



طراحی و مشخصه‌یابی نوری و حرارتی پنجره هوشمند نانوکامپوزیت خودتمیزشونده با ویژگی تغییر حالت انکساری شفاف-کدر

مهدی جعفری وردنجان^{1*}، محسن صفوی²، مهدی کاروان³

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* تهران، کد پستی 14357-61137، m-jafari@tvu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/01/17

پذیرش: 1400/08/15

کلیدواژگان

پنجره هوشمند، نانوکامپوزیت، عبور نور، خودتمیزشوندگی، ضریب شکست نور

امروزه پنجره‌های هوشمند پایه پلیمری به واسطه قابلیت‌های نوری و دمایی خود به منظور کاهش مصرف انرژی در ساختمان مورد توجه قرار گرفته‌اند. موضوع مهم در مورد این محصولات هوشمند، طراحی و ساخت بهینه آن‌ها می‌باشد که محور اصلی مقاله حاضر را تشکیل می‌دهد. پنجره پیشنهادی به گونه‌ای عمل می‌کند که درصد عبور نور از پنجره به میزان تطابق ضریب شکست نانوسیال داخل پنجره و صفحات پلیمری وابسته است. همچنین فیلم نانوکامپوزیت جهت فراهم آوردن ویژگی خودتمیزشوندگی و رفتار فوتوکاتالیستی در سطوح خارجی مورد استفاده قرار گرفته است. مواد مورد استفاده شامل پلیمر پلی متیل متاکریلات (صفحات)، سیال متیل سالیسیلات، و نانوذرات اکسید روی است. این مواد برای ساخت فیلم نانوکامپوزیت (نانوذرات و پلیمر) و نانوسیال (نانوذرات و سیال) نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از انجام مراحل طراحی و ساخت، آزمایشات مشخصه‌یابی به منظور تعیین خواص مکانیکی (استحکام کششی، چقرمگی، استحکام خمشی)، فیزیکی (زاویه تماس)، ساختاری (اندازه و شکل نانو ذرات)، نوری (میزان عبور نور)، و حرارتی (محدوده‌های دمایی، ضریب انتقال حرارت) بیان شده است. همچنین عملکرد پنجره از لحاظ میزان مصرف انرژی و عبور نور، در یک تحلیل کمی و به کمک دو پارامتر بی‌بعد نسبت عبور نور و تفاضل دما، مورد تحلیل و مقایسه با سایر پنجره‌های هوشمند قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از این تحلیل، بازه تغییر شفافیت پنجره پیشنهادی بیش از 2 برابر حداکثر این مقدار برای سایر پنجره‌های هوشمند بوده، راندمان آن در حیطه مصرف انرژی و تعدیل دما در فصول گرم و سرد 2.1 برابر سایر پنجره‌های هوشمند بوده است.

Design and Characterization of Thermal and Optical Properties of Nano-Composite Self-Cleaning Refractive Transparent-Opaque Smart Window

Mehdi Jafari Vardanjani^{1*}, Mohsen Safavi², Mehdi Karevan³

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Esfahan University of Technology, Esfahan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Esfahan University of Technology, Esfahan, Iran

* P.O.B. 14357-61137, Tehran, Iran, m-jafari@tvu.ac.ir

Keywords

Smart window, Nano-composite, Light transmission, Self-cleaning, Refractive index

Abstract

Today, polymer-based smart windows have been considered for their thermal capabilities to reduce energy consumption in the buildings. The important issue about these smart products is their optimal design and construction which is the main focus of this study. The proposed window operates the way that the percentage of the light passing through the window depends on the degree of conformity of the refractive index of the nanofluid inside the window and the polymeric plates. Nanocomposite film has also been used to provide self-cleaning and photocatalytic behavior on the external surfaces. The materials used include polymethyl methacrylate (plates), methyl salicylate (fluid), and zinc oxide nanoparticles, which have been used to fabricate the nanocomposite, and nanofluid. After accomplishing the design and fabrication steps, characterization tests have been performed to determine mechanical (tensile strength, toughness, flexural strength), physical (contact angle), structural (size and shape of nanoparticles), optical (light transmission rate), and thermal (temperature ranges, heat transfer coefficient) properties. In addition, the performance of the window has been analyzed and compared with the other smart windows in terms of energy consumption and light transmission, in a quantitative analysis by two dimensionless parameters of light transmission ratio and temperature difference. According to the results, the range of variation in the transparency has been more than the maximum for other smart windows by 2 times while its energy consumption and temperature adjustment performance index has been higher than the other smart windows by 2.1 times.

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. 2, pp. 1479-1493, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.527470.1715>

1- مقدمه

طبق تحقیقات انجام‌شده در حال حاضر ساختمان‌ها 40 درصد مصرف انرژی و بنابراین 36 درصد انتشار دی‌اکسید کربن را بر عهده دارند [1]. این امر نشان‌دهنده اهمیت مطالعه ساختمان‌ها از لحاظ مصرف انرژی و حفظ محیط‌زیست می‌باشد. در حال حاضر پنجره‌های استاندارد معمولاً یک سوم کل انرژی مورد استفاده برای گرمایش و تهویه را تلف می‌کنند؛ بنابراین تلاش‌ها بر روی بهبود پنجره‌ها و استفاده از فناوری مناسب برای کاهش این اتلاف انرژی متمرکز شده است [2]. شیشه متغیر (شفاف-کدر) که برای عبور یا بازتاب درصد قابل توجه نور خورشید بر اساس نیاز کاربر به کار می‌رود، راه حلی منطقی در این زمینه به شمار می‌رود. این المان‌ها برای کاهش هزینه‌های تهویه مطبوع طراحی شده‌اند که این کار را از طریق مسدود نمودن بخش عمده نور خورشید در تابستان و افزایش عبور نور در زمستان انجام می‌دهند. مکانیزم اساسی این المان‌ها مبتنی بر قابلیت تنظیم میزان نور عبوری است که عموماً در پاسخ به انرژی اعمال‌شده یا تغییر در شرایط محیطی (همچون دما) عمل می‌کند [3]. در حال حاضر مسئله مورد توجه این المان، استفاده از فن‌آوری‌ها و راه‌کارهای جدید جهت بهبود ویژگی‌های حرارتی و نوری به منظور کاهش هزینه‌های ساخت و تولید آن است. پنجره‌های هوشمند مبتنی بر پلیمر راه حل معقولی برای رفع این مشکل به شمار می‌آید که می‌توان با بکارگیری آن در تجهیزات از ویژگی‌های مطلوب آن بهره برد. قابلیت طراحی و تولید اقتصادی، انعطاف‌پذیری، خواص نوری-حرارتی، و سازگاری آن با فن‌آوری نانو از دلایل اصلی تمرکز این مطالعه بر روی پنجره‌های هوشمند مبتنی بر پلیمر است. این نوع پنجره‌های هوشمند از نظر طراحی، ساخت، و کاربرد یکی از انعطاف‌پذیرترین محصولات به شمار می‌روند. پنجره‌های هوشمند مبتنی بر پلیمر را می‌توان به سادگی در ساختمان‌ها و وسایل نقلیه تعبیه نمود تا علاوه بر کاهش مصرف انرژی و ارتقای سطح اتوماسیون در آن‌ها، ایمنی محدوده مورد نظر را با مسدود کردن دید در زمان مناسب بهبود بخشد. پلیمرهای شفاف معمولاً خواص نوری مختلفی از خود نشان می‌دهند که شامل ویژگی‌های قابل تنظیم میزان جذب و انعکاس نور به واسطه تنظیم ضریب شکست می‌باشد. از آنجائیکه این ویژگی‌ها در پلیمرها قابلیت‌های بالقوه‌ای همچون ویژگی‌های نوری و الکترونیکی ایجاد می‌کند، معمولاً مورد توجه قرار می‌گیرند [4]. مطالعات صورت‌گرفته در زمینه طراحی و کاربرد پنجره‌های هوشمند را می‌توان در مقوله‌های مختلفی از قبیل مدیریت مصرف انرژی، نوع مکانیزم تغییر حالت به کاررفته، و شبیه‌سازی عملکرد مورد بررسی قرار داد. در اینجا تعدادی از این تحقیقات به صورت طبقه‌بندی شده اشاره شده است.

1-1- بهینه‌سازی مصرف انرژی

هافمن¹ و همکاران [5] اثرات تغییر دما را در یک وضعیت آب و هوای سرد، و یک وضعیت گرم و مرطوب، روی پنجره‌های هوشمند ترموکرومیک بررسی کردند. مشخص شد که در مقایسه با پنجره‌های استاندارد جدید کم‌گسیل²، یک پنجره ترموکرومیک با تغییر حالت در دمای پایین، 10 تا 17 درصد، انرژی کمتری را در این مناطق آب و هوایی مصرف می‌کند. این نتایج فقط در مناطق خاص جغرافیایی مذکور اعتبارسنجی شده است، با این حال وارویک³ و همکاران [6] این نوع پنجره را تحت شرایط گسترده‌تری مورد تجزیه و تحلیل

قرار داده، کاهش 50 درصدی مصرف انرژی را در مقایسه با پنجره‌های استاندارد ثابت کرده‌اند.

عملکرد ترموکرومیک ذرات میکرو هیدروژل کوپلیمر شده با تنظیم اندازه ذرات و ساختار آن‌ها جهت بررسی تغییرات مصرف انرژی در این نوع پنجره‌ها مورد بررسی قرار گرفتند [7]. صرف نظر از هزینه تولید پنجره‌های هوشمند ترموکرومیک، کاربرد بالقوه آن‌ها در اهداف اتوماسیون ساختمان نیاز به بررسی عمیق‌تری دارد، ضمن اینکه باید به پیچیدگی روند طراحی و ساخت چنین پنجره‌هایی توجه نمود [8].

آلن⁴ و همکاران [1] با در نظر گرفتن ماهیت متغیر پنجره‌های هوشمند کنترل بیشتری را در مقایسه با رفتار ثابت پنجره کم‌گسیل بر جذب انرژی خورشیدی به دست آوردند. به عنوان مثال پنجره هوشمند هیدروکسی پروپیل سلولزی 74٪ نور خورشید را در حالت شفاف، و 11٪ نور را در حالت کدر انتقال می‌دهد. این مقدار برای پنجره کم‌گسیل، مقدار ثابت 53٪ است. بنابراین در دوره‌های سرد سال درصد پائین عبور نور در پنجره کم‌گسیل باعث از دست دادن انرژی مفید خورشیدی شده، انرژی اضافی مورد نیاز برای گرمایش افزایش می‌یابد. در مقابل، پنجره هوشمند هیدروکسی پروپیل سلولزی مورد نظر نویسنده، میزان انرژی مورد نیاز انرژی خورشیدی را در فصل سرما کاهش می‌دهد. اگرچه این مزیت به دلیل ویژگی‌های ذاتی مواد بکار رفته در پنجره‌های هوشمند منطقی به نظر می‌رسد، لیکن میزان دقیق برتری آن نسبت به پنجره‌های کم‌گسیل باید در سطح وسیع‌تری مورد آزمایش قرار گیرد.

1-2- مکانیزم‌های عملکرد پنجره‌های هوشمند

پنجره‌های هوشمند الکتروکرومیک معمولاً از چند لایه تشکیل شده‌اند که در آن‌ها فرآیند تغییر حالت با فرایندهای اکسیداسیون-احیا و انتشار یون‌های فعال‌شده خارجی به دست می‌آید [9]. در این پنجره‌ها می‌توان با اعمال اصلاحاتی، برخی از ویژگی‌ها را از قبیل زمان تغییر حالت و میزان عبور نور تا حد معینی به کمک میزان ولتاژ خارجی اعمال‌شده تحت کنترل قرار داد [10]. اگرچه این نوع پنجره‌ها در موارد خاص پرکاربرد هستند، لیکن برای آماده‌سازی مواد و ساخت لایه‌های آن‌ها به مراحل مختلف و پیچیده‌ای نیاز است که صرفه اقتصادی محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد [11]. علاوه بر این، از آنجا که این پنجره‌ها بر اساس فرایندهای اکسیداسیون و احیا عمل می‌کنند [9]، ممکن است واکنش‌های الکتروشیمیایی صورت گرفته بین الکترولیت و مواد فعال به تولید ترکیبات شیمیایی جانبی ناخواسته و بعضاً سمی منجر شود که این قضیه می‌تواند باعث کاهش راندمان عملکرد محصول نیز گردد [12، 13].

تلاش‌های قابل توجهی برای تولید پنجره‌های فتوکرومیک و گازوکرومیک صورت گرفته است. مدت زیادی است که در ساخت عینک‌های هوشمند از فن‌آوری فتوکرومیسم استفاده می‌شود. در مقایسه دو روش گازوکرومیسم و الکتروکرومیسم به نظر می‌رسد که فرآیند گازوکرومیسم اقتصادی‌تر باشد [3]. در این رابطه، وو⁵ و همکاران [14] با قرار دادن مواد آلی رنگی در یک ماتریس مبتنی بر سل-ژل، از فیلم‌های فتوکرومیک شفاف برای کاربردهای پنجره هوشمند استفاده کرده‌اند. میزان اتصال پوشش ماتریس و انواع ترکیبات آلی بر انتقال نور مرئی و میزان سفید شدن شیشه تأثیرگذار بوده است. در این راستا با تغییر میزان غلظت رنگ در پوشش و همچنین ضخامت آن، میزان انتقال نور نیز بین 30 تا 60٪ تنظیم شده است. به گفته نویسنده کاربرد این محصول به

⁴ Allen⁵ Wu¹ Hoffmann² Low-Radiation (LE)³ Warwick

- محدودیت زمانی (فصلی) و مکانی (جغرافیایی) در دستیابی به راندمان مفید محصول
- هزینه بالای ساخت
- پیچیدگی‌های نسبی ساختاری موجود در پلیمرها و مواد مورد استفاده
- پیچیدگی ساخت محصول و تجهیزات مورد نیاز
- وابستگی عمده تغییر حالت به انرژی حرارتی
- عدم دستیابی به درصد شفافیت بالا
- زمان نسبتاً بالای تغییر حالت
- محدودیت موقعیت نصب پنجره به دلیل جلوگیری از دید در هنگام افزایش دما

در مطالعه حاضر، طرح نوینی از پنجره هوشمند با بهره‌گیری از انطباق ضریب شکست نور بین المان‌های پنجره و استفاده از سیستم تخلیه-تزریق ساده ارائه شده است. بدین ترتیب، شفافیت پنجره هوشمند را می‌توان در زمان دلخواه و بدون نیاز به رسیدن به آستانه دمایی تغییر حالت کنترل نمود. پنجره هوشمند طرح پیشنهادی به گونه‌ای عمل می‌کند که درصد عبور نور از آن به وجود یا عدم وجود سیال (نانوسیال) بین دو دیواره (صفحات پلیمری) و انطباق ضریب شکست بدست آمده با توجه به درصد نانوذرات موجود در آن بستگی دارد. بنابراین درصد انتقال نور در غیاب سیال در حداقل مقدار خود (45 درصد)، و در حضور سیال در حداکثر مقدار (80 درصد) خواهد بود. مواد مورد استفاده در این مطالعه شامل پلی متیل متاکریلات^۳ بعنوان صفحات پنجره، متیل سالیسیلات^۴ بعنوان سیال، و پودر اکسید روی^۵، بعنوان نانوذرات مورد استفاده در ساخت نانوسیال و فیلم نانوکامپوزیت می‌باشد. از دلایل انتخاب پلی متیل متاکریلات، در دسترس بودن، شفافیت بالا در محدوده مرئی و نزدیک به مادون قرمز [18]، و جرم مخصوص کمتر در مقایسه با سیلیکا (شیشه) می‌باشد. ویژگی نوری این پلیمر باعث می‌شود که یافتن سیالی با ضریب شکست نوری نزدیک به آن و پوشش نانوی مناسب جهت افزودن سایر قابلیت‌ها دشوار نباشد. بنابراین سیال متیل سالیسیلات با ضریب شکست نزدیک به پلیمر مذکور مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله ویژگی‌های مهم این سیال ویسکوزیته نسبتاً کم و مناسب برای مکانیزم تغییر حالت به کاررفته، شفافیت بالا، دمای نقطه جوش و اشتعال مناسب برای محدوده دمایی کاری مورد نظر، و تطابق زیست-محیطی آن است. همچنین نانوذرات اکسید روی به عنوان یک پرکننده غیرارگانیک چندمنظوره که دارای ویژگی‌های برجسته‌ای از قبیل ضریب شکست نور بالا، انتقال حرارت خوب، رفتار خودتمیزشوندگی، رفتار فوتوکاتالیستی^۶، حفاظت در مقابل پرتوی فرابنفش [19]، و خواص ضدعفونی‌کننده است [20]، برای ساخت فیلم نانوکامپوزیت مناسب می‌باشد. به این ترتیب پلیمر مورد نظر در مجموعه بدست آمده نقش ماده‌ای جهت فراهم آوردن قابلیت‌های فرآیندپذیری مناسب، شفافیت، و انعطاف‌پذیری را ایفا می‌کند [21]، در حالیکه نانوذرات به کاررفته ویژگی مطلوب حرارتی و نوری را ارائه می‌دهد. در بخش‌های زیر، پس از معرفی مشخصات فنی مواد، مراحل ساخت، آزمایشات مشخصه‌یابی، و نتایج حاصل، با ارائه یک تحلیل کمی روی

طور قابل توجهی باعث کاهش انرژی در مناطق گرمسیر شده است. لازم به ذکر است که مدت زمان تغییر حالت نسبتاً بالا، و پیچیدگی ساختار از معایب این طرح به شمار می‌رود.

در مطالعه دیگری که توسط فنگ^۱ و همکاران انجام شد [15]، پنجره‌های گازوکرومیک هوشمند از نظر ویژگی‌های نوری و حرارتی و بهره‌وری انرژی مورد آزمایش قرار گرفتند. این کار با شبیه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان انجام شد. این مطالعه نشان داد که بهترین مناطق برای استفاده از این نوع پنجره مناطقی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم است. استفاده این محصول در این مناطق باعث کاهش مصرف انرژی مصرف‌شده در تهویه، خنک‌سازی، و گرمایش شده است. با این وجود، محدودیت موقعیت جغرافیایی مناسب و تجهیزات نسبتاً پیچیده مورد نیاز برای تولید گاز مورد نیاز، از محدودیت‌های این طرح به شمار می‌رود.

1-3- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی عددی عملکرد پنجره‌های هوشمند هنوز بین محققان متداول نشده است، با این وجود تلاش‌هایی برای تحقق این امر مشاهده شده است. یک مطالعه عددی در مورد عملکرد یک پنجره هوشمند چند لایه تعبیه‌شده در سلول‌های خورشیدی نسل سوم توسط سبری^۲ و همکاران انجام شده است [16] که در آن پارامترهای بهینه‌سازی سیستم مانند نسبت غلظت نور و جریان خنک‌کننده (آب) برای جلوگیری از افت عملکرد سلول مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار تجزیه و تحلیل سیالات، مدل‌سازی دقیقی روی ویژگی‌های حرارتی پنجره انجام شده است. سرانجام با در نظر گرفتن انتقال حرارت رسانشی، جابجایی، و تابشی در محفظه داخلی و خارجی سیستم پنجره هوشمند نتایج حل عددی ارائه شده است.

در مطالعه دیگری اثر سیستم تهویه غیرفعال و پنجره‌های هوشمند در یک ساختمان سازگار با شرایط آب و هوایی مختلف، توسط خالصی و همکاران [17] بررسی شده است. توزیع دما و شرایط هوا برای دو منبع گرما، پنجره‌های هوشمند، و دو نوع تهویه در نرم‌افزار تحلیل سیالات بررسی شده است. شاخص آسایش دما نیز توسط یک مدل معتبر برای پنجره‌های هوشمند تعیین شده است. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که پنجره‌های هوشمند از نظر تحقق شاخص‌های آسایش نسبت به سایر پنجره‌ها برتری دارند. همچنین این امر به صورت تئوری اثبات شد که می‌توان به کمک پنجره‌های الکتروکرومیک اختلاف دما را بین کف و سقف تا 50 درصد کاهش داد.

گرچه فناوری اکثر پنجره‌های هوشمند تأثیر مثبتی در مدیریت انرژی دارد، لیکن هزینه قابل توجه ساخت اکثر آن‌ها مانع اصلی به شمار می‌رود. پنجره‌های هوشمند کنونی که بر اساس میزان شدت دریافتی نور خورشید تحریک می‌شوند، نه تنها هزینه نسبتاً بالایی به مجموعه اعمال می‌کنند، بلکه در مدت طولانی نیز به خوبی کار نمی‌کنند. علاوه بر این در فرآیند ساخت اکثر این نوع پنجره‌ها معمولاً از مواد سمی استفاده می‌شود که می‌تواند خطرات قابل توجهی برای طبیعت و سلامت انسان ایجاد کند. بنابراین به طور کلی برخی از محدودیت‌های موجود در مطالعات قبلی و محصولات ارائه‌شده را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

⁴ Methyl salicylate

⁵ Zinc oxide (ZnO)

⁶ Photocatalytic behavior

¹ Feng

² Sabry

³ Poly(methyl methacrylate) (PMMA)

مونتاز شده این محصول، نمونه با تزریق سیال به داخل صفحات پلیمری آماده شده، سطوح خارجی با فیلم نانوکامپوزیت پوشیده شده است.

جدول 2 مشخصات فنی نانوذرات اکسید روی

Table 2 Technical specifications of ZnO nanoparticles

ویژگی‌های حرارتی	
$25 \frac{W}{m \cdot K}$	ضریب انتقال حرارت رسانشی
ویژگی‌های اپتیکی	
2.008	ضریب شکست
ویژگی‌های شیمیایی	
81.38 gr/mol	جرم مولکولی
ویژگی‌های فیزیکی	
5670 kg/m ³	چگالی
2250 K	دمای ذوب
17 – 48 nm	ابعاد ذرات نانو
$0.020 - 0.047 \frac{gr}{L}$	انحلال پذیری در آب

جدول 3 مشخصات فنی سیال متیل سالیسیلات

Table 3 Technical specifications of methyl salicylate

عمومی	
39256-L05	کد محصول
ویژگی‌های شیمیایی	
C ₈ H ₈ O ₃	ترکیب شیمیایی
ویژگی‌های حرارتی	
-8 °C	دمای ذوب
222 °C	دمای جوش
96 °C	دمای اشتعال
$248.9 \frac{J}{mol \cdot K}$	ظرفیت گرمایی
ویژگی‌های اپتیکی	
1.54	ضریب شکست
ویژگی‌های فیزیکی	
$0.7 \frac{gr}{L}$	انحلال پذیری در آب
$1180 \frac{kg}{m^3}$	چگالی
$0.000442 \frac{N}{cm}$	کشش سطحی

الف - صفحات پلیمری

پس از بررسی هندسه‌های مختلف مشخص شد که هندسه مکعب دوران یافته انتخاب بهتری برای این صفحه می‌باشد. در این شکل هندسی مکعب‌های دوران یافته به صورت حفره‌هایی در داخل صفحه در نظر گرفته شده است. شکل 3 جزئیات این طرح را نشان می‌دهد. به کمک این طرح پرتوی نور به طور متوالی دچار شکست شده، هنگامی که سیال در داخل آن قرار ندارد، درصد عبور نور به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در مقابل هنگامی که سیال وجود داشته باشد میزان عبور نور به واسطه تطابق بالای ضریب شکست سیال و صفحات پلیمری افزایش می‌یابد.

قابلیت‌های پنجره هوشمند پیشنهادی، عملکرد آن با سایر پنجره‌های هوشمند موجود مورد مقایسه قرار گرفته است.

2- مواد و روش‌ها

1-2- مواد

پلیمر مورد استفاده در این طرح، پلی متیل متاکریلات (محصول کشور چین) است که مشخصات فنی آن در جدول 1 ذکر شده است.

جدول 1 مشخصات فنی پلی متیل متاکریلات

Table 1 Technical specifications PMMA

عمومی	
25034-86-0	کد محصول
ویژگی‌های شیمیایی	
C ₅ H ₈ O ₂	ترکیب شیمیایی
ویژگی‌های مکانیکی	
2.45 GPa	مدول الاستیسیته
62 MPa	مقاومت کششی
6 %	تغییر شکل پلاستیک
134 MPa	مقاومت خمشی
19 Knoop	سختی
0.215 J/cm	مقاومت به ضربه
ویژگی‌های حرارتی	
$70 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$	ضریب انبساط
$0.2085 \frac{W}{m \cdot K}$	ضریب انتقال حرارت رسانشی
$1466 \frac{J}{kg \cdot K}$	ظرفیت گرمایی ویژه
105 °C	دمای انتقال شیشه‌ای
160 °C	دمای ذوب
-40 °C	حداقل دمای کاری
90 °C	حداکثر دمای کاری
ویژگی‌های اپتیکی	
1.492	ضریب شکست
ویژگی‌های فیزیکی	
1185 kg/m ³	چگالی
0.54	ضریب اصطکاک
0.35 %	جذب آب

پوشش نانوکامپوزیت مورد نظر برای این منظور اکسید روی-پلی متیل متاکریلات است. نانوذرات اکسید روی (محصول شرکت مرک¹ کشور آمریکا)، با مشخصات فنی جدول 2 مورد استفاده قرار گرفت.

سیال مورد نظر در این محصول متیل سالیسیلات (جدول 3) (محصول شرکت SDFCL کشور هند) است که پس از افزودن نانوذرات اکسید روی به نانوسیال تبدیل می‌شود.

2-2- ساخت

به طور کلی مراحل تجربی، شامل فرآیند ساخت و آزمایشات مشخصه‌یابی شده است (شکل 1). با توجه به تصویر مفهومی ارائه شده در شکل 2 از نمونه

¹ Merck



Fig. 4 3D printed polymeric prototype of panel.

شکل 4 نمونه پلیمری چاپ شده سه بعدی صفحه



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 5 Resin mold preparation; (a) Before curing; (b) After curing.

شکل 5 آماده‌سازی قالب رزینی؛ (الف) قبل از انجماد؛ (ب) بعد از انجماد

ب- فیلم نانوکامپوزیت

مقادیر درصد مورد نظر نانوذرات در جدول 4 ارائه شده است. باید توجه داشت که بر اساس تحقیقات انجام شده [22]، بیشترین غلظت قابل دستیابی نانوذرات در ماتریس پلیمری در حدود 10 درصد وزنی (10 wt%) است که به دلیل انرژی سطحی بالا و انحلال پذیری پائین نانوذرات است. بنابراین مقادیر کمتر از 10 wt% برای تولید این نانوکامپوزیت در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به بررسی‌های اولیه و مطالعات [23] انجام شده مشخص شد که درصد وزنی بالاتر از 6، برای این نانوذرات تأثیر نسبتاً نامطلوبی بر شفافیت مورد نظر این نانوکامپوزیت می‌گذارد.

جدول 4 درصد نانوذرات در نانوکامپوزیت

Table 4 Nano-particle percentage in nano-composite

نمونه	جرم PMMA (gr)	جرم ZnO (gr)
NCS ₁ *	0.99	0.01
NCS ₂	0.98	0.02
NCS ₃	0.95	0.05

*NCS: Nano-composite sample

جهت مخلوط نمودن و انحلال پلیمر در داخل حلال، از یک همزن-گرم‌کن مغناطیسی (RH-Basic، محصول شرکت IKA کشور چین) با دمای بیشینه

نمونه‌های پلیمری در ابتدا به وسیله روش چاپ سه بعدی (Trust L Pro شرکت توسعه‌گران بعد سوم کشور ایران) و با جنس پلی‌اتیلن¹ ایجاد شدند (شکل 4). سپس قالب رزینی به کمک نمونه پلیمری تولید شد (شکل 5). در نهایت، صفحات پلی متیل متاکریلات با تزریق پلیمر در داخل قالب رزینی تقویت شده ساخته شدند.

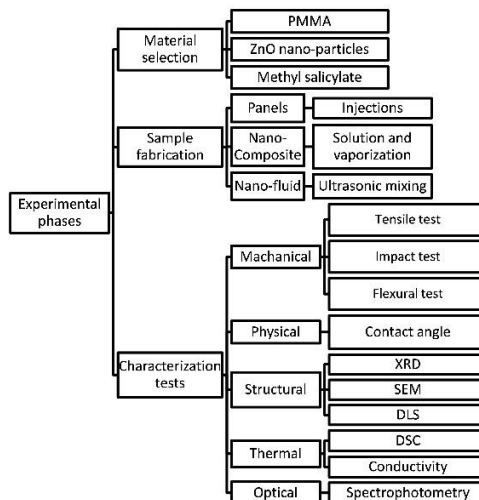


Fig. 1 Experimental steps

شکل 1 مراحل تجربی

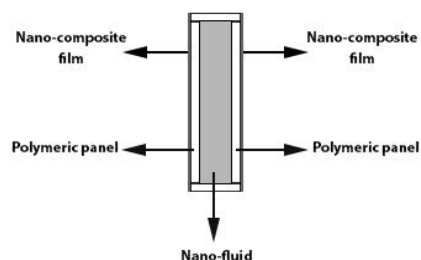
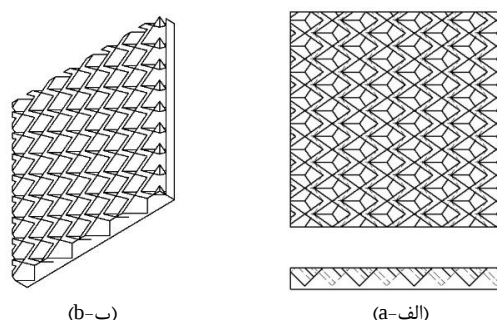


Fig. 2 Schematics of assembled sample

شکل 2 نمای شماتیک نمونه مونتاژ شده



(ب-ب)

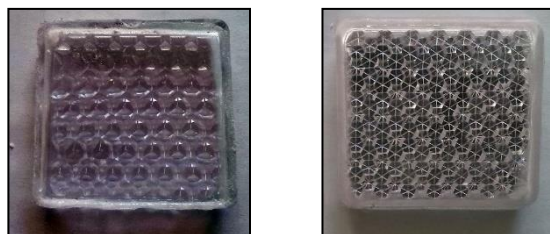
(الف-ا)

Fig. 3 Window panel with rotated cubes pattern; (a) Two-dimensional view; (b) Three-dimensional view.

شکل 3 صفحه پلیمری پنجره با هندسه مکعب دوران یافته؛ (الف) نمای دوبعدی؛ (ب) نمای سه بعدی

¹ Polyethylene (PE)

درصدهای مختلف نانوسیال و نانوکامپوزیت بدست می‌آید که این مسأله روی مجموعه صفحات پلیمری، نانوسیال، و نانوکامپوزیت در آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته است، بنابراین در وضعیت عدم وجود نانوسیال، به دلیل شکست بالای نور در صفحات پلیمری، عدم شفافیت (شکل 7) امری طبیعی می‌باشد.



(b-ب)

(الف-ا)

Fig. 7 The PMMA plates; (a) external view; (b) Internal view (Disassembled)

شکل 7 صفحات پلیمری ایجادشده؛ (الف) نمای خارجی؛ (ب) نمای داخلی (پیش از مونتاژ)

3-2- آزمایشات

آزمایشات مشخصه‌یابی در حوزه خواص مکانیکی، مکانیکی، حرارتی، ساختاری، و نوری، روی اجزاء انجام شد که در اینجا تشریح می‌شوند.

1-3-2- خواص فیزیکی

الف - آزمون زاویه تماس

آزمایشات زاویه تماس بر اساس ASTM D7490 [24] و با هدف تشخیص میزان مطابقت بین سیال و پلیمر مورد استفاده، در نمونه انجام شد. جهت انجام این آزمایش روش اندازه‌گیری زاویه تماس و کشش سطحی قطرات در دستگاه CA-ES10 (محصول شرکت ازدیاد برداشت فارس کشور ایران) مد نظر قرار داده شد. آزمون زاویه تماس برای صفحات پلیمری و فیلم نانوکامپوزیت، در مقابل آب، سیال، و نانوسیال با دو بار تکرار، در دمای 25°C انجام شد. نمونه پلیمری با ابعاد $50 \times 15 \times 4 \text{ mm}^3$ (شکل 8) برای این آزمون مورد استفاده قرار گرفت.



Fig. 8 PMMA samples for contact angle test.

شکل 8 نمونه پلیمری مورد استفاده در آزمایش تعیین زاویه تماس

2-3-2- خواص مکانیکی

الف- آزمون کشش

آزمون کشش صفحات پلیمری بر اساس ASTM D638 [25]، با نرخ $\frac{5 \text{ mm}}{\text{min}}$ ، در دمای 25°C ، با دو بار تکرار روی نمونه‌ها انجام شد (شکل 9). ابعاد نمونه در شکل 10 نمایش داده شده است. جهت انجام این آزمون دستگاه ST-100 (محصول شرکت تینیوس السن¹ کشور آمریکا) مورد استفاده قرار گرفت.

120°C استفاده شد (شکل 6). محلول پلیمر-سیال (پلی متیل متاکریلات) $\left(\frac{1 \text{ gr}}{50 \text{ ml}}\right)$ (سیال) به صورت مایع سفید غلیظی حاصل شد. از آنجائیکه پودر اکسید روی به صورت نانوذرات تهیه شده است، نیازی به سنتز اولیه این ماده جهت تولید پودر اکسید روی نبوده است. بنابراین پودر به طور مستقیم استفاده شد. مقادیر مختلف نانوذرات اکسید روی به محلول اضافه شد و در مرحله بعد، نمونه برای مدت 60 h در محدوده دمایی 60°C تا 65°C قرار گرفت و محصول نسبتاً سفیدرنگی حاصل شد. در گام بعدی، محصول ژله‌ای روی صفحه شیشه‌ای قرار داده شد تا فیلم بدست آید. در نهایت فیلم تهیه شده برای مدت 11 min در دمای 60°C قرار داده شد تا حلال از نمونه حذف گردد. ضخامت نمونه در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد تا از ضخامت $30 \mu\text{m}$ آن اطمینان حاصل گردد.



Fig. 6 Dissolving polymer in propanone (acetone).

شکل 6 حل کردن پلیمر در پروپانن (استون)

پ- نانوسیال

جهت آماده‌سازی نانوسیال مطلوب، نانوذرات اکسید روی اضافه شدند و با غلظت‌های 0.1، 0.5، و 1 درصد وزنی در نظر گرفته شد (جدول 5). سپس محلول قبل از انجام فرآیند مافوق صوت جهت اطمینان از پراکندگی کامل نانوذرات در سیال پایه، روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و مجدداً هم زده شد.

جدول 5 درصد نانوذرات در نانوسیال

Table 5 Nano-particle percentage in fluid.

مقدار ZnO (wt%)	نمونه
0.1	NFS ₁ *
0.5	NFS ₂
1	NFS ₃

*NFS: Nano-fluid sample

ت- محصول مونتاژشده

جهت ساده‌سازی روند تولید و مونتاژ نمونه، ابعاد مورد نظر برای نمونه $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$ در نظر گرفته شد. صفحات پلیمری ایجادشده در دو نما در شکل 7 نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که نحوه عملکرد پنجره هوشمند پیشنهادی به گونه‌ای است که میزان شفافیت حاصل بر اساس میزان تطابق ضریب شکست نانوسیال و صفحه پلیمری و فیلم نانوکامپوزیت، و با توجه به

¹ Tinius Olsen

جهت انجام آزمون DSC دستگاه SA059 (محصول شرکت سن‌تام کشور ایران) مورد استفاده قرار گرفت.

ب - آزمون سنجش ضریب انتقال حرارت

جهت شناسایی ضریب انتقال حرارت سطوح داخلی و خارجی محصول، آزمون سنجش ضریب انتقال حرارت بر اساس ASTM D5930 [28] و به کمک دستگاه SDK-TCC001 (ساخته‌شده توسط نگارنده) (شکل 12) انجام شد. ابعاد نمونه مورد نظر $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ بوده است.



Fig. 12 Heat transfer conductivity measuring device used in experiments

شکل 12 دستگاه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مورد استفاده در آزمون حرارتی

4-3-2- خواص نوری

الف - طیف‌سنجی فرابنفش^۲

آزمون طیف‌سنجی جهت ارزیابی میزان عبور و جذب صورت‌گرفته در آلمان‌های پنجره به کمک دستگاه V670 (محصول شرکت جسکوی^۳ کشور آلمان)، بر اساس ASTM E1348 [29] انجام شد. این آزمون برای ترکیب‌های مختلف اجزاء شامل صفحات پلیمری ساده، به همراه و بدون فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال، با دو تکرار، روی نمونه‌هایی به ابعاد $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ انجام شد. برای نمونه حاوی سیال، نمونه به صورت مجموعه مکعب مستطیل با ابعاد دیواره $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ ، و فاصله 5 mm بین دو دیواره انجام شد.

5-3-2- ویژگی‌های ساختاری

الف- ریزسنجی نوری و الکترونی روبشی^۴

مشخصه‌یابی ساختاری و نانوکامپوزیت و سیال به طور جداگانه برای هر یک، جهت شناسایی ساختار این مواد انجام شد. این کار برای نانوذرات با تفرق اشعه ایکس، و به کمک دستگاه D8-Advance (محصول شرکت براکر^۵ کشور آمریکا)، با دو تکرار، و بر اساس ASTM D5357 [30] انجام شد. جهت انجام این آزمون، ذرات پس از آماده‌سازی مافوق صوت پودر، با توجه به مطالعات مشابه گذشته [31، 32] طی مدت 20 min، با توان 150 W، و فرآیند تفرق اشعه ایکس با مشخصات 40 kV و 20 mA انجام شد. گام روبش برای هر مرحله، در دستگاه مورد استفاده 0.0167° و فاصله زمانی هر گام 0.3 s بیان شده است. ابعاد شبکه کریستالی ذرات اکسید روی به کمک رابطه (1) [33] بدست آمد.



Fig. 9 PMMA sample for tensile test.

شکل 9 نمونه پلیمری مورد استفاده در آزمون کشش

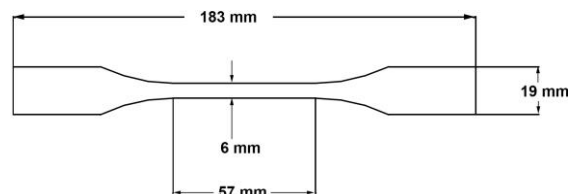


Fig. 10 Specimen dimensions for tensile test based on ASTM D638 (Thickness = 4 mm)

شکل 10 ابعاد نمونه پلیمری مورد استفاده در آزمون کشش طبق ASTM D638 (ضخامت نمونه برابر 4 mm است).

ب- آزمون خمش

آزمون خمش صفحات پلیمری بر اساس ASTM D790 [25] با دو بار تکرار و نرخ جابجایی $2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ، در دمای 25°C ، روی نمونه‌ها انجام شد (شکل 11). جهت انجام این آزمون از دستگاه Tinius-Olsen ST100 استفاده شد.



Fig. 11 PMMA samples for flexure test ($125 \times 12.7 \times 3.2 \text{ mm}^3$)

شکل 11 نمونه پلیمری آزمون خمش با ابعاد $125 \times 12.7 \times 3.2 \text{ mm}^3$

ب- آزمون ضربه

آزمون ضربه آیزود با هدف بررسی مقاومت به ضربه و چقرمگی و بر اساس ASTM D4812 [26] روی نمونه‌هایی با ابعاد $100 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ ، در دمای 25°C انجام شد. جهت انجام این آزمون دستگاه آزمون ضربه PIT-501A (محصول شرکت نوآندیشان صنعت و تجارت سمن کشور ایران) استفاده شد.

3-3-2- خواص حرارتی

الف- آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی^۱

از آنجائیکه پلی متیل متاکریلات یک پلیمر ترموپلاستیک است، تعیین محدوده دمایی شیشه‌ای شدن (T_g) و دمای ذوب (T_m) (محدوده دمایی فرآیندپذیر)، و دمای کریستالیزاسیون جهت انجام مراحل ساخت و تعیین محدوده دمایی کاری اهمیت خواهد داشت [27]. آزمون DSC برای پلیمر و نانوکامپوزیت، و بر اساس ASTM D3418 [26] انجام شده است. نمونه‌ها با شکل گرانول استوانه‌ای در دستگاه آزمون DSC مورد بررسی قرار گرفتند.

⁴ Optical and Scanning Electron Microscopy (SEM)

⁵ Bruker

¹ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

² UV-Vis NIR Spectroscopy

³ JASCO

جدول 6 نتایج مهم آزمون کشش نمونه پلیمری

Table 6 Important results of tensile test on polymeric samples

عنوان	پارامتر	مقدار میانگین
تنش تسلیم کششی	S_y	17.60 MPa
مدول الاستیسیته کششی	E	8.5 GPa
ازدیاد طول	e_f	0.21%

• آزمون ضربه

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون ضربه (جدول 7)، چقرمگی میانگین اندازه‌گیری شده برابر $1.5 \frac{kJ}{m^2}$ مشاهده شده است. در اکثر مطالعات [39, 40]، پلی متیل متاکریلات معمولاً به صورت غیر خالص و با افزودنی‌های متفاوت از لحاظ استحکام ضربه‌پذیری مورد بررسی قرار گرفته‌اند، بنابراین نتایج بدست آمده در این مطالعات در مقادیر بالاتر از $1.5 \frac{kJ}{m^2}$ قرار می‌گیرد، اما با بررسی مقدار استحکام ضربه‌ای اغلب انواع شیشه‌های متداول مورد استفاده در پنجره‌های موجود، طبق تحقیقات انجام شده [41-43] در محدوده پایین‌تر از $1.2 \frac{kJ}{m^2}$ قرار گرفته است که تقریباً 20% پایین‌تر از مقدار بدست آمده برای پلیمر مورد استفاده است.

جدول 7 نتایج آزمون ضربه در دمای 25 °C

Table 7 Impact test results in 25 °C

نمونه	استحکام ضربه‌ای (kJ/m^2)
نمونه 1	1.55
نمونه 2	1.48
نمونه 3	1.46
نمونه 4	1.51

پ- آزمون خمش

نتایج آزمون خمش روی صفحات پلیمری در شکل 14 نمایش داده شده است. جهت محاسبه استحکام خمشی از رابطه زیر استفاده شد:

$$S_{yb} = \frac{3L \cdot F}{2bt^2} \quad (2)$$

که در آن S_{yb} استحکام خمشی، L فاصله بین دو نقطه اتکا، F نیروی محوری وارد شده، b عرض نمونه، و t ضخامت نمونه است. طبق نتایج بدست آمده در شکل 14، ابعاد نمونه مورد استفاده (شکل 11)، و با توجه به رابطه (2)، مقدار بدست آمده برای تنش تسلیم خمشی برابر 61.007 MPa می‌باشد که در مقایسه با مقدار بدست آمده در مطالعه مشابه [36] برای پلی متیل متاکریلات خالص (59 MPa) به میزان 3% بالاتر است. بنابراین با توجه به کاربرد مورد نظر، استفاده از این پلیمر در پنجره هوشمند منطقی به نظر می‌رسد.

2-3- آزمون فیزیکی

الف- زاویه تماس

نتایج آزمون زاویه تماس بین سیال و پلیمر در جدول 8 ارائه شده است. نمونه‌ای از تصویر این آزمون در شکل 15 نمایش داده شده است.

$$d = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

که در آن d فاصله کریستالی، K فاکتور شکل بدون بعد با مقدار نزدیک به مقدار واحد، λ طول موج پرتو، θ زاویه تابش، و β عرض نصف مقدار بیشینه در قله است.

برای فیلم نانوکامپوزیت، آزمون ساختاری با ریزسنجی الکترونی روبشی و به کمک دستگاه Philips XL30 (محصول دانشگاه لون¹ کشور بلژیک)، با دوبار تکرار، و بر اساس ASTM E2015 [34] انجام شد. بنابراین ریخت‌شناسی و ترکیب شیمیایی فیلم نانوکامپوزیت با مکش پائین و ولتاژ 10 kV انجام شد. برای نانوسیال، روش پراکندگی نور پویا² بر اساس ASTM E2490 [35]، و به کمک دستگاه Nano-Partica SZ 100V2 (محصول شرکت هوریابی³ کشور ژاپن) با دو بار تکرار انجام شد. تحلیل اندازه ذرات نانو در محلول به کمک پرتوی لیزر با طول موج استاندارد انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- آزمون‌های مکانیکی

الف- صفحات پلیمری

• آزمون کشش

نتایج آزمون کشش انجام شده روی صفحات پلیمری در شکل 13 نشان داده شده است. مقدار میانگین بدست آمده نیز در جدول 6 ارائه شده است. با توجه به کاربرد مورد نظر و مطالعه انجام شده در زمینه ویژگی‌های مکانیکی پلیمر به کاررفته [36]، و مقایسه مقادیر بدست آمده با استحکام تسلیم شیشه متداول مورد استفاده در پنجره‌های کنونی، نتایج قابل استناد می‌باشد. طبق مطالعه انجام شده در زمینه ویژگی‌های مکانیکی شیشه متداول مورد استفاده در اکثر پنجره‌ها [37, 38]، مقدار استحکام تسلیم برابر 7 MPa می‌باشد که در مقایسه با مقدار بدست آمده برای پلیمر مورد نظر (جدول 6)، تقریباً به میزان 58% پایین‌تر است. بنابراین پلیمر مورد نظر استحکام لازم را در پنجره هوشمند پیشنهادی فراهم می‌نماید.

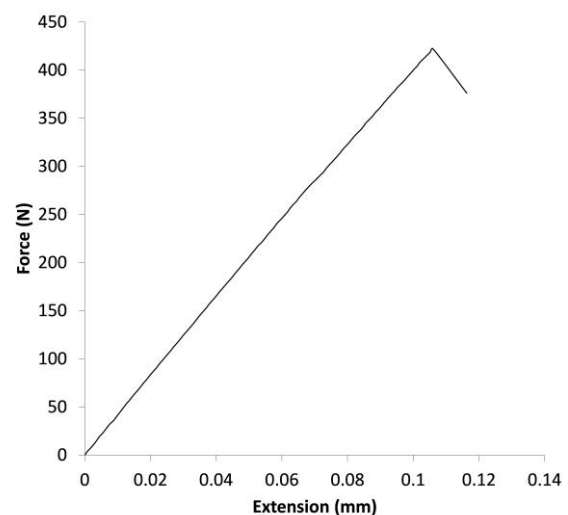


Fig. 13 Polymeric sample tensile test results.

شکل 13 نتایج آزمون کشش نمونه پلیمری

³ Horiba¹ KU Leuven² Dynamic Light Scattering (DLS)

ویژگی خودتمیزشوندگی نخواهد شد و باید تعادلی بین وضعیت سیال‌گریزی و قابلیت تمیزشوندگی با سیال و پاک‌سازی آلودگی‌های خشک وجود داشته باشد. به عبارت دیگر ویژگی سیال‌گریزی در صورتی که سطح در معرض آلودگی هوای مرطوب نباشد، تأثیر کمتری خواهد داشت. از آنجائیکه سطح خارجی پنجره می‌تواند در معرض آلودگی قرار داشته باشد، امکان چسبندگی ذرات معلق وجود داشته، به واسطه سیال‌دوستی پائین، نیاز به شستشو وجود دارد. البته سیال‌گریزی سطوح داخل پنجره باعث خودتمیزشوندگی داخلی پنجره می‌شود، زیرا سطوح داخلی صرفاً در معرض سیال مورد نظر قرار خواهند داشت. همچنین همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار زاویه برای فیلم نانوکامپوزیت و سیال، در هر مورد افزایش یافته است که سیال‌گریزی بیشتری را نشان می‌دهد و مقدار بیشینه برای فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال بدست آمده است.

3-3- آزمون ساختارسنجی

الف- نانوذرات

- آزمون تفرق اشعه ایکس

نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس روی نانوذرات در شکل 16 اشاره شده است.

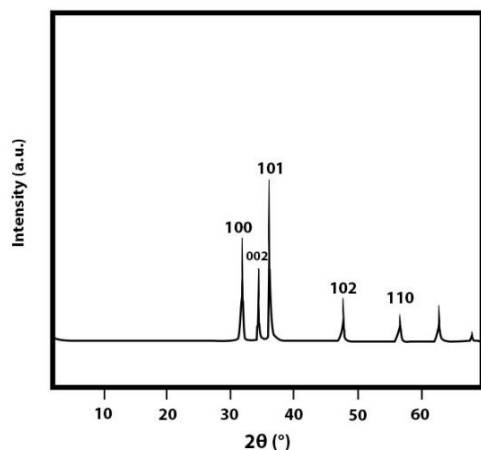


Fig. 16 XRD pattern obtained for ZnO nano-particles with Ethanol.

شکل 16 الگوی تفرق اشعه ایکس بدست‌آمده برای نانوذرات اکسید روی با اتانول

- آزمون ریزسنجی الکترونی روبشی

یک ناحیه از نتایج آزمون ریزسنجی الکترونی نانوکامپوزیت در شکل 17 نمایش داده شده است. این تصویر نشان‌دهنده دانای شدن عمومی نانوذرات اکسید روی در نانوکامپوزیت است.

طبق نتایج بدست‌آمده در شکل 16 ابعاد ذرات اکسید روی در داخل محدوده استاندارد مربوط به نانوکامپوزیت و نانوسیال مورد نظر بوده است. همچنین، همان‌طور که در شکل 17 نشان داده شده است، سطح بدست آمده از فیلم نانوکامپوزیت در شرایط مناسبی قرار دارد. این امر در مقایسه با نتایج مطالعات مشابه نیز قابل اثبات است. با توجه به مطالعه انجام شده توسط همانی¹ [19] بر روی نانو ذرات اکسید روی، الگوی تفرق اشعه ایکس مشابه با شکل 16 می‌باشد. در این مطالعه قید شده است که با توجه به الگوی بدست آمده و

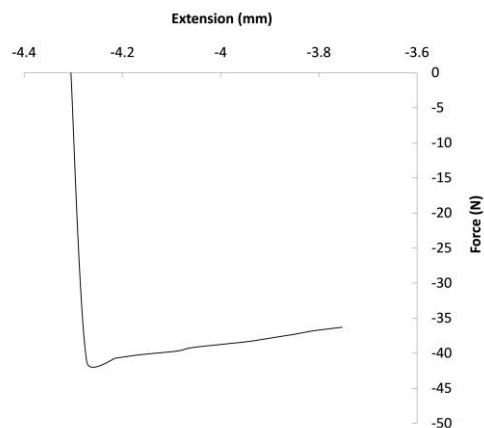


Fig. 14 Polymeric sample flexural test results.

شکل 14 نتیجه آزمون خمش نمونه پلیمری



Fig. 15 Photograph of a contact angle test between polymeric sample and water.

شکل 15 تصویر زاویه تماس نمونه پلیمری و آب

جدول 8 نتایج مهم آزمون زاویه تماس

Table 8 Contact angle test results.

نمونه	زاویه تماس (مقدار میانگین) (°)
صفحات پلیمری و آب	74
صفحات پلیمری و سیال	76
صفحات پلیمری و نانوسیال	78
فیلم نانوکامپوزیت و آب	76
فیلم نانوکامپوزیت و سیال	79
فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال	81

با توجه به نتایج بدست‌آمده در جدول 8، نتایج مربوط به صفحات پلیمری و آب طبق مطالعه انجام‌شده [44] که در آن این زاویه به طور تقریبی 69° معرفی شده است، منطقی بوده است. همچنین در این مطالعه مطرح شده است که این زاویه مربوط به وضعیت آب‌دوستی این پلیمر می‌شود، بنابراین زوایای بالاتر بدست‌آمده در جدول 8 برای فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال باعث نزدیک شدن به وضعیت سیال‌گریزی می‌شود که ویژگی‌های خودتمیزشوندگی را تسهیل می‌کند. البته باید توجه داشت که لزوماً سیال‌گریزی بالا باعث ایجاد

¹ Hammani

مطالعات قبلی [45]، اندازه نانو ذرات در حد 40 nm و کمتر می‌باشد که از آن در مراحل بعدی مطالعه، جهت ساخت فیلم نانوکامپوزیت پلی متیل متاکریلات-اکسید روی استفاده شده است. بنابراین نانوذرات حاصل در این آزمایش نیز در محدوده مناسب برای ساخت فیلم نانوکامپوزیت مورد قرار داشته است.

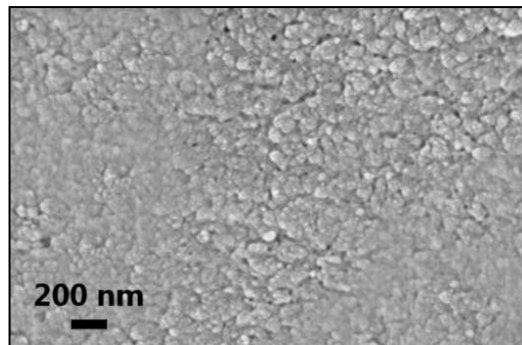


Fig. 17 SEM photo obtained from nano-composite film.

شکل 17 تصویر ریزسنجی روبش الکترونی بدست آمده از فیلم نانوکامپوزیت

ب- نانوسپال

• آزمون پراکنش نوری پویا

نتایج آزمون DLS روی نانوسپال، در محدوده 0 – 100 nm، پراکندگی قابل قبول نانوذرات را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد بخش عمده ذرات بین 3.5 nm تا 12 nm بوده است (شکل 18) که با توجه به مطالعه انجام شده توسط ساگدوان [46] در محدوده قابل قبول در داخل نانوسپال اکسید روی محسوب می‌شود. در این مطالعه دیده می‌شود که ابعاد نانوذرات اکسید روی با کاربرد حرارتی مورد نظر بین 35 nm تا 50 nm بوده است که عملکرد مطلوب را از لحاظ انتقال حرارت در نانوکامپوزیت ساخته شده داشته است، همچنین طبق مطالعات انجام شده در زمینه عملکرد نوری و اندازه‌گیری درصد عبور نور در ترکیبات حاوی نانوذرات اکسید روی [47-49]، این نتیجه به دست آمده است که اندازه نانوذرات کمتر از 40 nm، عملکرد نوری مورد نظر (عبور 80 تا 90 درصد) را ارائه می‌دهد.

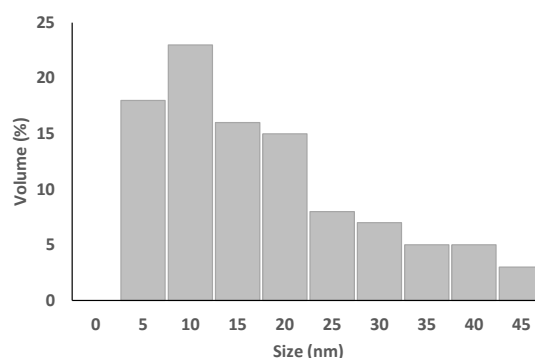


Fig. 18 ZnO Nano-particle size percentage in nanofluid

شکل 18 توزیع ابعاد نانوذرات اکسید روی در نانوسپال

4-3- آزمون حرارتی

الف- آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی

نتیجه آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی روی پلیمر مورد نظر در شکل نشان داده شده است. سایر نتایج با مقادیر متفاوت درصد اکسید روی در جدول 9 نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که داده‌ها نشان می‌دهد، T_g در فیلم نانوکامپوزیت بالاتر از پلیمر خالص است. این مقدار با افزایش درصد نانوذرات اکسید روی افزایش یافته است. T_g پلیمر خالص در حدود 90.5 °C است. همچنین محدوده شیشه‌ای شدن و ذوب پلیمر برای ساخت آن مناسب می‌باشد. نکته مهم این نتایج آن است که T_g با افزایش درصد اکسید روی افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل کمبود حلالیت پلیمر در حلال و کاهش توزیع وزن مولکولی باشد. این قضیه به واسطه رابطه مستقیم مقدار T_g با قابلیت جابجایی زنجیره پلیمر است [50].

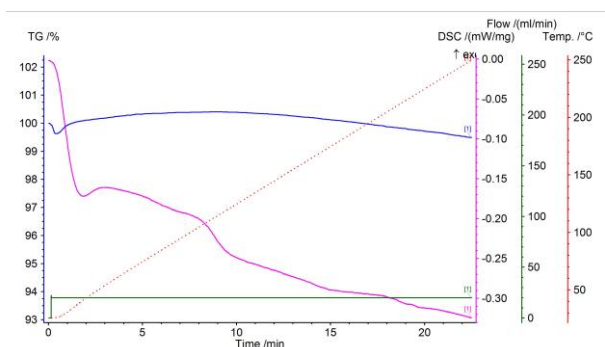


Fig. 19 DSC test result on PMMA.

شکل 19 نتیجه آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی روی پلیمر

گرچه T_g لزوماً روی عملکرد پنجره تأثیر ندارد، لیکن آگاهی از ویژگی‌های حرارتی آن می‌تواند باعث شناسایی محدوده ایمن دمایی لازم در شرایط کاری باشد.

جدول 9 نتایج آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی روی نانوکامپوزیت (مقادیر درصد اکسید روی در جدول اشاره شده است).

Table 9 DSC test results on nano-composite (ZnO percentages refereed in Table 4)

نمونه	T_g (°C)
NCS ₁	90.5
NCS ₂	94.6
NCS ₃	97.8

ب- آزمون ضریب انتقال حرارت

نتایج آزمون ضریب انتقال حرارت رسانشی در جدول ارائه شده است. طبق این نتایج، ضریب انتقال حرارت رسانشی با افزایش درصد نانوذرات اکسید روی اندکی افزایش یافته است. گرچه این پارامتر تأثیر قابل توجهی روی عملکرد مطلوب پنجره ندارد، لیکن امکان دارد پارامترهایی از قبیل اتلاف حرارت یا ورود حرارت ناخواسته از محیط خارج تحت تأثیر آن قرار گیرد. با

جدول 11 نتایج آزمون عبور نور ($\lambda = 500 \text{ nm}$)

Table 11 Light transmission test results

درصد عبور نور (میانگین)	نمونه
87	صفحات پلیمری ساده
45	صفحات پلیمری چندوجهی
82	صفحه پلیمری ساده و نانوکامپوزیت (NCS_3) (طبق جدول)
85	صفحه پلیمری ساده و نانوسیال (NFS_3) (طبق جدول)
80	مجموعه کامل (صفحات پلیمری چندوجهی، فیلم نانوکامپوزیت (NCS_3))، و نانوسیال (NFS_3) (طبق جدول و جدول)

3-6-1- مقایسه مکانیزم‌های مورد استفاده در پنجره‌های هوشمند

در اینجا مقایسه مختصری از لحاظ مکانیزم و قابلیت‌های پنجره، بین نمونه‌های موجود پنجره هوشمند و پنجره هوشمند پیشنهادی انجام شده است. جدول 12 مواد و سازوکارهای مورد استفاده برای تغییر وضعیت پنجره‌ها را ارائه می‌دهد. مطابق جدول 12 مهم‌ترین معایب پنجره‌های هوشمند موجود، صرف نظر از محدوده کوچک ضریب بهره حرارت خورشیدی¹ در هر دو حالت کدر و شفاف، مربوط به هزینه بالای مواد به کار رفته و مکانیزم پیچیده آن‌ها است. در پنجره پیشنهادی، پلی متیل متاکریلات به عنوان صفحه شفاف پنجره به راحتی در دسترس بوده، مکانیزم تغییر حالت مبتنی بر انطباق ضریب شکست صفحه و نانوسیال، به همراه عملیات تزریق و تخلیه، ساز و کار این پنجره را تا حد امکان تسهیل نموده است. همچنین از آنجائیکه استفاده از نانوکامپوزیت، عمدتاً به بهبود خواص خود تمیزشوندگی و فرآیند فوتوکاتالیز کمک می‌کند، می‌تواند به عنوان یک جزء اختیاری این پنجره محسوب شود.

جدول 12 مقایسه اجمالی مواد و مکانیزم‌های پنجره هوشمند پیشنهادی با سایر انواع پنجره‌های هوشمند موجود

Table 12 Brief comparison of materials and mechanisms of current smart windows and proposed type

پنجره هوشمند	اجزا	مکانیزم
الکتروکرومیک	شیشه چند لایه	ارتباط مستقیم ولتاژ اعمال شده با سطح گذر ناخی از انتقال یون
فتوکرومیک	شیشه یا پلی کربنات، یا پلیمر خاص دیگر	واکنش شیمیایی برگشت پذیر بین برخی از امان‌های داخل شیشه از قبیل کلر و نقره جهت کاهش شفافیت
گازوکرومیک	پلیمر، اکسید تنگستن، و گاز هیدروژن	واکنش شیمیایی برگشت پذیر گاز و پلیمر جهت کاهش شفافیت
سایر انواع	هیدروژن، شیشه کم گسیل، ...	کاهش شفافیت به کمک فرآیند نوین شیمیایی، الکتریکی، و ...
پنجره پیشنهادی	پلیمر، نانوسیال، نانوکامپوزیت	عدم تطابق ضریب شکست پلیمر و نانوسیال جهت کاهش شفافیت

3-6-2- میزان عبور نور

در این بخش عملکرد پنجره‌های هوشمند موجود و پنجره هوشمند پیشنهادی از لحاظ درصد عبور نور مورد مقایسه قرار گرفته است. این کار با در نظر گرفتن یک پارامتر بی بعد با عنوان نسبت عبور نور (R_p) انجام شده است:

توجه به مقادیر به دست آمده در جدول و مقایسه آن‌ها با ضریب انتقال حرارت رسانشی مواد رسنا و عایق [51، 52]، به طور کلی می‌توان گفت که بیش از آن که صفحات پنجره به عنوان هادی حرارت عمل کند، به عنوان عایق ضعیف عمل خواهند کرد.

جدول 10 نتایج آزمون ضریب انتقال حرارت (مقادیر درصد اکسید روی در جدول 4 اشاره شده است)

Table 10 Thermal conductivity coefficient test results (ZnO percentages refereed in Table 4)

ضریب انتقال حرارت رسانشی (میانگین) ($\frac{W}{m \cdot K}$)	نمونه
0.193	صفحات پلیمری
0.215	فیلم نانوکامپوزیت (NCS_1)
0.220	فیلم نانوکامپوزیت (NCS_2)
0.291	فیلم نانوکامپوزیت (NCS_3)

3-5-5- آزمون اپتیکی

شکل 20 و جدول 11 نتایج آزمون طیفسنجی عبوری پلیمرها، نانوکامپوزیت‌ها، و نانوسیال را در محدوده نور مرئی و فرابنفش، در دمای اتاق نشان می‌دهد. نتایج صفحات پلیمری ساده و نقش دار به همراه و بدون سیال، با مقادیر درصد مختلف نانوذرات اکسید روی در جدول 11 اشاره شده است. طبق نتایج حاصل، محدوده درصد عبور نور برای حالت کدر و شفاف بین 30 تا 80 درصد بوده است. لازم به ذکر است که حالت کدر زمانی رخ می‌دهد که پنجره حاوی سیال نباشد و حالت شفاف زمانی رخ می‌دهد که مجموعه (به همراه سیال) مورد استفاده قرار گیرد. بررسی و تحلیل کمی این نتایج به همراه مقایسه با سایر پنجره‌های هوشمند در بخش بعد ارائه شده است.

3-6-6- عملکرد پنجره

در این بخش عملکرد پنجره هوشمند پیشنهادی به طور کمی و تحلیلی با کمک دو پارامتر بدون بعد مربوط به میزان عبور نور و اختلاف دما مورد بررسی قرار گرفته، با سایر نمونه‌ها مقایسه شده است.

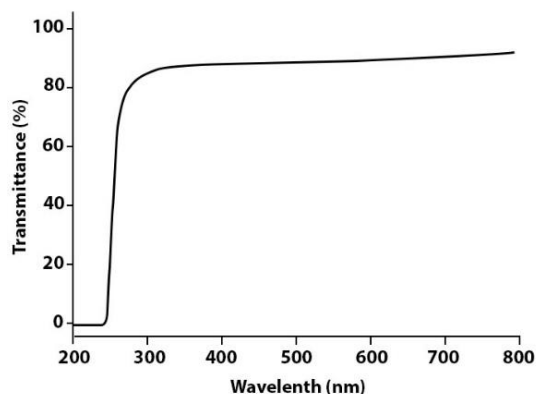


Fig. 20 UV-Vis transmission curve, obtained for simple polymeric panels

شکل 20 منحنی آزمون طیفسنجی عبوری بدست آمده برای صفحه پلیمری

¹ Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

استفاده از R_{Δ} ، یک اتاق آزمایشی فراهم شد تا تغییرات دمای آن در مدت زمان معین مورد بررسی قرار گیرد. به منظور دستیابی به پایداری دما، این آزمایش طی مدت زمان یک ساعت انجام شد، در حالی که اتاق از لحاظ حرارتی تحت کنترل قرار گرفت؛ به طوری که تنها نور خورشید مؤثرترین منبع حرارتی مؤثر بر تغییرات دما واقع شود. نتایج تجربی و عددی جدول 14 برای پنجره هوشمند پیشنهادی بدست آمد. از نرم‌افزار Energy Plus نیز به عنوان ابزار شبیه‌سازی جهت محاسبه نتایج عددی استفاده شد. ویژگی‌های نوری و حرارتی ضروری آزمایش‌شده در بخش‌های قبل برای محاسبه نتایج، در نرم‌افزار تعریف شد. اختلاف قابل قبولی بین نتایج تجربی و عددی جدول 14 مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی است.

جدول 14 R_{Δ} تجربی و محاسبه‌شده بین ساعات 00:12 تا 00:13 برای پنجره هوشمند پیشنهادی

Table 14 Experimental and predicted value of R_{Δ} during 12:00 to 13:00 for proposed smart window.

نتایج تجربی			نتایج محاسبه‌شده			حالت پنجره	شرایط کیفی دمای محیط
R_{Δ}	T_I	T_E	R_{Δ}	T_I	T_E		
0.06	33	35	0.09	32	35	شفاف	گرم
0.26	26	35	0.23	27	35	کدر	گرم
0.05	19	20	0.1	18	20	شفاف	سرد
0.3	14	20	0.25	15	20	کدر	سرد

در مورد R_{Δ} باید توجه داشت که در هوای گرم، مقادیر بالا و در هوای سرد مقادیر پایین بیانگر عملکرد بهتر پنجره هوشمند می‌باشد. بنابراین باید پیش از مقایسه مقادیر R_{Δ} برای پنجره‌های هوشمند مختلف، ابتدا شرایط دمایی هوا در نظر گرفته شود.

مقادیر پیش‌بینی‌شده R_{Δ} بر اساس مقادیر P_H و P_L ، و سایر ویژگی‌های نوری و حرارتی پنجره‌های هوشمند محاسبه شده، در جدول و شکل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. طبق نتایج شکل 22، R_{Δ} پنجره هوشمند پیشنهادی در هوای گرم بالاتر و در هوای سرد پایین‌تر از سایر پنجره‌های هوشمند است که بیان‌کننده عملکرد قابل اعتماد نمونه پیشنهادی از لحاظ بازده انرژی است. بر این اساس، هر چه مقدار اختلاف R_{Δ} هوای سرد و گرم بالاتر باشد، عملکرد پنجره هوشمند بهتر محسوب می‌شود. با توجه به نتایج جدول 15 این اختلاف برای پنجره پیشنهادی به مقدار 0.21 رسیده است که 2.1 برابر پنجره هوشمند فوتوکرومیک با بالاترین اختلاف (0.1) در سایر پنجره‌ها می‌باشد.

با توجه به مقادیر به دست‌آمده برای پارامترهای R_{Δ} و R_p ، نمونه پیشنهادی پنجره هوشمند از لحاظ مصرف انرژی لازم جهت تنظیم دما در مقایسه با سایر انواع پنجره‌های هوشمند مورد توجه می‌باشد. علاوه بر این، طراحی کارآمد مکانیزم تغییر حالت، باعث مستقل شدن حالت پنجره از وضعیت دمایی آن می‌شود، بنابراین می‌توان با صرف انرژی اندک، تحریک لازم را برای انجام فرآیند کم‌مصرف و برگشت‌پذیر تغییر حالت پنجره نیز انجام داد.

$$R_p = \frac{P_H}{P_L} \quad (1)$$

که در آن P_H و P_L درصد عبور نور به ترتیب در وضعیت شفاف و کدر پنجره هستند. مقادیر R_p برای پنجره‌های مختلف در جدول 13 و شکل 21 مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

جدول 13 انواع مختلف پنجره هوشمند [3, 8, 53]

Table 13 R_p for different types of smart windows [3, 8, 53]

R_p	P_H	P_L	پنجره هوشمند
1	0.9	0.9	شیشه (W_1)
1.17	0.8	0.6	گازوکرومیک (W_2)
1.23	0.74	0.6	الکتروکرومیک (W_3)
1.25	0.7	0.56	فوتوکرومیک (W_5)
2.83	0.85	0.3	پنجره پیشنهادی (W_5)

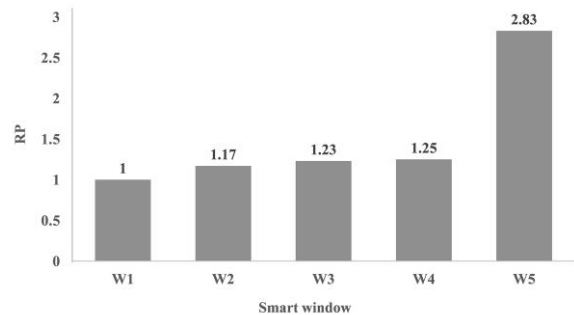


Fig. 21 R_p for different types of smart windows according to Table 13

شکل 21 R_p پنجره‌ها هوشمند مختلف طبق جدول 13

همان‌طور که در شکل 21 دیده می‌شود، پارامتر R_p برای پنجره هوشمند پیشنهادی مقدار بالاتری را نسبت به سایر موارد بررسی‌شده به خود اختصاص می‌دهد که نشان‌دهنده اختلاف بیشتر درصد عبور نور در دو حالت شفاف و کدر است. به عبارت دیگر وسعت تغییرات درصد عبور نور در پنجره پیشنهادی، تقریباً 2.2 برابر حداکثر وسعت این تغییرات برای سایر پنجره‌های هوشمند است.

3-6-3- میزان اختلاف دما

در اینجا پارامتر بدون بعد تفاضل دما (R_{Δ}) جهت مقایسه دقیق‌تر عملکرد پنجره پیشنهادی نسبت به سایر پنجره‌های هوشمند، در وضعیت هوای گرم و سرد، تعریف و محاسبه شده است:

$$R_{\Delta} = \frac{|\Delta T|}{T_E} = \frac{|T_E - T_I|}{T_E} \quad (1)$$

که در آن T_I و T_E به ترتیب دمای خارجی و داخلی اتاق مورد آزمایش هستند. این پارامتر میزان انتقال نور خورشید (میزان شفافیت پنجره) را در هوای سرد، و میزان عدم انتقال نور خورشید (میزان کدورت پنجره) را برای هوای گرم بیان می‌کند. به منظور ارزیابی عملکرد پنجره هوشمند پیشنهادی با

تغییر حالت پنجره پیشنهادی با سایر پنجره‌های هوشمند، این مدت زمان برای پنجره‌ای با بیشترین مساحت عنوان شده در مطالعات مربوط به سایر پنجره‌های هوشمند و با توجه به دبی ورودی نانوسیال بدست آمد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، پنجره در ساز و کار پیشنهادی به صورتی عملی می‌کند که وجود با عدم وجود سیال (نانوسیال) داخل پنجره و تطابق ضریب شکست بین سیال (نانوسیال) و صفحات، باعث شفافیت یا کدورت آن می‌شود.

گرچه افزایش مساحت پنجره و هزینه‌بر بودن نسبی نانوسیال مورد استفاده می‌تواند باعث افزایش زمان مورد نیاز به تغییر حالت پنجره و افزایش هزینه تمام شده آن گردد، لیکن این مسائل را می‌توان به کمک تدابیری مرتفع نمود. به عنوان مثال افزایش توان پمپ تغذیه می‌تواند باعث کاهش زمان تغذیه و تغییر حالت پنجره شود لیکن باید به هزینه پمپ مورد استفاده نیز توجه نمود. همچنین استفاده از سیال یا نانوسیال ارزان‌تر نیز می‌تواند باعث کاهش هزینه سیال مورد استفاده گردد که این امر نیاز به بررسی و آزمایش سیال‌ها و نانوسیال‌های مختلف و میزان تطابق آن‌ها با صفحات پلیمری مورد استفاده خواهد داشت. البته استفاده از روش سیال کدر و پلیمر شفاف نیز به عنوان مکانیزم جایگزین می‌تواند منجر به تسهیل و تسریع عملکرد پنجره و کاهش هزینه نهایی شود که این قضیه نیز مستلزم انجام مراحل تحقیقاتی مجزاً خواهد بود.

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مراحل طراحی، ساخت، و مشخصه‌یابی پنجره هوشمند مبتنی بر میزان تطابق ضریب شکست نانوسیال و صفحات پلیمری، ارائه شد. مواد به کار رفته در این پنجره شامل صفحات پلیمر پلی متیل متاکریلات، متیل سالیسیلات به عنوان سیال، و نانوذرات اکسید روی بوده است. نانوذرات مذکور جهت ساخت نانوکامپوزیت و نانوسیال مورد استفاده قرار گرفته است. فیلم نانوکامپوزیت (نانوذرات اکسید روی به همراه پلیمر پلی متیل متاکریلات) به عنوان پوشش صفحات، و نانوسیال (نانوذرات اکسید روی به همراه سیال متیل سالیسیلات) به عنوان مایع تطبیق‌دهنده ضریب شکست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از طراحی شکل هندسی مطلوب و ساخت نمونه اولیه این پنجره هوشمند با مدل‌سازی انجام شده و تزریق، آزمایشات مشخصه‌یابی روی آن صورت گرفت. با توجه به نتایج آزمایشات و تحلیل‌های انجام گرفته در رابطه با عملکرد نوری و حرارتی این محصول، نتایج زیر قابل ذکر می‌باشد:

- قابلیت دسترسی مواد مورد استفاده پنجره هوشمند پیشنهادی شامل پلیمر متیل متاکریلات، سیال متیل سالیسیلات، و نانوذرات اکسید روی، همراه با نحوه عملکرد این پنجره مبتنی بر میزان مطابقت ضریب شکست نور المان‌های تشکیل‌دهنده آن، در مقایسه با سایر مکانیزم‌های پیچیده به کار رفته در پنجره‌های هوشمند موجود، منجر به تسهیل روند ساخت و تولید آن شده است.
- با توجه به پارامتر نسبت عبور نور معرفی شده (R_p)، وسعت تغییرات درصد عبور نور در پنجره پیشنهادی، تقریباً 2.2 برابر حداکثر وسعت این تغییرات برای سایر پنجره‌های هوشمند است

جدول 15 مقادیر محاسبه شده R_Δ بین ساعت 00:12 تا 00:13 برای پنجره‌های هوشمند مختلف

Table 15 Predicted value of R_Δ during 12:00 to 13:00 for different smart windows.

پنجره هوشمند	هوای گرم (حالت کدر)	هوای سرد (حالت شفاف)
شیشه (W_1)	0.09	0.08
گازوکرومیک (W_2)	0.18	0.14
الکتروکرومیک (W_3)	0.19	0.13
فوتوکرومیک (W_5)	0.21	0.11
پنجره پیشنهادی (W_5)	0.26	0.05

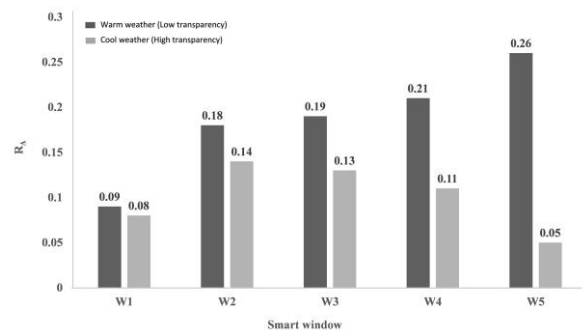


Fig. 22 Comparison of predicted R_Δ for different smart windows in warm (low transparency) and cool (high transparency) weather conditions

شکل 22 مقایسه R_Δ محاسبه شده برای پنجره‌های هوشمند در شرایط هوای گرم (شفافیت پائین) و سرد (شفافیت بالا)

3-4-6- مدت زمان تغییر حالت

باید توجه داشت که یکی از ویژگی‌های مهم پنجره هوشمند، زمان مورد نیاز جهت تغییر حالت آن است. طبق مطالعات گذشته این روند در پنجره‌های ترموکرومیک، الکتروکرومیک، و گازوکرومیک به واسطه فرآیندهای شیمیایی مورد نیاز نسبتاً زمان‌بر بوده است. این قضیه در مورد سایر انواع پنجره‌های هوشمند نیز به کلی مرتفع نشده است. برای مثال پنجره‌های هوشمند حاوی هیدروژل برای تغییر حالت خود نیاز به مدت زمانی در حدود 40 min دارد تا به تعادل دمایی رسیده، تغییر حالت به طور کامل انجام گیرد [54]. در نوع پیشرفته‌تر این پنجره که حاوی میکروژل است، این زمان حدوداً به 4 min کاهش یافته است [55]. همچنین این مدت زمان در مورد پنجره حاوی سلولز متیل هیدروکسی پروپیل که بر اساس تغییرات دما کار می‌کند، در حدود 6 min است [56]. گرچه تلاش‌هایی که در این مطالعات دیده می‌شود در جهت کاهش این مدت زمان بوده است، لیکن همواره این مدت زمان بیش از حدود 2 min بوده است، در حالیکه در پنجره پیشنهادی، این مدت زمان به واسطه استفاده از مکانیزم ساده تزریق و تخلیه به حدود 1 min کاهش یافته است. مدت زمان تغییر حالت پنجره برابر با مدت زمان پر شدن پنجره از نانوسیال مورد استفاده است. بدین ترتیب دبی ورودی نانوسیال و حجم پنجره دو فاکتور مؤثر محسوب خواهد شد. جهت انجام مقایسه صحیح مدت زمان

- [12] Hu, K., Blair, A. D., Piechota, E. J., Schauer, P. A., Sampaio, R. N., Parlani, F. G. L., Meyer, G. J. and Berlinguette, C. P., "Kinetic Pathway for Interfacial Electron Transfer from a Semiconductor to a Molecule" *Nature Chemistry*, Vol. 8, No. 9, pp. 853-859, 2016.
- [13] Wang, J., Zhang, L., Yu, L., Jiao, Z., Xie, H., Lou, X. W. D. and Sun, X. W., "A Bi-Functional Device for Self-Powered Electrochromic Window and Self-Rechargeable Transparent Battery Applications" *Nature communications*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-7, 2014.
- [14] Wu, L. Y. L., Zhao, Q., Huang, H. and Lim, R. J., "Sol-Gel Based Photochromic Coating for Solar Responsive Smart Window" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 320, pp. 601-607, 2017.
- [15] Feng, W., Zou, L., Gao, G., Wu, G., Shen, J. and Li, W., "Gasochromic Smart Window: Optical and Thermal Properties, Energy Simulation and Feasibility Analysis" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 144, pp. 316-323, 2016.
- [16] Sabry, M., Eames, P. C., Singh, H. and Wu, Y., "Smart Windows: Thermal Modelling and Evaluation" *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 200-209, 2014.
- [17] Javad, K. and Navid, G., "Thermal Comfort Investigation of Stratified Indoor Environment in Displacement Ventilation: Climate-Adaptive Building with Smart Windows" *Sustainable Cities and Society*, Vol. 46, pp. 101354, 2019.
- [18] Zettl, M., Mayer, O., Klampaftis, E. and Richards, B. S., "Investigation of Host Polymers for Luminescent Solar Concentrators" *Energy Technology*, Vol. 5, No. 7, pp. 1037-1044, 2017.
- [19] Hammani, S., Barhoum, A. and Bechelany, M., "Fabrication of Pmma/Zno Nanocomposite: Effect of High Nanoparticles Loading on the Optical and Thermal Properties" *Journal of Materials Science*, Vol. 53, No. 3, pp. 1911-1921, 2018.
- [20] Sun, D., Miyatake, N. and Sue, H.-J., "Transparent Pmma/Zno Nanocomposite Films Based on Colloidal ZnO Quantum Dots" *Nanotechnology*, Vol. 18, pp. 215606, 2007.
- [21] Dai Prè, M., Martucci, A., Martin, D. J., Lavina, S. and Di Noto, V., "Structural Features, Properties, and Relaxations of Pmma-Zno Nanocomposite" *Journal of Materials Science*, Vol. 50, No. 5, pp. 2218-2228, 2015.
- [22] Kalantari, S., Amini, M. and Shokoohfar, A., "Synthesis, Characterization and Application of Mesoporous Silica/Maghemite Nanocomposite in Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 3, pp. 1013-1020, 2020.
- [23] Kadkhodae, M., Abdollah-zadeh, A., Assadi, H. and Seraj, R. A., "Investigation of Tribological Properties of Zn/Zno Nanocomposite Targets Produced by Cold Spray Process" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 2, pp. 823-832, 2020.
- [24] ASTM, "Annual Book of Astm Standards: Tests for Chemical, Physical, and Optical Properties ; Appearance. Paints, Related Coatings, and Aromatics. Paint", American Society for Testing and Materials, 2012.
- [25] ASTM, "Volume 08.01 Plastics (I): C1147 D3159", ASTM International, 2012.
- [26] ASTM, "Volume 08.02 Plastics (Ii): D3222-D5083", American Society for Testing and Materials, 2012.
- [27] Soltani, M., Yousefpoor, M. and Taherian, Z., "Design, Preparation, Characterization and Biological Investigation of Sodium Alginate/Fluorohydroxyapatite Composite Scaffold for Bone Tissue Engineering Application" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 481-490, 2019.
- [28] ASTM, "Volume 08.03 Plastics (Iii): D5117 - Latest; Reinforced Plastic Piping Systems and Chemical Equipment; Plastic Building Products", American Society for Testing and Materials, 2016.

که دلیل عمده آن تطابق ویژگی‌های پلیمر و نانوسیال، و مکانیزم تغییر حالت مورد استفاده می‌باشد.

- با توجه به پارامتر نسبت تفاضل دما (R_{Δ})، عملکرد پنجره پیشنهادی در حیطه انرژی، 2.1 برابر عملکرد بیشینه سایر پنجره‌های هوشمند بوده است که این امر به طور مستقیم باعث کاهش مصرف انرژی تعدیل دما در فصول گرم و سرد می‌شود.
- روش تحقیق نشان داده است که زمان تغییر حالت پنجره هوشمند ارائه شده در مقایسه با سایر پنجره‌های هوشمند موجود به کمتر از 1 دقیقه کاهش یافته است که به واسطه استفاده از مکانیزم تزریق-تخلیه ساده است، البته مساحت پنجره و سرعت جریان سیال نیز دو عامل تأثیرگذار بر این امر هستند.

5-تقدیر و تشکر

این مقاله تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور¹ با شماره طرح 97025260 نگارش یافته است.

6-منابع

- [1] Allen, K., Connelly, K., Rutherford, P. and Wu, Y., "Smart Windows—Dynamic Control of Building Energy Performance" *Energy and Buildings*, Vol. 139, pp. 535-546, 2017.
- [2] Donaldson, L., "Cheaper and Easier Smart Windows" *Materials Today*, Vol. 21, No. 6, pp. 584, 2018.
- [3] Sala, R. L., Gonçalves, R. H., Camargo, E. R. and Leite, E. R., "Thermosensitive Poly(N-Vinylcaprolactam) as a Transmission Light Regulator in Smart Windows" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 186, pp. 266-272, 2018.
- [4] Demir, M. M., Koynov, K., Akbey, Ü., Bubeck, C., Park, I., Lieberwirth, I. and Wegner, G., "Optical Properties of Composites of Pmma and Surface-Modified Zincite Nanoparticles" *Macromolecules*, Vol. 40, No. 4, pp. 1089-1100, 2007.
- [5] Hoffmann, S., Lee, E. S. and Clavero, C., "Examination of the Technical Potential of near-Infrared Switching Thermochromic Windows for Commercial Building Applications" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 123, pp. 65-80, 2014.
- [6] Warwick, M. E. A., Ridley, I. and Binions, R., "The Effect of Transition Gradient in Thermochromic Glazing Systems" *Energy and Buildings*, Vol. 77, pp. 80-90, 2014.
- [7] Li, X.-H., Liu, C., Feng, S.-P. and Fang, N. X., "Broadband Light Management with Thermochromic Hydrogel Microparticles for Smart Windows" *Joule*, Vol. 3, No. 1, pp. 290-302, 2019.
- [8] Piccolo, A. and Simone, F., "Performance Requirements for Electrochromic Smart Window" *Journal of Building Engineering*, Vol. 3, pp. 94-103, 2015.
- [9] Baetens, R., Jelle, B. P. and Gustavsen, A., "Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings: A State-of-the-Art Review" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 94, No. 2, pp. 87-105, 2010.
- [10] Wu, C.-C., Liou, J.-C. and Diao, C.-C., "Self-Powered Smart Window Controlled by a High Open-Circuit Voltage Ingan/Gan Multiple Quantum Well Solar Cell" *Chemical Communications*, Vol. 51, No. 63, pp. 12625-12628, 2015.
- [11] Chen, Z., Cao, C., Chen, S., Luo, H. and Gao, Y., "Crystallised Mesoporous TiO₂(a)-VO₂(M/R) Nanocomposite Films with Self-Cleaning and Excellent Thermochromic Properties" *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 2, No. 30, pp. 11874-11884, 2014.

¹ Iran National Science Foundation: INSF

- [47] Huaxu, L., Fuqiang, W., Dong, L., Jie, Z. and Jianyu, T., "Optical Properties and Transmittances of ZnO-Containing Nanofluids in Spectral Splitting Photovoltaic/Thermal Systems" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 128, pp. 668-678, 2019.
- [48] Mohammed, M. I., "Optical Properties of ZnO Nanoparticles Dispersed in Pmma/Pvdf Blend" *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1169, pp. 9-17, 2018.
- [49] Soni, G., Gouttam, N. and Soni, P., "Optical Properties of Pmma/ZnO/SiO₂ Composite Thin Film" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30, pp. 35-38, 2020.
- [50] Kim, D., Jeon, K., Lee, Y., Seo, J., Seo, K., Han, H. and Khan, S., "Preparation and Characterization of UV-Cured Polyurethane Acrylate/ZnO Nanocomposite Films Based on Surface Modified ZnO" *Progress in Organic Coatings*, Vol. 74, No. 3, pp. 435-442, 2012.
- [51] Carvill, J., "3 - Thermodynamics and Heat Transfer" in: J. Carvill, *Mechanical Engineer's Data Handbook*, Eds., pp. 102-145, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993.
- [52] Masoumi, A. A., Rahimi Sharbaf Moghadas, G. H. and Liyaghat, G. H., "Transient Heat Transfer Analysis in Composite Metal Cylindrical Vessel Using the Layerwise Theory and Differential Quadrature Method" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 347-358, 2017.
- [53] Cao, S., Zhang, S., Zhang, T., Yao, Q. and Lee, J. Y., "A Visible Light-near-Infrared Dual-Band Smart Window with Internal Energy Storage" *Joule*.
- [54] Gyenes, T., Szilágyi, A., Lohonyai, T. and Zrínyi, M., "Electrically Adjustable Thermotropic Windows Based on Polymer Gels" *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 14, No. 11-12, pp. 757-762, 2003.
- [55] Wang, M., Gao, Y., Cao, C., Chen, K., Wen, Y., Fang, D., Li, L. and Guo, X., "Binary Solvent Colloids of Thermosensitive Poly(N-Isopropylacrylamide) Microgel for Smart Windows" *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, No. 48, pp. 18462-18472, 2014.
- [56] Kiruthika, S. and Kulkarni, G. U., "Energy Efficient Hydrogel Based Smart Windows with Low Cost Transparent Conducting Electrodes" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 163, pp. 231-236, 2017.
- [29] ASTM, "Volume 06.01 Paint—Tests for Chemical, Physical, and Optical Properties; Appearance", American Society for Testing and Materials, 2018.
- [30] ASTM, "Volume 05.06 Gaseous Fuels; Coal and Coke; Catalysts; Bioenergy and Industrial Chemicals from Biomass", American Society for Testing and Materials, 2017.
- [31] Askarinejad, A., Alavi, M. and Morsali, A., "Sonochemically Assisted Synthesis of ZnO Nanoparticles: A Novel Direct Method" *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, Vol. 30, pp. 75-81, 2011.
- [32] Mahdavi, R. and Ashraf Talesh, S. S., "The Effect of Ultrasonic Irradiation on the Structure, Morphology and Photocatalytic Performance of ZnO Nanoparticles by Sol-Gel Method" *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 39, pp. 504-510, 2017.
- [33] Gopi, D., Kavitha, L., Ramya, S. and Rajeswari, D., "Chapter 15 - Chemical and Green Routes for the Synthesis of Multifunctional Pure and Substituted Nanohydroxyapatite for Biomedical Applications" in: A. M. Grumezescu, *Engineering of Nanobiomaterials*, Eds., pp. 485-521: William Andrew Publishing, 2016.
- [34] ASTM, "Volume 03.01 Metals – Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography", American Society for Testing and Materials, 2015.
- [35] ASTM, "Volume 14.02 Particle and Spray Characterization; Forensic Sciences; Accreditation & Certification; Forensic Psychophysiology; Nanotechnology; Forensic Engineering", American Society for Testing and Materials, 2019.
- [36] Zebarjad, S., Sajjadi, S., Ebrahimi Sadrabadi, T., Yaghmaei, A. and Naderi, B., "A Study on Mechanical Properties of Pmma/Hydroxyapatite Nanocomposite" *Engineering*, Vol. 3, pp. 1, 2011.
- [37] Kaspar, T., Ryan, J., Pantano, C., Rice, J., Trivelpiece, C., Hyatt, N., Corkhill, C., Mann, C., Hand, R., Kirkham, M., Crawford, C., Jantzen, C., Du, J., Lu, X., Harrison, M., Cushman, C., Linford, M. and Smith, N., "Physical and Optical Properties of the International Simple Glass" *npj Materials Degradation*, Vol. 3, 2019.
- [38] Kasunic, K. J., "Optomechanical Systems Engineering", Wiley, 2015.
- [39] Alhareb, A., Md Akil, H. and Ahmad, Z., "Impact Strength, Fracture Toughness and Hardness Improvement of Pmma Denture Base through Addition of Nitrile Rubber/Ceramic Fillers" *The Saudi Journal for Dental Research*, Vol. 8, 2016.
- [40] Seldén, R., "Fracture Energy Measurements in Polycarbonate and Pmma" *Polymer Testing*, Vol. 7, No. 3, pp. 209-222, 1987.
- [41] Johnson, W., "Impact Strength of Materials" 00466136 ed., Transport Research Laboratory, pp. 361, 1983.
- [42] Onodera, Y., Kohara, S., Salmon, P. S., Hirata, A., Nishiyama, N., Kitani, S., Zeidler, A., Shiga, M., Masuno, A., Inoue, H., Tahara, S., Polidori, A., Fischer, H. E., Mori, T., Kojima, S., Kawaji, H., Kolesnikov, A. I., Stone, M. B., Tucker, M. G., McDonnell, M. T., Hannon, A. C., Hiraoka, Y., Obayashi, I., Nakamura, T., Akola, J., Fujii, Y., Ohara, K., Taniguchi, T. and Sakata, O., "Structure and Properties of Densified Silica Glass: Characterizing the Order within Disorder" *NPG Asia Materials*, Vol. 12, No. 1, pp. 85, 2020.
- [43] Tsesarsky, M., Peled, A., Katz, A. and Anteby, I., "Strengthening Concrete Elements by Confinement within Textile Reinforced Concrete (Trc) Shells – Static and Impact Properties" *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 514-523, 2013.
- [44] Ma, Y., Cao, X., Feng, X., Ma, Y. and Zou, H., "Fabrication of Super-Hydrophobic Film from Pmma with Intrinsic Water Contact Angle Below 90°" *Polymer*, Vol. 48, No. 26, pp. 7455-7460, 2007.
- [45] Yadav, A., Prasad, V., Kathe, A. A., Raj, S., Yadav, D., Chandrasekaran, S. and Nadanathangam, V., "Functional Finishing in Cotton Fabrics Using Zinc Oxide Nanoparticle" *Bulletin of Materials Science*, Vol. 29, pp. 641-645, 2006.
- [46] Sagadevan, S. and Shanmugam, S., "A Study of Preparation, Structural, Optical, and Thermal Conductivity Properties of Zinc Oxide Nanofluids" *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, Vol. 2015, pp. 0-0, 2015.



مطالعه تجربی اثر نانولوله هالوسایت و الاستومر آکریلونیتریل بوتادین رابر بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های PVC/NBR/HNT

سهراب پیروی¹، محمدرضا نخعی^{2*}، پدram صفرپور²، قاسم نادری³

1- دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، ایران، تهران

3- استاد مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

* صندوق پستی 16589-53571، sbu.ac.ir، nakhaei@sbu.ac.ir، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 1400/02/28	در سال‌های اخیر نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر پایه پلیمر به دلیل خواص مکانیکی، شیمیایی و حرارتی خوب، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف مثل کشتی‌سازی، هوافضا، خودروسازی و پزشکی داشته است. هدف از انجام این تحقیق مطالعه و بررسی تأثیر نانوذرات نانولوله هالوسایت (HNTs) و لاستیک آکریلونیتریل بوتادین رابر (NBR) بر خواص مکانیکی و ریزساختار ترموپلاستیک الاستومر بر پایه پلی‌وینیل کلراید/لاستیک آکریلونیتریل بوتادین رابر است. روش پاسخ سطح (RSM) با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) برای بررسی خواص مکانیکی مثل استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست مورد استفاده قرار گرفت. ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین استحکام کششی در 4.7 درصد وزنی نانولوله‌های هالوسایت بدست می‌آید و برای درصدهای بالا، استحکام کششی کاهش می‌یابد. افزایش مقدار لاستیک NBR از ۲۰ تا ۴۰ درصد وزنی، باعث کاهش مداوم استحکام کششی می‌شود. ازدیاد طول در هنگام شکست با افزایش مقدار NBR افزایش می‌یابد درحالی که ازدیاد طول در هنگام شکست با افزایش مقدار HNT کاهش می‌یابد. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که سطح شکست نمونه‌ها با افزایش استحکام، زبرتر می‌شود.
پذیرش: 1400/08/15	
کلیدواژگان:	
نانوکامپوزیت	
نانولوله هالوسایت	
ترموپلاستیک الاستومر	
مدول کششی	
ازدیاد طول	

Experimental study the effects of halloysite nanoparticles and acrylonitrile butadiene rubber elastomer on mechanical properties of PVC/NBR/HNT nanocomposites

Sohrab Peyravi¹, Mohammad Reza Nakhaei^{2*}, Pedram Safarpour², Ghasem Naderi³

1- Faculty of Mechanic and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Faculty of Mechanic and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16589-53571, Tehran, Iran, m_nakhaei@sbu.ac.ir

Keywords

Nanocomposite
Halloysite Nanotube
Thermoplastic Elastomer
Tensile Strength
Elongation at break

Abstract

In recent years, polymer-based nanocomposites have been widely used in various industries such as shipping, aircraft, automotive, and medical industries due to their good mechanical, chemical, and thermal properties. The aim of this study was to investigate the effect of halloysite nanotube nanoparticles (HNTs) and the nitrile butadiene rubber (NBR) content on the mechanical properties and microstructure of polyvinyl chloride / acrylonitrile-butadiene rubber (PVC/NBR) thermoplastic elastomer nanocomposites. Response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD) were used to study the tensile strength and elongation at break. The morphology of PVC/NBR/HNT nanocomposites were investigated by scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the maximum tensile strength was obtained at the HNT amount of 4.7 wt. %, while at high HNT levels the tensile strength will be decreased. Increase in NBR content from 20 wt. % to 40 wt. % causes an appreciable decrease in tensile strength. The elongation at break increased with increasing the NBR content, while the elongation at break decreased when the HNT content increased. The results of SEM show that the fractured surface of the samples gets rougher, the tensile strength increases.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Peyravi, S., Nakhaei, M. R., Safarpour, P., Naderi, G., "Experimental study the effects of halloysite nanoparticles and acrylonitrile butadiene rubber elastomer on mechanical properties of PVC/NBR/HNT nanocomposites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1494-1502, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.530671.1727>

1- مقدمه

امروزه سیستم های پلیمری چند فازي مانند ترموپلاستیک الاستومرها به دلیل ساختار خاص و خواص مکانیکی متنوعی که دارند مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. تقویت ترموپلاستیک الاستومرها با استفاده از ذرات نانو نشان دهنده یک رویکرد متریکی برای دستیابی به ماده ای با خواص مطلوب برای کاربردهای مختلف است. نانوکامپوزیت های ترموپلاستیک الاستومر به دلیل خصوصیات مکانیکی و فرایند پذیری خوب، موادی جذاب برای کاربردهای مهندسی هستند که خواص آن ها وابستگی زیادی به ریزساختار دارند [1]. برای افزایش خواص حرارتی، الکتریکی و مکانیکی ماتریس های پلیمری، از نانوذرات مختلف مثل خاک رس، نانو لوله های کربنی، کربنات سدیم و نانو لوله های هالوسایت (HNT) مورد استفاده قرار می گیرد [2]. پلی وینیل کلراید (PVC) از نظر فنی به طور گسترده ای در صنایع مختلف مانند سیم، پوشش کابل، پوشش تسمه نقاله، روکش، پوشش شلنگ، واشر، کفش و محصولات تلفن همراه مورد استفاده قرار گرفته است [3].

نانولوله های هالوسایت موادی هستند که در اندازه های نانومتری و به صورت یکنواخت به صورت طبیعی و در مدت زمان طولانی در زمین تشکیل شده اند. این مواد از دو لایه آلومینیوم، سیلیکون، هیدروژن و اکسیژن تشکیل شده اند. نانولوله های هالوسایت به صورت لوله های پیچ در پیچ هستند. این نانو لوله ها دارای قطر نسبی 100 نانومتر و حداقل طول 500 نانومتر هستند. دلیل پیچ در پیچ بودن نانولوله های هالوسایت کرنش ناشی از عدم همخوانی دو لایه دی اکسید سیلیکون و اکسید آلومینیوم می باشد [4]. نانولوله های هالوسایت به دلیل مقاومت حرارتی، سازگاری و مقاومت مکانیکی نسبتاً بالایی که دارند، به عنوان گزینه های مناسبی برای استفاده در ماتریس های پلیمری هستند. همچنین به دلیل قیمت پایین آن ها نسبت به نانو ساختارهای کربنی، می توانند به عنوان گزینه مناسبی به جای نانولوله های کربنی چندجداره (MWCNT) در نظر گرفته شوند [5، 6].

تحقیقات زیادی در مورد PVC به عنوان فاز ماتریس و ترموپلاستیک الاستومر PVC/NBR انجام شده است [7-9]. لیو و همکاران به بررسی خواص مکانیکی و مورفولوژی ترکیب PVC/HNT پرداختند که با افزودن ذرات نانو، خواص مکانیکی در مقایسه با PVC خالص افزایش می یابد. همچنین، مقاومت کششی و مدول کششی و مدول خمشی به طور قابل توجهی افزایش یافت [10]. حاجی بابا و همکاران به بررسی مورفولوژی و خواص مکانیکی در ترکیب PVC/NBR با حضور دو نانوذره متفاوت خاک رس و نانو لوله های کربنی تک جداره پرداختند. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که با افزایش این نانوذرات، خواص مکانیکی افزایش پیدا می کند به طوری که در 1 درصد وزنی از SWNT و 5 درصد وزنی از نانوذرات خاک رس خواص تقریباً مشابهی بدست آمد [2].

1-1- روش پاسخ رویه سطح (RSM)

روش پاسخ سطح (RSM) مجموعه ای از روش های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل تعیین می کند. هدف در طرح های رویه پاسخ، بهینه سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیر ورودی) می باشد. در هر آزمایش تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می شود [11، 12]. انتخاب طرح های آزمایش می تواند تأثیر زیادی بر روی تخمین و هزینه ساخت مدل سطح پاسخ داشته باشند [13]. در سال های اخیر

استفاده از روش های طراحی آزمایشات برای بهینه سازی خواص نانوکامپوزیت های ساخته شده بسیار استفاده شده است. قاسمی و همکاران به بررسی مدول کششی و استحکام ضربه در ترکیب $PP^2/LLDPE^3/TiO_2$ پرداختند که با استفاده از روش پاسخ سطح تعداد آزمایش و هزینه کاهش یافت [14]. مقری و همکاران به بررسی رفتار رئولوژیکی ترکیب PVC/NBR با نانوذره خاک رس پرداختند که داده های تجربی با استفاده از جدول آنالیز واریانس ($ANOVA^4$) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [15]. در روش پاسخ سطح مدل کلی بدست آمده به صورت معادله (1) است:

$$R = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i x_i + \sum_{i=1}^k B_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} B_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در معادله 1 به ترتیب R پاسخ، B_0 ضریب ثابت، B_{ij} و B_{ii} به ترتیب ضرایب خطی، درجه دوم و اثر متقابل می باشند. $x_i x_j$ متغیرهای مستقل و ε خطای استاندارد است.

از آنجا که تا به حال تحقیقی در زمینه بهینه سازی خواص مکانیکی کامپوزیت های PVC/NBR با نانوذرات HNT انجام نشده است، در تحقیق حاضر اثر نانوذرات HNT و لاستیک NBR و برهم کنش این دو بر روی خواص مکانیکی استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست از روش پاسخ سطح با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار می گیرد. ریزساختار نانوکامپوزیت PVC/NBR/HNT با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مکانیکی مورد بررسی قرار می گیرد.

2- تجربی

2-1- مشخصات مواد اولیه

در این پژوهش از پلی وینیل کلراید (S-PVC) با مقدار K معادل 65 محصول شرکت پتروشیمی بندر امام خمینی (ایران)، پودر پایدارکننده بر پایه قلع با چگالی 1.18 گرم بر سانتی متر مکعب ساخت شرکت ایران شیمی، لاستیک آکریلونیتریل بوتادین رابر با 34 درصد آکریلونیتریل، گرانیروی مونی 41ML در 100 درجه سانتی گراد و چگالی 2.2 گرم بر سانتی متر مکعب محصول شرکت کومهو (کره جنوبی) و نانولوله های هالوسایت با چگالی 2.55 گرم بر سانتی متر مکعب محصول شرکت ایمریس (نیوزلند) استفاده شده است. مشخصات نانولوله هالوسایت و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری به ترتیب در جدول 1 و شکل 1 آورده شده است.

2-2- دستگاه ها و روش ساخت

2-2-1- ساخت نمونه ها

برای ساخت نمونه ها، ابتدا نانولوله های هالوسایت در دمای 80 درجه سانتی گراد به مدت 8 ساعت داخل دستگاه آون جهت رطوبت گیری قرار گرفتند. اختلاط نمونه ها در دمای 160 درجه سانتی گراد و سرعت دورانی 50 دور بر دقیقه و به وسیله دستگاه مخلوط کن داخلی مکانیکی (Brabender) انجام شد. نحوه اختلاط به این صورت است که ابتدا پایدارکننده با پایه قلع با PVC با نسبت درصد وزنی 1 به 5 جهت جلوگیری از سوختن PVC و بالا بردن خواص آن ترکیب شده و درون دستگاه ریخته می شود.

جدول 1 مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانولوله هالوسایت

Table 1 Physical and chemical properties of halloysite nanotubes

³ Linear low density polyethylene

⁴ Analysis of variance

¹ Response surface methodology

² Polypropylene

ترتیب نشان دهنده تغییر داده ها در نزدیکی میانگین و مقدار پایین ترین سطح اهمیت می باشد. در واقع مقدار P نشان دهنده تأثیرگذاری متغیر ورودی بر روی پاسخ است بطوریکه مقدار P باید کمتر از 0.05 باشد تا متغیر ورودی مؤثر در نظر گرفته شود [16]. با توجه به نتایج بدست آمده برای ضرایب F در جداول آنالیز واریانس، درصد لاستیک آکریلونیتریل بوتادین به ترتیب عدد 423.94 و 246.93 را برای استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست به خود اختصاص داده است. لذا این پارامتر نسبت به درصد نانولوله های هالوسایت، تأثیر متقابل آن ها و ضریب دوم آن ها، بیشترین تأثیر بر روی استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست را دارد.

جدول 2 پارامترهای کنترل فرایند و حدود آن ها در روش پاسخ سطح RSM
Table 2 Process control parameters and their limits in surface response method

متغیر	واحد	علامت اختصاری	سطح					
			2	1	0	-1	-2	
NBR	Wt %	N	50	40	30	20	10	
HNT	Wt %	H	8	6	4	2	0	

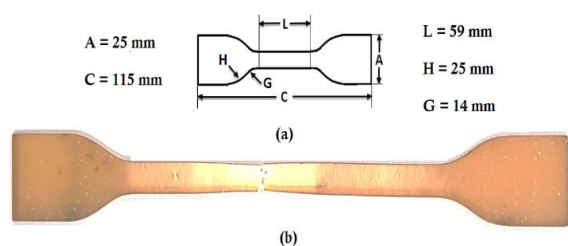


Fig. 2 (a) Schematic of tensile specimen and (b) tensile specimen after tensile test

شکل 2 الف (شماتیک نمونه کشش ب) نمونه کشش بعد از آزمون کشش

مطابق جدول آنالیز واریانس ضرایب خطی متغیرهای ورودی NBR و HNT و تأثیر متقابل پارامترهای مواد شامل HNT × NBR بر پاسخها تأثیر گذارند. ضرایب مرتبه ی دوم متغیرهای ورودی HNT و NBR بر روی استحکام کششی مؤثر است ولی با توجه به مقدار P بزرگ تر 0.05 مرتبه دوم HNT، ضریب این مؤلفه بر روی پاسخ ازدیاد طول در هنگام شکست مؤثر نیست. بر اساس نتایج تجربی و پیش بینی شده در محدوده تعیین شده برای متغیرها، مدل درجه دوم در معادله 2 و 3 به صورت مقادیر کدبندی واقعی برای مدول کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست ارائه شده است. معادلات ریاضی بین متغیرها و پاسخها بر اساس مقادیر کدبندی:

$$Y_{\text{Tensile}} = 20.83 - 3.99 \times \text{NBR} + 0.66 \times \text{HNT} + 0.92 \times \text{NBR} \times \text{HNT} - 0.60 \times \text{NBR}^2 - 0.90 \times \text{HNT}^2 \quad (2)$$

$$Y_{\text{Elongation}} = 47 + 18.67 \times \text{NBR} - 9.50 \times \text{HNT} - 5.50 \times \text{NBR} \times \text{HNT} + 4.25 \times \text{NBR}^2 \quad (3)$$

معادلات ریاضی بین متغیرها و پاسخها بر اساس مقادیر واقعی:

$$Y_{\text{Tensile}} = 27.98 - 0.22 \times \text{NBR} + 0.73 \times \text{HNT} + 0.046 \times \text{NBR} \times \text{HNT} - 0.006 \times \text{NBR}^2 - 0.22 \times \text{HNT}^2 \quad (4)$$

$$Y_{\text{Elongation}} = 6.25 + 0.41 \times \text{NBR} - 8 \times \text{HNT} - 0.275 \times \text{NBR} \times \text{HNT} + 0.43 \times \text{NBR}^2 \quad (5)$$

جدول 3 ماتریس طراحی و مقادیر پاسخها

Properties	Value
PH	3.5-4.5
Specific Gravity	2.55
Surface area, m ² /gm	20
Moisture content, %	3
Sio ₂ content%	49.5
AL ₂ O ₃ content%	35.5

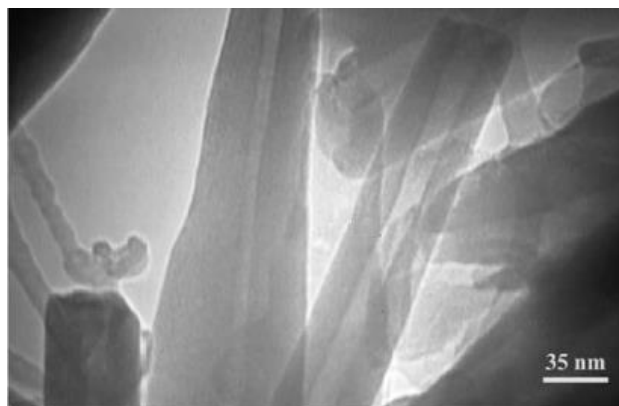


Fig. 1 Transmission electron scanning of HNT

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری از نانولوله های هالوسایت

پس از ۱ دقیقه NBR به دستگاه اضافه می شود. پس از ثابت شدن گشتاور دستگاه مخلوط کن داخلی، نانوذره به ترکیب اضافه می شود و مجدد پس از ثابت شدن گشتاور، اختلاط به پایان می رسد. صفحات با ابعاد 120×120×1 میلی متر در دمای 160 درجه سانتی گراد و فشار 1.5 مگاپاسکال ساخته شد. طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design Expert نسخه 8.0.2 و روش پاسخ سطح با استفاده از طراحی مکعب مرکزی انجام شد و مطابق جدول 2، متغیرهای ورودی NBR و HNT با سطوح مختلف در نظر گرفته شد. مطابق طراحی آزمایش انجام شده تعداد آزمایشها طراحی شده برای ترکیب PVC/NBR و تقویت کننده های HNT در جدول 3 آورده شده است.

2-2-2- آزمون کشش

نمونه های آزمون کشش مطابق استاندارد D412 به شکل دمبلی و از صفحات پرس شده با ضخامت 1 میلی متر تهیه شد. آزمون کشش با سرعت کشش 500 mm/min با استفاده از دستگاه Hiwa ساخت کشور ایران انجام شد. نتایج آزمون کشش جدول 3، میانگین سه بار تکرار هر آزمایش با شرایط یکسان است. شماتیک نمونه کشش و نمونه کشش بعد از آزمون کشش در شکل 2 نشان داده شده است.

3- نتایج و بحث

1-3- جدول آنالیز واریانس

بررسی نتایج آزمون کشش در نرم افزار Design expert انجام شد که نتایج مربوط به آنالیز واریانس (ANOVA) استحکام کششی و تغییر طول در هنگام شکست به ترتیب در جدول 4 و 5 آورده شده است. آنالیز واریانس داده ها و آزمون F جهت آنالیز داده ها و بدست آوردن روابط ریاضی با بهترین تطابق و همخوانی بین متغیرهای ورودی درصد نانولوله هالوسایت و درصد لاستیک NBR و خواص مکانیکی استفاده شده است. مقادیر P و F در این جدول به

نمودارهای مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی شده پاسخ برای استحکام کششی و ازدیاد طول در شکل 3 و 4 نشان داده شده است. نقاط موجود در نمودار یک خط مستقیم را نشان می‌دهد که بیانگر یک مدل مناسب است. نزدیک بودن نقاط به خط با شیب 45 بیانگر همبستگی قوی بین نتایج و معادلات بدست آمده را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای بدست آمده و مقادیر ضریب همبستگی R برای استحکام کششی و ازدیاد طول، می‌توان گفت که معادلات توضیحی مناسب از ضریب رگرسیون خطی می‌باشند [16]. همچنین برای مشخص کردن اعتبار مدل بدست آمده سه آزمایش در شرایط غیر از شرایط در نظر گرفته شده در جدول 3 انجام شد که مقادیر واقعی بدست آمده با مقادیری که از مدل ریاضی بدست آمده بود در جدول 6 نشان داده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود مقدار درصد خطا بین مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی زیر 7٪ است.

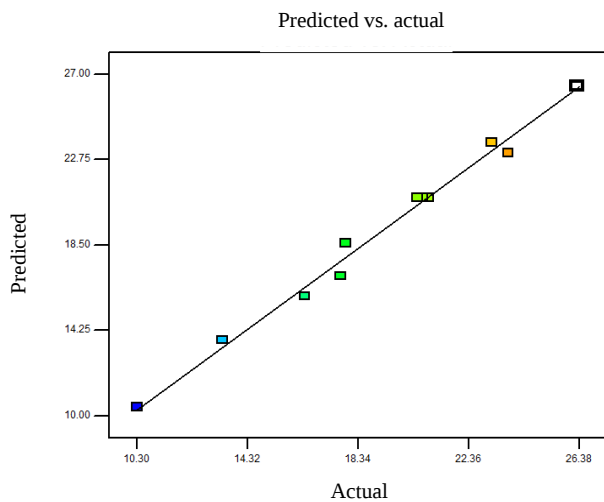


Fig. 3 Diagram of actual and predicted result of tensile strength

شکل 3 نمودار پاسخ‌های واقعی و پیش‌بینی شده استحکام کششی

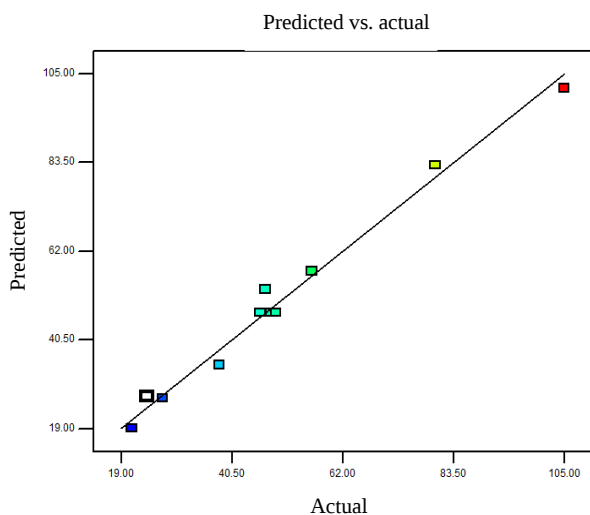


Fig. 4 Diagram of actual and predicted result of elongation at break

شکل 4 نمودار پاسخ‌های واقعی و پیش‌بینی شده ازدیاد طول در هنگام شکست

جدول 6 نتایج آزمون‌های اعتبار سنجی

Table 6 Validation of test results

² Lack of Fit
1497

Table 3 Design matrix and values of responses

شماره آزمایش	PVC (wt %)	NBR (wt %)	HNT (wt %)	TS (MPa)	Eb (%)
1	66	30	4	20.9	48
2	54	40	6	17.7	47
3	46	50	4	10.3	105
4	66	30	4	20.7	49
5	78	20	2	23.2	38
6	66	30	4	20.5	46
7	86	10	4	26.3	24
8	58	40	2	13.4	80
9	74	20	6	23.8	27
10	62	30	8	17.9	21
11	70	30	0	16.4	56

جدول 4 آنالیز واریانس برای استحکام کششی

Table 4 Analysis of variance for tensile strength

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربعات اصلی	ضریب F	ضریب پی
رابطه	216.77	5	43.35	96.13	< 0.0001
N-NBR	191.20	1	191.20	423.94	< 0.0001
H-HNT	5.20	1	5.20	11.53	0.0193
H×N	3.42	1	3.42	7.59	0.0401
N ²	7.14	1	7.14	15.83	0.0105
H ²	15.49	1	15.49	34.40	0.0021
باقیمانده	2.26	5	0.45	-----	-----
عدم تناسب	2.18	3	0.73	18.13	0.0527
R ²	0.9897		Adj - R ²	0.9794	

جدول 5 آنالیز واریانس برای ازدیاد طول در هنگام شکست

Table 5 Analysis of variance for elongation at break

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربعات اصلی	ضریب F	ضریب P
رابطه	6088.97	5	1217.79	71.92	0.0001
N-NBR	4181.33	1	4181.33	246.93	< 0.0001
H-HNT	1083.00	1	1083.00	63.96	0.0005
H×N	121.00	1	121.00	7.15	0.0442
N ²	348.63	1	348.33	20.59	0.0062
H ²	97.71	1	97.71	5.77	0.0615
باقیمانده ¹	84.67	5	16.93	-----	-----
عدم تناسب ²	80.00	3	26.67	11.43	0.1169
R ²	0.9896		Adj - R ²	0.9726	

بر اساس معادله 6 هرچه میزان پاسخ به عدد 1 نزدیک‌تر باشد همبستگی قوی‌تر و مثبت بین نتایج تجربی و پیش‌بینی خواهیم داشت و به دنبال آن خطای کم‌تری را بدست خواهد آمد [17].

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2][\sum (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (6)$$

با توجه به جدول 5 مربوط به جدول آنالیز واریانس مدول کششی مقدار ضریب همبستگی R و ضریب همبستگی تعدیل یافته برای استحکام کششی به ترتیب برابر 0.9897 و 0.9794 و برای ازدیاد طول در هنگام شکست به ترتیب برابر 0.9896 و 0.9726 است که نشان‌دهنده همبستگی کافی با رگرسیون خطی مناسب است [17].

2- اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی:

¹ Residual

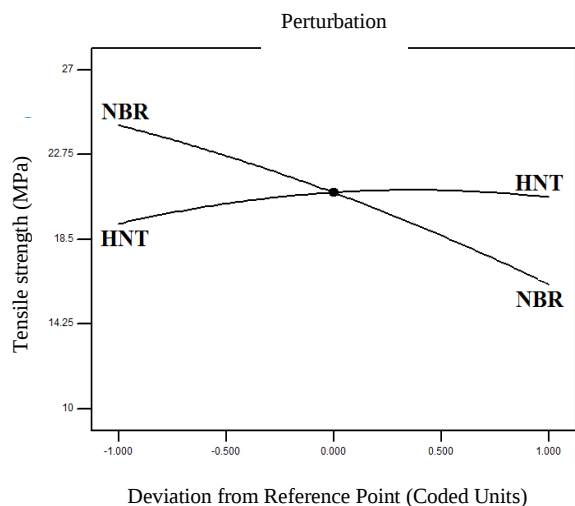


Fig. 5 Effect of all factor on tensile strength

شکل 5 تأثیر همه فاکتورها بر روی استحکام کششی

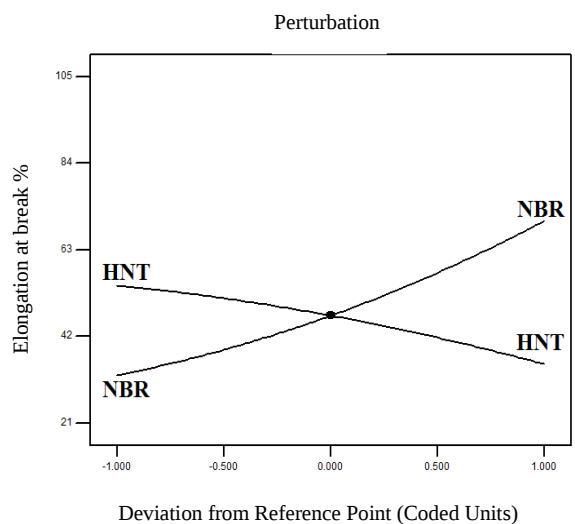


Fig. 6 Effect of all factor on elongation at break

شکل 6 تأثیر همه فاکتورها بر روی ازدیاد طول در هنگام شکست

4-3- تأثیر متقابل متغیرهای ورودی بر استحکام کششی

شکل 7 (a) نمودار دوبعدی تأثیر هم‌زمان دو متغیر درصد نانولوله‌های هالوسایت و درصد لاستیک را روی پاسخ‌ها نشان می‌دهد در حالی که در شکل 7 (b) نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی به عنوان تابعی از دو متغیر در یک زمان برای استحکام کششی است. همانطور که در شکل دوبعدی 7 (a) نشان داده شده است، در 2 درصد وزنی نانو لوله‌های هالوسایت، با افزایش مقدار NBR از 20 درصد وزنی تا 40 درصد وزنی، مقدار استحکام کششی از 24 به 14 مگاپاسکال کاهش پیدا می‌کند. در 30 درصد وزنی لاستیک NBR، با افزایش هالوسایت از 2 تا 4.7 درصد وزنی، استحکام کششی از 19 به 21.2 مگاپاسکال افزایش یافته و بعد از این درصد وزنی استحکام با شیب کم کاهش پیدا خواهد کرد بطوریکه این مقدار در 6 درصد وزنی از نانولوله هالوسایت معادل 20.5 مگاپاسکال بدست آمد. مطابق شکل سه‌بعدی 7 (b)، بیش‌ترین مقدار استحکام کششی برابر 23.34 مگاپاسکال خواهد بود که در 20 درصد وزنی از الاستومر و 3.7 درصد وزنی از تقویت‌کننده بدست آمده است و در مقایسه با مقدار متوسط استحکام کششی ترکیب PVC/NBR (80/20) بدون ذرات تقویت‌کننده، 41/7 درصد افزایش داشته است. کمترین مقدار مدول کششی در 40 درصد وزنی از NBR

شماره آزمایش	NBR (wt %)	HNT (wt %)	TS (MPa)	Eb (%)	مقدار واقعی
1	20	4	25.9	30.9	مقدار واقعی
			24.2	32.5	مقدار پیش‌بینی
			6.5	5.1	درصد خطا
2	30	6	20.2	36.4	مقدار واقعی
			20.6	35.2	مقدار پیش‌بینی
			1.9	3.2	درصد خطا
3	40	4	15.9	68.1	مقدار واقعی
			16.3	69.9	مقدار پیش‌بینی
			2.5	2.6	درصد خطا

3-3- تأثیر متغیرهای ورودی بر خواص مکانیکی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ANOVA و روابط بدست آمده 2 تا 5، مشخص می‌شود مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی تأثیر متغیرهای ورودی و اثر متقابل آن‌ها بر روی خواص مکانیکی مناسب است. شکل 5 و 6 نشان‌دهنده تأثیر متغیرهای ورودی بر روی استحکام کششی و ازدیاد طول است که تأثیر همه عوامل بر استحکام کششی و ازدیاد طول در حالتی بررسی می‌شود که متغیرهای دیگر در سطح میانی (0) قرار دارند. مطابق شکل 5، افزایش استحکام کششی مشاهده شده ترکیب PVC/NBR با افزایش نانو-لوله‌های هالوسایت را می‌توان به برهم‌کنش‌های نانوذرات با پلیمر ماتریس دانست که ناشی از سطح زیاد ایجاد شده به‌واسطه پخش نانوذره در زمینه پلیمری است. چسبندگی بیشتر پلیمر و نانوذره باعث جدایش کمتر آن‌ها در هنگام اعمال تنش می‌شود و در نتیجه استحکام کششی افزایش می‌یابد [18]. در تحقیقات گذشته نتایجی مبنی بر افزایش استحکام کششی ترکیبات پلیمری مختلف در حضور نانوذرات نیز گزارش شده است. با افزایش درصد نانو لوله‌های هالوسایت از سطح میانی، استحکام با شیب ملایم کاهش می‌یابد. کاهش استحکام کششی در نمونه‌های با درصد‌های بیشتر نانو لوله‌ها، به دلیل کلوخه شدن نانو لوله‌ها درون فاز ماتریس است که با توجه به کلوخه شدن نانو لوله‌ها، این کلوخه‌ها، نقاط مناسبی برای تمرکز تنش است و با اعمال نیرو، شروع ترک از این نقاط در نمونه‌ها شروع می‌شود و سریع رشد خواهد کرد که در مطالعات قبلی نیز مشاهده شده است. مطابق شکل 6 کاهش ازدیاد طول تا شکست همراه با افزایش درصد نانولوله‌های هالوسایت در دیگر ترکیب‌های ترموپلاستیک الاستومر تقویت شده با نانوذرات را سایر پژوهشگران نیز گزارش کرده‌اند. کاهش ازدیاد طول به این دلیل است که افزودن نانوذرات، باعث محدود کردن زنجیره‌های پلیمری شده و در نتیجه حرکت آن‌ها را محدود می‌کنند. با توجه به این نکته مقدار ازدیاد طول تا شکست نمونه‌ها‌های تقویت شده با نانوذرات نسبت به نمونه بدون ذره کمتر خواهد بود و هرچه درصد نانوذرات بیشتر باشد باعث کاهش بیشتر ازدیاد طول در هنگام شکست خواهد شد. همچنین طبق گزارش‌های داده شده، کاهش ازدیاد طول در نقطه شکست می‌تواند وابسته به عواملی مانند ایجاد تمرکز تنش به‌واسطه حضور نانوذره باشد [19, 20]. مطابق شکل 5 و 6، با افزایش درصد NBR از 20 تا 40 درصد، استحکام کششی از 24.21 به 16.23 مگاپاسکال کاهش می‌یابد در حالی که افزایش طول در هنگام شکست از 32.6 به 69.9 درصد افزایش می‌یابد. علت کاهش استحکام کششی و افزایش ازدیاد طول در هنگام شکست به دلیل وجود فاز لاستیکی نرم‌تر در ساختار ترکیب است که در تحقیقات دیگر محققین نیز گزارش شده است [21, 22].

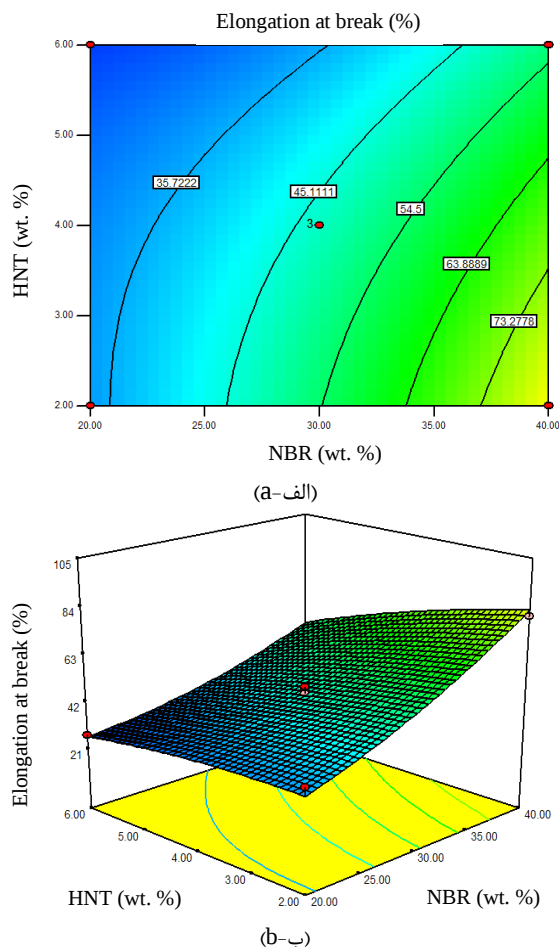


Fig. 8 Plot of a) 2D and b) 3D of effect of interaction between NBR and HNT on elongation at break

شکل 8 نمودار الف) دوبعدی و ب) سه بعدی اثر برهمکنش NBR و HNT بر ازدیاد طول در هنگام شکست

6-3- بهینه سازی چند متغیره

همانطور که در بخش 2-3 تا 4-3 مشاهده می شود زمانی که پارامترها به طوری انتخاب شود که یکی از خواص استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست ماکزیمم شود خاصیت دیگر در کمترین مقدار خود قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد لاستیک NBR، استحکام کششی کاهش می یابد در حالی که ازدیاد طول در هنگام شکست افزایش می یابد. مثلاً در حالی که یکی از استحکام کششی در بیشترین مقدار خود باشد ازدیاد طول در هنگام شکست در کمترین مقدار خواهد بود. در بهینه سازی چند متغیره مقادیر پارامترهای فرایند طوری انتخاب شوند که به طور هم زمان همگی مقادیر خواص مکانیکی (استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست) تا حد امکان در حداکثر مقدار ممکن خود باشند و یا به عبارتی تابع هدف، ماکزیمم شدن هم زمان خواص مکانیکی و تعادل بین آنها است. برای حداکثر شدن هم زمان خواص مکانیکی از مدل ریاضی بدست آمده از مرحله آنالیز داده ها استفاده می شود. مطابق جدول 7 پارامترهای فرایند به گونه ای انتخاب شدند تا به طور هم زمان بتوان کلیه خواص مکانیکی را به حداکثر رساند. نتایج پیشنهادی یا پیش بینی شده نشان می دهد که در صورت انتخاب پارامترهای درصد نانولوله های هالوسایت و درصد لاستیک NBR به ترتیب برابر 3.03 و 34.34 درصد، مقادیر پیش بینی شده برای استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست به ترتیب 18.3 مگاپاسکال و 61.3 درصد خواهد بود.

و 2 درصد وزنی از HNT معادل 13.75 مگاپاسکال است. علاوه بر این در مقایسه با تأثیر دو نانوذره SWNT و Nanoclay استفاده شده در ترکیب کامپوزیت PVC/NBR مقدار مدول کششی بالاتری در 4 درصد وزنی از HNT بدست آمد [8].

5-3- تأثیر متقابل متغیرهای ورودی بر ازدیاد طول در هنگام شکست

تأثیر متقابل درصد نانولوله های هالوسایت و درصد لاستیک NBR بر روی ازدیاد طول در هنگام شکست در شکل 8 به صورت دوبعدی و سه بعدی نشان داده شده است. شکل 8 (a) نشانگر تأثیر تغییرات ازدیاد طول نانوکامپوزیت PVC/NBR با تقویت کننده HNT در طرح کانتور دوبعدی است که تغییرات NBR بر روی این نمودار مورد بررسی قرار گرفت. این نمودار دارای 5 منطقه مختلف است که مقادیر ازدیاد طول در هنگام شکست از میزان کم به زیاد با رنگ آبی به رنگ سبز نشان داده شده است. ازدیاد طول در بیشترین مقدار خود در 40 درصد وزنی از NBR بیشتر از 73% و در کمترین مقدار خود در 20 درصد وزنی کمتر از 35% بدست آمد. شکل 8 (b) تأثیر متغیرهای NBR و HNT را به صورت هم زمان در ترکیب نانوکامپوزیت پلیمری PVC/NBR/HNT برای ازدیاد طول به صورت سه بعدی نشان می دهد. با افزایش HNT در درصد وزنی مختلف، ازدیاد طول کاهش می یابد. در 2 درصد وزنی از HNT، با افزایش مقدار لاستیک NBR از 20 تا 40 درصد، ازدیاد طول در هنگام شکست از 32.4 به 82.6 درصد افزایش می یابد در حالی که در 6 درصد وزنی از HNT، با افزایش مقدار لاستیک NBR از 20 تا 40 درصد، ازدیاد طول در هنگام شکست از 22.6 به 56.6 درصد افزایش می یابد.

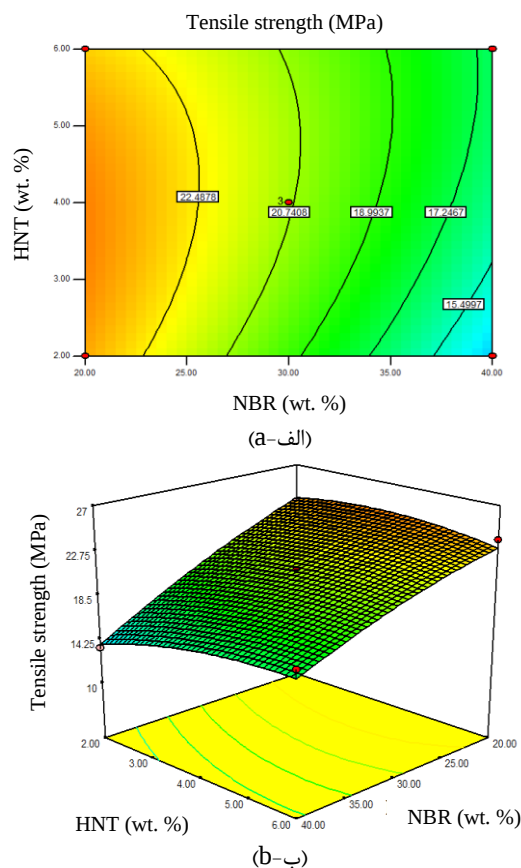


Fig. 7 Plot of a) 2D and b) 3D of effect of interaction between NBR and HNT on tensile strength

شکل 7 نمودار الف) دوبعدی و ب) سه بعدی اثر برهمکنش NBR و HNT بر استحکام کششی

- با افزایش مقدار NBR از 20 درصد وزنی تا 40 درصد وزنی، زمانی که درصد نانوذرات هالوست 2 درصد وزنی باشد، مقدار استحکام کششی از 24 به 14 مگاپاسکال کاهش پیدا می کند.

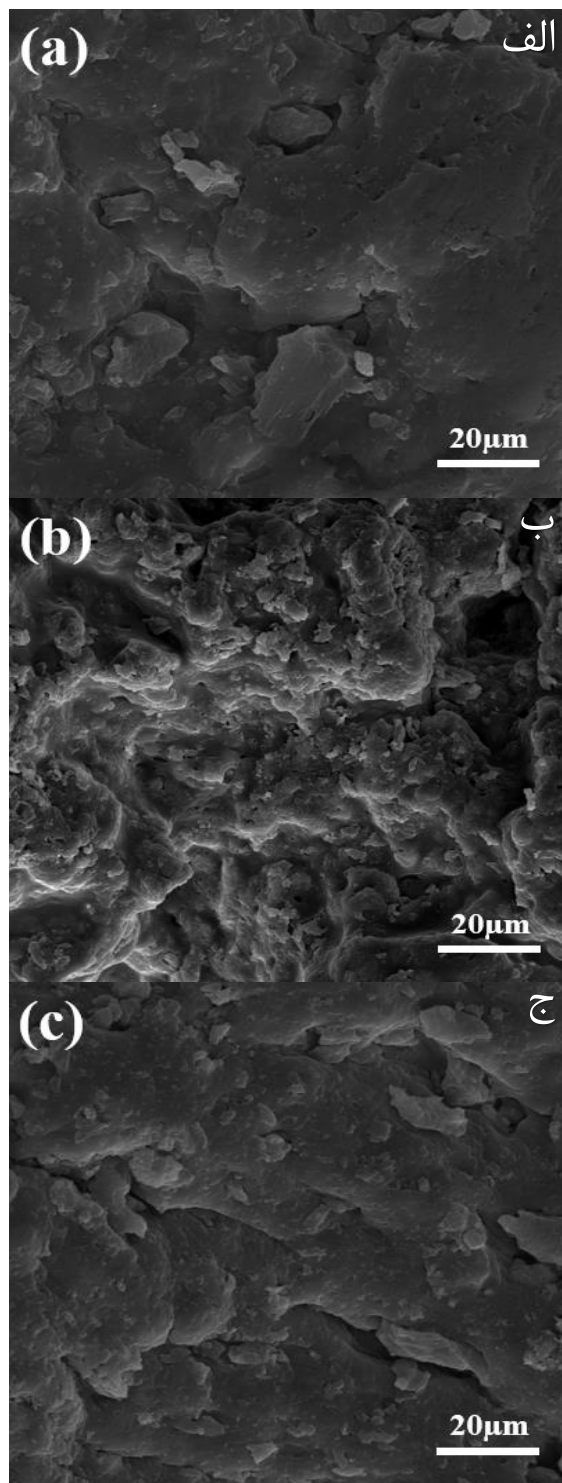


Fig. 9 Scanning electron microscope image of (a) PVC / NBR blend and nanocomposites with (b) 4 wt. % HNT and (c) 8 wt. % HNT

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) ترکیب PVC/NBR (ب) نانوکامپوزیت با 4 درصد وزنی NBR (ج) 8 درصد وزنی از HNT

جدول 7 متغیرهای موادی برای بیشینه شدن همزمان خواص مکانیکی

Table 7 Material variables for simultaneous maximization of mechanical properties

Eb (%)	TS (MPa)	HNT (wt %)	NBR (wt %)
61.3	18.3	34.34	3.03

7-3- بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت ها

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح شکست نانوکامپوزیت بر پایه PVC/NBR با نسبت 70/30 تقویت شده با 0، 4 و 8 درصد نانولوله های هالوسایت به ترتیب در شکل 9 (a تا c) قابل مشاهده است. با افزودن نانوذرات به ماده پایه، سطوح شکست زبرتر می شوند که این نشان می دهد که مقاومت ماده بیشتر شده است که نتایج ارائه شده با خواص مکانیکی ذکر شده در جدول 3 مطابقت دارد. همانطور که در شکل 9 (a)، سطح شکست کامپوزیت PVC/NBR که داری استحکام کششی 16.4 مگاپاسکال است نسبت به بقیه سطوح صافتر است. مطابق شکل 9 (b) با افزودن 4 درصد نانولوله هالوسایت، استحکام به 20.9 مگاپاسکال خواهد رسید که سطح شکست نیز زبرتر از نمونه PVC/NBR است. با افزودن 8 درصد نانوذرات به ماده پایه PVC/NBR، استحکام به 17.9 مگاپاسکال می رسد که این مقدار نسبت به نانوکامپوزیت با 4 درصد نانو دره کمتر خواهد بود و به همین دلیل سطح شکست این نمونه دارای زبری کمتری خواهد بود. کاهش خواص استحکام کششی در نمونه های با درصد های بیشتر نانوذرات به دلیل کلوخه شدن نانوذرات درون فاز ماتریس است. این نتایج با مشاهدات بسیاری از محققان مثل Panda و همکارانش [23] در مورد تأثیر استحکام و مدول کششی بر روی سطح شکست ماده تأیید می شود به طوری که اذعان داشتند با افزایش استحکام و مدول کششی ماده، سطوح شکست زبرتری مشاهده خواهد شد.

نحوه توزیع نانولوله هالوسایت را در ماتریس PVC/NBR در تصاویر EDAX¹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل 10 (a و b) مشاهده می شود، از مقایسه این تصاویر می توان استنباط کرد که در نمونه نانوکامپوزیت با 4 درصد وزنی نانولوله ها، نانولوله هالوسایت که به صورت ذرات ریز قرمز رنگ نشان داده شده است، توزیع بهتری را نسبت به دیگر نمونه ها دارد (شکل 10 (a)). در نمونه با 8 درصد وزنی هالوسایت، توزیع یکنواخت نانولوله هالوسایت صورت نگرفته است و این باعث کاهش خواص مکانیکی نسبت به نمونه با 4 درصد نانوذره شده است که این موضوع با نتایج تجربی بدست آمده در طی آزمون کشش مطابقت دارد. وجود کلوخه نانوذرات باعث کاهش شدید ازدیاد طول در هنگام شکست خواهد شد که با نتایج جدول 3 مطابقت می کند. بطوریکه با افزایش نانوذرات از 4 تا 8 درصد وزنی نانوذرات، ازدیاد طول در هنگام شکست 56 درصد کاهش می یابد.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر نانوذرات HNT و لاستیک NBR و برهم کنش این دو پارامتر بر روی خواص مکانیکی استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست از روش پاسخ سطح با استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار گرفت. خواص حرارتی و ریزساختار نانوکامپوزیت PVC/NBR/HNT با استفاده از گرماسنجی تفاضلی روبشی (DSC)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج بدست آمده به صورت زیر است:

¹ Energy Dispersive X-ray

5- مراجع

- [1] Nakhaei, M. R., Mostafapour, A. and Naderi, G., "Optimization of Mechanical Properties of PP/EPDM/Clay Nanocomposite Fabricated by Friction Stir Processing with Response Surface Methodology and Neural Networks" Polymer Composites, Vol. 38, pp. E421-E432, 2017.
- [2] Hajibaba, A., Naderi, G., Esmizadeh, E. and Ghoreishy, M. H. R., "Morphology and Dynamic-Mechanical Properties of PVC/NBR Blends Reinforced with Two Types of Nanoparticles" Journal of Composite Materials, Vol. 48, No. 2, pp. 131-141, 2014.
- [3] Asgarzadeh, Z. and Naderi, G., "Morphology and Properties of Unvulcanized and Dynamically Vulcanized PVC/NBR Blend Reinforced by Graphene Nanoplatelets" International Polymer Processing, Vol. 33, No. 4, pp. 497-505, 2018.
- [4] Paran, S., Naderi, G., Ghoreishy, M. and Dubois, C., "Essential Work of Fracture and Failure Mechanisms in Dynamically Vulcanized Thermoplastic Elastomer Nanocomposites Based on PA6/NBR/XNBR-Grafted Hnts" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 200, pp. 251-262, 2018.
- [5] Paran, S., Naderi, G. and Ghoreishy, M., "Microstructure and Mechanical Properties of Thermoplastic Elastomer Nanocomposites Based on PA6/NBR/HNT" Polymer Composites, Vol. 38, pp. E451-E461, 2017.
- [6] Khodabandelou, M., Aghjeh, M. K. R., Khonakdar, H. A. and Mazidi, M. M., "Effect of Localization of Carbon Nanotubes on Fracture Behavior of Un-Vulcanized and Dynamically Vulcanized PP/EPDM/MWCNT Blend-Nanocomposites" Composites Science and Technology, Vol. 149, pp. 134-148, 2017.
- [7] Mashhadzadeh, A. H., Fereidoon, A. and Ahangari, M. G., "Experimental and Multiscale Quantum Mechanics Modeling of the Mechanical Properties of PVC/Graphene Nanocomposite" Journal of Composite Materials, Vol. 54, No. 29, pp. 4575-4590, 2020.
- [8] Haghighat, N., Vatanpour, V., Sheydaei, M. and Nikjavan, Z., "Preparation of a Novel Polyvinyl Chloride (Pvc) Ultrafiltration Membrane Modified with Ag/TiO₂ Nanoparticle with Enhanced Hydrophilicity and Antibacterial Activities" Separation and Purification Technology, Vol. 237, pp. 116374, 2020.
- [9] Rezaei, P., Rezaei, M., Talebi, S. and Babaie, A., "Physico-Mechanical Properties and Cell Microstructure of Cross-Linked PVC/Organoclay Nanocomposite Foams Prepared at Various Processing Conditions" Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2020.
- [10] Liu, H., Wang, C., Qin, Y., Huang, Y. and Xiao, C., "Oriented Structure Design and Evaluation of Fe₃O₄/O-MWCNTS/PVC Composite Membrane Assisted by Magnetic Field" Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 120, pp. 278-290, 2021.
- [11] Acherjee, B., Kuar, A. S., Mitra, S. and Misra, D., "Modeling and Analysis of Simultaneous Laser Transmission Welding of Polycarbonates Using an Fem and Rsm Combined Approach" Optics & Laser Technology, Vol. 44, No. 4, pp. 995-1006, 2012.
- [12] Kumar, N. and Bandyopadhyay, A., "Simulation of the Effects of Input Parameters on Weld Quality in Laser Transmission Welding (Ltw) Using a Combined Response Surface Methodology (RSM)-Finite Element Method (Fem) Approach" Lasers in Engineering (Old City Publishing), Vol. 36, 2017.
- [13] Zhang, Y., Zhang, X., Yang, L. and Yu, X., "Optimization Design for Downhole Dynamic Seal Based on Response Surface Method" Advances in Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 1687814019828441, 2019.
- [14] Ghasemi, F. A., Daneshpayeh, S., Ghasemi, I. and Ayaz, M., "An Investigation on the Young's Modulus and Impact Strength of Nanocomposites Based on Polypropylene/Linear Low-Density Polyethylene/Titan Dioxide (PP/LLDPE/TiO₂) Using Response Surface Methodology" Polymer Bulletin, Vol. 73, No. 6, pp. 1741-1760, 2016.
- [15] Moghri, M., Zanjanijam, A. R., Seifi, L. and Ramezani, M., "An Investigation on Rheological Behavior of the Pvc/Nbr/Nanoclay Nanocomposites by Torque Rheometry: The Effects of Formulation Variables Using Response Surface Approach" Journal of Inorganic

- در 30 درصد وزنی لاستیک NBR، با افزایش نانولوله هالوسایت از 2 تا 4.7 درصد وزنی، استحکام کششی از 19 به 21.2 مگاپاسکال افزایش یافته و بعد از این درصد وزنی استحکام با شیب کم کاهش پیدا خواهد کرد بطوریکه این مقدار در 6 درصد وزنی از نانولوله هالوسایت معادل 20.5 مگاپاسکال بدست آمد.
- ازدیاد طول در بیشترین مقدار خود در 40 درصد وزنی از NBR بیشتر از 73% و در کمترین مقدار خود در 20 درصد وزنی کمتر از 35% بدست آمد.
- بهینه سازی چند متغیره نشان می دهد برای ماکزیمم شدن هم زمان خواص مکانیکی، باید پارامترهای درصد نانو لوله های هالوسایت و درصد لاستیک NBR به ترتیب برابر 3.03 و 34.34 انتخاب شود تا مقادیر استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست به ترتیب 18.3 مگاپاسکال و 61.3 درصد بدست آید.

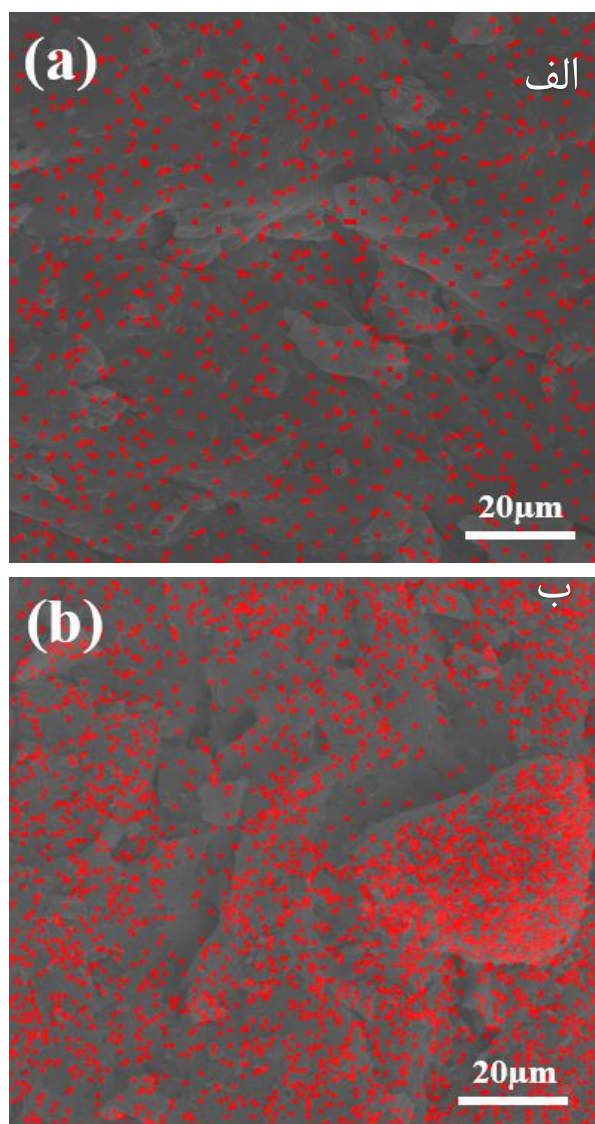


Fig. 10 EDAX images of a) PVC / NBR nanocomposites with (a) 4 wt. % HNT and (b) 8 wt. % HNT

شکل 10 تصاویر EDAX نانوکامپوزیت های با الف) 4 درصد وزنی NBR ب) 8 درصد وزنی HNT از

- and Organometallic Polymers and Materials, Vol. 27, No. 1, pp. 264-273, 2017.
- [16] Zinadini, S., Moradi, M. and Zinatizadeh, A. A. L., "Influence of Operating Variables on Performance of Nanofiltration Membrane for Dye Removal from Synthetic Wastewater Using Response Surface Methodology" International Journal of Engineering, Vol. 29, No. 12, pp. 1650-1658, 2016.
- [17] Ahmadi, A., Arab, N. M., Naderi, G. and Nakhaei, M., "Optimization of Co2 Laser Welding Process Parameters of PP/EPDM/Clay Nanocomposite Using Response Surface Methodology" Mechanics & Industry, Vol. 18, No. 2, pp. 220, 2017.
- [18] Zhang, Y., Zhang, X., Yang, L. and Yu, X., "Optimization Design for Downhole Dynamic Seal Based on Response Surface Method" Advances in Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 1687814019828441, 2019.
- [19] Nakhaei, M., Naderi, G. and Mostafapour, A., "Effect of Processing Parameters on Morphology and Tensile Properties of PP/EPDM/Organoclay Nanocomposites Fabricated by Friction Stir Processing" Iranian Polymer Journal, Vol. 25, No. 2, pp. 179-191, 2016.
- [20] Haghnegahdar, M., Naderi, G. and Ghoreishy, M., "Fracture Toughness and Deformation Mechanism of Un-Vulcanized and Dynamically Vulcanized Polypropylene/Ethylene Propylene Diene Monomer/Graphene Nanocomposites" Composites Science and Technology, Vol. 141, pp. 83-98, 2017.
- [21] Khodabandelou, M., Aghjeh, M. K. R., Khonakdar, H. A. and Mazidi, M. M., "Effect of Localization of Carbon Nanotubes on Fracture Behavior of Un-Vulcanized and Dynamically Vulcanized Pp/Epdm/Mwcnt Blend-Nanocomposites" Composites Science and Technology, Vol. 149, pp. 134-148, 2017.
- [22] Rashahmadi, S., Mosalman, S. and Hasanzadeh, R., "The Effect of Tio2 Nanoparticles on Mechanical Properties of Poly Methyl Methacrylate Nanocomposites (Research Note)" International Journal of Engineering, Vol. 30, No. 5, pp. 807-813, 2017.
- [23] Panda, B. P., Mohanty, S. and Nayak, S., "Mechanical Behavior and Fracture Toughness Evaluation of Multiphase Polymer Nanocomposites Using Impact and-Integral Via Locus Method" Chinese Journal of Engineering, Vol. 2013, 2013.



تحلیل تجربی و عددی استحکام باقی مانده استوانه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری فشاری متوالی

احمد گرامی¹، علی داور^{2*}، جعفر اسکندری جم³

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

2- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

3- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

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

اطلاعات مقاله:

چکیده

دریافت: 1400/02/30

پذیرش: 1400/09/16

کلیدواژگان

استحکام باقی مانده، استوانه مشبک کامپوزیتی، بارگذاری محوری فشاری متوالی، روش المان محدود، روش تجربی.

در این تحقیق، رفتار استحکام اولیه سازه استوانه مشبک کامپوزیتی تحت نیروی محوری فشاری در بارگذاری مرتبه اول و استحکام باقی مانده آن در بارگذاری مرتبه دوم، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، در روش تجربی، ابتدا سازه استوانه ای مشبک، با الگوی شبکه شش ضلعی، با استفاده از قالب سیلیکونی و دستگاه رشته پیچی، ساخته شده است. در آزمون بارگذاری تجربی مرتبه اول، سازه تحت نیروی محوری فشاری قرار گرفته و استحکام اولیه آن در آستانه فروریزش (اولین آسیب)، بدست آمده است. سپس، به منظور مطالعه استحکام باقی مانده، سازه آسیب دیده است. پس از باربرداری کامل و بازگشت به طول اولیه، تحت بارگذاری مرتبه دوم قرار گرفته است. اعتبارسنجی نتایج نیرو-جابجایی حاصل از نرم افزار المان محدود آباکوس با مقایسه با نتایج آزمون های بارگذاری تجربی صورت گرفته است. در ادامه، تحلیل عددی اثر انواع الگوهای شبکه لوزی و مثلثی بر استحکام اولیه و استحکام باقی مانده سازه انجام پذیرفته است. نتایج نشان می دهند که بیشترین نسبت نیروی تحمل شده به وزن (استحکام ویژه) در آستانه فروریزش سازه، به ترتیب مربوط به الگوهای شبکه مثلثی، شش ضلعی و لوزی در بارگذاری مرتبه اول و الگوهای شبکه شش ضلعی، مثلثی و لوزی در بارگذاری مرتبه دوم است. به طوری که در مرتبه دوم بارگذاری، الگوهای شبکه شش ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب 80.5، 69.11 و 54.01 درصد از استحکام اولیه خود را حفظ کرده اند. همچنین، الگوهای شبکه شش ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب از بیشترین انرژی جذب شده ویژه تا آستانه فروریزش برخوردارند.

Experimental and Numerical Study of Residual Strength of Composite Grid Stiffened Cylindrical Shells Under Sequential Compressive Axial Load

Ahmad Gerami¹, Ali Davar^{2*}, Jafar Eskandari Jam³

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

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

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

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

Keywords

Residual strength, Composite grid stiffened cylindrical shells, Sequential compressive axial load, Finite element method, Experimental method.

Abstract

In this research, the behavior of the initial strength of a composite lattice cylinder structure under axial compressive force in the first loading and its residual strength in the second loading stages have been studied. For this purpose, in the experimental method, first, the composite cylindrical structure, with a hexagonal lattice pattern, is made using a silicone mold and filament winding process. In the first experimental loading test, the structure is subjected to axial compressive force and its initial strength at the beginning of collapse (first damage) is obtained. Then, in order to study the residual strength, the damaged structure is subjected to the second loading stage after complete unloading and recovers its initial length. Validation of force-displacement results obtained from ABAQUS finite element software has been performed in comparison with the results of experimental loading tests. Next, the numerical analysis of the effect of various rhombic and triangular lattice patterns on the initial strength and residual strength of the structure is performed. The results show that the highest ratio of bearing force to weight on the collapse threshold of the structure in first loading stage is related to the triangular, hexagonal and rhombic, lattice patterns and hexagonal, triangular and rhombic lattice patterns, respectively in the second loading stage. After the second loading stage, hexagonal, triangular and rhombic lattice patterns retained 80.5%, 69.11% and 54.01% of their original strength, respectively. Also, hexagonal, triangular and rhombic lattice patterns have the highest specific absorbed energy up to the collapse threshold, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Gerami, A., Davar, A., Eskandari Jam, J., "Experimental and Numerical Study of Residual Strength of Composite Grid Stiffened Cylindrical Shells Under Sequential Compressive Axial Load", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1503-1513, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.529821.1726>

1- مقدمه

در چند دهه اخیر استفاده از مواد کامپوزیتی در طراحی سازه‌های پیشرفته، با توجه به اهمیت توأمان کاهش وزن و افزایش استحکام سازه‌ها، پیشرفت چشمگیری داشته است. امروزه رقابت بر سر بهینه‌سازی سازه‌ها می‌باشد به نحوی که بتوان بیشترین بهره را از خواص (مکانیکی، فیزیکی و ...) مواد کامپوزیتی برد. در این بین روش‌های نوین طراحی مهندسی از ویژگی‌های مواد مرکب بهره جسته و ساختارهای هدفمند را به وجود آورده‌اند. ساختارهای مشبک به عنوان یک ساختار هدفمند، از قرارگیری ریب‌های کامپوزیتی متصل به یکدیگر که تشکیل یک مجموعه پیوسته به صورت دو بعدی (صفحه‌ای) یا سه بعدی (فضایی) می‌دهند، تشکیل می‌شوند. دامنه مقاومت سازه‌های مشبک کامپوزیتی در برابر انواع آسیب‌ها بسیار وسیع می‌باشد. با توجه به تک راستا بودن الیاف در ریب‌ها بروز پدیده‌هایی همچون تورق بسیار کاهش می‌یابد. همچنین وجود شبکه‌ای از تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی در ساختار، سبب تغییر مسیر بارهای تخریبی در اطراف نقاط آسیب محلی شده و در نتیجه، این امر سبب افزایش تحمل این سازه‌ها می‌شود [1]. در تحقیقات جامع و کاربردی وسیلیو و همکارانش، یک فرآیند کامل از طراحی، ساخت و آزمون ساختارهای مشبک ارائه شده است. آنان در این تحقیقات، رفتار کمانشی استوانه‌های مشبک کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار داده‌اند و دریافتند، سازه‌های استوانه‌ای مشبک دارای ویژگی خودپایدارسازی¹ می‌باشند. به طوری که در شرایطی که این سازه‌ها تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد، ریب‌های مارپیچی فشار را در ریب‌های محیطی یا پوسته تبدیل به کشش کرده و بدین ترتیب بار فشاری، مشابه با یک نیروی فشاری داخلی عمل می‌کند. این فشار شکل استوانه‌ای سازه را تثبیت کرده و حساسیت پوسته را به عیوب شکلی کاهش و مقدار بار بحرانی را افزایش می‌دهد. همچنین راندمان وزنی این سازه‌ها به مراتب بیشتر از سازه‌های مشابه با تقویت‌کننده‌های غیر کامپوزیتی است [1-3]. تواترو و گوردال با استفاده از روش عددی به مطالعه بهینه‌سازی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری فشاری بر مبنای پارامترهای مؤثری نظیر عرض سطح مقطع ریب‌های مارپیچ و محیطی و فاصله ریب‌ها پرداختند و نقاط طراحی مناسب را تعیین نمودند [4]. موروزوف و همکارانش مطالعات گسترده‌ای را بر روی رفتار کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای و مخروطی تحت بارگذاری‌های مختلف اعم از بارگذاری محوری فشاری، بارگذاری خمشی و بارگذاری پیچشی، به صورت عددی و با استفاده از مدل‌های المان محدود انجام دادند. آن‌ها ریب‌ها را با المان‌های تیر² مدل کردند و زاویه پیچش مارپیچ ریب‌ها برای سازه مشبک را در محدوده 30 تا 35 درجه مناسب تشخیص دادند. آن‌ها همچنین اثرات طول پوسته، تعداد ریب‌ها و زاویه جهت‌گیری ریب‌ها را بر روی رفتار کمانشی این سازه‌ها بررسی کردند [5]. یزدانی و رحیمی در تحقیقاتی جداگانه به مطالعه پارامتری بر روی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی پرداختند و تأثیر چگالی و شکل تقویت‌کننده‌ها را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که بار کمانشی بحرانی برای پوسته‌هایی با شبکه مثلثی و شش‌ضلعی، به مراتب بیشتر از بار کمانشی بحرانی برای پوسته‌های تقویت نشده و پوسته‌های تقویت شده با شبکه لوزی می‌باشد. همچنین آن‌ها دریافتند که در بارگذاری محوری فشاری، افزودن تعداد ریب‌های مارپیچ مفیدتر از افزودن ریب‌های حلقوی است. علاوه بر این، آنان این سازه‌ها را تحت بارگذاری نوسانی قرار دارند و بهترین شکل تقویت‌کننده‌ها را پیشنهاد کردند و به این نتیجه رسیدند که تحت بار نوسانی، پوسته‌های مشبک، رفتاری به مراتب بهتر از پوسته‌های بدون

تقویت‌کننده دارند [6, 7]. لای و همکاران مطالعه عددی رفتار کمانشی (استحکام کمانشی و شکل مود کمانش) استوانه‌های مشبک کامپوزیتی با شش الگوی شبکه شامل لوزی، مثلثی، شش‌ضلعی، مثلثی دوران یافته، مثلثی ترکیب شده و مستطیلی تحت بارهای محوری فشاری، خمش خالص، پیچش و خمش عرضی را انجام داده‌اند. نتایج نشان داد الگوی مثلثی و مثلثی دوران یافته در برابر بار محوری فشاری و خمش خالص، از نظر بار کمانش ویژه، کارآمدتر هستند در حالی که در بارگذاری پیچشی و خمشی عرضی الگوی شش‌ضلعی کارآمدتر است [8]. مینگفان و همکارانش به مطالعه رفتار کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی به سه روش سفتی معادل، المان محدود و روش ترکیبی حاصل از ترکیب روش سفتی معادل و المان محدود پرداختند. آنان همچنین اثر نقص مواد را در تحلیل المان محدود به صورت مستقل بررسی کردند. مقایسه نتایج آزمون تجربی با سه روش مذکور نشان دادند که روش المان محدود از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد [9]. طالعزاده و رحیمی اثر نقص هندسی بر کمانش پوسته‌های ساده و مشبک کامپوزیتی با و بدون گشودگی را به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قراردادند. نتایج نشان دادند که میزان اثرگذاری نقص هندسی بر بار بحرانی پوسته مشبک، کمتر از پوسته‌های ساده است [10]. فدویان و همکارانش به منظور دست‌یابی به حداکثر بار قابل تحمل در بارگذاری محوری فشاری برای یک سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی به مطالعه فاکتورهای ساختی در فرآیند رشته‌پیچی پرداختند. آنان اثر چهار فاکتور ساخت کشش الیاف، سرعت پیچش، شرایط پخت و نوع الیاف بر کیفیت ساخت و استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی را بررسی کردند. با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی، اثر فاکتورهای ساخت مذکور در سه سطح و بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل آن‌ها (به صورت مجزا) بر متغیر پاسخ، مورد بررسی قرار گرفته است. فاکتورهای نوع الیاف و کشش الیاف به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه داشته‌اند. فاکتورهای نوع الیاف، کشش الیاف و سرعت پیچش، به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل بر روی متغیر پاسخ کارایی فشاری بوده‌اند [11]. داور و همکارانش به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی به مطالعه رفتار کمانشی سازه مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی با و بدون نانولوله کربنی به عنوان تقویت‌کننده، پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن 2٪ وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی در حین ساخت، نیروی قابل تحمل بیشینه را حدود 44٪ افزایش می‌دهد. این در حالی است که با افزایش کسر حجمی نانولوله بالاتر از 2٪ وزنی، به دلیل کاهش کیفیت پراکندگی و کلوخه‌ای شدن حداکثر نیروی قابل تحمل سازه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تجربی با نتایج مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مطابقت خوبی داشت [12]. خلیلی و همکارانش به روش تجربی و عددی به مطالعه نیم استوانه مشبک کامپوزیتی با شبکه لوزی تحت بار محوری فشاری پرداختند. همچنین در ادامه، اثر ضخامت پوسته، زاویه لایه-های پوسته، ارتفاع ریب و نوع شبکه مشبک را بررسی کردند. نتایج مطالعه آنان نشان داد نمونه با الگوی مثلثی قابلیت تحمل بار بیشتری دارد. و با افزایش ضخامت پوسته و ارتفاع ریب، قابلیت باربری سازه افزایش می‌یابد [13]. شاهقلیان و رحیمی به روش عددی و تحلیلی رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی را با استفاده از آنالیز ارتعاشات خطی و غیرخطی مورد مطالعه قرار دادند [14]. رستمی و شهرجری با استفاده از معادلات حاکم بر ساختارهای مشبک استوانه‌ای بر اساس میدان جابجایی و روابط تنش و کرنش به مطالعه کمانش استوانه مشبک کامپوزیتی با پوسته درونی و بیرونی

3- فرآیند ساخت نمونه های آزمایشگاهی

برای ساخت سازه های مشبک کامپوزیتی، چندین روش از جمله استفاده از قالب سیلیکونی، قالب ماشینکاری شده فلزی یا پلی اتیلنی و روش شکل دهی آزاد الیاف وجود دارد [1-3]. در این پژوهش برای ساخت نمونه، از روش رشته پیچی درون یک قالب سیلیکونی شیاردار استفاده شده است. مزیت های این روش عبارتند از:

- امکان شکل دادن راحت و درست الیاف در موقعیت شیارها و در نتیجه تأمین خواص مکانیکی و کیفیت عالی ریب ها.
 - هزینه پایین تر نسبت به دیگر روش های دقیق (به دلیل حذف فرآیند ماشین کاری)
 - امکان جداسازی بسیار راحت و سریع قطعه نهایی از قالب
 - امکان تولید چندین قطعه با یک قالب بر خلاف قالب های فومی
- در این روش، به یک قالب سیلیکونی برای شکل دادن دقیق الیاف آغشته به رزین نیاز است و پس از فراهم کردن آن، به کمک دستگاه رشته پیچی، الیاف به داخل این شیارها هدایت می شوند. پس از پخت کامل رزین، سازه از درون قالب به بیرون کشیده می شود.

برای ساخت یک قالب سیلیکونی از یک ورق پلکسی گلاس به ضخامت 4 میلی متر استفاده شده است. با توجه به حساسیت موضوع و دقت بالای کار، از دستگاه لیزر برای برش و ساخت قالب استفاده شده است. پس از ساخت قالب، سیلیکون به داخل آن ریخته می شود و پس از گذشت دو روز کامل، زمانی که پخت کامل شود، اقدام به درآوردن سیلیکون از درون قالب پلکسی گلاس می گردد (شکل 2).

با رول کردن قالب سیلیکونی مذکور به دور لوله ای استوانه ای، مندرل اصلی آماده عملیات رشته پیچی شده است. برای انجام عملیات پیچش الیاف از دستگاه رشته پیچی اتوماتیک استفاده شده است. این دستگاه با دقت و سرعت بالایی الیاف کولار آغشته به رزین را داخل شیارهای ایجاد شده بر روی مندرل هدایت می کند (شکل 3). تمامی ریب های هلیکال و محیطی، دارای ضخامت چهار میلی متری می باشند که از پیچش ده لایه الیاف رشته ای آغشته شده به رزین در داخل شیارهای قالب سیلیکونی متصل شده بر روی مندرل، ساخته شده اند.

برای پخت کامل این رزین ME101، مطابق اطلاعات شرکت سازنده، هفت روز زمان در دمای محیط، لازم است. پس از پایان این مدت زمان، با تخریب مندرل، نمونه از داخل قالب سیلیکونی خارج می شود. به منظور بدست آوردن مدول و استحکام کششی نهایی کامپوزیت، از آزمون نول¹ [16,17] و برای اندازه گیری خواص کششی رزین، از آزمون استاندارد ASTM D 638-03 استفاده شده است. همچنین با در نظر گرفتن خواص مکانیکی الیاف کولار و رزین اپوکسی و مراجعه به روابط میکرو مکانیک [18]، بقیه خواص مواد، با محاسبه بدست آمده اند. کسر حجمی الیاف نمونه ها، 60 درصد می باشد که در آزمایشگاه اندازه گیری شده است. خواص مواد در جدول 2 ارائه شده است. همچنین اصولاً باید حداقل سه نمونه استوانه مشبک کامپوزیتی ساخته شده و نتایج آزمون بارگذاری محوری، میانگین گیری شود. ولی به دلیل کمبود منابع مالی، تنها یک نمونه سازه ساخت شده است و نتایج تجربی حاصله، با نرم افزار آباکوس مقایسه گردیده، مطالعات پارامتری، به کمک نرم افزار آباکوس انجام گرفته که در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

و تحت فشار خارجی پرداختند. نتایج نشان داد افزایش پارامترهای زاویه، طول سلول مشبک و سطح مقطع باعث افزایش سختی معادل و بار بحرانی کماتش، تا قبل از رسیدن به مود کماتش موضعی تقویت کننده ها می شود. ولی افزایش بیشتر آن ها، کماتش موضعی و کماتش سازه را در پی دارد [15].

پژوهش حاضر، دارای دو هدف اصلی، مطالعه رفتار سازه استوانه ای مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری مرتبه اول و دیگری استحکام باقی مانده و قابلیت باربری مجدد سازه، تحت آزمون بار محوری فشاری مرتبه دوم قرار گرفته، می باشد. برای این منظور، سازه استوانه ای مشبک با شبکه شش ضلعی، به روش رشته پیچی در درون شیارهای قالب سیلیکونی ساخته شده است. سازه تحت بارگذاری محوری فشاری قرار گرفته، سپس به منظور بررسی اینکه چه ظرفیتی از ظرفیت تحمل بار اولیه سازه مذکور، قابلیت تحمل بارگذاری مجدد را دارد، سازه مذکور، تحت بارگذاری مجدد قرار گرفته است. همچنین، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس، مطالعه عددی بر روی سازه، با انواع شبکه های مثلثی، شش ضلعی و لوزی، با دو نوع المان S4R و SC8R انجام شده، نتایج با آزمون های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شده اند.

2- معرفی سازه

سازه مورد نظر، یک سازه استوانه ای مشبک با نوع شبکه شش ضلعی می باشد. در ساخت سازه، از الیاف کولار و رزین اپوکسی سرد کار، با نام تجاری ME101 استفاده شده است. این سازه، از هشت جفت ریب (تقویت کننده) مارپیچ و شش ریب (تقویت کننده) محیطی تشکیل شده است. که از به هم رسیدن این ریب های مارپیچ و محیطی، شبکه های ایزوگرید شکل می گیرد. در شکل 1، به منظور معرفی هندسه این سازه، از پارامترهای زاویه ای ریب ها، تعداد ریب ها، جزئیات سطح مقطع (عرض و ارتفاع ریب)، فاصله ی بین ریب ها استفاده شده است. در جدول 1، مقادیر این پارامترها برای سازه مذکور ارائه شده است.

جدول 1 مشخصات هندسی شبکه و سازه

Table 1 Geometric characteristic of grids and structures	
300	ارتفاع سازه (L) (mm)
81.9	شعاع سازه (R) (mm)
56.73	فاصله ریب های مارپیچ (a _b) (mm)
60	فاصله ریب های محیطی (a _c) (mm)
5	عرض ریب های مارپیچ (b _b) (mm)
5	عرض ریب های محیطی (b _c) (mm)
4	ضخامت لایه مشبک (H) (mm)
28.2	زاویه ریب های مارپیچ (φ) (mm)

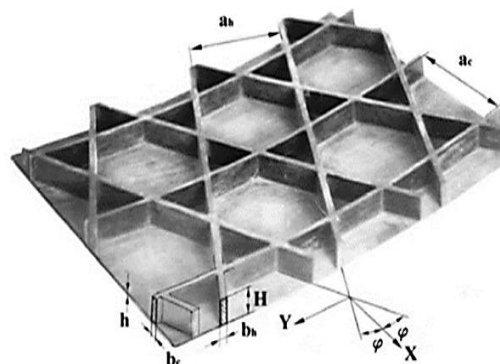


Fig. 1 Geometric parameters of composite lattice structures

شکل 1 پارامترهای هندسی سازه مشبک

2-4- مدل‌سازی سازه با پوسته‌ای معمولی (S4R)

المان‌های پوسته‌ای معمولی برای مدل کردن سازه‌هایی که در یک بعد (ضخامت)، به صورت قابل توجهی کوچک‌تر از دیگر ابعاد باشند، استفاده می‌شوند [19]. در ابتدا، هندسه یک پوسته استوانه‌ای به طول و شعاع اصلی ایجاد شده است. با توجه به مشخصات هندسه سازه و شبکه آن، نقاطی در قسمت ابتدایی و انتهایی این پوسته استوانه‌ای ایجاد شده‌اند. این نقاط، بر اساس الگوی شبکه و گام ریب‌ها، با استفاده از کوتاه‌ترین مسیر منحنی بین آن‌ها (مسیر ژئودزیک) یک به یک به یکدیگر متصل شده‌اند. در انتها، قسمت‌های اضافی سازه، حذف شده‌اند (شکل 5).

در تحلیل با نرم‌افزار آباکوس، از سه گام متوالی برای شبیه‌سازی دو مرتبه بارگذاری اولیه و بارگذاری مجدد استفاده شده است. از نظر زمانی، شرایط اولیه هر گام، عبارت‌اند از شرایط انتهایی گام قبل. در حین حل بر حسب زمان، در هر دو مرتبه بارگذاری، اثر کاهش خواص کامپوزیت، به روش مدل‌سازی آسیب پیشرونده⁵ و به کمک گزینه‌های آغاز آسیب⁶ و تکامل آسیب⁷، که از زیرگزینه‌های معیار آسیب هاشین⁸ در نرم‌افزار آباکوس هستند، با استفاده از خواص ماده ذکر شده در جدول 2، اعمال شده است. شرایط انتهایی بارگذاری مرتبه اول، شامل المان‌های آسیب دیده، شرایط ابتدایی بارگذاری مرتبه دوم است. لذا در هر دو مرتبه بارگذاری بر حسب زمان، بخشی از انرژی وارده تحت بارگذاری محوری فشاری به سازه، صرف آغاز و تکامل آسیب و سبب تخریب موضعی آن شده است. پیشرفت آسیب به این معناست، زمانی که ماده به استحکام نهایی خود رسید هنوز می‌تواند مقاومت از خود نشان دهد و کاهش خواص بعد از شروع آسیب به صورت تدریجی است تا اینکه سازه به واماندگی برسد.

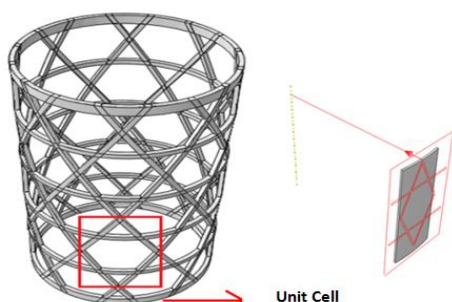


Fig. 4 Structural modeling with continuum shell element (SC8R)

شکل 4 مدل‌سازی سازه با المان پوسته‌ای کانٹینیوم (SC8R)

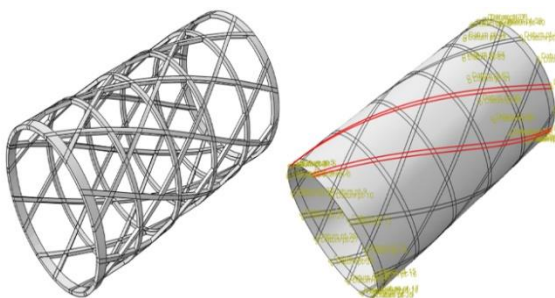


Fig. 5 Structural modeling with conventional shell element (S4R)

شکل 5 مدل‌سازی سازه با المان پوسته‌ای معمولی (S4R)



Fig. 2 Plexiglass and silicon mold

شکل 2 قالب پلکسی گلاس و سیلیکونی



Fig. 3 Filament winding process

شکل 3 فرآیند رشته‌پیچی

جدول 2 خصوصیات مواد

Table 2 The material properties

سایر	چقرمگی شکست (N/mm)	استحکام (MPa)	خصوصیات الاستیک (GPa)
$\nu_{12} = 0.38$	$G_{FT} = 70$	$X_T = 900$	$E_1 = 40$
$\rho = 1.48 \text{ kg/m}^3$	$G_{FC} = 95$	$X_C = 310$	$E_2 = 4.6$
	$G_{MT} = 0.25$	$Y_T = 30$	$G_{12} = G_{13} = 2.5$
	$G_{MC} = 1$	$Y_C = 100$	$G_{23} = 2$
		$S = 50$	

4- مدل‌سازی و تحلیل المان محدود

در مدل‌سازی این سازه از دو نوع المان پوسته‌ای معمولی¹ و المان پوسته‌ای کانٹینیوم² استفاده شده است. برای مدل‌سازی سازه با هر کدام از این المان‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، یک روش مجزا وجود دارد که در ابتدا به توضیح مختصری در این باره پرداخته شده است.

1-4- مدل‌سازی سازه با المان پوسته‌ای کانٹینیوم (SC8R)

المان‌های پوسته‌ای کانٹینیوم، یک حجم سه بعدی را مش بندی می‌کنند و ضخامت این المان‌ها از هندسه گره‌های آن به دست می‌آیند و این المان‌ها فقط درجات آزادی از نوع جابجایی دارند (سه درجه آزادی برای هر گره). شکل این المان‌ها، مانند المان سالیید بوده اما رفتارهای سینماتیک آن‌ها و نیز معادلات متشکله آن‌ها شبیه المان‌های پوسته‌ای معمولی می‌باشد [19]. در این روش، ابتدا یک پوسته مستطیلی به طول و عرض یک سلول واحد و به شعاع سازه اصلی با استفاده از دستور دوران حجم³ ایجاد می‌شود. سپس طرح یک سلول واحد، بر روی این پوسته ترسیم می‌شود. در نهایت سلول واحد مورد نظر، از درون پوسته مذکور، بریده می‌شود (شکل 4). سپس، سلول واحد مذکور، در راستای شعاعی و طولی سازه، به تعداد پیش‌بینی شده در طراحی، کپی می‌شود. پس از مونتاژ سلول‌های واحد در کنار یکدیگر، بین تمامی آن‌ها قید گره⁴ گذاشته می‌شود تا شبکه در حین تحلیل، یکپارچه باشد.

6 - Damage Initiation
7 - Damage Evolution
8 - Hashin Damage

1 - Conventional Shell
2 - Continuum Shell
3 - Revolution
4 - Tie
5 - Progressive Damage Modeling

برای مش‌بندی سازه، از المان‌های S4R و SC8R استفاده شده است. به منظور همگرایی جواب‌های مسئله، حل‌های متعددی با تعداد المان‌های مختلف انجام شده که در نهایت، تعداد بهینه المان‌های S4R، 12408 عدد و تعداد بهینه المان‌های SC8R، 22176 انتخاب شده است (شکل 7). در شکل 8، مدل‌سازی سازه استوانه‌ای مشبک با الگوهای شبکه لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی، نشان داده شده است.

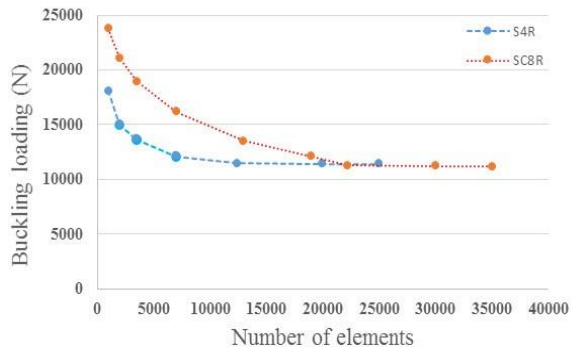


Fig. 7 Mesh convergence for S4R and SC8R elements

شکل 7 همگرایی مش برای المان‌های پوسته‌ای معمولی (S4R) و المان‌های پوسته‌ای کانتینیوم (SC8R)

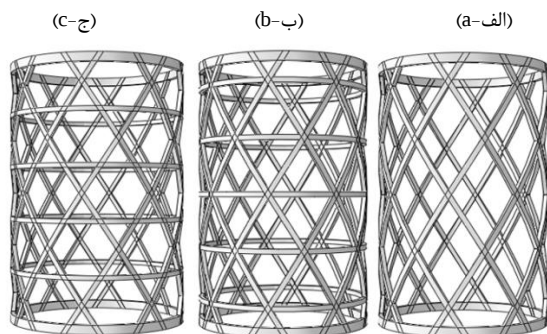


Fig. 8 Modeling the structure with a rhombic (a), triangular (b) and hexagonal (c) lattice patterns in ABAQUS software (from right to left)

شکل 8 مدل‌سازی سازه با الگوی شبکه لوزی (الف)، مثلثی (ب) و شش‌ضلعی (ج) در نرم‌افزار آباکوس

5- نتایج

5-1- اعتبار سنجی و مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

در این پژوهش، به دو روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، به مطالعه رفتار سازه استوانه‌ای مشبک تحت بار محوری فشاری و همچنین استحکام باقی‌مانده سازه مذکور، تحت بارگذاری مرتبه دوم محوری فشاری پرداخته شده است. در واقع، هدف از شبیه‌سازی المان محدود سازه، ارائه روشی کم‌هزینه و کاربردی برای مطالعه رفتار این گونه سازه‌ها می‌باشد. همچنین در ادامه، رفتار سه نوع الگوی شبکه مختلف لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی تحت بارگذاری محوری فشاری مرتبه اول و دوم، مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای انجام آزمون تجربی سازه تحت بار محوری فشاری، دو صفحه فولادی مسطح در بخش‌های تحتانی و فوقانی نمونه‌ها قرار گرفت تا توزیع بار وارده شده به نمونه‌ها، یکنواخت باشد. سپس به فک متحرک دستگاه، جابجایی با سرعت نیم میلی‌متر بر دقیقه داده شد تا بار وارده به سازه، کاملاً شبه استاتیکی

در این تحلیل از حلگر دینامیک صریح¹ استفاده شده است. برای اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در شبیه‌سازی بارگذاری محوری فشاری، از دو صفحه صلب در قسمت بالا و پایین سازه استفاده شده است که درجه آزادی صفحه پایینی، کاملاً بسته شده است و درجه آزادی صفحه بالایی فقط در جهت محور سازه باز می‌باشد. تماس‌های بین سازه و صفحات صلب از نوع صفحه به صفحه با ضریب اصطکاک 0.5 تعریف شده است. مسئله در سه مرحله (گام) حل شده است. در گام اول صفحه صلب بالای سازه به صورت جابجایی کنترل به کمک گزینه گام آهسته² در نرم‌افزار آباکوس، در راستای محوری سازه به طرف پایین حرکت می‌کند و سازه را تحت بار محوری فشاری قرار می‌دهد، تا جایی که سازه دچار فروریزش شود. سپس در گام دوم، بارگذاری از سازه آغاز می‌شود. یعنی صفحه مذکور، به آرامی به طرف بالا حرکت می‌کند و به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد. سپس در گام سوم، مجدداً صفحه صلب با شرایط توضیح داده شده در گام اول، به سازه (سازه‌ای که در گام اول، آسیب دیده و خواص مکانیکی آن، با توجه به معیار تخریب هاشین، کاهش یافته) نیرو وارد کرده، استحکام باقی‌مانده سازه آسیب دیده در بارگذاری مرتبه اول را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. ترتیب و توالی بارگذاری، در شکل 6، به صورت جدول شرایط مرزی (ردیف) و گام‌های بارگذاری (ستون) در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. مطابق این شکل، اعمال بارگذاری به صورت تعریف شرایط مرزی از نوع جابجایی، به ترتیب زیر است:

- شرایط مرزی اول: صفحه صلب قرار گرفته در زیر سازه، در لحظه اولیه، در همه جهات (شش درجه آزادی) مقید شده است و تا انتهای حل، در همه گام‌ها ادامه می‌یابد.
- شرایط مرزی دوم: صفحه صلب قرار گرفته بر روی سازه، در لحظه اولیه، در همه جهات مقید بوده و در آغاز گام اول، در جهت محوری آزاد شده، بر روی سازه نیروی فشاری به صورت جابجایی کنترل (گام آهسته) به سمت پایین وارد می‌کند. این شرایط مرزی، فقط تا انتهای گام اول حل مسئله حاکم بوده و در دو گام بعدی، غیرفعال شده است.
- شرایط مرزی سوم: صفحه صلب قرار گرفته بر روی سازه، در گام دوم، با مقید بودن سایر درجات آزادی، در جهت بالا شروع به حرکت کرده، بار را به صورت جابجایی کنترل (گام آهسته) از روی سازه بر می‌دارد. این شرایط مرزی، در گام سوم، غیرفعال شده است.
- شرایط مرزی چهارم: صفحه صلب قرار گرفته بر روی سازه، با مقید بودن سایر درجات آزادی، مجدداً بر روی سازه، نیروی فشاری به صورت شرایط جابجایی کنترل به سمت پایین وارد می‌کند. این شرایط مرزی، فقط در گام سوم حل مسئله حاکم است.

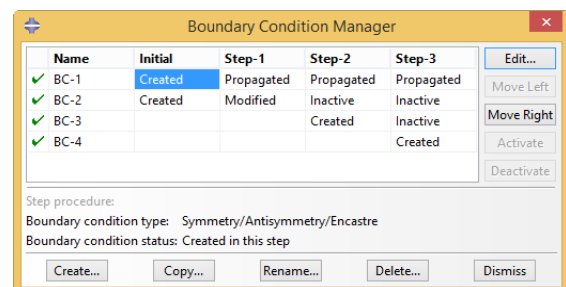
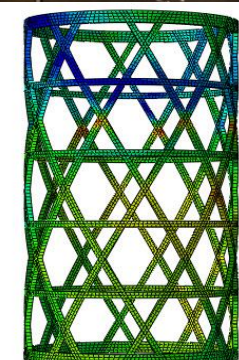
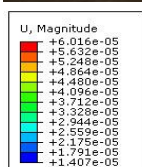
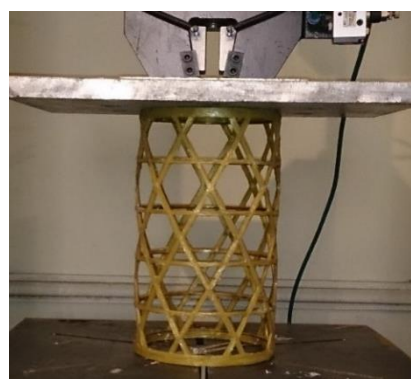


Fig. 6 Boundary conditions and loadings in ABAQUS software

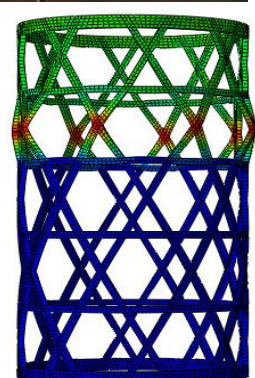
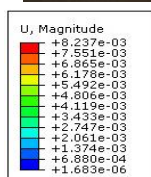
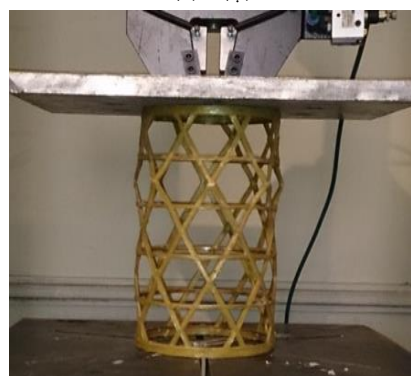
شکل 6 شرایط مرزی و بارگذاری در نرم‌افزار آباکوس

¹ - Explicit

² - Smooth Step



(ب) - (ب)



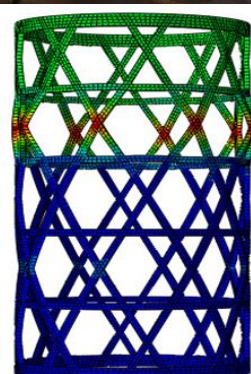
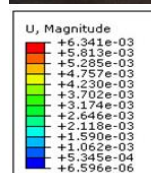
(ج) - (ج)

Fig. 9 Experimental and numerical deformation of the structure with hexagonal lattice pattern at different loading stages under compressive axial load; (a) Collapse during first loading stage (b) After complete unloading in the first stage (c) Collapse during second loading stage

شکل 9 تغییر شکل تجربی و عددی سازه با شبکه شش‌ضلعی در مراحل مختلف تحت بار محوری فشاری (الف) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه اول (ب) لحظه پس از باربرداری کامل مرتبه اول (ج) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه دوم

باشد. آزمون تا جایی که نمودار نیرو-جابجایی سازه، دچار افت محسوس شد (حداکثر تحمل بار محوری فشاری سازه)، ادامه یافت. بر طبق این نمودار، مقدار نیروی بحرانی کمانش (جایی که نمودار نیرو-جابجایی افت ناگهانی کرده است) برابر 10505 نیوتن می‌باشد. در ادامه مراحل تحقیق، به منظور مطالعه استحکام باقی‌مانده و ظرفیت مجدد باربری، سازه مذکور مجدداً (برای مرتبه دوم) تحت بار محوری فشاری قرار گرفت. نتایج نشان داد که سازه 8280 نیوتن بار تحمل کرد و سپس از محل آسیب آزمون اول، دچار فروریزش گردید. همچنین نتایج نشان دادند که علی‌رغم تخریب سازه در آزمون اول، سازه هنوز قابلیت باربری دارد، به طوری که 78.81 درصد از قابلیت خود در تحمل بار محوری فشاری را حفظ کرده است. همچنین در بارگذاری مجدد، به دلیل آسیب‌دیدگی سازه، سفتی سازه کاهش یافته است، به طوری که سازه در لحظه شکست مجدد، دچار 28.3 درصد جابجایی بیشتر شده است. در شکل 9، نمایی از جابجایی سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی در بارگذاری مراحل اول و دوم (تحت نیروی محوری فشاری)، در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سازه، ارائه شده است. همچنین در شکل 10، نمودارهای نیرو-جابجایی سازه در آزمون تجربی نشان داده شده است.

مطابق شکل 9، نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند که در لحظه آغاز فروریزش، حداکثر تغییر شکل سازه در راستاهای محوری و شعاعی، در بارگذاری مرتبه دوم، بیشتر از مرتبه اول است. همچنین با اندازه‌گیری طول استوانه کامپوزیتی به کمک خط‌کش میلی‌متری، پس از باربرداری مرتبه اول، سازه کاملاً به طول اولیه خود بازگشته است. البته این بازگشت، طبق مشاهدات، بلافاصله نبوده و پس از گذشت لحظاتی، قطعه استوانه‌ای به طور آهسته، به طول اولیه بازگشته است. تغییر شکل به جامانده، از مرتبه 10^{-5} متر است و با بازرسی چشمی در آزمون تجربی، قابل تشخیص نیست.



(الف) - (الف)

در شکل‌های 12 و 13 به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی سازه در شبیه‌سازی المان محدود با دو نوع المان S4R و SC8R به همراه نمودار آزمون تجربی سازه نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، به طور کلی حداکثر جابجایی سازه در لحظه فروریزش، در المان‌های پوسته‌ای معمولی (S4R)، تقریباً مساوی المان‌های پوسته‌ای کانتینیوم (SC8R) می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی شده با هر دو المان، مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمون تجربی دارند.

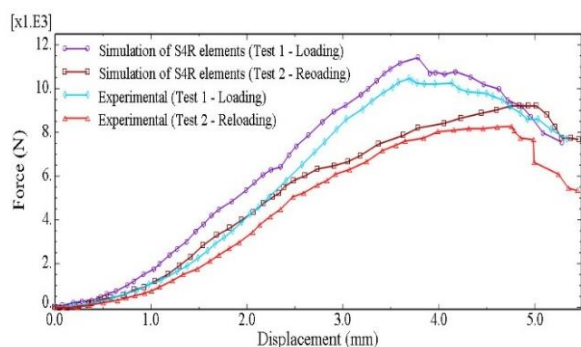


Fig. 12 Numerical simulation diagram (S4R element) and experimental testing of structures with hexagonal lattice pattern under first and second stages of compressive axial loading

شکل 12 نمودار شبیه‌سازی عددی (المان S4R) و آزمون تجربی سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری در بارگذاری مراحل اول و دوم

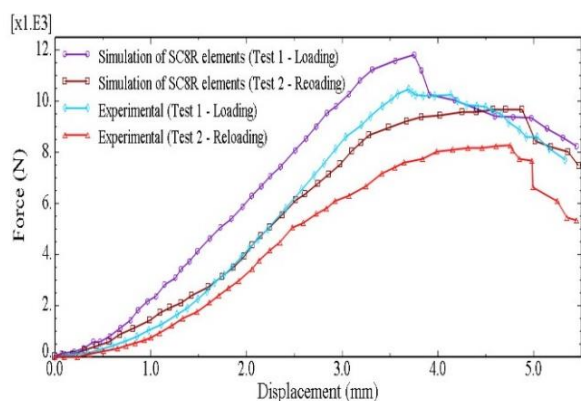


Fig. 13 Numerical simulation diagram (SC8R element) and experimental testing of structures with hexagonal lattice pattern under first and second stages of compressive axial loading

شکل 13 نمودار شبیه‌سازی عددی (المان SC8R) و آزمون تجربی سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری در بارگذاری مراحل اول و دوم

2-5- اثر الگوی شبکه بر حداکثر استحکام و استحکام باقی‌مانده سازه تحت بار محوری فشاری

با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، حداکثر استحکام و استحکام باقی‌مانده سازه با الگوهای لوزی شکل، مثلثی شکل و شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری متوالی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج جابجایی سازه در شبیه‌سازی عددی، برای الگوهای لوزی و مثلثی شکل، تحت بار محوری فشاری به ترتیب در شکل 14 و 15، ارائه شده است. همچنین در شکل 16 و 17، به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی سازه با الگوی شبکه لوزی و مثلثی نشان داده شده‌اند.

در تحلیل المان محدود، به منظور تعیین مود دقیق تخریب، استحکام نهایی مواد نیز در نرم‌افزار وارد شد تا مود واقعی تخریب مشخص شود. مقدار نیروی بحرانی کمانش (جایی که نمودار نیرو-جابجایی افت ناگهانی کرده است) در تحلیل المان محدود (با المان پوسته‌ای معمولی) برابر 11456.6 نیوتن است که این مقدار، حدود 9 درصد بیشتر از آزمون تجربی سازه مذکور می‌باشد. در شکل 11 سازه شبیه‌سازی شده به همراه مود تخریب آن (مود شکست فشاری الیاف) ارائه شده است. از این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که قبل از اینکه سازه دچار کمانش شود، تنش در سازه، از حداکثر استحکام فشاری آن، فراتر رفته (سازه دچار آسیب شده) و این عامل، سبب شکست سازه شده است. همچنین تغییر شکل و محل شروع تخریب سازه در هر دو روش شبیه‌سازی المان محدود و آزمون تجربی، دارای تطابق کامل می‌باشد (شکل‌های 9 و 11).

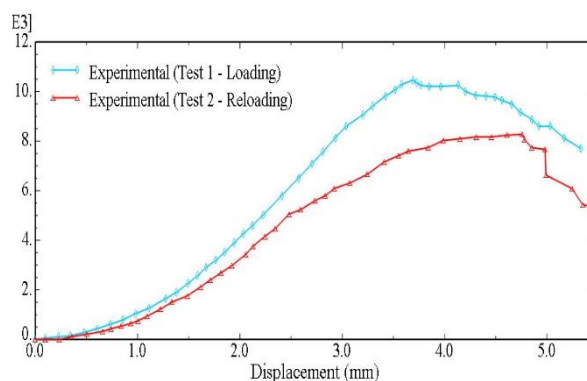


Fig. 10 Structure test diagram with hexagonal lattice pattern under compressive axial load

شکل 10 نمودار آزمون سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری

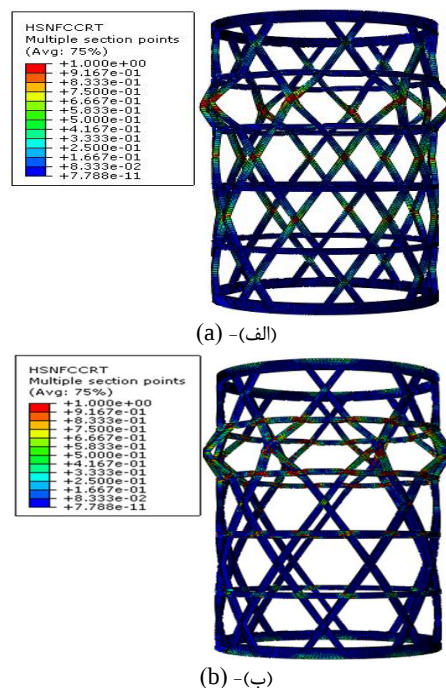


Fig. 11 Damage simulation of the structures with hexagonal pattern in ABAQUS software with (a) S4R element (b) SC8R element

شکل 11 شبیه‌سازی آسیب سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی در نرم‌افزار آباکوس (الف) المان پوسته‌ای معمولی (ب) المان پوسته‌ای کانتینیوم

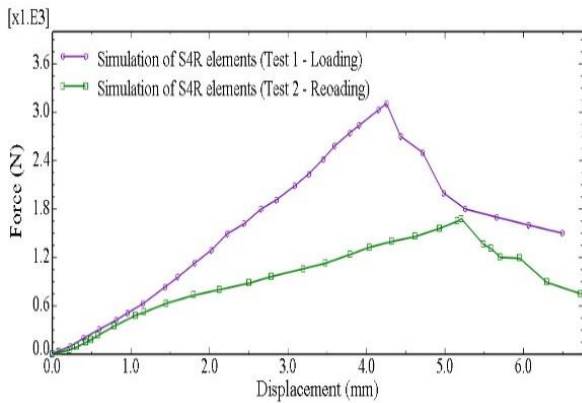


Fig. 16 Numerical simulation diagram of a structure with a rhombic lattice pattern under compressive axial load (S4R element)

شکل 16 نمودار شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه لوزی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

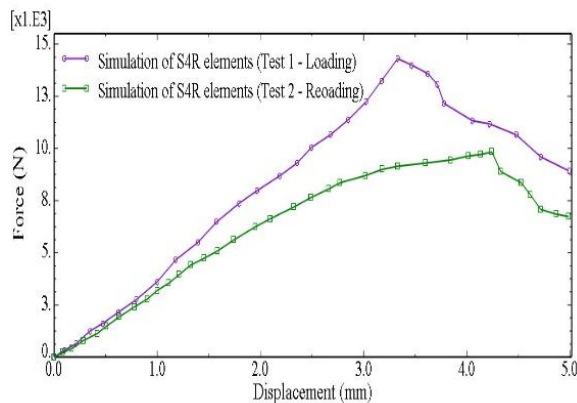


Fig. 17 Numerical simulation diagram of a structure with a triangular lattice pattern under compressive axial load (S4R)

شکل 17 نمودار شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه مثلثی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

همان طور که در شکل 18 مشاهده می‌شود، سازه با الگوی شبکه لوزی شکل، به علت عدم وجود ریب‌های محیطی و سفتی پایین، تحت بار محوری فشاری، ناپایدار بوده و دچار تغییر شکل بشکاف می‌شود و تخریب سازه به صورت تخریب ریب‌ها در فشار، نمایان می‌شود. همچنین در بارگذاری مجدد، این سازه به دلیل تخریب ریب‌ها در فشار، 45.99 درصد از ظرفیت باربری خود را از دست می‌دهد. شکل 19، نتایج سازه با الگوی مثلثی شکل را تحت بار محوری فشاری نشان می‌دهد. این سازه به دلیل شبکه چگالتر و وجود ریب‌های محیطی، از سفتی بالاتری برخوردار می‌باشد به طوری که تحت بارگذاری محوری فشاری، عملکرد بهتری نسبت به الگوهای شبکه لوزی و شش‌ضلعی نشان می‌دهد. در واقع این الگوی شبکه، با انتقال نیرو بین ریب‌های خود، سبب افزایش باربری نهایی سازه می‌شود. همچنین فروریزش سازه، از محل ریب‌های ماریج قرار گرفته در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی سازه می‌باشد که این امر، سبب کاهش 30.89 درصد از ظرفیت اولیه باربری سازه، در بارگذاری مجدد می‌گردد. در جدول 3، نتایج شبیه‌سازی المان محدود سازه شامل پارامترهای حداکثر نیروی فروریزش سازه، وزن سازه، انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه و جابجایی عمودی سازه در لحظه فروریزش، به همراه نتایج آزمون‌های تجربی برای سازه با الگوهای شبکه لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی ارائه شده است.

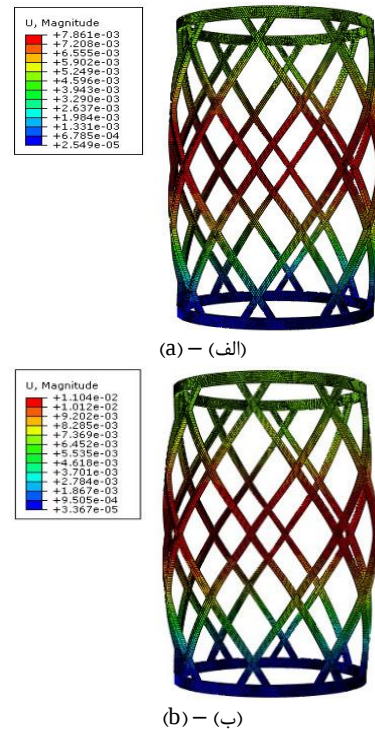


Fig. 14 Deformation of the structure with rhombic lattice pattern at different loading stages under compressive axial load; (a) Collapse during first loading stage (b) Collapse during second loading stage

شکل 14 تغییر شکل سازه با شبکه لوزی در مراحل مختلف تحت بار محوری فشاری (الف) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه اول (ب) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه دوم

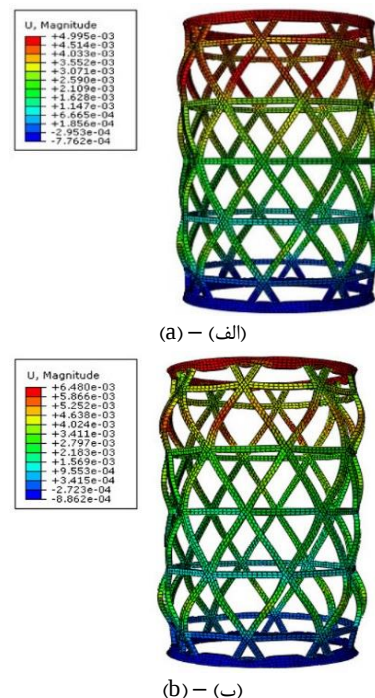


Fig. 15 Deformation of the structure with triangular lattice pattern at different loading stages under compressive axial load; (a) Collapse during first loading stage (b) Collapse during second loading stage

شکل 15 تغییر شکل سازه با شبکه مثلثی در مراحل مختلف تحت بار محوری فشاری (الف) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه اول (ب) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه دوم

جدول 3 حداکثر نیروی فروریزش، وزن، انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه، جابجایی عمودی در لحظه فروریزش و زمان حل شبیه‌سازی برای الگوهای مختلف شبکه
Table 3 Maximum collapse force, weight, absorbed energy up to the point of collapse of the structure, vertical displacement at the moment of collapse and simulation solution time for different grid patterns

هندسه شبکه	نوع المان	حداکثر نیروی فروریزش (N)				انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه (J)		جابجایی در لحظه فروریزش (mm)		زمان حل شبیه‌سازی (دقیقه)
		در روش عددی	بارگذاری اول	بارگذاری مجدد	درصد استحکام باقی‌مانده	وزن سازه (kg)	بارگذاری اول	بارگذاری مجدد	درصد جذب انرژی باقی‌مانده	
لوزی	S4R		3110.3	1680.1	54.01	0.207	7183.3	4102.1	57.1	164
مثلثی	S4R		14326.4	9901.1	69.11	0.280	25750.7	16343.4	63.5	462
شش‌ضلعی	S4R		11456.6	9222.8	80.5	0.243	24101.1	20920.5	86.8	235
شش‌ضلعی	SC8R		11289.6	9102.9	80.63	0.243	24480.3	21210.2	86.6	752
شش‌ضلعی (روش تجربی)			10505	8280	78.81	0.245	23067.3	19501.5	84.5	-

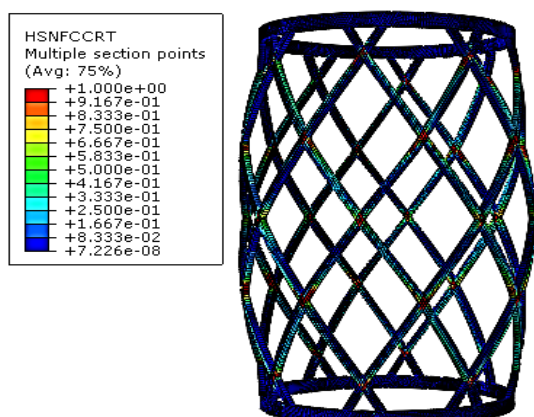


Fig. 18 Numerical simulation of a structure with a rhombic lattice pattern under compressive axial load (S4R element)

شکل 18 شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه لوزی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

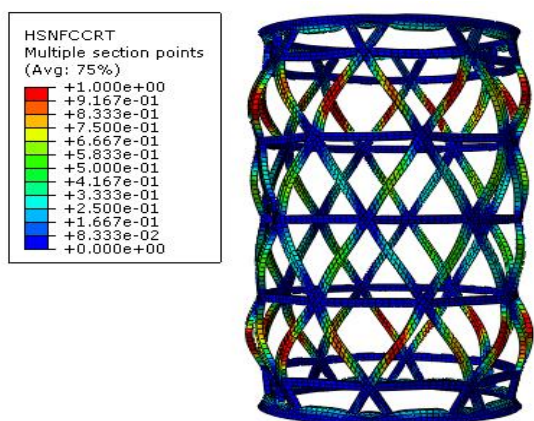


Fig. 19 Numerical simulation of a structure with a triangular lattice pattern under compressive axial load (S4R element)

شکل 19 شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه مثلثی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

همانطور که مشاهده می‌شود، سازه با الگوی شبکه مثلثی، بیشترین استحکام فروریزش، بیشترین جذب انرژی تا نقطه فروریزش و کمترین جابجایی عمودی در لحظه فروریزش را در بارگذاری مرتبه اول و در طرف مقابل، سازه با الگوی شبکه لوزی، کمترین استحکام فروریزش، کمترین جذب انرژی تا نقطه فروریزش و بیشترین جابجایی عمودی در لحظه فروریزش را در بارگذاری مرتبه اول، دارا می‌باشند. در واقع، وجود شبکه چگالتز و وجود ریب‌های محیطی، سبب افزایش قابل توجهی در سفتی سازه گردیده‌اند، به طوری که این مهم، تأثیر مستقیمی در افزایش و کاهش پارامترهای مذکور گذاشته است. در بارگذاری مجدد (مرتبه دوم)، سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی، عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوهای شبکه دارد، به طوری درصد استحکام باقی‌مانده سازه (نتایج شبیه‌سازی عددی) در الگوهای شبکه شش‌ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب، برابر 80.5، 69.11 و 54.01 می‌باشد. نکته قابل ذکر دیگر اینکه جابجایی در لحظه فروریزش در بارگذاری مجدد، نسبت به بارگذاری اول، در الگوهای شبکه شش‌ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب، حدود 29، 27 و 26 درصد افزایش نشان می‌دهد.

5-2-1- مقایسه پارامتر استحکام ویژه سازه

در طراحی مهندسی، بخصوص سازه‌های هوایی، معیار وزن، یکی از پارامترهای مهم می‌باشد. پارامتر استحکام ویژه، به صورت نسبت حداکثر نیروی تحمل شده به وزن، تعریف شده است. در شکل 20، استحکام ویژه سازه با الگوهای شبکه مختلف، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در بارگذاری مرتبه اول، به ترتیب سازه با الگوی شبکه مثلثی، شش‌ضلعی و لوزی، از استحکام ویژه بالاتری برخوردار می‌باشند. همچنین در بارگذاری مرتبه دوم، سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی، از استحکام ویژه بالاتری برخوردار می‌باشد.

5-2-2- مقایسه از نظر جذب انرژی ویژه تا نقطه آغاز فروریزش

یکی دیگر از پارامترهای مهم در این گونه سازه‌ها، جذب انرژی می‌باشد که از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی بدست می‌آید. اما جذب انرژی به تنهایی، کافی نیست و در طراحی مهندسی در برخی کاربردهای عملی که سبکی و حداقل وزن، مهم است، این جذب انرژی ویژه است که از اهمیت بالاتری برخوردار است. لذا از تقسیم مقدار انرژی جذب شده به جرم سازه، جذب انرژی ویژه بدست می‌آید. در شکل 21، انرژی ویژه جذب شده برای هر سه الگوی شبکه، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوی شش‌ضلعی از عملکرد بهتری در پارامتر جذب انرژی ویژه تا نقطه فروریزش، در هر دو بارگذاری مراحل اول و دوم برخوردار می‌باشد.

شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مقاله، با کمک نرم‌افزار آباکوس بر روی یک دستگاه رایانه با مشخصات سخت‌افزاری پردازش مرکزی 7 هسته‌ای و حافظه جانبی 8 گیگابایت انجام پذیرفته است. مدت زمان حل مسأله فروریزش استوانه مشبک کامپوزیتی با شبکه شش‌ضلعی، با استفاده

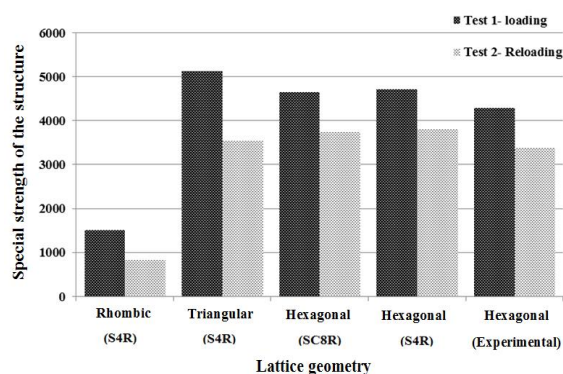


Fig. 20 Specific strength diagram of the structure for different grid patterns

شکل 20 نمودار استحکام ویژه سازه (نسبت حداکثر نیروی تحمل شده به وزن برای الگوهای شبکه مختلف)

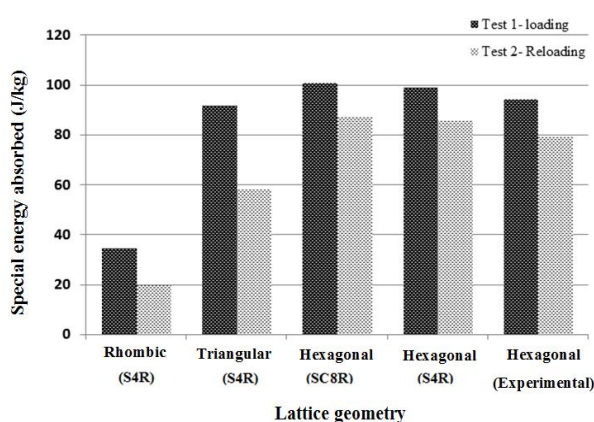


Fig. 21 Specific energy absorption diagram of the structure up to the collapse point for different grid patterns

شکل 21 نمودار انرژی ویژه جذب شده تا نقطه فروریزش سازه برای الگوهای شبکه مختلف

7-مراجع

- [1] Vasiliev, V., Barynin, V. and Rasin, A., "Anisogrid Lattice Structures-Survey of Development and Application" Composite structures, Vol. 54, No. 2-3, pp. 361-370, 2001.
- [2] Vasiliev, V. and Razin, A., "Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications" Composite structures, Vol. 76, No. 1-2, pp. 182-189, 2006.
- [3] Vasiliev, V. V., Barynin, V. A. and Razin, A. F., "Anisogrid Composite Lattice Structures-Development and Aerospace Applications" Composite structures, Vol. 94, No. 3, pp. 1117-1127, 2012.
- [4] Totaro, G. and Gürdal, Z., "Optimal Design of Composite Lattice Shell Structures for Aerospace Applications" Aerospace Science and Technology, Vol. 13, No. 4-5, pp. 157-164, 2009.
- [5] Morozov, E., Lopatin, A. and Nesterov, V., "Finite-Element Modelling and Buckling Analysis of Anisogrid Composite Lattice Cylindrical Shells" Composite Structures, Vol. 93, No. 2, pp. 308-323, 2011.
- [6] Yazdani, M. and Rahimi, G., "The Behavior of Gfrp-Stiffened and-Unstiffened Shells under Cyclic Axial Loading and Unloading" Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011.
- [7] Yazdani, S. and Rahimi, G., "Experimental and Numerical Stress Analysis of Glass Fiber-Reinforced Polymer (Gfrp)-Stiffened Shells with Cutout under Axial Loading" Scientific Research and Essays, Vol. 8, No. 21, pp. 902-916, 2013.

از المان پوسته متداول، مدت 78 دقیقه و با استفاده از المان پوسته پیوسته، مدت 248 دقیقه بوده است. بنابراین، حل یک مسأله با ابعاد هندسی و بارگذاری و شرایط مرزی مشابه، با کمک المان پوسته پیوسته، 3.2 برابر المان پوسته متداول، زمان می‌برد. لذا اگر هدف از شبیه‌سازی، بررسی رفتار کلی نیرو-جابجایی محوری باشد، نه تحلیل مؤلفه‌های جزئی تنش در نواحی دارای تمرکز تنش، استفاده از المان پوسته متداول، صرفه اقتصادی دارد.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار استحکامی استوانه مشبک کامپوزیتی با الگوهای شبکه لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی، به روش عددی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین برای اعتبار سنجی مدل عددی، سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی ساخته شده، دو بار متوالی مورد آزمایش بارگذاری فشار محوری قرار گرفت. اصولاً برای تحلیل دقیق‌تر تنش‌های عمودی و برشی بین لایه‌ای، به خصوص در محل‌های تمرکز تنش مانند محل تقاطع ریب‌ها و نزدیک مرزهای بالا و پایین سازه، استفاده از المان پوسته کانتینیوم، به خصوص در تحلیل‌های غیرخطی مادی و هندسی، بهتر است. لیکن برای مدلسازی راحت‌تر و حل سریع سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با ساختارهای مشابه با ساختار مورد استفاده در این مقاله، از نظر نسبت ضخامت یا ارتفاع ریب‌ها به شعاع، استفاده از المان پوسته معمولی، از دقت قابل قبول برخوردار است. چون در مدلسازی به کمک المان پوسته معمولی، نیازی به ایجاد قید گره جهت برقراری اتصال بین سلول‌های واحد مجاور که سبب افزایش زمان حل به کمک رایانه می‌شود، وجود ندارد.

نتایج نشان دادند که این سازه‌ها، اولاً عملکرد مناسبی در بارگذاری محوری فشاری دارند و ثانیاً به خاطر ماهیت شبکه‌ای بودن ساختار سازه، علی‌رغم اینکه وقتی در بارگذاری مرتبه اول، تحت آسیب اولیه و فروریزش قرار می‌گیرند، همچنان بخش قابل توجهی از خاصیت باربری خود را در بارگذاری مرتبه دوم، حفظ کرده و تنها بخش کوچکی از ظرفیت نامی خود را از دست می‌دهند، به طوری که:

- 1- در بارگذاری محوری فشاری مرتبه اول، سازه با الگوهای شبکه مثلثی، شش‌ضلعی و لوزی، به ترتیب از انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه، استحکام و استحکام ویژه بیشتر و از جابجایی عمودی تا نقطه فروریزش سازه کمتری (سفتی بالاتری) برخوردار می‌باشند.
- 2- در بارگذاری مرتبه دوم، سازه با الگوهای شبکه شش‌ضلعی، شبکه مثلثی و لوزی، به ترتیب مقادیر 80.5، 69.11 و 54.01 درصد از استحکام اولیه خود را حفظ کرده و لذا قابلیت تحمل بار محوری فشاری مجدد را دارا می‌باشند.
- 3- سازه با الگوهای شبکه شش‌ضلعی، شبکه مثلثی و لوزی، به ترتیب از قابلیت جذب انرژی ویژه بیشتری در هر دو بارگذاری مرتبه اول و دوم برخوردار می‌باشند.
- 4- جابجایی در لحظه فروریزش در بارگذاری مجدد، نسبت به بارگذاری مرتبه اول، در الگوهای شبکه شش‌ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب، حدود 29، 27 و 26 درصد افزایش نشان می‌دهد.
- 5- بعد از باربرداری کامل و قبل از بارگذاری مرتبه دوم، استوانه مشبک کامپوزیتی آسیب دیده از بارگذاری مرتبه اول، به طول اولیه خود باز می‌گردد. این از خصوصیات سازه با هندسه مشبک است.

- [8] Lai, C., Wang, J. and Liu, C., "Parameterized Finite Element Modeling and Buckling Analysis of Six Typical Composite Grid Cylindrical Shells" *Applied Composite Materials*, Vol. 21, No. 5, pp. 739-758, 2014.
- [9] Ren, M., Li, T., Huang, Q. and Wang, B., "Numerical Investigation into the Buckling Behavior of Advanced Grid Stiffened Composite Cylindrical Shell" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 16, pp. 1508-1519, 2014.
- [10] Talezadehlari, A. and Rahimi, G. H., "The Effect of Geometrical Imperfection on the Axial Buckling of Unstiffened and Stiffened Composite Cylinders with and without Cutout" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 245-256, 2017.
- [11] Fadavian, A., Davar, A., Jam, J. E. and Taghavian, H., "Buckling Strength Optimization of Fabrication Factors of Composite Lattice Cylinders Using Experimental-Statistical Method (Taguchi)" *Polymer Composites*, Vol. 40, No. 5, pp. 1850-1861, 2019.
- [12] Davar1, A., Azarafza2, R. and Bagheri, V., "Experimental and Numerical Analysis of Composite Lattice Truncated Conical Structures with and without Carbon Nanotube Reinforcements under Axial Compressive Force" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 418-425, 2018.
- [13] Khalili, S. M. R., Sedigh, Y. and Mir Mohammad Hossein Ahari, S. M., "Experimental and Numerical Study of the Buckling of Semi-Cylindrical Composite Lattice" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 269-276, 2016.
- [14] shahgholian ghahfarokhi, d. and Rahimi, G. H., "Prediction of the Critical Buckling Load of Stiffened Composite Cylindrical Shells with Lozenge Grid Based on the Nonlinear Vibration Analysis" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 135-143, 2018.
- [15] Rostami, B. and Shahrjerdi, A., "Buckling Analysis of Composite Lattice Cylinder Whit Inner and Outer Shell under External Pressure" *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 49, No. 3, pp. 147-156, 2019.
- [16] "Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe" *ASTM-D2290*, 2017.
- [17] Charan, V. S., Vardhan, A. V., Raj, S., Rao, G. R., Rao, G. and Hussaini, S., "Experimental Characterization of CFRP by Nol Ring Test" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 18, pp. 2868-2874, 2019.
- [18] Gibson, R. F., "Principles of Composite Material Mechanics", *CRC Press*, pp. 82-93, 2011.
- [19] "ABAQUS 6.14 Analysis User's Manual", Section 29.6.1, 2014.



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



تأثیر لایه‌چینی الیاف و محیط‌های حرارتی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف بازالت/الیاف کربن لایه‌نازک تک‌جهته

سید محمد صالح موسوی بفرولی¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، عبدالرضا گرانمایه³

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

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

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

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/03/07

پذیرش: 1400/08/15

کلیدواژگان:

کامپوزیت هیبریدی، الیاف کربن لایه‌نازک، خواص خمشی، شبه‌انعطاف‌پذیری، دماهای مختلف محیطی

چکیده

در این مطالعه تأثیرات دماهای مختلف محیطی و لایه‌چینی الیاف بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از رزین اپوکسی، الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن مورد بررسی قرار گرفت. کامپوزیت‌های هیبریدی با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی 2 لایه الیاف نازک تک‌جهته کربن و 6 لایه الیاف بازالت ساخته شدند. نمونه‌ها با سه نوع مختلف لایه‌چینی به طوری که موقعیت الیاف نازک تک‌جهته کربن از مرکز به سطوح نمونه‌ها تغییر می‌کرد، آماده شدند. همچنین، تأثیر دما بر رفتار خمشی نمونه‌ها با استفاده از دماهای 25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نمونه‌ها دارای شکست تدریجی بودند و به دلیل حضور الیاف نازک تک‌جهته کربن، رفتار شبه‌انعطاف‌پذیر نشان دادند. نتایج نشان دادند که با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌ها، استحکام و مدول خمشی نمونه‌ها به شدت افزایش یافت. به عنوان نمونه، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مدول خمشی نمونه‌هایی که الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌ها قرار داشتند، حدود 42 درصد بالاتر از مدول خمشی نمونه‌های با الیاف نازک تک‌جهته کربن در مرکز بود. با این وجود، مقادیر کرنش شکست نمونه‌ها با نزدیک کردن الیاف نازک تک‌جهته کربن به مرکز نمونه‌ها افزایش داشت. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش دما منجر به کاهش مقادیر استحکام و مدول خمشی نمونه‌ها شده، در حالی که مقادیر کرنش افزایش یافته است.

Effects of stacking sequence of fibers and thermal environments on the flexural properties of the basalt fibers/thin-ply unidirectional carbon fibers/epoxy hybrid composites

Seyed Mohammad Saleh Mousavi-Bafrouyi¹, Reza Eslami-Farsani^{2*}, Abdolreza Geranmayeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

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

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

Keywords

Hybrid composite, Carbon fibers thin-ply, Flexural properties, Pseudo-ductility, Different environmental temperatures

Abstract

In this study, the effects of different environmental temperatures and stacking sequences of fibers on the flexural properties of the hybrid composites including epoxy resin, basalt fibers, and thin-ply unidirectional (UD) carbon fibers were investigated. The hybrid composites were prepared by hand lay-up method with 2 layers of carbon thin-ply and 6 layers of basalt fibers. The samples were fabricated with three different stacking sequences of fibers in which the position of thin-ply UD carbon fibers changed from the center to the outermost layers. Also, the temperature effects on the flexural properties of samples were investigated by applying different temperatures of 25, 60, and 95 °C. All samples were fractured gradually and showed pseudo-ductility phenomenon due to thin-ply UD carbon fibers. Results showed that by placing the thin-ply UD carbon fibers at the outermost layers, the flexural strength and modulus of samples increased significantly. For example, at the temperature of 25 °C, the flexural modulus of the samples was about 42% higher than that of the sample with thin-ply UD carbon fibers at the center of samples. However, the strain values of samples increased by nearing the thin-ply UD carbon fibers to the center layers. Also, results indicated that increasing the temperature caused the reduction of flexural strength and modulus of samples while the strain values increased.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mousavi-Bafrouyi, S. M. S., Eslami-Farsani, R., Geranmayeh, A., "Effects of stacking sequence of fibers and thermal environments on the flexural properties of the basalt fibers/thin-ply unidirectional carbon fibers/epoxy hybrid composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1514-1521, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.530377.1725>

1- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص منحصر بفرد خود مانند استحکام و سفتی ویژه بالا توجه خاصی را در کاربردهای مختلف پیدا کرده‌اند. در برخی از این کاربردها، کامپوزیت ممکن است در شرایط مختلفی مانند دماهای بالا و محیط‌های خورنده قرار داشته باشند. بنابراین، لازم است که کامپوزیت‌های پلیمری دارای خواص مناسبی حتی در دماهای بالا و محیط‌های خورنده باشند. یکی از مهم‌ترین انواع کامپوزیت‌های پلیمری، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف هستند. این نوع از کامپوزیت‌ها به دلیل مزایای خود به طور گسترده‌ای در کاربردهای مهمی مانند بدنه هواپیما و بدنه خودرو استفاده می‌شوند. به طور کلی مهم‌ترین الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های پلیمری شامل الیاف شیشه، کربن، آرامید و بازالت هستند [4-1].

با وجود تمامی مزایای کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، معمولاً این نوع از کامپوزیت‌ها دارای چقرمگی پایینی هستند که این مشکل منجر به ایجاد شکست ناگهانی در شرایط بارگذاری‌های مختلف می‌شوند. امروزه، راهکارهای مختلفی در جهت بهبود چقرمگی پایین کامپوزیت‌های پلیمری معرفی شده است. از مهم‌ترین راهکارهای بهبود چقرمگی کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان به استفاده از پلیمرهای گرمانرم و همچنین افزودن نانوذرات به زمینه‌های پلیمری اشاره کرد. یکی دیگر از روش‌های مؤثر در بهبود افزایش چقرمگی کامپوزیت‌های الیافی، استفاده هم‌زمان از دو یا چند الیاف به عنوان تقویت‌کننده به منظور ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی است. به طور کلی، دلیل اصلی در استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی، دستیابی به مزایای هر دو الیاف و کاهش معایب آن‌ها می‌باشد. یکی از مهم‌ترین انواع کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از الیاف کربن و الیاف شیشه است. در این نوع کامپوزیت‌ها از الیاف شیشه به دلیل درصد ازدیاد طول بالا و از الیاف کربن به دلیل استحکام زیاد استفاده می‌شود [2 و 7-15].

با وجود مزایای فراوان کامپوزیت‌های هیبریدی، متغیرهای فراوانی بر خواص مکانیکی این دسته از کامپوزیت‌ها مؤثر است. از مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار می‌توان به نسبت وزنی/ حجمی الیاف تقویت‌کننده، خواص الاستیک الیاف و حالت قرارگیری الیاف و یا نوع لایه‌چینی آن‌ها اشاره کرد. نجفی و همکاران [8] به بررسی تأثیر نوع لایه‌چینی بر رفتار خمشی و ضربه در کامپوزیت‌های هیبریدی شامل الیاف کربن و الیاف بازالت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که انرژی ویژه جذب‌شده کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در اثر افزودن الیاف بازالت بهبود یافت. با افزودن 20، 40، 60 و 80 درصد وزنی الیاف بازالت، انرژی ویژه جذب‌شده کامپوزیت‌های هیبریدی به ترتیب 58، 140، 159 و 212 درصد افزایش یافته است.

در یک مطالعه دیگر، سوباجیو¹ و همکاران [9] به بررسی تأثیر لایه‌چینی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت/الیاف کربن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که خواص مکانیکی نمونه‌ها به شدت به نوع قرارگیری الیاف بازالت و الیاف کربن در نمونه‌ها وابسته است. نتایج آن‌ها نشان حالتی که الیاف بازالت در لایه‌های بیرونی قرار گرفته‌اند، بالاترین میزان انعطاف‌پذیری حاصل شده است، در حالی که با قرار دادن الیاف کربن در لایه‌های بیرونی، خواص خمشی بهبود یافت. در مطالعه‌ای دیگر، پراستی² و همکاران [10] به بررسی تأثیر درصد وزنی و همچنین نوع قرارگیری الیاف در کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف کربن/الیاف شیشه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با قرار

دادن الیاف کربن در دو سمت بیرونی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه می‌توان استحکام و مدول خمشی را به شدت بهبود بخشید، به طوری که با قرار دادن تنها یک لایه الیاف کربن در سمت بیرونی نمونه‌ها، استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها به ترتیب 20 و 42 درصد افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با قرار دادن تمامی الیاف کربن در سمت بیرونی کامپوزیت‌ها که در معرض نیروی خمشی است، می‌توان به بهینه‌ترین حالت از نظر کرنش شکست دست یافت.

کامپوزیت‌های متداول پلیمری معمولاً دارای استحکام فوق‌العاده، وزن پایین و البته شکست‌های ناگهانی هستند. یکی دیگر از مزایای استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی بالا بردن امنیت کامپوزیت‌ها و تغییر نوع شکست آن‌ها به حالت تدریجی است. حالت شکست تدریجی کامپوزیت‌های هیبریدی اصطلاحاً پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری³ نامیده می‌شود [11 و 12]. مطالعات در زمینه شبه‌انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های پلیمری را معمولاً می‌توان به دو دسته شامل استفاده از الیاف با زوایای لایه‌چینی مختلف [13-15] و همچنین استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی با خواص مکانیکی مختلف [16-19] طبقه‌بندی کرد. فولر⁴ و همکاران [14] به بررسی رفتار کششی کامپوزیت‌های با الیاف نازک کربن (0.03 میلی‌متر) با زوایای مختلف لایه‌چینی 45-15 درجه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حین آزمون کشش می‌توان به یک منحنی تنش-کرنش غیرخطی دست یافت. آن‌ها بیان کردند که رخ دادن پدیده شبه‌انعطاف-پذیری در این کامپوزیت‌ها به دلیل جهت‌گیری مجدد الیاف به سمت راستی بارگذاری کشش است.

به عنوان یکی دیگر از راهکارهای افزایش انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های پلیمری، مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که ترکیب الیاف با کرنش بالا و الیاف با کرنش پایین با ضخامت‌های کنترل شده می‌تواند منجر به پدیده شبه-انعطاف‌پذیری و شکست تدریجی در کامپوزیت‌های هیبریدی شود. اغلب مطالعات صورت گرفته در مورد رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های هیبریدی مربوط به استفاده از الیاف نازک تک‌جهته کربن است [16-18]. تحقیقات مذکور نشان داده‌اند که 4 مکانیزم شکست می‌تواند در مورد کامپوزیت‌های هیبریدی بر اساس ضخامت نسبی الیاف با کرنش کم و الیاف کرنش زیاد رخ دهد. این چهار مکانیزم شامل موارد زیر هستند:

- 1- یک شکست ترد گسترش یافته در کل ضخامت کامپوزیت
- 2- یک ترک درون لایه‌های با کرنش پایین و سپس یک تورق ناگهانی بین الیاف با کرنش کم و کرنش زیاد
- 3- خرد شدن الیاف با کرنش کم
- 4- خرد شدن الیاف با کرنش کم به همراه تورق موضعی که تنها در این حالت است که رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری بدست می‌آید.

سیزل⁵ و همکاران [20] از الیاف تک‌جهته کربن بسیار نازک با ضخامت 29 میکرومتر در بین لایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، پیش از این که الیاف شیشه دچار شکست شود، الیاف کربن مورد استفاده می‌تواند چندین بار در راستای طولی مورد شکست قرار گیرند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که با هیبرید کردن الیاف با کرنش کم و الیاف با کرنش زیاد می‌توان به رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری در بارگذاری‌های کششی و فشاری دست یافت.

⁴ Fuller
⁵ Czel

¹ Subagia
² Prusty
³ Pseudo-ductility

بعد از لایه‌گذاری، به منظور حذف حباب‌های هوا در کامپوزیت، از فشار 0.05 مگاپاسکال استفاده شد. در نهایت به منظور تکمیل فرایند پخت، نمونه‌ها در دمای اتاق به مدت 7 روز قرار گرفتند. کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته‌شده در این تحقیق از 2 لایه الیاف نازک تک‌جهته کربن و 6 لایه الیاف بازالت تشکیل شدند. به طور میانگین، ابعاد نمونه‌ها برابر با 13×7×1.5 میلی‌متر بود. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، در این نوع از کامپوزیت‌ها، موقعیت الیاف نازک تک‌جهته کربن از مرکز به سطوح بیرونی نمونه‌ها تغییر کرد. در کدهای ارائه شده، B و C به ترتیب بیانگر الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن، و اعداد بعد از حروف نشان‌دهنده تعداد لایه‌ها هستند.

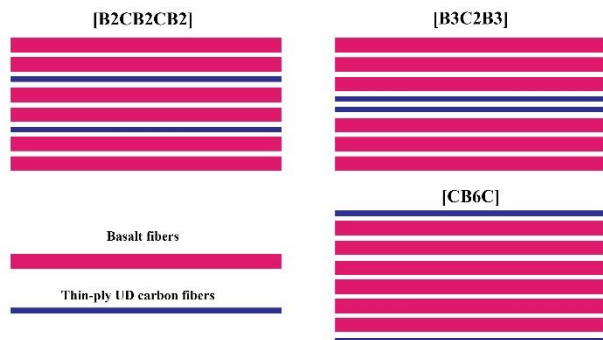


Fig. 1 The schematic image of hybrid composites with different stacking sequences.

شکل 1 تصویر شماتیکی از کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف.

همچنین، به منظور بررسی تأثیر دما بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته‌شده، نمونه‌ها در دماهای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت قرار گرفتند. سپس، کوره خاموش شده و نمونه‌ها به مدت 5 ساعت در آن به منظور خنک شدن قرار گرفتند.

3-2- مشخصه‌یابی

در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر دما و لایه‌چینی‌های مختلف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی، از آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM D790 در دمای محیط (با استفاده از دستگاه هانسفیلد³ HK255) استفاده شد. به طور میانگین مقادیر استحکام، مدول و کرنش نمونه‌ها به ترتیب از روابط 1 تا 3 بدست آمد. لازم به ذکر است که هر نمونه 3 بار مورد آزمایش قرار گرفت و مقادیر میانگین گزارش شدند.

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

$$E_b = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3)$$

در روابط بالا، σ_f ، استحکام خمشی (مگاپاسکال)، P ، بیشترین نیرو در منحنی‌های تنش-کرنش (نیوتن)، L ، طول نمونه طبق استاندارد خمشی که بر روی فک‌های دستگاه قرار می‌گیرد (میلی‌متر)، b ، عرض نمونه (میلی‌متر)، d ، ضخامت نمونه (میلی‌متر)، D ، میزان جابجایی در نقطه اولین افت نیرو (میلی-متر) و m ، شیب ناحیه خطی منحنی نیرو-جابجایی است [21].

با این وجود، مطالعات بسیار محدودی مبنی بر دستیابی به رفتار شبه-انعطاف‌پذیری در آزمون‌های خمشی صورت گرفته است و عوامل تأثیرگذار بر رخداد این پدیده در حین آزمون خمشی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، همان‌طور که گفته شد، کامپوزیت‌های پلیمری معمولاً در معرض رطوبت و محیط‌های حرارتی هستند. بنابراین، عملکرد آن‌ها می‌تواند در اثر قرارگیری در شرایط مختلف دمایی و محیطی تغییر کند. از این رو، مطالعه تأثیرات محیطی بر خواص کامپوزیت‌های پلیمری از اهمیت بالایی برخوردار است. با این وجود، تاکنون مطالعات بسیار محدودی مبنی بر تأثیر دما بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی صورت گرفته است. بر این اساس، هدف مطالعه حاضر ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن با لایه‌چینی‌های مختلف است. در این مطالعه، رفتار خمشی و امکان دستیابی به رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های هیبریدی در حین آزمون خمشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین، به منظور بررسی تأثیر شرایط محیطی، نمونه‌های ساخته‌شده در دماهای مختلف محیطی (25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد) به مدت 2 ساعت قرار می‌گیرند و تأثیرات آن بر رفتار خمشی کامپوزیت‌ها مطالعه می‌شود.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

در پژوهش حاضر، از الیاف بازالت با نام تجاری آرمباس¹ (کشور ارمنستان) و الیاف تک‌جهته نازک کربن با نام تجاری تکسترم² (کشور سوئد) استفاده شد. برای زمینه پلیمری کامپوزیت نیز رزین اپوکسی (EPL 1012) به همراه هاردنر (EPH 112) با نسبت رزین به هاردنر 100:13 بکار گرفته شد. جدول‌های 1 و 2 به ترتیب به ارائه خواص مکانیکی و حرارتی و مشخصات کلی الیاف بازالت و الیاف تک‌جهته نازک کربن مورد استفاده در این تحقیق می‌پردازند.

2-2- ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی

در این پژوهش به منظور ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف از روش لایه‌گذاری دستی³ استفاده شد.

جدول 1 مشخصات الیاف بازالت استفاده‌شده در این تحقیق

مقدار	خاصیت
380	چگالی (گرم بر مترمربع)
0.19	ضخامت (میلی‌متر)
8-22	قطر الیاف (میکرومتر)
سیلانی	نوع پوشش سطحی
-260-370	دمای کاری (درجه سانتی‌گراد)
80-95	مدول کششی (گیگاپاسکال)

جدول 2 مشخصات الیاف تک‌جهته نازک کربن استفاده‌شده در این تحقیق

مقدار	خاصیت
38	چگالی (گرم بر مترمربع)
0.1	ضخامت (میلی‌متر)
350	نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)
294	مدول کششی (گیگاپاسکال)
5490	استحکام کششی (مگاپاسکال)
1.9	ازدیاد طول (درصد)

³ Hand lay-up

⁴ Hounsfield

¹ ARMBAS

² TeXtreme

تمامی نمونه‌ها کاهش یافته است، با این وجود نمونه [CB6C] کمترین میزان افت در استحکام را در بین نمونه‌ها دارد. به عنوان مثال، استحکام خمشی نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C]، به ترتیب 7.72 درصد، 8.84 درصد و 4.62 درصد نسبت به دمای 25 درجه سانتی‌گراد افت پیدا کرده‌اند.

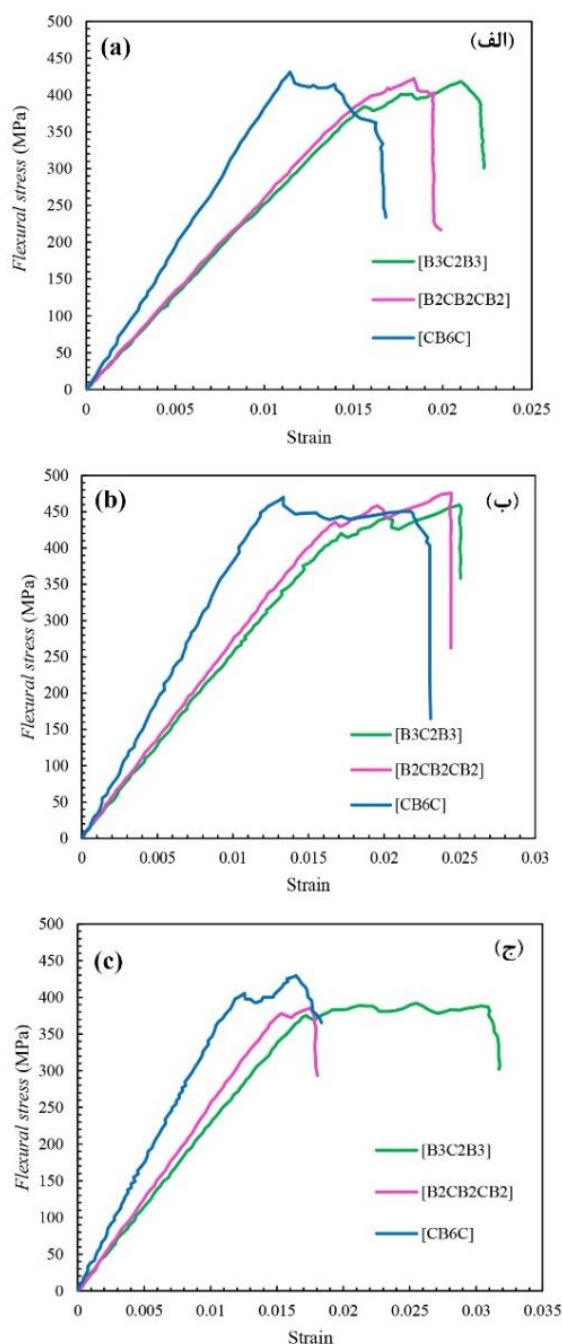


Fig. 2 The flexural stress-strain curves of the hybrid composites with different stacking sequences subjected different environmental temperatures of, (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 2 منحنی‌های تنش- کرنش خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف محیطی، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

همچنین به منظور بررسی سطوح شکست نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^1) مدل TESCAN ساخت کشور چک استفاده شد. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از پدیده تجمع بارهای الکترونی بر روی سطح نمونه در حین تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی، از پوشش-دهی طلا با استفاده از روش کندوپاش² استفاده شد.

3- نتایج و بحث

شکل 2 نشان‌دهنده منحنی‌های تنش- کرنش خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی در دماهای مختلف 25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که مشخص است، در تمامی نمونه‌ها شکست از نوع تدریجی بوده و پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری در تمامی نمونه‌ها دیده می‌شود. رخ دادن پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری را می‌توان به حضور الیاف نازک تک‌جهته کربن در نمونه‌ها نسبت داد. با این وجود مشخص است که با توجه به موقعیت قرارگیری الیاف نازک تک‌جهته کربن، رفتار نمونه‌ها از نظر استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست و کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری بسیار متفاوت است. به عنوان مثال، همان‌طور که در شکل 2-الف-a دیده می‌شود، کامپوزیت‌های [CB6C] دارای مدول خمشی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند، اما کرنش شکست آن‌ها پایین‌تر است. از طرف دیگر، اگرچه در نمونه‌های [B3C2B3] مقادیر استحکام و مدول خمشی پایین‌تری مشاهده می‌شود، اما این نمونه‌ها در تمامی دماها دارای کرنش شکست و همچنین کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نوع لایه‌چینی تأثیر قابل توجهی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده در این مطالعه دارد. با توجه به این که الیاف نازک تک‌جهته کربن منجر به تغییرات بسیار ناچیزی در ضخامت نمونه‌ها شده‌اند، می‌توان بیان کرد با توجه به کاربرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت، استفاده از این الیاف در موقعیت‌های مختلف می‌تواند منجر به افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری آن بدون تغییرات ابعادی شود. البته دیده می‌شود که قرار گرفتن نمونه‌ها در دماهای محیطی مختلف، منجر به تغییرات قابل توجه خواص خمشی آن‌ها شده است.

شکل 3 نشان‌دهنده استحکام خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه-چینی‌های مختلف در دماهای 25، 60 و 95 درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که دیده می‌شود، کامپوزیت‌های [CB6C] دارای بالاترین استحکام خمشی در تمامی دماها هستند. به عنوان مثال، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مقادیر 422.5، 422.3 و 451.1 مگاپاسکال به ترتیب برای کامپوزیت‌های هیبریدی [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] بدست آمد. همچنین، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مدول خمشی کامپوزیت‌های [CB6C] حدود 42 درصد نسبت به مقدار مدول خمشی نمونه‌های [B3C2B3] و [B2CB2CB2] بالاتر بود. در طی بارگذاری‌های خمشی، قسمت‌های مختلف نمونه در معرض نیروهای متفاوتی براساس موقعیت نسبت به نیروی بارگذاری قرار می‌گیرند.

به طور کلی، یکی از سطوح بیرونی نمونه تحت نیروهای فشاری و سطح دیگر تحت نیروی کششی قرار دارد. همان‌طور که دیده می‌شود، با نزدیک کردن الیاف نازک تک‌جهته کربن به سمت بیرونی‌ترین لایه‌ها، استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در آزمون خمش، خواص مکانیکی لایه‌های بیرونی دارای تأثیر بیشتری نسبت به سایر لایه‌های کامپوزیت‌های هیبریدی هستند و با قرار دادن الیاف کربن با استحکام مکانیکی بالاتر در سطوح بیرونی می‌توان استحکام خمشی را بهبود بخشید. همچنین مشخص است که با افزایش دما از 25 تا 95 درجه سانتی‌گراد، استحکام خمشی

² Sputtering

¹ Scanning Electron Microscopy

شکل 5 نشان‌دهنده مقادیر کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبریدی است. همان‌طور که دیده می‌شود، برخلاف استحکام و مدول خمشی، با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در دو سمت بیرونی کامپوزیت‌های هیبریدی، مقادیر کرنش شکست نمونه‌ها به شدت کاهش پیدا کرده است. در تمامی دماها، بالاترین و پایین‌ترین مقادیر کرنش شکست، به ترتیب مربوط به نمونه‌های [B3C2B3] و [CB6C] است. به عنوان مثال، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مقادیر کرنش شکست 0.021، 0.018 و 0.011 به ترتیب برای نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] بدست آمد. همچنین، مشخص است که به طور کلی افزایش دما منجر به افزایش کرنش شکست نمونه‌ها شده است. به عنوان نمونه، با افزایش دما از 25 تا 95 درجه سانتی‌گراد، کرنش شکست نمونه [B3C2B3] حدود 21.4 درصد افزایش یافته است.

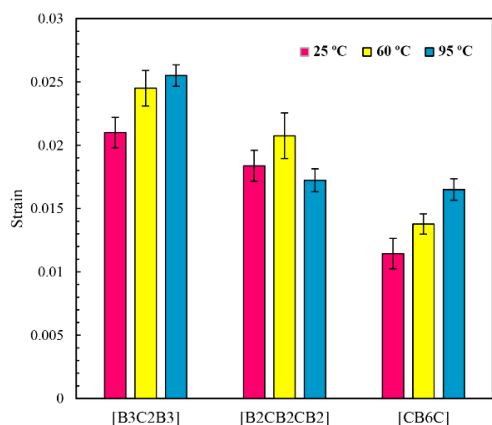


Fig. 5 The strain at break values of hybrid composites with different stacking sequences subjected different temperatures.

شکل 5 مقادیر کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف.

همان‌طور که نشان داده شد، دما و نوع قرارگیری الیاف، تأثیر قابل توجه‌ای بر خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته‌شده در این مطالعه دارند. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که افزایش دما دارای دو تأثیر متفاوت بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری است. گفته می‌شود که افزایش دما می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری از طریق افزایش سفتی پلیمر و چسبندگی پلیمر/الیاف شود [22]. از طرف دیگر، ضریب انبساط حرارتی در اجزای کامپوزیت‌ها با یکدیگر متفاوت است. لذا، اختلاف بدست آمده در انبساط اجزای کامپوزیت در اثر افزایش دما می‌تواند منجر به رخ دادن پدیده تورق¹ و در نتیجه افت خواص مکانیکی شود [23 و 24]. بنابراین می‌توان گفت که رقابتی بین اثرات مثبت و منفی دما بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری وجود دارد. این تأثیر دوگانه در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است [22 و 25]. به عنوان مثال، شیشوان² و آکبولوت³ [25] تأثیر سیکل‌های دمایی را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از الیاف بازالت و الیاف شیشه بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌ها را تا دمای +120 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه حرارت دادند و در دمای -40 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه خنک کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی تا یک تعداد مشخص، منجر به افزایش مدول کششی و خمشی نمونه‌ها شد، در حالی که افزایش بیشتر تعداد سیکل‌های حرارتی باعث افت خواص شد.

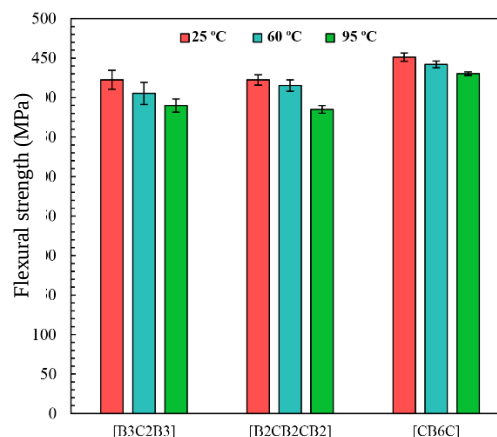


Fig. 3 The flexural strength values of hybrid composites with different stacking sequences subjected different temperatures.

شکل 3 مقادیر استحکام خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف.

شکل 4 نشان‌دهنده مقادیر مدول خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی در دماهای مختلف است. همان‌طور که دیده می‌شود، نوع قرارگیری الیاف بازالت و الیاف کربن، تأثیر بسیار قابل توجه‌ای بر مدول خمشی نمونه‌ها دارد. مطابق با شکل‌های 2 و 4، با قراردادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در دو سمت بیرونی کامپوزیت‌های هیبریدی، به طور قابل توجه‌ای مدول خمشی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، مدول خمشی نمونه [CB6C] برابر با 37.12 گیگاپاسکال است که این مقدار حدود 42 درصد بالاتر از مدول خمشی کامپوزیت‌های [B3C2B3] و [B2CB2CB2] است. همچنین مشخص است که بالاتر بودن مدول خمشی کامپوزیت‌های [CB6C] نسبت به سایر نمونه‌های در دماهای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد نیز حفظ می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای دستیابی به بالاترین مقادیر استحکام و مدول خمشی، لازم است که الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌های کامپوزیت‌های هیبریدی قرار گیرند.

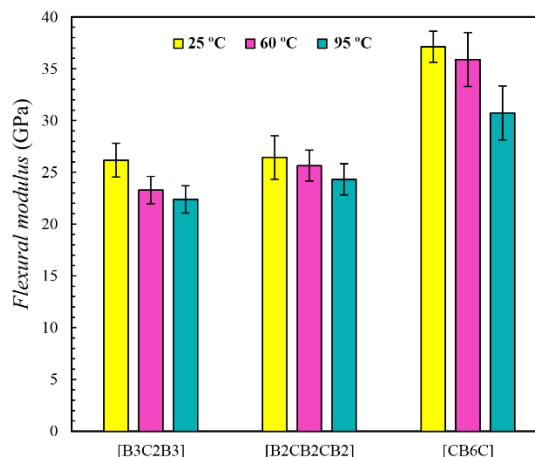


Fig. 4 The flexural modulus values of hybrid composites with different stacking sequences subjected different temperatures.

شکل 4 مقادیر مدول خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی با لایه‌چینی‌های مختلف در دماهای مختلف.

³ Akbulut

¹ Delamination

² Shishewan

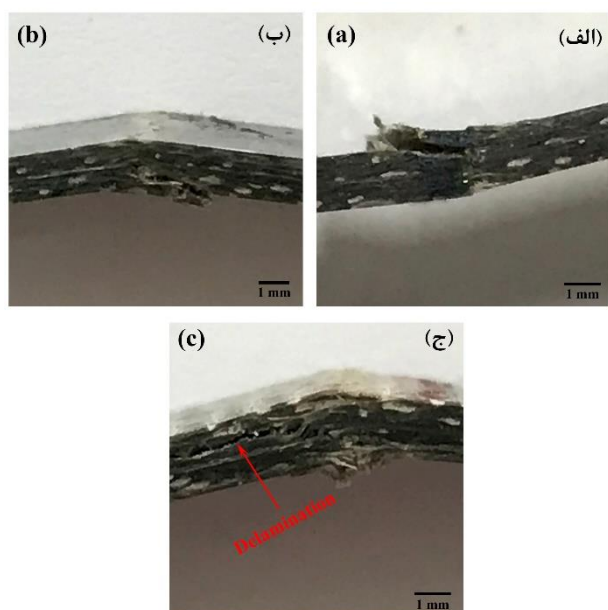


Fig. 6 The fracture surface of [B3C2B3] sample at different temperatures of, (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 6 سطوح شکست کامپوزیت‌های [B3C2B3] در دماهای مختلف، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

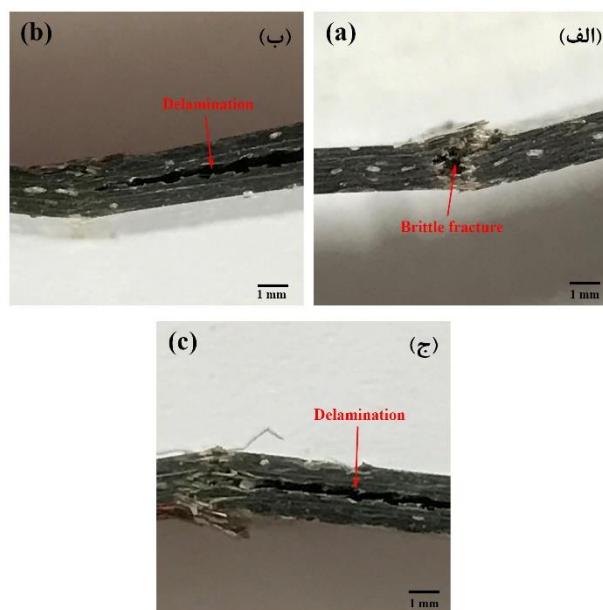


Fig. 7 The fracture surface of [B2CB2CB2] sample at different temperatures of, (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 7 سطوح شکست کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] در دماهای مختلف، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

همچنین، با توجه به شکل 8، مشخص است که اگرچه در نمونه [CB6C] با افزایش دما پدیده تورق دیده می‌شود، اما این نمونه، شکست تردتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. این پدیده می‌تواند ناشی از وجود فصل مشترک کمتر بین الیاف بازالت و الیاف کربن در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها باشد.

ضریب انبساط حرارتی رزین اپوکسی، الیاف بازالت و الیاف کربن به ترتیب برابر با $6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ، $6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ و $-6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ است [26]. با توجه به تفاوت ضریب انبساط حرارتی الیاف بازالت و الیاف کربن، قرارگیری این دو نوع الیاف در کنار یکدیگر، منجر به افت بیشتر خواص در اثر افزایش دما می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان داد، کامپوزیت‌های [CB6C] افت کمتری را در مقایسه با کامپوزیت‌های [B3C2B3] و [B2CB2CB2] از خود نشان دادند. این می‌تواند به دلیل این باشد که در کامپوزیت‌های [CB6C]، تعداد فصل مشترک‌های بین الیاف بازالت و الیاف کربن کمتر از کامپوزیت‌های با لایه‌چینی‌های دیگر است. از طرف دیگر، همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شد، تمامی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته‌شده در این پژوهش دارای رفتار شکست تدریجی و اصطلاحاً دارای رفتار شبه‌انعطاف‌پذیری بودند. یکی از متغیرهای تأثیرگذار در این رفتار مواد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری است. کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری از شروع رفتار شکست تدریجی تا شکست نهایی نمونه محاسبه می‌شود. [27]. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما تا یک حد مشخص، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، با افزایش دما از 25 به 60 درجه سانتی‌گراد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها افزایش یافت. به عنوان مثال، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] به ترتیب 0.37، 1.33 و 3.04 برابر با افزایش دما از 25 به 60 درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. در مورد کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] و [CB6C]، دمای بهینه از نظر میزان شبه‌انعطاف‌پذیری برابر با 60 درجه سانتی‌گراد است، زیرا با افزایش دما از 60 به 95 درجه سانتی‌گراد، میزان شبه‌انعطاف‌پذیری در آن‌ها کاهش می‌یابد. با این وجود در نمونه [B3C2B3]، با افزایش دما از 60 به 95 درجه سانتی‌گراد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری حدود 90 درصد افزایش پیدا کرده است. افزایش مقادیر کرنش در کامپوزیت‌های هیبریدی در اثر افزایش دما را می‌توان به پدیده نرم‌شدگی¹ نسبت داد. به طور کلی، نرم‌شدگی و کاهش سفتی نمونه‌ها می‌تواند منجر به افزایش کرنش شکست نمونه‌ها شود. همچنین، همان‌طور که گفته شد، رخ دادن هم‌زمان خرد شدن الیاف نازک تک‌جهته کربن به همراه ایجاد تورق‌های موضعی منجر به وقوع پدیده شبه‌انعطاف‌پذیری می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش دما از طریق افزایش میزان تورق‌های موضعی منجر به بالا رفتن مقادیر کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری شده است.

شکل‌های 6 تا 8 به ترتیب نشان‌دهنده تصاویر میکروسکوپی از سطوح شکست کامپوزیت‌های هیبریدی [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] در دماهای مختلف هستند. همان‌طور که در شکل‌های 6 دیده می‌شود، میزان پدیده تورق در نمونه [B3C2B3] در دماهای 25 و 60 درجه سانتی‌گراد چندان چشمگیر نیست. با این وجود، مشخص است که افزایش دما به 95 سانتی‌گراد، منجر به افزایش پدیده تورق در نمونه [B3C2B3] شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش تأثیرگذاری اختلاف در ضریب انبساط حرارتی بین الیاف بازالت و الیاف کربن باشد. سطوح شکست کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] در شکل‌های 7 نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، میزان پدیده تورق در نمونه‌های [B2CB2CB2] بیشتر از سایر نمونه‌های کامپوزیت است که می‌تواند به دلیل بالاتر بودن تعداد فصل مشترک در این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌ها باشد.

¹ Softening

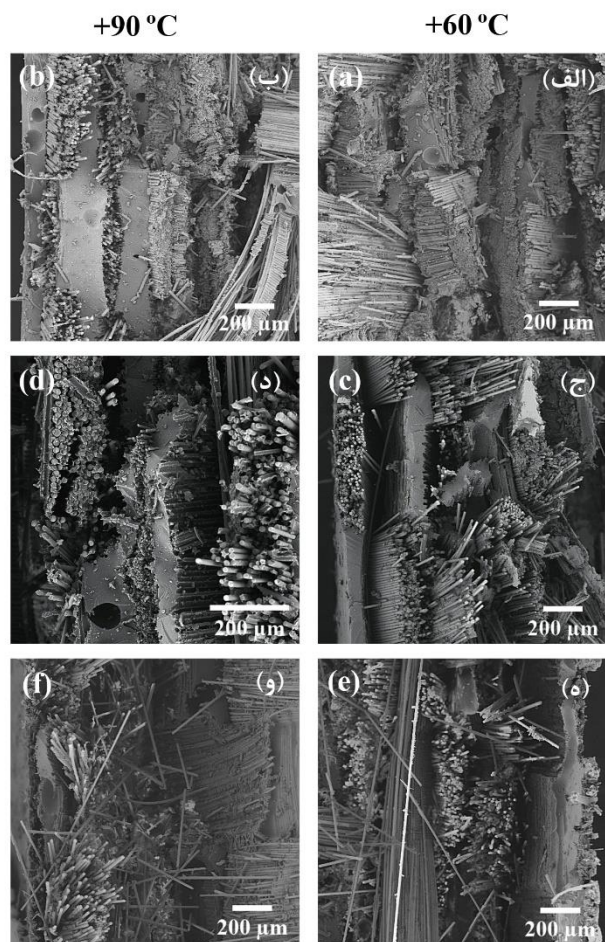


Fig. 9 The fracture surfaces of composite samples subjected to temperatures of 60 and 95 °C, (a and b) [B3C2B3] samples, (c and d) [B2CB2CB2] samples, (e and f) [CB6C].

شکل 9 سطوح شکست نمونه‌های کامپوزیتی در دماهای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد، (الف و ب) نمونه‌های [B3C2B3]، (ج و د) نمونه‌های [B2CB2CB2]، (ه، و) نمونه‌های [CB6C]

2- نتایج آزمون خمش نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای رفتار شبه-انعطاف‌پذیری بودند. با این وجود، میزان کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها متأثر از دما و نوع قرارگیری الیاف در کامپوزیت‌ها بود. به طور کلی نتایج نشان داد که کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در مرکز نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین، افزایش دما به طور کلی منجر به افزایش کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌ها شد، به طوری که با افزایش دما از 25 به 60 درجه سانتی‌گراد، کرنش شبه‌انعطاف‌پذیری نمونه‌های [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] به ترتیب 0.37، 1.33 و 3.04 برابر افزایش یافت.

3- نتایج نشان داد که افزایش دما سبب افت خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل پدیده تورق در اثر اختلاف در ضریب انبساط حرارتی اجزای کامپوزیت‌ها شده است. کامپوزیت‌های [B2CB2CB2] به دلیل دارا بودن تعداد فصل مشترک‌های بیشتر بین الیاف بازالت و الیاف کربن دچار تورق بیشتر و در نتیجه افت خواص بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها شدند.

5- مراجع

- [1] Salehi-Khojin, A., Mahinfalah, M., Bashirzadeh, R. and Freeman, B., "Temperature Effects on Kevlar/Hybrid and Carbon Fiber Composite Sandwiches under Impact Loading" Composite Structures, Vol. 78, No. 2, pp. 197-206, 2007.

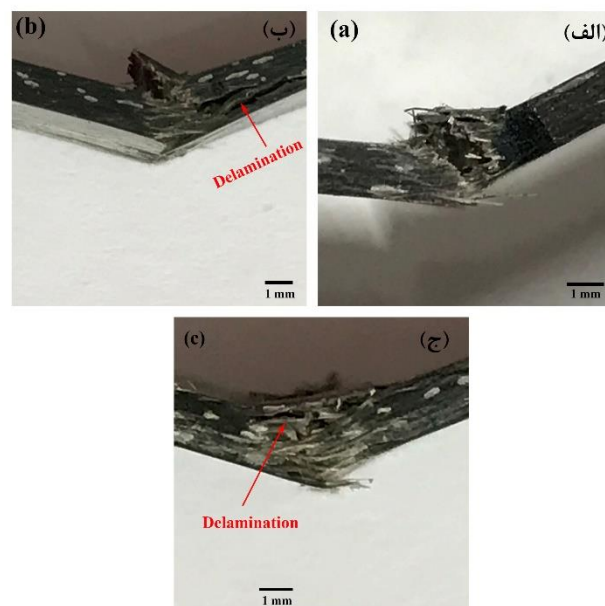


Fig. 8 The fracture surface of [CB6C] sample at different temperatures of, (a) 25 °C, (b) 60 °C, and (c) 95 °C.

شکل 8 سطوح شکست کامپوزیت‌های [CB6C] در دماهای مختلف، (الف) 25 درجه سانتی‌گراد، (ب) 60 درجه سانتی‌گراد و (ج) 95 درجه سانتی‌گراد.

به منظور بررسی بهتر سطوح شکست کامپوزیت‌های هیبریدی، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل 9 نشان‌دهنده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های کامپوزیتی در دو دمای 60 و 95 درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که دیده می‌شود، در هر دو دمای مذکور، نمونه‌های [B2CB2CB2] دچار پدیده تورق بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها شده‌اند. این نتایج در تطابق با تصاویر ماکروسکوپی بوده و به خوبی نشان‌دهنده آن است که وجود تعداد فصل مشترک‌های بیشتر الیاف بازالت / الیاف کربن می‌تواند منجر به افزایش پدیده تورق شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر لایه‌چینی و دماهای مختلف بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی-الیاف بازالت / الیاف کربن لایه نازک تک‌جهته پرداخته شد. در این تحقیق، سه نوع کامپوزیت هیبریدی متفاوت از نظر لایه چینی با کدهای [B3C2B3]، [B2CB2CB2] و [CB6C] با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. در این کدها، B و C به ترتیب بیانگر الیاف بازالت و الیاف نازک تک‌جهته کربن، و اعداد بعد از حروف نشان‌دهنده تعداد لایه‌ها هستند. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

1- نتایج نشان داد که با قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در دو سمت بیرونی نمونه‌ها، استحکام و مدول خمشی به طور جدی افزایش یافت. اگرچه افزایش دما منجر به افت استحکام و مدول خمشی تمامی نمونه‌ها شد، اما نمونه‌های [CB6C] دارای کمترین میزان افت خواص بودند. برخلاف استحکام و مدول خمشی نمونه‌ها، کامپوزیت‌های [B3C2B3] دارای بالاترین مقدار کرنش بودند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به منظور بهبود استحکام و مدول خمشی، قرار دادن الیاف نازک تک‌جهته کربن در بیرونی‌ترین لایه‌ها راهکاری مناسب است. از طرف دیگر، برای بهبود کرنش و چقرمگی، لازم است که الیاف نازک تک‌جهته کربن در مرکز نمونه‌ها قرار گیرند.

- Part A: Applied Science and Manufacturing, 72, 75-84" Composites: Part A, Vol. 72, pp. 75-84, 2015.
- [19] Jalalvand, M., Czél, G. and Wisnom, M. R., "Damage Analysis of Pseudo-Ductile Thin-Ply Uid Hybrid Composites—a New Analytical Method" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 69, pp. 83-93, 2015.
- [20] Czél, G. and Wisnom, M., "Demonstration of Pseudo-Ductility in High Performance Glass/Epoxy Composites by Hybridisation with Thin-Ply Carbon Prepreg" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 52, pp. 23-30, 2013.
- [21] ASTM, I., "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials" ASTM D790-07, 2007.
- [22] Azimpour-Shishevan, F., Akbulut, H. and Mohtadi-Bonab, M., "Effect of Thermal Cycling on Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fibre-Reinforced Epoxy Composites" Bulletin of Materials Science, Vol. 43, No. 1, pp. 1-10, 2020.
- [23] Dasari, S., Saurabh, S., Mahato, K. K., Prusty, R. K. and Ray, B. C., "Mechanical Properties of Glass/Carbon Inter-Ply Hybrid Polymer Composites at Different in-Situ Temperatures" Materials Today: Proceedings, Vol. 39, pp. 1192-1197, 2021.
- [24] Rathore, D. K., Prusty, R. K., Mohanty, S. C., Singh, B. P. and Ray, B. C., "In-Situ Elevated Temperature Flexural and Creep Response of Inter-Ply Glass/Carbon Hybrid Frp Composites" Mechanics of Materials, Vol. 105, pp. 99-111, 2017.
- [25] Shishevan, F. A. and Akbulut, H., "Effects of Thermal Shock Cycling on Mechanical and Thermal Properties of Carbon/Basalt Fiber-Reinforced Intraply Hybrid Composites" Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, Vol. 43, No. 1, pp. 441-449, 2019.
- [26] Khalili, S. M. R., Najafi, M. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Thermal Cycling on the Tensile Behavior of Polymer Composites Reinforced by Basalt and Carbon Fibers" Mechanics of Composite Materials, Vol. 52, No. 6, pp. 807-816, 2017.
- [27] Sun, J., "Pseudo-Ductility in Cfrp Laminates through the Ply Weakening Method", 2019.
- [2] Halvorsen, A., Salehi-Khojn, A., Mahinfalah, M. and Nakhaei-Jazar, R., "Temperature Effects on the Impact Behavior of Fiberglass and Fiberglass/Kevlar Sandwich Composites" Applied Composite Materials, Vol. 13, No. 6, pp. 369-383, 2006.
- [3] Aghamohammadi, H., Abbandanak, S., Eslami-Farsani, R. and Siadati, S., "Effect of Various Surface Treatment Methods on the Flexural Properties of Fiber Metal Laminates" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 495-502, 2020.
- [4] Fazlollah-Poor, M., Eslami-Farsani, R. and Aghamohammadi, H., "Experimental Investigation of the Effect of Shape Memory Alloy Wire Embedding on the Low-Velocity Impact Behavior of Fiber Metal Laminates Composites at Different Temperatures" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1057-1063, 2020.
- [5] Czél, G., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R., "Design and Characterisation of Advanced Pseudo-Ductile Unidirectional Thin-Ply Carbon/Epoxy-Glass/Epoxy Hybrid Composites" Composite Structures, Vol. 143, pp. 362-370, 2016.
- [6] Eslami Farsani, R., Ebrahim Nejad Khaljiri, H., Khorsand, H. and Abbas Banaee, K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [7] Swolfs, Y., Geboes, Y., Gorbatiikh, L. and Pinho, S. T., "The Importance of Translaminar Fracture Toughness for the Penetration Impact Behaviour of Woven Carbon/Glass Hybrid Composites" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 103, pp. 1-8, 2017.
- [8] Najafi, M., Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., "Hybridization Effect of Basalt and Carbon Fibers on Impact and Flexural Properties of Phenolic Composites" Iranian Polymer Journal, Vol. 23, No. 10, pp. 767-773, 2014.
- [9] Subagia, I. A., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S. and Shon, H. K., "Effect of Stacking Sequence on the Flexural Properties of Hybrid Composites Reinforced with Carbon and Basalt Fibers" Composites Part B: Engineering, Vol. 58, pp. 251-258, 2014.
- [10] Prusty, R. K., Rathore, D. K., Singh, B. P., Mohanty, S. C., Mahato, K. K. and Ray, B. C., "Experimental Optimization of Flexural Behaviour through Inter-Ply Fibre Hybridization in Frp Composite" Construction and Building Materials, Vol. 118, pp. 327-336, 2016.
- [11] Bunsell, A. and Harris, B., "Hybrid Carbon and Glass Fibre Composites" Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 157-164, 1974.
- [12] Manders, P. W. and Bader, M., "The Strength of Hybrid Glass/Carbon Fibre Composites" Journal of materials science, Vol. 16, No. 8, pp. 2246-2256, 1981.
- [13] Fuller, J. and Wisnom, M., "Exploration of the Potential for Pseudo-Ductility in Thin Ply Cfrp Angle-Ply Laminates Via an Analytical Method" Composites Science and Technology, Vol. 112, pp. 8-15, 2015.
- [14] Fuller, J. and Wisnom, M., "Pseudo-Ductility and Damage Suppression in Thin Ply Cfrp Angle-Ply Laminates" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 69, pp. 64-71, 2015.
- [15] Fuller, J., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R., "Combining Fibre Rotation and Fragmentation to Achieve Pseudo-Ductile Cfrp Laminates" Composite Structures, Vol. 142, pp. 155-166, 2016.
- [16] Czél, G., Jalalvand, M., Wisnom, M. R. and Czigány, T., "Design and Characterisation of High Performance, Pseudo-Ductile All-Carbon/Epoxy Unidirectional Hybrid Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 111, pp. 348-356, 2017.
- [17] Czél, G., Jalalvand, M. and Wisnom, M. R., "Demonstration of Pseudo-Ductility in Unidirectional Hybrid Composites Made of Discontinuous Carbon/Epoxy and Continuous Glass/Epoxy Plies" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 72, pp. 75-84, 2015.
- [18] Czél, G., Jalalvand, M. and Wisnom, M., "Ductility in Unidirectional Hybrid Composites Made of Discontinuous Carbon/Epoxy and Continuous Glass/Epoxy Plies. Composites



تأثیر فشار ستون سیال بر فرکانس‌های طبیعی قطاع دایروی توخالی از جنس مواد تابعی

امیرحسین نصراله براتی¹، علی اصغر جعفری²، شهرام اعتمادی حقیقی^{3*}، عادل مقصودپور³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی، تهران

3 و 4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

* تهران، صندوق پستی 14515-775، setemadi@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/03/19

پذیرش: 1400/08/15

چکیده

در این تحقیق، تأثیر فشار دینامیکی سیال بر روی ارتعاشات خطی قطاع دایروی توخالی از جنس مواد تابعی بررسی شده است. تجزیه و تحلیل ورق بر اساس نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول و با در نظر گرفتن اثرات اینرسی دورانی و نیروهای برشی انجام شده است. معادلات حاکم بر حرکت ورق با در نظر گرفتن انرژی‌های جنبشی و پتانسیل و استفاده از اصل همیلتون استخراج گردیده است. همچنین، فشار وارد شده از سیال به ورق با استفاده از حل تابع پتانسیل سرعت سیال و برابری سرعت در سطح تماس سیال و قطاع برحسب جابه‌جایی عمودی قطاع تعیین شده است. شکل مدهای فرضی بر اساس ارضای شرایط مرزی ورق در نظر گرفته شده است. با جایگذاری مدهای فرضی، پاسخ هارمونیک و استفاده از روش گالرکین، معادله حاکم به معادله مشخصه تبدیل شده و فرکانس طبیعی ورق بدست آمده است. با استفاده از روش نیمه‌تحلیلی مورد استفاده در این پژوهش تمامی حالت‌های شرایط مرزی قابل بررسی می‌باشند. در ادامه، نتایج عددی برای یک ورق نمونه ارائه شده و تأثیر پارامترهایی مانند زاویه قطاع، شرایط مرزی، چگالی سیال و ارتفاع سیال بررسی شده است. در پایان نتایج به‌دست آمده بدون در نظر گرفتن سیال با پژوهش‌های پیشین، و در حالت تماس با سیال با نرم‌افزار المان محدود انسیس اعتبار سنجی شده است.

کلیدواژگان

ارتعاشات خطی، قطاع دایروی توخالی، مواد تابعی، فشار ستون سیال

The effect of fluid column pressure on the natural frequencies of an annular sector plate made of functionally graded material

Amir Hossein Nasrollah Barati¹, Ali Asghar Jafari², Shahram Etemadi Haghighi^{3*}, Adel Maghsoudpour⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14515-775, Tehran, Iran, setemadi@srbiau.ac.ir

Keywords

Linear vibration, Annular sector plate, functionally graded material, Fluid column pressure

Abstract

In this study, the effect of fluid dynamic pressure on the linear vibrations of annular sector plate made of Functionally Graded Material (FGM) is investigated. Analysis of the plate is based on First-order Shear Deformation Plate Theory (FSDT) with consideration of rotational inertial effects and transverse shear stresses. The governing equations of motion of the plate are derived by considering the kinetic and potential energies and using the Hamilton's principle. Also, the pressure applied from the fluid to the plate is determined by solving the velocity potential function of the fluid and the velocity equality at the contact surface of the fluid and the sector in terms of vertical displacement of the sector. The shape of the studied plate modes is based on satisfying the boundary conditions of the plate. By placing hypothetical modes, harmonic responses and using the Galerkin method, the governing equation have become the characteristic equation and the natural frequency is obtained. Furthermore, the numerical results are presented for a sample plate and the effect of different parameters such as sector angle, boundary conditions, fluid density, and fluid height is investigated. Finally, the obtained results are validated without considering the fluid with previous researches, and in case of contact with the fluid with finite element model (ANSYS software).

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Nasrollah Barati, A. H., Jafari, A. A., Etemadi Haghighi, S., 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, Vol. 8, No. 2, pp. 1522-1531, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.531588.1731>

1- مقدمه

بررسی خصوصیات دینامیکی ورق‌ها یکی از موضوعات مهم مهندسی است و مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [1]. خصوصیات هیدروالاستیک سازه‌های در تماس با سیال برای بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند سازه‌های دریایی، سازه‌های هوایی، اجزای داخلی راکتور، مخازن ذخیره و سازه‌های هوایی مورد توجه می‌باشد. فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها از جمله ورق در حالت تماس با سیال متفاوت از فرکانس‌های آن در حالت بدون تماس با سیال می‌باشد. روش‌های مختلف نظری و عددی برای حل مشکلات تماس سازه‌ها با سیال توسعه یافته است. در برخی موارد حضور سیال باعث خستگی و یا از کارافتادگی سازه می‌گردد لذا آگاهی از رفتار سازه و سیال در اندرکنش دینامیکی بین آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد [2]. محققان مطالعات زیادی در زمینه ارتعاشات ورق در تماس با سیال انجام داده‌اند. عسکری و همکاران در سال 2013 [3]، ارتعاش یک ورق دایروی غوطه‌ور در سیال محدود را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک سری آزمایشات تجربی برای اعتبارسنجی مدل ارائه دادند و ورق را با دو شرط مرزی مختلف، لبه آزاد و لبه ساده مورد بررسی قرار دادند. برای دستیابی به پتانسیل سرعت سیال از هر دو روش حداقل مربعات گالریکین بهره بردند. همچنین برای تعیین فرکانس‌های طبیعی ورق از روش ریلی ریتز استفاده کردند. نتایج نشان داد که فرکانس‌های طبیعی ورق در ابتدا با عمق غوطه‌وری کاهش می‌یابد، سپس با رسیدن ورق به وسط ظرف تقریباً ثابت می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، تارپوردی لو و همکاران در سال 2013 [4]، ارتعاش آزاد ورق دایروی در تماس با سیال غیرقابل تراکم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فرکانس‌های طبیعی و جرم اضافه شده مربوطه را تعیین کردند. همچنین از دو روش سری‌های بسل-فوریه و روش تغییرات برای استخراج فرکانس‌های طبیعی ورق و سیال استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که برای دامنه معمول عمق سیال، فرکانس‌های ارتعاش آزاد با تغییر اندکی در عمق سیال، بدون تغییر باقی می‌ماند.

کواک و کیم در سال 1991 [5]، ارتعاش یک ورق دایروی در تماس با سیال ایده‌آل را در حالت متقارن محوری با در نظر گرفتن شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از نسبت فرکانس‌های طبیعی ورق در تماس بر فرکانس‌های طبیعی ورق بدون تماس با سیال که ضریب نمو جرم مجازی (AVMI) نامیده می‌شود، استفاده کردند و نشان دادند که حضور سیال مقدار اینرسی ورق را افزایش داده و در نهایت فرکانس‌های طبیعی ورق در مقایسه با حالت خشک بطور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. کربوا و همکاران در سال 2008 [6]، ارتعاش یک ورق مستطیل شکل در تماس با سیال را با پیشنهاد یک مدل ساختاری ریاضی بر اساس ترکیب روش اجزای محدود و تئوری پوسته‌سندرز مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از تابع پتانسیل سرعت و معادله برنولی فشار وارد شده از سیال به ورق را تعیین کردند. همچنین نشان دادند که روش ارائه شده می‌تواند برای مدل‌سازی ساختارهای منحنی تحت فشار تصادفی (به عنوان مثال، تجزیه و تحلیل دینامیکی اجزای مولد بخار) مورد استفاده قرار گیرد. خورشیدی و همکاران در سال 2017 [7]، ارتعاشات آزاد یک ورق مستطیل شکل در تماس با سیال را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ورق مستطیل شکل را به عنوان یکی از دیواره‌های مخزن مکعبی حاوی سیال در نظر گرفتند و برای بدست آوردن فرکانس طبیعی ورق مستطیل شکل در تماس با سیال آزمایش‌های صوتی و مودال را مورد استفاده قرار دادند. روش پیشنهادی آن‌ها می‌تواند ورق‌های عمودی، افقی یا

زاویه‌دار را که تا حدی در سیال غوطه‌ور شده‌اند را مورد بررسی قرار دهد. در مطالعه‌ای دیگر، سیوالک در سال 2004 [8]، مقایسه‌ای بین روش‌های تفاضلات مربعی و تفاضلات مربعی هارمونیک برای کمناش، خمش و تجزیه و تحلیل ارتعاشات آزاد ورق و ستون‌های الاستیک انجام داد. یافته‌ها نشان داد که روش تفاضلات مربعی هارمونیک نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد و نسبت به روش تفاضلات مربعی به نقاط شبکه کمتری نیاز دارد.

در سال 2012 [9]، حسینی هاشمی و همکاران به مطالعه ارتعاشات آزاد ورق نسبتاً ضخیم مستطیلی در تماس با سیال پرداختند. آن‌ها برای استخراج روابط حاکم بر ورق از تئوری میندلین و برای استخراج روابط حاکم بر سیال از معادله برنولی استفاده کردند. آن‌ها در مطالعه‌ای که انجام دادند فرکانس‌های طبیعی ورق در تماس با سیال از یک وجه و از دو وجه را بدست آوردند. یوسف‌زاده و همکاران در سال 2019 [10]، ارتعاش اجباری ورق نسبتاً ضخیم مستطیلی از جنس مواد مدرج تابعی در تماس با سیال غیر قابل تراکم تحت بار متحرک را مطالعه نمودند. آن‌ها با استفاده از تئوری مرتبه اول برشی و بکارگیری روش بسط شکل مودها معادلات حاکم بر رفتار ارتعاشی را استخراج کردند. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف هندسی از قبیل نسبت طول به عرض ورق، ضخامت به طول ورق، چگالی سیال و توان کسر حجمی را روی پاسخ دینامیکی ورق بررسی کردند. یوسف‌زاده و همکاران در سال 2019 [11]، ارتعاشات ورق دایروی از جنس مواد تابعی در تماس با سیال محدود را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها معادلات حاکم را با استفاده از تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی و توابع هارمونیک چیشف و معادله سیال را با استفاده از حل معادله لاپلاس پتانسیل سرعت استخراج کردند. همچنین از روش ریتز برای تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ورق دایروی در تماس با سیال استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان دهنده این موضوع بود که با افزایش ارتفاع سیال درون مخزن مقادیر فرکانس طبیعی ورق بطور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

شفیعی و همکاران در سال 2014 [12]، ارتعاشات آزاد ورق الاستیک از جنس مواد تابعی را که روی پایه الاستیک وینکلر در تماس با سیال قرار دارد را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دهنده این موضوع بود که فرکانس‌های طبیعی سیستم جفت شده سیال با افزایش پارامتر ماده افزایش می‌یابد. علاوه بر این، فرکانس طبیعی ورق با افزایش سفتی پایه الاستیک روند افزایشی خواهد داشت. آمابیلی 1996 [13]، به مطالعه ارتعاشات آزاد ورق دایروی توخالی در تماس با سیال محدود از یک طرف پرداخت. وی در تحقیق خود سیال را غیر قابل تراکم فرض کرد، همچنین ورق را در یک دیافراگم حلقوی از یک دیواره سفت و سخت بینهایت قرار داد. نتایج نشان داد که وقتی دامنه سیال توسط یک سطح آزاد محدود می‌شود، فرکانس‌های طبیعی با عمق سیال کاهش می‌یابد. کانالس و مانناری در سال 2017 [14]، یک راه حل تحلیلی برای تجزیه و تحلیل ارتعاش آزاد ورق کامپوزیت مستطیلی ضخیم در تماس با سیال محدود ارائه کردند. میدان جابجایی ورق با استفاده از روش ریتز تقریب زده شد و با استفاده از توابع مناسب شرایط مرزی کلاسیک را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت اثر جهتگیری الیاف کامپوزیت به همراه پارامترهای هندسی ورق روی فرکانس‌های طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت.

در مطالعه دیگری، یوسف‌زاده و همکاران در سال 2018 [15]، پاسخ دینامیکی ورق دایروی از جنس مواد تابعی را در تماس با سیال محدود تحت بار هارمونیک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تجزیه و تحلیل ورق را بر اساس

1 Added Virtual Mass Incremental

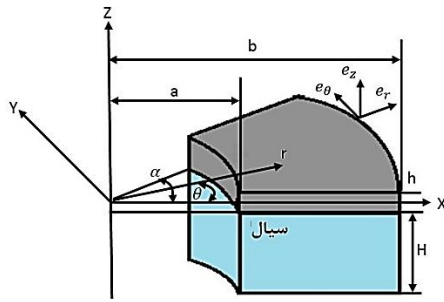


Fig. 1 Schematic of annular sector plate in contact with fluid with coordinate convection.

شکل 1 هندسه قطاع دایروی در تماس با سیال و نحوه استقرار محورها مختصات

که در آن z فاصله یک نقطه از لایه میانی، u_θ, u_r و u_z به ترتیب جابجایی یک نقطه دلخواه در امتداد محورها r, θ و z و u_0 و v_0 به ترتیب نمایانگر جابجایی صفحه میانی در امتداد جهت r و θ هستند. همچنین φ_r و φ_θ بیانگر چرخش‌های محور قائم عرضی به ترتیب حول محورها r و θ است. نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول برای ورق‌های نسبتاً ضخیم استفاده می‌شود. برای یک قطاع دایروی توخالی، این تئوری را می‌توان در ورق‌های با $h/c \leq 0.2$ استفاده کرد [19].

با فرض تغییرشکل‌های کوچک و روابط تنش- کرنش خطی، مؤلفه‌های کرنش قطاع دایروی طبق روابط زیر قابل بیان است [18]:

$$\begin{aligned} e_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r} + z \frac{\partial \varphi_r}{\partial r} \\ e_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \left(u_\theta + \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) + \frac{z}{r} \left(\varphi_r + \frac{\partial \varphi_\theta}{\partial \theta} \right) \\ e_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} + z \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_r}{\partial \theta} + \frac{\partial \varphi_\theta}{\partial r} - \frac{\varphi_\theta}{r} \right) \right) \\ e_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\varphi_r + \frac{\partial w}{\partial r} \right), \quad e_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\varphi_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

بر اساس قانون هوک، روابط تنش-کرنش به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{E(z)}{1-\nu^2} (e_{rr} + \nu(e_{\theta\theta} + e_{zz})) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{E(z)}{1-\nu^2} (e_{\theta\theta} + \nu(e_{rr} + e_{zz})) \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{E(z)}{1+\nu} e_{r\theta}, \quad \sigma_{rz} = \kappa^2 \frac{E(z)}{1+\nu} e_{rz} \\ \sigma_{\theta z} &= \kappa^2 \frac{E(z)}{1+\nu} e_{\theta z} \end{aligned} \quad (3)$$

κ^2 ضریب تصحیح برشی است که برای قطاع دایروی مقدار آن $\pi^2/12$ است. همچنین ν نسبت پواسون و $E(z)$ مدول یانگ ورق می‌باشد که طبق مدل ردی به صورت زیر تعریف می‌شود [15]:

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m) \left(\frac{2z - h}{2h} \right)^p \quad (4)$$

تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول انجام دادند. همچنین با حل معادله لاپلاس و برآورده ساختن شرایط مرزی آن، معادله حاکم برای رفتار نوسانی سیال را بدست آوردند. علاوه بر این، آن‌ها برای تعیین پاسخ دینامیکی ورق از روش چبیشف-ریتز و ارضای شرایط مرزی استفاده کردند. یوسف‌زاده و همکاران در سال 2019 [16]، به بررسی ارتعاشات آزاد ورق دایروی از جنس مواد تابعی در تماس با سیال محدود و غیرقابل تراکم پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش ریتز، فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای ورق دایروی در تماس با سیال را بر مبنای انرژی پتانسیل کمینه استخراج کردند و در ادامه، تأثیر پارامترهای مختلف هندسی از قبیل نسبت ضخامت بر شعاع ورق، شرایط مرزی، چگالی سیال، نسبت کسر حجمی ماده تابعی و ارتفاع سیال را روی فرکانس‌های طبیعی مورد بررسی قرار دادند. در سال 2000 اندو [17]، با استفاده از روش اجزای محدود، رفتار ارتعاشی سازه‌های شناور بسیار بزرگ VLFS¹ را تحت تأثیر بارمتحرک و امواج مورد مطالعه قرار داد. وی نشان داد که امواج باعث افزایش پاسخ دینامیکی VLFS می‌شود و اثر آن‌ها بایستی در طراحی این سازه‌ها مد نظر قرار گیرد.

مرور کارهای انجام شده توسط محققان که بخشی از آن‌ها در بالا اشاره شد نشان می‌دهد که تحقیقی در رابطه با قطاع دایروی از جنس مواد تابعی در تماس با سیال صورت نگرفته است. همچنین کارهای انجام شده بر روی ارتعاشات قطاع دایروی در شرایط محدود یعنی تکیه‌گاه با لبه ساده را بررسی کرده‌اند اما با توجه به روند حل نیمه‌تحلیلی این پژوهش تمام شرایط تکیه‌گاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، در این پژوهش ارتعاشات خطی قطاع دایروی از جنس مواد تابعی در تماس با سیال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. علاوه بر این، معادلات حرکتی حاکم توسط تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و اصل همیلتون تعیین شده است. فشار دینامیکی سیال به ورق با استفاده از معادله لاپلاس و ارضای شرایط مرزی بر حسب جابه‌جایی عمودی ورق بدست آمده است. با استفاده از روش مدهای فرضی و در نظر گرفتن پاسخ‌های هارمونیک و به کار بردن روش گالرکین فرکانس طبیعی ورق تعیین شده است. در انتها، برای قطاع دایروی از جنس مواد تابعی اثر پارامترهایی مانند زاویه قطاع، چگالی و ارتفاع سیال بر فرکانس طبیعی خطی برای شرایط مرزی مختلف ارائه شده است. همچنین نتایج بدست آمده بدون در نظر گرفتن سیال با پژوهش‌های پیشین و با در نظر گرفتن سیال با نرم‌افزار المان محدود انسیس صحت سنجی شده است که همگرایی خوبی را نشان می‌دهد.

2- روابط حاکم

2-1- روابط حاکم بر قطاع دایروی

یک قطاع دایروی تو خالی از جنس مواد تابعی به شعاع داخلی a و شعاع خارجی b و ضخامت h با زاویه مرکزی α مطابق شکل 1 در نظر گرفته شده است. ورق در سطح $z = -h/2$ در تماس با سیال و سیال در سطح زیرین ورق با عمق H فرض شده است.

بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، جابه‌جایی‌ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [16]:

$$\begin{aligned} u_r(r, \theta, z) &= u_0 + z \phi_r(r, \theta) \\ u_\theta(r, \theta, z) &= v_0 + z \phi_\theta(r, \theta) \\ u_z(r, \theta, z) &= w(r, \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

² Very Large Floating Structures

که در آن ρ_0 ، ρ_1 و ρ_2 ترم‌های اینرسی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$(\rho_0, \rho_1, \rho_2) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1, z, z^2) \rho(z) dz \quad (12)$$

3- تعیین فشار دینامیکی سیال

برای بدست آوردن یک مدل ریاضی از سیال، فرضیات زیر برای رفتار دینامیکی سیال در نظر گرفته می‌شود:

- جابجایی‌ها و سرعت سیال کم فرض می‌شوند. بنابراین، رفتار سیال به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود.
- یک سیال ایده‌آل به گونه‌ای فرض می‌شود که می‌توان یک تابع پتانسیل برای آن در نظر گرفت.
- شرایط اولیه سیال صفر در نظر گرفته می‌شود.
- سیال تراکم ناپذیر، غیر ویسکوز و غیر چرخشی در نظر گرفته شده است.

با توجه به فرضیات گفته شده برای سیال در تماس با ورق، تابع پتانسیل سرعت Φ باید معادله لاپلاس را در دامنه سیال ارضا کند. این معادله در مختصات استوانه‌ای به فرم رابطه (13) است [14]:

$$\nabla^2 \Phi(r, \theta, z, t) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (13)$$

شرایط مرزی سیال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial r} \right)_{r=a} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial r} \right)_{r=b} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right)_{\theta=0} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right)_{\theta=\alpha} = 0 \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_{z=-\frac{h}{2}-H} = 0, \quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_{z=-\frac{h}{2}} = \frac{\partial w}{\partial t}$$

با استفاده از معادله برنولی و صرف نظر از عبارات غیر چرخشی، فشار سیال در سطح تماس سیال و ورق به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [4]:

$$p = p|_{z=-\frac{h}{2}} = -\rho_f \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{z=-\frac{h}{2}} \quad (15)$$

که ρ_f چگالی سیال در حجم واحد است. با در نظر گرفتن روش تفکیک متغیرها، با استفاده از معادلات (14)، و جایگذاری تابع پتانسیل در رابطه (15)، فشار دینامیکی وارد شده توسط سیال بر ورق بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$P(r, \theta, t) = -\rho_f \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\coth(\mu_{mn}H)}{\mu_{mn}} \ddot{w}(r, \theta, t) \quad (16)$$

که μ_{mn} با توجه به معادله زیر بدست می‌آید:

$$J'_{\beta_m}(\mu a) Y'_{\beta_m}(\mu b) - J'_{\beta_m}(\mu b) Y'_{\beta_m}(\mu a) = 0 \quad (17)$$

همچنین J و Y توابع بسل قطبی نوع اول و دوم و $\beta_m = \frac{m\pi}{\alpha}$ می‌باشد.

4- روش حل

با جایگذاری معادلات (5) و (16) در معادله (11)، معادلات حرکت به صورت زیر مشخص می‌شوند:

همچنین در ورق از جنس مواد تابعی، E_c و E_m به ترتیب مدول الاستیسیته سرامیک و فلز می‌باشند و p توان کسر حجمی را نشان می‌دهد که مقدار آن بزرگ‌تر یا برابر با صفر است. نیرو و ممان‌های منته به صورت رابطه (5) تعریف می‌شوند:

$$(N_{ij}, M_{ij}) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1, z) \sigma_{ij} dz \quad i, j = r, \theta \quad (5)$$

$$Q_i = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{iz} dz \quad i = r, \theta$$

که N نیروی منته، M گشتاور منته و Q نیروی برشی منته است. از اصل همیلتون برای تعیین معادلات حاکم بر حرکت استفاده می‌شود. طبق این اصل داریم [20]:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - U + W_{n.c}) dt = 0 \quad (6)$$

که T انرژی جنبشی، U انرژی کرنشی و $W_{n.c}$ کار نیروهای خارجی غیر پایستار است. انرژی کرنشی ذخیره شده در ورق از رابطه (7) تعیین می‌شود [20]:

$$U = \frac{1}{2} \iiint \sigma_{ij} e_{ij} dV \quad (7)$$

انرژی جنبشی ورق با توجه به معادله زیر تعیین می‌شود [20]:

$$T = \frac{1}{2} \iiint \rho(z) (\dot{u}_r^2 + \dot{u}_\theta^2 + \dot{u}_z^2) dV \quad (8)$$

چگالی ورق ساخته شده از مواد تابعی به صورت زیر است [15]:

$$\rho(z) = \rho_m + (\rho_c - \rho_m) \left(\frac{2z - h}{2h} \right)^p \quad (9)$$

که ρ_c و ρ_m به ترتیب چگالی سرامیک و فلز هستند. اگر $p(r, \theta, t)$ فشار اعمالی ناشی از سیال به ورق باشد، تغییرات کار نیروهای خارجی ناپایستار به صورت رابطه (10) خواهد شد:

$$\delta W_{n.c} = - \int_0^\alpha \int_a^b P(r, \theta, t) \delta w r dr d\theta \quad (10)$$

با جایگزینی معادلات (7)، (8) و (10) در معادله (6)، معادلات حرکت را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\begin{aligned} N_{rr,r} + \frac{1}{r} N_{r\theta,\theta} + \frac{1}{r} (N_{rr} - N_{\theta\theta}) &= \rho_0 \ddot{u}_0 + \rho_1 \ddot{\varphi}_r \\ N_{r\theta,r} + \frac{1}{r} N_{\theta\theta,\theta} + \frac{2}{r} N_{r\theta} &= \rho_0 \ddot{v}_0 + \rho_1 \ddot{\varphi}_\theta \\ M_{rr,r} + \frac{1}{r} M_{r\theta,\theta} + \frac{1}{r} (M_{rr} - M_{\theta\theta}) - Q_r &= \rho_1 \ddot{u}_0 + \rho_2 \ddot{\varphi}_r \\ M_{r\theta,r} + \frac{1}{r} M_{\theta\theta,\theta} + \frac{2}{r} M_{r\theta} - Q_\theta &= \rho_1 \ddot{v}_0 + \rho_2 \ddot{\varphi}_\theta \\ Q_{r,r} + \frac{1}{r} Q_{\theta,\theta} + \frac{1}{r} Q_r &= \rho_0 \ddot{w} + P(r, \theta, t) \end{aligned} \quad (11)$$

که $\theta_{\varphi_r}(\theta)$ ، $R_{\varphi_r}(r)$ ، $\theta_{v_0}(\theta)$ ، $R_{v_0}(r)$ ، $\theta_{u_0}(\theta)$ ، $R_{u_0}(r)$ که $\theta_w(\theta)$ ، $R_w(r)$ ، $\theta_{\varphi_\theta}(\theta)$ ، $R_{\varphi_\theta}(r)$ توجه به شرایط مرزی ورق انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، $T_{v_0}(t)$ ، $T_{u_0}(t)$ ، $T_{\varphi_r}(t)$ و $T_{\varphi_\theta}(t)$ توابع زمان هستند. با جایگذاری از رابطه (20) در رابطه (18) مانده‌های I_1 ، I_2 ، I_3 ، I_4 و I_5 بدست می‌آیند. طبق روش گالرکین انتگرال حاصل ضرب مانده‌های رابطه (19) در تابع وزنی روی سطح باید برابر صفر شود. بنابراین:

$$\int_0^\alpha \int_a^b X_i I_i r dr d\theta = 0 \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (21)$$

به طوری که:

$$\begin{aligned} X_1 &= R_{u_0}(r)\theta_{u_0}(\theta) \\ X_2 &= R_{v_0}(r)\theta_{v_0}(\theta) \\ X_3 &= R_{\varphi_r}(r)\theta_{\varphi_r}(\theta) \\ X_4 &= R_{\varphi_\theta}(r)\theta_{\varphi_\theta}(\theta) \\ X_5 &= R_w(r)\theta_w(\theta) \end{aligned} \quad (22)$$

با جایگذاری معادلات (20) و (22) در معادله (21)، سیستم معادلات دیفرانسیل به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$[M]\{\ddot{T}\} + [K]\{T\} = 0 \quad (23)$$

$[M]$ ماتریس جرم است و $[K]$ ماتریس سفتی است.

$$\begin{aligned} [M] &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} \end{bmatrix} \\ [K] &= \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} \end{bmatrix} \\ \{\ddot{T}\} &= \begin{Bmatrix} \ddot{T}_{u_0} \\ \ddot{T}_{v_0} \\ \ddot{T}_{\varphi_r} \\ \ddot{T}_{\varphi_\theta} \\ \ddot{T}_w \end{Bmatrix} \quad \{T\} = \begin{Bmatrix} T_{u_0} \\ T_{v_0} \\ T_{\varphi_r} \\ T_{\varphi_\theta} \\ T_w \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

در این پژوهش، دو نوع شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود.

(الف): شرط مرزی گیردار:

$$w = 0, \quad \varphi_r = 0, \quad u_0 = 0, \quad v_0 = 0 \quad (25)$$

و در لبه‌های زاویه‌ای:

$$w = 0, \quad \varphi_\theta = 0, \quad u_0 = 0, \quad v_0 = 0 \quad (26)$$

(ب): شرط مرزی ساده:

در لبه‌های شعاعی:

$$w = 0, \quad M_{rr} = 0, \quad \varphi_\theta = 0, \quad u_0 = 0, \quad v_0 = 0 \quad (27)$$

و در لبه‌های زاویه‌ای:

$$w = 0, \quad M_{\theta\theta} = 0, \quad \varphi_r = 0, \quad u_0 = 0, \quad v_0 = 0 \quad (28)$$

$$\begin{aligned} &A_0 \left(u_{0,rr} + \frac{1}{r} u_{0,r} - \frac{1}{r^2} u_0 - \frac{1}{r^2} v_{0,\theta} + \frac{1}{r} v_{0,r\theta} \right) \\ &+ C_0 \left(\frac{1}{r^2} u_{0,\theta\theta} - \frac{1}{r^2} v_{0,\theta} - \frac{1}{r} v_{0,r\theta} \right) \\ &+ A_1 \left(\varphi_{r,rr} + \frac{1}{r} \varphi_{r,r} - \frac{1}{r^2} \varphi_r - \frac{1}{r^2} \varphi_{\theta,\theta} + \frac{1}{r} \varphi_{\theta,r\theta} \right) \\ &+ C_1 \left(\frac{1}{r^2} \varphi_{r,\theta\theta} - \frac{1}{r^2} \varphi_{\theta,\theta} - \frac{1}{r} \varphi_{\theta,r\theta} \right) \\ &= \rho_0 \ddot{u}_0 + \rho_1 \ddot{\varphi}_r \\ &A_0 \left(\frac{1}{r^2} u_{0,\theta} + \frac{1}{r} u_{0,r\theta} + \frac{1}{r^2} v_{0,\theta\theta} \right) \\ &+ C_0 \left(\frac{1}{r^2} u_{0,\theta} - \frac{1}{r} u_{0,r\theta} - \frac{1}{r^2} v_0 + \frac{1}{r} v_{0,r} + v_{0,rr} \right) \\ &+ A_1 \left(\frac{1}{r^2} \varphi_{r,\theta} + \frac{1}{r} \varphi_{r,r\theta} + \frac{1}{r^2} \varphi_{\theta,\theta\theta} \right) \\ &+ C_1 \left(\frac{1}{r^2} \varphi_{r,\theta} - \frac{1}{r} \varphi_{r,r\theta} + \varphi_{\theta,rr} - \frac{1}{r^2} \varphi_\theta + \frac{1}{r} \varphi_{\theta,r} \right) \\ &= \rho_0 \ddot{v}_0 + \rho_1 \ddot{\varphi}_\theta \\ &A_1 \left(u_{0,rr} + \frac{1}{r} u_{0,r} - \frac{1}{r^2} u_0 - \frac{1}{r^2} v_{0,\theta} + \frac{1}{r} v_{0,r\theta} \right) \\ &+ C_1 \left(\frac{1}{r^2} u_{0,\theta\theta} - \frac{1}{r^2} v_{0,\theta} - \frac{1}{r} v_{0,r\theta} \right) \\ &+ A_2 \left(\varphi_{r,rr} + \frac{1}{r} \varphi_{r,r} - \frac{1}{r^2} \varphi_r - \frac{1}{r^2} \varphi_{\theta,\theta} + \frac{1}{r} \varphi_{\theta,r\theta} \right) \\ &+ C_2 \left(\frac{1}{r^2} \varphi_{r,\theta\theta} - \frac{1}{r^2} \varphi_{\theta,\theta} - \frac{1}{r} \varphi_{\theta,r\theta} \right) \\ &- C_0 \kappa^2 (\varphi_r + w_{,r}) = \rho_1 \ddot{u}_0 + \rho_2 \ddot{\varphi}_r \\ &A_1 \left(\frac{1}{r^2} u_{0,\theta} + \frac{1}{r} u_{0,r\theta} + \frac{1}{r^2} v_{0,\theta\theta} \right) \\ &+ C_1 \left(\frac{1}{r^2} u_{0,\theta} - \frac{1}{r} u_{0,r\theta} - \frac{1}{r^2} v_0 + \frac{1}{r} v_{0,r} + v_{0,rr} \right) \\ &+ A_2 \left(\frac{1}{r^2} \varphi_{r,\theta} + \frac{1}{r} \varphi_{r,r\theta} + \frac{1}{r^2} \varphi_{\theta,\theta\theta} \right) \\ &+ C_2 \left(\frac{1}{r^2} \varphi_{r,\theta} - \frac{1}{r} \varphi_{r,r\theta} + \varphi_{\theta,rr} - \frac{1}{r^2} \varphi_\theta + \frac{1}{r} \varphi_{\theta,r} \right) \\ &- C_0 \kappa^2 \left(\varphi_\theta + \frac{1}{r} w_{,\theta} \right) = \rho_1 \ddot{v}_0 + \rho_2 \ddot{\varphi}_\theta \\ &C_0 \kappa^2 \left(\varphi_{r,r} + \frac{1}{r} \varphi_r + \frac{1}{r} \varphi_{\theta,\theta} + w_{,rr} + \frac{1}{r} w_{,r} + \frac{1}{r^2} w_{,\theta\theta} \right) \\ &= \left(\rho_0 + \rho_f \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\coth(\mu_{mn} H)}{\mu_{mn}} \right) \ddot{w} \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} (A_0, A_1, A_2) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{(1, z, z^2) E(z)}{1 - \nu^2} dz \\ (C_0, C_1, C_2) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{(1, z, z^2) E(z)}{2(1 + \nu)} dz \end{aligned} \quad (19)$$

برای حل معادله (18) از تفکیک متغیرها استفاده می‌شود. بنابراین، پاسخ-

ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{aligned} u_0(r, \theta, t) &= R_{u_0}(r) \theta_{u_0}(\theta) T_{u_0}(t) \\ v_0(r, \theta, t) &= R_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) T_{v_0}(t) \\ \varphi_r(r, \theta, t) &= R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) T_{\varphi_r}(t) \\ \varphi_\theta(r, \theta, t) &= R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) T_{\varphi_\theta}(t) \\ w(r, \theta, t) &= R_w(r) \theta_w(\theta) T_w(t) \end{aligned} \quad (20)$$

با حل کردن معادله (33)، فرکانس طبیعی را می‌توان تعیین کرد. همچنین، برای m و n ، فرکانس طبیعی برای تعداد موده‌های مختلف تعیین می‌شود.

5- بحث بر روی نتایج

در این پژوهش، تأثیر فشار سیال بر رفتار ارتعاشی یک قطاع دایروی توخالی از جنس مواد تابعی بررسی شده است. فرض می‌شود که قطاع دایروی در سطح $z = -h/2$ در تماس با سیال باشد. مرز ساده با S و مرز گیردار با C نمایش داده شده است. برای بیان شرایط مرزی کلی یک قطاع دایروی از چهار حرف استفاده شده است که دو حرف اول بیان‌کننده مرزهای زاویه‌ای، حرف سوم بیان‌کننده شرایط مرزی شعاع داخلی و حرف چهارم، بیان‌کننده شرایط مرزی شعاع خارجی است. به عنوان نمونه CSSC، بیان‌کننده مرزهای گیردار و ساده در مرزهای زاویه‌ای، مرز ساده در شعاع داخلی و مرز گیردار در شعاع خارجی است.

1-5- اعتبارسنجی پژوهش

از آنجا که هیچ پژوهشی برای ارتعاشات قطاع دایروی از جنس مواد تابعی در تماس با سیال وجود ندارد بنابراین با اعمال محدودیت نتایج این تحقیق اعتبارسنجی شده است. بنابراین با حذف اثر سیال نتایج با نتایج بدست آمده از پژوهش‌های پیشین [18, 21] صحت سنجی شده است. در جدول 1 نتایج فرکانس خطی بی‌بعد مربوط به قطاع دایروی توخالی از جنس مواد تابعی برای شرایط مرزی SSCC با داده‌های [18, 21] مقایسه شده است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. همچنین ورق مورد نظر در نرم‌افزار المان محدود مدل-سازی شده است و نتایج بدست آمده توسط نرم‌افزار در جدول 2 (در تماس با سیال) با نتایج بدست آمده از مطالعه مورد نظر مقایسه شده است که نشان دهنده همگرایی خوبی است.

جدول 1 مقایسه فرکانس‌های خطی بی‌بعد برای شرایط مرزی SSCC و $(h/a = 0.1) \Omega = \omega h \sqrt{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_c/E_c(1-\nu)}$
Table 1 Comparison of dimensionless linear frequency for boundary conditions SSCC, $\Omega = \omega h \sqrt{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_c/E_c(1-\nu)}$ ($h/a = 0.1$)

α	a/b	p=1	p=2	p=3	p=4	p=5
195°	[21]	0.0663	0.0622	0.0566	0.0505	0.0446
	[18]	0.0664	0.0625	0.0571	0.0510	0.0451
	Present	0.0661	0.0621	0.0562	0.0503	0.0444
	[21]	0.1041	0.0980	0.0895	0.0801	0.0710
	[18]	0.1046	0.0989	0.0908	0.0815	0.0723
	Present	0.1039	0.0978	0.0893	0.0799	0.0708
210°	[21]	0.0659	0.06195	0.0563	0.0502	0.0443
	[18]	0.0659	0.06204	0.0566	0.0506	0.0447
	Present	0.0656	0.0617	0.0559	0.0501	0.0439
	[21]	0.1039	0.0978	0.0892	0.0799	0.0708
	[18]	0.1043	0.0986	0.0905	0.0812	0.0720
	Present	0.1036	0.0976	0.0889	0.0796	0.0705

جدول 2 مقایسه پنج فرکانس بی‌بعد از قطاع دایروی توخالی مواد تابعی در تماس با سیال برای شرایط مرزی CCSS و $\Omega = (\omega b^2/h)\sqrt{12\rho_m(1-\nu^2)/E_m}h/c = 0.05, a/b = 0.5, \rho_f/\rho_c = 0.1, H/h = 1, \alpha = 240^\circ, p = 1$
Table 2 Comparison of five dimensionless frequencies of FGM annular sector plates in contact with fluid for boundary conditions $\Omega = (\omega b^2/h)\sqrt{12\rho_m(1-\nu^2)/E_m}h/c = 0.05, a/b = 0.5, \rho_f/\rho_c = 0.1, H/h = 1, \alpha = 240^\circ, p = 1$

Method	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5
Present	4.6619	1362.671	2859.281	15784.592	15818.997
FEM	4.7823	1362.981	2859.567	15784.813	15819.316

با توجه به ارتعاشات خطی و بی‌بعد سازی معادلات شکل موده‌ها در راستای r, θ به صورت (29) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned}\theta(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} (e_m \cos(\gamma_m \theta) + f_m \sin(\gamma_m \theta) \\ &\quad + g_m \cosh(\gamma_m \theta) + i_m \sinh(\gamma_m \theta)) \\ \Gamma(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} (k_m \cos(\xi_m \theta) + l_m \sin(\xi_m \theta)) \\ \Lambda(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} (o_m \cos(\delta_m \theta) + s_m \sin(\delta_m \theta)) \\ R(r) &= \sum_{n=1}^{\infty} (a_n J_{\gamma_m}(\lambda_n r) + b_n Y_{\gamma_m}(\lambda_n r) + c_n I_{\gamma_m}(\lambda_n r) \\ &\quad + d_n K_{\gamma_m}(\lambda_n r)) \\ S(r) &= \sum_{n=1}^{\infty} (p_n J_{\xi_m}(\chi_n r) + q_n Y_{\xi_m}(\chi_n r)) \\ Z(r) &= \sum_{n=1}^{\infty} (t_n J_{\delta_m}(\psi_n r) + z_n Y_{\delta_m}(\psi_n r))\end{aligned}\quad (29)$$

که J و Y توابع بسل قطبی نوع اول و دوم، I و K توابع بسل قطبی نوع اول و دوم اصلاح شده است. $\psi_n, \delta_m, \chi_n, \xi_m, \lambda_n, \gamma_m$ پارامترهایی هستند که با توجه به شرایط مرزی تعیین می‌شوند. همچنین، $d_n, c_n, b_n, a_n, t_n, s_m, o_m, q_n, p_n, l_m, k_m, i_m, g_m, f_m, e_m$ هستند که با توجه به شرایط مرزی مشخص خواهند شد. شکل موده‌ها برای $u_0, v_0, w, \varphi_r, \varphi_\theta$ در جهت r و θ به شکل زیر تبدیل خواهند شد:

$$\begin{aligned}R_w(r) &= R(r), \theta_w(\theta) = \theta(\theta), R_{\varphi_r}(r) = R'(r), \\ \theta_{\varphi_r}(\theta) &= \theta(\theta), R_{\varphi_\theta}(r) = \frac{1}{r} R(r), \theta_{\varphi_\theta}(\theta) = \theta'(\theta) \\ R_{u_0}(r) &= S(r), \theta_{u_0}(\theta) = \Gamma(\theta), R_{v_0}(r) = Z(r), \\ \theta_{v_0}(\theta) &= \Lambda(\theta)\end{aligned}\quad (30)$$

توابع زمان به فرم هارمونیک و بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} (T_{u_0})_0 \\ (T_{v_0})_0 \\ (T_{\varphi_r})_0 \\ (T_{\varphi_\theta})_0 \\ (T_w)_0 \end{Bmatrix} \cos(\omega_{mn} t) \quad (31)$$

که ω_{mn} فرکانس طبیعی است و $(T_{u_0})_0, (T_{v_0})_0, (T_{\varphi_r})_0, (T_{\varphi_\theta})_0$ و $(T_w)_0$ تحریک اولیه هستند. با جایگذاری معادله (31) در معادله (23)، معادله زیر بدست می‌آید:

$$(-\omega_{mn}^2 [M] + [K])\{T_0\} = 0 \quad (32)$$

برای اینکه معادلات فوق پاسخی غیر صفر داشته باشند، ماتریس ضرایب باید صفر باشد. بنابراین، معادله (33) را داریم:

$$|-\omega_{mn}^2 [M] + [K]| = 0 \quad (33)$$

با توجه به نمودارهای 4 و 5 فرکانس طبیعی با یک شیب بسیار تندی در دامنه تغییر چگالی از 0 تا 0.1 کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد وجود سیال فرکانس طبیعی را کاهش می‌دهد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که سیال به طور قابل توجهی اینرسی ورق را افزایش می‌دهد.

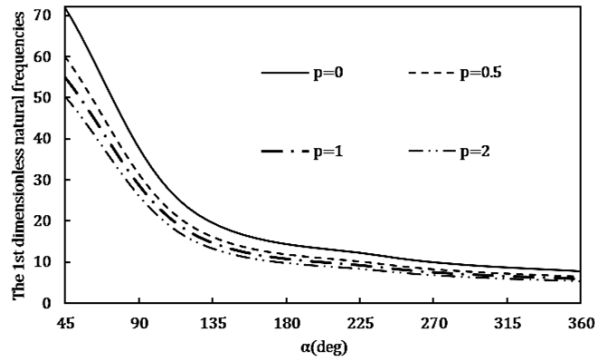


Fig. 3 The effect of angle change on linear dimensionless natural frequency in boundary conditions SSSC ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \rho_f/\rho_c = 0.3$)

شکل 3 تأثیر تغییرات زاویه قطاع بر فرکانس طبیعی بی بعد خطی برای شرایط مرزی SSSC و ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \rho_f/\rho_c = 0.3$)

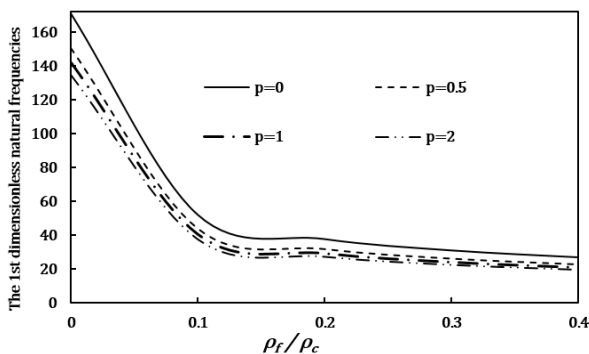


Fig. 4 The effect of fluid density on linear dimensionless natural frequency in boundary conditions CCCC ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

شکل 4 تأثیر چگالی سیال بر فرکانس طبیعی بی بعد خطی برای شرایط مرزی CCCC و ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

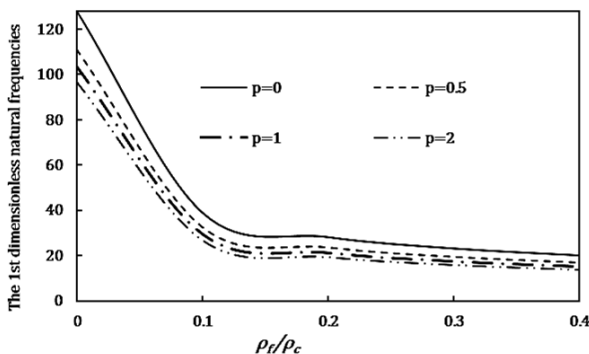


Fig. 5 The effect of fluid density on linear dimensionless natural frequency in boundary conditions SSSC ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

شکل 5 تأثیر چگالی سیال بر فرکانس طبیعی بی بعد خطی برای شرایط مرزی SSSC و ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

2-5- تأثیر توان کسر حجمی و زاویه قطاع بر فرکانس‌های طبیعی

برای نتایج عددی، یک قطاع دایروی ساخته شده از مواد تابعی در نظر گرفته شده است. مواد تابعی از دویخش فلز و سرامیک تشکیل شده‌اند. آلومینیوم و آلومینا به ترتیب به عنوان مقاطع فلزی و سرامیکی در نظر گرفته شده است. مدول یانگ و چگالی آلومینیوم و آلومینا به ترتیب برابر $E_m = 70GPa$ ، $\rho_m = 2707 kg/m^3$ و $E_c = 380GPa$ ، $\rho_c = 3800 kg/m^3$ می‌باشد. همچنین نسبت پواسون ورق برابر 0.3 در نظر گرفته شده و فرکانس طبیعی بی‌بعد بصورت زیر تعریف شده است:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega b^2}{h} \sqrt{\frac{12\rho_m(1-\nu^2)}{E_m}} \quad (34)$$

در شکل‌های 2 و 3 برای هر دو شرایط مرزی CSSS و CCCS، اثر توان کسر حجمی و زاویه قطاع بر روی فرکانس طبیعی بررسی شده است. در این دو شکل، برای توان کسر حجمی متفاوت، تأثیر زاویه قطاع بر فرکانس طبیعی بی‌بعد ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای دو شرایط مرزی در نظر گرفته شده، با افزایش توان کسر حجمی، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد که می‌تواند به کاهش سفتی ورق و افزایش اینرسی نسبت داده شود. همچنین، هنگامی که قطاع دایروی ایزوتروپیک ($p = 0$) به مواد تابعی ($p > 0$) تبدیل می‌شود، فرکانس طبیعی آن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد اما با افزایش توان کسر حجمی، نسبت کاهش فرکانس طبیعی کمتر می‌شود.

برای دو شرط مرزی در نظر گرفته شده، در هر توان کسر حجمی مشخص با افزایش زاویه قطاع، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش زاویه قطاع، سفتی ورق کاهش یافته و اینرسی آن افزایش می‌یابد. بعلاوه، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه قطاع، نسبت کاهش فرکانس طبیعی کمتر می‌شود.

3-5- تأثیر چگالی سیال بر فرکانس‌های طبیعی

شکل‌های 4 و 5 تأثیر تغییرات چگالی سیال بر فرکانس‌های طبیعی را برای هر دو شرط مرزی CSSS و CCCS نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌های 4 و 5 مشخص است و انتظار می‌رفت، با افزایش چگالی سیال (سنگین‌تر شدن سیال) فرکانس طبیعی بی‌بعد قطاع کاهش می‌یابد. چون سیال غیرلزج فرض شده است و فقط دارای اینرسی است، مانند جرم اضافه شده به ورق رفتار می‌کند. با افزایش چگالی سیال، جرم اضافه شده به ورق افزایش یافته و در نتیجه باعث کاهش فرکانس خواهد شد.

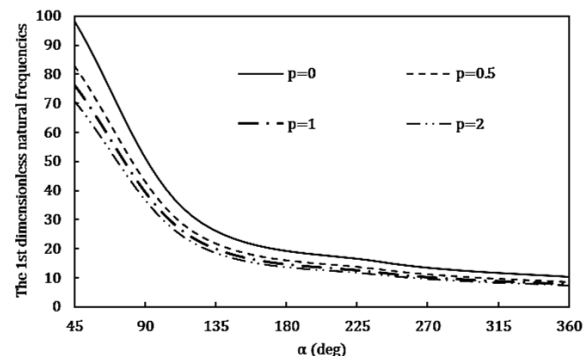


Fig. 2 The effect of sector angle change on the linear dimensionless natural frequency in boundary conditions CCCC ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \rho_f/\rho_c = 0.3$)

شکل 2 تأثیر تغییرات زاویه قطاع بر فرکانس طبیعی بی‌بعد خطی برای شرایط مرزی CCCC و ($H/h = 1, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \rho_f/\rho_c = 0.3$)

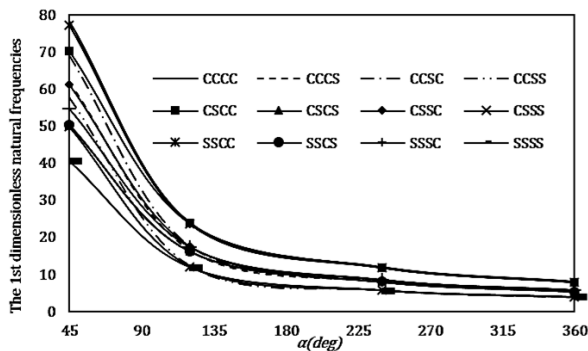


Fig. 8 The effect of boundary conditions on dimensionless natural frequency ($\rho_f/\rho_c = 0.3, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, p = 1$)
 شکل 8 تأثیر شرایط مرزی بر فرکانس طبیعی بی‌بعد و ($\rho_f/\rho_c = 0.3, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, p = 1$)

بالاترین و کمترین فرکانس‌های طبیعی به ترتیب مربوط به شرایط مرزی CCCC و SSSS هستند. همانطور که در شکل 8 نشان داده شده است، با افزایش تعداد تکیه‌گاه‌های گیردار ورق صلب‌تر شده و سفتی آن افزایش می‌یابد و در نتیجه فرکانس طبیعی آن زیاد می‌شود.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارتعاشات آزاد قطاع دایروی توخالی از جنس مواد تابعی در تماس با سیال مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های گذشته در وجود سیال در مجاورت ورق مفروض، استفاده از روش گالرکین (روش نیمه‌تحلیلی) و تحلیل تمامی حالت‌های تکیه‌گاهی می‌باشد. تحلیل قطاع دایروی از جنس مواد تابعی بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و اصل همپلتون انجام شد. برای تحلیل رفتار نوسانی سیال از حل معادله لاپلاس پتانسیل سرعت و ارضای شرایط مرزی استفاده شد. همچنین، معادلات حرکت با استفاده از روش تفکیک متغیرها و مدهای فرضی حل شدند و با استفاده از روش گالرکین فرکانس‌های طبیعی ورق تعیین گردید. تجزیه و تحلیل ورق بر اساس تحقیقات پیشین و نرم‌افزار المان محدود انسیس اعتبارسنجی شد که همگرایی خوبی را نشان داد. علاوه بر این، اثر پارامترهایی مانند توان کسر حجمی، زاویه قطاع، چگالی سیال و ارتفاع سیال بر فرکانس‌های طبیعی، مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی نتایج عددی به طور خلاصه برای دوازده حالت شرایط مرزی نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش ضریب کسر حجمی، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد.
- با افزایش زاویه قطاع، به علت کاهش سفتی ورق و افزایش اینرسی فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد.
- با افزایش چگالی سیال، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد که علت آن افزایش اینرسی ورق می‌باشد.
- با افزایش ارتفاع سیال، ابتدا فرکانس طبیعی خطی افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت می‌شود.
- افزایش تعداد تکیه‌گاه‌های گیردار منجر به افزایش فرکانس طبیعی می‌شود.

7- ضمیمه:

اجزای تشکیل دهنده ماتریس‌های جرم و سفتی به صورت زیر می‌باشد:

$$M_{11} = -\rho_0 \int_0^a \int_a^b R_{u_0}^2(r) \theta_{u_0}^2(\theta) r dr d\theta$$

4-5- تأثیر ارتفاع سیال بر فرکانس‌های طبیعی

شکل‌های 6 و 7 تأثیر تغییرات ارتفاع سیال بر فرکانس‌های طبیعی را برای هر دو شرط مرزی CCCC و CCSS نشان می‌دهد.

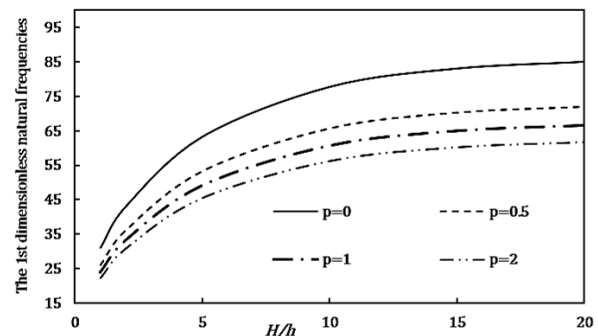


Fig. 6 The effect of fluid height on linear dimensionless natural frequency in boundary conditions CCCC ($\rho_f/\rho_c = 0.3, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

شکل 6 تأثیر ارتفاع سیال بر فرکانس طبیعی بی‌بعد خطی برای شرایط مرزی CCCC و ($\rho_f/\rho_c = 0.3, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

همان‌طور که در شکل‌های 6 و 7 مشخص است با افزایش ارتفاع سیال فرکانس طبیعی بی‌بعد ابتدا افزایش می‌یابد، سپس به مقدار ثابتی میل می‌کند و افزایش ارتفاع تأثیر ناچیزی بر فرکانس بی‌بعد دارد که این نتیجه بیانگر این مطلب است که سیال دور دست تأثیر اندکی بر رفتار ارتعاشی قطاع دایروی دارد. با شروع حرکت ارتعاشی موج ایجاد شده از ارتعاش به سیال وارد شده و در آن منتشر می‌شود و به صفحه صلب پایین برخورد کرده و به صورت موج مخالف در سیال ایجاد شده و باعث مخالفت با حرکت ارتعاشی قطاع و در نتیجه کاهش فرکانس می‌شود. در ارتفاع کم سیال این پدیده قابل توجه است، اما با افزایش ارتفاع زمان کافی برای رسیدن موج‌های مخالف با ارتعاش قطاع وجود ندارد و هر چه عمق سیال بیشتر شود، تأثیر این پدیده کمتر خواهد شد.

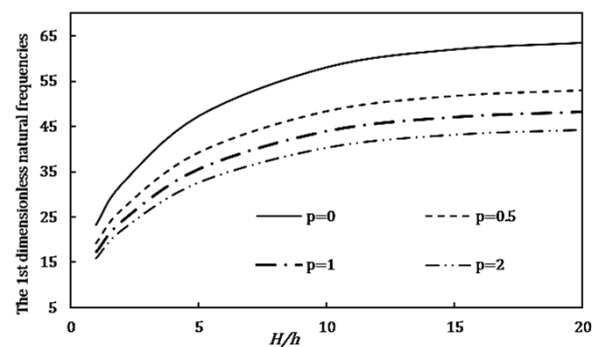


Fig. 7 The effect of fluid height on linear dimensionless natural frequency in boundary conditions SSSC ($\rho_f/\rho_c = 0.3, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

شکل 7 تأثیر ارتفاع سیال بر فرکانس طبیعی بی‌بعد خطی برای شرایط مرزی SSSC و ($\rho_f/\rho_c = 0.3, a/b = 0.5, h/c = 0.1, c = b - a, \alpha = 120^\circ$)

5-5- اثر شرایط مرزی بر فرکانس‌های طبیعی

شکل 8 تأثیر شرایط مرزی بر فرکانس طبیعی بی‌بعد را برای ضریب کسر حجمی مشخص نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}
K_{22} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_0 \frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta_{v_0}''(\theta) \right. \\
&\quad \left. + C_0 \left(R_{v_0}''(r) \theta_{v_0}(\theta) + \frac{1}{r} R_{v_0}'(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right) \right) R_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) r dr d\theta \\
K_{23} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) + \frac{1}{r} R_{\varphi_r}'(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. - C_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r} R_{\varphi_r}'(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right) \right) R_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) r dr d\theta \\
K_{24} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_0 \frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}''(\theta) \right. \\
&\quad \left. + C_0 \left(R_{\varphi_\theta}''(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) + \frac{1}{r} R_{\varphi_\theta}'(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right) \right) R_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) r dr d\theta \\
K_{31} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \left(R_{u_0}''(r) \theta_{u_0}(\theta) + \frac{1}{r} R_{u_0}'(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. + C_1 \frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right) R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) r dr d\theta \\
K_{32} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \left(-\frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{v_0}'(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. - C_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{v_0}'(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right) \right) R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) r dr d\theta \\
K_{33} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_2 \left(R_{\varphi_r}''(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) + \frac{1}{r} R_{\varphi_r}'(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. + C_2 \frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right) R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) r dr d\theta \\
K_{34} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_2 \left(-\frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{\varphi_\theta}'(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. - C_2 \left(\frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{\varphi_\theta}'(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right) \right) R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) r dr d\theta \\
K_{35} &= -C_0 \kappa^2 \int_0^\alpha \int_a^b R_w(r) \theta_w(\theta) R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) r dr d\theta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{13} &= M_{31} \\
&= -\rho_1 \int_0^\alpha \int_a^b R_{\varphi_r}(r) R_{u_0}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) \theta_{u_0}(\theta) r dr d\theta \\
M_{22} &= -\rho_0 \int_0^\alpha \int_a^b R_{v_0}^2(r) \theta_{v_0}^2(\theta) r dr d\theta \\
M_{24} &= M_{42} \\
&= -\rho_1 \int_0^\alpha \int_a^b R_{\varphi_\theta}(r) R_{v_0}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) \theta_{v_0}(\theta) r dr d\theta \\
M_{33} &= -\rho_2 \int_0^\alpha \int_a^b R_{\varphi_r}^2(r) \theta_{\varphi_r}^2(\theta) r dr d\theta \\
M_{44} &= -\rho_2 \int_0^\alpha \int_a^b R_{\varphi_\theta}^2(r) \theta_{\varphi_\theta}^2(\theta) r dr d\theta \\
M_{33} &= -\left(\rho_0 \right. \\
&\quad \left. + \rho_f \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\coth(\mu_{mn} H)}{\mu_{mn}} \right) \int_0^\alpha \int_a^b R_w^2(r) \theta_w^2(\theta) r dr d\theta \\
M_{12} &= M_{21} = M_{14} = M_{41} = M_{15} = M_{51} = M_{23} = M_{32} \\
&= M_{25} = M_{52} = M_{34} = M_{43} = M_{35} = M_{53} = M_{45} \\
&= M_{54} = 0 \\
K_{11} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_0 \left(R_{u_0}''(r) \theta_{u_0}(\theta) + \frac{1}{r} R_{u_0}'(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. + C_0 \frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right) R_{u_0}(r) \theta_{u_0}(\theta) r dr d\theta \\
K_{12} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_0 \left(-\frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{v_0}'(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. - C_0 \left(\frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{v_0}'(r) \theta_{v_0}'(\theta) \right) \right) R_{u_0}(r) \theta_{u_0}(\theta) r dr d\theta \\
K_{13} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \left(R_{\varphi_r}''(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) + \frac{1}{r} R_{\varphi_r}'(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. + C_1 \frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}'(\theta) \right) R_{u_0}(r) \theta_{u_0}(\theta) r dr d\theta \\
K_{14} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \left(-\frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{\varphi_\theta}'(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. - C_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{1}{r} R_{\varphi_\theta}'(r) \theta_{\varphi_\theta}'(\theta) \right) \right) R_{u_0}(r) \theta_{u_0}(\theta) r dr d\theta \\
K_{21} &= \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_0 \left(\frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta_{u_0}'(\theta) + \frac{1}{r} R_{u_0}'(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right) \right. \\
&\quad \left. - C_0 \left(\frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{r} R_{u_0}'(r) \theta_{u_0}'(\theta) \right) \right) R_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) r dr d\theta
\end{aligned}$$

- [5] Kwak, M.K., Kim, K.C., "Axisymmetric vibration of circular plates in contact with fluid," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.146, No.3, pp.381-9, 1991.
- [6] Kerboua, Y., Lakis, A.A., Thomas, M., Marcouiller, L., "Vibration analysis of rectangular plates coupled with fluid," *Applied Mathematical Modelling*, Vol.32, No.12, pp.2570-86, 2008.
- [7] Khorshidi, K., Akbari, F., Ghadirian, H., "Experimental and analytical modal studies of vibrating rectangular plates in contact with a bounded fluid," *Ocean Engineering*, Vol.140, pp. 146-54, 2017.
- [8] Civalek, Ö., "Application of differential quadrature (DQ) and harmonic differential quadrature (HDQ) for buckling analysis of thin isotropic plates and elastic columns," *Engineering Structures*, Vol.26, No.2, pp.171-186, 2004.
- [9] Hosseini-Hashemi, S., Karimi, M., Rokni, H., "Natural frequencies of rectangular Mindlin plates coupled with stationary fluid," *Applied Mathematical Modelling*, Vol.36, No.2, pp.764-778, 2012.
- [10] Yousefzadeh, S., Akbari, A., Najafi, M., "Dynamic response of FG rectangular plate in contact with stationary fluid under moving load", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 213-224, 2019.
- [11] Yousefzadeh, Sh. Jafari, A. and Mohammadzadeh, A., "Free vibration of a thick FG circular plate in contact with an inviscid and incompressible fluid", In Persian, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, No.1, pp. 73-96, 2019.
- [12] Shafiee, A.A., Daneshmand, F., Askari, E., Mahzoon, M., "Dynamic behavior of a functionally graded plate resting on Winkler elastic foundation and in contact with fluid," *Struct Eng Mech.*, Vol.50, No.1, pp.53-71, 2014.
- [13] Amabili, M., "Effect of finite fluid depth on the hydroelastic vibrations of circular and annular plates," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.193, No.4, pp.909-25, 1996.
- [14] Canales, F.G., Mantari, J.L., "Laminated composite plates in contact with a bounded fluid: Free vibration analysis via unified formulation," *Composite Structures*, Vol.162, pp.374-87, 2017.
- [15] Yousefzadeh, S., Jafari, A.A., Mohammadzadeh, A., Najafi, M., "Dynamic response of functionally graded annular/circular plate in contact with bounded fluid under harmonic load," *Structural engineering and mechanics*, An international journal, Vol. 65, No.5, pp.523-33, 2018.
- [16] Yousefzadeh, Sh. Jafari, A. and Mohammadzadeh, A., "Hydroelastic vibration analysis of functionally graded circular plate in contact with bounded fluid by Ritz method", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 529-538, 2019.
- [17] Endo, H., "The behavior of a VLFS and an airplane during takeoff/landing run in wave condition," *Marine structures*, Vol.13, No.4-5, pp.477-91, 2000.
- [18] Saidi, A.R., Baferani, A.H., Jomehzadeh, E., "Benchmark solution for free vibration of functionally graded moderately thick annular sector plates" *Acta mechanica*, Vol.219, No.3, pp.309-35, 2011.
- [19] Leissa, A.W., "Vibration of plates," *Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration*, 1969.
- [20] Hejripour, F., Saidi, A.R., "Nonlinear free vibration analysis of annular sector plates using differential quadrature method," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol.226, No.2, pp.485-497, 2012.
- [21] Nie, G.J., Zhong, Z., "Vibration analysis of functionally graded annular sectorial plates with simply supported radial edges," *Composite Structures*, Vol. 84, No.2, pp.167-76, 2008.

$$K_{41} = \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta'_{u_0}(\theta) + \frac{1}{r} R'_{u_0}(r) \theta'_{u_0}(\theta) \right) - C_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{u_0}(r) \theta'_{u_0}(\theta) - \frac{1}{r} R'_{u_0}(r) \theta'_{u_0}(\theta) \right) \right) R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{42} = \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta''_{v_0}(\theta) + C_1 \left(R''_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) + \frac{1}{r} R'_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) - \frac{1}{r^2} R_{v_0}(r) \theta_{v_0}(\theta) \right) \right) R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{43} = \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta'_{\varphi_r}(\theta) + \frac{1}{r} R'_{\varphi_r}(r) \theta'_{\varphi_r}(\theta) \right) - C_1 \left(\frac{1}{r^2} R_{\varphi_r}(r) \theta'_{\varphi_r}(\theta) - \frac{1}{r} R'_{\varphi_r}(r) \theta'_{\varphi_r}(\theta) \right) \right) R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{44} = \int_0^\alpha \int_a^b \left(A_0 \frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta''_{\varphi_\theta}(\theta) + C_0 \left(R''_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) + \frac{1}{r} R'_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) - \frac{1}{r^2} R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) \right) \right) R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{45} = -C_0 \kappa^2 \int_0^\alpha \int_a^b R_w(r) \theta'_w(\theta) R_{\varphi_\theta}(r) \theta_{\varphi_\theta}(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{53} = C_0 \kappa^2 \int_0^\alpha \int_a^b \left(\frac{1}{r} R_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) + R'_{\varphi_r}(r) \theta_{\varphi_r}(\theta) \right) R_w(r) \theta_w(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{54} = C_0 \kappa^2 \int_0^\alpha \int_a^b R_{\varphi_\theta}(r) \theta'_{\varphi_\theta}(\theta) R_w(r) \theta_w(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{55} = C_0 \kappa^2 \int_0^\alpha \int_a^b \left(R''_w(r) \theta_w(\theta) + \frac{1}{r^2} R_w(r) \theta''_w(\theta) + \frac{1}{r} R'_w(r) \theta_w(\theta) \right) R_w(r) \theta_w(\theta) r dr d\theta$$

$$K_{15} = K_{51} = K_{25} = K_{52} = 0$$

7- مراجع

- [1] Amiri, J.V., Nikkhoo, A., Davoodi, M.R., Hassanabadi, M.E., "Vibration analysis of a Mindlin elastic plate under a moving mass excitation by eigenfunction expansion method," *Thin-Walled Structures*, Vol.62, pp.53-64, 2013.
- [2] Hasheminejad, S.M., Khaani, H.A., Shakeri, R., "Free vibration and dynamic response of a fluid-coupled double elliptical plate system using Mathieu functions," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.75, pp.66-79, 2013.
- [3] Askari, E., Jeong, K.H., Amabili, M., "Hydroelastic vibration of circular plates immersed in a liquid-filled container with free surface," *Journal of sound and vibration*, Vol.332, No.12, pp.3064-85, 2013.
- [4] Tariverdilo, S., Shahmardani, M., Mirzapour, J., Shabani, R., "Asymmetric free vibration of circular plate in contact with incompressible fluid," *Applied Mathematical Modelling*, Vol.37, No.1-2, pp.228-39, 2013.



مطالعه ریزساختاری و بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم خالص-گرافن با استفاده از روش آسیاب گلوله‌ای در فرآیند ریخته‌گری با همزنی مکانیکی - مغناطیسی

زهرا عزیزی¹، خسرو رحمانی^{2*}، فتح‌اله طاهری بهروز³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16765-1719، Kh_rahmani@sbu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/04/14

پذیرش: 1400/08/15

کلیدواژگان

نانوکامپوزیت ریختگی، آلومینیوم، گرافن، آسیاب گلوله‌ای، همزنی مکانیکی-مغناطیسی

در پژوهش‌های اخیر، استفاده از گرافن به دلیل تأثیر مثبت بر خواص کامپوزیت‌ها از جمله خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، خواص ریزساختاری و مکانیکی نانوکامپوزیت ریختگی آلومینیوم خالص تقویت شده با 0.5 درصد وزنی گرافن با همزنی مکانیکی - الکترومغناطیسی و سپس اکستروژن داغ و نهایتاً آنیل، در دو روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای و بدون استفاده از آسیاب گلوله‌ای بررسی شد. با بکار بردن روش‌های همزنی مکانیکی و الکترومغناطیسی، ترکیب دو نیروی برشی و حجمی، تلاطم بیشتری را در فلز مذاب ایجاد کرده که منجر به توزیع مناسب ذرات تقویت کننده، کاهش ساختارهای دندریتی و اصلاح اندازه دانه در طول انجماد می‌شود. مطالعات ریزساختاری نشان داد که در روش آسیاب گلوله‌ای توزیع نانوذرات گرافن در فاز زمینه و کاهش اندازه دانه، نسبت به روش بدون آسیاب گلوله‌ای مطلوب‌تر می‌باشد. در روش آسیاب گلوله‌ای، سختی، استحکام کششی و استحکام فشاری به ترتیب 19.7، 142.8 و 11.7 درصد و در روش بدون آسیاب به ترتیب 9، 85.2 و 13.5 درصد نسبت به آلومینیوم خالص افزایش یافته است. تغییر طول در روش آسیاب گلوله‌ای 6.8 و در روش بدون آسیاب گلوله‌ای 35.4 درصد کاهش نشان می‌دهد.

Study of microstructure and investigation of mechanical properties of pure aluminum-graphene nanocomposite using ball mill method in casting process with mechanical and electromagnetic stirring

Zahra Azizi¹, Khosrow Rahmani^{2*}, Fathollah Taheri-Behrooz³

1- Mechanical and Energy Systems Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Mechanical and Energy Systems Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

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

* P.O.B. 16765-1719, Tehran, Iran, Kh_rahmani@sbu.ac.ir

Keywords

Casting Nanocomposite, Pure aluminum, Graphene, Ball Milling, Mechanical and Electromagnetic Stirring

Abstract

In recent scientific studies, the use of graphene has been considered due to its positive effect on the properties of composites, including mechanical, electrical and thermal properties. In this research, the microstructural and mechanical properties of pure aluminum nanocomposite cast reinforced with 0.5 wt% graphene with mechanical-electromagnetic stirrer and then hot extrusion and finally annealing, in two methods of using ball milling and without using ball milling process, was investigated. By applying both mechanical and electromagnetic stirring techniques, combining both shear and body forces can cause more turbulence in the molten metal that lead to as well as distribute reinforcing particles, decreasing the dendritic structures and refining the grains during solidification. The microstructural studies showed that in the ball mill method, the distribution of graphene nanoparticles and reduce grain size in the matrix phase is significantly better than the non-ball mill method. Also, in the method of ball mill, hardness, tensile strength and compressive strength increased by 19.7, 142.8 and 11.7%, respectively, and in the method without mill, 9, 85.2 and 13.5%, respectively, compared to pure aluminum. The elongation decreased by 6.8% in the ball mill method and 35.4% in the non-ball mill method.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Azizi, Z., Rahmani, K., Taheri-Behrooz, F., "Study of microstructure and investigation of mechanical properties of pure aluminum-graphene nanocomposite using ball mill method in casting process with mechanical and electromagnetic stirring", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1532-1542, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.533441.1735>

1- مقدمه

کاربرد کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به عنوان کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی، حمل و نقل، هواپیماسازی و خطوط انتقال قدرت بسیار مورد توجه می‌باشد [1-6]. این کامپوزیت‌ها دارای ویژگی‌های خاصی، از قبیل چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب هستند [7-10].

اضافه کردن مواد تقویت‌کننده به آلیاژهای آلومینیوم می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی، سایشی و همچنین خواص الکتریکی و حرارتی آن‌ها شود. در سال‌های اخیر نانو مواد کربنی مانند نانولوله‌های کربنی و گرافن به عنوان یک گروه مهم از مواد تقویت‌کننده جدید برای کاربردهای صنعتی مختلف با توجه به مدول ینگ بالا، استحکام مکانیکی و همچنین هدایت الکتریکی و حرارتی عالی معرفی شده‌اند. علاوه بر این، اکثر مطالعات نشان می‌دهد که گرافن به عنوان مؤثرترین ماده تقویت‌کننده برای ساخت مواد کامپوزیتی محسوب می‌شود [11-14]. به این دلیل که گرافن دارای ویژگی‌های خاصی از جمله خواص الکتریکی بسیار خوب [15]، هدایت حرارتی [16]، مدول ینگ [17] و استحکام کششی بالا [18] می‌باشد. چگالی گرافن به اندازه 1.08 g/cm^3 برآورد شده است [19]. این ویژگی‌ها، گرافن را به عنوان یک تقویت‌کننده کامل برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی معرفی می‌کند. تحقیقات زیادی برای ساخت کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت شده با نانو صفحات گرافن [20-22]، نانو ورق‌های گرافن [21-24]، گرافن چند لایه [25] یا مشتقات آن مانند اکسید گرافن و اکسید گرافن کاهش یافته [28-26] انجام شده است.

در میان روش‌های موجود برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته، ریخته‌گری یکی از پرکاربردترین روش‌ها، به دلیل هزینه‌های پایین فرآیند و روش تولید سریع می‌باشد [29]. روش ریخته‌گری گردابی شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت‌کننده به داخل گرداب می‌باشد. پس از افزودن ذرات تقویت‌کننده به مذاب، دوغاب حاصله به مدت زمان معینی هم زده می‌شود، سپس با روش‌های متداول، ریخته‌گری انجام می‌گیرد [30].

همزنی الکترومغناطیسی، یکی دیگر از روش‌های همزنی در طول فرآیند ریخته‌گری همزنی است که با توزیع نسبتاً خوب ذرات تقویت‌کننده و کاهش ساختارهای دندریتی و اصلاح اندازه دانه در طول انجماد می‌تواند برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی مفید باشد [31-32]. ساختارهای دندریتی و دانه‌های درشت می‌توانند ذرات تقویت‌کننده را در مرحله انجماد تحت فشار قرار دهند و باعث توزیع مجدد نامطلوب آن‌ها شوند و در نتیجه باعث تجمع توده‌ای ذرات می‌شود. به عنوان یک راه حل، استفاده از هم‌زدن الکترومغناطیسی تا مرحله انجماد می‌تواند اثرات مخرب این پدیده را کاهش دهد [33-34]. همزنی الکترومغناطیسی مانع از شناور شدن یا نشست ذرات توزیع شده، در هنگام انجماد می‌شود. علاوه بر این، همزنی الکترومغناطیسی می‌تواند به تولید کامپوزیت عاری از نقص، کاهش جدایش و ترک‌های داخلی کمک کند. همزنی الکترومغناطیسی نیروی حجمی را به فلز مذاب وارد می‌کند. با استفاده از این روش همزنی در مرحله سرمایش، حباب‌های گاز به دام افتاده و ذرات کلوخه شده به صورت قابل توجهی می‌توانند شناور یا ته‌نشین شوند. این امر منجر به تخلخل کمتر ناخواسته و توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده می‌شود. با این وجود، استفاده از همزن الکترومغناطیسی به صورت جداگانه نمی‌تواند به طور مؤثر تقویت‌کننده‌ها را توزیع کند، زیرا فقط یک نیروی حجمی را اعمال می‌کند. بنابراین، استفاده همزمان، از هر دو روش همزنی

مکانیکی و الکترومغناطیسی می‌تواند مفید باشد. در حقیقت، ترکیب دو نیروی برشی و حجمی می‌تواند تلاطم بیشتری را در فلز مذاب ایجاد کند و می‌توان از مزایای هر دو روش بهره‌مند شد.

پژوهش در زمینه کامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن از سال 2011 شروع شد [35-38، 20]. فرآیند اصلی آماده‌سازی کامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن شامل پیش پخش کردن، مخلوط و عملیات تغییر شکل می‌باشد. عملیات پیش پخش کردن و شکل دهی می‌تواند نقش مهمی در توزیع گرافن داشته باشد. در حال حاضر پژوهش‌ها روی توزیع گرافن در مراحل اولیه می‌باشد که عمدتاً بر پراکندگی پودر تمرکز دارد و پیشرفت خوبی در تحقیقات ایجاد شده است. با این وجود توزیع گرافن هنوز نیاز به بهبود دارد. در ادامه به بیان خلاصه چند مورد از پژوهش‌های انجام شده به منظور بهبود توزیع گرافن در زمینه آلومینیومی و افزایش خواص آلیاژ پایه، پرداخته می‌شود و سپس پژوهش حاضر تعریف می‌شود.

بستورس و همکاران [39]، به بررسی تأثیر زمان آسیاب کاری بر استحکام خمشی نانوکامپوزیت آلومینیوم 6061 و تقویت شده با 1 درصد وزنی گرافن و ساخته شده به روش نیمه پودری و سپس پرس داغ پرداختند. آن‌ها مدت آسیاب را 10، 30، 60 و 90 دقیقه انتخاب کردند و گزارش شد که با 1 ساعت آسیاب کاری گلوله‌ای، استحکام خمشی نانوکامپوزیت 47% افزایش می‌یابد. راشد و همکاران [24]، ابتدا پودر آلومینیوم و گرافن را به مدت 1 ساعت با همزن مکانیکی، با یکدیگر ترکیب کردند و سپس کامپوزیت زمینه آلومینیومی با خلوص 99% و تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانو صفحات گرافن را با استفاده از روش نیمه پودری و اکستروژن داغ تولید کردند. آن‌ها بیان کردند که در آزمون کشش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی کششی نانوکامپوزیت در مقایسه با آلومینیوم خالص به ترتیب 14.7 و 11.1 درصد افزایش یافته است اما کرنش تا نقطه شکست 40.6 درصد کاهش یافته است. در آزمون فشار، استحکام فشاری و کرنش به ترتیب 7.8 و 20.2 درصد کاهش می‌یابد.

ژائو و همکاران [40]، کامپوزیت آلومینیوم - گرافن را با استفاده آسیاب کاری گلوله‌ای و سپس فرآیند پیچش فشار بالا ساختند. تصاویر میکروسکوپی آن‌ها توزیع یکنواخت گرافن در زمینه را نشان داد. استحکام کششی کامپوزیت نسبت به آلومینیوم خالص 25.5% درصد افزایش یافت.

علی‌پور و همکاران [41]، به بررسی ریزساختار و استحکام کششی نانوکامپوزیت آلومینیوم 7068 گرافن ساخته شده به روش آسیاب گلوله‌ای، ریخته‌گری گردابی با کمک حباب‌زایی مافوق صوت و سپس اکستروژن داغ پرداختند. آن‌ها از درصدهای وزنی گرافن 0.1، 0.3، 0.5، 0.7 و 1، ساعت‌ها و سرعت‌های مختلف آسیاب گلوله‌ای استفاده کردند در نتیجه پژوهش خود، مدت زمان 2 ساعت آسیاب گلوله‌ای با سرعت 250 rpm و 0.5 درصد وزنی، را اعلام و بیان کردند که برای این پارامترها بهترین توزیع گرافن مشاهده شده است. استحکام کششی کامپوزیت نیز در بیشترین مقدار خود برای نیم درصد وزنی گرافن، 76 درصد نسبت به آلیاژ پایه بهبود پیدا کرد.

بابازاده و همکاران [42]، به بررسی اثر نانوصفحات گرافن و نانوتیوب کربن بر بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی (A356) پرداختند. در این پژوهش از درصدهای وزنی 0.01، 0.05 و 0.1 تقویت‌کننده‌ها استفاده شد. آن‌ها بیان کردند که با افزودن 0.1 درصد وزنی گرافن، استحکام و کرنش به ترتیب 28% و 2.8% افزایش یافت و افزودن 0.1% نانو تیوب کربنی، 33% افزایش سختی را به دنبال داشت.

دهد[44,45]. کلوخه شدن گرافن و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام کششی یکی از مسائل بحث برانگیز می‌باشد. در پژوهش حاضر، برای توزیع بهتر نانو صفحات گرافن و همچنین اصلاح بیشتر ریزساختار روش ریخته‌گری با همزنی مکانیکی - مغناطیسی بکار گرفته شد. بر این اساس، به منظور شفاف‌سازی بررسی تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر نحوه توزیع و در نتیجه خواص مکانیکی نانوکامپوزیت و همچنین افزایش قابل توجه استحکام کششی و سختی با توجه به کاربرد این نانوکامپوزیت‌ها، دو روش ساخت، انجام شد. در روش اول نانو صفحات گرافن مستقیماً به آلومینیوم ریخته‌گری اضافه و کامپوزیت ساخته شد. در روش دوم، برای ساخت نانوکامپوزیت نانو صفحات گرافن بعد از آسیاب‌کاری گلوله‌ای و کامپوزیت شدن با پودر میکرونی آلومینیوم به شمش آلومینیومی اضافه شده و تحت فرآیند ریخته‌گری گردابی و الکترومغناطیس قرار گرفت، سپس برای هر دو روش، فرآورده‌های اکستروژن داغ و آنیل به ترتیب انجام شدند (شکل 1). سپس ریزساختار زمینه و استحکام کششی، استحکام فشاری و سختی، در هر دو نانوکامپوزیت و سپس آلومینیوم خالص ساخته شده به روش مشابه، بررسی و مقایسه شد. به دلیل اهمیت و کاربرد گسترده آلیاژهای سری 1xxx در صنایع عمومی و پیشرفته از آلومینیوم با خلوص 99% به عنوان ماده زمینه در ساخت نانوکامپوزیت انتخاب شده است. از آلیاژهای معروف این سری می‌توان به آلیاژ 1350 برای کاربردهای الکتریکی از جمله خطوط انتقال برق فشارقوی اشاره کرد. هدف از انجام تحقیق بر روی آلیاژ آلومینیوم 1350، افزایش هدایت الکتریکی رشته‌های آلومینیومی جهت استفاده در هادی‌های پرفریت انتقال برق با افزودن نانوغرافن و هم چنین بررسی خواص مکانیکی آن می‌باشد.

2- روش تحقیق

در این تحقیق از آلومینیوم خالص با درصد خلوص 99 درصد و چگالی 2.7 g/cm^3 ، 0.5 درصد وزنی نانو صفحات گرافن (شکل 2) با اندازه ذره $5 \mu\text{m}$ و ضخامت میانگین 15 nm و پودرهای میکرونی آلومینیوم با میانگین اندازه 20 میکرومتر (شکل 3) برای ساخت نانوکامپوزیت استفاده شد. از جمله ویژگی‌های نانو صفحات گرافن می‌توان به متوسط تعداد لایه بین 5 تا 10 لایه و خلوص بالای 95 درصد وزنی اشاره کرد.

عزت‌پور و همکاران [43]، استراتژی ساده‌ای برای بهبود توزیع تقویت کننده کربنی با حداقل آسیب ساختاری و پیوند فصل مشترکی مناسب، اتخاذ کردند. آن‌ها کامپوزیت GNP-CNT/AA7075 را از تلفیق فرآیند متالورژی پودر ورقه‌ای، روش انحلالی به همراه ریخته‌گری نیمه جامد و اکستروژن دمای بالا، تولید کردند. پس از تعیین نسبت بهینه $V_{\text{GNP}}/V_{\text{CNT}}$ در تقویت کننده هیبریدی کربنی (0.167)، اثر حضور آن بر تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژ AA7075 را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که فرآیند ریخته‌گری نیمه جامد علاوه بر تخریب ساختار شبکه‌ای فاز تقویت کننده، سبب به دام فسادن مکانیکی آن‌ها درون زمینه و جدایش عناصر آلیاژی بر سطح تقویت کننده کربنی شده است. همچنین گزارش کردند که در دمای بهینه فرآیند اکستروژن 400°C ، توزیع یکنواخت GNP-CNT در درون زمینه و کاهش 39% اندازه دانه حاصل شده است و ریزسختی، و مقادیر استحکام تسلیم کششی و فشاری این کامپوزیت نسبت به آلیاژ AA7075 به ترتیب 17%، 51% و 28% بهبود یافته است.

اگرچه پژوهش‌هایی در زمینه تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر روی برخی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن انجام شده است، اما با توجه به این که یکی از کاربردهای آلومینیوم خالص، خطوط انتقال قدرت و صنایع الکترونیک می‌باشد، توزیع مطلوب گرافن در زمینه آلومینیوم خالص و خلأ شفاف‌سازی دقیق چگونگی تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم خالص - گرافن از جمله: سختی، استحکام کششی و فشاری در فرآیند تولید به روش ریخته‌گری با همزنی مکانیکی - مغناطیسی بعنوان یکی از روش‌های کم هزینه، سریع و مناسب برای تولید انبوه، احساس می‌شود. از طرفی در مطالعات پیشین افزایش استحکام کششی، سختی و یا استحکام فشاری برای این نانوکامپوزیت چشمگیر نبوده است.

بر اساس مطالعات انجام شده بر روی پژوهش‌های پیشین [41]، 0.5 درصد وزنی گرافن به عنوان مقدار بهینه برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب از جمله استحکام کششی در نانوکامپوزیت آلومینیوم - گرافن معرفی شده است.

در استفاده از فرآیند ریخته‌گری برای تولید نانوکامپوزیت آلومینیوم - گرافن، به دلیل بزرگ بودن سطح مقطع مخصوص صفحات گرافن و وجود نیروی واندروالس بین صفحات در طول فرآیند آماده‌سازی و همچنین پایین بودن چگالی گرافن نسبت به آلومینیوم خالص کلوخه‌شدن گرافن رخ می‌-

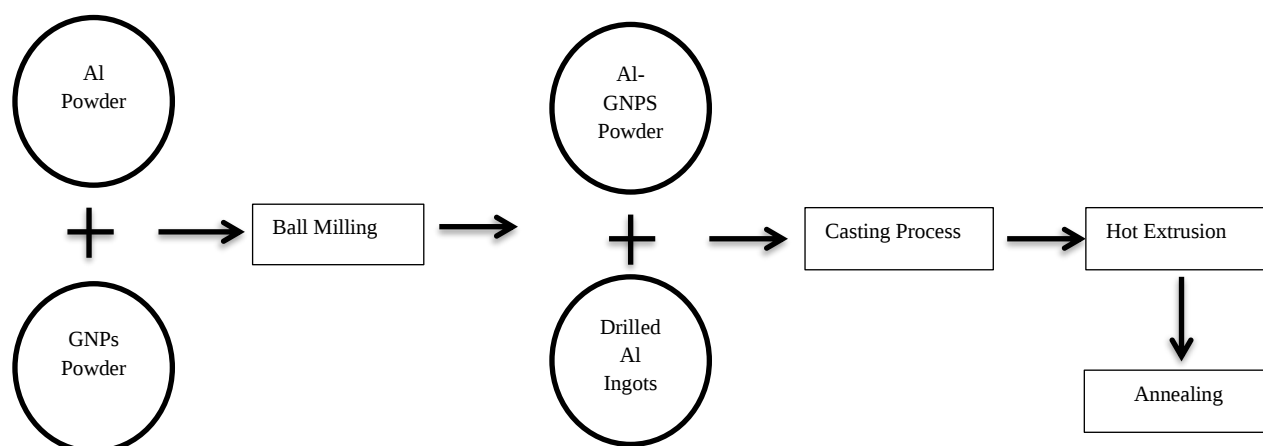


Fig. 1 Schematic of composite fabrication procedure.

شکل 1 شماتیک فرایند ساخت کامپوزیت.

شمش‌های آلومینیومی نیز با استون آزمایشگاهی شسته شدند تا آلودگی-های سطحی پاک شوند. همان‌طور که بیان شد برای ساخت کامپوزیت از دو روش استفاده شد. در روش اول ابتدا در شمش‌های آلومینیومی، با مت 6 میلی‌متری، 16 سوراخ به عمق 50 میلی‌متر ایجاد شد که این سوراخ‌ها با پودر نانو صفحات گرافن پر شدند و این مواد خام در بوته SiC (شکل 4) قرار داده شدند. سپس بوته در کوره‌ای که تحت گاز آرگون کار می‌کند و به همزن مکانیکی از جنس فولاد زنگ‌نزن 316 که جوش آرگون خورده و سپس روکش (کوتینگ) اکسید آلومینیوم به روش پاشش حرارتی داده شده است، و همزنی مغناطیسی (امواج الکترومغناطیسی) مجهز است، قرار داده شد (شکل 5)؛ و در ادامه ریخته‌گری به صورت زیر انجام شد:

- قراردادن شمش و پر کردن محفظه خلأ دستگاه ریخته‌گری با گاز آرگون با خلوص بالا (99.9995).

- افزایش دمای محفظه تا 780°C .

- شروع همزن مکانیکی بعد از ذوب کامل بیلت، با سرعت 2000 rpm و به مدت 10 min، سپس شروع همزن مغناطیسی با فرکانس 30 Hz، توان 5800 W و سرعت 400 rpm با نرخ خنک کاری $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

- خارج کردن بوته و قرار دادن در دمای محیط مختلف.

در ادامه، ماشین‌کاری بالک نانو کامپوزیت و انجام دو پاس اکستروژن داغ در دمای 300°C با نسبت اکستروژن 20 به 1، با استفاده از پرس هیدرولیک 100 تن با سرعت 20 mm/s، به منظور کاهش و بستن تخلخل‌های ناشی از ریخته‌گری و بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری انجام شد تا نمونه‌هایی به قطر 1cm و طول 8cm تولید شود. در روش دوم، کامپوزیت پودری آلومینیوم - گرافن آماده شده، به سوراخ‌های ایجاد شده در شمش‌های آلومینیوم افزوده شد. ادامه فرآیند ساخت نانو کامپوزیت، همانند روش اول انجام شد. برای مقایسه کردن خواص، نمونه‌های آلومینیوم خالص بدون ذرات تقویت کننده نیز با همین روش آماده شدند. نمونه‌های بدست آمده از هر سه روش به مدت یک ساعت و در دمای 343°C آتیل شدند. به منظور بررسی ریزساختار و توزیع نانوصفحات گرافن در فاز زمینه، از نمونه‌های نانو کامپوزیت آلومینیوم - گرافن در دو روش با آسیاب گلوله‌ای و بدون آسیاب گلوله‌ای، نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع 1 سانتی‌متر با قطر 1 سانتی‌متر تهیه شد. سطح این نمونه‌ها ابتدا با کاغذ سمباده‌های ضد آب 240 تا 5000 تحت عمل سمباده - زنی قرار گرفت. سپس با استفاده از خمیر الماسه 6 میکرونی پرداخت خشن سطح نمونه و نهایتاً با استفاده از محلول 0.03 میکرونی آلومینا، پولیش نهایی سطح نمونه‌ها انجام شد.



Fig. 4 Mold casting of SiC

شکل 4 قالب ریخته‌گری SiC

ریزساختار نمونه‌های نانو کامپوزیتی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل Mira 3-XMU و مجهز به آشکارساز EDX در بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی از این

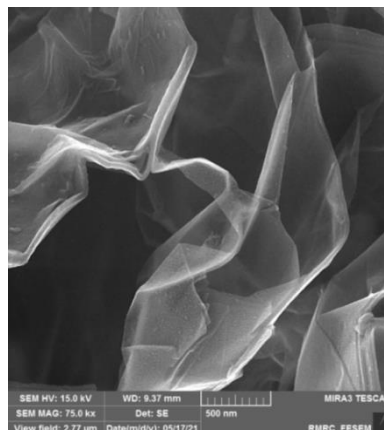


Fig. 2 Microscopy image of the graphene nanoplates.

شکل 2 تصویر میکروسکوپی از نانو صفحات گرافن.

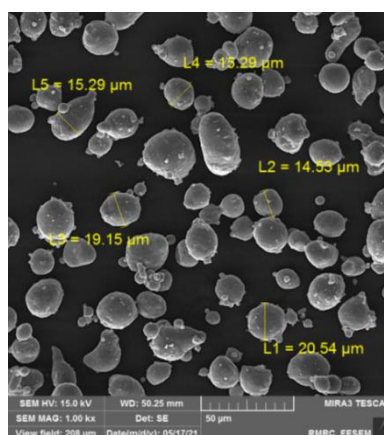


Fig. 3 Microscopy image of aluminum powder.

شکل 3 تصویر میکروسکوپی از پودر آلومینیوم.

با مطالعات انجام شده بر روی پژوهش‌های پیشین مشابه، می‌توان دریافت که به طور کلی آسیاب گلوله‌ای، نتایج مثبتی در توزیع بهتر پودر نانو در فاز زمینه و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های آلومینیوم - گرافن را به دنبال دارد. به همین دلیل، به منظور افزایش خاصیت ترشوندگی نانوصفحات گرافن و کاهش کلوخه‌ای شدن و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی آن، از آسیاب‌کاری گلوله‌ای استفاده شد. در این روش با بررسی مطالعات پیشین [41]، با هدف صرفه‌جویی در زمان و هزینه، و همچنین تحلیل نتایج پژوهش انجام شده، آسیاب گلوله‌ای به مدت 2 ساعت به عنوان زمان بهینه آسیاب انتخاب شد. در ادامه، ابتدا گرافن با استون آزمایشگاهی شسته شد تا کلوخه‌های احتمالی از هم جدا شوند و به مدت 24 ساعت در دمای اتاق نگه داشته شد تا کاملاً خشک شود. سپس مخلوطی از نانو صفحات گرافن و پودر آلومینیومی با ابعاد 20 میکرومتر به مدت 2 ساعت، با نسبت گلوله به پودر 10:1 و سرعت 250 rpm، تحت عملیات آسیاب‌کاری قرار گرفتند تا پودر کامپوزیتی آلومینیوم با نانو صفحات گرافن حاوی 25 درصد نانو صفحات گرافن و 75 درصد پودر آلومینیوم بدست آید. آسیاب با مقدار 2 درصد وزنی اسید استتاریک به عنوان کنترل کننده فرآیند (PCA) انجام شد. برای جلوگیری از اکسید شدن احتمالی پودرها در تمام مراحل آسیاب‌کاری، گاز آرگون در داخل محفظه شارژ و درب آسیاب کاملاً آب بندی شد. همچنین برای جلوگیری از بالا رفتن دما به ازای هر 1 ساعت آسیاب‌کاری، عملیات به مدت 30 دقیقه متوقف شد.

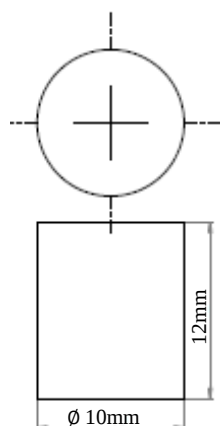
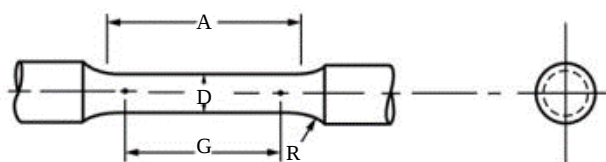


Fig. 6 Compression test sample dimensions

شکل 6 ابعاد نمونه آزمون فشار



G (mm)	D (mm)	R(mm)	A (mm)
30.00 ± 0.06	6.00 ± 0.10	6	48

Fig. 7 Tensile test sample dimensions.

شکل 7 ابعاد نمونه آزمون کشش.

الف-ا



ب-ب



Fig.8 A number of broken samples in the a) Compression test b) Tensile test.

شکل 8 تعدادی از نمونه‌های شکسته شده در الف) تست فشار، ب) تست کشش.

بررسی، پی بردن به تأثیر آسیاب گلوله‌ای بر نحوه توزیع نانو صفحات گرافن در زمینه نانو کامپوزیت، شکل و اندازه نانو صفحات می‌باشد. برای ارزیابی خواص مکانیکی، از آزمون سختی، آزمون فشار و آزمون کشش استفاده شد. آزمون سختی، توسط دستگاه سختی‌سنج ساخت شرکت شاپ ساری مدل M5 و 300 گرم-نیرو و زمان اعمال بار 15 ثانیه انجام شد. آزمون فشار برای نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد شکل 6 و آزمون با سرعت 2.16 mm/min انجام شد (شکل 8a). آزمون کشش نیز برای نمونه‌های تراشکاری شده مطابق با استاندارد ASTM B557M-10 (شکل 7) و با نرخ کرنش $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ انجام شد (شکل 8b). آزمون کشش و آزمون فشار، توسط دستگاه کشش ساخت شرکت سنتام با ظرفیت 150 کیلو نیوتن انجام شدند. برای هر نمونه آزمون کشش و فشار، 3 مرتبه آزمون صورت گرفت و مقدار میانگین با انحراف معیار مربوطه گزارش شد. برای هر نمونه آزمون سختی، حداقل در 5 نقطه آزمون انجام شد و مقدار میانگین بدست آمده برای هر نمونه با انحراف معیار مربوطه، ثبت شد.



ب-ب

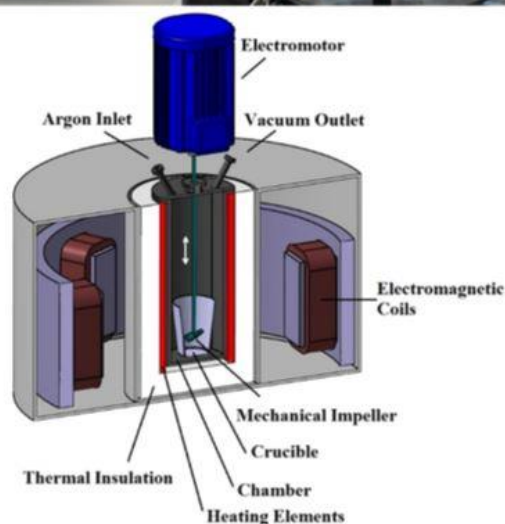


Fig. 5 Developed apparatus: a) different external parts and b) schematic view of the main parts.

شکل 5 دستگاه توسعه یافته الف) بخش‌های مختلف خارجی و ب) نمای شماتیک قطعات اصلی

3-نتایج و بحث

1-3- مطالعات ریزساختاری آلیاژ پایه و پودر نانوکامپوزیتی

همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، شکل پودر آلومینیوم به صورت کروی و با اندازه میانگین 20 میکرون می‌باشد. اما بعد از 2 ساعت آسیاب-کاری گلوله‌ای، شکل پودرهای میکرونی از کروی به صفحه‌ای تبدیل شده و اندازه آن‌ها نیز کاهش پیدا کرده است (شکل 9). بعد از اضافه کردن نانو صفحات گرافن به پودرهای میکرونی و بعد از عملیات آسیاب‌کاری گلوله‌ای با افزایش خاصیت ترشوندگی گرافن، نانو صفحات گرافن بصورت یکنواخت در داخل پودرهای آلومینیومی پخش شده‌اند.

2-3- توزیع نانوذرات در زمینه

توزیع نانو صفحات گرافن در فاز زمینه به عوامل مختلفی از قبیل پراکنده کردن نانوذرات در پودر آلومینیوم، اتفاقاتی که در حین مذاب و انجماد برای نانوذرات رخ می‌دهد، وابسته است. در حین مذاب، ته‌نشین شدن، شناور شدن و حتی کلوخه‌ای شدن مطرح می‌باشد. در زمان انجماد، موضوع مهم، اندرکنش بین جبهه انجماد و نانو صفحات گرافن است که به عوامل بسیاری وابسته است که از جمله آن‌ها می‌توان به شکل جبهه انجماد، سرعت انجماد، کسر حجمی نانو صفحات گرافن، گرادیان دمایی و گرادیان غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد اشاره داشت [46].

در روش بدون استفاده از آسیاب گلوله‌ای، بدلیل اینکه نانوذرات در مذاب از پراکندگی مناسبی برخوردار نیستند، توزیع نانوذرات در نمونه‌ای که از انجماد این مذاب بدست می‌آید، مطلوب نمی‌باشد. به‌طوری که توزیع نانو به صورت کلوخه و یا خوشه‌ای بودن آن می‌باشد که این امر به وضوح در شکل 10a، 10b و 10c مشاهده می‌شود. گرافن، دارای سطح مقطع مخصوص بزرگی می‌باشد و به دلیل جذب قوی نیروی واندروالس بین صفحات در فرآیند آماده‌سازی، به راحتی خوشه‌ای می‌شود [44,45]. می‌توان تاثیر گرافن به عنوان تقویت‌کننده و راندمان افزایش یافته (R) کامپوزیت را با استفاده از معادله زیر بیان کرد.

$$R = \frac{S l}{V 4} - 1 \quad (1)$$

که S/V سطح مخصوص و l اندازه نانوصفحات گرافن می‌باشد [47]. کلوخه‌شدن گرافن منجر به کاهش سطح مخصوص گرافن می‌شود (شکل 10a) که مستقیماً بر تأثیر تقویت‌کنندگی آن اثر می‌گذارد و راندمان ماده کامپوزیتی را کاهش می‌دهد. کلوخه‌های گرافن (شکل 10b و 10c) به عنوان منشأ ترک عمل می‌کنند و باعث می‌شوند که کامپوزیت در نیروی پایینی شکسته شود [48-50]. تصویر EDX برای اثبات وجود گرافن در نانوکامپوزیت استفاده شد که وجود ترکیبات کربن‌دار این امر را نشان می‌دهد (شکل 10d).

در روش استفاده از آسیاب‌کاری گلوله‌ای، نیروهای ضربه‌ای و برشی شدید ناشی از گلوله‌ها و همچنین تاثیر اسید استتاریک به عنوان عامل کنترل‌کننده فرآیند، باعث می‌شود که کلوخه‌های نانوذرات از بین رود و نانو صفحات گرافن به صورت مجزا در زمینه آلومینیوم توزیع شود و بازدهی آسیاب‌کاری بالا رود.

در نتیجه همان‌طور که در شکل 10e و 10f مشاهده می‌شود کامپوزیت بهتر ساخته می‌شود و کلوخه‌های گرافن تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. توزیع یکنواخت نانو صفحات گرافن در زمینه پودر آلومینیوم باعث می‌شود که

فاصله بین نانو صفحات گرافن افزایش و در نتیجه نیروی جاذبه بین آن‌ها کاهش یابد، این امر احتمال غلبه نیروی وارده توسط همزن مکانیکی بر نیروی

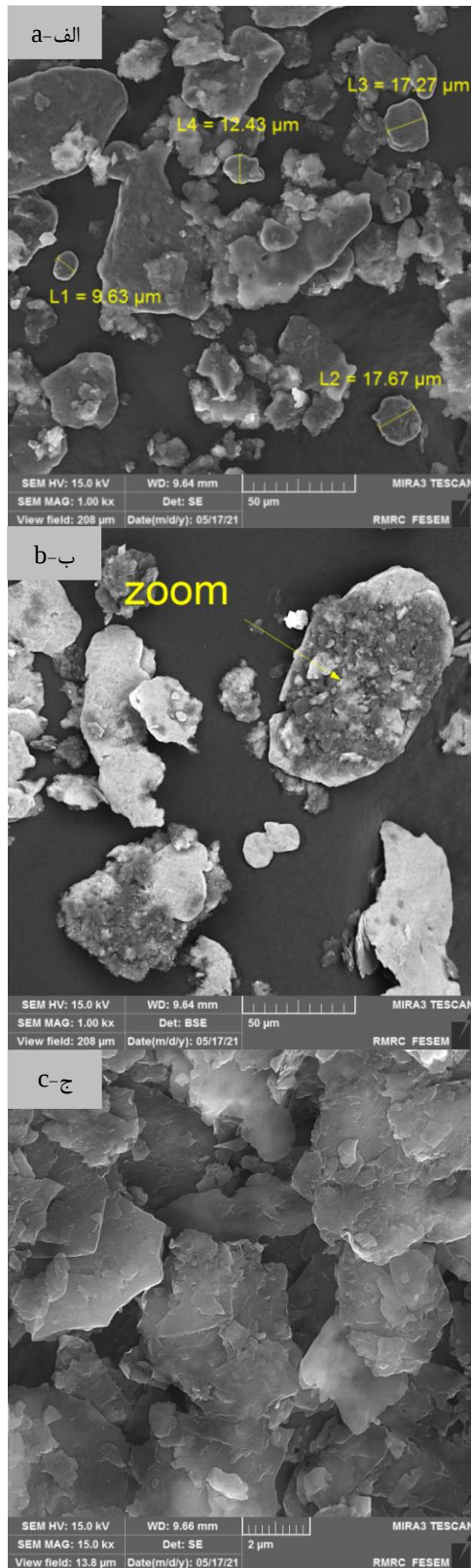


Fig. 9 Image of Al-0.5 wt% graphene composite powder after 2 hours of ball milling process a,b) low magnification, c) high magnification
شکل 9 تصویر پودر کامپوزیتی آلومینیوم - گرافن نیم درصد وزنی بعد از دو ساعت فرایند آسیاب‌کاری گلوله‌ای، الف و ب) بزرگنمایی پایین، ج) بزرگنمایی بالا.

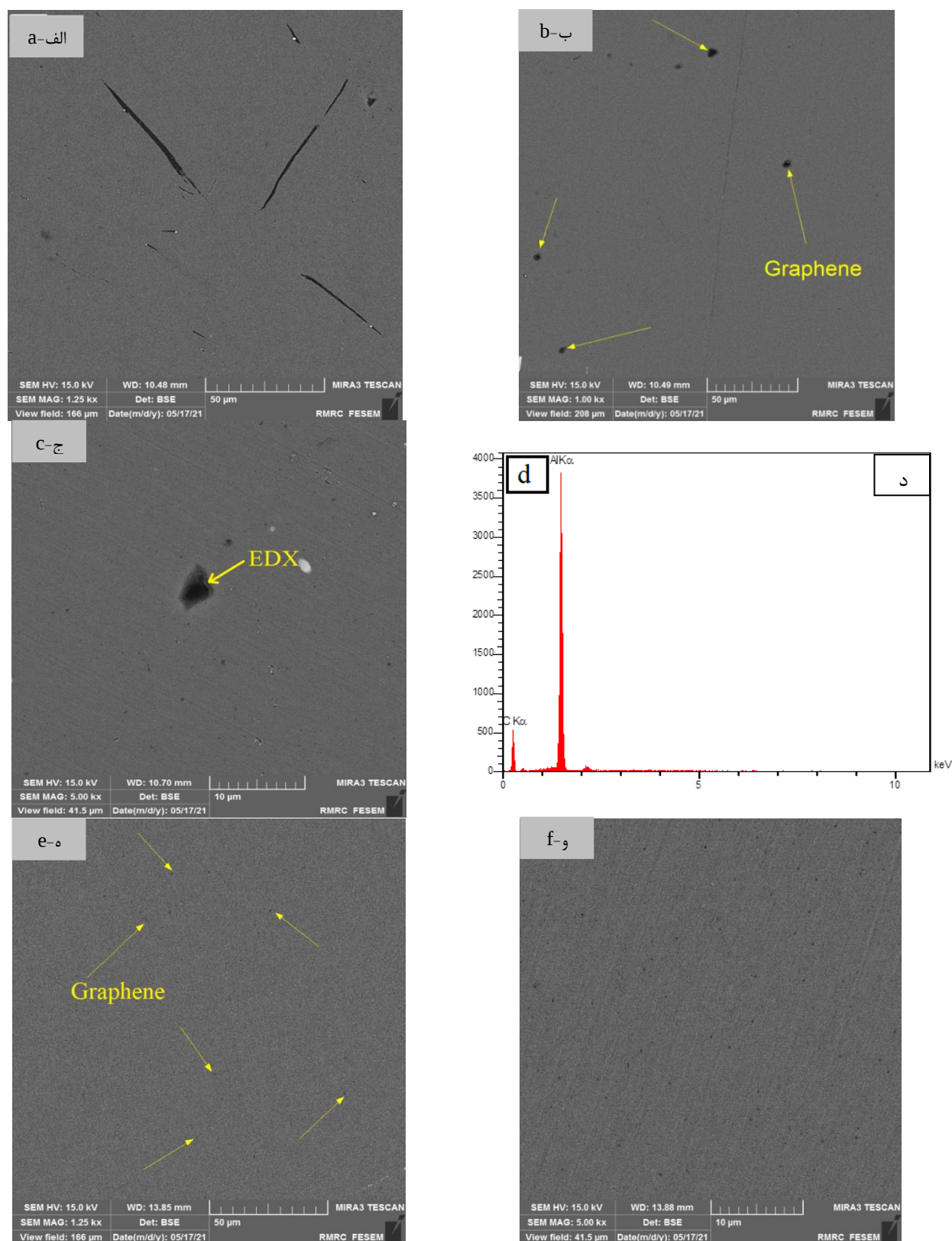


Fig. 10 FESEM images of pure Al – 0.5 wt% GNPs nanocomposite a) Surface area of graphene in nanocomposite without ball mill b) Low magnification of nanocomposite without ball mill c) High magnification of nanocomposite without ball mill (d) EDX image of nanocomposite without ball mill e) Low magnification of nanocomposite with ball mill f) High magnification of nanocomposite with ball mill.

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نانوکامپوزیت آلومینیوم خالص - نیم درصد وزنی نانوصفات گرافن، (الف) سطح مقطع گرافن در نانوکامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، (ب) بزرگنمایی پایین از نانوکامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، (ج) بزرگنمایی بالا از نانوکامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، (د) تصویر EDX از نانوکامپوزیت بدون آسیاب گلوله‌ای، (ه) بزرگنمایی پایین از نانوکامپوزیت با آسیاب گلوله‌ای، (و) بزرگنمایی بالا از نانوکامپوزیت با آسیاب گلوله‌ای .

فشاری، آسیاب نکردن پودر اثر بهتری دارد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، گرافن به علت ساختار دوبعدی آن، استحکام کششی بالایی دارد و بیشتر دچار کرنش می‌شوند اما در آزمون فشار به علت کمایش ورقه‌ای، گرافن نرم می‌باشد، بنابراین نمی‌تواند زیاد فشرده شود [53]. تأثیر مثبت افزودن گرافن و توزیع یکنواخت ناشی از آسیاب گلوله‌ای بر خواص کششی کامپوزیت به‌طور قابل توجهی بیشتر از استحکام فشاری می‌باشد. به عبارتی باز شدن کلوخه‌ها و توزیع یکنواخت گرافن می‌تواند باعث شود که صفحات دوبعدی گرافن با مکانیزم قفل کردن ترک‌ها و تغییر مسیر آن‌ها باعث افزایش استحکام کششی و تغییر طول بیشتری شوند. در حالی که در آزمون فشار، همان‌طور که بیان شد به علت نرم بودن گرافن، آسیاب گلوله‌ای و توزیع یکنواخت می‌تواند باعث اندکی کاهش در استحکام فشاری نانوکامپوزیت شود.

جدول ۱ نتایج آزمون‌های سختی، استحکام کششی، استحکام فشاری و تغییر طول برای آلومینیوم، نانوکامپوزیت آلومینیوم - 0.5% وزنی گرافن با آسیاب گلوله‌ای و آلومینیوم 0.5% - گرافن بدون آسیاب گلوله‌ای.

Table. 1 Results of hardness, tensile and compression strength and elongation tests for Al, Al-0.5% GNP nanocomposite with ball mill and Al-0.5% GNP without ball mill.

نمونه	سختی ویکرز	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)	استحکام فشاری (MPa)
آلومینیوم خالص	34.3 ± 1.3	61 ± 3.28	55.6 ± 2.45	228.8 ± 14.8
کامپوزیت آلومینیوم - گرافن بدون آسیاب گلوله‌ای	37.4 ± 1.64	113.3 ± 5.16	35.9 ± 1.2	259.5 ± 17.4
آلومینیوم - گرافن با آسیاب گلوله‌ای	41 ± 2.3	147.6 ± 8.32	51.8 ± 4.8	255.6 ± 15.52

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا نانوکامپوزیت آلومینیوم خالص - 0.5 wt% گرافن با استفاده از ریخته‌گری و با روش جدید همزنی مکانیکی - مغناطیسی ساخته شد. سپس توزیع نانوصفات گرافن به کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مطالعه و خواص مکانیکی بررسی شد. در روش اول نانو-صفحات گرافن مستقیم به داخل شمش‌های آلومینیومی اضافه شدند. اما در روش دوم ابتدا پودرهای آلومینیوم و گرافن به مدت 2 ساعت و با سرعت 250 rpm تحت عملیات آسیاب گلوله‌ای قرار گرفتند و سپس به شمش‌های آلومینیومی اضافه شدند و فرآیند ریخته‌گری انجام شد. در ادامه برای هر دو روش فرآیند اکستروژن داغ انجام شد. با هدف مقایسه، نمونه‌های آلومینیوم خالص نیز به روش مشابه آماده شد. همه نمونه‌های آماده شده در شرایط یکسان به مدت 1 ساعت و در دمای 343°C آنیل شدند. در نهایت نمونه‌هایی برای بررسی ریزساختار، آزمون کشش، آزمون سختی و آزمون فشار آماده شدند که نتایج زیر حاصل گردید:

جاذبه بین نانو صفحات گرافن را افزایش می‌دهد و در نتیجه، تشکیل کلوخه-های نانو صفحات گرافن را به حداقل می‌رساند [41].

در حین فرایند ریخته‌گری، در روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای، بعد از ذوب شدن شمش‌های آلومینیومی، انحلال و ذوب شدن پودرهای میکرونی آلومینیوم شروع می‌شود. چون نانو صفحات گرافن در داخل پودرهای آلومینیوم با عملیات آسیاب‌کاری گلوله‌ای قرار گرفته‌اند و در واقع پودرهای آلومینیوم حامل نانو صفحات گرافن هستند، این پودرها از نانو صفحات گرافن در مقابل مذاب محافظت کرده و از تماس مستقیم نانو ذرات با مذاب جلوگیری خواهند کرد. هنگامی که پودرهای میکرونی آلومینیوم در داخل مذاب حل و ذوب شدند، نانو صفحات گرافن در داخل زمینه آلومینیوم مذاب رهاسازی می‌شوند. این رهاسازی نانو صفحات گرافن در مدت هم زدن مکانیکی مذاب اتفاق می‌افتد. در ادامه با اعمال امواج الکترومغناطیس به نانوکامپوزیت تا مرحله سرد شدن، کلوخه‌های نانو صفحات گرافن کاملاً از هم باز شده و نانو صفحات در داخل زمینه پخش شدگی یکنواختی بدست می‌آورند (شکل 10e و 10f). از طرفی دیگر با توزیع یکنواخت نانو صفحات در داخل زمینه نیز می‌توان گفت که این ذرات با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک‌ها و تغییر مسیر آن‌ها در داخل زمینه هنگام اشاعه ترک باعث افزایش استحکام و تغییر طول نانوکامپوزیت خواهند شد [51]. بنابراین استفاده از آسیاب گلوله‌ای هم باعث توزیع یکنواخت، هم کاهش اندازه نانو ذرات می‌شود که نتیجه آن بهبود خواص مکانیکی می‌باشد. توزیع نامناسب نانوصفات گرافن در فاز زمینه و کلوخه شدن آن‌ها باعث می‌شود که در مرزخانه‌ها تجمع یابند و کاهش استحکام کششی را به دنبال داشته باشد.

3-3- خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های ریخته‌گری

نتایج آزمون سختی ویکرز، استحکام کششی، فشاری و تغییر طول در جدول 1 و شکل 11 نشان داده شده است. اثر مثبت آسیاب گلوله‌ای بر سختی نانوکامپوزیت 19.7 درصد و در روش بدون آسیاب گلوله‌ای 9 درصد می‌باشد که تأثیر مثبت روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای نسبت به بدون استفاده از آسیاب گلوله‌ای 10.7 درصد می‌باشد. استحکام کششی نمونه کامپوزیتی بدون آسیاب گلوله‌ای و نمونه کامپوزیتی با آسیاب گلوله‌ای نسبت به آلومینیوم خالص به ترتیب 142 و 85.2 درصد افزایش داشته است. در واقع با توزیع یکنواخت نانو صفحات گرافن، این ذرات در مرزخانه‌های آلومینیوم به عنوان یک مانع عمل می‌کنند تا رشد دانه را حفظ کنند و نابجایی‌ها به دلیل محدودیت حرکتشان نمی‌توانند به راحتی حرکت کنند که باعث افزایش استحکام کششی می‌شود. در صورتی که کلوخه‌های گرافن منجر به تخلخل بیشتر، کاهش چگالی و در نتیجه کاهش استحکام کششی و سختی ویکرز می‌شود [52]. ازدیاد طول تا نقطه شکست نیز در روش استفاده از آسیاب گلوله‌ای 6.8 درصد و در روش بدون آسیاب 35.4 درصد کاهش یافته است. همان‌طور که مشخص است، به دلیل کاهش اندازه ذرات و همچنان توزیع یکنواخت نانو ذرات، در روش آسیاب گلوله‌ای، استحکام و تغییر طول کامپوزیت به ترتیب 56.8 و 44.3 درصد بیشتر بهبود بخشیده است که درصد قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. بنابراین توزیع نامناسب نانو صفحات گرافن در زمینه باعث افت استحکام و تغییر طول می‌شود. نتایج آزمون استحکام فشاری نشان می‌دهد که نانو صفحات گرافن در هر دو روش باعث افزایش استحکام فشاری می‌شود. به‌طوری که در روش بدون آسیاب گلوله‌ای، 13.5 درصد و روش آسیاب گلوله‌ای 11.7 درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد در استحکام

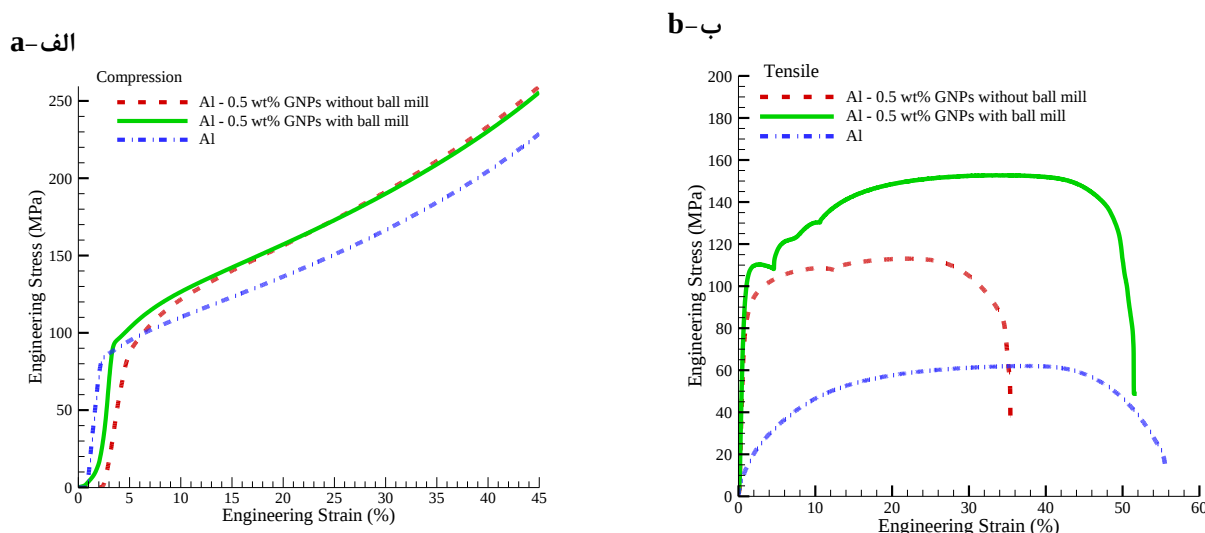


Fig. 11 a) Compression and **b)** tensile tests of pure Al and Al – 0.5 wt% GNPs composite with and without ball mill.

شکل 11 آزمون‌های الف) فشار و ب) کشش آلومینیوم و کامپوزیت آلومینیوم گرافن 0.5 درصد وزنی با آسیاب گلوله‌ای و بدون آسیاب گلوله‌ای.

- [4] Polat S, Sun Y, Cevik E., "Investigation of Wear and Corrosion Behavior of Graphene Nanoplatelet-Coated B4C Reinforced Al-Si Matrix Semi-Ceramic Hybrid Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 53, No. 25, pp. 3549-3565, 2019.
- [5] Rhee H, Whittington W.R, Oppedal A.L, Sherif A.R, King R.L, Kim H.J, Lee C., "Mechanical Properties of Novel Aluminum Metal Matrix Metal Composites: Application to Overhead Conductors", Journal of Materials and Design, Vol. 88, pp. 16-21, 2015.
- [6] Sauvage X, Bobruk E.V, Murashkin M.Y, Nasedkina Y, Enikeev N.A, Valiev R.Z., "Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys", Journal of Acta Materialia, Vol. 98, pp. 355-366, 2015.
- [7] Yibin, X, Yoshita. T., "Thermal Conductivity of SiC Fine Particles Reinforced Al Alloy Matrix Composite with Dispersed Particle Size", Journal of Applied Physics, Vol. 95, pp. 722-726, 2004.
- [8] Borgonovo. C, Apelian. D., "Manufacture of Aluminum Nanocomposites: A Critical Review", Journal of Materials Science Forum, Vol. 678, pp. 1-22, 2011.
- [9] Yang. Y, Li. X, Lan. J., "Study on Bulk Aluminum Matrix Nano Composite Fabricated by Ultrasonic Dispersion of Nano-Sized SiC Particles in Molten Aluminum Alloy", Journal of Materials Science and Engineering A, Vol. 380, pp. 378-383, 2004.
- [10] Miracle. D., "Metal Matrix Composites-From Science to Technological Significance", Journal of Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 2526-2540, 2005.
- [11] Porwal. H, Grasso. S, Reece. M. J., "Review of Graphene-Ceramic Matrix Composites", Journal of Advances in Applied Ceramics, Vol. 112, No. 8, pp. 443-454, 2013.
- [12] Tjong. S.C., "Recent Progress in The Development and Properties of Novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets", Journal of Materials Science and Engineering: R: Reports, Vol. 74, No. 10, pp. 281-350, 2013.
- [13] Hu. Z, Tong. G, Lin. D, Chen. C, Guo. H, Xu. J, Zhou. L., "Graphene-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites - a Review", Journal of Materials Science and Technology, Vol. 32, No. 9, pp. 930-953, 2016.
- [14] Moghadam. A.D, Omrani. E, Menezes. P.L, Rohatgi. P.K., "Mechanical and Tribological Properties of Self-lubricating Metal Matrix Nanocomposites Reinforced by Carbon Nanotubes (CNTs) and Graphene - A Review", Journal of Composites Part B: Engineering, Vol. 77, pp. 402-420, 2015.

- 1- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نشر میدانی نشان می‌دهد که آسیاب کاری گلوله‌ای باعث کاهش اندازه دانه ذرات میکرونی پودر آلومینیوم و تغییر شکل ذرات از کروی به صفحه‌ای می‌شود.
- 2- عدم وجود کلوخه‌ها و خوشه‌های گرافن در روش آسیاب گلوله‌ای، توزیع خوب نانو صفحات گرافن و اصلاح اندازه دانه در فاز زمینه با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی به‌خوبی آشکار می‌باشد. در صورتی که تصاویر میکروسکوپی کلوخه‌ها و خوشه‌های گرافن در روش بدون آسیاب گلوله‌ای گرافن را نشان می‌دهند.
- 3- استفاده از روش آسیاب گلوله‌ای پودر کامپوزیتی آلومینیوم - گرافن قبل از ریخته‌گری، استحکام کششی، تغییر طول تا نقطه شکست و سختی را نسبت به روش بدون آسیاب به ترتیب 56.8، 44.3 و 10.7 را بیشتر بهبود می‌بخشد. دوبعدی بودن گرافن عامل استحکام کششی بالای آن می‌باشد. بنابراین توزیع یکنواخت گرافن و در نتیجه مکانیزم قفل ترک‌ها و تغییر مسیر آن‌ها خواص کششی و سختی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد.
- 4- در آزمون فشار، آسیاب نکردن پودر اثر مثبت بیشتری (1.8%) بر استحکام فشاری داشت به طوری که در روش بدون آسیاب، استحکام فشاری 13.5 و در روش با آسیاب 11.7 درصد نسبت به آلومینیوم خالص افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند به علت نرم بودن گرافن ناشی از کماتش صفحه‌ای آن در آزمون فشار باشد.

5- مراجع

- [1] Kumar A, Gulati V, Kumar P., "Parametric Effects on Formability of AA2024-O Aluminum Alloy Sheets in Single Point Incremental Forming", Journal of Materials Research and Technology, Vol. 8, No.1, pp. 1461-1469, 2018.
- [2] Thakur A., "Fatigue Behavior and Fracture Mechanism of a Hot Rolled AA7020 Aluminum Alloy", International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 3, pp. 401-404, 2019.
- [3] Kumar GV, Rao CSP, Selvaraj N., "Mechanical and Tribological Behavior of Particulate Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites- a Review", Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 59-91, 2011.

- [31] Dwivedi. S. P, Sharma. S, Mishra. R. K., "Electromagnetic Stir Casting and its Process Parameters for the Fabrication and Refined the Grain Structure of Metal Matrix Composites", *International Journal of Advanced Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 639-649, 2014.
- [32] Kumar. A, Lal. S, Kumar. S. J., "Fabrication and Characterization of A359/Al₂O₃ Metal Matrix Composite using Electromagnetic Stir Casting Method", *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 2, No. 3, pp. 250-254, 2013.
- [33] Hashim. J, Looney. L, Hashmi. M., "Metal Matrix Composites: Production by The Stir Casting Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 1-7, 1999.
- [34] Garcia-Hinojosa. J, Surrapa. M., "Effect of Grain Refinement Treatment on the Microstructure of Cast Al-7Si-SiCp Composites", *Journal of Materials Science and Engineering: A*, Vol. 386, No. 1-2, pp. 54-60, 2004.
- [35] Wang. R. G, Li. Z, Liu. W.B, Jiao. W.C, Hao. L.F, Yang. F, "Attapulgite-Graphene Oxide Hybrids as Thermal and Mechanical Reinforcements for Epoxy Composites", *Journal of Composites Science and Technology*, Vol. 87, pp. 29, 2013.
- [36] Han. Y.G, Wang. T.Q, Gao. X.X, Li. T.X and Zhang. Q., "Preparation of Thermally Reduced Graphene Oxide and the Influence of Its Reduction Temperature on the Thermal, Mechanical, Flame Retardant Performances of PS Nanocomposites", *Journal of Composite Part A*, Vol. 84, p. 336, 2016.
- [37] Ramirza. C, Miranzo. P, Belmonte. M, Osendi. M.I, Poza. P, Vega-Diaz. S.M, Terrones. M., "Extraordinary Toughening Enhancement and Flexural Strength in Si₃N₄ Composites using Graphene Sheets", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 34, No. 2, p. 161, 2014.
- [38] Vahdati, M., "Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1207-1216, 2021.
- [39] Bastwors. M, Kim. Y, Zhang. K, and, Wang. S., "Fabrication of Graphene Reinforced Aluminum Composite by Semi-Solid Processing", *Journal of International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2013.
- [40] Zhao. L.Y, Lu. H.M, and Gao. Z.J., "Microstructure and Mechanical Properties of Al/Graphene Composite Produced by Highpressure Torsion", *Journal of Advanced Engineering Materials*, Vol. 17, No. 7, p. 976, 2013.
- [41] Alipour. M, Eslami Farsani. R., "Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of Cast AA7068 Nanocomposite Reinforced with Graphene Nanoplates", In Persian, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 139-144, 2017.
- [42] Babazade. A., Hadad, M.J., Safarabadi. M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1197-1206, 2021.
- [43] Ezatpour. H, and Torabi Parizi. M., "Effect of Carbonaceous Hybrid Reinforcement and Extrusion Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Matrix Hybrid Composite Prepared by Semi-Solid Casting", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1339-1352, 2021.
- [44] Shin. S.E, Choi. H.J, Bea. D.H., "Strengthening Behavior of Few-Layered Graphene/Aluminum Composites", *Journal of Carbon*, Vol. 82, pp. 143, 2015.
- [45] Baig. Z, Mamat. O and Mustapha. M., "Recent Progress on the Dispersion and the Strengthening Effect of Carbon Nanotubes and Graphene-Reinforced Metal Nanocomposites: A Review", *Journal of Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-46, 2018.
- [46] Chung. D.D. L., "Carbon Composites", Second Edition, University at Buffalo, The State University of New York, United States, Published by Elsevier, pp. 532-562, 2017.
- [15] Novoselov. K.S, Geim. A.K, Morozov. S.V, Jiang. D, Zhang. Y, Dubonos. S.V, Grigorieva. I.V, Firsov. A. A., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Journal of Science*, Vol. 306, No. 5696, pp. 666-669, 2004.
- [16] Balandin. A.A, Ghosh. S, Bao. W, Calizo. I, Teweldebrhan. D, Miao. F, Lau. C.N., "Superior Thermal Conductivity of Single layer Graphene", *Journal of Nano Letters*, Vol. 8, No. 3, pp. 902-907, 2008.
- [17] Lee.C, Wei. X, Kysar. J. W, Hone. J., "Measurement of The Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene", *Journal of Science*, Vol. 321, No. 5887, pp. 385-388, 2008.
- [18] Lee.C, Wei. X, Li. Q, Kysar. J. W, Hone. J., "Elastic and Frictional Properties of Graphene", *Journal of Physica Status Solidi (B)*, Vol. 246, No. 11-12, pp. 2562-2567, 2009.
- [19] Rafiee. M. A, Rafiee. J, Wang. Z, Song. H, Yu. Z. Z, Koratkar. N., "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content", *Journal of ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.
- [20] Bartolucci. S.F, Paras. J, Rafiee. M. A, Rafiee. J, Lee. S, Kapoor. D., "Graphene-Aluminum Nanocomposites", *Journal of Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 27, pp. 7933-7937, 2011.
- [21] Yan. S. J, Cheng. Y, Hu. H. Q, Zhou. C. J, Bo. L. D, Long. D. S., "Research of Graphene-Reinforced Aluminum Matrix Nanocomposites", *Journal of Materials Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 1-6, 2014.
- [22] Boostani. A. F, Tahamtan. S, Jiang. Z, Wei. D, Yazdani. S, Khoshroshahi. R. A., "Enhanced Tensile Properties of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Graphene Encapsulated SiC Nanoparticles", *Journal of Composites Part A*, Vol. 68, No. 2, pp. 155-163, 2015.
- [23] Li. J. L, Xiong. Y. C, Wang. X. D, Yan. S. J, Yang. C, He. W. W, Chen. J. Z, Wang. S. Q, Zhang. X. Y, Dai. S. L., "Microstructure and Tensile Properties of Bulk Nanostructured Aluminum-Graphene Composites Prepared Via Cryomilling", *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 626, pp. 400-405, 2015.
- [24] Rashad. M, Pan. F, Tang. A, Asif. M., "Effect of Graphene Nanoplatelets Addition on Mechanical Properties of Pure Aluminum Using a Semi-Powder Method", *Journal of Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 24, No. 2, pp. 101-108, 2014.
- [25] Shin. S. E, Choi. H. J, Shin. J. H, Bae. D. H., "Strengthening Behavior of Few-Layered Graphene/Aluminum Composites", *Journal of Carbon*, Vol. 82, No. 63, pp. 143-151, 2015.
- [26] Li. Z, Fan. G, Tan. Z, Guo. Q, Xiong. D, Su. Y, Li. Z. Q, Zhang. D., "Uniform Dispersion of Graphene Oxide in Aluminum Powder by Direct Electrostatic Adsorption for Fabrication of Graphene/Aluminum Composites", *Journal of Nanotechnology*, Vol. 25, No. 32, pp. 325-601, 2014.
- [27] Wang. J, Li. Z, Fan. G, Pan. H, Chen. Z, Zhang. D., "Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix Composites", *Journal of Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 8, pp. 594-597, 2012.
- [27] Wang. J, Li. Z, Fan. G, Pan. H, Chen. Z, Zhang. D., "Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix Composites", *Journal of Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 8, pp. 594-597, 2012.
- [28] Hedayatian, M. Vahedi, Kh. Nezamabadi, A.R. and Momeni, A., "Effect of Graphene Oxide Reinforcement on the Ballistic Properties of Al6061-GO Nanocomposites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No.3, pp. 401-410, 2019.
- [29] Wenzhen. L, Shiyang. L, Qiongyuan. Z, Xue. Z., "Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Journal of Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 990-993, 2010.
- [30] Aybarc. U, Yavuz. H, Dispinar. D, et al., "The Use of Stirring Methods for the Production of SiC-Reinforced Aluminum Matrix Composite and Validation Via Simulation Studies", *International Journal of Metalcasting*, Vol. 13, pp. 190-200, 2019.

- [47] Y. Mei, P. Shao, M. Sun and et al., "Deformation Treatment and Microstructure of Graphene-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites: A review of Graphene Post-Dispersion", *Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 27, No. 7, pp. 888, 2020.
- [48] Jiang. Y.Y, Tan. Z.Q, Xu. R, Fan. G.L, Xiong. D.B, Guo. Q, Su. Y.S, Li. Z.Q, Zhang. D, "Tailoring the Structure and Mechanical Properties of Graphene Nanosheet/Aluminum Composites by Flake Powder Metallurgy Via Shift-Speed Ball Milling", *Journal of Composites Part A*, Vol. 111, pp. 73, 2018.
- [49] Shin. S.E, Bae. D.H., "Deformation Behavior of Aluminum Alloy Matrix Composites Reinforced with Few-Layer Graphene", *Journal of Composites Part A*, Vol. 78, p. 42, 2015.
- [50] Zhao. P.Z, Yang. W.S, Zhang. Q, Tan. X, Xiu. Z.Y, Qiao. J, Yu. Z.H and Wu. G.H, "Microstructure and Tensile Properties of 5083 Al Matrix Composites Reinforced with Graphene Oxide and Graphene Nanoplates Prepared by Pressure Infiltration Method", *Journal of Composites Part A*, Vol. 109, pp. 151, 2018.
- [51] Dieter. G.E., "Mechanical Metallurgy", Third Edition, Drexel Institute of Technology. Philadelphia, Publisher: McGraw-Hill Education, pp. 111-135, 1976.
- [52] Can Şenel. M, Gürbüz. M, Koç. E., "Effect of Graphene Content on Tensile Strength and Microstructure of Aluminum Matrix Composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 6, No. 3, pp. 79–84, 2018.
- [53] Tsoukleri. G, Parthenios. J, Papagelis. K, Jalil. R, Ferrari. A.C, Geim. A.K, Novoselov. K.S, Galotis. C., "Subjecting a Graphene Monolayer to Tension and Compression", Vol. 5, No. 21, pp. 2397–2402, 2009.



تحلیل آماری - تجربی اثر پارامترهای ساخت بر استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری

احمد فدویان¹، علی داور^{2*}، محسن حیدری بنی³، جعفر اسکندری جم⁴

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

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

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/04/15

پذیرش: 1400/08/16

کلیدواژگان

تحلیل آماری - تجربی، استوانه مشبک کامپوزیتی، بار محوری فشاری، پارامترهای ساخت

چکیده

هدف از این پژوهش، دستیابی به حداکثر بار قابل تحمل در بارگذاری محوری فشاری برای یک سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با هندسه مشخص به روش تجربی- آماری است. پس از مطالعه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی فاکتورهای ساخت سازه‌های تولید شده با فرایند رشته پیچی و همچنین امکانات موجود، اثر چهار فاکتور کشش الیاف، سرعت پیچش، شرایط پخت و نوع الیاف بر کیفیت ساخت و استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی بررسی شد. برای این منظور، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، اثر فاکتورهای ساخت مذکور در سه سطح و بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل آن‌ها بر متغیر پاسخ، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس روش تاگوچی، 9 نمونه ساخته و تحت آزمون قرار داده شده‌اند و نتایج حاصل از آزمون‌ها، با استفاده از تحلیل واریانس مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا میزان تأثیرگذاری فاکتورهای ساخت بر متغیرهای پاسخ، مشخص شود. دو متغیر پاسخ شامل حداکثر بار تحمل شده و ویژه و کارایی فشاری در نظر گرفته شده‌اند. فاکتورهای نوع الیاف با 88.23٪ و کشش الیاف 9.98٪ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده و ویژه داشته‌اند و اثر دو فاکتور سرعت پیچش با 0.70٪ و شرایط پخت با 0.30٪ قابل صرف‌نظر بوده است. فاکتورهای نوع الیاف با 54.20٪، کشش الیاف با 23.54٪ و سرعت پیچش با 14.86٪، به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل بر روی متغیر پاسخ کارایی فشاری بوده‌اند و اثر فاکتور شرایط پخت با 1.85٪ قابل صرف‌نظر بوده است. بهینه‌سازی شرایط ساخت، بر اساس متغیر کارایی فشاری صورت گرفته است.

Statistical-experimental analysis of the effect of fabrication parameters on the strength of composite grid-stiffened cylinders under compressive axial load

Ahmad Fadavian¹, Ali Davar^{2*}, Mohsen Heydari Beni³, Jafar Eskandari Jam⁴

- 1- Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.
- 2- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.
- 3- Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.
- 4- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.

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

Keywords

Statistical analysis, experimental analysis, composite lattice cylinder, compressive axial load

Abstract

The aim of this study is to attain the maximum carried-load under compressive axial loading for a composite lattice cylindrical structure with a specified geometry by an experimental-statistical method. For this purpose, after studying the research in the field of fabrication factors of structures manufactured by filament winding process and also available facilities, the influence of four fabrication factors including fiber (roving) tension, winding speed, cure cycle and fiber type on the product quality and strength of the composite lattice cylinders has been investigated. For this purpose, design of experiment (DOE) with Taguchi method has been applied to investigate the effect of fabrication factors on the response variables in three levels without considering their interactions. According to Taguchi method, nine structures have been manufactured and tested and the results of the test have been analyzed using analysis of variance to determine the influence of the fabrication factors on the response variables. Two response variables including specific maximum carried-load and compressive efficiency have been considered. The results have shown that fiber type with 88.23% and fiber tension with 9.98% have greater influence, respectively, on the specific maximum carried-load while the effect of winding speed with 0.7% and cure cycle with 0.3% are negligible. In addition, the results illustrated that fiber type with 54.20%, fiber tension with 23.54% and winding speed with 14.86% have greater influence, respectively, on the compressive efficiency while the effect of cure cycle with 1.85% is negligible.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Fadavian, A., Davar, A., Heydari Beni, M., Eskandari Jam, J., "Statistical-experimental analysis of the effect of fabrication parameters on the strength of composite grid-stiffened cylinders under compressive axial load", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1543-1555, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.531397.1729>

1- مقدمه

امروزه با توجه به رشد روزافزون رقابت در صنایع مختلف، مقوله‌ی کیفیت جزء لاینفک شاخصه‌های کلیدی در محصولات تولیدی به حساب می‌آید. یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت محصول، استفاده از موادی با قابلیت‌های بهبود یافته است. از این رو، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان جایگزینی برای مواد پیشین مطرح شده است. کاربرد کامپوزیت‌ها، به عنوان موادی نوین با ویژگی‌هایی برتر در خواص مکانیکی، فیزیکی، الکتریکی، وزن و هزینه به شدت افزایش یافته است. این مواد شامل دو قسمت اصلی می‌باشند: (الف) ماده زمینه که دارای انواع پلیمری، فلزی و سرامیکی هستند، (ب) ماده تقویت کننده که به صورت الیاف بلند، الیاف کوتاه و ذرات می‌باشند. اکثر کامپوزیت‌ها زمینه پلیمری هستند [1].

در سازه‌های کامپوزیتی، فرآیند ساخت و پارامترهای آن به شدت بر رفتار مکانیکی تأثیر می‌گذارد. برای مثال، کشش الیاف و یا سرعت پیچش در فرآیند پیچش تر، بر مقدار رزین و حفره¹ (حباب‌های هوا) تأثیر می‌گذارد و در نتیجه برای استحکام سازه‌های ساخته شده با این روش، عاملی تعیین کننده هستند.

توتارو و دی نیکولا² [2] در پژوهشی به طراحی بهینه استوانه مشبک کامپوزیتی برای جرم کمینه تحت قیود استحکام و سفتی پرداخته‌اند. برای ساخت این سازه، از روش جایگذاری الیاف با بازوی روباتیک روی قلب سیلیکونی بهره گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن است که نمونه‌ی ساخته شده در مقایسه با نمونه‌ی معیار آلومینیومی، حدود 40 درصد کاهش وزن داشته است.

مازومدار و هوا³ [3] برای انجام حداقل آزمایش‌ها به منظور بررسی شرایط فرآیند ساخت (نوارپیچی) حلقه‌های کامپوزیتی از جنس کربن- پلی‌اترترکتون⁴، از روش کنترل کیفیت تاگوچی بهره برده‌اند. در این آزمایش‌ها، تأثیر سه عامل توان لیزر، سرعت پیچش و فشار مستحکم شدن⁵ بر استحکام اتصال بین لایه‌ها بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری به روش تحلیل واریانس نشان دهنده‌ی این است که توان لیزر بیشترین تأثیر را بر استحکام اتصال بین لایه‌ها داشته و فشار مستحکم شدن نیز قابل صرف نظر کردن بوده است. همچنین مشخص شد که سرعت پیچش رابطه‌ای غیرخطی با متغیر پاسخ (استحکام اتصال بین لایه‌ای) دارد.

کوهن⁶ و همکاران [4] با استفاده از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل جزئی⁷ به بررسی اثر متغیرهای فرایند پیچش تر بر کیفیت، استحکام و سفتی مخازن کامپوزیتی تحت فشار پرداخته‌اند.

لوسی⁸ و همکاران [5] در پژوهشی با استفاده از رویکرد طراحی آزمایش‌ها با روش تاگوچی، به بررسی اثر پارامترهای ساخت که در چهار گروه الیاف، رزین، فرآیند و طراحی دسته‌بندی شده‌اند، بر آغشته‌سازی دسته الیاف و کیفیت نهایی لوله‌های کامپوزیتی پرداخته‌اند. 19 متغیر قابل کنترل و 10 متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است که سه متغیر پاسخ کسر حجمی الیاف، حفره‌ها و استحکام برشی بین لایه‌ای از بقیه‌ی مهم‌تر هستند. استحکام برشی بین لایه‌ای شاخصی برای اندازه‌گیری استحکام پیوند بین زمینه و الیاف است. سه عامل شامل تنظیم کننده‌ی میزان رزین⁹، دمای حمام رزین و مقدار

شتاب‌دهنده‌ی افزوده شده، به آسانی کسر حجمی الیاف را تغییر می‌دهند. همچنین، کسر حجمی الیاف به شدت از زاویه‌ی پیچش تأثیر می‌پذیرد. خلیلی و جهانمهر [6] در تحقیقی تجربی، پارامترهای مؤثر فرآیند رشته‌پیچی تر را برای ساخت مخازن تحت فشار کامپوزیتی شناسایی کرده و از بین آن‌ها پارامترهای کشش الیاف، دمای رزین، سرعت پیچش و سیکل پخت را برای تحلیل انتخاب کرده‌اند. با استفاده از روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها، اثر هر یک از این پارامترها بر درصد رزین و الیاف، فشار تخریب و افزایش شعاع استوانه‌ای بررسی شده است. دمای رزین، سرعت پیچش و کشش الیاف به ترتیب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر روی درصد الیاف می‌باشند. دوبرزانسکی¹⁰ و همکاران [7] از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوچی برای بررسی پارامترهای کنترلی در فرآیند ساخت (پیچش تر) لوله‌های کامپوزیتی شیشه - پلی پروپیلن (رزین گرمانرم) و تأثیر آن‌ها بر متغیرهای خروجی استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، اثر پارامترهای دمای الیاف، سرعت پیچش، تعداد لایه‌ها و تعداد دسته الیاف بر استحکام کششی و استحکام برشی بررسی شده‌اند. نتیجه‌ی تحلیل‌های آماری نشان دهنده‌ی بیشترین تأثیرپذیری استحکام کششی و استحکام برشی از دمای الیاف است.

گوناسگار¹¹ و همکاران [8] با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های مقاوم تاگوچی به بررسی اثر پارامترهای فرآیندی بر خواص مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی پرداخته‌اند. آن‌ها اثر چهار متغیر زاویه پیچش، درصد وزنی ذرات سیلیکا، اندازه ذرات سیلیکا و کشش الیاف را بر سه متغیر پاسخ استحکام کششی محوری، استحکام کششی محیطی و سفتی لوله بررسی کرده‌اند. اندازه ذرات سیلیکا بیشترین اثر را روی استحکام کششی محوری داشته است. کوپکی¹² و همکاران [9] مطالعه تعیین تأثیر استفاده از تقویت کننده‌های ایزوگرید بر توزیع تنش و جابجایی پوسته استوانه‌ای جدار نازک ساخته شده از کامپوزیت‌های لایه‌ای در معرض بار پیچشی را ارائه کردند. این مطالعه شامل نتایج تحقیقات تجربی با استفاده از مدل‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی و نتایج تجزیه و تحلیل عددی به صورت غیر خطی است.

گرامی و همکاران [10] در پژوهشی برای آنالیز استوانه مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری، آنالیز استوانه مشبک کامپوزیتی تحت بار ضربه عرضی سقوط آزاد و مطالعه آسیب ناشی از آن، آنالیز اثر ضربه عرضی سقوط آزاد بر حداکثر استحکام سازه در بارگذاری محوری فشاری، از روش المان محدود و روش تجربی استفاده شده است.

تحقیقات پیشین در زمینه‌ی سازه‌های مشبک و همچنین درباره اثر فاکتورهای ساخت سازه‌های تولید شده با روش رشته‌پیچی بر استحکام آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. این بررسی نشان دهنده اهمیت اثر فاکتورهای ساخت بر استحکام سازه‌های کامپوزیتی است. اکثر تحقیقات انجام شده راجع به اثر فاکتورهای ساخت مخازن کامپوزیتی و لوله‌های کامپوزیتی با قطرهای متفاوت بوده است. عمدتاً بارگذاری در این نوع سازه‌ها به صورت فشار داخلی بوده است. لیکن راجع به اثر فاکتورهای ساخت بر استحکام و کماتش سازه‌های مشبک کامپوزیتی، تاکنون گزارشی توسط نگارندگان مشاهده نشده است. لذا در این پژوهش، به بررسی اثر فاکتورهای ساخت بر استحکام و

7 Fractional Factorial

8 Lossie

9 Doctor Blade Gap

10 Dobrzanski

11 Gunasegaran

12 Kopecki

1 Void

2 Totaro and De Nicola

3 Mazumdar and Hoa

4 Polyether ether ketone

5 Consolidation

6 Cohen

کمانش استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری فشاری پرداخته شده است.

در این پژوهش، هدف بر این است تا با روش طراحی آزمایش‌ها که یکی از ابزارهای کنترل کیفیت است، عوامل مهم ساخت که بر استحکام کمانشی سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی تأثیرگذار هستند، شناسایی شوند. همچنین با تحلیل آماری، شدت تأثیر آن‌ها مشخص و مقادیر بهینه تعیین شوند. درواقع دستاورد این پژوهش، بهینه‌سازی فرآیند ساخت برای بالا بردن ظرفیت باربری این نوع از سازه‌های کامپوزیتی است.

2- روش پژوهش

روش تحقیق در این پژوهش، روش طراحی آزمایش‌ها و طراحی و ساخت سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی است. ابتدا اصول تحلیل آماری روش طراحی آزمایش‌ها تبیین شده است. در بخش بعدی، مراحل ساخت سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی شامل مدل‌سازی و تهیه‌ی نقشه ساخت برای قالب، نحوه‌ی رشته پیچی و پخت سازه تشریح شده است. در بخش آخر تحلیل فاکتورهای ساخت در نظر گرفته شده در این پژوهش بررسی شده است.

2-1- طراحی و ساخت سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی

معمولاً سازه‌های مشبک، شکلی به صورت پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی دارند که شامل ریب‌های مارپیچ و محیطی هستند. چنین سیستمی از ریب‌ها باعث ایجاد مقاومت بالای سازه‌های مشبک در برابر کمانش تحت بار محوری فشاری می‌شود. مقادیر بار کمانش تجربی برای اکثر پوسته‌های استوانه‌ای معمولاً خیلی کمتر از مقادیر تئوری هستند. دلیل آن نیز وجود عیوب شکلی¹ پوسته است که اندازه‌گیری و کنترل آن‌ها مشکل است [11]. در مقابل پوسته‌های تقویت‌شده، سازه‌های مشبک پایداری شکلی² (خود پایداری) تحت بارگذاری از خود نشان می‌دهند. فشار محوری ریب‌های مارپیچ سبب ایجاد کشش در ریب‌های محیطی می‌شود و سطح مقطع پوسته حتی اگر دارای عیوب اولیه باشد، دایروی باقی می‌ماند، بنابراین بار کمانش تجربی نزدیک به نتایج تئوری می‌شود و نیازی به ضرایب کاهش‌دهنده³ (تصحیح کننده) برای استفاده در طراحی و تحلیل سازه‌های مشبک نیست [11].

مراحل ساخت سازه‌ی موردنظر بدین ترتیب است که ابتدا طرح دوبعدی سازه مشبک از برنامه استخراج شده و به کمک دستگاه برش لیزر یک قالب نری از جنس پلکسی‌گلس ساخته شد، سپس به‌وسیله قالب نری قالب سیلیکونی ساخته شده است. قالب سیلیکونی بر روی مندرل استوانه‌ای نصب گردیده و با استفاده از دستگاه رشته‌پیچی تمام‌خودکار، الیاف درون شیارهای قالب سیلیکونی رشته‌پیچی شده تا سازه مشبک شکل بگیرد.

2-1-1 مواد و ترکیبات

برای ساخت استوانه مشبک از سه نوع الیاف شیشه، کربن و آرامید استفاده شده است. رزین مورد استفاده معادل رزین اپوکسی و سخت‌کننده و شتاب‌دهنده می‌باشد و به نسبت 100، 90، 1 طبق دستور سازنده مخلوط شده‌اند. در جدول 1 نوع الیاف و رزین به کار رفته ارائه شده است. در جدول 2 خواص مکانیکی الیاف و رزین مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول 1 مشخصات الیاف و رزین

Table 1 Specifications of fibers and resins

پارامتر	سازنده	مشخصه
رزین	Huntsman	Araldite LY556 (100)
هاردنر	Huntsman	Aradur HY917 (90)
شتاب‌دهنده	Huntsman	DY070 (1)
الیاف کربن	Interglas	Carbon Fabric T300 50K
الیاف شیشه	Silenka	S Glass tex 2400
الیاف آرامید	Twaron	Aramid 805 tex

جدول 2 خواص مکانیکی الیاف و رزین

Table 2 Mechanical properties of fibers and resin

مواد	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (MPa)
آرامید	1400	99	2930
شیشه	2400	52	1204
کربن	1700	230	3500
اپوکسی	1100	3.1	83

2-1-2 مدل‌سازی قالب سازه

ابتدا سازه استوانه‌ای با ارتفاع و قطر موردنظر طراحی شده است. سپس پارامترهای هندسی شبکه شامل زاویه‌ی ریب‌های مارپیچ، تعداد جفت ریب‌های مارپیچ، تعداد ریب‌های محیطی، فواصل بین ریب‌ها و عرض و ارتفاع ریب‌ها محاسبه شده‌اند. در نهایت، مدل‌سازی قالب نری سازه انجام شده است. در جدول 3 ابعاد سازه و پارامترهای هندسی شبکه آورده شده است.

جدول 3 ابعاد سازه و پارامترهای هندسی شبکه

Table 3 Structural dimensions and geometric parameters of the grid

H	b _c	b _n	a _c	a _n	φ	D	L
4mm	5mm	5mm	60mm	52.78mm	26°	280mm	300mm

برای مدل‌سازی از نرم‌افزار طراحی- مهندسی کتیا⁴ استفاده شده است. در محیط پارت دیزاین⁵ (مدل‌سازی احجام توپر⁶) و محیط جنریتو شیپ دیزاین⁷ (مدل‌سازی سطوح⁸) سازه به دو صورت سه‌بعدی و گسترش یافته مدل شده‌اند. در این حالت مدل‌سازی فقط در محیط پارت دیزاین انجام شده است.

برای ساخت قالب نری، از ورق پلکسی‌گلس⁹ استفاده شده است که با دستگاه برش لیزری، طرح شبکه‌ی مذکور در آن ایجاد شده است. برای این کار، فرمت فایل نقشه کتیا به فرمت نرم‌افزار کرل دراو¹⁰ تبدیل شده است تا برای دستگاه برش قابل خواندن باشد. در شکل 1، نمایی از ورق پلکسی‌گلس در حال برش نشان داده شده است.

⁶ Solid

⁷ Generative Shape Design

⁸ Surface

⁹ Plaxiglass

¹⁰ Corel Draw

¹ Shape Imperfections

² Stiffened Shell

³ Knock-Down

⁴ CATIA

⁵ Part Design

پخت) استفاده گردید. بعد از رشته‌پیچی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی روی مندرل فومی، برای پخت، سازه درون اتوکلاو قرار گرفته است. در شکل 4 نمای از اتوکلاو نشان داده شده است. برای پخت سازه در اتوکلاو یک مکانیزم چرخان (برای جلوگیری از شره کردن رزین در حین پخت به دلیل کاهش میزان گرانشی) طراحی و ساخته شد، بدین ترتیب کل سیستم در حین پخت دوران می‌کند تا از تجمع رزین در قسمت پایینی سازه و کم رزین شدن بخش‌های بالایی تا حد ممکن جلوگیری شود. در شکل 5 سازه پخت شده از جنس شیشه-اپوکسی به همراه قالب سیلیکونی نشان داده شده است. در شکل 6 سه نوع سازه درون قالب سیلیکونی ارائه گردید. در شکل 7 تصاویر نمونه‌های ساخته شده آمده است.



Fig. 4 View of the mandrel on the rotating system and ready to cure

شکل 4 نمای از نحوه‌ی قرارگیری مندرل روی چهارپایه‌ها و آماده شدن برای پخت



Fig. 5 Composite lattice cylinder (glass-epoxy) wound into a silicone mold on a foam mandrel after curing and before separation from the mold

شکل 5 استوانه مشبک کامپوزیتی (شیشه-اپوکسی) رشته‌پیچی شده درون قالب سیلیکونی روی مندرل فومی بعد از پخت و قبل از جدایش از قالب

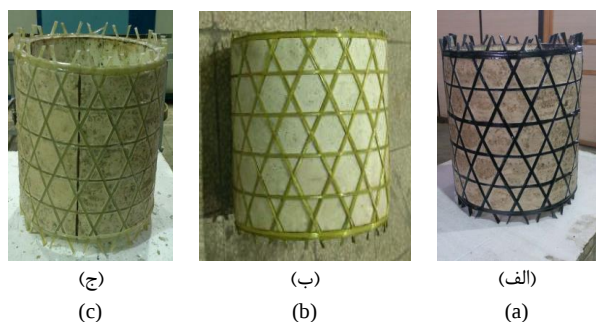


Fig. 6 Structures inside silicone mold (a) carbon-epoxy, (b) aramid-epoxy and (c) glass-epoxy

شکل 6 سازه درون قالب سیلیکونی (الف) کربن-اپوکسی، (ب) آرامید-اپوکسی و (ج) شیشه-اپوکسی

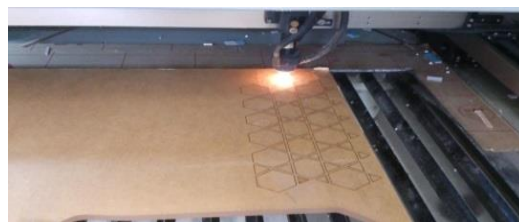


Fig. 1 Cutting process of Plexiglass by laser

شکل 1 ورق پلکسی‌گلس در حال برش با لیزر

بعد از ساخت قالب نری به روش ذکر شده، از لاستیک سیلیکون قالب‌گیری برای ساخت قالب مادگی استفاده شده است. در شکل 2، قالب نری که بین چهار جداره‌ی شیشه‌ای برای قالب‌گیری و ریختن سیلیکون محصور شده است، مشاهده می‌شود. همچنین برای جدایش راحت‌تر سیلیکون از قالب پلکسی‌گلس، یک لایه تفلون نفوذ ناپذیر در زیر آن قرار گرفته است.



Fig. 2 Male mold placed on a layer of Teflon surrounded by four glass walls

شکل 2 قالب نری واقع بر یک لایه تفلون که پیرامون آن با چهار جداره‌ی شیشه‌ای محصور شده است

3-1-2- نوشتن کد پیچش

برای رشته‌پیچی درون شیارهای قالب ساخته شده، کد پیچش نوشته شده است. این کد براساس قطر استوانه، زاویه‌ی ریب‌های مارپیچ و محل قرارگیری میله‌های نگهدارنده که وظیفه‌ی نگه داشتن باند الیاف در حین رشته‌پیچی را دارند، نوشته می‌شود.

در ادامه برای بررسی صحت و دقت کد نرم‌افزاری نوشته شده جهت رشته‌پیچی درون شیارها، ابتدا با نخ نایلونی چند بار پیچش انجام شده است. در شکل 3، نمای از نحوه‌ی قرار گرفتن نخ اشاره شده درون شیارها نشان داده شده است.



Fig. 3 Twist with nylon yarn to test the twist code

شکل 3 پیچش با نخ نایلونی برای امتحان کردن کد پیچش

4-1-2- پخت سازه‌ها

شرایط پخت (دما و زمان) اصولاً طبق دستورالعمل شرکت سازنده‌ی رزین در نظر گرفته می‌شود، اما در دستورالعمل نیز محدوده‌ای پیشنهاد می‌شود که مبنای انتخاب هر محدوده برحسب ابعاد و ضخامت قطعه‌ی کامپوزیتی تعیین می‌شود. در این پژوهش دمای پخت در محدوده پیشنهاد شده شرکت سازنده انتخاب شده است. برای بالا بردن سرعت فرآیند پخت نهایی و یا برای اطمینان از تکمیل پیوندهای عرضی، از یک دمای پخت بالاتر از دمای پخت اولیه (پس

بوده و در هر ثانیه 90 داده را ثبت کرده است. در شکل 9 نمایی از آماده‌سازی دستگاه برای انجام آزمون نشان داده شده است.

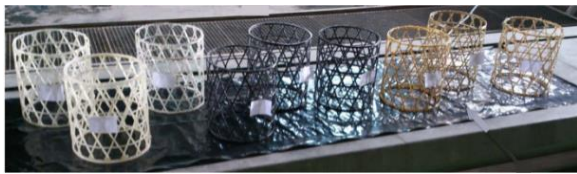


Fig. 7 Fabricated samples according to the experiments design table

شکل 7 نمونه ساخته شده طبق جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها

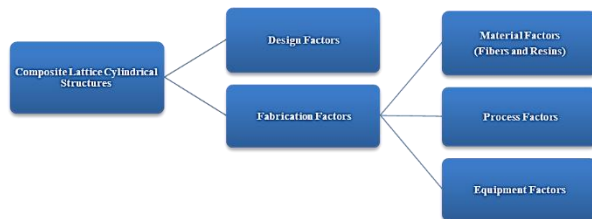


Fig. 8 Classification of factors in composite grid-stiffened cylinders

شکل 8 دسته‌بندی فاکتورها در سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی

جدول 4 جدول فاکتورهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها

Table 4 Table of factors under consideration and their levels

فاکتور	سطح 1	سطح 2	سطح 3
کشش الیاف	10 N	15 N	20 N
سرعت پیچش	2 rpm	4 rpm	6 rpm
شرایط پخت	4 hr @ 80 C + 4 hr @ 120 C	4 hr @ 80 C + 3 hr @ 140 C	4 hr @ 80 C + 2 hr @ 160 C
نوع الیاف	آرامید	شیشه	کربن

جدول 5 جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها (آرایه‌ی متعامد³ L9)

Table 5 Experiments design table (orthogonal array L9)

شماره‌ی آزمایش	کشش الیاف	سرعت پیچش	شرایط پخت	نوع الیاف
1	(10N)**1	(2rpm)1	4 hr @ 80 ⁰ C + 4 hr @ 120 ⁰ C	1 (آرامید)
2	(10N)1	(4rpm)2	4 hr @ 80 ⁰ C + 3 hr @ 140 ⁰ C	2 (شیشه)
3	(10N)1	(6rpm)3	4 hr @ 80 ⁰ C + 2 hr @ 160 ⁰ C	3 (کربن)
4	(15N)2	(2rpm)1	4 hr @ 80 ⁰ C + 3 hr @ 140 ⁰ C	3 (کربن)
5	(15N)2	(4rpm)2	4 hr @ 80 ⁰ C + 2 hr @ 160 ⁰ C	1 (آرامید)
6	(15N)2	(6rpm)3	4 hr @ 80 ⁰ C + 4 hr @ 120 ⁰ C	2 (شیشه)
7	(20N)3	(2rpm)1	4 hr @ 80 ⁰ C + 2 hr @ 160 ⁰ C	2 (شیشه)
8	(20N)3	(4rpm)2	4 hr @ 80 ⁰ C + 4 hr @ 120 ⁰ C	3 (کربن)
9	(20N)3	(6rpm)3	4 hr @ 80 ⁰ C + 3 hr @ 140 ⁰ C	1 (آرامید)

* شماره سطح فاکتور

** مقدار کمی سطح فاکتور

2-1-5- دسته‌بندی فاکتورها

هدف عمده در فرآیند ساخت، فراهم کردن کیفیت و خواص مکانیکی مناسب ریب‌های مارپیچ است که به‌عنوان اجزای اصلی در باربری سازه‌ی مشبک استوانه‌ای عمل می‌کنند. خواص مکانیکی نیز به‌شدت از روش ساخت و فاکتورهای مرتبط با آن تأثیر می‌پذیرند و بررسی و کنترل آن‌ها برای تولید سازه‌ای با کیفیت بالا و کمترین عیوب، ضروری است. در ادامه به دسته‌بندی فاکتورهای طراحی و ساخت سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی پرداخته شده است (شکل 8).

2-1-6- انتخاب فاکتورها

در فرآیند ساخت، تعدادی از فاکتورها هستند که توسط اپراتور قابل انتخاب، پایش و کنترل هستند که به آن‌ها فاکتورهای اولیه گفته می‌شود. در مقابل تعدادی از فاکتورها هستند که به‌طور مستقیم توسط اپراتور قابل کنترل نیستند و به آن‌ها فاکتورهای ثانویه گفته می‌شود. برای مثال، نسبت اختلاط سیستم رزین و دمای حمام رزین بر گرانیوی رزین مؤثر هستند. گرانیوی و عمر مفید¹ دو فاکتور اصلی در انتخاب رزین برای فرآیند پیچش به شمار می‌روند. اگر مقدار گرانیوی رزین بسیار پایین باشد، باید کشش زیاد در پیچش اعمال کرد تا کسر حجمی الیاف بالا رود و اگر گرانیوی بسیار بالا باشد، قطعه پخت شده دارای حفره زیادی خواهد بود [12]. همچنین، کشش الیاف و نحوه‌ی آغشته‌سازی (نوع حمام رزین) بر ضخامت لایه‌ها و عرض باند الیاف تأثیر می‌گذارند. اثرات متقابل فاکتورهای ساخت، به‌خصوص در پیچش تر، مهم و پیچیده هستند. اثر فاکتورهای مذکور را می‌توان بر خواص فیزیکی مانند کسر حجمی الیاف و رزین، میزان حفره، وزن سازه، استحکام و سفتی بررسی کرد و با بهینه کردن شرایط فاکتورها، این خواص را بهبود داد.

با توجه به توضیحات ذکر شده و هزینه و امکانات موجود، چهار فاکتور در سه سطح برای بررسی و بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و هر کدام به‌صورت مجزا بررسی شده‌اند. در جدول 4 فاکتورها و سطوح آن‌ها ذکر شده‌اند. شرایط ساخت هر سازه که طبق روش تاگوشی طراحی شده، در جدول 5 آورده شده است.

در انتها باید ذکر کرد که به‌خاطر وزن دوک الیاف شیشه که موجب ایجاد کشش 8 نیوتونی می‌شد و الیاف کربن که در 27 نیوتون رشته‌رفته می‌شد، محدودی 10 تا 20 نیوتون برای کشش الیاف در نظر گرفته شده است. برای فاکتور سرعت پیچش نیز حداقل سرعت دستگاه 2rpm، و حداکثر سرعتی که باند الیاف با دقت و به‌طور صحیح داخل شیارهای قالب قرار می‌گرفتند 6rpm بوده است. برای فاکتور شرایط پخت، با توجه به ضخامت و ابعاد سازه، حداقل زمان برای دماهای پیشنهادی در دستورالعمل پخت رزین در نظر گرفته شد.

3- نتایج و بررسی

3-1- شرح نحوه‌ی انجام آزمون کمانش تحت بار محوری فشاری

همانند سازه‌های کامپوزیتی سنتی، تخمین ظرفیت باربری و فرآیند واماندگی یک امر حیاتی در طراحی و به‌کارگیری سازه‌های مشبک است. در این پروژه برای انجام تمامی آزمون‌ها از دستگاه آزمون سنتام² به کد STM-150 با ظرفیت 15 تن استفاده شده است. سازه‌ها بین دو صفحه‌ی صلب فلزی (به ابعاد 50 در 50 سانتی‌متر و ضخامت 2 سانتی‌متر) قرار داده شده‌اند و بار محوری فشاری توسط فک هیدرولیکی در جهت قائم، اعمال شده است. آزمون‌ها در دمای محیط و با نرخ بارگذاری 0.5 میلی‌متر بر دقیقه (به دلیل شبه استاتیکی بودن آزمون) انجام شده‌اند. داده‌بردار دستگاه از نوع الکترونیکی

¹ Pot Life

² SANTAM

³ Orthogonal array

است. در این نمونه، سرعت پیچش دارای بالاترین سطح و کشش الیاف در سطح متوسط بوده است. سرعت زیاد پیچش، فرصت آغشته‌سازی کافی را به الیاف نداده است. همچنین، قرارگیری نامطلوب الیاف روی لایه‌های قبلی، باعث کاهش کیفیت کامپوزیت شده است. اگر الیاف به‌طور مناسب به رزین آغشته نشوند، انتقال بار برشی به‌طور کامل بین الیاف و رزین انجام نمی‌شود. همچنین، امکان شکل‌گیری ترک‌ها بین رزین و الیاف بالا می‌رود. توزیع غیریکنواخت الیاف در رزین بر خواصی همچون استحکام و سفتی بسیار تأثیرگذار است [1].



Fig. 9 Overview of the test device and preparation of test conditions

شکل 9 نمای کلی از دستگاه آزمون و آماده‌سازی شرایط آزمون

Aramid-Epoxy Structures Comparison

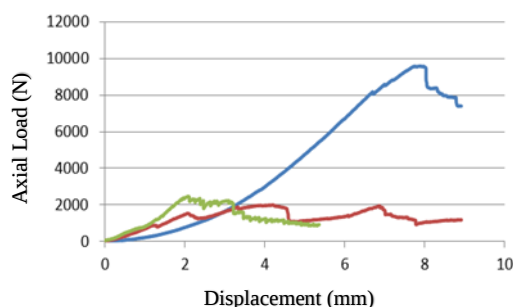


Fig. 10 Comparison of load - displacement diagrams of three aramid-epoxy structures

شکل 10 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی آرامید-اپوکسی

Glass-Epoxy Structures Comparison

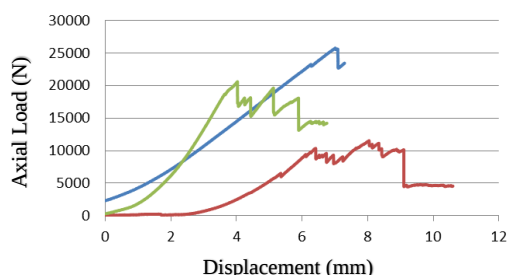


Fig. 11 Comparison of load - displacement diagrams of three glass-epoxy structures

شکل 11 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی شیشه-اپوکسی

در تحقیقات پیشین نیز اشاره شده است که افزایش سرعت پیچش، میزان حفره‌ها را افزایش می‌دهد که این مورد سبب کاهش استحکام کامپوزیت و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری سازه می‌شود [4، 6، 15]. حداکثر سرعت پیچش مجاز که برای هر نوع سازه متفاوت است، در استحکام کامپوزیت نقش عمده‌ای دارد. نمونه شماره 1 و 3 شکل 11 دارای بیشترین باربری نسبت به نمونه شماره 2 می‌باشند. نمونه شماره 1 نشان می‌دهد که اعمال سرعت پیچش متوسط به همراه پایین‌ترین سطح کشش موجب افزایش باربری سازه می‌شود. در نمونه شماره 3 با وجود اعمال کمترین سرعت پیچش که آغشته‌سازی مناسب الیاف را به همراه دارد اما به دلیل چقرمگی متوسط الیاف شیشه، اعمال حداکثر کشش موجب کم‌رین شدن بین لایه‌های الیاف شده و بار نهایی کمتری نسبت به نمونه شماره 1 متحمل شده است. یکی دیگر از دلایل باربری بیشتر نمونه شماره 1 نسبت به نمونه شماره

باید به این نکته اشاره کرد که قبل از انجام آزمون باید تراز بودن صفحات فلزی چک شود. در این پروژه، این شاخص با ابزار تراز سنجیده شده است. همچنین، تراز دو سطح بالا و پایین سازه و عدم بیضی‌گون شدن¹ استوانه نیز باید چک شوند. بعد از برش دو سطح بالا و پایین سازه، هر دو سطح با ابزار تراز چک شده‌اند و همچنین قطر داخلی استوانه نیز با ابزار کولیس اندازه‌گیری شده‌اند. موارد ذکر شده بر انتقال یکنواخت بار بر سازه‌ها و در نتیجه نتایج آزمون‌ها می‌توانند تأثیرگذار باشند.

2-3- مقایسه‌ی نتایج آزمون‌ها

در این بخش، نمودارهای بار-جابجایی نمونه‌های هم‌جنس به‌صورت یکجا، نمودار مقایسه‌ی درصد تغییر طول نسبی سازه‌ها در حداکثر بار و نمودار مقایسه‌ی جرم آن‌ها آورده شده است. در شکل 10 به مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی آرامید-اپوکسی پرداخته شده است.

همان‌طور که از شکل 10 قابل مشاهده است، باربری سازه‌ها در نمونه‌های دوم و سوم آرامید-اپوکسی (شماره پنج و نه جدول 3) به‌شدت کاهش پیدا کرده است. دلیل آن به دو فاکتور فرآیندی سرعت پیچش الیاف و دمای پخت برمی‌گردد، با افزایش سرعت پیچش، میزان آغشته‌سازی الیاف به رزین کاهش داشته است. در محل‌هایی که الیاف به‌طور مناسب آغشته نمی‌شوند، ترک‌ها ظاهر می‌شوند و رشد می‌نمایند و واصلندگی زودرس اتفاق می‌افتد. روند کاهش میزان آغشته‌سازی موجب بالا رفتن بیش از حد کسر حجمی الیاف و متقابلاً پایین آمدن کسر حجمی رزین شده است که ظرفیت انتقال بار از زمینه به تقویت‌کننده را دچار کاهش می‌کند. زمینه، انتقال بار را از طریق استحکام برشی بین لایه‌ای فراهم می‌کند [13]. استحکام برشی بین لایه‌ای، شاخصی برای اندازه‌گیری استحکام پیوند بین رزین و الیاف است. چسبیدن آرامیدها به زمینه، به خوبی چسبیدن الیاف کربن یا شیشه به زمینه نیست. بنابراین، مقادیر استحکام برشی بین لایه‌ای آرامیدها کمتر است [14]. این مقادیر کم تا حدودی از مقاومت برشی نسبتاً کم خود الیاف نیز ناشی می‌شود [14]. همچنین، پخت در حرارت‌های بالاتر موجب ایجاد ریز ترک‌هایی در کامپوزیت می‌شود که این رخداد نیز میزان استحکام را کاهش داده است (هر دو نمونه تحت دمای پخت بالاتری نیز قرار گرفته‌اند) [13]. در نمونه شماره یک آرامید به دلیل استفاده از حداقل سرعت پیچش که آغشته‌سازی بهتر الیاف به رزین را به همراه دارد و همچنین دمای پخت کمتر که موجب ایجاد ترک‌های کمتر در زمان پخت، در سازه شده است، توانسته نیروی بیشتری را نسبت به دو نمونه دیگر متحمل شود. در شکل 11 نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی شیشه-اپوکسی آورده شده است.

همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، در بین نمونه‌های شیشه-اپوکسی، نمونه‌ی دوم (شماره‌ی شش جدول 3) دارای کمترین بار تحمل شده

¹ Ovality

بیشتری هستند. بخشی از این نتایج به چگالی الیاف (ترتیب چگالی: آرامید، کربن و شیشه از کم به زیاد [12]) برمی‌گردد و بخشی از آن به فاکتورهای فرآیندی کشش الیاف و سرعت پیچش مربوط می‌شود. لازم به ذکر است که فاکتورهای فرآیندی کشش الیاف و سرعت پیچش، میزان آغشته‌سازی الیاف را تحت تأثیر قرار می‌دهند که تأثیر مستقیم بر روی کسر حجمی الیاف نسبت به رزین در سازه دارد.

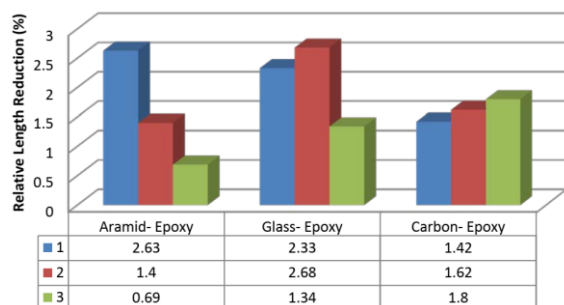


Fig. 13 Comparison diagram of the percentage reduction of relative length at maximum bearing load

شکل 13 نمودار مقایسه‌ی درصد کاهش طول نسبی در حداکثر بار تحمل شده

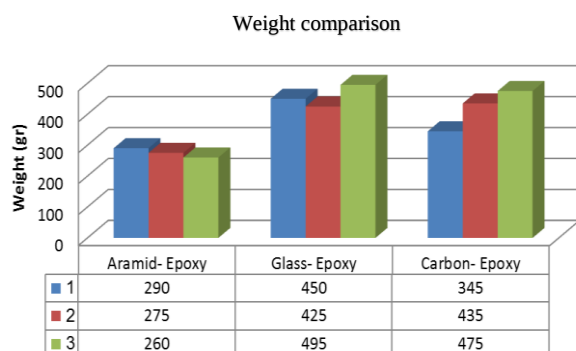


Fig. 14 Sample weight comparison chart

شکل 14 نمودار مقایسه‌ی جرم نمونه‌ها

در شکل 15 حداکثر بار تحمل شده توسط هر سازه مد نظر قرار گرفته است. همچنین در این شکل، درصد اختلاف بار تحمل شده توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده برای نمونه‌های هم‌جنس ذکر شده است. در این نمودار، نمونه‌ها به ترتیب از کم‌ترین تا بیشترین نتیجه‌ی به دست آمده برای هر نوع الیاف قرار گرفته‌اند.

برای محاسبه بار ویژه عموماً از تقسیم حداکثر بار بر چگالی سازه به دست می‌آید اما در این پژوهش به دلیل ثابت بودن حجم تمامی سازه‌ها، بار ویژه از تقسیم حداکثر بار اعمالی بر جرم سازه محاسبه شده است. در شکل 16 حداکثر بار تحمل شده ویژه مد نظر قرار گرفته است. همچنین در این شکل، درصد اختلاف بار تحمل شده‌ی ویژه توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده‌ی ویژه برای نمونه‌های هم‌جنس ذکر شده است. در این نمودار، نمونه‌ها به ترتیب از کم‌ترین تا بیشترین نتیجه‌ی به دست آمده برای هر نوع الیاف قرار گرفته‌اند.

از دو شکل 15 و 16 قابل مشاهده است که درصد اختلاف بار تحمل شده و بار تحمل شده‌ی ویژه، هر دو در نمونه‌های آرامید-اپوکسی در مقایسه با نمونه‌های شیشه-اپوکسی و کربن-اپوکسی (در این نمونه‌ها درصد اختلاف نسبتاً کمتر است) بسیار بیشتر است. این درصد اختلاف، تأثیر زیاد و مهم

3، کمتر بودن دمای پخت می‌باشد اما در ادامه نتیجه می‌شود که تأثیر دمای پخت بر روی استحکام سازه، بسیار کمتر از دو پارامتر کشش و سرعت پیچش الیاف، می‌باشد. شکل 12، نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی کربن-اپوکسی آورده شده است.

Carbon-Epoxy Structures Comparison

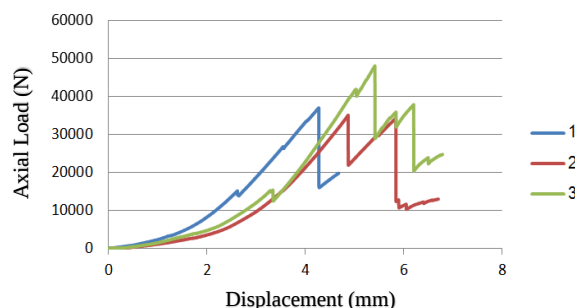


Fig. 12 Comparison of load-displacement diagrams of three carbon-epoxy structures

شکل 12 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی کربن-اپوکسی

نمونه‌های کربن-اپوکسی از نظر باربری در مقایسه با نمونه‌های شیشه-اپوکسی و آرامید-اپوکسی رفتار مشابه‌تری به هم دارند. نمونه‌ی سوم کربن-اپوکسی (شماره‌ی هشت جدول 3) که بار بیشتری را تحمل کرده است، در کمترین دما پخت شده است. این امر تنش‌های پس‌ملند کمتر در حین عمل‌آوری و در نتیجه ریزترک‌های کمتری را موجب شده است (از صداهای کمتری که در هنگام شکست ریزترک‌ها در حین آزمون شنیده شده است می‌توان به این وضعیت پی برد) که استحکام و باربری سازه را دچار کمترین کاهش کرده است. همچنین، در سازه‌هایی که با الیاف کربن تقویت شده‌اند، بهترین عملکرد تحت شرایط، کشش الیاف بیشتر و سرعت پیچش متوسط رخ داده که موجب افزایش تحمل بار سازه گردیدند. در الیاف کربن به علت ترد بودن الیاف، کشش الیاف بیشتر سازه‌ای یکپارچه‌تر و با حفره‌های کمتر تولید می‌شود.

در شکل 13، نمودار مقایسه‌ی بین درصد تغییر طول نسبی در حداکثر بار تحمل شده توسط سازه، به تفکیک نوع الیاف آورده شده است. دلیل اختلاف تغییر طول نسبی در سازه‌ها با الیاف تقویت‌کننده یکسان به اختلاف کسر حجمی الیاف و نوع پخت سازه برمی‌گردد و برای سازه‌ها با الیاف تقویت‌کننده متفاوت به استحکام متفاوت الیاف و ترد و چقرمه بودن الیاف برمی‌گردد (ترد بودن الیاف، ریب‌هایی یکپارچه‌تر و با حفره‌های کمتر را به همراه دارد). اختلاف شدید درصد تغییر طول نسبی نمونه شماره 1 با نمونه شماره 3 به دلیل کاهش شدید استحکام نمونه شماره 3 در فرایند ساخت می‌باشد که موجب فروپاشی سازه در جابه‌جایی کم شده است. در سازه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل بالا بودن مدول الاستیک سازه، شیب نمودار نیرو-جابجایی بیشتر از سازه‌های تقویت‌شده با الیاف دیگر بوده است، این نشان از تحمل باربری بیشتر این سازه‌ها در تغییر طول اندک، هنگام بارگذاری می‌باشد.

همان‌طور که از شکل 13 قابل مشاهده است، نمونه‌های کربن-اپوکسی و آرامید-اپوکسی نسبت به نمونه‌های شیشه-اپوکسی درصد کاهش طول نسبی کمتری داشته‌اند. در شکل 14، نمودار مقایسه‌ی جرم تمام نمونه‌ها به تفکیک نوع الیاف آورده شده است. از داده‌های به دست آمده مشهود است که سازه‌های آرامید-اپوکسی دارای جرم کمتر و سازه‌های شیشه-اپوکسی دارای جرم

2- ناهموازی ایجاد شده در سطوح بالا و پایین استوانه‌ها در اثر برش و یا ناهمتراز بودن صفحات فلزی که تعامد سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در نتیجه انتقال یکنواخت بار به سازه را در حین آزمون دچار اختلال می‌کنند.

3- به کارگیری انواع مختلف الیاف (علت محتمل می‌تواند ترد بودن الیاف کربن نسبت به شیشه و آرامید باشد که موجب می‌شود، الیاف به خوبی روی هم قرار گرفته و سازه‌ای همگن و یکپارچه تولید شود. همچنین چقرمه بودن و جذب رزین کمتر الیاف آرامید، موجب افزایش کسر حجمی الیاف شده که این امر کم رزین شدن الیاف و اتصال ناقص لایه‌ها را به همراه دارد).

جدول 6: مقایسه حالت‌های واماندگی در سطوح مختلف فاکتورها

Table 6: Comparison of failure modes at different levels of factors

حالت واماندگی				
حالت 1	حالت 2	حالت 3	حالت 4	فاکتور ساخت
شکست کششی عرضی	تورق یا جدایش بین لایه‌ای	کمانش ریب‌های مارپیچ محدود به گره‌های مجاور	شکست برشی ریب	
1	2-3	1	--	کشش الیاف:
2	4-5	--	4	
3	7-8-9	--	8	
1	6	8	1	سرعت پیچش:
2	--	4-2-9	4	
3	--	3-7-5	--	
1	6	8	1	شرایط پخت:
2	--	4-2-9	4	
3	--	3-7-5	--	
1	--	5-9	1	نوع الیاف:
2	6	2-7	--	
3	--	3-4-8	4-8	

3-3- تحلیل آماری نتایج و بهینه‌سازی ساخت

هدف از این پژوهش تجربی- آماری، تعیین اثر فاکتورهای ساخت بر عملکرد سازه‌ای و مشخص کردن بهترین شرایط ساخت برای این نوع از ساختارهای کامپوزیتی می‌باشد. برای این کار، از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی و نرم‌افزار کوآلی‌تک¹ استفاده شده است. در این پژوهش، چهار فاکتور در سه سطح به صورت مجزا تحت کنترل و بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل‌ها برای دو متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه (نسبت حداکثر بار تحمل شده به جرم سازه) و کارایی فشاری سازه (حداکثر بار تحمل شده به بار فشاری قابل تحمل هر ریب) انجام شده‌اند و در نهایت بهینه‌سازی براساس کارایی فشاری سازه صورت گرفته است.

3-3-1 تحلیل آماری

در جدول 7، طرح‌ریزی آزمایش‌ها (آرایه‌ی متعامد L9 تاگوچی) که سازه‌ها طبق آن ساخته و آزموده شده‌اند آورده شده است. در روش تاگوچی، برای چهار فاکتور در سه سطح، از تعداد کل 81 آزمایش ممکن، 9 آزمایش پیشنهاد می‌شود. باید متذکر شد که به دلیل منابع مالی محدود، برای هر حالت، یک نمونه ساخته و آزموده شده است. به همین دلیل تحلیل آماری داده‌ها با آنالیز استاندارد انجام شده است.

پارامترهای فرآیندی شامل کشش الیاف، سرعت پیچش و شرایط پخت بر باربری سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی، به خصوص سازه‌های آرامید-اپوکسی را نشان می‌دهد.

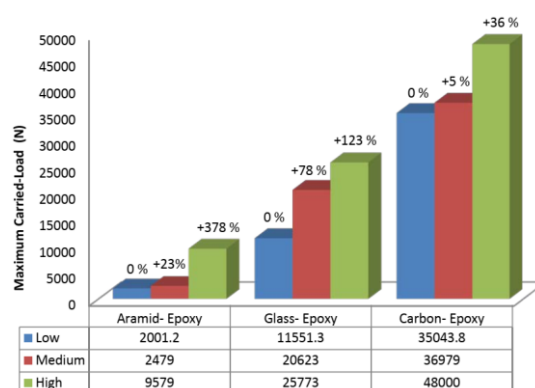


Fig. 15 Graph of the percentage difference of load bearing by structures compared to the minimum load bearing

شکل 15 نمودار درصد اختلاف بار تحمل شده توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده

Specific maximum carried-load comparison

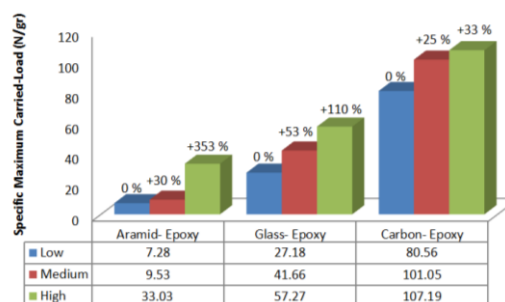


Fig. 16 Graph of the percentage difference of load bearing by structures compared to the minimum load bearing

شکل 16 نمودار درصد اختلاف بار تحمل شده توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده

در جدول 6، حالت‌های رخ داده در سطوح مختلف فاکتورها بر مبنای حالت‌های واماندگی طبقه‌بندی شده، دسته‌بندی شده‌اند. حالت واماندگی غالب در استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری، تورق بوده است. در ضمن باید اشاره کرد، اکثر واماندگی‌ها در حلقه‌های بالایی نزدیک محل اعمال بار رخ داده‌اند؛ زیرا در این نواحی، توزیع تنش یکنواخت نیست و تمرکز تنش به وجود می‌آید. حالت شکست کششی عرضی فقط در نمونه شش (شیشه-اپوکسی)، کمانش ریب‌های مارپیچ محدود به گره‌های مجاور فقط در نمونه یک (آرامید-اپوکسی) و شکست برشی ریب فقط در نمونه‌های چهار و هشت (کربن-اپوکسی) رخ داده است.

دلایل تغییر محل رخ دادن واماندگی و ایجاد حالت‌های مختلف واماندگی در استوانه‌ها می‌توانند موارد زیر باشند:

1- عدم تقارن ایجاد شده در سازه در حین ساخت (چرخش نامناسب سازه در حین پخت در اتوکلاو که موجب کم رزین یا پر رزین شدن برخی نواحی در سازه می‌شود یا کشش زیاد الیاف که موجب قرارگیری نامناسب باند الیاف بر لایه‌های قبلی می‌شود).

¹ Qualitek

جدول 7 جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها

Table 7 Experiments design table

شماره‌ی آزمایش	کشش الیاف	سرعت پیچش	شرایط پخت	نوع الیاف	پاسخ (حداکثر بار تحمل شده ویژه)	پاسخ (کارایی فشاری)
1	1	1	1	1	33.03	1.73
2	1	2	2	2	57.27	3.11
3	1	3	3	3	107.19	1.91
4	2	1	2	3	80.56	1.81
5	2	2	3	1	7.28	0.36
6	2	3	1	2	27.18	1.39
7	3	1	3	2	41.66	2.49
8	3	2	1	3	101.05	2.48
9	3	3	2	1	9.53	0.44

جدول 8 استحکام فشاری مواد کامپوزیتی

Table 8 Compressive strength of composite materials

کامپوزیت	آرامید-اپوکسی	شیشه-اپوکسی	کربن-اپوکسی
استحکام فشاری	276 MPa	414 MPa	965 MPa

الف- تحلیل برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه

در مرحله‌ی مقدماتی تحلیل، اثرات اصلی فاکتورها مشخص شده است و نمودار آن‌ها رسم شده است. در شکل 17، نمودارهای اثر اصلی فاکتورها بر متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه آمده است.

در شکل 17 محور افقی، سطوح فاکتورها را نشان می‌دهد و محور عمودی، مقدار میانگین اثر اصلی فاکتورها را نشان می‌دهد. در نمودارهایی که شیب خطوط کم است و تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهند (فاکتورهای شرایط پخت و سرعت پیچش)، بیانگر کم اهمیت بودن آن فاکتور است. در تحلیل واریانس که نتایج آن در بخش بعدی آورده می‌شود، این دو فاکتور کم اثر در خطا ادغام می‌شوند.

در تحلیل به روش تاگوجی، پس از انتخاب مشخصه‌ی کیفیت که در این تحلیل «هر چه بزرگ‌تر، بهتر» در نظر گرفته شده است، نتایج تحلیل و تفسیر می‌شوند. بر این مبنا، در نمودارها نقاط بالاتر برای ما مطلوب هستند.

در مرحله‌ی بعدی به تحلیل واریانس (ANOVA) پرداخته شده است. در جدول 9 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه آورده شده است. در جدول 10 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه بعد از ادغام دو فاکتور کم اثر سرعت پیچش و شرایط پخت آورده شده است.

در جدول 7، هر ردیف نشان دهنده‌ی شرایط ساخت هر سازه می‌باشد. اعداد 1، 2 و 3 به ترتیب نمایانگر سطح پایین، متوسط و بالای فاکتورها می‌باشند و در دو ستون بعدی نتایج متغیرهای پاسخ آمده است. در این پروژه، اثر فاکتورها بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل بررسی شده است. دو متغیر پاسخ در نظر گرفته شده در این پروژه از روابط زیر محاسبه شده‌اند:

$$\eta = \frac{P_{MCL}}{W} \quad (1)$$

این پاسخ (η) که از تقسیم حداکثر بار تحمل شده¹ توسط سازه (P_{MCL}) بر جرم سازه (W) به‌دست می‌آید، نشان دهنده‌ی حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه² سازه است.

$$P^* = \frac{P_{MCL}}{P_{Rib}} \quad (2)$$

هم‌چنین، این پاسخ (P^*) که از تقسیم حداکثر بار تحمل شده توسط سازه به بار فشاری قابل تحمل هر ریب (P_{Rib}) در سازه به‌دست می‌آید، نشان دهنده‌ی کارایی فشاری³ سازه است. بار فشاری قابل تحمل در هر ریب از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است:

$$P_{Rib} = S_{Composite} \times A_{Rib} \quad (3)$$

$S_{Composite}$ نشان دهنده‌ی استحکام فشاری کامپوزیت به‌کار رفته در ریب‌ها (سازه) و A_{Rib} نیز معرف مساحت سطح مقطع ریب است. نتایج آزمون استحکام فشاری مواد کامپوزیتی به‌کار رفته در ساخت سازه‌ها در جدول 8 آمده است.

جدول 9 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه

Table 9 Analysis of variance (ANOVA) table for the response variable of maximum specific load

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1137.13	568.56	1081.39	0	10.17
سرعت پیچش	2	78.53	39.26	78.53	0	0.7
شرایط پخت	2	32.93	16.46	32.93	0	0.3
نوع الیاف	2	9931.88	4965.94	9876.15	0	88.83
خطا	0	0	0	0	0	0
مجموع	8	11180.5				100

³ Compressive Efficiency¹ Maximum Carried-Load (MCL)² Specific Maximum Carried-Load (SMCL)

γ_i پاسخ هر آزمایش و r تعداد تکرار می‌باشد.

شکل 18 مقدار نسبت S/N را در پاسخ حداکثر بار تحمل شده و ویژه را نشان می‌دهد. نسبت S/N با استفاده از معادله (4) به دست آمده است و داده‌ها نشان می‌دهد که این نمودار بر عکس نمودار اثر اصلی پارامترها می‌باشد. نتایج مطالعات نسبت S/N نشان می‌دهد، در نسبت بالاتر S/N اثر پارامتر بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر شرایط بهینه پارامترهای آزمایش طبق این نمودار، کشش الیاف سطح 1، سرعت پیچش سطح 1، سیکل پخت سطح 1 و نوع الیاف کربن می‌باشد.

در مرحله‌ی بعدی به تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ کارایی فشاری با در نظر گرفتن مشخصه کیفیت «هر چه بزرگتر، بهتر» پرداخته شده است (جدول 11). در جدول 12 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ کارایی فشاری بعد از ادغام فاکتور کم اثر شرایط پخت آورده شده است.

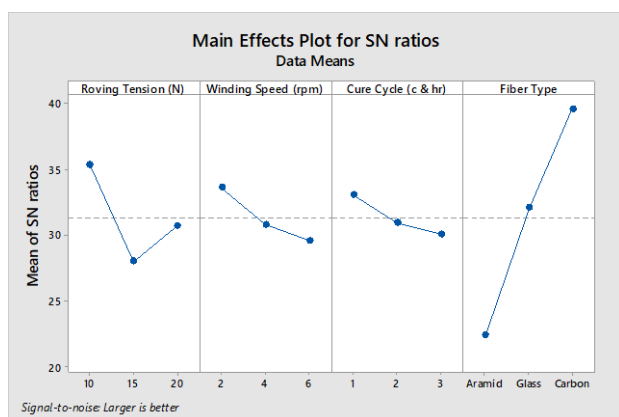


Fig. 18 Diagrams of S/N on the response variable of the specific maximum carried-load

شکل 18 نمودارهای S/N بر متغیر پاسخ حداکثر بار ویژه

در جدول 11 با توجه به محاسبات انجام شده، فاکتور شرایط پخت، به دلیل کوچکتر بودن مجموع مربعات آن از 10٪ بزرگترین مجموع مربعات موجود (مربوط به فاکتور نوع الیاف)، کم اثر تلقی می‌شود و باید ادغام شود. هر سه فاکتور باقی‌مانده در سطح اطمینان 90٪ معنادار هستند. سهم خطا نیز 7.40٪ است که نشان از صحت طراحی آزمایش انجام شده دارد. همچنین، فاکتورهای نوع الیاف با 54.20٪، کشش الیاف با 23.54٪ و سرعت پیچش با 14.86٪ به ترتیب مؤثرترین عوامل بر کارایی فشاری سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی هستند (جدول 12).

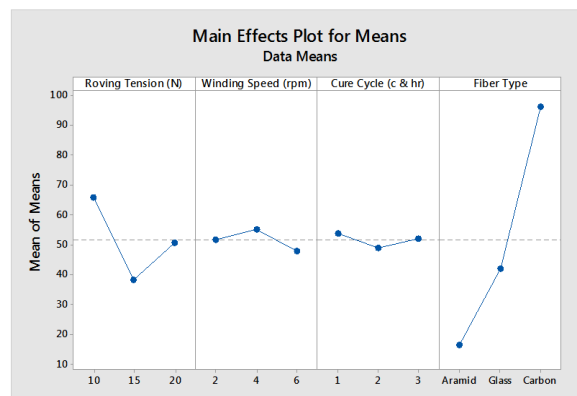


Fig. 17 Diagrams of the main effect of factors on the response variable of the specific maximum carried-load

شکل 17 نمودارهای اثر اصلی فاکتورها بر متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه

همان‌طور که از جدول 9 قابل مشاهده است، دو فاکتور سرعت پیچش و شرایط پخت، به دلیل کم اثر بودن، در جدول 10 ادغام شده‌اند و درجه‌ی آزادی و مجموع مربعات آن‌ها به خطا افزوده شده است. فاکتورهایی که مجموع مربعات آن‌ها از 10٪ بزرگترین مجموع مربعات موجود کمتر باشد، باید ادغام شوند [6].

هر دو فاکتور کشش الیاف و نوع الیاف، با داشتن ضریب معناداری بزرگتر از ضریب فیشر که از جدول استاندارد فیشر به دست می‌آیند، در سطح اطمینان 95٪ معنادار هستند. خطای طرح آزمایشی نیز 2.78٪ به دست آمده است که صحت فرایند طراحی آزمایشات انجام شده را نشان می‌دهد. اگر سهم مربوط به خطا در آزمایشی کمتر از 15٪ باشد، طراحی آزمایش انجام شده قابل قبول است [16]. همچنین با توجه به درصد سهم فاکتورها، نوع الیاف با 88.23٪ و سپس کشش الیاف با 9.98٪ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر متغیر پاسخ در نظر گرفته شده (حداکثر بار تحمل شده ویژه)، داشته‌اند.

وقتی آزمایش‌ها، شامل تکرار در هر موقعیت آزمایشی بوده و نتایج به صورت کمی اندازه‌گیری شود، تاگوچی تحلیل نسبت S/N را توصیه می‌کند. ابتدا تابع زبان یا میانگین مربعات انحراف¹ (MSD) محاسبه می‌شود. سپس نسبت S/N از MSD با استفاده از معادله (4) به دست می‌آید:

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (4)$$

برای حالتی که مشخصه‌ی کیفیت به صورت «هر چه بزرگتر، بهتر» باشد MSD با معادله (5) به دست می‌آید:

$$MSD = \frac{\left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots\right)}{r} \quad (5)$$

جدول 10 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه بعد از ادغام فاکتورهای سرعت پیچش و شرایط پخت

Table 10 Analysis of variance (ANOVA) table for the response variable of maximum specific load by pooled winding speed and cure cycle factors

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1137.13	568.56	1116.73	10.2	9.98
نوع الیاف	2	9931.88	4965.94	9753.68	89.1	88.23
خطا	4	111.47	55.73			2.78
مجموع	8	11180.5				100

¹ Mean Squared Deviation

جدول 11 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ کارایی فشاری

Table 11 Analysis of variance table (ANOVA) for compressive efficiency response variable

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1.71	0.85	1.71	0	25.38
سرعت پیچش	2	1.13	0.56	1.13	0	16.76
شرایط پخت	2	0.12	0.06	0.12	0	1.78
نوع الیاف	2	3.78	1.81	3.78	0	56.08
خطا	0	0	0	0	0	0
مجموع	8	6.74				100

جدول 12 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ کارایی فشاری با ادغام فاکتور شرایط پخت

Table 12 Analysis of variance table (ANOVA) for compressive efficiency response variable by pooled cure cycle factor

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1.71	0.85	1.58	13.70	23.54
سرعت پیچش	2	1.13	0.56	1.00	9.02	14.86
نوع الیاف	2	3.78	1.81	3.65	30.25	54.20
خطا	2	0.12	0.06		7.40	
مجموع	8	6.74				100

3-3-2- بهینه‌سازی و ساخت نمونه بهینه

فرآیند بهینه‌سازی برای متغیر پاسخ کارایی فشاری انجام شده است (جدول 13). با توجه به مشخصه کیفیت در نظر گرفته شده «هر چه بزرگتر، بهتر»، سطوحی از فاکتورها که در آن‌ها متغیر پاسخ بیشینه شده، به عنوان سطوح بهینه در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به دامنه‌ی اطمینان، جواب بلید در بازه‌ی بین 2.68 تا 3.50 قرار داشته باشد. دامنه اطمینان، تغییرات عملکرد میانگین در شرایط بهینه برای سطح اطمینان در نظر گرفته شده را پیش‌بینی می‌کند. جواب به‌دست آمده از آزمایش (آزمون تأیید)، در بازه‌ی فوق‌الذکر قرار دارد و نشان از صحت محاسبات آماری در مورد بهینه‌سازی فرآیند تحت بررسی دارد. در واقع، صحت‌سنجی طراحی آزمایشات انجام شده، از مقایسه‌ی نتیجه‌ی پیش‌بینی شده با نتیجه‌ی به‌دست آمده از آزمون تجربی صورت می‌گیرد. اختلاف پاسخ حاصل از آزمون تجربی با پاسخ پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی 9.38٪ به‌دست آمده است. در انتها، حالت واماندگی نمونه‌ی بهینه تحت بار محوری فشاری (آزمون کماتش) بررسی می‌شود.

جدول 13 جدول بهینه‌سازی

Table 13 Optimization table

شرایط بهینه	جواب پیش‌بینی شده	جواب آزمایش	اختلاف
کشش الیاف: 10 N			
سرعت پیچش: 2 rpm			
شرایط پخت: 4 hr @ 80 C + 4 hr @ 120 C	3.09±0.41	3.41	9.38%
نوع الیاف: شیشه			

در نمونه بهینه، واماندگی به‌صورت تورق و شکست کششی عرضی در ریب‌های مارپیچ قرار گرفته بین تقاطع ریب‌های مارپیچ با یکدیگر در حلقه‌ی اول و دوم مشاهده شده است. همچنین صدای شکست ریزترک‌ها نیز تا قبل از واماندگی نهایی شنیده شده است. سازه پس از باربرداری، به‌سرعت شکل خود را بازیابی کرد. حداکثر بار تحمل شده ثبت شده (28352 N) برای این نمونه، در محدوده‌ی پیش‌بینی شده‌ی آماری قرار دارد و این نتیجه صحت طرح آزمایشی را نشان می‌دهد. همچنین، جابجایی ثبت شده 5.45 mm است. در جدول 14، حالت واماندگی نمونه‌ی ساخته شده در شرایط بهینه آورده شده است.

جدول 14 حالت واماندگی نمونه‌ی ساخته شده در شرایط بهینه

Table 14 Failure mode of the sample fabricated in optimal conditions

حالت واماندگی	حالت 1	حالت 2	حالت 3	حالت 4
فاکتور ساخت	شکست کششی	تورق یا جدایش	کمانش ریب‌های مارپیچ محدود به گره‌های مجاور	شکست برشی ریب
کشش الیاف: 10 N	✓	✓	×	×
سرعت پیچش: 2 rpm	✓	✓	×	×
شرایط پخت: 4 hr @ 80 C + 4 hr @ 120 C				
نوع الیاف: شیشه				

درصدهای اختلاف مشاهده شده، نشان از تأثیر زیاد فاکتورهای فرآیندی بر کیفیت و باربری سازه‌های کامپوزیتی ساخته شده دارد.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تحلیل آماری - تجربی اثر پارامترهای ساخت بر استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که:

1- در تحلیل‌های انجام شده، به ترتیب فاکتور نوع الیاف با 88.23٪ و کشش الیاف با 9.98٪ بر متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه، بیشترین تأثیر را گذاشته‌اند و خطا نیز در این طرح آزمایشی 2٪ بوده است.

2- در تحلیل‌های انجام شده، به ترتیب فاکتور نوع الیاف با 54.20٪، کشش الیاف با 23.54٪ و سرعت پیچش با 14.86٪ بر متغیر پاسخ کارایی فشاری، بیشترین تأثیر را داشته‌اند و خطا نیز در این طرح آزمایشی 7.40٪ بوده است.

3- نتیجه تجربی حاصل از آزمون برای نمونه‌ی ساخته شده در شرایط بهینه، در محدوده‌ی پیش‌بینی شده‌ی آماری بوده است (اختلاف پیش‌بینی روش تاگوچی و آزمون تجربی 9.38٪ بوده است).

4- بیشترین مدوامانگی مشاهده شده، تورق بوده و بیشترین محل ایجاد واماندگی حلقه‌های بالایی سازه بوده‌اند.

5- واماندگی در استوانه‌های آرامید-اپوکسی به‌صورت تدریجی و نرم بوده است و بازایی شکل آن‌ها پس از باربرداری نیز به‌کندی صورت گرفته است؛ اما در استوانه‌های کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی واماندگی به‌صورت ناگهانی و ترد بوده است و پس از باربرداری، شکل خود را به‌سرعت بازایی می‌کردند.

6- سازه‌های تقویت شده با الیاف آرامید، دارای کمترین جرم در مقایسه با سازه‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه بوده‌اند. دلیل آن به چگالی کم الیاف و جذب کم رزین توسط این نوع الیاف برمی‌گردد.

7- استفاده از الیاف آرامید در این نوع سازه‌ها، به دلیل استحکام فشاری کم آن‌ها در مقابل بارهای فشاری، اصلاً توصیه نمی‌شود. به عنوان یک پیشنهاد برای کارهای آینده می‌توان از الیاف آرامید به‌صورت هیبریدی، آن هم در ریب‌های محیطی که تحت نیروهای کششی قرار می‌گیرند (پس از انتقال بارهای فشاری ریب‌های مارپیچ به ریب‌های محیطی، ریب‌های محیطی تحت کشش قرار می‌گیرند که به خودپایداری سازه کمک می‌کند) استفاده نمود.

5- مراجع

- [1] Hoa, S. V., "Principles of making composite materials," DEStech Publications, Inc, 2009.
- [2] Totaro, G. and De Nicola, F., "Recent advance on design and manufacturing of composite anisogrid structures for space launchers," Acta Astronautica, Vol. 81, pp. 570-577, 2017.
- [3] Mazumdar, S. K. and Hoa, S. V., "Application of Taguchi method for process enhancement of on-line consolidation technique," Composites, Vol. 26, No. 9, pp. 673-669, 1995.
- [4] Cohen, D., "Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength," Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 28, No. 12, pp. 1035-1047, 1997.
- [5] Lossie, M., Vandepitte, D. and Olofsson, K., "Experimental design approach to off-line quality control in filament winding," Proceedings of the international convention for filament winding technology, 1998.
- [6] Khalili, S. M. R. and Jahanmehr, F., "Experimental analysis of the effect of winding process parameters on physical properties and mechanical behavior of all-composite tanks," In Persian, 15th

در شکل‌های 19 و 20 سازه ساخته شده با شرایط بهینه قبل از آزمون و پس از آزمون آورده شده است.

3-3-3 مقایسه موردی

در این قسمت، حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه‌های شیشه-اپوکسی با نمونه‌ی ساخته شده با شرایط بهینه که آن هم شیشه-اپوکسی است، مقایسه شده است (شکل 21).



Fig. 19 Structures made with optimal conditions before testing

شکل 19 سازه ساخته شده با شرایط بهینه قبل از آزمون



Fig. 20 Overview of the structure after testing

شکل 20 نمای کلی سازه پس از آزمون

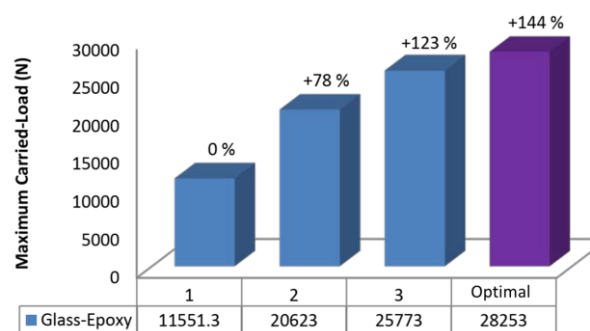


Fig. 21 Graph comparing the percentage difference between glass-epoxy samples and the sample fabricated with optimal conditions

شکل 21 نمودار مقایسه درصد اختلاف نمونه‌های شیشه-اپوکسی با نمونه‌ی ساخته شده با شرایط بهینه

همان‌طور که از شکل 21 قابل مشاهده است، حداکثر بار قابل تحمل سازه با بهینه کردن شرایط ساخت به‌شدت بالا می‌رود. درصدهای ذکر شده، نسبت به نمونه‌ای محاسبه شده که کمترین بار را تحمل کرده است. نمونه‌ی با شرایط بهینه‌ی ساخت، 9٪ درصد بهبود در بار تحمل شده را نسبت به نمونه‌ی شیشه-اپوکسی که بالاترین بار تحمل شده را دارد نشان می‌دهد. این

- Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, Iran, 2007.
- [7] Dobrzanski, L. A., Domagala, J. and Silva, J. F., "Application of Taguchi method in the optimization of filament winding of thermoplastic composites," Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 28, No. 3, pp. 133-140, 2007.
- [8] Gunasegaran, V., Prashanth, R. and Narayanan, M., "Experimental investigation and finite element analysis of filament wound GRP pipes for underground applications," Procedia Engineering, Vol. 64, pp. 1293-1301, 2013.
- [9] Kopecki, T., Mazurek, P. and Lis, T., "Experimental and Numerical Analysis of a Composite Thin-Walled Cylindrical Structures with Different Variants of Stiffeners," Subjected to Torsion. Materials, 12(19), p.3230, 2019.
- [10] Gerami, A., Davar, A., Heidari Bani, M., Eskandari Jam, J., "Numerical and experimental analysis of the buckling strength of a composite cylindrical lattice structure before and after low speed transverse impact," Composite Science and Technology, 8 (1): pp. 1363-1372, 2021.(in persian)
- [11] Vasiliev, V. V., Barynin, V. A. and Rasin, A. F., "Anisogrid composite lattice structures-development and aerospace applications," Composite Structures, Vol. 94, pp. 1117-1127, 2012.
- [12] Vasiliev, V. V. and Morozov, E. V., "Advanced mechanics of composite materials," Second ed., Elsevier, UK, 2007.
- [13] Beheshti, M. H. and Rezaoust, A. M., "Reinforced plastics (composites)," In Persian, Iran Polymer and Petrochemical Research Institute, 2005.
- [14] Strong, E. B., "Basics of making composites (materials, methods and applications)," F. Divasalar and P. Abachi Trans., University Publishing Center, In Persian 2001.
- [15] Henninger, F., Hoffmann, J. and Friedrich, K., "Thermoplastic filament winding with online-impregnation. Part B. Experimental study of processing parameters," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 33, No. 12, pp. 1677-1688, 2002.
- [16] Zeinali, A., "Taguchi experiment design using Qualitek software," Petrochemical Research and Technology Company, Tehran, 2008.



ارائه یک ضریب تصحیح جهت بهبود تخمین نسبت پواسون ساختار آگزتیک دو بعدی به کمک شبیه سازی و آزمایش

محمد کشفی^{1*}، پیام پورربیا²، پرویز کحال³

- 1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت ... بروجردی، بروجرد
 - 2- دانش آموزخته کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت ... بروجردی، بروجرد
 - 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت ... بروجردی، بروجرد
- * بروجر، صندوق پستی 69199-69737، m.kashfi@abru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

ساختارهای آگزتیک سازه‌هایی هستند که دارای نسبت پواسون منفی هستند، از این رو استفاده از این سازه‌ها به دلیل رفتار منحصر به فردشان در صنایع هوایی و خودرویی رو به افزایش است. تخمین نسبت پواسون در این ساختارها به منظور طراحی سازه‌های شخصی سازی شده مورد توجه است. برخی روابط تئوری جهت پیش بینی نسبت پواسون سازه‌های آگزتیک دو بعدی ارائه شده است که به دلیل در نظر نگرفتن برخی پارامترهای هندسی از دقت کمی برخوردار هستند. در این پژوهش ابتدا یک مدل عددی بر پایه روش اجزا محدود به وسیله مقایسه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی می‌شود. به منظور اعتبار سنجی مدل عددی، نمونه‌ها در ابتدا به کمک یک چاپگر سه بعدی ساخته و به کمک روش پردازش تصویر نسبت پواسون آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس، با توجه به جدول طراحی متغیرهای هندسی، یک ضریب تصحیح بر پایه پارامترهای هندسی سازه به‌ویژه ضخامت اضلاع طوری تعریف می‌شود که در عین بی‌بعد بودن با کمترین تعداد پارامتر بتواند مدل تئوری را به بیشترین دقت در تخمین نسبت پواسون برساند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه درونی و ضخامت اضلاع خطای رابطه تئوری افزایش می‌یابد که با در نظر گرفتن ضریب تصحیح ارائه شده تخمین نتایج بهبود قابل توجهی یافت به طوری که این ضریب می‌تواند خطای نتایج تئوری را از 800٪ به زیر 2٪ کاهش دهد.

دریافت: 1400/05/03

پذیرش: 1400/08/15

کلیدواژگان

ساختار آگزتیک، ساخت افزایشی، روش اجزا محدود، نسبت پواسون

A correction factor to improve Poisson's ratio prediction of 2D auxetic structure using finite element analysis and experiment

Mohammad Kashfi*, Payam Pourrabia, Parviz Kahhal

Mechanical engineering department, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

* P.O.B. 69199-69737, Boroujerd, Iran, m.kashfi@abru.ac.ir

Keywords

Auxetic structures, Additive manufacturing, Finite element analysis, Poisson's ratio

Abstract

Auxetic structures as a part of lattice structures are designed with a negative Poisson's ratio. The use of these structures is increasing due to their customized behavior in the aerospace and automotive industries. Several theoretical relations have been proposed to predict Poisson's ratio of 2D auxetic structures. Most simple relations could not predict the Poisson's ratio with a reasonable accuracy due to the absence of structure thickness. In this work, a numerical model based on finite element method is first validated by experimental results. In order to verify the numerical model accuracy, the constructed model is validated by experiment. Samples are printed, and the Poisson's ratio is measured using the DIC method during the compression test. A correction factor based on the geometrical parameters of the structure, especially the structure thickness, is then introduced. This dimensionless correction factor not only consists of the minimum number of parameters but also significantly improves the theoretical model accuracy. The results showed that the theoretical relation error is cumulated by increasing the structural angle and thickness. The present correction factor is successfully reduced the error of theoretical relation from 800% to less than 2%.

1- مقدمه

لایه نشانی مذاب¹ یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که به دلیل تولید نمونه‌هایی انعطاف پذیر و ساخت سریع، هزینه کم، تنوع و غیر سمی بودن مواد مورد استفاده و مقاومت بالای آن‌ها یکی از روش‌های محبوب در چاپ نمونه‌های سه بعدی محسوب می‌شود [4]. در حال حاضر این روش به طور

امروزه مواد مرکب در کنار ساخت افزایشی به‌ویژه نمونه سازی به روش چاپ سه بعدی به طور گسترده در مهندسی مکانیک، عمران، خودرو، پزشکی، مواد غذایی، پوشاک و برداشت انرژی مورد استفاده قرار گرفته است [1-3]. روش

¹ Fused Deposition Modelling (FDM)

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Kashfi, M., Pourrabia, P., Kahhal, P., "A correction factor to improve Poisson's ratio prediction of 2D auxetic structure using finite element analysis and experiment", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1556-1562, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.534622.1738>

انترانت را تحت خمش چهار نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تیر آگرتیک در اکثر نواحی، پایین‌ترین سطح تنش را دارد. گائو⁶ و همکاران [16] با بررسی ساختارهای شبکه سه‌بعدی آگرتیک کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن بر اساس سلول‌های تحت کشش، نشان دادند که این ساختارها در بارگذاری تک‌محوره بسیار مناسب هستند.

نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داد که محاسبه خواص مکانیکی ساختارهای آگرتیک همواره مورد توجه بوده است. با این حال روابط تئوری موجود جهت پیش‌بینی نسبت پوآسون آن‌ها از دقت لازم برخوردار نیست. لذا در این پژوهش در ابتدا یک ساختار آگرتیک پارامتریک طراحی و توسط روش لایه نشانی مذاب تولید می‌شود. سپس، نسبت پوآسون آن به کمک آزمایش فشار و بهره‌گیری از روش پردازش تصویر به صورت تجربی محاسبه می‌گردد. در گام بعد، با مقایسه و تحلیل نسبت پوآسون به دست آمده از آزمایش و مقایسه آن با مقدار پیش‌بینی شده در روش اجزا محدود، مدل عددی اعتبار سنجی می‌گردد. در نهایت بر پایه جدول طراحی پارامترهای ساختار آگرتیک و شبیه‌سازی مدل‌های مختلف، یک ضریب تصحیح جهت بهبود تخمین نسبت پوآسون روابط تئوری ارائه می‌گردد.

2- محاسبه تئوری خواص مکانیکی آگرتیک‌ها

به‌طور کلی هندسه یک سازه آگرتیک تک‌سلولی را می‌توان به‌وسیله چهار پارامتر l ، h ، t و θ توصیف نمود که در شکل 1 نشان داده شده است. شایان‌ذکر است که پارامترهای نشان داده در شکل طوری در نظر گرفته شده است که مقادیر این ابعاد به سادگی قابل اندازه‌گیری باشند.

نسبت پوآسون یک سازه آگرتیک را می‌توان با استفاده از معادله (1) به دست آورد [12]. در این رابطه از تغییر شکل اضلاع در حین بارگذاری صرف‌نظر شده است. همچنین، مقدار تغییر شکل به‌گونه‌ای فرض شده که تمامی تغییرات در ناحیه خطی واقع شده باشد. به عبارت دیگر یک ضلع در حین بارگذاری همچنان به صورت خط باقی بماند.

$$\nu = - \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta \left(\frac{\sin \theta}{\tan \theta} - \cos \theta \right)} \quad (1)$$

در رابطه اخیر l طول عضو افقی فوقانی و تحتانی، $2h$ ارتفاع سلول، θ زاویه بین عضو افقی و مورب و t ضخامت عضو می‌باشد.

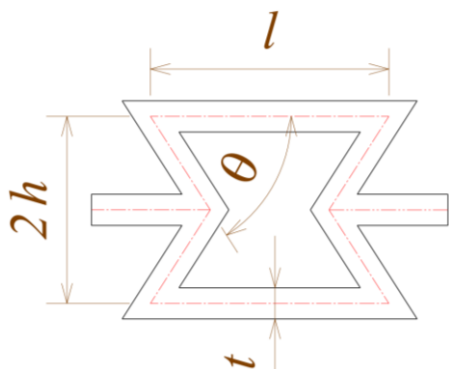


Fig. 1 A single cell of auxetic structure with design parameters.

شکل 1 نمایی از یک سازه آگرتیک تک‌سلولی و پارامترهای تعریف هندسه.

گسترده در ساخت نمونه‌ها و همچنین ترکیب آن با روش‌های عددی مانند روش اجزا محدود و بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش یک رشته به عنوان تغذیه در حالت نیمه مذاب به درون نازل دستگاه وارد می‌شود و بر اساس جی-کد نوشته شده در مختصات مربوطه قرار داده شده و به لایه ماده قبلی می‌پیوندد [5]. به طور معمول پلیمر مورد استفاده در روش لایه نشانی مذاب، پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) می‌باشد که از منابع تجدید پذیر تهیه می‌شود و دوستدار محیط‌زیست است [6].

پیشرفت‌های اخیر در فناوری به‌ویژه در صنایع هواپیمایی، خودرویی، ورزشی و پزشکی، لزوم تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده و بهینه را طلب کرده که لایه نشانی مذاب روشی مناسب جهت تولید آن‌ها است [7]. یکی از سازه‌هایی که به کمک این روش قابلیت ساخت پیدا نموده است، ساختارهایی با نسبت پوآسون منفی هستند که روز به روز کاربرد آن‌ها رو به افزایش است. برخی از این سازه‌ها به صورت لانه‌زنبوری بوده که با تغییر در زاویه‌های سلول امکان ایجاد نسبت پوآسون منفی در سازه را مهیا می‌کند. در مجامع علمی ساختارهایی با نسبت پوآسون منفی را سازه‌های آگرتیک¹ نیز می‌نامند [8]. آگرتیک‌ها به هنگام اعمال بارهای مکانیکی رفتارهای خاصی دارند به‌طوری‌که در هنگام کشش در جهت عرضی بر خلاف مواد متداول، کرنش مثبت و زمانی که تحت فشار قرار گیرند در جهت عرضی کرنش منفی دارند [9].

صفی‌خانی‌نسیم² و همکاران [10] به بررسی رفتار نوع جدیدی از کامپوزیت آگرتیک تشکیل‌شده از الیاف پلی‌استر و لوله‌های ABS³ به عنوان تقویت‌کننده و فوم پلی‌اورتان به عنوان ماتریس پرداختند. آن‌ها دریافتند که این نوع کامپوزیت در کرنش‌های بالا، مشابه مواد میرا کننده عمل می‌کند. همچنین، با بررسی پارامترهای مؤثر در رسیدن به ضریب پوآسون منفی بیشتر کامپوزیت آگرتیک نشان دادند که کاهش چگالی فوم و کاهش فاصله بین لوله‌های ABS در ابتدا تا رسیدن به یک مقدار بحرانی سبب افزایش ضریب پوآسون منفی شده و سپس کاهش پیدا می‌کند. نجفی⁴ و همکاران [11] به مطالعه تجربی و عددی جذب انرژی سازه‌های آگرتیک تحت بارگذاری شبه استاتیکی پرداختند. آن‌ها دریافتند که سازه‌های آگرتیک در مقایسه با سازه غیر آگرتیک لانه‌زنبوری عملکرد بهتری در جذب انرژی دارد به طوری که جذب انرژی سازه‌ی سرنیزه‌ای 161٪ بیشتر از سازه لانه‌زنبوری خواهد بود.

وانگ⁵ و همکاران [12] خواص مکانیکی ساختارهای سلولی آگرتیک ری-انترانت را مورد بررسی قرار دادند و با مقایسه روابط تئوری و نتایج تجربی نشان دادند هنگامی که پایه‌ها به اندازه کافی باریک باشند، خم شدن پایه‌ها تعیین‌کننده و تغییر شکل در ساختار و مکانیسم‌های دیگر را می‌توان نادیده گرفت. درحالی‌که وقتی پایه‌ها نسبتاً ضخیم می‌شوند، همه مکانیسم‌ها از جمله خمش، برش و بارگذاری محوری باید در نظر گرفته شوند. الوو⁶ و همکاران [13] با انجام آزمایش فشاری خستگی کم چرخه بر روی آگرتیک لانه زنبوری چاپ شده دریافتند که تحمل بار مبدنی بر سلول شش‌ضلعی، 1.75 برابر ساختار مشابه غیر آگرتیک است. چن⁷ و همکاران [14] شبکه‌های آگرتیک ری-انترانت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در اثر اضافه کردن یک دنده تقویت‌کننده به آگرتیک تک‌سلولی معمولی در جهت عمود بر راستای آگرتیک ری-انترانت سفتی افزایش می‌یابد. دوتا⁸ و همکاران [15] ساختارهای مختلف تیر از جمله همگن، خرپا و آگرتیک ری-

1 Auxetic
2 SafikhaniNasim
3 Acrylonitrile butadiene styrene
4 Najafi
5 Wang

6 Lvov
7 Chen
8 Dutta
9 Gao

3- ساخت نمونه‌ها و آزمایش

3-1- ساخت نمونه

یک ساختار آگزتیک چهار سلولی به‌وسیله یک چاپگر سه‌بعدی دو نازل و با تغذیه رشته PLA تهیه شد. جهت چاپ بهینه با توجه به خواص رشته مورد استفاده، دمای نازل و بستر به ترتیب 215 و 40 درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. همچنین، ضخامت لایه‌ها برابر 0.2 میلی‌متر تنظیم گردید. جهت استخراج جی-کد مربوطه از نرم‌افزار کورا استفاده گردید. به منظور صحت-سنجی، پارامترهای هندسی نمونه، l ، h ، θ و t به ترتیب برابر 1 رادیان، 23.9 و 3 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین، مقدار عمق نمونه در جهت عمود بر صفحه به نحوی در نظر گرفته شد که بتوان از پدیده کمایش در حین آزمایش صرف‌نظر نمود. نمونه چاپ شده در شکل 2 نشان داده شده است.

3-2- آزمایش فشار

به منظور بررسی خواص مکانیکی ساختار آگزتیک 4 سلولی تهیه شده، آزمایش فشار با استفاده از دستگاه آزمایش فشار با ظرفیت اعمال 10 تن انجام شد. همچنین، جهت افزایش دقت در محاسبه نسبت پوآسون، از یک دوربین 18 مگا پیکسل کنون همراه با کد پردازش تصویر روش DIC در نرم‌افزار متلب استفاده شد.

4- مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی

جهت بررسی خواص مکانیکی ساختار آگزتیک چاپ شده، مدل آن در نرم‌افزار کتیا بر پایه ابعاد در نظر گرفته شده در آزمایش مدل‌سازی و سپس به نرم‌افزار آباکوس انتقال داده شد. یک میلی‌متر جابجایی به عنوان بار خارجی به وجه بالایی اعمال گردید. از اصطکاک موجود بین صفحات بارگذاری در حین آزمایش صرف‌نظر شده است. همچنین، نمونه به دلیل تقارن در راستای عمود بر صفحه به صورت متقارن و با اعمال قید تقارن، مدل‌سازی شده است. مدول الاستیسیته و نسبت پوآسون PLA به ترتیب برابر 3.5 گیگاپاسکال و 0.36 اختصاص داده شد [6]. با توجه به رفتار ماده، مدل الاستیک خطی جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. به منظور بررسی المان‌های مختلف جهت مدل‌سازی، با استفاده از حلگر استاتیکی مسئله یک بار در حالت دوبعدی تنش‌صفحه‌ای (المان Quad) شامل 1269 المان، سپس در حالت سه‌بعدی (المان Hex) شامل 32425 المان و در نهایت به وسیله المان تیر (Beam) در مجموع با 30 المان، تحلیل شد.



Fig. 2 As printed auxetic structure used for experiment.

شکل 2 نمونه آگزتیک چاپ شده جهت انجام آزمایش.

به منظور دستیابی رابطه بین ویژگی‌های هندسی و نسبت پوآسون سازه، پارامترهای هندسی سازه آگزتیک به صورت جدول 1 در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، مقادیر θ بین 1 تا 1.4 رادیان و دیگر پارامترهای طوری طراحی شده است که فضای طراحی مناسبی جهت محاسبات و شبیه‌سازی‌ها ارائه گردد. مدل معیار جهت چاپ، آزمایش و بررسی نتایج آزمایشگاهی، عددی و تئوری مورد هفتم جدول انتخاب شده است. قابل توجه است که برخی تغییرات در روند اعداد در جدول مذکور به منظور جلوگیری از تداخل هندسی لحاظ شده است.

جدول 1 پارامترهای تعریف ساختار آگزتیک جهت شبیه‌سازی رفتار سازه آگزتیک

Table 1 Design table required for simulations

t	l	h	θ	#	t	l	h	θ	#	t	l	h	θ	#	t	l	h	θ	#
5	33	25	1.3	46	3	20	9	1.2	31	2	14	6	1.1	16	1	10	3	1.0	1
7	47	30	1.3	47	4	30	14	1.2	32	2	15	7	1.1	17	1	12	4	1.0	2
8	54	35	1.3	48	4	35	20	1.2	33	2	18	8	1.1	18	1	13	5	1.0	3
1	5	3	1.4	49	5	47	25	1.2	34	3	20	9	1.1	19	2	15	6	1.0	4
1	7	4	1.4	50	7	55	30	1.2	35	4	30	14	1.1	20	2	18	7	1.0	5
1	8	5	1.4	51	8	63	35	1.2	36	4	35	20	1.1	21	2	20	8	1.0	6
2	10	6	1.4	52	1	5	3	1.3	37	5	47	25	1.1	22	3	23	9	1.0	7
2	11	7	1.4	53	1	8	4	1.3	38	7	55	30	1.1	23	4	35	14	1.0	8
2	14	8	1.4	54	1	10	5	1.3	39	8	63	35	1.1	24	4	40	20	1.0	9
3	15	9	1.4	55	2	11	6	1.3	40	1	9	3	1.2	25	5	52	25	1.0	10
4	17	14	1.4	56	2	13	7	1.3	41	1	12	4	1.2	26	7	59	30	1.0	11
4	23	17	1.4	57	2	16	8	1.3	42	1	13	5	1.2	27	8	68	35	1.0	12
5	30	22	1.4	58	3	18	9	1.3	43	2	14	6	1.2	28	1	7	3	1.1	13
7	41	27	1.4	59	4	20	14	1.3	44	2	15	7	1.2	29	1	9	4	1.1	14
8	51	32	1.4	60	4	25	20	1.3	45	2	18	8	1.2	30	1	10	5	1.1	15

5- بحث و نتایج

5-1- نتایج آزمایشگاهی

جهت بررسی تجربی رفتار ساختار آگزتیک چاپ شده و همچنین اعتبار سنجی مدل اجزا محدود، مطابق با شکل 3، سازه در بین فک‌های دستگاه تحت آزمایش فشار قرار گرفت. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، به‌منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری کرنش‌ها، روش پردازش تصویر در بستر نرم‌افزار متلب به کار گرفته شده است. به ترتیب چهار نقطه در جهات طولی و عرضی به عنوان کرنش‌سنج‌های مجازی در طی فرایند پردازش تصویر تعریف گردید. با اتصال نقاط عمودی و افقی، کرنش‌سنج‌های مجازی در دو راستای طولی و عرضی تعریف می‌شوند. با توجه به مختصات نقاط، کرنش‌سنج‌های مجازی در ابتدا کاملاً افقی و عمودی در نظر گرفته شدند. مقدار تغییرات طول و در نتیجه کرنش برای هر کرنش‌سنج مجازی حین آزمایش در نمودار یکسان بر اساس عکس‌های تهیه شده محاسبه می‌شود. الگوی ایجاد شده بر روی نمونه جهت شناخت میدان تغییر مکان در فرایند پردازش تصویر می‌باشد که همراه با نقاط نشانگر در شکل 3 نشان داده شده است.

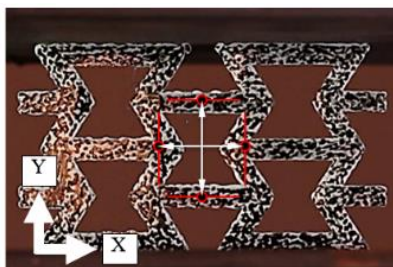


Fig. 3 Auxetic structure under compression test and DIC pattern indicators.

شکل 3 نمونه تحت آزمایش فشار و نقاط مرجع جهت اندازه‌گیری کرنش‌ها.

شکل 4 نمودار تغییرات کرنش‌های عرضی و طولی را بر اساس کرنش‌سنج‌های مجازی تعریف شده نشان می‌دهد. در مجموع زمان آزمایش 25 تصویر و به دنبال آن 25 نقطه اندازه‌گیری ثبت گردید. همان‌گونه که شکل

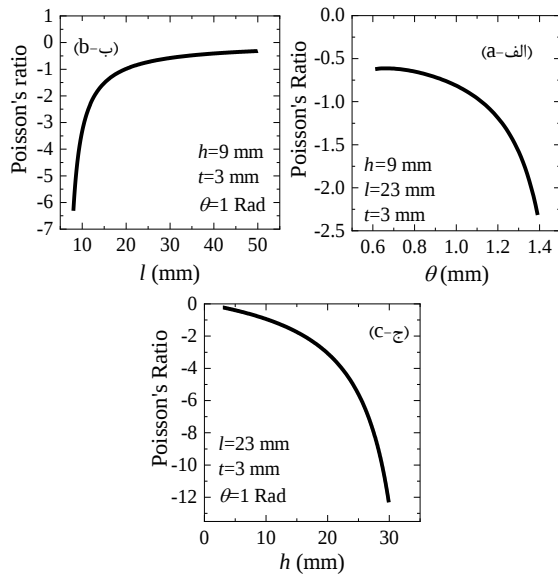


Fig. 5 Variation of Poisson's ratio by changing (a) θ , (b) l and (c) h .
شکل 5 نحوه تغییرات نسبت پواسون تخمین زده شده بر اساس رابطه تئوری بر حسب پارامترهای رابطه (1).

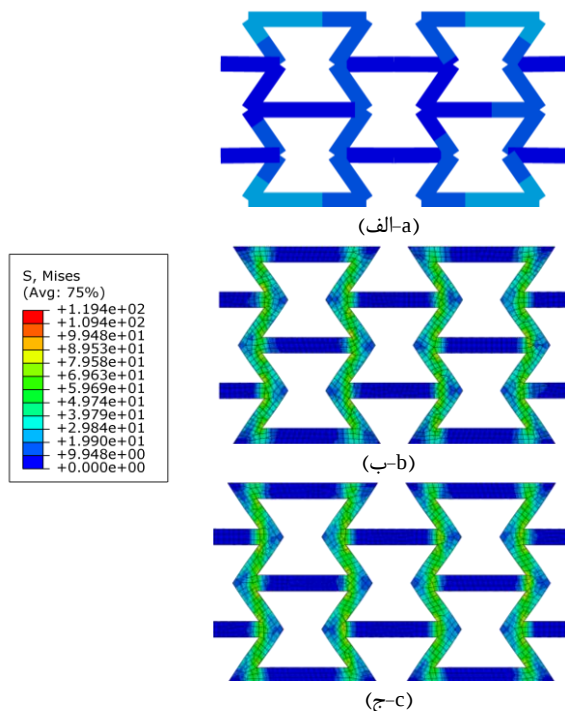


Fig. 6 Von-Mises stress contour of auxetic structure using (a) beam, (b) 2D and (c) 3D elements.

شکل 6 توزیع تنش معادل فون مایز در مدل با المان‌های (الف) تیر، (ب) دوبعدی و (ج) سه‌بعدی.

با استفاده از مقادیر جابجایی به‌دست‌آمده و همچنین مقادیر طول اولیه، می‌توان به ترتیب کرنش‌های طولی و جانبی معادل را محاسبه نمود. بنا بر تعریف نسبت پواسون، مقادیر آن به ترتیب برای المان‌ها تیر، دو و سه بعدی برابر 0.80، 0.68 و 0.65 به دست آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرات بین المان‌های تیر و سه‌بعدی مشاهده می‌شود که در حدود 19٪ است. خطای محاسبه شده قابل‌ملاحظه بوده، لذا استفاده از المان تیر

نشان می‌دهد در ابتدا مقادیر کرنش دارای تغییرات اندکی هستند که مبین ناحیه الاستیک بوده و در انتهای آزمایش تغییرات شدید می‌شود. با تقسیم کرنش عرضی به طولی و همچنین اعمال ضریب 1-، مقدار نسبت پواسون معادل سازه حاصل می‌شود. سپس با استفاده از برازش یک منحنی درجه صفر، مقدار نسبت پواسون ماده برابر با 0.66- محاسبه می‌شود.

5-2- بررسی حساسیت مدل تئوری

در این بخش اثر هر کدام از پارامترهای مؤثر بر نسبت پواسون منطبق با معادله (1) بیان می‌شود. شکل 5(a-الف)، شکل 5(b-ب) و شکل 5(c-ج) به ترتیب روند تغییرات نسبت پواسون سازه آگرتیک را بر حسب h و l و θ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین حساسیت مربوط به h بوده و کمترین حساسیت نسبت پواسون مربوط به θ است. همچنین با افزایش هر دو مقدار h و θ نسبت پواسون کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، با افزایش دو پارامتر فوق، نسبت پواسون منفی‌تر و خاصیت آگرتیکی افزایش می‌یابد. برخلاف این دو پارامتر، با افزایش l مقدار نسبت پواسون صعودی بوده و به صفر نزدیک‌تر می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود رابطه تئوری ارائه شده فاقد t بوده و مستقل از ضخامت تعریف شده است به همین دلیل تغییرات نسبت پواسون نسبت به ضخامت در شکل لحاظ نشده است.

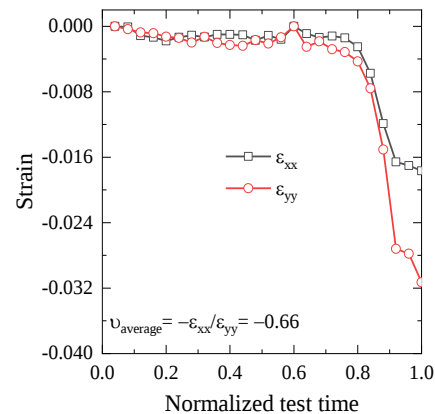


Fig. 4 Longitudinal and transverse strains during the compression test extracted by DIC.

شکل 4 نمودار کرنش‌های محوری و جانبی مستخرج از روش پردازش تصویر طی آزمایش فشار.

5-3- نتایج شبیه‌سازی

5-3-1- بررسی اثر نوع المان و اعتبار سنجی مدل

شکل 6(a-الف)، شکل 6(b-ب) و شکل 6(c-ج) به ترتیب توزیع تنش معادل فون مایز را برای المان‌های تیر، دو و سه بعدی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حداکثر تنش معادل در مدل با المان تیر، دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب برابر 42.5، 119.4 و 111.5 مگاپاسکال می‌باشد. بیشترین مقدار تنش معادل در اعضای رخ داده است که در هنگام تغییر شکل تحت بار خمشی واقع شده است. از سوی دیگر تنش در اعضای افقی ناچیز بدست آمده است. با توجه به ماهیت مدل‌سازی بر پایه المان تیر، تنش در کل یک المان ثابت است درحالی‌که برای مدل با المان‌های دو و سه‌بعدی توزیع تنش در راستای ضخامت نیز مشاهده می‌شود که این امر به واقعیت نزدیک‌تر است.

از آنجا که مقدار جابجایی افقی مقداری مؤثر بر نسبت پواسون سازه است، لذا تغییر در این پارامتر می‌تواند منجر به تغییر در مقدار نسبت پواسون معادل هر مدل گردد. بیشترین جابجایی عمودی در هر سه مدل یکسان و برابر با شرط مرزی اعمال شده (1 میلی‌متر) در نظر گرفته شده است.

در شکل نشانگر ضخامت جداره ساختار آگرتیک و هر رنگ بیانگر زاویه می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی نقاط طراحی، نسبت پواسون منفی محاسبه شده است. همچنین، با افزایش ضخامت (اندازه هر گوی) مقدار نسبت پواسون تا حدودی کاهش یافته است. البته در ضخامت‌های کم روند به‌گونه‌ای دیگر می‌باشد و برعکس به دست آمده است. پیچیدگی در تغییرات نسبت پواسون نیازمند تحلیل دقیقی بر روی نتایج است تا بتوان رفتار را به‌درستی پیش‌بینی نمود. نمودار به‌خوبی نشان می‌دهد که ضخامت جداره مطمئناً در مقدار نسبت پواسون مؤثر بوده درحالی‌که معادله (1) استقلال نسبت پواسون از ضخامت را نشان می‌دهد. بر این اساس رابطه تئوری نیازمند اصلاحاتی می‌باشد که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد. لازم به ذکر است که برخی از گوی‌ها در شکل 8 با دو رنگ نشان داده شده که بیانگر یک نقطه با مقادیر h و l ثابت است و تنها پارامتر θ در آن متغیر است.

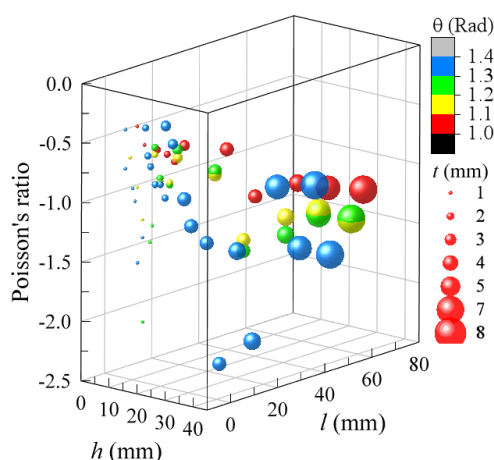


Fig. 8 Variation of Poisson's ratio respect to θ , h , l and t .

شکل 8 نمودار تغییرات نسبت پواسون به ازای تغییرات h ، l و t

4-4-ارائه ضریب تصحیح

با توجه به رابطه ارائه شده در معادله (1)، مشاهده می‌شود که معادله مذکور به دلیل عدم در نظر گرفتن ضخامت و همچنین به صورت خط ماندن اضلاع پس از تغییر شکل سازه، دقت مناسبی در تخمین نسبت پواسون ندارد. میانگین خطا به ازای زاویه 1 رادیان (ردیف 1 تا 12 از جدول 1) 7.83٪ می‌باشد. به همین ترتیب مقدار خطا به ازای زاویه 1.1، 1.2، 1.3 و 1.4 به ترتیب 23.10٪، 40.94٪، 120.27٪ و 400.63٪ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار θ ، مقدار خطای بین رابطه تئوری (معادله (1)) و نتایج عددی به‌شدت در حال افزایش است. از سوی دیگر در یک زاویه ثابت، با افزایش ضخامت نیز خطا افزایشی خواهد بود؛ بنابراین در این بخش یک ضریب تصحیح جهت افزایش دقت رابطه تئوری به شرح زیر تعریف می‌گردد.

$$\nu = -CF \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta \left(\frac{\sin \theta}{\tan} - \cos \theta \right)} \quad (2)$$

که در آن CF از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$CF = a - b \times c \left(\frac{hl}{t^2} \right) \quad (3)$$

علیرغم سادگی، دقت کافی را جهت تخمین نسبت پواسون ندارد. دلیل این خطا در المان تیر، عدم امکان بروز انحنا در المان است که این موضوع می‌تواند منجر به خطا شود.

مقدار خطا در مدل با المان دو و سه بعدی در حدود 4٪ می‌باشد؛ بنابراین جهت محاسبه نسبت پواسون می‌توان از مدل با المان دوبعدی استفاده نمود که زمان حل آن در مقایسه با مدل سه‌بعدی بسیار کمتر است؛ بنابراین با توجه به مقادیر محاسبه شده برای نسبت پواسون، مدل دوبعدی جهت تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل نه تنها از دقت بالایی برخوردار است، بلکه زمان حل آن نیز در مقایسه با مدل سه‌بعدی کمتر است. با مقایسه نسبت پواسون محاسبه شده در روش آزمایشگاهی تنها 4.55٪ خطا محاسبه می‌شود که با توجه به فرضیات موجود در شبیه‌سازی‌ها از جمله صرف‌نظر از اصطکاک بین فک‌ها و سازه تخمین خوبی از جواب‌ها حاصل شده است؛ بنابراین اعتبار مدل عددی استفاده شده در این پژوهش صحت‌سنجی شده و می‌توان آن در ادامه از آن جهت بهینه‌سازی‌ها بهره برد.

5-3-2-بررسی اثر تعداد سلول‌ها بر نتایج

از آنجاکه ساختار آگرتیک به‌صورت سلولی می‌باشد، بنابراین تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده می‌تواند منجر به تغییر جواب‌ها شود؛ بنابراین تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده باید به‌گونه‌ای باشد که پاسخ‌های به دست آمده همگرا شوند. بدین منظور در ادامه به ترتیب مدل‌هایی با یک، چهار، نه و شانزده سلول در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج بخش 5-3-1، جهت انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل با المان دوبعدی استفاده شده است. پس از انجام تحلیل استاتیکی روی مدل‌های ذکر شده مقادیر نسبت پواسون برای حالت‌های مختلف در شکل 7 نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر نشان داده شده در شکل، اختلاف مقادیر پیش‌بینی‌شده برای مدل 16 و 9 سلولی در مقایسه با مدل 4 سلولی به ترتیب تنها برابر 1.5 و 1٪ می‌باشد. از این‌رو با توجه به زمان حل هر مدل، مدل چهار سلولی به عنوان مدل اصلی در بهینه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

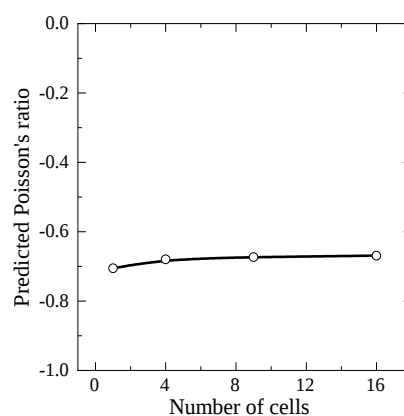


Fig. 7 Predicted Poisson's ratio for different number of considered cells.

شکل 7 نمودار نسبت پواسون پیش‌بینی‌شده بر اساس تعداد سلول در هر مدل.

5-3-3-نتایج مدل عددی

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، مقدار نسبت پواسون برای هر کد بر اساس تعریف آن محاسبه گردید. شکل 8 نمودار تغییرات نسبت پواسون پیش‌بینی‌شده توسط شبیه‌سازی را بر حسب پارامترهای هندسی ساختار نشان می‌دهد. از آنجاکه نسبت پواسون تابع چهار پارامتر ورودی است، لذا نمودار مذکور به‌گونه‌ای رسم شده که تغییرات همه پارامترها منظور گردد. اندازه هر گوی

- یک ضریب تصحیح بر مبنای ویژگی‌های هندسی در جهت افزایش دقت مدل تئوری تعریف گردید به نحوی که خطای محاسبات را به میزان زیادی کاهش داد. در زاویه 1.4 رادیان ضریب تصحیح توانست خطا را از 800٪ به زیر 2٪ کاهش دهد. در این ضریب تصحیح بر خلاف مدل تئوری اثر ضخامت اضلاع نیز منظور گردیده است.

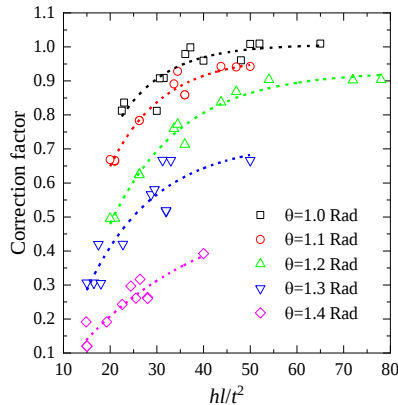


Fig. 9 Correction factor for different values of θ and h/l^2 .

شکل 9 تغییرات ضریب تصحیح برای زوایای مختلف نسبت به h/l^2

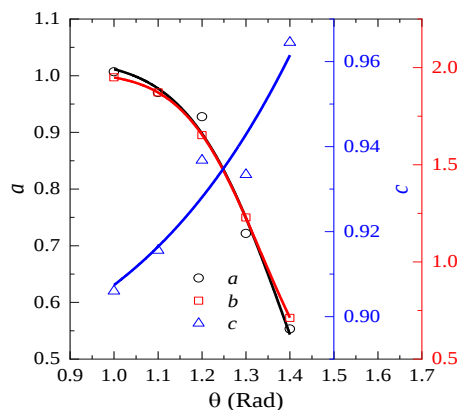


Fig. 10 Variation of a , b and c functions for different values of θ .

شکل 10 تغییرات توابع a , b و c به ازای زوایای مختلف.

7- تشکر و قدردانی

این تحقیق برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان (طراحی و بهینه‌سازی ساختارهایی با نسبت پواسون منفی) می‌باشد که با حمایت مالی دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره) و با کد رهگیری (213050-15664) انجام پذیرفته است.

8- مراجع

- [1] Lee, J.-Y., An, J. and Chua, C. K., "Fundamentals and Applications of 3d Printing for Novel Materials" Applied Materials Today, Vol. 7, pp. 120-133, 2017.
- [2] Kashfi, M., Fakhri, P., Amini, B., Yavari, N., Rashidi, B., Kong, L. and Bagherzadeh, R., "A Novel Approach to Determining Piezoelectric Properties of Nanogenerators Based on PVDF Nanofibers Using Iterative Finite Element Simulation for Walking Energy Harvesting" Journal of Industrial Textiles, pp. 23, 2020.
- [3] Ansari, E., Majzoobi, G., Rahmani, K. and Kashfi, M., "The Effect of Middle Layer Material and Thickness on the Quasi-Static Energy Absorption of FML" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 427-436, 2018.

که در آن h و t پارامترهای هندسی سازه آگرتیک هستند و در شکل 1 تعریف شده است. همچنین a ، b و c توابعی از θ می‌باشند که در ادامه تعریف می‌شوند. همان‌گونه که در رابطه (3) مشاهده می‌شود، ضریب تصحیح CF یک کمیت بی‌بعد بوده و تنها یک ضریب است که تمامی پارامترهای هندسی سازه آگرتیک را شامل می‌شود. شکل 9 نمایی از تغییرات ضریب تصحیح تعریف شده را بر حسب h/l^2 نمایش می‌دهد. از آنجاکه مقدار ضریب تصحیح در هر زاویه تغییر می‌کند، لذا 5 نمودار برای زوایای گوناگون تعریف شده است. با افزایش زاویه همان‌گونه که انتظار می‌رود، مقدار ضریب تصحیح کوچک‌تر می‌شود. همچنین، در تمامی نقاط طراحی مقدار ضریب تصحیح کوچک‌تر از مقدار واحد است که نشان از آن دارد که رابطه تئوری مقدار نسبت پواسون را همواره منفی‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. این کاهش دقت در ضخامت و زوایای بالا به حداکثر خود می‌رسد که گاه تا حدود 800٪ خطا نیز مشاهده می‌شود. تمامی برازش‌های انجام شده بر روی داده‌های شکل 9 به‌گونه‌ای انجام شده است که مقدار R^2 کمتر از 0.80 محاسبه نشود. باین‌حال در برخی موارد این مقدار تا حدود 0.9 نیز افزایش داشته است. هدف از ارائه ضریب تصحیح به شکل رابطه (3) آن بوده که به صورت هم‌زمان چهار پارامتر هندسی، سادگی رابطه، حداقل تعداد پارامترهای رابطه، بی‌بعد بودن و دقت تخمین بهینه باشد.

شکل 10 نحوه تغییرات توابع a ، b و c را به ازای زوایای مختلف نشان می‌دهد. هر دو پارامتر a و b روندی کاهشی را نشان می‌دهد درحالی‌که c روندی صعودی را ارائه می‌دهد؛ بنابراین جهت تخمین ضریب تصحیح می‌توان ابتدا با استفاده از زاویه، مقادیر a ، b و c را محاسبه نمود سپس با استفاده از این مقدار و همچنین مقادیر h و t ضریب تصحیح نهایی را به دست آورد. پس از اعمال ضریب تصحیح تعریف شده بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده در جدول 1، مقدار میانگین خطا به ازای زوایای 1، 1.1، 1.2، 1.3 و 1.4 رادیان به ترتیب برابر 0.28٪، -0.71٪، -2.70٪، +6.19٪ و +1.74٪ محاسبه گردید که با توجه به مقادیر قبلی محاسبه شده برای خطا بهبود چشم‌گیری مشاهده می‌شود.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار مکانیکی به ویژه نسبت پواسون سازه‌های آگرتیکی پرداخته شده است. در ابتدا مدل عددی بر پایه روش اجزا محدود به وسیله مقایسه و تحلیل نسبت پواسون مستخرج از آزمایش فشار اعتبار سنجی شده است. سپس با طراحی جدول پارامترهای هندسی، مقادیر نسبت پواسون در 60 حالت مختلف به وسیله شبیه‌سازی پیش‌بینی شده است. جهت افزایش دقت آزمایش‌ها ساخت افزایشی به کمک چاپگر سه‌بعدی و سیستم پردازش تصویر بهره برده شده است. با توجه به عدم دقت در رابطه تئوری موجود یک ضریب تصحیح بر پایه یافته‌های عددی جهت افزایش دقت مدل تئوری ارائه شده است. در مجموع نتایج اصلی این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود.

- جهت شبیه‌سازی ساختار آگرتیک می‌توان با دقت قابل قبولی از المان‌های دو بعدی استفاده نمود. همچنین المان‌های تیر می‌تواند خطای تخمین نسبت پواسون را تا حدود 20٪ افزایش دهد.
- مقدار همگرایی جواب‌ها به ویژه مقدار نسبت پواسون با تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده مرتبط است. با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده تعداد چهار سلول می‌تواند در عین کاهش هزینه‌های تولید با دقت خوبی نسبت پواسون را تخمین بزند.

- [4] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. and Hui, D., "Additive Manufacturing (3d Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [5] Yao, T., Ye, J., Deng, Z., Zhang, K., Ma, Y. and Ouyang, H., "Tensile Failure Strength and Separation Angle of Fdm 3d Printing Pla Material: Experimental and Theoretical Analyses" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 188, pp. 107894, 2020.
- [6] Farah, S., Anderson, D. G. and Langer, R., "Physical and Mechanical Properties of Pla, and Their Functions in Widespread Applications—a Comprehensive Review" *Advanced drug delivery reviews*, Vol. 107, pp. 367-392, 2016.
- [7] Zhang, J., Lu, G. and You, Z., "Large Deformation and Energy Absorption of Additively Manufactured Auxetic Materials and Structures: A Review" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 201, pp. 108340, 2020.
- [8] Quan, C., Han, B., Hou, Z., Zhang, Q., Tian, X. and Lu, T. J., "3d Printed Continuous Fiber Reinforced Composite Auxetic Honeycomb Structures" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 187, pp. 107858, 2020.
- [9] Rezaei, S., Kadkhodapour, J., Hamzehei, R., Taherkhani, B., Anaraki, A. P. and Dariushi, S., "Design and Modeling of the 2d Auxetic Metamaterials with Hyperelastic Properties Using Topology Optimization Approach" *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, Vol. 43, pp. 100868, 2021.
- [10] Safikhani Nasim, M. and Etemadi, E., "Analysis of Effective Parameters of Auxetic Composite Structure Made with Multilayer Orthogonal Reinforcement by Finite Element Method" *In Persian, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 247-254, 2017.
- [11] Najafi, M., Ahmadi, H. and Liaghat, G. H., "Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-Static Loading" *In Persian, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 415-424, 2020.
- [12] Wang, X.-T., Wang, B., Li, X.-W. and Ma, L., "Mechanical Properties of 3d Re-Entrant Auxetic Cellular Structures" *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 1, pp. 396-407, 2017.
- [13] Lvov, V., Senatov, F., Korsunsky, A. and Salimon, A., "Design and Mechanical Properties of 3d-Printed Auxetic Honeycomb Structure" *Materials Today Communications*, Vol. 24, pp. 101173, 2020.
- [14] Chen, Z., Wu, X., Xie, Y. M., Wang, Z. and Zhou, S., "Re-Entrant Auxetic Lattices with Enhanced Stiffness: A Numerical Study" *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 178, pp. 105619, 2020.
- [15] Dutta, S., Menon, H. G., Hariprasad, M., Krishnan, A. and Shankar, B., "Study of Auxetic Beams under Bending: A Finite Element Approach" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, 2020.
- [16] Gao, Y., Zhou, Z., Hu, H. and Xiong, J., "New Concept of Carbon Fiber Reinforced Composite 3d Auxetic Lattice Structures Based on Stretching-Dominated Cells" *Mechanics of Materials*, Vol. 152, pp. 103661, 2021.



مطالعه آزمایشگاهی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های زیست تجزیه پذیر تقویت شده الیافی

کامران محفوظی^{1*}، آرش تحویلی²

1- مربی دانشور، مهندسی نساجی، دانشگاه گیلان، رشت

2- مربی، مهندسی نساجی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

* رشت، کد پستی 41996-13776، mahfoozi@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/05/18

پذیرش: 1400/10/08

چکیده

در این پژوهش خواص فیزیکی و زیست تجزیه پذیری کامپوزیت‌های سبز، حاصل از پارچه پنبه‌ای و رزین‌های زیست تجزیه پذیر (ترکیب نشاسته، پلی‌وینیل الکل (PVA) و کربوکسی متیل سلولز (CMC))، از روش ریخته‌گری محلول مطالعه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که بهترین استحکام کششی (معادل $27.8 \text{ MPa} \pm 2.1 \text{ MPa}$) و همچنین بیشترین مقدار مدول یانگ ($8.3 \text{ GPa} \pm 0.8 \text{ GPa}$)، در کامپوزیت ساخته شده از نسبت 60% حجمی پارچه پنبه‌ای و رزین نشاسته (5% وزنی)، پلی‌وینیل الکل (7% وزنی) و کربوکسی متیل سلولز (1.5% وزنی) مشاهده می‌شود، که با کامپوزیت‌های متداول قابل مقایسه است. این خاصیت به‌تنهایی از پارچه پنبه‌ای و فیلم تهیه شده از رزین زیست تجزیه پذیر بیشتر است. بررسی مورفولوژیکی توسط عکس‌های میکروسکپ الکترونی، بیانگر تقویت کامپوزیت توسط الیاف پنبه هستند. این امر به فعل‌وانفعال قوی میان پارچه پنبه‌ای و رزین قابل تجزیه بیولوژیکی مرتبط می‌شود. با افزایش درصد کربوکسی متیل سلولز، مقاومت کامپوزیت‌ها در برابر نفوذ رطوبت بهبود می‌یابد. آزمون زیست تجزیه پذیری نشان می‌دهد که افزودن کربوکسی متیل سلولز، سبب کاهش زیست تجزیه پذیری کامپوزیت‌ها و افزودن نشاسته و پلی‌وینیل الکل، باعث افزایش آن می‌شود. این کامپوزیت‌ها می‌توانند کاندید مناسبی برای کامپوزیت‌های زیست تجزیه پذیر پلیمری با کارایی بالا باشند.

کلیدواژگان

کامپوزیت، رزین زیست تجزیه پذیر، پلی‌وینیل الکل، کربوکسی متیل سلولز، پارچه پنبه‌ای

Experimental study on mechanical and physical properties of bio-degradable fiber reinforced composites

Kamran Mahfouzi^{1*}, Arash Tahvili²

1- Engineering department, University of Guilan, Rasht, Iran.

2- Department of textile engineering, Technical and Vocational university, Tehran, Iran

* P.O.B. 41996-13776, Rasht, Iran, mahfoozi@guilan.ac.ir

Keywords

Composite, biodegradable resin, poly vinyl alcohol, carboxymethyl cellulose (CMC), cotton fabric

Abstract

In this paper physical and biodegradable properties of green composite made of cotton fabric and biodegradable resins (starch, poly vinyl alcohol (PVA) & carboxy methyl cellulose (CMC)) prepared by a solution casting method have been studied. The obtained results show that the best tensile strength (equivalent to $27.8 \text{ MPa} \pm 2.1 \text{ MPa}$) as well as the highest amount of Young's modulus ($8.3 \text{ GPa} \pm 0.8 \text{ GPa}$), is observed in the composites made of cotton fabric content (60 vol.%), 5 wt% starch, 7 wt% PVA & 1.5 wt% CMC by weight), which is comparable to conventional composites. This property is more than just cotton fabric and the film made from biodegradable resin. Morphological examination by scanning electron microscopy shows that the composite is reinforced by cotton fibers. This is due to the strong interaction between the cotton fabric and biodegradable resin. By increasing the percentage of CMC, the resistance of composites to moisture penetration is improved. The biodegradability test shows that the addition of CMC reduces the biodegradability of the composites and the addition of starch and polyvinyl alcohol increases it. These composites can be a good candidate for high performance biodegradable polymer composites.

1-مقدمه

تجزیه پذیر، نشاسته بیشترین پتانسیل ذاتی را به‌عنوان ماده مورد استفاده در پلاستیک‌های زیست تجزیه پذیر، به سبب فراوانی طبیعی و هزینه پایین دارد. نشاسته یکی از ارزان‌ترین مواد زیست تجزیه پذیر است که در صنایع مختلف غیرغذایی، مانند ساخت کاغذ، آहार نساجی، چسب‌ها و مقوا به کار برده می‌شود

در سال‌های اخیر افزایش قیمت انرژی‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی، فرصت تازه‌ای را برای تولیدات صنعتی تهیه شده از مواد زیست تجزیه پذیر، بر پایه منابع تجدیدپذیر طبیعی به وجود آورده‌اند. در میان پلیمرهای زیست

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mahfouzi, K., Tahvili, A., "Experimental study on mechanical and physical properties of biodegradable fiber reinforced composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1563-1572, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.534454.1739>

حسین خانی و همکاران بر روی خاصیت ویسکوالاستیک چندلایه کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف بلند و وابستگی آن به زاویه الیاف، مطالعه‌ای انجام داده و خاصیت ویسکوالاستیک را با آزمون رهایی تنش، در سه زاویه الیاف صفر، 45 و 90 درجه بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که میزان کاهش مدول رهایی تنش در زوایای الیاف صفر، 45 و 90 درجه در مدت زمان 150 دقیقه، به ترتیب 5، 16 و 18 درصد مقدار اولیه هستند [8]. صالح احمدی و همکاران نیز در تحقیقی الیاف تنه درخت خرما را به عنوان تقویت‌کننده، در کامپوزیت با زمینه اپوکسی به کار گرفته، نمونه‌های کامپوزیتی را با استفاده از الیاف برش داده‌شده، به طول 1، 2 و 3 سانتی‌متر و با سه سطح از درصد حجمی الیاف، با استفاده از روش قالب‌گیری دستی تولید نموده و تحت آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای قرار داده‌اند. با افزودن الیاف خرما به اپوکسی، مدول خمشی کامپوزیت افزایش یافته است. این افزایش در نمونه‌های حاوی 7.5 و 10.7 درصد حجمی الیاف مشاهده شده که بیشترین مقدار آن به میزان 3.7 GPa در نمونه 7.5 درصد حجمی 105% (افزایش) به دست آمده است [9]. مرادی و همکاران از الیاف گیاهی پنبه و کنف و الیاف حیوانی پشم بافته‌شده ساده، به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های لایه‌ای پایه اپوکسی استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که نسبت استحکام ویژه تحت بار کششی چندلایه‌های پنبه/اپوکسی، به چندلایه‌ای تقویت‌شده با الیاف کنف یا پشم، به ترتیب برابر 1.71 و 4.47 هستند. تحت بار برشی، استحکام ویژه نمونه‌ها به ترتیب با تغییر الیاف کنف و پشم به پنبه، 1.24 و 2.45 برابر بزرگ‌تر شده است. علاوه، استحکام خمشی ویژه کامپوزیت‌های پنبه/اپوکسی، به ترتیب 1.42 و 2.34 برابر بزرگ‌تر از کامپوزیت‌های کنف/اپوکسی و پشم/اپوکسی به دست آمده‌اند. همچنین، انرژی جذب‌شده ویژه مربوط به کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/اپوکسی، تحت بار کششی 2.7 برابر بزرگ‌تر از مقدار مربوط به کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف شیشه است. در انتها نیز به منظور بررسی میزان آب جذب‌شده توسط نمونه‌های مختلف، آزمون جذب رطوبت در فواصل زمانی سه و ده روز صورت گرفته و آشکار شد که بیشترین درصد جذب آب (7.47%) مربوط به نمونه تقویت‌شده با پنبه، در بازه زمانی ده روز بوده است [10]. در تحقیق پیش‌رو از پارچه پنبه‌ای به عنوان تقویت‌کننده الیافی کامپوزیت‌های زیست تجزیه‌پذیر استفاده شده و نشاسته و PVA جهت زمینه کامپوزیت و کربوکسی متیل سلولز، برای افزایش تقویت‌کنندگی آن به کار گرفته می‌شود.

2- روش تحقیق

2-1- مواد

نشاسته گندم از شرکت نشاسته ایران تهیه شده و کربوکسی متیل سلولز گرید A، از نماینده شرکت سانروز (sunroze) ژاپن، PVA از نماینده شرکت گزینول ژاپن (GH17) و گلیسرول و دترجنت از شرکت شیمیایی پاسارگاد نوین خریداری شده‌اند. همچنین پارچه پنبه‌ای از شرکت بافت ایران تهیه شده است.

2-2- روش‌ها

2-2-1- ساخت کامپوزیت

محلول پلیمری نشاسته، پلی‌وینیل الکل و کربوکسی متیل سلولز با نسبت‌های مطابق جدول 1 تهیه شده‌اند. سپس محلول پلیمری بر روی پارچه ریخته شده و آغشته‌سازی انجام گرفته است. نمونه‌ها داخل آون با دمای 70°C به مدت 23h جهت خشک‌شدن قرار گرفته‌اند. ضخامت کامپوزیت‌ها پس از خشک‌شدن حدود 0.86 mm به دست آمد و نمونه‌ها پس از خشک‌شدن به داخل دسیکاتور انتقال داده شدند.

[1]. فیلم‌های تهیه‌شده از نشاسته، ترد و شکننده بوده و از استحکام کافی برخوردار نیستند و برای افزایش انعطاف‌پذیری آن‌ها از پلاستی‌سایزرها استفاده می‌شود. پلاستی‌سایزرهای مورد استفاده برای این منظور، آب، گلیسرین، الکل و... هستند، البته افزودن پلاستی‌سایزرها، استحکام فیلم نهایی را، به‌خصوص در رطوبت‌های بالا، کاهش می‌دهد. برای بهبود خواص مکانیکی این فیلم‌ها از مخلوط نشاسته با مواد پلی‌ساکاریدی دیگر، مانند کربوکسی متیل سلولز استفاده می‌شود. کربوکسی متیل سلولز، پلی‌ساکارید نامشابه با وزن مولکولی بالا و محلول در آب است، که اغلب به همراه نشاسته برای بهبود کیفیت نهایی منسوجات، کنترل رطوبت و آب و یا پایداری به کار می‌رود. از دیگر پلیمرهای زیست تجزیه‌پذیر، پلی‌وینیل الکل، یک ماده مصنوعی زیست تجزیه‌پذیر است، که مزایای زیادی از جمله، شکل‌پذیری فیلمی خوب، چسبندگی قوی و ثبات حرارتی بالا دارد [2]. هرچند حجم زیادی از کامپوزیت‌ها بر پایه الیاف مصنوعی هستند، اما بالا بودن هزینه آن‌ها منجر به کاهش دسترسی به آن‌ها شده است. در طی سال‌های اخیر از الیاف طبیعی برای تقویت مواد ترموپلاستیکی، به سبب دانسیته پایین و مزایای زیستی استفاده می‌شود. این الیاف به دلیل زیست تجزیه‌پذیری، می‌توانند باعث بهبود مدیریت پسماندها شده و بنابراین در ترکیب با پلیمرهای ترموپلاستیک زیست تجزیه‌پذیر، مواد کامپوزیتی با کاربردهای مختلفی ایجاد کنند [3]. ویلاسکا و همکاران کامپوزیت‌های مبتنی بر نشاسته تقویت شده با رشته‌های جوت با روش قالب‌گیری تزریقی را بررسی کرده و تأثیر میزان چسبندگی سطح الیاف و زمینه بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف جوت از 0 تا 30% استحکام تا حد پارگی از 13.2 MPa به 22.2 MPa و مدول ینگ از 600 MPa به 2470 MPa افزایش و درصد ازدیاد طول از 22.6% به 1.8% کاهش می‌یابد [4]. لو و همکاران با تحقیق بر روی کامپوزیت نشاسته و الیاف رامی مشاهده نموده با افزوده شدن الیاف به زمینه از 0 تا 40% خواص مکانیکی کامپوزیت از جمله مدول ینگ از 56 MPa تا 480 MPa و استحکام تا حد پارگی از 2.8 MPa تا 9.6 MPa افزایش یافته و باعث کاهش ازدیاد طول تا حد پارگی از 94.2% به 13.65% می‌شود. همچنین مشکل آبدوستی زیاد پلیمر نشاسته از طریق ترکیب کردن با پرکننده‌های مناسب حل می‌شود. افزوده شدن نانوکریستال‌های رامی به زمینه پلاستی‌سایز شده نشاسته، مقاومت در برابر آب را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد که دلیل آن ایجاد شبکه‌های سه بعدی از پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی که بین پرکننده با خودش و پرکننده با زمینه است که باعث مقاومت بیشتر در برابر جذب آب می‌شود [5]. خان و همکاران خواص کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده الیاف طبیعی را بررسی کردند. خواص پلیمرهای تقویت شده با الیاف طبیعی به عواملی مانند خواص الیاف و زمینه، درصد بارگذاری الیاف، طول و جهت قرارگیری الیاف، مقدار پیوند سطحی و ترکیب مواد افزودنی بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که بهترین حالت برای استحکام و مدول کامپوزیت در ترکیب 30% الی 40% وزنی الیاف حاصل می‌شود. همچنین الیاف با طول بین 20 mm تا 50 mm و مخلوط الیاف کوتاه و بلند به دلیل کاهش فضای خالی، حالت بهینه در استحکام و مدول دارد [6]. تاکاشی و همکاران خواص مکانیکی کامپوزیت پلی‌الاکتیک اسید و الیاف کنف را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با ترکیب الیاف کنف به میزان 70% حجمی در کامپوزیت، مدول ینگ 6.3 GPa و استحکام 62 MPa به دست می‌آید که قابل مقایسه با کامپوزیت‌های متداول است. این نتایج از خواص دسته الیاف کنف و نیز لایه پلیمر به تنهایی بیشتر است [7].

جدول 1 نحوه شماره‌گذاری نمونه‌های کامپوزیت

Table 1 Numbering of composite samples

درصد وزنی پلی‌وینیل الکل gr			5%			7%			9%		
درصد وزنی نشاسته gr			5%	7%	9%	5%	7%	9%	5%	7%	9%
0%	1	5	9	13	17	21	25	29	33		
0.5%	2	6	10	14	18	22	26	30	34		
1%	3	7	11	15	19	23	27	31	35		
1.5%	4	8	12	16	20	24	27	32	36		

هلند) استفاده شد و قبل از مشاهده، سطح نمونه با لایه نازکی از طلا به ضخامت حدود $100\text{\AA}$ پوشانده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- استحکام کششی کامپوزیت‌ها

خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش در شکل 1 نشان داده شده است. ویژگی‌های مکانیکی یک پلیمر یا بیوپلیمر، هم توسط اتصال‌دهنده‌های عرضی و هم توسط پلاستی‌سایزرها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. معمولاً اتصال‌دهنده‌های عرضی و پلاستی‌سایزرها، اثر متضادی بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها دارند. به‌طور کلی با افزایش میزان اتصال‌دهنده‌های عرضی، استحکام کششی افزایش و کرنش تا نقطه شکست کاهش پیدا می‌کند، درحالی‌که پلاستی‌سایزرها اثری کاملاً عکس دارند [13].

کربوکسی متیل سلولز در کامپوزیت، نقش اتصال‌دهنده عرضی را داشته و اثربخشی آن به میزان مصرف آن ارتباط دارد. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، در تمام نمونه‌ها با افزودن کربوکسی متیل سلولز تا 1.5 درصد وزنی، استحکام کششی کامپوزیت‌ها افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار استحکام کششی، $(27.8 \text{ MPa} \pm 2.1 \text{ MPa})$ در نمونه تهیه‌شده با 5 درصد وزنی نشاسته، 7 درصد وزنی PVA و 1.5 درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز مشاهده می‌شود. دلیل این پدیده ایجاد برهم‌کنش‌های بین مولکولی قوی، در بین ماکرومولکول‌های نشاسته و کربوکسی متیل سلولز، به دلیل شباهت ساختاری این دو ماده (پلی‌ساکارید بودن هر دو) است، که با تقویت شبکه بیوپلیمر، می‌توانند به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت کمک کنند.

در غلظت کم نشاسته (5%)، این تأثیر بیشتر از دو غلظت دیگر است. دلیل این امر را شاید بتوان به کاهش مقدار پلاستی‌سایز در مقادیر بالاتر نشاسته نسبت داد. با افزایش مقادیر نشاسته و کاهش تأثیر پلاستی‌سایزرها (آب و گلیسرین)، ساختار نشاسته به‌طور مناسب تخریب نشده و در نتیجه پیوندهای مستحکمی بین گروه‌های هیدروکسیل نشاسته، گروه‌های کربوکسیلی در کربوکسی متیل سلولز و گروه‌های هیدروکسیلی در پلی‌وینیل الکل تشکیل نمی‌شوند. در حالت کلی در غلظت‌های بالاتر نشاسته، 7% و 9% نمونه‌ها حالت ترد و شکننده‌تری به خود گرفته و خواص مکانیکی پایین‌تری را نسبت به غلظت 5% نشاسته از خود نشان می‌دهند. با افزایش مقدار کربوکسی متیل سلولز، میزان کرنش کامپوزیت‌ها برخلاف استحکام کششی کاهش می‌یابند. دلیل این کاهش کرنش را می‌توان برقراری پیوندهای مناسب بین اجزای کامپوزیت‌ها دانست. نمونه‌های کامپوزیتی که در آن‌ها از کربوکسی متیل سلولز استفاده نشده، دارای کرنش بیشتری در مقایسه با کامپوزیت‌های حاوی کربوکسی متیل سلولز هستند. در کامپوزیت‌های پایه پلیمری، الیاف در تغییر شکل الاستیکی تا نقطه شکست نقش بسزایی دارند، درحالی‌که بخش پلیمری متحمل تغییر شکل پلاستیکی بعد از کرنش است. به‌طور کلی تغییر شکل

2-2- اندازه‌گیری خواص مکانیکی

استحکام کششی، کرنش تا شکست و مدول ینگ کامپوزیت‌ها با استفاده از دستگاه استحکام‌سنج شرلی، ساخت کشور انگلستان و بر طبق استاندارد ASTM D882 اندازه‌گیری شد

ابتدا نمونه‌ها به‌مدت $24h$ در (رطوبت نسبی 55% و دمای 25°C) شرایطی شدند. سپس ده نمونه از هر یک از کامپوزیت‌های ساخته‌شده، به شکل چهارگوش و با ابعاد $10 \times 1.5 \text{ cm}$ بریده شد و بین دو فک دستگاه قرار گرفت. فاصله اولیه دو فک و سرعت حرکت فک بالایی به ترتیب، 8 cm و 5 mm/min بوده و داده‌ها پس از تعیین، ثبت شدند.

2-2-3- اندازه‌گیری جذب رطوبت

برای اندازه‌گیری جذب رطوبت، از روش Rui-Hua Hu و همکارانش، البته با کمی تغییر استفاده شد [11]. دلیل انتخاب این روش بررسی جذب رطوبت کامپوزیت در شرایط محیطی مرطوب و گرم است و این روش به جهت شبیه‌سازی مناسب شرایط ذکر شده، استفاده می‌شود.

ابتدا نمونه‌ها در دمای 50°C به‌مدت $7h$ خشک شدند. از نمونه‌های کامپوزیتی خشک‌شده، نمونه‌های $2 \times 2 \text{ cm}$ تهیه شده و در داخل دسیکاتور حاوی سولفات کلسیم ($RH = 0\%$) به‌مدت $24h$ قرار گرفتند. پس از توزین اولیه، نمونه‌ها داخل جعبه پوشیده‌شده قرار گرفتند که جعبه حاوی مقداری آب در کف آن بود. سپس جعبه حاوی نمونه‌ها داخل آن با دمای 70°C به‌مدت $24h$ قرار گرفت. رطوبت سطحی نمونه‌ها با دستمال کاغذی پاک شده و وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که جذب رطوبت نمونه‌ها W_m ، از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$W_m = (W_e - W_o)/W_o \quad (1)$$

W_e وزن نمونه‌ها در حالت تعادل رطوبتی و W_o وزن خشک اولیه نمونه‌ها است.

2-2-4- آزمون زیست تجزیه‌پذیری

برای اندازه‌گیری میزان تجزیه‌پذیری نمونه‌ها از روش Thakore IM و همکارانش، البته با کمی تغییر استفاده شد [12]. ابتدا نمونه‌هایی با ابعاد $3 \times 3 \text{ cm}$ تهیه شده و سپس در داخل جعبه‌ای حاوی خاک، با 20-30% رطوبت در عمق 5 cm دفن شدند. بعد از آن نمونه‌ها در داخل دسیکاتور با رطوبت نسبی 75% و دمای 25°C قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از 25 روز از داخل خاک بیرون آورده شده، با آب شستشو داده شده و در آن با دمای 60°C خشک شدند تا به یک وزن ثابت رسیدند. سپس وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و درصد کاهش وزن، مبنای آزمایش زیست تجزیه‌پذیری قرار گرفت.

2-2-5- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی‌های سطحی و همچنین سطح شکست کامپوزیت‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل XL30، ساخت شرکت Philips از کشور

شکل 2 (الف، ب و پ)، تأثیر مقدار نشاسته را بر روی استحکام کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد. در شکل 2 (الف و پ) با افزایش مقدار نشاسته، استحکام کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد، اما از یک حد بهینه برخوردار هستند. در شکل 2 (ب) با افزایش غلظت نشاسته، کاهش استحکام مشاهده می‌شود. به‌طور کلی از آنجایی که پیوند بین نشاسته و پلی‌وینیل الکل از استحکام بالایی برخوردار نیست، از کربوکسی متیل سلولز به‌عنوان اتصال‌دهنده عرضی استفاده می‌شود، که این امر در شکل قابل مشاهده است. با افزایش نشاسته، در غلظت 5% پلی‌وینیل الکل، روند افزایش استحکام از غلظت 9% پلی‌وینیل الکل منظم‌تر است.

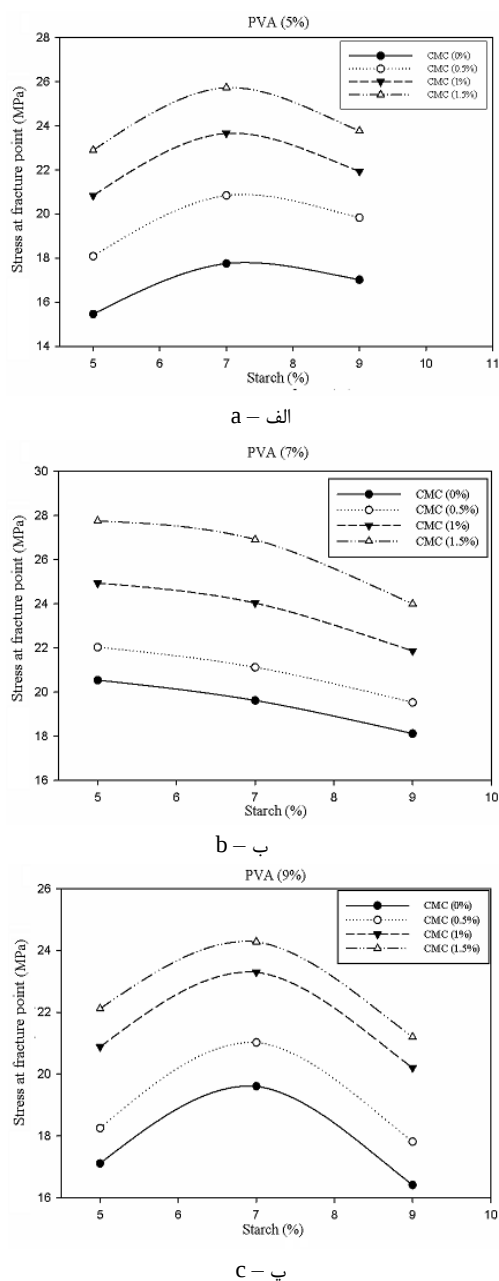


Fig. 2 Effect of starch content on the stress fracture point of composite (a) contains 5% polyvinyl alcohol, (b) contains 7% polyvinyl alcohol, (c) contains 9% polyvinyl alcohol

شکل 2 تأثیر میزان نشاسته، بر روی تنش کرنش در نقطه پارگی کامپوزیت، (الف) دارای 5% پلی‌وینیل الکل، (ب) دارای 7% پلی‌وینیل الکل، (پ) دارای 9% پلی‌وینیل الکل

نهایی الیاف (ϵ_f)، در نقطه شکست کامپوزیت اندازه‌گیری می‌شود، از این‌رو تغییر شکل بخش پلیمری (ϵ_m) بزرگ‌تر از الیاف است [14]. علت این امر می‌تواند اول به دلیل خواص ذاتی پلی‌وینیل الکل و دوم به دلیل استفاده از مقدار مناسب نشاسته تخریب‌شده در ترکیب با پلی‌وینیل الکل باشد، که خواص پلاستیکی خوبی ایجاد می‌کنند. بیشترین میزان کرنش ($8.46\% \pm 1.1\%$) در شکل 1 (الف)، در نمونه‌ای حاوی 5% نشاسته و 5% پلی‌وینیل الکل مشاهده می‌شود. کمترین میزان کرنش 3.4% در نمونه تهیه‌شده با 7% نشاسته، 7% پلی‌وینیل الکل و 1.5% کربوکسی متیل سلولز است.

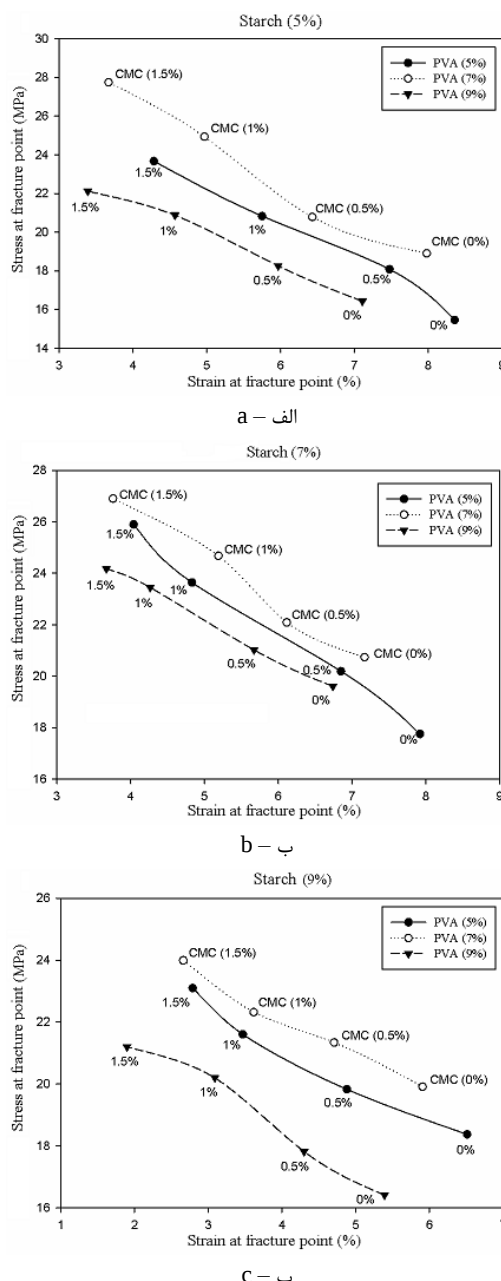


Fig. 1 Effect of carboxymethylcellulose on the stress-strain at fracture point of composites (a) containing 5% starch, (b) containing 7% starch, (c) containing 9% starch

شکل 1 تأثیر میزان کربوکسی متیل سلولز، بر روی تنش-کرنش در نقطه پارگی کامپوزیت‌ها، (الف) دارای 5% نشاسته، (ب) دارای 7% نشاسته، (پ) دارای 9% نشاسته

2-3-مدول یانگ کامپوزیت‌ها

مدول یانگ میزان افزایش استحکام کامپوزیت در کرنش کم را نشان می‌دهد. به منظور محاسبه مدول یانگ از فرمول (2) استفاده شد.

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (2)$$

که در فرمول، E نشان دهنده مدول یانگ، σ تنش در محور آزمایش و ε کرنش است. همان‌گونه که شکل 3 (الف، ب و پ) نشان می‌دهد، با افزایش مقدار کربوکسی متیل سلولز از 0% به 1.5%، مقدار مدول یانگ افزایش پیدا می‌کند. این افزایش مدول در غلظت 7% پلی‌وینیل الکل برای هر سه منحنی شکل 3 بیشتر است.

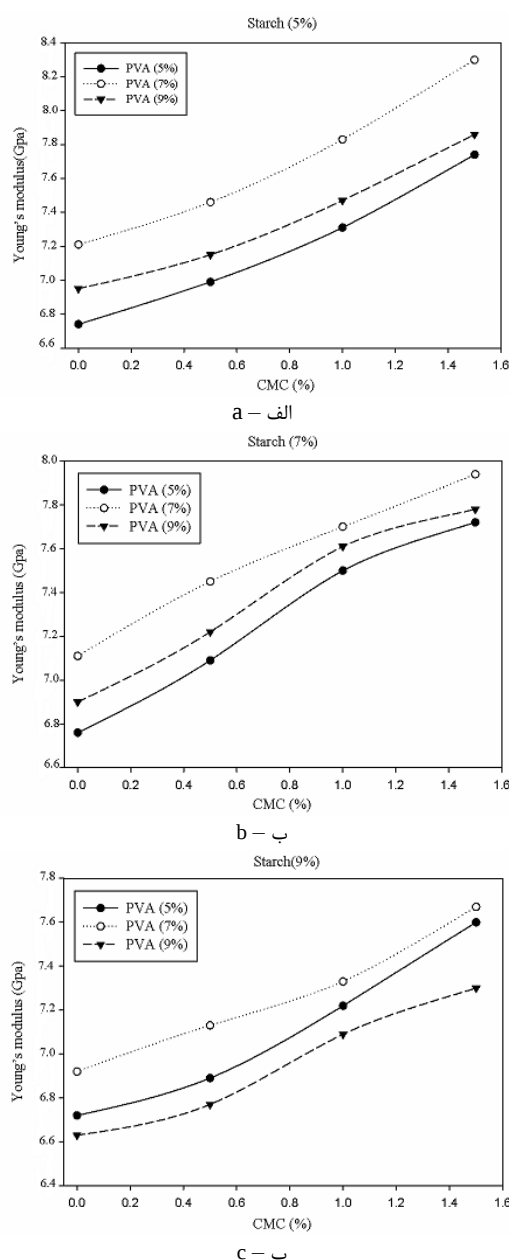


Fig. 3 The effect of carboxymethylcellulose on the Young's modulus of composites, (a) containing 5% starch, (b) containing 7% starch, (c) containing 9% of starch

شکل 3 تأثیر میزان کربوکسی متیل سلولز بر مدول یانگ کامپوزیت‌ها، (الف) دارای 5% نشاسته، (ب) دارای 7% نشاسته، (پ) دارای 9% نشاسته

بیشترین مقدار مدول یانگ ($8.3 \text{ GPa} \pm 0.8 \text{ GPa}$)، در نمونه تهیه‌شده با 5% نشاسته، 7% پلی‌وینیل الکل و 1.5% کربوکسی متیل سلولز مشاهده می‌شود. در شکل 3 (الف و ب)، مقدار مدول یانگ برای غلظت 9% پلی‌وینیل الکل، بیشتر از غلظت 5% آن بوده، درحالی‌که در شکل 3 (پ)، این قضیه معکوس است. در غلظت 9% و 5% پلی‌وینیل الکل، مقدار مدول کمتر نسبت به غلظت 7% پلی‌وینیل الکل ملاحظه می‌شود، که این مقدار کاهش در غلظت 5% نشاسته، محسوس‌تر از دیگر غلظت‌های نشاسته است. در شکل 3 (الف و ب) در غلظت‌های 7% و 5% نشاسته، با افزایش مقدار پلی‌وینیل الکل، افزایش مدول مشاهده می‌شود، اما حالت بهینه‌ای دارد. در غلظت 7% پلی‌وینیل الکل، بیشترین مقدار مدول یانگ دیده می‌شود. در این غلظت مقدار نشاسته پخش‌شده در آب، بهتر مورد تخریب ساختاری توسط آب و گلیسرین قرار گرفته و با افزایش پلی‌وینیل الکل و کربوکسی متیل سلولز، احتمال ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسی در نشاسته و پلی‌وینیل الکل و همچنین گروه‌های کربوکسی متیل سلولز افزایش می‌یابد. پیوندهای هیدروژنی، پیوندهای بسیار محکمی نیستند، اما به دلیل فراوانی می‌توانند ساختار محکمی را ایجاد کنند. این روند در غلظت 9% نشاسته نیز وجود دارد، اما مقدار مدول یانگ در غلظت 9% پلی‌وینیل الکل، کمتر از مقدار مدول یانگ در غلظت 5% آن است. در غلظت 9% نشاسته، به دلیل بالا بودن میزان غلظت نشاسته و پلی‌وینیل الکل نسبت به حالت‌های دیگر، کاهش میزان پلاستی‌سایزر نسبت به مقدار نشاسته استفاده‌شده، موجب عدم شکسته‌شدن مناسب دانه‌های نشاسته می‌شود. به دنبال آن حالت ژله‌ای مناسب ایجاد نشده و در نتیجه ترکیب ناهم‌آهنگی بین اجزای کامپوزیت برقرار شده و خواص مکانیکی کاهش پیدا می‌کنند.

3-3-تأثیر مقدار محتوی پارچه پنبه‌ای

شکل 4 (الف، ب) تأثیر مقدار محتوی پارچه پنبه‌ای را بر روی استحکام کششی و مدول یانگ کامپوزیت‌ها در حالت بهینه نشاسته 5%، پلی‌وینیل الکل 7% و کربوکسی متیل سلولز 1.5% نشان می‌دهد.

تأثیر محتوی پنبه‌ای از 0 تا 100% بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بررسی می‌شود. از نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار محتوی پنبه‌ای 0 تا 60%، استحکام کششی و مدول یانگ افزایش می‌یابد. پس از آن نیز با افزایش بیشتر مقدار محتوی پنبه‌ای، استحکام کششی و مدول یانگ کامپوزیت‌ها کاهش پیدا می‌کند. بالاترین مقدار استحکام کششی (27.9 MPa) و مدول یانگ ($8.3 \text{ GPa} \pm 0.8 \text{ GPa}$)، در محتوی پنبه‌ای حدود 60% مشاهده شد که این مقادیر با کامپوزیت‌های متداول قابل مقایسه هستند. کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها در مقدار محتوی پنبه‌ای بیش از 60%، به سبب کاهش مقدار زمینه و ناکافی بودن مقدار آن برای نگه‌داری پارچه در داخل خود است. در این حالت با کاهش مقدار مناسب زمینه، فصل مشترک الیاف با زمینه ضعیف شده و انتقال نیرو به‌طور کامل از زمینه به الیاف صورت نمی‌گیرد. در این حالت نیرو بیشتر به الیاف وارد شده و در نتیجه خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد.

4-3-بررسی مورفولوژیکی

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته‌شده از نمونه‌های کامپوزیتی را در محتوی 60% وزنی الیافی نشان می‌دهد. شکل 5 (الف) تصویری از سطح نمونه کامپوزیتی است که در آن سطح صاف و یکنواخت کامپوزیت مشاهده می‌شود. با این وجود در برخی از نقاط، تجمع مواد پلیمری به چشم می‌خورد، اما در حالت کلی کامپوزیت از سطح صاف و یکنواختی برخوردار است. این یکنواختی سطح می‌تواند بیانگر ترکیب خوب مواد پلیمری با یکدیگر باشند.

شکل 5 (پ) تصویر ترکیب مناسب زمینه با پارچه پنبه‌ای را نشان می‌دهد که در آن فضاهای خالی بین نخ‌ها با زمینه پر شده‌اند و سطح صاف و یکنواختی را به وجود آورده‌اند. وجود فضاهای خالی و خلل و فرج‌ها در کامپوزیت، موجب تمرکز تنش در نقاط خالی و در نتیجه کاهش استحکام و در برخی مواقع، سبب شکست کامپوزیت می‌شود.

شکل 5 (ت) تصویری از سطح شکست کامپوزیت را، بعد از آزمون کشش نشان می‌دهد و بیرون کشیدگی نخ‌ها از درون زمینه کاملاً مشهود هستند. این تصویر در حقیقت بیانگر تقویت‌کنندگی کامپوزیت توسط الیاف است، زیرا نیروی وارده به کامپوزیت، ابتدا به زمینه وارد شده و سپس به الیاف وارد می‌شود. از آنجایی که سطح شکست کامپوزیت به صورت صاف نبوده و بیرون کشیدگی الیاف از درون زمینه مشهود است، در نتیجه می‌توان به اثر تقویت‌کنندگی الیاف پی برد.

3-5- مقایسه استحکام کششی (زمینه، الیاف و کامپوزیت)

شکل 6 منحنی‌های تنش-کرنش پارچه پنبه‌ای، فیلم تهیه‌شده از زمینه و کامپوزیت پنبه/زمینه را در محتوی الیاف 60% نشان می‌دهد. مقدار مدول یانگ و استحکام کششی کامپوزیت، از فیلم تهیه‌شده از زمینه بالاتر است. به طور کلی این مسئله نشان‌دهنده اثر تقویت‌کننده پارچه پنبه‌ای داخل زمینه بوده و خواص مکانیکی کامپوزیت، حتی در مقایسه با پارچه تنها نیز بالاتر است. در اینجا می‌توان به برهم‌کنش قوی بین زمینه و پارچه پنبه‌ای پی برد. همان‌گونه که در شکل 6 دیده می‌شود، مقدار استحکام کششی و مدول یانگ پارچه، بالاتر از فیلم تهیه‌شده از زمینه است، در نتیجه می‌توان به تأثیر تقویت‌کننده پارچه در کامپوزیت پی برد. کرنش فیلم تهیه‌شده از زمینه در مقایسه با پارچه و کامپوزیت، از مقدار بیشتری برخوردار است.

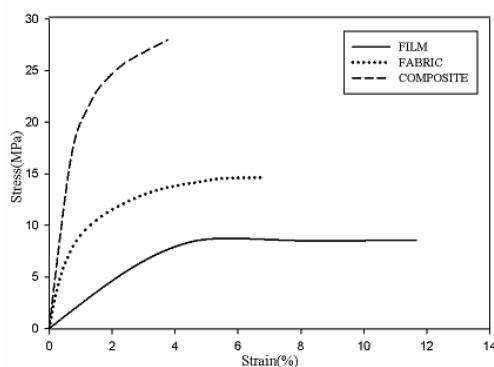


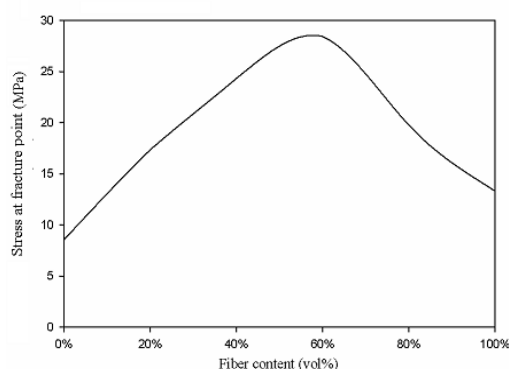
Fig. 6 Stress Strain curve (film, fabric, composite)

شکل 6 منحنی تنش کرنش (فیلم، پارچه، کامپوزیت)

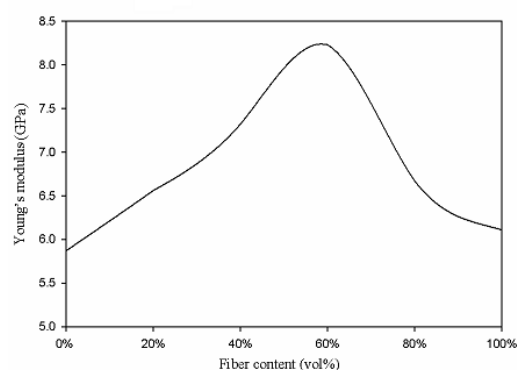
3-6- جذب رطوبت کامپوزیت‌ها

شکل 7 تأثیر میزان کربوکسی متیل سلولز بر روی میزان جذب رطوبت نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد. بیشترین جذب رطوبت (143.6%) در نمونه‌های حاوی 9% نشاسته و 9% پلی‌وینیل الکل، بدون حضور کربوکسی متیل سلولز مشاهده می‌شود. این در حالی است که با افزایش مقدار کربوکسی متیل سلولز، میزان جذب رطوبت به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. کمترین مقدار جذب رطوبت (81.6%) در نمونه‌های حاوی 5% نشاسته، 7% پلی‌وینیل الکل و 1.5% کربوکسی متیل سلولز دیده می‌شود. این مسئله نشان می‌دهد که کربوکسی متیل سلولز، قادر است مقاومت کامپوزیت‌ها را در برابر رطوبت افزایش دهد. به احتمال زیاد نشاسته قادر است با گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل کربوکسی متیل سلولز تشکیل پیوند داده و ایجاد این ساختار

شکل 5 (ب) تصویری از پارچه پنبه‌ای تار و پودی ساده را بدون زمینه نشان می‌دهد که در آن فضاهای خالی در بین نخ‌های پارچه قابل مشاهده هستند.



الف - ا



ب - ب

Fig. 4 Effect of Cotton Fabric Content on (a) Stress, (b) Young's Modulus of Composites

شکل 4 تأثیر مقدار محتوی پارچه پنبه‌ای بر روی الف- استحکام کششی، ب) مدول یانگ کامپوزیت‌ها

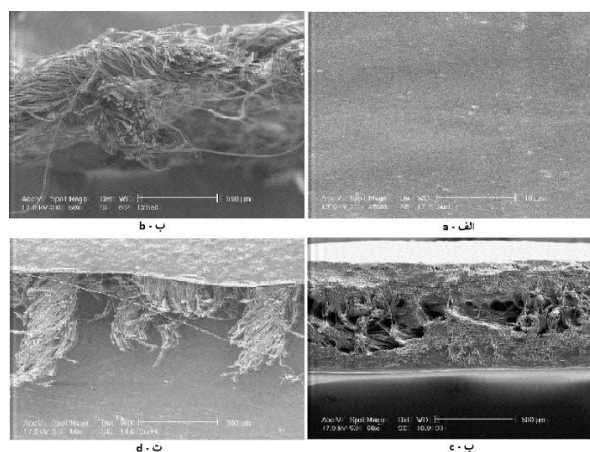


Fig. 5 Electron microscope images of composite samples containing 60% of fibers, (a) Composite sample surface, (b) Cotton fabric without matrix, (c) Appropriate combination of matrix and cotton fabric, (d) Composite failure after tensile test

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته‌شده از نمونه‌های کامپوزیتی، در محتوی 60% الیاف، (الف) سطح نمونه کامپوزیتی، (ب) پارچه پنبه‌ای بدون زمینه، (پ) ترکیب مناسب زمینه و پارچه پنبه‌ای، (ت) شکست کامپوزیت بعد از آزمون کشش

تأثیر مقدار نشاسته بر روی میزان جذب رطوبت کامپوزیت‌ها، در شکل 8 (الف، ب و پ) نشان داده شده است. با افزایش مقدار پلی‌وینیل الکل، میزان جذب رطوبت کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. نشاسته ماده‌ای کاملاً آب‌دوست است و ترکیب پلی‌وینیل الکل یا نشاسته، مقدار کمی از میزان جذب رطوبت کامپوزیت‌های حاصل از آن‌ها را کاهش می‌دهد. این مسئله می‌تواند به دلیل آب‌دوستی پایین‌تر پلی‌وینیل الکل نسبت به نشاسته باشد، اما در حالت کلی میزان جذب رطوبت کامپوزیت‌ها بالا است.

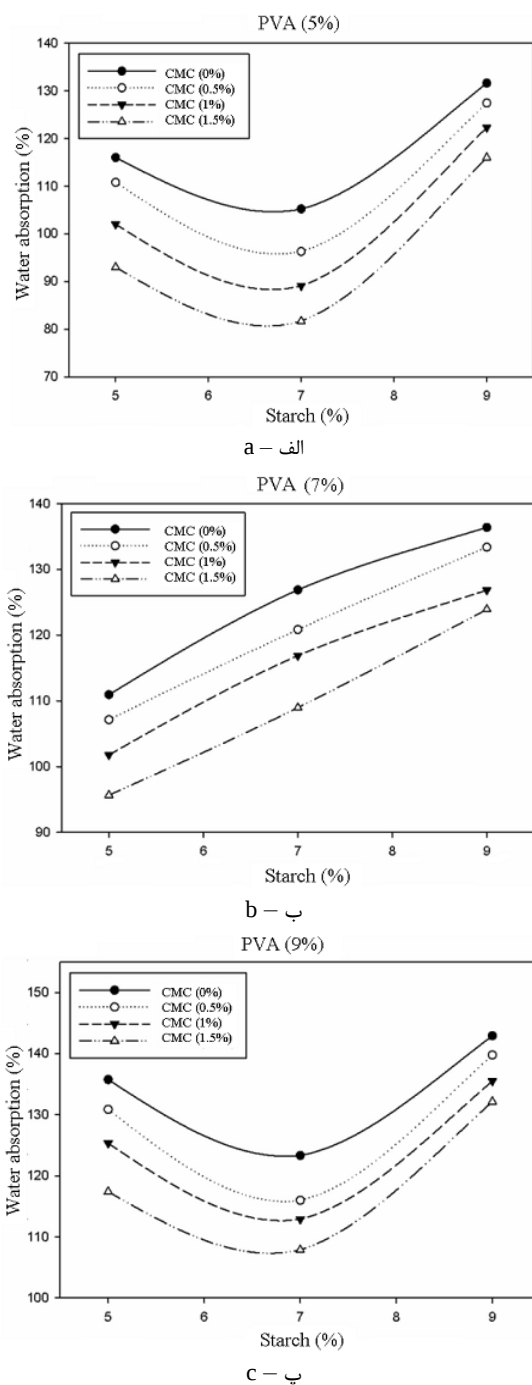


Fig. 8 Effect of starch content on the moisture absorption of composites (a) containing 5% polyvinyl alcohol, (b) containing 7% polyvinyl alcohol, (c) containing 9% polyvinyl alcohol

شکل 8 تأثیر میزان نشاسته بر روی جذب رطوبت کامپوزیت‌ها، دارای 5% پلی‌وینیل الکل، (ب) دارای 7% پلی‌وینیل الکل، (پ) دارای 9% پلی‌وینیل الکل

محکم، می‌تواند سرعت نفوذ مولکول‌های آب را به درون کامپوزیت‌ها کاهش دهد. اما همان‌طور که در شکل 7 دیده می‌شود، با وجود کاهش میزان جذب رطوبت، بر اثر افزایش مقدار کربوکسی متیل سلولز، همچنان میزان جذب رطوبت کامپوزیت‌ها بالا است. مقاومت کربوکسی متیل سلولز در برابر رطوبت بیشتر از نشاسته است و از طرف دیگر افزودن کربوکسی متیل سلولز، مسیر پریپیچ و خمی را برای نفوذ مولکول‌های آب ایجاد کرده و باعث کاهش نفوذ آب در ساختار کامپوزیت می‌شود [15]. این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن کربوکسی متیل سلولز تا یک حد معین، می‌تواند ویژگی بازدارندگی در برابر رطوبت را بهبود بخشد، زیرا کربوکسی متیل سلولز ماده‌ای آب‌دوست به حساب می‌آید، هرچند که آب‌دوستی آن کمتر از نشاسته است.

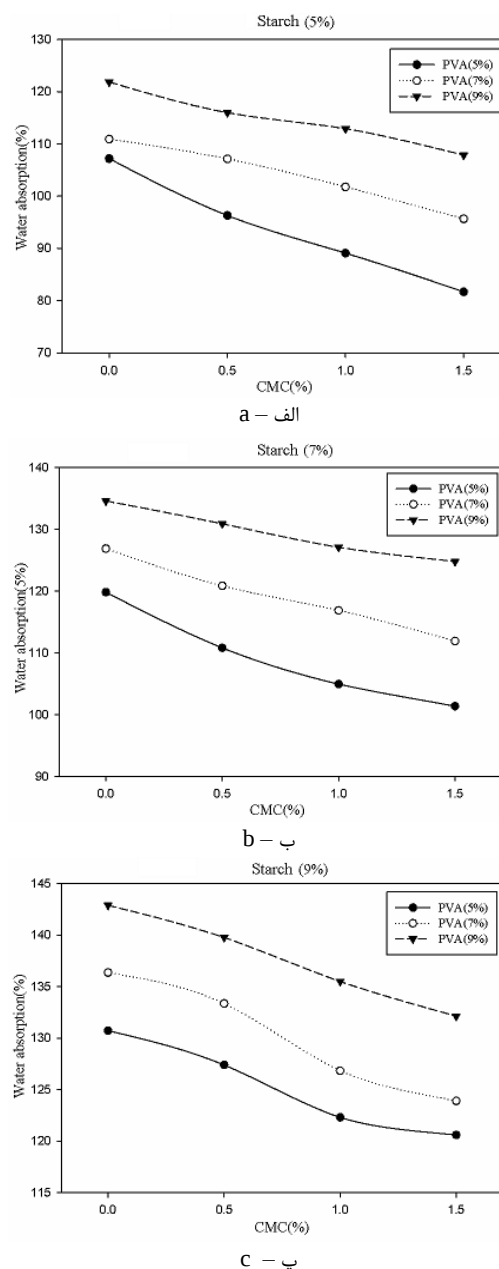


Fig. 7 The effect of carboxymethylcellulose on the water absorption curve of composites (a) containing 5% starch, (b) containing 7% starch, (c) containing 9% starch

شکل 7 تأثیر میزان کربوکسی متیل سلولز، بر روی منحنی جذب آب کامپوزیت‌ها، (الف) دارای 5% نشاسته، (ب) دارای 7% نشاسته، (پ) دارای 9% نشاسته

تجزیه پذیری بالای پلی وینیل الکل است. در نمونه‌های فاقد کربوکسی متیل سلولز، به دلیل وجود پیوندهای ضعیف‌تر نسبت به نمونه‌هایی که کربوکسی متیل سلولز وجود دارند، جذب رطوبت بیشتر را برای کامپوزیت‌ها ایجاد کرده و موجب شکست بیشتر پیوندها و در نتیجه کاهش وزن بیشتر می‌شود. پس با افزایش مقدار نشاسته و همچنین مقدار پلی وینیل الکل، جذب رطوبت کامپوزیت‌ها افزایش یافته، به دنبال آن شرایط مناسب برای رشد میکرواورگانیزم‌ها فراهم شده و در نتیجه میکرواورگانیزم موجب تجزیه کامپوزیت‌ها می‌شود [18].

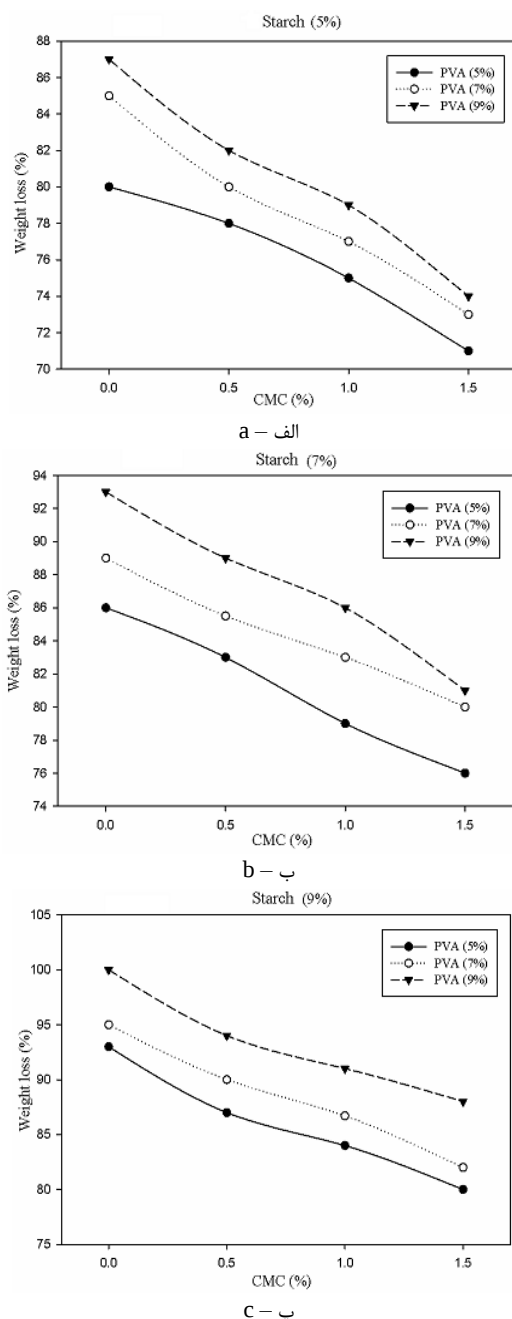


Fig. 9 Effect of CMC on the biodegradability of composites (a) contains 5% starch, (b) contains 7% starch, (c) contains 9% starch

شکل 9 تأثیر میزان کربوکسی متیل سلولز، بر روی زیست تجزیه پذیری کامپوزیت‌ها، الف) دارای 5% نشاسته، ب) دارای 7% نشاسته، پ) دارای 9% نشاسته

با توجه به شکل 8، نمونه‌های حاوی نشاسته بیشتر، از جذب رطوبت بالاتری برخوردار هستند. در شکل 8 (الف و پ)، در غلظت 7% نشاسته، جذب رطوبت کامپوزیت‌ها به کمترین مقدار خود رسیده و با افزایش مقدار نشاسته، جذب رطوبت افزایش می‌یابد. اما در غلظت 7% نشاسته شکل 8 (ب)، این روند متفاوت بوده و با افزایش مقدار نشاسته، میزان جذب رطوبت افزایش پیدا می‌کند. دلیل این پدیده را می‌توان به بالا بودن استحکام و مدول ینانگ در این غلظت نسبت داد. اگرچه کامپوزیت‌های حاوی کربوکسی متیل سلولز استحکام خوبی دارند، مولکول‌های آب ابتدا بر روی سطح کامپوزیت‌ها جمع شده و مقداری جذب سطح می‌شوند، که در اصطلاح «جذب سطحی» نام دارند. سپس با افزایش هرچه بیشتر مولکول‌های آب بر روی سطح کامپوزیت‌ها، فشار آن‌ها برای نفوذ به داخل کامپوزیت‌ها افزایش یافته و مولکول‌های آب به داخل کامپوزیت‌ها نفوذ می‌کنند. با این وجود این مقدار نفوذ به اندازه‌ای نیست که بتواند موجب از هم گسیختگی کامپوزیت‌ها شود. با افزایش مولکول‌های آب، به دلیل خاصیت جذب رطوبت مواد پلی ساکاریدی (نشاسته و کربوکسی متیل سلولز) و پلی وینیل الکل، میزان جذب رطوبت کامپوزیت‌ها بالا می‌رود. همچنین مقداری از مولکول‌های آب به دلیل اثر موبینگ، توانایی قرارگیری در ساختار توخالی الیاف را دارند، که این امر می‌تواند سبب افزایش میزان جذب رطوبت کامپوزیت‌ها شود.

3-7-زیست تجزیه پذیری کامپوزیت‌ها

مطالعه تجزیه کامپوزیت‌های زیستی آنچنان مهم است، که می‌تواند به عنوان هدفی برای ساخت کامپوزیت‌های زیستی باشد [16]. نتایج به دست آمده از تجزیه کامپوزیت‌ها براساس مقادیر مختلف نشاسته، پلی وینیل الکی و کربوکسی متیل سلولز بعد از گذشت 25 روز نشان داده شده است. اندازه گیری مقدار کاهش وزن نمونه‌های کامپوزیتی، در مقدار محتوی الیاف سلولزی 60% انجام شده است. همان گونه که در شکل 9 (الف، ب و پ) دیده می‌شود، با افزایش مقدار کربوکسی متیل سلولز، کاهش وزنی کمتری در نمونه‌های کامپوزیتی به وجود می‌آید، که این کاهش وزن، معیاری برای اندازه گیری میزان زیست تجزیه پذیری کامپوزیت‌ها است. ارزیابی زیست تجزیه پذیری، اغلب براساس کاهش وزن مواد وابسته به تجزیه مولکول‌ها در فاز جامد است. آزمون تجزیه در خاک، مستقیم به تجزیه زیستی اشاره دارد. اگر نمونه‌ها داخل خاک با شرایط آب و هوایی و میکرواورگانیزم‌های مناسب قرار گیرند، در مقایسه با آزمون آنزیمی این روش مؤثرتر است [17]. طبق شکل 9، با افزایش مقدار کربوکسی متیل سلولز، وزن کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش وزن را می‌توان ناشی از ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین کربوکسی متیل سلولز، نشاسته و پلی وینیل الکل دانست. اما این پیوندها آنچنان مستحکم نیستند که مولکول‌های آب توانایی نفوذ بین آن‌ها را نداشته باشند. کمترین مقدار تجزیه (71.32%)، برای نمونه حاوی 5% نشاسته، 7% پلی وینیل الکل و 1.5% کربوکسی متیل سلولز است.

کربوکسی متیل سلولز قابلیت امتزاج پذیری و سازگاری با نشاسته و پلی وینیل الکل را برای تشکیل ساختار متراکم‌تر دارد. همین دلیل باعث کاهش نفوذ میکرواورگانیزم‌ها می‌شود، اما این کاهش نفوذ چندان بالا نبوده و نمونه به مقدار قابل توجهی تجزیه می‌شود.

در شکل 10 (الف، پ) کمترین مقدار کاهش وزن در غلظت 7% نشاسته مشاهده می‌شود، که با افزایش مقدار نشاسته مقدار کاهش وزن افزایش می‌یابد. این در حالی است که در شکل 10 (ب) با افزایش مقدار نشاسته، مقدار کاهش وزن افزایش پیدا می‌کند. در حالت کلی با افزایش مقدار پلی وینیل الکل از 5% به 9%، کاهش وزن بیشتری ملاحظه می‌شود، که ناشی از آب دوستی و زیست

الیاف سلولزی به دلیل خاصیت آمورفی و همچنین وجود کانال‌های توخالی در ساختار خود، به‌طور طبیعی مورد هجوم میکروب‌ها قرار گرفته و تجزیه می‌شوند [19]. از آنجایی که تمام مواد مورد استفاده در ساخت این کامپوزیت‌ها قطبی هستند، بیشتر مورد حمله میکروب‌ها قرار می‌گیرند. زمانی که نمونه‌ها آب را جذب می‌کنند، آب به‌عنوان پلاستی‌سایزر عمل کرده و میان پیوندهای هیدروژنی تشکیل‌شده بین نشاسته، پلی‌وینیل الکل و کربوکسی متیل سلولز قرار می‌گیرد. سپس پیوندها را سست و نرم کرده و بعد از گذشت مدت زمان کافی، باعث شکسته‌شدن پیوندها می‌شود. با ازبین‌رفتن پیکره ساختاری کامپوزیت‌ها، میکرواورگانیزم‌ها از نقاطی که پیوندها ضعیف شده‌اند، به کامپوزیت‌ها حمله کرده و در نهایت موجب تجزیه آن‌ها می‌شوند.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کامپوزیت‌های دوستدار محیط‌زیست از پارچه پنبه‌ای و زمینه زیست تجزیه‌پذیر تهیه شدند. این کامپوزیت‌ها دارای خواص مکانیکی خوبی بودند، که نشان‌دهنده برهم‌کنش قوی بین پارچه پنبه‌ای و رزین زیست تجزیه‌پذیر است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که با افزودن کربوکسی متیل سلولز به کامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی آن‌ها بهبود یافته و جذب رطوبت کاهش پیدا می‌کند.

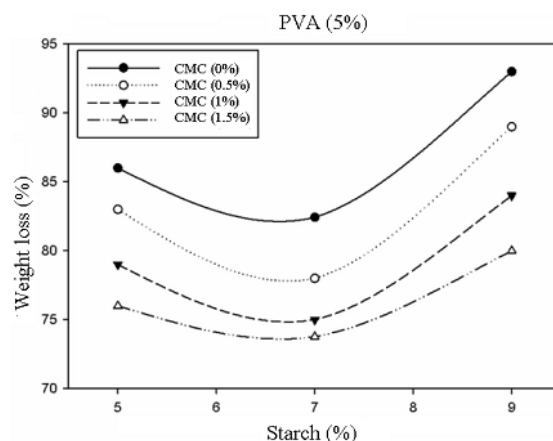
بیشترین مقدار استحکام کششی ($27.8 \text{ MPa} \pm 2.1 \text{ MPa}$) و مدول ینگ ($8.3 \text{ GPa} \pm 0.8 \text{ GPa}$) و همچنین کمترین میزان کرنش ($3.4\% \pm 1.1\%$) در نمونه‌ای با 5% نشاسته، 7% پلی‌وینیل الکل و 1.5% کربوکسی متیل سلولز مشاهده شد. بیشترین میزان کرنش ($8.46\% \pm 1.1\%$) در نمونه حاوی 5% نشاسته، 5% پلی‌وینیل الکل و فاقد کربوکسی متیل سلولز است. مقادیر به دست آمده خواص مکانیکی با مقایسه سایر مطالعات انجام شده، قابل ملاحظه است. در بررسی کامپوزیت‌های مبتنی بر نشاسته تقویت شده با رشته‌های جوت با روش قالب‌گیری تزریقی و ارزیابی آن، نشان می‌دهد که در 30% الیاف جوت، استحکام تا حد پارگی 22.2 MPa و مدول ینگ 2470 MPa و درصد ازدیاد طول 1.8% می‌شود [4]. در تحقیق بر روی کامپوزیت نشاسته و الیاف رامی نیز با افزوده شدن الیاف به زمینه تا 40% خواص مکانیکی کامپوزیت از جمله مدول ینگ تا 480 MPa و استحکام تا حد پارگی تا 9.6 MPa و باعث کاهش ازدیاد طول تا حد پارگی به 13.65% می‌شود [5]. در بررسی کامپوزیت پلی‌ال لاکتیک اسید و الیاف کنف نتایج نشان می‌دهد که با ترکیب الیاف کنف به میزان 70% حجمی در کامپوزیت، مدول ینگ 6.3 GPa و استحکام 62 MPa به دست [7].

با افزایش مقدار محتوی کربوکسی متیل سلولز، مقاومت کامپوزیت‌ها در برابر نفوذ آب و رطوبت‌پذیری بهبود یافت. کمترین مقدار جذب رطوبت (81.46%) در نمونه حاوی 5% نشاسته، 7% پلی‌وینیل الکل و 1.5% کربوکسی متیل سلولز دیده شد. همچنین بیشترین جذب رطوبت (143.6%) در نمونه حاوی 9% نشاسته، 9% پلی‌وینیل الکل و بدون کربوکسی متیل سلولز مشاهده شد.

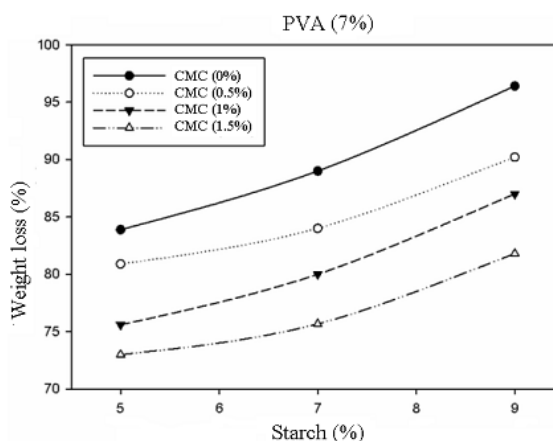
آزمایش تجزیه در خاک کامپوزیت نشان داد که افزودن کربوکسی متیل سلولز، بر روی زیست تجزیه‌پذیری تأثیر کمتری دارد. کمترین مقدار تجزیه در نمونه حاوی 5% نشاسته، 7% پلی‌وینیل الکل و 1.5% کربوکسی متیل سلولز است. اگرچه با افزایش مقدار کربوکسی متیل سلولز میزان تجزیه‌پذیری کاهش می‌یابد، اما در حالت کلی تجزیه‌پذیری نمونه‌ها خوب است.

با افزایش مقدار محتوی پارچه تا 60%، افزایش خواص مکانیکی مشاهده شد. در مقایسه با تحقیقات انجام شده، مقدار درصد الیاف جوت تا 30% وزنی

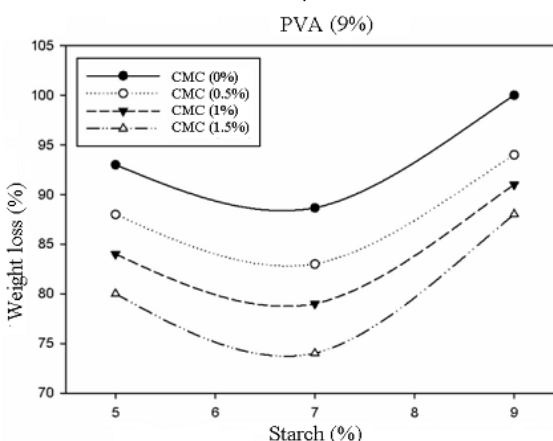
زمینه کامپوزیت‌ها زودتر از پارچه سلولزی مورد حمله میکرواورگانیزم‌ها قرار می‌گیرند. این مسئله به دلیل جذب رطوبت بالای زمینه، نسبت به الیاف سلولزی است و می‌تواند منجر به کاهش استحکام بین الیاف و زمینه و در نتیجه تجزیه کامپوزیت‌ها شود. نواحی کریستالی به دلیل ساختار محکم، کمتر مورد حمله باکتری‌ها و میکروب‌ها قرار می‌گیرند.



الف -



ب -



پ -

Fig. 10 Effect of starch content on biodegradability of composites (a) containing 5% polyvinyl alcohol, (b) containing 7% polyvinyl alcohol, (c) containing 9% polyvinyl alcohol

شکل 10 - تأثیر میزان نشاسته، بر روی زیست تجزیه‌پذیری کامپوزیت‌ها، الف) دارای 5% پلی‌وینیل الکل، ب) دارای 7% پلی‌وینیل الکل، پ) دارای 9% پلی‌وینیل الکل

- [17]. Hadano, S., Maehara, S., Onimura, K., Yamasaki, H., Tsutsumi, H., and Oishi, T., "Syntheses and biodegradability of benzylated waste pulps and graft copolymers from PBzs and l-lactic acid," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 92, pp. 2658–2664, 2004.
- [18]. Ramaraj, B., "Crosslinked poly (vinyl alcohol) and starch composite films. II. Physicomechanical, thermal properties and swelling studies," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 103, pp. 909–916, 2007.
- [19]. Haseena, A.P., Dasan, K.P., Namitha, R., Unnikrishnan, G., and Thomas, S., "Mechanical properties of sisal/coir hybrid fibre reinforced natural rubber," *Progress in Rubbers, Plastics and Recycling Technology*, Vol. 21, pp. 155–181, 2005.

و الیاف رامی تا 40% وزنی و نیز الیاف کنف تا 70% حجمی به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت کمک کرده است [4-5,7].

5-مراجع

- [1] Canigueral, N., Vilaseca, F. Méndez, JA. López L., Barbera, J.P., Puig, J., Pelach, M.A. and Mutje, P., "Behavior of biocomposite materials from flax strands and starch-based," *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, pp. 2651-2658, 2009.
- [2] Kestur, G., Saryanarayana, Gregorio, G.C. and Arizaga Fernando W., "Biodegradable composites based on limocellulosic fibers-An overview," *Progress in Polymer Science*, Vol. 34, pp. 982-1021, 2009.
- [3] Tongdee, W.T., Mauer, L.J., Wongnuong, S., Snburi, P., and Rachtanapun, P., "Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films," *Chemistry Central Journal*, Vol. 5, No. 6., 2011, doi:10.1186/1752-153X-5-6.2011
- [4] F. Vilaseca, J.A. Mendez, A. Pe'lach, M. Llop, N. Can'igueral, J. Gironè's, X. Turon, P. Mutje, "Composite materials derived from biodegradable starch polymer and jute strands", *Process Biochemistry*, Vol. 42, No. 3, pp. 329–334, 2007
- [5] Lu. Y, Weng.L, Cao.X." Morphological, thermal and mechanical properties of ramie crystallites—reinforced plasticized starch biocomposites", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 63, pp.198–204, 2006
- [6] Mohammad ZR Khan I, Sunil K Srivastava I and MK Gupta "Tensile and flexural properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review " *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol. 37, No. 24, pp. 1435-1455, 2018
- [7] Takashi Nishinoa, Koichi Hiraoa, Masaru Koteraa, Katsuhiko Nakamaea, Hiroshi Inagakib "Kenaf reinforced biodegradable composite" *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 1281–1286, 2003
- [8] Hosseinkhani, M., Haghighi Yazdi, M., Mousavi Mashadi, M., Safarabadi, M., "Finite element modeling and experimental investigation of the effect of fiber orientation on viscoelastic behavior of composite laminates reinforced with long fibers", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 248-254, 2019.
- [9] Ahmadi, M. S. Gholami, M. Tavanaie, M. A. and Khajeh Mehrizi, M., "Tensile and flexural properties of epoxy-date palm fiber composites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 69-78, 2018.
- [10] Moradi, E. Zeinedini, A. and Heidari-Shahmaleki, E., "Mechanical properties of laminated composites reinforced by natural fibers of cotton, wool and kenaf under tensile, flexural and shear loadings", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 99-108, 2019.
- [11] Rui-Hua Hu ab, Min-yo'ing Sun C, Jae-Kyoo Lim a." Moisture absorption, tensile strength and microstructure evolution of short jute fiber/poly lactide composite in hygrothermal environment," *Materials and Design*, Vo. 31, No. 7, pp. 3167-3173, 2010. doi:10. 1016j.muides
- [12] Thakore, M., Desai, S., Sarawade, BD., and Devi, S., "Studies on biodegradability. Morphology and thermomechanical properties, of LDPE modified starch blends," *European Polymer journal*, Vol. 37. pp. 151-60. 2001
- [13] Sreedhar., B., Sairam, M., Chattopadhyay, DK, Syamala Rathnam, PA, and Mohan Rao D.V., "Thermal, mechanical and surface characterization of starch poly (vinyl alcohol) blends and borax cross-linked films," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 96, pp. 1313, 2005.
- [14] Dai, S., Cunningham, P.R., Marshall, S., and Silva, C., "Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 69, pp. 195–207, 2015.
- [15] Ma, X., Chang, P.R., and Yu, J., "Properties of biodegradable thermoplastic pea starch/carboxymethyl cellulose and pea starch/microcrystalline cellulose composites," *Journal of Carbohydrate Polymers*, Vol. 72, pp. 369–375, 2008.
- [16]. Alvarez, V.A., Ruseckaite, R.A., and Va'zquez, A., "Degradation of sisal fibre/Mater Bi-Y bio composites buried in soil," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, pp. 3156- 3162, 2006.



بررسی تجربی مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی تقویت شده با ذرات نانو سیلیکا و نانو رس

حمیدرضا امامیه¹، مهدی یارمحمدتوسکی^{2*}، محسن جباری³، احمدرضا خورشیدوند³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

3 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

* صندوق پستی 11365-4435، m_yarmohammad@azad.ac.ir

اطلاعات مقاله:

چکیده

یکی از روش‌های تقویت استحکام کامپوزیت‌ها به عنوان جایگزینی سبک و بهینه برای مواد متداول نظیر فلزات، استفاده از تقویت کننده‌های نانویی می‌باشد. افزودن نانوذرات می‌تواند با هدف تقویت مقاومت و استحکام در بارگذاری‌های مختلف انجام گیرد. این مطالعه به منظور بررسی اثر افزودن نانوذرات سیلیکا و رس در میزان تغییرات مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی در آزمون ضربه سرعت پایین می‌باشد. رویه‌ها از الیاف شیشه و رزین اپوکسی همراه با ذرات سیلیکا و رس ساخته شده است. فرآیند ساخت به صورت لایه گذاری دستی می‌باشد. به منظور توزیع بهتر نانوذرات در ماتریس رویه صفحات ساندویچی از دستگاه اولتراسونیک استفاده شده است. آزمون‌های ضربه سرعت پایین توسط دستگاه وزنه افشان انجام شده است. آزمون ضربه سرعت پایین در 2 سطح انرژی 15 و 30 ژول انجام شد. مناطق آسیب دیده صفحات توسط SEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داده‌اند که میزان مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی بعد از استفاده از نانوذرات، تغییر کرده و بهبود یافته‌اند. بطوریکه میزان مقاومت به ضربه صفحه ساندویچی در حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس 13.65% بالاتر از حالت بدون نانو و حالت 1% نانو سیلیکا و 3% نانو رس 6.6% بیشتر از حالت بدون نانو می‌باشد.

دریافت: 1400/06/01

پذیرش: 1400/09/17

کلیدواژگان

همزمانی

نانوذرات

صفحات ساندویچی

ضربه سرعت پایین

An experimental investigation of impact resistance of sandwich panels reinforced by nano-silica and nano-clay

H.R. Emamieh¹, M. Yarmohammad Tooski^{1*}, M. Jabbari¹, A.R. Khorshidvand¹

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university South Tehran Branch, Tehran, Iran.

* P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

Synchronization
Nanoparticles
Sandwich panel
Low-velocity impact

Abstract

Nano-reinforcers are identified as one of the ways of strengthening composites as an optimal and light alternative for common materials like metals. Adding nano-particles is done in different loadings so as to strengthen the resistance and stability. The aim of the present study was to scrutinize the simultaneous effect of nano-particles of silica and clay in the amount of resistance changes onto the impacts of sandwich panels in the low velocity impact test. The face sheets of the panels were made by glass fibers and resin epoxy with nanoparticles of silica and clay. The type of making process was manual layering. The ultrasonic device was applied to perfectly distribute nano-particles through the face sheet matrix of the sandwich panels. The low velocity impact tests were done by the drop weight equipment. The low velocity impact test was done in two levels of energy including 15J and 30J. The damaged parts of the panels were inspected by SEM. The experimental results indicated that the amount of resistance to the impact of sandwich panels were changed and improved after using nano-particles. Thus, the amount of resistance to the impact holding cases of 3% of nano-silica and 1% of nano-clay was 13.65% higher than the case without nano and the case of 1% of nano-silica and 3% of nano-clay was actually 6.6% more than the case without nano.

1- مقدمه

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آنچه امروزه بسیار مورد توجه می‌باشد تقویت این سازه‌ها در برابر ضربه می‌باشند [1]. مواد نانو سبب کاهش وزن و بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر بارگذاری‌هایی مانند ضربه می‌گردند. نانوذرات با توجه به مدول یانگ بالا و استحکام فوق‌العاده‌ای که دارند می‌توانند بهبود قابل توجهی در خواص مواد کامپوزیتی در مقابل ضربه ایجاد نمایند. تاکنون، تعداد کمی از

امروزه سازه‌های کامپوزیتی به سرعت در حال جایگزینی بجای آلیاژهای فلزی معمول در صنعت می‌باشند. این مواد به خاطر ویژگی‌های کاربردی خود از قبیل سبکی، ساخت راحت و قیمت ارزان بسیار مورد توجه می‌باشند. صفحات ساندویچی به عنوان بخش بزرگی از کامپوزیت‌ها همواره در صنایع مختلف

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Emamieh, H. R., Yarmohammad Tooski, M., Jabbari, M., Khorshidvand, A. R., "An experimental investigation of impact resistance of sandwich panels reinforced by nano-silica and nano-clay", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1573-1582, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.536007.1742>

گرفته است. صفحات ساندویچی ساخته شده دارای هسته PVC و رویه با الیاف شیشه تک جهته و رزین اپوکسی می‌باشند. در کل یک حالت بدون نانو و 4 حالت دیگر با درصدهای مختلف نانوذرات سیلیکا و رس ساخته شده است. سپس، صفحات ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین قرار گرفتند و داده‌های مکانیکی نیرو، جابجایی، زمان و سرعت ثبت گردیدند. با استفاده از داده‌های مکانیکی جمع‌آوری شده، نمودارهای نیرو-جابجایی، نیرو-زمان، جابجایی-زمان و سرعت-زمان با یکدیگر مقایسه گردید. در انتها نیز جهت ارزیابی بیشتر و جزئی‌تر تأثیر نانوذرات ترکیبی روی آسیب‌های بوجود آمده در صفحات ساندویچی، از تصاویر SEM استفاده شد و با نتایج مکانیکی مقایسه شد.

2- مواد و روش آزمایش

1-2- ساخت نمونه‌ها

رویه‌ی صفحات ساندویچی از الیاف شیشه و رزین اپوکسی با نام تجاری EPL1012 همراه با هاردنر با نام تجاری EPH 112 متعلق به شرکت لیوراد¹ (با نسبت وزنی 100:15) و با روش لایه گذاری دستی ساخته شده‌اند. مشخصات رزین و هاردنر استفاده شده در این تحقیق در جدول 1 آورده شده است. هر کدام از رویه‌های زیرین و فوقانی شامل چهار لایه الیاف با زوایای صفر، نود، نود و صفر می‌باشند. هسته مورد استفاده نیز از جنس PVC با ضخامت 10 میلیمتر با تراکم اسمی $80(\text{kg/m}^3)$ و مقاومت فشاری $1.4(\text{MPa})$ تهیه شده از شرکت دیاب² می‌باشد (جدول 2).

جدول 1 مشخصات رزین اپوکسی EPL 1012-Liorad Co در دمای 25°C سانتی‌گراد

Table 1 The Properties of epoxy resin EPL1012-Liorad Co at 25°C

خواص	میزان
تراکم (kg/m^3)	900-1100
استحکام فشاری (kgf/cm^2)	974
مدول فشاری (kgf/cm^2)	9371
استحکام خمشی (kgf/cm^2)	960
مدول خمشی (kgf/cm^2)	36454
استحکام کششی (kgf/cm^2)	761
مدول کششی (kgf/cm^2)	27890
مقاومت در برابر ضربه (kJ/m^2)	7.850

جدول 2 مشخصات فوم PVC H80-Diab در دمای 23°C سانتی‌گراد

Table 2 The Properties of PVC foam H80-Diab at 23°C

خواص	میزان
تراکم اسمی (kg/m^3)	80
مقاومت فشاری (MPa)	1.4
مدول فشاری (MPa)	90
استحکام کششی (MPa)	2.5
مدول کششی (MPa)	95
مقاومت برشی (MPa)	1.15
مدول برشی (MPa)	27

محققان تأثیر افزودن نانوذرات به صفحات ساندویچی کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار داده‌اند [2-7]. به عنوان مثال، ژنگ و همکاران [8] به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت با الیاف شیشه و نانو سیلیکا پرداختند که با افزایش درصد وزنی نانوسیلیکا تا 7 درصد مقاومت خمشی، مقاوت برشی و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر تسای و همکاران [9]، اثر نانوذرات سیلیکا بر مقاومت برشی داخل صفحه‌ای را بررسی نمود و گزارش دادند که با افزایش درصد وزنی نانو سیلیکا تا 20 درصد، مقاومت برشی داخل صفحه‌ای افزایش می‌یابد. لینگراجو و همکاران [10] اثرات درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بر خواص مکانیکی، مقاومت به ضربه و خواص سایشی نانوکامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و نانوسیلیکا را بررسی کرده‌اند. افزودن نانوسیلیکا باعث بهبود خواص اپوکسی خالص نیز می‌شود [11]. به عنوان نمونه مرتضوی و همکاران [12] در مطالعه‌ای مشاهده کردند که با اضافه کردن نانوسیلیکا به اپوکسی، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل ایجاد پیوند قوی بین ماتریس و نانوذرات باشد. در مطالعه‌ای دیگر زمانیان و همکاران [13] دریافتند که با افزودن نانوسیلیکا به اپوکسی، مدول یانگ و انرژی شکست افزایش می‌یابد. یکی از دلایل محتمل این امر می‌تواند نقش نانوسیلیکا در جلوگیری از انتشار ترک باشد. وانگ و همکاران [14] پی بردند که با اضافه کردن نانوسیلیکا به اپوکسی خالص، مدول یانگ و مقاومت کششی افزایش می‌یابد. لیو و همکاران [15] به این نتیجه رسیدند که با اضافه شدن نانوسیلیکا به اپوکسی چقرمگی شکست مود اول افزایش می‌یابد. که با افزایش درصد وزنی نانوسیلیکا از 0 تا 3 استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد. سیناغ و همکارانش [16] نشان دادند که کامپوزیت‌های حاوی 2 درصد وزنی نانوذرات سیلیس حداکثر مقاومت کششی، مقاومت در برابر ضربه و سفتی را نشان می‌دهند، در حالی که کامپوزیت با 3 درصد وزنی نانوذرات سیلیس بیشترین مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

آویلا و همکاران [17] اثر نانو بر روی صفحات ساندویچی کامپوزیتی تحت بارهای ضربه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اضافه کردن 5% وزنی از نانوذرات (رس)، منجر به جذب انرژی بیشتر و کارایی بهتری می‌شود. لیاقت و همکاران [18] اثر درصد وزنی نانوذرات رس را بر استحکام ضربه در چند لایه‌ها بررسی نمودند و درصد وزنی بهینه را برای مقابله با ضربه و نفوذ بدست آوردند. سزار گانسینگ و همکاران [19] به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد وزنی ذرات نانو اثر خوبی در استحکام کششی و مدول کششی دارد ولی کشیدگی تا شکست را کم می‌کند. بیدی و همکاران [20] نشان دادند که استفاده از نانوذرات رس در بهبود قابلیت جذب انرژی و کاهش تغییر شکل صفحه ساندویچی مؤثر می‌باشد. مفتخریان و همکارانش [21] با افزودن 1.5% و 3% نانو رس به کامپوزیت پلی استر-الیاف شیشه آزمون سرعت بالا را انجام دادند که نمونه بدون نانو بهترین عملکرد را دارا بود. تیرتاش و همکاران [22] با بررسی حضور 5% نانو رس در زمینه کامپوزیت متوجه شده‌اند مقدار استحکام خمشی و انرژی جذب شده تا 40% افزایش یافته است. آنچه مشخص می‌باشد، در تحقیقات ذکر شده تنها اثر یک نوع نانوذره بر بهبود خواص کامپوزیت‌ها بررسی شده است و بهتر است بررسی‌های بیشتری در مورد تأثیر انواع و درصد نانوذرات اضافه شده و همچنین استفاده همزمان آنها بر رفتار مقاومت به ضربه پانل ساندویچی انجام شود. در این پژوهش اثر حضور دو نوع نانو به طور همزمان (نانوذرات سیلیکا و رس) در میزان افزایش یا کاهش مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار

² Diab. www.diabgroup.com

¹ Liorad Company

حالت دیگر با درصدهای مختلف هر دو نوع نانوذره تهیه گردید. جدول 4، خلاصه‌ای از ترکیب تمام حالت‌ها با ذکر جزییات درصدهای حجمی اضافه شده بیان می‌کند.

جدول 4 درصدهای مختلف نانوذرات در صفحه ساندویچی

Table 4 Percentage of nanoparticles added to the composite sandwich panel in the present study

حالت‌های دارای نانو X و Y	حالت بدون نانو	شماره نمونه
5	1	درصد سیلیکا
4	2	درصد رس
3	3	
2	4	
1	5	

2-2- آزمایش ضربه سرعت پایین

برای بررسی رفتار کامپوزیت‌ها تحت ضربه سرعت پایین، نمونه‌ها تحت ضربه سرعت پایین قرار می‌گیرند. با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آزمایش ضربه سرعت پایین میزان خرابی از جمله شکست الیاف، تورق و شکست ماتریس را می‌توان بررسی کرد. در این پژوهش شرایط مرزی لبه گیردار در نظر گرفته می‌شود (چهار طرف گیردار) و نمونه‌ها با استفاده از فیکسچر، ثابت نگه داشته می‌شوند. نمونه‌ها پس از قرارگیری در فیکسچر، روی فک پایینی دستگاه قرار می‌گیرند. سطح آزاد مؤثر نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه سرعت پایین در فیکسچر 60×60 میلی‌متر مربع می‌باشد.



Fig. 2 View of the low velocity impact tester

شکل 2 نمایی از دستگاه آزمون ضربه سرعت پایین

دستگاه آزمون سقوط آزاد جهت انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی سازه‌های مختلف شامل تیر، ورق، لوله و ... با شرایط مرزی دلخواه و با ضخامت 2 الی 200 میلی‌متر می‌باشد. خروجی دستگاه بصورت داده‌هایی از شتاب-زمان است که با استفاده از روابط ریاضی، منحنی‌های نیرو-جابجایی، سرعت-زمان، انرژی-زمان و غیره را بدست آورد. تنظیمات دستگاه بصورت تمام خودکار بوده تا از خطاهای انسانی جلوگیری شود. دستگاه ضربه قادر به تنظیم وزن و ارتفاع ضربه در محدوده‌ی 0.1 به 2 متر بوده است. ضربه زننده‌ی مورد استفاده در این پژوهش بصورت نیم کروی به قطر 16 میلی‌متر بوده که در فک متحرک

نمونه‌ها در ابعاد $120 \times 120 \times 10 \pm 5\% \text{ mm}^3$ ساخته شده‌اند. چگالی الیاف شیشه استفاده شده در رویه 409 گرم بر متر مربع می‌باشد. نانوذرات مورد استفاده نیز سیلیکا¹ و رس² هستند که درصد خلوص، اندازه‌ی ذرات و چگالی آنها در جدول 3 قابل مشاهده است.

جدول 3 مشخصات نانوذرات استفاده شده در این تحقیق

Table 3 The nanoparticles used in the present study

نام نانوذره	درصد خلوص	اندازه ذرات (نانومتر)
سیلیکا	98	20-30
رس	98	1-2

برای توزیع بهتر نانوذرات در زمینه، از دستگاه التراسونیک ساخت کارخانه SONOPULS HD مدل BANDELIN کشور آلمان استفاده شده است که در شکل 1 نشان داده شده است. این دستگاه از نوع پروبی³ می‌باشد که با ارسال امواج اولتراسونیک توسط پروب دستگاه، ترکیب خوشه‌ای نانو ساختارها به اجزای ریزتری شکسته شده و در نتیجه نسبت سطح به حجم در ساختارهای نانو افزایش پیدا می‌کند. توان ماکزیمم دستگاه 200 وات است که در فرکانس 20 کیلوهرتز امواج مورد نظر را تولید می‌کند. در این تحقیق توان دستگاه نیز روی 75% مقدار کل یعنی 150 وات قرار داده شد.



Fig. 1 View of the ultrasonic device

شکل 1 نمایی از دستگاه اولتراسونیک

در ابتدا رزین تا دمای 40 الی 50 درجه گرم شد تا ویسکوزیته کاهش و انحلال افزایش یابد. پس از اندازه‌گیری میزان نانو با ترازوی دیجیتالی، محلول رزین و نانوذره‌ی اول را بوسیله همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه هم زده و سپس به مدت 15 دقیقه از دستگاه التراسونیک برای شکست ذرات نانو و ایجاد مخلوط استفاده شده است. این 15 دقیقه به 3 بازه 5 دقیقه‌ای تقسیم شد (برای جلوگیری از داغ شدن پروب) و هر فاز 5 دقیقه‌ای نیز به بازه 20 ثانیه‌ای (20 ثانیه اولتراسونیک و 20 ثانیه استراحت) تقسیم گردید. برای اضافه کردن نانوذره دوم نیز ابتدا 15 دقیقه مخلوط اولتراسونیک شده و در نهایت 15 دقیقه دیگر جهت دستیابی به محلول کاملاً همگن عملیات اولتراسونیک انجام شد. یعنی نانوذره اول در کل 45 دقیقه و نانوذره دوم 30 دقیقه اولتراسونیک شده است. برای بررسی تأثیر حضور نانوذرات لازم است حالتی به عنوان حالت شاهد یعنی فاقد ذرات نانو نیز ساخته شود. بدین ترتیب علاوه بر حالت شاهد، 4

³ Prob

¹ Nano silica, US Research Nanomaterials, Inc. www.us-nano.com

² Nano clay, Sigma-Aldrich. www.sigma-aldrich.com

نیوتن بوده و به ترتیب در زمان‌های 0.0042 و 0.0032 ثانیه اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار نیروی تماسی مربوط به حالتی است که نمونه تحت ضربه با انرژی 30 ژول قرار داشته است.

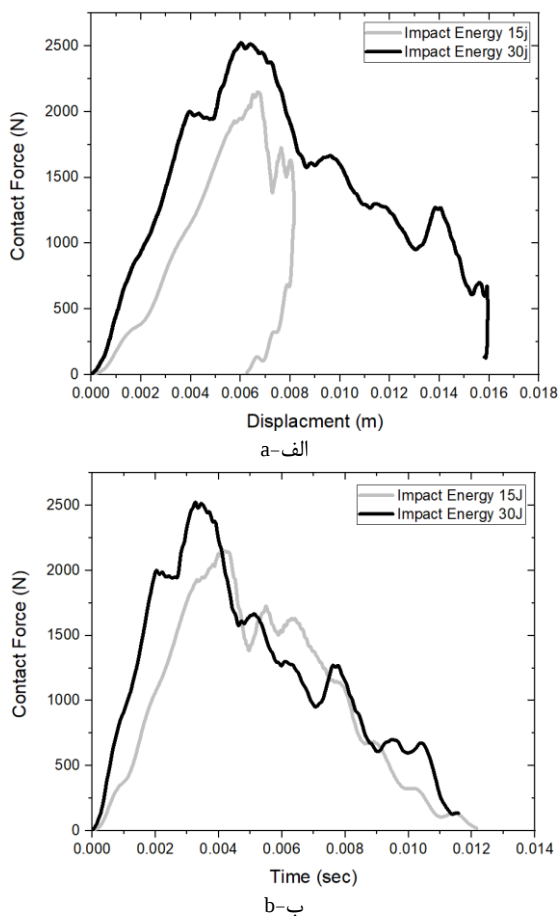


Fig. 3 The case of without nano (a) The curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time

شکل 3 حالت بدون نانو (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

1-3- اثر افزودن (همزمان) نانوذرات سیلیکا و رس بر مقاومت به ضربه سرعت پایین

1-1-1- بررسی نمودارهای نیروی تماسی-زمان و نیروی تماسی-جابجایی در ساخت حالت 2 تا 5 اثر همزمان نانوذره رس و نانوذره سیلیکا مورد بررسی قرار گرفته است. درصدهای به کار رفته از نانوذرات در جدول 2 ارائه شده است. در ادامه به بررسی ماکزیمم انرژی تماسی در نمونه‌ها پرداخته می‌شود. شکل 4a منحنی‌های نیرو تماسی-جابجایی را برای صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس در سطح انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود روند 2 منحنی تا قبل از 3 میلی‌متر شبیه به هم بوده و پس از آن به علت برخورد ضربه زننده با رویه فوقانی دارای برآمدگی اولیه می‌گردد، که این برآمدگی اولیه مربوط به آسیب رویه فوقانی است. در نهایت این مقدار (2534 نیوتن) در سطح انرژی 30 ژول به بیشترین مقدار خود می‌رسد و پس از آن به علت برخورد با هسته PVC منحنی شیب نزولی به خود گرفته است. بر طبق منحنی‌های شکل 4b که نیرو تماسی-زمان صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس را نشان می‌دهد می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین

دستگاه قرار داده می‌شود و وزن دقیق آن و متعلقات ثابت دستگاه 2.62 کیلوگرم می‌باشد. در شکل 2 نمایی از دستگاه فوق، متعلق به دانشگاه امیرکبیر نشان داده شده است.

صفحات تحت تأثیر سرعت کم در سطوح انرژی 15J و 30J قرار گرفتند که مطابق با انرژی‌های مختلف، جرم ضربه تنظیم شده است. انرژی ضربه (E_{imp}) و ارتفاع جرم در حال سقوط (H_{imp}) همراه با مشخصات ضربه در جدول 5 آورده شده است.

جدول 5 مشخصات آزمون ضربه سرعت پایین

Table 5 The features of low-velocity impact tests

انرژی ضربه (ژول)	وزن ضربه زننده (کیلوگرم)	ارتفاع ضربه زننده (متر)	شکل ضربه زننده	قطر سر (میلیمتر)
15	3.058	0.5	نیم‌کره	16
30	6.16	0.496		

در این حالت تمام نمونه‌ها آسیب می‌بینند و در همه سطوح انرژی بازگشت ضربه زننده وجود ندارد. با برخورد ضربه زن به صفحات، داده‌های شتاب برحسب زمان توسط حس‌گر نصب شده بروی ضربه زننده ثبت و از طریق کنترل‌کننده به رایانه متصل به دستگاه منتقل می‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌ها، سیگنال‌های مزاحمی در خروجی مشاهده شد، که با استفاده از روش متوسط‌گیری، اثر سیگنال‌های مزاحم از پاسخ‌های خروجی حذف گردید. پس از انجام این کار داده‌های شتاب برحسب زمان به داده‌های نیروی تماسی و انرژی برحسب زمان و نیروی تماسی برحسب جابجایی تبدیل شده‌اند. در ادامه با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های شتاب، سرعت ضربه زننده برحسب زمان و با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های سرعت، جابجایی ضربه زننده برحسب زمان بدست آمده است.

3- نتایج و بحث

برای انجام آزمون ضربه سرعت پایین ابتدا لازم است حالت فاقد نانوذرات، مورد آزمایش قرار گیرد تا بتوان تأثیر اضافه شدن ذرات نانو را مورد بررسی قرار داد. از آنجایی که صفحه ساندویچ دارای 2 رویه فوقانی و زیرین می‌باشد و هسته با جنس PVC در مرکز قرار گرفته، این انتظار می‌رود که منحنی‌ها دارای روند صعودی و نزولی باشند که بخاطر برخورد ضربه زننده با رویه‌های سخت و هسته نرم‌تر است. از روی منحنی نیرو تماس-زمان می‌توان به بررسی شروع آسیب، گسترش آسیب و کم شدن سفتی و استحکام ماده پرداخت. افت شدید نیرو بعد از ماکزیمم نیرو در واقع نقطه شروع آسیب و رشد ترک را نشان می‌دهد. هر قله نشان دهنده آسیب به یک رویه است. پیک نیرو نشان می‌دهد که نمونه‌ها می‌توانند چه میزان نیروی بیشتری را تا قبل از خرابی جدی تحمل کنند. در تمام نمونه‌ها، رویه فوقانی در تمام سطوح انرژی آسیب دیده است. مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی برای حالت‌های بدون نانوذره و تحت ضربه با انرژی-های مختلف در شکل 3a ارائه شده است. مشاهده می‌شود منحنی‌های نیرو-جابجایی مربوط به ضربه با انرژی‌های 15 و 30 ژول از نظر تعداد برآمدگی و فرورفتگی با یکدیگر مشابهت دارند.

شکل 3b، منحنی‌های نیروی تماسی-زمان با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است ماکزیمم نیروهای تماسی مربوط به سطوح انرژی 15 و 30 ژول به ترتیب دارای مقادیر 2149 و 2524

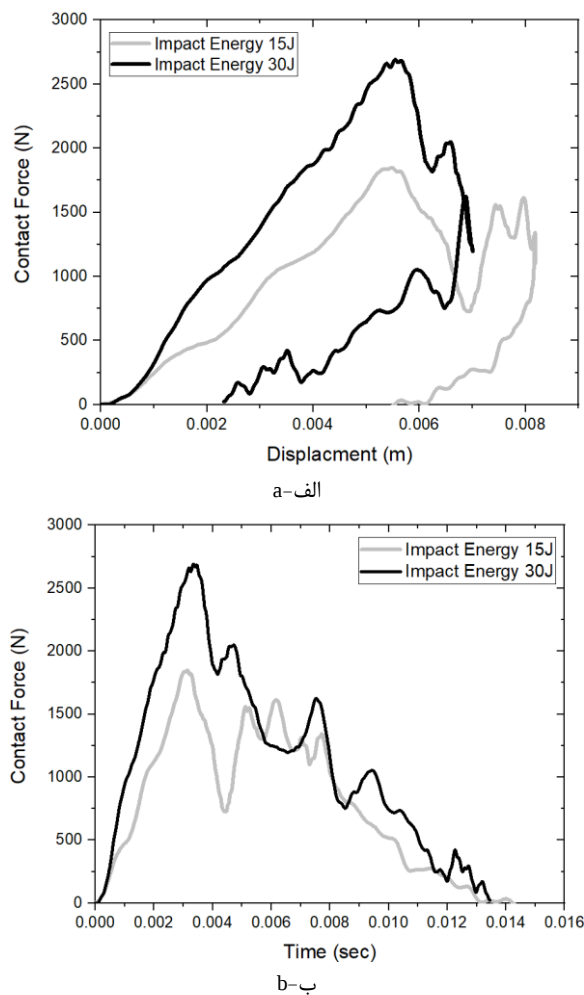


Fig. 5 The case of 1% nano silica and 3% nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time

شکل 5 حالت دارای 1% نانو سیلیکا و 3% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

همچنین بیشترین مقدار نیروی تماسی در 30 ژول اتفاق افتاده است. تمامی منحنی‌های ایجاد شده کوه مانند می‌باشند. ماکزیمم نیروی تماسی برای صفحه ساندویچی با 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس در سطح انرژی‌های 15 و 30 به ترتیب در جابجایی 6.6 و 5.3 میلی‌متر اتفاق افتاده است (شکل 6a). بیشترین جابجایی نهایی در سطح انرژی 15 ژول بوده که برابر با 5.9 میلی‌متر می‌باشد. شکل 6b، منحنی‌های نیرو-زمان صفحه ساندویچی با 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس تحت ضربه با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول را نشان می‌دهد. ماکزیمم نیرو در انرژی ضربه 15 و 30 ژول به ترتیب برابر است با 2335 و 2868 نیوتن که در زمان‌های 0.0041 و 0.0032 ثانیه رخ داده است. برای صفحه ساندویچی با 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس روند اولیه منحنی‌های سطح انرژی 15 و 30 ژول شبیه به یکدیگر می‌باشد (شکل 7). مشاهده می‌شود رویه فوقانی در سطح انرژی 30 ژول مقاومت زیادی در برابر ضربه نشان نداده است به طوریکه بیشترین نیروی تماسی در رویه اول در سطح انرژی 30 ژول برابر 2628 نیوتن است و جابجایی مربوط به آن برابر با 5.2 میلی‌متر است.

مقدار نیروی تماسی مربوط به حالتی است که صفحه نوع دوم تحت ضربه با انرژی 30 ژول قرار داشته است. ماکزیمم نیروهای تماسی مربوط به سطوح انرژی 15 و 30 ژول دارای مقادیر 2275 و 2534 نیوتن می‌باشند که به ترتیب در زمان‌های 0.005 و 0.0034 ثانیه اتفاق افتاده است.

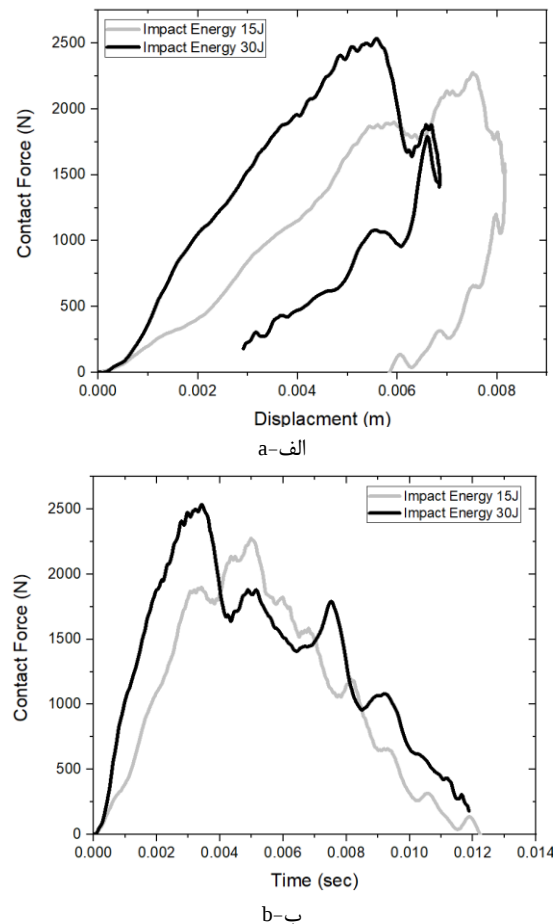
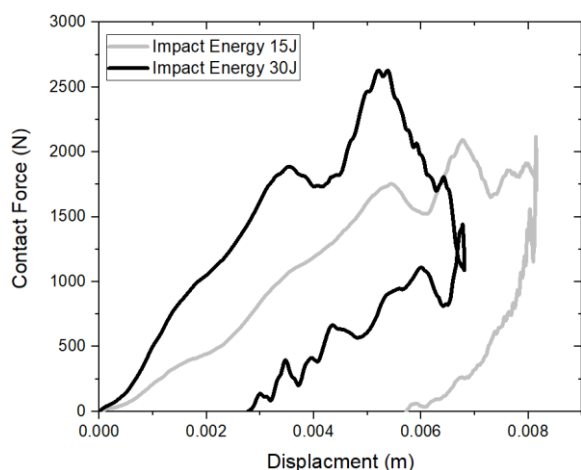


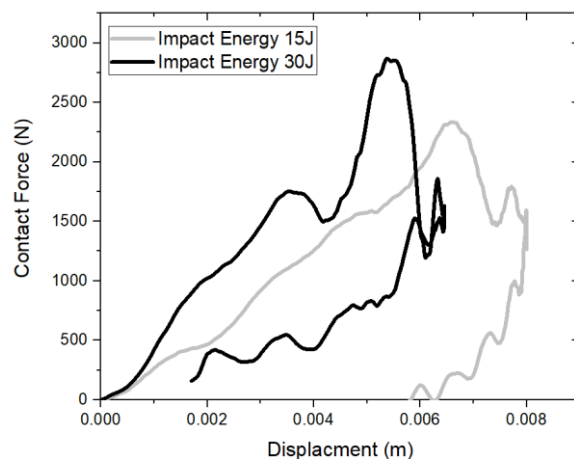
Fig. 4 The case of 1% nano silica and 1% nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time

شکل 4 حالت دارای 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

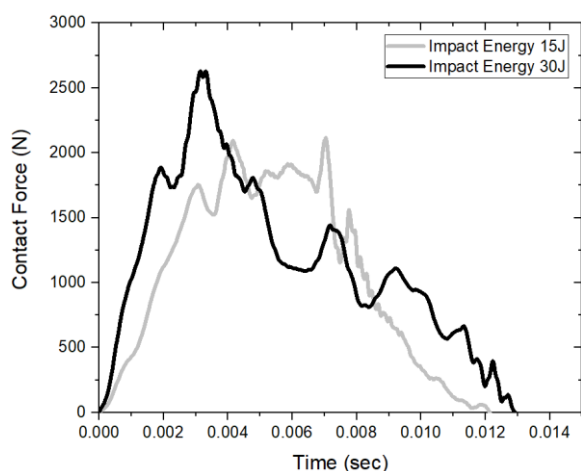
طبق مشاهدات حاصله از شکل 5a، که مقایسه منحنی‌های نیرو تماسی - جابجایی صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس تحت ضربه با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول را ارائه می‌دهد، روند منحنی همانند حالت صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس می‌باشد. با این تفاوت که جابجایی نهایی و جابجایی برای حداکثر نیروی تماسی برای صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس به ترتیب در 2.3 و 5.3 میلی‌متر اتفاق افتاده که برای صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس این مقدار به ترتیب در 2.4 و 5.5 میلی‌متر می‌باشد. مقایسه منحنی‌های نیرو تماسی-زمان صفحه ساندویچی با 1% نانو سیلیکا و 3% نانو رس تحت ضربه با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول (شکل 5b) نشان می‌دهد که ماکزیمم نیروهای تماسی مربوط به سطوح انرژی 15 و 30 ژول به ترتیب دارای مقادیر 1848 و 2690 نیوتن بوده و به ترتیب در زمان‌های 0.0031 و 0.0033 ثانیه اتفاق افتاده است.



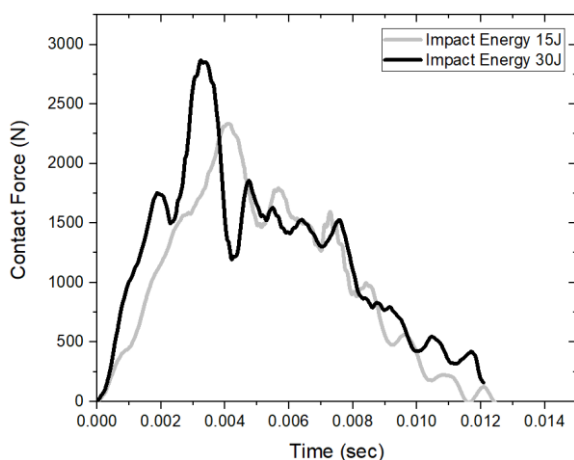
الف-ا



الف-ا



ب-ب



ب-ب

Fig. 7 The case of with 3% of nano silica and 3% of nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time

شکل 7 حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

Fig. 6 The case of 3% nano silica and 1% nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time

شکل 6 حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

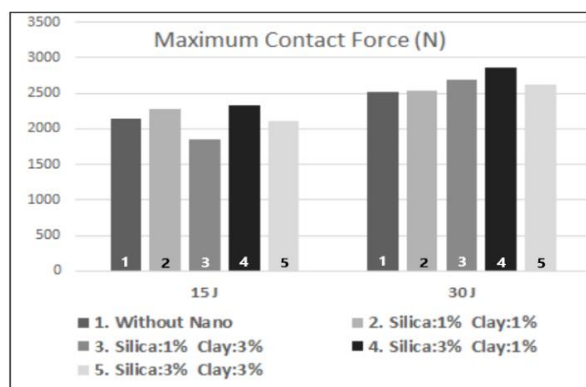


Fig. 8 Comparison of the maximum contact force between the total cases at the energy levels 15 and 30J

شکل 8 مقایسه ماکزیمم نیروی تماسی بین حالت‌های مختلف صفحات ساندویچی در سطوح انرژی 15 و 30 ژول

همانطور که در شکل 7a مشخص می‌باشد با افزایش مقدار درصد نانوذره سیلیکا مقدار ماکزیمم انرژی تماسی افزایش پیدا کرده در حالیکه با افزایش مقدار نانوذره رس مقدار ماکزیمم انرژی تماسی کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مقاومت نمونه در برابر ضربه کاهش پیدا می‌کند. بر طبق نتایج ارائه شده در شکل 7b بیشترین نیروی تماسی در صفحه ساندویچی دارای نانو سیلیکا 3% و نانو رس 3% در 15 و 30 ژول برابر است با 2116 و 2628 نیوتن که در زمان 0.007 و 0.0031 ثانیه می‌باشد.

حالت سوم با 1% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس کمترین مقاومت به ضربه را در انرژی 15 و حالت پنجم با 3% سیلیکا و 3% نانو رس کمترین مقاومت به ضربه در سطح انرژی 30 ژول و حالت چهارم با 3% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس بیشترین مقاومت به ضربه را در انرژی‌های 15 و 30 ژول داشته است. بهترین حالت در برابر ضربه، حالت دارای 3% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس می‌باشد. مقایسه ماکزیمم نیروهای تماسی در شکل 8 نشان داده شده است.

شکست الیاف و جدایش بین الیاف و ماتریس رخ داده است ولی میزان منطقه آسیب به خاطر حضور درصد بیشتر نانو سیلیکا بسیار کاهش یافته است.

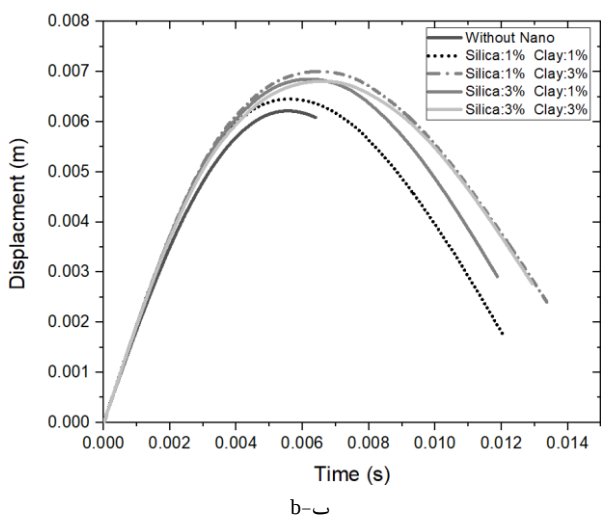
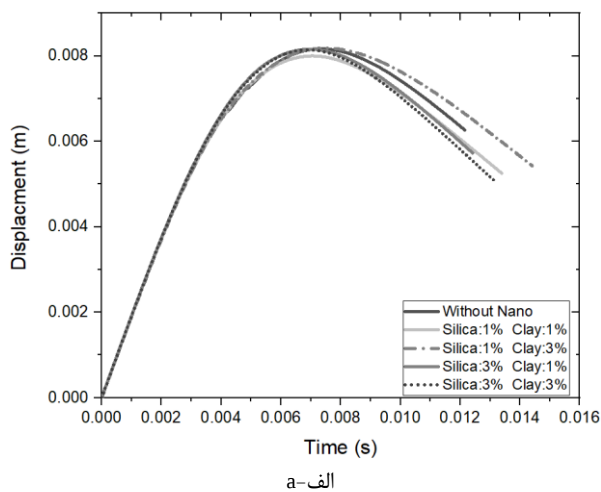


Fig. 9 displacement - time curve at the energy level (a) 15J and (b) 30J

شکل 9 منحنی جابجایی-زمان در سطح انرژی (الف) 15 ژول و (ب) 30 ژول

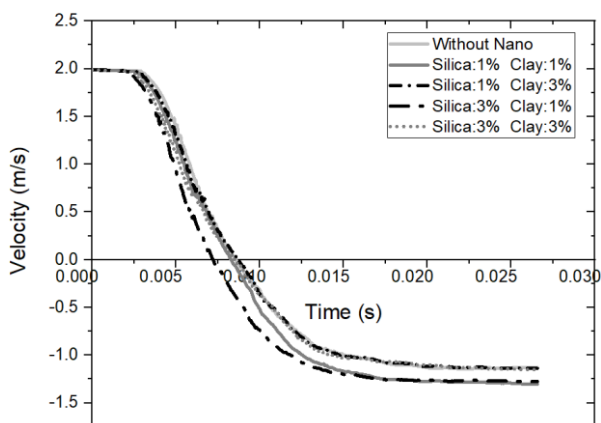


Fig. 10 the curve of velocity- time of different cases of sandwich panels

شکل 10 منحنی سرعت - زمان حالت‌های مختلف صفحه ساندویچی

3-1-2 بررسی نمودارهای جابجایی-زمان و سرعت-زمان

در ادامه بررسی اثر افزودن نانوذرات به رویه صفحات ساندویچی به بررسی منحنی‌های جابجایی-زمان و سرعت-زمان پرداخته شده است. در شکل 9 منحنی‌های جابجایی-زمان برای سطوح انرژی 15 و 30 ژول آورده شده است. روند منحنی جابجایی-زمان در بین همه حالت‌ها در سطوح مختلف انرژی یکسان می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد حالت دارای 3% سیلیکا و 1% نانو رس دارای بیشترین مقدار جابجایی می‌باشد و هر چه سطح انرژی بالاتر می‌رود اختلاف آن با حالت بدون نانو افزایش می‌یابد. آنچه مشخص است، افزایش حضور نانو سیلیکا در کنار نانو رس باعث افزایش مقدار جابجایی و در نتیجه مقدار جذب انرژی می‌باشد. در سطح انرژی 30 ژول کاملاً مشهود است که در حالت‌های دارای نانو حد اکثر جابجایی در زمان بیشتری نسبت به نمونه بدون نانو رخ داده است.

در شکل 10 منحنی سرعت ضربه زننده-زمان در سطح انرژی 30 ژول آورده شده است. آنچه مشخص است که سرعت ضربه زننده از مقدار مثبت 1.99 متر بر ثانیه شروع شده و پس از برخورد با نمونه سرعت آن در زمان‌های 0.0085، 0.0082، 0.0087، 0.0072 و 0.0085 ثانیه به صفر رسیده و در نهایت سرعت برگشت ضربه زننده به مقدار 1.13، 1.3، 1.14، 1.28 و 1.15- به ترتیب برای حالت‌های بدون نانو، 1% سیلیکا و 1% رس، 1% سیلیکا و 3% رس، 1% سیلیکا و 3% رس، 3% سیلیکا و 1% رس و 3% سیلیکا و 3% رس می‌باشند. ضربه زننده در نمونه دارای 3% سیلیکا و 1% رس در زمان 0.0072 به مقدار صفر رسیده و پس از آن ضربه زننده مسیر برگشت را در پیش گرفته است. آنچه مشخص است سرعت در این حالت نسبت به حالت‌های دیگر، در زمان کمتری به صفر رسیده و سپس منفی شده است. در کل حضور نانوذرات باعث افزایش میزان مقاومت به ضربه نسبت به نمونه بدون نانو می‌باشد که از این حیث بسیار دارای اهمیت می‌باشد.

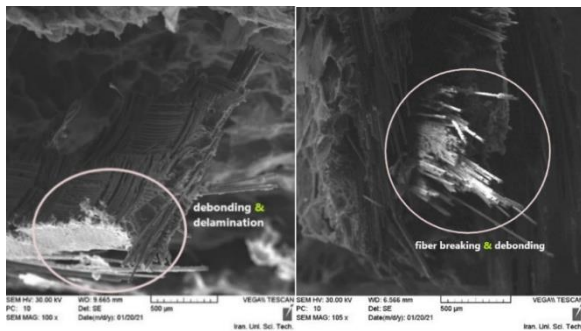
3-2-2 اثر حضور نانوذرات بر مکانیزم‌های خرابی

برای بررسی پاسخ ضربه و نوع و میزان آسیب لازم است عوامل مختلفی از جمله شکل و وزن ضربه زننده، ارتفاع و سرعت ضربه، نوع و میزان اختلاط ذرات نانو، تجمع آنها در ماتریس و خواص مواد در ساخت صفحات ساندویچی را در نظر گرفت. در شکل 11 خسارت رخ داده بر روی رویه صفحات تحت تأثیر ضربه برای توصیف میزان و ماهیت مکانیزم‌های خرابی عمده تحلیل و ارزیابی شد. شکل 11a تصویر سطوح شکست صفحه ساندویچی در سطح انرژی 15 و 30 ژول در حالت 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس را نشان می‌دهد. آنچه مشاهده می‌گردد در سطح انرژی 15 و 30 ژول همانطور که در منحنی نیرو-تماسی-زمان مشخص شد فقط رویه فوقانی دچار خسارت می‌شود، با بررسی رویه نمونه در سطح انرژی 30 ژول، لایه لایه شدن و جدایش و شکست الیاف کاملاً مشخص می‌باشد، که نشان از ضعف اتصال بین ماتریس و الیاف دارد. شکل 11b تصاویر مربوط آسیب صفحه ساندویچی با درصد 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس می‌باشد. با بررسی وسعت منطقه آسیب می‌توان مشاهده کرد که این حالت دارای کمترین وسعت منطقه آسیب در میان حالت‌ها، مخصوصاً در سطح انرژی 30 ژول می‌باشد. در این سطح انرژی صفحه رویی کاملاً تخریب شده و هم جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف به خوبی مشخص می‌باشد، ولی با این حال مقدار بسیار زیادی از انرژی ضربه را جذب کرده است. با اینکه

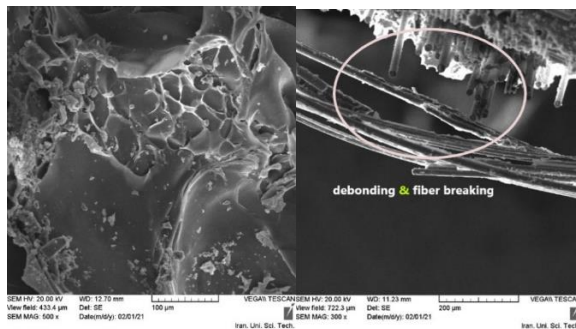
لایه‌ها از هسته، پارگی الیاف و گسیختگی بین الیاف و ماتریس. حضور 3% نانو رس در این حالت باعث کلوخه و تجمع این ذرات در ماتریس و کاهش اتصال بین الیاف و ماتریس گشته است.

3-3- بررسی شکل ناحیه آسیب با استفاده از SEM

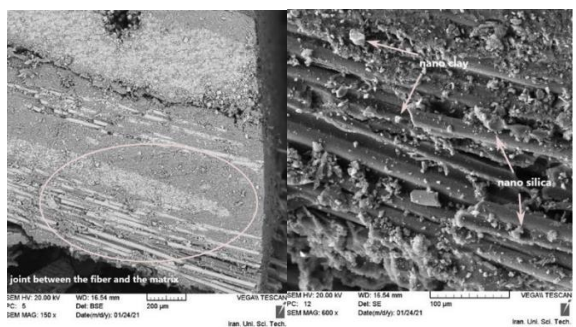
برای مشاهده بهتر خرابی‌ها از SEM¹ بهره گرفته شده است. شکل 12 نتایج بررسی SEM را به ترتیب با بزرگنمایی تدریجی برای حالت‌های مختلف نمایش می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، حالت‌های خرابی در ساندویچ صفحات کامپوزیت شامل شکست الیاف، کماتش الیاف، ترک ماتریس، خورد شدن هسته و لایه شدن می‌باشد، که با تصاویر SEM سازگار است.



الف-ا



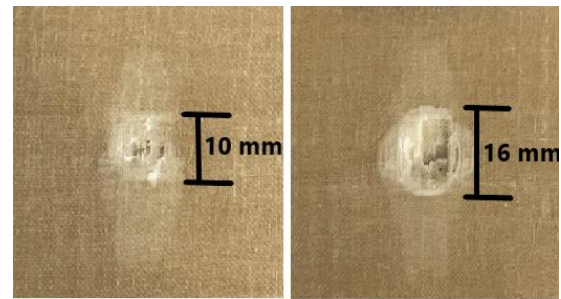
ب-ب



ج-ج

Fig. 12 The SEM images for case with (a) 1% of nano silica and 1% of nano clay, (b) 3% of nano silica and 1% of nano clay and (c) 3% of nano silica and 3% of nano clay

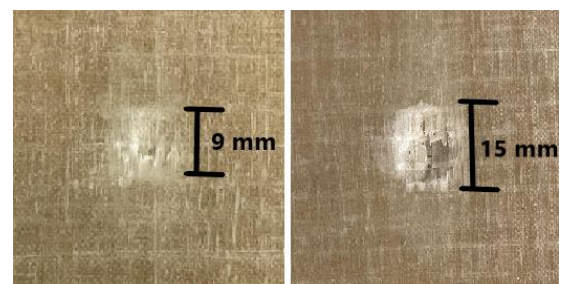
شکل 12. تصاویر SEM برای حالت دارای (الف) 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (ب) 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (ج) 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس



On the sample (15J)

On the sample (30J)

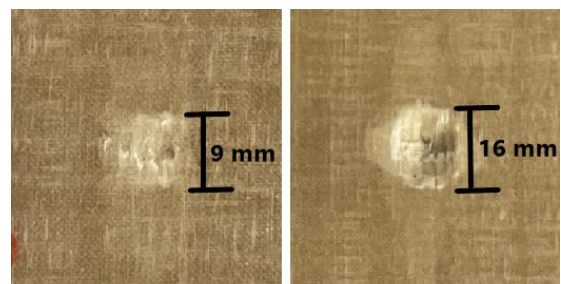
الف-ا



On the sample (15J)

On the sample (30J)

ب-ب



On the sample (15J)

On the sample (30J)

ج-ج

Fig. 11 The amount and state of damage in sandwich panel with (a) 1% of nano silica and 1% of nano clay, (b) 3% of nano silica and 1% of nano clay and (c) 3% of nano silica and 3% of nano clay

شکل 11. میزان و نحوه آسیب در صفحه ساندویچی دارای (الف) 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس، (ب) 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس و (ج) 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس

در شکل 11c نوع و میزان آسیب حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس نشان داده شده است. این حالت در سطوح مختلف انرژی بیشترین مقدار آسیب را دارا می‌باشد. در سطح انرژی 30 ژول شکستن الیاف، له‌شدگی هسته و بیرون‌زدگی الیاف از رزین کاملاً مشخص می‌باشد. همانطور که از شکل پیداست وسعت منطقه خسارت دیده در رویه فوقانی بیشتر از بقیه حالت‌ها می‌باشد که ترکیبی از حالت‌های خرابی و انواع آسیب‌های ضربه‌ای در چند لایه‌ها وجود دارد، از جمله: ترک ماتریس بین لایه، خورد شدن هسته، جداسازی

¹ Scanning Electron Microscope

15 و 30 ژول پرداخته شده است. در هنگام اعمال ضربه بر روی صفحات با انرژی‌های مختلف ماکزیمم نیروی تماسی، جابجایی، زمان، سرعت و میزان جذب انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اثر حضور نانوذرات در میزان مقدار مقاومت به ضربه بررسی گردید. افزودن 3% سیلیکا و 1% نانو رس به صورت همزمان باعث افزایش ماکزیمم نیروی تماس و در نتیجه افزایش مقاومت به ضربه صفحه ساندویچی نسبت به حالت بدون نانو به میزان 13.65% گردیده است. این مقدار برای حالت دارای 1% نانوسیلیکا و 3% نانو رس 6.6% می‌باشد. حالت دارای 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس کمترین میزان مقاومت به ضربه را در بین همه حالت‌های دارای نانو و 0.5% بیشتر از حالت بدون نانو دارا می‌باشد. با بررسی منطقه آسیب در حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس مشخص می‌گردد که وسعت منطقه آسیب کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. حالت‌های دارای 3% نانو رس دارای کمترین مقاومت در برابر ضربه می‌باشد و بیشترین میزان لایه لایه شدگی و جدایش بین ماتریس و الیاف را می‌توان مشاهده کرد. حضور نانو رس بر خلاف نانو سیلیکا تأثیر مثبت قابل توجهی در افزایش مقاومت به ضربه ندارد. بررسی آسیب‌ها نشان می‌دهد سیلیکا به خاطر سفتی خمشی بالایی که دارد، باعث می‌شود نمونه‌ها نیروی تماسی بیشتری را تحمل نماید. توزیع بهتر سیلیکا در رزین باعث افزایش جذب انرژی و حداکثر نیروی تماسی و کاهش رشد ترک می‌شود، ولی برخلاف تصور، افزایش نانوذره رس به علت تجمع و کلوخه شدن و ایجاد فضای خالی باعث کاهش اتصال بین زمینه، الیاف و در نهایت کاهش مقاومت صفحه ساندویچی گشته است که با بررسی SEM نیز، صحت این موضوع مشاهده شد. همچنین تجزیه و تحلیل ماکروسکوپی رفتار ناحیه آسیب، نشان داد میزان آسیب تحت ضربه سرعت پایین با سطح انرژی پایین، ناچیز و با افزایش انرژی ضربه، خمش و شکستگی الیاف و تورفتگی به حالت غالب آسیب تبدیل گردیده شده است. بطور کلی حضور نانوذرات در ماتریس صفحات ساندویچی در مقایسه با حالت بدون نانو، باعث افزایش قابل توجهی در حداکثر نیروی تماس، در نتیجه افزایش مقاومت صفحات در برابر آسیب و جلوگیری از لایه لایه شدن و در نهایت، افزایش قابل توجهی در میزان سفتی دارند. بطوریکه که صفحات ساندویچی دارای نانو انرژی بسیار بالاتری قبل از شکست را تحمل می‌نمایند که نشان دهنده بهبود مقاومت ضربه در تمام سطوح انرژی است.

6- منابع

- [1] Zarei, H.T. "Analyzing the rate of enhancing the resistance against force in multi-layered sandwich compound materials", In Persian M.Sc thesis, faculty of engineering, Tarbiat Modarres University, Iran, 2010.
- [2] Amirashjaee-Asalemi, K., Fakhreddini-Najafabadi, S., Taheri-Behrooz, F. "Numerical and Experimental Study of Carbon / Epoxy Composite Laminate Response to Low Velocity Impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, Issue 1. 2021.
- [3] Moumen, AEL., Tarfaoui, M., Hassoon, O., et al. "Experimental study and numerical modelling of low velocity impact on laminated composite reinforced with thin film made of carbon nanotubes". Appl Compos Mater; Vol. 25, pp. 309-320, 2018.
- [4] Khoshgoftar, M. and Liaghat, G., "Experimental and Numerical Investigation of Perforation Behavior of Composite Laminates Reinforced with Carbon Nanotubes," in Persian, Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department, Iran, 2010.
- [5] Hafezi, M. and Yarmohammad Tooski, M. "An investigation of impact resistance of sandwich panel with basalt skin and basalt/Kevlar hybrid skin with nano silica", In Persian, Journal of Science and Technology of composite, Vol. 7, No. 4, pp. 1145-1152, 2021.

شکل 12a نوع آسیب را در حالت دارای 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس در سطح انرژی 30 ژول نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 12a مشاهده می‌گردد گسیختگی، لایه لایه شدگی و همچنین شکست الیاف کاملاً مشخص می‌باشد. در محل اتصال رویه به فوم جدایش اتفاق افتاده و جدایش بین لایه‌ها به وضوح دیده می‌شود. شکل 12b میزان توزیع نانوذرات در حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس را نشان می‌دهد. شکست الیاف شیشه و جدایش بین لایه‌ها آشکار است. از آنجا که این حالت از صفحه ساندویچی دارای بالاترین نیروی تماسی و در نتیجه بالاترین مقاومت به ضربه در بین همه حالت‌ها می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که وجود نانوذرات سیلیکا باعث افزایش قدرت اتصال بین الیاف شیشه و ماتریس افزایش می‌گردد و با کاهش نانوذرات رس و در نتیجه کاهش مقدار ذرات کلوخه شده و افزایش اتصال الیاف ماتریس کاملاً مشهود می‌باشد. تصویر SEM حالت محتوی 3% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس را در سطح انرژی 30 ژول (شکل 12c) گویای پخش شدگی یکنواخت نانوذرات سیلیکا و کلوخه شدن نانوذرات رس است. حضور نانو سیلیکا باعث شده تا حدودی مقاومت به ضربه بهبود یابد ولی با افزایش درصد نانو رس این مقاومت کاهش یافته است. به نظر می‌آید انحلال خوب نانو سیلیکا در ماتریس باعث اتصال محکم‌تر می‌باشد و در نتیجه اتصال یکپارچه بین الیاف و ماتریس برقرار می‌گردد که باعث بالا رفتن مقاومت به ضربه می‌گردد و کلوخه شدن و تجمع ذرات نانو رس باعث کاهش قدرت اتصال بین الیاف و ماتریس و تمرکز تنش و ترک خوردن ماتریس و در پی آن شکست الیاف شده است.

4- بررسی و بحث در نتایج

با بررسی نتایج بدست آمده از آزمون ضربه سرعت پایین و منحنی‌های بدست آمده از این آزمون، مقایسه ماکزیمم نیروی تماسی (شکل 8) و مقایسه مناطق آسیب در شکل 11 و تصاویر SEM در شکل 12 خلاصه‌ای از عملکرد ذرات نانو موجود در ماتریس صفحات ساندویچی ارائه می‌گردد. با بررسی 5 حالت از صفحات با درصد‌های مختلف نانوذرات سیلیکا و رس می‌توان مشاهده کرد که بیشترین نیروی تماسی در سطح انرژی 30 ژول از حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس بدست آمده است. با بررسی نواحی آسیب و مقایسه وسعت آن می‌توان به صحت این موضوع اشاره کرد. در این بررسی مشخص می‌باشد که حضور نانو سیلیکا و افزایش درصد آن از 1% تا 3% باعث افزایش ماکزیمم نیروی تماسی و در نتیجه افزایش مقاومت به ضربه می‌باشد. در حالیکه حضور نانو رس در ماتریس صفحات ساندویچی و افزایش درصد آن از 1% به 3%، باعث کاهش ماکزیمم نیروی تماسی و در نتیجه کاهش مقاومت به ضربه می‌گردد. افزودن نانوذره سیلیکا تأثیر بسزایی در سطح تخریب رویه صفحات ساندویچی داشته است. به ازای افزودن نانو سیلیکا میزان سطح شکست در مقایسه با حالت بدون نانو بطور قابل توجهی کاهش یافته است. این اتفاق به دلیل افزایش سفتی رویه صفحات ساندویچی می‌باشد. در نتیجه مقدار انرژی مورد نیاز بیشتری برای ایجاد آسیب لازم است. مقاومت به ضربه با افزایش درصد وزنی نانو رس در کامپوزیت به دلیل کلوخه شدن و ایجاد فضاهای خالی در رویه صفحه ساندویچ و کاهش اتصال ماتریس و الیاف، کاهش می‌یابد.

5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر همزمان حضور نانوذرات سیلیکا و رس در ماتریس صفحات ساندویچی تحت آزمون ضربه کم سرعت در دو سطح انرژی

- [6] Ahmadi, M., Ansari R and Hassanzadeh-Aghdam MK. "Low velocity impact analysis of beams made of short carbon fiber/carbon nanotube-polymer composite: a hierarchical finite element approach", *Mech Adv Mater Struct*; Vol. 26, pp. 1104–1114, 2018.
- [7] Ali, M., Joshi, S. C., and Sultan, M. T. H., "Palliatives for Low Velocity Impact Damage in Composite Laminates", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2017.
- [8] Zheng, Y., Ning, R., Zheng, Y. "Study of SiO₂ nanoparticles on the improved performance of epoxy and fiber composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24, No. 3, pp. 223-33, 2005.
- [9] Tsai, J-L., Hsiao, H., Cheng, Y-L., "Investigating mechanical behaviors of silica nanoparticle reinforced composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, No. 4, pp. 505-24, 2010.
- [10] Lingaraju, D., Ramji, K., Devi, MP., Lakshmi, UR. "Mechanical and tribological studies of polymer hybrid nanocomposites with nano reinforcements", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 34, No. 4, pp. 705-12, 2011.
- [11] Rahimi Sharbaf, H., Rahimi, G.H. and Liaghat G.H., "Experimental study of behavior of filament winding composite pipes with liner using glass fibers and silica nanoparticles under impact loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 311-320, 2017.
- [12] Mortazavi, B., Bardon, J., Bomfim, JAS. and Ahzi, S. "A statistical approach for the evaluation of mechanical properties of silica/epoxy nanocomposite: Verification by experiments", *Computational Materials Science*, Vol. 59, pp. 108-13, 2012.
- [13] Zamanian, M., Mortezaei, M., Salehnia, B. and Jam, J. "Fracture toughness of epoxy polymer modified with nanosilica particles: Particle size effect", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 97, pp. 193-206, 2013.
- [14] Wang, J., Waas, AM. and Wang, H. "Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels", *Composite Structures*, Vol. 96, pp. 298-311, 2013.
- [15] Liu, H-Y., Wang, G-T., Mai, Y-W. and Zeng, Y. "On fracture toughness of nano-particle modified epoxy", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 8, pp. 2170-5, 2011.
- [16] Sing, T., Gangil, B., Ranakoti, L., Joshi, A., "Effect of silica nanoparticles on physical, mechanical, and wear properties of natural fiber reinforced polymer composites", *Polymer Composites*, Vol. 42, pp. 2396– 2407, 2021.
- [17] Avila, F., Carvalho, MG AR., Dias, C., da Cruz, D ETL., "Nano-Structured Sandwich Composites Response to Low-Velocity Impact", *Compos Struct*, Vol. 92, No. 3, pp.51-745, 2010.
- [18] Pole, M. H., and Liaghat, Gh., "Experimental and Analytical Penetration Analysis in Nano Composites", In Persian, PhD Thesis Mechanical Engineering, TMU. Tehran, Iran 2012.
- [19] GunaSingh, C., Soundararajanand, S. and Palanivelu, K., "Studies on Mechanical, Thermal properties and Characterization of Nanocomposites of Nylon-6 –Thermoplastics Poly Urethane Rubber [TPUR] blend," *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 4, pp. 65-75, 2013.
- [20] Bidi, A., Liaghat, Gh., and Rahimi, Gh., "Effect of Nano Clay Addition to Energy Absorption Capacity of Steel-Polyurea Bi-layer", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016.
- [21] Moftakharian, J.E., Esfandeh, M., Sabet, A., "High -Velocity Impact Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polyester Filled with Nanoclay", *Wiley Online Library*, pp. 583-591, 2012.
- [22] Tirtash, B., Montazeri, A., Eslami-Farsani, A et al. "An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, Issue 4, 2020



بررسی تجربی رفتار شکست مود ترکیبی کششی-برشی در فصل مشترک قطعه دو ماده‌ای دیسک برزیلی ساخته شده از استخوان مهره-سیمان استخوانی

دین محمد ایمانی^{1*}، محمدرضا محمد علیها²

1- استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی جوش و اتصال، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشیار، آزمایشگاه تحقیقاتی جوش و اتصال، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، imanim@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/06/21

پذیرش: 1400/08/24

چکیده

استفاده از رزین‌ها و کامپوزیت‌های استخوانی یکی از روش‌ها مناسب برای تقویت استخوان‌های آسیب‌دیده و دچار پوکی می‌باشد. تزریق سیمان یکی از روش‌های رایج جهت تقویت فوری استخوان‌های صدمه‌دیده است. چنانچه در هنگام تزریق سیمان استخوانی به بافت استخوان در فصل مشترک اتصال ناپوستگی و عدم چسبندگی به وجود آید، این عدم چسبندگی همچون یک ترک رفتار نموده و در اثر اعمال بارهای مکانیکی می‌تواند باعث جدایش اتصال سیستم دو ماده‌ای استخوان-سیمان شود. در این مقاله با استفاده از قطعه دو ماده‌ای (بافت اسفنجی استخوان مهره گاو- سیمان استخوانی هیدروکسی آپاتیت) به شکل دیسک برزیلی به بررسی رفتار شکست فصل مشترک اتصال در حالت‌های مختلف بارگذاری پرداخته می‌شود. آزمایش‌های شکست مود ترکیبی در زوایای مختلف 0، 9، 18 و 27 درجه نسبت به فصل مشترک اتصال انجام و مقادیر متناظر بار و انرژی شکست نمونه‌ها به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه بارگذاری و افزایش مود لغزشی، مقدار بار و انرژی شکست اندکی افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی حالت‌های بارگذاری، شکست در فصل مشترک استخوان- سیمان اتفاق می‌افتد. مقایسه نمونه‌های دو ماده‌ای استخوان-سیمان و تک‌ماده استخوان نشان‌دهنده افزایش نیرو و انرژی شکست در نمونه‌های استخوان-سیمان به نسبت نمونه تک‌ماده‌ای استخوان می‌باشد.

کلیدواژگان

سیمان استخوانی، استخوان مهره گاو، دیسک برزیلی دو ماده‌ای، مود ترکیبی کششی-برشی، شکست فصل مشترک، مطالعه تجربی

Experimental mixed-mode fracture study in the interface of vertebrae bone tissue-hydroxyapatite cement using the bi-material Brazilian disc specimen

Din Mohammad Imani^{1*}, Mohammad Reza Mohammad Aliha²

1- Welding and Joining Research Center, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Welding and Joining Research Center, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

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

Keywords

Bone-cement, Bi-material Brazilian disc, Mixed mode loading, Interface fracture, Experimental study

Abstract

The use of resin-based cement is a common method for strengthening and retaliation the damaged bones material. However due to lack of sufficient adhesion in the interface of two materials (i.e., bone and injected cement) a crack can be initiated in the interface and consequently it can be fractured due to application of external loads to the repaired bone part. In order to investigate the load carrying capacity and reliability of bi-material joint of bone's soft tissue-hydroxyl apatite cement, a number of bi-material bone-cement specimens in the shape of circular disc containing a center crack in the interface of disc and subjected to diametral compression were tested. The bi-material specimens were load under different inclination angles of crack related to the loading direction. This results in application of different mixed mode I+II (i.e., tensile-shear deformation) in the interface of center crack. The results showed that the fracture load and fracture energy become more by increasing the crack inclination angle (i.e., increasing the contribution of shear mode deformation relative to mode I component). In addition, the overall strength of bi-material bone-cement system was higher than the neat one material bone material. The fracture of all tested bi-material samples was extended along the interface line of Brazilian disc specimen with no kinking into any of two bone or cement materials.

1-مقدمه

استخوان ماده‌ای طبیعی است که همچون کامپوزیت‌های صنعتی ساختار غیر همگن و ارتوتروپیک داشته و متشکل از سه فاز (مواد آلی، مواد معدنی و آب) است [1]. استخوان‌ها با تشکیل اسکلت جانداران وظیفه تحمل و انتقال بارهای وارده را بر عهده دارند. نیروی وارد بر استخوان ممکن است منجر به تغییر ساختار و مشخصات مکانیکی (صدمه) استخوان شود. صدمات استخوانی در موارد شدید منجر به ترک خوردگی یا شکست استخوان می‌گردد. شکست استخوان انواع مختلف دارد، یکی از انواع خطرناک آن، شکست پاتولوژیک می‌باشد. این حالت از شکست زمانی رخ می‌دهد که ضعف ساختار استخوان ناشی از سابقه بیماری‌هایی همچون پوکی استخوان باشد. در این شرایط ساختار استخوان می‌تواند به صورتی ضعیف شود که در نیروهای بسیار کم بشکند.

با توجه به ضعف عمومی استخوان‌هایی که دچار پوکی شده‌اند و همچنین عوارض عمل‌های باز، در بسیاری از بیماران به‌کارگیری روش‌هایی همچون قرار دادن ایمپلنت‌های فلزی جهت تقویت استخوان مطلوب نمی‌باشد. در این شرایط عمل‌هایی بر پایه تزریق سیمان‌های زیست سازگار کامپوزیتی به استخوان (همچون عمل رتروپلاستی¹) می‌تواند جایگزین روش‌هایی همچون دارودرمانی، استراحت درمانی یا استفاده از کمربندهای طبی باشد [2]. استفاده از روش تزریق سیمان استخوانی که نمای شماتیک آن در شکل 1 مشاهده می‌شود در تقویت استخوان‌های پوک و آسیب‌دیده برای اولین بار توسط گیلبرت در سال 1984 میلادی در فرانسه برای درمان مهره گردنی آسیب‌دیده صورت گرفت و از سال‌های اولیه دهه 90 میلادی متداول گردید [3]. از مهم‌ترین ویژگی‌های یک ساختار استخوانی تقویت‌شده با تزریق سیمان استخوانی پایداری آن در برابر نیروهای وارده است، به صورتی که ساختار بتواند عملکردی حداقل برابر استخوان سالم داشته باشد.



Fig. 1 Schematic illustration of Vertebroplasty Surgical Procedure (cement injection into the damaged bone).

شکل 1 نمای شماتیک از عمل رتروپلاستی (تزریق سیمان استخوانی زیست سازگار به استخوان آسیب‌دیده).

با توجه به بروز ترک، رشد آن و نهایتاً شکست کامل در مواد استخوانی، مطالعات متعددی در سال‌های اخیر برای بررسی رفتار ترک خوردگی بافت‌های سخت و اسفنجی استخوانی با استفاده از مبانی مکانیک شکست انجام شده است.

از شاخص‌های مهم در مکانیک شکست پارامتری به نام چقرمگی شکست است. چقرمگی شکست بیانگر مقاومتی است که یک ماده دارای ترک در برابر رشد ترک از خود نشان می‌دهد. به عنوان مثال، با استفاده از این پارامتر می‌توان در شرایط معینی از بارگذاری، رفتار شکست کامپوزیت‌های زیستی مورد استفاده در تقویت استخوان‌های آسیب‌دیده را تعیین کرده و بر اساس آن روش‌های تقویت استخوان را ارزیابی نمود.

طی سه دهه تحقیق در مورد استخوان و کامپوزیت‌های زیستی، محققان متعددی برای مطالعه رفتار این مواد از مکانیک شکست استفاده کرده‌اند. در این میان حوزه‌ای که کمتر به آن پرداخته شده است بررسی رفتار و کارایی استخوان پس از تقویت با سیمان استخوانی است. از جمله مطالعات در رابطه با شکست کامپوزیت‌های زیستی و بیومکانیکی دو یا چند ماده‌ای می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

تام و پیلبار (1993) از اولین محققانی بودند که از شاخص چقرمگی شکست برای مطالعه رفتار یک ساختار استخوان-رزین کامپوزیتی استفاده کردند. آن‌ها قطعه میله کوتاه ترک‌دار² دارای ترک در سطح تماس را تحت نیروی کششی قرار دادند و مقدار چقرمگی شکست اتصال دو ماده‌ای استخوان-رزین کامپوزیتی را به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه در چقرمگی شکست ساختارها با رزین‌های مختلف بود [4]. از دیگر مطالعات پیشگام در بررسی چقرمگی شکست ساختارهای چند ماده‌ای کامپوزیتی و زیستی می‌توان به تحقیق خواجویا و همکاران (1997) اشاره نمود [5].

تان و همکاران (2013) به بررسی اثر حفره بر مقاومت سیمان‌های استخوانی پرداختند و با استفاده از نمونه‌های دیسکی شکل تحت نیروی فشاری نمونه‌های بدون حفره را با نمونه‌های حفره‌دار مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تخلخل در ساختار سیمان استخوانی و استحکام آن‌ها اثری قابل توجه دارد [6].

سوزا و همکاران (2016) به بررسی چقرمگی شکست فصل مشترک دندان-سیمان پرداختند. آن‌ها در این مطالعه پنج نوع سیمان متداول که در ترمیم دندان استفاده می‌شود را به کمک دو قطعه کشش مستقیم و تیر تحت بار چهار نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نوع قطعه اثر قابل توجهی بر مسیر شکست ترک دارد، به صورتی که مسیر شکست ترک در قطعات کشش مستقیم معمولاً از فصل مشترک عبور می‌کند در صورتی که در قطعات تیر تحت خمش چهار نقطه، الگویی معین برای مسیر رشد ترک وجود ندارد [7].

تنگ و همکاران (2007) با استفاده از قطعه دیسک برزلی به بررسی چقرمگی شکست فصل مشترک ساختار استخوان-سیمان متصل شده به کمک رزین از مود یک خالص تا مود دو خالص پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده سهولت استفاده از قطعه دیسک برزلی نسبت به دیگر قطعات در مطالعه رفتار شکست مود ترکیبی کشش-برشی این مواد می‌باشد [8].

علیها و همکاران (2015) به بررسی تأثیر نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و نانو آلومینا بر رفتار چقرمگی شکست کامپوزیت‌های دندانی و استخوانی پایه پلیمری پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که خواص استحکامی پروتزهای دندانی پایه پلیمری موجود با اضافه نمودن درصد‌های مناسبی از نانوذرات ریز سازگار تا حد قابل توجهی بهبود می‌یابد [9].

یکی از نکات مهم در خصوص موفقیت آمیز بودن و اثربخشی عملیات تزریق سیمان استخوانی به استخوان آسیب‌دیده میزان استحکام اتصال دو ماده می‌باشد. در این حالت چنانچه در موضع اتصال ناپیوستگی ایجاد شود، احتمال بروز جدایش ناشی از بارهای مکانیکی افزایش می‌یابد. در این زمینه بررسی استحکام فصل مشترک اتصال‌های استخوان-سیمان استخوانی دارای اهمیت بسیار می‌باشد.

² Short-rod

¹ Vertebroplasty

کششی در قطعه مشاهده خواهد شد. به عبارت دیگر، برای زاویه‌های غیر صفر ترک، قطعه دیسک برزلی در حالت مود ترکیبی کششی-برشی قرار می‌گیرد. در این حالت مود برشی خالص (مود لغزش درون صفحه‌ای یا مود II) با توجه به طول ترک در زاویه‌ای خاص حاصل می‌شود.

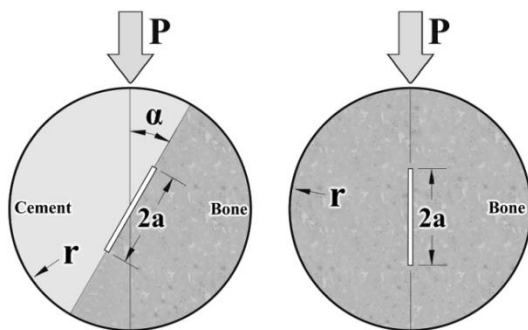


Fig. 2 Geometry and loading condition of Brazilian disc specimen subjected to diametral compression load.

شکل 2 هندسه و بارگذاری قطعات دیسک برزلی تک‌ماده‌ای و دو ماده‌ای دارای ترک مرکزی تحت بارگذاری فشاری قطری.

نمونه‌های استخوانی مورد استفاده در این تحقیق از استخوان مهره گاو حدوداً 10 ساله تهیه شده است. طی بررسی‌های چشمی دقیق از سالم بودن، عدم یخ‌زدگی، تازگی و زنده بودن بافت این مهره‌ها اطمینان حاصل گردید. قطعات دیسکی مورد نیاز برای آزمایش به کمک ابزارهای برش از مهره‌ها مغزه‌گیری شد. برای جلوگیری از تغییر خواص استخوان، قطعات ساخته شده در محیطی با دمای کنترل شده و به دور از عوامل فاسد کننده نگهداری شدند. نمایی از استخوان مهره و نمونه‌های گرفته شده از مهره‌ها در شکل 3 نشان داده شده است.

با توجه به محدودیت ابعادی مهره‌ها و محدودیت‌های ماشین‌کاری و تراشکاری و برش، از هر مهره دیسک‌هایی به قطر 24 میلی‌متر (به عنوان بزرگترین اندازه قابل استخراج) و ضخامت 2 میلی‌متر از بافت اسفنجی میان مهره‌ای مغزه‌گیری شد. در نمونه‌های استخوان-سیمان، پس از نصف کردن هر قطعه استخوان، هر نیمه در قالب ساخته شده از پلکسی گلس قرار گرفت و نیمه خالی قالب با سیمان استخوانی پر شد.

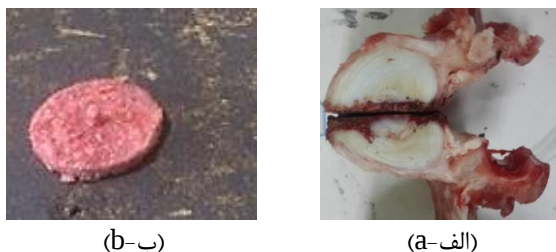


Fig. 3 Preparation of disc shape specimen from the soft tissue of a bovine vertebrae bone

شکل 3 آماده‌سازی قطعات استخوان از قسمت بافت اسفنجی استخوان مهره گاو (الف) استخوان مهره برش خورده، (ب) قطعه استخراج شده دیسکی شکل از بافت اسفنجی استخوان

سیمان استخوانی بکار رفته از نوع سیمان هیدروکسی آپاتیت می‌باشد. روند آماده‌سازی سیمان بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده طی شد. برای این منظور پودر سیمان استخوانی و حلال با نسبت 2 به 1 ترکیب و به مدت

از تزریق رزین‌های کامپوزیتی یا سیمان استخوانی عمدتاً جهت تقویت مهره‌های ستون فقرات استفاده می‌شود. مهره‌ها دارای هندسه‌ای استوانه شکل بوده (شکل 1) و در طول عمر خود در معرض انواع بارهای فشاری، کششی، پیچشی و برشی با ماهیت ناگهانی یا تکرارشونده قرار می‌گیرند. در حضور این بارها وجود ترک یا عدم پیوستگی در فصل مشترک اتصال سیمان-استخوان تواند باعث رشد ترک در مود ترکیبی کشش-برش (مود ترکیبی I-II یا مود ترکیبی هم‌زمان بازشونده لبه ترک و لغزش داخل صفحه لبه‌های ترک) گردد. در نتیجه به منظور بررسی رفتار شکست اتصالات دو ماده‌ای استخوان - سیمان در موده‌های ترکیبی باید از روش‌های مناسب آزمایشگاهی استفاده نمود.

هندسه نامنظم و ابعاد کوچک استخوان از چالش‌های مهم در مطالعه تجربی و آزمایشگاهی استخوان و ترکیبات استخوانی می‌باشد. در این شرایط روش و هندسه قطعه آزمایش باید به گونه‌ای انتخاب شود که نیازهای مطالعه را تأمین نماید. محققان از نمونه‌های مختلفی جهت مطالعه رفتار شکست در حالت‌های مختلف بارگذاری و مواد مهندسی تک‌ماده‌ای و یا در فصل مشترک ساختارهای دو ماده‌ای استفاده کرده‌اند. از جمله این قطعات می‌توان به قطعه دیسک برزلی [8,10-16]، قطعه تیر تحت بار خمشی سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای [7,9,17-21]، قطعه جداشونده گوه [21]، قطعه میله کوتاه ترک‌دار [20]، قطعه کشش مستقیم [20]، قطعه رینگ [11]، قطعه نیم دیسک تحت بار خمشی سه نقطه‌ای [22,23]، قطعه تیر کوتاه دو ماده‌ای با ترک لبه‌ای مورب و تحت بار خمشی سه نقطه‌ای [24] و قطعه مستطیلی با ترک داخلی [25] اشاره نمود.

در حال حاضر روش استاندارد و قطعه توصیه شده‌ای برای بررسی رفتار شکست در فصل مشترک مواد دو ماده‌ای و خصوصاً مواد دو جنسه استخوانی وجود ندارد. با وجود این، از میان نمونه‌های فوق قطعات آزمایشگاهی دایره‌ای شکل شبیه‌ترین هندسه به هندسه طبیعی مهره‌ها را دارند. در نتیجه ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با هندسه دیسک برزلی (که از جمله قطعات پرکاربرد با هندسه دایره‌ای شکل می‌باشد) با سهولت بیشتر و مراحل کمتری نسبت به سایر قطعات و هندسه‌ها قابل انجام است. همچنین در مقایسه با سایر قطعات، قطعه دیسک برزلی به جهت ابعاد کوچک مورد نیاز و نیز اعمال بار فشاری قطری بدون نیاز به فیکسچر خاص از مزیت بیشتری برای آزمایش چقرمگی شکست مواد بیومکانیکی برخوردار است.

در این مقاله کاربرد و توانایی قطعه دیسک برزلی دو ماده‌ای برای مطالعه استحکام شکست اتصال بافت اسفنجی استخوان مهره به سیمان استخوانی هیدروکسی آپاتیت به روش تجربی و آزمایشگاهی در موده‌های مختلف کششی-برشی شکست مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2-مطالعه آزمایشگاهی شکست ساختار دو ماده‌ای

شکل 2 نمای شماتیک قطعه دیسک برزلی دو ماده‌ای را نشان می‌دهد. این قطعه به شکل یک دیسک به شعاع (r) و ضخامت (t) می‌باشد که یک ترک مرکزی به طول (2a) در فصل مشترک دو ماده قرار گرفته است. با اعمال نیروی فشاری قطری (P) به نمونه و با تغییر زاویه راستای ترک، ترکیب‌های مختلفی از کشش و برش در ترک و در فصل مشترک دو ماده قابل دستیابی می‌باشد.

حالت کشش خالص (مود I یا مود بازشونده) شکست در شرایطی به وجود می‌آید که راستای ترک و راستای بارگذاری موازی هستند ($\alpha=0^\circ$). با افزایش زاویه راستای ترک از صفر درجه، مشارکت مود برشی نیز در کنار مود

3- نتایج و بحث

شکل 6 نمونه‌ای از منحنی‌های بار-جابجایی قطعات دیسک برزیلی آزمایش شده را نشان می‌دهد، این منحنی‌ها به‌طور کلی نشان‌دهنده رفتار تقریباً الاستیک خطی نمونه‌ها می‌باشند.

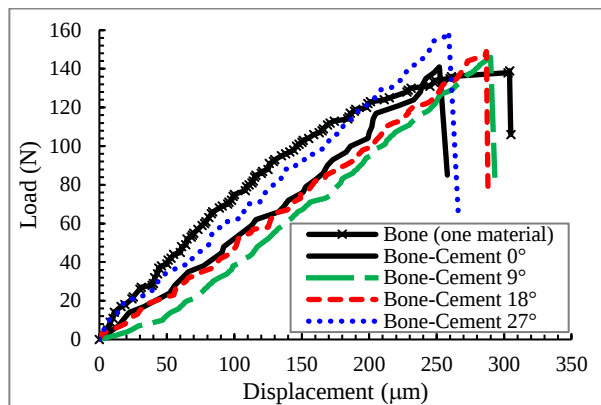


Fig. 6 Load-displacement curves obtained from the tested bi-material Brazilian disc samples

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های دیسک برزیلی تک‌ماده‌ای و دو ماده‌ای آزمایش شده در حالت‌های مختلف مود ترکیبی

بر این اساس با توجه به زاویه بارگذاری قطعات منحنی‌های متفاوتی به دست می‌آید که نشان‌دهنده تأثیر مود بارگذاری کششی-برشی بر رفتار شکست نمونه‌ها و بار و انرژی (سطح زیر منحنی بار-جابجایی) شکست قطعات دو ماده‌ای استخوان - سیمان استخوانی است. به عبارت دیگر با افزایش زاویه بارگذاری، نیروی شکست بیشتر شده و انرژی بیشتری برای ایجاد جدایش در فصل مشترک ساختار دو ماده‌ای نیاز است.

بار متناظر با لحظه شکست (بار شکست) نمونه‌ها در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، در قطعات با زاویه ترک 0، 9، 18 و 27 درجه، مقدار بار بحرانی شکست در قطعات استخوان-سیمان به ترتیب 5، 9، 10 و 18 درصد بیشتر از بار بحرانی شکست در قطعه استخوان تک‌ماده‌ای در مود کششی می‌باشد. در این نمودار B1 و B2 و B3 داده‌های مربوط به شکست استخوان تک‌ماده‌ای و C1، C2 و C3 داده‌های مربوط به سیستم دو ماده‌ای استخوان-سیمان می‌باشد.

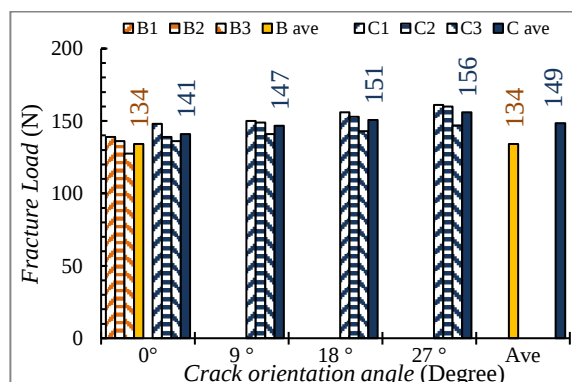


Fig. 7 Fracture loads obtained for the tested bone and bone-cement BD specimens under different loading angles.

شکل 7 نیروی شکست قطعات دیسک برزیلی دو ماده‌ای استخوان-سیمان در حالت‌های مختلف مود ترکیبی

30 ثانیه در دمای کمتر از ۲۵ درجه سلسیوس مخلوط گردید و خمیر حاصله قبل از سفت شدن به قالب تزریق شد. با توجه به ابعاد کوچک (شعاع و ضخامت کوچک) بخش نیمه دیسک ساخته شده از سیمان استخوانی اعمال فشار به سطح خمیر در حین تزریق به قالب و اتصال به بخش استخوانی برای حصول اطمینان از عدم وجود حباب و تخلخل کافی به نظر می‌رسد. در عمل نیز سیمان استخوانی به طریق مشابه به بافت استخوان تزریق می‌شود. به‌منظور ایجاد ترک در نمونه‌های استخوان-سیمان، پیش از اضافه نمودن سیمان به قالب، یک ورق بسیار نازک آلومینیومی با طول 7.2 میلی‌متر در فصل مشترک قرار داده شد و سپس سیمان به قالب اضافه گردید. این ورق پس از خشک شدن ساختار و اتصال دو ماده به همدیگر، نقش ترک را ایفا می‌نماید. شکل 4 نمونه‌ای از قطعه دیسک برزیلی دو ماده‌ای استخوان مهره-سیمان هیدروکسی آپاتیت را نشان می‌دهد.

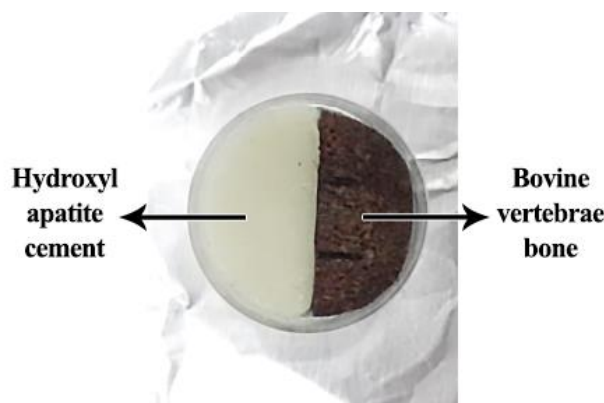


Fig. 4 A typical bi-material (bone-cement) Brazilian disk specimen

شکل 4 قطعه دیسک برزیلی دو ماده‌ای استخوان مهره گاو- سیمان هیدروکسی آپاتیت

نمونه‌های دو ماده‌ای دیسک برزیلی ساخته‌شده با ترکی به طول 7.2 میلی‌متر (نسبت شعاع به طول ترک 0.3) در زوایای ترک 0، 9، 18 و 27 درجه با استفاده از دستگاه بارگذاری تحت فشار قطری قرار گرفته و نمودارهای بار برحسب جابه‌جایی هر نمونه ثبت گردید. نرخ بارگذاری نمونه‌ها برابر با 1.5 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد و برای افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها، هر حالت با سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. شکل 5 نشان‌دهنده یکی از نمونه‌ها در حال آزمایش و تحت بار فشاری قطری است.

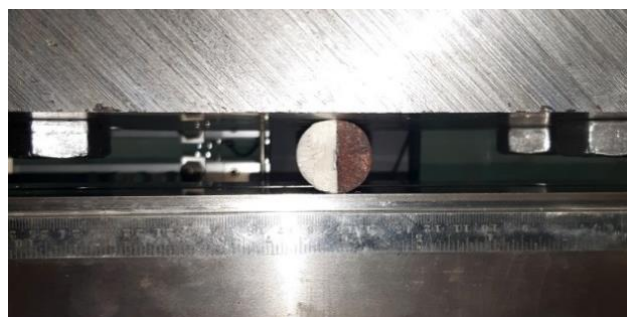


Fig. 5 Typical bi-material (bone-cement) Brazilian disk specimen inside the loading test machine

شکل 5 نمونه دیسک برزیلی دو ماده‌ای در دستگاه آزمایش

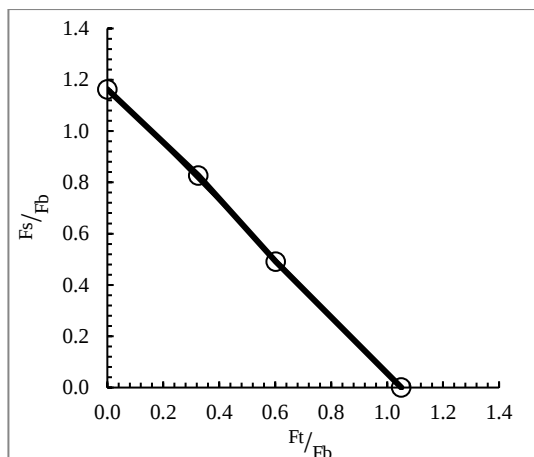


Fig. 9 Fracture curve envelope ($F_s/F_b - F_t/F_b$) obtained for the tested bi-material bone - cement system.

شکل 9 منحنی بار شکست بی بعد شده مود ترکیبی نمونه های دو ماده ای آزمایش شده

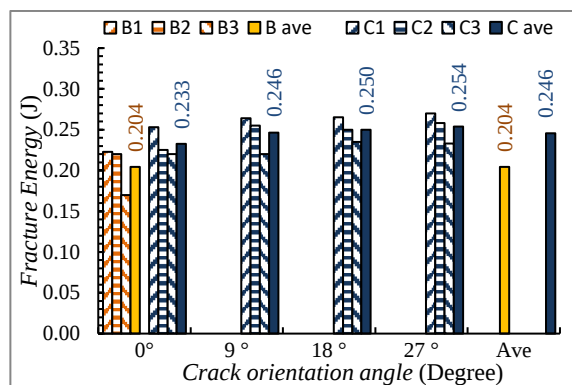


Fig. 10 Fracture energy value obtained for the tested bone and bone-cement BD specimens under different loading angles.

شکل 10 انرژی شکست قطعات دیسک برزلی دو ماده ای استخوان-سیمان در حالت های مختلف مود ترکیبی

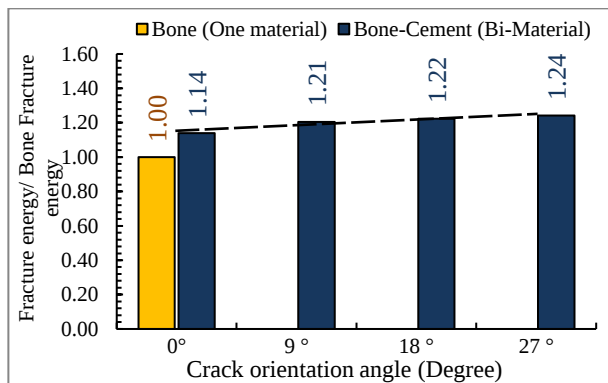


Fig. 11 Variations of Fracture energy versus the loading angle in the tested specimens.

شکل 11 تغییرات انرژی شکست نمونه های دو ماده ای استخوان-سیمان نسبت به نمونه استخوان تک ماده ای.

شکل 12 منحنی تغییرات انرژی شکست مود برشی بی بعد شده بر حسب انرژی شکست مود کششی بی بعد شده را در حالت های مختلف مود ترکیبی نشان می دهد. نشان می دهد که در آن E_t و E_s به ترتیب مؤلفه های متناظر با انرژی شکست نمونه های دو ماده ای استخوان - سیمان در حالت های مختلف

همچنین روند تغییرات بار بحرانی ناشی از تغییر مود شکست نشان می دهد که در قطعات سیمان- استخوان، با تغییر مود شکست از حالت کششی به برشی، میزان بار شکست به مقدار 13 درصد افزایش پیدا کرده است.

شکل 8 منحنی تغییرات بار شکست بر حسب زاویه بارگذاری نمونه های دو ماده ای استخوان- سیمان را نشان می دهد که بر اساس آن روند تغییرات بار شکست با افزایش زاویه بارگذاری و تغییر مود شکست از مود کششی به مود برشی نمونه های دو ماده ای با دقت خوبی به صورت خطی می باشد.

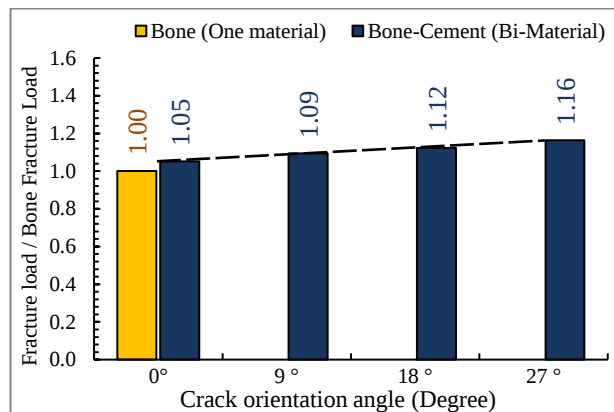


Fig. 8 Variations of Fracture load versus loading angle in the tested specimens.

شکل 8 تغییرات بار-شکست بر حسب زاویه بارگذاری

شکل 9 منحنی تغییرات نیروی شکست مود برشی بی بعد شده بر حسب نیروی شکست مود کششی بی بعد شده را نشان می دهد که در آن F_t و F_s به ترتیب مؤلفه های متناظر با بار شکست نمونه های دو ماده ای استخوان - سیمان در حالت های مود کششی و برشی بوده و F_b نیز بار شکست قطعه تک ماده ای بافت اسفنجی استخوان در حالت مود I (کشش خالص) می باشد. با توجه به زاویه بارگذاری هر یک از حالت های آزمایش شده قطعه دیسک برزلی، مقادیر F_t و F_s که وابسته به نسبت نیروهای کشش و برش هستند محاسبه می شود. محور افقی این نمودار داده های کشش خالص و محور عمودی این نمودار متناظر با بیشترین زاویه بارگذاری یا بیشترین حالت برش در نمونه های دیسک برزلی می باشد. بر اساس این شکل یک رابطه تقریباً خطی برای بار شکست حالت های مختلف مود ترکیبی کششی - برشی به دست می آید که با معادله (1) قابل بیان می باشد.

$$\frac{F_s}{F_b} = -1.11 \left(\frac{F_t}{F_b} \right) + 1.17 \quad (1)$$

شکل 10 نشان دهنده انرژی شکست (به دست آمده از سطح زیر نمودار بار- جابه جایی تا لحظه شکست) نمونه ها می باشد. بر اساس نتایج حاصل از این شکل، مقدار انرژی شکست قطعات دو ماده ای استخوان- سیمان استخوانی از مقدار انرژی شکست حالت کشش خالص ماده استخوان بیشتر است. همچنین انرژی شکست بیشتری در مودهای ترکیبی کششی - برشی مشاهده می شود.

شکل 11 منحنی تغییرات انرژی شکست بر حسب زاویه بارگذاری نمونه های دو ماده ای استخوان-سیمان را نشان می دهد که بر اساس آن روند تغییرات انرژی شکست با افزایش زاویه بارگذاری و تغییر مود شکست از مود کششی به مود برشی نمونه های دو ماده ای با دقت خوبی به صورت خطی می باشد.

$$E = (-8 \times 10^{-5})F^2 + 0.026F - 1.77 \quad (3)$$

در شکل 14 الگوی شکست نمونه‌های استخوان-سیمان استخوانی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، شکست در هر دو مود کششی و برشی در فصل مشترک دو ماده رخ داده است. در نتیجه اتصال ایجاد شده بین دو ماده (بافت اسفنجی استخوان مهره- سیمان استخوانی هیدروکسی آپاتیت) از نوع اتصال نسبتاً ضعیف می‌باشد که باعث رشد ترک در امتداد فصل مشترک دو ماده می‌گردد و شکست به داخل یکی از دو ماده منحرف نمی‌شود. شکست قطعه در حالت زاویه صفر بارگذاری به صورت بازشدگی و جدایش عمودی دو ماده نیم‌دایره‌ای شکل می‌باشد و حال آنکه با چرخش زاویه ترک و در مود برشی بارگذاری مسیر شکست به صورت لغزش دو نیم‌دایره بر روی یکدیگر می‌باشد. با توجه به نوع اتصال ضعیف مشاهده شده در این تحقیق در حالت‌های کششی و برشی بارگذاری، لازم است که از روش‌هایی برای افزایش استحکام اتصال سیستم دو ماده‌ای سیمان- استخوان در کاربردهای عملی استفاده گردد. یکی از روش‌های پیشنهادی افزایش سطح تماس بین دو ماده می‌باشد. این کار با افزایش زیری در فصل مشترک قسمت چسبنده استخوان، ایجاد حالت زیگزاگ و یا طرح کنگره‌دار در فصل مشترک که هم باعث افزایش سطح تماس سیمان با استخوان و هم ایجاد قفل مکانیکی بین دو ماده می‌شود قابل انجام است.

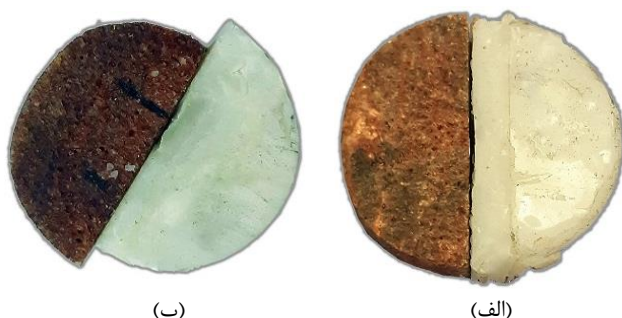


Fig. 14 Interface failure pattern of bone-cement specimens under different pure modes I and II.

شکل 14 الگوی شکست فصل مشترکی نمونه‌های استخوان-سیمان در مودهای (الف) کششی خالص و (ب) برشی خالص

5- نتیجه‌گیری

استفاده از سیمان استخوانی یکی از روش‌ها جهت تقویت استخوان‌های آسیب‌دیده می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از مفاهیم مکانیکی، مقاومت شکست فصل مشترک سیستم دو ماده‌ای سیمان هیدروکسی آپاتیت- بافت اسفنجی استخوان مهره گاو حاوی یک ترک مرکزی در فصل مشترک دو ماده، به کمک نمونه دیسک برزلی در چهار زاویه ترک 0 تا 27 درجه بررسی شده است تا رفتار شکست نمونه‌ها در حالت‌های مختلف مود ترکیبی مورد مطالعه قرار گیرد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده موارد زیر است:

- بار شکست ساختار سیمان- استخوان حداقل 5 درصد و حداکثر 18 درصد بیشتر از بار شکست بافت اسفنجی استخوان مهره می‌باشد؛ همچنین انرژی شکست ساختار سیمان- استخوان نیز حداقل 6 و حداکثر 23 درصد بیشتر از انرژی شکست استخوان می‌باشد.
- با تغییر مود شکست از مود بازشدگی به مود برشی، افزایش مقدار بار شکست مشاهده می‌شود. مقدار بار شکست ساختار استخوان-سیمان در مود برشی 6 درصد بیشتر از بار شکست در مود بازشدگی است.

مود کششی و برشی بوده و E_b نیز انرژی شکست قطعه تک‌ماده‌ای بافت اسفنجی استخوان در حالت مود I خالص می‌باشد. مجدداً مشاهده می‌گردد که یک رابطه تقریباً خطی برای انرژی شکست مود ترکیبی بی‌بعد شده نمونه‌های دو ماده‌ای دیسک برزلی استخوان مهره- رزین هیدروکسی آپاتیت حاصل می‌گردد که با معادله (2) بیان می‌گردد. همچنین بر اساس شکل‌های 9 و 12، شکست برشی به نیرو و انرژی بیشتری برای شروع شکست در مقایسه با بارگذاری مود کششی خالص نیاز دارد. در نتیجه اتصال بررسی شده در فصل مشترک دو ماده‌ای سیستم استخوان-سیمان در برابر شکست مود II عملکرد مناسب‌تری دارد.

$$E_s/E_b = -1.09(E_t/E_b) + 1.25 \quad (2)$$

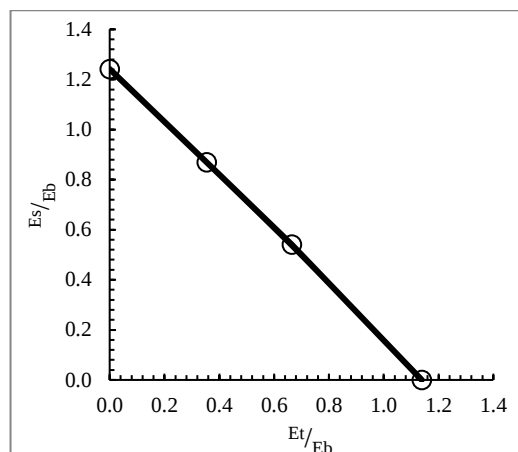


Fig. 12 Fracture energy envelope ($E_s/E_b - E_t/E_b$) obtained for the tested Brazilian disc specimens made of bi-material bone - cement
شکل 12 منحنی انرژی شکست نمونه‌های دو ماده‌ای آزمایش شده استخوان- سیمان هیدروکسی آپاتیت در حالت‌های مختلف مود ترکیبی

شکل 13 رابطه بین بار شکست و انرژی شکست نمونه‌های دو ماده‌ای استخوان-سیمان استخوانی آزمایش شده را نشان می‌دهد. بر اساس برازش منحنی به داده‌های این شکل مشاهده می‌گردد که رابطه بار شکست و انرژی شکست نمونه‌ها از یک معادله درجه دو (مطابق معادله 3) تبعیت می‌کند:

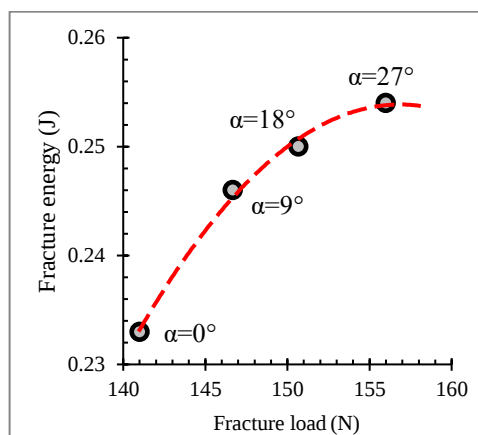


Fig. 13 Relation between the fracture energy and corresponding fracture load of bi-material bone - cement Brazilian disc specimens
شکل 13 رابطه بین انرژی شکست و بار شکست در قطعات دو ماده‌ای استخوان- سیمان

- [17] Kavanagh, J.L. and Pavier, M.J., "Rock interface strength influences fluid-filled fracture propagation pathways in the crust," *Journal of Structural Geology*, Vol. 63, pp. 68-75, 2014.
- [18] Aliha, M.R.M. and Mousavi, S.S., "Sub-Sized Short Bend Beam Configuration for the Study of Mixed-Mode Fracture," *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 225, 2020.
- [19] Mirsayar, M. and Park, P., "Modified maximum tangential stress criterion for fracture behavior of zirconia/veneer interfaces," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Vol. 59, pp. 236-240, 2016.
- [20] Gladius, L., "Apparent Fracture Toughness of Acrylic Bone Cement: Effect of Test Specimen Configuration and Sterilization Method," *Biomaterials* Vol. 20, pp. 69-78, 1999.
- [21] Bokam, P. Germaneau, A. Rigoard, P. Vendevre, T. and Valle, V., "Evaluation of Fracture Properties of Cancellous Bone Tissues Using Digital Image Correlation/Wedge Splitting Test Method," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* Vol. 102, 2020.
- [22] Mirsayar, M. Shi, X. and Zollinger, D. "Evaluation of interfacial bond strength between Portland cement concrete and asphalt concrete layers using bi-material SCB test specimen," *Engineering Solid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 293-306, 2017.
- [23] Ajdani, A., Ayatollahi, M. R., Akhavan-Safar, A., & da Silva, L. F. M. "Mixed mode fracture characterization of brittle and semi-brittle adhesives using the SCB specimen," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 101, 102629, 2020.
- [24] Aliha, M. R. M., Kucheki, H. G., & Mirsayar, M. "Mixed Mode I/II Fracture Analysis of Bi-Material Adhesive Bonded Joints Using a Novel Short Beam Specimen," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 11, pp. 5232, 2021.
- [25] Mirsayar, M., "A modified maximum tangential stress criterion for determination of the fracture toughness in bi-material notches-Part 1: Theory," *Engineering Solid Mechanics*, Vol. 2, No. 4, pp. 277-282, 2014.
- نمودارهای بار-جابجایی نمودارها نشان‌دهنده رفتار ترد نمونه‌های آزمایش‌شده می‌باشد. از این بین نمونه‌های استخوان-سیمان، رفتاری تردتر از رفتار استخوان دارند.
- بررسی الگوی گسیختگی در نمونه‌های استخوان-سیمان نشان‌دهنده گسترش ترک در فصل مشترک دو ماده بوده و در تمامی مودها چنین رفتاری مشاهده گردید. افزایش سطح تماس بین دو ماده از طریق ایجاد حالت زیگزاگ و یا طرح کنگره در قسمت استخوان می‌تواند باعث افزایش استحکام سیستم دو ماده‌ای گردد.
- ### 6-مراجع
- [1] Yan, J. Clifton, K. Mecholsky, J. and Gower, L., "Effect of Temperature on the Fracture Toughness of Compact Bone," *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, no. 7, 2007.
- [2] Lin, J.T. Lane, J.M., "Nonmedical management of osteoporosis," *Curr Opin Rheumatol*. Vol. 14, pp. 441-6, 2002.
- [3] Galibert, P. Deramond, H. Rosat, P. Le Gars, D., "Preliminary note on the treatment of vertebral angioma by percutaneous acrylic Vertebroplasty," *Neurochirurgie*, pp. 33-166, 1987.
- [4] Tam, L.E. Pilliar, R.M., "Fracture toughness of dentin/resin-composite adhesive interfaces," *J Dent Res*, 1993.
- [5] Khajotia, S. Dhuru, V. Fournelle, R. and McKinney, M., "Fracture Toughness and Load Relaxation of Dentin Bonding Resin Systems," *Dental Materials* Vol. 13, no. 3, 1997.
- [6] Tan, H. Ao, H. Ma, R. and Tang, T., "Quaternised Chitosan-Loaded Polymethylmethacrylate Bone Cement: Biomechanical and Histological Evaluations," *Journal of Orthopaedic Translation* Vol. 1, no. 1, pp. 57-66, 2013.
- [7] Souza, M. DeMunck, J. Pongprueksa, P. VanEnde, A. and VanMeerbeek, B., "Correlative Analysis of Cement-Dentin Interfaces Using an Interfacial Fracture Toughness and Micro-Tensile Bond Strength Approach," *Dental Materials* Vol. 32, no. 12, 1575-85, 2016.
- [8] Tong, J., Wong, K.Y., and Lupton, C., "Determination of Interfacial Fracture Toughness of Bone-Cement Interface Using Sandwich Brazilian Disks," *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 74, no. 12, pp. 1904-16, 2007.
- [9] MohammadAliha, M. Moosavi, A. MehriKhansari, N. and Safarabadi, M., "Effects of alumina and hydroxyapatite nanoparticles on fracture toughness of PMMA based dental composite," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 9-16, 2015.
- [10] Soares, J.B. Tang, T.X., "Bimaterial Brazilian specimen for determining interfacial fracture toughness," *Eng Fract Mech*, 1998.
- [11] Carrera, C.A. Chen, Y.C. Li, Y. Rudney, J. Aparicio, C. and Fok, A., "Dentin-Composite Bond Strength Measurement Using the Brazilian Disk Test," *Journal of Dentistry* Vol. 52, pp. 37-44, 2016.
- [12] Banks-Sills, L. and Schwartz, J., "Fracture testing of Brazilian disk sandwich specimens," *International journal of fracture*, Vol. 118, No. 3, pp. 191-209, 2002.
- [13] Pang, H.L.J. Bong, S.N. Shi, X.Q. and Wang, Z.P., "Mixed mode fracture toughness characterization for interface and interlayer cracks in adhesive bonded joints," In *International Symposium on Electronic Materials and Packaging*, Cat. No. 00EX458, pp. 197-200, 2000.
- [14] Ryoji, Y. JinQiao, L. Jin-Quan, X. Toshiaki, O. and Tomoyoshi, O. "Mixed mode fracture criteria for an interface crack," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 47, No. 3, pp. 367-377, 1994.
- [15] Banks-Sills, L. Travitzky, N. and Ashkenazi, D., "Interface fracture properties of a bimaterial ceramic composite," *Mechanics of Materials*, Vol. 32, No. 12, pp. 711-722, 2000.
- [16] Asdollah-Tabar, M., Heidari-Rarani, M., & Aliha, M. R. M. "The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete," *Composites Communications*, 100684, 2021.



بررسی تأثیر جهت‌گیری نانوذرات بر استحکام کمانشی صفحات نانوکامپوزیتی پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی و نانورس

مهدي نقابي¹، مجيد صفرآبادي فراهاني^{2*}

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

* تهران، صندوق پستی 14155-6619، msafarabadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 1400/06/29	در این مقاله تأثیر افزودن نانوذرات به ماده زمینه در بهبود استحکام کمانشی صفحات نانوکامپوزیتی پایه پلیمری از طریق مدل‌سازی اجزا محدود بررسی شد. نانوذرات از دو جنس نانولوله‌های کربنی و نانورس با درصد‌های حجمی مختلف با توزیع تصادفی به ماده زمینه افزوده شد و خواص مکانیکی ماتریس تقویت‌شده از طریق شبیه‌سازی اجزا محدود به کمک المان نماینده حجم در نرم‌افزار آباکوس محاسبه گردید. در ادامه با کدنویسی پایتون، نانولوله‌های کربنی به صورت جهت‌دهی شده درون ماده زمینه توزیع گردید و مدول یانگ مؤثر برای جهت‌های افقی و عمودی به صورت جداگانه به دست آمد. با داشتن خواص مکانیکی ماتریس تقویت‌شده، بررسی بار بحرانی کمانش برای صفحات ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری از جنس اپوکسی و الیاف تک‌جهته شیشه از طریق روش تحلیل مقادیر ویژه انجام شد. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین تطابق خوبی نشان داد. با افزودن نانوذرات افزایش بار بحرانی کمانشی صفحه با افزایش درصد حجمی مشاهده گردید. در حالتی که الیاف وجود دارند، هنگامی که نانوذرات در راستای الیاف که همان راستای بارگذاری هست توزیع شدند، بار بحرانی کمانش افزایش بیشتری نشان داد. در حالت بدون وجود الیاف و تقویت صفحه پلیمری خالص، در حالت جهت‌دهی طولی نانوذرات بار بحرانی کمانشی در راستای محوری 3.55٪ افزایش یافت، اما برای توزیع تصادفی افزایش به میزان 2.14٪ بود. در نهایت مطالعه پارامتری بر اثر جهت‌گیری نانوذرات، نسبت منطری صفحه، بارگذاری در جهت عرضی صفحه، جنس و درصد حجمی نانوذرات بر بار بحرانی کمانش صفحات پلیمری صورت پذیرفت.
پذیرش: 1400/09/22	
کلید واژگان:	
نانوکامپوزیت‌ها، تحلیل اجزا محدود، المان نماینده حجم، توزیع نانوذرات، کمانش خطی	

Investigating the effect of Nano-additives orientations on buckling strength of polymeric Nanocomposite plates reinforced by CNT and Nanoclay

Mahdi Neghabi¹, Majid Safarabadi Farahani^{2*}

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

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

* P.O.B. 14155-6619, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

Keywords

Nanocomposites, Finite Element analysis, Nanoparticles distribution, Representative volume element, Linear buckling

Abstract

In this article, the effect of adding nanoparticles into the matrix on improving the buckling strength of polymeric nanocomposite plates was investigated through finite element analysis. Two types of nanoparticles, including Carbon nanotubes (CNTs) and Nanoclays with different volume fractions (VF), were added randomly into the Epoxy matrix and mechanical properties of the reinforced matrix were estimated using simulation of a representative volume element (RVE). Moreover, a python script was generated to distribute CNT nanoparticles in aligned orientations and calculate the equivalent Young's modulus in horizontal and vertical directions. Afterwards, the critical buckling load of nanocomposite plates made of unidirectional glass fibers and nanoparticle reinforced Epoxy matrix were studied, using Eigenvalue analysis. Results were validated by previous studies and a very good agreement was obtained. In general, adding nanoparticles into the matrix led to increasing the critical buckling load with an increase of nano-additive's VFs. When nanoparticles were dispersed aligned with fiber directions, which is the same as loading direction, a higher increase of critical buckling load was observed. For the case of reinforcing pure polymeric plates without fibers, when nanoparticles were aligned in the longitudinal direction, axial critical buckling load rose to 55.3%, whereas for the random distribution, it was increased by 14.2%. Finally, a parametric study was conducted to evaluate the effect of nanoparticle orientations, the aspect ratio of plates, transverse loading, type, and volume fraction of nano-additives on the critical buckling load of polymeric plates.

1- مقدمه

نانوکامپوزیت‌ها نوعی از مواد کامپوزیتی هستند که در ساختار آن‌ها فاز زمینه با ریزساختارهایی در ابعاد نانو تقویت شده است. نانوکامپوزیت‌ها از استحکام مکانیکی بالا و وزن نسبتاً کم برخوردار هستند و مقاومت حرارتی و الکتریکی بالایی دارند. امروزه این مواد به علت خواص بهینه‌ای که دارند، در صنایع مختلف از قبیل هوافضا، ساختمانی، بسته‌بندی، خودروسازی، پزشکی و غیره به طور چشمگیری مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسته به نوع ماده زمینه و همچنین نانوذراتی که به عنوان تقویت‌کننده یا پرکننده¹ به آن افزوده می‌شود، نانوکامپوزیت‌ها به انواع مختلف همچون نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری، نانوکامپوزیت‌های پایه سرامیکی و نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی طبقه‌بندی می‌گردند. ماتریس پلیمری به خوبی نانوذرات تقویت‌کننده را در خود جای می‌دهد و می‌تواند نیروهای اعمال شده به کامپوزیت را به شکل یکنواخت بر روی تمام اجزا منتقل کند. از مهم‌ترین نانوذراتی که به عنوان تقویت‌کننده به ماده زمینه افزوده می‌شوند، نانوذرات معدنی (نانوسیلیکا و نانورس‌های حاصل‌شده از سیلیکات‌های لایه‌ای²) و نانولوله‌های کربنی (CNT³) از نوع تک جداره و چند جداره می‌باشند. نانولوله‌های کربنی ساختار استوانه‌ای یک بعدی از اتم‌های کربنی هستند که به صورت شش ضلعی مرتب شده‌اند و مدول الاستیسیته حدود 1 TPa و استحکام کششی حدود 150 GPa دارند. مطالعات نشان می‌دهد که افزودن درصد کمی از این نانوذرات (حدود 5٪) خواص مکانیکی پلیمرها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در سالیان اخیر پژوهشگران علاوه بر جنس و ساختار نانوذرات، شیوه‌های گوناگون توزیع آن‌ها درون ماده زمینه را نیز مورد توجه قرار داده‌اند. با توزیع نانوذرات به صورت یکنواخت و همگن می‌توان خواص مکانیکی همسانگرد در فاز تقویت شده مشاهده نمود. به علاوه برای استفاده‌های خاص در برخی صنایع، توزیع نانوذرات به شکل غیریکنواخت و یا جهت‌دهی شده توسط روش‌های مخصوصی از قبیل تأثیرات میدان الکتریکی یا مغناطیسی نیز دارای اهمیت می‌باشد، به شکلی که استحکام نانوکامپوزیت را در جهت مخصوصی مانند جهت بارگذاری یا الیاف تقویت نماید. یکی از رفتارهای مکانیکی که سازه نانوکامپوزیتی تحت بارگذاری از خود نشان می‌دهد، رفتار کمانشی است که در صنایع مختلف از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از آنجا که ماهیت این رفتار مکانیکی به ویژگی‌های ذاتی ماده مانند استحکام، سفتی و ... مربوط می‌شود، بهبود و ارتقا این ویژگی‌ها در سازه‌های مورد استفاده در صنایع حساس یکی از اساسی‌ترین زمینه‌های تحقیق و توسعه را شامل می‌شود.

در دهه‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات و نانوالیاف انجام شده است. گریل و هاماکرز [1] مدول الاستیسیته سازه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را توسط شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار دادند. یکی از نتایج جالب در این پژوهش این بود که با استفاده از نانولوله‌های درازتر، سازه بیشتر تقویت گردید. حبایب و همکاران [2] مدل اجزا محدود دو بعدی و سه بعدی برای شبیه‌سازی توزیع تصادفی و جهت‌دهی شده نانوذرات، برای بررسی تأثیر درصد وزنی نانوذرات بر سفتی سازه کامپوزیتی با استفاده از روش موری-تاناکا را به کار گرفتند. نتایج نشان داد که روش موری-تاناکا برای نانوذرات جهت‌دهی شده و با درصد وزنی کمتر از 5 درصد، نتایج دقیق‌تری را حاصل می‌سازد. زمانی و همکاران [3] تأثیر افزودن نانوذرات رسی به ماتریس

پلیمری بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی/نانوذرات رسی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمون کشش نشان داد افزودن نانوذرات رسی به اپوکسی سبب افزایش مدول الاستیسیته، استحکام کششی، کرنش شکست و انرژی جذب‌شده تا شکست نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانورس گردید. نتایج آزمون کمانش پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی نیز بهبود رفتار کمانشی این سازه‌ها با افزایش درصد نانوذرات رسی در زمینه را در پی داشت. نصیحت‌گذار و همکاران [4] به تحلیل کمانش پل‌های کامپوزیتی پیژوالکتریک تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در دو حالت بارهای محوری و فشاری پرداختند و ضمن بررسی اثرات تراکم حجمی نانولوله‌ها، نوع بارگذاری و ابعاد هندسی، نشان دادند که افزایش کسر حجمی⁴ نانولوله‌های تقویت‌کننده منجر به افزایش بار کمانش بحرانی سازه نیز می‌شوند. شن و همکارانش [5] بین سال‌های 2009 تا 2011 کمانش حرارتی، پاسخ پس-کمانشی و ارتعاش غیرخطی صفحات و پوسته‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که تقویت‌کننده‌های نانولوله‌ای کربنی با توزیع تابعی (FG⁵) می‌توانند دمای بحرانی کمانش و همچنین استحکام پاسخ پس از کمانش ساختارهای صفحه-پوسته تحت بار مکانیکی را افزایش دهد. محمدی‌مهر و همکاران [6]، رفتار خمشی، کمانشی و ارتعاشات آزاد تیرهای نانوکامپوزیتی تقویت‌شده با CNT را با روش‌های تئوری نظیر اویلر-برنولی، تیموشنکو و ردی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش آزمون‌هایی را به منظور تعیین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت انجام دادند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که با افزودن دو درصد نانوذرات، به بهبود خواص مکانیکی، افزایش بار بحرانی کمانش و فرکانس‌های طبیعی و همچنین کاهش خیز تیر می‌گردد. اخیراً بررسی رفتار-های مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها با توزیع نانوذرات در جهت‌گیری‌های خاص نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. اولین بار در سال 1994 آجایان و همکاران [7] هم‌راستا کردن نانوذرات درون زمینه پلیمری را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش برش‌دادن به منظور قرار دادن نانوالیاف در جهت‌های موازی درون ماده پلیمری بهره بردند. در نتیجه خواص مکانیکی بالای نانوالیاف به طور قابل ملاحظه‌ای به زمینه پلیمری منتقل گردید و ماده پلیمری خواص غیر ایزوتروپیک را از خود بروز داد. جعفری مهرآبادی و همکاران [8] کمانش صفحه نانوکامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تک جداره و چند جداره که به شکل هم‌راستا و مدرج تابعی در ضخامت صفحه توزیع شده‌اند را تحت بارگذاری صفحه‌ای فشاری یک جهته و دوجته مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با مقایسه نسبت‌های منطری⁶ مختلف تأثیر افزایش درصد حجمی و همچنین شکل‌های متفاوت توزیع نانوذرات بر بار بحرانی کمانش را ارائه دادند. خرمی شاد و همکاران [9] اثر هم‌راستا کردن نانوصفحات گرافن اکسید (GONP⁷) به کمک اعمال میدان الکتریکی مستقیم بر رفتار شکست اتصال پلیمری را به کمک روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که هم‌راستا کردن نانوذرات نسبت به حالتی که به طور تصادفی⁸ توزیع شده‌اند، مقاومت در برابر شکست بهتری از خود نشان داد. همچنین افزایش درصد وزنی نانوذرات از حدی به بعد تأثیر مطلوبی بر استحکام ماده نداشت. جعفری‌پور و همکاران [10] اثر هم‌راستا کردن نانوالیاف کربن (CNF) بر

4 Volume fraction
5 Functionally Graded
6 Aspect ratio
7 Graphene oxide nanoplatelet
8 Random

1 Filler
2 Layered silicates
3 Carbon nanotube

نکته حائز اهمیت در توزیع تصادفی این است که ذرات باید تا حد امکان به شکل یکنواخت و همگن توزیع گردند تا بیانگر دقت خوبی از خواص کلی ماده باشند. یک الگوریتم توزیع تصادفی نانوذرات درون سلول واحد به کمک اسکریپت نویسی در محیط پایتون تولید شد و نقاط خروجی در محیط نرم-افزار آباکوس برای قرار دادن نانوذرات درون ماده زمینه به کار گرفته شد. دو شرط عدم تداخل نانوذرات به یکدیگر و همچنین عدم برخورد با مرزهای سلول واحد نیز در تولید نقاط تصادفی لحاظ گردیده اند. کد تصادفی تولید شده این قابلیت را دارد تا تعداد نانوذرات، طول ضلع RVE و شعاع نانوذره را به عنوان ورودی یک تابع بگیرد و در خروجی مختصات توزیع تصادفی سه بعدی آن‌ها در فضا، با رعایت شرط‌های فرض شده، به کاربر بدهد. در مرحله بعد، با داشتن کد مورد نیاز برای توزیع تصادفی نقاط، اسکریپت نویسی برای مدل سازی RVE در محیط آباکوس انجام شد. در این کد ابتدا یک پارت⁶ مکعبی برای ماتریس از جنس رزین اپوکسی با مدول یانگ $E_m = 3.4 \text{ GPa}$ و ضریب پواسون⁷ $\nu_m = 0.3$ تولید شد [12]. سپس به کمک یک حلقه for به تعداد نانوذرات مورد نیاز با توجه به درصد حجمی مد نظر، پارت‌های مربوط به نانوذرات ایجاد گردید و خواص مواد و همچنین نوع مقاطع هر کدام اختصاص داده شد. در جدول 1 مدول یانگ، ضریب پواسون و ابعاد نانوذرات آورده شده است. پس از تولید پارت‌ها و اختصاص ویژگی‌های مواد در قسمت اسمبلی⁸، پارت‌های تولید شده جایگذاری گردیدند. همچنین در این بخش به کمک دستور انتقال و یک حلقه for پارت‌های مربوط به نانوذرات به مختصات تولید شده متناظر در تابع توزیع تصادفی منتقل شده و آن قسمت‌ها از ماتریس توخالی شدند. بدین صورت یک RVE با توزیع تصادفی نانوذرات داخل آن خواهیم داشت. برای نانوذرات با هندسه کروی مانند نانورس جهت-گیری مطرح نمی‌باشد ولی برای نانوذرات استوانه‌ای مانند CNT و CNF⁹ می‌توان در همین قسمت جهت‌گیری آن‌ها در فضا را نیز اختصاص داد. در مرحله اول جهت‌گیری نانوذرات در زوایای تصادفی داده شدند و در ادامه به صورت هم‌راستا در زوایای دلخواه ورودی جهت‌دهی گردیدند. مدل سازی- RVE ها برای درصد حجمی‌های 1/، 2/، 3/ و 4/ از نانوذرات درون ماتریس پلیمری صورت گرفتند. برای محاسبه تعداد نانوذرات در هر درصد حجمی به آسانی از فرمول‌های حجم استوانه و کره که بر حجم RVE مکعبی تقسیم می‌شوند بهره برده شد. طول ضلع RVE از مقداری شروع به افزایش داده تا جایی که نتایج همگرا شوند. طول ضلع مکعب معادل 200 nm، حدود 4 برابر بزرگ‌ترین بعد که طول CNT است در شبیه‌سازی لحاظ گردید و نتایج قابل قبول به دست آمد. همچنین به منظور دقت بیشتر در نتایج، برای هر حالت RVE حدود سه مدل تولید گردید و نتایج آن‌ها میانگین گرفته شد.

جدول 1 خواص مکانیکی و ابعاد نانوذرات [13-14]

Nanoclay	CNT	نانوذره
200	1000	مدول الاستیسیته (GPa)
0.28	0.3	ضریب پواسون
20	7.2	قطر (nm)
-	50	طول (nm)

خواص ترمومکانیکی و تنش‌های پسماند ناشی از پخت در نانوکامپوزیت‌های پلیمری را به طور عددی مطالعه نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد با افزودن 2 درصد وزنی CNF هم‌راستا شده در جهت عرضی به نانوکامپوزیت-های نامتقارن پلیمری با الیاف کربن و شیشه، به ترتیب به میزان 15٪ و 29٪ نسبت به حالت توزیع تصادفی CNF تنش‌های پسماند موجود در این نانوکامپوزیت‌ها را کاهش داد. آن‌ها همچنین در پژوهش دیگری [11] نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود خود را با نتایج آزمایشگاهی، هالپین-تسای و موری-تاناکا مقایسه کردند و ملاحظه شد که نتایج روش اجزا محدود تطابق بالاتری با نتایج تجربی دارد.

هرچند مطالعات گوناگون به نحوه توزیع نانوذرات درون ماده پلیمری و همچنین روش‌های انجام این فرآیند پرداخته‌اند، اثر هم‌راستا کردن نانوذرات در طیف گسترده از زوایا بر بهبود خواص مکانیکی ماده زمینه در جهات اصلی به طور چشم‌گیری صورت نپذیرفته است. در این مقاله به کمک شبیه‌سازی مدل اجزا محدود ابتدا به تعیین خواص مکانیکی معادل برای ماتریس اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات از جنس CNT تک جداره با هندسه استوانه-ای و نانورس با هندسه کروی پرداخته شد. سپس بجای توزیع تصادفی، نانوذرات در زوایای مختلف به شکل جهت‌گیری شده و هم‌راستا درون ماده زمینه پخش می‌شوند. برای این منظور از یک کد اسکریپت به زبان پایتون¹ بهره برده شد. در ادامه مدول الاستیسیته مؤثر در راستای دو محور اصلی مختصات برای ماتریس تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی محاسبه گردید. در ادامه با داشتن خواص مکانیکی معادل برای ماتریس اپوکسی تقویت شده، بررسی رفتار کمانشی صفحه نانوکامپوزیتی از جنس ماتریس اپوکسی و الیاف تک‌جهته شیشه، و همچنین صفحات پلیمری از جنس رزین اپوکسی بدون الیاف انجام شد. بدین منظور به کمک روش اجزا محدود بار بحرانی کمانش این صفحات تحت توزیع‌های نانوذرات در زوایای مختلف و توزیع تصادفی، نسبت منطری‌های مختلف صفحه، بارگذاری در جهت عرضی و همچنین درصد حجمی‌های مختلف برای نانوذرات محاسبه گردید.

2- مدل سازی اجزا محدود

در این بخش ابتدا به کمک شبیه‌سازی المان نماینده حجم $(RVE)^2$ خواص مکانیکی معادل ماتریس پلیمری تقویت شده با نانوذرات را به دست آمد. در تئوری کامپوزیت‌ها، RVE که سلول واحد نیز نامیده می‌شود، کوچک‌ترین حجمی است که می‌توان خواص ماکروسکوپی³ نمونه را به طور متوسط به آن نسبت داد. در این تحقیق از یک سلول واحد مکعبی $(3D \text{ RVE})$ که در برگزیده فاز ماتریس و نانوذرات داخل آن می‌باشد استفاده می‌گردد. شبیه-سازی در محیط CAE نرم‌افزار آباکوس⁴ انجام می‌پذیرد. ابعاد سلول واحد باید تا حدی بزرگ باشند که خواص مکانیکی آن تقریب قابل قبولی از خواص ماده در ابعاد ماکروسکوپی⁵ باشد. از طرف دیگر افزایش ابعاد سلول واحد منجر به طولانی‌تر و پرهزینه‌تر شدن محاسبات می‌گردد. لذا مطالعات نشان می‌دهد با در نظر گرفتن طول ضلع سلول واحد به اندازه سه تا پنج برابر بیشترین طول ذرات داخل آن به نتایج مطلوبی می‌رسیم.

ابتدا نانوذرات به صورت تصادفی درون ماده زمینه توزیع شدند. روش‌های مختلفی برای توزیع تصادفی نقاط درون سطح یا حجم مشخص وجود دارد. از شناخته‌شده‌ترین این روش‌ها الگوریتم توزیع تصادفی مونت-کارلو⁵ می‌باشد.

⁶ Part

⁷ Poisson's ratio

⁸ Assembly

⁹ Carbon nano fiber

¹ Python

² Representative Volume Element

³ Macroscopic

⁴ Abaqus

⁵ Monte Carlo

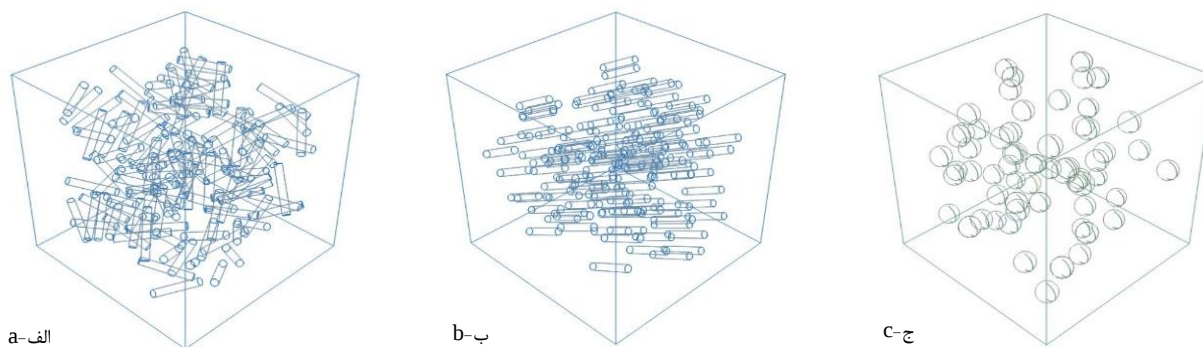


Fig. 1 Generated RVE of 3% VF (a) CNTs with random distribution (b) CNTs with aligned distribution (c) Nanoclays with random distribution

شکل 1 سلول‌های واحد تولید شده برای 3٪ حجمی، الف) CNT با توزیع تصادفی، ب) CNT با توزیع هم‌راستا شده، ج) نانورس با توزیع تصادفی

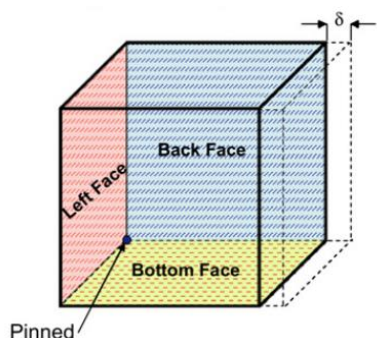


Fig. 2 Symmetric boundary conditions and applied uniform displacement load in 3D RVE model [2]

شکل 2 شرایط مرزی متقارن و بار یکنواخت جابجایی اعمال شده در سلول واحد سه بعدی مدل‌سازی شده [2]

2-2 محاسبه خواص مکانیکی معادل برای ماتریس تقویت‌شده با نانوذرات

تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها از موضوعاتی است که محققان پژوهش‌های گسترده بر روی آن انجام می‌دهند. از جمله روش‌های ارائه‌شده، روش‌های تجربی، عددی و نیمه تجربی می‌باشد. استفاده از روابط میکرومکانیکی مانند هالپین-تسای⁹ و موری-تاناکا¹⁰ از دقت خوبی برای تعیین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها با توزیع همگن نانوذرات برخوردار هستند. در این پژوهش از روش کاربرد همگن‌سازی عددی به کمک RVE تولید شده، خواص مکانیکی مؤثر معادل نانوکامپوزیت، با میانگین گرفتن از تنش‌ها و کرنش‌های به وجود آمده در المان‌ها ناشی از بارگذاری یکنواخت استاتیکی بر روی حجم کل سلول واحد به دست می‌آیند [15]. برای محاسبه مدول یانگ مؤثر¹¹، تنش و کرنش میانگین حجمی تمام المان‌های RVE به کمک کد پایتون و طبق روابط زیر محاسبه گردید [15].

$$S_{ave} = \sum_{i=1}^N \frac{s_i \times v_i}{V} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ave} = \sum_{i=1}^N \frac{e_i \times v_i}{V} \quad (2)$$

$$E_{eff} = \frac{S_{ave}}{\varepsilon_{ave}} \quad (3)$$

در این مدل‌سازی بیشتر اثرات کلی هندسه نانوذرات در ابعاد ماکرو با اختصاص خواص مکانیکی آن‌ها در تقویت ماده زمینه و بهبود استحکام کمانشی صفحات نانوکامپوزیتی مورد توجه بوده و لذا ساختار استوانه‌ای ساده و غیرمشبک برای نانولوله‌ها درون ماتریس در نظر گرفته شد و با نتایج مراجع صحت سنجی گردید. اتصال بین نانوذرات توزیع شده و ماتریس در محدوده کرنش‌های پایین تا حد خیلی زیادی می‌توان از نوع کاملاً متصل¹ با قید گره² در نظر گرفت. البته لازم به ذکر است که در مدل‌سازی‌های با دقت بالاتر که برهم‌کنش بین نانوذرات و ماتریس در ابعاد مولکولی اهمیت دارد، معمولاً فاز میانی³ نیز در مدل‌سازی لحاظ می‌گردد. در شکل 1 سه نمونه از RVE های تولید شده به ترتیب برای ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با توزیع تصادفی، نانولوله‌های کربنی هم‌راستا شده (30 درجه) و هم‌چنین نانو-رس با توزیع تصادفی و درصد حجمی 3٪ ارائه می‌گردد.

1-2 بارگذاری و شرایط مرزی

به منظور تعیین خواص مکانیکی نمونه، لازم است تا سلول واحد تحت بارگذاری استاتیکی قرار گیرد. از این رو یک بار از نوع جابجایی (δ) با کرنش ثابت برابر با 1٪ طول RVE به یک وجه از آن اعمال می‌شود و تنش‌ها و کرنش‌های حاصل از آن به دست می‌آیند. شرایط مرزی از نوع متقارن⁴ است به طوری که سه وجه زیرین، پشتی و چپی از مکعب در راستای بردار نرمال هر یک ثابت می‌شوند و هم‌چنین نقطه تقاطع آن سه وجه نیز تمام درجات آزادی آن بسته شده تا پین⁵ شود [2]. برای محاسبه خواص مکانیکی در سه راستای اصلی مختصات، بارگذاری کرنشی سه مرتبه به صورت جداگانه بر وجه‌های آزاد مکعب اعمال می‌گردد. در شکل 2 شرایط مرزی و بارگذاری سلول واحد در راستای محور x نشان داده شده است.

در گام بعدی سلول واحد مدل‌سازی شده که شامل ماتریس اپوکسی و نانوذرات توزیع شده درون آن می‌باشد، مش زده می‌شود. مش‌زنی با روش آزاد⁶ و المان‌های استفاده شده از نوع سه‌بعدی خطی چهار گره‌ای هرمی⁷ (C3D4) می‌باشد. دانه‌ریزی⁸ المان‌ها هم به نحوی انجام می‌شود که در اطراف نانوذرات المان‌ها ریزتر باشند و هر چه به سمت نقاط دور از نانوذرات و لبه‌های ماتریس مکعبی می‌رویم ابعاد المان‌ها درشت‌تر می‌شوند. با این روش دقت نتایج بالاتر رفته و حجم محاسبات تا حد خوبی کاهش می‌یابد.

¹ Fully bonded

² Tie

³ Interphase

⁴ Symmetric boundary conditions

⁵ Pin

⁶ Free

⁷ Tetrahedral Elements

⁸ Seeding

⁹ Halpin-Tsai

¹⁰ Mori-Tanaka

¹¹ Effective Young's modulus

مسئله کمانش ورق بر اساس تئوری کلاسیک صفحه^۲، تئوری تیر اویلر-برنولی و تیموشنکو اصلاح شده^۳، تئوری‌های تغییر شکل برشی مرتبه اول^۴ و تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر^۵ می‌باشند. این روش‌ها عموماً مبتنی بر حل معادلات تعادل و ساختاری سازه با در نظر گرفتن فرضیات خاص خود هستند [18]. طبق معادلات تعادل و پایداری در تحلیل خطی کمانشی ورق نازک، بار بحرانی کمانشی صفحه تحت بار ثابت تک‌جهته محوری N_x مطابق شکل 3 از روابط زیر به دست می‌آید [19,20]:

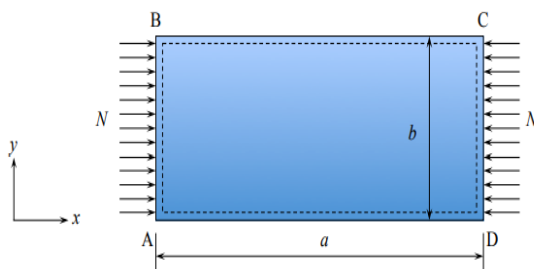


Fig. 3 Geometry and loading of the classical plate buckling problem

شکل 3 هندسه و شرایط بارگذاری در مسئله کمانش ورق

$$D\nabla^4 w + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (8)$$

که:

$$\nabla^4 = \nabla^2 \nabla^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (9)$$

در این روابط w جابجایی در راستای عمود بر صفحه یا همان خیز است. ∇^2 عملگر لاپلاس^۶ و ∇^4 عملگر همساز مضاعف^۷ می‌باشد. همچنین D سفتی خمشی^۸ ورق می‌باشد که برابر است با:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (10)$$

که E مدول یانگ صفحه، t ضخامت ورق و ν ضریب پواسون آن است. با در نظر گرفتن شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده و بارگذاری ثابت تک‌جهته N_x در راستای طولی، پاسخ غیربدهی معادله دیفرانسیل (8) به شکل رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$N_x = \frac{D\pi^2}{b^2} \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (11)$$

در رابطه (11)، a و b به ترتیب طول و عرض صفحه هستند و m نیز نسبت طول به عرض صفحه می‌باشد.

$$m = \frac{a}{b} \quad (12)$$

در روابط فوق S_{ave} و ε_{ave} به ترتیب تنش و کرنش میانگین حجمی تمام المان‌های تشکیل دهنده RVE می‌باشند. همچنین V ، V_i ، e_i ، S_i و N به ترتیب بیانگر تنش هر المان، کرنش هر المان، حجم هر المان، حجم کل المان نماینده حجم و تعداد المان‌های موجود در مدل هستند.

لازم به یادآوری هست که در حالتی که نانوذرات به صورت تصادفی و همگن درون ماده زمینه توزیع شده‌اند، خواص معادل برای ماده از نوع ایزوتروپیک^۱ می‌باشد، اما هنگامی نانوذرات به صورت جهت‌دهی شده توزیع می‌گردند، مدول یانگ مؤثر در جهات مختلف متفاوت است، لذا می‌بایست تنش‌ها و کرنش‌های میانگین برای جهات اصلی جداگانه محاسبه شده تا در نتیجه مدول یانگ مؤثر برای آن جهات حاصل گردد.

به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، از روش نیمه تجربی هالپین-تسای بهره برده شد. این روابط میکرومکانیکی با فرض اتصال کامل بین نانوذرات و ماتریس برای تعیین مدول یانگ مؤثر ماتریس تقویت شده با توزیع تصادفی و همگن نانوذرات درون آن به کار می‌روند. دقت بالای این مدل طبق تحقیقات آزمایشگاهی زیادی چون پژوهش صورت گرفته توسط شکریه و همکاران [16] سنجیده شده است. روابط ارائه شده در این مدل به شرح زیر می‌باشد [13,17]:

$$E_{eff} = \frac{3}{8}E_1 + \frac{5}{8}E_2 \quad (4)$$

$$G_{eff} = \frac{1}{8}E_1 + \frac{1}{4}E_2 \quad (5)$$

که در این روابط E_{eff} و G_{eff} به ترتیب مدول یانگ و مدول برشی معادل نانوکامپوزیت ایزوتروپیک می‌باشند. E_1 و E_2 نیز به ترتیب نشان‌دهنده مدول‌های یانگ فرضی در جهات طولی و عرضی نانوذره یا نانوالیاف می‌باشند که از روابط زیر محاسبه می‌گردند [13]:

$$\frac{E_1(or 2)}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta VF}{1 - \eta VF} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad (7)$$

در روابط (6) و (7) E_m مدول یانگ ماتریس خالص، E_f مدول یانگ ماده تقویت‌کننده (نانوذره یا نانوالیاف)، VF کسر حجمی نانوذره در ماتریس خالص و ξ ضریب اصلاح مربوط به شرایط هندسی و شرایط بارگذاری می‌باشد که مقدار آن برای E_1 و E_2 به ترتیب برابر با $\frac{2l}{a}$ و 2 هست (l طول نانوذره و d قطر آن می‌باشد).

3- کمانش صفحه نانوکامپوزیتی

پس از به دست آوردن خواص ماتریس تقویت‌شده با نانوذرات، مطالعه بر بار بحرانی کمانش صفحات نانوکامپوزیتی تشکیل‌شده از ماتریس تقویت‌شده و الیاف شیشه تک‌جهته انجام می‌شود. همچنین تأثیر جهت‌دهی کردن نانوذرات در راستاهای مختلف بر بار بحرانی کمانش صفحه نیز بررسی می‌گردد.

روش‌های مختلف تئوری، تجربی و عددی گوناگون برای تعیین بار بحرانی کمانش صفحات مستطیلی وجود دارند. از جمله روش‌های متداول تئوری، حل

¹ Isotropic

² Classical Plate Theory (CPT)

³ Modified Euler-Bernoulli and Timoshenko Beam Theory

⁴ First Order Shear Deformation Theory (FSDT)

⁵ Higher Order Shear Deformation Theory (HSDT)

⁶ Laplace Operator

⁷ Biharmonic Operator

⁸ Flexural rigidity

می‌گردد. در ادامه اعمال بارگذاری و شرایط مرزی انجام شد. شرایط تکیه‌گاهی صفحه از نوع ساده و گیردار فرض می‌گردد. بار کمانش خطی از نوع فشاری محوری می‌باشد که در شبیه‌سازی نرم‌افزار یک بار واحد طولی از نوع بار لبه‌ای^{۱۵} در راستای محور افقی که همان راستای الیاف می‌باشد، به طور یکنواخت وارد می‌گردد. در قسمت نتایج مقدار ویژه حاصل شده از حلگر نرم-افزار در مود اول، ضریب طول لبه‌ای که بار به آن اعمال شده برابر با بار بحرانی کمانش خطی متناظر می‌باشد. در صورت نیاز می‌توان مقدار بار بحرانی برای مودهای بالاتر را نیز به همین ترتیب محاسبه کرد، هر چند در اینجا مورد اهمیت نمی‌باشند.

4- نتایج

در این بخش جداول و نمودارهای مربوط به نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر ارائه می‌گردد. ابتدا نتایج مربوط به محاسبه مدول الاستیسیته مؤثر زمینه پلیمری تقویت شده با نانوذرات با توزیع تصادفی و جهت‌دهی شده، و سپس بار بحرانی کمانش صفحه نانوکامپوزیتی تشکیل شده از زمینه پلیمری تقویت شده در شرایط تکیه‌گاهی و درصد‌های حجمی مختلف نمایش داده می‌شود.

4-1- نتایج مدول الاستیسیته مؤثر برای زمینه پلیمری تقویت شده با نانوذرات ماتریس پلیمری از جنس اپوکسی با مدول 4.3 GPa و ضریب پواسون برابر با 0.3، با افزودن نانوذرات با خواص مکانیکی و ابعاد ذکر شده در جدول 1 تقویت شدند و خواص مکانیکی معادل آن به کمک شبیه‌سازی اجزا محدود پیش‌بینی گردید. صحت نتایج با روش نیمه تجربی هالپین-تسای مقایسه شده است. در شکل 4 نتایج مربوط به مدول 4.3 GPa و ضریب پواسون 0.3، با افزودن نانوذرات CNT در درصد حجمی‌های 1/، 2/، 3/ و 4/ آورده شده است.

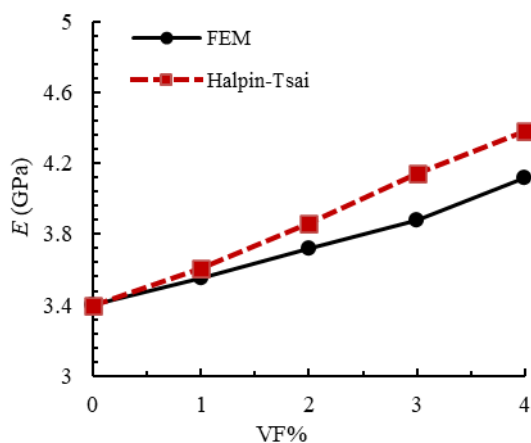


Fig. 4 Effective elastic modulus of Epoxy matrix reinforced with randomly oriented CNTs

شکل 4 مدول الاستیسیته مؤثر ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با توزیع تصادفی

این نتایج برای سه نمونه مدل‌سازی شده RVE تحت بارگذاری یکنواخت کرنشی 1/ و میانگین گرفتن از آن‌ها به دست آمده است. همچنین ضرایب پواسون مؤثر معادل برای ماتریس تقویت شده نیز به روش مشابه محاسبه گردید و تفاوت چندانی با ضریب پواسون ماتریس خالص نداشت، لذا همان مقادیر ثبت گردیدند. طبق نتایج ملاحظه شده در شکل 4 با افزایش درصد

در این مقاله تحلیل کمانشی انجام شده با روش اجزا محدود و روش تعیین مقدار ویژه^۱ به کمک نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. تحلیل کمانش از جمله مسائل مربوط به پایداری^۲ سازه‌ها می‌باشد. روش تعیین مقدار ویژه عموماً برای تخمین بار بحرانی یا دوشاخه شدن^۳ سازه‌های سفت^۴ به کار گرفته می‌شود. این روش یک نوع مسأله آشفتگی خطی^۵ می‌باشد که می‌تواند برای تعیین بار بحرانی سازه دارای پیش بار و حساسیت به ناکاملی^۶ سازه استفاده شود [21]. به طور کلی در روش مقادیر ویژه کمانشی، ما به دنبال یافتن بارهایی هستیم که ماتریس سفتی^۷ مدل را منفرد^۸ می‌کنند، بنابراین در معادله (13) جواب‌های غیربدیهی^۹ خواهیم داشت [21,22].

$$K^{MN}v^M = 0 \quad (13)$$

که K^{MN} ماتریس سختی استفاده شده در هر گام تکرار حل مسأله پس از اعمال بار می‌باشد. همچنین v^M هم پاسخ‌های غیربدیهی بردار تغییر مکان می‌باشد. M و N بیانگر درجات آزادی سیستم هستند. بار اعمالی هم می‌تواند از نوع فشار، بار متمرکز، جابجایی و بار حرارتی باشد.

برای حل معادله (13) یک الگوی بارگذاری افزایشی^{۱۰}، Q^N ، تعریف می‌شود. مقدار این بار تعریف شده مهم نیست و در ادامه در ضرایب بار (λ_i) حاصل شده از حل مسأله مقدار ویژه ضرب می‌گردند. شکل عمومی رابطه به فرم زیر است [21]:

$$(K_0^{NM} + \lambda_i K_{\Delta}^{NM})v_i^M = 0 \quad (14)$$

در معادله (14)، K_0^{NM} ماتریس سختی متناظر با حالت پایه است که تأثیر پیش‌بارها^{۱۱}، P^N ، (در صورت وجود پیش‌بار) را نیز در بر می‌گیرد. K_{Δ}^{NM} نیز نماینده ماتریس سختی بار و تنش‌های اولیه دیفرانسیلی ناشی از Q^N می‌باشد. همچنین λ_i مقادیر ویژه، v_i^M شکل مودهای کمانش یا همان بردارهای ویژه^{۱۲} و اندیس i بیانگر شماره مود کمانش متناظر می‌باشند.

برای به دست آوردن بار بحرانی کمانش معمولاً کمترین مقدار λ_i مد نظر می‌باشد که متناظر با مود اول کمانش سازه هست. لازم به ذکر است که K_0^{NM} و K_{Δ}^{NM} ماتریس‌های متقارن شده می‌باشند، زیرا حلگر نرم‌افزار آباکوس-استاندارد تنها قادر به استخراج مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس‌های متقارن است. به طور کلی حلگر نرم‌افزار از روش‌های تکرار^{۱۳} برای استخراج مقادیر و بردارهای ویژه بهره می‌برد، به نحوی که هر چه تعداد گام‌های تکرار افزایش یابد، نتایج از دقت و همگرایی بالاتری برخوردار می‌شود.

لذا به منظور تعیین بار بحرانی کمانشی صفحه از روش FEM در نرم‌افزار آباکوس، پس از مدل‌سازی صفحه نانوکامپوزیتی و اختصاص خواص مکانیکی زیرلایه‌ها و همچنین هندسه و ترتیب لایه‌چینی^{۱۴}، یک گام حل آشفتگی خطی و از نوع کمانش ایجاد نموده و تعداد بردارهای ویژه مدنظر تعیین

¹ Eigenvalue analysis

² Stability problems

³ Bifurcation

⁴ Stiff structures

⁵ Linear perturbation procedure

⁶ Imperfection

⁷ Stiffness Matrix

⁸ Singular

⁹ Nontrivial solutions

¹⁰ Incremental loading pattern

¹¹ Preloads

¹² Eigenvectors

¹³ Iteration

¹⁴ Composite lay-up

¹⁵ Shell edge load

لازم به ذکر است که جهت طولی تعریف شده به صورت قراردادی می باشد و در اینجا همان جهت اعمال بار یکنواخت کرنشی بر وجه عمود بر محور طولی RVE است که متناظر با بیشترین افزایش مدول الاستیسیته برای حالت توزیع نانولوله های کربنی هم راستا با این محور گردید.

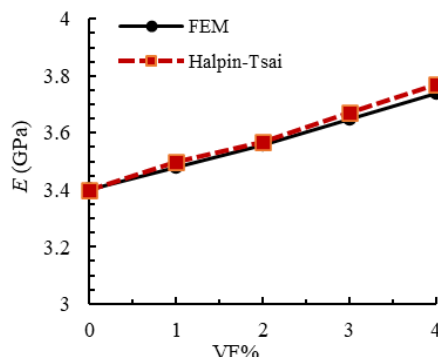


Fig. 5 Effective elastic modulus of Epoxy matrix reinforced with randomly oriented Nanoclays

شکل 5 مدول الاستیسیته مؤثر ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانورس با توزیع تصادفی

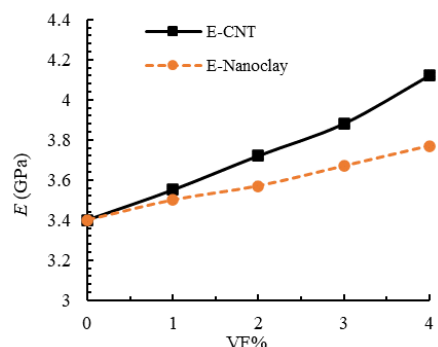


Fig. 6 Effective elastic modulus of Epoxy matrix reinforced with randomly oriented CNTs and Nanoclays

شکل 6 مدول الاستیسیته مؤثر ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانولوله های کربنی و نانورس با توزیع تصادفی

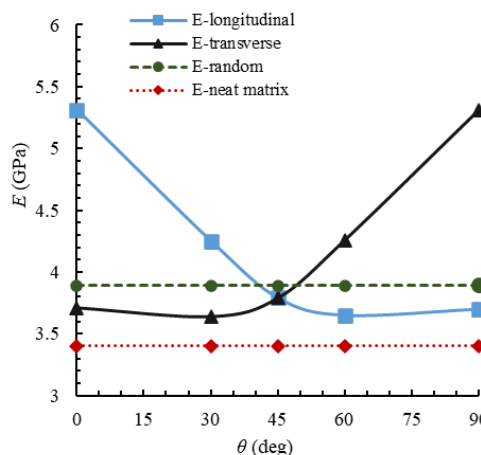


Fig. 7 Effective longitudinal and transverse elastic modulus of Epoxy matrix reinforced with aligned CNTs in different angles

شکل 7 مدول الاستیسیته طولی و عرضی مؤثر ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانولوله های کربنی با توزیع هم راستا شده در زوایای مختلف

حجمی نانولوله های کربنی افزوده شده به ماتریس خالص^۱ (بدون تقویت کننده)، مدول یانگ به طور تقریباً خطی افزایش می یابد. بیشترین افزایش مربوط به درصد حجمی ۴٪ نانولوله های کربنی می باشد که طبق نتایج FEM مدول یانگ به میزان ۲۱.۲٪ نسبت به ماتریس خالص افزایش یافته است. البته در عمل برای افزایش درصد حجمی محدودیت وجود دارد و از یک مقدار به بعد باعث ایجاد انباشتگی^۲ درون ماتریس گردیده و خواص مکانیکی و استحکام را کاهش می دهد. همچنین طبق شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از FEM و مدل هالپین-تسای تطابق خوبی را نشان می دهد. حداکثر اختلاف بین نتایج در دو روش برابر با ۵.۸٪ است که مقدار ناچیزی می باشد. به طور کلی نیز مقادیر مدول الاستیسیته پیش بینی شده در روش هالپین-تسای کمی از مدول های حاصل از روش FEM بیشتر می باشد.

در شکل ۵ نتایج مربوط به مدول الاستیسیته ماتریس تقویت شده با توزیع تصادفی نانوذرات از جنس نانورس نشان داده شده است. تأثیر افزایش درصد حجمی این نانوذرات بر افزایش مدول الاستیسیته مؤثر همانند نانوذرات CNT به شکل خطی می باشد. بیشترین افزایش مربوط به درصد حجمی ۴٪ نانورس می باشد که طبق نتایج FEM مدول یانگ به میزان ۱۰.۳٪ نسبت به ماتریس خالص افزایش یافته است. البته واضح است که به دلیل مدول یانگ پایین تر نانورس نسبت به نانولوله های کربنی، مقدار افزایش مدول مؤثر ماتریس در این حالت کمتر می گردد. در شکل ۶ مقادیر مدول الاستیسیته مؤثر ماتریس تقویت شده با توزیع تصادفی CNT و نانورس حاصل از FEM در یک نمودار مقایسه شده اند.

طبق شکل ۶ با افزایش درصد حجمی نانوذرات تقویت کننده، اختلاف اثر تقویت کنندگی دو نوع نانوذره چشم گیرتر می گردد، به نحوی که در درصد حجمی ۴٪، مدول مؤثر ماتریس تقویت شده با CNT به میزان ۹.۳٪ از ماتریس تقویت شده با نانورس بیشتر است، که ناشی از خواص مکانیکی بالاتر نانولوله های کربنی نسبت به نانورس می باشد.

در ادامه تأثیر هم راستا کردن نانولوله های کربنی بر مدول الاستیسیته مؤثر در شکل ۷ ارائه گردیده است. نانوذرات CNT در زوایای ۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، به صورت موازی و هم راستا شده درون ماتریس اپوکسی با درصد حجمی ثابت ۳٪ توزیع شدند و مدول الاستیسیته مؤثر ماتریس در دو راستای طولی^۳ و عرضی^۴ محاسبه گردید. طبق شکل ۷ ملاحظه می گردد که با تغییر زاویه قرارگیری نانولوله های کربنی از صفر تا ۴۵ درجه، مدول یانگ طولی کاهش می یابد، به نحوی که در زاویه صفر درجه بیشینه مدول یانگ طولی به دست می آید؛ و به طور عکس، از ۴۵ تا ۹۰ درجه مدول یانگ عرضی افزایش می یابد، به طوری که در زاویه ۹۰ درجه بیشینه مدول یانگ عرضی مشاهده شده است. همچنین مدول یانگ مؤثر برای حالتی که نانولوله های کربنی با توزیع تصادفی و جهت گیری تصادفی درون ماده زمینه با همان درصد حجمی ۳٪ قرار گرفته اند نیز با مدول های طولی و عرضی در زوایای مختلف مقایسه شده است. همان طور که قبلاً ذکر شد در حالت توزیع تصادفی نانوذرات خواص مکانیکی RVE در همه جهات تقریباً یکسان است و می توان آن را ایزوتروپیک فرض کرد. نتایج پژوهش نشان داد برای حالت توزیع هم راستا نانوذرات CNT در زاویه صفر درجه بیشترین مقدار مدول الاستیسیته طولی به دست می آید که به ترتیب به میزان قابل توجه ۵۶.۲٪ و ۳۶.۸٪ نسبت به مدول یانگ ماتریس خالص و ماتریس با توزیع تصادفی نانوذرات CNT افزایش یافته است.

^۱ Neat matrix

^۲ Agglomeration

^۳ Longitudinal

^۴ Transverse

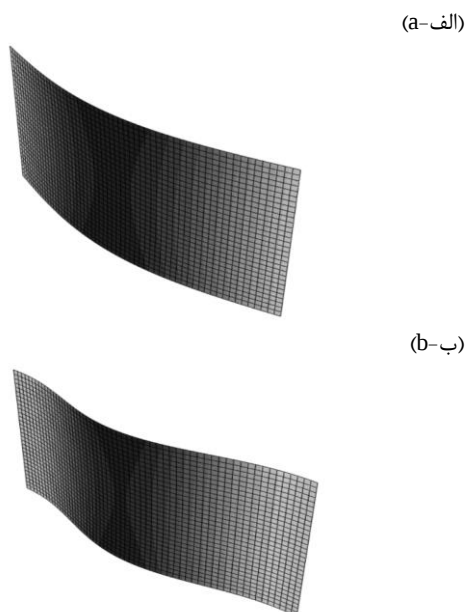


Fig. 9 First buckling mode shape of (a) Simply supported and (b) Clamped composite plate

شکل 9 شکل مود اول کمانش صفحه کامپوزیتی با تکیه‌گاه (الف) ساده و (ب) گیردار

جدول 2 مقایسه بار بحرانی کمانش صفحه کامپوزیتی تحقیق حاضر و نتایج تجربی و تئوری

Table 2 Comparison between critical buckling load of composite plate resulted from present study and theoretical and experimental results

Experiment [12]	Theory [12]	Present study (FEM)	بار بحرانی (N)
			نوع تکیه‌گاه
141.7	157.65	157.8	ساده
563	630.6	638.7	گیردار

طبق جدول 2 و شکل 10، نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با روش شبیه‌سازی اجزا محدود، تطابق بسیار خوبی با نتایج تئوری و تجربی داشت. به طور مثال برای صفحه با تکیه‌گاه گیردار اختلاف بار بحرانی کمانش حاصل از FEM با روش تئوری و تجربی به ترتیب 1.3٪ و 13.4٪ می‌باشد. کمتر بودن بار بحرانی کمانش حاصل از آزمایش تجربی معمولاً به دلیل وجود ناکاملی‌هایی در هندسه و ساختار نمونه، و همچنین بروز خطاهای احتمالی در اعمال بار و شرایط مرزی رخ می‌دهد.

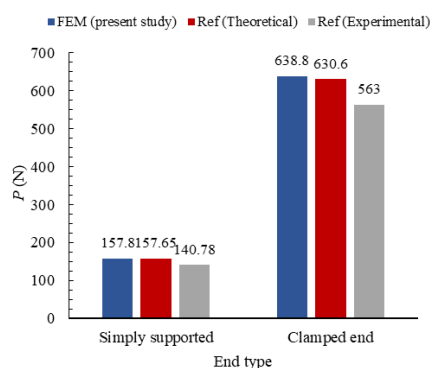


Fig. 10 Validation study of critical buckling load

شکل 10 اعتبار سنجی بار بحرانی کمانش

2-4- نتایج بار کمانش بحرانی برای صفحات نانوکامپوزیتی مدل‌سازی شده

اکنون با در اختیار داشتن خواص مکانیکی ماتریس تقویت شده با نانوذرات، بررسی بار بحرانی کمانشی نانوکامپوزیت ساخته شده از آن انجام گردید. به منظور مقایسه و اعتبارسنجی نتایج خود، از نمونه چندلایه^۱ بررسی شده در پژوهش چای و همکاران [12] استفاده شد. در آن پژوهش بار بحرانی کمانش صفحات کامپوزیتی ساخته شده از ماتریس اپوکسی و الیاف تک‌جهته شیشه از پیش‌ساخته‌های^۲ فایبرگلاس از نوع Fibredux 913G-E-5-30% به صورت تئوری و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت.

ابعاد صفحه طبق پژوهش چای و همکاران برابر با 120×60 mm و ضخامت آن برابر با 1 mm می‌باشد. زاویه قرارگیری الیاف صفر درجه و هم‌راستا با محور طولی صفحه که بارگذاری نیز در آن راستا اعمال می‌شود، می‌باشد. تعداد لایه‌ها برابر 8 و شرایط تکیه‌گاهی از دو نوع تکیه‌گاه ساده^۳ و گیردار^۴ لحاظ گردید. بارگذاری به صورت بار یکنواخت خطی فشاری در راستای محوری (هم‌راستا با جهت الیاف) بر انتهای آزاد صفحه اعمال شد. شکل 8 بارگذاری فشاری در راستای طولی بر صفحه نانوکامپوزیتی مستطیل شکل با تکیه‌گاه گیردار را نشان می‌دهد.

هم‌چنین در شکل 9، کمانش صفحه در مود اول برای دو نوع تکیه‌گاه ساده و گیردار که توسط شبیه‌سازی کمانش در نرم‌افزار آباکوس از روش تحلیل مقادیر ویژه به دست آمده‌اند ملاحظه می‌گردد.

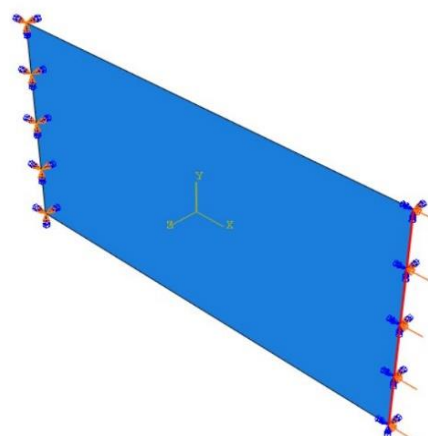


Fig. 8 Boundary conditions and applied load on rectangular nanocomposite plate

شکل 8 شرایط مرزی و بارگذاری بر صفحه نانوکامپوزیتی مستطیل شکل

3-4- اعتبارسنجی نتایج

روش تحلیل استفاده شده در پژوهش حاضر شبیه‌سازی FEM می‌باشد. در ابتدا برای بررسی دقت روش استفاده شده، کمانش یک نمونه صفحه کامپوزیتی مطالعه شده در مرجع [12] شبیه‌سازی گردید. خواص مکانیکی یک نمونه تک لایه^۵ مورد آزمایش مرجع [12] برابر با $E_{11} = 46$ GPa، $E_{22} = 15$ GPa، $G_{12} = 4.17$ GPa و $\nu_{12} = 0.276$ می‌باشد. در جدول 2 مقادیر بار بحرانی کمانش صفحه کامپوزیتی با خواص مکانیکی فوق حاصل از روش FEM با نتایج به دست آمده در مرجع [12] به روش تئوری و تجربی مقایسه گردید.

¹ Laminate

² Prepregs

³ Simply supported

⁴ Clamped

⁵ Lamina

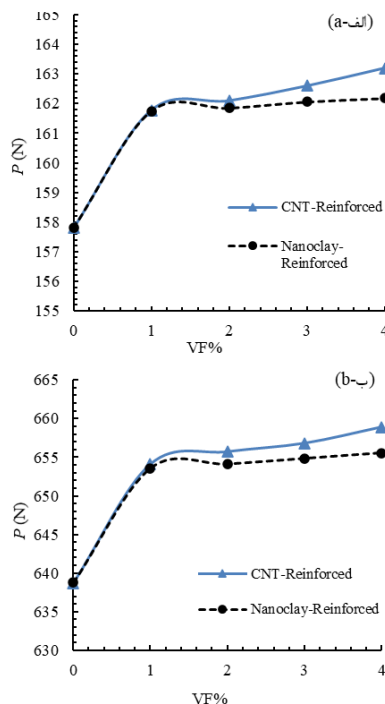


Fig. 12 Critical buckling load of CNT/Glass fiber reinforced and Nanoclay/Glass fiber reinforced nanocomposite plates with random distribution of nanoparticles inside Epoxy matrix for (a) Simply supported and (b) Clamped boundary conditions

شکل 12 بار بحرانی کمانش صفحات نانوکامپوزیتی از جنس ماتریس اپوکسی تقویت شده با توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی و نانورس و الیاف از نوع شیشه برای شرایط مرزی (الف) تکیه‌گاه ساده و (ب) تکیه‌گاه گیردار

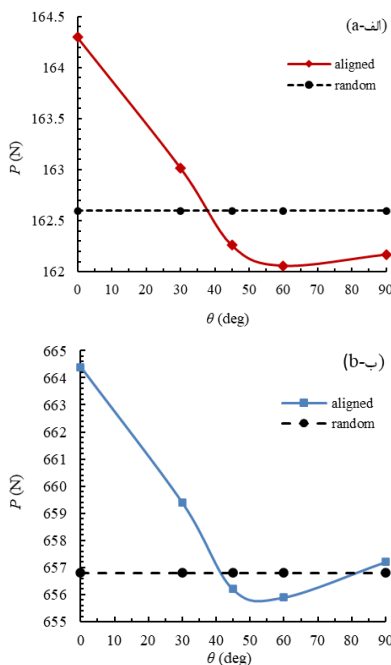


Fig. 13 Critical buckling load of CNT/Glass fiber reinforced nanocomposite plates with aligned distribution of nanoparticles at different angles inside Epoxy matrix for (a) Simply supported and (b) Clamped boundary conditions

شکل 13 بار بحرانی کمانش صفحات نانوکامپوزیتی از جنس ماتریس اپوکسی تقویت شده با توزیع هم‌راستا شده نانولوله‌های کربنی در زوایای مختلف و الیاف از نوع شیشه برای شرایط مرزی (الف) تکیه‌گاه ساده و (ب) تکیه‌گاه گیردار

4-4 مطالعه همگرایی مش

به منظور بررسی دقت بیشتر نتایج حاصل از FEM، استقلال از مش مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق شکل 11 مش‌زنی مدل ابتدا با المان‌های درشت‌تر انجام گرفت و سپس رفته رفته اندازه المان‌ها کوچک‌تر گردید و در نتیجه تعداد (n) آن‌ها افزایش داده شد. مشاهده گردید که در حدود تعداد 4000 المان مقادیر بار بحرانی همگرا و ثابت می‌گردند. لازم به ذکر است نوع المان استفاده شده از نوع متداول پوسته‌ای چهارگره‌ای (S4R) می‌باشد.

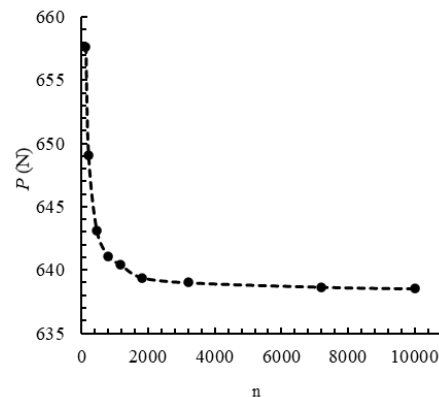


Fig. 11 Mesh convergence study

شکل 11 بررسی همگرایی مش

4-5 بررسی کمانش صفحات نانوکامپوزیتی تقویت شده با الیاف و نانوذرات

با در اختیار داشتن خواص مؤثر ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانوذرات، به کمک روابط میکرومکانیکی قانون اختلاط¹ و هالپین-تسای، خواص مکانیکی معادل تک لایه GFRP تشکیل شده از ماتریس تقویت شده به دست آمد و تحلیل کمانش خطی به منظور یافتن بار بحرانی بر صفحات نانوکامپوزیتی انجام گردید. در شکل 12 بار بحرانی کمانش صفحات نانوکامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه و توزیع تصادفی نانوذرات CNT و نانورس، تحت شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده و گیردار نشان داده شده است. طبق نتایج شکل 12 با افزایش درصد حجمی نانوذرات درون ماده زمینه، مقادیر بار بحرانی افزایش می‌یابد، هر چند این افزایش شیب تندی ندارد. بیشترین مقدار افزایش بار بحرانی کمانش مربوط به درصد حجمی 4/ نانولوله‌های کربنی می‌باشد که در حالت تکیه‌گاه ساده و گیردار به ترتیب به میزان 3/5٪ و 3/2٪ نسبت به صفحه بدون نانوذره افزایش نشان می‌دهد. هم‌چنین افزایش بار بحرانی کمانش برای توزیع تصادفی CNT نسبت به توزیع تصادفی نانورس بیشتر است که ناشی از خواص مکانیکی و نسبت منظری بالاتر CNT نسبت به نانورس می‌باشد. هم‌چنین مطابق شکل 12، مقادیر بار بحرانی کمانشی حاصل در حالت تکیه‌گاه گیردار، حدوداً 4 برابر بیشتر از مقادیر متناظر برای تکیه‌گاه ساده است که این نسبت با نتایج تئوری کاملاً همخوانی دارد.

پس از مقایسه نتایج بار بحرانی کمانشی صفحات نانوکامپوزیتی با توزیع تصادفی نانوذرات، به بررسی اثر توزیع هم‌راستا شده نانولوله‌های کربنی بر بار بحرانی کمانش صفحات پرداخته شد. همان‌طور که در شکل 13 نشان داده شده است، نانوذرات CNT در زوایای بین صفر تا 90 درجه درون ماده زمینه هم‌راستا شده‌اند و تغییرات بار کمانش بحرانی ملاحظه می‌گردد. تغییرات بار در نظر گرفتن درصد حجمی ثابت نانوذرات برابر با 3٪ ثبت شده‌اند.

¹ Rule of mixture

استحکام ماتریس تقویت شده در جهت طولی که همان جهت اعمال بار کمانشی است، می‌باشد.

4-7- مطالعه پارامتری تأثیر ضریب منطری صفحه بر بار بحرانی کمانش

تغییر در هندسه و ابعاد نمونه یکی از متداول‌ترین راهکارها برای تغییر بار بحرانی کمانش می‌باشد [23]. در این قسمت با تغییر نسبت منطری (AR) صفحه پلیمری که همان نسبت طول به عرض آن می‌باشد، تغییرات بار بحرانی کمانش بررسی گردیده است. طبق شکل 15 در چهار نسبت منطری 1، 1.5، 2 و 3، بار بحرانی کمانش صفحات تقویت شده با نانوذرات CNT با توزیع تصادفی و توزیع هم‌راستا شده در زاویه صفر درجه (موازی با راستای اعمال بار) به دست آمده‌است. بار اعمالی نیز در راستای طولی صفحه اعمال می‌شود و تکیه‌گاه از نوع ساده است. ملاحظه می‌گردد با افزایش AR بار بحرانی کمانش صفحه کاهش می‌یابد. به طور مثال در نسبت منطری 3 مقدار بار بحرانی به میزان 89.1٪ نسبت به صفحه با نسبت منطری 1 و تقویت شده با نانوذرات با توزیع هم‌راستا کاهش می‌یابد که مقدار چشمگیری است. همچنین طبق شکل 15، مقادیر بار بحرانی کمانش در تمام نسبت منطری‌های صفحه، در حالت توزیع هم‌راستا شده نانوذرات بیشتر از مقادیر متناظر برای توزیع تصادفی می‌باشد. نتایج از منظر تئوری نیز قابل تفسیر هستند زیرا با افزایش نسبت طول به عرض صفحه مطابق تئوری اوپلر، استحکام کمانشی در آن راستا کم می‌شود و با مقادیر بار کمتری، صفحه دچار کمانش می‌گردد [24]. در ادامه با تغییر راستای اعمال بار فشاری در جهت عرضی صفحه مطابق شکل 16، بار بحرانی کمانش صفحه پلیمری در راستای عرضی و تکیه‌گاه ساده برای نسبت منطری‌های مختلف محاسبه می‌گردد.

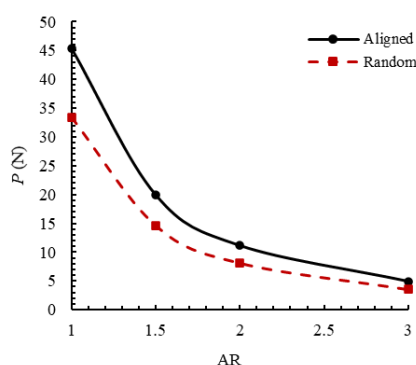


Fig. 15 Effect of aspect ratio on critical buckling load of reinforced polymeric plates with aligned and random distribution of nanoparticles
 شکل 15 تأثیر نسبت منطری بر بار بحرانی کمانش صفحات پلیمری تقویت شده با نانوذرات CNT با توزیع هم‌راستا شده و تصادفی

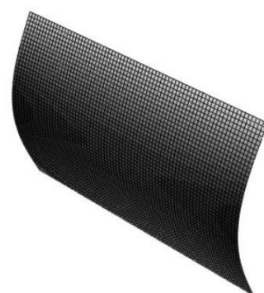


Fig. 16 Buckling mode shape of polymeric plate under transverse loading

شکل 16 شکل مود کمانشی صفحه پلیمری تحت بارگذاری در راستای عرضی

مطابق شکل 13، با افزایش زاویه قرارگیری نانولوله‌ها از صفر تا حدود 50 درجه، مقادیر بحرانی کمانش صفحه کاهش می‌یابد، سپس با افزایش زاویه تا 90 درجه کمی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار بار کمانش در زاویه صفر درجه رخ می‌دهد که برای صفحه با تکیه‌گاه ساده به ترتیب به میزان 4.4٪ و 1.1٪ نسبت به صفحه بدون نانوذرات و صفحه با نانوذرات با توزیع تصادفی، افزایش بار بحرانی کمانش را به حاصل دارد. همچنین ملاحظه می‌گردد که مقادیر بار بحرانی کمانش صفحه در حالت توزیع هم‌راستا شده نانولوله‌های کربنی تا حدود زاویه قرارگیری 40 درجه، از مقادیر بار بحرانی در حالت توزیع تصادفی با همان درصد حجمی که به صورت خط‌چین در شکل 13 مشخص شده است، بیشتر می‌باشند. به طور کلی نتایج پژوهش نشان می‌دهد که عامل اصلی در استحکام کمانشی نمونه‌ها، خواص مکانیکی آن‌ها در راستای اعمال بار می‌باشد، لذا بیشتر مقاومت کمانشی صفحه نانوکامپوزیتی مربوط به الیاف است. بهبود مدول الاستیسیته ماتریس منجر به افزایش استحکام سازه در راستای عرضی می‌شود و با جهت‌دهی کردن توزیع نانوذرات تقویت‌کننده در راستای طولی هم به طور قابل قبولی افزایش استحکام کمانشی به دست می‌آید.

4-6- بررسی کمانش صفحات پلیمری تقویت شده با نانوذرات

در این قسمت تأثیر افزودن نانوذرات در حالت توزیع تصادفی و هم‌راستا شده بر بار بحرانی صفحات پلیمری ساخته شده از رزین اپوکسی با خواص مکانیکی یاد شده مورد بررسی قرار گرفت. صفحات به شکل مربعی و طول ضلع 100 mm و بارگذاری در راستای طولی و شرایط تکیه‌گاهی ساده فرض شد. در شکل 14، بار بحرانی کمانش صفحات ساخته شده از رزین اپوکسی خالص، رزین اپوکسی تقویت شده با توزیع تصادفی نانوذرات از جنس CNT و هم-چنین صفحه از جنس رزین اپوکسی با توزیع هم‌راستا شده نانوذرات CNT درون آن در زوایای بین صفر تا 45 درجه، در یک نمودار ترسیم شده‌اند.

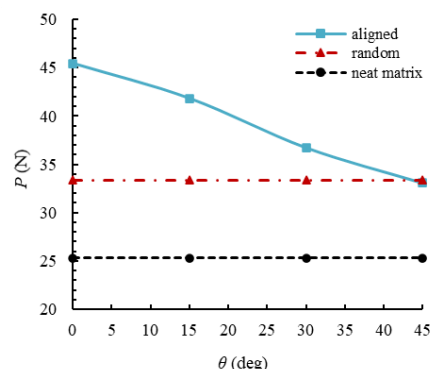


Fig. 14 Critical buckling load of CNT reinforced polymeric plates with aligned distribution of nanoparticles at different angles inside Epoxy matrix

شکل 14 بار بحرانی کمانش صفحات پلیمری تقویت شده با نانوذرات CNT با توزیع هم‌راستا شده در زوایای مختلف

با مقایسه نتایج شکل 14، ملاحظه می‌گردد که بیشترین افزایش بار بحرانی کمانش در حالت توزیع نانوذرات در زاویه صفر درجه و موازی با راستای بارگذاری رخ می‌دهد که به ترتیب به میزان 55.3٪ و 36.1٪ نسبت به صفحه بدون تقویت‌کننده و صفحه با توزیع تصادفی بیشتر است. همچنین با افزایش زاویه قرارگیری نانوذرات تا 45 درجه، مقدار بار بحرانی کمانش کاهش می‌یابد، هر چند نسبت به صفحه بدون تقویت‌کننده و صفحه تقویت شده با توزیع تصادفی مقادیر بار بحرانی همچنان بیشتر است. دلیل کاهش بار بحرانی با افزایش زاویه قرارگیری نانوذرات نیز به علت کاهش مدول الاستیسیته و

زمینه را به میزان بیشتری افزایش می‌دهند. برای نمونه، طبق نتایج حاصل از شکل 18، مقدار افزایش بار بحرانی کمانش برای صفحه پلیمری تقویت شده با CNT در درصد حجمی 4٪، نسبت به صفحه ساخته شده از پلیمر خالص و بدون نانوذرات تقویت‌کننده برابر با 21.3٪ می‌باشد. همچنین این میزان افزایش بار بحرانی کمانش برای صفحه پلیمری تقویت شده با 10٪ حجمی نانورس برابر با 4.25٪ نسبت به بار بحرانی کمانش صفحه بدون تقویت‌کننده است.

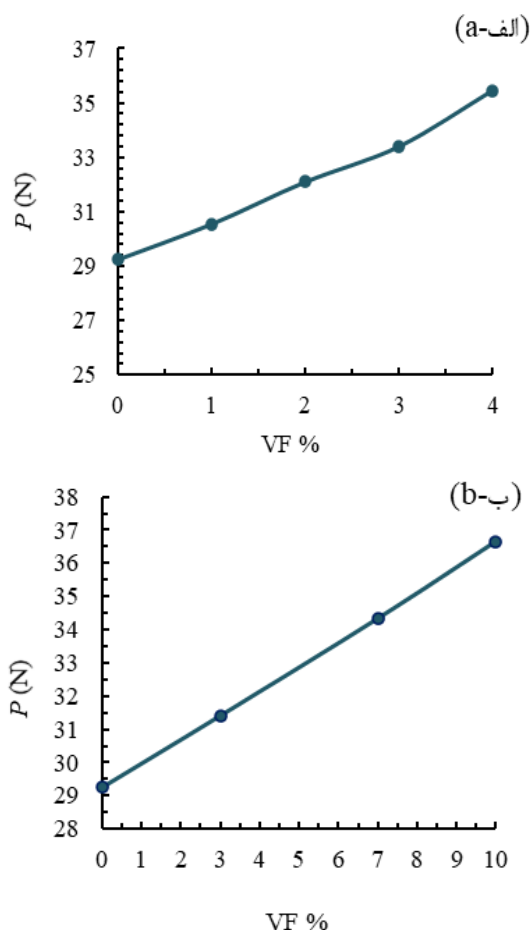


Fig. 18 Critical buckling load of (a) CNT reinforced polymeric plates (b) Nanoclay reinforced polymeric plates with random distribution of nanoparticles inside Epoxy matrix

شکل 18 بار بحرانی کمانش صفحات پلیمری از جنس ماتریس اپوکسی تقویت شده با توزیع تصادفی (الف) نانولوله‌های کربنی و (ب) نانورس

5- جمع‌بندی نتایج

در این تحقیق، ابتدا اثر تقویت‌کنندگی نانوذرات CNT و نانورس، بر مدول الاستیسیته ماده زمینه پلیمری به روش شبیه‌سازی اجزا محدود بررسی شد. بدین منظور بار کرنشی یکنواخت بر المان‌های واحد حجم (RVE) اعمال گردید و سپس با استفاده از تنش‌ها و کرنش‌های میانگین آن‌ها، مقدار مدول یانگ مؤثر نمونه‌ها محاسبه شد. این محاسبات برای درصدهای حجمی مختلف و توزیع و جهت‌گیری تصادفی نانوذرات درون ماده زمینه صورت پذیرفت و مدول یانگ مؤثر ماتریس تقویت شده در درصدهای حجمی و حالات توزیع مختلف در نمودارهایی ارائه شد. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل است:

همان‌طور که اشاره شد، استحکام کمانشی صفحه در راستاهای مختلف تفاوت دارد. لذا برای حالت بارگذاری در راستای عرضی و در ضرایب منظری بیشتر از یک، مقدار بار بحرانی کمانش افزایش خواهد یافت. این نتیجه برای صفحه پلیمری از جنس اپوکسی خالص و بدون افزودن نانوذرات تقویت‌کننده و شرایط تکیه‌گاهی ساده، در شکل 17 مورد بررسی قرار گرفت. طبق پیش-بینی با افزایش نسبت منظری صفحه، بار کمانشی آن در راستای عرضی افزایش یافت که طبق شکل 17، این افزایش به شکل خطی می‌باشد. نتیجه جالب توجهی که حاصل گردید، نشان می‌دهد که تنها با تغییر نسبت منظری صفحه پلیمری بدون تقویت‌کننده، از 1 به 1.5 و تغییر راستای بارگذاری در جهت عرضی صفحه، بار بحرانی کمانش، با بار بحرانی کمانش صفحه پلیمری تقویت شده با نانوذرات هم‌راستا شده در راستای بار (زاویه صفر درجه) و نسبت منظری 1 تقریباً برابر می‌گردد. این نتیجه بسیار حائز اهمیت می‌باشد و نشان می‌دهد در صورت امکان مبنی بر تغییر ابعاد نمونه و جهت بارگذاری، بدون صرف هزینه زیاد برای افزودن نانوذرات و هم‌راستا نمودن آن‌ها، می‌توان به افزایش استحکام کمانشی به مقدار مشابه دست یافت.

8-4- مطالعه پارامتری اثر جنس و درصد حجمی نانوذرات بر بار بحرانی کمانش در این قسمت نتایج مربوط به مطالعه پارامتری بر روی تأثیر جنس و درصد حجمی نانوذرات تقویت‌کننده بر افزایش بار بحرانی کمانش صفحه پلیمری از جنس رزین اپوکسی ارائه گردید. فرض شد که نانوذرات از جنس CNT و نانورس با توزیع تصادفی، هندسه صفحه از نوع مربعی و شرایط تکیه‌گاهی ساده باشد.

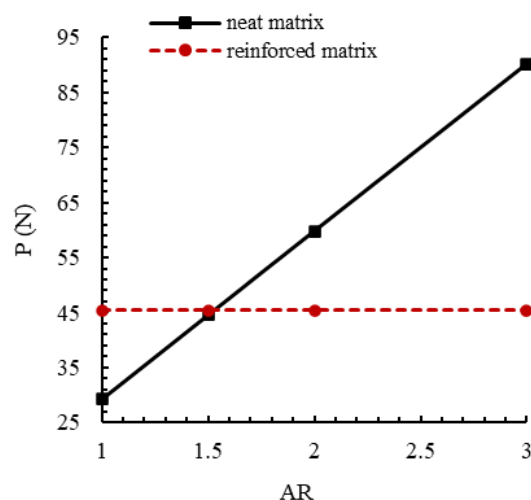


Fig. 17 Critical buckling load of polymeric plate under transverse loading at different aspect ratios

شکل 17 بار بحرانی کمانش صفحه پلیمری تحت بارگذاری در راستای عرضی در نسبت منظری‌های مختلف

نانوذرات CNT تا درصد حجمی 4٪ و نانوذرات نانورس تا درصد حجمی 10٪ به صورت همگن و با توزیع تصادفی به ماتریس اپوکسی افزوده شده و صفحات پلیمری تقویت شده تحت بارگذاری فشاری تک‌جهته قرار می‌گیرد. مقادیر افزایش بار بحرانی کمانش با افزودن نانوذرات به ماده زمینه در شکل 18، برای نانوذرات از جنس CNT و نانورس مشاهده می‌گردد. نانورس به علت قیمت بسیار پایین‌تر می‌توان تا درصدهای بالاتر نسبت به نانولوله‌های کربنی به ماده زمینه افزوده شود. از طرف دیگر نانولوله‌های کربنی به علت خواص مکانیکی و نسبت منظری بالاتر نسبت به نانورس، استحکام مکانیکی ماده

عرضی، مقدار بار بحرانی تقریباً برابر با بار بحرانی صفحه مربعی تقویت شده با نانوذرات هم‌راستا شده بود. لذا در صورت امکان تنها با تغییر ابعاد صفحه و راستای بارگذاری می‌توان به اثر مشابه با افزودن ذرات تقویت‌کننده دست یافت و در هزینه‌ها صرفه‌جویی نمود.

■ در پایان مطالعه پارامتری بر تأثیر جنس و درصد حجمی نانوذرات بر بار بحرانی کمانش صفحات پلیمری صورت گرفت. مقدار افزایش بار بحرانی کمانش برای صفحه تقویت شده با توزیع تصادفی 4٪ حجمی CNT، 21.3٪ و برای 10٪ حجمی نانورس برابر با 25.4٪ به دست آمد.

6- مراجع

- [1] Griebel, M., Hamaekers, J., "Molecular dynamics simulations of the elastic moduli of polymer-carbon nanotube composites," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 193, No. 17-20, pp. 1773-1788, 2004.
- [2] Hbaieb, K., Wang, Q.X., Chia, Y.H.J. and Cotterell, B., "Modelling stiffness of polymer/clay nanocomposites," Polymer, Vol. 48, No. 3, pp. 901-909, 2007.
- [3] Zamani, R., Rahimi, G.H. and Pol, M.M., "Reinforcing Effect of Nanoclay on Buckling Behavior of Nanocomposite Grid Shells: Experimental Investigation," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 411-418, 2015.
- [4] Nasihatgozar, M., Daghighi, V., Eskandari, M., Nikbin, K. and Simoneau, A., "Buckling analysis of piezoelectric cylindrical composite panels reinforced with carbon nanotubes," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 107, pp. 69-79, 2016.
- [5] Shen, H.S., Zhang, C.L., "Thermal Buckling and Postbuckling Behavior of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Plates," Materials & Design, Vol. 31, pp.3403-3411, 2010.
- [6] Mohammadi Mehr, M., Mehrabi, M. and Shabani Nejad, E., "Buckling and Vibration Analyses of Double-bonded Micro Composite Plates Reinforced by CNTs and BNNTs Based on MSGT," In Persian, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 50, No. 5, pp. 27-30, 2018.
- [7] Ajayan, P., Stéphan, O., Colliex, C. and Trauth, D., "Aligned Carbon Nanotube Arrays Formed by Cutting a Polymer Resin-Nanotube Composite," Science, Vol. 265, No. 5176, pp. 1212-1214, 1994.
- [8] Mehrabadi, S.J., Aragh, B.S., Khoshkharesh, V. and Taherpour, A., "Mechanical buckling of nanocomposite rectangular plate reinforced by aligned and straight single-walled carbon nanotubes," Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 4, pp. 2031-2040, 2012.
- [9] Khoramishad, H., Hosseini Vafa, S.M.B., "Effect of aligning graphene oxide nanoplatelets using direct current electric field on fracture behaviour of adhesives," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 41, No. 6, pp. 2514-2529, 2018.
- [10] Jafarpour, A., Safarabadi, M. and Haghighi-yazdi, M., "Numerical investigation of oriented CNFs effects on thermo-mechanical properties and curing residual stresses field of polymeric nanocomposites," Mechanics of Materials, Vol. 138, 2019.
- [11] Jafarpour, A., Safarabadi, M., Haghighi-Yazdi, M. and Yousefi, A., "Numerical study of curing thermal residual stresses in GF/CNF/epoxy nanocomposite using a random generator model," Mechanics of Advanced Materials and Structures, pp.1-11, 2020.
- [12] Chai, G. B., Yap, C. W., and Lim, T. M., "Bending and buckling of a generally laminated composite beam-column," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 224, No. 1, pp. 1-7, 2010.
- [13] Srivastava, A., Dinesh K., "Mechanical characterization and postbuckling behavior of carbon nanotube-carbon fiber reinforced nanocomposite laminate," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 232, No. 1, pp. 106-123, 2018.

■ افزایش مدول یانگ مؤثر برای ماتریس تقویت شده با نانولوله‌های کربنی در درصد حجمی 4٪ به میزان 10.3٪ از ماتریس تقویت شده با نانورس بیشتر بود که ناشی از خواص مکانیکی بالاتر CNT نسبت به نانورس می‌باشد. نتایج حاصل با مدل نیمه تجربی هالپین-تسای مقایسه شدند و تطابق بسیار خوبی ملاحظه گردید.

■ با تعمیم مدل ارائه شده به کمک کدنویسی، نانوذرات CNT به طور هم‌راستا شده و در زوایای مختلف، درون ماتریس اپوکسی با درصد حجمی ثابت 3٪ توزیع گردیدند و مدول‌های الاستیسیته مؤثر در جهات طولی و عرضی به طور محاسبه شدند.

■ بیشترین مدول طولی مؤثر در زاویه صفر درجه برای قرارگیری نانولوله‌های کربنی و در جهت موازی با راستای اعمال بار حاصل شد که به ترتیب به میزان 56.2٪ و 36.8٪ نسبت به مدول یانگ ماتریس خالص و ماتریس با توزیع تصادفی نانوذرات CNT افزایش نشان داد.

■ به کمک روش تحلیل مقادیر ویژه و با روش شبیه‌سازی اجزا محدود، بار کمانش بحرانی صفحات نانوکامپوزیتی از جنس GFRP تشکیل شده از ماتریس اپوکسی تقویت شده با نانوذرات CNT و نانورس و الیاف تک‌جهته شیشه، در شرایط تکیه‌گاهی ساده و گیردار مورد بررسی قرار گرفت.

■ نتایج بار بحرانی کمانش در حالت تکیه گیردار حدود 4 برابر بار کمانش صفحات در حالت تکیه‌گاه ساده بود و همچنین با افزایش درصد حجمی نانوذرات تا 4٪ درون ماده زمینه صفحات نانوکامپوزیتی، مقدار بار بحرانی کمانش آن‌ها با شیب ملایمی افزایش داشت و بیشترین درصد افزایش نسبت به صفحه بدون تقویت‌کننده به میزان 3.5٪ برای صفحه تقویت شده با نانولوله‌های کربنی و درصد حجمی 4٪ و تکیه‌گاه ساده رخ داد.

■ بار بحرانی کمانش صفحه برای توزیع هم‌راستا شده نانولوله‌های کربنی در زوایای مختلف و در درصد حجمی ثابت 3٪ نیز بررسی شد و طبق نتایج بیشترین افزایش بار بحرانی برای حالتی که نانوذرات CNT با زاویه صفر درجه و موازی با راستای الیاف و بارگذاری قرار گرفتند به دست آمد که برای صفحه با تکیه‌گاه ساده به میزان 4.4٪ نسبت به صفحه بدون نانوذرات افزایش داشت.

■ بار بحرانی کمانش صفحات پلیمری از جنس ماتریس اپوکسی و تقویت شده با CNT در حالت تکیه‌گاه ساده نیز بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد در حالت توزیع هم‌راستا شده نانولوله‌های کربنی در زاویه صفر درجه و موازی با جهت بارگذاری، بار بحرانی کمانشی صفحه به میزان 55.3٪ نسبت به صفحه پلیمری بدون تقویت‌کننده افزایش می‌یابد.

■ با افزایش زاویه هم‌راستا شدن نانولوله‌های کربنی تا 45 درجه، بار بحرانی کمانش صفحه کاهش یافته اما همچنان از صفحه ساخته شده از رزین خالص بیشتر بود.

■ اثر ضریب منطری صفحات (AR) که همان نسبت طول به عرض می‌باشد بر بار بحرانی کمانش نیز بررسی گردید. مطابق انتظار با افزایش نسبت طول به عرض صفحه برای بارگذاری در راستای طولی، مقادیر بار بحرانی به طور چشمگیری کاهش یافتند. برای نسبت منطری 3 مقدار بار بحرانی به میزان 89.1٪ نسبت به صفحه با نسبت منطری 1 و تقویت شده با نانوذرات با توزیع هم‌راستا کاهش داشت.

■ همچنین با تغییر راستای اعمال بار در جهت عرضی صفحه مقادیر بار بحرانی افزایش داشتند. نکته جالب توجه این بود که برای نسبت منطری 1.5 و صفحه پلیمری بدون تقویت‌کننده بارگذاری شده در راستای

- [14] Rafiee, R., Shahzadi, R. "Mechanical properties of nanoclay and nanoclay reinforced polymers: a review," *Polymer Composites*, Vol. 40, No. 2, pp. 431-445, 2019.
- [15] Mahdavi, M., Yousefi, E., Baniasadi, M., Karimpour, M. and Baghani, M., "Effective thermal and mechanical properties of short carbon fiber/natural rubber composites as a function of mechanical loading," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 117, pp 8-16, 2017.
- [16] Shokrieh, M.M., Mosalmani, R. and Omid, M.J., "Strain rate dependent micromechanical modeling of reinforced polymers with carbon nanotubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, No. 27, pp. 3381-3393, 2014.
- [17] Shokrieh, M. M., Soveity, S. and Mosalmani, R., "An investigation on effects of aspect ratio of representative volume element on elastic modulus of a carbon nanotubes reinforced polymer," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 107-116, 2014.
- [18] Abolghasemi, S., Eipakchi, H.R. and Shariati, M., "Analytical solution for buckling of rectangular plates subjected to non-uniform in-plane loading based on first order shear deformation theory," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 37-46, 2015.
- [19] Timoshenko, S. P., Gere, J. M., "Theory of Elastic Stability," McGraw-Hill, New York, 1961.
- [20] Nwoji, C. U., Onah, H. N., Mama, B. O., Ike, C. C. and Ikwueze, E. U., "Elastic buckling analysis of simply supported thin plates using the double finite Fourier sine integral transform method," *Explorematics Journal of Innovative Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 37-47, 2017.
- [21] Novoselac, S., Todor, E., "Linear and nonlinear buckling and post buckling analysis of a bar with the influence of imperfection," *Tehnicki Vjesnik*, Vol. 19, No. 3, pp. 695-701, 2012.
- [22] Brubak, L., Hellesland, J., "Approximate buckling strength analysis of arbitrarily stiffened, stepped plates," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 9, pp. 2321-2333, 2007.
- [23] Shukla, K. K., Nath, Y., Kreuzer, E., and Kumar, K. V., "Buckling of Laminated Composite Rectangular Plates," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 18, pp. 215-223, 2005.
- [24] Khdeir, A. A., Reddy, J. N., "Buckling of cross-ply laminated beams with arbitrary boundary conditions," *Composite Structures*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-3, 1997.



بازرسی لوله‌های چند لایه به کمک امواج هدایت شده پیچشی

محمد پورمنصوری¹، رضا مسلمانی^{2*}، امین یاقوتیان³، افشین قنبر زاده⁴

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

* اهواز، صندوق پستی 61357-83151، mosalmani@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 1400/07/19	کاربرد لوله‌های چندلایه به دلیل مزیت‌های مکانیکی و شیمیایی آن‌ها به عنوان جایگزین لوله‌های همگن جهت انتقال نفت، گاز و مواد پتروشیمی در حال افزایش است. جهت جلوگیری از مسدود شدن خطوط انتقال و زیان وارده از آن می‌بایست که بازرسی‌ها و آزمون‌های غیر مخرب مانند آزمون‌های فراصوت برای اطمینان از صحت کارکرد آن‌ها به صورت مداوم انجام گیرند. از این رو در این تحقیق، ابتدا معادلات انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه مورد بررسی قرار گرفته و روابط میدان‌های جابجایی و تنش‌های دینامیکی در لوله چندلایه استخراج شده است؛ سپس نمودارهای دیسپرز و سرعت گروه برای لوله چندلایه با توجه به شرایط مرزی مسئله رسم شده است. همچنین، انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه با استفاده از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. با مقایسه نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌شود که نتایج کامل با یکدیگر تطابق داشته و مدل‌سازی به درستی انجام گرفته است. در انتها نیز تأثیر عوامل مؤثر بر انتشار موج پیچشی در لوله‌های دولایه و سه لایه بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ضخامت لایه‌ها، ترتیب لایه‌ها و جنس تشکیل‌دهنده لایه‌های لوله بر سرعت انتشار موج پیچشی در لوله‌های چندلایه تأثیرگذار است.
پذیرش: 1400/09/16	
کلیدواژگان	
موج پیچشی هدایت‌شده، انتشار موج، لوله چندلایه، روش المان محدود، نمودار دیسپرز	

Inspection of Multilayer Pipes Using Torsional Guided Waves

Mohammad Pourmansouri¹, Reza Mosalmani^{1*}, Amin Yaghootian¹, Afshin Ghanbarzadeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* P.O.B. 61357-83151, Ahvaz, Iran, mosalmani@scu.ac.ir

Keywords

Torsional guided waves, Wave propagation, Multilayer pipes, Finite element method, Dispersion curve

Abstract

The use of multilayer pipes has increased recently thanks to their superior mechanical and chemical properties as a replacement of homogeneous single-layer pipes. Therefore, applicable inspections and non-destructive tests for multilayer pipes should be investigated. In this study, the governing equations of torsional wave propagation in the multilayer pipe were initially developed, and the relations between the displacement fields and dynamic stresses in the multilayer pipe were calculated. Then, the dispersion curves and group velocity for the multilayer pipe are plotted according to the boundary conditions. The torsional wave propagation in the multilayer pipe was also simulated using the finite element method via ABAQUS software. By comparing the analytical results and the numerical simulations, a complete agreement was observed between the results. Finally, the influence of effective parameters on torsional wave propagation in two- and three-layer pipes was investigated. The obtained results showed how the thickness, lay-up, and mechanical properties of the layers could affect the velocity of torsional wave propagation in the multilayer pipes.

1- مقدمه

به صورت مداوم انجام گیرند. خطوط لوله که عمدتاً به صورت مدفون در خاک و یا در زیر آب استفاده می‌شوند، همواره با مشکلات متعددی از نظر حفظ و نگهداری روبرو هستند، به همین دلیل بازرسی، بازسازی و تعمیر خطوط لوله از نظر اقتصادی و فنی اهمیت فراوانی دارد. از جمله آزمون‌های غیر مخرب متداول، می‌توان به آزمون امواج هدایت‌شده فراصوت اشاره کرد. امواج هدایت‌شده فراصوت در اجسام استوانه‌ای شکل در راستای محوری به صورت طولی و پیچشی منتشر می‌شوند.

استفاده از لوله‌های چندلایه در شرایط ویژه مکانیکی، شیمیایی و حرارتی، با توجه به رفتار مکانیکی خاص آن‌ها، در صنایع مختلف روبه گسترش است. مزایای این لوله نسبت به لوله‌های تک لایه همسانگرد را می‌توان به مقاومت به خوردگی بالا، خصوصیات مکانیکی بالا و دمای کاری بالا اشاره کرد. جهت جلوگیری از مسدود شدن خطوط انتقال و زیان وارده از آن می‌بایست که بازرسی‌ها و آزمون‌های غیر مخرب برای اطمینان از صحت کارکرد آن‌ها

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Pourmansouri, M., Mosalmani, R., Yaghootian, A., Ghanbarzadeh, A., "Inspection of Multilayer Pipes Using Torsional Guided Waves", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1603-1611, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.540289.1751>

خاردار^{24, 23} استفاده می‌شود. میائو و همکاران^[25] نحوه شبیه‌سازی و تحریک موج پیچشی $T(0,1)$ با استفاده از یک حلقه ترنسدیوسر پیزوالکتریک را ارائه کرده و مدل به کمک نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است^[25]. ژو^[26] به کمک یک مدل ترنسدیوسر موج هدایت‌شده (آرایه‌های حلقه‌ای با تأخیر زمانی دوره‌ای) مدهای تقارن محوری را در استوانه‌ی توخالی منتشر کرده است و نتایج را با شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی مقایسه کرده است. ژو^[27] همچنین عیب خوردگی در لوله‌ها را با استفاده از انتشار امواج فراصوت بصورت عددی بررسی کرده است. جهت دست‌یابی به میزان قابلیت استفاده از مود دوم موج هدایت‌شده طولی در بازرسی لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا مطالعه عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است^[28].

همچنین دمما^[29] ضرایب بازگشتی موج پیچشی و عرضی از عیب‌های ناچ و ترک را به کمک مدل المان محدود و تجربی برای دو لوله تک لایه با شعاع متفاوت مورد مطالعه قرار داده است. فورکوا و کمورا^[30] موج طولی و پیچشی را با مدل‌سازی پراب در لوله همگن به‌صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی منتشر کرده و مشاهده کردند پس از عبور جبهه موج طولی از زانویی، موج طولی تغییر مود می‌دهد و باعث تغییر سرعت و ساختار موج می‌شود، در حالی موج پیچشی تغییر مود نداده و تنها مدهای بالاتر تولید می‌شوند. تأثیر مدهای پیچشی $T(0,1)$ و طولی $L(0,2)$ در تشخیص بریدگی دورانی^۷ نزدیک به جوش زانویی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به اینکه موج پیچشی در مدهای مرتبه بالاتر تغییر کمتری می‌کند، به موج طولی ترجیح داده شده است^[31]. ژانگ و همکاران^[32] پراش موج عرضی پیچشی از عیوب دایروی در استوانه‌های توخالی را به کمک شبیه‌سازی المان محدود و نتایج آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. مدلی جهت بررسی پراش بازگشتی از چند عیب هم‌زمان تصادفی در مرجع^[33] ارائه و مشاهده شده است که ضریب بازگشت برای مود $T(0,1)$ مستقل از موقعیت دورانی عیب سوراخ دایره‌ای می‌باشد.

در مطالعات مرور شده عدم بررسی انتشار موج پیچشی هدایت‌شده در لوله‌های چندلایه مشاهده می‌شود. همچنین جهت صرفه‌جویی در هزینه و زمان، شبیه‌سازی المان محدود می‌تواند نقش مهمی در بررسی مسائل و عوامل مختلف کمک بسزایی ایفاء نماید. بنابراین در این تحقیق ابتدا معادلات حاکم بر انتشار موج پیچشی در استوانه توخالی چندلایه متشکل از مواد همگن و همسانگرد استخراج شده و با توجه به شرایط مرزی، نمودار دیسپرزین رسم می‌شود و سرعت انتشار موج به دست می‌آید. سپس نحوه شبیه‌سازی موج پیچشی در لوله و جزییات مربوط به مدل‌سازی مورد بحث قرار می‌گیرد. در انتها پس از اعتبار سنجی نتایج عددی با نتایج تحلیلی، عوامل مؤثر بر انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

2- معادلات حاکم

همانند شکل 1، در ابتدا لوله‌ای متشکل از دو ماده همگن در نظر گرفته می‌شود. محور z منطبق بر محور استوانه قرار دارد که راستای انتشار موج را مشخص می‌کند. r_1 ، r_2 و r_3 به ترتیب شعاع داخلی، شعاع صفحه میانی و شعاع بیرونی لوله را مشخص می‌کنند. $\rho^{(1)}$ ، $\mu^{(1)}$ و $\lambda^{(1)}$ و $\rho^{(2)}$ ، $\mu^{(2)}$ و $\lambda^{(2)}$ به ترتیب نشان‌دهنده چگالی و ضرایب لامه در لایه‌های داخلی و خارجی لوله می‌باشند. سطوح لوله بدون تنش در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، معادلات حاکم ناویر برای انتشار موج هدایت‌شده را برای هر یک از مواد می‌توان به‌صورت رابطه (1) نوشت^[1]:

امواج پیچشی به‌اختصار به فرم $T(m,n)$ و امواج طولی به فرم $L(m,n)$ نمایش داده می‌شوند که m عددی صحیح است که نشان‌دهنده مرتبه دورانی مود می‌باشد و n عددی صحیح است که بیان‌کننده مرتبه گروه مود می‌باشد. برای مود متقارن m برابر صفر است^[1]. موج پیچشی در مقایسه با موج طولی دارای مزیت‌هایی می‌باشد از جمله اینکه سرعت فاز مود اول موج پیچشی مستقل از فرکانس می‌باشد. به همین دلیل موج پیچشی در مقایسه با موج طولی کمتر تغییر مود می‌دهد. از طرفی دیگر در صورت وجود خمیدگی در لوله و عبور موج از آن، تغییرات کمتر حالت مود موج پیچشی، شرایط را برای تشخیص عیوب فراهم می‌کند و امکان بازرسی موارد پیچیده‌تر را افزایش می‌دهد^[2].

مطابق مطالعات انجام گرفته در خصوص انتشار امواج فراصوت، گازیس^[3]، انتشار امواج در سیلندرهایی توخالی دایروی را به‌صورت تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار داده است. در مرجع^[1] موج طولی و پیچشی در لوله تک‌لایه همگن، به روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و نمودار دیسپرزین ارائه شده است. وابستگی امواج طولی به فرکانس در یک استوانه‌ی توخالی به کمک استخراج معادلات و نمودار دیسپرزین مورد بحث قرار گرفته است و مشاهده شده است که مود طولی انتشار موج هدایت‌شده در استوانه توخالی وابسته به فرکانس است^[5]. موگلتن^[6] تئوری انتشار موج پیچشی در لوله همگن مدفون در خاک را مورد بررسی قرار داده و نمودار دیسپرزین را برای آن رسم کرد. در مراجع^[7, 8] معادلات موج طولی، پیچشی و عرضی برای یک میله استوانه‌ای توپر متشکل از دولاچه ماده الاستیک و با فرض اتصال کامل بین لایه‌ها، استخراج شده است. وایترو جونز^[9] با استفاده از تئوری خطی الاستیسیته، انتشار موج طولی متقارن نسبت به محور در یک استوانه توخالی دولاچه با لایه‌های همگن و همسانگرد را مورد بررسی قرار داده و نمودار دیسپرزین و فرکانس برحسب عدد موج را برای موج طولی استخراج کردند.

سان و دو^[10] یک روش مبتنی بر اندازه‌گیری میدان^۱ جهت محاسبه نمودار دیسپرزین موج هدایت‌شده برای یک لوله را ارائه دادند. روش پیشنهادشده به کمک شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده است. با استفاده از تئوری موج الاستیک در اجسامی که تحت تنش اولیه قرار گرفته‌اند، نمودار دیسپرزین موج پیچشی برای سیلندر توخالی متشکل از سه لایه با مواد همگن و همسانگرد با فرض کرنش اولیه در استوانه به دست آمده است^[11, 12]. دین^[13] نمودار دیسپرزین موج پیچشی را برای یک استوانه با هسته تشکیل‌شده از ماده FGM^2 را به دست آورده و تغییرات فرکانس را برای تشخیص اتصال ناقص موجود بین هسته و لایه بیرونی بررسی کرده است. انتشار موج پیچشی و طولی برای لوله تک لایه همگن دارای روکش ویسکوالاستیک به کمک روش تحلیلی و عددی، با در نظر گرفتن میرایی روکش مورد مطالعه قرار گرفته است^[14-16]. کستینگز و بیکن^[17] مدهای موج پیچشی را در لوله‌هایی با مواد جاذب مانند اپوکسی مورد بررسی قرار داده‌اند. چن و همکاران^[18] به‌صورت تحلیلی تغییر مود موج‌های مایکرو در عبور از زانویی را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با شبیه‌سازی عددی اعتبار سنجی کردند.

جهت تولید و انتشار امواج هدایت‌شده در لوله‌ها از انواع مختلف ترنسدیوسرها مانند ترنسدیوسرهای پیزوالکتریک خشک^۳^[19]، حسگر کروی مغناطیسی^۴^[20]، ترنسدیوسرهای انعطاف‌پذیر و بدون تماس موج هدایت‌شده^۵^[21]، ترنسدیوسرهای فراصوت پیزوالکتریک مستقیم^[22] و ترنسدیوسرهای

⁵ Flexible and noncontact guided-wave transducers

⁶ Comb type transducers

⁷ Circumferential cut

¹ Field-measurement-based method

² Functionally graded material

³ Dry-coupled piezoelectric transducers

⁴ Spherical magnetic sensors

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{c_1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{c_2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (8)$$

C_1 و C_2 به ترتیب سرعت موج طولی حجمی و سرعت موج عرضی حجمی می‌باشند که به صورت رابطه (9) تعریف می‌شوند:

$$C_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, C_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (9)$$

همچنین عبارات $\nabla^2 \varphi$ و $\nabla^2 \vec{H}$ در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (10) و رابطه (11) تعریف می‌شوند:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{H} = \nabla^2 (H_r \vec{e}_r + H_\theta \vec{e}_\theta + H_z \vec{e}_z) \\ = \left(\nabla^2 H_r - \frac{1}{r^2} H_r \right. \\ \left. - 2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} \right) \vec{e}_r + \left(\nabla^2 H_\theta \right. \\ \left. - \frac{1}{r^2} H_\theta - 2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right) \vec{e}_\theta \\ \left. + \nabla^2 H_z \vec{e}_z \right) \end{aligned} \quad (11)$$

برای حل معادله (1) برای مود موج پیچشی، توابع زیر برای φ, H_r, H_θ و H_z پیشنهاد شده است [1]:

$$\begin{aligned} \varphi &= f(r) \sin(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \\ H_r &= h_r(r) \cos(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \\ H_\theta &= h_\theta(r) \sin(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \\ H_z &= h_z(r) \cos(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن ω بیانگر فرکانس زاویه‌ای و m یک عدد صحیح است که مرتبه دورانی مود موج را نشان می‌دهد. k نیز بیانگر عدد موج است که به صورت رابطه (13) تعریف می‌شود:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_p} \quad (13)$$

که در آن λ طول موج و c_p سرعت فاز می‌باشد. با جایگذاری توابع (12) در معادلات (7) و (8) نتیجه می‌شود که:

$$\begin{aligned} r^2 f'' + r f' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] f &= 0 \\ r^2 h_r'' + r h_r' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m^2 + 1) \right] h_r \\ - 2m h_\theta &= 0 \\ r^2 h_\theta'' + r h_\theta' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m^2 + 1) \right] h_\theta \\ - 2m h_r &= 0 \\ r^2 h_z'' + r h_z' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] h_z &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

با فرض $h_3 = h_z$ و $2h_2 = h_r + h_\theta$, $2h_1 = h_r - h_\theta$ اعمال آن در معادلات (14) نتیجه می‌شود که:

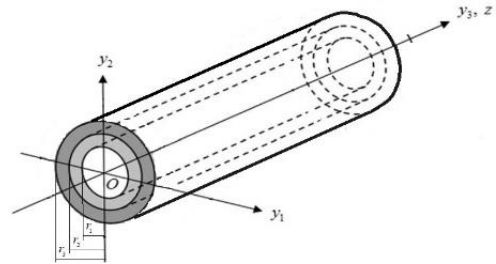


Fig. 1 A two-layer hollow cylinder consisting of two homogeneous materials

شکل 1 استوانه توخالی دولایه متشکل از دو ماده همگن

$$\mu^{(1)} \nabla^2 \vec{U}^{(1)} + (\mu^{(1)} + \lambda^{(1)}) \nabla \nabla \cdot \vec{U}^{(1)} = \rho \left(\frac{\partial^2 \vec{U}^{(1)}}{\partial t^2} \right) \quad (\text{الف-1})$$

$$\mu^{(2)} \nabla^2 \vec{U}^{(2)} + (\mu^{(2)} + \lambda^{(2)}) \nabla \nabla \cdot \vec{U}^{(2)} = \rho \left(\frac{\partial^2 \vec{U}^{(2)}}{\partial t^2} \right) \quad (\text{ب-1})$$

که در آن t نشانگر زمان و $\vec{U}$ میدان جابجایی در مختصات استوانه‌ای می‌باشد. هر یک از روابط (1) به صورت مجزا قابل حل می‌باشند. برای حل معادله ناویر از توابع پتانسیل برای تجزیه میدان جابجایی استفاده می‌شود. به دلیل آنکه سیلندر همگن در نظر گرفته شده است، میدان جابجایی را می‌توان به شکل رابطه (2) نوشت:

$$\vec{U}^{(i)} = \nabla \varphi + \nabla \times \vec{H} \quad (2)$$

φ کمیت اسکالر پتانسیل مرتبط به امواج طولی و $\vec{H}$ کمیت برداری پتانسیل مرتبط با امواج عرضی می‌باشند که برای تعریف میدان جابجایی بکار برده شده‌اند. در رابطه (2)، $\vec{H}$ به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$\vec{H} = H_r \vec{e}_r + H_\theta \vec{e}_\theta + H_z \vec{e}_z \quad (3)$$

در این رابطه (3)، اندیس‌های r, θ و z مربوط به مختصات استوانه‌ای می‌باشند. همچنین عبارات $\nabla \varphi$ و $\nabla \times \vec{H}$ در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (4) و رابطه (5) بیان می‌گردند:

$$\nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \hat{z} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \right) \hat{r} + \left(\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \hat{\theta} \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (\rho H_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right) \hat{z} \end{aligned} \quad (5)$$

شرایط مرزی باید در معادلات حاکم صدق نماید. برای ساده‌سازی شرایط مرزی، فرض می‌شود که طول استوانه توخالی بی‌نهایت است. همچنین ناوردایی اندازه¹ به صورت رابطه (6) مطرح می‌شود. شرط ناوردایی اندازه که در اینجا به نام شرط حجم ثابت نیز شناخته می‌شود، بدان معنی است که حجم سازه ثابت است.

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (6)$$

با در نظر گرفتن شرط فوق، مسئله بدون در نظر گرفتن شرایط مرزی دو سر استوانه توخالی قابل حل است [1]. با جایگذاری معادله (2) در معادله (1) به دست می‌آید که:

¹ Gauge invariance

$$\alpha_i = \left| \sqrt{\frac{\omega^2}{c_2^{(i)2}} - k^2} \right|$$

$$Z_1(\alpha_i r) = \begin{cases} J_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i \geq 0 \\ I_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$W_1(\alpha_i r) = \begin{cases} Y_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i \geq 0 \\ K_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i < 0 \end{cases}$$

با در اختیار داشتن میدان جابجایی و به کمک تئوری کلاسیک الاستیسیته می‌توان میدان تنش را به دست آورد. با توجه به این که سطوح بیرونی و داخلی لوله بدون تنش و اتصال بین لایه‌ها کامل در نظر گرفته شده است، شرایط مرزی به صورت رابطه (21) اعمال می‌گردند:

$$\sigma_r^{(1)} = \sigma_{r\theta}^{(1)} = \sigma_{rz}^{(1)} = 0 \quad \text{at } r = r_1$$

$$\sigma_{jr}^{(1)} = \sigma_{jr}^{(2)} \quad U_j^{(1)} = U_j^{(2)}, j = r, \theta, z \quad \text{at } r = r_2 \quad (21)$$

$$\sigma_r^{(2)} = \sigma_{r\theta}^{(2)} = \sigma_{rz}^{(2)} = 0 \quad \text{at } r = r_3$$

با توجه به آنکه موج پیچشی نسبت به محور لوله متقارن است ($m = 0$)، بنابراین شرایط مرزی به روابط (22) تقلیل پیدا می‌کنند:

$$\sigma_{r\theta}^{(1)} = 0 \quad \text{at } r = r_1$$

$$\sigma_{\theta r}^{(1)} = \sigma_{\theta r}^{(2)} \quad U_\theta^{(1)} = U_\theta^{(2)}, j = r, \theta, z \quad \text{at } r = r_2 \quad (22)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(2)} = 0 \quad \text{at } r = r_3$$

با داشتن 4 معادله شرایط مرزی فوق و همچنین 4 معادله از شرط ناوردایی اندازه جمعاً 8 معادله شرایط مرزی موجود است که می‌توان ماتریس $[C]$ را تشکیل داد.

$$[C] \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ \vdots \\ C_2 \\ D_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

با حل معادله $\det(C) = 0$ در بازه‌ی فرکانسی مود نظر، نمودار دیسپرن برای لوله‌ی دولایه به دست می‌آید. مشابه روش گفته‌شده در این بخش، می‌توان معادلات حاکم بر انتشار موج پیچشی در لوله‌های n لایه را استخراج نمود و با تعریف شرایط مرزی مشابه، نمودار دیسپرن رسم شود.

3- مدل‌سازی عددی

در این بخش مدل‌سازی عددی انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس [35] جهت شبیه‌سازی انتشار موج پیچشی استفاده شده است. اندازه المان‌ها با توجه طول موج منتشرشده در جسم تعیین می‌شود، به‌طوری‌که بایستی انتشار موج در طول المان به‌صورت کامل مشاهده شود. رابطه‌ی (24) برای تعیین طول المان ارائه شده است [36]:

$$\frac{\lambda}{20} < l_{element} < \frac{\lambda}{10} \quad (24)$$

که در آن $l_{element}$ طول المان و λ طول موج منتشرشده است و به‌صورت رابطه (25) تعریف می‌شود:

$$r^2 f'' + r f' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] f = 0$$

$$r^2 h_1'' + r h_1' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m-1)^2 \right] h_1 = 0$$

$$r^2 h_2'' + r h_2' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m+1)^2 \right] h_2 = 0$$

$$r^2 h_3'' + r h_3' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] h_3 = 0 \quad (15)$$

معادلات (15) مشابه معادله مرتبه اول تابع بسل می‌باشند. بنابراین با توجه به حل جامع توابع بسل، می‌توان نوشت:

$$f = AZ_m(ar) + BW_m(ar)$$

$$h_1 = A_1 Z_{m-1}(\beta r) + B_1 W_{m-1}(\beta r)$$

$$h_2 = A_2 Z_{m+1}(\beta r) + B_2 W_{m+1}(\beta r) \quad (16)$$

$$h_3 = A_3 Z_m(\beta r) + B_3 W_m(\beta r)$$

که در آن A_i و B_i ضرایب ثابت هستند و Z_m و W_m مرتبه m از توابع بسل می‌باشند که به‌صورت رابطه (17) تعیین می‌شوند [34]:

$$Z_m(ar) = \begin{cases} J_m(ar) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \geq 0 \\ I_m(ar) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 < 0 \end{cases}$$

$$W_m(ar) = \begin{cases} K_m(ar) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \geq 0 \\ Y_m(ar) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$Z_m(\beta r) = \begin{cases} J_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \geq 0 \\ I_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 < 0 \end{cases}$$

$$W_m(\beta r) = \begin{cases} K_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \geq 0 \\ Y_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 < 0 \end{cases}$$

همچنین α و β در روابط فوق برابرند با:

$$\alpha = \left| \sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2} \right|, \quad \beta = \left| \sqrt{\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2} \right| \quad (18)$$

برای لوله دولایه می‌توان نتیجه گرفت که میدان جابجایی برای موج پیچشی متقارن نسبت به محور لوله ($m = 0$) با استفاده از روابط (16) و (2) به فرم رابطه (19) استخراج می‌شود:

$$U_r^{(i)} = U_z^{(i)} = 0$$

$$U_\theta^{(i)} = \{ I_i K [A_i Z_1(\alpha_i r) + B_i W_1(\alpha_i r)] + \alpha [C_i Z_1(\alpha_i r) + D_i W_1(\alpha_i r)] \} e^{I(Kz - \omega t)} \quad (19)$$

که در آن A_i, B_i, C_i و D_i ضرایب نامعلوم می‌باشند که در آن اندیس i برابر (1) و (2) می‌باشد که به ترتیب برای ماده‌ی داخلی و خارجی استفاده شده‌اند. همچنین Z و W نیز به‌صورت رابطه (20) تعریف می‌شوند:

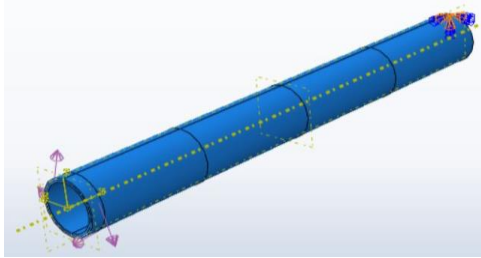


Fig. 3 Boundary conditions of the model for torsional wave $T(0,1)$ mode propagation in the two-layer pipe

شکل 3 شرایط مرزی مدل جهت انتشار موج پیچشی $T(0,1)$ در لوله دولایه

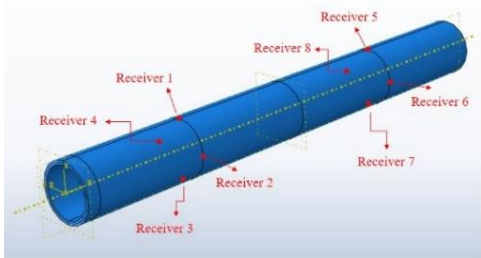


Fig. 4 Position of the defined receivers

شکل 4 موقعیت مکانی دریافت‌کننده‌ها

جهت بررسی وابستگی اندازه‌ی مدل شبیه‌سازی‌شده، در فرکانس ثابت، انرژی کرنشی برای اندازه‌های آلمان متفاوت محاسبه شده است (شکل 5). با همگرا شدن انرژی کرنشی، اندازه‌ی آلمان مناسب تشخیص داده می‌شود. با توجه به رابطه (24) و شکل 5، در این تحقیق برای موج با فرکانس 100 کیلوهرتز طول بیشینه آلمان 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

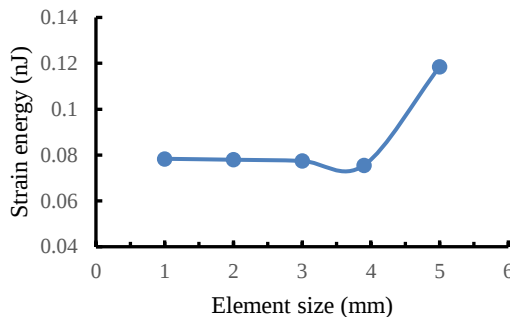


Fig. 5 Investigation of the element size independence of the simulation model at a frequency of 100 kHz

شکل 5 بررسی وابستگی اندازه‌ی آلمان مدل شبیه‌سازی‌شده در فرکانس 100 کیلوهرتز

4- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا جهت بررسی دقت مدل‌سازی عددی، تطابق نتایج عددی و تحلیلی با یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن انتشار موج پیچشی در لوله‌های دولایه و سه لایه و عوامل مؤثر بر آن، بررسی می‌شود.

4-1- صحت سنجی مدل عددی

هندسه و خصوصیات لوله دولایه مورد مطالعه در جدول 1 نشان داده شده است. جنس لایه داخلی آلومینیومی و بیرونی فولاد و ضخامت لایه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادلات (22) نمودارهای دیسپرز سرعت فاز و سرعت گروه برای مود متقارن مرتبه اول موج پیچشی $T(0,1)$ برای لوله دولایه با خصوصیات ذکر شده در جدول 1، به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 ارائه

$$\lambda = \frac{c_2}{f} \quad (25)$$

به صورتی که c_2 که سرعت موج عرضی در ماده و f فرکانس موج منتشر شده می‌باشد. مش‌بندی انجام‌شده بر روی مدل در شکل 2 نمایش داده شده است. آلمان سه‌بعدی C3D8R یک آلمان خطی مکعبی با 8 گره و با یک نقطه یکپارچه‌سازی¹ است [35]. برای آنکه شرط نامتناهی بودن لوله برقرار شود می‌بایست طول لوله بسیار بزرگ‌تر از قطر و ضخامت لوله باشد. از این‌رو طول لوله برابر 80 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

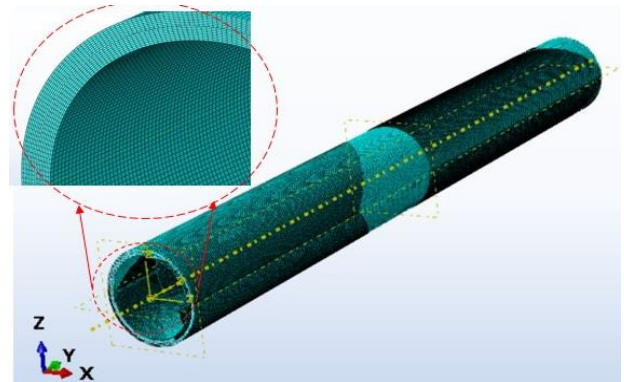


Fig. 2 The meshed model of a two-layer pipe

شکل 2 مش‌بندی مدل لوله دولایه

در عمل جهت تحریک موج اولیه از روش‌های مختلفی همچون ترنس‌دیوسرهای الکترومغناطیس، پیزوالکتریک و لیزر استفاده می‌شود. در این پژوهش از ترنس‌دیوسرهای پیزوالکتریک جهت تحریک موج اولیه استفاده شده است. جهت مدل‌سازی پیزوالکتریک و تحریک موج، نیروی دورانی ابتدا روی سطح بیرونی لوله به طول 2 سانتی‌متر آن جهت شبیه‌سازی حلقه ترنس‌دیوسر اعمال می‌شود. از رابطه (26) برای تعیین پالس نیروی دورانی تحریک استفاده شده است که در آن f فرکانس موج تحریک ترنس‌دیوسر، N تعداد سیکل‌های پالس اعمالی است و A_0 دامنه موج تحریک می‌باشد.

$$A(t) = \begin{cases} A_0 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{N}t\right) \right] \cos(2\pi f t) & , 0 < t < \frac{N}{f} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

همچنین جهت جلوگیری از حرکت ناچیز لوله، روی یک نقطه در انتهای لوله تمام جابجایی‌های آن صفر شده‌اند. برای مدل‌سازی لوله چندلایه، جهت ایجاد اتصال کامل بین لایه‌ها از قید Tie استفاده شده است. هندسه و شرایط مرزی مدل جهت انتشار موج پیچشی $T(0,1)$ در لوله دولایه در شکل 3 نشان داده شده است.

چهار دریافت‌کننده² همانند شکل 4 در فاصله 20 سانتی‌متری از ابتدای لوله و چهار دریافت‌کننده دیگر در فاصله 60 سانتی‌متری از ابتدای لوله با اختلاف زاویه‌ای 90 درجه، برای تحلیل تغییرات جابجایی امواج دریافتی مدل شده‌اند. همچنین جهت دستیابی به ساختار موج منتشرشده در سطح مقطع لوله 9 دریافت‌کننده در هر لایه در راستای ضخامت تعریف می‌شوند.

² Receiver

¹ Integration

شده است. برای صحت‌سنجی نمودارهای بدست آمده، نمودارهای دیسپرز به کمک نرم‌افزار GUIGUW برای مدهای مختلف (پیچشی، طولی و خمشی) نیز ترسیم شده‌اند. در این نمودارها، حروف T ، L و F به ترتیب دلالت بر انواع مود طولی، پیچشی و خمشی دارند. همانطور که از شکل‌های 6 و 7 مشخص است مدهای مختلفی از امواج هدایت شده قادر به پدیدار شدن در محیط انتشار لوله می‌باشند، همچنین نمودارهای مربوط به مود $T(0,1)$ حاصل از معادلات ارائه شده و نرم‌افزار GUIGUW انطباق کامل دارند. با توجه به شکل‌های 6 و 7 واضح است که در تمامی مدهای بجز مود متقارن مرتبه اول موج پیچشی $T(0,1)$ ، سرعت فاز و گروه به فرکانس بستگی دارد. به عبارت دیگر سرعت مود اول متقارن موج پیچشی برای لوله دولایه همانند لوله تک لایه، مستقل از فرکانس بوده و با تغییر فرکانس سرعت فاز و گروه ثابت می‌ماند و این مود غیردیسپرسیو گفته می‌شود.

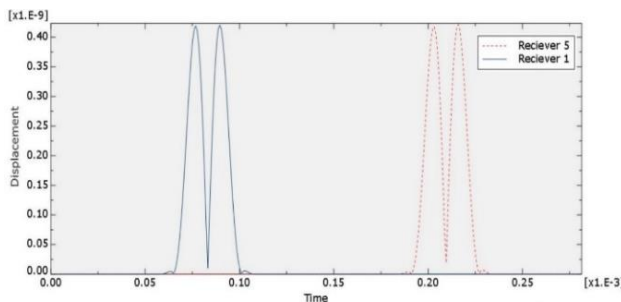


Fig. 8 Displacement changes at 50 kHz in the first and fifth receivers in the two-layer pipe

شکل 8 تغییرات جابجایی برای فرکانس 50 کیلوهرتز در دو دریافت‌کننده یک و پنج برای لوله دولایه

جدول 2 مقایسه سرعت گروه به‌دست‌آمده از مدل عددی با مدل تحلیلی برای لوله دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز

Table 2 Comparison of the group velocity obtained from the numerical model with the analytical model for a two-layer pipe at 50 kHz

خطای نسبی (%)	سرعت گروه (m/s)	
	عددی	تحلیلی
0.21	3164.05	3171

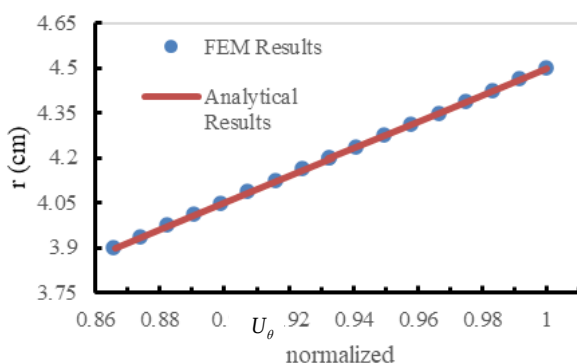


Fig. 9 Torsional wave $T(0,1)$ mode structure through the pipe thickness for a two-layer pipe at 50 kHz

شکل 9 ساختار موج پیچشی $T(0,1)$ برای لوله دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز

2-4- بررسی تأثیر تعداد لایه‌ها

از سری عوامل مؤثر، ابتدا تأثیر تعداد لایه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این‌رو 2 لوله با ضخامت یکسان ولی با تعداد لایه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. خصوصیات لوله دولایه در جدول 1 ذکر شده است. شعاع داخلی لوله سه لایه برابر 3.9 سانتی‌متر

جدول 1 خصوصیات مکانیکی و هندسی لوله دولایه مورد استفاده در شبیه‌سازی المان محدود

Table 1 Mechanical and geometrical properties of two-layer pipe used in the simulation model

لایه	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m^3)	شعاع داخلی لایه (cm)	ضخامت (cm)
داخلی	70	0.33	2700	3.9	0.3
بیرونی	207	0.3	7800	4.2	0.3

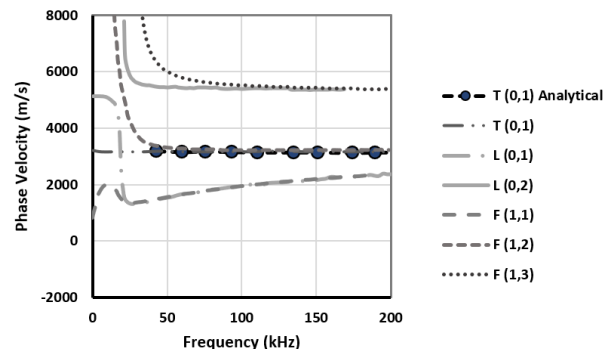


Fig. 6 The phase velocity dispersion curves for the two-layer pipe with the properties listed in Table 1

شکل 6 نمودارهای دیسپرز سرعت فاز برای لوله دولایه با خصوصیات ذکر شده در جدول 1

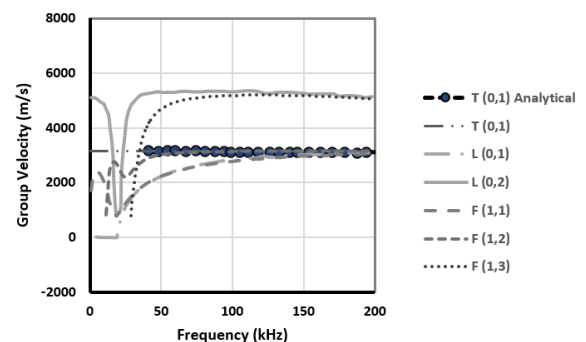


Fig. 7 The group velocity dispersion curves of the torsional wave for the two-layer pipe with the properties listed in Table 1

شکل 7 نمودار دیسپرز سرعت گروه موج پیچشی برای لوله دولایه با خصوصیات ذکر شده در جدول 1

فرکانس ثابت 50 کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش ضخامت سرعت انتشار موج می‌تواند حدود $50 \text{ mm}/\mu\text{sec}$ افزایش یابد که مقدار قابل توجهی می‌باشد (شکل 11).

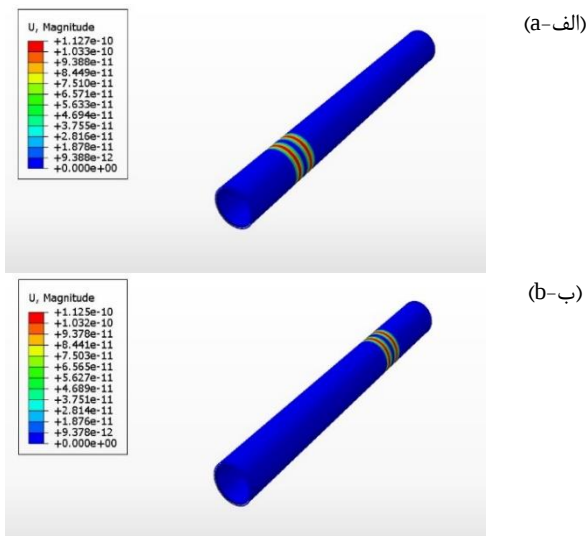


Fig. 10 Torsional wave propagation in the two-layer pipe at 50 kHz (a) 66.06 μsec (b) 192.09 μsec

شکل 10 انتشار موج پیشی در لوله دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز (الف) زمان 66.06 میکروثانیه (ب) زمان 192.09 میکروثانیه

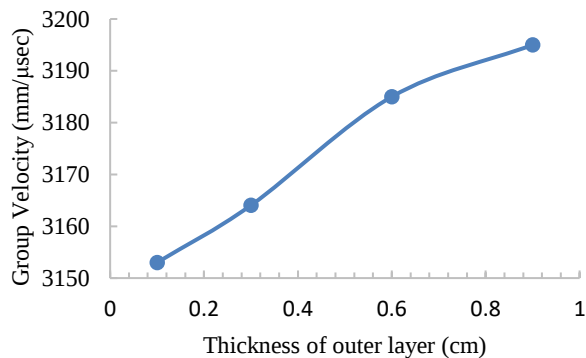


Fig. 11 Group velocity variation of the torsional wave propagation in terms of the thickness of the outer layer

شکل 11 تغییرات سرعت گروه انتشار موج پیشی بر حسب ضخامت لایه خارجی

4-5- بررسی تأثیر خواص مکانیکی لایه‌ها

سه لوله دولایه با خواص مکانیکی متفاوت جهت بررسی تأثیر خواص مکانیکی بر سرعت انتشار موج مورد مطالعه قرار گرفتند. مختصات هندسی سه لوله دولایه در جدول 1 ذکر شده است. جنس لایه داخلی ثابت و آلومینیوم در نظر گرفته شده است و لایه بیرونی فولاد، مس و قلع قرار داده شده است. مدول یانگ قلع برابر 50 گیگا پاسکال و چگالی آن برابر 7635 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. در فرکانس 100 کیلوهرتز سرعت انتشار موج در لوله تشکیل شده از آلومینیوم و فولاد برابر 3123 متر بر ثانیه، در لوله تشکیل شده از آلومینیوم و مس برابر 2138 متر بر ثانیه و در لوله تشکیل شده از آلومینیوم و قلع برابر 1563 متر بر ثانیه محاسبه شده است (جدول 6). نتایج نشان می‌دهد که سرعت انتشار موج پیشی در لوله دولایه وابسته به خصوصیات مکانیکی مواد لایه‌های تشکیل دهنده لوله می‌باشد.

و ضخامت هریک از لایه‌ها برابر 2 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جنس لایه داخلی، میانی و بیرونی به ترتیب آلومینیوم، فولاد و آلومینیوم در نظر گرفته شده است. سرعت انتشار موج اول متقارن موج پیشی در لوله دولایه برابر 3168.05 متر بر ثانیه محاسبه شده است. درحالی‌که سرعت انتشار موج در لوله سه‌لایه برابر 3164.85 متر بر ثانیه به دست آمده است. اگرچه این مقادیر تفاوت ناچیزی دارند، با این حال در صورت وجود عیب، جهت تشخیص دقیق محل آن می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

4-3- بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها

جهت بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها در لوله‌های دولایه، با جابجایی جنس لایه‌های لوله ذکر شده در جدول 1، نتایج مورد بررسی قرار داده شده است (جدول 3). همچنین برای لوله‌های سه لایه تأثیر ترتیب لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات هندسی لوله سه لایه در بخش 2-4 ذکر شده است. همچنین خصوصیات مکانیکی جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 3 بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها در لوله‌های دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز

جنس لایه داخلی	جنس لایه بیرونی	سرعت گروه (m/s)		خطای نسبی (%)
		عددی	تحلیلی	
فولاد	آلومینیوم	3164.04	3164	0.0019
آلومینیوم	فولاد	3168.05	3171	0.18

جدول 4 خواص مکانیکی لوله سه لایه

ماده	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m^3)
آلومینیوم	70	0.3	2700
فولاد	207	0.3	7800
مس	110	0.343	8930

جدول 5 بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها در لوله‌های سه لایه

جنس لایه داخلی	جنس لایه میانی	جنس لایه بیرونی	سرعت گروه (m/s)		خطای نسبی (%)
			عددی	تحلیلی	
آلومینیوم	فولاد	آلومینیوم	3164.85	3164	0.008
فولاد	آلومینیوم	فولاد	3168.05	3171	0.18
مس	فولاد	آلومینیوم	2694.62	2662.2	1.21
آلومینیوم	فولاد	مس	2791.28	2742.52	1.77

از جدول 3 و جدول 5 نتیجه می‌شود که سرعت گروه با تغییر ترتیب لایه‌ها، تغییر کرده است. با تغییر ترتیب لایه‌ها در لوله دولایه مشاهده می‌شود سرعت گروه تا 7 متر بر ثانیه (0.22 درصد) تغییر می‌کند (جدول 3). همچنین برای لوله سه لایه متشکل از مس، فولاد و آلومینیوم با تغییر چینش لایه‌ها سرعت گروه به میزان 80 متر بر ثانیه (3.01 درصد) تغییر می‌کند (جدول 5) که برای تشخیص دقیق محل عیب احتمالی می‌بایست مورد توجه بازرسان قرار گیرد.

4-4- بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ها

جهت بررسی تأثیر ضخامت بر روی سرعت انتشار موج پیشی تقارن محوری، ضخامت لایه بیرونی لوله دولایه ذکر شده در جدول 1 به عنوان متغیر مسئله تغییر داده شده است. از این رو ضخامت‌های 0.1، 0.3، 0.6 و 0.9 سانتی‌متر در

- [9] Whittier, J. S. and Jones, J. P., "Axially Symmetric Wave Propagation in a Two-Layered Cylinder," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 3, No. 4, pp. 657-675, 1967.
- [10] Sun, Z. and Du, H., "Estimation of the Dispersion Curves of Pipe Guided Waves by Field Measurement," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 140, pp. 106693, 2020.
- [11] Akbarov, S., Kepceler, T. and Egilmez, M. M., "Torsional Wave Dispersion in a Finitely Pre-Strained Hollow Sandwich Circular Cylinder," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 18-19, pp. 4519-4537, 2011.
- [12] Guz, A. N., "Elastic Waves in Bodies with Initial (Residual) Stresses," *International Applied Mechanics*, Vol. 38, No. 1, pp. 23-59, 2002.
- [13] Dean, M., "Torsional Wave Dispersion in a Composite Cylinder with a Functionally Graded Core and an Imperfect Interface," Thesis, The Ohio State University, USA, 2013.
- [14] Hua, J. and Rose, J., "Guided Wave Inspection Penetration Power in Viscoelastic Coated Pipes," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 52, no. 4, pp. 195-205, 2010.
- [15] Luo, W., "Ultrasonic Guided Waves and Wave Scattering in Viscoelastic Coated Hollow Cylinders," PhD Thesis, The Pennsylvania State University, USA, 2005.
- [16] Mu, J., "Guided Wave Propagation and Focusing in Viscoelastic Multilayered Hollow Cylinders," PhD Thesis, The Pennsylvania State University, USA, 2008.
- [17] Castaings, M. and Bacon, C., "Finite Element Modeling of Torsional Wave Modes Along Pipes with Absorbing Materials," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 119, No. 6, pp. 3741-3751, 2006.
- [18] Chen, G., Katagiri, T., Song, H., Yusa, N. and Hashizume, H., "Investigation of the Effect of a Bend on Pipe Inspection Using Microwave NDT," *NDT & E International*, Vol. 110, pp. 102208, 2020.
- [19] Alleyne, D. and Cawley, P., "The Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers" *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-20, 1996.
- [20] Kwun, H. and Dynes, C. P., "Long-Range Guided Wave Inspection of Pipe Using Magnetostrictive Sensor Technology: The Feasibility of Defect Characterization," *Proceeding SPIE 3398, Nondestructive Evaluation of Utilities and Pipelines II*, pp. 28-34, 1998.
- [21] Liu, T., Pei, C., Cai, R., Li, Y. and Chen, Z., "A Flexible and Noncontact Guided-Wave Transducer Based on Coils-Only EMAT for Pipe Inspection," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 314, pp. 112213, 2020.
- [22] Guo, S., Chen, S., Zhang, L., Liew, W. H. and Yao, K., "Direct-Write Piezoelectric Ultrasonic Transducers for Pipe Structural Health Monitoring," *NDT & E International*, Vol. 107, pp. 102131, 2019.
- [23] Ditri, J. J., Rose, J. L. and Pilarski, A., "Generation of Guided Waves in Hollow Cylinders by Wedge and Comb Type Transducers," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 211-218, 1993.
- [24] Quarry, M. J. and Rose, J. L., "Multimode Guided Wave Inspection of Piping Using Comb Transducers," *Materials Evaluation*, Vol. 57, No. 10, pp. 1089-1090, 1999.
- [25] Miao, H., Huan, Q., Wang, Q. and Li, F., "Excitation and Reception of Single Torsional Wave T (0, 1) Mode in Pipes Using Face-Shear D24 Piezoelectric Ring Array," *Smart Materials and Structures*, Vol. 26, No. 2, pp. 025021, 2017.
- [26] Zhu, W., "A Finite Element Analysis of the Time-Delay Periodic Ring Arrays for Guided Wave Generation and Reception in Hollow Cylinders," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 48, No. 5, pp. 1462-1470, 2001.
- [27] Zhu, W., "An FEM Simulation for Guided Elastic Wave Generation and Reflection in Hollow Cylinders with Corrosion Defects," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 124, No. 1, pp. 108-117, 2002.

جدول 6 بررسی تأثیر خواص مکانیکی لایه‌های لوله‌های دولایه در 100 کیلوهرتز

Table 6 Effect of mechanical properties of layers in two-layer pipes at 100 kHz

نمونه	ماده لایه داخلی	ماده لایه بیرونی	سرعت گروه (m/s)
1	آلومینیوم	فولاد	3123
2	آلومینیوم	مس	2138
3	آلومینیوم	قلع	1563

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا سرعت فاز برای لوله‌ی چندلایه متشکل از مواد همگن، با استفاده از معادلات حرکت موج و با شرایط مرزی ذکر شده استخراج شد. سپس جهت بررسی انتشار موج پیچشی در لوله دولایه و سه لایه، یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس ایجاد شد. همچنین نشان داده شد نتایج مدل‌سازی موج پیچشی در لوله دولایه و سه لایه، در مقایسه با سرعت گروه به‌دست‌آمده از معادلات تحلیلی، مطابقت خوبی دارند. از مقایسه‌ی انتشار موج پیچشی تقارن محوری در سه مدل با ضخامت یکسان ولی با تعداد لایه متفاوت، مشاهده می‌شود که سرعت گروه موج منتشرشده با یکدیگر متفاوت بوده و باید موردتوجه بازرسان قرار گیرد. همچنین مشاهده شد که تعداد لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها تأثیری کوچکی بر سرعت انتشار موج در لوله دارد. درحالی‌که ترتیب لایه‌ها و جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده تأثیر بیشتری بر روی سرعت انتشار موج پیچشی $T(0,1)$ در لوله‌های چندلایه دارد. مطالعه تفاوت سرعت و الگوهای انتشار موج می‌تواند منجر به شناخت بهتر ساختار لوله چندلایه و تشخیص عیوب احتمالی آن شود.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز جهت حمایت از این پژوهش که با شماره قرارداد (SCU.EM97.29321) به انجام رسیده، تشکر و قدردانی می‌کنند.

7- مراجع

- [1] Rose, J. L., "Ultrasonic Guided Waves in Solid Media," Cambridge university press, 2014.
- [2] Tan, J. J., Wang, X., Guo, N. and Ho, J. H., "Parametric Study of Defect Detection in Pipes with Bend Using Guided Ultrasonic Waves," in *MATEC Web of Conferences*, Vol. 71, pp. 2003, 2016.
- [3] Gazis, D. C., "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 31, No. 5, pp. 568-573, 1959.
- [4] Gazis, D. C., "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. II. Numerical Results," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 31, No. 5, pp. 573-578, 1959.
- [5] Liu, G. and Qu, J., "Guided Circumferential Waves in a Circular Annulus," *Applied Mechanics*, Vol. 65, No. 2, pp. 424-430, 1998.
- [6] Muggleton, J. M., Kalkowski, M., Gao, Y. and Rustighi, E., "A Theoretical Study of the Fundamental Torsional Wave in Buried Pipes for Pipeline Condition Assessment and Monitoring," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 37, pp. 155-171, 2016.
- [7] Lai, J. L., Dowell, E. H. and Tauchert, T. R., "Propagation of Harmonic Waves in a Composite Elastic Cylinder," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 49, No. 2, pp. 220-228, 1971.
- [8] Armenakas, A. E., "Torsional Waves in Composite Rods," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 38, No. 3, pp. 439-446, 1965.

- [28] Lowe, P. S., Lais, H., Paruchuri, V. and Gan, T.-H., "Application of Ultrasonic Guided Waves for Inspection of High Density Polyethylene Pipe Systems," *Sensors*, Vol. 20, No. 11, pp. 3184, 2020.
- [29] Demma, A., Cawley, P. and Lowe, M., "The Reflection of the Fundamental Torsional Mode from Cracks and Notches in Pipes," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 114, No. 2, pp. 611-625, 2003.
- [30] Furukawa, T. and Komura, I., "Simulation and Visualization of Guided Wave Propagation by Large-Scale 3D FEM," *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol. 3-3, pp. 92-101, 2011.
- [31] Tan, J. J., Wang, X., Guo, N. and Ho, J. H., "Parametric Study of Defect Detection in Pipes with Bend Using Guided Ultrasonic Waves," *The International Conference on Computing and Precision Engineering*, pp.5, 2016.
- [32] Zhang, X., Tang, Z., Lv, F. and Yang, K., "Scattering of Torsional Flexural Guided Waves from Circular Holes and Crack-Like Defects in Hollow Cylinders," *NDT & E International*, Vol. 89, pp. 56-66, 2017.
- [33] Løvstad, A. and Cawley, P., "The Reflection of the Fundamental Torsional Mode from Pit Clusters in Pipes," *NDT & E International*, Vol. 46, pp. 83-93, 2012.
- [34] Abramowitz, M. and Stegun, I., "Handbook of Mathematical Functions: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables Applied Mathematics Series," Dover Publications, 1964 .
- [35] Dassault Systèmes, "Abaqus Analysis User's Guide," Technical Report Abaqus 6.14 Documentation ,Simulia Corp., 2016 .
- [36] Gresil, M., Poohsai, A. and Chandarana, N., "Guided Wave Propagation and Damage Detection in Composite Pipes Using Piezoelectric Sensors," *Procedia Engineering*, Vol. 188, pp. 148-155, 2017.



بررسی تأثیر سیم حافظه‌دار بر رفتار بالستیکی ساندویچ پنل هوشمند با هسته موجدار

رهام ماهر¹، سید محمدرضا خلیلی^{2*}، رضا اسلامی فارسانی³

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

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

* تهران، صندوق پستی 1999143344، khalili@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/07/29

پذیرش: 1400/10/08

کلیدواژگان

ضربه سرعت بالا، ساندویچ پنل، هسته موجدار، پوسته کامپوزیتی هوشمند، آلایز حافظه‌دار

چکیده

در این مطالعه، رفتار ساندویچ پنل هسته دوزنقه‌ای آلومینیومی با پوسته‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تقویت شده با آلایز حافظه‌دار تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های کامپوزیتی جهت انجام آزمایش‌های کشش، فشار و برش ساخته شدند و خواص مورد نیاز از آزمایش‌ها به دست آمد. سپس سازه‌های ساندویچی با هسته موجدار آلومینیومی و پوسته‌های 4 لایه کامپوزیت شیشه‌ای/اپوکسی با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شد. به منظور تقویت پوسته‌های کامپوزیتی، از سیم آلایز حافظه‌دار در سه حالت، سه سیم بدون پیش کرنش، سه سیم با 3% پیش کرنش و سه سیم با 6% پیش کرنش استفاده شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه سرعت بالا به وسیله تفنگ گازی قرار گرفتند. برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج، مدل‌های عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار LS-Dyna با در نظر گرفتن شرایط آزمایش تجربی تهیه شد. نتایج شامل سرعت محدود بالستیک و انرژی جذب شده توسط سازه با راه‌حل‌های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شد. هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثر افزودن سیم آلایز حافظه‌دار به جهت تقویت پوسته‌ها و تأثیر پیش کرنش بر رفتار بالستیکی سازه ساندویچی بوده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که وجود سیم آلایز حافظه‌دار و اعمال پیش کرنش باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌شود. میزان جذب انرژی در مقایسه با نمونه بدون سیم، در نمونه 3 سیم بدون پیش کرنش تقریباً 10%، در نمونه 3 سیم با 3 درصد پیش کرنش تقریباً 22% و در نمونه 3 سیم با 6 درصد پیش کرنش تقریباً 30% افزایش یافته است.

The effect of shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels

Roham Maher¹, Seyed Mohammad Reza Khalili^{2*}, Reza Eslami-Farsani³

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

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

* P.O.B. 1999143344, Tehran, Iran, khalili@kntu.ac.ir

Keywords

High Velocity Impact, Sandwich Panel, Corrugated core, Smart composite Face-sheet, Shape Memory Alloy

Abstract

In this research, the impact behavior of trapezoidal corrugated core sandwich panel reinforced with SMA wires, has been investigated experimentally and numerically. Composite specimens were made to perform tensile, compression and shear tests, and the requisite properties were acquired from the tests. Then, sandwich structures with aluminum corrugated core and 4-layer glass/epoxy composites face-sheets were made using the hand-layup technique. In order to reinforce the composite face-sheets, SMA wires were used in two models: 3 SMA wires without pre strain, 3 SMA wires with 3% pre-strain and 3 SMA wires with 6% pre-strain. The test was performed using a gas gun. To validate and compare the results, the numerical models of the specimens were prepared in LS-Dyna, considering the experimental testing conditions. The results, including ballistic limited velocity and the absorbed energy of the structure were compared and validated by the experimental solutions. The aim of this study was to investigate the effect of adding shape memory alloy wire to reinforce the face-sheets and the effect of pre strain on the ballistic behavior of the sandwich structure. The results shows that the presence of the SMA wires and applying pre-strain, leads to increasing the energy absorption. Comparing to the wireless sample, the absorbed energy increased about 10%, 22% and 30% in the 3-wires sample without pre-strain, 3-wires sample with 3% pre-strain and 3-wires sample with 6% pre-strain, respectively.

1-مقدمه

سازه‌های کامپوزیتی پیشرفته در مقیاس وسیع و در سازه‌های مختلف به صورت روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختارهای ساندویچی با هسته موجدار نمونه‌ای از کامپوزیت‌های پیشرفته می‌باشند. سازه‌های ساندویچی عموماً از سه بخش ساخته می‌شوند، بخش هسته میانی و پوسته بالایی و پایینی. سازه‌های ساندویچی با داشتن وزن کم نسبت به مقاومت بالایشان، باعث بهبود خواص سازه و جذب بیشتر انرژی توسط سازه می‌شوند [1-4]. این ساختارها در بسیاری از سازه‌های دریایی، شهری، خودروها و به خصوص در سامانه‌های هوافضایی کاربرد دارند. برخی از موارد کاربرد آن‌ها در زندگی روزمره عبارت‌اند از: هسته‌های ساندویچی مقوایی برای بسته‌بندی، سقف‌های موج‌دار فلزی، بدنه کشتی، شاسی و سپر خودرو، بدنه و بال‌سازی استفاده می‌شوند. در طبیعت، جایی که عملکرد مکانیکی باید بهینه شود، از ساختارهای ساندویچی استفاده می‌شود، به عنوان مثال جمجمه انسان که از دو لایه استخوان فشرده متراکم تشکیل شده است که توسط یک "هسته" از مواد با چگالی کمتر جدا شده است. ساندویچ‌پنل‌های هسته موجدار در امتداد موج هسته سفتی بالا و عمود بر امتداد موج هسته انعطاف‌پذیری بالایی دارند. از دیگر مزایای استفاده از ساندویچ‌پنل هسته موجدار مقاومت خستگی بالای این سازه‌ها می‌باشد. [5] با توجه به کاربرد گسترده سازه‌های ساندویچی هسته موجدار با رویه‌های کامپوزیتی در ساخت اجزای مکانیکی بکار رفته در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، شناخت خواص ضربه‌ای این ساختارها همچون خواص ایستایی آن‌ها به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه حین باربری و برخوردهای ناخواسته امری لازم و ضروری است. هسته موجدار نقش جدا کننده دو پوسته را از یکدیگر دارد. همچنین هسته موجدار با مقاومت در برابر تغییر شکل‌های عمودی، پوسته‌ها را تثبیت کرده و کل سازه را با توجه به مقاومت برشی بالای خود قادر می‌سازد تا به عنوان یک سازه ضخم مورد استفاده قرار گیرد. هسته موجدار در راستای جهت موج انعطاف قابل توجهی دارد، همچنین در جهت عرضی، این سازه‌ها دارای سفتی بیشتری هستند [6-7]. علاوه بر این یک هسته موجدار بر خلاف هسته‌های نرم لانه زنبوری، در برابر خمش، پیچش و برش عمودی از خود مقاومت نشان می‌دهد.

ترکیب پوسته‌های کامپوزیتی با هسته فلزی مانند سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری امروزه در صنایع هوافضا کاربرد بسیاری دارند. این نوع ساندویچ‌پنل‌ها می‌تواند با استفاده از پوسته‌های کامپوزیتی، سفتی و استحکام ویژه خمشی را افزایش دهد، در حالی که استفاده از هسته‌های فلزی ظرفیت جذب انرژی را همراه با تغییر شکل‌های بزرگ نیز بهبود می‌بخشد. کاترمن و همکاران [8] نشان دادند که ساختارهای ساندویچی با هسته لانه زنبوری و مواد فوم پلیمری ممکن است هوا و رطوبت را حفظ کنند. حفظ رطوبت یکی از مشکلات ساخت ساندویچ‌پنل مورد استفاده در هواپیما است. این مشکل ممکن است منجر به افزایش وزن ساندویچ‌پنل و ضعیف شدن خواص اصلی آن شود. به منظور حل مشکل، جایگزینی یک هسته توخالی مانند هسته موجدار می‌تواند از تجمع رطوبت جلوگیری کند.

در سال‌های اخیر، استفاده از آلایژ حافظه‌دار به منظور تقویت سازه‌های کامپوزیتی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. نیتینول¹ یکی از اولین مواد هوشمند است که در سال 1962 کشف شد [9]. نیتینول‌ها دارای دو فاز کریستالی هستند: 1) فاز آستنیت که قوی‌تر است و در دمای بالا پایدار

است و 2) فاز مارتنزیت که نرم‌تر است و در دمای پایین پایدار است [10]. نیتینول در فاز مارتنزیت خود به دلیل نرمی نسبی، به راحتی تغییر شکل می‌پذیرد. فاز آستنیت دارای ساختار مکعبی است. فاز مارتنزیت دارای تقارن کمتری است و بسته به نوع تغییر فاز ممکن است شکل کریستالی مختلفی داشته باشد. تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت از چندین روش امکان‌پذیر است، درحالی که تبدیل فاز از مارتنزیت به آستنیت فقط از یک روش امکان‌پذیر است. آلایژهای حافظه‌دار می‌توانند در اثر تغییر فاز از حالت آستنیت به مارتنزیت و بالعکس باعث جذب انرژی بیشتری در راستای تقویت صفحات کامپوزیتی گردند. به علاوه این مواد تحت بارگذاری سیکلی مکانیکی، می‌توانند از طریق ایجاد حلقه‌ی برگشت‌پذیر هیستریزس، انرژی مکانیکی را جذب و یا تلف کنند.

استفاده از آلایژ حافظه‌دار در کاربردهای علمی و مهندسی، به خاطر ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها رو به گسترش است. سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با آلایژ حافظه‌دار، قابلیت تغییر در سفتی خود را دارند. همچنین آلایژ حافظه‌دار بر اساس آزمایش سان [11] و تجزیه و تحلیل شریعات [12]، توانایی تغییر شکل، تعمیر آسیب و بهبود خاصیت ضربه را دارد. در این مطالعه، سیم‌های آلایژ حافظه‌دار به همراه پیش کرنش در دمای بالا در بین لایه‌های پوسته کامپوزیتی ساندویچ‌پنل قرار گرفته‌اند. تمایل سیم‌هایی که در معرض کشش اولیه² قرار گرفته‌اند به بازگشت به حالت ابتدایی، باعث ایجاد یک تنش فشاری در جسم شده و بنابراین مقاومت سازه در برابر ضربه را افزایش می‌دهد.

یکی از مهمترین دلایل استفاده از آلایژهای حافظه‌دار به منظور تقویت کامپوزیت‌ها، بالابردن میزان جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی در بارگذاری ضربه‌ای است. سازه‌های کامپوزیتی در حین ساخت و یا حمل و نقل، مستعد قرار گرفتن در معرض آسیب‌های ناشی از ضربه هستند [13]. خسارت ناشی از ضربه بر روی سطوح کامپوزیتی اغلب غیر قابل اجتناب است، لذا باید راه‌حلی پیدا کرد تا این خسارت را به حداقل رساند تا سازه به‌طور کامل عملکرد خود را از دست ندهد.

در سال‌های اخیر محققان بسیاری بر روی پاسخ ضربه‌ای سازه‌های کامپوزیتی تحقیق کرده‌اند [14-15]. خدادادی و همکاران [16] به بررسی تجربی و عددی ضربه بالستیک روی کامپوزیت لایه‌ای پرداختند. آن‌ها تأثیر تعداد لایه‌های کامپوزیت بر میانگین انرژی جذب شده و همچنین اثر شکل پرتابه بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت کولار/ اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. سانچز و همکاران [17] بصورت تجربی نتایج اثر زاویه پرتابه را روی پاسخ یک ورق چندلایه کامپوزیتی تحت ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. خلیلی و همکاران [18] به بررسی اثر شکل سر پرتابه و زاویه برخورد در ضربه سرعت بالا بر روی کامپوزیت‌های لایه‌ای پرداختند. آن‌ها با بررسی کامپوزیت‌های لایه‌ای با 3 مدل لایه‌چینی دریافتند که کمترین خسارت و حد بالستیک در 4 لایه پارچه الیاف کربن و بیشترین خسارت و حد بالستیک در 4 لایه پارچه الیاف شیشه ایجاد خواهد شد. با ترکیب این دو پارچه و ساخت 4 لایه پارچه کربن-شیشه، حد بالستیک بالاتر و خسارت پایین‌تر خواهد آمد. ورما و همکاران [19] به بررسی تجربی ضربه سرعت بالا بر روی کامپوزیت‌های تقویت شده با آلایژ حافظه‌دار پرداختند. آن‌ها نحوه قرارگیری سیم‌های آلایژ حافظه‌دار در بین لایه‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که قرارگرفتن سیم‌های آلایژ حافظه‌دار بصورت شبکه‌بندی

² prestrain¹ nitinol

گردیده است. به منظور ساخت و شکل دادن هسته موجدار دوزنقه‌ای، از دستگاه خم (شکل 1) استفاده گردیده است. هندسه سطح مقطع هسته موجدار دوزنقه‌ای در شکل 2 نمایش داده شده است. شکل 3، هسته موجدار آلومینیومی را نمایش می‌دهد. خواص آلومینیوم در جدول 1 آورده شده است.



Fig. 1 Bending machine to shape the aluminum core

شکل 1 نمونه دستگاه خم برای شکل دادن هسته آلومینیومی

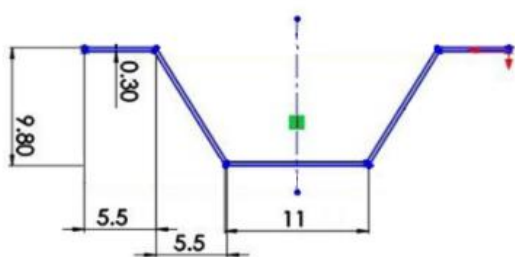


Fig. 2 geometry of aluminum corrugated core

شکل 2 هندسه هسته موجدار آلومینیومی

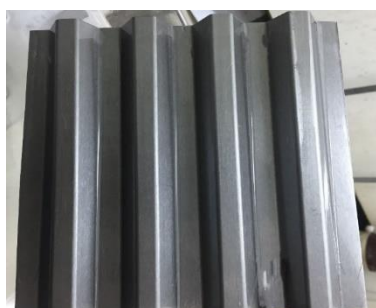


Fig. 3 Aluminum corrugated core

شکل 3 هسته موجدار آلومینیومی

جدول 1 خواص آلومینیوم سری 3000 [28]

Table 1 Properties of aluminum grade 3000 series [28]

مقدار	پارامتر
2770	دانشیه (kg/m^3)
70	مدول کششی (GPa)
0.33	ضریب پواسون
295	استحکام نهایی (MPa) S_{ut}

پوسته‌های کامپوزیتی از پارچه شیشه/ اپوکسی دوجهته به روش لایه‌چینی دستی و در دمای اتاق ساخته شده‌اند. به منظور ساخت پوسته‌های کامپوزیتی پارچه شیشه و رزین اپوکسی^۲ با 10% هاردنر ترکیب شده‌اند.

شده جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌هایی دارد که سیم‌های آلایژ حافظه‌دار بصورت خطی و در یک راستا در نمونه قرار گرفته‌اند. اسلامی-فارسانی و همکاران [20] به بررسی تجربی پاسخ FMLهای تقویت شده با آلایژ حافظه‌دار و بررسی سطوح تخریب شده در اثر ضربه سرعت بالا پرداختند. پیرمحمدی و همکاران [21] به بررسی ضربه سرعت بالا بر روی ساندویچ پل با هسته لانه زنبوری بصورت تجربی پرداختند. آن‌ها با بررسی مکانیزم شکست در سازه لانه زنبوری و میزان جذب انرژی توسط هر بخش ساندویچ پل دریافتند که پوسته رویی نسبت به پوسته زیرین نقش بیشتری در جذب انرژی دارد. جی و همکاران [22] به بررسی تجربی ضربه سرعت پایین و بالا بر روی ساندویچ پل پرداختند. آن‌ها از شبکه فلزی توخالی تقویت شده با اپوکسی به عنوان هسته و چندلایه کامپوزیتی به عنوان پوسته‌های استفاده کردند. شهبازی و همکاران [23] به بررسی ضربه سرعت بالا بر روی ساندویچ پل‌های هسته موجدار پرداختند. آن‌ها تأثیر تعداد موج بر روی میزان جذب انرژی سازه را بصورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. لیاقت و همکاران [24] به بررسی تجربی نفوذ دینامیکی بر روی ساندویچ پل با پوسته‌های آلومینیومی و هسته لانه زنبوری آلومینیومی پرداختند. هو و همکاران [25] به بررسی اثرات شکل هندسی و پارامترهای ابعادی اصلی، بر رفتار ساندویچ پل‌های هسته موجدار و بهبود هسته‌های ساندویچ پل با شکل هسته دوزنقه‌ای و خرابایی بر اساس استانداردهای تصادم پرداختند. وادلی و همکاران [26] تغییر شکل و شکست پل‌های ساندویچی با هسته موجدار مثلثی، تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت بالا را مورد بررسی قرار دادند. کیلیکاسلان و همکاران [27] به بررسی و مدل‌سازی المان محدود ضربه بر روی سازه ساندویچی با هسته موجدار دوزنقه‌ای آلومینیومی با پوسته‌های آلومینیومی پرداختند.

هدف از این پژوهش، ارتقای خواص ضربه‌ای ساندویچ پل‌های هسته موجدار در مواجهه با برخورد سرعت بالا است تا بتوان با استفاده از تقویت پوسته‌های کامپوزیتی سازه به واسطه قرار دادن سیم‌های آلایژ حافظه‌دار و اعمال پیش کرنش به آن‌ها، مقاومت سازه در مقابل بارهای ضربه‌ای را افزایش داد.

اگرچه مطالعات بسیاری بر روی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت شده با آلایژ حافظه‌دار انجام شده است، اما بررسی تأثیر افزودن سیم‌های آلایژ حافظه‌دار در پوسته‌های کامپوزیتی ساندویچ پل‌های با هسته موجدار در معرض ضربه با سرعت بالا مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، پاسخ ساندویچ پل‌های هسته موجدار با پوسته‌های کامپوزیتی که تحت تأثیر سرعت زیاد قرار گرفته‌اند به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، تأثیر افزودن سیم‌های آلایژ حافظه‌دار سوپرالاستیک به پوسته‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است تا درک بهتری از بهبود ویژگی‌های سازه، هنگام قرار گرفتن در معرض ضربه با سرعت بالا بدست آید. در ادامه تأثیر اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلایژ حافظه‌دار بر رفتار سازه در مواجهه با ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفته است.

2-تحلیل آزمایشگاهی

2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

آلومینیوم به علت چگالی کم و انعطاف‌پذیری زیاد و استحکام بالا در بسیاری از مصارف مهندسی به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه، از آلومینیوم سری 3000 با ضخامت 0.3 میلی‌متر، برای ساخت هسته موجدار استفاده

² EPON828

¹ Fibe Metal Laminate

$$v = v_F V_F + v_E V_E \quad (1)$$

که در آن $v_F = 0.22$ و $v_E = 0.35$ است [32]. همچنین خواص سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار سوپر الاستیک استفاده شده در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3 خواص آلیاژ حافظه‌دار [33]

Table 3 Properties of shape memory alloys [33]

پارامتر	مقدار
دانشیه (kg/m^3)	6500
مدول الاستیک در فاز آستنیت (GPa)	55
مدول الاستیک در فاز مارتنزیت (GPa)	46
ضریب پواسون	0.3
تنش شروع آستنیت (MPa)	190
تنش شروع مارتنزیت (MPa)	380
تنش پایان آستنیت (MPa)	120
تنش پایان مارتنزیت (MPa)	460

در این مطالعه، تأثیر حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار و اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار به منظور تقویت سازه ساندویچی، در پاسخ سازه ساندویچ پنل هوشمند به ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مشاهده اثر افزوده شدن سیم آلیاژ حافظه‌دار به سازه، 2 نمونه، شامل نمونه‌های بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار (شکل 5 الف - a)، نمونه‌های با 6 سیم آلیاژ حافظه‌دار (3 سیم در پوسته رویی و 3 سیم در پوسته زیرین) (شکل 5 ب - b) ساخته و آزمایش شده است. به منظور مشاهده اثر پیش کرنش، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در نمونه‌های دارای 6 سیم در دو حالت بدون پیش کرنش و 3% پیش کرنش در پوسته‌های کامپوزیتی قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها در ابعاد 15×15 سانتی‌متر مربع ساخته شده‌اند. کد نمونه‌ها و تعریف پارامترهای هر نمونه در جدول 4 آمده است.

2-2- آزمایش ضربه سرعت بالا

آزمایش ضربه سرعت بالا توسط دستگاه تفنگ گازی که در شکل 6 نمایش داده شده است انجام شده است. تفنگ گازی مورد استفاده از یک مخزن تحت فشار، سرعت مورد نظر را برای پرتابه فراهم می‌کند.

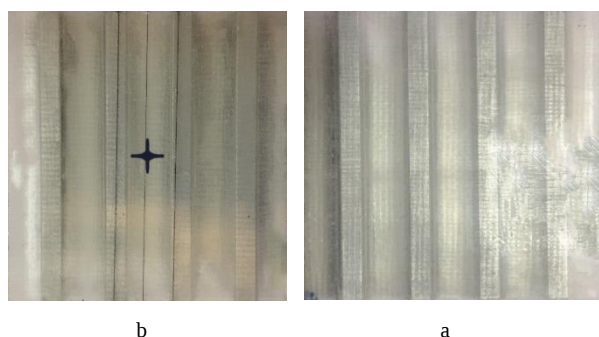


Fig. 5 The fabricated smart sandwich panels a) without wire, b) with 6 wires

شکل 5 نمونه‌های ساخته شده ساندویچ پنل هوشمند الف) نمونه بدون سیم ب) نمونه با 6 سیم

پوسته‌های کامپوزیتی از چهار لایه و مجموعاً به ضخامت 1.1 میلی‌متر ساخته شده‌اند. به منظور دستیابی به خواص پوسته‌های کامپوزیتی، آزمایش کشش (شکل 4 الف - a)، فشار (شکل 4 ب - b) و برش (شکل 4 پ - c) به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D3039 [29]، ASTM D6641 [30] و ASTM D5379 [31] انجام شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول 2 آورده شده است.

از آنجا که نسبت اختلاط پارچه شیشه و اپوکسی در پوسته‌های کامپوزیتی به گونه‌ای است که 77 درصد پوسته‌ها را پارچه شیشه و 23 درصد را اپوکسی تشکیل می‌دهد، مقدار ضریب پواسون ذکر شده در جدول 2 از قانون مخلوط‌ها و رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

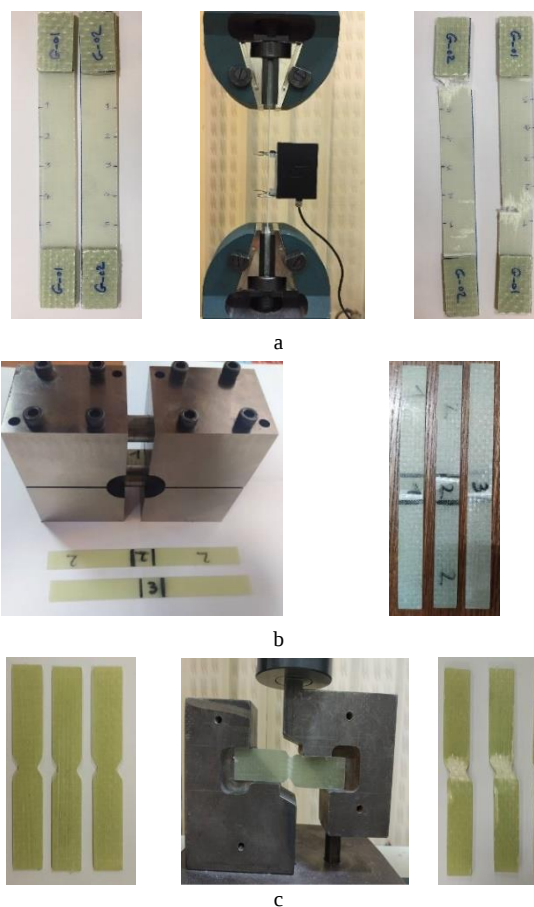


Fig. 4 a) tensile test b) shear test c) compressive test of composite laminates

شکل 4 آزمایش الف) کشش ب) برش پ) فشار پوسته کامپوزیتی

جدول 2 خواص پوسته‌های کامپوزیتی

Table 2 Composite laminate properties

پارامتر	مقدار
دانشیه (kg/m^3)	1460
ضریب پواسون	0.25
مدول کششی (GPa)	19.84
مدول برشی (GPa)	5
استحکام نهایی کششی (MPa)	369
استحکام نهایی فشاری (MPa)	375
استحکام نهایی برشی (MPa)	75.8

آلیاژ حافظه‌دار جهت تقویت صفحه‌های کامپوزیتی که در شکل 8 مدل المان محدود ایجاد شده نمایش داده شده است.

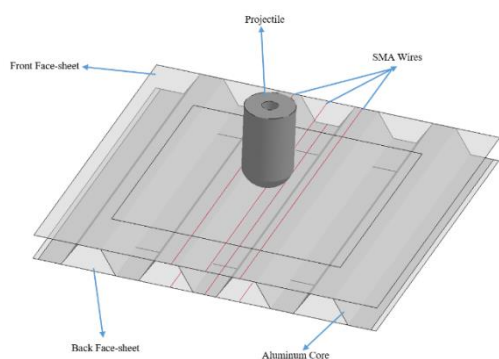


Fig. 8 FEM Geometry of the presented sandwich structure

شکل 8 مدل المان محدود سازه ساندویچی مورد مطالعه

برای جسم ضربه زننده از خواص جسم صلب استفاده شده است. هسته آلومینیومی توسط المان پوسته³ با فرمول Belytschko-Tsay و با 3 نقطه انتگرال گیری در راستای ضخامت مدل شده است. ضخامت هسته آلومینیومی همانند نمونه‌های آزمایش گرفته شده، 0.3 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای صفحات کامپوزیتی از المان پوسته با 4 نقطه انتگرال گیری در راستای ضخامت استفاده شده است. ضخامت صفحات کامپوزیتی 1.1 میلی‌متر متشکل از 4 لایه می‌باشد. همچنین برای مدل‌سازی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار از المان تیر⁴ با فرمول Hughes-Liu with cross section integration و سطح مقطع دایره‌ای و قطر 0.5 میلی‌متر استفاده شده است. ابعاد کلی نمونه به شکل مربع و با ابعاد 15×15 سانتی‌متر مربع و ارتفاع هسته آلومینیومی 1.1 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل 9 سطح مقطع هسته را نمایش می‌دهد.

جسم ضربه زننده بصورت استوانه با سر گرد با طول 3.75 سانتی‌متر، شعاع 1.08 سانتی‌متر و جرم 27 گرم مدل شده است که در شکل 10 مشاهده می‌شود. محل اصابت ضربه زننده دقیقاً در وسط نمونه می‌باشد.

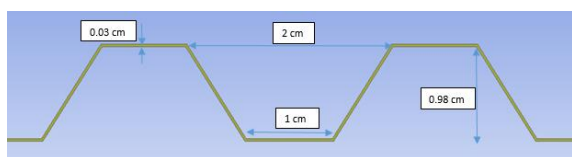


Fig. 9 Core cross section view

شکل 9 سطح مقطع هسته موجدار

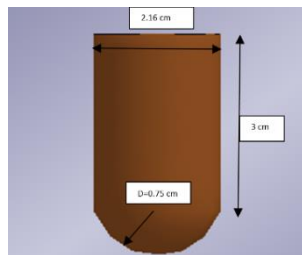


Fig. 10 Geometry of Projectile

شکل 10 هندسه ضربه زننده

جدول 4 کد نمونه‌ها

Table 4 Codes of samples

ردیف	کد نمونه	تعداد سیم	درصد پیش کرنش
1	GE-0W0	0	0
2	SGE-3W0	3	0
3	SGE-3W3	3	3

پرتابه از لوله تفنگ گازی عبور کرده و در آستانه خروج، از سنسور عبور می‌کند. دستگاه اندازه‌گیری سرعت از یک دیود ساطع کننده نور و یک آشکارساز پرتو نوری تشکیل شده است. پرتابه که طول معینی دارد، پرتو نور را قطع می‌کند و سرعت پرتابه با استفاده از سنسور اندازه‌گیری می‌شود. صفحه نگهدارنده نمونه‌ها به صورتی عمل می‌کند که از هر وجه نمونه 5 cm را مقید می‌کند (شکل 7 الف-a). پرتابه مورد استفاده در این مطالعه، بصورت استوانه‌ای با سر کروی با قطر 21 میلی‌متر و وزن 27 گرم در نظر گرفته شده است (شکل 7 ب-b). سرعت پرتابه در این مطالعه برابر 119m/s است.

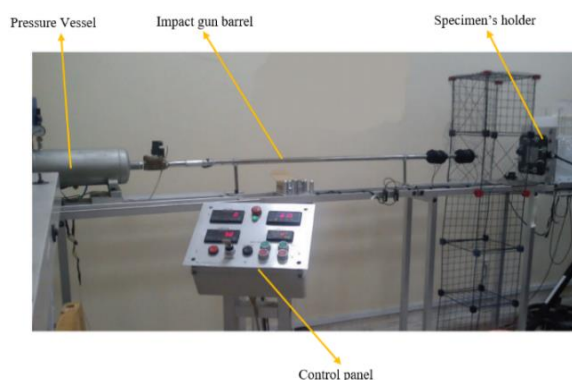


Fig. 6 Gas gun impact tester

شکل 6 دستگاه تفنگ گازی

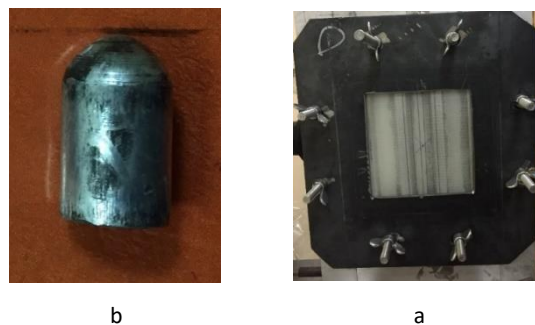


Fig. 7 a) Fixture b) Projectile

شکل 7 الف نگهدارنده ب ضربه زننده

3- تحلیل المان محدود

1-3- مدل‌سازی

نرم‌افزار المان محدود تجاری ال اس داینا¹، به منظور شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. ال اس داینا یک نرم‌افزار مدل‌سازی دینامیک غیرخطی است که از معادلات صریح² به منظور شبیه‌سازی مسائل بهره می‌برد. در این مطالعه هندسه از 5 جزء تشکیل شده است، ضربه زننده (پرتابه)، هسته آلومینیومی، دو صفحه کامپوزیتی در بالا و پایین هسته آلومینیومی و سیم‌های

³ shell
⁴ beam

¹ LS-Dyna
² Explicit

$$\begin{aligned} e_t^2 &= \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1, \\ e_t^2 &\geq 0 \Rightarrow \text{failed} \\ e_t^2 &< 0 \Rightarrow \text{elastic} \end{aligned} \quad (4)$$

در حالت فشار محوری وقتی $\sigma_{22} < 0$

$$\begin{aligned} e_c^2 &= \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 - 1, \quad e_c^2 \geq 0 \Rightarrow \text{failed} \\ e_c^2 &< 0 \Rightarrow \text{elastic} \end{aligned} \quad (5)$$

برای حالت شکست برشی داریم:

$$e_t^2 = \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \quad (6)$$

در معادلات بالا σ_{11} تنش در راستای محوری، σ_{22} تنش عرضی، σ_{12} تنش برشی می‌باشد. همچنین X_t, X_c, Y_t و Y_c به ترتیب استحکام نهایی کشش در حالت محوری، استحکام فشاری در حالت محوری، استحکام کشش در حالت عرضی و استحکام فشاری در حالت عرضی می‌باشند. همچنین S_c بیانگر استحکام برشی است.

هسته آلومینیومی:

هسته آلومینیومی توسط مدل ماده Piecewise linear plasticity مدل شده است. خواص الاستو-پلاستیک^۳ برای این مدل ماده توسط تعریف نمودار تنش-کرنش انجام گرفته است. شکست ماده توسط تعریف حد کرنش پلاستیک در لحظه شکست^۴ تعریف شده است. خواص تعریف شده برای آلومینیوم در جدول 1 آمده است.

آلیاژ حافظه‌دار:

به منظور تعریف خواص آلیاژ حافظه‌دار، از مدل ماده Shape Memory استفاده شده است. [36] این مدل ماده، رفتار سوپر الاستیک مواد آلیاژ حافظه‌دار را تعریف می‌کند که در آن ماده قادر به تحمل تغییر شکل‌های بزرگ در اثر بارگذاری و بازگشت به حالت اولیه در اثر باربرداری است. پارامترهای مورد نیاز برای تعریف آلیاژ حافظه‌دار شامل دانسیته، مدول الاستیک در فاز آستنیت، ضریب پواسون، تنش شروع آستنیت، تنش پایان آستنیت، تنش شروع مارتنزیت، تنش پایان مارتنزیت، مدول الاستیک در فاز مارتنزیت می‌باشد. این پارامترها در جدول 3 آمده است.

3-3- تأثیرات نرخ کرنش در خواص مکانیکی مواد

با توجه به اینکه آزمایش‌های صورت گرفته در سرعت بالا انجام شده است، تأثیر نرخ کرنش بر روی خواص مواد می‌بایست در نظر گرفته شود. نرخ کرنش در تحقیق پیش رو حدود $370s^{-1}$ می‌باشد.

با توجه به نتایج تحقیق ارائه شده در مرجع [37]، نرخ کرنش تأثیری بر روی مدول الاستیسیته صفحات کامپوزیتی شیشه/پوکسی ندارد و تنها بر روی مقادیر استحکام تأثیر خواهد گذاشت. نتایج ارائه شده در مرجع [38] نشان می‌دهد با افزایش نرخ کرنش از $0.001s^{-1}$ به $1000s^{-1}$ ، میزان استحکام ماده 50% افزایش یافته است. لذا با توجه به نرخ کرنش $370s^{-1}$ ، با میانمایی می‌توان نتیجه گرفت مقادیر استحکام بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی استاتیکی می‌بایست به میزان 18.5% افزایش پیدا کند.

جهت در نظر گرفتن نرخ کرنش برای مدل‌سازی هسته آلومینیومی از مدل کوپر-سایموند [39] استفاده شده است (معادله 7):

در این مطالعه، 4 نمونه جهت تحلیل عددی مدل‌سازی شده است: مدل بدون سیم (شکل 11 الف-a)، مدل دارای 3 سیم در هر صفحه کامپوزیتی (شکل 11 ب-b) که بصورت بدون پیش کرنش، با 3% پیش کرنش و با 6% پیش کرنش در نظر گرفته شده است. در مدل‌های دارای 3 سیم در هر صفحه کامپوزیتی، سیم میانی دقیقاً در وسط جسم و محل برخورد ضربه زنده قرار گرفته است.

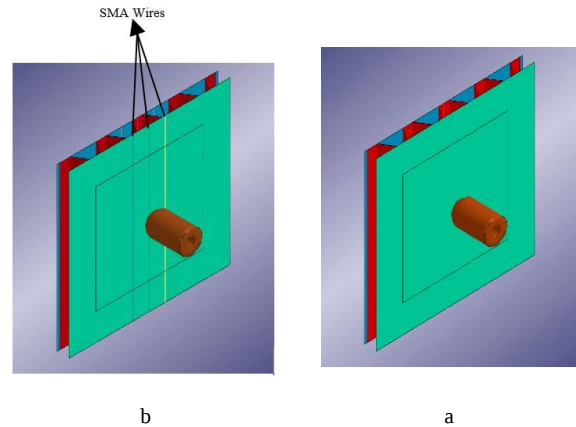


Fig. 11 Geometry of Samples a) without SMA Wires b) With 3 SMA Wires

شکل 11 هندسه نمونه الف) بدون سیم ب) 3 سیم

3-2- خواص مواد

پوسته‌های کامپوزیتی:

برای صفحات کامپوزیتی از مدل ماده Enhanced Composite Damage استفاده شده است. خواص ارتوتروپیک تعریف شده برای ماده کامپوزیتی در جدول 2 آمده است. برای تعریف شکست صفحات کامپوزیتی از مدل چانگ-چانگ^۱ استفاده شده است [34-35]. در این مدل ماده هرگاه میزان تنش المان‌ها در راستای ضخامت و نقاط انتگرال‌گیری به تنش شکست برسد، المان حذف می‌شود. معادلات شکست چانگ-چانگ بر طبق فرمول‌های زیر و بر اساس پارامترهای e_t و e_c که به ترتیب متغیرهای شکست در حالت کشش و فشار هستند بیان می‌شود.

در حالت کشش محوری وقتی $\sigma_{11} > 0$

$$\begin{aligned} e_t^2 &= \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1, \quad e_t^2 \geq 0 \Rightarrow \text{failed} \\ e_t^2 &< 0 \Rightarrow \text{elastic} \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله 2، β ضریب وزنی تنش برشی است. در معیار شکست هشین^۲ مقدار β برابر 1 می‌باشد. هرگاه $\beta = 0$ در نظر گرفته شود، معادله 2 بیانگر حداکثر معیار تنش شکست می‌باشد.

در حالت فشار محوری وقتی $\sigma_{11} < 0$

$$\begin{aligned} e_c^2 &= \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1, \quad e_c^2 \geq 0 \Rightarrow \text{failed} \\ e_c^2 &< 0 \Rightarrow \text{elastic} \end{aligned} \quad (3)$$

در حالت کشش عرضی وقتی $\sigma_{22} > 0$

³ Elasto-Plastic

⁴ Effective Plastic Strain (EPS)

¹ Chang-Chang

² Hashin

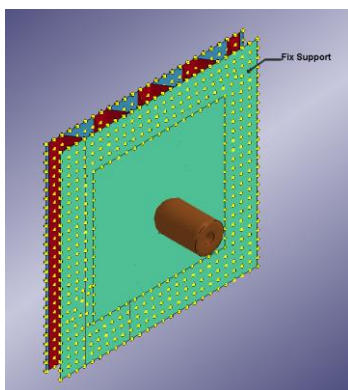


Fig. 12 Boundary Condition

شکل 12 شرایط مرزی

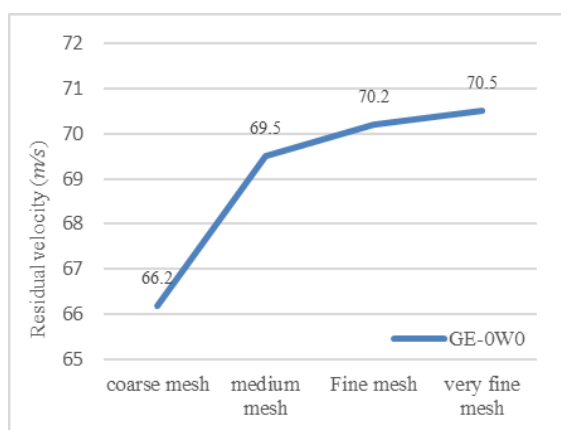


Fig. 13 Mesh size results on convergence rate

شکل 13 بررسی نتایج اندازه مش بر نرخ همگرایی

نتایج حاصل از بررسی حساسیت مش نشان می‌دهد که تغییرات ناشی از کوچک‌تر شدن ابعاد مش در سه حالت مش با ابعاد نصف و مش با ابعاد یک‌چهارم و یک‌هشتم تقریباً 1 درصد خواهد بود. زمان تحلیل از 30 دقیقه برای نمونه اولیه تا 4 ساعت برای نمونه با مش یک‌چهارم افزایش خواهد یافت.

4- نتایج و بحث

در این مطالعه، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده توسط نمونه‌های ساندویچ پل محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای این منظور، سرعت خروجی پرتابه به دست آمده است. پس از بدست آوردن سرعت خروجی، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده محاسبه شده است. سرعت حد، حداقل سرعت مورد نیاز برای نفوذ کامل پرتابه در جسم است که از معادله 8 بدست می‌آید. پس از بدست آوردن سرعت حد بالستیک، انرژی جذب شده نیز از معادله 9 محاسبه شد. [20]

$$V_l = \sqrt{V_i^2 - V_r^2} \text{ m/s} \quad (8)$$

$$E_{abs} = \frac{1}{2} M_p V_l^2 \quad (9)$$

در ادامه، به بررسی اندازه سطح آسیب دیده¹ در سطوح کامپوزیتی پرداخته شده است. با مقایسه مساحت سطح آسیب دیده می‌توان نتیجه گرفت کدام یک از صفحات انرژی بیشتری در فرآیند ضربه جذب کرده است. مساحت

$$1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/P} \quad (7)$$

که در آن $P=4$ و $C=6500 \frac{1}{s}$ لحاظ شده است. همچنین نتایج تحقیق ارائه شده در مرجع [40] نشان می‌دهد، افزایش نرخ کرنش موجب می‌شود که سطح تنش در ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاری (تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت) افزایش یافته و سطح تنش در ناحیه تنش ثابت در مرحله باربرداری (تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت) ثابت می‌ماند. نتایج تحقیق [41] نشان می‌دهد با افزایش نرخ کرنش از $0.001s^{-1}$ در حالت شبه استاتیکی به $1200s^{-1}$ در حالت دینامیکی، میزان تنش‌های شروع و پایان حالت مارتنزیت به میزان 100 MPa افزایش پیدا خواهند کرد. با میانمایی صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت در تحقیق پیش رو، میزان تنش‌های شروع و پایان حالت مارتنزیت می‌بایست به میزان 30 MPa افزایش یابند.

3-4 شرایط تماس

تماس بین ضربه‌زننده با سایر اجسام از طریق مدل تماس CONTACT AUTOMATIC Single Surface تعریف شده است. در این مدل تماس، هرگاه گره‌های سطحی ضربه‌زننده با گره‌های دیگر اجسام برخورد کند تماس شکل می‌گیرد.

تماس بین هسته آلومینیومی و پوسته‌های کامپوزیتی با مدل تماس CONTACT Tied Surface to Surface offset مدل شده است. در این مدل ماده، با تغییر شکل المان‌های یکی از سطوح، سطوح در تماس با آن نیز تغییر شکل پیدا می‌کند.

تماس بین سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با پوسته‌های کامپوزیتی توسط مدل تماس CONTACT Tied Nodes to Surface offset تعریف شده است.

3-5 شرایط مرزی و اولیه

در این مطالعه، با توجه به شرایط آزمایش تجربی، ضربه زننده با سرعت $119m/s$ بصورت عمود و دقیقاً به مرکز جسم برخورد می‌کند. با توجه به شرایط مرزی و نگهدارنده در آزمایش تفنگ گازی، چهار وجه صفحات کامپوزیتی هر یک به اندازه 5 سانتی‌متر مقید در نظر گرفته شده‌اند. (شکل 12)

در نمونه‌های دارای پیش کرنش هر یک از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار قبل از شروع تحلیل دینامیک یکبار به اندازه 1.5% طول اولیه خود معادل 2.25 میلی‌متر از بالا و پایین (مجموعه 3% پیش کرنش برای هر سیم) و بار دیگر به میزان 3% طول اولیه خود معادل 4.5 میلی‌متر کشیده شده‌اند (مجموعه 6% پیش کرنش برای هر سیم).

3-6 بررسی حساسیت مش

در مدل‌های المان محدود صریح، اندازه مش در نتایج بسیار تأثیرگذار خواهد بود. همچنین با کوچک‌تر شدن هرچه بیشتر اندازه مش‌ها و افزایش تعداد المان‌ها، زمان حل افزایش پیدا خواهد کرد. مطالعه حساسیت مش بدین منظور انجام شده است که به مقدار سباز بهینه برای المان‌ها دست یابیم. بدین منظور باید مش‌ها ریز شوند تا حدی که نتایج حاصل از دو نمونه مش تغییر چندانی نداشته باشند. در این مطالعه مش‌ها یک‌بار نصف و یک‌بار یک‌چهارم و بار دیگر بصورت یک‌هشتم شده و نتایج حاصل با نمونه‌های اولیه مقایسه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل 13، مش با ابعاد نصف (medium mesh) جهت تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول 6 مساحت سطح تخریب در نمونه GE-0W0

Table 6 Damage Area of GE-0W0

اجزاء	حل تجربی	حل عددی	درصد اختلاف
رویه جلویی	7.86	7.76	1.3
رویه پشتی	8.53	9.36	8.86

4-2- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه سه سیم بدون پیش کرنش

نمونه با 3 سیم آلیاژ حافظه‌دار در شکل 5 (ب - ب) نمایش داده شده است. مدل عددی این نمونه در شکل 11 (ب - ب) نمایش داده شده است. سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط سازه، برای نمونه SGE-3W0 در دو حالت حل تجربی و عددی محاسبه شده و در جدول 7 نمایش داده شده است.

جدول 7 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه SGE-3W0

پارامتر	حل تجربی (cm^2)	حل عددی (cm^2)	درصد اختلاف
$V_r(m/s)$	68	66.3	2.5
$V_l(m/s)$	97.66	98.8	1.17
$E_{abs}(J)$	128.749	131.83	2.4

شکل 15، نمونه‌ی SGE-3W0 را در دو حالت تجربی و عددی پس از برخورد نمایش می‌دهد. مساحت سطح تخریب ناشی از برخورد سرعت بالا برای هر سطح در جدول 8 آورده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اضافه کردن سیم آلیاژ حافظه‌دار به نمونه، باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه آسیب دیده در قسمت جلوی (شکل 15 (الف-ا)) و پشتی (شکل 15 (ب-ب)) شده و این پانل‌ها انرژی بیشتری را جذب می‌کنند. همچنین جهت گسترش خرابی در راستای سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و عمود بر آن است.

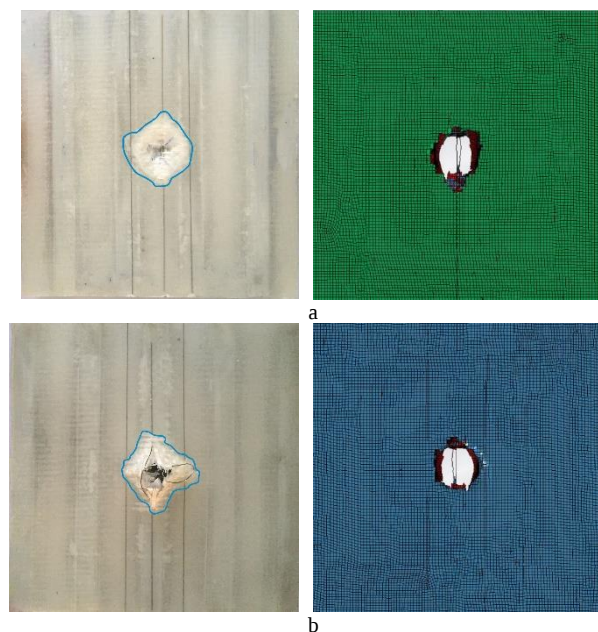


Fig. 15 Damage area of composite face-sheet in SGE-3W0 specimen by experiment and by numerical analysis a) front view b) back view.

شکل 15 سطح تخریب شده در نمونه SGE-3W0 توسط آزمایش و توسط آنالیز عددی (الف صفحه جلویی ب) صفحه پشتی

دقیق ناحیه آسیب دیده با مقایسه تعداد پیکسل‌های آن ناحیه با تعداد پیکسل‌های سطح کل سازه توسط نرم‌افزار فتوشاپ بدست می‌آید.

4-1- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه بدون سیم

در اولین قدم، نمونه بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار که در شکل 5 (الف - ا) نمایش داده شده است، به عنوان نمونه مرجع مورد آزمایش قرار گرفته شده است. مدل عددی این نمونه در شکل 11 (الف - ا) نمایش داده شده است. سرعت باقیمانده، سرعت حد بالستیک از معادله 8 و انرژی جذب شده توسط سازه از معادله 9، برای نمونه GE-0W0 در دو حالت حل تجربی و عددی محاسبه شده و در جدول 5 نمایش داده شده است.

جدول 5 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه GE-0W0

Table 5 Residual Velocity, limited velocity and energy absorbed for GE-0W0

پارامتر	حل تجربی (cm^2)	حل عددی (cm^2)	درصد اختلاف
$V_r(m/s)$	74	69.5	6.1
$V_l(m/s)$	93.19	96.5	3.55
$E_{abs}(J)$	117.247	126	7.5

در شکل 14، سطوح روبروی (شکل 14 (الف-ا)) و پشتی (شکل 14 (ب-ب)) نمونه GE-0W0 بعد از برخورد، در دو حالت حل تجربی و عددی نمایش داده شده است. همچنین در جدول 6 مساحت سطح تخریب ناشی از برخورد سرعت بالا برای هر سطح آورده شده است.

از نتایج ارائه شده در جدول 6 می‌توان نتیجه گرفت، به علت اتصال پوسته پشتی به سطح هسته با توجه دوزنقه بودن هسته، باعث تقویت هسته در محل برخورد پرتابه با هسته و پوسته خواهد شد. از این رو با شکست و پارگی هسته آلومینیومی، شکست و پارگی در پوسته پشتی رخ می‌دهد، این شکست عاملی بر تخریب بیشتر پوسته‌های پشتی بوده و با افزایش سطح تخریب پوسته‌های پشتی، میزان انرژی صرف شده جهت تخریب بیشتر خواهد بود.

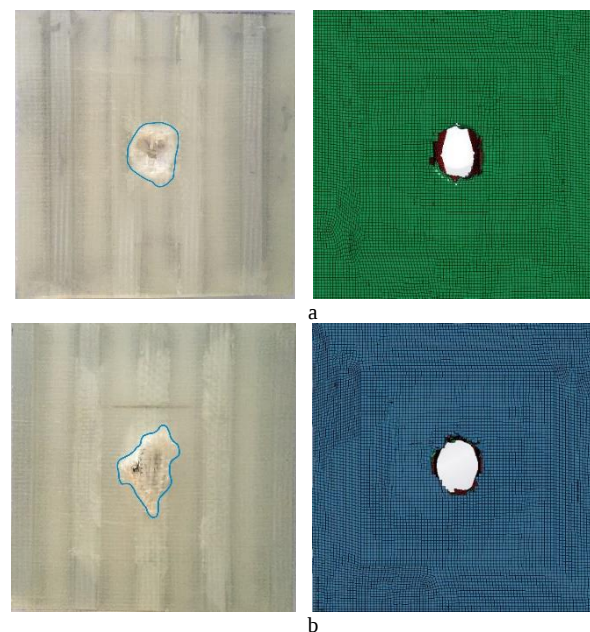


Fig. 14 Damage area of composite face-sheet in GE-0W0 specimen by experiment and by numerical analysis a) front view b) back view.

شکل 14 سطح تخریب شده در نمونه GE-0W0 توسط آزمایش و توسط آنالیز عددی (الف صفحه جلویی ب) صفحه پشتی

سرعت باقیمانده، سرعت حد انرژی جذب شده برای نمونه SGE-3W6 در جدول 11 نمایش داده شده است. در شکل 17، سطوح رویی (شکل 17 الف) و پشتی (شکل 17 ب) نمونه SGE-3W3 بعد از برخورد نمایش داده شده است. مساحت سطح تخریب در پوسته‌های جلویی و پشتی (جدول 12) نشان می‌دهد که با افزایش پیش کرنش از 3% به 6%، ناحیه آسیب دیده در قسمت جلویی افزایش یافته و در قسمت پشتی کاهش یافته است.



Fig. 16 Damage Area of composite face-sheet in SGE-3W3 specimen by experiment and by numerical analysis numerically a) front view b) back view.

شکل 16 سطح تخریب شده در نمونه SGE-3W3 توسط آزمایش و توسط آنالیز عددی الف) صفحه جلویی ب) صفحه پشتی

جدول 11 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه SGE-3W6

پارامتر	حل عددی
$V_r (m/s)$	54.9
$V_l (m/s)$	105.6
$E_{abs} (J)$	150.5

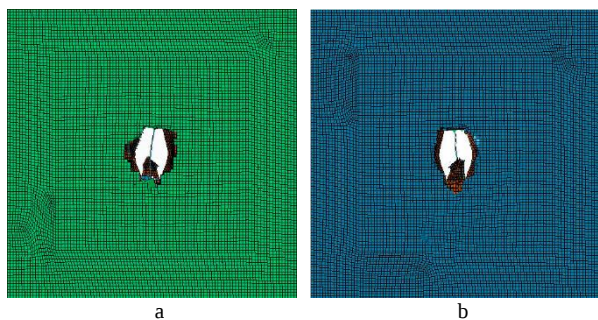


Fig. 17 Damage Area of composite face-sheet in SGE-3W6 specimen by numerical analysis a) front view b) back view.

شکل 17 سطح تخریب شده در نمونه SGE-3W6 توسط آنالیز عددی الف) صفحه جلویی ب) صفحه پشتی

جدول 8 مساحت سطح تخریب در نمونه SGE-3W0

Table 8 Damage Area of SGE-3W0

اجزاء	حل تجربی (cm^2)	حل عددی (cm^2)	درصد اختلاف
رویه جلویی	9.3	9.21	0.96
رویه پشتی	9.86	9.26	6.1

با مقایسه نتایج حل تجربی ارائه شده در جداول 5 و 7 می‌توان نتیجه گرفت که سازه با 3 سیم حافظه‌دار به‌طوری که سیم در محل برخورد قرار گرفته باشد، مقدار 9.81 درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه بودن سیم دارد.

3-4- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه سه سیم با 3 درصد پیش کرنش شکل‌های 5 (ب-ب) و 11 (ب-ب) نمونه با سه سیم آلیاژ حافظه‌دار با 3٪ پیش کرنش را به ترتیب در حالت تجربی و عددی نمایش می‌دهد. سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده برای نمونه SGE-3W3 در محاسبه و در جدول 9 نمایش داده شده است.

جدول 9 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه SGE-3W3

Table 9 Residual Velocity, limited velocity and energy absorbed for SGE-3W3

پارامتر	حل تجربی	حل عددی	درصد اختلاف
$V_r (m/s)$	60	57	5
$V_l (m/s)$	102.77	104.46	1.6
$E_{abs} (J)$	142.574	147.312	3.3

در شکل 16، سطوح رویی (شکل 16 الف) و پشتی (شکل 16 ب) نمونه SGE-3W3 بعد از برخورد، در دو حالت حل تجربی و عددی نمایش داده شده است. از نتایج ارائه شده در جدول 10 می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه کردن پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، ناحیه آسیب دیده در قسمت جلویی افزایش یافته و در قسمت پشتی نسبت به حالت بدون پیش کرنش کاهش یافته است. همچنین جهت گسترش خرابی همچنان در راستای سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و عمود بر آن است.

جدول 10 مساحت سطح تخریب در نمونه SGE-3W3

Table 10 Damage area of SGE-3W3

اجزاء	حل تجربی (cm^2)	حل عددی (cm^2)	درصد اختلاف
رویه جلویی	9.34	9.5	1.7
رویه پشتی	7.97	8.4	5.1

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول 9 و 7 می‌توان نتیجه گرفت، اعمال 3 درصد پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، مقدار 10.74 درصد جذب انرژی را در مقایسه با نمونه بدون پیش کرنش افزایش می‌دهد.

3-4- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه سه سیم با 6 درصد پیش کرنش پس از حصول اطمینان از مطابقت نتایج عددی و تجربی در نمونه‌های قبلی، در این بخش به بررسی نمونه با سه سیم آلیاژ حافظه‌دار با 6٪ پیش کرنش بصورت عددی پرداخته شده است.

نتایج حاصل از حل عددی نمونه SGE-3W6 نشان می‌دهد که با افزایش پیش کرنش در نمونه از 3% به 6%، میزان جذب انرژی 2.7٪ افزایش یافته است.

با توجه به نتایج، سرعت حد بالستیک برای سازه ساندویچ پل با هسته موجدار با قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار دقیقاً در محل ضربه و همچنین اعمال پیش کرنش به سیم‌ها افزایش خواهد یافت.

4-6- مراحل نفوذ

در نمونه‌های دارای سیم آلیاژ حافظه‌دار مراحل نفوذ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

مرحله 1. پرتابه با پوسته جلویی برخورد کرده و باعث شکستگی و پارگی در الیاف و ماتریس می‌شود.

مرحله 2. برخورد پرتابه به سیم میانی باعث حرکت سیم میانی داخل پوسته کامپوزیتی و در عین حال بیرون کشیدگی و افزایش طول سیم میانی و در نتیجه، جذب انرژی توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار خواهد شد. سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار پاره نشده‌اند، اما به مقدار کمی از پوسته‌های کامپوزیتی بیرون کشیده شده‌اند. ناحیه آسیب دیده در پوسته‌های جلویی (شکل 15 (الف - a) و 16 (الف - a)) نشان می‌دهد که انرژی برخورد پرتابه در سطح پوسته‌ها پخش نشده و فقط قسمت‌های میانی آسیب دیده است.

مرحله 3. با ادامه روند نفوذ، پرتابه با هسته آلومینیومی برخورد کرده و منجر به شکست هسته آلومینیومی خواهد شد و در نتیجه، پارگی و شکست در الیاف و ماتریس پوسته‌های کامپوزیتی پستی ایجاد می‌شود.

مرحله 4. در هر نمونه، برخورد پرتابه با هسته آلومینیومی و سپس پوسته پستی منجر به تغییر شکل سیم آلیاژ حافظه‌دار و جذب انرژی بیشتر به دلیل این تغییر شکل می‌شود. تنش زیاد در محل برخورد منجر به جدا شدن موضعی پوسته پستی و هسته آلومینیومی خواهد شد.

4-7- مکانیزم جذب انرژی

مکانیزم جذب انرژی در نمونه‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

1. جذب انرژی حاصل از تخریب پوسته جلویی.
2. جذب انرژی حاصل از تخریب هسته موجدار آلومینیومی.
3. جذب انرژی حاصل از تخریب پوسته پستی.
4. جذب انرژی حاصل از اثر قرار دهی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار.
5. جذب انرژی حاصل از بیرون کشیدگی و افزایش طول سیم حافظه.

از آنجا که پوسته‌های جلویی در محل برخورد با پرتابه به هسته اتصال ندارند، جهت بررسی تأثیر حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار بر میزان جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی می‌توان نتایج حاصل از سطح تخریب در پوسته‌های جلویی را مورد بررسی قرار داد. نتایج ارائه شده در جداول 6، 8 و 10 و 12 نشان می‌دهد میزان جذب انرژی توسط پوسته‌های کامپوزیتی جلویی با قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار، با افزایش سطح تخریب، افزایش خواهد یافت.

به علت عدم وابستگی کرنش نهایی آلومینیوم به سرعت پرتابه [42,43]، کاهش سرعت برخورد پرتابه با هسته (در اثر عبور از پوسته جلویی نمونه‌ها و از دست دادن انرژی) تأثیری بر میزان جذب انرژی توسط هسته آلومینیومی در نمونه‌ها ندارد.

با اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، پس از آنکه پرتابه با تخریب پوسته جلویی مقداری از انرژی خود را از دست داد، با ادامه فرآیند برخورد و بیرون کشیدگی و افزایش طول سیم آلیاژ حافظه‌دار میزان انرژی جذب شده توسط سیم‌ها افزایش خواهد یافت. از آنجا که در نمونه SGE-3W3 و SGE-3W6، سطح تخریب پوسته پستی نسبت به دو نمونه دیگر کاهش یافته و میزان جذب انرژی در این نمونه‌ها بالاتر رفته است، می‌توان نتیجه گرفت که اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش

جدول 12 مساحت سطح تخریب در نمونه SGE-3W6

Table 12 Damage area of SGE-3W6

اجزاء	حل عددی (cm^2)
رویه جلویی	9.49
رویه پستی	7.35

4-5- سرعت حد و انرژی جذب شده

مقایسه نتایج بدست آمده از نمونه‌های تقویت شده با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با نمونه بدون سیم نشان می‌دهد که در نمونه SGE-3W0، که سیم میانی دقیقاً در محل ضربه قرار داشته باشد، سرعت حد و در نتیجه آن انرژی جذب شده توسط نمونه افزایش می‌یابد. همچنین با اعمال پیش کرنش در نمونه SGE-3W3 و SGE-3W6 مشاهده گردید، سرعت حد ضربه زننده و انرژی جذب شده توسط سازه افزایش قابل ملاحظه‌ای با افزایش پیش کرنش داشته است. این نتایج در شکل 18 و 19 نمایش داده شده‌اند. سرعت حد در اثر افزودن سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش (SGE-3W0) نسبت به نمونه بدون سیم (GE-0W0)، به میزان 4.8٪ افزایش یافته است. همچنین با اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، سرعت حد به میزان 5.2٪ در نمونه SGE-3W3 و 6.9٪ در نمونه SGE-3W6 نسبت به نمونه SGE-3W0 افزایش یافته است.

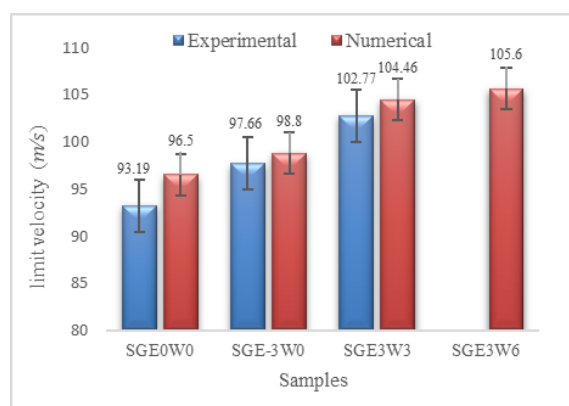


Fig. 18 Comparison of limited velocities by experiment and numerical analysis

شکل 18 مقایسه سرعت حد در نتایج عددی و تجربی

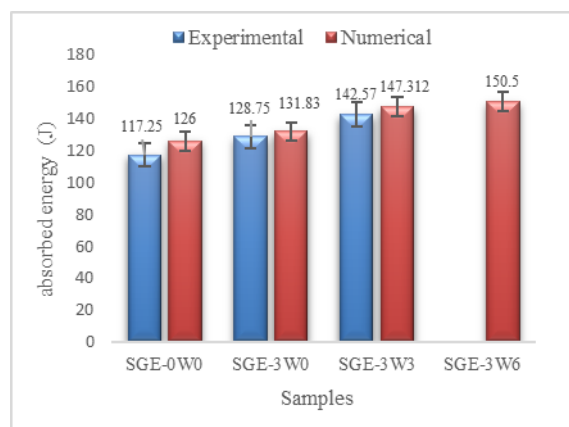
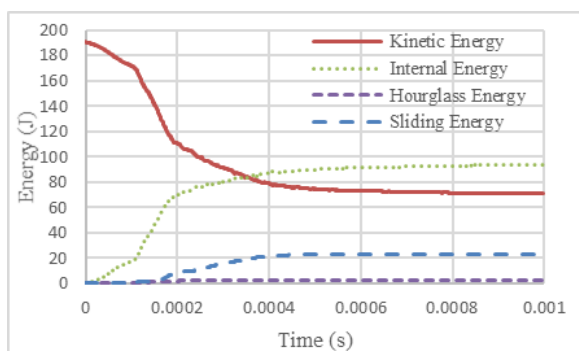
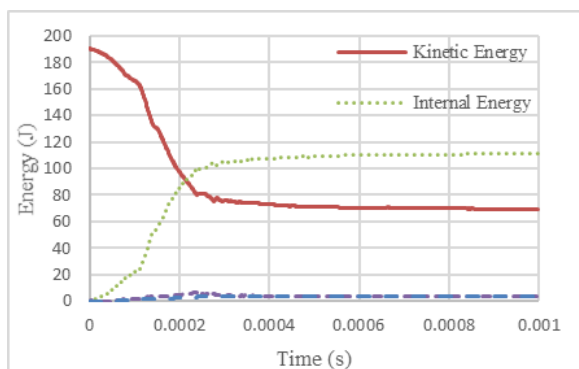


Fig. 19 Comparison of absorbed energies by experiment and numerical analysis

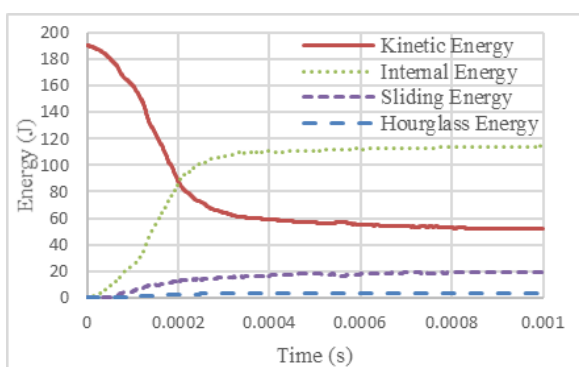
شکل 19 مقایسه انرژی جذب شده در نتایج عددی و تجربی



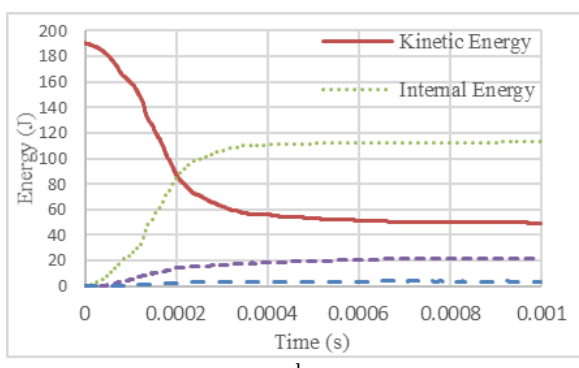
a



b



c



d

Fig. 20 Simulation Energy Balance Analysis, a) GE-0W0 b) SGE-3W0 c) SGE-3W3 d) SGE-3W6

شکل 20 بررسی تعادل انرژی در شبیه‌سازی، الف) نمونه GE-0W0 ب) SGE-3W0 پ) SGE-3W3 ت) SGE-3W6

جذب انرژی بیشتر توسط سیم‌ها شده و علاوه بر بهبود خواص بالستیکی سازه، باعث کاهش سطح تخریب شده در سازه خواهد شد.

8-4- بررسی نتایج عددی

بررسی نمودارهای بدست آمده از میزان انرژی جذب شده توسط سازه در حل عددی، تأثیرگذاری حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار و همچنین اعمال پیش کرنش به سیم‌ها در جهت تقویت سازه را بهتر نمایش خواهد داد.

8-4-1 تعادل انرژی

بررسی شرایط تعادلی انرژی یکی از مهم‌ترین شرایط اطمینان از تحلیل عددی سازه می‌باشد. تعادل انرژی در نرم‌افزار ال اس داینا از معادله زیر محاسبه می‌شود. [44]

$$E_{kin} + E_{int} + E_{gi} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg} = E_{kin}^0 + E_{in}^0 + W_{ext} \quad (10)$$

از آنجا که انرژی‌های جسم صلب و میرایی در این مطالعه بسیار پایین است می‌توان نتیجه گرفت غالب انرژی جذب شده توسط سازه ناشی از انرژی داخلی، انرژی ساعت شنی¹ و انرژی سایش است. انرژی ساعت شنی انرژی حاصل از تغییر شکل‌های غیر فیزیکی المان‌ها است که نرم‌افزارهای المان محدود در حل صریح از آن جهت همگرایی مسئله استفاده می‌کنند.

تعادل سراسری² انرژی در طول شبیه‌سازی برای تمامی نمونه‌ها در شکل 20 نمایش داده شده است. با برخورد پرتابه به سازه، انرژی جنبشی کاهش یافته و انرژی داخلی افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل 20 نمایش داده شده است، انرژی جنبشی اولیه در تمامی نمونه‌ها برابر با 191J (معادله 9) می‌باشد. انرژی جنبشی در پایان فرآیند تماس و پس از خروج کامل پرتابه از سازه برابر 70.7J در نمونه GE-0W0 (شکل 20 الف-a)، 69J در نمونه SGE-3W0 (شکل 20 ب-b)، 52J در نمونه SGE-3W3 (شکل 20 پ-c) و 49.4J در نمونه SGE-3W6 (شکل 20 ت-d) شده است. میزان انرژی جنبشی کاهش یافته اغلب صرف افزایش میزان انرژی داخلی سازه و در نتیجه جذب انرژی اولیه پرتابه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که قرار گرفتن سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش در سازه، باعث کاهش انرژی جذب شده از طریق سایش و افزایش جذب انرژی داخلی در سازه می‌شود. قرار گرفتن سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش باعث کاهش انرژی سایش از 22.8J در نمونه GE-0W0 به 6.65J در نمونه SGE-3W0 خواهد شد. همچنین انرژی داخلی سازه از 93.8J در نمونه GE-0W0 به 111J در نمونه SGE-3W0 افزایش یافته است.

اعمال پیش کرنش به سیم آلیاژ حافظه‌دار سبب افزایش اثر مکانیزم جذب انرژی توسط افزایش میزان انرژی داخلی و سایشی می‌شود. انرژی داخلی سازه از 111J در نمونه SGE-3W0، به 114J در نمونه SGE-3W3 و 113J در نمونه SGE-3W6 افزایش یافته است. انرژی سایشی سازه از 6.65J در نمونه SGE-3W0، به 19J در نمونه SGE-3W3 و 21.8J در نمونه SGE-3W6 رسیده است. نتایج حاصل از اعمال پیش کرنش نشان می‌دهد با افزایش پیش کرنش از 3% به 6%، به خاطر نرم‌تر شدن سیم آلیاژ حافظه‌دار و تغییر شکل بیشتر سیم در حین برخورد، زمان تماس بین پرتابه و سیم‌ها افزایش یافته و در نتیجه مکانیزم جذب انرژی از طریق سایش افزایش می‌یابد.

² Global

1 HourGlass

2-8-4- نیروی تماسی

همانطور که در شکل 21 و 22 نمایش داده شده است، قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار، باعث افزایش حداکثر نیروی تماسی از 12.1kN (GE-0W0) تا 19.1kN (SGE-3W6) شده است. با توجه به اینکه این افزایش در حداکثر نیروی تماسی، همراه با حرکت نقطه اوج به سمت راست نمودار و افزایش زمان تماس از 61.7ms در نمونه بدون سیم به 7.92ms در نمونه 3 سیم با 6 درصد پیش کرنش است می‌توان نتیجه گرفت در اثر قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار و همچنین با اعمال پیش کرنش به سیم‌ها، از شوک ضربه کاسته و در نتیجه مقاومت در برابر ضربه افزایش می‌یابد.

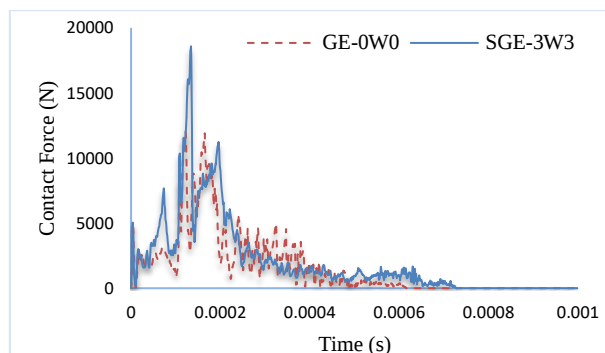


Fig. 21 Contact force-Time diagram for GE-0W0 and SGE-3W3 specimens

شکل 21 نمودار نیروی تماسی - زمان برای نمونه‌های GE-0W0 و SGE-3W3

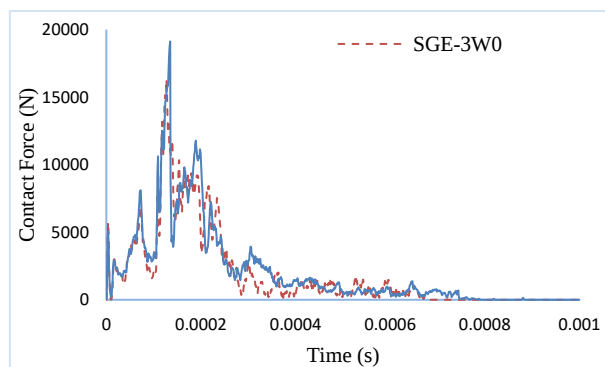


Fig. 22 Contact force-Time diagram for SGE-3W0 and SGE-3W6 specimens

شکل 22 نمودار نیروی تماسی - زمان برای نمونه‌های SGE-3W0 و SGE-3W6

3-8-4- انرژی جذب شده توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

انرژی جذب شده توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در شکل 23 نمایش داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد با افزایش مقدار پیش کرنش، حداکثر انرژی جذب شده توسط سیم‌ها افزایش یافته است. نمودارهای نمایش داده شده دارای 2 نقطه پیک برای هر نمونه می‌باشند، که پیک اول مربوط به میزان انرژی جذب شده توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته جلویی و پیک دوم مربوط به میزان انرژی جذب شده توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته پشتی است. در مرحله اول و با برخورد پرتابه به پوسته جلویی، با افزایش پیش کرنش به سیم‌ها، میزان جذب انرژی توسط سیم‌ها به ترتیب 139% و 219% در نمونه‌های دارای 3% و 6% پیش کرنش نسبت به حالت بدون پیش کرنش افزایش یافته است. همچنین در پیک دوم که حاصل از برخورد پرتابه به

سیم‌های قرار گرفته در پوسته پشتی است، میزان جذب انرژی توسط سیم‌ها به ترتیب 17.21% و 61.8% در نمونه‌های دارای 3% و 6% پیش کرنش نسبت به حالت بدون پیش کرنش افزایش یافته است. با افزایش پیش کرنش، پیک دوم به سمت راست نمودار انتقال پیدا خواهد کرد که نشان دهنده کاهش شوک ضربه و افزایش مقاومت سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در مقابل ضربه به سبب نرم‌تر شدن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در اثر اعمال پیش کرنش و در نتیجه زمان بیشتر تماس بین سیم‌ها و پرتابه است. نتایج نشان می‌دهند جذب انرژی توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته پشتی بیشتر از جذب انرژی توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته جلویی است. دلیل این اتفاق کاهش سرعت اولیه پرتابه در اثر برخورد با پوسته جلویی است.

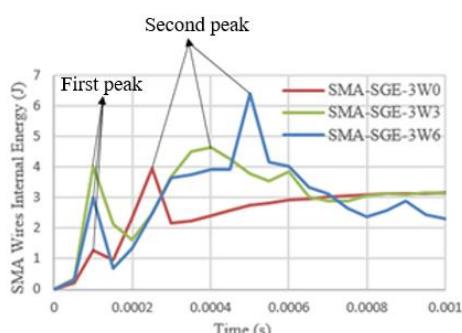


Fig. 23 SMA wires Internal Energy diagram for SGE-3W0, SGE-3W3 and SGE-3W6 specimens

شکل 23 نمودار انرژی داخلی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار برای نمونه‌های SGE-3W0 و SGE-3W3 و SGE-3W6

4-8-4- واماندگی هسته موجدار آلومینیومی

در این پژوهش، پوسته‌های کامپوزیتی نمونه SGE-3W3 از هسته جدا شده - اند تا بر روی نحوه واماندگی هسته آلومینیومی بررسی دقیق‌تر صورت گیرد. پس از مطالعه نمونه ذکر شده و مقایسه با نتایج عددی و اطمینان از صحت نتایج عددی به بررسی پارامتری در نمونه‌های دیگر به روش عددی پرداخته شده است.

شکل 24 الی 26 هسته آلومینیومی نمونه SGE-3W3 را پس از برخورد در روش تجربی و حل عددی نمایش می‌دهد. جذب انرژی توسط هسته ابتدا به واسطه تغییر شکل الاستیک، و پس از رسیدن به تنش تسلیم، با تغییر شکل پلاستیک و پس از آن با عبور از تنش واماندگی با جذب انرژی به واسطه ایجاد پارگی در هسته صورت می‌گیرد. در حین عبور پرتابه از هسته، مقداری انرژی از طریق اصطکاک مابین هسته و پرتابه هدر خواهد رفت. همچنین بخشی از انرژی جنبشی پرتابه صرف غلبه بر اتصال مابین هسته و پوسته شده که این انرژی بصورت محلی¹ در اطراف محل تماس قابل مشاهده خواهد بود. همانطور که در شکل 24 نمایش داده شده، پس از برخورد و عبور پرتابه از هسته موجدار، تغییر شکل‌های پلاستیک در اطراف محل برخورد شکل می‌گیرد، این تغییر شکل‌های پلاستیک اغلب باعث جدایش هسته از پوسته کامپوزیتی در محل تغییر شکل پلاستیک خواهد شد.

شکل 25 نشان دهنده ایجاد 4 ترک دقیقاً در محل خم‌شدگی هسته می‌باشد. در اثر برخورد پرتابه با هسته، به علت ایجاد تمرکز تنش در محل‌های دارای خم، ترک‌هایی در این محل‌ها ایجاد شده و در راستای خط خم رشد پیدا خواهند کرد.

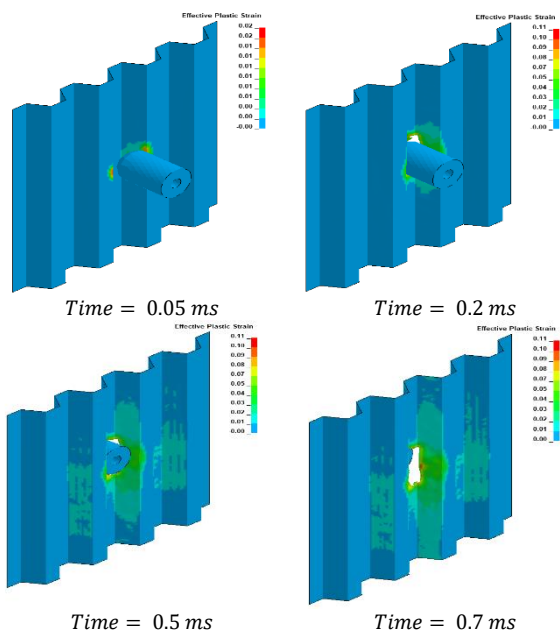


Fig. 27 Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for GE-0W0 core

شکل 27 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه GE-0W0

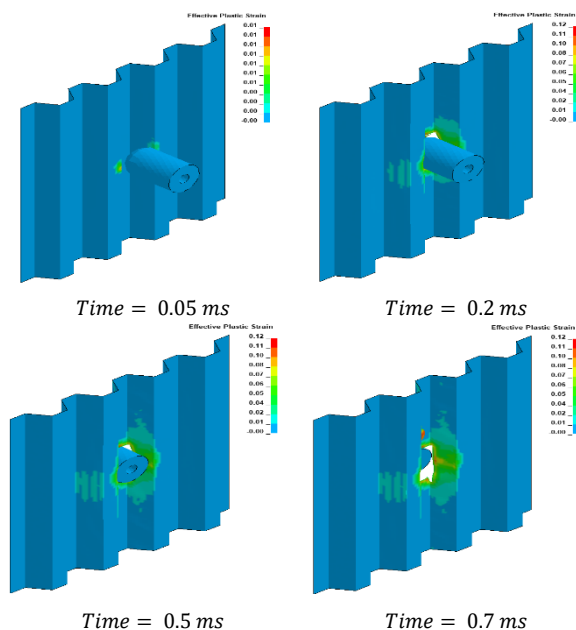


Fig. 28 Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for SGE-3W0 core

شکل 28 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه SGE-3W0

شکل 18 و 19 مقایسه‌ای بین سرعت حد پرتابه و انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها از دو روش حل تجربی و حل عددی را نشان می‌دهد. روش تجربی به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شده است. همانطور که نتایج ارائه شده نشان می‌دهد، تفاوت بین نتایج بدست آمده از حل تجربی و عددی بسیار اندک است.

بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در نمونه GE-0W0 و به میزان 3.55% برای سرعت حد پرتابه و 7.5% در میزان انرژی جذب شده توسط سازه بوده است.

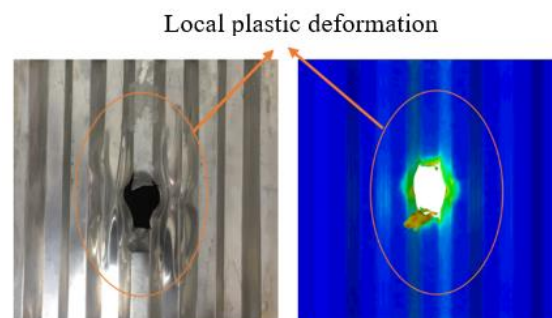


Fig. 24 Plastic deformation in SGE-3W3 core

شکل 24 تغییر شکل پلاستیک در هسته نمونه SGE-3W3

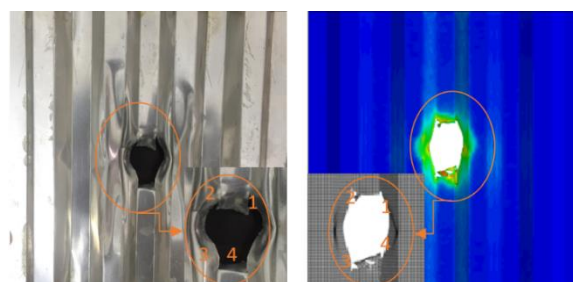


Fig. 25 Crack growth in SGE-3W3 core

شکل 25 گسترش ترک در هسته نمونه SGE-3W3



Fig. 26 Core fracture in SGE-3W3 specimen

شکل 26 واماندگی هسته در نمونه SGE-3W3

شکل 26 نحوه واماندگی هسته آلومینیومی پس از خروج پرتابه از سازه را نمایش می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، پس از خروج پرتابه از سازه در راستای موج، هسته پاره شده و دو گلبرگ تشکیل خواهد شد، این گلبرگ‌ها باعث ایجاد و رشد ترک در پوسته‌های کامپوزیتی نیز خواهد بود. مکانیزم واماندگی در هسته تمامی نمونه‌ها مانند یکدیگر می‌باشد. شکل 27 الی 30 تغییر شکل پلاستیک هسته نمونه‌ها را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

نتایج ارائه شده در شکل‌های 27 تا 30 نشان می‌دهند که پرتابه ابتدا با جداره موج‌های هسته برخورد دارد و باعث تغییر شکل در جداره‌ها خواهد شد. در این مرحله جذب انرژی توسط سایش و همچنین از طریق ایجاد تغییر شکل پلاستیک در هسته می‌باشد. سپس با برخورد به سطح زیرین هسته باعث پارگی و عبور از هسته می‌گردد. در این مرحله جذب انرژی از طریق ایجاد تغییر شکل پلاستیک و در نهایت پارگی هسته صورت می‌گیرد. در هسته‌های موجدار این مراحل باعث جذب انرژی بیشتری در سازه می‌گردد.

بر رفتار ضربه، نمونه‌هایی با 6 سیم آلیاژ حافظه‌دار با 0٪ و 3٪ و 6٪ پیش کرنش مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور صحت‌سنجی نتایج، مدل المان محدود تمامی نمونه‌های آزمایش شده، در نرم‌افزار LS-Dyna شبیه‌سازی شده و صحت نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر است:

1. وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش باعث کاهش سرعت باقیمانده پرتابه از 74 m/s در نمونه GE-0W0 به 68 m/s در نمونه SGE-3W0 می‌شود.

2. اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث کاهش سرعت خروجی پرتابه از سازه و افزایش انرژی جذب شده توسط سازه می‌شود. سرعت خروجی پرتابه از 68 m/s در نمونه SGE-3W0 به 60 m/s و 54.9 m/s به ترتیب در نمونه‌های SGE-3W3 و SGE-3W6 رسیده است.

3. وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش باعث افزایش سطح تخریب در رویه‌های جلویی و پشتی کامپوزیتی می‌شود.

4. اعمال پیش‌کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش سطح تخریب در رویه جلویی کامپوزیتی و کاهش سطح تخریب در پوسته پشتی کامپوزیتی نمونه‌ها شده است.

6- فهرست علائم

v_F	ضرب پوآسون پارچه شیشه
V_F	درصد حجمی پارچه شیشه
v_E	ضرب پوآسون اپوکسی
V_E	درصد حجمی اپوکسی
V_l	سرعت حد
V_i	سرعت ورودی
V_o	سرعت خروجی
E_{abs}	انرژی جذب شده
M_p	جرم ضربه‌زننده
E_{kin}	انرژی جنبشی پایانی
E_{int}	انرژی داخلی پایانی
E_{gi}	انرژی لغزشی پایانی
E_{rw}	انرژی جسم صلب پایانی
E_{damp}	انرژی میرایی پایانی
E_{hg}	انرژی ساعت شنی
E_{kin}^0	انرژی جنبشی اولیه
E_{in}^0	انرژی داخلی اولیه
W_{ext}	کار نیروهای خارجی
ε	نرخ کرنش
C	ضرب ثابت معادله کوپر-سایموند
P	ضرب ثابت معادله کوپر-سایموند

7- مراجع

[1] Li, Z., Chen, W., Hao, H., "Numerical Study of Sandwich Panel with a New Bi-Directional Load-Self-Cancelling (Lsc) Core under Blast Loading", Thin-Walled Structures, Vol. 127, pp. 90-101, 2018.

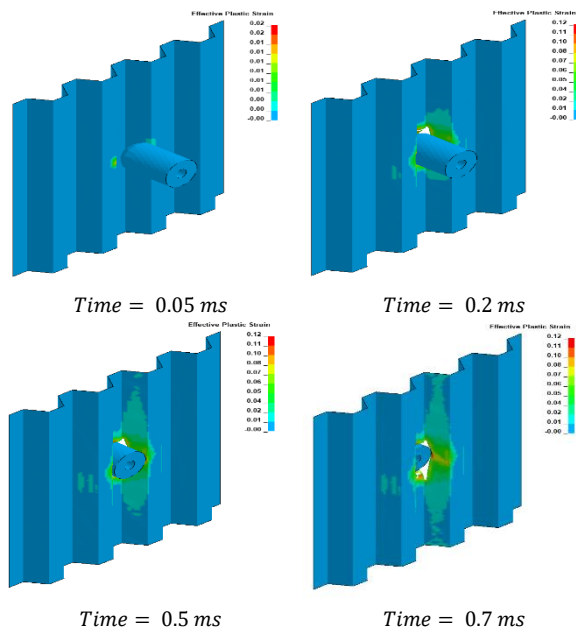


Fig. 29 Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for SGE-3W3 core

شکل 29 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه SGE-3W3

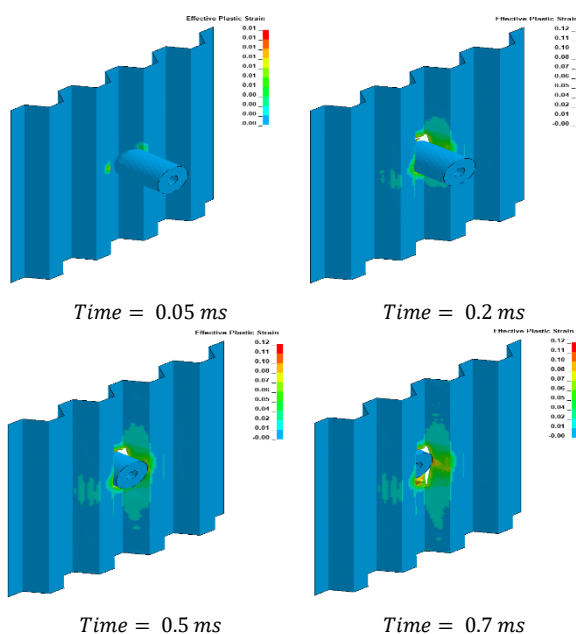


Fig. 30 Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for SGE-3W6 core

شکل 30 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه SGE-3W6

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ضربه سرعت بالا بر روی ساندویچ پنل‌های با هسته موجدار آلومینیومی و پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار سوپر الاستیک، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر حضور سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و درصد پیش کرنش سیم‌ها بر روی پدیده‌های ضربه مانند سرعت حد، سرعت باقیمانده و انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچ پنل به عنوان متغیر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر حضور سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، نمونه بدون سیم، نمونه با 6 سیم آلیاژ حافظه‌دار ساخته و آزمایش شد. برای بررسی تأثیر پیش کرنش در سیم آلیاژ حافظه‌دار

- Laminates" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 37, No. 5, pp. 300-309, 2018.
- [21] N. Pirmohammadi, G.H. Liaghat, M. Hossein Pol, "Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core", *Moddares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014 (In Persian).
- [22] Ji G, Li G and Pang S. Novel sandwich panel with metallic millitube grid stiffened polymer core for impact mitigation. *Eng Struct*; Vol. 71, pp. 178–186, 2014.
- [23] Shahbazi, A. and Zeinedini, A., "Impact Response of E-Glass/Epoxy Composite Bi-Directional Corrugated Core Sandwich Panels" *Polymers and Polymer Composites*, Vol. 29, No. 9, pp. 1563-1574, 2021.
- [24] Hassanpoor, F. Liaghat, G. Sabouri, H. Hadavi, H., "Experimental Study of the interaction of surfaces with aluminum honeycomb core in sandwich panels in the quasistatic and dynamic penetration", In *Persian Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 16, No. 16, pp. 23-31, 2016.
- [25] Hou, S., Zhao, S., Ren, L., Han, X. and Li, Q., "Crashworthiness Optimization of Corrugated Sandwich Panels" *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 1071-1084, 2013.
- [26] Wadley, H. N., Børvik, T., Olovsson, L., Wetzel, J. J., Dharmasena, K. P., Hopferstad, O. S., Deshpande, V. and Hutchinson, J. W., "Deformation and Fracture of Impulsively Loaded Sandwich Panels" *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 61, No. 2, pp. 674-699, 2013.
- [27] Kılıçaslan, C., Güden, M., Odacı, İ. K. and Taşdemirci, A., "The Impact Responses and the Finite Element Modeling of Layered Trapezoidal Corrugated Aluminum Core and Aluminum Sheet Interlayer Sandwich Structures" *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 121-133, 2013.
- [28] Navard Aluminum MFG Co., Arak Province, I.R. Iran, <https://www.navardaluconam.com>, (accessed Feb. 24, 2020).
- [29] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 15.03, D 3039, 2014.
- [30] Standard AS. D6641-09, 2009 "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture". West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D6641-09.
- [31] Standard AS. D5379-05, 2005 "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method". West Conshohocken, PA, 2005, DOI: 10.1520/D5379-05.
- [32] Sudheer, M., Pradyoth, K. and Somayaji, S., "Analytical and Numerical Validation of Epoxy/Glass Structural Composites for Elastic Models" *American Journal of Materials Science*, Vol. 5, No. 3C, pp. 162-168, 2015.
- [33] Lagoudas, Dimitris C., ed. *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [34] Chang, F.-K. and Chang, K.-Y., "Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure" *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, No. 9, pp. 809-833, 1987.
- [35] Chang, F.-K. and Chang, K.-Y., "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations" *Journal of composite materials*, Vol. 21, No. 9, pp. 834-855, 1987.
- [36] Auricchio, F. and Taylor, R. L., "Shape-Memory Alloys: Modelling and Numerical Simulations of the Finite-Strain Superelastic Behavior" *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 143, No. 1-2, pp. 175-194, 1997.
- [37] Reis, J., Coelho, J., Monteiro, A. and da Costa Mattos, H., "Tensile Behavior of Glass/Epoxy Laminates at Varying Strain Rates and Temperatures" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 4, pp. 2041-2046, 2012.
- [38] Armenakas, A. and Sciammarella, C., "Response of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Specimens to High Rates of Tensile Loading" *Experimental Mechanics*, Vol. 13, No. 10, pp. 433-440, 1973.
- [39] Spranghers, K., Kakogiannis, D., Ndambi, J., Lecompte, D. and Sol, H., "Deformation Measurements of Blast Loaded Plates Using
- [2] Jing, L. and Zhao, L., "Blast Resistance and Energy Absorption of Sandwich Panels with Layered Gradient Metallic Foam Cores" *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 464-482, 2019.
- [3] Wang, Z., "Recent Advances in Novel Metallic Honeycomb Structure" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 166, pp. 731-741, 2019.
- [4] Ivañez, I., Santiuste, C., Barbero, E. and Sanchez-Saez, S., "Numerical Modelling of Foam-Cored Sandwich Plates under High-Velocity Impact" *Composite structures*, Vol. 93, No. 9, pp. 2392-2399, 2011.
- [5] Dayyani, I., Ziaei-Rad, S. and Friswell, M. I., "The Mechanical Behavior of Composite Corrugated Core Coated with Elastomer for Morphing Skins" *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, No. 13, pp. 1623-1636, 2014.
- [6] Ansari, M., Golzar, M. and Behraves, A. H., "Evaluation of Corrugated Composite Beam Deflection by Shape Memory Alloy Wire" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, 2014.
- [7] Kumar, P. A. and Rathakrishnan, E., "Corrugated Triangular Tabs for Supersonic Jet Control" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 228, No. 6, pp. 831-845, 2014.
- [8] Katzman, H. A., Castaneda, R. M. and Lee, H. S., "Moisture Diffusion in Composite Sandwich Structures" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, No. 5, pp. 887-892, 2008.
- [9] Buehler, W.J.; Wiley, R.C. *Nickel-Based Alloys*. U.S. Patent 3,174,851, 23 March 1965.
- [10] Taha OM, Bahrom MB, Taha OY, Aris MS. Experimental study on two way shape memory effect training procedure for nitinol shape memory alloy. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*; Vol. 10, No. 17, pp. 7847-51, 2015.
- [11] Sun, M., Wang, Z., Yang, B. and Sun, X., "Experimental Investigation of Gf/Epoxy Laminates with Different Smas Positions Subjected to Low-Velocity Impact" *Composite Structures*, Vol. 171, pp. 170-184, 2017.
- [12] Shariyat, M. and Hosseini, S., "Accurate Eccentric Impact Analysis of the Preloaded Sma Composite Plates, Based on a Novel Mixed-Order Hyperbolic Global-Local Theory" *Composite Structures*, Vol. 124, pp. 140-151, 2015.
- [13] Baker, A., Jones, R. and Callinan, R., "Damage Tolerance of Graphite/Epoxy Composites" *Composite Structures*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-44, 1985.
- [14] Hazell, P. J. and Appleby-Thomas, G. J., "The Impact of Structural Composite Materials. Part 1: Ballistic Impact" *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47, No. 7, pp. 396-405, 2012.
- [15] Appleby-Thomas, G. J. and Hazell, P. J., "The Impact of Structural Composite Materials. Part 2: Hypervelocity Impact and Shock" *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47, No. 7, pp. 406-418, 2012.
- [16] Khodadadi, A., Liaghat, G., Ahmadi, H., Bahramian, A. R., shahgholian, D., Anani, Y. and Asemani, s., "Experimental and Numerical Analysis of High Velocity Impact on Kevlar/Epoxy Composite Plates" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 265-274, 2019 (In Persian).
- [17] Pernas-Sánchez, J., Artero-Guerrero, J. A., Varas, D. and López-Puente, J., "Experimental Analysis of Normal and Oblique High Velocity Impacts on Carbon/Epoxy Tape Laminates" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 60, pp. 24-31, 2014.
- [18] Ahmadi, M., Khalili, SMR. And Eslami Faresani, R., "Investigation on Projectile Nose and Impact Angle Effects in High Velocity Impact on 4ply Glass/Carbon Laminates" *Journal of Energetic Materials*, Vol. 6, No. 2, 2012. (In Persian).
- [19] Verma, L., Sivakumar, S. M., Andrew, J. J., Balaganesan, G., Arockirajan, A. and Vedantam, S., "Compression after Ballistic Impact Response of Pseudoelastic Shape Memory Alloy Embedded Hybrid Unsymmetrical Patch Repaired Glass-Fiber Reinforced Polymer Composites" *Journal of Composite Materials*, Vol. 53, No. 28-30, pp. 4225-4247, 2019.
- [20] Eslami-Farsani, R. and Khazaie, M., "Effect of Shape Memory Alloy Wires on High-Velocity Impact Response of Basalt Fiber Metal

Digital Image Correlation and High-Speed Photography“in Proceeding of EDP Sciences, pp. 12006.

[40] Gur, S., Mishra, S. K. and Frantziskonis, G. N., “Thermo-Mechanical Strain Rate-Dependent Behavior of Shape Memory Alloys as Vibration Dampers and Comparison to Conventional Dampers“ Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 27, No. 9, pp. 1250-1264, 2016.

[41] Adharapurapu, R. R., Jiang, F., Vecchio, K. S. and Gray III, G. T., “Response of Niti Shape Memory Alloy at High Strain Rate: A Systematic Investigation of Temperature Effects on Tension-Compression Asymmetry“ Acta materialia, Vol. 54, No. 17, pp. 4609-4620, 2006.

[42] B. L. Buitrago, C. Santiuste, E. Barbero, Modeling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact, Composite Structures 92, pp. 2090–2096, 2010.

[43] H. Zhao, I. Elnasri, Y. Girard, Perforation of aluminum foam core sandwich panels under impact loading-An experimental study, International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, No. 7, pp. 1246-1257, 2007.

[44] Hamid, I. A., Kamarudin, K., Osman, M., Abidin, A. Z., Zulkippli, Z., Jawi, Z. M., Isa, M. M., Solah, M., Hamzah, A. and Ariffin, A., “Finite Element Bus Rollover Test Verification“ Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia, Vol. 3, No. 4, 2019.



قالب پیش‌نویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرم‌افزار ورد (استایل عنوان)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول¹، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و ... نگارنده سوم³، ... (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمی نگارنده، رشته تخصصی، نام سازمان، نام شهر (استایل مشخصات نویسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 16846-13114، پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

چکیده (سبک عنوان چکیده)

اطلاعات مقاله:

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژگان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

در این قالب (تمپلیت)، شیوه‌ی تهیه‌ی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرم‌افزار ورد برای مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالب‌بندی مقاله، بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها، به‌طور کامل در استایل‌ها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پیست) آن در بخش‌های مختلف و انتخاب استایل مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه شده باشند، معذور است. برای آماده‌سازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایل‌ها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگی‌های لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه می‌باشد. چکیده باید به‌طور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روش‌های انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکل‌ها، جدول‌ها، فرمول‌ها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

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

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:
Composites, Foam, Shear, Deflection

Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

کپی و سپس چسباندن (پیست^۱) متن خود در این فایل، سبک^۲ مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به‌طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:
Paste option → match with Destination format

1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)

1- مقدمه (استایل عنوان سطح 1)

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت^۱) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

³ Style

¹ Template

² Paste

شکل‌ها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکان‌های ذکر شده، مشخص نمایید:

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند.

عناوین افقی و عمودی شکل‌ها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک می‌آیند (توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن^۲ با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین^۳) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

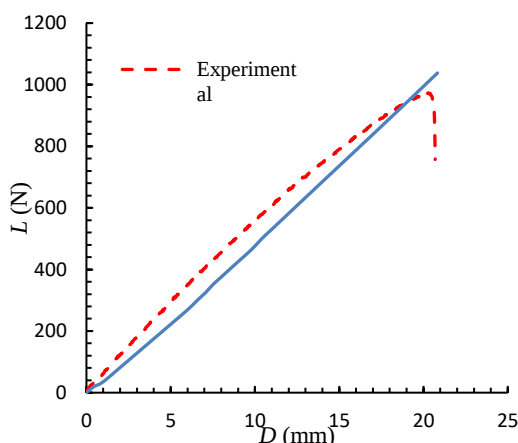


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی ۵ میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علائمی نظیر ، ، ، و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علائم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک‌تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,5,7].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

2-1- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی^۱ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال ۱۰۲ صحیح و ۱/۲ غلط می‌باشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوتونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

2-1- شکل‌ها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکل‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، شکل‌ها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در زیر شکل قرار می‌گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می‌گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
- به همه‌ی شکل‌ها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکل‌ها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سبک متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

¹ English (Style: Sub Title)

² Times New Roman

³ Gridlines

کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدرو برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ^۲ استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطرها بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله $(a.b)$ به جای نقطه ضرب $(a \cdot b)$ استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املاي زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها» جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهای» و «ساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

4-1- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز فارسی خطر به‌هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم علائم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علائم باید دقیقاً یکسان باشد.

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
- عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
- جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
- به همگی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سائز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
- جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
- استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
- در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
- متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
- جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.
- برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم		
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها ^(*)	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

^(*) فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله^۱ موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث^۲ 9pt و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان³ مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

در صورت نیاز، لیست علائم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

E مدول یانگ (Nm^{-2})

P نیرو (Nm^{-2})

T دما (K)

علائم یونانی

σ تنش (Nm^{-2})

ε کرنش

بالانویس‌ها

k تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست علائم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کوشه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً تأکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.

✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.

✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنُت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote