نمد، مجدداً در لایه ششم پارچه بافته شده و در لایه هفتم از نمد استفاده شد که ضخامت کلی پوشش کامپوزیتی به 3.16 mm رسید.

2-2- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده که برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی گسترش امواج لمب در صفحه دولایه فولاد-کامپوزیت

⁹ Abaqus¹⁰ Chopped strand glass fiber mat¹¹ Woven roving glass fiber cloth¹ Coating² Composite material³ Lamb wave propagation⁴ Non-destructive evaluation and testing⁵ Guided waves⁶ Anisotropic⁷ Delamination⁸ Disbonding

جایه‌جایی به دست آمده برای هر نمونه وارد نرم‌افزار اکسل شده و شیب قسمت ابتدایی نمودار محاسبه گردید. سرعت بارگذاری قطعات در آزمایش کشش برابر با 2 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. تصویری از ستاپ آزمایش کشش در شکل 2 نشان داده شده است.

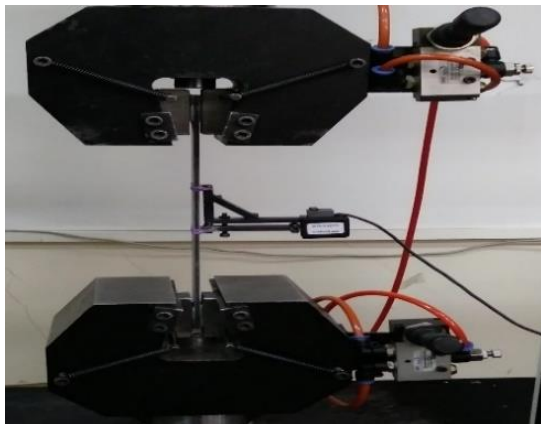


Fig. 2 The tensile test setup via Santam STM-150.

شکل 2 ستاپ آزمایش کشش با استفاده از دستگاه STM-150 شرکت سنتام.

4-2- شبیه‌سازی عددی

اندازه المان‌ها و طول بازه زمانی⁵ دو پارامتر بسیار مهم در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت شونده لمب می‌باشند. طول بازه زمانی که دقت محاسبات عددی شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب را تضمین می‌کند مطابق معادله (1) به دست می‌آید:

$$\Delta t \approx \frac{(l_e)_{min}}{c_p} = \frac{1}{20f_{max}} \quad (1)$$

که در آن Δt طول بازه زمانی، $(l_e)_{min}$ کوچکترین اندازه المان در مدل اجزای محدود، f_{max} بیشینه فرکانس اعمالی و c_p سرعت موج فشاری می‌باشد. همچنین طبق منابع موجود برای تضمین دقت محاسبات و نتایج به دست آمده وجود 10 نود در هر طول موج ضرورت دارد [28، 29]. با توجه به اینکه طول موج امواج برشی نسبت به امواج فشاری کوتاه‌تر است، رابطه بین اندازه المان‌ها با سرعت موج برشی به صورت معادله (2) خواهد شد:

$$l_e = \frac{\lambda_{min}}{20} \approx \frac{c_s}{20f_{max}} \quad (2)$$

که در آن λ_{min} طول موج و c_s سرعت موج برشی است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی گسترش امواج لمب در محیط دولایه فولاد-کامپوزیت از نرم‌افزار آباکوس با حلگر غیر ضمني⁶ استفاده شد. همچنین هندسه نمونه‌های دو لایه فولاد-کامپوزیت شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس در شکل 3 نشان داده شده است.

برای ایجاد موج لمب در نمونه مورد نظر یک جایجایی سینوسی متناوب با دامنه 1 nm در محل عملگر⁷ به نمونه اعمال شد و مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌هایی با ضخامت‌های مختلف برای هر دو لایه فولاد و کامپوزیت در فرکانس‌های تحریک 20-110 kHz انجام شد.

مورد نیاز است از آزمایش کشش به دست آمدند. بدین منظور، نمونه‌های کامپوزیتی لایه‌ای نمد و بافته شده برای مشخصه‌یابی خواص مکانیکی ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا حجم مورد نظر از رزین اپوکسی را درون بشر وزن نموده و با توجه به نوع رزین اپوکسی استفاده شده در این پژوهش، سخت‌کننده با نسبت وزنی 100 به 15 به آن افزوده شد. سپس با همزن مکانیکی به آرامی به مدت حداکثر 5 دقیقه و با سرعت 200 دور بر دقیقه ترکیب انجام شد. بعد از اتمام فرآیند هم زدن مکانیکی، محتوای بشر به درون محفظه‌ی خلأ منتقل گردید. حداکثر زمان خلأگیری در این مرحله 5 دقیقه در فشار 1 mbar در نظر گرفته شد. سپس لایه‌های مورد نظر از پارچه‌های نمد و بافته شده بریده شده و کنار گذاشته شدند. در ادامه این الیاف وزن شده و به میزان وزنشان با استفاده از قلم‌مو به ترکیب رزین و سخت‌کننده آغشته شدند تا کامپوزیت لایه‌ای با نسبت وزنی الیاف 50 درصد تولید گردد. پس از آغشته‌سازی پارچه‌ها، آن‌ها یک به یک روی هم قرار داده شده و با استفاده از غلتک، رزین توزیع شده تا نسبت به توزیع مناسب و خارج شدن حباب‌های احتمالی هوا اطمینان حاصل گردد. در پایان جهت حباب‌گیری و به دست آوردن ضخامت یکنواخت در قطعه، نمونه‌ها با اعمال نیروی 200 نیوتنی به مدت یک هفته تحت فشار قرار گرفتند. نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در شکل 1 نشان داده شده‌اند، که در دو انتهای آن‌ها یک باریکه¹ برای جلوگیری از آسیب زیاد در ناحیه فک دستگاه کشش به وسیله چسب چسبانده شده است.



Fig. 1 The fabricated mat and woven composite specimens.

شکل 1 نمونه‌های کامپوزیتی لایه‌ای نمد و بافته شده.

3-2- آزمایش کشش

برای انجام آزمایش‌های کشش از دستگاه کشش سنتام مدل STM-150 استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری مقدار نیرو از نیروسنج² بونگشین³ 50 kgf استفاده شد و جهت اندازه‌گیری مقدار کرنش از کشش‌سنج⁴ دو فک سنتام نوع STT-100D استفاده شد. دلیل استفاده از کشش‌سنج محاسبه مدول الاستیک نمونه‌ها به درستی و با دقت بالا بوده است.

از آنجایی که در این پژوهش از الیاف شیشه به عنوان استحکام‌دهنده کامپوزیت استفاده شده و تمامی نمونه‌ها می‌توانند با توجه به نوع الیاف شیشه به کار رفته در آن‌ها (نمد و بافته شده) همسانگرد در نظر گرفته شوند، از استاندارد ASTM D638 برای انجام کلیه آزمایش‌های کشش در این مطالعه استفاده شده است. با توجه به تأکید استاندارد در خصوص انتخاب ظرفیت دستگاه نسبت به ابعاد نمونه‌ها برای رسیدن به دقت مناسب در نتایج آزمایش‌ها، از دستگاه STM-150 شرکت سنتام با استفاده از نیروسنج پنج تنی کمکی استفاده شد برای محاسبه مدول کششی نمونه‌ها، نمودار نیرو -

¹ Tab

² Load Cell

³ Bongshin

⁴ Extensometer

⁵ Time Interval length

⁶ Implicit solver

⁷ Actuator

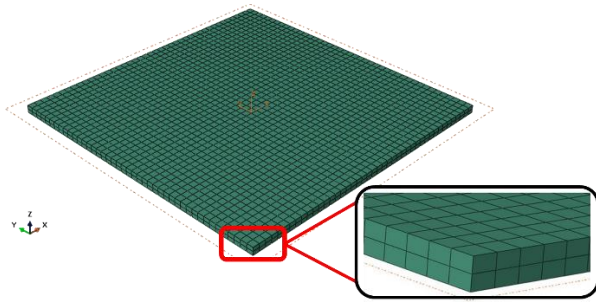


Fig. 5 The elements type used in the model.

شکل 5 خانواده المان‌های به کار رفته در مدل.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، در شبیه‌سازی‌های انجام شده یک بار پوشش کامپوزیتی به صورت لایه-لایه مدل شد و خواص مکانیکی هر لایه به طور جداگانه اعمال شد و یک بار هم پوشش کامپوزیتی به شکل بالک (جامد ارتوتروپیک) مدل شد و خواص به دست آمده از آزمایش‌های کشش انجام شده برای کامپوزیت لایه‌ای در مدل اعمال شد. خواص مورد استفاده در مدل بالک از ماتریس سفتی ارتوتروپیک زیر به دست می‌آید [30]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\eta_{yz}\eta_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\eta_{yx} + \eta_{zx}\eta_{yz}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\eta_{xx} + \eta_{yz}\eta_{zy}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\eta_{xy} + \eta_{xz}\eta_{zy}}{E_x E_z \Delta} & \frac{1-\eta_{xx}\eta_{zz}}{E_x E_z \Delta} & \frac{\eta_{zy} + \eta_{xz}\eta_{xy}}{E_x E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\eta_{xz} + \eta_{xy}\eta_{yz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{\eta_{yz} + \eta_{xz}\eta_{xy}}{E_x E_y \Delta} & \frac{1-\eta_{xy}\eta_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن

$$\Delta = \frac{1 - \eta_{xy}\eta_{yx} - \eta_{yz}\eta_{zy} - \eta_{zx}\eta_{xz} - 2\eta_{xy}\eta_{zy}\eta_{zx}}{E_x E_y E_z} \quad (4)$$

که 9 ثابت الاستیک در معادلات ساختاری ارتوتروپیک از سه مدول ینگ E_x, E_y, E_z ، سه ضریب پواسون $\eta_{yx}, \eta_{zx}, \eta_{yz}$ و سه مدول برشی G_{yz}, G_{zx}, G_{xy} تشکیل شده است. سه ضریب پواسون دیگر نیز از روابط زیر به دست می‌آیند [30]:

$$\eta_{zy} = \frac{E_z}{E_y} \times \eta_{yz} \quad (5)$$

$$\eta_{xz} = \frac{E_z}{E_y} \times \eta_{zx} \quad (6)$$

$$\eta_{xy} = \frac{E_z}{E_y} \times \eta_{yx} \quad (7)$$

نمودار پراکندگی مدهای مختلف موج لمب برای نمونه فولاد-کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm و یک لایه فولادی با ضخامت‌های 4 mm و 8 mm به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. از نرم‌افزار GUIGUW که مبتنی بر روابط المان محدود نیمه تحلیلی² است، برای استخراج منحنی‌های پراکندگی استفاده شد. فرکانس قطع به صورت خط چین قرمز رنگ در شکل‌های 6 و 7 مشخص شده است. برای اطمینان از ایجاد مود فرکانسی (A_0) از فرکانس-

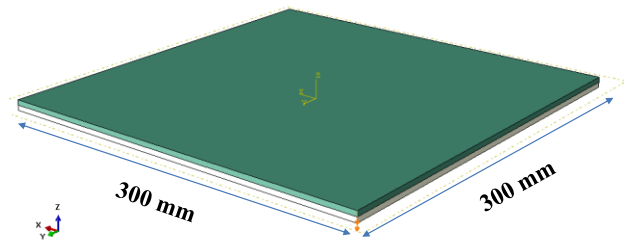


Fig. 3 Geometry of the steel-composite specimens simulated in ABAQUS.

شکل 3 هندسه نمونه‌های فولاد-کامپوزیت شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس.

از آنجایی که ایجاد مود A_0 موج لمب در عمل آسان‌تر است و همچنین سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس قطع حساسیت نسبتاً خوبی به تغییر ضخامت و خواص سازه نشان می‌دهد، در این مطالعه از این مود موج لمب استفاده شده است. برای اطمینان از ایجاد موج لمب نامتقارن مود (A_0) در تمامی نقاط نمونه، تحریک هم در بالا (لایه کامپوزیتی) و هم در پایین (لایه فولادی) نمونه انجام شد و شرایط مرزی برای تمامی لبه‌ها به صورت آزاد قرار داده شد. حسگرها¹ در فواصل مشخصی از عملگر جهت محاسبه سرعت فاز موج لمب گسترش یافته روی سطح نمونه قرار داده شدند که در شکل 4 مشاهده می‌شود. سرعت فاز مود A_0 موج لمب برای هر نمونه با استفاده از اختلاف فاز موج دریافتی در حسگرها اندازه‌گیری شد.

نمونه‌های دولایه فولاد-کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش را می‌توان بر اساس ضخامت لایه‌ها به دو گروه تقسیم‌بندی کرد. در گروه اول ضخامت لایه فولادی 4 mm ثابت در نظر گرفته شد و ضخامت پوشش کامپوزیتی مقادیر 0، 1، 2 و 3.16 میلی‌متر متغیر در نظر گرفته شد. در گروه دوم ضخامت پوشش کامپوزیتی 3.16 mm ثابت در نظر گرفته شد و ضخامت لایه فولادی مقادیر 2، 4، 6 و 8 میلی‌متر متغیر در نظر گرفته شد. از المان‌های سه‌بعدی مکعبی خطی هشت نقطه‌ای با انتگرال کاهش یافته و با کنترل ساعت شنی (C3D8R) در این کار استفاده شد که در شکل 5 تصویر این المان‌ها دیده می‌شود.

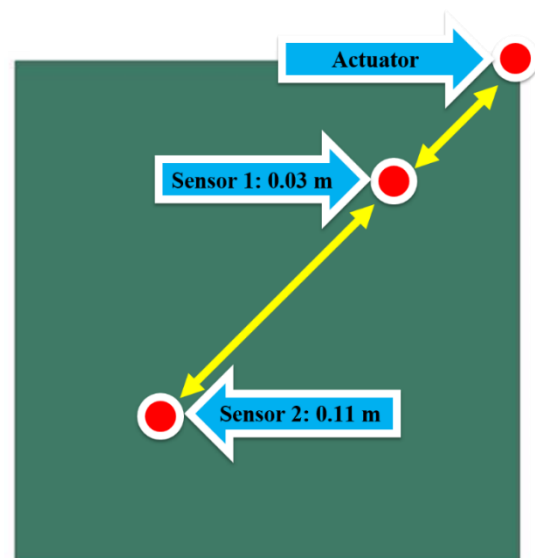


Fig. 4 The position of the actuator and sensors on the specimens.

شکل 4 جایگاه عملگر و حسگرها روی نمونه‌ها.

² Semi-analytical finite element

¹ Sensors

نیز کمتر از لایه فولادی است. این امر باعث ایجاد انعکاس قابل توجه موج در سطح مشترک صفحه فولادی و پوشش کامپوزیتی در تکنیک‌های مرسوم ارزیابی اولتراسوند، از جمله اندازه‌گیری ضخامت و اسکن مود A_0 یا B_1 می‌شود. در نتیجه، چنین تکنیک‌هایی برای ارزیابی چنین سازه‌های پوشش‌دهی شده مناسب نیستند، به ویژه زمانی که خواص مکانیکی و آکوستیکی صفحه فولادی و پوشش کامپوزیتی به طور قابل توجهی متفاوت باشد.

جدول 1 خواص مکانیکی صفحه فولادی، لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده و پوشش لایه‌ای کامپوزیتی.

Table 1 The mechanical properties of the carbon steel plate, mat and woven composite plies, and laminated composite coating.

ماده	سفتی در راستای x و y (GPa)	سفتی در راستای z (GPa)	V_{xy}, V_{yz}, V_{xz}	ρ (kg/m ³)
فولاد	200	200	0.29	7700
لایه نمد	26.4	26.4	0.27	1750
لایه بافته شده	21.74	10.56	0.27	1750
کامپوزیت لایه‌ای	10.42	9.5	0.27	1750

تصویری از خروجی شبیه‌سازی المان محدود که در آن موج لمب مود A_0 در صفحه فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت که با فرکانس تحریک 100 kHz گسترش یافته در شکل 8 نشان داده شده است. همچنین در شکل 9 تصویر دیگری از جابجایی در راستای Z در فرکانس تحریک 100 kHz نشان داده شده است. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود، گسترش موج لمب در فرکانس مربوط به طور منظم و دقیق شبیه‌سازی شده است. در ضمن، افت دامنه دیده شده در شکل 9 مربوط به افزایش جبهه موج با فاصله انتشار نسبت به منبع موج (عملگر) است.

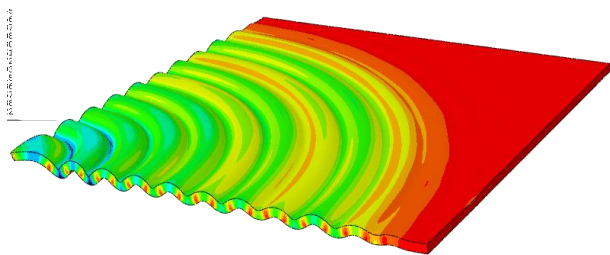


Fig. 8 A snapshot of the simulated waveform of Lamb wave mode A_0 in the specimen at the frequency of 100 kHz. The deformation scale factor is 1×10^8 in this figure.

شکل 8 تصویری از شکل موج لمب مود A_0 شبیه‌سازی شده در نمونه با فرکانس 100 kHz. ضریب تغییر شکل 1×10^8 است.

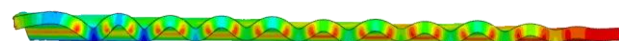


Fig. 9 A snapshot of Z displacement component of the simulated Lamb wave mode A_0 in the specimen at the frequency of 100 kHz. The deformation scale factor is 1×10^8 in this figure.

شکل 9 تصویری از مقدار جابجایی در راستای Z به واسطه موج لمب شبیه‌سازی شده مود A_0 در نمونه با فرکانس 100 kHz. ضریب تغییر شکل 1×10^8 است.

های کمتر از 110 kHz در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب در نمونه‌ها استفاده شد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نمودار سرعت مود A_0 موج لمب بر حسب فرکانس در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس قطع شیب مناسبی دارد. در نتیجه مود A_0 موج لمب در این بازه فرکانسی حساسیت خوبی به تغییر ضخامت و خواص سازه نشان می‌دهد.

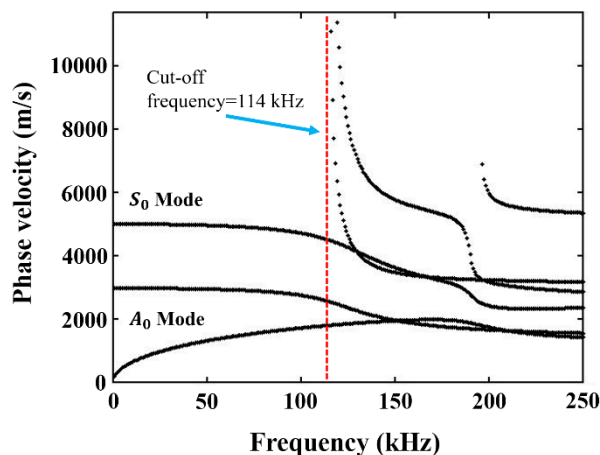


Fig. 6 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the GUIGUW software for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 6 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm که با استفاده از نرم‌افزار GUIGUW به دست آمده است.

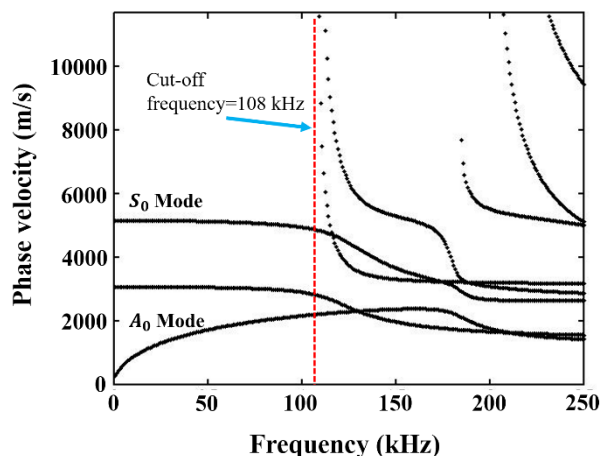


Fig. 7 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the GUIGUW software for an 8 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 7 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 8 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm که با استفاده از نرم‌افزار GUIGUW به دست آمده است.

3- نتایج و بحث

خواص مکانیکی صفحه فولادی، لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده، و پوشش لایه‌ای کامپوزیتی در جدول 1 نشان داده شده است. اعداد گزارش شده در این جدول برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی گسترش امواج لمب در صفحه فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت لایه‌ای استفاده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، مدول الاستیک و چگالی پوشش کامپوزیتی کمتر از صفحه فولادی است و در نتیجه امپدانس آکوستیکی آن

¹ A- or B- mode scanning

پایین، سرعت موج لمب بیشتری در نمونه‌های با پوشش کامپوزیتی ضخیم‌تر محاسبه شد، در نتیجه می‌توان گفت که سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های پایین بیشتر تحت تأثیر پارامتر ضخامت قرار دارد. اما در فرکانس‌های بالاتر اثر دو پارامتر ضخامت و سفتی تا حدودی با هم برابر شده و در نتیجه سرعت برای نمونه‌های مختلف نزدیک به هم محاسبه شد.

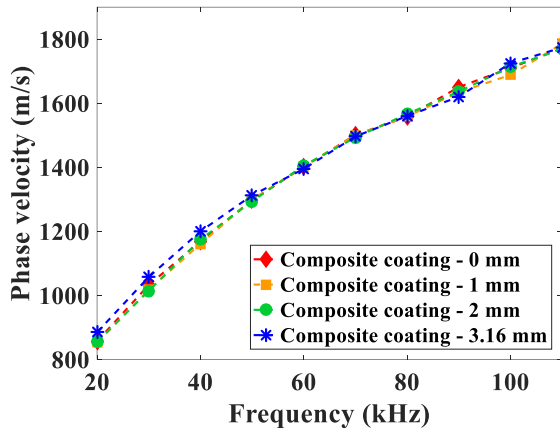


Fig. 10 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a composite coating with different thicknesses.

شکل 10 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت ثابت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف.

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های دولایه‌ای فولاد-کامپوزیت متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت ثابت 3.16 mm و لایه فولادی با ضخامت‌های مختلف 2، 4، 6 و 8 میلی‌متری در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 11 نشان داده شده است. این نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لایه فولادی، سرعت موج لمب نیز افزایش می‌یابد و همچنین اختلاف تقریبی ثابتی در سرعت امواج در نمونه‌های مختلف با فرکانس‌های تحریک متفاوت مشاهده شد. این نتیجه به دو دلیل ضخامت کلی بالاتر و سفتی بیشتر برای نمونه‌های با ضخامت فولادی بیشتر حاصل شد.

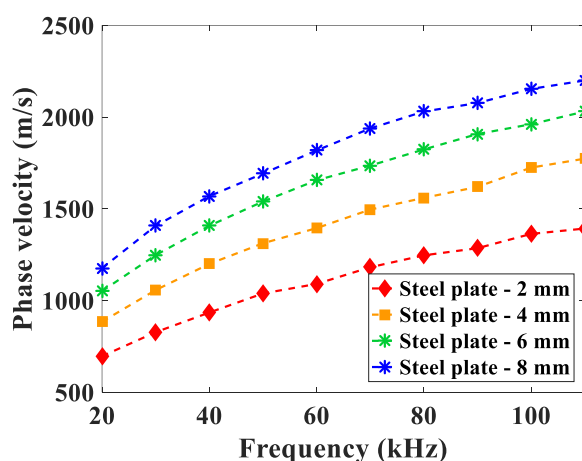


Fig. 11 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a carbon steel plate with different thicknesses coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 11 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت ثابت 3.16 mm و لایه فولادی با ضخامت‌های مختلف.

بعد از استخراج نمودارهای جابجایی-زمان برای هر یک از حسگرهای پیزوالکتریک (با فاصله‌های مشخص نسبت به عملگر)، سرعت موج لمب با توجه به محل قرارگیری عملگر و حسگرهای و اختلاف فاز موج در فواصل مختلف محاسبه شد و با سرعت محاسبه شده توسط نرم‌افزار GUIGUW مقایسه شد.

سرعت موج لمب گسترش یافت در نمونه‌های فولاد-کامپوزیتی در فرکانس‌های مختلف که با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود محاسبه شده در جدول 2 مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در شبیه‌سازی‌های انجام شده یک بار پوشش کامپوزیتی به صورت لایه لایه مدل شد و خواص مکانیکی هر لایه به طور جداگانه اعمال شد، و یک بار هم پوشش کامپوزیتی به شکل بالک (جامد ارتوتروپیک) مدل شد و خواص به دست آمده از آزمایش‌های کشش انجام شده برای کامپوزیت لایه‌ای در مدل اعمال شد. نتایج ارائه شده در جدول 2 نشان می‌دهند که خطای موجود بین سرعت موج لمب به دست آمده از GUIGUW و شبیه‌سازی‌های المان محدود کمتر از 2% بوده که نشان دهنده دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت موج لمب مود A_0 نیز افزایش می‌یابد که با توجه به ثابت بودن ضخامت و سفتی کل نمونه منطقی به نظر می‌رسد. همچنین، با توجه به یکسان بودن سرعت‌های محاسبه شده از شبیه‌سازی‌های المان محدود برای دو حالت لایه‌ای و بالک و کمتر بودن زمان ران برای مدل بالک، در ادامه کار و برای محاسبه نمودارهای پراکندگی پوشش کامپوزیتی به شکل بالک مدل شد.

جدول 2 سرعت موج لمب محاسبه شده برای نمونه با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود و نرم‌افزار GUIGUW.

Table 2 The Lamb wave phase velocity of the specimen obtained using the FE simulations and the GUIGUW software.

فرکانس (kHz)	سرعت موج برشی GUIGUW (m/s)	سرعت موج در شبیه-سازی بصورت لایه‌ای (m/s)	سرعت موج در شبیه-سازی بصورت بالک (m/s)
20	876.6	885	885 (0.95%)
40	1193	1200	1200 (0.53%)
60	1412	1395	1395 (1.2%)
80	1579	1560	1560 (1.2%)
100	1714	1725	1725 (0.64%)

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های دولایه‌ای فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت ثابت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف 0، 1، 2 و 3.16 میلی‌متری در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 10 نشان داده شده است. مشاهده شد که سرعت موج لمب در فرکانس‌های پایین برای نمونه‌های با ضخامت پوشش کامپوزیتی بیشتر کمی بیشتر بود، اما با افزایش فرکانس موج گسترش یافته اختلاف بین سرعت‌های موج لمب برای نمونه‌های مختلف کاهش یافت. سرعت موج لمب در مودهای مختلف تابعی از ضخامت و سفتی نمونه است. مشخصاً در مود A_0 موج لمب با افزایش ضخامت و سفتی، سرعت موج نیز افزایش می‌یابد و همچنین در فرکانس‌های مختلف تأثیرات دو پارامتر ضخامت و سفتی بر سرعت موج لمب متفاوت خواهد بود. ضخامت کل نمونه‌های دولایه‌ای فولاد-کامپوزیتی که دارای ضخامت لایه کامپوزیتی بیشتری هستند، در مجموع بیشتر بود، در حالی که نمونه‌های دارای ضخامت لایه کامپوزیتی کمتر سفتی برآیند بیشتری داشتند. در شکل 10 نشان داده شده است که در فرکانس‌های

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت فاز مود A_0 موج لمب با کاهش سفتی لایه فولادی به دلیل کاهش سفتی کل نمونه کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تفاوت بین سرعت‌های محاسبه شده برای نمونه‌های مختلف در فرکانس‌های بالاتر بیشتر بود. این مشاهدات با تأثیر بیشتر سفتی کلی نمونه پوشش داده شده و همچنین تأثیر بیشتر خواص پوشش بر سرعت فاز در فرکانس‌های بالا (به دلیل داشتن طول موج کوتاه‌تر) توضیح داده می‌شود. نشان داده شد که ارزیابی کاهش خواص مکانیکی پوشش و صفحه فولادی با استفاده از روش گسترش امواج لمب پیشنهادی ممکن است در فرکانس‌های موج بالا، بصورت کارآمدتری انجام شود.

4- جمع بندی

در این مطالعه به کمک شبیه‌سازی المان محدود گسترش امواج لمب در صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت، اثر تغییرات ضخامت و خواص مکانیکی سازه فولادی و پوشش کامپوزیتی بر سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که سرعت فاز مود A_0 موج لمب بیشتر تحت تأثیر ضخامت نمونه‌ها در فرکانس‌های پایین و سفتی کلی نمونه‌ها در فرکانس‌های بالاتر قرار می‌گیرد. بنابراین، تخمین ضخامت پوشش در سازه‌های پوشش داده شده با استفاده از روش گسترش موج لمب پیشنهادی در فرکانس‌های پایین بهتر انجام می‌شود. همچنین، شناسایی افت خواص مکانیکی پوشش و صفحه فولادی با استفاده از روش گسترش امواج لمب می‌تواند در فرکانس‌های بالاتر به طور مؤثرتری انجام شود. در نتیجه، شبیه‌سازی عددی المان محدود می‌تواند بعنوان یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیر مخرب سازه‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان دادند که موج لمب به تغییر ضخامت و همچنین افت خواص مکانیکی صفحه فلزی و پوشش کامپوزیتی در صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت حساسیت خوبی نشان می‌دهد. ولی در شرایطی که تغییر ضخامت و یا افت خواص مکانیکی به طور هم‌زمان در صفحه فلزی و پوشش کامپوزیتی اتفاق بیفتند، تشخیص آن دشوارتر خواهد شد. یک راه مؤثر برای پایش صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت در این شرایط استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است، که می‌تواند موضوع مطالعات آینده در این زمینه باشد. همچنین، تشخیص افت خواص و تغییر ضخامت موضعی در سازه‌های دو لایه نیز می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

5- مراجع

- [1] Lee, Y.-C. and Cheng, S.-W., "Measuring Lamb Wave Dispersion Curves of a Bi-Layered Plate and Its Application on Material Characterization of Coating" IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, Vol. 48, No. 3, pp. 830-837, 2001.
- [2] Shokrieh, M. M. and Omid, M. J., "Reinforcement of Metallic Plates with Composite Materials" Journal of composite materials, Vol. 39, No. 8, pp. 723-744, 2005.
- [3] Masurkar, F., Tse, P. and Yelve, N. P., "Evaluation of Inherent and Dislocation Induced Material Nonlinearity in Metallic Plates Using Lamb Waves" Applied Acoustics, Vol. 136, pp. 76-85, 2018.
- [4] Cho, H., Hasanian, M., Shan, S. and Lissenden, C. J., "Nonlinear Guided Wave Technique for Localized Damage Detection in Plates with Surface-Bonded Sensors to Receive Lamb Waves Generated by Shear-Horizontal Wave Mixing" NDT & E International, Vol. 102, pp. 35-46, 2019.

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 12 نشان داده شده است، با این تفاوت نسبت به شکل‌های 10 و 11 که افت خواص مکانیکی معادل 0%، 20%، 40% و 60% برای پوشش کامپوزیتی در نظر گرفته شد. این نتایج نشان داد که سرعت مود A_0 موج لمب با افت خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی کمی کاهش پیدا کرد که این امر در اثر کاهش سفتی معادل دو لایه فولاد-کامپوزیت بوده است.

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 13 نشان داده شده است، که در آن افت خواص مکانیکی معادل 0%، 20%، 40% و 60% برای لایه فولادی در نظر گرفته شد.

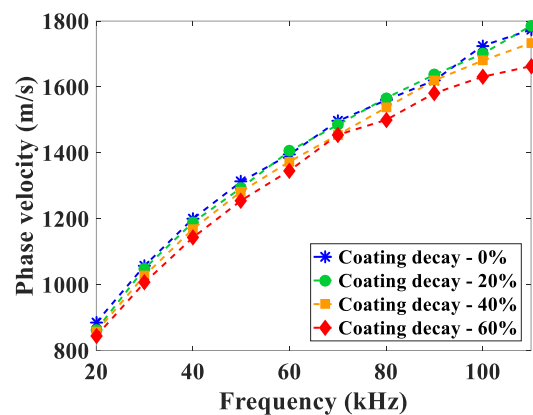


Fig. 12 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating, where the coating material underwent different percentages of stiffness decay.

شکل 12 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm که دچار درصد‌های مختلف افت خواص مکانیکی شده است.

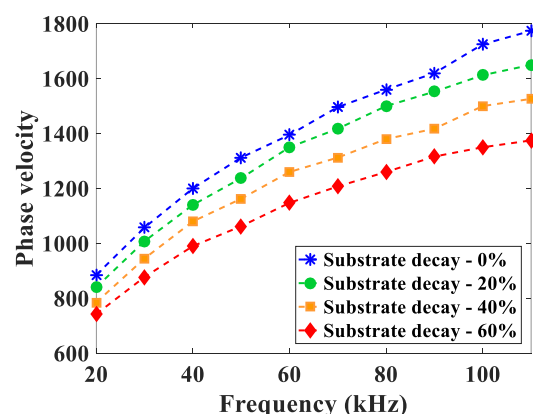


Fig. 13 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating, where the substrate material underwent different percentages of stiffness decay.

شکل 13 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm و لایه فولادی با ضخامت 4 mm که دچار درصد‌های مختلف افت خواص مکانیکی شده است.

- [22] Castaings, M. and Hosten, B., "Guided Waves Propagating in Sandwich Structures Made of Anisotropic, Viscoelastic, Composite Materials" *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 113, No. 5, pp. 2622-2634, 2003.
- [23] Dahmen, S., Amor, M. B. and Ghozlen, M. H. B., "Investigation of the Coupled Lamb Waves Propagation in Viscoelastic and Anisotropic Multilayer Composites by Legendre Polynomial Method" *Composite Structures*, Vol. 153, pp. 557-568, 2016.
- [24] Daryabor, p., Farzin, m. and Honarvar, F., "Calculating the Lamb Wave Modes in an Aluminum Sheet Bonded to a Composite Layer with Fem and Experiment" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 95-106, 2013.
- [25] Alleyne, D. N. and Cawley, P., "The Interaction of Lamb Waves with Defects" *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 39, No. 3, pp. 381-397, 1992.
- [26] Ramadas, C., Balasubramaniam, K., Hood, A., Joshi, M. and Krishnamurthy, C., "Modelling of Attenuation of Lamb Waves Using Rayleigh Damping: Numerical and Experimental Studies" *Composite Structures*, Vol. 93, No. 8, pp. 2020-2025, 2011.
- [27] Yang, C., Ye, L., Su, Z. and Bannister, M., "Some Aspects of Numerical Simulation for Lamb Wave Propagation in Composite Laminates" *Composite structures*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 267-275, 2006.
- [28] Moser, F., Jacobs, L. J. and Qu, J., "Modeling Elastic Wave Propagation in Waveguides with the Finite Element Method" *Ndt & E International*, Vol. 32, No. 4, pp. 225-234, 1999.
- [29] Alleyne, D. and Cawley, P., "A Two-Dimensional Fourier Transform Method for the Measurement of Propagating Multimode Signals" *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No. 3, pp. 1159-1168, 1991.
- [30] Donaldson, B. K., "Analysis of Aircraft Structures: An Introduction", Cambridge University Press, 2008.
- [5] Rosenkrantz, E., Bottero, A., Komatitsch, D. and Monteiller, V., "A Flexible Numerical Approach for Non-Destructive Ultrasonic Testing Based on a Time-Domain Spectral-Element Method: Ultrasonic Modeling of Lamb Waves in Immersed Defective Structures and of Bulk Waves in Damaged Anisotropic Materials" *NDT & E International*, Vol. 101, pp. 72-86, 2019.
- [6] Fathi, H., Kazemirad, S. and Nasir, V., "A Nondestructive Guided Wave Propagation Method for the Characterization of Moisture-Dependent Viscoelastic Properties of Wood Materials" *Materials and Structures*, Vol. 53, No. 6, pp. 1-14, 2020.
- [7] Fathi, H., Nasir, V. and Kazemirad, S., "Prediction of the Mechanical Properties of Wood Using Guided Wave Propagation and Machine Learning" *Construction and Building Materials*, Vol. 262, pp. 120848, 2020.
- [8] Fathi, H., Kazemirad, S. and Nasir, V., "Lamb Wave Propagation Method for Nondestructive Characterization of the Elastic Properties of Wood" *Applied Acoustics*, Vol. 171, pp. 107565, 2021.
- [9] Rastegarmoghaddam, M., Nikkhouy Tanha, S. D. and Rajabi, M., "Use of Machine Learning to Identify Adhesive Joints Defects by Using Ultrasonic Waves," In Persian, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 54, No. 2, pp. 1-6, 2021.
- [10] Taghipour Birgani, P., "Investigation of the Effect of Angle Beam Transducer Parameters on the Lamb Wave Field in the Three-Layer Plate by Normal Mode Expansion Method" *Journal of Computational Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 2, pp. 482-485, 2020.
- [11] Jenot, F., Ouaftouh, M., Duquennoy, M. and Ourak, M., "Corrosion Thickness Gauging in Plates Using Lamb Wave Group Velocity Measurements" *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, No. 8, pp. 1287, 2001.
- [12] Rao, J., Ratssepp, M., Lisevych, D., Hamzah Caffoor, M. and Fan, Z., "On-Line Corrosion Monitoring of Plate Structures Based on Guided Wave Tomography Using Piezoelectric Sensors" *Sensors*, Vol. 17, No. 12, pp. 2882, 2017.
- [13] Datta, S. K., "Elastic Waves in Composite Media and Structures: With Applications to Ultrasonic Nondestructive Evaluation", CRC Press, 2019.
- [14] Ramezani, H., Kazemirad, S., Shokrieh, M. and Mardanshahi, A., "Effects of Adding Carbon Nanofibers on the Reduction of Matrix Cracking in Laminated Composites: Experimental and Analytical Approaches" *Polymer Testing*, pp. 106988, 2020.
- [15] Mardanshahi, A., Nasir, V., Kazemirad, S. and Shokrieh, M., "Detection and Classification of Matrix Cracking in Laminated Composites Using Guided Wave Propagation and Artificial Neural Networks" *Composite Structures*, pp. 112403, 2020.
- [16] Mardanshahi, A., Shokrieh, M. and Kazemirad, S., "Identification of Matrix Cracking in Cross-Ply Laminated Composites Using Lamb Wave Propagation" *Composite Structures*, Vol. 235, pp. 111790, 2020.
- [17] Shafiei Alavijeh, M. and Soorgee, M. H., "Experimental and Numerical Study of Delamination Detection in a Wgf/Epoxy Composite Plate Using Ultrasonic Guided Waves and Signal Processing Tools" *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, Vol. 4, No. 2, pp. 141-152, 2018.
- [18] 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.
- [19] Castaings, M., Singh, D. and Viot, P., "Sizing of Impact Damages in Composite Materials Using Ultrasonic Guided Waves" *NDT & E International*, Vol. 46, pp. 22-31, 2012.
- [20] Gao, F., Zeng, L., Lin, J. and Shao, Y., "Damage Assessment in Composite Laminates Via Broadband Lamb Wave" *Ultrasonics*, Vol. 86, pp. 49-58, 2018.
- [21] Wang, L. and Rokhlin, S., "Stable Reformulation of Transfer Matrix Method for Wave Propagation in Layered Anisotropic Media" *Ultrasonics*, Vol. 39, No. 6, pp. 413-424, 2001.



بررسی استحکام کششی و ثابت دی الکتریک کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه

احسان طالعی فرد^{1*}، حسین پارسا²، جعفر اسکندری جم³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

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

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

* تهران، صندوق پستی 15875-1774، etalei74@gmail.com

اطلاعات مقاله

دریافت: 1400/11/05

پذیرش: 1401/01/31

کلیدواژگان

ریدوم، کامپوزیت، استحکام کششی، ثابت دی الکتریک

چکیده

ریدوم کامپوزیتی سازه‌ای مقاوم برای محافظت از آنتن رادارهای مخابراتی در برابر عوامل مکانیکی و محیطی می‌باشد. با توجه به قرارگیری آن در مقابل آنتن و امکان تأثیر بر روی امواج دریافتی و ارسالی، علاوه بر خواص مکانیکی، خواص الکترومغناطیسی این سازه بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش خواص مکانیکی (استحکام کششی در راستای الیاف) به همراه خواص الکترومغناطیسی (ثابت دی الکتریک در فرکانس باند X) برای ریدوم کامپوزیتی (GFRP) بررسی و بهینه‌یابی شده است. برای این منظور از دو نوع الیاف شیشه سری E و D و دو نوع رزین اپوکسی و رزین پلی‌استر استفاده شده است. علاوه بر آن، جهت ساخت کامپوزیت، سه روش متداول لایه‌چینی دستی، کیسه خلأ و نفوذ در خلأ به کار گرفته شده است. همچنین با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل سیگنال به نویز ترکیب بهینه برای هر یک از خواص به دست آمد که برای استحکام کششی ترکیب الیاف شیشه سری E و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ بالاترین استحکام کششی به مقدار 320.9 مگاپاسکال و برای ثابت دی الکتریک الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ با مقدار 2.85 پایین‌ترین مقدار تعیین گردید. پس از دست‌یابی به ترکیب بهینه برای هر یک از خواص، به بررسی حالت بهینه با در نظر گرفتن تمامی عوامل مکانیکی و الکترومغناطیسی بصورت یکجا به کمک روش بهینه‌یابی چندپاسخه (رابطه خاکستری)، پرداخته شده که در نهایت، ترکیب الیاف شیشه سری D، رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ پیشنهاد شده است.

Investigation of tensile strength and dielectric constant of GFRP composite

Ehsan Talei-Fard^{1*}, Hossein Parsa¹, Jafar Eskandari Jam¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, etalei74@gmail.com

Keywords

Radome, Composites, tensile strength, dielectric constant

Abstract

A composite radome is a durable structure to protect telecommunication radar antennas against mechanical and environmental factors. Due to its placement in front of the antenna and the possibility of affecting the received and transmitted waves, in addition to the mechanical properties, the electromagnetic properties of this structure are very important. In this study, the mechanical properties (tensile strength in the direction of fibers) and the electromagnetic properties (dielectric constant at X-band frequency) for a GFRP composite radome has been studied and optimized. For this purpose, two types of glass fibers E and D series, and two types of epoxy resin and polyester resin have been used. In addition, three common methods of composite fabrication including hand layup, vacuum bag, and vacuum infusion have been used. Also, by using the Taguchi test design method and signal-to-noise analysis, the optimal composition was obtained for each of the properties, which for tensile strength of the combination of E series glass fibers and epoxy resin and vacuum bag fabrication method, the highest tensile strength was 320.9 MPa and for the dielectric constant of D series glass fibers and epoxy resin and vacuum bag fabrication method with the lowest value of 2.85 were determined. After determining the optimal composition for each of the properties, the optimum state was investigated by considering all the mechanical and electromagnetic properties factors together by using the multi-response optimization method (gray relation). Finally, a combination of D-series glass fibers, epoxy resin, and vacuum bag fabrication method was proposed.

1- مقدمه

الکترومغناطیسی رادار اثر نامطلوبی بگذارد. به همین منظور برای ساخت ریدوم از موادی استفاده می‌شود که هم استحکام مکانیکی لازم را دارا بوده و هم کاملاً از آنتن در برابر شرایطی محیطی که در آن قرار دارد محافظت کند و همچنین دارای خواص الکترومغناطیسی مطلوب باشد تا در عملکرد رادار تأثیر نامطلوبی

تمامی اجزا رادار برای مقابله با عوامل مکانیکی و محیطی نیاز به یک پوشش محافظ دارند که به این پوشش در اصطلاح ریدوم گفته می‌شود. این پوشش‌ها ضمن داشتن خواص سازه‌ای (استحکام مکانیکی مناسب)، نباید بر روی امواج

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Talei-Fard, E., Parsa, H., Eskandari Jam, J., "Investigation of tensile strength and dielectric constant of GFRP composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1708-1714, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.546100.1767>

بیسمالیمید به کد QY9611 و QY8911 و رزین سیانات استر 9915 در سه فرکانس 0.2، 1 و 1.6 (THz) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند که در هر 3 فرکانس رزین اپوکسی BA9916 کمترین مقدار دی‌الکتریک (2.9، 2.83 و 2.8 به ترتیب برای فرکانس 0.2 و 1 و 1.6 (THz)) به دست آمده است.

در سال 2015 ردی و همکاران [7] به مطالعه و طراحی یک ریدوم تحت فشار بالا برای یک زیردریایی پرداختند. در بخشی از این پژوهش با تحقیق بر روی خواص الیاف شیشه، کولار و کربن به این نتیجه رسیدند که الیاف کربن به دلیل رسانای الکتریکی بودن برای ریدوم مناسب نیست و همچنین کولار با وجود مستحکم‌تر بودن از الیاف شیشه، در جذب رطوبت و مقاومت فشاری ضعیف است به همین دلیل سه نوع رایج از الیاف شیشه E و H و S را انتخاب کردند. با بررسی خواص گونه‌های بیان شده به این نتیجه دست یافتند که باوجود بالاتر بودن استحکام و مدول کششی انواع E و S، نوع H به دلیل ثابت دی‌الکتریک 2.9 و تانژانت تلفات 0.01 انتخاب مناسب‌تری برای آن‌ها می‌باشد در سال 2018 زیانگ ژو و همکاران [8] تحقیقاتی بر روی خواص دی‌الکتریک کامپوزیت آرامید/اپوکسی تحت بار فشاری انجام دادند. آن‌ها مقادیر دی‌الکتریک کامپوزیت تک جهته و شبه آیزوتروپیک آرامید/اپوکسی و رزین اپوکسی و کامپوزیت شیشه/اپوکسی را تحت بارهای فشاری مختلف اندازه‌گیری کردند. در نهایت مشاهده شد که در تمام باند X بار فشاری تأثیر بسیار کمی بر روی ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت شیشه اپوکسی با مقدار 3.95 به دست آمد. مختاری و همکاران [9] در سال 2019 در پژوهشی نحوه ساخت و ارزیابی یک ریدوم هواشناسی را بررسی کردند. فرایند طراحی، آزمون مکانیکی و میدانی ریدوم و پارامترهای مؤثر در آن بررسی و بهترین انتخاب برای ساخت ریدوم پیشنهاد و نمونه‌های طراحی شده، ساخته و در نهایت آزمون الکترومغناطیسی بر روی آن انجام شده است. از آنجایی که ریدوم در دوره کاری خود تحت بارگذاری‌های فشاری مانند نیروی باد قرار دارد، برای بررسی میزان دوام سازه ساخته شده در برابر کمناش ناشی از نیروی باد، نمونه‌های ساخته شده، مورد آزمون کمناش قرار گرفته است.

در سال 2021 سرخوش و زارعی [10] در تحقیقی مشابه خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت پلیمری تفلون تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کردند و جهت تعیین خواص مکانیکی آزمون کشش و جهت تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی آزمون ثابت دی‌الکتریک در باند X انجام گرفت. بیشینه استحکام کششی و مدول یانگ کششی که در این پژوهش به دست آمد به ترتیب برابر با 130 مگاپاسکال و 3.65 گیگاپاسکال است. ماکزیمم ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌های تولیدی در باند X به ترتیب برابر با 2.37 و 0.096 است.

در سال 2022 سرخوش و همکاران [11] در تحقیق دیگری بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر اپوکسی/کنف تولید شده با روش انتقال رزین به داخل قالب به کمک خلأ³ پرداختند. بیشینه استحکام کششی و مدول الاستیک به دست آمده از آزمون کشش در این پژوهش به ترتیب برابر با 62.42 مگاپاسکال و 4.43 گیگاپاسکال و بیشینه ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌های تولیدی در باند X به ترتیب برابر با 4.47 و 0.053 است.

مطالعات گوناگونی بر روی مواد دی‌الکتریک کامپوزیتی و خواص هر جز از آن بصورت مجزا انجام شده اما نگاهی جمعی برای یافتن بهترین مواد و روش ساخت که مطلوب‌ترین خواص مکانیکی (استحکام کششی) و خواص الکترو-

نگذارد. غالباً ریدوم‌ها از پوسته‌های با دی‌الکتریک¹ و تانژانت تلفات² بهینه مورد نیاز و همچنین استحکام بالا طراحی می‌شوند [1]. در نتیجه مهندسين به این نتیجه دست یافتند که ریدوم‌ها را از موادی باید ساخت که تمام این ویژگی‌های منحصر به فرد را دارا باشد و بهترین ماده‌ای که دارای خواص بهبود یافته است، کامپوزیت‌ها می‌باشد.

کامپوزیت به ماده‌ای اطلاق می‌شود که از دو فاز ماتریس یا زمینه و تقویت‌کننده تشکیل شده باشد که در آن‌ها اجزای تشکیل‌دهنده علاوه بر حفظ کردن ویژگی‌های خود، نقاط ضعف سایر اجزا را نیز تقویت می‌کنند. خواص الکتریکی و مکانیکی مواد کامپوزیت به عوامل مختلفی همچون جنس مواد بکار گرفته شده و روش ساخت بستگی دارد [2].

ریدوم‌های کامپوزیتی در دو دسته کامپوزیت‌های پلیمری و سرامیکی ساخته می‌شود. کامپوزیت‌های سرامیکی را می‌توان در دمای بسیار بالا مورد استفاده قرار داد. کامپوزیت‌های پلیمری گرمای در سازه‌های با دمای حرارت متوسط استفاده می‌شوند درحالی که مواد گرماسخت در دماهای بالا نیز مقاومت می‌کنند. در اکثر موارد ریدوم‌ها، همچون ریدوم زمینی شکل 1 با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت ساخته می‌شود و برای بهبود خواص آن‌ها از پوشش‌های مختلف استفاده می‌کنند [3].



Fig. 1 composite radome for Meteorological radar

شکل 1 نمونه ریدوم کامپوزیتی برای رادار هواشناسی

سوکولوو و همکاران [4] در سال 2004 به بررسی خواص دی‌الکتریک رزین اپوکسی و عامل‌های مختلف آن و انواع مختلف شیشه و کامپوزیت‌های ساخته شده با آن‌ها در بازه فرکانسی 1 (MHz) تا 400 (GHz) پرداختند. با مقایسه مقادیر مختلف به این نتیجه رسیدند که در پایین‌ترین فرکانس مقدار ثابت دی‌الکتریک رزین اپوکسی بین 3.4 تا 4 و تانژانت تلفات بین 0.01 تا 0.027 است، در حالی که با افزایش فرکانس ثابت دی‌الکتریک رزین کاهش ولی تانژانت تلفات افزایش می‌یابد به نحوی که در بالاترین فرکانس مقدار ثابت دی‌الکتریک بین 2.8 تا 3.1 و تانژانت تلفات بین 0.03 تا 0.045 می‌شود.

در تحقیق دیگری محمد اکرم و همکاران [5] در سال 2005 خواص دی‌الکتریک مواد کامپوزیتی پایه پلیمر را بررسی کردند و به مطالعه تأثیر دما و فرکانس بر روی این نوع کامپوزیت‌ها پرداختند. الیاف مورد مطالعه آن‌ها الیاف شیشه در انواع E، C و S و از پلی‌استر به عنوان زمینه استفاده شده است. در این تحقیق چهار نمونه را در شرایط یکسان ساخته‌اند و در بازه 330 (Hz) تا 3 (MHz) و دمای 25 تا 150 درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار دادند. در نهایت تفاوت نسبی بین نمونه‌ها در فرکانس‌های پایین مشاهده شد که با افزایش فرکانس این تفاوت به مراتب کاهش می‌یابد.

در سال 2010 وانگ و همکاران [6] در رابطه با طیف‌سنجی رزین کامپوزیت‌های که در سازه‌های هوانوردی استفاده می‌شوند، به مطالعه پرداختند. در این پژوهش دو نوع رزین اپوکسی A3238 و BA9916 و دو نوع رزین

¹ Dielectric
² Loss tangent

³ VARTM

ترکیبی با درصد برابر از شیشه سری E و D تشکیل شده است. برای عامل رزین نیز از دو سطح اپوکسی و یک سطح پلی‌استر (به دلیل اهمیت و کاربرد بیشتر رزین اپوکسی در مطالعات پیشین) و در نهایت برای روش ساخت سه سطح لایه‌چینی دستی، کیسه خلأ و نفوذ در خلأ به کار گرفته شده است.

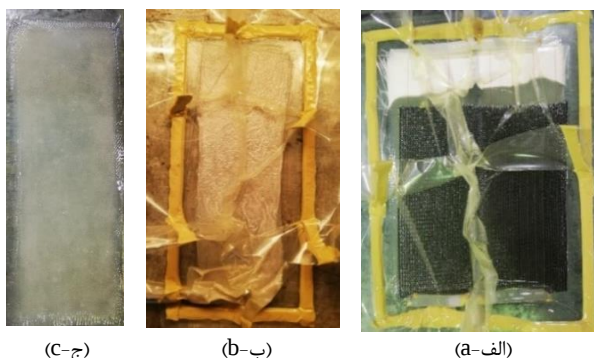


Fig. 2 Some of the parts made by a) infusion, b) vacuum bag, c) hand layup method

شکل 2 نمونه قطعات ساخته شده با روش الف (نفوذ در خلأ، ب) کیسه خلأ، ج) لایه‌چینی دستی

با توجه به کیفی بودن تمامی عامل‌ها از بین روش‌های طراحی آزمایش، روش تاگوچی که مبتنی بر آرایه‌های متعامد و آنالیز سیگنال به نویز است انتخاب شده است. به دلیل داشتن سه عامل در سه سطح بهترین انتخاب برای مسئله حاضر آرایه L_9 می‌باشد. به این ترتیب برای به دست آوردن بهترین ترکیب برای حالت بهینه هر یک از پاسخ‌ها نیاز به انجام 9 آزمایش می‌باشد که در جدول 1 نحوه ترکیب عامل‌ها مشخص شده است. جهت تعریف تاگوچی و انجام فرایند بهینه‌یابی از نرم‌افزار آماری مینی‌تب³ 20.3 استفاده شده است.

جدول 1 نحوه چینش متغیرهای ورودی

Table 1 Arrangement of input variables

شماره نمونه	جنس الیاف	جنس رزین	روش ساخت
1	شیشه سری E	اپوکسی	لایه‌چینی دستی
2	شیشه سری E	اپوکسی	کیسه خلأ
3	شیشه سری E	پلی‌استر	نفوذ در خلأ
4	شیشه سری D	پلی‌استر	لایه‌چینی دستی
5	شیشه سری D	اپوکسی	کیسه خلأ
6	شیشه سری D	اپوکسی	نفوذ در خلأ
7	ترکیب شیشه سری E و D	اپوکسی	لایه‌چینی دستی
8	ترکیب شیشه سری E و D	پلی‌استر	کیسه خلأ
9	ترکیب شیشه سری E و D	اپوکسی	نفوذ در خلأ

متغیرهای پاسخ در این پژوهش، استحکام کششی و ثابت دی‌الکتریک می‌باشند، که در بخش بعد بصورت مختصر به بیان استانداردها و روش‌های محاسبه این خواص اشاره می‌شود.

برای به دست آوردن حالت بهینه هر یک از این پاسخ‌ها، نیاز به انجام تحلیل سیگنال به نویز بر روی آن‌ها می‌باشد. مقدار پاسخ موردنظر از رابطه 1 برای خواص مکانیکی هر چه بیشتری باشد بهتر است و از رابطه 2 برای خواص الکترومغناطیسی اگر هر چه مقدار کمتری باشد مطلوب‌تر است، مقدار میانگین

مغناطیسی (ثابت دی‌الکتریک) را داشته باشد و بسیار کاربردی باشد، تا کنون انجام نشده است. لذا در این تحقیق با بررسی خواص مکانیکی و خواص الکترومغناطیسی در مدل‌های مختلف به مقادیر مطلوب و بهینه دست یافته و با یکدیگر مقایسه شده است.

2- مواد و روش ساخت

2-1- مواد

برای استفاده از ریدوم به طور معمول از الیاف شیشه استفاده می‌شود [12]. الیاف شیشه دارای خواص مکانیکی قابل قبول و خواص الکترومغناطیسی مناسبی می‌باشد و همچنین از نظر قیمت از الیاف کربن و آرامید بسیار بصره‌تر است. الیاف شیشه نوع D مخصوص کاربردهای دی‌الکتریک است، ولی خواص مکانیکی آن از نوع E که عایق الکتریکی می‌باشد، کمتر است. با این وجود نوع E نیز به دلیل وجود درصد کمی از ترکیبات فلزی خواص الکترومغناطیسی مطلوبی دارد. به همین دلیل در این پژوهش، در هر نمونه، از 12 لایه پارچه $(0/90)_{12}$ شیشه سری E با وزن واحد سطح $150 \text{ (g/m}^2\text{)}$ و یا سری D با وزن واحد سطح $200 \text{ (g/m}^2\text{)}$ و یا ترکیبی از این دو نوع پارچه در کنار هم با درصد برابر (6 لایه شیشه سری E و 6 لایه شیشه سری D) ساخت شرکت هیلتکس¹ هلند، استفاده شده است.

با توجه به تحقیقات انجام شده، بطور معمول برای فاز زمینه ریدوم کامپوزیت از دو نوع رزین پلی‌استر و اپوکسی استفاده شده است. این دو رزین دارای خواص مکانیکی بسیار خوبی است و برای کاربردهای الکترومغناطیسی نیز استفاده می‌شود. رزین پلی‌استر مورد استفاده در این پژوهش رزین پلی‌استر غیر اشباع کبالت خورده ساخت شرکت صنایع شیمیایی بوشهر است که نیاز به افزودن 2 درصد اسید به عنوان کاتالیزور دارد. رزین اپوکسی نیز دارای کد LY5052 به همراه سخت‌کننده HY5052 با درصد ترکیب 100 به 35 و ساخت شرکت هانسن² است. چرخه پخت قطعات ساخته شده با این رزین به صورت هوا پخت³ است به نحوی که پس از ساخت قطعه، یک روز آن را در دمای اتاق (23 درجه سلسیوس) نگه داشته می‌شود و پس از آن به مدت 15 ساعت در دمای 50 درجه در داخل کوره گذاشته تا چرخه پخت کامل شود.

2-2- روش ساخت

روش‌های ساخت ریدوم متناسب با نوع کاربرد آن متفاوت است [13]. در این پژوهش از بین روش‌های ساخت ریدوم، سه روش لایه‌چینی دستی، کیسه خلأ و نفوذ در خلأ⁴ بررسی شده و میزان تأثیر آن‌ها بر روی خواص ریدوم کامپوزیتی، با یکدیگر مقایسه شده است. در روش لایه‌چینی دستی برخلاف دو روش دیگر از پمپ خلأ برای خروج حباب استفاده نمی‌شود در نتیجه حباب بیشتری در داخل قطعه می‌ماند. در روش کیسه خلأ ابتدا رزین اعمال می‌شود و سپس قطعه تحت خلأ قرار می‌گیرد ولی در روش نفوذ در خلأ ابتدا قطعه تحت خلأ قرار می‌گیرد و سپس به واسطه وجود خلأ رزین به داخل قطعه تزریق می‌شود (شکل 2).

2-3- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش یک رویکرد علمی است که با کمک آن به فهم بهتر از یک فرآیند و همچنین تعیین چگونگی تأثیر ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها پرداخته می‌شود. در هر طراحی آزمایش نیاز به تعدادی عامل ورودی در سطح‌های گوناگون است. عامل‌های مدنظر در این پژوهش نوع الیاف، رزین و روش ساخت کامپوزیت است. عامل الیاف از سه سطح شیشه سری E و شیشه سری D و

⁴ Infusion

⁵ Minitab

¹ Hiltex

² Hunstman

³ Cold cure

از هر نمونه، نمودار تنش کرنش یکی از سه نمونه آزمون که مقداری نزدیک به میانگین مقادیر سه نمونه آزمون داشته، در شکل 4 آورده شده است. مقادیر استحکام نهایی و مدول الاستیک در راستای الیاف برای هر یک از نمونه‌ها در جدول 2 آمده است. با توجه به نمودار شکل 4، از میان نمونه‌های مورد آزمون، بیشترین مقدار استحکام کششی برای کامپوزیت شیشه E و اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ (نمونه شماره 2) می‌باشد.

پس از انجام تحلیل در نرم‌افزار مینی تب مقادیر سیگنال به نویز هر یک از عوامل در هر سطر برای استحکام کششی مطابق جدول 2 به دست آمد. پس از آنالیز نتایج، مقدار سیگنال به نویز برای سطوح هر یک از عوامل در جدول 3 آمده است.

هرچه مقدار دلتا بیشتر باشد، پراکندگی سطوح عامل بیشتر و در نتیجه تأثیر آن عامل بر روی سیستم بیشتر از سایر عامل‌ها است. با توجه به جدول 3 می‌توان بیان کرد که نوع الیاف بیشترین تأثیر را بر روی استحکام کششی دارد. همچنین مشخص گردید که با ترکیب الیاف شیشه E و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ بالاترین مقدار استحکام کششی (نمونه شماره 2) به مقدار 320.9 (MPa) به دست آمده است.

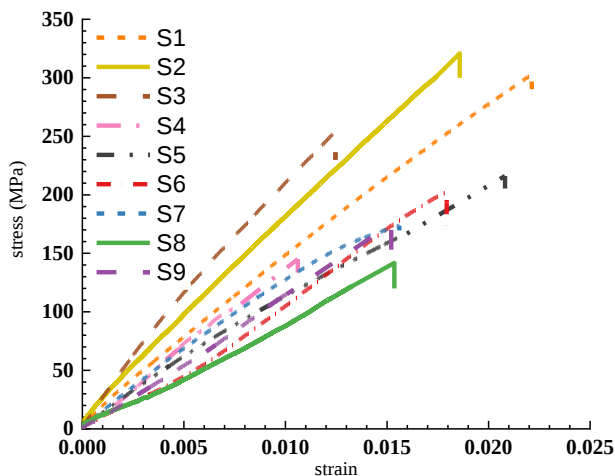


Fig. 4 Stress-Strain diagram

شکل 4 نمودار تنش کرنش

جدول 2 مقادیر استحکام کششی نهایی در راستای الیاف

Table 2 Final tensile strength values in the direction of the fibers

شماره نمونه	استحکام کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	مقادیر سیگنال به نویز استحکام کششی
1	302.9	13.76	49.626
2	320.9	17.26	50.127
3	254.3	21.19	48.107
4	145.09	13.66	43.233
5	216.15	10.38	46.695
6	202.5	11.25	46.129
7	173.5	12.05	44.786
8	141.8	9.23	43.034
9	175.1	11.51	44.866

مربعیات انحرافات¹ استفاده می‌شود و در نهایت با رابطه 3 مقدار سیگنال به نویز را به دست می‌آید.

$$MSD = \frac{[(y_1)^2 + (y_2)^2 + \dots + (y_n)^2]}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}{n} \quad (1)$$

$$MSD = \frac{[\frac{1}{(y_1)^2} + \frac{1}{(y_2)^2} + \dots + \frac{1}{(y_n)^2}]}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(y_i)^2}}{n} \quad (2)$$

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (3)$$

در این روابط y_i پاسخ i -ام هر یک از آزمایش‌ها و n تعداد تکرار پاسخ در هر آزمایش است. هرچه نسبت S/N بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده نتایج بهتری است زیرا اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از پارامترهای غیر قابل کنترل (نویز²) است. در انتها پس از محاسبه سیگنال به نویز پاسخ هر یک از آزمایش‌ها، مقدار میانگین سیگنال به نویز پاسخ برای هریک از سطوح عامل‌ها، محاسبه می‌شود.

در نهایت با مقایسه مقادیر سیگنال به نویز سطوح هر عامل، بهترین سطح برای آن عامل مشخص و با استفاده از این مقادیر بهترین پاسخ را می‌توان پیش‌بینی نمود. همچنین هرچه اختلاف مقادیر سیگنال به نویز سطوح در یک عامل بیشتر باشد میزان تأثیر آن عامل در پاسخ نهایی بیشتر است.

3- نتایج

3-1- خواص مکانیکی

از جمله مهم‌ترین خواص مکانیکی در یک کامپوزیت، استحکام کششی در راستای الیاف است. در این پژوهش از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D3039 استفاده شده است. بر طبق این استاندارد برای هر قطعه ساخته شده، سه نمونه مجزا به همراه تپ‌های فلزی در نظر گرفته شده است که هر نمونه با ابعاد 250 در 25 میلی‌متر مربع، با استفاده از دستگاه آزمون کشش عمودی شرکت سنتام مدل STM-150، آزموده شده و در نهایت پس از انجام آزمون کشش، خروجی‌های تنش-کرنش از دستگاه استخراج شده است. در شکل 3، سه نمونه آزمون قبل، حین و بعد از آزمون کشش عمودی آورده شده است.

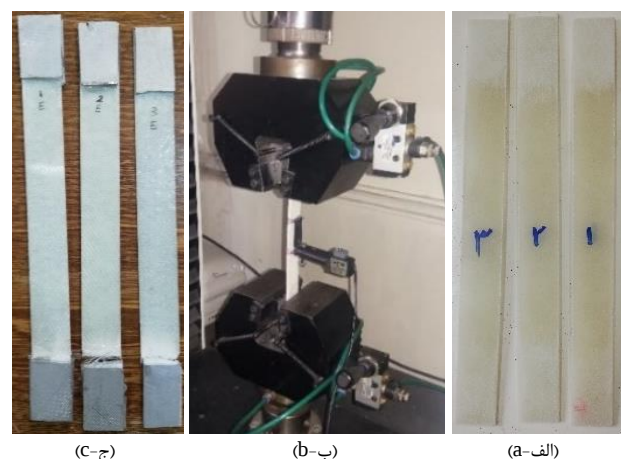


Fig. 3 a) 3 samples prepared for testing, b) Vertical tensile testing machine with sample, c) 3 samples after testing

شکل 3 الف) سه نمونه آزمون آماده شده جهت آزمایش، ب) دستگاه آزمون کشش عمودی همراه با نمونه آزمون، ج) سه نمونه آزمون بعد از آزمایش

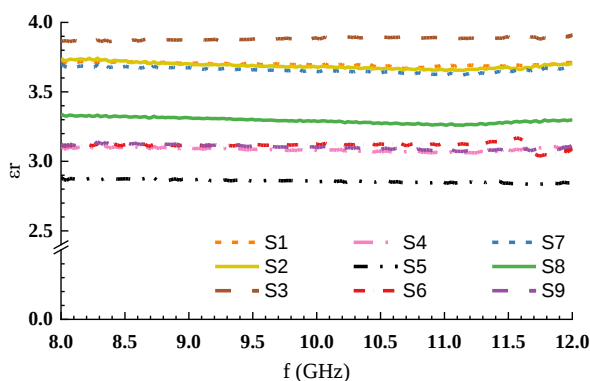


Fig. 5 Dielectric constant at X band

شکل 5 ثابت دی‌الکتریک در باند X

برای ارزیابی، مقایسه نتایج و یافتن حالت بهینه برای خواص الکترو-مغناطیسی از بین فرکانس‌های باند X، فرکانس 10.5 گیگاهرتز به دلیل کاربری بالای این فرکانس در سازه‌های مخابراتی هوایی و دریایی انتخاب شد که در جدول 4 مقدار ثابت دی‌الکتریک مقادیر سیگنال به نویز به دست آمده از نرم‌افزار در این فرکانس آورده شده است.

جدول 4 مقادیر ثابت دی‌الکتریک در فرکانس 10.5 GHz

Table 4 Dielectric constant at 10.5 GHz

شماره نمونه	ثابت دی‌الکتریک در فرکانس	شماره نمونه
-11.341	3.69	1
-11.281	3.665	2
-11.806	3.893	3
-9.737	3.068	4
-9.115	2.856	5
-9.894	3.124	6
-11.217	3.638	7
-10.339	3.271	8
-9.794	3.088	9

پس از انجام مقادیر سیگنال به نویز سطوح هر یک از عوامل و مقدار دلتا برای ثابت دی‌الکتریک در جدول 5 آورده شده است. با توجه به جدول می‌توان نتیجه گرفت که همچنان نوع الیاف بیشترین تأثیر را بر روی ثابت دی‌الکتریک دارد. ترکیب الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ (نمونه شماره 5) کمترین مقدار ثابت دی‌الکتریک (2.85) را در فرکانس 10.5 گیگاهرتز می‌دهد.

جدول 5 نتایج تحلیل سیگنال به نویز ثابت دی‌الکتریک

Table 5 Results of signal-to-noise analysis for Dielectric constant

سطح	الیاف	روش ساخت	رزین
1	-11.476	-10.765	-10.440
2	-9.582	-10.245	-10.627
3	-10.450	-10.498	
دلتا	1.894	0.520	0.187
رتبه	1	2	3

 جدول 3 نتایج تحلیل سیگنال به نویز استحکام نهایی
 Table 3 Results of signal-to-noise analysis for ultimate strength

سطح	الیاف	روش ساخت	رزین
1	49.29	45.88	47.04
2	45.35	46.62	44.79
3	44.23	46.37	
دلتا	5.06	0.47	2.25
رتبه	1	3	2

2-3- خواص الکترومغناطیسی

از جمله مهم‌ترین پارامترهای الکترومغناطیسی در طراحی یک ریدوم، ثابت دی‌الکتریک آن است. خواص دی‌الکتریک یک ماده عایق به شکل یک کمیت فیزیکی مختلط مطابق رابطه (4) توصیف می‌شود که به ترتیب بخش حقیقی آن (ϵ') بیانگر ذخیره انرژی (که معرف ثابت دی‌الکتریک است) و بخش موهومی آن (ϵ'') بیانگر اتلاف انرژی در ماده است در این رابطه ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک در خلأ است.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (4)$$

از بین روش‌های محاسبه خواص الکترومغناطیسی، روش خط انتقال دارای خطای کم و دقتی بالا می‌باشد و می‌توان به وسیله آن در تمام باند X مقادیر ثابت دی‌الکتریک را محاسبه کرد. طبق استاندارد D5568 اندازه نمونه‌ها در این روش 22.5 در 10 میلی‌متر مربع است که در داخل دستگاه (شکل 5) قرار می‌گیرد.



Fig. 4 Internal compartment of transmission line test device

شکل 4 محفظه داخلی دستگاه آزمون خط انتقال

با توجه به اهمیت دقت ابعادی نمونه‌های آزمون دی‌الکتریک، جهت تهیه و جدا کردن این نمونه‌ها از قطعه اصلی، روش برشی جت آب¹ به کار گرفته شده است تا از ایجاد هرگونه فضای خالی بین نمونه و محفظه قرارگیری² آن جلوگیری شود.

پس از انجام آزمون بر روی هر یک از نمونه‌ها، مقادیر ثابت دی‌الکتریک آن‌ها در فرکانس 8 تا 12 گیگاهرتز (GHz) (محدوده فرکانسی باند X) به دست می‌آید که در نمودار شکل 5 نشان داده شده است.

همانطور که در نمودار شکل 5 مشاهده می‌شود مقادیر ثابت دی‌الکتریک در بازه 2.8 تا 3.9 متغیر است و کم‌ترین مقدار ثابت دی‌الکتریک برای نمونه شماره 5 (کامپوزیت شیشه D و اپوکسی و روش کیسه خلأ) و بیشترین مقدار برای نمونه شماره 3 (کامپوزیت شیشه E و پلی‌استر و روش نفوذ در خلأ) در بین نمونه‌های موجود به دست آمده است.

² Waveguide

¹ Water jet

3-3- بهینه‌یابی

با استفاده از روش تاگوچی تنها می‌توان به بهینه‌یابی یک پاسخ پرداخت و سطوح بهینه عامل‌ها را بر اساس میانگین مقادیر سیگنال به نویز تعیین کرد و نمی‌توان مسائل چند پاسخ را مستقیماً با آن بهینه‌یابی کرد. در حالی که در پژوهش حاضر قصد بر این است بیش از یک پاسخ (استحکام کششی و ثابت دی‌الکتریک) بهینه شود و نتیجه نهایی به هر دو پاسخ‌ها وابسته است. رویکرد کلی در حل این مشکل ترکیب چند پاسخ در یک پاسخ و سپس دستیابی به سطوح بهینه است. برای حل مسئله کنونی از روش تحلیل رابطه خاکستری¹ استفاده شده است. مراحل تحلیل رابطه خاکستری شامل: 1- ایجاد رابطه خاکستری 2- نرمالیزه کردن 3- محاسبه ضریب رابطه خاکستری می‌شود. در مرحله اول، نیاز است که پاسخ‌ها با استفاده از روابط بیان شده در مراحل قبل به مقادیر سیگنال به نویز تبدیل شوند که در بخش طراحی آزمایش این کار انجام شده و مقادیر آن در جدول‌های 2 و 4 آورده شده است. در مرحله بعد با توجه به هم‌وزن نبودن پاسخ‌ها پس از ایجاد رابطه خاکستری، باید نسبت به نرمال‌سازی آن‌ها اقدام نمود تا امکان ارزیابی و مقایسه از منظر همه پاسخ‌ها فراهم گردد. نرمال‌سازی با استفاده از رابطه (5) صورت می‌گیرد. با عمل نرمال‌سازی کلیه داده‌های مسئله بین صفر و یک قرار می‌گیرند.

$$Z_{ij} = \frac{Y_{ij} - \min(Y_{ij})}{\max(Y_{ij}) - \min(Y_{ij})} \quad (5)$$

در رابطه بالا مقادیر Z_{ij} ، مقادیر نرمال شده و مقادیر Y_{ij} جواب i -امین آزمایش از j -امین پاسخ می‌باشد که عددی بین 0 و 1 است. مقادیر نرمال‌سازی شده در جدول (6) آمده است.

جدول 6 مقادیر نرمال‌سازی شده خروجی‌ها

Table 6 Normalized values of outputs

شماره نمونه	ثابت دی‌الکتریک	استحکام نهایی
1	0.173	0.929
2	0.195	1.000
3	0.000	0.715
4	0.769	0.028
5	1.000	0.516
6	0.710	0.436
7	0.219	0.247
8	0.545	0.000
9	0.748	0.258

در مرحله بعد برای به دست آوردن ضریب رابطه خاکستری ابتدا باید مقادیر نرمال‌سازی شده را به انحراف از هدف² طبق رابطه (6) تغییر داد که به عنوان افت کیفیت نیز بیان می‌شود. این مقدار برابر با اختلاف هر یک از مقادیر Z_{ij} با مقدار هدف 1 (به دلیل اینکه عدد 1 بهترین حالت ممکن است) می‌باشد. پس از مشخص شدن مقادیر انحراف از هدف، ضریب GC_{ij} رابطه خاکستری طبق رابطه (7) محاسبه می‌شود. ضریب رابطه خاکستری برای بیان رابطه بین نتایج آزمایشی ایده‌آل و واقعی بصورت زیر تعریف شده است.

$$\Delta_{ij} = 1 - Z_{ij} \quad (6)$$

$$GC_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \lambda \Delta_{\max}} \quad (7)$$

¹ Grey

در رابطه (7) مقدار $\Delta_{\max}$ برابر با 1 و مقدار $\Delta_{\min}$ برابر با صفر (به دلیل 1 بودن مقدار هدف) است. λ ضریب تمایز است که بر اساس نیازهای عملی سیستم تنظیم می‌شود و عددی بین صفر و یک می‌باشد. مقدار آن در این مطالعه بصورت هم‌وزن و برابر با 0.5 در نظر گرفته شده است. مقدار GC_{ij} محاسبه شده برای هر یک از پاسخ‌ها در جدول 7 آورده شده است.

جدول 7 مقادیر GC_{ij} خروجی‌ها

Table 7 GC_{ij} values of outputs

شماره نمونه	ثابت دی‌الکتریک	استحکام نهایی
1	0.377	0.876
2	0.383	1.000
3	0.333	0.637
4	0.684	0.340
5	1.000	0.508
6	0.633	0.470
7	0.390	0.399
8	0.524	0.333
9	0.665	0.403

پس از به دست آوردن ضرایب رابطه خاکستری پاسخ هر یک از آزمایش‌ها، مقدار ضریب نهایی G_i برای هر یک از آزمایش‌ها طبق رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$G_i = \frac{1}{m} \sum (\alpha_j \times GC_{ij}) \quad (8)$$

در این معادله α_j برابر است با ضریب تأثیر هر یک از پاسخ‌ها با توجه به میزان اهمیت آن پاسخ نسبت به سایر پاسخ‌ها و m برابر با مجموع ضرایب تأثیر پاسخ‌ها است. با توجه به اینکه کاربری این سازه برای محافظت از آنتن می‌باشد، اهمیت خواص الکترومغناطیسی بیشتر از خواص مکانیکی است. به همین دلیل برای ثابت دی‌الکتریک ضریب تأثیر 4 و برای استحکام نهایی ضریب تأثیر 3 در نظر گرفته شده است. در جدول 8 مقدار G نهایی برای تمامی آزمایش‌ها آورده شده است. همانطور که در جدول (8) مشخص شده است، نمونه شماره 5 (الیاف شیشه سری D، رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ) نمونه بهینه در بین نمونه‌های موجود شده است.

پس از به دست آوردن مقادیر G_i ، آن‌ها را به عنوان پاسخ جدید در نظر گرفته و از آن‌ها به عنوان ورودی نرم‌افزار مینی‌تب استفاده نموده تا سطوح بهینه نهایی هر یک از عامل‌ها به دست آید. مقادیر سیگنال به نویز و مقدار دلنا برای سطح‌های هر عامل، در جدول 9 آورده شده است. در این تحلیل نیز همچون سایر تحلیل‌های خواص مکانیکی و الکترومغناطیسی تأثیر الیاف بر نتیجه نهایی بیشتر از سایر عامل‌ها است.

ترکیب الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ، ترکیب بهینه و ایده‌آلی برای حالت نهایی است. این ترکیب کامپوزیت که با نمونه شماره 5 نیز تطابق دارد و به عنوان حالت بهینه ثابت دی‌الکتریک نیز به دست آمده بود، دارای استحکام کشش 216.15 (MPa) و ثابت دی‌الکتریک 2.85 در فرکانس 10.5 (GHz) است.

² Deviation sequence

جدول 8 مقادیر G نهایی

Table 8 Final G values

شماره نمونه	مقدار G	رتبه
1	0.591	3
2	0.647	2
3	0.464	7
4	0.536	6
5	0.789	1
6	0.563	4
7	0.394	9
8	0.442	8
9	0.552	5

جدول 9 نتایج تحلیل سیگنال به نویز مقدار G

Table 9 Results of signal-to-noise analysis for G values

سطح	الیاف	روش ساخت	رژین
1	-5.009	-6.024	-4.772
2	-4.151	-4.307	-6.393
3	-6.778	-5.606	
Delta	2.627	1.717	1.621
رتبه	1	2	3

4- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های سیگنال به نویز در روش تاگوجی و بهینه‌یابی چندپاسخه الیاف و رزین‌های مورد استفاده در ساخت ریدوم‌های کامپوزیتی GFRP که در این پژوهش استفاده شده، نتایج حاصله به این صورت است که برای استحکام کششی ترکیب الیاف شیشه سری E و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ بالاترین استحکام کششی مقدار 320.9 مگاپاسکال را دارد و برای ثابت دی‌الکتریک الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ با مقدار 2.85 پایین‌ترین ثابت دی‌الکتریک را داشته است. درنهایت با انجام بهینه‌یابی چندپاسخه با روش خاکستری مشخص گردید برای حالتی که پایین‌ترین ثابت دی‌الکتریک و بالاترین استحکام کششی هم‌زمان مدنظر است، پیشنهاد می‌شود که از ترکیب الیاف شیشه سری D، رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلأ استفاده شود.

5- تقدیر و تشکر

در انتها از زحمات اساتید محترم و کارشناسان کارگاه و آزمایشگاه دانشگاه صنعتی مالک اشتر که ما را در به ثمر رساندن این پژوهش یاری رساندن بسیار سپاس گذاریم.

6- مراجع

- [1] Rašuo, B., "Dielectric modeling of multiphase composites," Vol. 93, pp. 3209–3215, 2011.
- [2] Miracle, D. B., Donaldson, S. L., Henry, S. D., "ASM Handbook Volume 21 Composites," Eighth ed., ASM International Handbook Committee, 2017.
- [3] Blythe, T., and Bloor, D., "Electrical properties of polymers," Vol. 11, No. 3, 2005.
- [4] Sokolov, V. I., Shalgunov, S. I., Gurtovnik, I. G., Mikheeva, L. G., and Simonov-Emel'yanov, I. D., "Dielectric Characteristics of Glass Fibre Reinforced Plastics and Their Components," Int. Polym. Sci. Technol., Vol. 32, No. 7, pp. 62–67, 2004.
- [5] Akram, M., Javed, A., and Rizvi, T. Z., "Dielectric properties of industrial polymer composite materials," Turkish J. Phys., Vol. 29, No. 6, pp. 355–362, 2005.
- [6] Wang, Q., Li, X., Chang, T., Hu, Q., and Yang, X., "Terahertz spectroscopic study of aeronautical composite matrix resins with different dielectric properties," Optik (Stuttg.), Vol. 168, No. 2010, pp. 101–111, 2018.



نانو/میکرو کامپوزیت‌های فوم پلی‌یورتان/پلی‌اوره تقویت شده با زئولیت طبیعی/نانوذرات گرافیت مقاوم به شعله

مهدی کاروان^{1*}، مرضیه فلاح²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* mkarevan@iut.ac.ir, 83111-84156 صندوق پستی

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/11/10

پذیرش: 1401/01/27

کلیدواژگان

خواص مکانیکی، فوم پلی‌یورتان، مقاوم به شعله، زئولیت طبیعی، پلی‌اوره

چکیده

کامپوزیت‌های پلیمری پایه نفتی می‌توانند عامل گسترش اشتعال علیرغم کاربردهای متعدد خود باشند. تحقیقات انجام شده بر روی اشتعال‌پذیری و خواص ضد حریق کامپوزیت‌ها در مقایسه با مطالعات خواص مکانیکی آن‌ها ناچیز بوده که بیانگر اهمیت پرداختن به خواص چندمنظوره کامپوزیت‌ها با خواص مقاومت در برابر آتش است. در این تحقیق پلی‌یورتان دوجزئی با زئولیت طبیعی و نانوصفات گرافیتی به منظور بررسی مقاومت به آتش و خواص بهینه مکانیکی فوم‌های کامپوزیتی ترکیب شد. همچنین ترکیب پلی‌یورتان با پلی‌اوره بنا بر فرضیه مطالعه با درصد بهینه 40٪ به صورت کامپوزیت ترکیبی هم‌پایه بررسی شد. نتایج نشان داد میکرو/نانوکامپوزیت‌های تقویت شده زئولیت و نانوصفات گرافیتی به ترتیب منجر به افزایش مدول یانگ کششی معادل 200 و 300٪ شده و افزودن زئولیت باعث افزایش استحکام در کشش کامپوزیت‌های می‌شود. آزمایش‌ها نشان داد مدول خمشی نیز با افزودن دو فیلر افزایش می‌یابد. به منظور افزایش خواص مکانیکی، پارچه الیاف شیشه به کامپوزیت ترکیبی پلی‌یورتان/پلی‌اوره با خواص بهینه لایه‌گذاری شد که منجر به افزایش 600 و 200 درصدی مدول یانگ خمشی در حالت دولایه شد. روکش پلی‌اوره روی کامپوزیت‌ها با درصد بهینه نشان داد که نرخ سوختن 23 تا میلی‌متر بر دقیقه کاهش یافته و مدت سوختن طبق استاندارد UL94 معادل 200 ثانیه گردید. کامپوزیت پلی‌یورتان/پلی‌اوره تقویت شده با زئولیت 2 درصد وزنی منجر به نرخ سوختن 4.9 میلی‌متر بر دقیقه شده که در دامنه مجاز 80 درصد کمتر از حداکثر نرخ ممکن در استاندارد است.

Fire resistant polyurethane/polyurea micro/nanocomposite foams reinforced with natural zeolite/Graphite nanoplatelets (GNP)

Mehdi Karevan^{1*}, Marzieh Fallah¹

1- Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, mkarevan@iut.ac.ir

Keywords

Mechanical properties, Polyurethane foam, Fire resistance, Natural zeolite, Polyurea

Abstract

Petroleum based polymer composites could be a factor in the development of fire unlike their numerous applications. The research performed on the fire resistance and flammability of composites is not comparable with those conducted on the mechanical behavior of composites demonstrating the importance of studying multi-functional composites of fire resistance behavior. In this work, two-part polyurethane was reinforced with natural zeolite and graphite nanoplatelets (GNP) to examine fire resistance and optimized mechanical behavior of the composite foams. Moreover, polyurea was added with the optimized ratio of 40% into polyurethane composites based on the study hypothesis. The results showed that zeolite and GNP filled nano/microcomposites led to a 200 and 300% improvement in the tensile modulus of the composites, respectively. It was further shown that both fillers resulted in enhancement in the flexural modulus, too. To enhance the mechanical behavior, fiber glass mat was laminated with the optimized polyurethane/polyurea compound leading to a 600 and 200% improvement in the flexural modulus, respectively, in the case of two-layer reinforcement. The polyurea coating on the optimized composite specimens demonstrated the reduced burning rate of 23 mm/min and a 200 s flame time based on the UL94 standard. The mixed compound of polyurethane/polyurea filled with 2 wt% of zeolite led to the burning rate of 4.9 mm/min being in the allowable range above 80% lower than the maximum possible rate set forth in the standard.

Please cite this article using:

Karevan, M., Fallah, M., "Fire resistance polyurethane/polyurea micro/nanocomposite foams reinforced with natural zeolite/Graphite nanoplatelets (GNP)", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1715-1725, 2022.
<https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.546600.1766>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1-مقدمه

پلی‌یورتان‌ها¹ خانواده بزرگی از پلیمرها با خواص و کاربردهای متنوع هستند و همه آن‌ها محصول واکنش ایزوسیانات آلی با ترکیبات حاوی گروه هیدروکسیل می‌باشند. پلی‌یورتان‌ها ممکن است ترموست یا ترموپلاستیک، سخت یا نرم، جامد یا دارای بافت سلولی با خواص متنوع باشند که در فناوری‌های نوین نیز کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند [1، 2]. خواص آن‌ها می‌تواند متناسب با نیاز کاربردهای مختلف باشد، به عنوان مثال ترموپلاستیک پلی‌یورتان برای قاب ابزار خودرو، فیلم اکستروژنه شده و ورق، فوم نرم برای لوازم منزل و عایق صوتی، فوم پنبه نیمه جامد برای قطعات خودرو، فوم سخت برای عایق و پوشش‌های انعطاف‌پذیر برای پارچه، چرم، الیاف الاستیک و چسب و با ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی و به عنوان پرکننده الیاف سه‌بعدی استفاده می‌شوند [3، 4]. پلی‌یورتان از واکنش یک ترکیب ایزوسیانات شامل دو یا چند گروه ایزوسیانات در هر مولکول با یک پلی‌ال شامل دو یا چند گروه هیدروکسی در هر مولکول تشکیل می‌شود. خواص پلی‌یورتان به شدت به نوع ایزوسیانات و پلی‌ال که برای ساخت آن استفاده شده است، بستگی دارد. بخش‌های بلند و انعطاف‌پذیر که توسط پلی‌ال ساخته می‌شوند، یک پلیمر الاستیک و نرم را نتیجه می‌دهند. تعداد زیاد اتصالات عرضی² یک پلیمر سفت و سخت را می‌سازد. از لحاظ فنی این پلیمرها الاستومرهای ترموپلاستیک شامل بخش‌های خطی کوپلیمر متشکل از بخش‌های سخت و نرم هستند. پلیمر نهایی شامل زنجیره‌های پلیمری خطی در ساختار بلوک مانند می‌باشد [5].

یکی از ویژگی‌های مطلوب پلی‌یورتان این است که این پلیمر قابل تبدیل شدن به شکل فوم می‌باشد. تولید فوم نیاز به تشکیل یک گاز در همان زمانی که پلیمریزاسیون یورتان اتفاق می‌افتد، دارد [5]. یکی از کاربردهای اصلی پلی‌یورتان ساخت فوم‌های انعطاف‌پذیر کامپوزیتی با افزودن مواد تقویت کننده میکرو و نانو است [6]. طیف گسترده‌ای از تقویت‌کننده‌ها مانند الیاف شیشه، کربن سیاه و الیاف طبیعی، نانولوله کربن³، نانو صفحات گرافیتی⁴، ذرات سیلیکا⁵ و دیگر اکسیدهای فلزی نمونه‌هایی از پرکننده‌های نانو بوده که بطور فراوان در تحقیقات گزارش شده‌اند [6-9].

گرچه استفاده از نانوفیلرها برای تقویت پلیمرها یک فناوری جدید بوده که می‌توانند خواص مکانیکی فوم‌ها را بهبود بخشند، با توجه به هزینه تحمیلی بر محیط‌زیست و انباشت مواد غیر قابل بازگشت به طبیعت در کنار سیاست کشورها در راستای فناوری‌های سبز، پرکننده‌های معدنی نظیر ژئولیت⁶ طبیعی بسیار در تحقیقات گزارش شده‌اند [10، 11]. ژئولیت‌ها ترکیبات بلوری بر پایه آلومینوسیلیکات هستند که دارای ساختار سه‌بعدی متشکل از صفحات چهار وجهی SiO_4 و AlO_4 هستند و توسط اتم‌های اکسیژن به یکدیگر متصل شده‌اند [12]. ژئولیت‌ها بیشتر مواقع با خصوصیات چون تراکم پایین و فضای خالی زیاد، ساختمان بلوری، خاصیت تبادل کاتیونی، خواص فیزیکی متنوعی از قبیل رسانایی الکتریکی، خواص کاتالیستی و غیره شناخته می‌شوند [13]. نانوصفات گرافیتی⁷ که از صفحه‌های گرافن با ضخامت حدود 1 تا 15 نانومتر تشکیل شده نیز بسیار در راستای افزایش خواص مکانیکی فوم‌های پلی‌یورتان استفاده شده‌اند که در مقایسه با خاک رس، ساختار لایه‌ای مشابه همراه با خواص مکانیکی بهتری داشته و نتایج امیدوارکننده‌ای در زمینه

کامپوزیت‌های پلیمری به عنوان حسگر، مواد رابط حرارتی و ایجاد پلیمرهای هادی الکتریسته نمایش داده‌اند [14، 15].

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تقویت‌کنندگی فازهای پلی‌یورتان با انواع مواد نانومیکرو در جهت بهبود خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و خواص تاخیرانداز شعله آن‌ها گزارش شده است [3، 16]. تیرومال و همکارانش فوم پلی‌یورتان سخت همراه با بازدارنده‌های شعله پلی‌فسفات ملامین⁸ و سیانورات ملامین را تولید کردند. نتایج نشان داد خواص مکانیکی و پایداری حرارتی فوم تقویت‌شده با سیانورات ملامین نتایج بهتری نسبت به فوم پرشده با پلی‌فسفات ملامین داشته و مقاومت به آتش فوم پلی‌یورتان پرشده با پلی‌فسفات ملامین بهتر از فوم پرشده با سیانورات ملامین است [17]. هاریکشرینان و همکارانش نانوالیاف کربن را به عنوان فاز تقویت‌کننده به ترکیبات پلی‌یورتان افزودند. فوم حاصل از واکنش این نانوذرات، فوم پلی‌یورتان با خواص بالا تولید کرد و هدایت حرارتی و رفتار مقاومت به آتش این فوم نانوکامپوزیتی به ازای درصد کمی از نانوفیلر بهبود پیدا کرد [18]. کالری‌متر مخروطی⁹ یکی از مهم‌ترین تجهیزاتی است که برای بررسی رفتار ماده در برابر آتش استفاده می‌شود. نازیم یوستا و همکاران رفتار فوم پلی‌یورتان سخت شامل خاکستر ورقه شده و بازدارنده شعله را که ترکیب آمونیوم پلی‌فسفات و پنتا اریتریتول بود، با استفاده از کالری‌متر مخروطی بررسی کردند [19]. لرنزتی و همکارانش نشان دادند که فسفینات آلی و معدنی هر دو در افزایش مقاومت به آتش فوم پلی‌یورتان تأثیرگذار هستند [20].

ژائو و همکاران نشان دادند تجزیه حرارتی فوم پلی‌یورتان سخت در هوا و گاز نیتروژن به ترتیب یک فرایند سه مرحله‌ای و دو مرحله‌ای دارد و سرعت تجزیه فوم پلی‌یورتان در هوا به دلیل حضور اکسیژن به طور چشمگیری قابل توجه است [21]. ژانگ و همکارانش یک پلی‌ال بازدارنده شعله بر پایه روغن برای استفاده در فوم پلی‌یورتان گزارش کردند. این پلی‌ال در زنجیره مولکولی خود دی‌اتیل‌فسفات داشته و واکنش بیشتری با ایزوسیانات می‌دهد [22].

در یک تحقیق، ویکلین و همکارانش نانو سلولز و اکسید گرافن را در فوم پلی‌یورتان استفاده کرده و نشان دادند هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها 0.015 وات بر متر کلین است که تقریباً نصف ضریب هدایت حرارتی فوم پلی‌استایرن است [23]. لیو و همکارانش نوع جدید از پلی‌ال پلی‌اتر پایه ملامین را بر اساس پروپیلن گلیکول و هگزا متوکسی متیلن ملامین تولید کرده و بیان کردند خواص فیزیکی- مکانیکی فوم پلی‌یورتان با استفاده از این افزودنی به طور چشمگیری بهبود می‌یابد [24]. وانگ و همکارانش بازدارنده شعله بر پایه فسفر- نیتروژن (2 و 2-دی‌اتیل-1 و 3-پروپاندیول فسفریل ملامین) را به وسیله طیف سنجی مادون قرمز فوری و رزونانس مغناطیسی هسته‌ای تولید کرده و نشان دادند این تقویت کننده سازگاری مطلوبی با فوم پلی‌یورتان دارد اما تأثیر نامطلوبی بر خواص مکانیکی می‌گذارد. این کامپوزیت آزمون UL-94 V0 را با موفقیت گذراند و نشان داده شد که مکانیزم بازدارندگی شعله در فوم پلی‌یورتان سخت بر اساس تشکیل لایه زغال به عنوان مانع فیزیکی است که سرعت تجزیه فوم پلی‌یورتان را کاهش می‌دهد [25]. آیدوگان و یوستا از خاک رس به عنوان فیلر به مقدار حداکثر 15٪ در فوم پلی‌یورتان سخت به منظور کاهش قیمت و افزایش مقاومت به آتش استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که اضافه

⁶ Natural zeolite⁷ Graphite nanoplatelets (GNPs)⁸ MMP⁹ Cone calorimeter¹ Polyurethanes² Cross – linking³ Carbon nano tube⁴ Graphite nano platelet⁵ Silica particle

2-2- ساخت نانو/میکرو کامپوزیت‌های پلی‌یورتان/ژئولیت/نانوگرافیت

نانوصفحات گرافیتی به منظور جلوگیری از انباشتگی نانوذرات، با نسبت مشخصی داخل الکال (به ازای 10 گرم نانوذرات گرافیت 800 سی‌سی الکال ایزوپروپیل¹) ترکیب شده و سپس محلول حاصل به مدت 10 دقیقه تحت امواج آلتراسونیک تفرق² یافتند. سپس ذرات داخل محلول حاصل توسط پمپ خلأ خشک شد و حلال الکال از پودر نانوذرات گرافیت جدا شد و در آخر به مدت 2 ساعت در وکیوم آن (کوره خلأ) به طور کامل خشک شد. برای تعیین درصد وزنی بهینه فاز تقویت‌کننده به منظور دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، مقادیر مختلفی از ژئولیت و نانوذرات گرافیت به پلیمر اضافه شد و کامپوزیت‌های حاوی 0، 2، 5 و 10 درصد وزنی فاز تقویت‌کننده ساخته شد.

به منظور تهیه کامپوزیت‌ها پایه ژئولیت، ژئولیت طبیعی ابتدا شسته شده و سپس داخل وکیوم آن به مدت 2 ساعت با جریان هوا خشک شد و مطابق با روش ایجاد تفرق ذرات در خصوص نانوذرات گرافیت مورد استفاده قرار گرفت. قالب‌ها برای آزمون کشش پلی‌یورتان، کشش پلیمر ترکیبی و خمش به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM D3574، ASTM D638، ASTM D790 از جنس سیلیکون ساخته شدند. نمونه‌های مورد نظر داخل قالب‌ها ریخته شدند و به مدت 24 ساعت داخل قالب قرار گرفته و خشک شدند. برای تهیه کامپوزیت به روش پوشش‌دهی، از یک کامپوزیت به عنوان روکش روی کامپوزیت اولیه استفاده شد. برای این منظور ترکیب پلی‌یورتان و رزین پلی‌اوره پایه ایزوسیانات همراه با 10 درصد وزنی ژئولیت تهیه و به صورت روکش روی کامپوزیت‌ها کشیده شد. نمونه‌های روکش‌شده 24 ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند تا به طور کامل خشک شوند.

به منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیت به روش ترکیب کامپوزیت هم‌پایه پلی‌یورتان، رزین پلی‌اوره پایه ایزوسیانات و ژئولیت با درصد وزنی 40٪ (با درصد وزنی پلی‌اوره/پلی‌یورتان) با یکدیگر مطابق با تحقیقات اولیه و بهینه‌سازی شده در این مطالعه ترکیب شدند. همچنین از پارچه نسوز الیاف شیشه در این کامپوزیت استفاده شد تا اثر آن بر خواص مکانیکی و مقاومت به آتش بررسی شود. برای این منظور، نمونه‌های این کامپوزیت در سه حالت بدون پارچه نسوز الیاف شیشه، با یک لایه پارچه نسوز الیاف شیشه و با دو لایه پارچه نسوز الیاف شیشه ساخته شدند.

به منظور بررسی ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی و ارتباط آن با نرخ سوختن نمونه‌ها، سه نمونه کامپوزیت پلی‌یورتان خالص، پلی‌یورتان تقویت شده با ژئولیت، نانوذرات گرافیت و کامپوزیت هم‌پایه شامل پلی‌یورتان، رزین پلی‌اوره پایه ایزوسیانات و ژئولیت داخل قالب استوانه‌ای به قطر 4 سانتی‌متر و طول 11 سانتی‌متر ساخته شد. ابعاد قالب مطابق با استاندارد EN55022 تعیین شد.

2-3- مشخصه‌یابی خواص مکانیکی میکرو/نانو کامپوزیت‌ها

آزمون کشش

برای ارزیابی رفتار کششی پلی‌یورتان و کامپوزیت‌های آن از آزمون کششی مطابق با استاندارد ASTM D3574 و برای کامپوزیت‌های ترکیبی پلی‌یورتان و رزین کمکی پایه ایزوسیانات از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D635 استفاده شد. هندسه نمونه‌ها طبق ابعاد ذکر شده در استانداردهای مربوطه است. این آزمون توسط دستگاه SANTAM-STM50 در دمای محیط و تعداد تکرار 5 نمونه برای دستیابی به متوسط داده‌ها برای هر گروه و با سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. مقادیر استحکام کششی از تقسیم مقدار بیشینه بار ثبت

کردن 10٪ وزنی خاک رس و 5٪ وزنی تاخیرانداز شعله به طور مؤثر مقاومت به آتش فوم را بهبود می‌بخشد [26].

با توجه به تحقیقات صورت گرفته مشخص می‌گردد که نیاز بیشتر به بررسی بیشتر تقویت‌کننده‌ها و بررسی ارتباط بین خواص مکانیکی نانو-میکرو کامپوزیت‌های هیبرید فومی در خصوص خواص مکانیکی و رفتار مقاومت به شعله کامپوزیت‌های فومی پلی‌یورتان می‌باشد [27]. در این تحقیق روش ساخت و خواص مکانیکی فوم‌های پلی‌یورتان، پلی‌اوره و ترکیب این دو رزین زمینه تقویت شده با ذرات ژئولیت طبیعی و نانوذرات گرافیت ارائه شده و ارتباط بین خواص مکانیکی در کشش و خمش در درصد وزنی ذرات ژئولیت طبیعی و نانوذرات گرافیت در حضور پلی‌اوره و الیاف شیشه بررسی می‌گردد. بطور مشخص این مقاله به بررسی مقایسه‌ای خواص تاخیرانداز شعله و خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان تقویت شده با دو فاز ژئولیت و نانوذرات گرافیت در فاز پایه پلی‌یورتان پرداخته که در حضور فاز ترکیبی پلی‌اوره برای نخستین بار اثر ترکیبی دو رزین پایه را ارزیابی می‌نماید. همچنین، به منظور بهبود خواص چندمنظوره میکروکامپوزیت‌های تهیه شده به ویژه خواص مکانیکی در انعطاف‌پذیری کامپوزیت، تأثیر لایه‌گذاری پارچه الیاف شیشه مطالعه شده و نتایج با خواص کامپوزیت‌های پایه مقایسه می‌گردد.

2-2- ساخت و مشخصه‌یابی نانو/میکرو کامپوزیت‌های پلی‌یورتان/ژئولیت/نانوگرافیت

2-1- مواد پلیمری و افزودنی‌های میکرو/نانو

مواد مورد نیاز برای فاز زمینه و فاز تقویت‌کننده مطابق با جدول 1 تهیه شدند. شکل 1 مورفولوژی و ابعاد ژئولیت طبیعی را نمایش داده که در آن ساختار شیمیایی و توزیع ذرات در یک نمونه‌گیری گزارش شده است.

جدول 1 مشخصات مواد تقویت‌کننده، پلیمر و کد تجاری

Table 1 Specification of the reinforcements, polymer and commercial codes

تقویت‌کننده	کد تجاری و مشخصات
پلی‌یورتان دوجزئی پایه ایزوسیانات/پلی‌ال	790y کره جنوبی مدل skc
رزین ترموست پایه ایزوسیانات (پلی‌اوره)	ET2060A
ژئولیت	طبیعی، سایز ذرات (> 50 میکرومتر) 99.5٪
گرافیت	Nano307 with a surface area of 325–375 m ² /g, diameter <1 μm, thickness of ~3 nm, and a true density of 2.16 g/cm ³

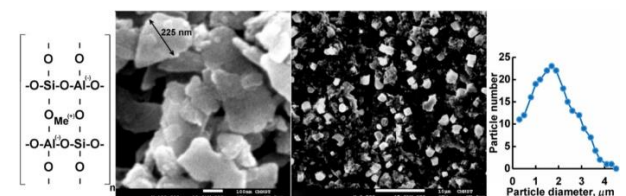


Fig. 1 Scanning electron microscope image of natural zeolite with chemical structure and particles distribution from [28]

شکل 1 تصویر الکترونی روبشی ژئولیت طبیعی به همراه ساختار شیمیایی و توزیع ذرات برگرفته از مرجع [28]

² Dispersed¹ Isopropyl alcohol

شایان ذکر است که در این بررسی ذرات نانوغرافیت بصورت بشقابی با نسبت اندازه 250 و فاز ژئولیت بصورت کروی با نسبت اندازه 1 فرض شد. همچنین از دیگر فرض‌های تحلیل، عدم تغییر مدول الاستیک فاز زمینه پلی‌یورتان بوده و از اثر کلوخه‌ای شدن ذرات صرف نظر شده و اتصال کامل بین فازهای تقویت شده و فاز زمینه مورد نظر قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- خواص مکانیکی در کشش

اثر درصد‌های وزنی مختلف پرکننده ژئولیت و نانوذرات گرافیت بر خواص کششی فوم پلی‌یورتان در شکل‌های 2 و 3 نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی مواد تقویت‌کننده برای هر دو نوع فیلر (ژئولیت و نانوذرات گرافیت) مدول ینگ به طور چشمگیری به دلیل خواص ذاتی و مدول ینگ بیشتر نانوذرات گرافیت افزایش می‌یابد [14]. در خصوص ژئولیت، علاوه بر خواص مکانیکی بیشتر فاز تقویت‌کننده، ژئولیت هنگامی که با پلی‌یورتان مخلوط می‌شود، باعث ایجاد برهم‌کنش‌ها با پلیمر می‌شود. در کامپوزیت پلی‌یورتان پر شده با ژئولیت پیوند هیدروژنی بین گروه یورتان N-H از پلیمر پلی‌یورتان با گروه T-OH از ژئولیت تشکیل می‌شود [33].

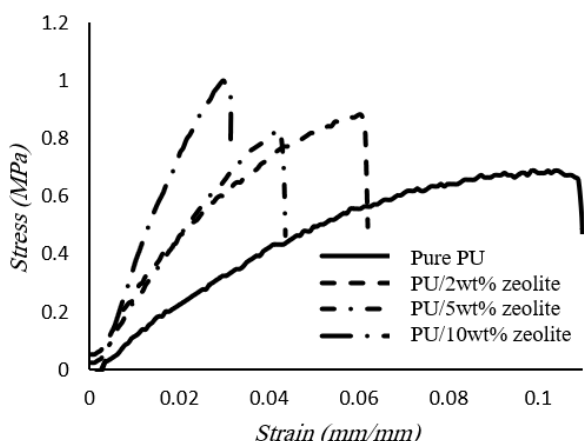


Fig. 2 Stress-strain curves of polyurethane vs. zeolite loading
شکل 2 نمودار تنش-کرنش پلی‌یورتان بر حسب درصد وزنی ژئولیت

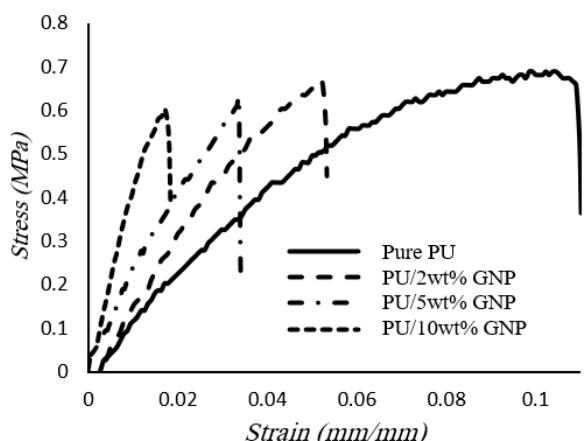


Fig. 3 Stress-strain curves of polyurethane vs. GNP loading
شکل 3 نمودار تنش-کرنش پلی‌یورتان بر حسب درصد وزنی نانوذرات گرافیت

شده در حین بارگذاری بر سطح مقطع نمونه‌ها محاسبه شد و همچنین مقدار مدول ینگ از شیب قسمت خطی نمودار تنش-کرنش محاسبه شد. نتایج بر اساس میانگین به دست آمده از پنج آزمون برای هر حالت است.

آزمون خمش

آزمون خمش با استفاده از دستگاه SANTAM-STM50 و مطابق با استاندارد ASTM D790 انجام شد. نمونه‌ها با سطح مقطع 12.7×3.2 میلی‌متر مربع و طول سنج 40 میلی‌متر تحت سرعت 5 میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند. تعداد تکرار نمونه‌ها در هر گروه نیز 5 عدد است که نتایج بر اساس میانگین نتایج این 5 نمونه بیان می‌شود.

میکروسکوپ الکترونی روبشی¹ (SEM)

بررسی ریخت‌شناسی سطح ذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نمونه‌ها با یک لایه طلا تحت شرایط خلأ پوشش داده شدند سپس سطح آن‌ها برای مشاهده ساختار فوم و همچنین پراکندگی و توزیع نانوذرات مورد ارزیابی قرار گرفت.

آزمون UL-94 در تعیین خواص پایداری حرارتی

تعیین اشتعال‌پذیری و میزان پیشروی شعله با انجام آزمون UL-94 HB بررسی شد. نمونه‌ها با ابعاد استاندارد $125 \times 13 \times 3$ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM D3801 تهیه شدند. نمونه‌ها به صورت افقی نگه‌داشته شدند و شعله تحت زاویه 45 درجه به سر آزاد نمونه وارد شد. بر روی سطح نمونه دو علامت به فاصله 1 و 4 اینچ از سر آزاد نمونه گذاشته شد سپس شعله به مدت 30 ثانیه یا تا زمانی که به علامت اول برسد، به نمونه اعمال شد و پس از آن، مدت زمان سوختن نمونه بین دو علامت اندازه‌گیری و در انتها نرخ سوختن محاسبه شد. برای هر حالت سه نمونه آزمایش و نرخ سوختن آن‌ها تعیین شد. معیار آزمون بر این اساس است که نرخ سوختن در فاصله علامت‌گذاری شده برای نمونه‌های با ضخامت 3 تا 13 میلی‌متر نباید از 40 میلی‌متر بر دقیقه بیشتر باشد و برای نمونه‌ها با ضخامت کمتر از 3 میلی‌متر نباید از 80 میلی‌متر بر دقیقه بیشتر باشد.

آزمون هدایت حرارتی

هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها با استفاده از دستگاه آنالیز خواص حرارتی KD2 pro ساخت DECAGON امریکا اندازه‌گیری شد. این دستگاه بر اساس استاندارد مرجع EN55022 برای اندازه‌گیری خواص حرارتی از جمله ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی استفاده می‌شود. نمونه‌ها به صورت استوانه با قطر 4 سانتی‌متر و طول 11 سانتی‌متر تهیه شدند و در وسط نمونه سوراخی به قطر 3 میلی‌متر و طول 11 سانتی‌متر ایجاد شد. این سوراخ باید کاملاً عمود و در وسط نمونه باشد تا حسگر اندازه‌گیری داخل آن قرار گیرد.

تحلیل میکرومکانیک خواص الاستیک کامپوزیت‌های پلی‌یورتان/ژئولیت/نانوذرات گرافیت

به منظور ارزیابی اثر فازهای تقویت‌کننده ژئولیت و نانوذرات گرافیت و همچنین درک بهتر مکانیزم‌های استحکام بخشی در کامپوزیت‌های فومی تهیه شده، از تحلیل میکرومکانیک تاندون-وینگ² [29] استفاده شد. در تحلیل‌ها با استفاده از مقادیر و ثوابت گزارش شده در تحقیقات در خصوص خواص مکانیکی و فیزیکی فازهای تقویت‌کننده و فاز زمینه، درصد وزنی، نسبت اندازه³ و چگالی با مقادیر متوسط [30-32] و مقادیر مدول الاستیک فاز زمینه بر اساس آزمون‌های تجربی انجام شده در تحقیق فعلی، روند تغییرات در مدول الاستیک نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و با مقادیر تجربی مورد مقایسه قرار گرفت.

³ Aspect ratio

¹ Scanning electron microscope

² Tandon-weng

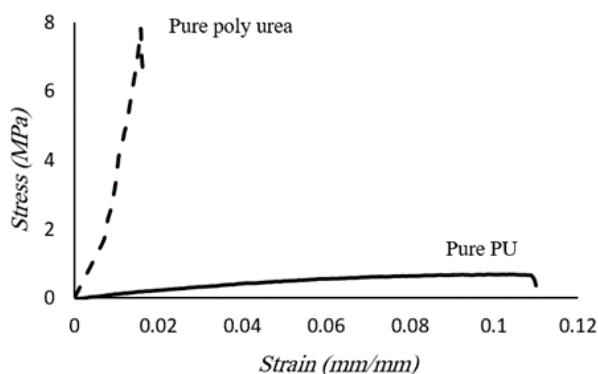


Fig. 6 Stress-strain curves of polyurethane vs. polyurea

شکل 6 نمودار تنش- کرنش پلی‌اوره خالص در مقایسه با پلی‌یورتان خالص

لازم به ذکر است که با این وجود هدف اصلی تقویت فاز پلی‌یورتان در این تحقیق اعمال خواص تأخیر آتش آن به فاز پلیمر نبوده بلکه در راستای افزایش سفتی (نسبت استحکام به وزن) نمونه‌ها صورت گرفته است. اگرچه اضافه کردن مقادیر بسیار بیشتر فاز تقویت‌کننده می‌تواند تا حدود زیادی پاسخگوی این چالش باشد، ولیکن افزایش بیش از حد ذرات تقویت‌کننده از نظر تکنیکی و علمی مورد قبول نبوده (عدم خاصیت ترکندگی فاز پلی‌یورتان) و همچنین در کنار این مسئله کاهش شدید خواص ضربه‌پذیری و مهم‌تر از آن شکل‌پذیری پلی‌یورتان ایجاد می‌گردد. بدین منظور با توجه به خواص مکانیکی در کشش بالای پلی‌اوره مطابق با شکل 6، از ترکیب رزین کمکی هم‌پایه پلی‌اوره با درصد وزنی 40٪ (در فاز پلی‌اوره و پلی‌یورتان) به عنوان ترکیب بهینه استفاده شد. نتایج شهودی آزمایشگاهی نشان داد افزودن فاز پلی‌اوره باعث ایجاد انعطاف‌پذیری در نمونه شده و با افزایش میزان ویسکوزیته و کاهش تحرک پلی‌یورتان زمینه می‌تولند منجر به کاهش مقدار تخلخل نمونه‌ها و در نتیجه افزایش چگالی کامپوزیت‌ها گردد. دلیل این امر نه تنها تأثیر در کاهش پیوندهای بین فاز پلی‌ال و ایزوسیانات پلی‌یورتان (کاهش درصد مؤثر ترکیب)، بلکه افزایش ویسکوزیته ترکیب پلی‌یورتان به عنوان یک عامل بازدارنده در برابر تخلخل آن بلافاصله پس از ترکیب است. با توجه به چقرمگی و درصد ازدیاد طول ناچیز پلی‌اوره مطابق با نتایج شکل 6، اثر افزودن لایه‌های لیمنت به فاز پلی‌اوره به وسیله یک و دو لایه پارچه الیاف شیشه بر روی انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌ها بررسی شد.

نمودار تنش-کرنش مربوط به این سه کامپوزیت در شکل 7 نشان می‌دهد که با افزودن یک لایه پارچه الیاف شیشه به ترکیب پلیمر مقدار مدول یانگ مطابق با شیب اولیه نمودار افزایش یافته، استحکام شکست بیشتر شده و همچنین مقدار ازدیاد طول تا رسیدن به نقطه شکست نیز افزایش می‌یابد. همین نتایج برای حالتی که دو لایه پارچه الیاف شیشه اضافه شود در مقایسه با حالتی که یک لایه اضافه شده، مشاهده شده بطوریکه که منجر به افزایش 600 درصدی استحکام و 200 درصدی مدول یانگ خمشی در حالت دولایه شد.

نتایج همچنین نشان می‌دهد افزایش تعداد لایه‌ها منجر به افزایش خواص چقرمگی نمونه‌ها شده که در کاربردهایی که ضرورت خواص جذب انرژی کامپوزیت مطرح است، حائز اهمیت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد افزایش تعداد لایه‌ها در لایه‌گذاری کامپوزیت اثر کلیدی داشته بطوریکه خواص استحکام کششی نمونه‌ها تا نزدیک به 300 درصد نسبت به نمونه‌های تک لایه افزایش پیدا می‌کند (شکل 7 مقایسه منحنی تک لایه و دو لایه).

به دلیل وجود پیوندهای مذکور انتظار می‌رود خواص مکانیکی افزایش یافته و سفتی کامپوزیت حاصل بیشتر از پلیمر خالص می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ژئولیت استحکام شکست نیز با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده افزایش می‌یابد اما در مورد نانوذرات گرافیت تغییرات استحکام شکست بسیار ناچیز می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های بعدی نمایش داده می‌شود، فوم پلی‌یورتان خالص ساختار اسفنجی داشته و ترد می‌باشد، با این حال اضافه کردن فیلر به آن باعث ترد شدن بیشتر آن می‌شود. مقادیر عددی متوسط مدول یانگ و استحکام شکست نمونه‌ها در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، افزودن ژئولیت تأثیر بیشتری بر روی خواص استحکام کششی داشته، با این وجود، میکرو/نانوکامپوزیت‌های تقویت شده ژئولیت و نانوذرات گرافیت به ترتیب منجر به افزایش مدول یانگ کششی معادل 200 و 300 درصد می‌شوند.

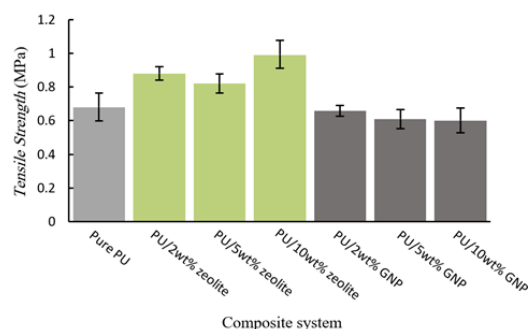


Fig. 4 Tensile strength of GNP/zeolite reinforced micro/nanocomposites as a function of fillers weight fraction

شکل 4 استحکام شکست نمونه‌های میکرو/نانوکامپوزیتی در کشش بر حسب درصد مواد تقویت‌کننده

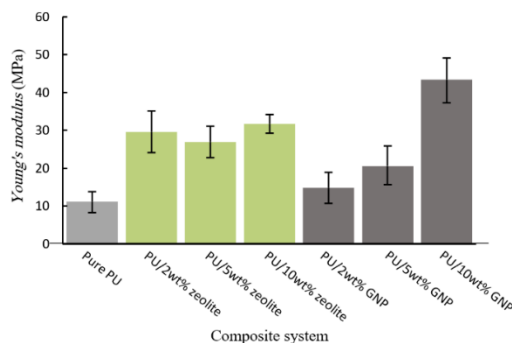


Fig. 5 Tensile Young's modulus of GNP/zeolite reinforced micro/nanocomposites as a function of fillers weight fraction

شکل 5 مدول یانگ میکرو/نانوکامپوزیت تقویت شده با ژئولیت/ نانوذرات گرافیت در کشش بر حسب درصد مواد تقویت‌کننده

رفتار کششی کامپوزیت هم‌پایه که ترکیب پلی‌یورتان و رزین پلی‌اوره پایه ایزوسیانات همراه با ژئولیت است، در مقایسه با پلی‌یورتان خالص در شکل 6 نمایش داده شده است. طبق نمودار در اثر ترکیب رزین کمکی پایه ایزوسیانات با پلی‌یورتان مقدار استحکام شکست افزایش می‌یابد اما مقدار کشیدگی تا نقطه شکست کاهش می‌یابد. مقایسه شیب نمودارها نیز نشان می‌دهد که مدول یانگ کامپوزیت ترکیبی در مقایسه با پلی‌یورتان خالص به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. مدول یانگ کامپوزیت ترکیبی 243.3 مگاپاسکال است که در مقایسه با مدول یانگ پلی‌یورتان خالص (11.1 مگاپاسکال) بسیار بیشتر می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که در کامپوزیت ترکیبی با فاز زمینه ترکیب پلی‌یورتان و پلی‌اوره با درصد وزنی پلی‌اوره/پلی‌یورتان 40٪، مقدار مدول خمشی 49.4 مگاپاسکال بوده که از مقادیر مدول خمشی کامپوزیت‌های پلی‌یورتان بسیار بالاتر است. مطابق با شکل 10، از طرفی با افزودن پارچه الیاف شیشه در حالت دولایه و تک لایه به ترتیب منجر به افزایش 600 درصدی و 200 درصدی مدول یانگ در خمش کامپوزیت ترکیبی پلی‌یورتان/پلی‌اوره می‌شود.

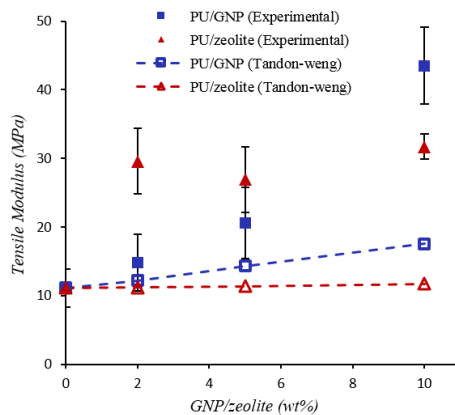


Fig. 8 Experimental and micromechanical elastic modulus values of polyurethane foams reinforced with GNP and zeolite

شکل 8 مدول الاستیک تجربی و میکرومکانیک کامپوزیت‌های فومی پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات نانوغرافیت و ژئولیت

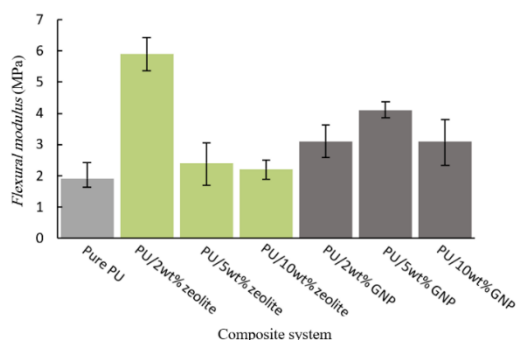


Fig. 9 Flexural modulus of polyurethane micro/nanocomposites reinforced with various fractions of reinforcements

شکل 9 مدول خمشی میکرو/نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتان تقویت شده با درصدهای وزنی مختلف فاز تقویت‌کننده

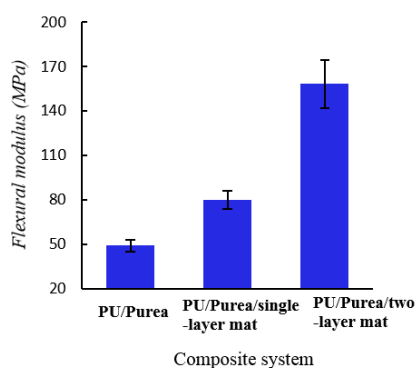


Fig. 10 Flexural modulus of pure polyurea/polyurethane and fiber glass mat reinforced composites

شکل 10 مدول خمشی پلی‌اوره خالص و کامپوزیت‌های تقویت شده پلی‌اوره با پارچه الیاف شیشه

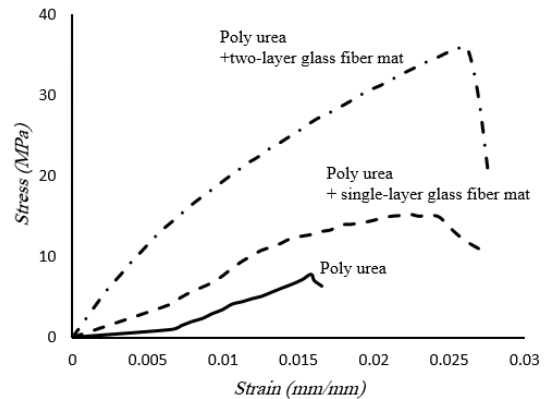


Fig. 7 Stress-strain curves of pure polyurea reinforced with single and two-layer fiber glass mat

شکل 7 نمودار تنش-کرنش پلی‌اوره خالص تقویت شده با تک لایه پارچه الیاف شیشه و دو لایه پارچه الیاف شیشه

شکل 8 نتایج حاصل از تحلیل میکرومکانیک فوم‌های کامپوزیتی تهیه شده تقویت شده با نانوذرات گرافیت و ژئولیت را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، مدول الاستیک در هر دو سامانه کامپوزیتی نانوغرافیت و ژئولیت افزایش پیدا می‌کند. با این وجود، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر حاصل از آزمون‌های تجربی بیشتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل میکرومکانیک تاندون-وینگ است. تفاوت مشاهده شده، همان‌طور که انتظار می‌رود مرتبط با افزایش چگالی و مدول یانگ پلیمر پایه با افزایش مواد افزودنی است در حالیکه در مدل مورد استفاده، خواص مکانیکی پلیمر پایه خالص بر اساس فوم پلی‌یورتان با چگالی کمتر (اندازه سلول‌های بیشتر) به عنوان خواص مکانیکی فاز زمینه فرض شده در حالیکه با افزایش مواد میکرو/نانو خواص مکانیکی (طی افزایش چگالی) دچار افزایش می‌گردد. در حالت پلیمرهای فاز زمینه گرماترم و گرماسخت، این حالت ایجاد نشده و خواص پلیمر پایه ثابت مانده (عدم تغییر در چگالی و خواص مکانیکی) و تنها خواص فاز میانی در فصل مشترک پلیمر/تقویت‌کننده دچار تغییر می‌گردد. نتایج حاصل از شکل 8 در خصوص مدول یانگ حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل میکرومکانیک همچنین نشان می‌دهد ذرات با نسبت اندازه 1، اثر بیشتری در استحکام مانند نانوغرافیت در مقابل ژئولیت با نسبت اندازه 1، اثر بیشتری در انتقال نیروی بخشی فوم پلی‌یورتان داشته و فاز کروی ژئولیت به سبب عدم انتقال نیروی مناسب حاصل از هندسه آن سهم کمتری در افزایش سفتی و مدول یانگ کامپوزیت‌های تهیه شده دارد. اثر افزودن مواد تقویت‌کننده بر روی چگالی، جوانه زایی سلول‌ها و آن‌ها در بخش‌های بعدی با کمک آزمون‌های ساختاری بحث شده است.

2-3- خواص مکانیکی در خمش

نتایج آزمون خمش در خصوص مدول خمشی برای کامپوزیت‌ها در شکل 9 نمایش داده شده و نشان می‌دهد که اضافه کردن ژئولیت و نانوصفحات گرافیتی به پلی‌یورتان منجر به افزایش مدول خمشی می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، کامپوزیت تقویت‌شده با ژئولیت و کامپوزیت تقویت‌شده با نانوذرات گرافیت در مقایسه با پلی‌یورتان خالص مدول خمشی بیشتری دارند. در مورد پلی‌یورتان تقویت‌شده با ژئولیت با افزایش درصد وزنی ژئولیت، مقدار مدول خمشی ابتدا افزایش شدیدی داشته و سپس کاهش می‌یابد و در مورد پلی‌یورتان تقویت‌شده با نانوذرات گرافیت با افزایش درصد وزنی مقدار مدول خمشی به مقدار بسیار ناچیزی افزایش دارد.

گرفتند، شروع به سوختن کردند، اما پس از 30 ثانیه با دور شدن شعله، سوختن نمونه تا انتهای علامت دوم یعنی فاصله 4 اینچ ادامه پیدا نکرد و قبل از رسیدن به آن متوقف شد.

جدول 2 نرخ سوختن نمونه‌های کامپوزیت پلی‌یورتان/ژئولیت 2 درصد وزنی روکش شده توسط پلی‌اوره

Table 2 Burning rate of polyurea coated polyurethane composites

نمونه	زمان سوختن بین 1 تا 4 اینچ (s)	نرخ سوختن (mm/min)
1	217	21.1
2	178	25.7
3	206	22.2
Average	~200	~23

جدول 3 نرخ سوختن کامپوزیت‌های پایه پلی‌یورتان/ژئولیت 2 درصد وزنی/پلی‌اوره

Table 3 Burning rate of polyurethane/polyurea-based composites

نمونه	طول سوخته شده (cm)	زمان سوختن (s)	نرخ سوختن (mm/min)
1	1	92	6.5
2	0.5	89	3.4
3	0.3	38	4.7
Average	~0.6	~73	~4.9

از طرفی، طولی از نمونه که در معرض سوختن قرار گرفت، با نرخ بسیار پایینی شعله‌ور شد. این امر در بیان فنی این استاندارد نمایانگر سوختن کندتر نمونه‌ها می‌باشد. نتایج طولی از نمونه که در محدوده مورد نظر (فاصله 3 اینچ بین دو علامت) سوخت، زمان و نرخ سوختن آن در جدول 3 برای سه نمونه بیان شده است. نمونه‌های سوخته شده در شکل 11 نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود سوختن نمونه‌ها تا انتها ادامه پیدا نکرد و متوقف شده است.

نتایج همچنین نشان داد در نمونه‌های کامپوزیت هم‌پایه تقویت شده با یک و دو لایه پارچه نسوز الیاف شیشه، آزمون UL-94 انجام شد و به مدت 30 ثانیه شعله به سر نمونه اعمال شد. پس از دور شدن شعله قبل از اینکه شعله به علامت اول یعنی فاصله 1 اینچ از سر نمونه برسد، سوختن متوقف و شعله خاموش شد.

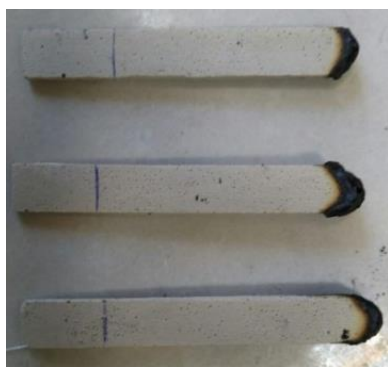


Fig. 1 Composites of polyurethane/polyurea after UL94 test

شکل 11 نمونه‌های کامپوزیت ترکیبی پلی‌یورتان/پلی‌اوره هم‌پایه بعد از آزمون UL-94

نتایج نشان می‌دهد که این کامپوزیت طبق نتایج قبلی در برابر آتش مقاوم بوده و نرخ سوختن آن پایین‌تر از نمونه‌های تهیه شده توسط سامانه‌های کامپوزیتی پایه پلی‌یورتان است. با این وجود، اضافه کردن پارچه نسوز الیاف

با توجه به خواص خمشی به دست آمده مطابق با شکل 10، سامانه‌های کامپوزیتی با خواص خمشی بالا در کاربردهایی که کامپوزیت مورد بحث تحت نیروی خمشی بر روی یک کانتور پیچیده نظیر مخزن بنزین خودرو مورد استفاده بوده و یا استفاده از آن‌ها به عنوان پوشش بر روی لوله‌ها و خطوط مواد غذایی و یا نفتی مطرح است، میزان انعطاف‌پذیری خمشی کامپوزیت نقش کلیدی بر روی کاربرد کامپوزیت تهیه شده را دارد. این امر به ویژه در سازه‌ها با استلزام خواص چند منظوره، با خواص مکانیکی قابل قبول نظیر جذب انرژی و تاخیرانداز شعله قابل توجه است.

3-3- خواص پایداری حرارتی و تاخیرانداز شعله

به منظور بررسی خواص مقاوم به آتش، ابتدا کامپوزیت پلی‌یورتان تقویت شده با 10٪ وزنی ژئولیت، 10٪ وزنی نانوذرات گرافیت و 2٪ وزنی آلومینیوم دی‌اکسید (به عنوان فاز تاخیرانداز معدنی) تحت آزمون UL-94 قرار گرفت. نمونه‌ها به طور کامل شعله‌ور شده و نرخ سوختن آن‌ها بسیار سریع و بیشتر از 40 میلی‌متر بر دقیقه شده که منجر به نقض استاندارد شد. دلیل این مشاهده مرتبط با ساختار متخلخل پلی‌یورتان در زمان ترکیب دو جز آن یعنی پلی‌ال و ایزوسیانات بوده که این ساختار اسفنجی و متخلخل به گسترش شعله به عنوان منبع اکسیژن کمک می‌کند. در کامپوزیت پلی‌یورتان/نانوفصحات گرافیت و ژئولیت این حفره‌ها بطور کامل پر نشده و مطابق با تصاویر ارائه شده در بخش بعد، کامپوزیت همچنان با ساختار متخلخل و اسفنجی تولید شد. لذا، اضافه کردن این دو فاز تقویت‌کننده با درصدهای وزنی مورد مطالعه منجر به کامپوزیت پایه پلی‌یورتان با خواص مقاوم به آتش طبق استاندارد مذکور نشد. نتایج نشان می‌دهد که فاز تقویت‌کننده ژئولیت هنگامی نقش کلیدی خود را ایفا می‌کند که این ذرات در کنار اینکه خواص مکانیکی کامپوزیت را بهبود ببخشند، از سوی دیگر باعث افزایش چگالی کامپوزیت شده که یکی از فاکتورهای مهم به منظور کاهش نرخ سوختن در فوم‌ها می‌باشد.

درصد بهینه ژئولیت بر اساس بیشترین خواص مکانیکی در کشش و خمش نمونه مطابق با نتایج ارائه شده در آزمون‌های مکانیکی انتخاب شده که معادل 2 درصد وزنی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد درصد وزنی 2 درصد منجر به بیشینه خواص مدول خمشی شده (شکل 9) و در عین حال از نقطه نظر خواص کششی مطابق با اشکال 4 و 5 میکروکامپوزیت‌های تقویت شده با 2 درصد وزنی ژئولیت خواص کششی معادل با دیگر درصدهای وزنی (5 و 10 درصد) را ارائه داده در حالیکه از نقطه نظر فرآیند ساخت (تفرق ذرات و ویسکوزیته رزین کامپوزیتی) و هزینه مواد تقویت‌کننده قابل توجهی می‌باشد. به منظور بررسی اثر تأخیر انداز شعله پلی‌اول، کامپوزیت‌های پلی‌یورتان پوشش داده شده با ترکیب پلی‌اوره/پلی‌یورتان (40٪) با ضخامت تقریبی 5 میلی‌متر تهیه شدند. زمان سوختن نمونه‌های کامپوزیت روکش شده در فاصله علامت‌گذاری شده و محاسبه نرخ سوختن در این فاصله در جدول 2 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد برای سه نمونه نرخ سوختن کمتر از 40 میلی‌متر بر دقیقه است و در نتیجه این کامپوزیت مطابق با معیار آزمون UL-94 HB مقاوم در برابر شعله است. دلیل این نتایج وجود روکش ترکیبی دو پلیمر بوده که مانع از رسیدن شعله به کامپوزیت زیرین می‌شود. با توجه به اینکه این روکش ترکیب دو پلیمر (پلی‌یورتان و پلیمر کمکی پایه ایزوسیانات) است، وجود پلیمر کمکی و اضافه کردن آن به پلی‌یورتان باعث کاهش ایجاد حباب در پلی‌یورتان در حین شکل‌گیری شده و در نتیجه کامپوزیتی با ساختار منسجم و بدون تخلخل ایجاد شود. با توجه به نتایج حاصل، کامپوزیت‌های ترکیب پلی‌یورتان/پلی‌اوره تقویت شده با درصد بهینه ژئولیت ساخته شد. نمونه‌های ساخته شده به روش ترکیب کامپوزیت هم‌پایه زمانی که در معرض شعله قرار

نشان می‌دهد که وقتی دو جز پلیمر (پلی‌ال و ایزوسیانات) با یکدیگر ترکیب می‌شوند، پلیمر حاصل شروع به پف کردن می‌کند و ساختار پر تخلخلی را ایجاد می‌کند. نکته حائز اهمیت تغییر فرم سلول‌ها بوده که در حالتیکه نمونه‌ها با مقادیر رزین کمکی (پلی‌اوره) ترکیب می‌شوند از بین رفته و چگالی آن‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند. در شکل 13 پلی‌یورتان تقویت‌شده با ژئولیت، نانوذرات گرافیت و آلومینیوم دی‌اکسید مشاهده می‌شود. در اثر اضافه شدن این تقویت‌کننده‌ها، سلول‌های فوم پلی‌یورتان تا حدودی پُر شده و ابعاد سلول‌ها کمتر از 500 میکرومتر شده است. با این وجود اضافه کردن بیش از حد تقویت‌کننده به منظور پرکردن کامل حباب‌ها، می‌تواند منجر به کاهش ضربه‌پذیری و شکل‌پذیری پلی‌یورتان شود. در این تصاویر که به صورت نماینده‌ای از سطح مقطع شکست ارائه شده است ذرات توسط دواپری در شکل مشخص گردیده است.

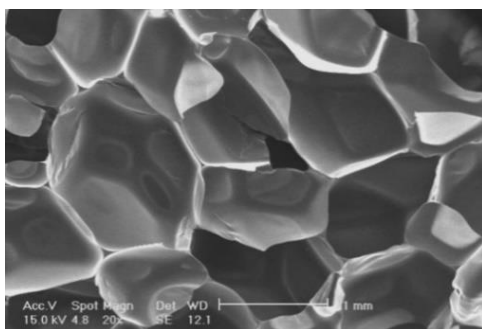
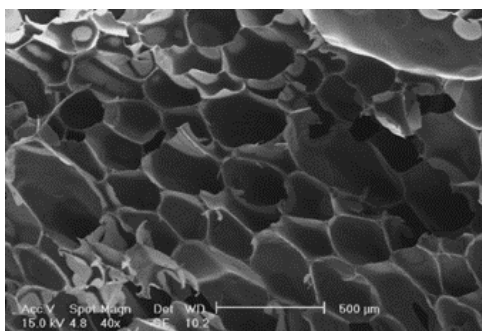
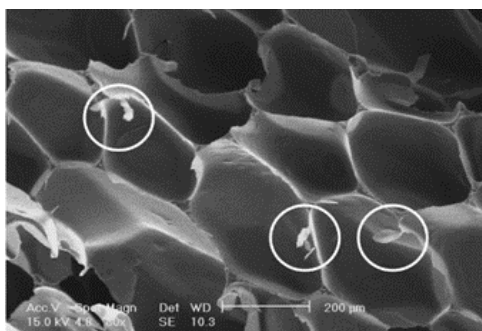


Fig. 12 SEM image of fractured surface of polyurethane structure
شکل 12 تصویر SEM سطح مقطع شکست از ساختار فوم پلی‌یورتان



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 13 (a) SEM image of fractured surface of polyurethane reinforced with zeolite and GNP and (b) the zoomed-in image with GNPs circled

شکل 13 (الف) تصاویر SEM سطح شکست فوم پلی‌یورتان تقویت‌شده با ژئولیت و نانوذرات گرافیت و (ب) تصویر بزرگ‌نمایی شده نمونه با ذرات گرافیت مشخص شده در شکل

شیشه مقاومت به آتش آن را بهبود بیشتری بخشیده که به دلیل خواص ذاتی مقاومت در برابر حریق این الیاف، گسترش شعله در نمونه‌ها کاهش چشمگیری داشته که خود باعث کاهش میزان حریق و نرخ آن به نواحی مجاور می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی به دست آمده از آزمون هدایت حرارتی، بررسی و با رفتار نمونه‌ها در برابر آتش مقایسه شد. مقدار ضرایب به دست آمده از این آزمون در جدول 4 ذکر شده است. ضریب هدایت حرارتی عبارت است از مقدار انرژی گرمایی که ماده می‌تواند در واحد زمان و در واحد ضخامت و در دمای مشخصی از خود عبور دهد. هرچه این ضریب کمتر باشد یعنی ماده قابلیت انتقال انرژی گرمایی کمتری دارد و برای عایق مناسب‌تر است.

جدول 4 هدایت حرارتی نمونه‌های کامپوزیتی و خالص

Table 4 Thermal conductivity of the pure and composite specimens

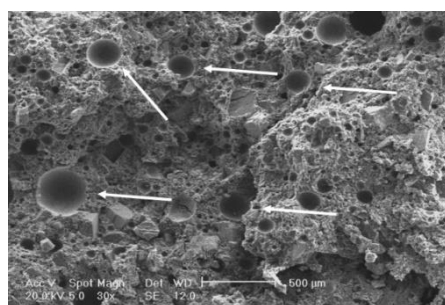
نوع کامپوزیت	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	مقاومت حرارتی (°C.cm/W)	دما (°C)
پلی‌یورتان خالص	0.022+/-0.003	4547	26.47
میکرو/نانو کامپوزیت پلی‌یورتان	0.024+/-0.002	4200	29.79
میکرو/نانو کامپوزیت رزین ترکیبی پلی‌یورتان/پلی‌اوره	0.482+/-0.010	207.6	24.88

نتایج نشان داد کامپوزیت تهیه شده به روش مستقیم که شامل پلی‌یورتان، ژئولیت و نانوذرات گرافیت می‌باشد، نسبت به پلی‌یورتان خالص ضریب هدایت حرارتی بیشتری است. مقاومت حرارتی نیز برعکس ضریب هدایت، مقاومت ماده در برابر انتقال حرارت را نشان می‌دهد. طبق این نتایج کامپوزیت تهیه شده به روش ترکیب مستقیم انتقال حرارت بیشتری نسبت به پلی‌یورتان خالص دارد. در آزمون سوختن نیز مشاهده شد که نمونه‌های تهیه‌شده به روش مستقیم وقتی در معرض شعله قرار گرفتند، با سرعت بالایی سوختند. در مورد کامپوزیت ترکیبی هم‌پایه (ترکیب پلی‌یورتان/پلی‌اوره) ضریب حرارتی در مقایسه با دو کامپوزیت دیگر بیشتر بوده که به معنی است که در شرایط یکسان این کامپوزیت حرارت بیشتری از خود عبور می‌دهد. نتایج به دست آمده در این قسمت این‌طور توصیف می‌شود که انتقال حرارت در خواص عایق تأثیرگذار است و عملکرد آن در خصوص خواص مقاومت به آتش تفاوت دارد. در واقع رفتار این کامپوزیت‌ها در برابر شعله به نقطه ذوب آن‌ها بستگی دارد و تأثیر چندانی از ضریب هدایت حرارتی نمی‌گیرد. مقایسه ضریب هدایت حرارتی و مقاومت به آتش برای پلی‌یورتان خالص در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است [34, 35]. نتایج این تحقیقات بیان می‌کند که پلی‌یورتان‌ها به شدت قابل احتراق بوده و شاخص اکسیژن آن‌ها 16 تا 18 است. ساختار متخلخل و وزن سبک اسفنج‌های پلی‌یورتانی باعث می‌شود شعله به سرعت پیشرفت کرده و گرمای زیادی ایجاد شود. اسفنج‌های سخت یورتان عایق‌های گرمایی بسیار خوبی هستند. رسانایی گرمایی آن‌ها در مقایسه با سایر مواد بسیار کمتر و خواص عایق آن‌ها بسیار بهتر است.

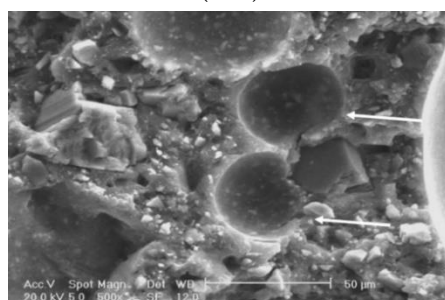
3-4- مورفولوژی و ساختار کامپوزیت‌ها

شکل 12 ساختار متخلخل فوم پلی‌یورتان خالص را نشان می‌دهد. وجود حباب‌هایی با ابعاد مختلف از 200 میکرومتر تا 2 میلی‌متر در ساختار این فوم

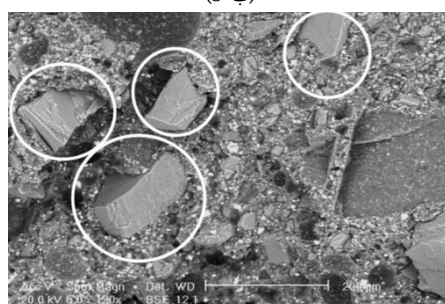
توسط حضور یک رزین کمکی با سفتی و ویسکوزیته بالا یکی دیگر از عوامل بازدارنده در توسعه حریق در نمونه‌ها است.



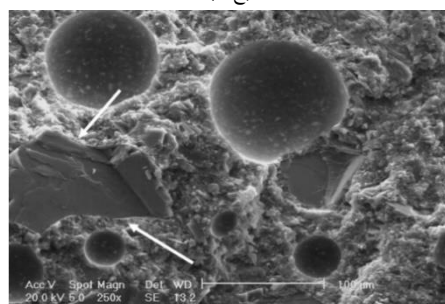
(الف-ا)



(ب-ب)



(ج-ج)



(د-د)

Fig. 14 (a) SEM images of fractured surface of polyurethane/polyurea and the presence of bubbles with polyurethane cells of altered geometry and their disappearance, (b) the magnified image showing spherical bubbles in specimens, (c) the zeolite particles within polyurethane/polyurea and the quality of zeolite/polymer interface and (d) the magnified images on the interface of zeolite/polyurethane/polyurea

شکل 14 (الف) تصاویر SEM سطح مقطع شکست کامپوزیت ترکیبی پلی‌یورتان/پلی‌اوره و حضور حباب‌ها با تغییر فرم هندسه سلول‌های پلی‌یورتان و حذف آن‌ها، (ب) تصویر بزرگنمایی شده نمایانگر حباب‌های تشکیل شده با فرم کروی در نمونه‌ها، (ج) ذرات ژئولیت در ترکیب پلی‌یورتان/پلی‌اوره و کیفیت فصل مشترک ژئولیت/پلیمر و (د) تصویر بزرگنمایی شده در فصل مشترک ژئولیت/پلی‌یورتان/پلی‌اوره در کنار حذف حفره‌های پلی‌یورتان

در شکل 14 پلی‌یورتان با پلیمر پلی‌اوره ترکیب شده و سپس با ژئولیت تقویت شده است در حالیکه این نوع نمونه فاقد لایه‌های تقویت کننده الیاف شیشه می‌باشد. همان‌طور که در شکل 14 (الف) و (ب) مشاهده می‌شود اضافه کردن پلیمر از پف کردن پلی‌یورتان در زمان شکل‌گیری جلوگیری می‌کند. این امر یکی از دلایلی است که چرا افزودن مواد ترکیبی رزین باعث بهبود خواص ضد حریق نمونه‌ها شده است که به خوبی با تصاویر SEM تأیید می‌گردد. در این بررسی مشاهده می‌گردد که هندسه شش ضلعی سلول‌ها کاملاً از بین رفته و سلول‌هایی با چگالی (تعداد در حجم) بسیار کمی تولید شده‌اند. این دو عامل باعث می‌شود که وجود حفره در داخل ساختار کامپوزیت به حداقل برسد و ساختار منسجم‌تری داشته باشد که هم در خواص مکانیکی و هم رفتار مقاومت به آتش تأثیر مطلوبی دارد.

در تصویر SEM در شکل 14 (ج) و تصویر بزرگنمایی شده 14 (د) ژئولیت افزوده شده به این ترکیب و فصل مشترک ژئولیت/پلیمر نمایش داده شده است. مطابق با این شکل ضخامت تقریبی ذرات ژئولیت حدود 100 میکرون و یا کمتر از آن بوده که بسیار کمتر از سلول‌های شش ضلعی ایجاد شده در پلی‌یورتان است. یکی از عوامل تأثیرگذار دیگر ایجاد هسته‌زایی این مواد تقویت کننده در جهت ایجاد سلول‌های بیشتر با دلیل کاهش آنتروپی واکنش در سطح مشترک تقویت کننده و رزین می‌باشد که باعث جوانه‌زایی سلولی بیشتر فاز پلی‌یورتان می‌گردد [36].

در صورت ایجاد این سلول که دارای تعداد بیشتر اما اندازه کمتر هستند می‌توان اظهار داشت که میزان اکسیژن موجود و یا گازهای قابل اشتعال حاصل از ترکیب دو جزء پلی‌یورتان در کل نمونه بیشتر شده که این امر خود مسبب کاهش خواص ضد حریق نمونه‌های پلی‌یورتان با افزایش ژئولیت می‌گردد. در اشکال تصویربرداری SEM در اشکال 14 (الف-د) ارائه گردیده است. همچنین، همان‌طور که مشخص است تمام سطح فصل مشترک مواد تقویت کننده توسط رزین مورد استفاده پوشش داده نشده است که این خود یکی از دلایل ایجاد تردی در کامپوزیت تهیه شده با اضافه شدن ذرات ژئولیت است، چرا که عدم اتصال کامل ذرات تقویت کننده به فاز زمینه و تأثیر عکس آن بر روی مقدار فاز میانی تشکیل شده در سطح مشترک خود یکی از مکانیزم‌های مهم ترد شدن کامپوزیت‌ها می‌باشد که این موضوع با نتایج مکانیکی حاصل شده در این تحقیق مطابقت دارد. شکل 14 (د) بیانگر وجود فصل مشترک کامل در درصدی از فاز تقویت کننده ژئولیت در مجاورت رزین پلی‌یورتان و ترکیب آن با رزین کمکی آیزوسیانات است. در صورتیکه این فصل مشترک کامل تر باشد، انتظار می‌رود که خواص انعطاف‌پذیری و کرنش در نقطه شکست نمونه‌ها بیشتر گردد.

شکل 15 (الف) و (ب) قسمت سوخته شده نمونه تقویت شده با دولایه پارچه نسوز الیاف شیشه را نشان می‌دهد. طبق شکل یک لایه زغال روی جسم ایجاد شده و مانع از گسترش شعله می‌شود. به همین دلیل در آزمون UL-94 زمانی که شعله از سر نمونه دور شد، پس از زمان کوتاهی سوختن متوقف می‌شود. این تصاویر به خوبی نشان می‌دهد که مقادیر بیشتر حباب در نمونه‌ها ایجاد شده که این امر به دلیل تشکیل بخارات حاصل از سوختن مواد در نمونه‌ها می‌باشد (مقایسه با شکل 14). همچنین تصاویر بیانگر کاهش سطوح زبر در اثر شکست نمونه‌ها که قبل از آزمون حریق به دست آمده نسبت به این نمونه‌ها بوده که به دلیل ذوب مواد حاصل شده است. این مطلب بیانگر یکی از مکانیزم‌های مهم در گسترش حریق در پلیمرها بوده بدین معنی که سیلان پلیمر از نقطه‌ای به نقطه دیگر یکی از موارد ذکر شده در خصوص گسترش حریق بوده که آزمایش‌ها مرتبط با این نمونه‌ها نشان می‌دهد که این مکانیزم

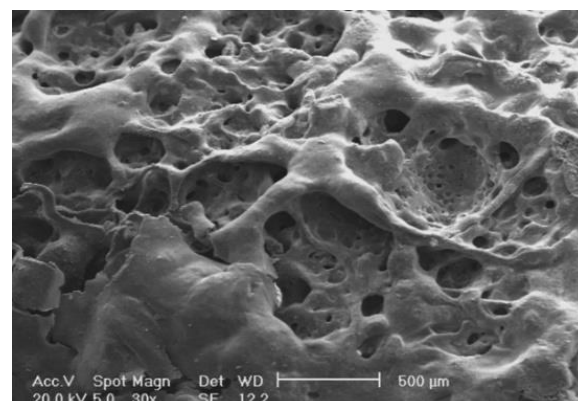
شده که به عنوان فرضیه تحقیق ترکیب کامپوزیت بهینه پلی‌یورتان/ژئولیت و پلی‌اوره به منظور کاهش درصد تخلخل (حفره) پلی‌یورتان به عنوان یک عامل گسترش شعله تهیه شد. نشان داده شد که این ترکیب رفتار مقاومت به آتش بالایی داشته بطوریکه 80٪ از حداکثر مقدار مجاز استاندارد کمتر بوده که به حبس گازهای قابل احتراق، کاهش دسترسی به اکسیژن با ایجاد مواد پوششی شیمیایی و عدم حرکت وسیع مولکولی پلیمر و تأثیر در هدایت حرارتی منجر به بهبود رفتار مقاومت به آتش کامپوزیت مرتبط شد. مقایسه نتایج آزمون سوختن و هدایت حرارتی نشان می‌دهد رابطه مستقیمی بین این دو وجود ندارد و در واقع ضریب هدایت حرارتی و انتقال حرارت در خواص عایق مؤثر است و مقاومت به آتش به نقطه ذوب وابسته است.

5- تقدیر و تشکر

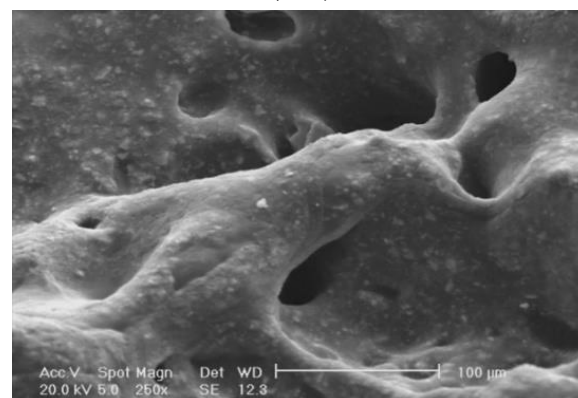
با تشکر و قدردانی از آزمایشگاه پلیمر و نانوکامپوزیت- دانشکده مهندسی مکانیک-دانشگاه صنعتی اصفهان به دلیل حمایت تجهیزاتی، مواد مصرفی و علمی در انجام این تحقیق

6-مراجع

- [1] Sang, G., Xu, P., Yan, T., Murugados, V., Naik, N., Ding, Y. and Guo, Z., "Interface Engineered Microcellular Magnetic Conductive Polyurethane Nanocomposite Foams for Electromagnetic Interference Shielding," Nano-Micro Letters, Vol. 13, No. 1, pp. 1-16, 2021.
- [2] Alavi Nikje, M. m., Ghavidel Kelishemi, R., Akbar, R. and Vakili, M., "Synthesis of a Novel Magnetic Flexible Polyurethane Foam Nanocomposite," In Persian, Applied Chemistry, No. 35, pp. 14, 2015.
- [3] Zhai, Y., Yu, Y., Zhou, K., Yun, Z., Huang, W., Liu, H., Xia, Q., Dai, K., Zheng, G. and Liu, C., "Flexible and Wearable Carbon Black/Thermoplastic Polyurethane Foam with a Pinnate-Veined Aligned Porous Structure for Multifunctional Piezoresistive Sensors," Chemical Engineering Journal, Vol. 382, pp. 122985, 2020.
- [4] Safari, H., Karevan, M. and Nahvi, H., "Mechanical Characterization of Natural Nano-Structured Zeolite/Polyurethane Filled 3d Woven Glass Fiber Composite Sandwich Panels," Polymer Testing, Vol. 67, pp. 284-294, 2018.
- [5] Sharmin, E. and Zafar, F., "Polyurethane: An Introduction," Polyurethane, pp. 3-16, 2012.
- [6] Palve, A. M. and Gupta, R. K., "Polyurethane-Based Nanocomposites and Their Applications," Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates, Eds., pp. 225-255: ACS Publications, 2021.
- [7] Bhinder, J., Verma, S. K. and Agnihotri, P. K., "Qualifying Carbon Nanotube Reinforced Polyurethane Foam as Helmet Inner Liner through in-Situ, Static and Low Velocity Impact Testing," Materials Science and Engineering: B, Vol. 274, pp. 115496, 2021.
- [8] Pattanayak, D. S., Mishra, J., Nanda, J., Sahoo, P. K., Kumar, R. and Sahoo, N. K., "Photocatalytic Degradation of Cyanide Using Polyurethane Foam Immobilized Fe-Tcpp-S-Tio2-Rgo Nano-Composite," Journal of Environmental Management, Vol. 297, pp. 113312, 2021.
- [9] Dodanek, A. H., Dabiryan, H. and Hamze, S., "Experimental Study of the Impact Properties of Foam Based Composites Reinforced with Warp-Knitted Spacer Fabric," In Persian, journal of science and technology of composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1353-1362, 2021.
- [10] Skleničková, K., Abbrent, S., Halecký, M., Kočí, V. and Beneš, H., "Biodegradability and Ecotoxicity of Polyurethane Foams: A Review," Critical Reviews in Environmental Science and Technology, pp. 1-46, 2020.
- [11] Zhang, Y., Josien, L., Salomon, J.-P., Simon-Masseran, A. I. and Lalevée, J., "Photopolymerization of Zeolite/Polymer-Based Composites: Toward 3d and 4d Printing Applications," ACS Applied Polymer Materials, Vol. 3, No. 1, pp. 400-409, 2020.



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 15 (a) Charcoal formed during the burning and (b) the magnified image of (a) obtained from SEM analysis in zeolite/polyurethane/polyurea/ glass fiber mat composites

شکل 15 (الف) لایه زغال تشکیل شده در زمان سوختن و (ب) تصویر بزرگنمایی حاصل از آزمایش‌ها SEM در کامپوزیت‌های پلی‌یورتان/پلی‌اوره/ژئولیت/پارچه الیاف شیشه

بطور خلاصه، اثر مثبت افزودن فاز ژئولیت با ایجاد تراکم بیشتر سلولی (افزایش چگالی فوم) و عدم اشتعال ذاتی این ماده معدنی، کاهش اندازه سلول‌های فوم در اثر افزودن فاز پلی‌اوره، افزایش ویسکوزیته مذاب در اثر افزایش ژئولیت و پلی‌اوره می‌تواند از جمله مکانیزم‌های مؤثر در ممانعت از گسترش شعله و نرخ سوختن در نمونه‌ها باشند.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق میکرو/نانوکامپوزیت‌های پایه پلی‌یورتان و پلی‌اوره و ترکیب دو پلیمر پایه تقویت شده با ژئولیت و نانوذرات گرافیت با هدف بهبود خواص تاخیرانداز شعله و مقاومت به آتش نمونه‌ها با بررسی خواص مکانیکی، حرارتی، ساختاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تقویت پلی‌یورتان با ژئولیت و نانوذرات گرافیت منجر به افزایش خواص مدول کششی و استحکام کششی در خصوص تقویت کننده ژئولیت و رفتار خمشی نمونه‌ها شده و اضافه کردن ژئولیت تا مقادیر بهینه معادل 2 درصد وزنی منجر به پرکردن ساختار اسفنجی و پر تخلخل و کاهش نرخ حریق و گسترش شعله در نمونه‌ها می‌گردد. تحلیل میکرومکانیک مدول الاستیک و مقایسه نتایج با مقادیر مدول یانگ تجربی صورت گرفته و اختلاف در نتایج به تغییر در چگالی فاز زمینه با افزایش درصد مواد افزودنی مرتبط شد. نتایج نشان داد که اعمال پوشش پلی‌اوره روی کامپوزیت‌های پایه پلی‌یورتان و تقویت نمونه‌های پلی‌اوره با پارچه الیاف منجر به بهبود خواص مقاومت به آتش و کاهش نرخ سوختن

- Functional Materials, "Journal of biomedical optics, Vol. 23, No. 9, pp. 091411, 2018.
- [29] G. P. Tandon, G. J. W., "The Effect of Aspect Ratio of Inclusions on the Elastic Properties of Unidirectionally Aligned Composites," *Polymer composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 327-333, 1984.
- [30] Coudert, F.-X., "Systematic Investigation of the Mechanical Properties of Pure Silica Zeolites: Stiffness, Anisotropy, and Negative Linear Compressibility," *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 15, No. 38, pp. 16012-16018, 2013.
- [31] Karevan, M., Pucha, R. V., Bhuiyan, M. A. and Kalaitzidou, K., "Effect of Interphase Modulus and Nanofiller Agglomeration on the Tensile Modulus of Graphite Nanoplatelets and Carbon Nanotube Reinforced Polypropylene Nanocomposites," *Carbon Letters (Carbon Lett.)*, Vol. 11, No. 4, pp. 325-331, 2010.
- [32] Minceva, M., Fajgar, R., Markovska, L. and Meshko, V., "Comparative Study of Zn²⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺ Removal from Water Solution Using Natural Clinoptilolitic Zeolite and Commercial Granulated Activated Carbon. Equilibrium of Adsorption," *Separation Science and Technology*, Vol. 43, 05/26, 2008.
- [33] Ciobanu, G., Carja, G. and Ciobanu, O., "Structure of Mixed Matrix Membranes Made with Sapo-5 Zeolite in Polyurethane Matrix," *Microporous and mesoporous materials*, Vol. 115, No. 1-2, pp. 61-66, 2008.
- [34] Kirshenbaum, G., "Conference Report: Recent Advances in Flame Retardancy of Polymeric Materials," 2005.
- [35] Morgan, A. B. and Gilman, J. W., "An Overview of Flame Retardancy of Polymeric Materials: Application, Technology, and Future Directions," *Fire and Materials*, Vol. 37, No. 4, pp. 259-279, 2013.
- [36] Zangiabadi, Z. and Jafar Hadianfard, M., "Effects of Size and Structure of Silica Nanoparticles on Morphology and Tensile Behavior of Flexible Nanocomposite Foams Based on Polyurethane," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 5, 2016.
- [12] Serati-Nouri, H., Jafari, A., Roshangar, L., Dadashpour, M., Pilehvar-Soltanahmadi, Y. and Zarghami, N., "Biomedical Applications of Zeolite-Based Materials: A Review," *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 116, pp. 111225, 2020.
- [13] Ahmadi, B. and Shekarchi, M., "Use of Natural Zeolite as a Supplementary Cementitious Material," *Cement and concrete composites*, Vol. 32, No. 2, pp. 134-141, 2010.
- [14] Kausar, A. and Siddiq, M., "Poly (Ether-Imide)/Polyurethane Foams Reinforced with Graphene Nanoplatelet: Microstructure, Thermal Stability, and Flame Resistance," *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, Vol. 21, No. 5, pp. 436-446, 2016.
- [15] Barikani, M., Askari, F., Barikani, M. and Barmar, M., "Effect of Fire Retardants in Improvement of Combustion Restriction and Thermal Decomposition of Polyurethane Foams: A Review," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 33, 2011.
- [16] Ababsa, H. S., Safidine, Z., Mekki, A., Grohens, Y., Ouadah, A. and Chabane, H., "Fire Behavior of Flame-Retardant Polyurethane Semi-Rigid Foam in Presence of Nickel (II) Oxide and Graphene Nanoplatelets Additives," *Journal of Polymer Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 1-14, 2021.
- [17] Thirumal, M., Khastgir, D., Nando, G., Naik, Y. and Singha, N. K., "Halogen-Free Flame Retardant Puf: Effect of Melamine Compounds on Mechanical, Thermal and Flame Retardant Properties," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 95, No. 6, pp. 1138-1145, 2010.
- [18] Harikrishnan, G., Singh, S. N., Kiesel, E. and Macosko, C. W., "Nanodispersions of Carbon Nanofiber for Polyurethane Foaming," *Polymer*, Vol. 51, No. 15, pp. 3349-3353, 2010.
- [19] Usta, N., "Investigation of Fire Behavior of Rigid Polyurethane Foams Containing Fly Ash and Intumescent Flame Retardant by Using a Cone Calorimeter," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 124, No. 4, pp. 3372-3382, 2012.
- [20] Lorenzetti, A., Modesti, M., Gallo, E., Scharrel, B., Besco, S. and Roso, M., "Synthesis of Phosphinated Polyurethane Foams with Improved Fire Behaviour," *Polymer degradation and stability*, Vol. 97, No. 11, pp. 2364-2369, 2012.
- [21] Jiao, L., Xiao, H., Wang, Q. and Sun, J., "Thermal Degradation Characteristics of Rigid Polyurethane Foam and the Volatile Products Analysis with Tg-Ftir-Ms," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 98, No. 12, pp. 2687-2696, 2013.
- [22] Zhang, L., Zhang, M., Hu, L. and Zhou, Y., "Synthesis of Rigid Polyurethane Foams with Castor Oil-Based Flame Retardant Polyols," *Industrial Crops and Products*, Vol. 52, pp. 380-388, 2014.
- [23] Wicklein, B., Kocjan, A., Salazar-Alvarez, G., Carosio, F., Camino, G., Antonietti, M. and Bergström, L., "Thermally Insulating and Fire-Retardant Lightweight Anisotropic Foams Based on Nanocellulose and Graphene Oxide," *Nature nanotechnology*, Vol. 10, No. 3, pp. 277-283, 2015.
- [24] Liu, Y., He, J. and Yang, R., "The Synthesis of Melamine-Based Polyether Polyol and Its Effects on the Flame Retardancy and Physical-Mechanical Property of Rigid Polyurethane Foam," *Journal of Materials Science*, Vol. 52, No. 8, pp. 4700-4712, 2017.
- [25] Wang, C., Wu, Y., Li, Y., Shao, Q., Yan, X., Han, C., Wang, Z., Liu, Z. and Guo, Z., "Flame-Retardant Rigid Polyurethane Foam with a Phosphorus-Nitrogen Single Intumescent Flame Retardant," *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 29, No. 1, pp. 668-676, 2018.
- [26] Aydoğan, B. and Usta, N., "Cone Calorimeter Evaluation on Fire Resistance of Rigid Polyurethane Foams Filled with Nanoclay/Intumescent Flame Retardant Materials," *Res. Eng. Struct. Mater*, Vol. 4, pp. 71-77, 2018.
- [27] Dasari, A., Yu, Z.-Z., Cai, G.-P. and Mai, Y.-W., "Recent Developments in the Fire Retardancy of Polymeric Materials," *Progress in Polymer Science*, Vol. 38, No. 9, pp. 1357-1387, 2013.
- [28] Hovhannisyan, V. A., Dong, C.-Y., Lai, F.-J., Chang, N.-S. and Chen, S.-J., "Natural Zeolite for Adsorbing and Release of



خواص خود تمیز شوندگی و انرژی آزاد سطح پوشش‌های نانوکامپوزیت اتیلن وینیل استات تقویت شده با نانوذرات سیلیکا

مهدی حسن زاده¹، مهدی کاروان^{2*}، احمدرضا پیشه‌ور³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، mkarevan@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله: چکیده

دریافت: 1400/11/13

پذیرش: 1401/02/12

کلیدواژگان

خود تمیز شوندگی، نانوسیلیکا، انرژی سطح، آبگریزی، پوشش نانوکامپوزیت

ایجاد پوشش‌ها با حداقل مؤلفه‌های مواد و مراحل تولید یکی از چالش‌های امروز در تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیتی آبگریز است. هدف از این تحقیق تهیه پوشش نانوکامپوزیت پایه پلیمری آبگریز و بررسی ارتباط بین خواص آبگریزی، میکروساختار، درصد فاز افزودنی و انرژی آزاد سطح آن می‌باشد. بدین منظور، از نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با هگزامتیل دی سیلان به عنوان فاز افزودنی و اتیلن وینیل استات به عنوان زمینه و از تولون به عنوان حلال استفاده شد. غلظت پلیمر/ حلال با غلظت 3/3 به عنوان غلظت بهینه برای تشکیل فیلم انتخاب شد. مقادیر 10، 20 و 30 درصد وزنی نانوذرات به محلول اضافه شد و از روش پاشش به دلیل یک مرحله‌ای بودن استفاده شد. نتایج نشان داد پوشش پر شده با 30 درصد نانوسیلیکا دارای حفره‌ها با ساختاری متخلخل و شبکه‌ای بوده که موافق با پیش‌بینی مدل انرژی سطح کیسی- بکستر بود. پوشش‌های نانوکامپوزیتی با 30 درصد نانوسیلیکا منجر به زاویه تماس استاتیکی 121 درجه با 34 درصد افزایش نسبت به سطح اتیلن وینیل استات خالص و زاویه غلتش 8 درجه با 90 درصد کاهش نسبت به نمونه‌های 10 درصد وزنی شدند. انرژی آزاد سطح از سه تئوری اوونز-وندت، فوکس و ون اوس بررسی شد که بر خلاف تئوری ون اوس تئوری‌های فوکس و اوونز-وندت نشان دادند که با افزایش غلظت نانو مواد، جزء قطبی انرژی آزاد سطح پوشش کاهش یافته که مؤید افزایش زوایای تماس تخمین زده شده در این مطالعه بود.

Self-Cleaning Properties and Free Surface Energy of Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Nanocomposite Coatings Reinforced with Silica Nanoparticles

Mehdi Hasanzadeh¹, Mehdi Karevan^{1*}, Ahmad Reza Pishevar¹

1- Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 8415683111 Isfahan, Iran, mkarevan@iut.ac.ir

Keywords

Self-cleaning, Nano silica, Surface energy, Hydrophobicity, Nanocomposite coating

Abstract

The preparation of coatings involving the least material components and fabrication route is one of the today's challenges in the development of hydrophobic nanocomposite films. This study aims at the fabrication of a hydrophobic polymer nanocomposite coating and the evaluation of the interplays amongst hydrophobicity, microstructure, fillers loading and free surface energy of the coatings. To achieve this, hexamethyldisilazane functionalized nano-silica as the filler and ethylene vinyl acetate (EVA) as the matrix were used. Toluene was used as the solvent. The concentration of 3% was employed as the optimized solvent ratio to create polymer film. The loadings of 10, 20 and 30 wt% of nanomaterials were added into the solvent followed by a spray technique due to its single step approach. The analyses showed the coating filled with 30 wt% of nano-silica resulted in a porous interconnected structure, in good agreement with the Cassie-Baxter surface energy model. The 30 wt% nano-silica nanocomposite coatings resulted in a static water angle of $\sim 121^\circ$ exhibiting a 34% increase with respect to that in the case of pure EVA and a sliding angle of 8° with 90% reduction compared to the 10 wt% filled coatings due to the high surface roughness. Three surface energy models of Fowkes, Owens-Wendt and Van Oss were employed through which, unlike the case of Van Oss model, the Fowkes and Owens-Wendt models exhibited that with the addition of fillers, the polar component of the free surface energy decreases confirming the increase in the estimated water angle contact.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Hasanzadeh, M., Karevan, M., Pishevar, A. R., "Self-cleaning properties and free surface energy of ethylene vinyl acetate (EVA) nanocomposite coatings reinforced with silica nanoparticles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1726-1736, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.547872.1769>

1-مقدمه

ویلهلم بارتلوت و تیم تحقیقاتی‌اش در سال 1937 اصول خود تمیز شونده گی را کشف کردند. موضوع سطوح خود تمیز شونده با مشاهده برگ نیلوفر آبی در طبیعت آغاز شد که این گیاه در اثر آب‌گریزی بسیار بالا دارای خواص خود تمیز شونده گی بود [1]. قابلیت تر شونده گی یکی از خصوصیات مهم سطوح جامد به شمار می‌رود و دو پارامتر توپوگرافی و ترکیب شیمیایی سطح بر آن اثرگذارند. پوشش‌هایی با قابلیت پخش کردن سریع قطرات آب بر روی سطح و تشکیل زاویه تماس کمتر از 5 درجه در مدت زمان کمتر از 0.5 ثانیه را پوشش‌های فوق آب‌دوست می‌نامند. سطوح آب‌گریز دارای زاویه تماس بالای 90 درجه و هیستریزس زاویه تماس پایین هستند؛ این دو عامل باعث می‌شوند که قطرات آب تحت زاویه کوچکی بر روی سطح بلغزند و ذرات موجود روی سطح را در حین غلتش به خود جذب کنند که این پدیده اثر خود تمیز شونده گی را به دنبال خواهد داشت [2]. این سطوح به دلیل داشتن خواص خود تمیز شونده گی، از لحاظ فناوری، قابلیت بالایی برای کاربردهای مختلف دارند که به ویژه در توسعه منسوجات آب‌گریز و سطوح هوشمند امروزه بیشتر مورد توجه بوده است [3-5]. این سطوح، به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی از قبیل خواص خود تمیز شونده گی و مقاومت پایین در برابر جریان سیال در کاربردهای زیادی مانند شیشه‌های خود تمیز شونده، برای منازل، کشتی‌ها، پارچه‌ها و مواردی که در آن‌ها احتیاج به کاهش یخ‌زدگی توسط آب فوق سرد است استفاده می‌شوند. می‌توان گفت که یکی از بارزترین ویژگی‌های سطح مایع، تمایل آن‌ها به انقباض و جمع‌شدگی به منظور کاهش سطح به پایین‌ترین مقدار ممکن و رسیدن به حداقل انرژی آزاد می‌باشد. مارتین و همکارانش برای اولین بار سطوح شفاف، مقاوم در برابر سایش¹ و مافوق آب‌گریز² را برای پلی متیل سیلوکسان³ با استفاده از روش ساده و مقیاس‌پذیر⁴ ساختند. پلی متیل سیلوکسان شفاف است و برای مصارف پزشکی استفاده می‌شود و با استفاده از نانوذرات سیلیسیوم اکسید و رزین متیل فیل پویش داده شدند و بعد از چند آزمایش مشخص شد مقاومت به سایش بهبود یافته است [6]. فن لی و همکاران پوشش با استفاده از محلول اپوکسی و مواد با انرژی کم ساختند و به این نتیجه رسیدند که آب‌گریزی و انتقال نور به شدت، به غلظت اپوکسی و زبری سطح بستگی دارد و بالاترین غلظت اپوکسی که از خود بهترین زاویه تماس و انتقال نور را نشان می‌دهد، 5٪ می‌باشد [7]. یائو و همکارانش نانوکامپوزیت پلیمری منعطفی با استفاده از نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانوذرات کروی سیلیکا⁵ به وسیله روش اسپری ساختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت نانولوله‌ها آب‌گریزی افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

افزایش زبری سطح و یا در بیشتر مواقع ایجاد زبری سلسله‌ای میکرو/نانو باعث افزایش آب‌گریزی می‌شود [8]. ونگ و همکاران تأثیر زبری ماکرو بر روی پخش آب، زاویه تماس پیش‌رو و پس‌رو و هیستریزس را بررسی کرده و نشان دادند تا حد بهینه‌ای زبری بر روی زاویه تماس تأثیر بیشتری را دارد [9]. زبری همچنین موضوع حائز اهمیت در خصوص تغییرات در شفافیت پوشش است و ممکن است در عین حال پراکندگی نوری که روی سطح اتفاق می‌افتد را افزایش می‌دهد. برای کاهش این مسأله لازم است زبری سطح کمتر از طول موج نور باشد و ثابت شده است که زبری سطح بایستی کمتر از 100 نانومتر باشد تا از شدت پراکندگی نور بکاهد و همچنین در ساخت سطوح آب‌گریز با شفافیت

بالا مؤثر می‌باشد. در همین راستا هارون و همکارانش سطوح شفاف و آب‌گریز با استفاده از تتراآتوکسیلان⁶، فلوئورآکلیل سیلان، سیلیکا و گرافن اکساید، آب مقطر، هیدروکلریک اسید و اتانول ساختند. نتایج زاویه تماس زاویه تماس استاتیکی بالای 120 درجه را نشان می‌داد که به خاطر وجود نانوذرات سیلیکا و کربن بوده و با افزودن گرافن و سیلیکا پوشش‌ها متمایل به مات شدن داشتند [10]. نانوذرات سیلیکا به صورت گسترده در توسعه پوشش‌های آب‌گریز و یا مواد اروژلی اعم از آب‌گریز یا آب‌دوست روی سطوح مختلف مورد استفاده قرار گرفته است، که به ویژه در تحقیقات اخیر با دیگر نانو/میکرومواد با هدف ارائه خواص چندمنظوره نظیر خواص آنتی باکتری با دیگر ذرات نظیر گرافن، تیتانیوم دی‌اکسید و نانوذرات نقره ترکیب شده‌اند [11-14]. محمدزاده و همکاران در یک روش جدید نانوپوشش‌های سیلیکا را با استفاده از تتراآتوکسی سیلان تهیه کردند که با تغییر در درصد اصلاح‌کننده‌ها زاویه تماس حدود 132 درجه را به دست آورده که تا دمای 200 درجه سانتی‌گراد خواص خود را حفظ می‌کرد [15]. در تحقیقی دیگر شمس و همکاران روش سل-ژل را برای تهیه پوشش آب‌گریز بر پایه تتراآتوکسی سیلان بر روی زیر لایه شیشه استفاده کرده و اثر اکسید نقره بر روی خواص آب‌گریزی را مورد مطالعه قرار دادند و به زاویه ماس 124 بدون اضافه کردن نانوآکسید دست یافتند [16]. در بسیاری از تحقیقات، اثر اصلاح‌کننده سطح به عنوان یک عامل کلیدی در راندمان آب‌گریزی مطرح شده است. داوراه و همکاران، ترکیب تترااتیل اورتوسیلیکات به عنوان پیش‌ماده و اکتیل تری اتوکسی سیلان را به عنوان اصلاح‌کننده در روش ژل بر پایه سیلیکای سنتز مورد بررسی قرار دادند و به زاویه تماس آب حدود 141 درجه رسیدند [17].

انرژی سطوح در رابطه مستقیم با کیفیت آب‌گریزی و خواص خود تمیز شونده گی یک پوشش است. بیشتر تئوری‌های انرژی سطحی با این وجود دارای خطا هستند و انرژی آزاد سطح جامد یک مقدار دقیق نیست. در عوض، این مقدار وابسته به مایعات مورد استفاده در آزمایش زاویه تماس می‌باشد و این که کدام تئوری انرژی سطح برای تجزیه و تحلیل داده‌ها انتخاب می‌شود. در مدل ونزل، قطره آب کاملاً سطوح زبر را تر می‌کند ناحیه تماس واقعی مایع-جامد زیر قطره، در سطح زبر بیشتر از سطح صاف است [18]. زمانی که انرژی فصل مشترک جامد-هوا بیشتر از جامد-مایع باشد، با تر شدن سطح زبر، انرژی سیستم کاهش بیشتری می‌یابد، پس سطح زبر با سرعت بیشتری، تر می‌شود. اما در حالتی که انرژی فصل مشترک جامد-مایع بیش‌تر از فصل مشترک جامد-هوا باشد، سطح به صورت ذاتی آب را پس می‌زند و ترشوندگی سطح زبر در این حالت بسیار سخت است.

کیسی و بکستر⁷ در سال 1994 میلادی مدل ونزل را که برای سطوح با فصل مشترک همگن ارائه شده بود را برای یک سطح با فصل مشترک ناهمگن شامل حباب هوای به دام افتاده بود را توسعه دادند. در این حالت اگر سطح، زبری با اندازه مناسب را داشته باشد قطره به صورت معلق روی این برآمدگی‌ها قرار می‌گیرد زیرا مایع به درون حفره‌ها نفوذ نکرده و با سطح جامد مستقیماً تماس ندارد. در مدل ونزل مایع به صورت کامل با آب در تماس است و در مدل کیسی-بکستر با برآمدگی‌های در مقیاس نانو در تماس است اما بر خلاف این دو حالت در حالت اشباع کیسی قطره به صورت کامل در میان میکروزبری‌ها نفوذ می‌کند [19]. نتایج نشان می‌دهد در مدل اشباع کیسی آب به طور کامل

⁵ SiO₂⁶ Tetraethoxysilane⁷ Cassie-Baxter¹ Wear-resistant² Superoleophobic³ Polydimethylsiloxane (PDMS)⁴ Scalable

سوی دیگر، پلیمر الاستومری ترموپلاستیک EVA با خواص الاستومری بالا و قابلیت فرآیند نسبتاً بالا در فرآیندهای ترکیب حلال در ساخت نانوکامپوزیت ها نسبت به دیگر پلیمرهای هم‌پایه خود و یا دیگر پلیمرهای ترموپلاستیک دارای زمان حلالیت پایین بوده و نیازمند به حلال‌های تجاری در دسترس حتی در گریدهای صنعتی است.

2-2- روش ساخت نانوکامپوزیت‌های اتیلن وینیل استات/نانوسیلیکا و پوشش‌دهی زیر سطح شیشه

ابتدا جهت بهینه‌سازی غلظت پلیمر محلول 1، 3 و 5٪ اتیلن وینیل استات در حلال تولوئن تهیه و در دمای محیط بر روی همزن مغناطیسی به مدت 45 دقیقه مخلوط شد. در نهایت غلظت 3٪ به عنوان غلظت بهینه به دلیل عدم رویت عیوب و تخلخل انتخاب شد. به منظور ایجاد یک لایه مسطح و یکنواخت در این تحقیق از روش پاششی استفاده شد. در روش اسپری پارامترهای زیادی بر روی فیلم تشکیل شده تأثیرگذار هستند. یکی از این پارامترها فاصله پیستوله تا نمونه است. در این تحقیق، در مرحله اول پاشش با فشار باد 4 بار و فاصله 30 سانتی‌متر از سر نازل پیستوله تا سطح زیرسطح به عنوان شرایط استاندارد در نظر گرفته شد.

برای تهیه محلول‌های پلیمری با غلظت‌های مختلف نانو، محلول‌های پلیمری با درصد‌های مختلف نانوسیلیکا به شرح زیر تهیه شدند. ابتدا درصد وزنی 1٪ نانوذره نسبت به وزن خالص پلیمر به محلول افزوده شد. به منظور داشتن تفرق⁵ مناسب از التراسونیک به مدت 15 دقیقه و در سه مرحله استفاده شد که به طور پیوسته در هر مرحله 5 دقیقه محلول تحت التراسونیک قرار داده شد و سپس یک دقیقه استراحت به محلول داده شده و مجدداً التراسونیک اعمال گردید. پس از پاشش محلول بر روی زیرسطح و خشک شدن فیلم آب‌گریزی سطح با رفتار قطره آب بر روی سطح به روش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است قبل از اعمال پوشش سطح زیرسطح کاملاً با اتانول چربی زدایی و خشک شد. در این درصد، فیلم ایجاد شده از یک پوشش آب‌گریز فاصله زیادی داشت. لذا این فرایند با افزودن تدریجی درصد نانوذره و تکرار آزمون آب‌گریزی ادامه یافت. با ادامه این روند در درصد‌های نانوذره 10٪ رفتارهای آب‌گریزی از پوشش به تدریج مشاهده شد و در درصد نانوذره 20٪ پوشش آب‌گریز و در 30٪ نانوذره رفتار آب‌گریزی از پوشش مشاهده شده که کاملاً قطرات آب به صورت کروی از روی سطح پس زده می‌شد. اسامی نمونه‌ها در مشخص شده است. این نکته قابل ذکر است که پوشش‌ها با 40٪ به دلیل ساختار سطحی با عیوب قابل رویت مورد استفاده قرار نگرفت.

جدول 1 نام‌گذاری اختصاری نمونه‌های ساخته شده

Table 1 The abbreviated name of the specimens

شماره نمونه	نام نمونه
1	EVA-Pure
2	EVA-%10SiO ₂
3	EVA-%20SiO ₂
4	EVA-%30SiO ₂

3-2- مدل‌های محاسبه انرژی آزاد سطح

انرژی آزاد سطحی یکی از مهم‌ترین کمیت‌های ترمودینامیکی است که حالت تعادل اتم‌ها را در لایه سطحی ماده توصیف می‌کند. این پارامتر عموماً برای خواص چسبندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار آن برای هر ماده مشخص است و می‌توان از این پارامتر برای مطالعات عددی استفاده کرد [20]. از سوی

در بین میکروزبری‌ها و در میان نانوزبری‌ها به صورت کم نفوذ کرده و منجر به افزایش هیستریزس زاویه تماس و افزایش زاویه غلتش شده است. اما در حالت کیسی-بکستر قطره در تماس با نانوزبری‌هاست و به صورت کم در میکروزبری‌ها نفوذ کرده است و این مسأله موجب شده تا چسبندگی قطره به سطح کم شده و زاویه غلتش کاهش یابد. مطالعه تحقیقات گذشته با این وجود نشان می‌دهد سامانه‌های متفاوت پوشش دهی میکرو/نانوکامپوزیتی به منظور آب‌گریز نمودن زیرلایه‌های فلزی، شیشه‌ای و یا پلیمری مستلزم روش‌های چند مرحله و متعدد ساخت، استفاده از مواد فرار متعدد با نرخ خروجی ناچیز لایه آب‌گریز و مواد شیمیایی و افزودنی گران‌قیمت بوده که کاربرد این پوشش‌ها را در پوشش دهی سطوح وسیع در مقیاس‌های فراتر از آزمایشگاهی محدود و یا غیرممکن می‌کند. در این تحقیق، نانوکامپوزیت‌های اتیلن وینیل استات¹ پر شده با نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با هگزامتیل دی سیلاناز از روش حلال با غلظت‌های 1٪، 3٪ و 5٪ با حل پلیمر در تولوئن به عنوان حلال تهیه شده و غلظت 3٪ به عنوان غلظت بهینه برای تشکیل فیلم روی سطح شیشه در نظر گرفته شد. با هدف زاویه تماس استاتیکی بالا و زاویه غلتش پایین و همچنین مطالعه اثر افزودن نانوذرات سیلیکا بر روی خواص آب‌گریزی پوشش، درصدهای 1٪، 10٪، 20٪ و 30٪ نانوذرات نسبت به وزن پلیمر مورد بررسی قرار گرفتند. از روش پاشش به دلیل تک‌مرحله‌ای بودن روش و تعمیم آن در پوشش سطوح بزرگ‌تر زیرلایه استفاده شد. مواد و روش ارائه شده در این تحقیق می‌تواند به دلیل مقرون به صرفه اقتصادی بودن پوشش به منظور پوشش دهی سطوح شیشه‌ای با سطح گسترده مورد استفاده قرار گرفته و درک بهتری از ارتباط بین خواص آب‌گریزی و انرژی سطح را در خصوص پوشش‌های نانوکامپوزیتی ارائه دهد.

2- مواد و روش تحقیق

1-2- مواد مورد استفاده در ساخت نانوکامپوزیت

رزین اتیلن وینیل استات 28٪ گرید VA910 از شرکت لاتنه کیمیکال خریداری شد. این رزین به دلیل شفاف بودن، مقاومت در برابر اشعه فرابنفش و همچنین دو بلوکی بودن کوپلیمر و تفاوت قطبیت میان بلوک‌ها انتخاب شد، و همچنین از نانوذرات سیلیکا (SiO₂) شرکت فدک با متوسط اندازه 20 الی 30 نانومتر استفاده شد. حلال تولوئن از شرکت پتروشیمی اصفهان تهیه شد. جهت ایجاد پوشش پلیمری از زیرسطح با جنس آلومینیوم استفاده شد. ورق فویل آلومینیوم با ضخامت 300 میکرون و خلوص 99٪ از شرکت تیسن² آلمان تهیه شد و در ابعاد 7×5 سانتی‌متر آماده‌سازی شد. قبل از استفاده ورق‌ها باید با اتانول چربی زدایی و تمیز شوند. پوشش حاوی اتیلن وینیل استات به عنوان فاز بستر³، تولوئن به عنوان حلال، نانوذرات سیلیکا به عنوان عامل بهبود خواص آب‌گریزی بکار رفته است. هیچگونه اصلاحی بر روی مواد تهیه شده صورت نپذیرفته است. برای انتخاب حلال، آزمون حلالیت اتیلن وینیل استات در حلال‌های تتراهیدروفوران، دی متیل فرم آمید، دی متیل سولفوکسید و تولوئن صنعتی گرفته شد. با توجه به حلالیت اتیلن وینیل استات در تولوئن و قیمت بسیار پایین‌تر آن نسبت به سایر حلال‌ها، این حلال انتخاب شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، یکی از اهداف محوری تحقیق تهیه پوشش آب‌گریز با قابلیت مقیاس بالا⁴ در پوشش دهی سطوح وسیع بوده که یکی از ارکان تحقق این هدف، فرضیه استفاده از مواد در دسترس و با هزینه تأمین کمتر در مقیاس صنعتی بوده است. از طرف دیگر، نوع نانوذرات مورد استفاده از نانومواد تجاری محسوب شده و در ساخت پوشش‌های آب‌گریز بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. از

⁴ Scale up

⁵ Dispersed

¹ Ethylene Vinyl Acetate (EVA)

² Thyssen

³ Matrix

لیفشیتز-ون در والز و جزء قطبی شامل مؤلفه‌ی اسیدی لوئیس و مؤلفه‌ی بازی لوئیس است مطابق با رابطه زیر است [22]:

$$(Y_{LA} (1 + \cos \theta) = 2[(Y_{LA}^D Y_{SA}^D)^{\frac{1}{2}} + (Y_{LA}^+ Y_{SA}^+)^{\frac{1}{2}} + (Y_{LA}^- Y_{SA}^-)^{\frac{1}{2}}]) \quad (3)$$

جدول 2 پیوندهای مربوط به هر قله در طیف FT-IR [23]

Table 2 Bonds correlated to the FTIR spectrum peaks [23]

عدد موج (cm ⁻¹)	پیوند
800	ارتعاش کششی پیوندهای Si-N
850	ارتعاش کششی پیوندهای Si-C
1020	ارتعاش کششی پیوندهای C-O
1078	ارتعاش کششی نامتقارن پیوندهای Si-O
1242	ارتعاش کششی پیوندهای C-O-C
1369	ارتعاش خمشی گروه‌های -CH ₃
1461	ارتعاش گهواره‌ای C-H در گروه‌های CH ₂
1735	ارتعاش کششی متقارن پیوندهای C=O
2854	ارتعاش کششی متقارن پیوندهای C-H در گروه CH ₂
2923	ارتعاش کششی نامتقارن پیوندهای C-H در گروه CH ₂

2-4- مشخصه‌یابی پوشش‌های نانوکامپوزیتی

به منظور بررسی پیوندها و گروه‌های عاملی پوشش‌های نانوکامپوزیتی تهیه شده از آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری^۶ استفاده شد. به منظور بررسی خواص مورفولوژی و ساختار سطح پوشش‌ها و تخریل سطح از آزمون میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مدل FE-SEM QUANTA FEG (USA) 450 استفاده شد. به منظور جلوگیری از تجمع الکترونی سطح نمونه‌ها با ذرات طلا پوشش داده شد. به منظور ارزیابی زاویه تماس آب و تخمین آب‌گریزی پوشش‌های تهیه شده از دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس آب شرکت سولار مدل CA-500 A استفاده شد، که بر اساس شکل قطره روی سطح پوشش تهیه شده و اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیکی، خصوصیات ترشوندگی و انرژی سطح پوشش‌های مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی زبری سطوح از دستگاه زبری سنج مدل SJ-210 ساخت شرکت میتوتوویو استفاده شد.

3-نتایج و بحث

3-1- تحلیل FT-IR نمونه‌های نانوکامپوزیت اتیلن وینیل استات/نانوسیلیکا
طیف‌های FT-IR مربوط به نمونه‌های اتیلن وینیل استات فاقد و حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیکا در شکل 1 و پیوندهای مرتبط با قله‌های مشخصه در طیف FTIR در جدول 2 [23، 24] نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمون، وجود پیوندهای C-H، C-O، و C=O در ساختار اتیلن وینیل استات و همچنین پیوندهای Si-N، Si-C، و C-H در ساختار هگزا متیل دی سیلازان قابل مشاهده است. همچنین، با توجه به نتایج در طیف اتیلن وینیل استات قله‌های قابل مشاهده در اعداد موج 2854 cm⁻¹ تا 2923 cm⁻¹ به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی متقارن و نامتقارن پیوندهای C-H و قله واقع شده در عدد موج حدود 1369 cm⁻¹ مربوط به ارتعاش خمشی پیوندهای C-H در گروه‌های CH₃ (انتهای زنجیره‌های پلیمری) می‌باشد [24، 25]. همچنین ارتعاش گهواره‌ای مربوط به پیوندهای C-H در گروه‌های CH₂ (وسط زنجیره‌های پلیمری) در 1461 cm⁻¹ قله جذبی نشان داده است [23]. وجود

دیگر، اهمیت دیگر روش‌های محاسباتی و تحلیلی در تعیین انرژی سطح مواد ناشناخته‌تر به عنوان مثال در انتخاب زوج مؤلفه‌های کامپوزیتی در میکرو/نانوکامپوزیت‌ها و بررسی آب‌دوستی/آب‌گریزی این مواد در لایه فاز میانی در سطح مشترک و ارتباط آن با مکانیزم‌های تقویت‌کنندگی فازهای افزودنی است. سطوح مواد جامد را می‌توان به دو دسته‌ی سطوح با انرژی سطح بالا و پایین می‌توان تقسیم کرد [20]. تا به امروز، متداول‌ترین روش برای تعیین انرژی سطح بر اساس اندازه‌گیری زاویه تماس است. هنگامی که برای یک مایع واحد (به طور معمول آب) اندازه‌گیری می‌شود، زاویه تماس اندازه‌گیری شده میزان آب‌گریزی یا عدم آب‌گریزی سطح را نشان می‌دهد. کشش سطحی مقدار انرژی یا کار لازم بر واحد سطح برای افزایش مساحت سطح یک مایع می‌باشد به صورتی که بتوان بر نیروهای بین مولکولی مایع غلبه کرد. البته کشش سطحی را می‌توان نیرو بر واحد طول نیز تعریف کرد. کشش سطحی را غالباً با γ نشان می‌دهند و واحد آن به صورت نیرو بر واحد طول N/m و یا انرژی بر واحد سطح J/m² تعریف می‌گردد. برای تعریف دقیق‌تر، اصطلاح تنش بین سطحی^۱ مربوط به مرزهای فاز مایع/مایع و مایع/جامد می‌باشد. برای حالت مایع/گاز به تنش سطح^۲ و برای حالت جامد/گاز به انرژی آزاد سطح^۳ اشاره می‌شود. سه مدل مختلف سطوح آب‌گریز بر مبنای هیستریزس زاویه تماس در این بخش توضیح داده شده است.

برای تعاملات خاص (قطبی) بین سطوح جامد و مایع از تئوری اوونز/وندت^۴ استفاده می‌شود که این تئوری انرژی سطح جامدات را به دو قسمت قطبی و غیر قطبی تقسیم می‌کند؛ جز غیر قطبی شامل پیوندهای واندروالسی و جز قطبی شامل پیوندهای دوقطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی القایی و پیوندهای هیدروژنی می‌باشد. از لحاظ ریاضی، این تئوری بر دو معادله اساسی گودز و یانگ بنا شده است که تعامل بین سطوح جامد و مایعات را توصیف می‌کند که معادله آن به شرح زیر است [20]:

$$\left(\frac{Y_{LA} (\cos \theta + 1)}{2 (Y_{LA}^D)^{1/2}} \right) = (Y_{SA}^P)^{1/2} \frac{(Y_{LA}^P)^{1/2}}{(Y_{LA}^D)^{1/2}} + (Y_{SA}^D)^{1/2} \quad (1)$$

برای محاسبه انرژی سطح جامد، لازم است اطلاعات زاویه تماس چند مایع بر روی سطح جامد به دست آورده شود [21]. اگرچه تئوری اوونز/وندت برای سطوح با قطبیت متوسط بسیار خوب عمل می‌کند، اما به دلیل نیاز استفاده از مایعات متعدد برای آزمایش و همچنین انتخاب این مایعات توسط آزمایشگر نامناسب است. نظریه فوکس^۵ انرژی سطح جامد را به دو قسمت قطبی و غیر قطبی تقسیم می‌کند. در حقیقت، نظریه فوکس از نظر ریاضی معادل تئوری اوونز/وندت است. با این حال، مبنای آن تا حدودی متفاوت است [8]. نظریه فوکس نشان می‌دهد که انرژی چسبندگی میان جامد و مایع را می‌توان به تعاملات بین بخش قطبی و غیر قطبی تقسیم کرد. معادله 2 نشان دهنده تئوری فوکس می‌باشد [36].

$$\left((Y_{LA}^D)^{1/2} (Y_{SA}^D)^{1/2} + (Y_{LA}^P)^{1/2} (Y_{SA}^P)^{1/2} \right) = \frac{Y_{LA} (\cos \theta + 1)}{2} \quad (2)$$

در این تحقیق از تئوری ون اوس^۶ نیز استفاده شد که بر اساس این تئوری انرژی سطح جامدات به سه جزء تقسیم شده که شامل مؤلفه‌ی غیر قطبی

⁵ Fowkeskl,

⁶ Van Oss

⁷ FTIR

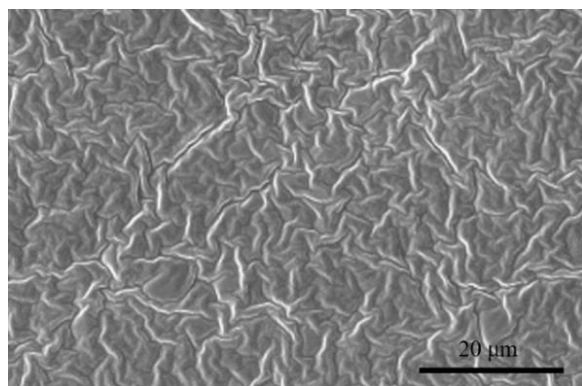
¹ Interfacial tension (IFT)

² Surface tension

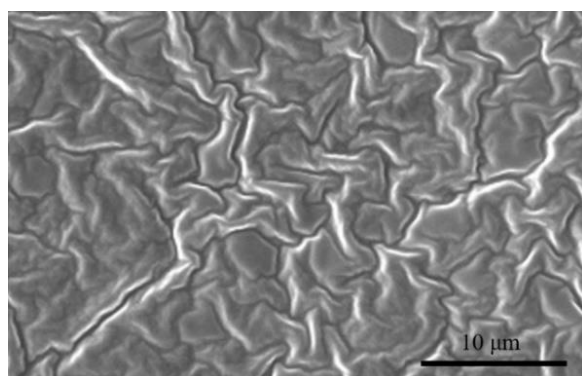
³ Surface free energy

⁴ Owens-Wendt

زاویه غلتش بالایی داشته باشد که این مسأله در آزمون زاویه تماس در ادامه این تحقیق بررسی شده و تأیید گردید.



(الف-5)



(ب-10)

Fig. 2 SEM images of pure EVA specimens in (a) 5000 and (b) 10000 magnifications

شکل 2 تصاویر SEM سطح نمونه EVA-Pure در (الف) بزرگمایی 5000 و (ب) 1000 برابر

در تصاویر SEM شکل 3 وجود نانوذرات سیلیکا که به صورت ذرات سفید رنگ می‌باشند در شکل نمایش داده شده است. با وجود اضافه شدن نانو مواد به پوشش، سطح پوشش صاف می‌باشد و نتیجه این پدیده در آزمون زاویه تماس نیز مشخص است.

نتایج نشان می‌دهد با وجود افزودن نانوذرات ترکیب شیمیایی سطح تغییر کرده و بهبود زاویه تماس استاتیکی زاویه غلتش هنوز بالا می‌باشد که مبین حالت اشباع کیسی می‌باشد، چرا که غلظت نانوذرات هنوز به مقدار کافی بالا نرفته و منجر به نفوذ کم قطرات آب به طور کامل در بین میکروزبری‌ها و در میان نانوزبری‌ها شده که خود منجر به افزایش هیستریزس زاویه تماس و افزایش زاویه غلتش می‌شود. دلیل عدم تشکیل ساختار حفره‌ای با وجود افزودن نانو مواد را می‌توان به غلظت کم نانو مواد نسبت داد. تصاویر میکروساختار SEM در شکل 4 نشان می‌دهد با افزودن درصد بیشتری از نانومواد پدیده جدایش فازی رخ می‌دهد و ساختار حفره‌ای تشکیل می‌شود. با افزودن نانو مواد، این فرآیند به دلیل نقش تشکیل هسته نانوذرات تسریع می‌شود. در جریان جداسازی فاز، فاز پلیمر به نواحی غنی از پلیمر (حلال ضعیف) و فقیر-پلیمر (غنی از حلال) جدا می‌شود. سپس، آن مناطق با حلال غنی به دلیل تبخیر سریع مولکول‌های حلال که نتیجه تکنیک پاشش است، از بین می‌روند [28, 29].

این قله‌ها در طیف اتیلن وینیل استات تأییدکننده حضور تعداد زیادی پیوند C-H در ساختار این ماده است. همچنین وجود دو قله جذبی در 1735 cm^{-1} و 1020 cm^{-1} به ترتیب مؤید وجود پیوندهای C=O و C-O در ساختار رزین اتیلن وینیل استات است. پیوند C-O-C موجود در ساختار این رزین نیز در 1242 cm^{-1} قله جذبی نشان داده شده است [23, 26]. بنابراین وجود این قله‌ها در طیف FT-IR مربوط مؤید وجود ساختار اتیلن وینیل استات می‌باشد. با افزودن عامل سیلیکا به سیستم، برخی قله‌های جدید در ساختار ماده پدید آمده که شدت این قله‌ها با افزودن درصد این عامل تشدید شده است.

مطابق با شکل 1، قله‌های جدید پدیدار شده در عدد موج‌های 800 cm^{-1} ، 850 cm^{-1} و 1078 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای Si-O، Si-C، N-Si-C می‌باشد [24, 27]. پیوندهای Si-C و Si-N که قله آن‌ها در طیف FT-IR مشخص است، در ساختار هگزا متیل دی سیلازان قابل مشاهده می‌باشد و بنابراین افزایش شدت قله مربوط به این دو پیوند با افزایش درصد عامل سیلیسیم دار قابل توجیه می‌باشد.

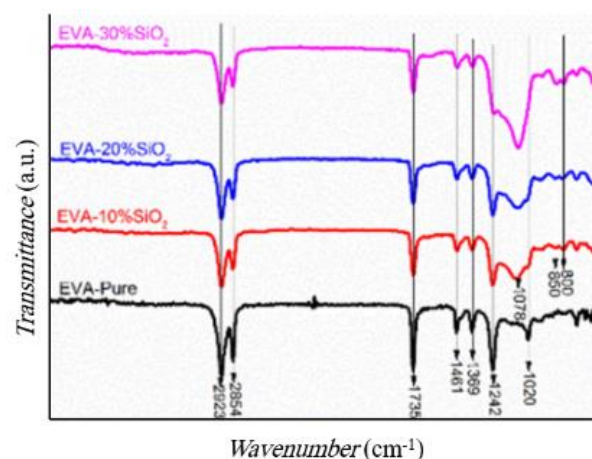


Fig. 1 FTIR spectra of EVA as a function of the nano-silica loading fraction

شکل 1 طیف‌های FT-IR نمونه‌های اتیلن وینیل استات بر حسب درصدهای مختلف نانوسیلیکا

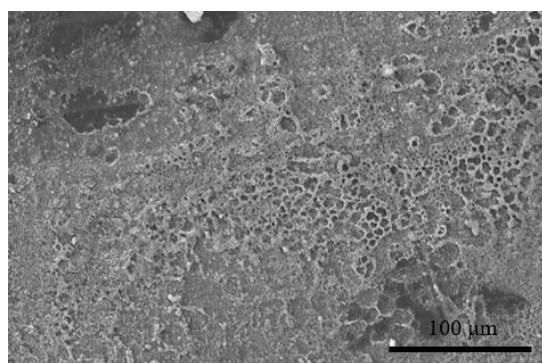
تشدید شدت قله مربوط به پیوند Si-O با افزایش درصد عامل سیلیسیم دار در طیف‌های مربوط قابل توجیه است چرا که هرچقدر غلظت این ماده در رزین افزایش یابد، لازم است تعداد پیوندهای بین این ماده و رزین نیز بیشتر نمایش داده شود که خود مبین افزایش پیوندهای اتصال بین عامل سیلیکا و رزین و افزایش برهم‌کنش‌های سطح دو فاز زمینه و سیلیکا است.

2-3- مورفولوژی و میکروساختار پوشش‌های نانوکامپوزیتی

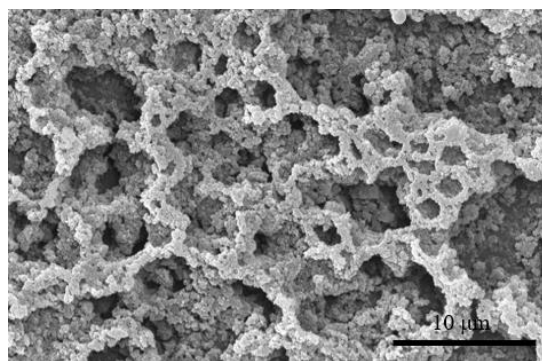
شکل 2 تصاویر SEM نمونه EVA-Pure (نام نمونه) را در دو بزرگمایی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سطح از بخش‌های مجزا از هم تشکیل شده است که این پدیده را می‌توان به دوبلوکی بودن کوپلیمر نسبت داد چرا که پلیمر مورد استفاده از یک قسمت قطبی و از یک قسمت غیر قطبی تشکیل شده است. سطوح مجزا از هم الزاماً به معنای جدایش فازی کومونومری موجود در EVA نبوده، بلکه در مقیاس نمایش داده شده توسط تصاویر میکروسکوپی SEM سطح پوشش داده شده تنها به دلیل پیدایش مرزهای غنی از حلال پیرامون مناطق غنی از پلیمر به‌طور مقطع¹ شکل گرفته است. این سطح کاملاً صاف و یکنواخت بوده و به همین دلیل انتظار می‌رود که زاویه تماس کم و

¹ Segmental

تصویر مورفولوژی SEM در شکل 5 به خوبی نشان دهد با افزودن 30٪ وزنی سیلیکا به نمونه ساختار سطح به سمت یک حالت شبکه‌ای می‌رود که این پدیده ناشی از فرایند جداسازی فاز می‌باشد. از دست دادن حلال در فصل مشترک نمونه-هوا منجر به تغییر ناهمگن غلظت حلال در نمونه شده [30] و زمانی که غلظت حلال به مقدار بحرانی می‌رسد جدایش فاز ابتدا در محل تماس نمونه-هوا رخ می‌دهد که این کاهش سریع غلظت حلال منجر به جدایش فاز و در نتیجه تشکیل مناطق غنی از پلیمر و فقیر پلیمر می‌شود که در نهایت باعث شکل‌گیری ساختار شبکه‌ای می‌شود. در بعضی از نقاط نانوذرات بیشتر جمع (کلوخه‌ای)¹ شده‌اند که حاکی از تجمع غیر یکنواخت نانوذرات دارد [31]. جهت بررسی دقیق‌تر تغییر اندازه تخلخل‌های شبکه با تغییر مقدار نانوذرات از نرم‌افزار پردازش تصویر Image J استفاده شده و توزیع اندازه حفرات در تصاویر مربوط به بزرگنمایی 2500 برابر شکل 6 مطابق با نتایج میکروساختار آنالیز SEM برای نمونه‌های EVA-%20SiO₂ و EVA-%30SiO₂ اندازه‌گیری شده است.



(الف-ا)

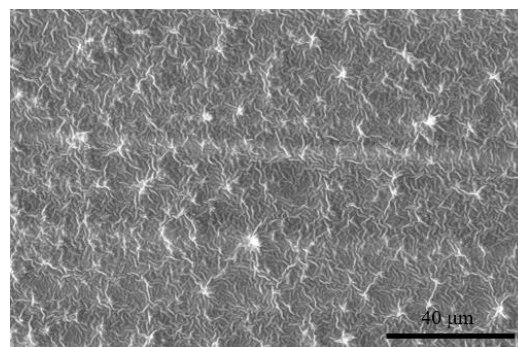


(ب-ب)

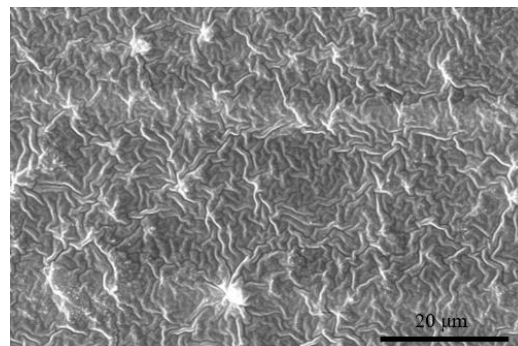
Fig. 5 SEM images of EVA-%30 SiO₂ specimens in (a) 1000 and (b) 2500 magnification

شکل 5 تصاویر SEM نمونه EVA-%30 SiO₂ در (الف) بزرگنمایی 1000 و (ب) 10000 برابر

هیستوگرام توزیع اندازه تخلخل مربوط به این دو نمونه در شکل 7 (الف) و (ب) نمایش داده شده است. همان‌گونه که از شکل 7 مشخص است، بیشترین تعداد اندازه حفرات در نمونه حاوی 20٪ نانوذره بین 6 تا 8 میکرومتر بوده است در حالی که در نمونه حاوی 30٪ نانوذرات بیشترین تعداد حفرات در محدوده 2 تا 3 میکرومتر بوده است. همچنین توزیع اندازه حفرات در نمونه حاوی 20٪ نانوذره نسبت به نمونه دیگر نرمال‌تر است. داده‌های آماری مستخرج از این اندازه‌گیری در جدول 3 گزارش شده است.



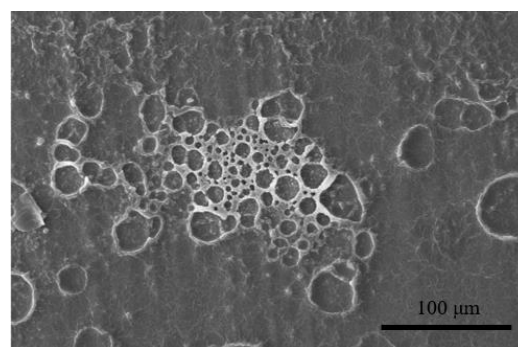
(الف-ا)



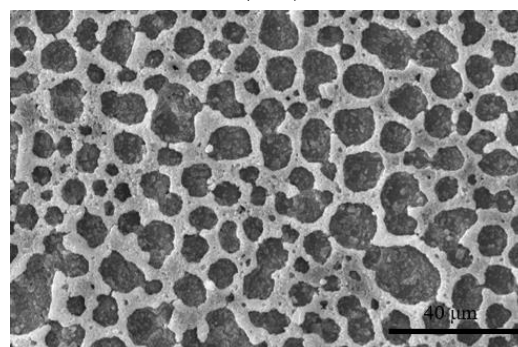
(ب-ب)

Fig. 3 SEM images of EVA-%10 SiO₂ specimens in (a) 2500 and (b) 5000 magnifications

شکل 3 تصاویر SEM نمونه EVA-%10 SiO₂ در (الف) بزرگنمایی 2500 و (ب) 5000 برابر



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 4 SEM images of EVA-%20 SiO₂ specimens in (a) 1000 and (b) 2500 magnification

شکل 4 تصاویر SEM نمونه EVA-%20 SiO₂ در (الف) بزرگنمایی 1000 و (ب) 2500 برابر

¹ Agglomerated

جدول 3 داده‌های آماری حاصل از اندازه‌گیری توزیع اندازه حفرات حاصل از نمونه‌های حاوی 20٪ و 30٪ نانوسیلیکا

Table 3 Statistical information in the pore size distribution obtained from specimens loaded with 20 wt% and 30 wt% of nano-silica

میانگین (μm)	اندازه کوچک‌ترین حفره (μm)	اندازه بزرگ‌ترین حفره (μm)	نمونه
9.1	2.21	18.98	EVA-20% SiO ₂
3.26	1.52	7.7	EVA-30% SiO ₂

مطابق با جدول 3 مشاهده می‌شود که اندازه میانگین حفرات در نمونه حاوی 20٪ نانوذره حدود 3 برابر از قطر حفرات نمونه حاوی 30٪ نانوذره بزرگ‌تر است و این مسئله قبلاً نیز توسط کیم و همکارانش گزارش شده است [26]. همچنین در این جدول اختلاف بین کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین حفرات موجود در دو نمونه مورد مطالعه قابل توجه بوده و بیشتر بودن این پارامترها در نمونه حاوی 20٪ نانوذره نسبت به نمونه حاوی 30٪ نانوذره مشهود است. وقتی نانوذرات افزوده می‌شوند به دلیل نقش تشکیل هسته، فرایند حفره حفره شدن سطح بهتر اتفاق می‌افتد. همچنین مشخص شد که افزودن نانوذرات منجر به تبخیر سریع‌تر از حلال می‌شود و بنابراین، در حضور نانوذرات، این پوشش با سرعت بیشتری خشک می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد، با افزایش محتوای سیلیس، روند خشک شدن تسریع شده که منجر به تشکیل منافذ کوچک‌تر در سطح پوشش می‌شود. نمونه با 40٪ نانوذره تمام سطح پوشیده شده از نانوذره می‌باشد. این پدیده ناشی از نسبت سطح زیاد نانو مواد نسبت به پلیمر بوده زیرا پلیمر قابلیت ترکنندگی کافی برای نانوذرات را نداشته و عملاً ساختار حفره‌ای نیز تشکیل نشده است.

3-3- زاویه تماس استاتیکی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس در جدول 4 ذکر شده است. زوایای گزارش شده میانگین 3 اندازه‌گیری متوالی در 3 ناحیه متفاوت از سطح هر پوشش می‌باشد. نتایج به خوبی نشان می‌دهد افزودن نانوذرات منجر به ایجاد سطوح آب‌گریزتر شده و مقدار آن در درصد وزنی 30٪ نانوسیلیکا به حداکثر می‌رسد. یکی دیگر از معیارهای مرتبط با آب‌گریزی سطوح زاویه غلتش است که برای نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و در جدول 5 نشان داده شده است. محاسبه زاویه غلتش بر مبنای مرجع [32] می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد نانوذرات اصلاح شده زاویه تماس افزایش، و زاویه غلتش کاهش می‌یابد و بیشترین زاویه تماس و کمترین زاویه غلتش مربوط به نمونه EVA-30% SiO₂ می‌باشد که این نتایج حاصل زبری و ترکیب شیمیایی سطح می‌باشد. شکل 8 نمایشگر زاویه تماس آب بر روی پوشش نانوکامپوزیتی 30٪ وزنی نانوسیلیکا در مقایسه با پوشش مرجع (اتیلن وینیل استات خالص) است که مقادیر عددی آن در جدول 4 گزارش شده است.

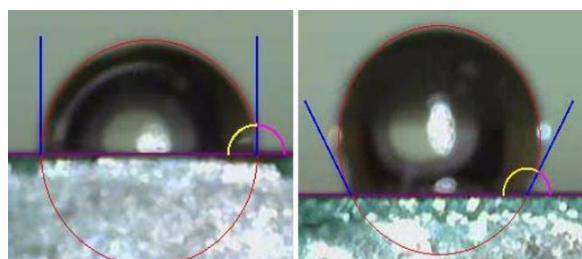
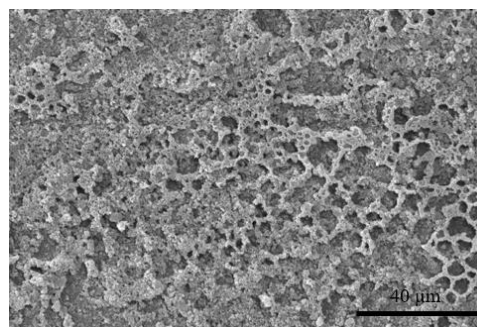
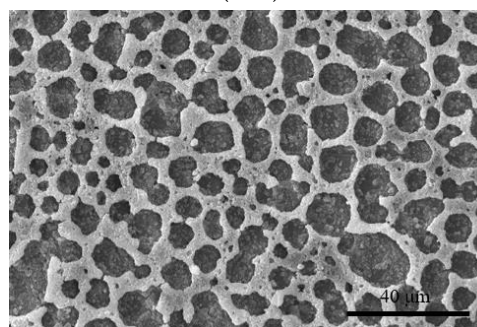


Fig.8 Contact angle of pure EVA and 30 wt% nano-silica filled specimens

شکل 8 زاویه تماس نمونه‌های پلی‌اتیلن استات خالص و نمونه پر شده با 30٪ وزنی نانوسیلیکا



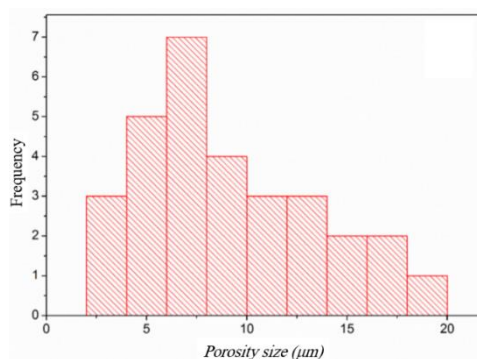
(الف-ا)



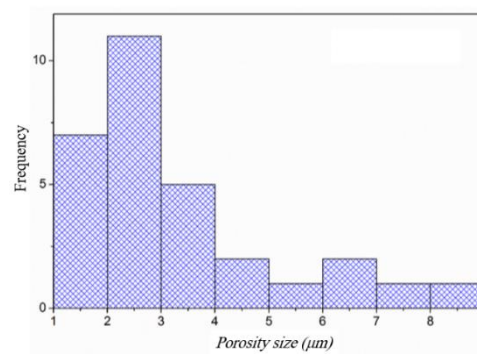
(ب-ب)

Fig. 6 SEM images of SiO₂/EVA nanocomposites in 2500 magnification in specimens filled with (a) 20% and (b) 30% of nano-silica

شکل 6 تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن استات/نانوسیلیکا در بزرگنمایی 2500 برابر جهت بررسی توزیع اندازه حفرات در دو نمونه (الف) حاوی 20٪ و (ب) حاوی 30٪ نانوسیلیکا



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig.7 Pore size distribution histogram of nanocomposites filled with (a) 20 wt% and (b) 30 wt% of nano-silica

شکل 7 هیستوگرام توزیع اندازه حفرات نانوکامپوزیت‌های (الف) حاوی 20٪ و (ب) حاوی 30٪ نانوسیلیکا

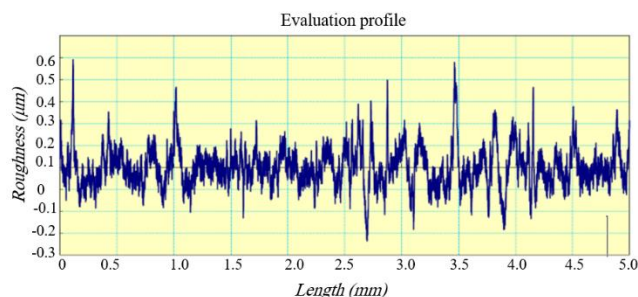


Fig.9 Surface roughness profile of EVA-pure specimens

شکل 9 پروفایل زبری سطح نمونه EVA-Pure

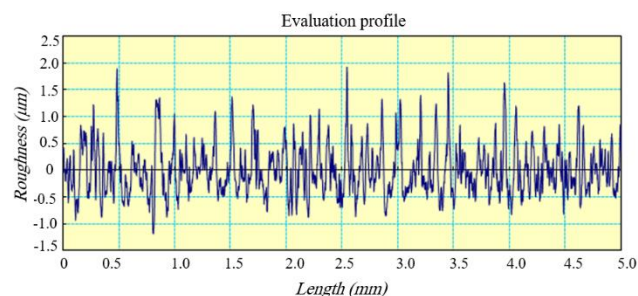


Fig.10 Surface roughness profile of EVA-%10 SiO₂ specimens

شکل 10 پروفایل زبری سطح نمونه EVA-%10 SiO₂

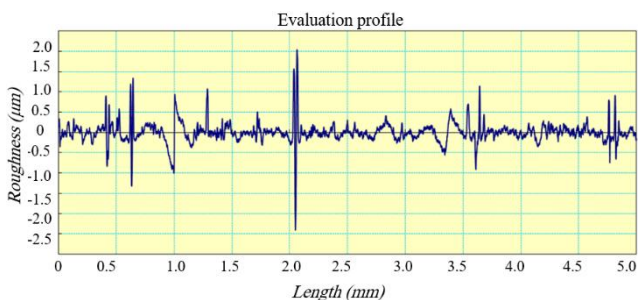


Fig.11 Surface roughness profile of EVA-%20 SiO₂ specimens

شکل 11 پروفایل زبری سطح نمونه EVA-%20 SiO₂

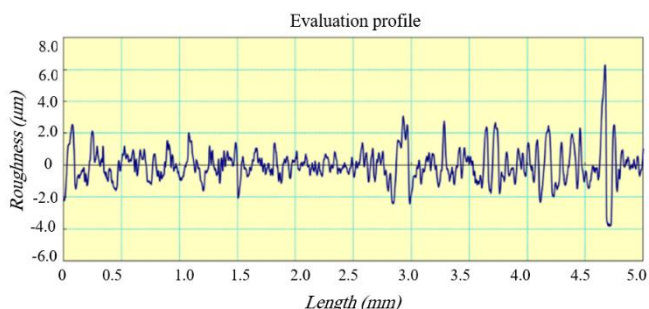


Fig.12 Surface roughness profile of EVA-%30 SiO₂ specimens

شکل 12 پروفایل زبری سطح نمونه EVA-%30 SiO₂

جدول 7 پارامترهای زبری نمونه‌های نانوکامپوزیتی پر شده با نانوسیلیکا

Table 7 Roughness parameters of nanocomposite specimens filled with nano-silica

	EVA-Pure	EVA-%10SiO ₂	EVA-%20SiO ₂	EVA-%30SiO ₂
Ra (μm)	0.069	0.151	0.363	0.768
Rq (μm)	0.092	0.259	0.466	1.071
Rsk (μm)	0.726	0.310	0.818	0.703

جدول 4 زاویه تماس استاتیکی با آب بر روی پوشش‌های نانوکامپوزیتی

Table 4 Static contact angle using water droplet on the nanocomposite coatings

نمونه	زاویه تماس (θ)
Pure-EVA	90.1
EVA-%10 SiO ₂	97.5
EVA-%20 SiO ₂	103.5
EVA-%30 SiO ₂	121.32

جدول 5 زاویه غلتش آب بر روی نمونه‌ها با پوشش‌های نانوکامپوزیتی

Table 5 Sliding angle obtained from nanocomposite coatings

نمونه‌ها	زاویه غلتش
Pure-EVA	بدون غلتش
EVA-%10 SiO ₂	85
EVA-%20 SiO ₂	20
EVA-%30 SiO ₂	8

مطابق با تحقیقات دیگر، استفاده از مقادیر بالای نانوذرات به دلیل عدم قابلیت پلیمر در نگهداری نانوذرات در فیلم پلیمری امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به شکل 5 لایه سطحی با نانوذرات پوشیده شده است که همین مسأله موجب کاهش انرژی سطح و آب‌گریزی نمونه شده است که این بهبود آب‌گریزی را می‌توان به تجمع نانو مواد نسبت داد که همین پدیده توسط ایمان حجازی و همکاران گزارش شده است [33]. در نمونه‌های EVA-%10 SiO₂ و EVA-%20 SiO₂ با وجود افزودن نانو مواد، زاویه غلتش افزایش یافته و این حالت مطابق با پیش‌بینی مدل اشباع کیسی است چرا که غلظت نانو مواد به حد کافی نبوده و قطره به درون میکروزبری‌ها و به مقدار کم درون نانوزبری‌ها نفوذ کرده و موجب می‌شود تا زاویه غلتش افزایش یابد.

برای اندازه‌گیری انرژی آزاد سطح پوشش‌ها از داده‌های شرکت کروس استفاده شده است. لازم به ذکر است کشش سطح مایعات استفاده شده در آزمون زاویه تماس، با روش قطره آویزان اندازه گرفته شده که در تطابق با مقادیر گزارش شده در [34] می‌باشد. در این تحقیق، از زاویه تماس تولون، تتراهیدروفوران و سیکلوهزان بر روی سطوح استفاده شد که نتایج آن در جدول 6 نشان داده شده است.

جدول 6 زاویه تماس مایعات استفاده شده برای اندازه‌گیری انرژی سطح

Table 6 Contact angle of liquids used to measure the surface energy

نمونه	تولون	سیکلوهگزان	تتراهیدروفوران
Pure-EVA	32.66	43.17	26
EVA-%10 SiO ₂	36.27	59.75	30.35
EVA-%20 SiO ₂	36.1	52.08	31.39
EVA-%30 SiO ₂	21.94	42.18	27.42

3-4- زبری سطح پوشش نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن استات/نانوسیلیکا

در میان پارامترهای موجود برای اندازه‌گیری زبری سطح بیشتر از پارامترهای زبری متوسط (Ra) و جذر متوسط مربع (Rq) بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرند [35]. زبری سطح نمونه‌ها در یک طول 5 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. در شکل‌های 9 الی 12 پروفایل زبری سطوح نمونه‌ها ارائه شده است.

در جدول 7 مقادیر Ra، Rq و Rsk ارائه گردیده است. با توجه به مقادیر جدول 7 مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نانو مواد زبری سطح افزایش می‌یابد و این زبری ایجاد شده تأثیر مستقیمی بر روی زاویه غلتش دارد و با افزایش زبری سطح زاویه غلتش افزایش می‌یابد.

جدول 11 قسمت قطبی انرژی آزاد سطح محاسبه شده را نشان داده که مجموع جزء بازی و اسیدی است و با افزایش نانو مواد افزایش پیدا کرده است. این نتایج در تقابل با دو تئوری قبلی بوده چرا که با افزایش نانو مواد قسمت قطبی انرژی آزاد سطح باید کاهش پیدا کرده و دلیل این مسأله افزایش زاویه تماس استاتیکی آب می‌باشد. در نتیجه این تئوری توانایی لازم برای تخمین انرژی آزاد سطح این پوشش را ندارد. تصور می‌گردد فرض‌های در نظر گرفته شده در توسعه تئوری ون اوس حساسیت بیشتری به نوع مواد مورد استفاده و خصوصیت فیزیکی-شیمیایی آن‌ها داشته که در برخی از سامانه‌های نانوکامپوزیتی فرض‌های ترمودینامیکی مدل مذکور نقض می‌گردد. یکی از این موارد، کیفیت برهم‌کنش‌های فاز پرکننده/پلیمر یا فاز میانی در سطح مشترک پرکننده و پلیمر است که دارای خصوصیات فیزیکی و ساختاری متفاوت از پلیمر فاز زمینه است که مدل به عنوان فاز سوم در نظر نگرفته است. این امر به ویژه در نانوکامپوزیت‌ها به سبب سطح ویژه بالای نانومواد قابل توجه است. همچنین، علاوه بر خصوصیات ترمودینامیکی سطح و سطح/مایع مورد آزمایش، هندسه سطوح (پستی و بندی مقیاس میکرو/نانو) نیز می‌تواند باعث تناقض در فرض‌های مدل و شرایط واقعی عملکردی پوشش گردد.

جدول 11 اجزای مختلف انرژی آزاد سطح با تئوری ون اوس

Table 11 The surface energy components based on the Van Oss theory

	γ_{SA}	γ_{SA}^D	γ_{SA}^+	γ_{SA}^-
Pure-EVA	26.6	19.1	7.54	0.02
EVA-%10 SiO ₂	24.6	14.4	9.8	0.4
EVA-%20 SiO ₂	26.8	16.6	8.3	1.9
EVA-%30 SiO ₂	40.5	19.3	7.2	14.0

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پوشش‌های نانوکامپوزیتی پایه اتیلن وینیل استات پر شده با صفر تا 30٪ وزنی نانوذرات سیلیکا در حالت اصلاح شده با هگزامتیل دی سیلان از روش حلال و با غلظت بهینه 3٪ پلیمر در تولوئن به عنوان حلال با توجه صرفه اقتصادی به منظور بررسی خواص آب‌گریزی و انرژی سطح پوشش‌ها ساخته شد. خواص میکروساختار نشان داد نمونه اتیلن وینیل استات خالص نشان دارای سطحی صاف می‌باشد که مطابق با آزمون زاویه غلتش و زاویه تماس استاتیکی بود. نتایج نشان داد نمونه پر شده با 30 درصد سیلیکا دارای حفره‌ها با اندازه بهینه نسبت به دیگر پوشش‌های نانوکامپوزیتی بوده که منجر به افزایش زاویه تماس به مقدار 121 درجه با 34٪ افزایش نسبت به سطح اتیلن وینیل استات خالص شد. آزمایش‌ها نشان داد افزایش درصد نانو مواد منجر به بهبود زبری سطح و در نتیجه کاهش زاویه غلتش شده بطوریکه پوشش حاوی 30 درصد وزنی نانوسیلیکا منجر به کاهش زاویه غلتش به 8 درجه با 90٪ کاهش نسبت به نمونه‌های 10 درصد وزنی شد. این نتایج به زبری قابل توجه در پوشش 10 درصد وزنی و سطح حفره‌ای در اثر جدایش فاز در نمونه 20 درصد مرتبط شد. محاسبه انرژی آزاد سطح با استفاده از سه تئوری اوونزوندت، فوکس و ون اوس انجام شد و نشان داده شد که در تئوری‌های اوونزوندت و فوکس جزء قطبی انرژی آزاد سطح با افزودن نانو مواد کاهش یافت که این مسأله با نتایج آزمون زاویه تماس مطابقت داشت. با این وجود تئوری ون اوس افزایش جزء قطبی انرژی سطح را پیش‌بینی کرده که این نتایج مغایر با نتایج آزمون زاویه تماس بوده که می‌تواند مرتبط با تفاوت در فرض‌های تئوری با شرایط پوشش‌های تهیه شده از جمله برهم‌کنش‌های بین نانوسیلیکا/EVA در سطح مشترک باشد.

پارامتر دیگر زبری کجی (Rsk) است که برای تعیین تقارن مشخصات زبری در مورد خط متوسط استفاده می‌شود. نشان می‌دهد در نمونه‌های EVA-%10 SiO₂ و EVA-%30 SiO₂ با افزایش درصد نانو مواد، Rsk نسبت به نمونه خالص بیشتر کاهش یافته و این کاهش می‌تواند منجر به آب‌گریزی بیشتر سطح شود [33].

3-5- مقادیر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطح

همان‌طور که قبلاً بیان شد، در این تحقیق با استفاده از سه تئوری اوونزوندت، فوکس و ون اوس انرژی سطح محاسبه شده است. برای محاسبه انرژی سطح اجزای متفاوتی از کشش سطح مایعات باید مشخص شده باشند که به همین منظور از داده‌های شرکت کروس استفاده شده است [34]. برای استفاده از تئوری اوونزوندت از مایعات جدول 8 و اطلاعات زاویه تماس جدول‌های 4 و 6 استفاده شده است. با استفاده از رابطه 1 مقادیر محاسبه شده انرژی آزاد سطح در جدول 9 ارائه گردیده است.

جدول 8 اجزای مختلف کشش سطح مایعات مورد استفاده [28]

Table 8 The surface tension components of the liquids used

مایعات آزمون	γ_{LA}^D	γ_{LA}^P	γ_{LA}
آب	26.4	46.4	72.8
تتراهیدروفوران	12.4	15.0	27.4
سیکلوهگزان	25.5	0	25.5
تولون	26.1	2.3	28.4

جدول 9 اجزای مختلف انرژی آزاد سطح با تئوری اوونزوندت

Table 9 The surface energy components based on the Owens-Wendt theory

	γ_{SA}	γ_{SA}^D	γ_{SA}^P
Pure-EVA	24.9	19.8	5.1
EVA-%10 SiO ₂	21.5	17.1	4.3
EVA-%20 SiO ₂	21.7	19.4	2.3
EVA-%30 SiO ₂	25.0	25.0	0.03

همان‌گونه که از داده‌های جدول 9 مشخص است با افزایش درصد وزنی نانو مواد قسمت قطبی انرژی آزاد سطح کاهش یافته است و این کاهش در افزایش زاویه تماس استاتیکی آب نقش داشته است چرا که مولکول آب قطبی است و تمایل دارد که با قسمت قطبی انرژی آزاد سطح پیوند برقرار کند و در نتیجه زاویه تماس مدام بیشتر می‌شود. برای محاسبه انرژی آزاد سطح با استفاده از تئوری فوکس، از اطلاعات زاویه تماس آب و سیکلوهگزان و معادله 2 استفاده شده است.

همان‌گونه که از جدول 10 مشخص است با افزایش درصد نانو مواد قسمت قطبی انرژی آزاد سطح کاهش یافته است و هر دو تئوری روند کاهشی انرژی آزاد سطح را نشان می‌دهند که مطابق با نتایج آزمون زاویه تماس می‌باشد. برای استفاده از تئوری ون اوس از اطلاعات زاویه تماس آب، سیکلوهگزان و تتراهیدروفوران و همچنین معادله 3 استفاده شده است.

جدول 10 اجزای مختلف انرژی آزاد سطح با تئوری فوکس

Table 10 The surface energy components based on the Fowkes theory

	γ_{SA}	γ_{SA}^D	γ_{SA}^P
Pure-EVA	23.2	19.1	4.2
EVA-%10 SiO ₂	17.6	14.4	3.2
EVA-%20 SiO ₂	17.7	16.6	1.1
EVA-%30 SiO ₂	19.9	19.3	0.56

5- فهرست علائم

γ_{SA}	انرژی آزاد سطح کل (N/m)
γ_{SA}^D	قسمت غیر قطبی انرژی آزاد سطح (N/m)
γ_{SA}^P	قسمت قطبی انرژی آزاد سطح (N/m)
γ_{SA}^-	قسمت بازی انرژی آزاد سطح (N/m)
γ_{SA}^+	قسمت اسیدی انرژی آزاد سطح (N/m)

6- تقدیر و تشکر

با تشکر و قدردانی از آزمایشگاه پلیمر و نانوکامپوزیت- دانشکده مهندسی مکانیک-دانشگاه صنعتی اصفهان به دلیل حمایت تجهیزاتی، مواد مصرفی و علمی در انجام این تحقیق.

7- مراجع

- [1] Barthlott, W. and Neinhuis, C., "Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces" *Planta*, Vol. 202, No. 1, pp. 1-8, 1997.
- [2] Wu, Y., Du, J., Liu, G., Ma, D., Jia, F., Klemes, J. J. and Wang, J., "A Review of Self-Cleaning Technology to Reduce Dust and Ice Accumulation in Photovoltaic Power Generation Using Superhydrophobic Coating" *Renewable Energy*, 2021.
- [3] Mazrouei-Sebdani, Z. and Khoddami, A., "A Review on Superhydrophobicity: A Characteristic Property of Textiles" *Journal of Textile Science and Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 23-38, 2013.
- [4] Jafari Vardanjani, M., Safavi, M. and Karevan, M., "Design and Characterization of Thermal and Optical Properties of Nano-Composite Self-Cleaning Refractive Transparent-Opaque Smart Window" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 2, pp. 1479-1493, 2021.
- [5] Diaa, M. and Hassabo, A. G., "Self-Cleaning Properties of Cellulosic Fabrics (a Review)" *Biointerf. Res. Appl. Chem*, Vol. 12, No. 2, pp. 1847-1855, 2022.
- [6] Martin, S. and Bhushan, B., "Transparent, Wear-Resistant, Superhydrophobic and Superoleophobic Poly (Dimethylsiloxane)(Pdms) Surfaces" *Journal of colloid and interface science*, Vol. 488, pp. 118-126, 2017.
- [7] Lei, F., Yang, J., Wu, B., Chen, L., Sun, H., Zhang, H. and Sun, D., "Facile Design and Fabrication of Highly Transparent and Hydrophobic Coatings on Glass with Anti-Scratch Property Via Surface Dewetting" *Progress in Organic Coatings*, Vol. 120, pp. 28-35, 2018.
- [8] Nouri, N. M., Saadat Bakhsh, M. and Bagheri, R., "Robust Superhydrophobic Surface with Polytetrafluoroethylene (Ptfе), Micro Sized Aluminum Particles and Sio2 Nano-Particles" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 26-32, 2016.
- [9] Wang, J., Wu, Y., Cao, Y., Li, G. and Liao, Y., "Influence of Surface Roughness on Contact Angle Hysteresis and Spreading Work" *Colloid and Polymer Science*, Vol. 298, pp. 1107-1112, 2020.
- [10] Harun, M. H., Talib, Z. A., Ibrahim, N. A., Chyi, J. L. Y., Salleh, N. G. N., Alias, M. S., Mohamed, M. and Othman, N., "Characterization of Transparent Hydrophobic Coating with Silica and Graphene Oxide Fillers by Sol-Gel Method" *International Journal of Nanoelectronics & Materials*, Vol. 11, No. 3, 2018.
- [11] Zargar Shoushtari, M. and Navazesh, N., "Fabrication of Hydrophilic and Hydrophobic Silica Aerogel by Drying at Ambient Pressure and Their Structural Properties" *Iranian Journal of Physics Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 111-119, 2021.
- [12] Ershad-Langroudi, A. and Azadi, N., "Effects of Adding Nanosilica on Acrylic and Siloxane Hydrophobic Coatings to Protect Calcite Stones" *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 15-29, 2019.
- [13] Ma, W., Jiang, Z., Lu, T., Xiong, R. and Huang, C., "Lightweight, Elastic and Superhydrophobic Multifunctional Nanofibrous Aerogel for Self-Cleaning, Oil/Water Separation and Pressure Sensing" *Chemical Engineering Journal*, Vol. 430, pp. 132989, 2022.
- [14] Padmanabhan, N. T., Thomas, R. M. and John, H., "Antibacterial Self-Cleaning Binary and Ternary Hybrid Photocatalysts of Titanium Dioxide with Silver and Graphene" *Journal of Environmental Chemical Engineering*, pp. 107275, 2022.
- [15] Mohammadzadeh, H., Torkian, L. and Daghighi Asli, M., "Synthesis and Preparation of Hydrophobic Silica Nano-Coatings through Sol-Gel-Dipping Method" *Journal of Applied Researches in Chemistry (JARC)*, Vol. 8, No. 3, pp. -, 2014.
- [16] Shams solaree, L., "Synthesis of Hydrophobic Silica Coatings on Glass by Sol-Gel and Studying Silver Oxide Effect on the Wettability" *Journal of Advanced Materials Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 60-68, 2013.
- [17] Davarpanah, J., soleimankhani, s., Soleimani nezhad, E. and Elahi, S., "Synthesis and Characterization of Hydrophobic Coating Materials Based on Alkoxy Silane Compounds" *Applied Chemistry*, Vol. 16, No. 58, pp. 199-218, 2021.
- [18] Liu, K., Yao, X. and Jiang, L., "Recent Developments in Bio-Inspired Special Wettability" *Chemical Society Reviews*, Vol. 39, No. 8, pp. 3240-3255, 2010.
- [19] Ebert, D. and Bhushan, B., "Wear-Resistant Rose Petal-Effect Surfaces with Superhydrophobicity and High Droplet Adhesion Using Hydrophobic and Hydrophilic Nanoparticles" *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 384, No. 1, pp. 182-188, 2012.
- [20] Rudawska, A. and Jacniacka, E., "Analysis for Determining Surface Free Energy Uncertainty by the Owen-Wendt Method" *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, No. 4, pp. 451-457, 2009.
- [21] Zhang, Z., Wang, W., Korpacz, A. N., Dufour, C. R., Weiland, Z. J., Lambert, C. R. and Timko, M. T., "Binary Liquid Mixture Contact-Angle Measurements for Precise Estimation of Surface Free Energy" *Langmuir*, Vol. 35, No. 38, pp. 12317-12325, 2019.
- [22] Van Oss, C. J., Chaudhury, M. K. and Good, R. J., "Interfacial Lifshitz-Van Der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems" *Chemical reviews*, Vol. 88, No. 6, pp. 927-941, 1988.
- [23] Zhang, W., Yan, W., Pan, R., Guo, W. and Wu, G., "Synthesis of Silane-Grafted Ethylene Vinyl Acetate Copolymer and Its Application to Compatibilize the Blend of Ethylene-Propylene-Diene Copolymer and Silicone Rubber" *Polymer Engineering & Science*, Vol. 58, No. 5, pp. 719-728, 2018.
- [24] Khankrua, R., Pongpanit, T., Paneetjit, P., Boonmark, R., Seadan, M. and Suttirungwong, S., "Development of Pla/Eva Reactive Blends for Heat-Shrinkable Film" *Polymers*, Vol. 11, No. 12, pp. 1925, 2019.
- [25] Parhizkar, N., Shahrabi, T. and Ramezanzadeh, B., "Steel Surface Pre-Treated by an Advance and Eco-Friendly Cerium Oxide Nanofilm Modified by Graphene Oxide Nanosheets; Electrochemical and Adhesion Measurements" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 747, pp. 109-123, 2018.
- [26] Jiang, Z., Hu, C., Easa, S. M., Zheng, X. and Zhang, Y., "Evaluation of Physical, Rheological, and Structural Properties of Vulcanized Eva/Sbs Modified Bitumen" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 134, No. 21, 2017.
- [27] Xiong, J. and Huang, Q., "Crystallization Behavior of Polymer Derived Silicon Carbide Sintered through Microwave Heating Technique" *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1368-1373, 2017.
- [28] Zhang, Z., He, Z., Bi, S. and Asare-Yeboah, K., "Phase Segregation Controlled Semiconductor Crystallization for Organic Thin Film Transistors" *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-163, 2020.
- [29] Liu, S., Chu, Y., Tang, C., He, S. and Wu, C., "High-Performance Chlorinated Polyvinyl Chloride Ultrafiltration Membranes Prepared by Compound Additives Regulated Non-Solvent Induced Phase Separation" *Journal of Membrane Science*, Vol. 612, pp. 118434, 2020.
- [30] Hopkinson, I. and Myatt, M., "Phase Separation in Ternary Polymer Solutions Induced by Solvent Loss" *Macromolecules*, Vol. 35, No. 13, pp. 5153-5160, 2002.

- [31] Zhang, H., Zuo, M., Zhang, X., Shi, X., Yang, L., Sun, S., Zhong, J., Song, Y. and Zheng, Q., "Effect of Agglomeration on the Selective Distribution of Nanoparticles in Binary Polymer Blends" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 149, pp. 106590, 2021.
- [32] Li, S., Huang, J., Chen, Z., Chen, G. and Lai, Y., "A Review on Special Wettability Textiles: Theoretical Models, Fabrication Technologies and Multifunctional Applications" *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 5, No. 1, pp. 31-55, 2017.
- [33] Hejazi, I., Sadeghi, G. M. M., Seyfi, J., Jafari, S.-H. and Khonakdar, H. A., "Self-Cleaning Behavior in Polyurethane/Silica Coatings Via Formation of a Hierarchical Packed Morphology of Nanoparticles" *Applied Surface Science*, Vol. 368, pp. 216-223, 2016.
- [34] Tuvshindorj, U., Yildirim, A., Ozturk, F. E. and Bayindir, M., "Robust Cassie State of Wetting in Transparent Superhydrophobic Coatings" *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 6, No. 12, pp. 9680-9688, 2014.
- [35] Bolvardi, B., Seyfi, J., Hejazi, I., Otadi, M., Khonakdar, H. A., Drechsler, A. and Holzschuh, M., "Assessment of Morphology, Topography and Chemical Composition of Water-Repellent Films Based on Polystyrene/Titanium Dioxide Nanocomposites" *Applied Surface Science*, Vol. 396, pp. 616-624, 2017.



تولید عایق‌های امواج الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی کارآمد بر پایه نانولوله‌های کربنی با روش پخش و جداسازی الکترومکانیکی

ایوب کریم‌زاد قویدل^{1*}، محمد زادشکویان²، غلامرضا کیانی³

1- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- دانشیار، شیمی آلی و بیوشیمی، دانشگاه تبریز، تبریز

* تهران، صندوق پستی 14357-61137، a-karimzad@tvu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/11/18

پذیرش: 1401/01/10

کلیدواژگان

عایق امواج الکترومغناطیسی، نانولوله‌های کربنی، نسبت وجهی، پخش و جداسازی الکترومکانیکی، التراسونیک

این پژوهش در تلاش است تا با بکارگیری روش نوین الکترومکانیکی برای پخش و جداسازی نانولوله‌ها، عایق جاذب الکترومغناطیسی باند X با راندمان بالا و مقرون به صرفه تولید نماید. برای این منظور، نخست نانوکامپوزیت‌هایی با زمینه پلی‌متیل‌متاکریلات با درصدهای بین 0 تا 2٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی با دو روش الکترومکانیکی و پروب التراسونیک تولید شد. ساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌نگاری رامان مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین مقاومت الکتریکی نمونه‌ها برای تعیین غلظت آستانه رسانایی اندازه‌گیری شد. در گام نهایی ارزیابی‌ها، رفتار الکترومغناطیسی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند آستانه رسانایی در روش الکترومکانیکی در غلظت وزنی 0.2٪ رخ داده است، در حالی که برای روش التراسونیک این رویداد در غلظت 1٪ مشاهده شد. بر اساس مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان، توانایی جداسازی الکترومکانیکی در حفاظت از ساختار و طول نانولوله‌ها، عامل اصلی کاهش 80 درصدی غلظت آستانه رسانش تشخیص داده شد. بررسی خصوصیات الکترومغناطیسی نمونه‌ها در آستانه رسانایی نشان می‌دهد که روش الکترومکانیکی علی‌رغم داشتن غلظتی معادل 20٪ روش پروب التراسونیک، عایق‌سازی موثر الکترومغناطیسی 38 dB را ارائه می‌دهد که در مقایسه با روش التراسونیک 16٪ بیشتر است. البته مزیت روش الکترومکانیکی در مقایسه با سایر روش‌ها، حاکی از امکان تقلیل 25 برابری غلظت و هم‌زمان افزایش میزان جذب از 25 به 36 dB است.

Fabrication of carbon nanotubes-based efficient electromagnetic wave shield nanocomposites using electro-mechanical dispersion technique

Ayub Karimzad Ghavidel^{1*}, Mohammad Zadshakoyan², Gholamreza Kiani³

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

2- Department of Manufacturing and Production, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Department of Organic and Biochemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 14357-61137, Tehran, Iran, a-karimzad@tvu.ac.ir

Keywords

Electromagnetic waves shields, Carbon nanotubes, Aspect ratio, Electro-Mechanically Dispersion Technique (EMDT), Ultrasonic

Abstract

This research is trying to fabricate an efficient and economical EMIS X-band using Electro-Mechanical Dispersion Technique (EMDT). For this purpose, first, poly-methyl-methacrylate (PMMA)-based nanocomposites were produced with the different weight percentages between 0 to 2%, by two EMDT and ultrasonic probe methods. The structure of samples was evaluated by scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. The electrical resistivity of samples was also measured to determine percolation threshold. At the final assessments, electromagnetic behavior of the samples was examined. The results show percolation threshold was occurred at the concentration of 0.2 wt.% in EMDT, while this event was observed at the concentration of 1 wt.% for ultrasonic method. According to the microscopic study and the results of Raman spectroscopy, the ability of EMDT in protecting the structure and length of CNTs was detected as the main factor to decrease 80% in percolation threshold concentration. The investigation of electromagnetic properties of samples at percolation threshold show that EMDT method, despite having a concentration equal to 20% of the ultrasonic probe method, offers effective EMIS of 38 dB, which is 16% higher than the ultrasonic probe method. However, the advantage of EMDT compared to earlier presented methods relates to reduce 25 times the concentration and simultaneously increasing the absorption from 25 to 36 dB.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Karimzad Ghavidel, A., Zadshakoyan, M., Kiani, G., "Fabrication of Carbon Nanotubes-Based Efficient Electromagnetic Waves Shields Nanocomposites Using Electro-Mechanically Dispersion Technique", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1737-1744, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.548352.1770>

1- مقدمه

تداخل امواج الکترومغناطیسی در مواردی که دو وسیله الکترونیکی در عملکرد یکدیگر تداخل ایجاد کرده و یا موجب آسیب‌هایی به تجهیزات می‌شوند، اهمیت پیدا می‌کند [1, 2]. بر این اساس، تداخل امواج الکترومغناطیسی با توجه به رشد سریع تجهیزات الکترونیکی مانند گوشی‌های همراه، لپ‌تاپ‌ها، رادارهای هواشناسی و نظامی، فرستنده‌های مخابراتی و تلویزیونی به یک چالش مهم فنی مبدل شده است. در این راستا، برای کاهش اثر امواج، مراجع ذیصلاح نظیر CISRP¹ مقرراتی را وضع نموده است که بر مبنای آن‌ها نباید امواج دستگاه‌های الکترونیکی و الکتریکی، خللی در عملکرد خود و یا تجهیزات هم‌جوار ایجاد کند [3]. با در نظر گرفتن این قانون، عایق‌سازی الکترومغناطیسی تجهیزات حداقل باید 30 dB و یا به عبارتی 99.9٪ باشد و تنها 0.1٪ از امواج را از خود عبور دهند [4]. عایق‌سازی به مجموع امواج بازتاب یافته و جذب شده اطلاق می‌شود [5].

اخیراً، الزامات مذکور سبب شده است تا نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری به دلایلی مانند سبکی وزن، استحکام مطلوب مکانیکی، حرارتی و شایشی در این عرصه مورد توجه قرار گیرند [6-8]. در این میان نانولوله‌های کربنی، به عنوان پرکننده، به دلیل خصوصیات ویژه آن‌ها، توجه‌های فراوانی را به خود جلب کرده‌اند [9, 10]. شاید مهم‌ترین برجستگی ویژه نانولوله‌های کربنی در مقایسه با سایر نانوذرات مشابه را بتوان به نسبت وجهی بسیار بالای آن‌ها نسبت داد [11-14]. نانولوله‌های کربنی به دلیل نیروی واندروالسی قوی که در سطح آن‌ها وجود دارد، تشکیل بندل‌ها و کلوخه‌هایی را می‌دهند [15, 16] که برای بهره‌مندی از ویژگی‌های آن‌ها باید پخش و جداسازی گردند [15, 17]. توجه به ایرادات ساختاری، نسبت وجهی، پخش و جداسازی از کلوخه‌ها، توزیع و راستاگیری و درصد حجمی حضور نانولوله‌ها فاکتورهای مهمی هستند که تأثیر بسیار فزاینده‌ای بر راندمان عایق‌سازی الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های تهیه شده از این الیاف می‌گذارند [18].

در منابع علمی گزارش‌های متعددی وجود دارند که در آن‌ها به اهمیت حفاظت از طول و ساختار اولیه نانولوله‌ها در هنگام تولید نانوکامپوزیت‌ها، جهت افزایش جذب و بازتاب امواج الکترومغناطیس اشاره شده است [19, 20]. روش‌های رایج پخش و جداسازی نانولوله‌ها نظیر استفاده از امواج التراسونیک و یا روش‌های اختلاط ذوبی-مکانیکی، علی‌رغم تمام مزایا، به دلیل اعمال تنش‌های برشی بسیار بالا سبب می‌گردند تا ایرادات ساختاری نانولوله‌ها افزایش یابد و مهم‌تر از آن با شکست طول نانولوله‌ها، برجسته‌ترین ویژگی آن‌ها یعنی نسبت وجهی را به شدت کاهش می‌دهد [21-23]. بنابراین، برای بهبود عملکرد عایق‌سازی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی در مقابل امواج الکترومغناطیس، لازم است که روش‌های نوینی برای پخش و جدایش آن‌ها ابداع گردد.

اخیراً روشی الکترومکانیکی² برای پخش و جداسازی نانولوله‌های کربنی ارائه شده است که در آن کلوخه‌ها و بندل‌ها در یک محیط سیال تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی متغیرالجهت قرار می‌گیرند [24]. راستاگیری اجباری و چرخش به سوی امتداد میدان بندل‌ها و کلوخه‌ها تحت اثر نیروی دی‌الکترئوفورسیس سبب می‌گردد تا تنش‌های هیدروپدینامیکی کوچکی از جانب سیال به پیکره آن‌ها اعمال شود [24, 25]. اگر جهت این تنش‌ها به واسطه تغییر جهت میدان الکتریکی به طور متناوب تغییر یابد، نتیجه آن غلبه بر نیروی واندروالسی بین نانولوله‌ها و باز شدن درهم‌تنیدگی آن‌ها در سایه

پدیده خستگی مکانیکی چرخه بالا خواهد بود [24]. مزیت برجسته این روش در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم پخش و جداسازی، عدم آسیب به ساختار اولیه نانولوله‌ها و نیز جلوگیری از شکست طول آن‌هاست [24].

این پژوهش در تلاش است با حفاظت از ساختار اولیه نانولوله‌های کربنی، برای نخستین بار با به کارگیری روش نوین الکترومکانیکی در پخش و جداسازی، عایق‌های الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی با راندمان بالا و مقرون به صرفه تولید نماید. در این راستا نخست نمونه‌هایی از نانوکامپوزیت PMMA/CNTs در درصد‌های مختلف وزنی، با دو روش نوین الکترومکانیکی و مرسوم پروب التراسونیک تهیه خواهند شد. سپس ارزیابی‌های لازم جهت تعیین آستانه رسانایی و عایق‌سازی الکترومغناطیسی نمونه‌ها انجام و تأثیر فرایند الکترومکانیکی و حفاظت از ساختار اولیه نانولوله‌ها بر این خصوصیات تعیین خواهد شد. پیش‌بینی می‌شود، در صورت موفقیت پژوهش حاضر، امکان تولید عایق‌های جاذب الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی با غلظت‌های بسیار ناچیز نانولوله‌های کربنی فراهم شده و بدین‌وسیله قیمت تمام شده این عایق‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای تقلیل یابد.

2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش نانولوله‌های چند دیواره کربنی (MWCNTs) تولیدی شرکت نانوسیل بلژیک با کد مشخصه NC7000 مورد استفاده قرار گرفت. میانگین طول این نانولوله‌ها $1.5 \mu\text{m}$ ، میانگین قطر آن‌ها 9.5 nm و درجه خلوص آن‌ها در حدود 90٪ گزارش شده است [26, 27]. همچنین کلروفورم تولیدی شرکت دکتر مجللی با کد شناسه 3-DR66-67 با خلوص 98٪ برای تهیه نمونه‌ها استفاده شد. علت انتخاب کلروفورم، ضریب دی‌الکتریک فوق‌العاده بالای آن است و در فرایند الکترومکانیکی کمک می‌کند تا میدان الکتریکی اعمال شده به سمت میدان الکترواستاتیکی تمایل داشته باشد و از مصرف بیش از حد جریان جلوگیری شود [24]. از PMMA ساخت شرکت Tiwan-CHIMEI به عنوان ماتریس زمینه استفاده شد.

نمونه‌های نانوکامپوزیتی با دو روش متفاوت پخش و جداسازی الکترومکانیکی و پروب التراسونیک تولید گردیدند که در هر دو روش روندی کاملاً مشابه دنبال شد و تنها روش پخش و جداسازی متفاوت در نظر گرفته شد. در هر دو روش، میزان انرژی خالص مصرفی برای عملیات پخش و جداسازی دقیقاً برابر و معادل 760 J در نظر گرفته شد. برای ایجاد این مقدار از انرژی، در روش الکترومکانیکی، شدت میدان الکتریکی $0.14 \text{ V}/\mu\text{m}$ و زمان‌های روشنی و خاموشی هر دو 25 μs و نیز در روش پروب التراسونیک حالت پالسی توان برابر با 50 W و زمان‌های روشنی و خاموشی 5 ثانیه تنظیم گردید [24]. برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها، نخست گرانول‌های PMMA درون کلروفورم در دمای محیط به کمک همزن مغناطیسی حل گردید. سپس 0.0003 g از نانولوله‌های کربنی در 1.76 mL از محلول کلروفورم با روش‌های الکترومکانیکی و یا پروب التراسونیک پخش گردید. سپس با افزودن مقداری معلوم از محلول PMMA در کلروفورم به مخلوط‌های نانولوله‌های پخش شده در زمینه کلروفورم، نانوکامپوزیت‌های PMMA/CNTs به شکل محلول با درصد‌های وزنی متفاوت حاصل شد. مقدار افزودن محلول PMMA به نحوی انتخاب شد تا نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی 0 تا 2٪ با نسبت تغییرات 0.1٪ تولید شود. سپس بلافاصله پس از عمل اختلاط، ترکیبات به دست آمده با همزن مغناطیسی هم زده شد و فوراً جهت جلوگیری از تشکیل کلوخه‌ها و بندل‌های ثانویه با روش انعقادی به صورت الیاف نانوکامپوزیتی در محیط الکل

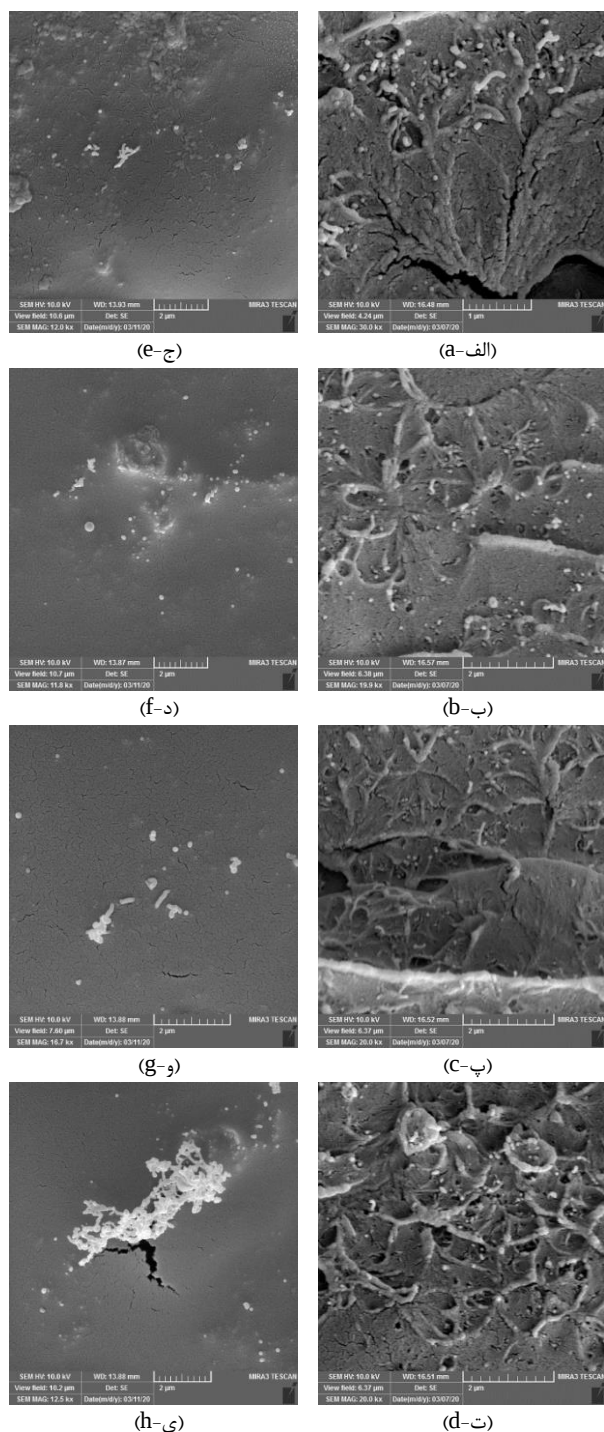


Fig. 1 FE-SEM micrographs of the nanocomposite samples, prepared by EMDT and Ultrasonic probe. Figures (a) to (d) and (e) to (h) relates to the samples produced by EMDT and ultrasonic probes, respectively. Concentration of CNTs in figures are: (a) and (e) 0.2, (b) and (f) 0.4, (c) and (g) 0.6, (d) and (h) 1% wt.%.

شکل 1 میکروگراف‌های FE-SEM نمونه‌های نانوکامپوزیتی تهیه شده به روش الکترومکانیکی و پروب التراسونیک. تصاویر (الف) تا (ت) و (ج) تا (ی) به ترتیب مربوط به نمونه‌های تولید شده به روش الکترومکانیکی و پروب التراسونیک می‌باشند. غلظت نانولوله‌های کربنی در تصاویر (الف) و (ج) 0.2، (ب) و (د) 0.4، (پ) و (و) 0.6 و (ت) و (ی) 1٪ وزنی است.

اتیلک 99.6٪ منعقد شده [28, 29] و پس از شستشو و خشک کردن در دمای °C 60 آماده قالب‌گیری شد. لازم به توضیح است روند تولید الیاف نانوکامپوزیتی برای هر یک از درصدهای وزنی چندین مرتبه تکرار شد، تا الیاف نانوکامپوزیتی به مقدار 1 g از هر درصد وزنی برای قالب‌گیری تهیه شود. فرایند قالب‌گیری فشاری نمونه‌ها توسط قالبی با حفره‌هایی به ابعاد $1 \times 30 \times 10$ mm در دمای °C 200 و فشار 50 bar به مدت یک ساعت انجام شد. پس از قالب‌گیری، عملیات خنک‌کاری با حفظ فشار قالب‌گیری تا رسیدن به دمای محیط با تزریق آب به سیستم خنک‌کاری ادامه یافت.

بررسی مورفولوژی و ساختار نانوکامپوزیتی نمونه‌ها نیز با بکارگیری دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) ¹ مدل Tescan Mira3 انجام شد. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها توسط مولتی‌متر Agilent 3458A با روش چهارپین یا کلون کشش انجام شد [30]. برای تعیین خصوصیات الکترومغناطیسی، نخست نمونه‌ها با ابعاد $22.8 \times 10 \times 1$ mm مطابق با استاندارد اندازه حفره مجبورها توسط فرایند برش لیزری با دقت برش داده شد. سپس نمونه‌های حاصل توسط دستگاه VNA ² مدل HP 8510 ساخت کشور آمریکا در محدوده فرکانسی 8-12 GHz مورد آنالیز و ارزیابی قرار گرفت. همچنین طیف‌نگاری رامن جهت تعیین آسیب‌های ساختاری وارده از سوی روش پخش بر نانولوله‌های کربنی، بر روی نمونه‌هایی با غلظت آستانه رسانش (برای هر دو گروه از روش تهیه توسط الکترومکانیکی و التراسونیک) با استفاده از دستگاه Jobin Yvon S-3000 با لیزر تحرک کننده 514.5 nm انجام شد. همچنین منحنی ولتاژ-جریان این دو نمونه به کمک منبع تغذیه JPS30-2D و مولتی‌متر Agilent 3458A تعیین شد.

3- بحث و نتایج

3-1- مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری

تصاویر تهیه شده توسط FE-SEM برای چندین نمونه در شکل 1 آورده شده است. تصاویر (الف) تا (ت) این شکل مربوط به نمونه‌های تولید شده توسط فرایند الکترومکانیکی است. همانطوریکه در این تصاویر کاملاً مشهود است در 0.2٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی شبکه‌ای از آن‌ها در درون ساختار نانوکامپوزیت شکل گرفته است که این شبکه می‌تواند عهده‌دار انتقال الکترون‌ها باشد. تصاویر (الف) تا (ت) در شکل 1 نیز تأثیر افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی برای این دسته از نمونه‌ها را نشان می‌دهند. بر اساس این میکروگراف‌ها، افزایش غلظت از 0.2٪ (شکل 3 الف) تا 1٪ (شکل 3 ت) تراکم شبکه‌ای شکل گرفته از نانولوله‌های کربنی را افزایش داده است.

تصاویر (ج) تا (ی) شکل 1 نیز مربوط به نمونه‌های است که پخش و جداسازی نانولوله‌های کربنی توسط روش پروب التراسونیک انجام شده است. این تصاویر همچنین تأثیر افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهند. همانطوریکه در این تصاویر به وضوح مشخص است تا غلظت 0.8٪ شبکه‌ای از نانولوله‌ها ایجاد نشده است و در نمونه 1٪ وزنی، شبکه‌ای با تراکم اندک از نانولوله‌ها ایجاد شده است که می‌تواند منجر به کاهش مقاومت الکتریکی پلیمر زمینه گردد. علت اصلی تفاوت در ساختارهای ایجاد شده می‌تواند به طول نانولوله‌ها نسبت داده شود. با توجه به اثرات مخرب امواج التراسونیک، به نظر می‌رسد جداسازی با این روش با شکست طول نانولوله‌ها [31-34] و در نتیجه با تقلیل نسبت وجهی، شکل‌گیری شبکه‌ای نانولوله‌ها را به غلظت‌های بالاتر موکول می‌کند [35-37].

1 Field Emission Scanning Electron Microscope
2 Vector Network Analyzer

شکل 3 نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مشهود است که آستانه رسانایی برای نمونه‌های تولید شده با روش الکترومکانیکی در غلظت 0.2 درصد وزنی روی داده است در حالی که این پدیده برای نمونه‌های دسته التراسونیک در غلظت تقریبی 1٪ وزنی اتفاق افتاده است. بر اساس یافته‌های مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان این نتایج کاملاً قابل پیش‌بینی و توضیح است. در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی دو مکانیزم غالب بر کاهش مقاومت الکتریکی وجود دارد:

(الف) برخورد مستقیم نانولوله‌های کربنی و تشکیل شبکه‌ای به هم پیوسته از آن‌ها که می‌تواند عمل انتقال الکترون را انجام دهند [17، 43]. (ب) پدیده تونل‌زنی ذره‌ای که اگر نانولوله‌های کربنی به هم بسیار نزدیک شوند بدون برخورد مستقیم نیز امکان انتقال الکترون با تونل‌زنی فراهم می‌گردد [17، 44]. هر دو پدیده تحت تأثیر دو فاکتور غلظت و طول نانولوله‌هاست [17، 45، 46]. با افزایش غلظت، تراکم توزیع نانوذرات در زمینه نارسا بیشتر شده و احتمال شکل‌گیری شبکه رسانا زیاد می‌شود [47]. در مقابل طول بودن نانولوله‌ها کمک می‌کند که فاصله بین آن‌ها کمتر شده و به واسطه آن پدیده تونل‌زنی تقویت شود [48-50]. البته افزایش غلظت نیز می‌تواند با کاهش فواصل بین ذرات رسانا نقشی مشابه را ایفا نماید ولی فزونی یافتن بیش از حد غلظت، موجب تشکیل شبکه رسانا شده که نتیجه آن کم‌رنگ گشتن اثر پدیده تونل‌زنی خواهد بود. در مورد یافته کنونی در نمونه‌های فرایند الکترومکانیکی، که در غلظت 0.2٪ آستانه رسانش رخ داده است، به نظر می‌رسد عدم شکست طول نانولوله‌ها با کاهش فاصله بین آن‌ها پدیده تونل‌زنی را تقویت کرده است و بدین طریق آستانه رسانایی در غلظت کمتری روی داده است [17].

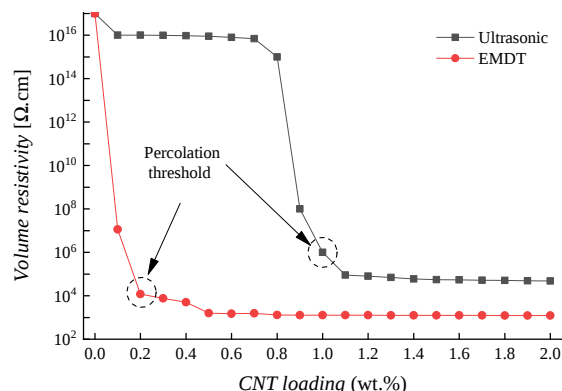


Fig. 3 The influence of CNTs concentration and dispersion method on the electrical resistivity of PMMA/CNTs nanocomposites

شکل 3 تأثیر غلظت نانولوله‌های کربنی و روش پخش و جداسازی آن‌ها بر مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت PMMA/CNTs

منحنی ولتاژ-جریان نمونه‌ها با غلظت آستانه رسانایی در شکل 4 آورده شده است که می‌تواند این فرضیه را به طور عملی اثبات نماید [17]. در شکل 4 مشاهده می‌شود، نمونه التراسونیک، رفتاری کاملاً خطی از خود نشان می‌دهد. این شکل از منحنی ولتاژ-جریان در مواد فلزی رخ می‌دهد که اثبات شده در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی، نمودار خطی تنها در صورت تشکیل شبکه رسانا ایجاد می‌شود [17]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه 1٪ وزنی تهیه شده با التراسونیک به دلیل بالا بودن غلظت وزنی رسانش با مکانیزم تشکیل شبکه اتفاق افتاده است. در مورد نمونه تولید شده با روش الکترومکانیکی تا ولتاژ 10 V شاهد رفتار خطی بوده ولی در اختلاف پتانسیل‌های بالاتر از آن منحنی به شکل نمایی در حال صعود است. بر اساس مراجع

با توجه به اینکه، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی تنها به بخشی از سطوح نمونه‌ها دسترسی دارد، فرضیه فوق در وابستگی شکل‌گیری شبکه به طول، می‌تواند به کمک یافته‌های طیف‌نگاری رامان اثبات گردد.

شکل 2، طیف رامان مربوط به دو نمونه نانوکامپوزیت حاوی 1٪ وزنی نانولوله‌های کربنی، تولید شده با دو روش متفاوت پروب التراسونیک و الکترومکانیکی را نشان می‌دهد. طیف‌نگاری رامان روشی پذیرفته شده برای شناسایی آسیب‌های ساختاری بر روی نانولوله‌هاست [38-40]. بر اساس شکل 2، سه پیک مشخصه برای هر نمونه در طیف رامان دیده می‌شود. پیک در عدد موجی 1450 cm^{-1} به زمینه PMMA مربوط است، ولی دو پیک در حوالی 1354 cm^{-1} و 1596 cm^{-1} به ترتیب تحت عناوین G-peak و D-peak نام‌گذاری می‌شوند که منابع پیک D را به کربن آمورف و یا بی‌نظمی‌های اتمی نسبت می‌دهند [41].

تناسب شدت پیک D به G (I_D/I_G) معیاری مطمئن برای تشخیص عیوب ساختاری نانولوله‌هاست که نسبت بزرگ‌تر به معنی آسیب بیشتر در ساختار است [38، 40]. مقایسه این نسبت برای دو نمونه با مواد اولیه مشابه و فرایندهای تولید متفاوت، به تأثیر آن فرایند بر طول نانولوله‌ها نیز نسبت داده می‌شود که مقادیر بزرگ‌تر نشانگر طول باقی ماندن نانولوله‌هاست. این تناسب در مورد نمونه‌های الکترومکانیکی و التراسونیک به ترتیب 1.05 و 1.16 به دست آمده است. در فرایند التراسونیک میزان تنش‌های برشی اعمالی به نانولوله‌ها و کلخه‌های آن‌ها حتی تا 100 MPa نیز می‌رسد [42]. این سطح از تنش، در نقاطی از نانولوله‌ها که دچار نابجایی‌های اتمی هستند آسیب‌ساز بوده و می‌تواند از آن نقاط نانولوله‌ها را بشکند [25]. در مقابل اثبات شده است که فرایند الکترومکانیکی با عملکرد بر مبنای خستگی مکانیکی چرخه بالا، در تنش‌های بسیار ناچیز عمل پخش و جدایش را انجام می‌دهد و از طول نانولوله‌ها حفاظت می‌نماید [24]. با تفسیر هم‌زمان یافته‌های مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های تولید شده به کمک روش الکترومکانیکی به دلیل عدم شکست طول نانولوله‌ها، شبکه رسانا در غلظت‌های اندک شکل گرفته است در حالی که در نمونه‌های التراسونیک شده این شبکه در غلظت‌های بالاتر ایجاد شده است.

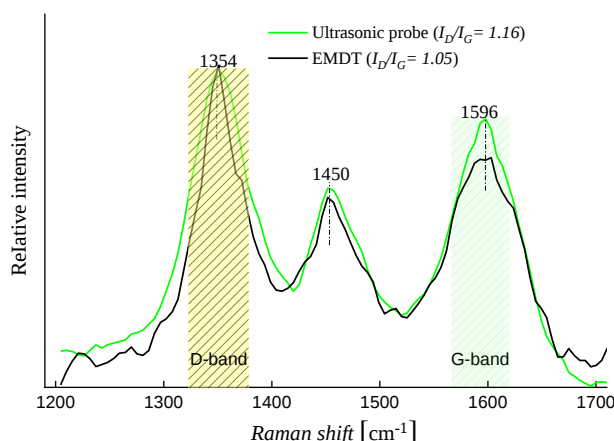
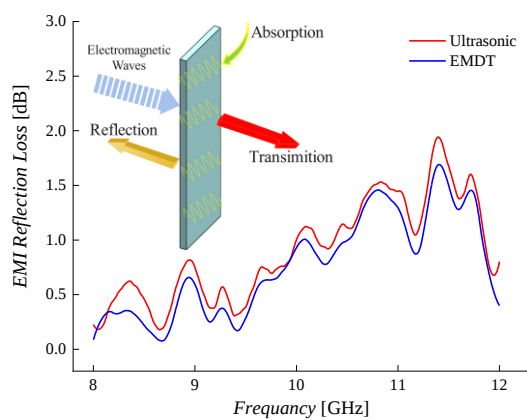


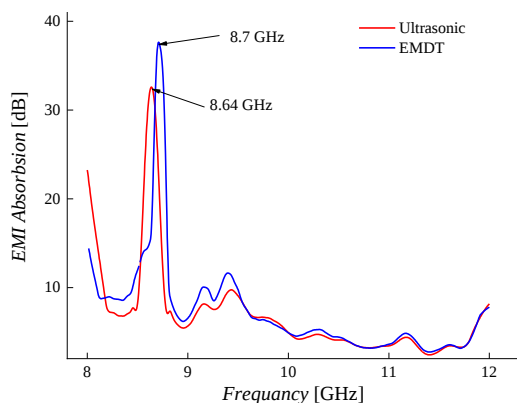
Fig. 2 Raman spectrum of the nanocomposite samples with the CNTs concentration of 1 wt.%, produced by EMDT and Ultrasonic

شکل 2 طیف رامان نمونه‌های نانوکامپوزیتی با غلظت 1٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی، تولید شده با دو فرایند الکترومکانیکی و التراسونیک

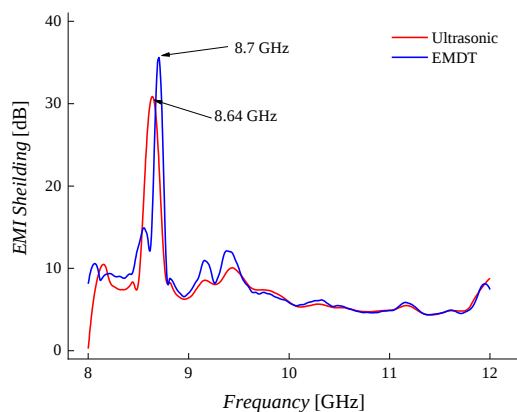
طول نانولوله‌ها بکاهند [15, 23]. به نظر می‌رسد توانایی حفاظت از طول اولیه توسط روش پخش و جدایش الکترومکانیکی توانسته است با تشکیل شبکه‌ای متراکم از نانولوله‌ها، شرایط را برای جذب بیشتر امواج الکترومغناطیسی فراهم آورد.



(الف-ا)



(ب-ب)



(ج-ج)

Fig. 5 The behavior of the prepared samples by EMDT and Ultrasonic versus electromagnetic waves. (a) Reflection, (b) Absorption and (c) Total electromagnetic shielding. Weight percentage of the prepared samples by EMDT and Ultrasonic samples is 0.2 and 1%, respectively.

شکل 5 رفتار نمونه‌های تهیه شده با روش‌های الکترومکانیکی و التراسونیک با غلظت آستانه رسانایی در مقابل امواج الکترومغناطیسی. (الف) بازتاب، (ب) جذب و (ج) عایق‌سازی کل در برابر امواج الکترومغناطیسی. درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در نمونه‌های تولید شده با روش الکترومکانیکی و التراسونیک به ترتیب برابر با 0.2 و 1٪ وزنی می‌باشد.

معتبر، منحنی وار بودن نمودار ولتاژ-جریان حاکی از غالب بودن پدیده تونل‌زنی است [17, 48]. در اختلاف پتانسیل‌های اندک چون توان لازم برای تونل‌زنی وجود ندارد، تنها شبکه‌ی نانولوله‌ها عهده‌دار هدایت الکتریکی است. با توجه به اینکه، تراکم شبکه به دلیل غلظت پایین بسیار کم است، جریان انتقالی نیز ناچیز است. با تشدید اختلاف پتانسیل و تقویت میدان الکتریکی، امکان انتقال با تونل‌زنی فراهم می‌گردد [48] و با توجه به فاصله کم نانولوله‌ها از همدیگر، تحت‌الشعاع عدم شکستن آن‌ها در فرایند جداسازی الکترومکانیکی، انتقال به واسطه تونل‌زنی انجام می‌گردد.

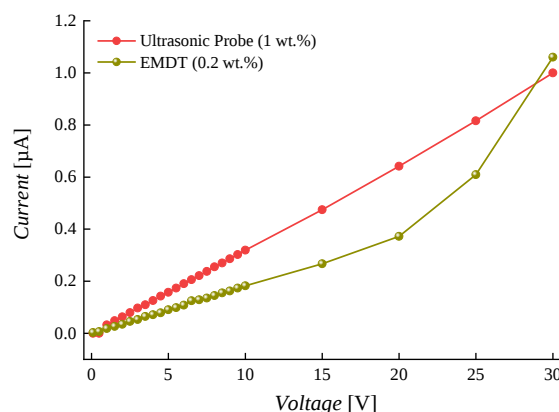


Fig. 4 Voltage-Current curves of nanocomposite samples, produced by EMDT and Ultrasonic methods

شکل 4 منحنی ولتاژ-جریان نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده با روش الکترومکانیکی و التراسونیک

شکل 5 نمودارهای حاصل از ارزیابی رفتار نمونه‌های تولید شده با روش التراسونیک و الکترومکانیکی را در غلظت آستانه رسانش، در مقابل امواج الکترومغناطیسی نشان می‌دهند. با برخورد موج الکترومغناطیسی به یک ماده سه پدیده بازتاب، عبور و یا جذب می‌تواند روی دهد [5]. عایق بودن در مقابل امواج الکترومغناطیسی بر اساس تعاریف مراجع به مجموع پدیده‌های جذب و بازتاب، نسبت داده می‌شود [1]. شکل 5 (الف) میزان بازتاب امواج الکترومغناطیسی را به طور جداگانه برای هر نمونه نشان می‌دهد. همانطوریکه در این نمودار مشهود است میزان امواج بازتاب شده از هر دو نمونه در محدوده فرکانسی مطالعه شده، اندک و در حدود 0.1 تا 2 dB است. حداکثر موج بازتابی در فرکانس 11.4 GHz برای هر دو نمونه اتفاق افتاده است. نمودار مقدار جذب امواج توسط نمونه‌ها نیز در شکل 5 (ب) قابل مشاهده است. بر این اساس، برخلاف بازتاب، میزان جذب نمونه‌ها بسیار قابل توجه بوده و در محدوده فرکانسی تحت مطالعه در حدود 5 تا 38 dB از امواج تابش داده شده، جذب شده است. این نتیجه توسط مراجع مختلف نیز قبلاً تأیید گردیده است [51]. اما نکته قابل توجه عملکرد خیره‌کننده نمونه تولید شده با روش الکترومکانیکی در مقایسه با نمونه التراسونیک است. این نمونه با جذب 38 dB در فرکانس 7.8 GHz، علی‌رغم آنکه غلظتش تنها 20٪ نمونه التراسونیک است، در حدود 21٪، مقدار جذب بیشتری را ارائه می‌دهد. قبلاً تأثیر طولی بودن نانولوله‌ها در بهبود جذب امواج الکترومغناطیسی نیز گزارش گردیده است [19] ولی در عمل روشی برای حفاظت ساختار نانولوله‌ها پیشنهاد نشده است. در این راستا صرفاً پژوهشگران کوشیده‌اند تا با تحت کنترل درآوردن روش‌های موجود، نظیر پخش و جداسازی نانولوله‌ها به کمک فرایندهای ذوبی-اختلاطی و همچنین استفاده از امواج التراسونیک از تأثیرات نامطلوب آن‌ها در شکستن

آستانه رسانایی در نانوکامپوزیت‌های تولید شده به روش الکترومکانیکی در غلظت 0.2٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی رخ داد، در حالی که برای نمونه‌های تولیدی با پروب التراسونیک در 1٪ رسانش قابل توجه مشاهده شد. این کاهش 80 درصدی در مصرف نانولوله‌ها جهت رسیدن به آستانه رسانایی، بر اساس مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان، به دلیل عدم شکست طول نانولوله‌ها در فرایند جداسازی الکترومکانیکی و متعاقباً شکل‌گیری شبکه‌ای متراکم و رسانا از آن‌ها در درون ساختار نانوکامپوزیت حاصل شده است.

همچنین نمونه تولید شده با روش الکترومکانیکی در آستانه رسانایی (0.2٪ وزنی) عایق‌سازی 38 dB در برابر امواج الکترومغناطیسی را از خود نشان داد که در مقایسه با نمونه تهیه شده با پروب التراسونیک (1٪ وزنی) در حدود 16٪ بیشتر است. البته مقایسه میزان جذب نمونه تولید شده به روش الکترومکانیکی با موارد مشابه گزارش شده، نشان می‌دهد این روش از نظر کاهش هم‌زمان غلظت و بهبود عایق‌سازی بسیار مؤثرتر است، به نحوی که علی‌رغم کاهش 25 برابری غلظت کارآمدی عایق از 25 به 38 dB ارتقا یافته است.

در جمع‌بندی کلی، پروسه پخش و جداسازی الکترومکانیکی، روشی بسیار کارآمد در تولید عایق‌های جاذب امواج الکترومغناطیسی با راندمان بالا تشخیص داده شد که به دلیل کاهش 80 درصدی مصرف نانولوله‌های کربنی در مقایسه با روش التراسونیک قادر است، قیمت تمام شده این عایق‌ها را به طور چشمگیری تقلیل دهد.

5- مراجع

- [1] Arjmand, M., Apperley, T., Okoniewski, M. and Sundararaj, U., "Comparative Study of Electromagnetic Interference Shielding Properties of Injection Molded Versus Compression Molded Multi-Walled Carbon Nanotube/Polystyrene Composites," Carbon, Vol. 50, No. 14, pp. 5126-5134, 2012.
- [2] Mirmohammadi, S. A., Sadjadi, S., Didehban, K., Yarahmadi, E. and Bahri-Laleh, N., "Synthesis of Polyaniline/Zinc-Cobalt Ferrite Nanocomposites and Their Use in the Preparation of Radar Absorber Coatings," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 761-767, 2020.
- [3] Yang, S., Lozano, K., Lomeli, A., Foltz, H. D. and Jones, R., "Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Nanofiber/Lcp Composites," Composites Part A: applied science and manufacturing, Vol. 36, No. 5, pp. 691-697, 2005.
- [4] Huang, J. C., "EMI Shielding Plastics: A Review," Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute, Vol. 14, No. 2, pp. 137-150, 1995.
- [5] Arjmand, M., "Electrical Conductivity, Electromagnetic Interference Shielding and Dielectric Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Polymer Composites," PhD Thesis, University of Calgary, Canada, 2014.
- [6] Arjmand, M., Mahmoodi, M., Gelves, G. A., Park, S. and Sunderaraj, U., "Electrical and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Flow-Induced Oriented Carbon Nanotubes in Polycarbonate," Carbon, Vol. 49, No. 11, pp. 3430-3440, 2011.
- [7] Mahmoodi, M., Arjmand, M., Sundararaj, U. and Park, S., "The Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding of Injection Molded Multi-Walled Carbon Nanotube/Polystyrene Composites," Carbon, Vol. 50, No. 4, pp. 1455-1464, 2012.
- [8] Agalari, M., Heidari, F., Shelesh-Nezhad, K. and Navid, T., "Experimental Study on the Mechanical Properties, Morphology and Fluidity of Abs/Pbt/Cnt Nanocomposites," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1189-1196, 2021.
- [9] Aghajari, E., Morady, S., Navid Famili, M., Zakiyan, S. and Golbang, A., "Responses of Polystyrene/Mwcnt Nanocomposites to Electromagnetic Waves and the Effect of Nanotubes Dispersion," Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian), Vol. 27, pp. 193-201, 2014.

مقایسه میزان جذب نمونه تولید شده به روش الکترومکانیکی با موارد مشابه نشان می‌دهد که این روش از منظر کاهش هم‌زمان غلظت و افزایش کارآمدی عایق بسیار مؤثرتر است، به نحوی که علی‌رغم کاهش 2500٪ غلظت، کارآمدی عایق از 25 dB به 38 dB ارتقا یافته است [51]. این یافته نوید می‌دهد تا امکان تولید عایق‌های جاذب الکترومغناطیسی با درصد‌های پایین نانولوله‌های کربنی در صورت بکارگیری روش تولید الکترومکانیکی قابل دستیابی بوده که نتیجه آن کاهش چشمگیر هزینه به دلیل پایین بودن غلظت نانولوله‌های کربنی مصرفی است. شکل 5 (ج) نیز مجموع محافظت نمونه‌ها در برابر تابش امواج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه میزان بازتابش امواج در هر دو نمونه‌ی بررسی شده اندک بود، در مجموع محافظت نیز، نقش پر رنگ جذب بسیار به چشم می‌خورد به نحوی که نمودارها بسیار مشابه با پدیده جذب است. بهترین عملکرد برای نمونه‌های الکترومکانیکی و التراسونیک به ترتیب مربوط به فرکانس‌های 7.8 و 8.64 GHz با عایق‌سازی 30 و 36 dB است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد روش تولید الکترومکانیکی در عایق‌سازی در حدود 16٪ بیشتر از التراسونیک است در حالی که غلظت نانولوله‌های کربنی در آن در حدود 80٪ کمتر است. علت این یافته می‌تواند با ماهیت فیزیکی عایق‌سازی توسط نانوکامپوزیت‌ها توجیه شود [5]. ارتباط مستقیم محافظت در برابر پرتوهای الکترومغناطیسی به دو مکانیسم مربوط می‌شود: اولاً افت اهمی و نانولوله‌های رسانای منفرد را می‌توان به عنوان یک مقاومت بازدارنده در برابر بارهای مهاجر در نظر گرفت. ترکیب نانولوله‌های رسانا و زمینه پلیمری بین آن‌ها را می‌توان به عنوان یک نانو-خازن در نظر گرفت. از این رو، می‌توان ادعا کرد که ساختار یک نانوکامپوزیت متشکل از تعداد بی‌شماری مقاومت و خازن است که به صورت سری یا موازی با یکدیگر ارتباط دارند. افزایش طول نانولوله‌ها منجر به تغییر ساختارهای مقاومت و خازن می‌شود که به ترتیب تلفات اهمی و افت پلاریزاسیون را به همراه دارد. در واقع، با افزایش طول، میزان برهمکنش بارهای مهاجر و دوقطبی‌های الکتریکی/مغناطیسی افزایش می‌یابد که این امر بشدت موج الکترومغناطیسی را تضعیف می‌کند [5]. ثانیاً با توجه به گزارش‌های مراجع قبلی، به نظر می‌رسد، حفاظت از نسبت وجهی نانولوله‌ها، کمک می‌کند تا ساختار شبکه‌ای شکل گرفته از آن‌ها، در هم تنیدگی بیشتری را ایجاد کرده و منجر به تشدید جریان‌های گردابی شود و به واسطه آن عایق‌سازی بیشتری را در مقابل امواج الکترومغناطیسی می‌توان ایجاد کرد [19]. بدیهی است در مقابل، خرد شدن طول نانولوله‌ها پدیده مشروح را تضعیف می‌نماید که در مورد نمونه تهیه شده با التراسونیک رخ داده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شد تا جاذب امواج الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی، با راندمان بالا و صرف هزینه کمتر تولید شود. برای این منظور، لازم بود تا ساختار اولیه نانولوله‌ها حفظ شود و از شکست آن‌ها جلوگیری به عمل آید. اخیراً روش الکترومکانیکی جدیدی بر مبنای استفاده از میدان‌های الکتریکی اغتشاشی، برای پخش و جداسازی نانولوله‌های کربنی در بسترهای مایع ابداع شده است که می‌تواند این هدف را برآورده سازد. در این راستا، در رویکردی مقایسه‌ای توانمندی فرایند نوین الکترومکانیکی با روش رایج پروب التراسونیک در تولید جاذب امواج الکترومغناطیسی بر پایه نانولوله‌های کربنی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- Nanotubes in One-Dimensional Polymer Fiber Structure,” *Carbon*, Vol. 140, pp. 1-9, 2018.
- [27] Lahelin, M., Annala, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J. and Seppälä, J., “In Situ Polymerized Nanocomposites: Polystyrene/Cnt and Poly (Methyl Methacrylate)/Cnt Composites,” *Composites Science and Technology*, Vol. 71, No. 6, pp. 900-907, 2011.
- [28] Du, F., Fischer, J. E. and Winey, K. I., “Coagulation Method for Preparing Single-Walled Carbon Nanotube/Poly (Methyl Methacrylate) Composites and Their Modulus, Electrical Conductivity, and Thermal Stability,” *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 41, No. 24, pp. 3333-3338, 2003.
- [29] Mazov, I., Kuznetsov, V., Moseenkov, S., Ishchenko, A., Rudina, N., Romanenko, A., Buryakov, T., Anikeeva, O., Macutkevicius, J. and Seliuta, D., “Structure and Electrophysical Properties of Multiwalled Carbon Nanotube/Polymethylmethacrylate Composites Prepared Via Coagulation Technique,” *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, Vol. 3, No. 1, pp. 18-23, 2011.
- [30] Ghavidel, A. K., Azdast, T., Shabgard, M., Navidfar, A. and Sadighikha, S., “Improving Electrical Conductivity of Poly Methyl Methacrylate by Utilization of Carbon Nanotube and Co₂ Laser,” *Journal of applied polymer science*, Vol. 132, No. 42, 2015.
- [31] Duan, W. H., Wang, Q. and Collins, F., “Dispersion of Carbon Nanotubes with Sds Surfactants: A Study from a Binding Energy Perspective,” *Chemical Science*, Vol. 2, No. 7, pp. 1407-1413, 2011.
- [32] Arrigo, R., Teresi, R., Gambarotti, C., Parisi, F., Lazzara, G. and Dintcheva, N. T., “Sonication-Induced Modification of Carbon Nanotubes: Effect on the Rheological and Thermo-Oxidative Behaviour of Polymer-Based Nanocomposites,” *Materials*, Vol. 11, No. 3, pp. 383, 2018.
- [33] Xu, H., Abe, H., Naito, M., Fukumori, Y., Ichikawa, H., Endoh, S. and Hata, K., “Efficient Dispersing and Shortening of Super-Growth Carbon Nanotubes by Ultrasonic Treatment with Ceramic Balls and Surfactants,” *Advanced Powder Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 551-555, 2010.
- [34] Zou, B., Chen, S. J., Korayem, A. H., Collins, F., Wang, C. M. and Duan, W. H., “Effect of Ultrasonication Energy on Engineering Properties of Carbon Nanotube Reinforced Cement Pastes,” *Carbon*, Vol. 85, pp. 212-220, 2015.
- [35] Zare, Y., Rhee, K. Y. and Park, S.-J., “Effects of Cnt Size, Network Fraction, and Interphase Thickness on the Tunneling Distance between Neighboring Carbon Nanotubes (Cnts) in Nanocomposites,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 86, pp. 53-60, 2020.
- [36] Li, J., Ma, P. C., Chow, W. S., To, C. K., Tang, B. Z. and Kim, J. K., “Correlations between Percolation Threshold, Dispersion State, and Aspect Ratio of Carbon Nanotubes,” *Advanced Functional Materials*, Vol. 17, No. 16, pp. 3207-3215, 2007.
- [37] Qian, J., Pu, J.-H., Zha, X.-J., Bao, R.-Y., Liu, Z.-Y., Yang, M.-B. and Yang, W., “Effect of Aspect Ratio of Multi-Wall Carbon Nanotubes on the Dispersion in Ethylene-A-Octene Block Copolymer and the Properties of the Nanocomposites,” *Journal of Polymer Research*, Vol. 26, No. 12, pp. 1-11, 2019.
- [38] Datsyuk, V., Kalyva, M., Papagelis, K., Parthenios, J., Tasis, D., Siokou, A., Kallitsis, I. and Galiotis, C., “Chemical Oxidation of Multiwalled Carbon Nanotubes,” *carbon*, Vol. 46, No. 6, pp. 833-840, 2008.
- [39] Chapkin, W. A., Wenderott, J. K., Green, P. F. and Taub, A. I., “Length Dependence of Electrostatically Induced Carbon Nanotube Alignment,” *Carbon*, Vol. 131, pp. 275-282, 2018.
- [40] Wang, Y., Vasileva, D., Zustiak, S. P. and Kuljanishvili, I., “Raman Spectroscopy Enabled Investigation of Carbon Nanotubes Quality Upon Dispersion in Aqueous Environments,” *Biointerphases*, Vol. 12, No. 1, pp. 011004, 2017.
- [41] Kuznetsov, V. L., Bokova-Sirosh, S. N., Moseenkov, S. I., Ishchenko, A. V., Krasnikov, D. V., Kazakova, M. A., Romanenko, A. I., Tkachev, E. N. and Obraztsova, E. D., “Raman Spectra for Characterization of Defective Cvd Multi-Walled Carbon Nanotubes,” *physica status solidi (b)*, Vol. 251, No. 12, pp. 2444-2450, 2014.
- [42] Huang, Y. Y. and Terentjev, E. M., “Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties,” *Polymers*, Vol. 4, No. 1, pp. 275-295, 2012.
- [10] Esmaili, P., Azdast, T., Doniavi, A., Hasanzadeh, R., Mamaghani, S. and Eungkee Lee, R., “Experimental Investigation of Mechanical Properties of Injected Polymeric Nanocomposites Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes According to Design of Experiments,” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 3, pp. 67-74, 2015.
- [11] Wang, X., Jiang, Q., Xu, W., Cai, W., Inoue, Y. and Zhu, Y., “Effect of Carbon Nanotube Length on Thermal, Electrical and Mechanical Properties of Cnt/Bismaleimide Composites,” *Carbon*, Vol. 53, pp. 145-152, 2013.
- [12] Guo, J., Liu, Y., Prada-Silvy, R., Tan, Y., Azad, S., Krause, B., Pötschke, P. and Grady, B. P., “Aspect Ratio Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Polycarbonate/Mwcnt Composites,” *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 52, No. 1, pp. 73-83, 2014.
- [13] Esbati, A. and Irani, S., “Multiscale Modeling of Fracture in Polymer Nanocomposite Reinforced by Intact and Functionalized Cnts,” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 35-46, 2017.
- [14] Karimi, M., Ghajar, R. and Montazeri, A., “Investigation of Nanotubes’ Length and Their Agglomeration Effects on the Elastoplastic Behavior of Polymer-Based Nanocomposites,” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 2, pp. 229-240, 2017.
- [15] Kasaliwal, G. R., Pegel, S., Gödel, A., Pötschke, P. and Heinrich, G., “Analysis of Agglomerate Dispersion Mechanisms of Multiwalled Carbon Nanotubes During Melt Mixing in Polycarbonate,” *Polymer*, Vol. 51, No. 12, pp. 2708-2720, 2010.
- [16] Rong, Q., Shao, C. and Bao, H., “Molecular Dynamics Study of the Interfacial Thermal Conductance of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Van Der Waals Force Induced Deformation,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 121, No. 5, pp. 054302, 2017.
- [17] Hoseini, A. H. A., Arjmand, M., Sundararaj, U. and Trifkovic, M., “Significance of Interfacial Interaction and Agglomerates on Electrical Properties of Polymer-Carbon Nanotube Nanocomposites,” *Materials & Design*, Vol. 125, pp. 126-134, 2017.
- [18] Hashemi, S. A., Mousavi, S. M., Arjmand, M., Yan, N. and Sundararaj, U., “Electrified Single-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposite Via Vacuum Shock Technique: Effect of Alignment on Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding,” *Polymer Composites*, Vol. 39, No. S2, pp. E1139-E1148, 2018.
- [19] Singh, B., Saini, K., Choudhary, V., Teotia, S., Pande, S., Saini, P. and Mathur, R., “Effect of Length of Carbon Nanotubes on Electromagnetic Interference Shielding and Mechanical Properties of Their Reinforced Epoxy Composites,” *Journal of nanoparticle research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-11, 2014.
- [20] Yuen, S.-M., Ma, C.-C. M., Chuang, C.-Y., Yu, K.-C., Wu, S.-Y., Yang, C.-C. and Wei, M.-H., “Effect of Processing Method on the Shielding Effectiveness of Electromagnetic Interference of Mwcnt/Pmma Composites,” *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 3-4, pp. 963-968, 2008.
- [21] Pötschke, P., Dudkin, S. M. and Alig, I., “Dielectric Spectroscopy on Melt Processed Polycarbonate—Multiwalled Carbon Nanotube Composites,” *Polymer*, Vol. 44, No. 17, pp. 5023-5030, 2003.
- [22] Jiang, Y., Song, H. and Xu, R., “Research on the Dispersion of Carbon Nanotubes by Ultrasonic Oscillation, Surfactant and Centrifugation Respectively and Fiscal Policies for Its Industrial Development,” *Ultrasonics sonochemistry*, Vol. 48, pp. 30-38, 2018.
- [23] Hilding, J., Grulke, E. A., George Zhang, Z. and Lockwood, F., “Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquids,” *Journal of dispersion science and technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-41, 2003.
- [24] Ghavidel, A. K., Zadshakoyan, M., Arjmand, M. and Kiani, G., “A Novel Electro-Mechanical Technique for Efficient Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquid Media,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 207, pp. 106633, 2021.
- [25] Ghavidel, A. K., Zadshakoyan, M. and Arjmand, M., “Mechanical Analysis of Aligned Carbon Nanotube Bundles under Electric Field,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 196, pp. 106289, 2021.
- [26] Yu, S., Wang, X., Xiang, H., Zhu, L., Tebyetekerwa, M. and Zhu, M., “Superior Piezoresistive Strain Sensing Behaviors of Carbon

- [43] Mahmoodi, M., "Electrical, Thermal, and Machining Behaviour of Injection Moulded Polymeric Cnt Nanocomposites," PhD Thesis, University of Calgary, Canada, 2014.
- [44] Talamadupula, K. K. and Seidel, G. D., "Statistical Analysis of Effective Piezoresistivity of Carbon Nanotube Reinforced Polymer Nanocomposites from Electron Tunneling Effects," in Proceeding of 2259.
- [45] Otaegi, I., Aranburu, N., Iturrondobeitia, M., Ibarretxe, J. and Guerrica-Echevarría, G., "The Effect of the Preparation Method and the Dispersion and Aspect Ratio of Cnts on the Mechanical and Electrical Properties of Bio-Based Polyamide-4, 10/Cnt Nanocomposites "Polymers, Vol. 11, No. 12, pp. 2059, 2019.
- [46] Rahman, R. and Servati, P., "Effects of Inter-Tube Distance and Alignment on Tunnelling Resistance and Strain Sensitivity of Nanotube/Polymer Composite Films," Nanotechnology, Vol. 23, No. 5, pp. 055703, 2012.
- [47] Zare, Y. and Rhee, K. Y., "A Power Model to Predict the Electrical Conductivity of Cnt Reinforced Nanocomposites by Considering Interphase, Networks and Tunneling Condition," Composites Part B: Engineering, Vol. 155, pp. 11-18, 2018.
- [48] Doh, J., Park, S.-I., Yang, Q. and Raghavan, N., "The Effect of Carbon Nanotube Chirality on the Electrical Conductivity of Polymer Nanocomposites Considering Tunneling Resistance," Nanotechnology, Vol. 30, No. 46, pp. 465701, 2019.
- [49] Bao, W., Meguid, S., Zhu, Z., Pan, Y. and Weng, G., "Effect of Carbon Nanotube Geometry Upon Tunneling Assisted Electrical Network in Nanocomposites," Journal of Applied Physics, Vol. 113, No. 23, pp. 234313, 2013.
- [50] Gau, C., Kuo, C.-Y. and Ko, H., "Electron Tunneling in Carbon Nanotube Composites," Nanotechnology, Vol. 20, No. 39, pp. 395705, 2009.
- [51] Soltani Alkuh, M., Navid Famili, M. H. and Moeini, M. H., "The Effect of Foaming Process on the Radar Absorbing Properties of Pmma/Mwcnt Composites," Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 28, No. 3, pp. 195-189, 2015.