



بررسی خواص تریبولوژیکی نانوکامپوزیت آلایژ مس / دی اکسید تیتانیوم تولید شده با استفاده از فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی

احمد افسری^{1*}، علیرضا رهبر²، مازیار جانقربان³، بهداد جهان‌بین²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز،

2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز،

3- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت،

* شیراز، صندوق پستی 71365-364، Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/09/04

پذیرش: 1402/02/20

کلیدواژگان

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی،

مس، دی اکسید تیتانیوم، ریزساختار،

سایش، خوردگی

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روشی برای فراوری حالت جامد آلایژهای فلزی می‌باشد. جهت انجام فرآیند از ماشین فرز FP4M و ابزار دوار غیرمصرفی برای ایجاد حرارت لازم و اختلاط بیشتر مس با پودر دی اکسید تیتانیوم استفاده گردید. ورق پایه از جنس مس با خلوص 99.9٪ است. حرارت ایجاد شده در طی فرآیند بر روی قطعه مسی و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم موجود در شیار، منجر به تغییرات متالورژیکی در ریزساختار فلز پایه شده و منجر به تغییر اندازه دانه‌ها و شکل آن‌ها می‌گردد. نمونه‌ها تحت عملیات متالوگرافی و بررسی‌های ریزساختی توسط میکروسکوپ نوری، XRD، آزمون‌های خوردگی و سایش قرار داده شدند. نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه HAZ نزدیک به فرآیند، و در ناحیه فرایند، دانه‌ها بصورت ساختار بسیار ریزدانه حاوی نواحی دوقلویی با میانگین اندازه دانه 14 می‌باشند. مقایسه میانگین ضریب اصطکاک در نمودار سایش مس پایه و مس بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی نشان دهنده کاهش مقاومت سایشی می‌باشد. با مقایسه نمودار خوردگی نمونه مس پایه و نمونه مس اصطکاکی اغتشاشی، مشخص گردید که تفاوت محسوسی بین جریان خوردگی در اثر فرایند وجود ندارد.

Investigation of Tribological Properties of Nano-Composite Copper / Titanium Dioxide Alloy Produced Using Friction-Stir Process

Ahmad Afsari^{1*}, Alireza Rahbar¹, Maziar Janghorban², Behdad Jahanbeen¹

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

2- Department of Mechanical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

* P.O.B. 71365-364 shiraz, Iran, Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

Keywords

Friction Stir Processes, Copper, Titanium dioxide, Microstructure, Wear, Corrosion.

Abstract

The FSP is a method for solid state processing of metal alloys. FP4M milling machine and non-consumable rotary-tools were used to create the necessary heat and further mixing of copper with titanium-dioxide powder. The base plate is made of copper with a purity of 99.9%. The heat created during the process on the copper piece and the titanium-dioxide nanoparticles in the groove leads to metallurgical changes in the microstructure of the base metal and leads to changes in the size and shape of the grains. The samples were subjected to metallography and microstructure investigations by OP, XRD, corrosion and wear tests. The results showed that in the HAZ and SZ area, the grains were in the form of a ultrafine grain structure. The average friction coefficient in the base copper wear diagram is lower than pure copper that showed FSP weakened wear properties. Comparing corrosion graphs of base copper sample with FSP sample, showed no evident changing in corrosion resistance.

1- مقدمه

مزایای آن می‌توان به ایجاد منطقه تحت تأثیر حرارت بسیار کوچک در قطعه

و همچنین کاهش آلایندگی زیست‌محیطی به علت مصرف انرژی کم آن

اشاره نمود. اما با وجود این مزایا، عیوبی که در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به

اخیراً فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به عنوان روش اتصال، فراوری و ایجاد

تغییرات میکروساختاری در مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد که از مهم‌ترین

وجود می‌آید ممکن است خطرناک بوده ولی با کنترل صحیح پارامترهای فرآیند می‌توان این عیوب را کاهش داد و یا از تشکیل آن جلوگیری نمود [1]. افزایش تقاضا برای بهبود خواص آلایژ ساخته شده از یک سو، و همچنین ضرورت کاهش جرم یک سازه از سوی دیگر، منجر به تحقیقات مهندسی مواد شده تا باعث بهبود لایه‌های سطحی و خواص عملکردی مورد نیاز گردد. روش‌هایی مانند روکش کردن، پاشش حرارتی و ذوب مجدد با پرتو لیزر که معمولاً در تولید لایه‌های سطحی استفاده می‌شوند، سال‌ها است که شناخته شده‌اند. یک روش جدید، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی لایه‌های سطحی است. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در درجه اول برای اصلاح ریزساختار در لایه‌های نزدیک به سطح اجزاء فلزی استفاده می‌شود. به طور خاص، این فرآیند ممکن است ساختار ریزدانه، کامپوزیت سطحی، اصلاح ریزساختاری آلایژهای ریخته‌گری، آلایژسازی با عناصر خاص و بهبود کیفیت اتصالات جوش را ایجاد نماید [2 و 3]. مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخش یا دوران ابزار بر حسب دور در دقیقه و سرعت پیشروی ابزار بر حسب میلی‌متر بر دقیقه است. برای رسیدن به محدوده تغییر شکل پلاستیک مواد، حرارت و دمای کافی مورد نیاز بوده و در صورتی که دمای ماده تحت فرآیند به میزان کافی بالا نرود، عملیات ناقص و منجر به ایجاد عیب می‌گردد. از طرف دیگر اگر گرمای اصطکاکی به وجود آمده در واحد طول بیش از حد افزایش یابد، ماده متخلخل شده و خواص نهایی آن افت می‌کند. یکی از پارامترهای مهم برای رسیدن به فرآوری بی‌عیب در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، انتخاب مناسب سرعت دوران ابزار نسبت به سرعت پیشروی آن است. تحقیقات انجام شده نشان داده که هر آلایژ در محدوده مشخصی از این نسبت می‌تواند به فرآوری با خواص مطلوب منتهی شود. به علاوه سطح مقطع پین و شانه و جنس ابزار و طراحی ابزار و نیروی عمودی اعمالی نیز بر خواص مناطق مختلف فرآوری شده تأثیرات جدی دارند [4 و 5].

خدابخشی و همکاران [6] تولید نانو کامپوزیت سطحی زمینه مس با ذرات تقویت‌کننده SiO_2 به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برای بهبود خواص مکانیکی را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان دهنده این است که فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی به تنهایی و بدون دخالت پودر باعث کاهش اندازه دانه از 32 میکرومتر به 10 میکرومتر شده است. کاربرد پودر باعث کاهش اثر فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی در ریز کردن دانه‌ها شده و اندازه دانه‌ها از 32 به 13 کاهش پیدا کرده است. با افزایش سرعت دورانی در نمونه‌های دارای پودر، اندازه دانه‌ها افزایش و در نتیجه سختی کاهش می‌یابد ولی اثر پودر یا فرآیند در این مورد مشخص نیست و نتایج آزمون کششی نشان دهنده آن است که استحکام کششی فلز پایه و فلز فرآوری شده بدون پودر و نمونه حاوی کامپوزیت سطحی تولید شده به ترتیب 218 و 227 و 216 مگاپاسکال می‌باشد. بیشترین استحکام کششی و کمترین قابلیت انعطاف و ضریب اصطکاک مربوط به نمونه بدون پودر بوده است. افزایش پودر اکسید سیلیسیم باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی نسبت به فلز پایه شده است که ناشی از سختی ذاتی ذرات پودر اکسید سیلیسیم می‌باشد.

در پژوهشی برای انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر روی مس خالص تجاری و آلایژ برنج در زیر آب از ابزاری از جنس کاربید تنگستن استفاده شد. بررسی‌های ریزساختار نمونه‌های مس خالص تجاری، کاهش فوق‌العاده اندازه دانه را نشان داده و به همین ترتیب سختی سنجی مقطع عرضی و عمود بر راستای فرآیند، افزایش سختی نمونه‌ها تا 45٪ بیشتر از فلز پایه مشاهده گردید. همچنین رفتار سایشی نمونه‌ها با روش پین روی دیسک مورد بررسی

قرار گرفته که نتایج حاصل، کاهش ضریب اصطکاک حداقل تا حدود 48٪ نسبت به فلز پایه را نشان می‌دهد. نتایج حاصله از آزمایش‌های سایش و سختی نشان می‌دهد که فرآوری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند مقاومت سایشی و سختی مس خالص تجاری و آلایژ برنج را به نحو چشمگیری افزایش دهد [7].

در پژوهشی دیگر با افزودن نانوپودر سرامیکی ZrO_2 به فلز پایه مسی و استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی نانو کامپوزیت Cu/ZrO_2 ایجاد شده است. همچنین در بخشی دیگر از این پژوهش نمونه‌ای بدون استفاده از پودر ZrO_2 با شرایط مشابه تهیه و خواص آن به منظور مقایسه با دیگر نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های سایش، ریزسختی و بررسی ریزساختار حاکی از آن است که خواص سایشی و سختی بسیار مطلوبی نسبت به فلز پایه به دست آمده و ریزدانه کردن مس که از پیش مد نظر بوده، کاملاً بدست آمده است. در حالت چهارگذره فرآیند با نانوذرات لایه کامپوزیتی فرآوری شده از یکنواختی و همگنی بیشتری برخوردار است و دارای خواص مکانیکی بالاتری نسبت به فلز پایه و نمونه‌های بدون پودر است. بر اساس نتایج، بیشترین میزان سختی بدست آمده در حالت چهارگذره با پودر در مقایسه با سختی فلز پایه افزایش بیش از 3.5 برابری داشته است. کمترین میزان ضریب اصطکاک مربوط به نمونه چهارگذره فرآیند با نانوذرات است که بهبود چشمگیری در خواص سایشی نشان می‌دهد [8].

کاربرد ذرات SiC و h-BN بر روی زمینه مسی در فرآیند FSP نیز باعث افزایش سختی مس خالص از حدود 70 ویکرز به 180 ویکرز شده است. پودر SiC اثر قوی‌تری در سخت کردن داشته که ممکن است بدلیل سختی ذاتی بالاتر آن نسبت به پودر h-BN باشد [9]. در تحقیقی ذرات دی اکسید تیتانیوم به طور یکنواخت بر روی سطح ماتریس آلومینیوم از طریق فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با دو پاس پراکنده شدند تا بتوان اثر تعداد عبور بر توزیع ذرات، ریزساختار، ریزسختی و خواص سایشی را به طور سامانمند مورد بررسی قرار داد. در این خصوص مطالعات ریزساختاری به دلیل تبلور مجدد دینامیکی، ساختار دانه‌ای هم محور ریز را در منطقه اغتشاشی نشان داده و نمونه کامپوزیت سطح گذر اول به دلیل جریان و کرنش ناکافی مواد منجر به تجمع ذرات به سمت ناحیه پیشرو شده است. با تغییر ناحیه پیشرو و پسرو در پاس دوم، نتایج حاکی از آن است که تغییرات شدید در اندازه دانه نسبت به نمونه اولیه مشاهده شد به نحوی که اندازه دانه اولیه از 42.85 میکرومتر به 4.5 میکرومتر رسیده است. کامپوزیت‌های سطحی فرآوری شده توسط پاس دوم سختی و مقاومت در برابر سایش بهتری از خود نشان می‌دهند [10]. مقایسه آلومینیوم با نمونه‌های قرار گرفته در معرض 4 تا 6 پاس فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی و نمونه دارای پودر اکسید تیتانیوم نشان از افزایش استحکام کششی و تسلیم و کاهش قابلیت انعطاف در نمونه‌های دارای پودر است. در نمونه‌های از 4 تا 6 پاس بدون پودر شکسته شدن ذرات اکسید تیتانیوم و واکنش‌های ایجاد ترکیب بین فلزی Al_3Ti و سرامیک Al_2O_3 نشان داده شده است [11].

در فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی ذرات تقویت‌کننده مختلف در زمینه Al 5059 برای تولید کامپوزیت‌های استفاده گردیده است. آزمایش‌های کشش به ترتیب افزایش 11، 20 و 35 درصد افزایش در استحکام تسلیم را نسبت به آلایژ آلومینیوم اولیه برای کامپوزیت‌های شامل ذرات نانویی SiC ، Al_2O_3 و B_4C نشان می‌دهد. بیشترین استحکام تسلیم و سختی و کمترین قابلیت انعطاف مرتبط با کاربرد پودر تقویت‌کننده B_4C بوده است. استفاده از ذرات 4.3 میکرونی Al_2O_3 بجای ذرات 1.1 میکرونی باعث شده است که ریز

می‌شود، همچنین افزایش پاس‌های FSP، با جهت مخالف حرکت ابزار بین پاس‌های متوالی، مساحت منطقه اغتشاشی را افزایش می‌دهد. لایه‌های AMC فرآوری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با آلومینیوم اولیه به طور قابل توجهی از نظر سختی و مقاومت در برابر سایش بهبود یافته و افزایش پاس‌های فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث بهبود این دو گردیده است [17].

در این پژوهش بهبود خواص تریبولوژیکی نانو کامپوزیت آلایژ مس با دی اکسید تیتانیوم TiO_2 با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و به منظور ارزیابی خواص نمونه‌های تولید شده، نمونه‌ها تحت عملیات متالوگرافی و بررسی‌های ریزساختی توسط میکروسکوپ نوری² و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس³ و آزمون‌های خوردگی و سایش قرار داده شدند.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از قطعه مسی به عنوان فلز پایه با درجه خلوص 99.9 درصد و از نانو پودر دی اکسید تیتانیوم برای تشکیل کامپوزیت در محل استفاده شده است. مس خالص انعطاف‌پذیر بوده و قابلیت تغییر شکل، چکش‌خواری، صیقل‌پذیری، تورق و مفتول شدن در آن خیلی زیاد است. مس در مقابل ضربه، فشار و کشش هم مقاومت مناسبی دارد. این فلز با برخی فلزات دیگر، آلایژهای بسیار مهمی را تشکیل می‌دهند که خواص و کاربردهای ویژه‌ای در پژوهش، علم و صنعت دارند. مس خالص صنعتی در صنایع الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته و معمولاً از نوع مس کاتدی یا بدون اکسیژن است. مس بدون اکسیژن قابلیت انعطاف‌پذیری، مقاومت و چکش‌خواری بهتری از مس کاتدی دارد. همه آلایژهای مس دارای مقاومت به خوردگی در برابر آب و بخار بوده و در بیشتر اتمسفرهای صنعتی و دریایی، محلول‌های نمکی، خاک‌ها، کانی‌های غیر اکسیدی، اسیدهای آلی و محلول‌های سوزآور، مقاوم هستند.

در این تحقیق به منظور انجام فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی، ورقه‌ای از جنس مس به ابعاد $5 \times 100 \times 200$ میلی‌متر تهیه شد. با استفاده از آزمایش کوانتومتری ترکیب شیمیایی آن مورد بررسی قرار گرفت. برای اطمینان از تخت بودن سطوح آن و عدم وجود اعوجاج در آن، تحت عملیات پرداخت - کاری با استفاده از ماشین سنگ‌زنی قرار داده شد و سپس مطابق شکل 1 با استفاده از یک تیغ فرز اره‌ای از جنس فولاد تندبر، شیار به ابعاد 2×176 و عمق 3 میلی‌متر بر روی آن نگه داشتن پودر دی اکسید تیتانیوم و اختلاط بهتر و بیشتر با فلز پایه مس ایجاد گردید.

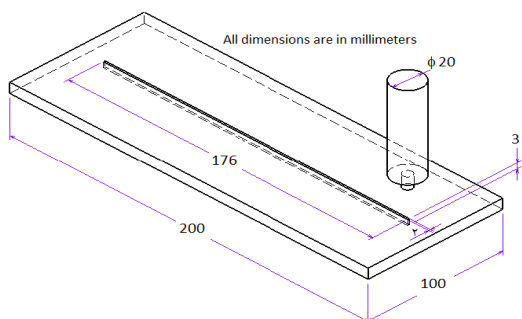


Fig. 1 Schematic diagram of initial part preparation for friction stir processing.

شکل 1 شماتیکی از آماده‌سازی قطعه اولیه برای فرایند اصطکاکی اغتشاشی

شدن ذرات حدود 10 برابر شده و بدلیل نسبت‌های حجمی بالاتر ذرات اکسیدی، 32 درصد افزایش در استحکام تسلیم در مقایسه با فلز پایه ایجاد شود. به نظر می‌رسد ذرات در مقیاس نانو با افزایش نسبت سطح ذرات در کامپوزیت‌های تولید شده نقش مؤثرتری در افزایش سختی داشته باشند [12]. همچنین در پژوهشی ایجاد پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات کاربید سیلیسیوم بر سطح فولاد ASTM A106 با به کارگیری فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز بررسی شده است و بررسی پوشش‌ها بیانگر بهبود چشمگیر رفتار سایشی آن‌ها در اثر افزودن تقویت‌کننده کاربید سیلیسیوم می‌باشد. با افزایش درصد تقویت‌کننده کاربید سیلیسیوم و کاهش حرارت ورودی باعث افزایش سختی و بهبود عمده در مقاومت سایشی می‌گردد. مکانیزم عمده سایش در نمونه بدون پوشش سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی و در نمونه‌های پوشش داده شده مخلوطی از سایش چسبان، اکسایش سطحی و سایش ورقه‌ای تشخیص داده شده است [13].

افزایش درصد حجمی ذرات AlN به زمینه مسی تا 18 درصد نشان داد که سختی از Hv 64 به Hv 109 افزایش پیدا کرده و سرعت سایش از $248 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ در مس خالص به $174 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$ رسیده که 30 درصد کاهش را نشان می‌دهد که ناشی از افزایش سختی، کاهش سطح تماس و کاهش ضریب اصطکاک است. افزایش درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده باعث دانسیته بالای نابجایی و ایجاد دانه‌های بسیار ریز شده است. مس خالص دارای مقدار زیادی دوقلوهای آنیلی بوده و پس از انجام FSP نیز در منطقه SZ همچنان این دوقلوها در بزرگنمایی زیاد مشاهده شدند [14].

افزایش دادن پودر TiO_2 در خط جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی مس باعث کاهش بیشتر اندازه دانه و افزایش بیشتر سختی و سفتی ضربه‌ای (به ترتیب 20 و 18 درصد) نسبت به عدم کاربرد آن در این فرایند است. کاربرد پودر و افزایش پاس هرچند باعث بهبود خواص در SZ می‌شود ولی باعث بهبود خواص در منطقه تحت تأثیر حرارت نشده و تمامی نمونه‌های کششی از این منطقه می‌شکنند. افزایش پاس بدلیل ایجاد حرارت ورودی بیشتر، باعث رشد بیشتر دانه‌ها و کاهش بیشتر استحکام و سختی و سفتی ضربه‌ای در منطقه تحت تأثیر حرارت می‌شود [15].

با افزایش درصد‌های مختلف شیشه مربوط به لوله اشعه کاتدی¹ و 2 درصد BN در نمونه‌های پایه مس در فرایند FSP بدلیل ریز شدن دانه‌ها در SZ سختی تا حدود 65 درصد افزایش می‌یابد ولی نمونه مسی فرایند شده بدون پودر کاهش سختی را نشان می‌دهد. فرایند FSP بطور کلی باعث کاهش استحکام کششی و تسلیم در تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه اولیه می‌شود ولی در نمونه‌های دارای پودر بدلیل اثرات مثبت پودر در افزایش استحکام تسلیم و کشش از طریق ریز کردن دانه‌ها، این اثر مخرب FSP تا حد زیادی برطرف می‌شود. انجام فرایند FSP باعث کاهش کوچکی در سرعت سایش در مس خالص می‌شود ولی افزایش پودر این کاهش سرعت سایش را شدت می‌بخشد. افزایش پودر باعث حرکت ولتاژ شروع خوردگی به سمت اعداد بزرگ‌تر شده و جریان خوردگی نیز کاهش می‌یابد [16]. همچنین در تحقیقی از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برای ساخت کامپوزیت سطحی درجا بر اساس سیستم Al-Cu بر روی بستر Al 1060 استفاده شده است. تجزیه و تحلیل XRD نشان داده که با افزایش تعداد پاس‌های FSP، تنها فاز Al_2Cu در جا تشکیل شده و مقدار این فاز هم با افزایش پاس، زیاد

² Optical Microscope, OM

³ X-Ray Diffraction, XRD

¹ Cathod Ray Tube, CRT

1-2- آزمایش‌های ریزساختاری

بر اثر حرارت ایجاد شده در طی فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی قطعه پایه مسی و همچنین وجود نانوذرات دی اکسید تیتانیوم موجود در شیار، تغییرات متالورژیکی در ریزساختار فلز پایه، رخ می‌دهد. همچنین در این فرآیند امکان تغییر شکل و اندازه دانه‌ها وجود دارد. توزیع ذرات در زمینه می‌تواند به صورت غیر یکنواخت، انباشته، یکنواخت و یا ترکیبی از همه آن‌ها باشد که به شکل متفاوتی خواص را تحت تأثیر قرار خواهند داد. برای انجام آزمایش‌ها تعداد 9 قطعه در معرض آزمایش‌های متالوگرافی (5 نمونه)، سایش (2 نمونه) و خوردگی (2 نمونه) قرار گرفتند. قطعات آماده شده در داخل مواد مانت قرار داده شده و پولیش قطعه با دستگاه پولیشر خودکار Rotopol-3S انجام گردید و سپس نمونه‌ها در معرض یک محیط خورنده مخلوط اتانول با 2 درصد اسید کلریدریک و 3 گرم $FeCl_3$ قرار گرفته و بر اساس استاندارد ASTM E407-07 اچ شده و در نهایت ریزساختار با میکروسکوپ نوری در محدوده بزرگنمایی 50-1500 مشاهده شدند. برای مطالعه ریزساختاری و تغییرات ایجاد شده در نظم دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی (SZ) برشکاری انجام شده و با دستگاه XRD طبق استاندارد ASTM E3 تحت آزمایش قرار گرفت. بررسی دقیق اثرات فرایند بر روی ساختار با آزمایش بر روی 5 نمونه با کدهای 01، 02، 04 و 011 و 22 انجام گردید (شکل 3).



Fig. 3 FSP on parts with codes 01, 02 and 04.

شکل 3 انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی قطعاتی با کد 04، 02، 01

بازرسی چشمی باید از 4 منطقه از هر نمونه انجام شود. در شکل 4 نمونه 01 و سطح مورد مطالعه توسط میکروسکوپ نوری نمایش داده شده است. شکل 5 نیز شماتیکی از سطح جانبی نشان داده شده است چهار ناحیه‌ای که باید مورد بررسی قرار گیرد در این تصویر شماتیک آورده شده است. منطقه اغتشاشی یا منطقه الف مربوط به نمونه شماره 1 در شکل 6 نشان داده شده است. در این ناحیه باید نحوه و میزان توزیع ذرات دیده شود.



Fig. 4 Microstructural investigations by optical microscopy

شکل 4 بررسی‌های ریزساختی سطح جانبی عمود بر خط جوش توسط میکروسکوپ نوری.

دی اکسید تیتانیوم گرید 5566 از دسته تیتان‌های روتایل¹ بوده و یک ماده غیرآلی جامد سفیدرنگ است که در برابر حرارت پایدار، غیر قابل اشتعال و دارای قابلیت انحلال ضعیف است.

جهت انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی از ماشین فرز FP4M شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده گردید. ابزار مورد استفاده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در این تحقیق در شکل 2 مشاهده می‌شود. از مهم‌ترین عوامل در طراحی ابزار، جنس آن می‌باشد زیرا ابزار باید مقاومت کافی در برابر حرارت ناشی از اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را دارا باشد. در این تحقیق از ابزارهایی از جنس فولاد تندبر استفاده شده که دارای سختی 53 راکول سی (HRC) و عدم تمایل به واکنش شیمیایی با فلز پایه مسی می‌باشد. قطر شانه این ابزار 20 میلی‌متر و پین آن دارای قطر 5 میلی‌متر و ارتفاع 3 میلی‌متر است تا قادر باشد سطح و درون شیار ایجاد شده درون قطعه را پوشش دهد. این ابزار جهت استفاده بر روی محور چرخنده دستگاه فرز، در گیره فشنگی بسته می‌شود. نحوه درگیری ابزار با قطعه جهت انجام فرایند در شکل 2 مشاهده می‌شود. ابتدا لازم است، ابزار ساده بدون پین برای پوشاندن سطح روی پودر استفاده گردد تا از پراکنده شدن و پاشش پودر به خارج از شیار ممانعت به عمل آید. ابزار دوار غیرمصرفی با سرعت دوران 2000 دور در دقیقه وارد شیار درون ورق شده و سپس در امتداد درز اتصال با سرعت 100 میلی‌متر در دقیقه پیشروی می‌نماید. زاویه بین ابزار و سطح ورق 3 درجه می‌باشد.

اصطکاک بین پین و شانه ابزار با قطعه منجر به ایجاد حرارت شدید و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک قطعه‌کار می‌گردد. گرمایش موضعی، ماده اطراف پین را نرم کرده و ترکیب حرکت چرخشی و خطی ابزار، منجر به جابجایی ماده از جلوی پین به عقب آن می‌گردد و بدین ترتیب حفره پشت ابزار که در اثر حرکت ابزار به طرف جلو ایجاد می‌شود، را پر می‌نماید. از طرفی شانه ابزار که در بالای ناحیه خمیری واقع شده است، با اعمال فشار بر روی مواد نرم شده امکان ایجاد واکنش میان پودر و فلز را به وجود می‌آورد. شانه ابزار جریان فلز به سطح را محدود کرده و در نتیجه عمل ابزار و تأثیر آن بر قطعه - کار، اتصال حالت جامد ایجاد می‌شود. در واقع ابزار سه وظیفه گرم کردن قطعه‌کار، جابجایی مواد برای ایجاد اتصال و تحت فشار نگه داشتن ماده داغ در زیر پیشانی ابزار را بر عهده دارد.



Fig. 2 The tool used and its interaction with the part in the friction stir processing.

شکل 2 ابزار استفاده شده و نحوه درگیری ابزار با قطعه در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی.

¹ Rutile

3-2- آزمایش خوردگی

هدف از آزمایش خوردگی، بررسی مقاومت به خوردگی مس قرار گرفته در فرایند اصطکاکی-اغتشاشی و مقایسه آن با مس خالص قبل از این عملیات می‌باشد. برای این منظور ابتدا نمونه‌های مورد نیاز از قطعه قرار گرفته در فرایند اصطکاکی-اغتشاشی و مس خالص تجاری استخراج گردید و سپس نمونه‌ها برای انجام آزمایش خوردگی تافل با دستگاه پتانسیوایستات EG & G به صورت یکنواخت آماده‌سازی شد. نمونه‌های آماده شده برای آزمون مقاومت به خوردگی مس خالص و مس فراوری شده در شکل 8 نشان داده شده است.

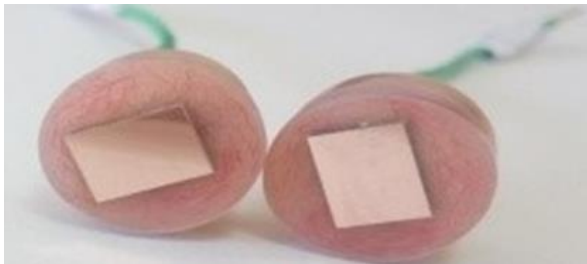


Fig. 8 Corrosion resistance samples of pure and processed copper.

شکل 8 بررسی مقاومت به خوردگی مس خالص و مس فراوری شده.

3- نتایج و بحث

جهت بررسی کیفیت سطح و محل جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بازرسی چشمی از نمونه‌ها انجام شد. یکی از مهم‌ترین عیوب این روش فراوری، اثر پین در محل خروج از قطعه است که به صورت حفره می‌باشد. با توجه به جهت دوران و پیشروی ابزار می‌توان از دو بخش پیشرو و پسرو در فراوری نام برد که معمولاً مقداری پلیسه در سمت پیشرو تشکیل می‌شود. مقدار پلیسه بستگی به عمق نفوذ شانه‌های ابزار در قطعه دارد. زیاد بودن عمق نفوذ شانه‌های ابزار باعث افزایش میزان پلیسه در کناره‌های منطقه فراوری می‌گردد و کاهش عمق نفوذ شانه‌های ابزار نیز باعث کاهش میزان اصطکاک شده و این مسئله حرارت تولیدی را کاهش می‌دهد. با کاهش میزان حرارت ورودی، سیلان کافی انجام نمی‌پذیرد و احتمال وجود عیوب افزایش می‌یابد.

3-1- ساختار میکروسکوپی

آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی با استاندارد (ASTM E3-11)، میکرواج فلزات بر اساس استاندارد ((ASTM E407-07 و تصاویر میکروسکوپ نوری بر پایه استاندارد ((ASTM E883 - 11 انجام گرفت و نتایج نمونه‌ها مشابه بوده و نتیجه بررسی ساختار میکروسکوپی نمونه 022 در شکل 9 نشان داده شده است. تعیین اندازه دانه در تمامی نمونه‌ها با استاندارد -ASTM E 112 2013 انجام گرفت.

در تمامی نمونه‌ها اندازه دانه در منطقه تحت تأثیر حرارت نزدیک خط فرایند برابر 14 و ریزتر و در نمونه‌های فلز پایه برابر 10 بوده است. تغییرات جزئی در اندازه دانه‌ها در منطقه تحت تأثیر حرارت در مجاورت فلز پایه مشاهده شده و عدد اندازه دانه بین 8 تا 9 متغیر است.

ساختار میکروسکوپی نمونه 022 برای فلز پایه شامل ترکیبی از دانه‌های درشت و ریز است و مرز دانه‌ها بدلیل شبکه FCC مس صاف و مستقیم بوده به گونه‌ای که میانگین اندازه دانه‌ها در این ساختار حدود 60 تا 100 میکرومتر می‌باشد. در بعضی نواحی دانه‌ها بصورت کشیده به داخل دانه‌ها

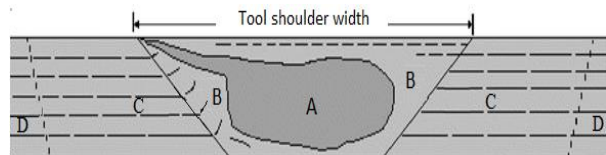


Fig. 5 Schematic of the four zones of a friction-stirred processes sample, including: A - Stirring zone, B - Thermomechanical zone, C - Heat affected zone and D - Base metal

شکل 5 شماتیکی از چهار منطقه یک نمونه قرار گرفته در معرض فرایند اصطکاکی-اغتشاشی شامل: الف - منطقه اغتشاش، ب - منطقه ترمومکانیکال، ج - منطقه تحت تأثیر حرارت و د - فلز پایه [18]

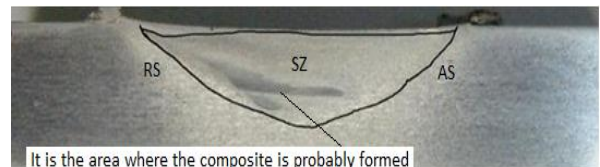


Fig. 6 Composited area.

شکل 6 ناحیه کامپوزیت سازی شده.

2-2- آزمایش‌های سایش

پدیده سایش یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب قطعات صنعتی است. برای کاهش اثرات این پدیده، انتخاب جنس قطعات درگیر با یکدیگر و نیز انتخاب پوشش سطحی مناسب بسیار حائز اهمیت است. آزمایش پین روی دیسک¹ روش متداولی برای ارزیابی رفتار سایشی و تریبولوژیکی انواع مواد فلزی، سرامیکی، کامپوزیت‌ها و پوشش‌های فلزی مواد است. ابتدا نمونه‌های مورد آزمایش را از قطعاتی که تحت عملیات فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته شده، از وسط فراوری با ماشین وایرکات شرکت توسعه الکترونیک پیشران برش داده و استخراج گردید سپس آزمایش پین بر روی دیسک و با استاندارد ASTM G99 انجام گردید (شکل 7).

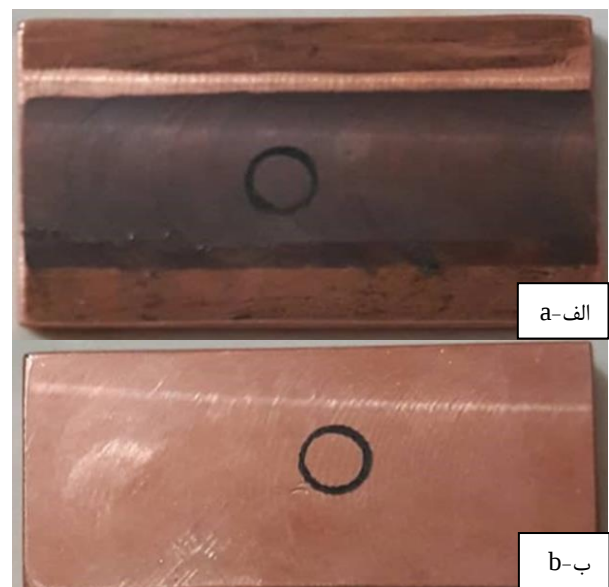


Fig. 7 Wear Test samples marked with numbers 01 and 08 Copper Specimen with and without FSP.

شکل 7 نمونه‌های آزمایش سایش مشخص شده با شماره‌های 01 مربوط به مس فراوری شده با پودر اکسید تیتانیوم (الف) و 08 مس خالص (ب)

¹ Pin on Disk

بدیهی است که با اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، ساختار دانه بندی در ناحیه اغتشاش یافته تغییر کرده و به دانه بندی ریزتر تبدیل شده است و این موضوع به طور واضح برای تمامی نمونه ها صدق می کند در ناحیه اطراف ناحیه اغتشاش که ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) نامیده می شود، دانه بندی ها نیز همچنان ریزتر شده است زیرا این ناحیه از نمونه ها، همزمان تحت تأثیر فرآیند حرارتی و مکانیکی نیز قرار می گیرند و بدیهی است که عملیات مکانیکی در این ناحیه، توسط شانه ابزار صورت گرفته شده است، این امر باعث می شود که فلز به حالت خمیری شکل تحت تأثیر قرار گیرد. در حالی که ناحیه متأثر از حرارت بین ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی و فلز پایه واقع شده است. این ناحیه تنها حرارت ناشی از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را متحمل می گردد و با خنک شدن در فضای آزاد، به تدریج دانه بندی در آن بزرگ تر از فلز پایه شده است. ریز شدن دانه ها در اثر فرایند انجام شده می تواند باعث تغییرات شدید در سختی و استحکام کششی و تسلیم و حتی افزایش قابل توجه قابلیت انعطاف گردد.

2-3- آزمون تفرق اشعه ایکس

این آزمون بر اساس استاندارد مرجع BS EN13925-1: 2008 تحت ولتاژ 40 کیلوولت و با آند مسی و تحت جریان 30 میلی آمپر انجام گردیده است. با استفاده از روش XRD یا پراش اشعه ایکس (X-Ray-Diffraction) نمونه های فرآیند که تحت عملیات اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته بود، به منظور بررسی ترکیبات موجود در سطح نمونه با دستگاه D6792-Philips و با استاندارد ASTM E3 توسط موسسه رازی مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه در شکل 10 نشان داده شده است.

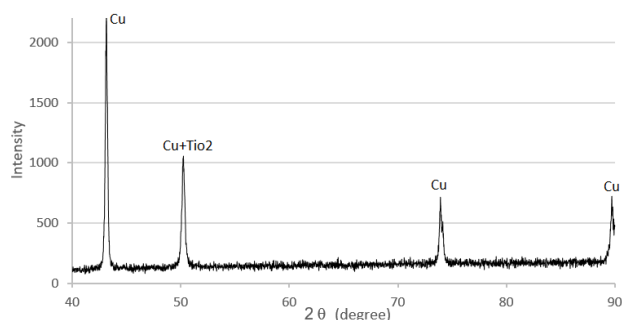


Fig. 10 Test diagram with XRD

شکل 10 نمودار آزمون تفرق اشعه ایکس فلز مس فراوری شده

همان گونه که مشاهده می شود قله های متعددی در زوایای متفاوت و با شدت های متفاوت وجود دارد هر کدام از این قله ها مربوط به صفحه ای خاص از نمونه بوده و زاویه هر قله وابسته به فاصله بین صفحه و شدت قله مربوط به آرایش اتم ها در صفحات است در نمونه ها فلز پایه تعداد پیک های فلزی زیاد و منظم مشاهده می شود. قله های مربوط به مس و اکسید تیتانیوم ر شکل مشخص شده اند. با توجه به قله های موجود، وجود اکسید تیتانیوم در لایه سطحی به خوبی نشان داده شده است.

3-3- آزمون سایش

آزمون پین بر روی دیسک در فاصله 220 متر با نیروی عمودی 0.5 کیلوگرم و سرعت 0.02 متر بر ثانیه بر روی مس خالص و نمونه فراوری شده با پودر اکسید تیتانیوم انجام شد همان طور که شکل های 11 و 12 نشان می دهند، در نمودارهای سایش، متوسط ضریب اصطکاک در نمونه مس پایه حدود 0.8 و در ناحیه مس اصطکاکی اغتشاشی، متوسط ضریب اصطکاک حدود یک

نفوذ کرده هستند که در اثر فعال شدن تغییر شکل توسط دو قلوها ایجاد شده می باشد. این پدیده در فلزات FCC که انرژی نقص در چیده شدن کوچکی دارند دیده می شود. در لبه های منطقه تحت تأثیر حرارت، دانه ها درشت تر می شوند ولی با حرکت به سمت مرکز جوش، در اثر حرارت وارد شده، دانه ها بشدت ریز می شوند و در نهایت در منطقه اغتشاشی که اثر ترکیبی حرارت و تغییر شکل وجود دارد دانه ها بسیار ریز بوده و باندهای تغییر شکل و مسیرهای حرکتی آن به راحتی قابل مشاهده است.

بنابراین ساختار اولیه قطعه پایه که مسی قبل از اجرای فرآیند دارای دانه بندی درشت بوده در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تبدیل به ساختار با دانه بسیار ریز شده است.

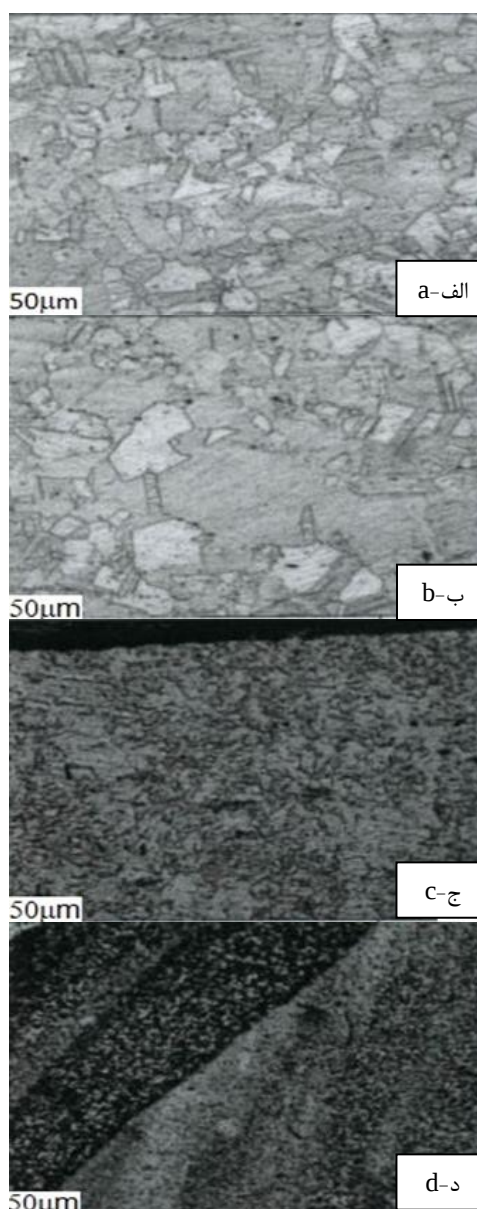
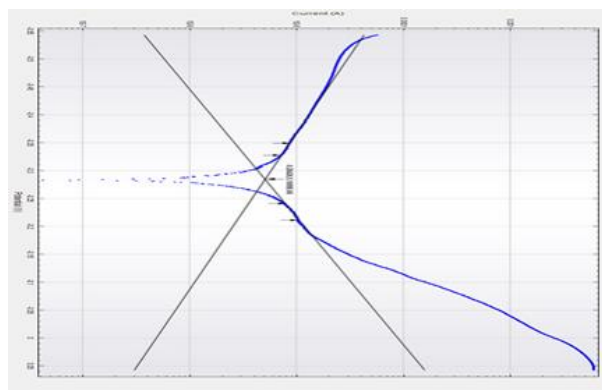


Fig. 9 Microscopic structure of copper solid solution grain in the base metal (a), in the heat-affected zone near the line process (b) in the heat-affected zone near the line process (c) in the process area (d), in sample 022.

شکل 9 ساختار میکروسکوپی دانه محلول جامد مس در فلز پایه (الف)، در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به فلز پایه (ب)، در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به خط فرآیند (ج) و در ناحیه فرآیند (د) در نمونه 22.

سایشی کمتر به حضور ذرات اکسید تیتانیوم و اثرات مخرب آن‌ها بر مقاومت سایشی در زمینه بسیار نرم مسی نسبت داده می‌شود. ریز شدن شدید دانه‌ها توسط پودر اکسید تیتانیوم نیز نتوانسته است باعث افزایش مقاومت سایشی مس خالص شود.

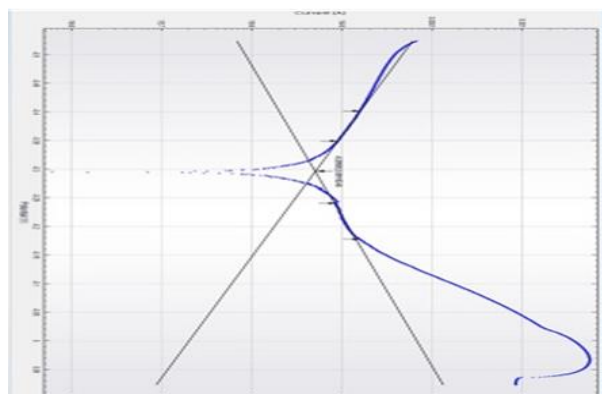
4- با بررسی نمودار خوردگی نمونه مس پایه و نمونه مس اصطکاکی- اغتشاشی با توجه به ولتاژهای محاسبه شده و واقعی و با توجه به جریان خوردگی مشخص گردید که تفاوت معنی داری بین میزان خوردگی مشاهده نمی‌شود بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انجام فرایند FSP بر روی افزایش مقاومت خوردگی مس بی تأثیر بوده است.



Corrosion rate, tafel slope
 ... ba (V/dec) = 279.310 mV/dec
 ... bc (V/dec) = 228.630 mV/dec
 ... Ecorr, Calc (V) = -284.260 mV
 ... Ecorr, Obs (V) = -283.970 mV
 ... jcorr (A/cm²) = 11.0430 μ A/cm²
 ... icorr (A) = 5.10090 μ A
 ... Corrosion rate (mm/year) = 0.11257
 ... Polarization resistance (Ω) = 10.7040 k
 ... E Begin (V) = -348.820 mV
 ... E End (V) = -211.030 mV

Fig.13 Corrosion chart (tafel) of base copper sample.

شکل 13 نمودار خوردگی (tafel) نمونه مس پایه.

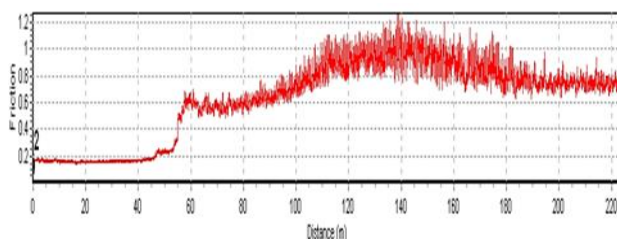


Corrosion rate, tafel slope
 ... ba (V/dec) = 211.290 mV/dec
 ... bc (V/dec) = 262.540 mV/dec
 ... Ecorr, Calc (V) = -295.850 mV
 ... Ecorr, Obs (V) = -295.530 mV
 ... jcorr (A/cm²) = 11.3410 μ A/cm²
 ... icorr (A) = 5.09110 μ A
 ... Corrosion rate (mm/year) = 0.11561
 ... Polarization resistance (Ω) = 9.98680 k
 ... E Begin (V) = -401.310 mV
 ... E End (V) = -177.460 mV

Fig. 14 Tafel Corrosion diagram of copper friction-stirring sample.

شکل 14 نمودار خوردگی نمونه مس بعد از فرایند اصطکاکی - اغتشاشی.

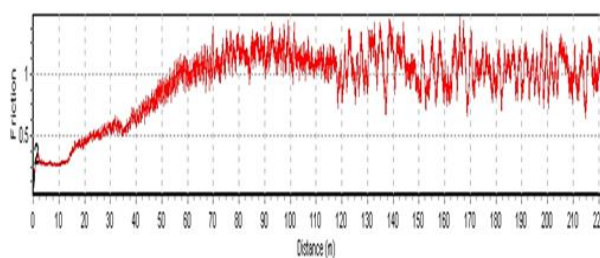
مشاهده می‌گردد که نشانه میزان سایش بیشتر و مقاومت سایشی کمتر نمونه‌های قرار گرفته در معرض فرایند اصطکاکی-اغتشاشی نسبت به مس خالص می‌باشد.



Wear Test: Vertical force: 0.50Mgf Velocity: 0.02m/s Gain: 0.94

Fig. 11 wear diagram of base copper zone.

شکل 11 نمودار سایش ناحیه مس پایه.



Wear Test: Vertical force: 0.50Mgf Velocity: 0.02m/s Gain: 0.94

Fig. 12 The wear diagram of the friction stirred zone Specimen

شکل 12 نمودار سایش ناحیه اصطکاکی اغتشاشی مس بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی

4-3- تست خوردگی تافل

نتایج تست خوردگی تافل بر روی نمونه مس خالص و مس پس از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در شکل 13 و 14 نشان داده شده است. محور عمودی پتانسیل یا ولتاژ و محور افقی لگاریتم جریان را نشان می‌دهد. با توجه به شاخه‌های کاتدی و آندی نمودارها مشخص گردید، مس خالص دارای ولتاژ خوردگی 283.97 میلی ولت و دانسیته جریان برابر با 11.043 آمپر بر سانتیمتر مربع می‌باشد در حالیکه ولتاژ و جریان خوردگی در نمونه مس بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی با پودر دی اکسید تیتانیوم به ترتیب برابر با 295.53 میلی ولت و 11.34 میکروآمپر بر سانتیمتر مربع می‌باشد. هرچند نمونه پروسس شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی دارای مقاومت خوردگی ضعیفتری نسبت به فلز پایه شده است ولی تفاوت در این مورد بسیار ناچیز است بنابراین می‌توان فرض کرد که انجام فرایند اصطکاکی-اغتشاشی با پودر هیچ تاثیری بر رفتار خوردگی مس نداشته است.

4- نتیجه گیری

- 1- در تمام نمونه‌ها ساختار میکروسکوپی در فلز پایه به صورت دانه‌های مس خالص حاوی دانه‌های کشیده و مرز دانه‌های مستقیم همراه با پدیده دوقلویی وجود دارد.
- 2- در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به فلز پایه دانه‌ها درشت تر شده اند ولی در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به مرز فرایند و در منطقه تحت تأثیر فرایند دانه‌ها در ساختار بسیار ریز شده اند.
- 3- در نمودار سایش، نمونه مس پایه دارای ضریب اصطکاک کمتر و مقاومت سایشی بهتری نسبت به نمونه اصطکاکی-اغتشاشی بوده است. این مقاومت

5- مراجع

- [17] Huang, G., Hou, W., Li, J., & Shen, Y., "Development of surface composite based on Al-Cu system by friction stir processing: Evaluation of microstructure, formation mechanism and wear behavior", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 344, pp. 30-42. 2018.
- [1] Kumar, R., Kumar, H., Kumar, S., & Chohan, J. S., "Effects of tool pin profile on the formation of friction stir processing zone in AA1100 aluminium alloy", *Materials Today, Proceedings*, Vol. 48, pp. 1594-1603, 2022.
- [2] Węglowski, M. S., "Friction stir processing-State of the art", *Archives of civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18(1), pp. 114-129, 2018.
- [3] Wu, B., Ibrahim, M. Z., Raja, S., Yusof, F., Muhamad, M. R. B., Huang, R., & Kamangar, S., "The influence of reinforcement particles friction stir processing on microstructure, mechanical properties, tribological and corrosion behaviors", A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022.
- [4] El-Sayed, M. M., Shash, A. Y., Abd-Rabou, M., & ElSherbiny, M. G., "Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique", A review, *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 3, pp. 100059, 2021.
- [5] Merah, N., Abdul Azeem, M., Abubaker, H. M., Al-Badour, F., Albinmousa, J., & Sorour, A. A., "Friction Stir processing influence on microstructure, mechanical, and corrosion behavior of steels", A review. *Materials*, Vol. 14, No.17, pp. 5023, 2021.
- [6] Khodabakhshi, E., Kazemi, S., and Ahmadi F. S., "Investigation of mechanical properties and microstructure of copper matrix nanocomposite reinforced with silicon oxide particles produced by friction stir processing method", *Journal of Science and Technology Composite*, Vol. 4, No. 4, pp. 426-433, 2018.
- [7] Moaref, A., and Amin R., "Evaluation of the effect of underwater friction stir welding on microstructure and tribological properties of copper and its alloy." *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 42-51, 2019.
- [8] Rabieizadeh, A., and Saman G., "The influence of multi-pass friction stir processing on microstructure and sliding wear behavior of Cu/ZrO₂ surface composite." *International Journal of Materials Research*, Vol. 111, No. 10, pp. 814-825. 2020.
- [9] Thallapalli, N., Kishore K. K., and Renuka B., "Investigation on the micro-structure and mechanical properties of copper based surface composites fabricated by friction stir processing." *Materials Today, Proceedings* Vol. 27, pp. 1774-1779, 2020.
- [10] Jain, V. K. S., Varghese, J., & Muthukumaran, S., "Effect of first and second passes on microstructure and wear properties of titanium dioxide-reinforced aluminum surface composite via friction stir processing", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 44, No.2, pp. 949-957. 2019.
- [11] Madhu, H. C., Ajay K. P., Perugu, C. S., & Kailas, S. V., "Microstructure and mechanical properties of friction stir process derived Al-TiO₂ nanocomposite", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 27, No.3, pp. 1318-1326. 2018.
- [12] Sahraeinejad, S., Izadi, H., Haghshenas, M., & Gerlich, A. P., "Fabrication of metal matrix composites by friction stir processing with different particles and processing parameters", *Materials Science and Engineering*, Vol. A, No. 626, pp. 505-513., 2015.
- [13] Mazaheri, H. fazel N. M., and Alaei. A., "Study of Microstructure and Tribological Behavior of the Composite Layer Produced of Silicon Carbide Particles on a Steel ASTM A106 GTAW Welding Method", *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 2, No. 1, pp. 65-72, 2015.
- [14] Saravanakumar, S., Gopalakrishnan, S., Dinaharan, I., & Kalaiselvan, K., "Assessment of microstructure and wear behavior of aluminum nitrate reinforced surface composite layers synthesized using friction stir processing on copper substrate", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 322, pp. 51-58, 2017.
- [15] Shahedi, B., Damircheli, M., & Shirazi, A., "Experimental investigation of the effects of welding parameters and TiO₂ nanoparticles addition on FSWed copper sheets", *Materials Research Express*, Vol. 6, No.2, pp. 026525, 2018.
- [16] Gopal P. M., "Influence of Silica Rich CRT and BN on Mechanical, Wear and Corrosion Characteristics of Copper-Surface Composite Processed Through Friction Stir Processing", *Silicon*, Vol. 13, No. 10, pp. 3431-3440. 2021.



امکان سنجی استفاده از جداکننده‌های باتری سرب-اسید به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌های پلی اتیلنی

علی قاسم خانی¹، محمدرضا شجاعی²، غلامرضا پیرچراغی^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشجوی دکتری، پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-1639، pircheraghi@sharif.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/09/07

پذیرش: 1402/01/28

کلیدواژگان

بازیافت،

باتری سرب-اسید،

کامپوزیت،

خواص مکانیکی،

پلی اتیلن

چکیده

باتری‌های سرب-اسید بخش قابل توجهی از بازار جهانی باتری‌ها هستند که با توجه به عمر کوتاه آن‌ها، با چالش‌های زیست‌محیطی جدی مرتبط با ضایعات باتری‌های سرب-اسید مواجه هستیم. یکی از اجزای این باتری‌ها جداکننده‌های آن‌ها است، که علاوه بر پلی اتیلن، سیلیکا و مقادیری از ترکیبات سرب نیز دارند. در این پژوهش از جداکننده باتری سرب اسید و پلی اتیلن به عنوان زمینه برای تهیه کامپوزیتی استفاده شد که به دلیل حضور سیلیکا می‌تواند خواص مکانیکی پلی اتیلن را بهبود بخشد. نمونه‌هایی با زمینه پلی اتیلن پرچگالی و خطی کم‌چگالی به همراه 5 تا 15 درصد وزنی جداکننده باتری سرب-اسید تهیه شده و خواص مکانیکی و حرارتی آن‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی، نوع پلی اتیلن در جداکننده باتری پلی اتیلن پرچگالی تعیین شد. با افزودن جداکننده باتری به زمینه پلی اتیلن پرچگالی مدول کشسانی حدود 22٪ و مدول خمشی حدود 55٪ افزایش یافت. این بهبود برای مدول کشسانی پلی اتیلن خطی کم‌چگالی تقریباً 35٪ بود. برای نمونه با زمینه پلی اتیلن پرچگالی حاوی 15 درصد جداکننده استحکام تسلیم از 1.25 مگاپاسکال به 28 مگاپاسکال و برای نمونه با زمینه پلی اتیلن کم‌چگالی حاوی 15 درصد جداکننده استحکام تسلیم از 9.11 مگاپاسکال به 13.7 مگاپاسکال افزایش یافته است. سختی و مدول برای 15 درصد جداکننده در بیشینه مقدار را دارند. بنابراین 15 درصد جداکننده مقداری بهینه برای بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها است.

Feasibility of using lead-acid battery separators as reinforcement in polyethylene composites

Ali Ghasemkhani¹, Mohammadreza Shojaei², Gholamreza Pircheraghi^{1*}

1- Material Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Institute for Nanoscience Nanotechnology, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-1639, Tehran, Iran, pircheraghi@sharif.ir

Keywords

Recycling
Lead-acid battery
Composite
Mechanical properties
Polyethylene

Abstract

Lead-acid batteries are a significant part of the global battery market; however, due to limited life of these batteries, we are faced with major environmental challenges associated with lead-acid battery waste. One of their main components is the separator. In addition to polyethylene and silica, the separator of these batteries also contains lead compounds. In this research, lead-acid battery separator and polyethylene were used as a matrix for preparing a composite that could improve polyethylene's mechanical properties due to the presence of silica. Samples of HDPE and LLDPE with 5% to 15% lead-acid battery separator were prepared and their mechanical and thermal properties were evaluated and compared. By analyzing the DSC results, the type of polyethylene in the battery separator, HDPE, was determined. By adding the battery separator to HDPE matrix, elastic modulus increased by about 22% and bending modulus by about 55%. For LLDPE elastic modulus increased by approximately 35%. The yield strength of the sample, with HDPE matrix containing 15% separator has increased from 25.1 MPa to 28 MPa, and for the sample, with LLDPE matrix containing 15% separator, yield strength increased from 11.9 MPa to 13.7 MPa. Hardness and modulus for 15% of the separator are at maximum value. Consequently, 15 wt.% separator is an optimal value to improve samples' mechanical properties.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Ghasemkhani, A., Shojaei, M., Pircheraghi, G., "Feasibility of using lead-acid battery separators as reinforcement in polyethylene composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2075-2082, 2023.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1972662.1810

1- مقدمه

باتری‌ها را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم نمود. دسته اول شامل باتری‌های اولیه که غیرقابل شارژ هستند و دسته دوم که دربردارنده باتری‌های ثانویه بوده و قابل شارژ هستند. روند افزایشی توسعه و استفاده از لوازم الکتریکی نسل جدید مانند انواع دوربین‌های دیجیتال، تلفن‌های همراه و لپ‌تاپ‌ها باعث افزایش تقاضا برای انواع باتری‌ها و به‌طور خاص نوع قابل شارژ آن در سال‌های اخیر شده است. این موضوع تولید حجم عظیمی از انواع باتری‌ها را به دنبال دارد. تا سال 2000 میلادی آمریکا و اروپا به ترتیب 3 و 5 میلیارد باتری تولید کردند. در بین انواع مختلف باتری‌ها، باتری‌های سرب-اسید¹ به دلیل خواص برجسته خود برای ساخت در مقیاس بزرگ در وسایل نقلیه مناسب هستند. این ویژگی‌ها شامل چگالی انرژی² بالا، در دسترس بودن و هزینه کم است که باعث افزایش تولید انبوه این دسته از باتری‌ها در سال‌های اخیر شده است. تولید انبوه باتری‌های سرب-اسید باعث شده است که تنها تا سال 2013 حدوداً 9 میلیون تن سرب از منابع طبیعی استخراج شود [1].

برخی از مواد مورد استفاده در باتری‌های سرب-اسید تجاری، مانند سرب، بسیار سمی و برای محیط‌زیست مضر هستند. دفع نادرست این باتری‌ها از یک طرف با توجه به ترکیبات موجود در آن‌ها مخاطرات زیست‌محیطی شدیدی را به دنبال داشته و از طرف دیگر موجب هدر رفتن یک منبع عالی از مواد اولیه می‌شود، چرا که این دورریزها حاوی درصد بالایی از مواد باارزش مانند سیلیکا، سرب، نیکل، لیتیوم و کادمیم هستند. بر این اساس و با توجه محدودیت‌های زیست‌محیطی اعمال شده در بسیاری از کشورها در برابر دفع نامناسب انواع باتری‌ها، روش‌های متعددی جهت بازیافت این مواد توسعه یافته است [2].

1-1- جداکننده‌های باتری سرب-اسید

اساساً باتری‌ها از چهار بخش اصلی تشکیل شده‌اند که شامل الکترودهای مثبت و منفی، الکترولیت و جداکننده هستند [3]. وظیفه جداکننده جلوگیری از تماس فیزیکی کاتد و آند با یکدیگر برای جلوگیری از اتصال کوتاه است. علاوه بر این، نیاز به غشاهایی است که مانعی برای عبور یون‌ها در حین فرآیند ایجاد نشود. برای فراهم کردن این خواص متناقض، جداکننده باید از نظر مکانیکی پایدار و درعین حال متخلخل باشد [4].

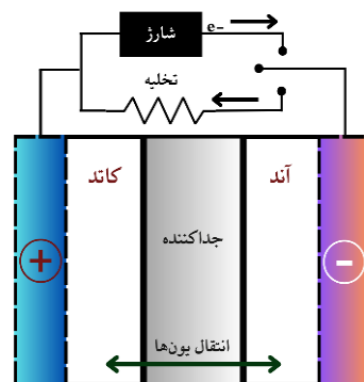


Fig. 1 The structure of a battery, including: cathode, anode and separator

شکل 1 ساختار یک باتری شامل: کاتد، آند و جداکننده

طبق پژوهش کولپین [5]، جداکننده‌ها باید دارای خواص تر شوندگی³ خوب، کمترین زاویه تماس با الکترولیت و تخلخل زیاد باشند. همچنین، ساختار میکرو متخلخل⁴ برای جذب اسید و انتقال گازهای تولیدشده و خواص مکانیکی مناسب در جداکننده باتری‌های سرب-اسید نیاز است. بهترین ماده‌ای که این الزامات را برآورده می‌کند، ماده‌ای بر پایه پلیمر، مانند پلی‌اتیلن است. امروزه بیش از 90 درصد جداکننده‌های باتری‌ها از پلی‌اتیلن ساخته می‌شوند [6]. علاوه بر پلی‌اتیلن، سیلیکای رسوبی از دیگر اجزای اصلی جداکننده باتری سرب-اسید است که معمولاً بین 50 الی 60 درصد وزنی جداکننده را تشکیل می‌دهد و وظیفه استحکام مکانیکی، پایداری ابعادی و هدایت یونی جداکننده را بر عهده دارد [7]. سیلیکا از طرفی باعث افزایش بلورینگی پلی‌اتیلن می‌شود که نتیجه آن افزایش مقاومت به خوردگی جداکننده در برابر الکترولیت اسیدی است. همچنین، تر شوندگی و آب‌دوستی⁵، با افزودن سیلیکا و با تولید یک شبکه میکرومتخلخل افزایش می‌یابد، در نتیجه تبادل یونی در باتری بهبود می‌یابد [8].

2-1- اهمیت مدیریت پسماند

مدیریت پسماند جامد⁶ یک مشکل مهم است که به‌عنوان محصول جانبی تداوم رشد و توسعه اقتصادی به تدریج این مشکل بزرگ‌تر و مهم‌تر می‌شود. مواد پلیمری (پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها) سهم فزاینده‌ای از زباله‌های شهری و صنعتی را تشکیل می‌دهند که به محل دفن زباله می‌روند. بازیافت پلیمر راهی برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تجمع زباله‌های پلیمری ناشی از کاربردهای روزانه مواد پلیمری مانند بسته‌بندی و ساخت وساز است. بازیافت زباله‌های پلیمری به حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند [9].

بازیافت پلیمرها، برخلاف فلزات و سرامیک‌ها، امروزه بدون حداقل کاهش خواص، تا حد زیادی غیرممکن است. از سوی دیگر، این بدان معنا نیست که هیچ چیز نمی‌تواند کیفیت محصولات ساخته‌شده از پلیمرهای بازیافتی را تا سطح مطلوب بهبود بخشد. در آینده، حجم زیاد پلیمرهای استفاده‌شده می‌تواند به منبع مهمی از مواد خام برای تولید پلاستیک، مونومر برای ساخت سایر پلیمرها و همچنین سوخت و انرژی تبدیل شود [10].

اجتناب از دفن زباله برای حفظ محیط‌زیست بسیار مهم است و همچنین باید بازیابی انرژی به حداقل برسد تا تمرکز بر بازیافت مکانیکی از یک سو یا بازیافت شیمیایی از سوی دیگر باشد. بازیافت مکانیکی فرایند بازیابی ضایعات پلاستیک جامد برای تولید مکرر پلیمر با ابزار مکانیکی مانند فناوری اکستروژن (غیرواکنشی) است. در دهه 1970، بازیافت مکانیکی، که به‌عنوان بازیافت ثانویه نیز شناخته می‌شود، رونق یافته و در ادامه تجاری شد. بنابراین یکی از رایج‌ترین روش‌های بازیافت ضایعات پلاستیکی جامد و نسبتاً شناخته‌شده است. با این وجود، بازیافت مکانیکی فقط برای ضایعاتی کاملاً تعریف‌شده و قابل‌استفاده است که به‌طور ایده‌آل از یک جزء پلیمری (خطی یا با اتصال عرضی آزاد) مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن و پلی‌استایرن تشکیل شده‌اند. علاوه بر این، میزان آلودگی ضایعات پلاستیکی جامد تأثیر قابل توجهی بر عملی بودن بازیافت مکانیکی برای دستیابی به کیفیت مطلوب محصول دارد. عملیات پرهزینه واحد مانند جداسازی، شست‌وشو و آماده‌سازی همگی برای تولید محصولات نهایی باکیفیت بالا، شفاف، تمیز و همگن ضروری هستند، و می‌تواند علت این را که چرا در کنار بازیافت مکانیکی، اغلب سوزاندن برای بازیابی انرژی هنوز در نظر گرفته می‌شود، توضیح دهد [11].

⁴ Microporous

⁵ Hydrophilicity

⁶ Management of solid waste

¹ Lead-acid battery

² Energy density

³ Wettability

از بین بروند و باعث تمرکز بیشتر تنش شوند، به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و در نتیجه، عیوب کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌ها با افزایش مقدار نانوسیلیکا کاهش می‌یابد [17].

استحکام کششی کامپوزیت اندکی با مقدار کم سیلیکا افزایش می‌یابد و در 3 درصد وزنی سیلیکا به حداکثر می‌رسد و سپس با افزایش بیشتر مقدار سیلیکا کاهش می‌یابد. ذرات سیلیکا و زنجیره‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی از طریق پل اتصال³ فاز بین سطحی به هم متصل می‌شوند و یک شبکه اتصال عرضی⁴ سه‌بعدی را تشکیل می‌دهند که در آن ذرات سیلیکا به عنوان نقاط اتصال همراه با بلورهای پلی‌اتیلن عمل می‌کنند. هنگامی که کامپوزیت‌ها تحت تنش بیرونی هستند، نقاط اتصال می‌توانند تنش را به طور یکنواخت توزیع کرده و از گسیختگی مواد جلوگیری کنند. بنابراین پراکندگی بهتر تنش دلیل اصلی افزایش استحکام کششی کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی و نانوسیلیکا با مقدار کم سیلیکا است. اگر مقدار نانوسیلیکا زیر 3 درصد وزنی باشد، ازدیاد طول شکست کامپوزیت تقریباً برابر با پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی است و با افزایش سیلیکا به شدت کاهش می‌یابد. این را می‌توان با سازوکار ذکر شده قبلی نیز توضیح داد. واضح است که مدول کشسانی به طور چشمگیری با افزایش مقدار سیلیکا افزایش می‌یابد. این اتفاق ممکن است با مشارکت مدول بالای سیلیکا و همچنین اثر اتصال عرضی سیلیکا در زمینه تفسیر شود [17]. بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی با اضافه شدن نانوسیلیکا کمی تغییر می‌کند (2.25 درصد افزایش با 10 درصد وزنی نانوسیلیکا)، به این معنی که مقدار کمی از نانوسیلیکا تأثیر کمی بر ویژگی بلوری پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی دارد. اسکات و همکاران [18]، گزارش کرده‌اند که نانوسیلیکا با اصلاح سطحی تقریباً هیچ اثر هسته‌زایی ناهمگنی روی پلی‌اتیلن ندارد. در نتیجه، بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی با افزایش مقدار نانوسیلیکا تقریباً بدون تغییر باقی ماند.

از آنجا که بلورینگی و مورفولوژی بلوری پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی و نوری کامپوزیت‌ها دارد، نتایج به دست آمده قبل، تأیید می‌کند که بهبود مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌ها عمدتاً از عملکرد پل اتصال نانوسیلیکا ناشی می‌شود. در عین حال، عوامل اصلی مؤثر بر خواص نوری کامپوزیت‌ها، مقدار و قابلیت پخش نانوسیلیکا در زمینه است [17].

تنش تسلیم کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن پرچگالی⁵ به همراه سیلیکا در غیاب یک سازگارکننده با افزایش مقدار سیلیکا تغییر نمی‌کند. استفاده از سازگارکننده پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید⁶ برای دستیابی به مدول بالاتر ضروری است. در حضور سازگارکننده پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید، تنش تسلیم تقریباً به صورت خطی با مقدار سیلیکا افزایش می‌یابد، اما این افزایش خیلی قابل توجه نیست [19]. تمام نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی آزمایش‌شده افزایش مدول یانگ با افزایش افزودنی معدنی را نشان می‌دهند. استفاده از کامپوزیت حاوی 2 درصد وزنی سیلیکا 1.13 برابر مدول بالاتر نسبت به مدول نمونه بدون سازگارکننده و 1.18 برابر مدول بالاتر از پلی‌اتیلن خالص نشان می‌دهد. افزایش مدول کشسانی کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن و سیلیکا به همراه سازگارکننده می‌تواند با بهبود اتصال سطحی بین زمینه پلی‌اتیلن و نانوذرات مرتبط باشد و درجه پراکندگی ذرات را افزایش دهد. افزودن سیلیکا بر ازدیاد طول تأثیر منفی دارد. کاهش تدریجی ازدیاد طول در هنگام شکست با افزایش سیلیکا مشاهده می‌شود. علاوه بر این، افت این پارامتر برای

پژوهش‌های اندکی در زمینه بازیافت و بازیابی جداکننده‌های باتری سرب-اسید انجام شده است. تمرکز همه پژوهش‌ها بر بازیافت سیلیکا از جداکننده‌های پسماند بوده است. برای مثال در پژوهش انجام شده توسط پیرچراغی و همکاران [2] از سیلیکای بازیافت شده برای ساخت مجدد جداکننده‌های باتری سرب اسید استفاده شده است. یا در پژوهشی دیگر توسط نعمتی و همکاران [12] از سیلیکا برای ساخت کامپوزیتی پلیمری استفاده شده است. همچنین در پژوهش انجام شده توسط شجاعی [13] و همکاران از سیلیکای بازیافتی برای ساخت آمیزه‌های لاستیکی استفاده شده است. هرچند نتایج همه پژوهش انجام شده برای بازیافت سیلیکا از جداکننده‌های باتری سرب-اسید موفقیت‌آمیز بوده است اما به دلیل سوزانده شدن بخش پلیمری اثرات منفی زیست‌محیطی به وجود می‌آید. به همین علت استفاده نمودن مستقیم جداکننده‌ها در کامپوزیت‌های مختلف می‌تواند رویکرد جدیدی برای استفاده از این پسماند باشد که آسیب‌های زیست‌محیطی به حداقل برسد.

2- سیلیکا

2-1- اثر سیلیکا بر خواص مکانیکی پلی‌اتیلن

پلی‌اتیلن مهم‌ترین عضو پلی‌اولفین‌ها و پرمصرف‌ترین پلیمر در دنیاست [14]. پلی‌اتیلن‌ها خانواده‌ای از گرمانرم‌ها¹ هستند. پلی‌اتیلن شامل ساختاری بسیار ساده‌ای است، به‌طوری‌که ساده‌تر از تمام پلیمرهای تجاری است. پلی‌اتیلنی که تعداد زنجیره‌های جانبی آن کم و طول آن‌ها کوتاه باشد، پلی‌اتیلن سنگین (پلی‌اتیلن خطی) نامیده می‌شود. در این حالت هیچ شاخه‌ای در مولکول وجود ندارد. پلی‌اتیلن خطی سخت‌تر (دارای خواص مکانیکی بهتر) از پلی‌اتیلن شاخه‌ای است، اما پلی‌اتیلن شاخه‌ای آسان‌تر و ارزان‌تر ساخته می‌شود [15، 16]. مقدار کمی از ذرات نانوسیلیکا اصلاح‌شده سطحی می‌تواند به طور مؤثر مدول، تنش تسلیم، استحکام و چقرمگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی² را بهبود بخشد. چنین بهبودی در خواص کلی پلیمرها به ندرت در کامپوزیت‌های معمولی با ذرات میکرو قابل مشاهده است. برای نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی مقدار بهینه سیلیکا 4 درصد وزنی گزارش شده است. این مقدار می‌تواند باعث بهبود قابل توجه خواص و صرفه‌جویی در کامپوزیت‌ها شود. به‌طور کلی، بیش از 20 درصد از ذرات با اندازه میکرومتر برای دستیابی به عملکرد مشابه مورد نیاز است. مقدار سیلیکای بیشتر هیچ بهبود قابل توجهی در خواص ایجاد نمی‌کند، در حالی که به هزینه کامپوزیت می‌افزاید. سیلیکا بالای 8 درصد بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها اثر منفی دارد [17].

استحکام ضربه با زیاد شدن سیلیکا افزایش می‌یابد و با 3 درصد وزنی سیلیکا به حداکثر خود می‌رسد، سپس با افزایش بیشتر مقدار سیلیکا کاهش می‌یابد. با مقدار کمتر، نانوسیلیکا پراکندگی خوبی در زمینه و اتصال سطحی خوب با زمینه نشان می‌دهد. طبق نظریه لانگ، ذرات معدنی می‌توانند تقسیم و تفکیک ترک‌ها را تحت تنش در کامپوزیت‌ها تسریع کنند. علاوه بر این، فاز سطحی بین زمینه و پرکننده، که از زنجیره‌های ماکرو مولکولی متصل به سطح پرکننده از طریق جذب فیزیکی یا شیمیایی تشکیل شده است، هنگامی که کامپوزیت‌ها تحت تنش قرار می‌گیرند، می‌تواند بیشتر انرژی جنبشی و انرژی کرنش را در نوک ترک به انرژی تغییر شکل مرزی ناپیوسته تبدیل کند. بنابراین رشد ترک‌ها را متوقف می‌کنند. این دو عامل باعث افزایش انرژی شکست می‌شوند. در نتیجه استحکام شکست کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. در مقابل، با افزایش نانوسیلیکا، مقدار کلوخه‌های بزرگ که می‌توانند به راحتی تحت تنش

⁴ Cross-linking network

⁵ High-density polyethylene (HDPE)

⁶ Maleic anhydride grafted polyethylene

¹ Thermoplastics

² Linear low-density polyethylene (LLDPE)

³ Bridge-connection

3- بخش تجربی

3-1- مواد اولیه

تأثیر جداکننده‌های باتری سرب-اسید به عنوان تقویت کننده برای بهبود خواص مکانیکی دو نوع پلی‌اتیلن پرچگالی (EX3) و خطی کم‌چگالی (209) همچون مدول کشسانی، استحکام کششی، سختی و روند تغییر خواص مکانیکی در درصد‌های وزنی مختلف از جداکننده بررسی شد. جهت جلوگیری از تخریب نمونه‌ها حین فرایندها از آنتی‌اکسیدان Irgafos168 به میزان 1000 ppm استفاده شد.

در پژوهش حاضر از جداکننده باتری سرب-اسید تازه و استفاده نشده یا به عبارتی دیگر اسید نخورده، برای ساخت کامپوزیت مورد نظر استفاده شده است. لازم به ذکر است برای حذف ناخالصی‌های احتمالی، جداکننده‌ها با روش پیشنهادی پیرچراغی و همکاران [2] اسیدشویی و خالص‌سازی شده‌اند.

3-2- روش تهیه کامپوزیت

برای آماده‌سازی نمونه‌ها از مخلوط‌کن داخلی³ ساخت شرکت Brabender استفاده شد. اختلاط نمونه‌ها در دمای 180 درجه سانتی‌گراد و با سرعت چرخش 60 rpm و به مدت 5 دقیقه انجام شد. پس از اضافه کردن گرانول‌های پلی‌اتیلن پرچگالی یا پودر پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی، 3 دقیقه زمان داده شد تا ذوب صورت بگیرد و سپس جداکننده‌ها اضافه شدند. برای بررسی تغییر خواص مکانیکی و به منظور مقایسه، از هر نوع پلی‌اتیلن یک نمونه بدون جداکننده نیز تهیه شد. سپس نمونه‌ها با استفاده از روش قالب‌گیری فشاری⁴ در دمای 180 درجه سانتی‌گراد و فشار 200 بار با قالب‌های استاندارد آماده شدند. نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها مطابق جداول 1 و 2 است.

جدول 1 ترکیب نمونه‌های تهیه شده با زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی

Table 1 Composition of samples prepared with HDPE matrix

نمونه‌ها	پلی‌اتیلن پرچگالی (wt.%)	جداکننده استفاده نشده (wt.%)
HDPE	100	0
H-5FS	95	5
H-10FS	90	10
H-15FS	85	15

جدول 2 ترکیب نمونه‌های تهیه شده با زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی

Table 2 Composition of samples prepared with LLDPE matrix

نمونه‌ها	پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی (wt.%)	جداکننده استفاده نشده (wt.%)
LLDPE	100	0
L-5FS	95	5
L-10FS	90	10
L-15FS	85	15

3-3- روش انجام آزمون‌ها

جهت بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تهیه شده، از آزمون‌های کشش⁵، خمش⁶ و سختی⁷ سنجی⁷ استفاده شد. آزمون‌های کشش و خمش با استفاده از دستگاه کشش H10KS Hounsfield و به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D638 – Type V و ASTM D790 انجام شد. سختی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D2240 D اندازه‌گیری شد. از آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی مطابق با استاندارد ASTM D3418-03 برای بررسی خواص حرارتی نمونه‌ها استفاده شد.

کامپوزیت‌های با پلی‌اتیلن پیوند شده با انیدرید مالئیک به عنوان سازگارکننده بسیار کمتر است. در حضور پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید، کامپوزیت با 6 درصد وزنی سیلیکا 66 درصد از ازدیاد طول پلی‌اتیلن بدون سیلیکا و کامپوزیتی با همان مقدار پرکننده بدون حضور سازگارکننده تنها 27 درصد ازدیاد طول نسبت به پلی‌اتیلن بدون سیلیکا نشان می‌دهد. محل‌های تجمع پرکننده می‌توانند به عنوان مکانی برای تمرکز تنش عمل کنند، به طوری که در نمونه بدون سازگارکننده به علت تمرکز تنش ازدیاد طول در هنگام شکست کاهش بیشتری می‌یابد [19].

الغامدی و همکاران [20]، موفق به تهیه و عامل‌دار کردن نانوذرات سیلیکا همراه با پلی‌اتیلن با استفاده از روش پلی‌همولوژی شروع شده با سطح¹ شدند. سپس به روش اختلاط مذاب نانوکامپوزیت‌های پلی‌الفین با نسبت‌های مختلف نانوذرات سیلیکا و نانوذرات سیلیکا همراه با پلی‌اتیلن در زمینه‌های پلی‌اتیلن با چگالی کم خطی و پلی‌اتیلن با چگالی کم ساختند.

اثر بخشی بیشتر پرکننده سیلیکا همراه با پلی‌اتیلن برای بهبود رفتارهای کشسانی و پلاستیک پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی در مقایسه با پرکننده‌های سیلیکا از پراکندگی خوب و منطقه بین‌فازی در نانوذرات سیلیکای همراه با پلی‌اتیلن (مورفولوژی مشابه پوسته- هسته²) ناشی می‌شود که اتصال بین پرکننده و زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی را تقویت می‌کند. اساساً، پلی‌اتیلن پیوندشده بر روی سطح نانوذرات سیلیکا به تقویت اتصال سطحی کمک کرده و امکان پراکندگی همگن در سطح مولکولی نانوذرات سیلیکای همراه با پلی‌اتیلن در زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی را فراهم می‌کند [20].

به منظور بهبود پراکندگی و افزایش سازگاری، ذرات سیلیکا را می‌توان با اتصال گروه‌های عاملی به سطح خود اصلاح کرد. یکی از اصلاح‌کننده‌های پرکاربرد سیلیکا سیلان است که در صنایع لاستیک، رنگ و رزین نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [21]. همچنین برای افزایش برهمکنش بین بستر پلی‌اتیلن و ذرات تقویت کننده می‌توان از پلی‌اتیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید استفاده نمود [19].

2-2- خطرات محیط‌زیستی باز یافت نانوسیلیکا

باز یافت جداکننده‌ی باتری سرب-اسید برای تهیه نانوسیلیکا با روش سوزاندن بخش پلیمری با چالش‌های زیست‌محیطی فراوانی همراه است. ارائه راهکاری جهت مدیریت جداکننده‌های باتری سرب-اسید بدون آسیب جدی به محیط‌زیست ضروری است. استفاده مستقیم از جداکننده‌های باتری سرب-اسید به عنوان تقویت کننده برای بهبود خواص مکانیکی دو نوع پلی‌اتیلن پرچگالی و پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی همچون مدول کشسانی، استحکام کششی، سختی و انرژی جذب شده در آزمون ضربه می‌تواند ایده‌ای مناسب باشد. چگونگی تغییر خواص مکانیکی با استفاده از جداکننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. وجود سیلیکا در جداکننده‌های باتری می‌تواند دلیلی برای این بررسی باشد. با توجه به کاربردهای گسترده پلی‌اتیلن و اهمیت باز یافت، استفاده از جداکننده‌ها برای کاربردهایی که خواص مکانیکی اهمیت دارد می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. هدف اصلی پروژه حاضر، به نظر می‌رسد راهکار پیشنهادی از جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی مزیت‌های متعددی نسبت به روش باز یافت جداکننده‌ها دارد. بنابراین امکان استفاده مستقیم جداکننده‌های باتری در زمینه‌های پلیمری بررسی می‌شود.

⁵ Tensile test⁶ Bending⁷ Hardness¹ surface-initiated polyhomologation² Core - shell³ Internal mixer⁴ Compression molding

جدول 3 خواص حرارتی نمونه‌ها (نتایج حاصل از DSC)

Table 3 Composition of samples prepared with LLDPE matrix

نمونه	T _c (°C)	X _c (%)	T _m (°C)
Fresh Separator	114.6	-	128.6
HDPE	114.6	51.2	130.7
H-5FS	114.7	49.9	130.2
H-10FS	114.2	47.7	130.5
H-15FS	114.0	43.2	130.1
LLDPE	111.1	23.8	123.6
L-5FS	109.4	24.9	124.1
L-10FS	110.6	25.0	123.5
L-15FS	111.2	25.1	124.2

2-4- کشش

نتایج آزمون کشش در جدول 4 آورده شده است. همان‌طور که در جدول گزارش شده است، با افزایش مقدار جداکننده به زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی، مدول کشسانی نمونه حاوی 15 درصد جداکننده باتری حدوداً 21.8٪ و تنش تسلیم حدوداً 11.3٪ افزایش یافته‌اند. از طرفی همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود، برای کامپوزیت‌ها با زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی مدول کشسانی با اضافه شدن 5، 10 و 15 درصد وزنی جداکننده پسماند روند افزایشی دارد. مدول کشسانی برای نمونه‌های L-15FS از 220 مگاپاسکال به 296 مگاپاسکال افزایش داشته است. همچنین، تنش تسلیم این نمونه از 11.9 مگاپاسکال به 13.7 مگاپاسکال افزایش یافته است. به نظر می‌رسد دلیل روند افزایشی مدول کشسانی و تنش تسلیم حضور سیلیکا در جداکننده‌ها و همچنین ایجاد پیوندهای ضعیف از نوع جذب فیزیکی و پیوند کوالانسی است. به عبارتی دیگر، بین زنجیره‌های پلیمر زمینه و جداکننده حاوی سیلیکا، شبکه‌هایی ایجاد می‌شود که نتیجه این پدیده افزایش سفتی و استحکام زمینه در راستای عدم حرکت راحت زنجیره‌های زمینه است.

با توجه به جدول 4 درصد ازدیاد طول با اضافه شدن 5، 10 و 15 درصد وزنی جداکننده پسماند برای همه نمونه‌ها روند کاهشی دارد. برای نمونه H-15FS ازدیاد طول در نقطه شکست از 518 به 18 درصد کاهش یافته است. همچنین برای نمونه L-15FS ازدیاد طول در نقطه شکست از 674 به 263 کاهش یافته است.

با توجه به درصد بلورینگی پلی‌اتیلن پرچگالی که 51.2٪ است میزان ناحیه آمورف در مقایسه با پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی کمتر است و نواحی بلورین بیشتری وجود دارند و احتمال قرار گرفتن ذرات جداکننده‌ی حاوی سیلیکا بین بلورها افزایش یافته که می‌توانند هنگام تسلیم در زمینه تمرکز تنش لازم برای شکست را فراهم آورد. در واقع محصور شدن ذرات جداکننده بین بلورهای پلی‌اتیلن پرچگالی سبب افت شدید کرنش در نقطه شکست شده است.

نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی به همراه جداکننده در مقایسه با نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی کرنش در شکست بیشتری داشتند. درصد بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی 23.8٪ است که به معنای نواحی آمورف بیشتر است و شاهد اتفاقی که در پلی‌اتیلن پرچگالی رخ داده است، در این نوع پلی‌اتیلن نخواهیم بود. علاوه بر مسئله‌ی درصد بلورینگی، تنش تسلیم دو نوع پلی‌اتیلن هم متفاوت بوده و می‌تواند دلیلی برای تفاوت کرنش شکست نمونه‌ها در نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی و پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی باشد. پلی‌اتیلن موجود در جداکننده‌های باتری از نوع پلی‌اتیلن پرچگالی است و تنش تسلیم این نوع پلی‌اتیلن از پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی بیشتر است. به عبارتی دیگر تنش وارد شده به نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی هنگام تسلیم بیشتر از نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی است.

با هدف مشاهده اتصال جداکننده‌ها به زمینه و نحوه توزیع آن‌ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی بکار رفت. برای مطالعه مقدماتی رفتار رئولوژیکی، آزمون تعیین شاخص جریان مذاب¹ با استفاده از وزنه‌ی 5 Kg و در دمای 190°C مطابق با استاندارد ISO 1133 انجام شد.

4- نتایج و بحث

1-4- گرماسنجی روبشی تفاضلی

جهت بررسی خواص حرارتی و درصد بلورینگی نمونه‌ها آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی² با دستگاه Q100 شرکت TA Instrument انجام شد. برای هر نمونه، یک چرخه گرمایش و سرمایش تحت اتمسفر نیتروژن (جریان گاز 20 میلی‌لیتر بر دقیقه) از دمای 40 تا 200 درجه سانتی‌گراد با نرخ 10 درجه بر دقیقه انجام شد.

نتایج آزمون DSC از نمونه‌ها در جدول 3 آورده شده است. با توجه به نتایج نمونه جداکننده استفاده نشده که دمای ذوب 128 درجه سانتی‌گراد دارد. در جداکننده‌ی باتری معمولاً دو نوع پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا و پلی‌اتیلن پرچگالی مورد استفاده قرار می‌گیرند که با توجه به دمای ذوب و T_c به نظر می‌رسد در جداکننده باتری مورد استفاده در این پژوهش از پلی‌اتیلن پرچگالی (HDPE) استفاده شده است. درصد بلورینگی (X_c) کامپوزیت‌های دارای زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی با افزودن جداکننده کاهش یافته است. جداکننده‌ها تا حدودی مانع تشکیل بلورهای با ابعاد بزرگ شده‌اند. در نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی با افزایش مقدار جداکننده‌های باتری افزایش درصد بلورینگی مشاهده می‌شود. در این نمونه‌ها ذرات جداکننده‌ی باتری، که در نواحی آمورف قرار گرفته‌اند، تا حدودی گره‌خوردگی‌ها را کاهش داده و موجب افزایش نظم در ساختار شده‌اند. مطابق نتایج پژوهش الفامدی و همکاران [20] ذرات سیلیکا با افزایش جوانه‌زنی ناهمگن موجب افزایش درصد بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی می‌شوند. از طرف دیگر پلی‌اتیلن موجود در جداکننده از نوع پلی‌اتیلن پرچگالی بوده اما به دلیل فرایند تولید جداکننده بلورینگی کمتری نسبت به زمینه دارد بنابراین با افزودن جداکننده به زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی شاهد کاهش درصد بلورینگی هستیم. با توجه به این که در این آزمون، نمونه وزن بسیار کمی در حد چند میلی‌گرم دارد و بخشی از جداکننده باتری شامل سیلیکا و سایر موادی است که پلیمری نیستند، درصد بلورینگی برای جداکننده‌ی باتری داده‌ی معتبر و ارزشمندی نیست و گزارش نشده است.

در کامپوزیت‌های پلیمری، اثرات هسته‌زایی³ و تحدید⁴ هر دو می‌توانند نقش مهمی در تعیین خواص کامپوزیت داشته باشند. هسته‌زایی به فرآیندی اطلاق می‌شود که طی آن بلورها یا فازهای جدید در زمینه پلیمری تشکیل می‌شوند، در حالی که اثر تحدید به محدودیت تحرک زنجیره‌های پلیمری به دلیل وجود فاز تقویت‌کننده مانند نانوذرات یا الیاف اشاره دارد. رقابت بین اثرات هسته‌زایی و تحدید در کامپوزیت‌های پلیمری به عوامل مختلفی مانند اندازه و شکل فاز تقویت‌کننده، خواص زمینه پلیمری و شرایط فرآیند بستگی دارد. به نظر می‌رسد در نمونه‌های با زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی اثر تحدید نقش بیشتری در خواص کامپوزیت داشته است در حالی که در پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی اثر هسته‌زایی مشهودتر است در نتیجه بلورینگی در کامپوزیت با زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی کاهش و در زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی افزایش یافته است.

³ nucleation⁴ confinement effect¹ Melt flow index (MFI)² Differential Scanning Calorimetry (DSC)

و علت تفاوت بلورینگی آن‌ها ساختار زنجیره‌ها است که برای پلی‌اتیلین پرچگالی خطی بوده و برای پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی دارای شاخه است. تفاوت بلورینگی موجب تفاوت سختی و تنش تسلیم این دو نوع پلی‌اتیلین نیز می‌شود و می‌توان گفت که پلی‌اتیلین پرچگالی خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی دارد. از طرفی به دلیل اینکه سیلیکا ذاتاً ماده‌ای با سختی زیاد است، سختی میانگین کامپوزیت طراحی شده با افزایش مقدار جداکننده افزایش می‌یابد.

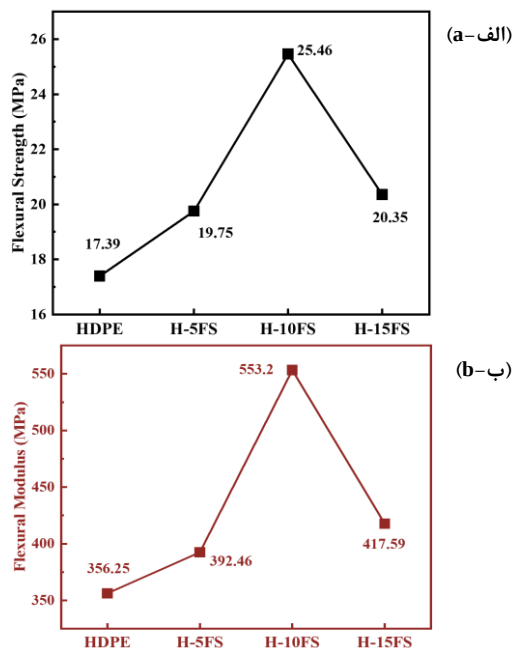


Fig. 2 a) Flexural strength and b) flexural modulus of HDPE samples
شکل 2 الف) استحکام خمشی و ب) مدول خمشی نمونه‌های پلی‌اتیلین پرچگالی

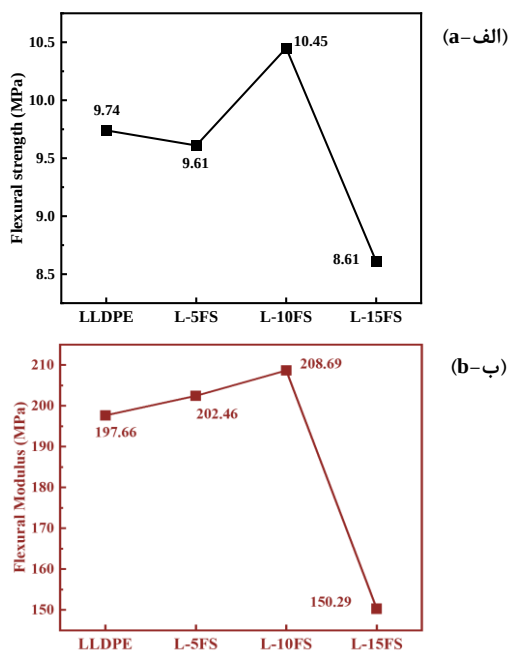


Fig. 3 a) Flexural strength and b) flexural modulus of LLDPE samples
شکل 3 الف) استحکام خمشی و ب) مدول خمشی نمونه‌های پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی

جدول 4 نتایج آزمون کشش کامپوزیت‌ها

Table 4 Results of tensile test for composites

نمونه	مدول کشسانی (MPa)	ازدیاد طول در نقطه شکست (%)	تنش تسلیم (MPa)
HDPE	830	518	25.1
H-5FS	932	63	25.2
H-10FS	972	41	26.5
H-15FS	1011	18	28.0
LLDPE	220	674	11.9
L-5FS	237	437	12.9
L-10FS	282	300	12.6
L-15FS	296	263	13.7

3-4- خمش

نتایج مربوط به آزمون خمش در شکل‌های 2 و 3 آورده شده است. با توجه به نتایج خمش، بیشترین استحکام و مدول خمشی برای دو نوع پلی‌اتیلین مربوط به نمونه‌های H-10FS و L-10FS است.

استحکام و مدول خمشی نمونه H-10FS نسبت به نمونه پلی‌اتیلین پرچگالی 47 و 55 درصد به ترتیب افزایش یافته‌اند. همچنین استحکام و مدول خمشی برای نمونه L-10FS نسبت به نمونه پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی حدوداً 11 و 6 درصد به ترتیب افزایش یافته‌اند. بنابراین، اثر جداکننده پسماند بر رفتار خمشی زمینه پلی‌اتیلین پرچگالی بهتر مشخص می‌شود. نقش اصلی را در بهبود استحکام و مدول خمشی ذرات سیلیکای موجود در جداکننده‌های باتری دارند. سیلیکا ماده‌ای سرامیکی بوده و مدول بیشتری از زمینه دارد و با اضافه شدن به زمینه پلیمری مدول کشسانی و خمشی را با استفاده سازوکار پل زدن بهبود می‌بخشد [17]. با افزودن جداکننده‌های باتری افزایش در مدول کشسانی در آزمون کشش نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده این است که جداکننده‌های باتری سبب افزایش سفتی پلی‌اتیلین شده‌اند. مقدار بهبود خواص خمشی در زمینه پلی‌اتیلین پرچگالی قابل‌توجه‌تر و بیشتر است. در آزمون کشش نمونه‌های پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی افت کرنش کمتری داشتند و می‌توان گفت نمونه‌های پلی‌اتیلین پرچگالی برای کاربردهایی که خواص خمشی اهمیت دارد (مانند لوله‌ها) و نمونه‌های پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی برای کاربردهایی که خواص کششی مطرح است، مناسب‌تر هستند.

همان‌طور که در شکل‌های 2 و 3 مشاهده می‌شود، استحکام و مدول خمشی برای تمامی نمونه‌ها حاوی 15 درصد جداکننده خردشده کاهش چشمگیری داشته است. به نظر می‌رسد با افزایش درصد جداکننده خردشده پدیده‌ی کلوخه‌ای شدن تشدید شده و تمرکز تنش موضعی عاملی برای این اتفاق است. بنابراین، با توجه به نتایج مقدار بهینه برای افزایش مدول و استحکام خمشی 10 درصد وزنی جداکننده است.

4-4- سختی سنجی

برای تمام نمونه‌ها آزمون سختی با 6 مرتبه تکرار انجام شد. در شکل 4 نتایج سختی نمونه‌ها نشان داده شده است. برای هر دو زمینه نمونه‌های با 15 درصد جداکننده بیشترین سختی را دارند. سختی همه نمونه‌ها با اضافه شدن جداکننده خردشده روند افزایشی دارد که مشابه با روند مدول در آزمون کشش است. با افزودن جداکننده باتری سختی پلی‌اتیلین پرچگالی در نمونه H-15FS تقریباً 6.43٪ و سختی پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی در نمونه L-15FS تقریباً 15.75٪ نسبت به زمینه بدون جداکننده افزایش یافته است. روند افزایش سختی مشابه با مدول کشسانی است که چنین شباهتی در پژوهش‌های دیگر نیز مشاهده شده است [13]. زنجیره‌های دو نوع پلی‌اتیلین ماهیت یکسانی دارند

بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی کمتر است نواحی بلورین در این نمونه چندان قابل تفکیک و مشاهده نیستند. خردایش جداکننده‌های باتری به علت حضور پلی‌اتیلن با چالش همراه بوده و اندازه ذرات نمی‌تواند از یک حدی بیشتر کاسته شود و همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود ریزترین ذره جداکننده‌ی باتری ابعادی حدود 240 nm دارد. لازم به ذکر است اندازه‌ی تمام ذرات در همین حدود نبوده و ابعاد اکثر ذرات در محدوده میکرومتر قرار دارد.

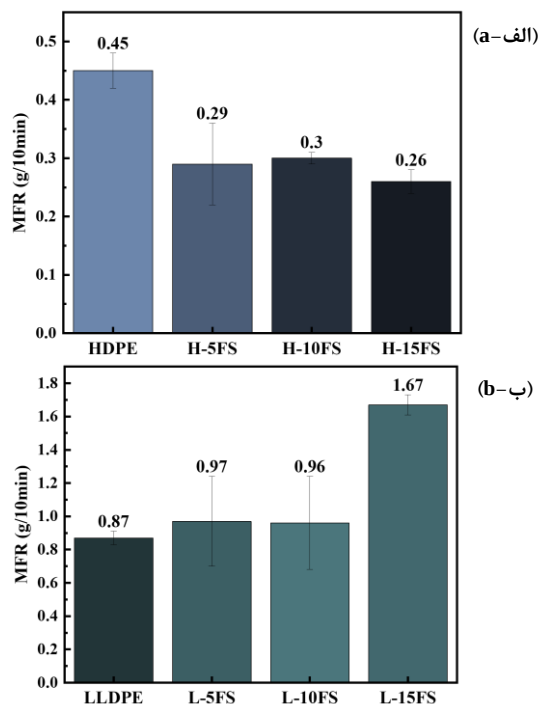


Fig. 5 The results of the melt flow index test of a) HDPE and b) LLDPE samples

شکل 5 نتایج آزمون تعیین شاخص جریان مذاب نمونه‌های الف) پلی‌اتیلن پرچگالی و ب) پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی

5- جمع‌بندی

بازار قابل توجه باتری‌های سرب-اسید و طول عمر کم این نوع باتری‌های موجب شده تا با حجم پسماند قابل توجهی از این نوع باتری روبه‌رو باشیم. بیشتر اجزای باتری‌ها بازیافت شده یا مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرند تا به چرخه مصرف بازگردند. به علت وجود پلی‌اتیلن و ترکیبات سرب بازیافت جداکننده‌های باتری سرب-اسید با چالش بیشتری همراه است. از طرف دیگر وجود سیلیکا که ماده‌ای سرامیکی است در جداکننده‌های باتری سرب-اسید می‌تواند موجب تقویت خواص مکانیکی پلی‌اتیلن شود. با اضافه شدن جداکننده باتری سرب-اسید به پلی‌اتیلن پرچگالی تنش تسلیم و مدول برای بهترین نمونه با 15 درصد وزنی جداکننده به ترتیب 28 و 1011 مگاپاسکال است. همچنین سختی برای این نمونه 61 واحد Shore D گزارش شده است. رفتار مدول خمشی این نمونه در 10 درصد وزنی افزایش چشمگیری تا 553 مگاپاسکال است. برای نمونه با زمینه پلی‌اتیلن کم‌چگالی رفتار مکانیکی تقریباً مشابه است. به طوری که تنش تسلیم و مدول به ترتیب 13 و 298 مگاپاسکال گزارش شده‌اند. همچنین سختی برای این نمونه 46 واحد Shore D است. رفتار مدول خمشی این نمونه در 10 درصد جداکننده به بیشینه حالت 208 مگاپاسکال رسیده است. بنابراین اضافه شدن جداکننده باتری به عنوان تقویت‌کننده امکان بهبود نسبی خواص مکانیکی زمینه پلیمری را می‌دهد.

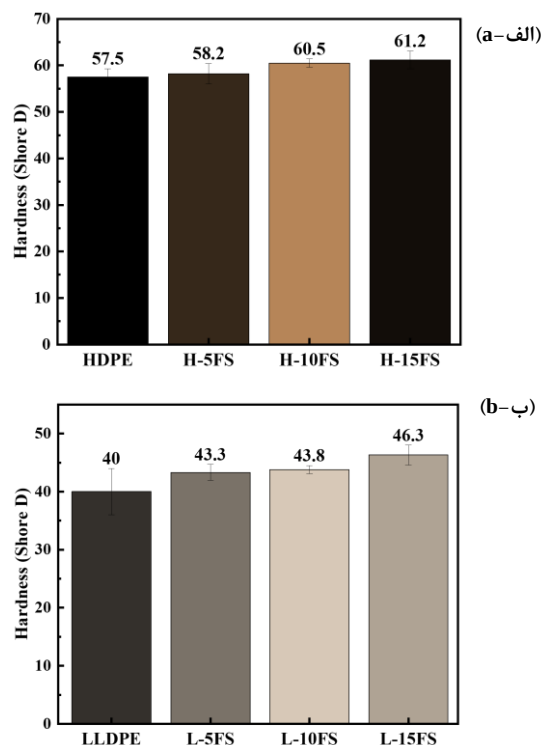


Fig. 4 Hardness test results of a) HDPE and b) LLDPE samples

شکل 4 نتایج آزمون سختی سنجی نمونه‌های الف) پلی‌اتیلن پرچگالی و ب) پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی

4-5- تعیین شاخص جریان مذاب

آزمون در دمای 190°C و با استفاده از وزنه‌ی 5 kg انجام شد. نتایج آزمون تعیین شاخص جریان مذاب در شکل 5 قابل مشاهده است. روند تغییر شاخص جریان مذاب با افزایش درصد وزنی جداکننده‌ی باتری برای کامپوزیت‌های با زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی با کاهش و برای نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی با افزایش همراه است. با افزودن 15 درصد وزنی جداکننده‌ی باتری شاخص جریان مذاب نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی کاهش یافته (42٪) و در نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی این شاخص زیاد شده است (92٪). روند مشاهده‌شده می‌تواند ناشی از خواص رئولوژیکی متفاوت پلی‌اتیلن پرچگالی و کم‌چگالی استفاده‌شده و همچنین جداکننده خردشده باشد. همچنین سازگاری و امتزاج‌پذیری در حالت مذاب ناشی از خواص رئولوژیکی متفاوت اجزای استفاده‌شده نیز می‌تواند دلیل این موضوع باشد. می‌توان تصور نمود سازگاری بیشتر در حالت مذاب بین پلی‌اتیلن پرچگالی و جداکننده (به دلیل وجود بستر پلی‌اتیلن پرچگالی) وجود داشته و این موضوع باعث برهمکنش بیشتر پلیمر جداکننده با بستر و کاهش شاخص جریان مذاب در نمونه‌های پرچگالی می‌شود. با این حال این موضوع نیازمند تحقیق بیشتر و در نظر گرفتن سازوکارهای تخریب شامل شکست زنجیر و شبکه‌ای شدن پلی‌اتیلن هنگام آمیزه‌سازی است که در مطالعات آتی انجام خواهد شد.

4-6- بررسی توزیع جداکننده باتری در زمینه پلی‌اتیلن کم‌چگالی خطی

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه L-15FS را نشان می‌دهد. اندازه ذرات جداکننده‌ی باتری در حدود یک میکرومتر و اندکی کمتر است. طبق شکل 6 (ب)، توزیع و پراکنش ذرات جداکننده‌ی باتری در زمینه چندان یکنواخت و منظم نیست اما به دلیل وجود پلی‌اتیلن در جداکننده‌ی باتری سرب-اسید اتصال ذرات به زمینه قابل قبول و مناسب است. از آن جا که درصد

- [5] Culpin, B., "Separator Design for Valve-regulated Lead-acid Batteries," *Journal of Power sources*, Vol 53, No.1, pp. 127-135, 1995.
- [6] Toquet, F., "Study of the Combined Roles of the Silica/Oil UHMWPE Formulation and Process Parameters on Morphological and Electrical Properties of Battery Separators," PhD Thesis, Université de Lyon, France, 2017.
- [7] Rand, D.A.J., Holden, L.S., May, G.J., Newnham, R.H., Peters, K., "Valve-regulated Lead-acid Batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 191-197, 1996.
- [8] Wei, X., Nie, Z., Luo, Q., Li, B., Chen, B., Simmons, K., Sprengle, V., Wang, W., "Nanoporous Polytetrafluoroethylene/Silica Composite Separator as A High-performance All-vanadium Redox Flow Battery Membrane," *Advanced Energy Materials*, Vol. 3, No. 9, pp. 1215-1220, 2013.
- [9] Burillo, G., Clough, R.L., Czvikovszky, T., Guven, O., Le Moel, A., Liu, W., Singh, A., Yang, J., Zaharescu, T., "Polymer Recycling: Potential Application of Radiation Technology," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 64, No. 1, pp. 41-51, 2002.
- [10] Ignatyev, Igor A, Wim Thielemans., Bob Vander Beke., "Recycling of Polymers: A Review." *ChemSusChem*, Vol. 7, No. 6, pp. 1579-1593, 2014.
- [11] Moens, E.K., De Smit, K., Marien, Y.W., Trigilio, A.D., Van Steenberge, P.H., Van Geem, K.M., Dubois, J.L., D'hooge, D.R., "Progress in Reaction Mechanisms and Reactor Technologies for Thermochemical Recycling of Poly (Methyl Methacrylate)," *Polymers*, Vol. 12, No. 8, pp. 1667, 2020.
- [12] Nemati, S., Pircheraghi, G., "Fabrication of a form-stable phase change material with green fatty acid and recycled silica nanoparticles from spent lead-acid battery separators with enhanced thermal conductivity." *Thermochimica Acta*, Vol. 693, No. 1, pp. 178781, 2020.
- [13] Shojaei, M.R., Pircheraghi, G., Alinoori, A., "Sustainable SBR/silica nanocomposites prepared using high-quality recycled nanosilica from lead-acid battery separators." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 370, No. 2, pp. 133316, 2022.
- [14] Shirkavand, M., Azizi, H., Ghasemi, I., Karabi, M., Rashedi, R., "Correlation Between Microstructure and Rheological Properties in High Density Polyethylene with Broad Distribution of Molecular Weigh." In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 28, No. 1, 27-38, pp. 3-12, 2015.
- [15] Vosoghifar, H., rahbaripour, A., "Examination of High Density Polyethylene," In Persian, *Promotional Scientific Journal of Mechanical* Vol. 20, No. 80, pp. 49-56, 2011.
- [16] Moghaddam, M. K., Shabani, M., "A Review on Evolution of Polyethylene Pipes: Production Methods and Standards," In Persian, *Polymerization*, Vol. 5, No. 4, pp. 84-91, 2015.
- [17] Hua, Y.Q., Zhang, Y.Q., Wu, L.B., Huang, Y.Q., Wang, G.Q., "Mechanical and Optical Properties of Polyethylene Filled with Nano SiO₂," *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, Vol. 44, No. 2, pp. 149-159, 2005.
- [18] Scott, C., Ishida, H., Maurer, F.H.J., "Melt State Dynamic Mechanical Properties of Polyethylene/EPDM/silicon Dioxide Composites," *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 10, No. 5, pp. 463-476, 1991.
- [19] Bula, K., Jesionowski, T., "Effect of Polyethylene Functionalization on Mechanical Properties and Morphology of PE/SiO₂ Composites." *Composite Interfaces*, Vol. 17, No. 5-7, pp. 603-614, 2010.
- [20] Alghamdi, R.D., Yudhanto, A., Lubineau, G., Abou-Hamad, E., Hadjichristidis, N., "Polyethylene Grafted Silica Nanoparticles Via Surface-initiated Polyhomologation: A Novel Filler for Polyolefin Nanocomposite," *Polymer*, Vol. 254, No. 2, pp. 125029, 2022.
- [21] Jesionowski, T., Krysztafkiwicz, A., "Influence of silane coupling agents on surface properties of precipitated silicas," *Applied Surface Science*, Vol. 172, No. 1-2, pp. 18-32, 2001.

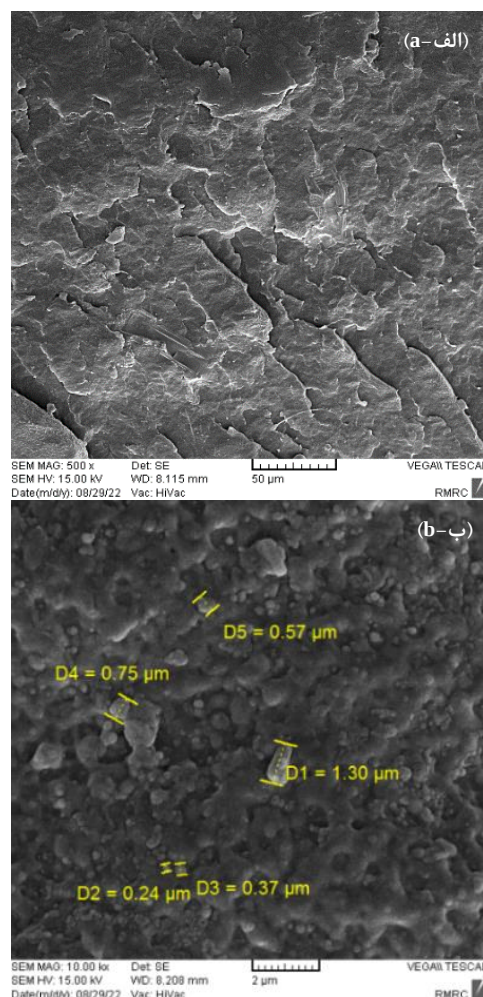


Fig. 6 Scanning electron microscope images in a)500x and b)1000x magnification

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی الف) 500 برابر و ب) 1000 برابر

6- تقدیر و تشکر

از آقای روح‌الله شامی زاده، نیما رشیدی، خانم یکتا رضایی و خانم نیلوفر افشاری و سایر اعضای محترم گروه تحقیقاتی مواد پلیمری دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف (PMRG) که در مسیر این پروژه یاری‌رسان و راهنما بودند، کمال تشکر را دارم.

7- مراجع

- [1] Bernardes, A.M., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.S., "Recycling of Batteries: A Review of Current Processes and Technologies," *Journal of Power sources*, Vol. 130, No. 1-2, pp. 291-298, 2004.
- [2] Pircheraghi, G., Nowrouzi, M., Nemati, S., "Fabrication of Polyethylene Separator for Lead-acid Batteries from Waste and Recycled Silica and Investigation of its Performance," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 250, No. 1-2, pp. 119535, 2020.
- [3] Palacin, M. R., "Recent Advances in Rechargeable Battery Materials: A Chemist's Perspective," *Chemical Society Reviews*, Vol 38, No. 9, pp. 2565-2575, 2009.
- [4] Zhang, W., Tu, Z., Qian, J., Choudhury, S., Archer, L.A., Lu, Y., "Design Principles of Functional Polymer Separators for High-energy, Metal-Based Batteries," *Small*, Vol. 14, No. 11, pp. 1703001, 2018.



اصلاح ایزوسیاناتی پوسته برنج بمنظور استفاده در کامپوزیت‌های فوم‌های پلی‌یورتانی

محمد برمر^{*}، شروین احمدی¹

1- دانشیار، مهندسی صنایع پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 14965/115، M.Barmar@ippi.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 1401/09/09

پذیرش: 1402/01/29

چکیده

فوم‌های پلی‌یورتانی سخت، یکی از پرمصرف‌ترین فوم‌های پلیمری بوده، که بعنوان عایق‌های حرارتی استفاده می‌شوند. مصرف بسیار زیاد این مواد و نیز ماندگاری طولانی‌مدت آن‌ها در محیط، یکی از دغدغه‌های بشر در زمینه حفظ محیط‌زیست می‌باشد. راه‌های متفاوتی برای بهبود خواص زیست‌تخریب‌پذیری پلیمرها وجود دارد. یکی از این راه‌ها استفاده از مواد طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر در بستر پلیمرها می‌باشد. در اینجا برای اولین بار از پوسته برنج که یکی از ضایعات کشاورزی فراوان در کشور است، در فوم‌های عایق پلی‌یورتانی استفاده گردیده است. ابتدا پوسته‌های برنج آسیاب و غربال گردید. سپس این مواد، به دو گروه تقسیم شدند. یک گروه از این مواد، تحت آمایش قلیایی قرار گرفته، گروه دیگر بهمان صورت خام استفاده شد. سپس، هر دو گروه آمایش قلیایی شده، و نشده، تحت اصلاح ایزوسیاناتی قرار گرفتند. برای اصلاح ایزوسیاناتی، از 20 درصد وزنی ترکیبات ایزوسیاناتی استفاده شد. با استفاده از آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز هر دو روش آمایش قلیایی و اصلاح ایزوسیاناتی مورد بررسی قرار گرفت. آنگاه، پوسته‌های برنج اصلاح شده، به میزان 5 درصد وزنی به فوم‌های پلی‌یورتان اضافه شدند. سپس خواص مکانیکی و عایقی فوم‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر دو گروه پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی پیش آمایش قلیایی شده و نشده، باعث بهبود خواص مقاومت فشاری تا میزان 89 درصد گردید. این در حالیست که خواص عایقی فوم‌ها نیز بهبود می‌یابد.

کلیدواژگان

پوسته برنج،

اصلاح،

ایزوسیانات،

قلیایی،

فوم پلی‌یورتان.

Isocyanate modification of rice husk for using in polyurethane foam composite

Mohammad Barmar*, Shervin Ahmadi

Faculty of Polymer Science, Iran polymer and petrochemical institute, Tehran, Iran.

* P. O. B. 14975/112., Tehran, Iran, M.Barmar@ippi.ac.ir.

Keywords

Rice husk
Modification
Isocyanate
Alkaline
Polyurethane foam

Abstract

The hard polyurethane foams are one of the most consumed polymer foams as thermal insulation. Excessive consumption of these materials and their non-biodegradability is one of the human concerns in the field of environmental considerations. There are different ways to improve the biodegradability of polymers. The use of natural biodegradable materials in the polymer matrix is one of the solutions. Here, for the first time, rice husk, which is one of the abundant agricultural wastes in the country, has been used in polyurethane insulation foams. First, the rice husks were ground and sieved. Then, these materials were divided into two groups. One group of these materials was subjected to alkaline treatment. Both alkaline and non-alkaline treatment groups were subjected to isocyanate modification. For isocyanate modification, 20% by weight of isocyanate compounds were used. Both alkaline treatment and isocyanate modification methods were investigated using an infrared spectroscopy test. Then, the modified rice husks were added to the polyurethane foams at a rate of 5% by weight. Finally, the mechanical and insulating properties of the foams were evaluated. The results showed that both groups of isocyanate-modified rice husks, non-alkaline treatment, and alkaline treatment improved the compression strength properties of the polyurethane foams up to 89%. Also, the insulation properties of the foams are improved, too

1- مقدمه

زیست‌تخریب‌پذیر در آن‌ها، چه به صورت یک ماده اصلی و چه به صورت یک ماده افزودنی، می‌باشد [1-4]. علاوه بر ملاحظات زیست‌محیطی، از دیگر دلایل استفاده از مواد طبیعی در پلیمرها، ملاحظات اقتصادی و قیمت پایین در مقایسه با سایر مواد تقویت‌کننده متداول می‌باشد.

پلی‌یورتان‌ها نیز از این امر مستثنی نبوده، و در این پلیمرها، مواد طبیعی گاهی به عنوان بخشی از مواد اولیه واکنش، همچون پلی‌ال، و یا گاهی به عنوان

امروزه موضوع حفاظت از محیط‌زیست به یک دغدغه جدی برای بشر تبدیل شده است. از طرف دیگر، انسان‌ها در زندگی روزمره خود، از انواع مختلف پلیمرها، بصورت گسترده استفاده می‌کنند. متأسفانه این مواد به دلیل پایداری محیطی بالا، یکی از عوامل مؤثر در آلودگی طبیعت به شمار می‌روند. یک راهکار مبارزه با آلودگی محیط‌زیست توسط پلیمرها، استفاده از مواد طبیعی و

اصلاح فرمولاسیون فوم‌های پلی‌یورتانی با مواد طبیعی مذکور، می‌توان فوم‌های انعطاف‌پذیر با خواص پایداری حرارتی بهبود یافته و نیز سایر خواص فیزیکی مکانیکی مطلوب، تهیه نمود. سیتوانی و همکاران، همزمان برای ساخت و بهبود خواص فوم، از مواد طبیعی استفاده کردند [14]. این پژوهش شامل ساخت یک فوم سخت پلی‌یورتانی، با یک سیستم پلی‌ال 20 : 80 پلی‌اتر و یک پلی‌استر بر پایه روغن هسته خرما، و تقویت آن با نانوکریستال سلولز بود. نتایج بدست آمده نشان داد که برهمکنش نانوکریستال سلولز و پلی‌ال پلی‌استر پایه روغن خرما، بر روی استحکام کششی، هم در جهت بالا آمدن فوم، و هم در جهت عمود بر آن، تأثیر منفی می‌گذارد. اما مدول یانگ در جهت عمود بر مسیر بالا آمدن فوم، بدلیل آرایش یافتگی نانوکریستال سلولز به موازات بالا آمدن فوم، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

یکی از محصولات مهم کشاورزی در کشور برنج می‌باشد، بطوریکه هر ساله مقادیر زیادی از پسته آن به عنوان ضایعات کشاورزی تولید می‌شود. این مواد به واسطه سطح بالای سلیس نمی‌توانند بعنوان خوراک دام مورد استفاده قرار گیرند، و در نتیجه معمولاً از روش‌های سنتی مانند سوزاندن، از بین می‌روند. بنابراین استفاده از این مواد در پلیمرها بعنوان یک راه‌حل، باعث می‌شود تا در کنار استفاده از یک ماده پایه زیستی، از آلودگی محیط‌زیست نیز جلوگیری شود. ترکمن و همکاران [15]. برای ساخت نئوپان از پسته برنج، سدیم سیلیکات و دی‌ایزوسیانات استفاده کردند. در این پژوهش مشخص شد به ازای اضافه کردن هر 1 درصد وزنی دی‌ایزوسیانات، می‌توان 5 درصد وزنی استفاده از سدیم سیلیکات را کاهش داد. همین گروه تحقیقاتی در کار دیگری [16]. با استفاده از پسته برنج و رزین اوره - فرمالدهید به همراه دی‌ایزوسیانات، محصولات چوبی تخته خرده تهیه کردند. با بررسی‌هایی که انجام دادند، مشخص گردید با 10 درصد رزین شامل 8 درصد اوره - فرمالدهید و 2 درصد دی‌ایزوسیانات، می‌توان تخته خرده‌هایی با خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب تهیه نمود.

در یک کار پژوهشی دیگر [17]. کامپوزیت‌های پلی‌یورتانی در فرایند یک مرحله‌ای، با افزودن پودر پسته برنج به پلی‌ال و دی‌ایزوسیانات، تهیه و مورد مطالعه قرار گرفتند. با افزایش پودر پسته برنج، مقدار پلی‌ال کاهش داده شد، بطوریکه میزان هیدروکسیل سیستم ثابت باقی بماند. نتایج نشان داد تا میزان 50 درصد جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل پلی‌ال با گروه‌های هیدروکسیل پسته برنج، خواص فیزیکی مکانیکی تا حدودی بهبود یافته، بعد از آن کاهش می‌یابد.

ناوارو و همکاران [18]. از پسته برنج و کربنات کلسیم، بعنوان پرکننده در کامپوزیت‌های فوم‌های نرم پلی‌یورتانی استفاده کردند. با انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی، مشخص شد که پسته برنج برای بعضی از کاربردهای خاص که سختی فوم مهم نمی‌باشد، می‌تواند در فرمولاسیون فوم استفاده شود. وجود پسته برنج به خاصیت برگشت‌پذیری فوم، پس از برداشتن نیرو، کمک می‌کند.

هدف از انجام این کار تحقیقاتی استفاده از مواد طبیعی پسته برنج در فوم‌های سخت عایق حرارتی پلی‌یورتانی که برای عایق سازی در صنایع، ساختمان‌ها و وسایل نقلیه مجهز به سردخانه استفاده می‌شوند، بود. در اینجا برای اولین بار، از پسته برنج اصلاح شده استفاده گردید. بدین منظور، بخشی از این مواد تحت اصلاح قلیایی قرار گرفتند. سپس اصلاح ایزوسیاناتی هم بر نمونه‌های پسته برنج خام و هم بر نمونه‌های تحت آمایش قلیایی گرفته، صورت پذیرفت. دلیل انجام اصلاح ایزوسیاناتی، واکنش این گروه‌ها با گروه‌های هیدروکسیل موجود در پسته برنج بود، تا ضمن کاهش میزان گروه‌های

پرکننده طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یک کار پژوهشی، از مایع سازی اسیدی ضایعات پودر قهوه، پلی‌ال تهیه و برای سنتز یکسری فوم پلی‌یورتان عایق حرارتی استفاده گردید [5]. میزان عایق حرارتی و نیز پایداری حرارتی فوم‌های تهیه شده، کاملاً با انواع فوم‌های متداول تهیه شده با مواد صنعتی برابری می‌کرد. همچنین رفتار مکانیکی این فوم‌های تهیه شده از پلی‌ال‌های حاصل از پودر قهوه، نشان داد که این مواد می‌توانند کاربرد بالقوه‌ای در ساخت فوم‌های ویسکوالاستیک داشته باشند. در کار دیگری، فوم سخت پلی‌یورتان از واکنش پلی‌ال طبیعی تهیه شده با باگاس نیشر مایع شده، همراه با پلی‌اتیلن گلیکول، سنتز شد [6]. با افزایش میزان پلی‌ال طبیعی، چگالی و استحکام فشاری فوم بهبود یافت. با افزایش بیش از 30٪ پلی‌ال طبیعی، ساختار سلولی فوم تهیه‌شده ناهمگون و نامنظم گردید. سنان شاین و همکاران، از روغن سویا به عنوان بخشی از پلی‌ال در فرمولاسیون فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر استفاده کردند [7]. برای تهیه این فوم‌ها، مقادیری از پلی‌ال به‌تدریج با افزودن پلی‌ال مشتق شده از روغن سویا، جایگزین گردید. با افزایش تدریجی پلی‌ال مشتق شده از روغن سویا در فرمولاسیون، خواص فوم تهیه شده، کاهش یافت. این افت خواص ناشی از جدایی فازی ضعیف قسمت‌های سخت از قسمت‌های نرم، در فوم‌های حاوی پلی‌ال‌های بر پایه روغن سویا و پلی‌ال پلی‌اتری بود. همچنین از لیگنین کرافت به عنوان یک ماده اولیه طبیعی برای ساخت فوم‌های منعطف پلی‌یورتانی استفاده گردیده است [8]. به‌همراه لیگنین مایع شده، دو زنجر افزاینده روغن کرچک و نیز پلی‌پروپیلن گلیکول سه عاملی استفاده شده است. مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، کاهش دمای انتقال شیشه‌ای فاز نرم شامل پلی‌ال لیگنین مایع شده، بود که می‌تواند بعنوان یک دستاورد برای ساخت فوم‌های نرم از لیگنین مایع شده، در نظر گرفته شود.

در یک کار تحقیقاتی دیگر از نانوکریستال‌های سلولزی برای تقویت پلی‌یورتان الاستومری استفاده گردید [9]. در اثر استفاده از این مواد، مدول ذخیره و پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌ها به طور قابل توجهی بهبود یافت. یک ژل آلی پلی‌یورتانی بر پایه کیتین، متشکل از ایزوفورون دی‌ایزوسیانات، پلی‌اتیلن گلیکول و کیتین، بعنوان یک ماده پلیمری هوشمند توسط زوسین چنا و همکاران سنتز و مطالعه شد [10]. بخش‌های نرم پیش پلیمر که ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول بود، خصوصیات الاستومری و نیز آبدوستی این ترکیبات پلی‌یورتانی بر پایه کیتین را ایجاد نمود. قسمت‌های سخت هم که متشکل از کیتین و ایزوفورون دی‌ایزوسیانات بودند، با توجه به وجود باندهای یورتانی قطبی، نقش آبریزی را در حلال‌های آلی قطبی ارائه نمودند. این کوپلیمر سنتز شده یک ژل آلی قابل تزریق در دمای پایین بود که در دمای تقریبی 105 درجه سانتی‌گراد به ژل آلی نیمه جامد تبدیل می‌شد. روغن کرچک نیز یکی دیگر از پرمصرف‌ترین مواد طبیعی است که در سنتز پلی‌یورتان‌ها استفاده می‌شود. در یک کار تحقیقاتی، از مخلوط روغن کرچک و گلیسرول خام بعنوان یک پلی‌ال تجدیدپذیر، برای تهیه فوم‌های پلی‌یورتانی سخت استفاده شد [11]. فوم‌های تهیه شده پتانسیل بالایی را برای استفاده به عنوان عایق حرارتی از خود نشان دادند. همچنین برای ساخت فوم هیبریدی پلی‌یورتان - اوره، از روغن سویای اکسید شده با هوا استفاده شد [12]. این مطالعه نشان داد که در فرایند سنتز یک مرحله‌ای فوم، رابطه مستقیمی بین مقاومت در برابر خوردگی و آبریزی مواد، با ناهمگنی مورفولوژی فازی مواد، وجود دارد. در یکی از کارهای تحقیقاتی، فوم‌های نرم پلی‌یورتانی با اضافه کردن مواد طبیعی مشتق شده از پوست گردو و فندق تهیه شدند [13]. بعضی از خواص فیزیکی مکانیکی فوم‌های تهیه شده، شامل چگالی ظاهری، سختی، انعطاف‌پذیری و تغییر شکل غیر قابل بازگشت، اندازه‌گیری شد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها نشان داد، در صورت

پوسته‌های برنج از یکدیگر جدا شده، کاملاً در محیط پخش شوند. آنگاه به این مخلوط 6 گرم ایزوسیانات پلیمری (20 درصد وزنی)، به‌همراه 4 قطره دی بوتیل تین دی لورایت، اضافه گردید. آنگاه واکنش اصلاح ایزوسیاناتی به مدت 48 ساعت تحت جو نیتروژن صورت پذیرفت.

2-3-3- تهیه کامپوزیت‌های فومی

پس از آماده‌سازی و اصلاح پوسته‌های برنج، سه فوم پلی‌یورتان خالص (PU)، فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح شده با 20 درصد وزنی ترکیبات ایزوسیاناتی (5 – 20 – PURH)، و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح شده با 20 درصد وزنی ترکیبات ایزوسیاناتی بر روی پوسته برنج از قبل آمایش قلیایی شده (5 – 20 – PURAH) اصلاح، تهیه و مورد بررسی قرار گرفت.

برای ساخت نمونه‌های فومی، با توجه به توصیه شرکتی که مواد اولیه فوم از آن تهیه گردیده بود، نسبت اختلاط 100 به 120، به ترتیب برای آمیزه پلی‌ال و ایزوسیانات در نظر گرفته شد، به عبارت دیگر با توجه به قالب مورد استفاده، مقدار 25 گرم پلی‌ال با 30 گرم ایزوسیانات، به مدت 10 ثانیه مخلوط و سپس در قالب ریخته‌گری شد. لازم به ذکر است پوسته‌های برنج با توجه به هر نمونه، به مقادیر لازم از قبل توزین، و به پلی‌ال اضافه شده بود. اختلاط پوسته‌های برنج با پلی‌ال نیز، به مدت 30 ثانیه با همزن مکانیکی و 600 دور بر دقیقه صورت پذیرفت.

3- نتایج و بحث

در این پژوهش اثر افزودن پوسته برنج بعد از فرآیندهای اصلاح ایزوسیاناتی و نیز اثر پیش آمایش قلیایی و سپس اصلاح ایزوسیاناتی، بر خواص فیزیکی و مکانیکی فوم‌های سخت عایق پلی‌یورتانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بعد از مش‌بندی پوسته‌های برنج، بخشی از آن‌ها تحت فرایند آمایش قلیایی قرار گرفتند. در شکل 1 نتایج آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز پوسته‌های آمایش قلیایی شده، و پوسته‌های برنج خام، با یکدیگر مقایسه شده است. طیف‌سنجی مادون‌قرمز یک روش کیفی برای بررسی ساختار ماده و بدست آوردن اطلاعاتی در مورد ساختمان مولکولی آن است. اما می‌توان با استفاده از تکنیک‌هایی از همین آزمون، برای بررسی تغییرات کمی در ساختار مواد نیز، استفاده کرد. یکی از این تکنیک‌ها، نرمالایز کردن طیف‌ها می‌باشد، که با استفاده از قله‌ی مشخصه یک گروه عاملی که در واکنش دخالت نمی‌کند، انجام می‌شود. با توجه به این نکته، و همچنین برای از بین بردن اثر غلظت پوسته‌های برنج در قرص برمید پتاسم، و نیز فراهم کردن امکان قابلیت مقایسه کردن طیف‌ها با یکدیگر، نرمالایز کردن طیف‌ها انجام گردید. برای این کار و باتوجه به ساختار تشکیل‌دهنده اجزای پوسته برنج، طیف مربوط به سیلیکا به عنوان جزئی از ترکیب پوسته برنج که به‌هیچ‌وجه در واکنش اصلاح ایزوسیاناتی شرکت نمی‌کند به عنوان مبنا انتخاب، و بقیه قله‌ها نسبت به آن نرمالایز گردید.

همانطور که در شکل 1 مشخص است، در اثر آمایش قلیایی شدت پهناء، و ارتفاع قله پیک 3444 cm^{-1} که متعلق به گروه‌های OH و NH می‌باشد، بیشتر شده است. پوسته برنج از دو بخش آلی و غیر آلی تشکیل شده است. بخش آلی آن شامل سلولز، همی سلولز، لیگنین و موم‌ها بوده، و بخش غیر آلی آن حاوی سه نوار وابسته به پیوندهای Si-O-Si می‌باشد. در اثر آمایش قلیایی، ناخالصی‌های سطحی و موم‌های موجود بر پوسته‌های برنج حذف گردیده، موقعیت‌های گروه‌های هیدروکسیل، فعال می‌گردند. همین امر باعث افزایش ارتفاع قله و نیز پهن شدن پیک ناحیه 3444 cm^{-1} می‌گردد.

هیدروکسیل، امکان توزیع مناسب و واکنش پوسته برنج با بستر پلی‌یورتانی نیز فراهم گردد. پس از بررسی فرآیندهای اصلاح کردن و انجام اصلاح با 20 درصد وزنی ترکیبات ایزوسیاناتی، 5 درصد وزنی از این مواد در فوم‌های کامپوزیتی پلی‌یورتانی استفاده شد. سپس رفتار خواص مختلف نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده، همچون چگالی، مقاومت فشاری و عایق حرارتی مورد بررسی قرار گرفت.

2- تجربی

2-1- مواد

مواد اولیه برای ساخت فوم، شامل ترکیبات ایزوسیانات پلیمری با کد Isomak 370 – و پلی‌ال به‌همراه سایر اجزای فرمولاسیون، با کد Polymak – 328 از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شد. برای ساخت نمونه‌های فومی، دو جز مذکور به نسبت مساوی مخلوط، در قالب قرار می‌گرفت. پوسته برنج از کارخانه‌های شالیکوبی شمال تهیه، با دستگاه آسیاب خرد و با الک مش 35 غربالگری شد. همچنین از هیدروکسید سدیم و اسید استیک شرکت مرک، برای فرایند آمایش قلیایی استفاده گردید. حلال تولوئن صنعتی نیز برای محیط انجام واکنش اصلاح سطحی پوسته برنج استفاده شد.

2-2- دستگاه‌ها و آزمون‌ها

برای آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز از دستگاه اکیونوکس 66 ساخت شرکت بروکر استفاده شد. آزمون چگالی بر اساس استاندارد ASTM D1622 انجام گرفت. نمونه‌های فومی تهیه شده برای انجام آزمون دارای ابعاد $4 \times 4 \times 3$ سانتیمتر بودند. رفتار عایق حرارتی فوم‌های سنتزی توسط دستگاه تی سی ا 200 ساخت شرکت تاروس مورد مطالعه قرار گرفت. آزمون مقاومت فشاری مطابق با روش استاندارد ASTM D1621-16 و با دستگاه شرکت سنتام انجام گرفت. همچنین برای بررسی ساختار سلولی فوم‌ها، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تی اسکن مدل وگا 2 استفاده گردید.

2-3- روش‌ها

2-3-1- آمایش قلیایی

آمایش این محصولات با روش‌های متفاوتی امکان‌پذیر می‌باشد. در اینجا برای اصلاح پوسته‌های برنج از روش آمایش قلیایی استفاده شد. در این روش ابتدا پوسته‌های برنج تهیه شده، توسط آسیاب خرد شدند. سپس، پوسته‌ها با استفاده از الک مش 35، غربالگری شده برای مرحله بعد آماده گردیدند. در ادامه، محلول 5 درصد وزنی سود، از مخلوط کردن سود آزمایشگاهی با میزان لازم از آب مقطر، تهیه شد. آنگاه پوسته برنج به مقادیر لازم از سود 5 درصد، اضافه گردید. مخلوط حاصل به مدت 90 دقیقه در دمای 25 درجه سانتی‌گراد توسط همزن مکانیکی لنگری بزرگ با 600 دور بر دقیقه، هم زده شد. در پایان مخلوطی به رنگ قهوه‌ای تیره حاصل گردید. این تغییر رنگ ناشی از جداسازی ناخالصی‌های سطحی از روی پوسته برنج بود. در نهایت پوسته‌های تحت آمایش قلیایی گرفته، توسط اسید استیک گلاسیال خنثی شد. پوسته‌های برنج بعد از خنثی‌سازی، سه بار با آب شهری و دو بار با آب مقطر، شستشو داده شده، پس از خشک شدن، آماده استفاده گردیدند.

2-3-2- اصلاح ایزوسیاناتی پوسته‌های برنج

ابتدا پوسته‌های برنج به مدت 24 ساعت در آون 100 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده، تا کاملاً خشک گردند. سپس 30 گرم پوسته برنج عاری از رطوبت به 200 cc تولوئن خشک اضافه گردید. مخلوط حاصل به مدت 30 دقیقه در دمای 80 درجه سانتی‌گراد با سرعت همزن 300 دور بر دقیقه هم زده شد، تا

وقتی که از فوم صحبت می‌گردد، اولین ویژگی مهم آن مقدار چگالی فوم می‌باشد. در جدول 1 چگالی سه نوع فوم مذکور با یکدیگر مقایسه شده است. بطور معمول با اضافه کردن یک ماده به عنوان پرکننده، چگالی فوم نیز تغییر کرده، و افزایش می‌یابد. همانطور که در جدول دیده می‌شود، چگالی هر دو نمونه حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح شده ایزوسیاناتی، از نمونه فوم خالص یا فاقد پوسته برنج، بیشتر می‌باشد. درصد افزایش چگالی نمونه حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (PUARH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (PUARH-20-5)، به ترتیب 17.1٪ و 15.5٪ می‌باشد. به عبارت دیگر، افزایش چگالی در نمونه حاوی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی از پیش قلیایی شده، کمتر از نمونه دیگر است. این نتیجه نشان می‌دهد که نمونه فوم PUARH-20-5، باعث ناهمگونی کمتری در ساختار سلولی فوم شده، و در نتیجه، منجر به افزایش کمتر چگالی شده است.

جدول 1 مقایسه چگالی سه نمونه فوم پلی‌یورتانی خالص (PU)، حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (PURH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (PUARH-20-5)

Table 1 Density comparison of three samples of pure pu foam (PU), containing 5% by weight of isocyanate modified rice husk (PURH-20-5) and foam samples containing 5% by weight of pre-alkaline treat isocyanate-modified rice husk (PUARH-20-5).

نمونه	چگالی (Kg/ m3)
PU	32.05
PURH-20-5	37.52
PUARH-20-5	37.02

برای بررسی خواص مقاومت فشاری، خواص هر سه نمونه فوم، تحت آزمون استاندارد ASTM D1621 - 16 بررسی گردید. در شکل 3، جدول فشاری هر سه نمونه با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج حاصله بیانگر این مطلب است که اضافه کردن تنها 5 درصد وزنی پرکننده پوسته برنج، منجر به افزایش قابل

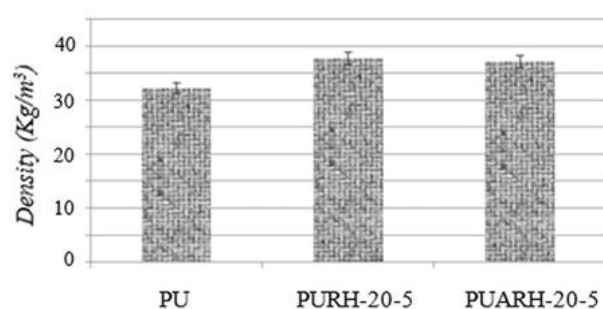


Fig. 3 Compression modulus comparison of three samples of pure pu foam (PU), containing 5% by weight of isocyanate modified rice husk (PURH-20-5) and foam samples containing 5% by weight of pre-alkaline treat isocyanate modified rice husk (PUARH-20-5).

شکل 3 مقایسه مدول فشاری سه نمونه فوم پلی‌یورتانی خالص (PU)، حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (PURH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (PUARH-20-5)

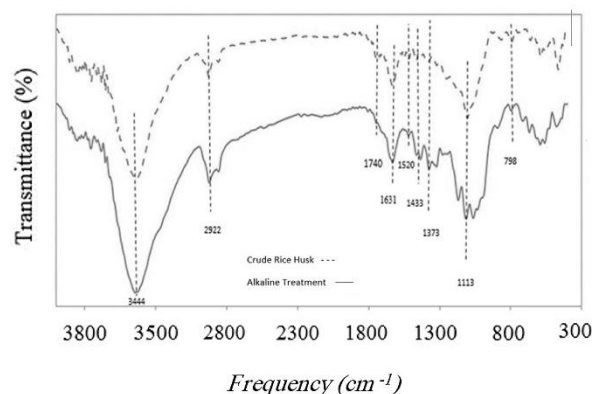


Fig. 1 Comparison of FTIR spectrum of rice husk crude with alkaline treated rice husk.

شکل 1 مقایسه طیف FTIR، پوسته‌های برنج خام و آمایش قلیایی شده.

برای بررسی چگونگی کیفیت انجام اصلاح ایزوسیاناتی، طیف‌های مادون قرمز پوسته‌های خام برنج و پوسته‌های اصلاح شده ایزوسیاناتی، در شکل 2، مقایسه گردیده‌اند. لازم به ذکر است که برای اطمینان از عدم حضور ترکیبات ایزوسیاناتی واکنش نکرده، نمونه‌های اصلاح شده، چندین بار با حلال تولوئن خشک شستشو داده شدند. پیکی که در ناحیه 2270 cm^{-1} مشاهده می‌گردد، مربوط به گروه‌های آزاد ایزوسیاناتی بوده، و به خوبی اتصال ترکیبات ایزوسیاناتی و یا به عبارت دیگر، اصلاح ایزوسیاناتی پوسته برنج را تأیید می‌کند. همچنین، همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، پیک 3200 cm^{-1} تا 3500 cm^{-1} در طیف مادون قرمز مربوط به پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده، هم از مساحت کمتری برخوردار بوده و هم کمی به طول موج‌های بزرگ‌تر تمایل پیدا کرده است. این پدیده، مصرف گروه‌های هیدروکسیل و ایجاد گروه‌های NH مربوط به باندهای یورتانی، در اثر واکنش گروه‌های ایزوسیاناتی با گروه‌های هیدروکسیل پوسته برنج را نشان می‌دهد. چون پیک‌های مربوط به گروه‌های NH باندهای یورتانی، علی‌رغم همپوشانی با پیک‌های مربوط به گروه‌های OH، از پهنای کمتری برخوردار بوده، و تمایل کمی به طول موج‌های بالاتر دارد.

در ادامه سه نمونه فومی شامل فوم پلی‌یورتانی خالص (PU)، نمونه حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (PURH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (PUARH-20-5)، تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت.

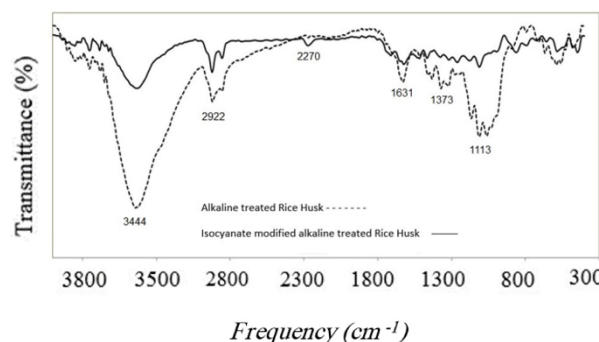


Fig. 2 Isocyanate modification investigation of alkaline treated of Rice Husk.

شکل 2 بررسی اصلاح ایزوسیاناتی پوسته برنج آمایش قلیایی شده، توسط طیف‌سنجی مادون قرمز

فوم‌های پلی‌یورتانی حاوی پوسته برنج کمک نموده است. به عبارت دیگر اثر تخریبی ساختار سلولی قابل توجه نبوده است.

برای مشاهده ساختار سلولی، از نمونه‌های فومی، تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی تهیه گردید. تصاویر مربوط به هر سه نمونه در شکل 5 مشاهده می‌گردد.

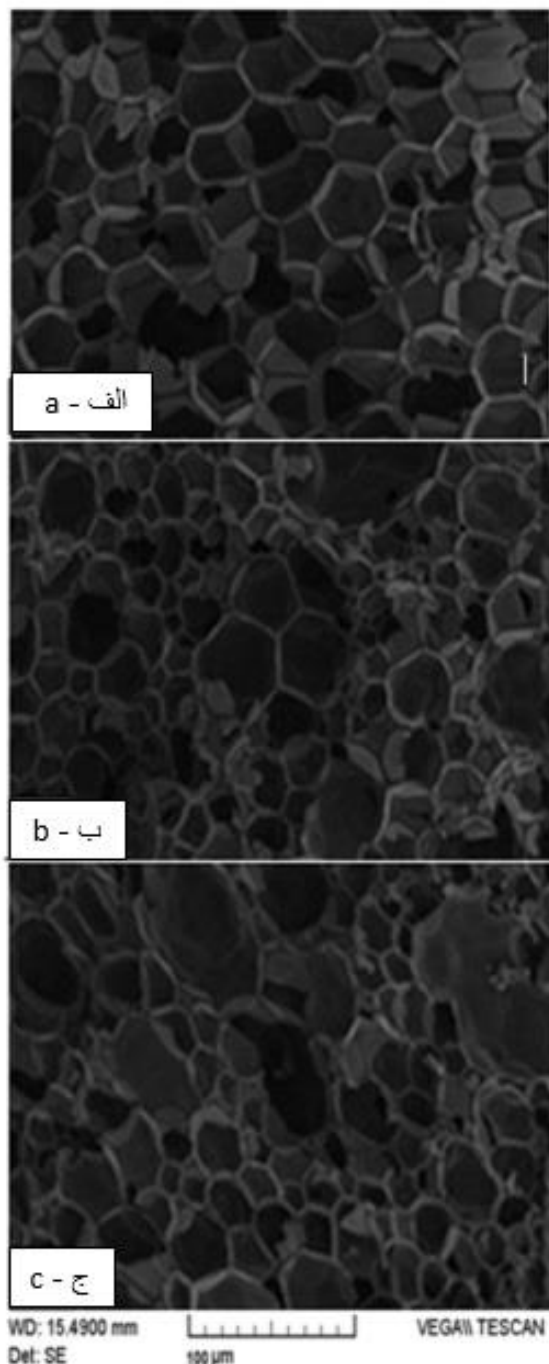


Fig. 5. Microscopic images of three samples of pure PU foam (PU) (a), containing 5% by weight of isocyanate modified rice husk (PURH-20-5) (b), and foam samples containing 5% by weight of pre-alkaline treat isocyanate modified rice husk (PUARH-20-5) (c).

شکل 5 عکس‌های میکروسکوپی از ساختار سلولی سه نمونه فوم پلی‌یورتانی خالص (الف) (PU)، حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (ب) (PURH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (ج) (PUARH-20-5).

توجهی مقادیر مدول فشاری به میزان 63.84٪ و 88.97٪ به ترتیب برای نمونه حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (PURH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (PUARH-20-5)، شده است. در اینجا نیز رفتار نمونه‌های آمایش قلیایی شده، از سایر نمونه‌ها، قابل قبول تر می‌باشد. همین رفتار نیز در زمینه استحکام یا مقاومت فشاری نمونه‌ها به خوبی مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر، مقاومت فشاری برای نمونه فوم پلی‌یورتانی خالص از 147 کیلو پاسکال ، به مقدار 165 کیلو پاسکال ، برای نمونه حاوی 5 درصد پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از پیش قلیایی شده، می‌رسد. دلیل این رفتار را می‌توان به این صورت بیان نمود. با توجه به نتایج حاصل شده، وقتی که نمونه‌ها تحت همایش قلیایی قرار می‌گیرند، موقعیت‌های گروه‌های هیدروکسیل، فعال گردیده، امکان واکنش آن‌ها با گروه‌های ایزوسیاناتی، فراهم می‌شود. در اثر این واکنش اتصال دانه‌های برنج با زمینه پلی‌یورتانی، از نوع شیمیایی شده، پراکندگی خوبی حاصل می‌گردد. این بهبود خواص فشاری، برای کاربردهایی مثل ساندویچ پانل می‌تواند، بسیار مفید باشد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی و امکان‌سنجی افزودن پوسته‌های

برنج به فوم‌های متداول عایق حرارتی پلی‌یورتانی بود. به همین دلیل، بررسی چگونگی اثر اضافه کردن پوسته برنج، بر روی رفتار عایق حرارتی نمونه‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود. بنابراین هر سه نمونه فوم، از نظر عایق حرارتی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمون هدایت حرارتی برای دمای 30 درجه سانتی‌گراد در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 نتایج هدایت حرارتی سه نمونه فوم پلی‌یورتانی خالص (PU)، حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (PURH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (PUARH-20-5).

Table 2 Heat conductivity results of three samples of pure pu foam (PU), containing 5% by weight of isocyanate-modified rice husk (PURH-20-5) and foam samples containing 5% by weight of pre-alkaline treat isocyanate-modified rice husk (PUARH-20-5).

نمونه	هدایت حرارتی w/(m*k)
PU	0.030241
PURH-20-5	0.02807
PUARH-20-5	0.029661

همانطور که از اطلاعات جدول 2 مشخص است، با افزایش 5 درصدی پوسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی، چه با آمایش قلیایی، و چه بدون آمایش قلیایی، هدایت حرارتی کمی کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر رفتار عایق حرارتی کمی بهبود پیدا کرده است. این رفتار برای این دسته از فوم‌های عایق حرارتی، مفید می‌باشد. وجود پوسته‌های برنج در فوم پلی‌یورتانی، می‌تواند منجر به دو اثر متضاد در رفتار عایق حرارتی فوم‌ها گردد. اولاً چون خود این مواد عایق حرارتی می‌باشند، بنابراین می‌تواند در مجموع به رفتار عایق حرارتی فوم پلی‌یورتانی کمک کند. از طرف دیگر وجود سلول‌های حاوی گاز پف‌زا عامل اصلی و موثر برای رفتار عایق حرارتی فوم‌های پلی‌یورتانی است. وجود پوسته برنج در فرمولاسیون فوم، می‌تواند تشکیل، رشد و همگونی این سلول‌ها را تحت تأثیر منفی قرار داده، منجر به کاهش میزان عایق حرارتی شود. نتایج جدول 2 نشان می‌دهد که برآیند این دو اثر متضاد، در نهایت به بهبود رفتار عایق حرارتی

- Foam Prepared from Sugar-Cane Bagasse Polyol," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 129, pp. 301–307, 2011.
- [7] Sonnenschein, M. F., Wendt, B. L., "Design and Formulation of Soybean Oil Derived Flexible Polyurethane Foams and Their Underlying Polymer Structure/Property Relationships," *Polymer*, vol. 54, pp. 2511–2520, 2013.
- [8] Cinelli, P., Anguillesi, I., Lazzeri, A., "Green synthesis of Flexible Polyurethane Foams from Liquefied Lignin," *European Polymer Journal*, Vol. 49, pp. 1174–1184, 2013.
- [9] Pei, A., Malho, J. M., Ruokolainen, J., Zhou, Q., Berglund, L. A., "Strong Nanocomposite Reinforcement Effects in Polyurethane Elastomer with Low Volume Fraction of Cellulose Nanocrystals," *Macromolecules*, Vol. 44, pp. 4422–4427, 2011.
- [10] Chena, S. H., Tsaoa, C. T., Chang, C. H., Wuc, Y. M., Liua, Z. W., Lind, C. P., Wange, C. K., Hsieha, K. H., "Synthesis and Characterization of Thermal-Responsive Chitin-Based Polyurethane Copolymer as A Smart Material, Carbohydrate Polymers," Vol. 88, pp. 1483–1487, 2012.
- [11] Carriço, C. S., Fraga, T., Carvalho, V. E., Pasa, V. M. D., "Polyurethane Foams for Thermal Insulation Uses Produced from Castor Oil and Crude Glycerol Biopolyols," *Molecules*, Vol. 22, pp. 1091–1105, 2017.
- [12] Ouriquea, P. A., Krindgesa, I., Aguzzolia, C., Figueroaa, C. A., Amalvyb, J., Wankea, C. H., Bianchia, O., "Synthesis, Properties, and Applications of Hybrid Polyurethane-Urea Obtained from Air-Oxidized Soybean Oil," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 108, pp. 15–24, 2017.
- [13] Bryskiewicz, A., Zieleniewska, M., Przyjemaska, K., Chojnacki, P., Ryszkowska, J., "Modification of Flexible Polyurethane Foams by The Addition of Natural Origin Fillers," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 132, pp. 32–40, 2016.
- [14] Sepevania, A. A., Evansa, D. A.C., Martina, D. J., Annamalaia, P. K., "Hybrid Polyether-Palm Oil Polyester Polyol Based Rigid Polyurethane Foam Reinforced with Cellulose Nanocrystal," *Industrial Crops & Products*, Vol. 112, pp. 378–388, 2018.
- [15] Torkaman, J., Fatehmy, S.M., "Modifying The Bondability of Rice Husk/Sodium Silicate Particleboard by Using Diisocyanate," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 21pp.3-8, 2008.
- [16] Torkaman, J., Fatehmy, S.M., "Investigating The Properties of Rice Husk/Urea Formaldehyde Resin Particleboard by Using Diisocyanate," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 21. pp. 99-105, 2008.
- [17] Rozman, H. D., Ang, L. G., Tay G. S., Abubakar A. "The Mechanical Properties of Rice Husk-Polyurethane Composites," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 42, pp. 327–343, 2003.
- [18] Navarro, M. V., Vega-Baudrit, J. R., Sibaja, M. R., Melero, F. J., "Use of Rice Husk as Filler in Flexible Polyurethane Foams," *Macromolecular Symposia*, Vol. 321, pp. 202–207, 2012.

همانطور که در شکل 5(b) مشخص است، در صورت استفاده از پسته‌های برنج اصلاح شده ایزوسیاناتی بدون آمایش قلیایی، مقداری ناهمگونی در ساختار سلولی ایجاد می‌گردد. اما با آمایش قلیایی به هم‌ریختگی ساختار سلولی کمتر شده، در نتیجه میزان ناهمگونی سلول‌ها کاهش می‌یابد. دلیل ارائه خواص بهتر این نمونه نیز، مربوط به کمتر شدن ناهمگونی ساختار سلولی است. نتایج این آزمون تأیید کننده حفظ رفتار عایق حرارتی فوم‌های کامپوزیتی حاوی ذرات پسته برنج است. همانطور که بیان شد، هر چند کمی از همگونی ساختار سلولی فوم‌های پلی‌یورتانی کمتر شده است، اما همچنان ساختار کلی فوم‌های پلی‌یورتان حفظ شده، و همین مسئله باعث عدم افت خواص عایق حرارتی نمونه‌ها گردیده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از پسته برنج که یکی از ضایعات قابل توجه کشاورزی در کشور می‌باشد، برای استفاده در کامپوزیت‌های فومی عایق حرارتی پلی‌یورتانی استفاده گردید. پس از مشخص شدن پسته‌های برنج، بخشی از آن تحت آمایش قلیایی قرار گرفت. سپس هر دو قسمت آمایش قلیایی شده و نشده، با 20 درصد وزنی ترکیبات ایزوسیاناتی واکنش داده، ترکیبات ایزوسیاناتی بر روی پسته برنج نشانداده شد. سپس 5 درصد وزنی از هر گروه، در کامپوزیت‌های فوم‌های پلی‌یورتانی استفاده گردید. درصد افزایش چگالی نمونه حاوی 5 درصد وزنی پسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده (PURH-20-5) و نمونه فوم حاوی 5 درصد وزنی پسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده از قبل آمایش قلیایی شده (PUARH-20-5)، به ترتیب 17.1٪ و 15.5٪ بود. وجود هر دو گروه پسته برنج اصلاح شده، باعث بهبود خواص استحکام فشاری و عایق حرارتی کامپوزیت‌های فوم‌های پلی‌یورتانی شد. برای نمونه کامپوزیتی حاوی پسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی از پیش قلیایی شده، نتایج بهتری حاصل گردید. با توجه به این نتایج، استفاده از پسته برنج اصلاح ایزوسیاناتی شده، ضمن کمک به زیست‌تخریب پذیر کردن فوم‌های پلی‌یورتانی، علاوه بر مزیت اقتصادی، باعث بهبود خواص، بویژه استحکام فشاری می‌شود.

5- مراجع

- [1] Simon, J., Muller, H. P., Koch, R., Muller, V., "Thermoplastic and Biodegradable Polymers of Cellulose," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 59, pp. 107–115, 1998.
- [2] Nabi Saheb, D., Jog, J. P., "Natural Fiber Polymer Composites: A Review," *Advances in Polymer Technology*, Vol. 18, pp. 351–363, 1999.
- [3] Ghasemi, I., Kord, B., "Long-term Water Absorption Behaviour of Polypropylene/Wood Flour/Organoclay Hybrid Nanocomposite," *Iranian Polymer Journal*, Vol. 18, pp. 683–691, 2009.
- [4] Sawai, D., Nozoe, Y., Yoshitani, T., Tsukada Y., "Development of New Cellulose-based Polymers with Excellent Melt-Processability," *Fujifilm Research & Development*, Vol. 57, pp. 55–58, 2012.
- [5] Gama, N. V., Soares, B., Freire, C. S. R., Silva, R., Neto, C. P., Barros-Timmons, A., Ferreira, A., "Bio-Based Polyurethane Foams Toward Applications Beyond Thermal Insulation," *Materials and Design*, Vol. 76, pp. 77–85, 2015.
- [6] Abdel Hakima, A. A., Nassara, M., Emamb, A., Sultana, M., "Preparation and Characterization of Rigid Polyurethane



بررسی تأثیر افزایش نانوذرات پرلیت بر خواص مکانیکی و ریزساختار ترکیب پلیمری PP/NR تهیه شده با فرایند اختلاط مذاب: بهینه‌سازی با رویکرد سطح پاسخ

هادی سلیمانی¹، عبدالحسین فریدون^{2*}، علیرضا آلبویه³، محمدرضا نخعی امرودی⁴

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

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه دامغان، دامغان

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، afereidoon@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 1401/09/24	پژوهش حاضر به مطالعه اثر افزودن نانوذرات پرلیت و لاستیک طبیعی با درصدهای وزنی مختلف بر مدول کششی و استحکام ضربه‌ای پلی‌پروپیلن پرداخته است. برای این منظور، نمونه‌های مختلف با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی بر اساس استانداردهای آزمون‌های کشش و ضربه تولید و آزموده شدند. همچنین با کمک روش بهینه‌سازی پاسخ سطح (RSM)، نقش پارامترهای ورودی بر پاسخ‌ها در جهت دست‌یابی به خواص مکانیکی بهینه و پیش‌بینی این خواص با مدل‌های ریاضی در قالب طرح پنج سطحی مرکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، از آزمون SEM به جهت مشاهده تغییرات ایجاد شده در ریز ساختار نمونه‌ها بهره گرفته شد. نتایج نشان داد، افزودن 7 wt.% از نانوذرات پرلیت به ماتریس حاوی 20 wt.% از لاستیک طبیعی، مقدار مدول کششی را 11.27٪ افزایش و استحکام ضربه‌ای را 52.01٪ نسبت به افزودن 3 wt.% از نانوذرات پرلیت به همان ماتریس کاهش می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی چند متغیره اثبات کرد که درصد وزنی بهینه نانوذرات پرلیت و لاستیک طبیعی به ترتیب 4.04 و 35.26٪ بود. در این صورت بیشترین مقدار حاصل شده برای مدول کششی 508.04 MPa و استحکام ضربه‌ای 108.52 J/m تعیین شد. با مشاهده تصاویر SEM استنباط شد که تغییر در اندازه فاز الاستومری به جهت استفاده از درصدهای وزنی گوناگون تقویت‌کننده، باعث متفاوت شدن نتایج خواص مکانیکی نمونه‌ها با یکدیگر شد.
پذیرش: 1402/01/20	
کلیدواژگان:	
پلی‌پروپیلن	
لاستیک طبیعی	
پرلیت	
نانوکامپوزیت	
روش پاسخ سطح	

Effect of perlite nanoparticles addition on the mechanical and microstructure properties of PP/NR blend fabricated by melt mixing processing: Optimizing by Response Surface Approach

Hadi Soleymani¹, Abdolhossein Fereidoon^{1*}, Alireza Albooyeh², Mohammad Reza Nakhaei³

1- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

3- Faculty of Mechanics and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, afereidoon@semnan.ac.ir

Keywords

Polypropylene
Natural rubber
Perlite
Nanocomposite
Response surface methodology

Abstract

The present research has studied the effect of adding perlite and natural rubber nanoparticles with various weight percentages on the tensile modulus and impact strength of polypropylene. For this purpose, different samples were produced and tested using an internal mixer based on the standards of tensile and impact tests. Also, by using of response surface methodology (RSM), the role of input parameters on the responses was investigated in order to achieve optimal mechanical properties and predict these properties with mathematical models in the form of central composite five-level design (CCD). In addition, the SEM test was used to observe the changes made in the microstructure of the samples. The results showed that the addition of 7 wt.% of perlite nanoparticles to the matrix containing 20 wt.% of natural rubber, the value of the tensile modulus increased by 11.27% and the impact strength by 52.01% compared to the addition of 3 wt.% of perlite nanoparticles to the same matrix. The results of multiobjective optimization proved that the optimal weight percentage of perlite nanoparticles and natural rubber was 4.04 and 35.26% wt. respectively. In this case, the highest value obtained for tensile modulus was 508.04 MPa and impact strength was determined to be 108.52 J/m. By observing the SEM images, it was concluded that the change in the size of the elastomeric phase due to the use of different weight percentages of reinforcements has caused the results of the mechanical properties of the samples to differ from each other.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Soleymani, H., Fereidoon, A., Albooyeh, A., Nakhaei, M. R., "Effect of perlite nanoparticles addition on the mechanical and microstructure properties of PP/NR blend fabricated by melt mixing processing: Optimizing by Response Surface Approach," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2089-2098, 2023. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1982818.1817>

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های بر پایه پلی‌پروپیلن (PP)¹ رواج گسترده‌ای در صنایع مختلف خودروسازی، تولید تجهیزات پزشکی و ساخت الیاف مصنوعی داشته است. از آنجایی که این نوع از مواد ترموپلاستیکی از ویژگی‌های خاص و مهمی برخوردارند، مورد توجه محققان قرار گرفتند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به در دسترس بودن با قیمت ارزان، مقاومت بالای حرارتی، سبک بودن و قابلیت بازیافت چند باره اشاره کرد [1، 2]. پژوهش‌های فراوانی بر روی پلی‌پروپیلن به عنوان ماده پایه در ترکیبات مختلف نانوکامپوزیتی انجام شده است. به نحوی که پژوهشگران با افزودن مواد الاستومری و تقویت‌کننده‌های مؤثری همچون نانوذرات سرامیکی، سیلیکاتی و نانولوله‌های کربنی به فاز پایه پلیمری، سبب افزایش چقرمگی شکست و بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری پلی‌پروپیلن خالص شدند [3-6]. همچنین، در تحقیقاتی اثر افزودن نانوذرات مختلف در جهت بهبود خواص مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند [7-12].

نانوذرات پرلیت از تقویت‌کننده‌های سیلیکاتی پرکاربرد در صنعت و مهندسی به شمار می‌روند که استفاده از آن‌ها در ترکیبات مختلف باعث بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری نمونه‌های تهیه شده، می‌شود. با استفاده از نانوذرات پرلیت در ترکیبات می‌توان ایجاد پیوندهای قوی بین فازها را انتظار داشت. این امر باعث افزایش استحکام مکانیکی مواد در آزمون‌هایی نظیر کشش و ضربه می‌شود [13، 14]. در تحقیقی، صحرائیان و همکارانش [15]، به مطالعه تأثیر افزایش نانوذرات پرلیت به فیلم‌های بر پایه پلی‌اتیلن چگالی پایین بر خواص مکانیکی و ریزساختاری پرداخته‌اند. آن‌ها در بررسی‌های خود نتیجه گرفتند، با افزایش درصد وزنی پرلیت به مقدار 5 wt. %، میرایی ماده پایه کاسته شد، اما در مقابل دمای انتقال حرارت بلورهای شیشه‌ای نانوذرات، ویسکوزیته ترکیب و مدول الاستیسیته در مقایسه با پلیمر پایه افزایش یافت. الیورا و همکارانش [16]، خواص مکانیکی، ساختاری، حرارتی و رئولوژی پلیمر پلی‌استایرن تقویت‌شده با میکروذرات پرلیت را مورد بررسی قرار دادند. طبق بررسی‌های صورت گرفته مشاهده شد، میکروذرات پرلیت میزان پایداری دمایی ماتریس پایه را کاهش دادند. همچنین، شکستگی برخی از ذرات پرلیت در حین انجام فرایند پخت و اختلاط سبب کاهش استحکام کششی مخلوط شد. از طرفی، مقایسه نتایج دیگر نشان داد که حضور پرلیت دو خاصیت مدول الاستیک و ویسکوزیته ماده زمینه را افزایش داد.

استفاده از روش‌های متنوع طراحی آزمایش، نظیر روش پاسخ سطح² و تاکوچی³ برای آزمایش‌هایی که از تعداد پارامترهای مؤثر زیادی برخوردارند، رواج دارد [17]. این شیوه برای کاهش وقت و هزینه‌های پژوهش بسیار مناسب است. در این راستا، یعقوبی و فریدون [18]، با استفاده از روش پاسخ سطح در قالب طرح باکس بنکن به مدل‌سازی و بهینه‌سازی نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف کناف پرداختند. پس از مطالعه و جمع‌بندی نتایج، مشاهده شد که با آمیخته سازی 28.95 wt. % از الیاف کناف به طول 6.22 mm و همچنین 5 wt. % از سازگار کننده PP-g-MA⁴، بیشترین مقدار استحکام و مدول کششی به ترتیب 32.70 MPa و 2182.33 MPa بدست آمد. شارما و نایاک [19]، به بررسی خواص مکانیکی، ساختاری و حرارتی نمونه‌های نانوذرات اصلاح شده خاک رس/ پلی‌پروپیلن پرداختند. آن‌ها به سبب نتایج بدست آمده دریافتند که استحکام و مدول کششی پلی‌پروپیلن خالص با افزایش نانورس به

ترتیب 95٪ و 152٪ افزایش داشت. بعلاوه، از طریق آزمون‌های حرارتی مانند آنالیز حرارتی TGA⁵ و گرما سنجی تفاضلی روشی DSC⁶ به افزایش 87° دمای تخریب و 4° نقطه ذوب نسبت به پلی‌پروپیلن پایه پی بردند. گل پرور و فصیحی [20] با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش، تأثیر افزودن 3، 6 و 9 wt. % از نانوسیلیکای پودری ترکیب‌شده با پلی‌پروپیلن/ الاستومر اولفینی را بر خصوصیات مکانیکی مورد مطالعه قرار دادند. بررسی نتایج نشان داد که استفاده نکردن از سازگار کننده موجب تخریب و کلوخه شدن نانوذرات در ترکیب پلیمری شد. همین موضوع سبب شد تا پس از افزودن نانوذرات به ماتریس پایه، استحکام کششی و ضربه‌ای که از خصوصیات مکانیکی کامپوزیت بشمار می‌روند، کاهش یابد. اما، افزودن سازگار کننده موجب افزایش مدول الاستیک شد. بعلاوه، با افزایش درصد وزنی الاستومر اولفینی تا 20 wt. %، تغییر طول تا شکست و استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص و ترموپلاستیک الاستومر ساخته شده با 10 wt. % از الاستومر اولفینی افزایش پیدا کرد. دانش پایه و همکارانش [21]، در پژوهش‌های خود با بهره‌گیری از روش پاسخ سطح، مطالعاتی را بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن/ پلی‌اتیلن خطی چگالی پایین همراه با افزودن نانوذرات تیتانیوم انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در اثر حضور نانوذرات تیتانیوم در ترکیب ابتدایی پلی‌پروپیلن/ پلی‌اتیلن خطی چگالی پایین، مقدار استحکام کششی و تغییر طول تا شکست کاهش یافت. اما، مدول الاستیسیته و استحکام ضربه‌ای به ترتیب 7٪ و 5٪ نسبت به حالت بدون نانوذره تیتانیوم افزایش پیدا کرد.

لاستیک طبیعی از جمله الاستومرهای مهمی است که در ترکیبات نانوکامپوزیتی جهت افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها در برابر آزمون‌های کشش و ضربه بکار می‌رود [22، 23]. در پژوهش صورت گرفته توسط شریکا و همکارانش [24]، به بررسی سیر الکترومغناطیسی تشکیل شده در اثر ترکیب ریزساختار PP/NR با نانوذرات MWCNT پرداخته شد. در این مطالعه، نتیجه آزمایش‌ها نشان داد که کارکرد دی‌الکتریک، وابستگی بسیار زیادی به نانوذرات MWCNT موجود در ماتریس پایه پلیمری دارد. همچنین، افزایش چشمگیری در عملکرد سیر الکترومغناطیسی ایجاد شده، مشاهده شد. علت آن رسانایی الکتریکی بالا و رساناهای دی‌الکتریک ناهمگن به سبب وجود نانوذرات در فاز الاستومری NR بود. بررسی‌هایی که به تازگی توسط چاندران و همکارانش [25] انجام شد، مطالعه بر روی تأثیر تغییر شکل آلی ناشی از تحول سطحی، مورفولوژی و خصوصیات فیزیکی- مکانیکی نانوکامپوزیت‌های مخلوط مبتنی بر PP/NR بود. آن‌ها گزارش کردند که در اثر افزودن نانوذره رس به ترکیب PP/NR، فاز مورفولوژی اصلاح شد و خصوصیات فیزیکی- مکانیکی نیز بهبود پیدا کرد که برای استفاده‌های گوناگون در صنعت خودرو کاربرد دارد.

مطالعات گسترده‌ای در حوزه ساخت و بهینه‌سازی نانوکامپوزیت‌های پلیمری در جهت تولید ترکیبی نو با بهترین خواص مکانیکی و ساختاری برای رفع نیازهای متعدد صنایع مختلف انجام گرفته است. در همین راستا، پژوهش حاضر برای نخستین بار خواص مکانیکی، حرارتی و ساختاری نمونه‌های نانوکامپوزیتی PP/NR تقویت‌شده با نانوذرات پرلیت که با استفاده از فرایند اختلاط مذاب از طریق دستگاه مخلوط‌کن داخلی دو مارپیچه تحت درصدهای وزنی 10، 20، 30، 40 و 50 wt. % برای لاستیک طبیعی و 1، 3، 5، 7 و 9 wt. % برای نانوذره پرلیت ساخته شده‌اند، را مورد بررسی قرار داده است. از طرفی، با بهره‌گیری از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و روش پاسخ سطح اعتبار نتایج بدست

⁴ Maleic anhydride (MA)-grafted PP⁵ Thermogravimetric analysis⁶ Differential scanning calorimetry¹ Polypropylene² Response surface methodology³ Taguchi

نمونه‌ها، از آزمون ضربه سرعت پایین آیزود بر اساس استاندارد ASTM D256 استفاده شد. همچنین، دستگاه برش لیزر (CNC) برای تهیه نمونه‌های آزمون ضربه با ابعاد $80 \times 10 \times 4$ mm مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها توسط دستگاه آزمون ضربه محصول شرکت آلمانی زیوکی با انرژی 200J سنجیده شد. شایان ذکر است، به منظور کاهش خطاهای انسانی و آزمایشگاهی، آزمون‌ها برای 3 نمونه تکرار شدند و میانگین نتایج استخراج و برای هر نمونه با تکرار اندکی در جدول 4 گزارش شد. در شکل 1 تصاویری از نمونه‌های آزمون کشش و ضربه ارائه شده است.

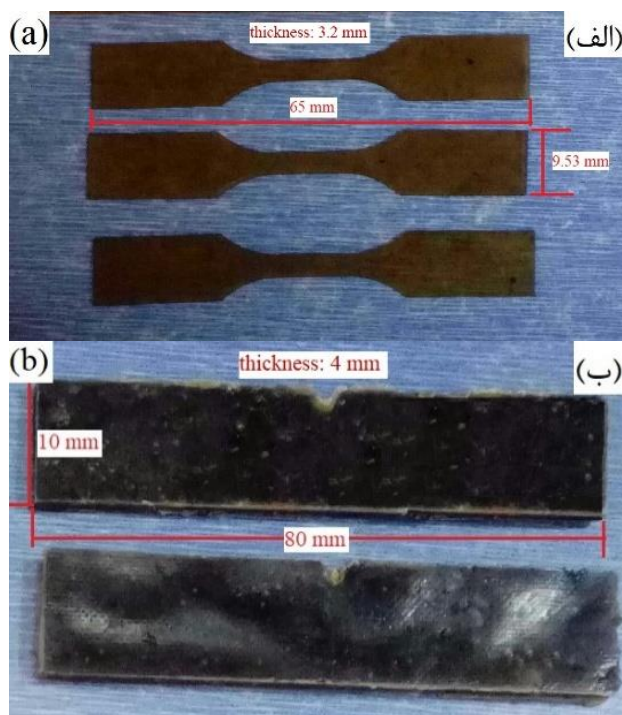


Fig. 1 The pictures of a) tensile test samples and b) low velocity impact test samples

شکل 1 تصاویر الف) نمونه‌های آزمون کشش و ب) نمونه‌های آزمون ضربه سرعت پایین

2-3- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت عکس‌برداری از شکستگی‌های ایجاد شده در نواحی باریک شدگی بر اثر آزمون کشش و نیز شکستگی‌های رخ داده در اثر آزمون ضربه، دو نمونه در مایعی از نیتروژن قرار داده شدند تا شبکه بلوری آن‌ها دچار گسستگی شوند. از آنجایی که هدف از این آزمون، بررسی میزان اندازه فاز الاستومری ترکیب تهیه شده و فاز نانوذرات پرلیت پراکنده شده در ماتریس زمینه می‌باشد، می‌بایست به جهت تشخیص اندازه این فازها، با قرار دادن نمونه نانوکامپوزیتی مدنظر در مایعی از تولوئن، الاستومر موجود در آن بعد از گذشت یک شبانه روز حل شود. در این فرایند حفره‌های تیره‌رنگ نمایان شده نشان‌دهنده فاز الاستومری نمونه تولید شده است. همچنین، پیش از عکس‌برداری از نمونه، به کمک ورقه‌های نازکی از روکش‌های طلا، سطح شکست پوشانده شد تا با جذب الکترون‌های آزاد بر روی سطح، باعث افزایش کیفیت و بهبود تصویر ثبت شده شود. در این آزمون برای ثبت تصاویر SEM، دستگاه محصول شرکت تسکن¹ جمهوری چک با مدل تجاری ویج² در شرایط دمایی محیط استفاده شد.

آمده از آزمون‌های تجربی به وسیله جداول آنالیز واریانس، مدل‌های ریاضی و نمودارهای داده‌های تجربی بر حسب داده‌های پیش‌بینی شده بررسی شده‌اند.

2- تجربی

2-1- مواد اولیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

ساخت نانوکامپوزیت PP/NR/Perlite نیازمند تهیه مخلوطی از مواد اولیه شامل پلی‌پروپیلن، لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت است. به همین جهت، از پلی‌پروپیلن با نام تجاری RP340N محصول شرکت پتروشیمی جم به عنوان ماده زمینه و لاستیک طبیعی با نام تجاری SMR 20 محصول کشور مالزی به عنوان الاستومر برای افزایش انعطاف‌پذیری ترکیب نانوکامپوزیتی در این پژوهش استفاده شد. همچنین، به سبب بررسی نحوه تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مکانیکی، حرارتی و ریزساختار نمونه‌های تولید شده، در هر مرحله درصد مشخصی از نانوذرات پرلیت به عنوان تقویت‌کننده به ترکیب ابتدایی (پلی‌پروپیلن/لاستیک طبیعی) اضافه شد. مشخصات و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی هر سه ماده تشکیل‌دهنده در جدول 1 ارائه شده است. پیش از آغاز فرایند ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی با روش اختلاط مذاب، به منظور حذف رطوبت احتمالی در پلی‌پروپیلن خالص و نانوذرات پرلیت، این مواد به مدت 24 ساعت در محفظه خشک‌کن (آون) با دمای 80°C قرار داده شدند. سپس، درون دستگاه مخلوط‌کن داخلی دو محوره طبق درصدهای وزنی مشخص، با سرعت اختلاط 60 rpm به مدت 12 min در دمای 180°C مخلوط شدند. پس از ذوب و ترکیب مواد با یکدیگر، ماده نهایی از داخل محفظه دستگاه مخلوط‌کن خارج شد. در نهایت پس از سرد شدن، ماده نانوکامپوزیتی برای قالب‌گیری و ساخت نمونه‌های ورقه‌ای در داخل قالبی به شکل مربع با ابعاد $150 \times 150 \times 3.2$ mm زیر دستگاه پرس داغ گذاشته شد. سپس، ماده تحت فشار 150 bar و حرارت 185°C قرار گرفت تا پس از گذشت زمان 10 min، مواد ترکیب‌شده در دستگاه مخلوط‌کن داخلی به صورت صفحه‌ای مربعی با ضخامت 3.2 mm ایجاد شود.

جدول 1 خواص فیزیکی و شیمیایی مواد مورد استفاده [13]

Table 1 The physical and chemical properties of materials [13]

مواد	خواص
پلی‌پروپیلن	چگالی 0.91 g/cm ³ شاخص جریان مذاب 11 g/10 min سختی 94 R Scale
لاستیک طبیعی	چگالی 0.98 g/cm ³ ناخالصی 0.16 wt.% انعطاف‌پذیری 30 wt.%
نانوذره پرلیت	چگالی 2.2 g/cm ³ شاخص سختی 5.5 Mohs

2-2- آزمون کشش و ضربه سرعت پایین

در این مقاله، از استاندارد ASTM D638 برای تهیه نمونه‌های دمبلی شکل آزمون کشش استفاده شد. به طوری که پس از قالب‌گیری مواد، نمونه‌های دمبلی با ابعاد $65 \times 9.53 \times 3.2$ mm به کمک دستگاه لیزر (CNC) از روی ورق-های بدست آمده در مرحله قبل، برش زده شدند. در ادامه از دستگاه آزمون کشش ساخت شرکت سنتام جهت بررسی نمونه‌های دمبلی با شرایط دمایی 25°C و سرعت فک 5 mm/min بهره گرفته شد. جهت ارزیابی استحکام ضربه‌ای

² Vage

¹ Tescan

3- طراحی آزمایش

روش بهینه‌سازی پاسخ سطح، یکی از روش‌های نوین و پرکاربرد در بهینه‌سازی پارامترها به جهت بدست آوردن حداکثر خواص مکانیکی است. در این روش، با در نظر گرفتن تأثیر هر کدام از پارامترها و برهمکنش‌های بین آن‌ها بر روی پاسخ‌های مکانیکی و آنالیز واریانس می‌توان به کمک مدل‌های ریاضی و نمودار-های دوبعدی و سه‌بعدی پاسخ سطوح، خواص مکانیکی را پیش‌بینی کرد. پیش‌بینی خواص مکانیکی با توجه به مدل ریاضی بدست آمده بر اساس تأثیر هر کدام از مؤلفه‌های مستقل، مربعات و برهمکنش‌های بین آن‌ها می‌تواند به وسیله‌ی معادله چندجمله‌ای زیر تحت عنوان معادله (1) صورت پذیرد.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در این معادله X_i و X_j نشان‌دهنده متغیرهای ورودی، k تعداد متغیرها و y بیانگر پاسخ‌ها هستند. علاوه بر β_i ، β_{ij} ضرایب رگرسیون، β_0 ضریب ثابت و ε ماتریس خطا هستند [26].

همانطور که در جدول 2 ذکر شده است برای انجام این آزمایش، حدود تغییرات پارامترها در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت با استفاده از مدل پنج سطحی روش مرکب مرکزی تبیین شد. به طوری که برای این طراحی، از دو پارامتر موادی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت با درصد‌های وزنی 10، 20، 30، 40 و 50 wt.% و 1، 3، 5، 7 و 9 wt.% در ترکیب نانوکامپوزیتی PP/NR/Perlite بهره گرفته شد [13، 24]. از این رو، درصد‌های وزنی نمونه‌ها جهت اختلاط در دستگاه مخلوط‌کن داخلی و تولید نمونه‌های استاندارد برای شرکت در آزمون-های مکانیکی از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استخراج و در جدول 3 گزارش شد.

جدول 2 پارامترهای موادی و حدود عملکرد آن‌ها بر اساس مدل پنج سطحی CCD
Table 2 Material parameters and their performance limits based on the five surfaces model of CCD

پارامتر	واحد	علامت اختصاری	2+	1+	0	1-	2-
NR content	%wt.	N	50	40	30	20	10
Perlite content	%wt.	P	9	7	5	3	1

جدول 3 نام نمونه‌ها بر اساس طراحی مرکب مرکزی (CCD)

Table 3 The name of the samples based on central composite design (CCD)

ردیف	کد نمونه‌ها	Perlite (wt.%)	NR (wt.%)	PP (wt.%)
1	PP70/N30/P0	0	30	70
2	PP65/N30/P5	5	30	65
3	PP65/N30/P5	5	30	65
4	PP65/N30/P5	5	30	65
5	PP61/N30/P9	9	30	61
6	PP69/N30/P1	1	30	69
7	PP45/N50/P5	5	50	45
8	PP85/N10/P5	5	10	85
9	PP53/N40/P7	7	40	53
10	PP57/N40/P3	3	40	57
11	PP73/N20/P7	7	20	73
12	PP77/N20/P3	3	20	77

4- بحث و نتیجه‌گیری

4-1- خواص مکانیکی

نمودار تنش- کرنش بدست آمده از آزمون کشش برای نمونه‌های موجود در جدول 3 به صورت شکل 2 گزارش شده است. همچنین، نتایج خواص مکانیکی (الف) مدول کششی و (ب) استحکام ضربه‌ای حاصل از آزمون‌های تجربی کشش و ضربه برای نمونه‌های نانوکامپوزیت PP/NR/Perlite با درصد‌های متفاوت وزنی به صورت نمودار در شکل 3 ارائه شده است. علاوه بر این، حدود خطاها به همراه میانگینی از نتایج حاصل شده برای این دو خاصیت مکانیکی از طریق تکرار هر آزمایش برای 3 نمونه در جدول 4 مشخص شده است. در این جدول نمونه PP65N/30P5 از سه بار تکرار برخوردار است.

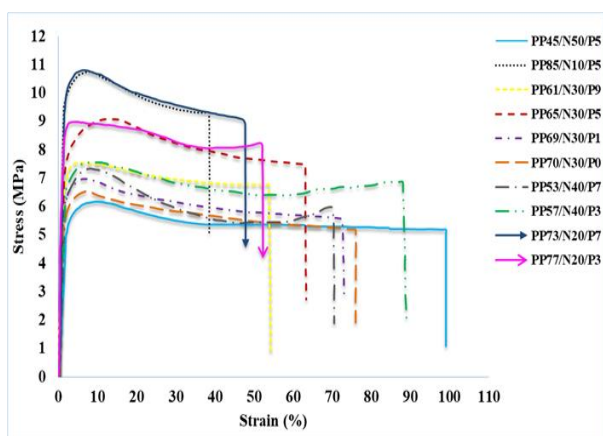


Fig. 2 The stress - strain diagram of samples

شکل 2 نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها

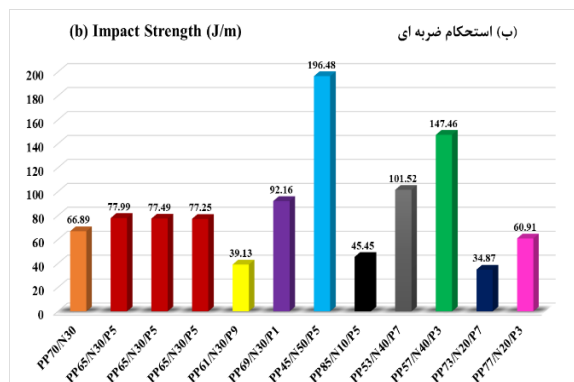
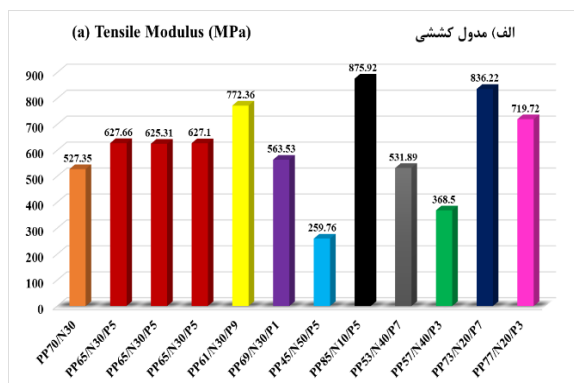


Fig. 3 The values of mechanical properties a) tensile modulus and b) impact strength

شکل 3 مقادیر خواص مکانیکی (الف) مدول کششی و (ب) استحکام ضربه‌ای

به تأثیر مثبت افزایش مقدار درصد وزنی نانوذرات پرلیت بر مقادیر مدول کششی اشاره کرد. اما با بیشتر شدن سهم لاستیک طبیعی در نانوکامپوزیت PP/NR/Perlite، مدول کششی روند کاهشی به خود گرفته است. بر اساس این نمودارها مشاهده شد که حداکثر مقدار مدول کششی 822.99 MPa بدست می‌آید. این مقدار در شرایطی بدست آمد که از 20 wt.% لاستیک طبیعی و 7 wt.% نانوذرات پرلیت (PP73N/20P/7) در هنگام ادغام مواد استفاده شد. از آنجایی که خاصیت مدول کششی ترکیب نهایی، وابسته به مدول اجزا تشکیل‌دهنده ترکیب است، در نتیجه می‌توان این رفتار (افزایش مدول کششی) را ناشی از پخش مناسب نانوذرات در درصدهای 3 تا 7 wt.% دانست [27-29]. با توجه به این مطالب، استنباط می‌شود که مقادیر خواص مکانیکی از وابستگی بالایی به پارامترهای موادی برخوردار هستند. به طوری که، به واسطه این وابستگی می‌توان با انتخاب مقادیر مناسب عددی برای پارامترهای درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت، حداکثر مقدار خواص مکانیکی را مشخص کرد. از طرفی، بررسی نتایج تجربی حاصل از آزمون کشش برای دو نمونه PP77N/20P/3 و PP73N/20P/7، بیانگر افزایش 13.93٪ مقدار مدول کششی نمونه PP73N/20P/7 نسبت به نمونه PP77N/20P/3 است. علت این امر، کاهش ناحیه پلاستیکی در نمودار تنش- کرنش (شکل 2) در نمونه PP73N/20P/7 در قیاس با نمونه PP77N/20P/3 به واسطه افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت به 7٪ و تجمع زیاد آن‌ها در اطراف فاز الاستومری است. براساس قانون وو افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت در فاز ترموپلاستیک الاستومر تأثیر مستقیمی بر نسبت ویسکوزیته فاز پلیمری پلی‌پروپیلن (PP) و فاز الاستومری لاستیک طبیعی (NR) دارد که منجر به کاهش اندازه حفره‌های ایجاد شده در ناحیه پلاستیکی می‌شود و در نتیجه افزایش مدول کششی را به دنبال دارد [30، 31].

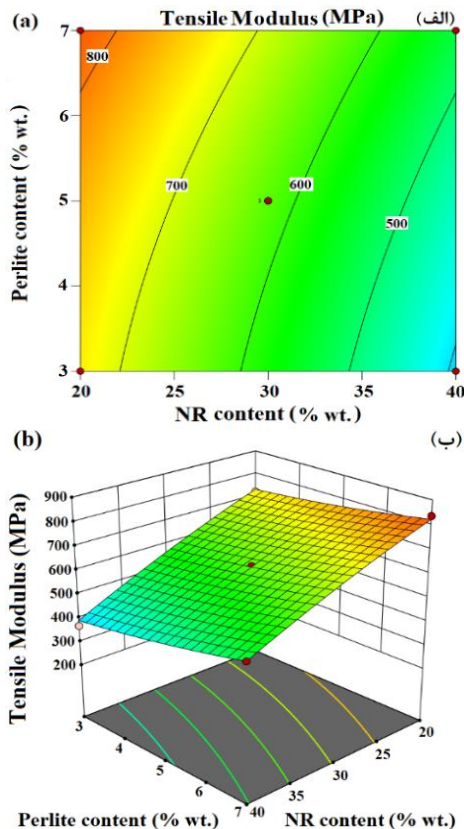


Fig. 4 Graphs of a) 2D b) 3D of the effect of interaction parameters on tensile modulus

شکل 4 گراف‌های الف) دوبعدی و ب) سه‌بعدی اثر متقابل پارامترها بر مدول کششی

جدول 4 مقادیر خواص مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه‌ای

Table 4 The values of mechanical properties of tensile modulus and impact strength

Impact Strength (J/m)	Tensile Modulus (MPa)	کد نمونه‌ها
66.89 ± 0.3	527.35 ± 0.94	PP ₇₀ /N ₃₀ /P ₀
77.99 ± 1.1	627.66 ± 3.89	PP ₆₅ /N ₃₀ /P ₅
77.49 ± 0.6	625.31 ± 1.27	PP ₆₅ /N ₃₀ /P ₅
77.25 ± 0.5	627.1 ± 2.43	PP ₆₅ /N ₃₀ /P ₅
39.13 ± 0.2	772.36 ± 1.46	PP ₆₁ /N ₃₀ /P ₉
92.16 ± 1.4	563.53 ± 0.81	PP ₆₉ /N ₃₀ /P ₁
196.48 ± 2.1	259.76 ± 1.09	PP ₄₅ /N ₅₀ /P ₅
45.45 ± 0.2	875.92 ± 2.07	PP ₈₅ /N ₁₀ /P ₅
101.52 ± 1.7	531.89 ± 2.67	PP ₅₃ /N ₄₀ /P ₇
147.46 ± 1.9	368.5 ± 2.96	PP ₅₇ /N ₄₀ /P ₃
34.87 ± 0.2	836.22 ± 1.29	PP ₇₃ /N ₂₀ /P ₇
60.91 ± 0.3	719.72 ± 1.98	PP ₇₇ /N ₂₀ /P ₃

2-4- نتایج مدول کششی

نتایج آنالیز واریانس برای خاصیت مدول کششی در جدول 5 آورده شده است. از مقایسه نتایج این جدول دریافت شد که مؤلفه اثر متقابل لاستیک طبیعی و نانوذره پرلیت (N×P) به واسطه مقدار ضریب P بزرگ‌تر از 0.05 در نگارش نهایی معادله رگرسیون برای پاسخ مدول کششی در دو حالت تجربی و پیش‌بینی شده حذف می‌شود. در صورتی که، دیگر مؤلفه‌های مستقل نظیر (N)، (P) و اثر مربعات (N²) و (P²) نقش اساسی در تعیین مقدار پاسخ مدول کششی به روش بهینه‌سازی آنالیز واریانس دارند. تأثیرگذاری این پارامترها بر مدول کششی به جهت ضریب P پایین‌تر، از اطمینان 95٪ برخوردار هستند.

جدول 5 نتایج بدست آمده از روش آنالیز واریانس برای مدول کششی

Table 5 The obtained result of analysis of variance for tensile modulus

P ضریب	F آزمون	مربعیات اصلی	مجموع مربعات	پارامترها
0.0001>	273.46	69646.36	3.482E +05	نمونه
0.0001>	1166.16	2.970E +05	2.970E +05	N
0.0001>	159.21	40548.00	40548.00	P
0.2018	2.16	549.67	549.67	N×P
0.0104	15.93	4056.19	4056.19	N ²
0.0338	8.40	2140.08	2140.08	P ²
.....		254.69	7.18	Residual
0.0035	281.06	423.47	7.06	Lack of Fit
R ²		0.9927	R ² Adjusted	0.9964
Precision		53.3912	R ² Predicted	0.9633

در نتیجه، مدل ریاضی نهایی جهت تعیین مقدار پاسخ مدول کششی به صورت روابط تجربی (بر اساس مقادیر تجربی) و پیش‌بینی شده (بر اساس مقادیر حاصل از آنالیز واریانس) در معادلات (2) و (3) ارائه شده است.

$$\text{Tensile Modulus (MPa)} = 973.139 - 9.964 \times N - 14.843 \times P - 0.144 \times N^2 + 2.632 \times P^2 \quad (2) \text{ Actual Eq.}$$

$$\text{Tensile Modulus (MPa)} = 623.23 - 157.32 \times N - 58.13 \times P - 14.50 \times N^2 + 10.53 \times P^2 \quad (3) \text{ Predicted Eq.}$$

نمودارهای الف) دوبعدی و ب) سه‌بعدی شکل 4 بیانگر پاسخ سطح مدول کششی در درصدهای مختلف وزنی از پارامترهای موادی لاستیک طبیعی و نانوذره پرلیت است. با توجه به مقادیر پاسخ‌های حاصل شده در سطوح مختلف که به واسطه تغییر در مقدار درصد وزنی مواد اولیه ایجاد شده است، می‌توان

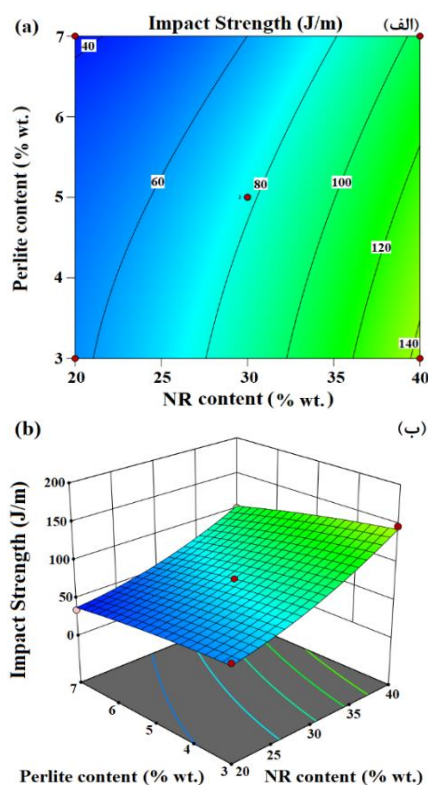


Fig. 5 Graphs of a) 2D b) 3D of the effect of interaction parameters on impact strength

شکل 5 گراف‌های الف) دوبعدی و ب) سه‌بعدی اثر متقابل پارامترها بر استحکام ضربه‌ای

4-4- اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی

مقایسه داده‌های تجربی بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی (کشش و ضربه) و داده‌های پیش‌بینی شده از فرمولاسیون آنالیز واریانس در نموداری نسبت به خط مورب 45° سنجیده شد. به طوری که، هر چه این داده‌ها به خط مورب نزدیک باشند، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده از تطابق بالایی نسبت به یکدیگر برخوردار هستند که این امر موجب افزایش دقت در نتایج نهایی و اعتبار بخشیدن به پژوهش صورت گرفته می‌شود. از این رو، برای درک بهتر تطابق این داده‌ها با خط 45° ، در شکل 6 نمودارهای مقادیر تجربی-پیش‌بینی شده برای دو خاصیت مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه‌ای آورده شده است. همچنین، مقایسه ستون خطای مربعات اصلی موجود در جداول 5 و 6 آنالیز واریانس و نمودارهای تجربی-پیش‌بینی شده، نشان از تطابق مناسب مقادیر باقی‌مانده با داده‌های تجربی دارند که برای هر یک از خصوصیات مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه‌ای صادق است (این موضوع توسط مدل‌های ریاضی محاسبه شده در بخش 2-4 و 3-4 نیز قابل درک است). علاوه بر این، در صورتی که دیگر مقادیر حاصل شده در این جداول همانند مقدار نسبت سیگنال به نویز (Precision) بزرگ‌تر از 4 و اختلاف بین داده‌های ضرایب همبستگی پیش‌بینی شده (R^2 Predicted) و داده‌های ضرایب همبستگی تعدیل یافته (R^2 Adjusted) از 0.2 کمتر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های بدست آمده از نتایج تجربی و پیش‌بینی شده، با اختلاف ناچیزی نسبت به یکدیگر با هم تطابق دارند. علاوه، در پیش‌بینی خواص مکانیکی می‌توان از مدل‌های بدست آمده که از همبستگی بسیار بالایی با داده‌های تجربی برخوردارند، استفاده کرد. این همبستگی برای مدول کششی و استحکام ضربه‌ای به ترتیب ($R^2 = 0.9927$) و ($R^2 = 0.9947$) محاسبه شدند [33].

3-4- نتایج استحکام ضربه‌ای

نتایج آنالیز واریانس برای استحکام ضربه‌ای در جدول 6 ارائه شده است. با مشاهده داده‌های حاصل شده در این جدول دریافت شد که تمامی مؤلفه‌های موجود به علت ضریب P کوچک‌تر از 0.05 بر روی مقدار پاسخ‌های تجربی و پیش‌بینی شده استحکام ضربه‌ای بدست آمده از معادلات رگرسیون مؤثر هستند. از این رو، مؤلفه‌های مورد نظر با اطمینان 95٪ بر روی مقدار پاسخ استحکام ضربه‌ای نقش دارند. این روش به کاهش زمان و هزینه‌های پژوهش کمک شایانی کرد.

جدول 6 نتایج بدست آمده از روش آنالیز واریانس برای استحکام ضربه‌ای

Table 6 The obtained results of analysis of variance for impact strength

ضریب P	آزمون F	مربعات اصلی	مجموع مربعات	پارامترها
0.0001>	376.91	4699.13	1022.82	نمونه
0.0001>	1385.33	17271.81	17271.81	N
0.0001>	211.87	2641.52	2641.52	P
0.0372	7.94	99.00	99.00	N×P
0.0001>	181.49	2262.76	2262.76	N ²
0.0135	13.96	174.02	174.02	p ²
.....		12.47	62.34	Residual
0.0263	37.13	20.68	62.05	Lack of Fit
R ²		0.9947	R ² Adjusted	0.9974
Precision		61.6884	R ² Predicted	0.9723

بنابراین، معادلات رگرسیون نوشته شده برای استحکام ضربه‌ای که به عنوان مدل ریاضی برای تعیین مقدار پاسخ استحکام ضربه‌ای کاربرد دارد، به صورت روابط تجربی و پیش‌بینی شده در معادلات 4 و 5 آمده است.

$$\text{Impact Strength (J/m)} = 42.536 - 1.458 \times N + 7.55 \times P - 0.248 \times N \times P + 0.108 \times N^2 - 0.750 \times P^2 \quad (4) \text{ Actual Eq.}$$

$$\text{Impact Strength (J/m)} = 77.89 + 37.94 \times N - 14.84 \times P - 4.98 \times N \times P + 10.83 \times N^2 - 3.00 \times P^2 \quad (5) \text{ Predicted Eq.}$$

نمودارهای پاسخ سطح الف) دوبعدی و ب) سه‌بعدی نمایش داده شده در شکل 5 مقدار پاسخ سطح استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های PP/NR/Perlite تهیه شده بر حسب پارامترهای متنوع موادی درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها، ملاحظه می‌شود که در صورت استفاده از 3 wt.% از نانوذرات پرلیت، استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها در اثر افزایش درصد وزنی لاستیک طبیعی در ترکیب، به مرور افزایش پیدا کرده است. به طوری که افزایش مقدار استحکام ضربه‌ای، حداکثر تا 147.46 J/m برای نمونه PP57N40P3 ادامه دارد. همچنین، در مقدار ثابت 7 wt.% از نانوذرات پرلیت با افزایش لاستیک طبیعی به مقدار 40 wt.% می‌توان استحکام ضربه‌ای را از 37.91 J/m به 103.84 J/m افزایش داد. اما، افزایش 3 wt.% از نانوذرات پرلیت، سبب کاهش مقدار استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها شد. به عبارت دیگر، بررسی‌های بیشتر نشان داد در مقدار ثابت 40 wt.% از لاستیک طبیعی، با افزایش نانوذرات پرلیت از 3 wt.% تا 7 wt.% استحکام ضربه‌ای از 147.46 J/m به 103.84 J/m کاهش می‌یابد. در نتیجه این امر، می‌توان به چسبندگی نانوذرات پرلیت به واسطه افزایش تعداد ذراتشان در ترکیب پایه و عدم نفوذ مناسب پلیمر پایه (پلی پروپیلن) در میان این ذرات اشاره کرد به نحوی که منجر به شکل گرفتن نقاط تمرکز تنش در ماده نهایی شده است [34, 33, 32, 76].

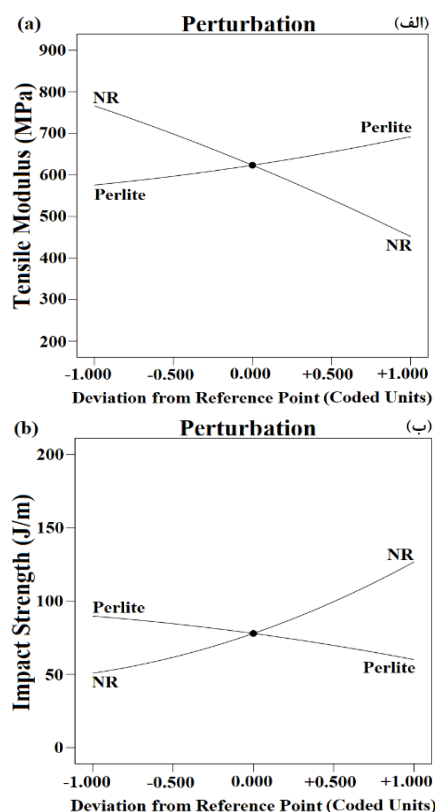


Fig. 7 The effect of material parameters on a) tensile modulus and b) impact strength

شکل 7 اثر پارامترهای موادی بر (الف) مدول کششی و (ب) استحکام ضربه‌ای

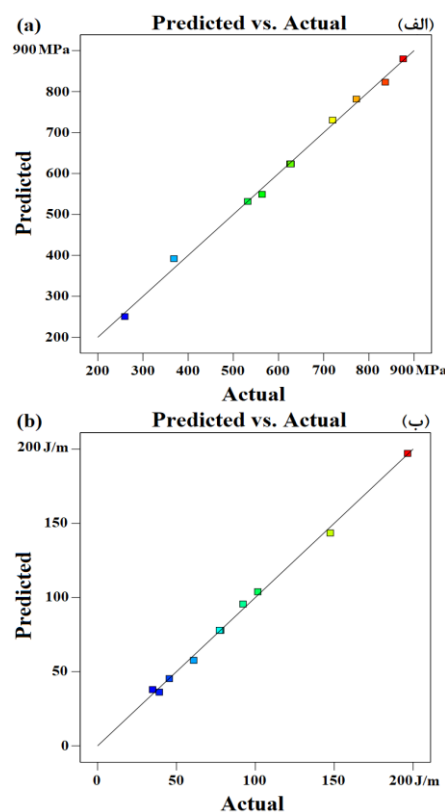


Fig. 6 Comparison of experimental and predicted data for a) tensile modulus b) impact strength relative to the diagonal line 45°

شکل 6 مقایسه داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده برای (الف) مدول کششی و (ب) استحکام ضربه‌ای نسبت به خط مورب 45°

5-4- بهینه‌سازی چند متغیره

شکل 7 بیانگر نحوه اثرگذاری دو پارامتر ورودی درصد وزنی لاستیک طبیعی (N) و درصد وزنی نانوذرات پرلیت (P) بر روی هر یک از خصوصیات مکانیکی مطالعه شده نظیر مدول کششی و استحکام ضربه‌ای است. با توجه به این تصاویر مشخص شد که بیشتر شدن مقدار درصد وزنی لاستیک طبیعی در ترکیب PP/NR/Perlite سبب اثرگذاری منفی این پارامتر بر مدول کششی شده است. در صورتی که این امر بر استحکام ضربه‌ای اثری مثبت دارد. بعلاوه، مشاهدات نشان می‌دهند که افزایش مقدار درصد وزنی نانوذرات پرلیت در حین اختلاط، تأثیر مثبتی بر مدول کششی گذاشته است اما بر روی استحکام ضربه‌ای اثر کاهشی دارد. بررسی‌ها نشان دادند که تأثیرات هر یک از پارامترهای موادی بر روی خصوصیات مختلف مکانیکی متفاوت است. از این رو، می‌توان با استفاده از جداول 5 و 6 آنالیز واریانس و روابط ریاضی نوشته شده، یک تابع هدف از پارامترهای ورودی و خصوصیات مکانیکی در جهت بیشینه کردن هم‌زمان خصوصیات مکانیکی نمونه ساخته شده تعیین کرد. همانطور که در جدول 7 مشخص شده است، مقدار درصدهای وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت در شرایطی که خصوصیات مکانیکی به طور هم‌زمان با استفاده از آنالیز واریانس بیشینه شدند را به ترتیب 35.268 wt. و 4.046 wt. نشان می‌دهد. ضمن آن که، تحت این مقادیر حداکثر مقدار مدول کششی 508.04 MPa و استحکام ضربه‌ای 108.52 J/m تعیین گردید. این مقادیر از نمودارهای بدست آمده به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت که در شکل 8 و 9 به ترتیب برای مدول کششی و استحکام ضربه‌ای آمده است، استخراج شد.

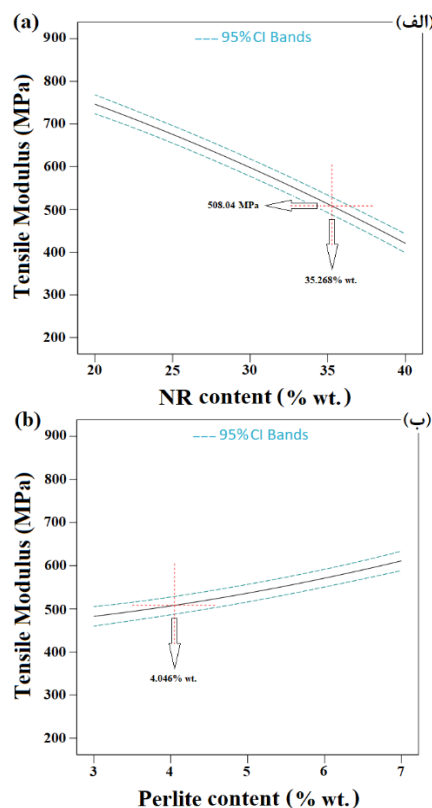


Fig. 8 The curves of optimal parameters in maximizing of tensile modulus

شکل 8 نمودار بهینه پارامترها در جهت بیشینه‌سازی مدول کششی

در برابر آزمون کشش و ضربه برخورداری هستند. به همین جهت می‌توان بیان کرد که تفاوت‌های ایجاد شده در مقدار خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه شده با درصد وزنی‌های گوناگون ناشی از تغییر در مقدار ویسکوزیته ترکیب و استفاده از نانوذرات با درصد‌های وزنی متنوع است. به بیان دیگر، با مشاهده اندازه حفره‌ها در نمونه‌های (ب) و (پ)، دریافت شد که بکارگیری 5 wt.% از نانوذرات پرلیت در ترکیب، توزیع بهتر نانوذرات را در فاز پایه پلیمری به همراه دارد. این امر سبب کاهش اندازه حفره‌های الاستومری در سراسر سطح شکست و افزایش خواص مکانیکی به واسطه افزایش مقاومت در برابر آزمون‌های کشش و ضربه‌ای شده است. اما با توجه به کلوخگی و تجمع نانوذرات در اثر افزایش مقدار آن به 9 wt.%، اندازه حفره‌های فاز الاستومری در مقایسه با نمونه (ب) کمی بزرگ‌تر بوده و به دلیل افزایش اندازه حفره‌های الاستومری از استحکام ضربه‌ای پایین‌تری نسبت به این نمونه برخوردار است. از طرفی، تصاویر مپینگ ثبت شده از سطح شکست برای دو نمونه الف) PP65N/30P/5 و ب) PP61N/30P/9 که در شکل 11 آمده است، نحوه پخش نانوذرات در سطح ماتریس پایه را نشان می‌دهد. به طوری که تراکم نانوذرات در مناطق مختلف ریزساختار نمونه (ب) اثری مخرب بر روی خواص مکانیکی نمونه تولیدی دارد و منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش در نمونه شده و مقدار استحکام ضربه‌ای را کاهش می‌دهد. به همین جهت خاصیت استحکام ضربه‌ای این نمونه کمتر از نمونه الف) بدست آمد [35، 36].

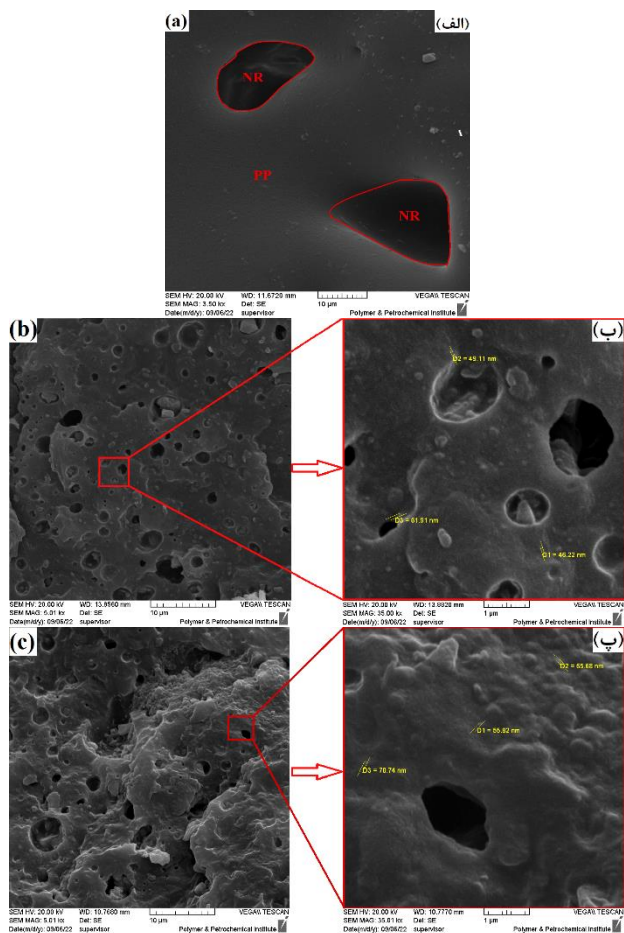


Fig. 10 The SEM images of fracture surface of nanocomposites a) PP70/N30/P0, b) PP65/N30/P5 and c) PP61/N30/P9

شکل 10 تصاویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت‌های الف) PP70/N30/P0، ب)

PP65/N30/P5 و پ) PP61/N30/P9

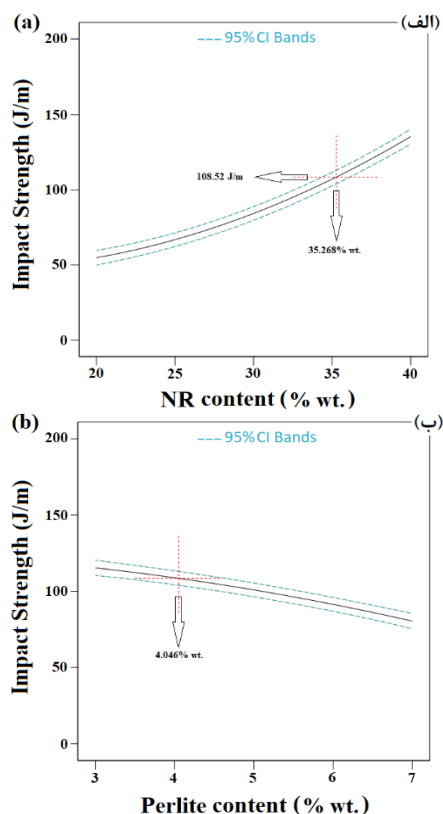


Fig. 9 The curves of optimal parameters in maximizing of impact strength

شکل 9 نمودار بهینه پارامترها در جهت بیشینه‌سازی استحکام ضربه‌ای

جدول 7 مقادیر پارامترها برای بیشینه کردن همزمان مدول کششی و استحکام ضربه‌ای
Table 7 The values of parameters for simultaneous maximization of tensile modulus and impact strength

MS (MPa)	درصد وزنی پرلیت (wt.%)	درصد وزنی لاستیک طبیعی (wt.%)
IS (J/m)		
508.04		
	4.046	35.268
108.52		

4-6 نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

مطالعه ریزساختار نمونه‌های نانوکامپوزیتی درک درستی از نحوه اختلاط مواد اولیه با یکدیگر، اندازه فاز الاستومری و همچنین چگونگی پخش نانوذرات در فاز پایه می‌دهد. در همین راستا، شکل 10 نشان‌دهنده تصاویر SEM گرفته شده از سطح شکست نمونه‌های الف) PP70N/30P/0، ب) PP65N/30P/5 و پ) PP61N/30P/9 است. در این تصاویر حفره‌های تیره به وجود آمده بیانگر اندازه فاز الاستومری خارج شده از ساختار نانوکامپوزیت می‌باشد. به نحوی که سطح شکست نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در محلول تولوئن غوطه‌ور شدند. از این رو، پس از مقایسه اندازه حفره‌ها در سه نمونه مذکور استنباط شد که اندازه فاز الاستومری در نمونه الف) به سبب عدم حضور نانوذرات پرلیت در فاز پایه آن، بزرگ‌تر از دو نمونه ب) و پ) است. این رفتار اثبات کرد که حضور نانوذرات در ترکیبات کامپوزیتی باعث کوچک شدن اندازه حفره‌های الاستومری شد. در نتیجه، خواص مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه‌ای نمونه ب) به جهت کوچک‌تر بودن اندازه حفره‌های ایجاد شده در ساختار آن، از مقاومت بیشتری

بزرگی از الاستومتر خارج شده توسط محلول تولوئن است که افزودن نانوذرات پرلیت به فاز پایه در دو نمونه PP61N/30P/9 و PP65N/30P/5 منجر به کاهش اندازه فاز الاستومری و افزایش مدول کششی و استحکام ضربه‌ای ماده شد.

(6) تصاویر میکینگ نشان داد، بهترین پخش نانوذرات در فاز پایه نمونه PP65N/30P/5 اتفاق افتاده است. در این نمونه توزیع مناسب نانوذرات با توجه به تصاویر میکینگ کاملاً مشهود است که منجر به افزایش مدول کششی این نمونه در مقایسه با نمونه بدون نانوذره شد. اما با توجه به افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت در نمونه PP61N/30P/9 مشاهده شد که نانوذرات در نواحی مختلفی متراکم شده‌اند و توزیع مناسبی در فاز پایه به سبب افزایش درصد وزنی پرلیت نسبت به نمونه PP65N/30P/5 انجام نگرفته است. این موضوع افزایش تمرکز تنش در نقاط کلوحه شدگی و در پی آن کاهش مقدار استحکام ضربه‌ای را به همراه داشت.

6- مراجع

- [1] Fereidoon, A., Memarian, S., Albooyeh, A.R. and Tarahomi, S., "Influence of mesoporous silica and hydroxyapatite nanoparticles on the mechanical and morphological properties of polypropylene" Materials & Design, Vol. 57, pp. 201-210, 2014.
- [2] Albooyeh, A.R., "The effect of addition of Multiwall Carbon Nanotubes on the vibration properties of Short Glass Fiber reinforced polypropylene and polypropylene foam composites" Polymer Testing, Vol. 74, pp. 86-98, 2019.
- [3] Mostafapour, A., Naderi, G. and Nakhaei, M.R., "Effect of process parameters on fracture toughness of PP/EPDM/nanoclay nanocomposite fabricated by novel method of heat assisted friction stir processing" Polymer Composites, Vol. 39, No. 7, pp. 2336-2346, 2018.
- [4] Bakhtiari, A., Ashenai Ghasemi, F., Naderi, G. and Nakhaei, M.R., "An approach to the optimization of mechanical properties of polypropylene/ nitrile butadiene rubber/ halloysite nanotube/ polypropylene-gmaleic anhydride nanocomposites using response surface methodology" Journal of Polymer Composites, Vol. 41, No. 6, pp. 2330-2343, 2020.
- [5] Albooyeh, A.R. and Fereidoon, A., "The effect of mesoporous silica and carbon nanotube on the vibration properties of polypropylene" In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 67-73., 2014.
- [6] Albooyeh, A.R. and Fereidoon, A., "Effect of Mesoporous Silica and Hydroxyapatite Nanoparticles on the Tensile and Dynamic Mechanical Thermal Properties of Polypropylene and Polypropylene Foam" In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 27, pp. 423-439., 2014.
- [7] Hoseinlghab, S., Farahani, M., Safarabadi M., and Nikkhah, M., "Tension-after-impact analysis and damage mechanism evaluation in laminated composites using AE monitoring" Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 186, 109844, 2023.
- [8] Mohammadkhani, P., Jalali, S.S. and Safarabadi, M., "Experimental and numerical investigation of Low-Velocity impact on steel wire reinforced foam Core/Composite skin sandwich panels" Composite Structures, Vol. 256, 112992, 2021.
- [9] Hadad, M., Babazade, A., and 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, pp. 1197-1206, 2021.
- [10] Hadad, M., Babazade, A., and Safarabadi, M., "Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplates and carbon nanotubes on the improvement of mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 109, pp. 2535-2547, 2020.

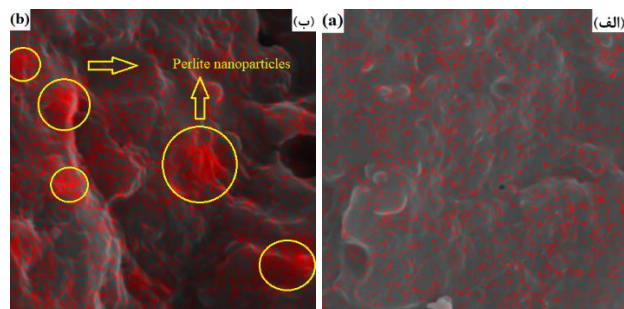


Fig. 11 Mapping images of fracture surface of nanocomposites a) PP₆₅/N₃₀/P₅ and b) PP₆₁/N₃₀/P₉

شکل 11 تصاویر میکینگ از سطح شکست نانوکامپوزیت‌های الف) PP₆₅/N₃₀/P₅ و ب) PP₆₁/N₃₀/P₉

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی بر پایه پلی‌پروپیلن (PP)/لاستیک طبیعی (NR) تقویت‌شده با نانوذرات پرلیت با روش اختلاط مذاب در یک مخلوط‌کن داخلی انجام شد. سپس، برای پیش‌بینی خواص مکانیکی (مدول کششی و استحکام ضربه‌ای) و مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی، از روش پاسخ سطح (RSM) در قالب مرکب مرکزی پنج سطحی (CCD) جهت بررسی و مطالعه اثر بخشی دو پارامتر موادی درصد وزنی لاستیک طبیعی با حدود تغییرات 10، 20، 30، 40 و 50 wt.% و درصد وزنی نانوذرات پرلیت با حدود تغییرات 1، 3، 5، 7 و 9 wt.% به همراه تعیین مدل‌های ریاضی استفاده شد. نتایج بدست آمده را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

- (1) طبق نتایج آنالیز واریانس و مقادیر بدست آمده توسط مدل‌های ریاضی برای مدول کششی و استحکام ضربه‌ای مشاهده شد که مؤلفه $N \times P$ برای مدول کششی به جهت مقدار ضریب پی بالاتر از 0.05، در نگارش روابط ریاضی و همچنین فرایند پیش‌بینی خواص مکانیکی بهینه به سبب تأثیر ناچیز روی مقدار پاسخ نهایی، حذف شده است.
- (2) با توجه به نزدیکی نقاط حاصل از نتایج تجربی برحسب داده‌های پیش‌بینی شده نسبت به خط 45° در نمودار اعتبار سنجی، مشاهده شد پاسخ مدل‌های ریاضی بدست آمده از روش پاسخ سطح نشان از صحت این روابط و تطابق مطلوب بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده دارد.
- (3) دیاگرام‌های دوبعدی و سه‌بعدی پاسخ سطح مدول کششی و استحکام ضربه‌ای، نشان‌دهنده رفتار متفاوت این خواص با درصد‌های وزنی مختلف است. با بررسی این دیاگرام‌ها مشاهده شد، با ثابت نگه داشتن مقدار لاستیک طبیعی در 20 wt.% و افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت از 3 تا 7 wt.%، حداکثر مقدار مدول کششی 822.99 MPa بدست آمد. اما بر خلاف مدول کششی، مقدار بیشینه استحکام ضربه‌ای در شرایطی که مقدار نانوذرات پرلیت از 7 به 3 wt.% کاهش و مقدار لاستیک طبیعی از 20 به 40 wt.% افزایش یابد، 143.46 J/m بدست آمد.
- (4) با استفاده از نتایج بهینه‌سازی چند متغیره، مقادیر بهینه هر یک از دو پارامتر موادی، در شرایطی که مدول کششی و استحکام ضربه‌ای به طور همزمان در مقدار بیشینه خود باشند، به ترتیب 4.046 wt.% از نانوذرات پرلیت و 35.268 wt.% از لاستیک طبیعی بدست آمد. در نتیجه بیشترین مقدار حاصل شده برای مدول کششی 508.04 MPa و استحکام ضربه‌ای 108.52 J/m تعیین شد.
- (5) تصویر SEM ثبت شده از نمونه PP70N/30P/0 نشان‌دهنده حفره‌های

- [27] 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, No. S1, pp. E421-E432, 2017.
- [28] Nouri-Niyaraki, M., Ashenai-Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental analysis of graphene nanoparticles and glass fibers effect on mechanical and thermal properties of polypropylene/ EPDM based nanocomposites" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 2, pp. 169-176, 2018.
- [29] Maleki Khorasgani, A. and Shahrajabian, H., "Investigation of the physical and mechanical properties of wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/ recycled poly (ethylene terephthalate): part II, Constrained Optimization" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 119-126, 2019.
- [30] Nakhaei, M. R., Mostafapour, A., Dubois, C., Naderi, G., & Reza Ghoreishy, M. H., "Study of morphology and mechanical properties of PP/EPDM/clay nanocomposites prepared using twin-screw extruder and friction stir process. *Polymer composites*" Vol. 40, No. 8, pp. 3306-3314, 2019.
- [31] Ning, N., Li, S., Wu, H., Tian, H., Yao, P., Hu, Guo-Hua., Tian, M. and Zhang, L., "Preparation, microstructure, and microstructure-properties relationship of thermoplastic vulcanizates (TPVs): A review" *Progress in Polymer Science*, Vol. 79, pp. 61-97, 2018.
- [32] Fasihi, M. and Mansouri, H., "Effect of Rubber Interparticle distance distribution on toughening behavior of thermoplastic polyolefin elastomer toughened polypropylene" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, No. 40, pp. 44068, 2016.
- [33] Yaghoobi, H. and Fereidoon, A., "An experimental investigation and optimization on the impact strength of kenaf fiber biocomposite: application of response surface methodology" *Polymer Bulletin*, Vol. 75, No. 8, pp. 3283-3309, 2018.
- [34] Mousavi, S.R., Faraj Nejad, S., Jafari, M. and Paydayesh, A., "Polypropylene/ethylene propylene diene monomer/cellulose nanocrystal ternary blend nanocomposites: Effects of different parameters on mechanical, rheological, and thermal properties" *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 9, pp. 4187-4198, 2021.
- [35] Soleymani, H., Nakhaei, M.R. and Naderi, Gh., "Experimental and mathematical investigation of mechanical and microstructural properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with silicon carbide (SiC) nanoparticles" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 4, pp. 1789-1796, 2022.
- [36] Mehrdad Shokrieh, M., Zeinedini, A., and Ghoreishi, M., "Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites" In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 125-133, 2015.
- [11] Albooyeh, A.R., Tarahomi, S., Fereidoon, A. and Taherian, Z., "The effect of processing conditions on the mechanical properties of polypropylene/mesoporous silica-hydroxyapatite hybrid nanocomposites" *Mechanics Of Advanced Composite Structures*, Vol. 3, No. 2, pp. 73-82, 2016.
- [12] Bastam, K., and Zeinedini, A., "Tensile properties of flexible latex-based composites reinforced by cotton fibers in the presence of shape memory alloys, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites* Vol. 8, pp. 1780-1788, 2022.
- [13] Ghorbankhan, A., Nakhaei, M.R. and Safarpour, P., "Modeling and optimization of mechanical properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with perlite nanoparticles" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1421-1430, 2021.
- [14] Sahraeian, R. and Esfandeh, M., "Mechanical and morphological properties of LDPE/perlite nanocomposite films Polym" *Polymer Bulletin*, Vol. 74, No. 4, pp. 1327-1341, 2017.
- [15] Sahraeian, R., Hashemi, S.A., Esfandeh, M. and Ghasemi, I., "Preparation of nanocomposites based on LDPE/Perlite: Mechanical and Morphological Studies" *Polymers and Polymer Composites*, Vol. 20, No. 7, pp. 639-646, 2012.
- [16] De Oliveira, A.G., Jandorno Jr, J.C., da Rocha, E.B.D., de Sousa, A.M.F. and da Silva, A.L.N., "Evaluation of expanded perlite behavior in PS/Perlite composites" *Applied Clay Science*, Vol. 181, No. 15, 105223, 2019.
- [17] Albooyeh, A.R., Soleymani, P., and Taghipoor, H., "Evaluation of the mechanical properties of hydroxyapatite-silica aerogel/ epoxy nanocomposites: Optimizing by response surface approach" *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 136, No. 105513, 2022.
- [18] Yaghoobi, H. and Fereidoon, A., "Modeling and optimization of tensile strength and modulus of polypropylene/ kenaf fiber bio composites using box-behnken response surface method" *Polymer Composites*, Vol. 39, No. S1, pp. E1-E646, 2018.
- [19] Sharma, S.K. and Nayak, S.K., "Surface modified clay/ polypropylene (PP) nanocomposites: Effect on physico-mechanical, thermal and morphological properties" *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 94, No. 1, pp. 132-138, 2009.
- [20] Golparvar, M. and Fasihi, M., "Investigation of mechanical properties of polypropylene-based hybrid nanocomposites using experimental design" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 307-314, 2018.
- [21] Daneshpayeh, S., Ashenai Ghasemi, F. and Ghasemi, I., "Mechanical properties of nanocomposites based on polypropylene-linear low density polyethylene-titanium dioxide nano particles by response surface methodology" *Journal of Tabriz Mechanical Engineering*, Vol. 77, pp. 903-101, 2017.
- [22] Bicy, K., Rouxel, D., Poncot, M., Royaud, I., Bourson, P., Chapron, D., Kalarikkal, N. and Thomas, S., "Interfacial tuning and designer morphologies of microporous membranes based on polypropylene/natural rubber nanocomposites" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 138, No. 41, pp. 51208, 2021.
- [23] Lopattananon, N., Tanglakwaraskul, S., Kaesaman, A., Seadan, M. and Sakai, T., "Effect of nanoclay addition on morphology and elastomeric properties of dynamically vulcanized natural rubber/ polypropylene nanocomposites" *International Polymer Processing*, Vol. 29, No. 3, 2014.
- [24] Sharika, T., Abraham, J., Arif P, M., George, S.C., Kalarikkal, N. and Thomas, S., "Excellent electromagnetic shield derived from MWCNT reinforced NR/PP blend nanocomposites with tailored microstructural properties" *Composites Part B*, Vol. 173, 106798, 2019.
- [25] Chandran, N., Sarathchandran, C., Jose, S., Thankappan, S. and Thomas, S., "Organic modifier induced interfacial transformation, morphology and physico-mechanical properties of PP/NR based blend nanocomposites" *Composites Part B*, Vol. 194, 2020.
- [26] Banerjee, S., Joshi, M. and Ghosh, A.K., "Optimization of polypropylene/ clay nanocomposite processing using box-behnken statistical design" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, No. 4, pp. 2042-2051, 2012.



تحلیل پارامتری ضربه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی با رویه FML و هسته مدرج تابعی با استفاده از یک تئوری پوسته جدید

علی داور^{1*}، محسن حیدری بنی²، رضا آذرافزا¹، جعفر اسکندری جم³

1- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

2- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

3- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

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

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/11/26

پذیرش: 1402/01/15

کلیدواژگان

پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی،

ضربه عرضی سرعت پایین،

تئوری مرتبه بالای تصحیح شده،

مدل ضربه

در مقاله حاضر به تحلیل پارامتری ضربه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی با رویه FML و هسته مدرج تابعی با استفاده از یک تئوری پوسته جدید پرداخته شده است. در این پژوهش دو مدل جدید، ساده و مهندسی برای پیش‌گویی تاریخچه نیروی تماس ناشی از برخورد عرضی شبه استاتیکی توسط ضربه‌زننده الاستیک و ایزوتروپیک به شکل کره، با سرعت پایین به پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ارائه شده است. این دو مدل عبارتند از مدل نیم سینوسی (یا H-S) و مدل جرم و فنر بهبود یافته با دو درجه آزادی (یا IS-M). در مدل H-S حداکثر نیروی تماس و مدت زمان تماس به روش تحلیلی استخراج شده‌اند. در مدل IS-M، ابتدا جرم و سفتی مؤثر پوسته در محل تماس به روش تحلیلی محاسبه شده، سپس با استفاده از روش تکرار و رسیدن به همگرایی، سفتی تماس اصلاح شده به دست آمده است. اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر با مقایسه با نتایج تئوری و تجربی سایر محققین و نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته و تطابق خوبی حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهند که هر چه اثر عبارت‌های $(1 + z/R)$ دقیق‌تر محاسبه شوند، دقت محاسبه پاسخ ضربه افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج عددی نشان می‌دهند که برخی پارامترها از جمله ساختار، جنس و زاویه لایه‌ها و کسر حجمی فلز (MVF) و نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل پوسته در پوسته‌های ساندویچی FML/هسته/FML با هسته FGM، اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی پاسخ ضربه این پوسته‌ها می‌گذارند.

Parametric analysis of impact on sandwich cylindrical shells with FML face and functionally graded core using a new shell theory

Ali Davar^{1*}, Mohsen Heydari Beni¹, Reza Azarafza¹, Jafar Eskandari Jam¹

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

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

Keywords

Composite cylindrical shells,
Low-velocity transverse impact,
Modified Higher-order theory,
Impact model.

Abstract

In this paper, the parametric analysis of the impact on cylindrical sandwich shells with the FML face sheet and functionally graded core using a new shell theory is discussed. In this research, two new, simple and engineering models have been presented to predict the history of the contact force caused by a quasi-static transverse impact by an elastic and isotropic impactor in the shape of a sphere, with a low speed, to a composite cylindrical shell. These two models are the half-sine model (or H-S) and the improved mass and spring model with two degrees of freedom (or IS-M). In the H-S model, the maximum contact force and contact duration have been extracted analytically. In the IS-M model, first the mass and the effective stiffness of the shell at the contact point are calculated analytically, then using the successive method and reaching convergence, the modified contact stiffness is obtained. Validation of the present research results was done by comparing the theoretical and experimental results of other researchers and the results of the ABAQUS software, and a good match has been achieved. The results show that the more accurately the effect of $(1+z/R)$ terms are calculated, the higher the accuracy of estimating the impact response. Also, the numerical results show that some parameters such as the structure, material and angle of the layers and the metal volume fraction (MVF) and the ratio of the core thickness to the total thickness of the shell in FML/Core/FML sandwich shells with FGM core have a significant effect on the impact response.

1- مقدمه

ساختارهای ساندویچی کامپوزیتی FML^1 /هسته/FML در سازه سیستم‌های هوافضایی، از جمله در فیرینگ² (سطوح آیرودینامیکی محافظ) بار محموله موشک‌های ماهواره‌بر کاربرد دارند. ساختارهای مورد استفاده در فیرینگ‌های سیستم‌های حامل بار محموله به فضا، از بار محموله در برابر بارهای حرارتی، آکوستیکی، تداخل امواج الکترومغناطیسی، فروریزش ناگهانی ناشی از فشار آیرودینامیکی خارجی و همچنین برخورد اجرام ریز موجود در اتمسفر، محافظت می‌کنند. با توجه به مقاومت فلز تیتانیوم در دماهای بالا، از قابلیت استفاده در FML برای افزایش مقاومت حرارتی برخوردار است. تاکنون تحقیقات فراوان در حوزه ضربه بر روی ورق‌های کامپوزیتی انجام شده است. لیکن تعداد تحقیقات انجام شده تاکنون راجع به ضربه روی پوسته‌های استوانه-ای کامپوزیتی بسیار کم بوده است. در ادامه، به آن دسته از تحقیقات انجام شده راجع به ضربه روی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی که از منظر موضوعی به پژوهش حاضر نزدیک‌تر هستند، اشاره شده است.

کریشنامورثی³ و همکاران [1] پاسخ ضربه و آسیب ناشی از آن برای پوسته کامپوزیتی چندلایه توسط یک ضربه زننده فلزی را با روش المان محدود مطالعه کردند. از قانون تماس هرگز برای محاسبه نیروی تماس بین جرم ضربه زننده و پوسته استفاده شده است. اثر پارامترهای مهم مسئله، مانند جرم و سرعت ضربه زننده، انحنای پوسته و ترتیب چیدمان لایه‌ها بررسی شده است. نیروی تماس و پاسخ سازه‌ای برای تغییر شکل‌های زیاد در مورد پانل‌های انحنادار استوانه‌ای محاسبه شده است.

گانگ و لام⁴ [2] پدیده ضربه را روی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی در حال چرخش تحلیل کردند. از تئوری کلاسیک پوسته‌ها و تقریب اول لاو با در نظر گرفتن اثر شتاب کوریولیس استفاده کردند. بار ضربه‌ای را به صورت یک پالس نیم سینوسی با نیروی قله، با مقدار عددی از قبل تعریف شده، در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت پارامتر بار ضربه‌ای به سرعت چرخش استوانه، ماکزیمم تغییر شکل تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

کریشنامورثی و همکاران [3] پاسخ ضربه پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی چندلایه را با دو روش کلاسیک سری فوری و المان‌های محدود تعیین کردند. پاسخ ضربه‌ای که توسط روش المان محدود به دست آمده، شامل پیشگویی آسیب ناشی از ضربه بر پایه مدل پیشگویی آسیب نیمه تجربی چوی-چانگ می‌باشد. در روش تحلیلی، حل با استفاده از روش عددی جایگزین، در ارتباط با قانون تماس غیرخطی هرگز، انجام شده که قابلیت فرورفتگی موضعی ناشی از جسم فرورونده⁵ روی سطح ضربه را فراهم می‌کند. دابینین و بانیکیف⁶ [4] حل مسئله معکوس⁷ را به منظور آشکارسازی محل ضربه روی پوسته و جرم و سرعت ضربه زننده انجام دادند. آن‌ها اثر برخورد قطعات لق شده یا جدا شده را بر روی سازه اصلی نیروگاه هسته‌ای یا خطوط لوله، بررسی کردند. مدل کاری آن‌ها، برخورد یک جرم صلب به پوسته استوانه‌ای بود. وابستگی نیروی ضربه و شتاب یک نقطه از پوسته برحسب زمان را از آزمون تجربی به‌عنوان ورودی تحلیل دریافت کرده، محاسبات تئوری را با نتایج تجربی تأیید کردند.

سونوکاک⁸ و همکاران [5] آنالیز پاسخ ضربه برای یک پوسته استوانه‌ای ایزوتروپیک را با استفاده از بسط توابع ویژه و تئوری الاستودینامیک سه‌بعدی انجام دادند. شرایط مرزی دو انتهای پوسته را مفصلی در نظر گرفتند. بار ضربه‌ای را به صورت یک بار یکنواخت توزیع شده که به صورت ناگهانی روی یک بخش از سطح خارجی وارد می‌شود، اعمال کردند. نتایج عددی برای پاسخ تنش و تغییر مکان نقاط مختلف دلخواه را به دست آوردند. آن‌ها اثر ناهمسانگردی را روی پاسخ ضربه بررسی کردند. همچنین به این نتیجه دست یافتند که پاسخ تنش بزرگ‌تر، در جهتی رخ می‌دهد که مدول الاستیک طولی بالاتری دارد.

گنینگ⁹ و همکاران [6] ضربه روی پوسته‌های کامپوزیتی را در دو بخش بررسی کردند. بخش اول شامل تعیین و مدل‌سازی آسیب و توسعه آن در پوسته‌های استوانه‌ای تحت ضربه وزنه‌ای افتان است. بخش دوم شامل ارزیابی اثر این آسیب روی تنش پس‌ماند و فشار هیدرواستاتیکی است. آن‌ها برای مدل‌سازی و تعیین پاسخ ضربه و آسیب، از روش المان محدود و از نرم‌افزار آباکوس¹⁰ استفاده نمودند. نتایج آزمون تجربی با نتایج نرم‌افزار تطابق بسیار خوبی داشته است.

جعفری و همکاران [7] پاسخ دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت تنش‌های اولیه و ایمپالس جانبی را مطالعه کردند. ایشان ارتعاشات آزاد و پاسخ دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی چندلایه با شرایط مرزی مختلف را تحت بار ایمپالس جانبی وارد بر روی یک سطح مستطیلی و با در نظر گرفتن اثرات پیش‌تنیدگی (مانند نیروی محوری و فشار داخلی) بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و تقریب اول لاو مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها حل معادلات ارتعاشات آزاد را با استفاده از روش گالرکین انجام دادند. با استفاده از نتایج تحلیل ارتعاشات آزاد و با استفاده از انتگرال کانولوشن، پاسخ زمانی مؤلفه‌های جابجایی را بر اساس روش جمع مودها رسم کردند.

کومار¹¹ و همکاران [8] پاسخ ضربه و آسیب ناشی از ضربه را در کامپوزیت‌های چندلایه انحنادار تحت ضربه عرضی توسط ضربه زننده فلزی را با روش المان محدود سه‌بعدی مطالعه کردند. چندین مثال از پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی گرافیت/اپوکسی را حل کرده و اثر پارامترهای ضربه‌زننده (جرم و سرعت) و مشخصات چندلایه (انحنای پوسته و زاویه الیاف) را در این مثال‌ها بررسی کردند. آن‌ها آسیب ناشی از ضربه (شامل تورق و ترک در ماتریس) را با استفاده از معیار واماندگی بر پایه تنش سه‌بعدی مناسب پیش‌گویی کردند. ایشان به منظور در نظر گرفتن کاهش خواص مکانیکی منطقه آسیب دیده ناشی از ضربه، ماتریس سفتی المان‌های واقع در ناحیه وامانده را، در حین حل کاهش دادند.

خلیلی و همکاران [9] پاسخ دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت تنش‌های اولیه و ایمپالس جانبی را مطالعه کردند. ایشان ارتعاشات آزاد و پاسخ دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی چندلایه با شرایط مرزی ساده را با در نظر گرفتن اثر نیروی محوری توأم با فشار داخلی، بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و تقریب اول لاو مورد بررسی قرار دادند. ایشان پس از مطالعه اثر نیروی محوری توأم با فشار داخلی روی پاسخ زمانی پوسته، به این نتیجه دست یافتند که فرکانس طبیعی و پاسخ دینامیکی

⁷ Inverse problem⁸ Tsunokake⁹ Gning¹⁰ ABAQUS¹¹ Kumar¹ Fibre-metal laminates² Firing³ Krishnamurthy⁴ Gong and Lam⁵ Indenter⁶ Dubinin and Bannikov

پوسته کامپوزیتی جدار نازک، نسبت به فشار داخلی حساسیت بیشتری در مقایسه با نیروی محوری دارد.

احمدی و صدیقی [10] مسئله ضربه سرعت پایین توسط یک ضربه زنده صلب نیم کره بر روی یک پوسته استوانه‌ای FGM¹ را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از یک مدل المان محدود، ماتریس جرم، سفتی و میرایی سازه را استخراج کردند. با استفاده از روش نیومارک معادلات حاکم را حل کردند. آن‌ها از قانون تماس هرترز اصلاح یافته برای مدل‌سازی تماس بین پوسته و ضربه زنده استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش سرعت، نوسانات در پاسخ پوسته استوانه‌ای افزایش می‌یابد و ضربه‌های دوم و سوم به وقوع می‌پیوندند. همچنین نشان دادند که برای پوسته‌های استوانه‌ای FGM با افزایش ضخامت، مدت زمان تماس کاهش و حداکثر نیروی تماس افزایش می‌یابد.

ستوده و انفرادی [11] ضربه سرعت پایین روی پوسته‌های کامپوزیتی رشته‌پیچی را به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی کردند. آنالیز ارتعاشات آزاد و آنالیز دینامیکی به روش ضمنی² را برای مطالعه اثر میرایی روی پاسخ پوسته کامپوزیتی چندلایه در معرض بارگذاری ضربه با سرعت پایین انجام دادند. آن‌ها اثر میرایی سازه‌ای را بر روی نیروی تماس، خیز نقطه محل تماس و سرعت و انرژی جسم ضربه زنده مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میرایی سازه‌ای سبب افزایش نیروی تماس و کاهش خیز نقطه محل تماس می‌شود. همچنین انرژی تلف شده ناشی از میرایی سازه‌ای، در مقابل انرژی سیستم بدون میرایی قابل صرف‌نظر است.

رحمانی و همکاران [12] رفتار پوسته ساندویچی با هسته انعطاف‌پذیر را با استفاده از اصل هامیلتون مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تئوری مرتبه بالای جدید برای تحلیل رفتار دینامیکی پوسته‌های ساندویچی ضخیم ارائه دادند. برای مدل‌سازی اثر رویه‌ها از تئوری کلاسیک پوسته و برای مدل‌سازی هسته از تئوری الاستیسیته بهره بردند. اثرات غیرخطی صفحه‌ای و جابجایی‌های قائم هسته را در تئوری مرتبه بالا لحاظ کردند. آن‌ها نتیجه‌های تنش و جابجایی‌ها در رویه‌ها و هسته و تنش‌های برشی و نرمال متقابل بین هسته و رویه‌ها را در معادلات وارد کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که الگوهای ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی پیچیده‌تر از پوسته‌های استوانه‌ای همگن است.

بیات و همکاران [13] در مطالعه‌ای، رفتار غیرخطی پوسته‌ای استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله کربنی در برابر ضربه‌ی سرعت پایین در دماهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. توزیع نانولوله‌ها در راستای ضخامت به صورت مدرج تابعی در نظر گرفتند. برای محاسبه‌ی خواص مکانیکی مؤثر، از مدل‌های میکرومکانیکی استفاده شد. معادلات حرکت بر پایه‌ی تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالا با ترم غیرخطی هندسی از نوع ونکارمن، بوده است.

مامندی و سلیمان‌زاده [14] تحلیل ارتعاشات گذرای غیرخطی ضربه با سرعت پایین بر روی پوسته استوانه‌ای مرکب تحت فشار داخلی با استفاده از روش‌های تحلیلی و اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی حاکم بر حرکت پوسته با استفاده از نظریه غیرخطی پوسته دانیل استخراج شده است. نیروی برخورد ناشی از ضربه زنده با قانون تماس اصلاح شده هرترز مدل شده است. برای مدل‌سازی ضربه با سرعت پایین در

روش تحلیلی از مدل ارائه شده توسط شیواکمار بهره گرفته شده است. با استفاده از روش گالرکین معادلات دیفرانسیل غیرخطی حاکم بر ارتعاشات پوسته حل شده‌اند. سپس، پاسخ دینامیکی و تنش‌ی پوسته تحت ضربه با سرعت پایین به کمک روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و برنامه توسعه داده شده در محیط نرم‌افزار ریاضی متمتیکا³ تحلیل شده است. ژائو⁴ و همکاران [15] در پژوهشی، دنباله‌ای از تجمع بر روی ارتعاش پوسته استوانه‌ای ورقه‌ای فلزی الیافی (FML) در فاز میکرو با استفاده از نظریه تنش کوپل توسعه داده‌اند. اصل همیلتون برای استخراج معادلات غیر کلاسیک حرکت پوسته ریز استوانه‌ای نازک وابسته به اندازه بر اساس اولین نظریه تقریب لاو انجام شده است. از موری تاکانا و قانون توسعه یافته مخلوط به ترتیب برای تخمین ویژگی‌های مکانیکی نانولوله‌های کربنی و فیبر معادل آن استفاده شده است.

بر اساس جستجوی انجام شده توسط نگارنده، تاکنون به بحث ضربه روی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی FML/هسته/FML با هسته FGM پرداخته نشده است. لذا در پژوهش حاضر، تحلیل ضربه روی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی FML/هسته/FML با هسته FGM انجام پذیرفته است. در این پژوهش، با ارتقای دقت تئوری‌های مرتبه بالای موجود، تئوری پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مرتبه بالای تصحیح شده جدید با دوازده مؤلفه جابجایی توسعه داده شده است. در این تئوری، اثر عبارت‌های مربوط به شکل دوزنقه‌ای مقطع پوسته $(1+z/R)$ در نتیجه‌های تنش پوسته به‌طور دقیق محاسبه شده است. پس از افزودن انرژی کرنشی نظیر جلوگیری از چرخش جسم صلب به تابعی (فانکشنال) انرژی پوسته، بر اساس اصل هامیلتون، معادلات تعادل پوسته استوانه‌ای دو سر ساده استخراج شده‌اند. با استفاده از این معادلات، تحلیل پوسته تحت بارگذاری عرضی دینامیکی (با توزیع یکنواخت بر روی یک سطح مربعی کوچک) انجام شده‌اند. همچنین دو مدل ضربه جدید تحت عنوان نیم‌سینوسی یا "H-S" و مدل جرم و فنر بهبود یافته دو درجه آزادی "IS-M" یا "IS-M" برای تحلیل ضربه شبه استاتیکی ارائه شده است.

2- معادلات حاکم

با محاسبه عبارت‌های مربوط به کار و انرژی در تابعی اصل همیلتون [16]، امکان استخراج معادلات تعادل پوسته فراهم می‌آید. بدین نحو که بر مبنای قضیه اساسی حساب تغییرات⁵، مجموع کل ضرایب عبارت‌های $\delta u_0, \delta u_1, \delta u_2, \delta w_0, \delta w_1, \delta w_2, \delta v_0, \delta v_1, \delta v_2, \delta \theta_0, \delta \theta_1, \delta \theta_2, \delta \phi_0, \delta \phi_1, \delta \phi_2, \delta \psi_0, \delta \psi_1, \delta \psi_2$ در عبارات زیر انتگرال‌های دوگانه بایستی برابر صفر قرار داده شوند. با انجام این کار، پس از مرتب‌سازی، معادلات تعادل به صورت زیر به دست آمده‌اند:

معادله اول، ضرایب δu_0 :

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial N_{\phi x}}{\partial \phi} + (1-\gamma_0) \left(-\frac{1}{2R^2} \frac{\partial M_{\phi x}}{\partial \phi} - \frac{1}{2R} \frac{\partial N_{\phi x}}{\partial \phi} + \frac{1}{2R} \frac{\partial N_{x\phi}}{\partial \phi} \right) = \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \bar{I}_0 + \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \bar{I}_1 + C_3 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \bar{I}_2 + C_4 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \bar{I}_3 \quad (1)$$

معادله دوم، ضرایب δv_0 :

$$\frac{1}{R} \frac{\partial N_{\phi}}{\partial \phi} + \frac{\partial N_{x\phi}}{\partial x} + \frac{1}{R} Q_{\phi} + \gamma_0 \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial M_{\phi}}{\partial \phi} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_{x\phi}}{\partial x} + \frac{1}{R^2} S_{\phi} - \frac{1}{R} R_{\phi} \right) + (1-\gamma_0) \left(\frac{1}{2R} \frac{\partial M_{\phi x}}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{\phi x}}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial N_{x\phi}}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} (\bar{I}_0 + \frac{2\gamma_0}{R} \bar{I}_1 + \frac{\gamma_0}{R^2} \bar{I}_2) + \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} (\bar{I}_1 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_2) + C_3 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} (\bar{I}_2 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_3) + C_4 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} (\bar{I}_3 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_4) \quad (2)$$

⁴ zhao

⁵ Fundamental lemma of the calculus of variations

¹ Functionally graded materials

² implicit

³ Mathematica

معادله سوم، ضرایب δw_0 :

معادله دوازدهم، ضرایب $\delta \theta_z^*$ ، در حالت $C_2 = 1$:

$$-\frac{1}{R} M_\phi^* - 3N_z^* + \frac{\partial S_x^*}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial S_\phi^*}{\partial \phi} - \frac{h^3}{8} (q_t - q_b) =$$

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \bar{I}_3 + C_1 \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial t^2} \bar{I}_4 + C_1 \frac{\partial^2 w_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_5 + \frac{\partial^2 \theta_z^*}{\partial t^2} \bar{I}_6 \quad (12)$$

که در روابط (1) تا (12)، اینرسی‌های جرمی به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$(\bar{I}_0, \bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4, \bar{I}_5, \bar{I}_6)$$

$$= \sum_{i=1}^{NL} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho_k (1, z, z^2, z^3, z^4, z^5, z^6) (1 + \gamma_0 z/R) dz \quad (13)$$

که در رابطه (13)، ρ_k عبارت است از چگالی لایه k -ام. همچنین با استفاده از اصل هامیلتون، امکان استخراج معادلات شرایط مرزی پوسته نیز فراهم می‌آید. بار دیگر بر مبنای قضیه اساسی حساب تغییرات، مجموع کل ضرایب عبارت‌های δu_0^* ، δw_0^* ، δv_0^* ، δu_0^* ، $\delta \theta_z$ ، $\delta \theta_\phi$ ، $\delta \theta_x$ ، δw_0 ، δv_0 ، δu_0 ، $\delta \theta_z^*$ و $\delta \theta_\phi^*$ در عبارات زیر انتگرال‌های یگانه در روابط، بایستی برابر صفر قرار داده شوند. با انجام این کار، پس از مرتب‌سازی، معادلات شرایط مرزی در $x = L$ و $x = 0$ به صورت زیر به دست آمده‌اند:

$$\begin{aligned} \delta u_0 = 0 & \rightarrow N_x - \hat{N}_x = 0 \\ \delta v_0 = 0 & \rightarrow (N_{x\phi} + \gamma_0/R M_{x\phi}) - (\hat{N}_{x\phi} + \gamma_0/R \hat{M}_{x\phi}) = 0 \\ \delta w_0 = 0 & \rightarrow Q_x - \hat{Q}_x = 0 \\ \delta \theta_x = 0 & \rightarrow M_x - \hat{M}_x = 0 \\ \delta \theta_\phi = 0 & \rightarrow M_{x\phi} - \hat{M}_{x\phi} = 0 \\ C_1 \delta \theta_z = 0 & \rightarrow C_1 (S_x - \hat{S}_x) = 0 \\ C_3 \delta u_0^* = 0 & \rightarrow C_3 (N_x^* - \hat{N}_x^*) = 0 \\ C_3 \delta w_0^* = 0 & \rightarrow C_3 (N_{x\phi}^* - \hat{N}_{x\phi}^*) = 0 \\ C_1 \delta w_0^* = 0 & \rightarrow C_1 (Q_x^* - \hat{Q}_x^*) = 0 \\ C_4 \delta \theta_x^* = 0 & \rightarrow C_4 (M_x^* - \hat{M}_x^*) = 0 \\ C_4 \delta \theta_\phi^* = 0 & \rightarrow C_4 (M_{x\phi}^* - \hat{M}_{x\phi}^*) = 0 \\ C_2 \delta \theta_z^* = 0 & \rightarrow C_2 (S_x^* - \hat{S}_x^*) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

3- تحلیل بارگذاری ضربه

در این بخش، به منظور محاسبه تغییر شکل‌های پوسته استوانه‌ای در معرض بارگذاری عرضی¹، به حل معادلات تعادل پوسته استوانه‌ای، پرداخته شده است. تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در پوسته‌های استوانه‌ای تحت تأثیر بارهای دینامیکی، از عوامل تعیین‌کننده در طراحی این سازه‌ها می‌باشد. در کاربردهای عملی، این بارهای دینامیکی ممکن است به صورت ضربه (برخورد جسم خارجی) بر پوسته وارد شوند. بنابراین در این پژوهش، بار دینامیکی به

$$-\frac{1}{R} N_\phi + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial Q_\phi}{\partial \phi} - q_t - q_b =$$

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \bar{I}_0 + C_1 \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial t^2} \bar{I}_1 + C_1 \frac{\partial^2 w_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_2 + C_2 \frac{\partial^2 \theta_z^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 \quad (3)$$

معادله چهارم، ضرایب $\delta \theta_x$:

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_{\phi x}}{\partial \phi} - Q_x = \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \bar{I}_1 + \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} \bar{I}_2 + C_3 \frac{\partial^2 u_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 + C_4 \frac{\partial^2 \theta_x^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 \quad (4)$$

معادله پنجم، ضرایب $\delta \theta_\phi$:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial M_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial M_{x\phi}}{\partial x} + \frac{1}{R} S_\phi - R_\phi =$$

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} (\bar{I}_1 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_2) + \frac{\partial^2 \theta_\phi}{\partial t^2} \bar{I}_2 + C_3 \frac{\partial^2 v_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 + C_4 \frac{\partial^2 \theta_\phi^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 \quad (5)$$

معادله ششم، ضرایب $\delta \theta_z$ ، در حالت $C_1 = 1$:

$$-\frac{1}{R} M_\phi - N_z + \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial S_\phi}{\partial \phi} - \frac{h}{2} (q_t - q_b) =$$

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \bar{I}_1 + \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial t^2} \bar{I}_2 + \frac{\partial^2 w_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 + C_2 \frac{\partial^2 \theta_z^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 \quad (6)$$

معادله هفتم، ضرایب δu_0^* ، در حالت $C_3 = 1$:

$$\frac{\partial N_x^*}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial N_{\phi x}^*}{\partial \phi} - 2S_x + (1 - \gamma_0) \left(-\frac{1}{2R^2} \frac{\partial M_{\phi x}^*}{\partial \phi} - \frac{1}{2R} \frac{\partial N_{\phi x}^*}{\partial \phi} + \frac{1}{2R} \frac{\partial N_{x\phi}^*}{\partial \phi} \right) =$$

$$\frac{\partial^2 u_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_2 + \frac{\partial^2 \theta_x^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 + \frac{\partial^2 u_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 + C_4 \frac{\partial^2 \theta_x^*}{\partial t^2} \bar{I}_5 \quad (7)$$

معادله هشتم، ضرایب δv_0^* ، در حالت $C_3 = 1$:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial N_\phi^*}{\partial \phi} + \frac{\partial N_{x\phi}^*}{\partial x} + \frac{1}{R} Q_\phi^* - 2T_\phi + (1 - \gamma_0) \left(\frac{1}{2R} \frac{\partial M_{\phi x}^*}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{\phi x}^*}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial N_{x\phi}^*}{\partial x} \right) =$$

$$\frac{\partial^2 v_0^*}{\partial t^2} (\bar{I}_2 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_3) + \frac{\partial^2 \theta_\phi^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 + \frac{\partial^2 v_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 + C_4 \frac{\partial^2 \theta_\phi^*}{\partial t^2} \bar{I}_5 \quad (8)$$

معادله نهم، ضرایب δw_0^* ، در حالت $C_1 = 1$:

$$-\frac{1}{R} N_\phi^* - 2M_z + \frac{\partial Q_x^*}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial Q_\phi^*}{\partial \phi} - \frac{h^2}{4} (q_t + q_b) =$$

$$\frac{\partial^2 w_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_2 + \frac{\partial^2 \theta_z^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 + \frac{\partial^2 w_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 + C_2 \frac{\partial^2 \theta_z^*}{\partial t^2} \bar{I}_5 \quad (9)$$

معادله دهم، ضرایب $\delta \theta_x^*$ ، در حالت $C_4 = 1$:

$$\frac{\partial M_x^*}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_{\phi x}^*}{\partial \phi} - 3Q_x^* = \frac{\partial^2 u_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_3 + \frac{\partial^2 \theta_x^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 + C_3 \frac{\partial^2 u_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_5 + \frac{\partial^2 \theta_x^*}{\partial t^2} \bar{I}_6 \quad (10)$$

معادله یازدهم، ضرایب $\delta \theta_\phi^*$ ، در حالت $C_4 = 1$:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial M_\phi^*}{\partial \phi} + \frac{\partial M_{x\phi}^*}{\partial x} + \frac{1}{R} S_\phi^* - 3R_\phi^* =$$

$$\frac{\partial^2 v_0^*}{\partial t^2} (\bar{I}_3 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_4) + \frac{\partial^2 \theta_\phi^*}{\partial t^2} \bar{I}_4 + C_3 \frac{\partial^2 v_0^*}{\partial t^2} \bar{I}_5 + \frac{\partial^2 \theta_\phi^*}{\partial t^2} \bar{I}_6 \quad (11)$$

¹ -Transverse loading

طرفین رابطه (17) و انتگرال گیری روی سطح پوسته، روابط زیر برای P به دست آمده‌اند:

$$n = 0, \quad P_{m0} = \frac{1}{\pi L} \int_0^L q_t(x, \varphi) \sin \lambda x \, dx \quad (19)$$

$$n > 0, \quad P_{mn} = \frac{2}{\pi L} \int_0^L \int_0^{2\pi} q_t(x, \varphi) \sin \lambda x \cos n\varphi \, dx \, d\varphi \quad (20)$$

با توجه به کوچک بودن سطح اعمال بار، فرض شده است توزیع فشار بر روی سطح مستطیلی یکنواخت و برابر q_0 باشد، یعنی $q_t(x, \varphi) = q_0$ ، آنگاه روابط (19) و (20) پس از انتگرال گیری به صورت زیر در آمده‌اند:

$$n = 0, \quad P_{m0} = \frac{q_0}{m\pi^2} (\cos \lambda x_1 - \cos \lambda x_2) \quad (21)$$

$$n > 0, \quad P_{mn} = \frac{2q_0}{m\pi^2} (\sin n\psi_2 - \sin n\psi_1) (\cos \lambda x_1 - \cos \lambda x_2) \quad (22)$$

با جایگذاری روابط (21) و (22) در معادلات تعادل (1) تا (12) و صرف نظر از عبارتهای متغیر با زمان، معادله زیر حاصل شده است:

$$\int_0^L \int_0^{2\pi} \left([L'_{ij}] \{ \Delta \} - \{ Q_s \} \right) \{ \Psi \} \, dx \, d\varphi = 0 \quad (23)$$

که در رابطه (23)، $\{ \Delta \}$ بردار شکل مودهای طبیعی و $\{ \Psi \}$ بردار توابع وزنی¹ هستند و به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\{ \Delta \} = \begin{Bmatrix} u_{0mn} \cos \lambda x \cos n\varphi \\ v_{0mn} \sin \lambda x \sin n\varphi \\ w_{0mn} \sin \lambda x \cos n\varphi \\ \theta_{xmn} \cos \lambda x \cos n\varphi \\ \theta_{\varphi mn} \sin \lambda x \sin n\varphi \\ \theta_{zmn} \sin \lambda x \cos n\varphi \\ u_{0mn}^* \cos \lambda x \cos n\varphi \\ v_{0mn}^* \sin \lambda x \sin n\varphi \\ w_{0mn}^* \sin \lambda x \cos n\varphi \\ \theta_{xmn}^* \cos \lambda x \cos n\varphi \\ \theta_{\varphi mn}^* \sin \lambda x \sin n\varphi \\ \theta_{zmn}^* \sin \lambda x \cos n\varphi \end{Bmatrix}, \quad \{ \Psi \} = \begin{Bmatrix} \cos \lambda x \cos n\varphi \\ \sin \lambda x \sin n\varphi \\ \sin \lambda x \cos n\varphi \\ \cos \lambda x \cos n\varphi \\ \sin \lambda x \sin n\varphi \\ \sin \lambda x \cos n\varphi \\ \cos \lambda x \cos n\varphi \\ \sin \lambda x \sin n\varphi \\ \sin \lambda x \cos n\varphi \\ \cos \lambda x \cos n\varphi \\ \sin \lambda x \sin n\varphi \\ \sin \lambda x \cos n\varphi \end{Bmatrix} \quad (24)$$

در رابطه (23)، L'_{ij} عبارت‌اند از همان عملگرهای دیفرانسیلی L_{ij} ولی بدون در نظر گرفتن اینرسی‌های جرمی ($\bar{I}_I$) و به عبارت دیگر با حذف عبارت‌های شامل مشتقات زمانی و $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ و همچنین Q_s بردار نیروهای عرضی استاتیکی است و به صورت زیر تعریف شده است:

$$\{ Q_s \} = \{ Q \} = \left\{ 0 \ 0 \ q_t \ 0 \ 0 \ q_t \frac{h}{2} \ 0 \ 0 \ q_t \frac{h^2}{4} \ 0 \ 0 \ q_t \frac{h^3}{8} \right\}^T \quad (25)$$

صورت بار ضربه عرضی ناشی از برخورد جسم کروی الاستیک و با سرعت پایین بر پوسته استوانه‌ای اعمال شده است.

در گزارش حاضر، به منظور حصول اطمینان از صحت پاسخ‌های حاصل از تئوری پیشنهادی برای تغییر شکل و کرنش پوسته، ابتدا بارگذاری استاتیکی عرضی پوسته استوانه‌ای به صورت فشار یکنواخت بر روی یک سطح مستطیلی کوچک واقع بر سطح خارجی پوسته در نظر گرفته شده است. سپس بارگذاری ضربه عرضی به صورت فشار یکنواخت ولی متغیر با زمان (مانند فشار حاصل از بارگذاری ضربه‌ای) بر روی سطح مستطیلی مذکور اعمال شده، تحلیل دینامیکی گذرا تحت بارگذاری ضربه عرضی انجام پذیرفته است.

3-1- تحلیل بارگذاری استاتیکی عرضی

فرض شده است بار استاتیکی عرضی مطابق شکل 1 به صورت فشار یکنواخت بر روی سطح مستطیلی واقع بر سطح خارجی پوسته اعمال شده باشد.

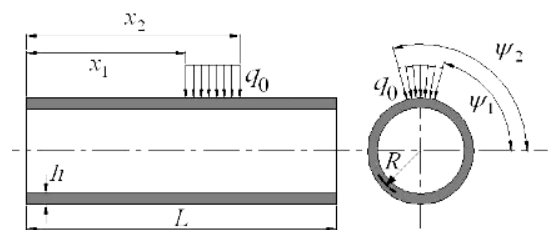


Fig. 1 Static loading applied on a small rectangular surface.

شکل 1 بارگذاری عرضی استاتیکی اعمال شده بر یک سطح مستطیلی کوچک.

با توجه به شکل 1، مختصات نقطه مرکز این سطح به صورت زیر تعریف شده است:

$$(x_L, \varphi_L, z_L) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}, \frac{h}{2} \right) \quad (15)$$

بعد سطح اعمال بار به صورت $2l_2 \times Al_1 = 2l_1$ تعریف شده که l_1 و l_2 عبارت‌اند از:

$$l_1 = \frac{R(\psi_2 - \psi_1)}{2}, \quad l_2 = \frac{x_1 - x_2}{2} \quad (16)$$

با توجه به تعریف شرایط مرزی دو سر ساده برای پوسته، بارگذاری عرضی q_t و q_b باید با استفاده از سری فوریه دوگانه، طوری تعریف شوند که شرایط مرزی پارامترهای جابجایی مؤلفه جابجایی عرضی (w) را ارضاء کنند. چون فرض شده است بارگذاری عرضی بر سطح خارجی پوسته اعمال می‌شود، در معادلات تعادل، مقادیر q_t و q_b به صورت زیر جایگذاری شده‌اند:

$$q_t(x, \varphi) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn} \sin \lambda x \cos n\varphi \quad (17)$$

$$q_b(x, \varphi) = 0 \quad (18)$$

که در رابطه (17) P_{mn} ضرایب ثابت فوریه هستند که به مشخصات سطح اعمال بار (ابعاد، محل و پروفیل توزیع بار) دارند. با ضرب $\sin \lambda x \cos n\varphi$

¹ Weighting functions

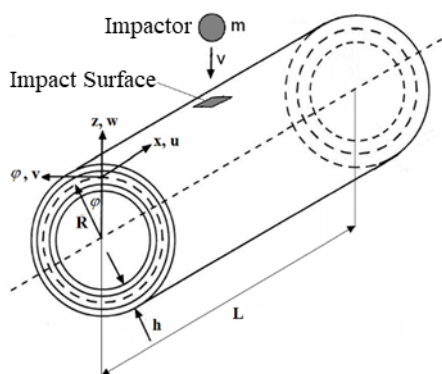


Fig. 2 Transverse shock loading applied to the outer surface of the shell.

شکل 2 بارگذاری ضربه عرضی اعمال شده بر سطح خارجی پوسته.

به منظور محاسبه پاسخ ضربه، تابع تحریک خارجی q_t ، به دو بخش مکانی و زمانی تقسیم شده است. بخش مکانی این تابع، با روابط (17) تا (23) تعریف شده در بخش استاتیکی محاسبه شده و بخش زمانی این تابع، به صورت $f(t)$ تعریف شده، در بخش مکانی ضرب شده است. تابع q_t در تحلیل ضربه عرضی به صورت زیر تعریف شده است:

$$q_t(x, \varphi, t) = q_t(x, \varphi) f(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn} \sin \lambda x \cos n \varphi f(t) \quad (29)$$

$$q_b(x, \varphi, t) = 0 \quad (30)$$

با جایگذاری پارامترهای جابجایی و همچنین تحریک خارجی q_t در معادلات تعادل، با اعمال روش گالرکین، معادله زیر به دست آمده است:

$$\int_0^L \int_0^{2\pi} ([L_{ij}] \{\Delta\} T_{mn}(t) - \{Q_d\}) \{\Psi\} dx d\varphi = 0 \quad (31)$$

که در رابطه (31)، $\{\Delta\}$ بردار شکل مودهای طبیعی و $\{\Psi\}$ بردار توابع وزنی³ هستند.

$T_{mn}(t)$ تابع زمانی مجهول است که باید محاسبه شود. $\{Q_d\}$ بردار توابع تحریک عرضی دینامیکی است و به صورت زیر تعریف شده است:

$$\{Q_d\} = \{Q\} f(t) \quad (32)$$

به منظور حل دستگاه معادلات رابطه (32)، ابتدا این دستگاه معادلات به صورت زیر بازنویسی شده است:

$$\int_0^L \int_0^{2\pi} ([L'_{ij}] \{\Delta\} T_{mn}(t)) \{\Psi\} dx d\varphi = \int_0^L \int_0^{2\pi} (\ddot{T}_{mn}(t) \{\Phi\} - \{Q_d\}) \{\Psi\} dx d\varphi \quad (33)$$

با انجام انتگرال گیری ذکر شده در رابطه (23) و دسته بندی ضرایب، یک دستگاه دوازده معادله‌ای با دوازده مجهول به صورت زیر حاصل شده است:

$$[K] \{d\} = \{Q\} \quad (26)$$

که در رابطه (26)، $\{Q\}$ بردار نیروهای عرضی استاتیکی تعریف شده در رابطه (26)، $\{d\}$ بردار ثوابت فوریه (پارامترهای جابجایی)، مشابه با تعریف ارائه شده در رابطه (21) و K ماتریس سفتی است. برای به دست آوردن ثوابت فوریه، معادله (26) به ازای مقادیر مختلف m و n حل شده است. برای حل معادله (26) از نرم افزار متلب¹ استفاده شده است. برای محاسبه پاسخ جابجایی در هر نقطه (x, φ, z) از فضای پوسته در سه جهت (u, v, w) پارامترهای جابجایی با استفاده از روش جمع آثار مودها²، به صورت سری‌های فوریه دوگانه مثلثاتی زیر محاسبه شده‌اند [17]:

$$\begin{aligned} u_0 &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} u_{0mn} \cos \lambda x \cos n \varphi & u_0^* &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} u_{0mn}^* \cos \lambda x \cos n \varphi \\ v_0 &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} v_{0mn} \sin \lambda x \sin n \varphi & v_0^* &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} v_{0mn}^* \sin \lambda x \sin n \varphi \\ w_0 &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} w_{0mn} \sin \lambda x \cos n \varphi & w_0^* &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} w_{0mn}^* \sin \lambda x \cos n \varphi \\ \theta_x &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \theta_{xmn} \cos \lambda x \cos n \varphi & \theta_x^* &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \theta_{xmn}^* \cos \lambda x \cos n \varphi \\ \theta_\varphi &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \theta_{\varphi mn} \sin \lambda x \sin n \varphi & \theta_\varphi^* &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \theta_{\varphi mn}^* \sin \lambda x \sin n \varphi \\ \theta_z &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \theta_{zmn} \sin \lambda x \cos n \varphi & \theta_z^* &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \theta_{zmn}^* \sin \lambda x \cos n \varphi \end{aligned} \quad (27)$$

با جایگذاری پارامترهای جابجایی از رابطه (27) در رابطه (28)، مؤلفه‌های جابجایی پوسته نیز در هر نقطه دلخواه (x, φ, z) قابل محاسبه هستند.

$$\begin{aligned} u(x, \varphi, z, t) &= u_0(x, \varphi, t) + z \theta_x(x, \varphi, t) + z^2 u_0^*(x, \varphi, t) + z^3 \theta_x^*(x, \varphi, t) \\ v(x, \varphi, z, t) &= (1 + z/R) v_0(x, \varphi, t) + z \theta_\varphi(x, \varphi, t) + z^2 v_0^*(x, \varphi, t) + z^3 \theta_\varphi^*(x, \varphi, t) \\ w(x, \varphi, z, t) &= w_0(x, \varphi, t) + z \theta_z(x, \varphi, t) + z^2 w_0^*(x, \varphi, t) + z^3 \theta_z^*(x, \varphi, t) \end{aligned} \quad (28)$$

2-3- تحلیل بارگذاری ضربه عرضی

فرض شده است جسم ضربه زننده کروی با جرم m_i از جنس ماده همگن، ایزوتروپیک و الاستیک، با سرعت v_i به صورت عمود بر سطح خارجی پوسته استوانه‌ای مطابق شکل 2 برخورد کند.

³ Weighting functions

¹ MATLAB

² Modes superposition method

که در رابطه (33) بردار $\{\Phi\}$ به صورت زیر تعریف شده است:

$$G_{mn}(t) = \frac{H_{mn}}{J_{mn}} f(t) \quad (39)$$

که در رابطه (39)، H_{mn} در صورت کسر، به صورت زیر تعریف شده است:

$$H_{mn} = P_{mn} (w_{0mn} + C_1 \frac{h}{2} \theta_{zmn} + C_1 \frac{h^2}{4} w_{0mn}^* + C_2 \frac{h^3}{8} \theta_{zmn}^*) \quad (40)$$

همچنین در رابطه (40)، J_{mn} در مخرج کسر، عبارت‌اند از جرم‌های نرمالیزه³ و به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$J_{mn} = A_{mn} \bar{I}_0 + B_{mn} \bar{I}_1 + C_{mn} \bar{I}_2 + D_{mn} \bar{I}_3 + E_{mn} \bar{I}_4 + F_{mn} \bar{I}_5 + Z_{mn} \bar{I}_6 \quad (41)$$

که در رابطه (41)، ضرایب A_{mn} تا Z_{mn} به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\begin{aligned} A_{mn} &= (u_{0mn}^2 + v_{0mn}^2 + w_{0mn}^2) \\ B_{mn} &= 2 \left(\theta_{xmn} u_{0mn} + v_{0mn} \frac{\gamma_0}{R} + \theta_{\phi mn} v_{0mn} + C_1 \theta_{zmn} w_{0mn} \right) \\ C_{mn} &= 2 \left(C_3 u_{0mn}^* u_{0mn} + \theta_{\phi mn} v_{0mn} \frac{\gamma_0}{R} + C_3 v_{0mn}^* v_{0mn} + C_1 w_{0mn}^* w_{0mn} \right) + \\ &\quad \left(v_{0mn}^2 \frac{\gamma_0}{R^2} + \theta_{xmn}^2 + \theta_{\phi mn}^2 + C_1 \theta_{zmn}^2 \right) \\ D_{mn} &= 2 \left(C_4 \theta_{xmn}^* u_{0mn} + C_3 v_{0mn}^* v_{0mn} \frac{\gamma_0}{R} + C_4 \theta_{\phi mn}^* v_{0mn} + C_2 \theta_{zmn}^* w_{0mn} \right) + \\ &\quad \left(C_3 u_{0mn}^* \theta_{xmn} + C_3 v_{0mn}^* \theta_{\phi mn} + C_1 w_{0mn}^* \theta_{zmn} \right) \\ E_{mn} &= 2 \left(C_4 \theta_{\phi mn}^* v_{0mn} \frac{\gamma_0}{R} + C_4 \theta_{xmn}^* \theta_{xmn} + C_4 \theta_{\phi mn}^* \theta_{\phi mn} + C_1 C_2 \theta_{zmn}^* \theta_{zmn} \right) + \\ &\quad (C_3 (u_{0mn}^*)^2 + C_3 (v_{0mn}^*)^2 + C_1 (w_{0mn}^*)^2) \\ F_{mn} &= 2(C_3 C_4 \theta_{xmn}^* u_{0mn}^* + C_3 C_4 \theta_{\phi mn}^* v_{0mn}^* + C_1 C_2 \theta_{zmn}^* w_{0mn}^*) \\ Z_{mn} &= (C_4 (\theta_{xmn}^*)^2 + C_4 (\theta_{\phi mn}^*)^2 + C_2 (\theta_{zmn}^*)^2) \end{aligned} \quad (42)$$

به منظور حل معادله دیفرانسیل در رابطه (38)، از طرفین این رابطه تبدیل لاپلاس گرفته شده، رابطه زیر به دست آمده است:

$$\mathcal{L} \{ \ddot{T}_{mn}(t) + \omega_{mn}^2 T_{mn}(t) \} = \mathcal{L} \left\{ \frac{H_{mn} f(t)}{J_{mn}} \right\} \quad (43)$$

با فرض $t \geq 0$ ، می‌توان نوشت [18]:

$$s^2 T_{mn}(s) - s T_{mn}(0) - \dot{T}_{mn}(0) + \omega_{mn}^2 T_{mn}(s) = \frac{H_{mn}}{J_{mn}} F(s) \quad (44)$$

که در رابطه (44)، $T_{mn}(s) = \mathcal{L}(T_{mn}(t))$ و $F(s) = \mathcal{L}(f(t))$ با فرض شرایط اولیه صفر، یعنی $T_{mn}(0) = \dot{T}_{mn}(0) = 0$ ، می‌توان نوشت:

$$s^2 T_{mn}(s) + \omega_{mn}^2 T_{mn}(s) = \frac{H_{mn}}{J_{mn}} F(s) \quad (45)$$

$$\{\Phi\} = \begin{Bmatrix} (u_{0mn} \bar{I}_0 + \theta_{xmn} \bar{I}_1 + C_3 u_{0mn}^* \bar{I}_2 + C_4 \theta_{xmn}^* \bar{I}_3) \cos \lambda x \cos n\phi \\ \left(v_{0mn} (\bar{I}_0 + \frac{2\gamma_0}{R} \bar{I}_1 + \frac{\gamma_0}{R^2} \bar{I}_2) + \theta_{\phi mn} (\bar{I}_1 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_2) \right. \\ \left. + C_3 v_{0mn}^* (\bar{I}_2 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_3) + C_4 \theta_{\phi mn}^* (\bar{I}_3 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_4) \right) \sin \lambda x \sin n\phi \\ (w_{0mn} \bar{I}_0 + C_1 \theta_{zmn} \bar{I}_1 + C_1 w_{0mn}^* \bar{I}_2 + C_2 \theta_{zmn}^* \bar{I}_3) \sin \lambda x \cos n\phi \\ (u_{0mn} \bar{I}_1 + \theta_{xmn} \bar{I}_2 + C_3 u_{0mn}^* \bar{I}_3 + C_4 \theta_{xmn}^* \bar{I}_4) \cos \lambda x \cos n\phi \\ \left(v_{0mn} (\bar{I}_1 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_2) + \theta_{\phi mn} \bar{I}_2 + C_3 v_{0mn}^* \bar{I}_3 + C_4 \theta_{\phi mn}^* \bar{I}_4 \right) \sin \lambda x \sin n\phi \\ C_1 (w_{0mn} \bar{I}_1 + \theta_{zmn} \bar{I}_2 + w_{0mn}^* \bar{I}_3 + C_2 \theta_{zmn}^* \bar{I}_4) \sin \lambda x \cos n\phi \\ C_3 (u_{0mn} \bar{I}_2 + \theta_{xmn} \bar{I}_3 + u_{0mn}^* \bar{I}_4 + C_4 \theta_{xmn}^* \bar{I}_5) \cos \lambda x \cos n\phi \\ C_3 \left(v_{0mn} (\bar{I}_2 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_3) + \theta_{\phi mn} \bar{I}_3 + v_{0mn}^* \bar{I}_4 + C_4 \theta_{\phi mn}^* \bar{I}_5 \right) \sin \lambda x \sin n\phi \\ C_1 (w_{0mn} \bar{I}_2 + \theta_{zmn} \bar{I}_3 + w_{0mn}^* \bar{I}_4 + C_2 \theta_{zmn}^* \bar{I}_5) \sin \lambda x \cos n\phi \\ C_4 (u_{0mn} \bar{I}_3 + \theta_{xmn} \bar{I}_4 + C_3 u_{0mn}^* \bar{I}_5 + \theta_{xmn}^* \bar{I}_6) \cos \lambda x \cos n\phi \\ C_4 \left(v_{0mn} (\bar{I}_3 + \frac{\gamma_0}{R} \bar{I}_4) + \theta_{\phi mn} \bar{I}_4 + C_3 v_{0mn}^* \bar{I}_5 + \theta_{\phi mn}^* \bar{I}_6 \right) \sin \lambda x \sin n\phi \\ C_2 (w_{0mn} \bar{I}_3 + C_1 \theta_{zmn} \bar{I}_4 + C_1 w_{0mn}^* \bar{I}_5 + \theta_{zmn}^* \bar{I}_6) \sin \lambda x \cos n\phi \end{Bmatrix} \quad (34)$$

از طرفی در تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته، داریم:

$$\int_0^L \int_0^{2\pi} ([L_{ij}] \{\Delta\} T_{mn}(t)) \{\Psi\} dx d\phi = 0 \quad (35)$$

با توجه به این‌که در تحلیل ارتعاشات آزاد رابطه $e^{i\omega_{mn} t} T_{mn}(t)$ برقرار است، دستگاه معادلات رابطه (35) نیز به صورت زیر بازنویسی شده است:

$$\begin{aligned} \int_0^L \int_0^{2\pi} ([L'_{ij}] \{\Delta\} T_{mn}(t)) \{\Psi\} dx d\phi &= \\ \int_0^L \int_0^{2\pi} (-\omega_{mn}^2 T_{mn}(t) \{\Phi\}) \{\Psi\} dx d\phi & \end{aligned} \quad (36)$$

با استفاده از خاصیت تعامد شکل مودها¹، از ترکیب دو رابطه (33) و (36)، رابطه زیر به دست آمده است [17]:

$$\begin{aligned} \int_0^L \int_0^{2\pi} (\ddot{T}_{mn}(t) \{\Phi\} - \{Q_d\}) \{\Psi\} dx d\phi &= \\ \int_0^L \int_0^{2\pi} (-\omega_{mn}^2 T_{mn}(t) \{\Phi\}) \{\Psi\} dx d\phi & \end{aligned} \quad (37)$$

پس از انجام انتگرال‌گیری در رابطه (37)، معادلات سطرهای اول تا دوازدهم، به ترتیب در u_{0mn}^* ، θ_{zmn}^* ، $\theta_{\phi mn}^*$ ، θ_{xmn}^* ، w_{0mn}^* ، v_{0mn}^* ، u_{0mn}^* ، θ_{zmn}^* ، $\theta_{\phi mn}^*$ ، θ_{xmn}^* ، w_{0mn}^* ، v_{0mn}^* تساوی با هم جمع شده‌اند. پس از مرتب‌سازی عبارت‌های جبری، یک معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم بر حسب زمان به صورت زیر به دست آمده است:

$$\ddot{T}_{mn}(t) + \omega_{mn}^2 T_{mn}(t) = G_{mn}(t) \quad (38)$$

که در رابطه (38)، $G_{mn}(t)$ عبارت‌اند از نیروهای تعمیم یافته² و به صورت زیر تعریف شده است:

¹ - Orthogonality of mode shapes
² - Generalized forces

³ - Normalized masses

پس از انجام ساده‌سازی، رابطه زیر حاصل شده است:

$$\theta_x^*(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\theta_{xmn}^* H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau \quad (48)$$

با جایگذاری پارامترهای جابجایی از رابطه (48) در رابطه (28)، مؤلفه‌های جابجایی پوسته نیز در هر نقطه دلخواه (x, φ, z) برحسب زمان قابل محاسبه هستند.

4- مدل ضربه ارائه شده این پژوهش

در تحقیقاتی که تاکنون برای تحلیل پاسخ ضربه روی پوسته‌های استوانه‌ای توسط سایر محققین انجام پذیرفته است، به دو موضوع مهم توجه شده است. یکی تخمین نیروی تماس بین ضربه‌زننده و پوسته و دیگری پیش‌گویی جابجایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در پوسته تحت بارگذاری ضربه‌ای.

اکثر محققین برای تخمین نیروی تماس بین جسم ضربه زننده و سازه هدف در حین ضربه، از قانون تماس هرتز² و یا از ویرایش اصلاح شده آن استفاده کرده‌اند [18]. تحقیقات بسیاری تاکنون برای تخمین تاریخچه نیروی ضربه انجام شده است. اما اکثر این تحقیقات، یا به کمک روش‌های اندازه‌گیری تجربی انجام شده مانند گنینگ و همکاران [5] و یا با استفاده از روش‌های عددی مانند المان محدود و تفاضل محدود مانند چاندراشکارا و شرودر [19] کیستلر و واس [20]؛ کریشنامورثی و همکاران [2]؛ گلنپائی و راثو [21]. برخی محققین نیز با روش‌های تحلیلی به معادله‌ای غیرخطی جهت محاسبه نیروی ضربه دست یافته‌اند مانند ماتمیولا و سترونج [22]. لیکن حل این معادله غیرخطی، قدری دشوار است و باید به روش گام‌به‌گام، توأم با ارضای معیار همگرایی صورت گیرد. برخی دیگر مانند کریستوفرو و سوانسون [23] با استفاده از تبدیل لاپلاس، حل تحلیلی بسته برای نیروی ضربه روی پوسته استوانه‌ای ارائه دادند. لیکن رابطه ارائه شده توسط ایشان برای محاسبه نیروی ضربه، رابطه‌ای نسبتاً پیچیده است.

برخی محققین سعی کرده‌اند از مدل‌های ساده‌تر برای تخمین نیروی تماس استفاده کنند. ازجمله گانگ [18] برای محاسبه نیروی ضربه روی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی، از مدل جرم و فنر دو درجه آزادی خطی مشابه با مدل جرم و فنر شیواکومار و همکاران [24] استفاده کرد. اما سفتی تماس را به کمک آزمایش تجربی استخراج کرد. تعداد کمی از تحقیقات صورت گرفته تاکنون، به روش‌های تحلیلی ساده و مهندسی برای تخمین نیروی ضربه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای روی آورده‌اند. از این رو، در این پژوهش دو مدل جدید با تعاریف کلی زیر برای محاسبه تاریخچه نیروی ضربه پیشنهاد شده‌اند:

1. مدل اول (مدل نیم سینوسی یا H-S³): این مدل بر مبنای

مدل بالانس انرژی ارائه شده در مقاله آپتیه و همکاران [25] با ایده گرفتن از روش ارائه شده در مقاله چوی و هونگ [26] بنا نهاده شده است.

2. مدل دوم (مدل جرم و فنر بهبودیافته یا IS-M⁴): این مدل

بر مبنای مدل جرم و فنر خطی دو درجه آزادی ارائه شده در مقاله شیواکومار و همکاران [24] با ایده گرفتن از روش

$$T_{mn}(s) = \frac{1}{(s^2 + \omega_{mn}^2)} \frac{H_{mn}}{J_{mn}} F(s) \quad (46)$$

صورت و مخرج کسر رابطه (46) در ω_{mn} ضرب شده، از طرفین این رابطه تبدیل لاپلاس معکوس گرفته شده است. آنگاه با بهره‌گیری از انتگرال کانولوشن¹ [18]، توابع مجهول $T_{mn}(s)$ به صورت زیر محاسبه شده‌اند:

$$T_{mn}(t) = \frac{H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau \quad (47)$$

برای محاسبه پاسخ جابجایی در هر نقطه (x, φ, z) از فضای پوسته در سه جهت (u, v, w) برحسب زمان، پارامترهای جابجایی با استفاده از روش جمع آثار مودها، به صورت سری‌های فوریه دوگانه مثلثاتی زیر محاسبه شده‌اند:

$$u_0(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_{0mn} H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \cos \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$v_0(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{0mn} H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \sin n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$w_0(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{w_{0mn} H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$\theta_x(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\theta_{xmn} H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \cos \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$\theta_\varphi(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\theta_{\varphi mn} H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \sin n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$\theta_z(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\theta_{zmn} H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$u_0^*(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_{0mn}^* H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \cos \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$v_0^*(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v_{0mn}^* H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \sin n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$w_0^*(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{w_{0mn}^* H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$\theta_x^*(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\theta_{xmn}^* H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \cos \lambda x \cos n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

$$\theta_\varphi^*(x, \varphi, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\theta_{\varphi mn}^* H_{mn}}{J_{mn} \omega_{mn}} \sin \lambda x \sin n \varphi \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau$$

³ - Half-Sine model

⁴ - Improved Spring-Mass model

¹ - Convolution integral

² -Hertz's contact law

1-1-4- محاسبه حداکثر نیروی تماس (F_{max})

به منظور محاسبه حداکثر نیروی ضربه (F_{max})، ابتدا تحلیل استاتیکی پوسته استوانه‌ای صورت پذیرفته است. سپس پاسخ تحلیل استاتیکی با پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای با استفاده از مدل جرم و فنر تلفیق شده است. همانطور که در شکل 3 نمایش داده شده است، سیستم ضربه زننده و پوسته استوانه‌ای با دو فنر الاستیک به صورت سری مدل‌سازی شده است. یک فنر خطی (k_s) با ثابت k_s برای به حساب آوردن خیز کلی² و یک فنر غیرخطی (k_i) برای به حساب آوردن فرورفتگی موضعی³ ناشی از نیروی تماس در نظر گرفته شده است.

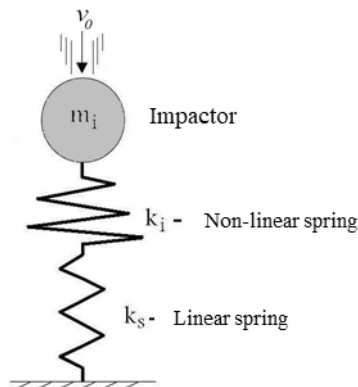


Fig. 3 Low velocity impact model.

شکل 3 مدل ضربه سرعت پایین.

نیروی موجود در هر دو فنر خطی و غیرخطی نمایش داده شده در شکل 3، با استفاده از روابط زیر محاسبه شده‌اند:

$$F = k_i \alpha^p \quad (51)$$

$$F = k_s w_b, \quad w_b = w(x_L, \varphi_L, -h/2) \quad (52)$$

که در روابط (51) و (52)، F کل نیروی تماس، α فرورفتگی موضعی، p نما و w_b جابه‌جایی شعاعی نقطه زیرین مرکز اعمال بار با مختصات $(x_L, \varphi_L, -h/2)$ است. همچنین ثابت فنر غیرخطی k_i بر اساس قانون تماس هرتز و ثابت فنر خطی k_s بر اساس سفتی پوسته در محل اعمال نیروی ضربه در راستای شعاعی هستند که در ادامه به توضیح نحوه محاسبه آن‌ها پرداخته شده است.

برای محاسبه ثابت فنر الاستیک خطی (k_s)، نیروی استاتیکی واحد به صورت فشاری بر سطح مستطیلی مورد اصابت ضربه زننده اعمال شده است. بر این اساس، k_s به طریق زیر محاسبه شده است:

$$k_s = \frac{1}{\delta_1}, \quad \delta_1 = w(x_L, \varphi_L, -h/2) \quad (53)$$

که در رابطه (53)، δ_1 خیز در نقطه زیرین مرکز اعمال بار در اثر اعمال نیروی فشاری واحد بر سطح مستطیلی مورد اصابت ضربه زننده است. ثابت فنر الاستیک غیرخطی k_i یا سفتی تماس هرتز، بر اساس قانون تماس هرتز به صورت زیر محاسبه شده است [30]:

خطی‌سازی قانون تماس ارائه شده در مقاله چوی و لیم [27] بنا نهاده شده است.

به منظور محاسبه تاریخچه نیروی ضربه روی پوسته استوانه‌ای، فرضیات زیر مدنظر قرار گرفته‌اند:

- ضربه زننده با سرعت پایین به پوسته برخورد می‌کند
- شکل ضربه زننده کروی، از جنس همگن ایزوتروپیک و الاستیک است
- از اثرات نرخ کرنش و انتشار موج بر پاسخ ضربه صرف‌نظر شده است
- از انرژی‌های ناشی از ارتعاش جسم ضربه زننده، صوت، حرارت و آسیب جزئی در محل ضربه صرف‌نظر شده است

با توجه به اینکه در فرضیات، از اثر انتشار موج بر پاسخ ضربه صرف‌نظر شده، ضربه مورد بحث در پژوهش حاضر در دسته ضربه مرز کنترل شده واقع می‌شود. بنابراین، برای محاسبه تاریخچه نیروی تماس، پدیده ضربه به صورت شبه‌استاتیکی فرض شده است.

1-4- مدل اول (مدل نیم سینوسی یا H-S)

با توجه به نتایج تحقیقات گذشته توسط سایر محققین، فرض شده است که نیروی تماس δ و بدل شده بین ضربه زننده و پوسته کامپوزیتی چندلایه در حین ضربه، از تئوری تماس هرتز به صورت زیر تبعیت می‌کند:

$$F_c(t) = K_2 [\delta(t)]^p \quad (49)$$

که در آن K_2 و P ثابت‌های ماده، F_c نیروی تماس و δ فرورفتگی هستند که با استفاده از آزمایش‌های فرورفتگی استاتیکی قابل دستیابی هستند (یانگ و سان [28] و گانگ [18]). از طرفی نشان داده شده است که فرورفتگی ناشی از تماس را می‌توان با دقت مناسب، به صورت یک منحنی نیم سینوسی، مانند رابطه (50) تقریب زد ([29, 18]):

$$\delta(t) = \delta_m \sin \frac{\pi t}{T} \quad (50)$$

که در آن δ_m حداکثر فرورفتگی و T مدت زمان تماس¹ هستند. بنابراین، در مدل اول (H-S) ارائه شده در این پژوهش، تاریخچه نیروی ضربه به صورت یک منحنی نیم سینوسی تقریب زده شده است.

همان‌طور که ذکر شد، این مدل بر مبنای مدل بالانس انرژی ارائه شده در مقاله آپتره و همکاران [25]، که برای حل مسئله ضربه بر روی یک تیر ساندویچی بکار گرفته شده، توأم با استفاده از ایده‌ی ارائه شده در مقاله چوی و هونگ [26]، که در آن تحلیل ضربه روی ورق‌های مربعی کامپوزیتی انجام پذیرفته، بنا نهاده شده است. روش بالانس انرژی ارائه شده توسط آپتره و همکاران [25] اصولاً مشابه با روش بالانس انرژی ارائه شده توسط شیواکومار و همکاران [26] است. همچنین چوی و هونگ [26] با کمک نرم‌افزار المان محدود، فرکانس پایه سیستم ورق با جرم متمرکز در مرکز آن را محاسبه کرده، مدت زمان تماس (C.T.) را برابر نصف پریود پایه در نظر گرفته‌اند. لیکن در این پژوهش، بر اساس یک روش تحلیلی و بدون استفاده از نرم‌افزار المان محدود، مدت زمان تماس محاسبه شده است.

¹ Contact time (C.T.)

² Global deflection

³ Local indentation

شده است. لذا در این پژوهش، برخلاف روش ارائه شده توسط چوی و هونگ [26] نیاز به استفاده از نرم‌افزار المان محدود وجود ندارد.

اثر جرم نقطه‌ای¹ متمرکز در یک نقطه دلخواه از سطح میانی پوسته استوانه‌ای بر فرکانس‌های طبیعی توسط سَوِدِل [31] بررسی شده است. معادله مشخصه کل سیستم پوسته به طول L و به جرم m_s که جرم نقطه‌ای m_i در مختصات (x_L, φ_L) به آن وصل شده، عبارت است از [31]:

$$\frac{4}{m_s} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\omega_{mn}^2 - \omega^2)} \sin^2 \frac{m\pi x_L}{L} - \frac{1}{m_i \omega^2} = 0 \quad (59)$$

که در رابطه (59) همان مختصه طولی مرکز سطح اعمال بار و ω_{mn} فرکانس‌های طبیعی پوسته (بدون جرم متمرکز) هستند. برای استخراج فرکانس‌های طبیعی سیستم با جرم متمرکز، $\omega = \omega_{mn}$ باید ریشه معادله (59) با یک روش عددی محاسبه شود. هر چه تعداد موده‌های (m, n) در نظر گرفته شده در رابطه (59) بیشتر باشد، دقت جواب به دست آمده برای فرکانس‌های طبیعی سیستم با جرم متمرکز بیشتر است. در مرجع [31] جزئیات نحوه محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم با جرم متمرکز آورده شده است.

4-1-3- استخراج تابع نیروی ضربه در مدل اول (H-S)

پس از مشخص شدن حداکثر نیروی ضربه (F_{max}) و مدت زمان تماس $(C.T)$ ، اطلاعات لازم برای رسم منحنی نیم سینوسی توصیف کننده تاریخچه نیروی ضربه، آماده شده‌اند. بنابراین، تابع نیروی ضربه به صورت زیر در می‌آید:

$$F_c(t) = F_{max} \sin(\omega_1^* t) \quad (60)$$

که در رابطه (60)، ω_1^* همان فرکانس پایه سیستم با جرم متمرکز (برحسب رادیان بر ثانیه) است که با استفاده از رابطه (59) تعیین شده است. بخش زمانی $(f(t))$ از تابع تحریک خارجی $(q_1(x, \varphi, t))$ ، در رابطه (17)، با تقسیم تابع نیروی ضربه $f_c(t)$ در رابطه (60) بر مساحت سطح کوچک اعمال بار $(A_L = 2l_1 \times 2l_2)$ ، به صورت زیر تعیین شده است:

$$\begin{cases} f(t) = \frac{F_c(t)}{A_L} = \frac{F_{max}}{A_L} \sin(\omega_1^* t) = f_0 \sin(\omega_1^* t), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_1^*} \\ f(t) = 0, & t > \frac{\pi}{\omega_1^*} \end{cases} \quad (61)$$

در عمل مساحت سطح اعمال بار ضربه‌ای با زمان تغییر می‌کند. لیکن نشان داده شده است که با توجه به بسیار کوچک بودن سطح تماس در حین ضربه، تغییر در اندازه مساحت آن (حتی تا صد برابر افزایش) تأثیری ناچیز بر نیروی تماس و خیز کلی ناشی از ضربه می‌گذارد [2]. لذا در پژوهش حاضر برای سادگی حل مسئله، در رابطه (61) سطح اعمال بار ضربه‌ای، ثابت در نظر گرفته شده است. با جایگذاری تابع $f(t)$ از رابطه (61) در انتگرال کانولوشن رابطه (51)، رابطه (62) حاصل شده است:

$$\int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn} (t - \tau) d\tau = \begin{cases} \frac{f_0 (\sin(\omega_{mn} t) - \frac{\omega_{mn}}{\omega_1^*} \sin(\omega_1^* t))}{(\frac{\omega_1^{*2} - \omega_{mn}^2}{\omega_1^*})}, & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_1^*} \\ \frac{f_0 (\sin(\omega_{mn} t) + \sin \frac{\omega_{mn}}{\omega_1^*} (\omega_1^* t - \pi))}{(\frac{\omega_1^{*2} - \omega_{mn}^2}{\omega_1^*})}, & t > \frac{\pi}{\omega_1^*} \end{cases} \quad (62)$$

$$k_i = \frac{4}{3} E_* \sqrt{R_*} \quad (54)$$

که در آن E_* و R_* به ترتیب مدول یانگ معادل و انحنای معادل هستند و به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\frac{1}{E_*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s}, \quad \frac{1}{R_*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_s} \quad (55)$$

که در رابطه (55)، V و R به ترتیب مدول یانگ، ضریب پواسون و شعاع انحنا و زیرنویس‌های i و s به ترتیب نماینده جسم ضربه زننده و سازه هدف هستند. جایابی ضربه زننده برابر است با حاصل جمع عمق فرورفتگی به علاوه خیز کلی پوسته استوانه‌ای که به صورت رابطه (56) محاسبه شده است:

$$w = \alpha + w_b = \frac{F}{k_s} + \left(\frac{F}{k_i} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (56)$$

کار انجام شده توسط جسم ضربه زننده در خلال رخداد ضربه به شیوه زیر محاسبه شده است:

$$W = \int_0^w F dw = Fw - \int_0^F w dF = Fw - \int_0^F \left(\frac{F}{k_i} + \left(\frac{F}{k_i} \right)^{\frac{1}{p}} \right) dF = \frac{F^2}{2k_i} + \frac{1}{p+1} \frac{F^{1+1/p}}{k_i^{1/p}} \quad (57)$$

با توجه به اینکه انرژی جنبشی ضربه زننده برابر با کار انجام شده توسط نیروی ضربه و یا انرژی کرنشی ذخیره شده در فنرها است، حداکثر نیروی تماس به شیوه زیر محاسبه شده است [32]:

$$\frac{F_{max}^2}{2k_s} + \frac{F_{max}^{1+1/p}}{(p+1)k_i^{1/p}} = \frac{1}{2} m_i v_0^2 \quad (58)$$

که در رابطه (58)، m_i جرم و v_0 سرعت اولیه برخورد جسم ضربه زننده هستند. با حل معادله فوق با استفاده از یکی از روش‌های عددی ریشه‌یابی معادلات، مانند روش نیوتن، مقدار F_{max} یا حداکثر نیروی ضربه به دست آمده است. مقدار p در رابطه (58)، بر اساس قانون هرتز برابر 1.5 در نظر گرفته شده است.

4-1-2- محاسبه مدت زمان تماس (C.T)

چوی و هونگ [26] فرکانس‌های حاکم بر تاریخچه نیروی ضربه را با مقادیر فرکانس‌های طبیعی این سیستم با جرم متمرکز مقایسه کردند. آن‌ها از انطباق اولین فرکانس طبیعی سیستم با جرم متمرکز با اولین فرکانس تاریخچه نیروی ضربه، نتیجه گرفتند که اولین فرکانس طبیعی سیستم با جرم متمرکز، توصیف کننده اصلی رفتار دینامیکی نیروی ضربه است و اثر آن در مقایسه با اثر سایر فرکانس‌ها بر رفتار دینامیکی نیروی ضربه، غالب است. در مدل تحلیلی ساده‌ای که برای پیش‌گویی تاریخچه نیروی ضربه ارائه دادند، مدت زمان تماس را برابر نصف عکس اولین فرکانس طبیعی سیستم با جرم متمرکز قرار دادند.

در این پژوهش محاسبه فرکانس پایه سیستم پوسته با جرم ضربه زننده متمرکز در نقطه اعمال ضربه، به روش تحلیلی صورت پذیرفته است. سپس مشابه با روش چوی و هونگ [26]، مدت زمان تماس $(C.T)$ برابر نصف پرئود پایه (نصف عکس اولین فرکانس طبیعی سیستم با جرم متمرکز) قرار داده

¹- Point mass

با فرض پاسخ هارمونیک برای این سیستم دو درجه آزادی، فرکانس‌های طبیعی به صورت زیر به دست آمده‌اند:

$$\lambda_{1,2} = \frac{\left(\frac{k_c + k_{bs}}{m_i} + \frac{k_c}{m_i} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_c + k_{bs}}{m_i} + \frac{k_c}{m_i} \right)^2 - 4 \frac{k_c k_i}{m_i m_i}}}{2}, \quad \omega_{1,2} = \sqrt{\lambda_{1,2}} \quad (65)$$

که در رابطه (65) ω_1 و ω_2 فرکانس‌های طبیعی سیستم جرم و فنر هستند. برای حل مسئله ارتعاشات آزاد سیستم جرم و فنر با شرایط اولیه، پاسخ هارمونیک برای درجات آزادی x_i و x_s به صورت زیر به دست آمده‌اند [17]:

$$\begin{Bmatrix} x_i(t) \\ x_s(t) \end{Bmatrix} = A_1 \begin{Bmatrix} 1 \\ X_s^{(1)} \end{Bmatrix} \sin \omega_1 t + A_2 \begin{Bmatrix} 1 \\ X_s^{(1)} \end{Bmatrix} \cos \omega_1 t + A_3 \begin{Bmatrix} 1 \\ X_s^{(2)} \end{Bmatrix} \sin \omega_2 t + A_4 \begin{Bmatrix} 1 \\ X_s^{(2)} \end{Bmatrix} \cos \omega_2 t \quad (66)$$

$$X_s^{(1)} = 1 - \frac{m_i}{k_c} \lambda_1, \quad X_s^{(2)} = 1 - \frac{m_i}{k_c} \lambda_2 \quad (67)$$

که در رابطه (66) ثوابت A_1 تا A_4 از شرایط اولیه به صورت زیر تعیین شده‌اند [17]:

$$A_1 = \frac{v_0(k_c - m_i \omega_1^2)}{\omega_1 m_i (\omega_2^2 - \omega_1^2)}, \quad A_3 = \frac{v_0(k_c - m_i \omega_2^2)}{\omega_2 m_i (\omega_1^2 - \omega_2^2)}, \quad A_2 = A_4 = 0 \quad (68)$$

با توجه به روابط (66) تا (68)، تابع نیروی ضربه به صورت رابطه (69) استخراج شده است [24]:

$$F_c(t) = k_{bs} x_s(t) = \frac{k_{bs} v_0 (k_c - m_i \omega_1^2) (k_c - m_i \omega_2^2)}{k_c m_i (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \left(\frac{\sin(\omega_1 t)}{\omega_1} - \frac{\sin(\omega_2 t)}{\omega_2} \right) \quad (69)$$

بخش زمانی $f(t)$ از تابع تحریک خارجی $(q_t(x, \phi, t))$ ، در رابطه (29)، با تقسیم تابع نیروی ضربه $f_c(t)$ بر مساحت سطح کوچک اعمال بار $(A_L = 2l_1 \times 2l_2)$ ، به صورت زیر تعیین شده است:

$$\begin{cases} f(t) = \frac{F_c(t)}{A_L} = F_0 \left(\frac{\sin(\omega_1 t)}{\omega_1} - \frac{\sin(\omega_2 t)}{\omega_2} \right), & 0 \leq t \leq T \\ f(t) = 0, & t > T \end{cases} \quad (70)$$

$$F_0 = \frac{k_{bs} v_0 (k_c - m_i \omega_1^2) (k_c - m_i \omega_2^2)}{A_L k_c m_i (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (71)$$

که در رابطه (70)، مدت زمان تماس است. با جایگذاری تابع $f(t)$ از رابطه (71) در انتگرال کانولوشن، رابطه (72) حاصل شده است:

$$\begin{aligned} \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t - \tau) d\tau &= F_0 \left[\frac{1}{\omega_1^2 - \omega_{mn}^2} \left(\sin(\omega_{mn} t) - \frac{\omega_{mn}}{\omega_1} \sin(\omega_1 t) \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\omega_2^2 - \omega_{mn}^2} \left(\sin(\omega_{mn} t) - \frac{\omega_{mn}}{\omega_2} \sin(\omega_2 t) \right) \right], \quad 0 \leq t \leq T \\ \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t - \tau) d\tau &= F_0 \left[\frac{1}{\omega_1^2 - \omega_{mn}^2} \left(\frac{\sin(\omega_{mn} t) - \cos(\omega_1 T) \sin \omega_{mn}(t - T)}{\omega_1} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\omega_2^2 - \omega_{mn}^2} \left(\frac{\sin(\omega_{mn} t) - \cos(\omega_2 T) \sin \omega_{mn}(t - T)}{\omega_2} \right) \right], \quad t > T \end{aligned} \quad (72)$$

³ - Modified contact stiffness

برای محاسبه پارامترهای جابجایی پوسته برحسب زمان، رابطه (62) در روابط (60) جایگذاری شده است.

4-2- مدل دوم (مدل جرم و فنر بهبودیافته یا IS-M)

همان‌طور که ذکر شد، این مدل بر مبنای مدل جرم و فنر دو درجه آزادی ارائه شده در مقاله شیواکومار و همکاران [24] برای حل مسئله ضربه بر روی ورق دایروی کامپوزیتی توأم با استفاده از قانون تماس خطی شده¹ ارائه شده در مقاله چوی و لیم [27] برای تحلیل ضربه روی ورق‌های مربعی کامپوزیتی، بنا نهاده شده است.

4-2-1- معادلات حرکت مدل جرم و فنر دو درجه آزادی بهبودیافته

با توجه به اینکه در این پژوهش، از اثرات تغییر شکل‌های غیرخطی صرف‌نظر شده است، از مدل جرم و فنر دو درجه آزادی خطی بهره گرفته شده که در آن از به‌کارگیری فنر غیرخطی ناشی از اثرات غشایی، یا همان (K_m) در مدل جرم و فنر دو درجه آزادی غیرخطی شیواکومار و همکاران [24]، صرف‌نظر شده است. در شکل 4 این سیستم‌های جرم و فنر دو درجه آزادی نمایش داده شده‌اند.

شکل 4 ب شماتیک یک سیستم دو درجه آزادی را نشان می‌دهد که در آن m_i جرم ضربه زننده، m_s^* جرم مؤثر پوسته²، k_c سفتی تماس اصلاح شده³ و k_{bs} سفتی معادل پوسته (سفتی توأم خمشی و برشی یا همان k_s در رابطه (85)) هستند. با توجه به شکل 4، معادلات حرکت سیستم دو درجه آزادی با شرایط اولیه $\dot{x}_i(0) = -v_0, x_s(0) = x_i(0) = \dot{x}_s(0) = 0$ بر اساس قانون دوم نیوتن به صورت رابطه (95) در می‌آیند:

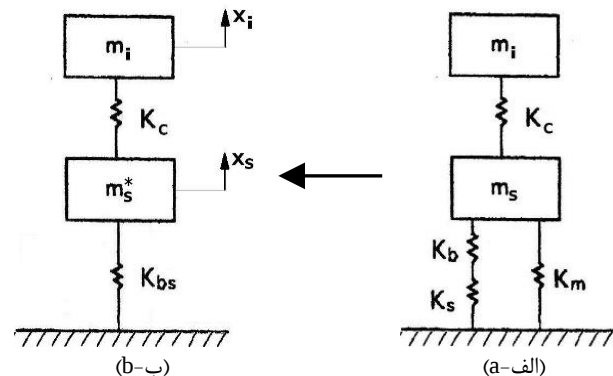


Fig. 4 a) Nonlinear mass and spring model of two degrees of freedom by Shivakumar et al. [24]; b) Improved linear mass and spring model with two degrees of freedom (used in this research).

شکل 4 الف- مدل جرم و فنر دو درجه آزادی غیرخطی شیواکومار و همکاران [24]؛ ب- مدل جرم و فنر دو درجه آزادی خطی بهبودیافته (مورد استفاده در این پژوهش).

$$\sum F_{x_j} = m_j \ddot{x}_j, \quad j = i, s \quad (63)$$

از روابط (63) معادلات به فرم ماتریسی زیر نتیجه شده است:

$$\begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_s^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c & -k_c \\ -k_c & (k_c + k_{bs}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (64)$$

¹ - Linearized contact law

² - Effective mass of the shell

که در رابطه (75)، F_m عبارت است از حداکثر نیروی تماس پیش‌گویی شده و $k = k_i$ همان سفتی تماس هرتز معرفی شده در رابطه (64) است.

4-2-4- به‌کارگیری الگوریتم تکراری و اصلاح سفتی تماس

در این الگوریتم، برای همگرایی سریع‌تر مقدار سفتی تماس، فرض شده است مقدار حداکثر نیروی تماس مورد استفاده در رابطه (75) در تکرار اول ($F_m^{(1)}$) از مدل جرم و فنر یک درجه آزادی به صورت رابطه (76) استخراج شده باشد [34]:

$$F_m^{(1)} = v_0 \sqrt{k_{bs} m_i} \quad (76)$$

با جایگذاری $F_m^{(1)}$ در رابطه (75)، اولین مقدار برای k_c به دست آمده است. اما این مقدار واقعی k_c نیست و باید در تکرارهای بعد اصلاح شود. با استفاده از k_c محاسبه شده در تکرار اول، می‌توان با استفاده از رابطه (69)، حداکثر نیروی تماس را در تکرار دوم $F_m^{(2)}$ محاسبه کرد. با جایگذاری $F_m^{(2)}$ در رابطه (59)، دومین مقدار (اصلاح شده) برای k_c به دست آمده است. این روند تکراری تا آنجا ادامه می‌یابد که قدر مطلق اختلاف حداکثر نیروی تماس در آخرین تکرار با تکرار قبل، از حد مجاز تعریف شده (عدد بسیار کوچک مثل ϵ) کوچک‌تر شود. آخرین مقدار به دست آمده برای سفتی تماس، سفتی تماس اصلاح شده (k_c^*) نامیده می‌شود.

در روش خطی سازی گانگ [18]، با برابر قرار دادن ایمپالس (سطح زیر منحنی نیروی تماس-زمان) حاصل از قانون تماس خطی با ایمپالس حاصل از قانون تماس غیرخطی، سفتی تماس (k_c) با استفاده از تابع گاما به‌طور تقریبی محاسبه شده است. لیکن این محاسبه با فرض رعایت شرط $m_s > 10 m_i$ انجام شده است [18]. لیکن در این مدل، برای محاسبه سفتی تماس اصلاح شده (k_c^*)، هیچ شرطی برای نسبت جرمی اعمال نشده است. نام‌گذاری مدل جرم و فنر "بهبودیافته" برای این مدل، به همین دلیل است. پس از محاسبه تاریخچه نیروی تماس توسط مدل‌های ضربه H-S یا IS-M، ابعاد سطح مربعی کوچک تماس (ابعاد ناحیه اعمال بار ضربه‌ای) طبق رابطه (77) محاسبه شده است [34]:

$$2l_1 = 2l_2 = 2R_{contact} \quad (77)$$

$$R_{contact} = \left(3 \frac{F_{max} R_0}{4 E_*} \right)^{1/3}$$

که در رابطه (77) $R_{contact}$ معرف شعاع ناحیه تماس، F_{max} حداکثر نیروی تماس و R_0 و E_* شعاع انحنای معادل و مدول یانگ معادل هستند و در رابطه (55) تعریف شده‌اند.

5- صحت سنجی

تاریخچه نیروی ضربه مرکزی بر روی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی با استفاده از مدل‌های اول (H-S) و دوم (IS-M) در مقایسه با نتایج تئوری و تجربی گانگ [18] و همچنین نتایج تحلیلی ماتمیولا و سترونج [22]، در شکل 5 نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، نتایج مدل‌های H-S و IS-M ارائه شده در پژوهش حاضر، از تطابق خوبی نسبت به نتایج تئوری و تجربی سایر محققین برخوردار هستند.

برای محاسبه پارامترهای جابجایی پوسته برحسب زمان، رابطه (72) در روابط (53) جایگذاری شده است.

4-2-2- محاسبه جرم مؤثر پوسته (m_s^*)

در تحلیل‌های انجام شده توسط شیواکومار و همکاران [24] (راجع به ضربه روی ورق دایروی کامپوزیتی) و گلنگ [18] (راجع به ضربه روی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی)، جرم مؤثر سازه (m_s^*) برابر یک چهارم جرم کل سازه در نظر گرفته شده است ($m_s^*/m = 1/4$). لیکن ژوو و سترونج [32] نشان دادند که نسبت m_s^*/m به‌شدت وابسته به نسبت سفتی برشی به سفتی خمشی سازه ($\xi = k_s/k_b$) در محل اعمال بار ضربه‌ای است. آن‌ها نشان دادند که در حالت حدی $\xi \rightarrow \infty$ (یعنی حالتی که سهم انرژی کرنشی برشی در مقایسه با سهم انرژی کرنشی نرمال ناچیز است، مانند ورق‌های خیلی جدار نازک) نسبت m_s^*/m برای ورق‌های کامپوزیتی دایروی به سمت یک چهارم میل می‌کند [32].

سوانسون [33] نشان داد که نسبت جرم مؤثر سازه به کل جرم آن به نوع سازه (مانند شکل هندسی سازه (ورق مسطح یا پوسته انحنادار) و ضخامت جداره سازه نازک یا ضخیم)، محل اعمال بار، شرایط مرزی و ناهمسانگردی خواص ماده بستگی دارد. وی نسبت جرم مؤثر سازه به کل جرم آن را به‌طور تقریبی برای تیرهای دو سرگیردار 0.375 و برای تیرهای دو سر لولا 0.5 تخمین زد. وی مقدار این نسبت‌ها در مورد ورق‌ها را تقریباً نصف مقدار این نسبت‌ها در مورد تیرها با همین شرایط مرزی تخمین زد. ایشان مقدار نسبت جرم مؤثر پوسته استوانه‌ای به کل جرم آن را بسیار کوچک‌تر از این نسبت برای تیرها و ورق‌ها تخمین زد. برای مثال، ایشان جرم مؤثر برای پوسته‌های استوانه‌ای گرافیت/اپوکسی (با نسبت $R/h=30$) را بین 2 درصد (به ازای $L/R=4$) تا 5 درصد (به ازای $L/R=16$) در مقایسه با جرم کل آن تخمین زد. این مطلب نشان دهنده آن است که ضربه بر روی پوسته استوانه‌ای بسته، به صورت کاملاً موضعی (یا متمرکز) اعمال می‌شود و این امر سبب می‌شود که تنها سهم نسبتاً کوچکی از جرم کل پوسته استوانه‌ای در پاسخ ضربه دخالت کند [33]. سوانسون همچنین رابطه‌ای تقریبی و ساده برای محاسبه جرم مؤثر سازه‌های کامپوزیتی ارائه کرد [33]:

$$\omega_f \approx \sqrt{\frac{k_{bs}}{m_s^*}} \quad (73)$$

که در رابطه (73)، ω_f کوچک‌ترین فرکانس طبیعی سازه است. در مدل دوم (IS-M)، جرم مؤثر پوسته استوانه‌ای با استفاده از رابطه (27) محاسبه شده است.

4-2-3- قانون تماس خطی شده چوی¹

چوی و لیم [27] نشان دادند که در رابطه معروف قانون تماس هرتز، $F = k\alpha^p$ ، در p ثابت، تغییر مقدار k تا صد برابر و یا در k ثابت، تغییر مقدار p تا 2.5 برابر، تأثیر قابل توجهی بر تاریخچه نیروی ضربه روی ورق‌های مربعی کامپوزیتی نمی‌گذارد. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از رابطه غیرخطی $F = k\alpha^p$ برای محاسبه نیروی تماس الزامی نیست. لذا برای راحتی در انجام تحلیل ضربه، بجای این رابطه غیرخطی، از رابطه خطی شده زیر استفاده کردند [27]:

$$F = k_c \alpha \quad (74)$$

$$k_c = F_m^{1/3} k^{2/3} \quad (75)$$

¹ Choi

جدول 2 خطاهای پارامترهای اصلی منحنی تاریخچه نیروی تماس در مقایسه با آزمایش تجربی گانگ [18].

Table 2 Errors of the main parameters of the contact force history curve in comparison with Gang's experimental test [18].

روش	سطح زیر منحنی نیروی تماس- زمان (ایمپالس) (N.s)	مدت زمان تماس (C.T) (ms)	زمان حداکثر نیروی تماس (F _{max}) (N)	زمان حداکثر نیروی تماس (ms)	حداکثر
روش آزمایش تجربی گانگ [18]	0.756070	1.8686	696.2	0.5249	696.2
مدل اول (H-S)	0.751076	1.5487	696.1	0.7744	696.1
خطا (%)	0.66-	17.11-	47.53	0.01-	
مدل دوم (IS-M)	0.695056	2.0136	599.7	1.0191	599.7
خطا (%)	8.07-	7.76	94.15	13.86-	
روش تحلیلی گانگ [18]	0.767867	1.80	701.2	0.8911	701.2
خطا (%)	1.56	3.67-	69.77	0.7218	
روش تحلیلی ماتمیولا و سترونج [22]	0.554105	1.4976	610.0	0.4456	610.0
خطا (%)	26.71-	19.85-	15.11-	12.38-	

5-1- مقایسه مدل اول (H-S) و مدل دوم (IS-M)

دو نکته در مقایسه بین نیروی تماس پیش‌گویی شده بر اساس دو مدل H-S و IS-M قابل توجه هستند.

1- حداکثر نیروی ضربه تخمین زده شده با مدل H-S دقتی بیشتر از مدل IS-M دارد ولی مدت زمان تماس تخمین زده شده با مدل H-S دقتی کمتر از مدل IS-M دارد.

2- برای ایجاد مدل H-S نیاز به محاسبه تعداد کافی فرکانس طبیعی ω_{mn} ، دو حلقه همگرایی (اولی برای محاسبه سفتی خمشی معادل استاتیکی و دومی برای محاسبه فرکانس سیستم جرم متمرکز) و محاسبه ریشه دو معادله غیرخطی است. ولی مدل IS-M نیاز به تنها فرکانس پایه، تنها یک حلقه همگرایی جهت محاسبه سفتی خمشی معادل استاتیکی و تعداد اندکی تکرار (معمولاً سه یا چهار تکرار) برای همگرایی سفتی تماس اصلاح شده دارد.

با توجه به آنچه تا اینجا گفته شد، می‌توان گفت مدل IS-M از مدل H-S ساده‌تر است و کارایی آن در محاسبات با حجم بالا مانند فرآیندهای بهینه‌سازی، جایی که زمان صرف شده برای پردازش اطلاعات از اولوی بالاتر برخوردار است، مناسب‌تر است. بعلاوه، یکی از ویژگی‌های مدل IS-M مقایسه با مدل H-S، این است که علاوه بر محاسبه نیروی تماس، امکان محاسبه هم‌زمان خیز پوسته در نقطه زیرین محل برخورد نیز وجود دارد.

6- تحلیل ضربه پوسته استوانه‌ای FML/هسته/FML با هسته FGM

در این بخش، پاسخ ضربه پوسته ساندویچی FML/هسته/FML، تحت ضربه عرضی سرعت پایین توسط ضربه زننده کروی صلب در مرکز پوسته، به روش تحلیلی با استفاده از مدل‌های H-S و IS-M محاسبه شده، با نتایج حاصل از حلگر ABAQUS/Explicit مقایسه صورت پذیرفته است. به منظور مدل‌سازی به روش المان محدود، شکل 6، در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. در جدول 3 مشخصات هندسه و جنس پوسته استوانه‌ای و ضربه زننده موردنظر آورده شده‌اند.

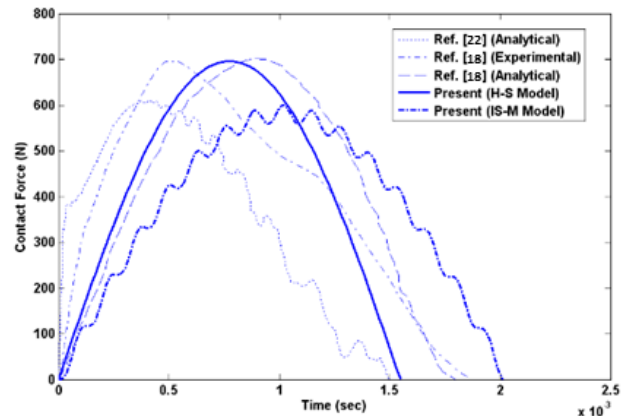


Fig. 5 Comparison of the contact force history obtained from the analytical method of Matmilola and Stronge [22], the analytical and experimental methods of Gang [18] and the first model (H-S) and the second model (IS-M) of the present study.

شکل 5 مقایسه تاریخچه نیروی تماس حاصل از روش تحلیلی ماتمیولا و سترونج [22]، روش‌های تحلیلی و تجربی گانگ [18] و مدل اول (H-S) و مدل دوم (IS-M) پژوهش حاضر.

هندسه، جنس، شرایط مرزی پوسته و ضربه زننده مورد بررسی در شکل 5، در جدول 1 آورده شده‌اند. همچنین خطاهای پارامترهای اصلی منحنی تاریخچه نیروی تماس، در مقایسه با آزمایش تجربی انجام شده توسط گانگ [18]، در جدول 2 آورده شده‌اند.

همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، مدل اول (H-S) حداکثر نیروی تماس را با دقت خیلی خوب پیش‌گویی می‌کند. ولی مدل دوم (IS-M) حداکثر نیروی تماس را با دقتی کمتر پیش‌گویی می‌کند. در عوض مدل IS-M مدت زمان تماس را با دقتی بیشتر در مقایسه با مدل H-S پیش‌گویی می‌کند. همچنین سطح زیر منحنی نیروی تماس-زمان در مدل H-S در مقایسه با مدل IS-M، به مقدار به دست آمده از آزمایش تجربی گانگ [18] نزدیک‌تر است.

در این مثال، نسبت جرم مؤثر پوسته به جرم کل آن 0.0536 به دست آمده است. این عدد، به اعداد تقریبی پیش‌گویی شده توسط سوانسون [33]، در مورد نسبت جرم مؤثر پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی به جرم کل آن (دو تا پنج درصد)، نزدیک است.

جدول 1 هندسه و جنس پوسته و ضربه زننده مورد بررسی در شکل 5 [18, 20].

Table 1 The geometry and material of the shell and impactor studied in Figure 5 [18, 20]

پوسته	جنس	$E_{\text{in}} = 14.506 \text{ GPa}$, $E_{\text{out}} = 5.362 \text{ GPa}$
	(ایزوتروپیک)	$G_{\text{in}} = 2.509 \text{ GPa}$, $\nu_{\text{in}} = 0.231$, $\rho = 1526 \text{ kg/m}^3$
	عرضی	لایه‌چینی: [90] ⁸ (با ضخامت لایه‌های یکسان)
ضربه زننده	هندسه (استوانه)	$R = 108 \text{ mm}$, $L = 280 \text{ mm}$, $h = 2.3 \text{ mm}$
	جنس (ایزوتروپیک)	$\rho_i = 7900 \text{ kg/m}^3$, $E_i = 200 \text{ GPa}$, $\nu_i = 0.3$
جرم و سرعت اولیه	هندسه (کره)	$R_i = 13.2 \text{ mm}$
	جرم و سرعت اولیه	$m_i = 0.0751 \text{ kg}$, $v_0 = 5 \text{ m/s}$

در شکل 7 تاریخچه نیروی تماس حاصل از دو مدل H-S و IS-M، به ازای نسبت‌های جرمی (m_i/m_s) مختلف با نتایج حاصل از حلگر ABAQUS/Explicit مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، نتایج هر دو مدل H-S و IS-M تطابق خوبی با نتایج حلگر ABAQUS/Explicit نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رود، هر چه مقدار نسبت جرمی m_i/m_s بیشتر می‌شود، ماهیت شبه استاتیکی بر رفتار ضربه غالب شده، اختلاف بین نتایج دو مدل H-S و IS-M با نتایج حلگر ABAQUS/Explicit کاهش می‌یابد. درصد تفاوت در حداکثر نیروی تماس حاصل از مدل IS-M و H-S به ترتیب -1.36% و -2.68% به ازای $m_i/m_s = 5.22$ ، 2.18% و -0.23% به ازای $m_i/m_s = 2.09$ ، 4.69% و 1.73% به ازای $m_i/m_s = 1.04$ ، 5.83% و 0.4% به ازای $m_i/m_s = 0.52$ و 12.57% و 7.37% به ازای $m_i/m_s = 0.26$ است.

7- مطالعه پارامتری ضربه روی پوسته‌های استوانه‌ای

FML/هسته/FML با هسته FGM

به منظور بررسی خصوصیات رفتار دینامیکی پوسته‌های ساندویچی FML/هسته/FML با هسته P-FGM تحت بار ضربه‌ای، در این بخش به بررسی اثر برخی پارامترها مانند کسر حجمی هسته (h_{core}/h)، کسر حجمی فلز (MVF) در رویه‌ها و نمای قانون توانی (N) هسته P-FGM پرداخته شده است. در جدول 4 مشخصات هندسه و جنس پوسته و ضربه زننده مورد نظر آورده شده‌اند.

جدول 4 هندسه و جنس پوسته ساندویچی FML/هسته/FML با هسته P-FGM و ضربه زننده فولادی.

Table 4 Geometry and material of FML/core/FML sandwich shell with P-FGM core and steel impactor.

Ti/C 2/1 [0/90/0]	رویه‌ها (facesheets)
P-FGM با ساختار متقارن تیتانیوم-تیتانیوم (Ti-TiB-Ti) بوراید-تیتانیوم	پوسته هسته (core)
$R = 1m$, $L = 1m$, $h = 0.05m$	هندسه (استوانه)
$E_f = 200GPa$, $\nu_f = 0.3$	جنس (ایزوتروپیک)
$R_i = 0.3m$	ضربه هندسه (کروی)
$v_0 = 1m/s$ و $m_i = 1282.7kg$	زننده جرم و سرعت

1-7 اثر کسر حجمی هسته یا h_{core}/h

در شکل‌های 8 و 9 اثر کسر حجمی هسته (h_{core}/h) بر روی به ترتیب تاریخچه نیروی تماس و تاریخچه خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به شکل 8، با افزایش h_{core}/h از 0.0 تا 1.0، حداکثر نیروی تماس حدود 1.23 برابر افزایش یافته است. همچنین با توجه به شکل 9، با افزایش h_{core}/h از 0.0 تا 1.0، حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس حدود 1.36 برابر کاهش یافته است.

2-7 اثر کسر حجمی فلز (MVF) در رویه‌ها

در شکل‌های 10 و 11 تغییرات به ترتیب حداکثر نیروی تماس و حداکثر خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس برحسب کسر حجمی هسته (h_{core}/h) به ازای مقادیر مختلف MVF در رویه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، با افزایش MVF در رویه‌ها از 0.0

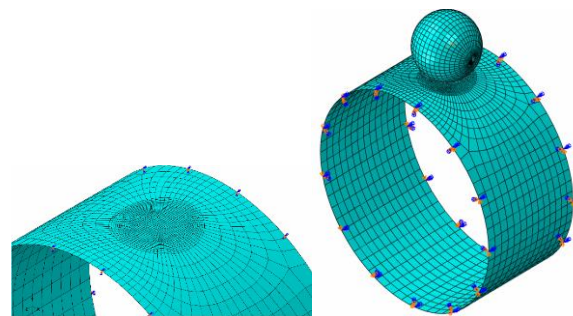


Fig. 6 Modeling of shell and spherical rigid impactor in ABAQUS software.

شکل 6 مدل سازی پوسته و ضربه زننده صلب کروی در نرم افزار ABAQUS.

جدول 3 هندسه و جنس پوسته ساندویچی FML/هسته/FML با هسته P-FGM و ضربه زننده صلب.

Table 3 Geometry and material of FML/هسته/FML sandwich shell with P-FGM core and rigid impactor.

Ti/C 2/1 [0/90/0] , MVF = 0.7	رویه‌ها (facesheets)
FGM با ساختار متقارن تیتانیوم-تیتانیوم بوراید-تیتانیوم	پوسته هسته (core)
(Ti-TiB-Ti) با کسر حجمی 30 درصد یا $h_{core}/h = 0.3$	هندسه (استوانه)
$R = 1m$, $L = 1m$, $h = 0.05m$	ضربه هندسه (کروی)
$R_i = 0.3m$	زننده جرم و سرعت
$v_0 = 3m/s$ و m_i متغیر	

برای مدل سازی پوسته کامپوزیتی از المان S4R دارای 4 گره با شش درجه آزادی در هر گره و برای مدل سازی ضربه زننده از المان‌های صلب R3D4 و R3D3 به ترتیب با 4 و 3 گره با سه درجه آزادی در هر گره استفاده شده است. سپس مش بندی پوسته و ضربه زننده مطابق شکل 6 انجام پذیرفته است.

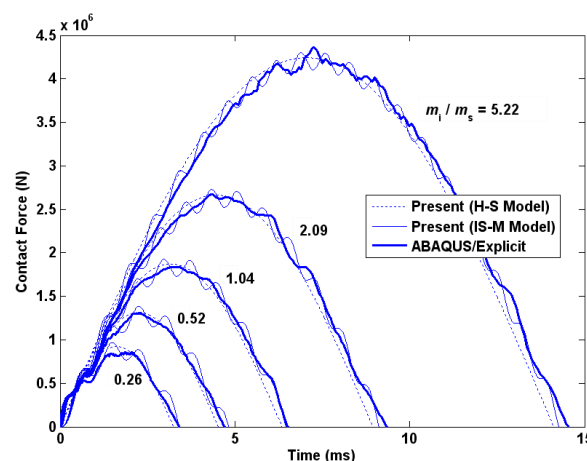


Fig. 7 Comparison of the history of the impact force caused by the impact of a rigid impactor on the FML/core/FML sandwich shell with Ti/C 2.1 [0.90] (MVF = 0.7) skins, and the FGM core with the structure Symmetric Ti-TiB-Ti for different values of mass ratio m_i/m_s , $h_{core}/h=0.3$, $N=1$, $L/R=1$.

شکل 7 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه ناشی از برخورد ضربه زننده صلب به پوسته ساندویچی FML/هسته/FML با رویه‌های (Ti/C 2/1 [0/90/0] (MVF=0/7) و هسته FGM با ساختار متقارن Ti-TiB-Ti به ازای مقادیر مختلف نسبت جرمی $L/R=1$, $N=1$, $h_{core}/h=0.3$, m_i/m_s

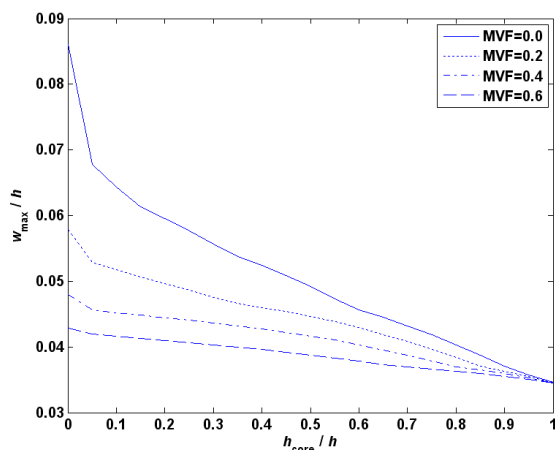


Fig. 11 The maximum buoyancy of the inner surface of the shell under the contact point in terms of core volume fraction (h_{core}/h) for different values of MVF in the skins ($m_i=1282.7$ kg, $v_0=1$ m/s and $N=10$).

شکل 11 حداکثر خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس برحسب کسر حجمی هسته (h_{core}/h) به ازای مقادیر مختلف MVF در رویه‌ها ($m_i=1282.7$ kg, $v_0=1$ m/s, $N=10$).

با توجه به شکل 10، با افزایش MVF از 0.0 تا 0.6، حداکثر نیروی تماس در $h_{core}/h=0$ حدود 2.01 برابر افزایش یافته است. همچنین با توجه به شکل 11، با افزایش MVF از 0.0 تا 0.6، حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس در $h_{core}/h=0$ حدود 1.84 برابر کاهش یافته است. با افزایش h_{core}/h اثر MVF بر حداکثر نیروی تماس و حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس کاهش می‌یابد و در $h_{core}/h=1$ این اثر به صفر می‌رسد.

3-7- اثر نمای قانون توانی (N) هسته P-FGM

در شکل‌های 12 و 13 تغییرات به ترتیب حداکثر نیروی تماس و حداکثر خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس برحسب نمای قانون توانی (N)، به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی هسته (h_{core}/h)، مورد بررسی قرار گرفته است.

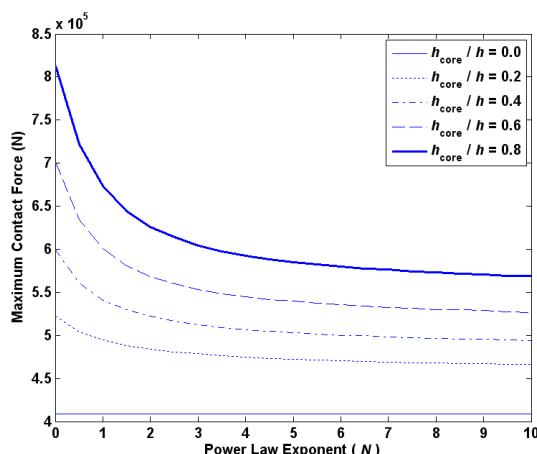


Fig. 12 Maximum contact force in terms of power law (N) for different values of core volume fraction (h_{core}/h) (metal volume fraction in skins $MVF=0.2$, $m_i=1282.7$ kg, $v_0=1$ m/s).

شکل 12 حداکثر نیروی تماس برحسب نمای قانون توانی (N) به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی هسته (h_{core}/h) (کسر حجمی فلز در رویه‌ها $MVF=0.2$ ، $v_0=1$ m/s، $m_i=1282.7$ kg).

تا 0.6، تغییرات شیب در مقادیر h_{core}/h کمتر از 0.1 کاهش یافته، منحنی‌های تغییرات حداکثر نیروی تماس و حداکثر خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس برحسب h_{core}/h ، به صورت هموار در آمده‌اند.

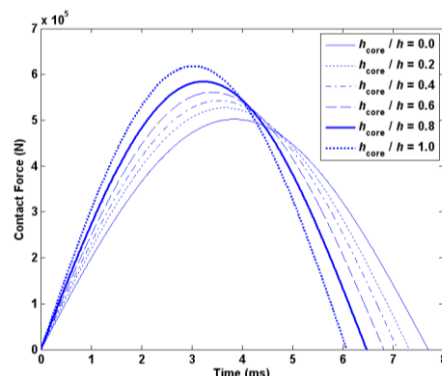


Fig. 8 Comparison of the history of the impact force for different values of core volume fraction h_{core}/h (volume fraction of metal in the skins $MVF=0.5$, $N=10$).

شکل 8 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی هسته h_{core}/h (کسر حجمی فلز در رویه‌ها $MVF=0.5$ ، $N=10$).

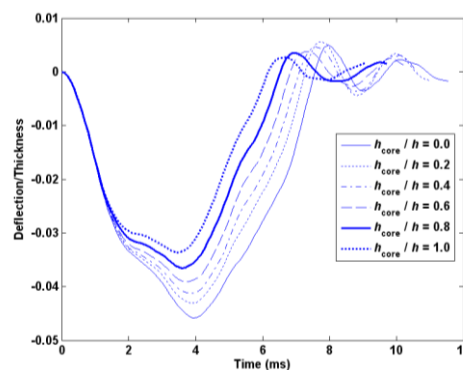


Fig. 9 Comparison of the history of the crust under the contact point for different values of the core volume fraction h_{core}/h (metal volume fraction in the skins $MVF=0.5$, $N=10$).

شکل 9 مقایسه تاریخچه خیز پوسته در زیر نقطه تماس به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی هسته h_{core}/h (کسر حجمی فلز در رویه‌ها $MVF=0.5$ ، $N=10$).

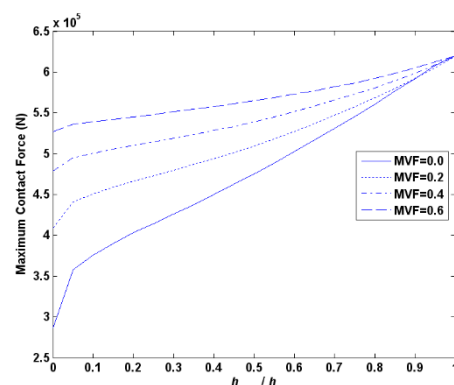


Fig. 10 Maximum contact force in terms of core volume fraction (h_{core}/h) for different values of MVF in the skins ($m_i=1282.7$ kg, $v_0=1$ m/s and $N=10$).

شکل 10 حداکثر نیروی تماس برحسب کسر حجمی هسته (h_{core}/h) به ازای مقادیر مختلف MVF در رویه‌ها ($m_i=1282.7$ kg، $v_0=1$ m/s، $N=10$).

می‌شود [25]. به عنوان مثال، در مرجع [25] ضربه بر روی یک تیر ساندویچی با هسته FGM مورد بررسی قرار گرفته است.

برای محاسبه ماتریس سفتی در پوسته‌ها یا هسته‌های FGM، ابتدا ماده FG به تعداد کافی زیرلایه ایزوتروپیک با خواص معادل، در امتداد ضخامت پوسته یا هسته تقسیم شده است. برای اطمینان از کافی بودن تعداد این زیرلایه‌ها، مطالعه همگرایی جواب (در مورد فرکانس طبیعی یا خیز پوسته) صورت پذیرفته است. سپس خواص ماده ایزوتروپیک متناظر با هر لایه جایگذاری شده، درایه‌های ماتریس سفتی نظیر هر لایه محاسبه شده است. از این ماتریس‌ها در محاسبه انتگرال‌های مربوط به منته‌های تنش استفاده شده است.

8- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با ارتقای دقت تئوری‌های موجود، تئوری پوسته‌های استوانه‌ای جدید توسعه داده شده است که می‌تواند رفتار دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای را بهتر پیش‌گویی کند. همچنین، پس از مطالعه پژوهش‌های گذشته راجع به انواع مدل‌های ضربه مورد استفاده برای مطالعه ضربه عرضی روی سازه‌های کامپوزیتی، در این پژوهش بر اساس مدل‌های ضربه موجود، به ارائه مدل‌های جدید، ساده و مهندسی برای محاسبه تاریخچه نیروی تماس ناشی از ضربه عرضی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی پرداخته شده است.

بر اساس نتایج و بحث‌های ذکر شده، مهم‌ترین نتایج و دستاوردهای کاربردی مبتنی بر نوآوری‌های پژوهش حاضر را می‌توان به‌طور مختصر در موارد زیر خلاصه کرد:

- مدل H-S نسبت به مدل IS-M در پیش‌گویی حداکثر نیروی تماس از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است. ولی مدل IS-M نسبت به مدل H-S در پیش‌گویی مدت‌زمان تماس از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است.
- مدل IS-M از مدل H-S ساده‌تر است و کارایی آن در محاسبات با حجم بالا مانند فرآیندهای بهینه‌سازی، جایی که زمان صرف شده برای پردازش اطلاعات از اولی‌تین بالاتر برخوردار است، مناسب‌تر است. بعلاوه، یکی از ویژگی‌های مدل IS-M در مقایسه با مدل H-S، این است که علاوه بر محاسبه نیروی تماس، امکان محاسبه هم‌زمان خیز پوسته در نقطه زیرین محل برخورد نیز وجود دارد.
- هر چه مقدار نسبت جرمی m_i/m_s بیشتر می‌شود، ماهیت شبه استاتیکی بر رفتار ضربه غالب شده، اختلاف بین نتایج دو مدل H-S و IS-M با نتایج حلگر صریح² آباکوس کاهش می‌یابد.
- در نظر گرفتن عبارت‌های $(1+z/R)$ سبب افزایش همه مقادیر حداکثر کرنش تا بیش از 2٪ (مربوط به کرنش محیطی به ازای $N=1$) شده است.
- با افزایش h_{core}/h ، حداکثر نیروی تماس حدود 1.23 برابر افزایش یافته و همچنین حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس حدود 1.36 برابر کاهش یافته است.
- با افزایش MVF حداکثر نیروی تماس در حدود 2.01 برابر افزایش یافته است. همچنین حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس حدود 1.84 برابر کاهش یافته است. با افزایش h_{core}/h اثر

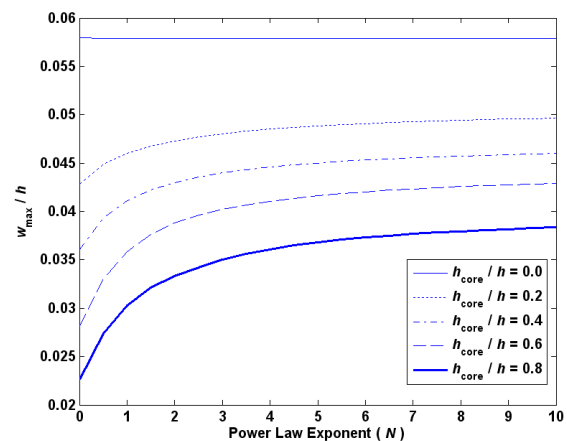


Fig. 13. The maximum internal surface tension of the shell under the contact point in terms of power law (N) for different values of the core volume fraction (h_{core}/h) (MVF=0.2, $m_i=1282/7$ kg, $v_0 = 1$ m/s).

شکل 13 حداکثر خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس برحسب نمای قانون توانی (N) به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی هسته (h_{core}/h) (کسر حجمی فلز در رویه‌ها $v_0 = 1$ m/s, $m_i = 1282.7$ kg, MVF=0.2).

با توجه به شکل 12، با افزایش کسر حجمی هسته (h_{core}/h) از 0.0 تا 0.8، حداکثر نیروی تماس در $N=0$ حدود 1.99 برابر و در $N=10$ حدود 1.39 برابر افزایش یافته است. همچنین با توجه به شکل 13، با افزایش کسر حجمی هسته (h_{core}/h) از 0.0 تا 0.8، حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس در $N=0$ حدود 2.56 برابر و در $N=10$ حدود 1.51 برابر کاهش یافته است. با افزایش مقدار N ، شیب منحنی‌های حداکثر نیروی تماس و حداکثر خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس، به ازای مقادیر h_{core}/h بزرگ‌تر از صفر، به ترتیب افزایش و کاهش یافته، به‌طوری که در $N=10$ شیب این منحنی‌ها به نزدیک صفر رسیده است.

در مدل‌سازی پوسته‌های ساندویچی FML/هسته/FML با هسته FGM، فرض شده است جنس ماده هسته سفت¹ باشد و همراه با رویه‌های بالا و پایین تغییر شکل کلی بدهد. به عبارت دیگر تغییر شکل موضعی رویه‌های بالا و پایین در اثر ضربه، تفاوت قابل ملاحظه‌ای باهم ندارند، برخلاف آنچه در مورد سازه‌های ساندویچی با هسته نرم اتفاق می‌افتد. همچنین فرض شده است که اتصال کامل بین هسته و رویه‌های Ti/C برقرار است. به منظور کاهش جهش در تنش‌های بین لایه‌ای، خواص ماده هسته در محل اتصال به رویه‌ها، هم‌جنس با لایه فلزی رویه در تماس با هسته، یعنی تیتانیوم (Ti)، در نظر گرفته شده است. لذا توزیع ماده هسته از سطح داخل به سمت سطح خارج پوسته به این صورت است که یک پوسته استوانه‌ای از جنس Ti/C به عنوان رویه پایینی در سطح داخل قرار گرفته و هسته از جنس ماده FG صورت یک پوسته استوانه‌ای روی آن قرار گرفته است. این پوسته FGM دارای ساختار متقارن است. به نحوی که خواص ماده آن، از سطح داخل (تیتانیوم Ti) تدریجاً به سمت سطح میانی (سرامیک TiB) تغییر می‌کند و از این سطح نیز تا سطح خارجی، خواص ماده تدریجاً به تیتانیوم تغییر می‌یابد. آنگاه یک پوسته استوانه‌ای نازک دیگر، با لایه چینی یکسان با رویه پایینی، به عنوان رویه بالایی روی هسته استوانه‌ای قرار گرفته است. از هسته‌های FGM در سیستم‌های محافظ حرارتی (TPS2) با ساختار ساندویچی استفاده

² Explicit

¹ - Hard Core

- [15] Zhao, G., Hooman, M., Yarigaravesh, M., Algarni, M., Opulencia, M.J.C., Alsaikhan, F., Jalil, A.T., Mohamed, A., AboRas, K.M., Rahman, M.L. and Sarjadi, M.S., "Vibration analysis of size dependent micro FML cylindrical shell reinforced by CNTs based on modified couple stress theory". *Arabian Journal of Chemistry*, 15(10), p.104115, 2022.
- [16] Suresh S., Mortensen A., "Fundamentals of functionally graded materials", London, UK: IOM Communications Limited, 1998.
- [17] Rao S.S., "Mechanical vibrations", 2nd edition, Addison Wesley, 1990.
- [18] Gong S.W., "A study of impact on composite laminated shells", Ph.D. Dissertation, National University of Singapore, 1995.
- [19] Chandrashekhara K., Schroeder T., "Nonlinear impact analysis of laminated cylindrical and doubly curved shells", *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, pp. 2160-2179, 1995.
- [20] Kistler L.S., Waas A.M., "Impact response of cylindrically curved laminates including a large deformation scaling study", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 1-2, pp. 61-75, 1998.
- [21] Ganapathy S., Rao K.P., "Interlaminar stresses in laminated composite plates cylindrical spherical shell panels damaged by low velocity impact", *Composite Structures*, Vol. 38, No. 1-4, pp. 157-168, 1997.
- [22] Matemilola S.A., Stronge W.J., "Impact response of composite cylinders", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, No. 21, pp. 2669-2684, 1997.
- [23] Christoforou A.P., Swanson S.R., "Analysis of simply-supported orthotropic cylindrical shells subjected to lateral impact loads", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, Issue 2, pp. 376-382, 1990.
- [24] Shivakumar K.N., Elber W., Illg W., "Prediction of impact force and duration due to low-velocity impact on circular composite laminates", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp. 674-680, 1985.
- [25] Apetre N.A., Sankar B.V., Ambur D.R., "Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 2479-2496, 2006.
- [26] Choi I.H., Hong C.S., "New approach for simple prediction of impact force history on composite laminates", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 10, pp. 2067-2072, 1994.
- [27] Choi I.H., Lim C.H., "Low-velocity impact analysis of composite laminates using linearized contact law", *Composite Structures*, Vol. 66, pp. 125-132, 2004.
- [28] Yang S.H., Sun C.T., "Indentation law for composite laminates", In *Composite Material: Testing and Design*, pp. 425-449, ASTM STP 787, Philadelphia PA, 1982.
- [29] Greszczuk L.B., "Impact Dynamics", John Wiley & Sons, pp. 55-94, New York, 1982.
- [30] Pashah S., Massenzio M., Jacquelin E., "Prediction of structural response for low velocity impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 119-132, 2008.
- [31] Soedel W., "Vibrations of shells and plates", 3rd Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc., New York, 2004.
- [32] Zhou D.W., Stronge W.J., "Low velocity impact denting of HSSA lightweight sandwich panel", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, pp. 1031-1045, 2006.
- [33] Swanson S.R., "Limits of quasi-static solutions in impact of composite structures", *Composites Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 261-267, 1992.
- [34] Abrate S., "Impact on composite structures", Cambridge University Press, US, 1998.
- [35] Khalili S.M.R., Mittal R.K., Mohammad Panah N., "Analysis of fiber reinforced composite plates subjected to transverse impact in the presence of initial stresses", *Composite Structures*, Vol. 77, pp. 263-268, 2007.

MVF بر حداکثر نیروی تماس و حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس کاهش می‌یابد و در $h_{core}/h = 1$ این اثر به صفر می‌رسد.

- با افزایش کسر حجمی هسته (h_{core}/h) حداکثر نیروی تماس افزایش یافته است. همچنین حداکثر خیز پوسته در زیر نقطه تماس کاهش یافته است. با افزایش مقدار N ، شیب منحنی‌های حداکثر نیروی تماس و حداکثر خیز سطح داخلی پوسته در زیر نقطه تماس، به ازای مقادیر h_{core}/h بزرگ‌تر از صفر، به ترتیب افزایش و کاهش یافته، به‌طوری که در $N=10$ شیب این منحنی‌ها به نزدیک صفر رسیده است.

9- مراجع

- [1] Gong S.W., Lam K.Y., "Rotating multilayered cylindrical shells to impact loading", *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 1: Technical Notes, pp. 139-142, 2002.
- [2] Krishnamurthy K.S., Mahajan P., Mittal R.K., "Impact response and damage in laminated composite cylindrical shells", *Composite Structures*, Vol. 59, pp. 15-36, 2003.
- [3] Dubinin V.V., Bannikov S.N., "The experimental investigation of the impact of a particle or a rigid body on a cylindrical shell", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 43, No. 1-4, pp. 253-260, 2003.
- [4] Tsunokake H., Kobayashi H., Araki H., "Impact response of transversely isotropic circular cylindrical shells", *Structures and Materials*, Vol. 15, Structures Under Shock and Impact VIII, pp. 485-493, 2004.
- [5] Gning P.B., Tarfaoui M., Collombet F., Davies P., "Prediction of damage in composite cylinders after impact", *Journal of Composite Materials*, Vol. 39, No. 10, pp. 917-928, 2005.
- [6] Jafari A.A., Khalili S.M.R., Azarafza R., "Transient dynamic response of composite circular cylindrical shells under radial impulse load and axial compressive loads", *Thin-Walled Structures*, Vol. 43, pp. 1763-1786, 2005.
- [7] Azarafza R., "Weight and dynamic optimization of multi-layer composite cylindrical shells", PhD thesis, Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2014, In persian.
- [8] Kumar S., Nageswara Rao B., Pradhan B., "Effect of impactor parameters and laminate characteristics on impact response and damage in curved composite laminates", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 26, No. 13, pp. 1273-1290, 2007.
- [9] Khalili S.M.R., Azarafza R., Davar A., "Transient dynamic response of initially stressed composite circular cylindrical shells under radial impulse load", *Composite Structures*, Vol. 89, pp. 275-284, 2009.
- [10] Ahmadi I., Sadighi M., "Finite element analysis of low-velocity impact on functionally graded cylindrical shell", 17th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran, Paper code: ISME-2009-2520, May 19-21 2009.
- [11] Setoodeh A., Enferadi M., "Effect of structural damping on dynamic response of laminated cylindrical shell subjected to low velocity impact", 17th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran, Paper code: ISME-2009-1722, May 19-21 2009.
- [12] Rahmani O., Khalili S.M.R., Malekzadeh K., "Free vibration response of composite sandwich cylindrical shell with flexible core", *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 1269-1281, 2010.
- [13] Bayat M.R., Rahmani O., Mousavi Mashhadhi M., "dynamic analysis of composite cylinders reinforced with carbon nanotubes under low speed impact", 24th annual international conference of mechanical engineering of Iran, Yazd, May 2015, In persian.
- [14] Mamandi A., Salimzadeh M., "Analysis of nonlinear vibrations of composite cylindrical shell with internal pressure against low speed impact using analytical methods and finite elements", *Aerospace Mechanics*, Volume 16, Number 3, pp. 59-73, 2019, In persian.



بررسی تجربی تأثیر عملیات سطحی مختلف بر رفتار شکست مود اول اتصال چسبی کامپوزیت - آلومینیوم

امیر کریمان مقدم¹، سعید رهنما^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، srahnama@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/12/03

پذیرش: 1402/02/25

کلیدواژگان

عملیات سطحی، اتصال چسبی، کامپوزیت، مود اول شکست

اتصال چسبی در مقایسه با روش‌های اتصال مکانیکی دارای توزیع تنش یکنواخت، عملکرد خستگی مناسب‌تر و اثر کاهش وزن بهتر می‌باشد. برخی از خرابی‌ها در اتصال چسبی به دلیل وجود آلودگی و زبری نامناسب در سطوح اتصال ایجاد می‌شوند. در این مطالعه تأثیر عملیات سطحی مختلف بر رفتار مکانیکی اتصال چسبی کامپوزیت/آلومینیوم مود اول شکست و با استفاده از نمونه تیریکسرگردار دولبه بررسی می‌شوند. عملیات سطحی با سه روش پوسته‌کنی، سنباده‌زنی و لیزر برای چسبنده‌های کامپوزیتی و دو روش سنباده‌زنی و لیزر برای چسبنده‌های آلومینیومی انجام شده است. در روش عملیات سطحی لیزری فاصله عرضی شیارها و قطر دایره لیزر ثابت و سرعت اسکن و توان دستگاه متغیر در نظر گرفته شده است. زبری سنجی سطح چسبنده‌ها نشان دهنده افزایش زبری سطح تا مقدار مشخصی از چگالی انرژی لیزر می‌باشد، اما بعد از آن بدلیل ذوب شدن سطح چسبنده‌ها زبری کاهش یافته است. بررسی نتایج نشان دهنده افزایش 13.43٪ نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست با استفاده از روش عملیات سطحی لیزر نسبت به روش سنباده‌زنی و افزایش 7.46٪ نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست نسبت به روش پوسته‌کنی می‌باشد. همچنین بررسی سطح شکست اتصال نشان دهنده افزایش حالت شکست پارگی الیاف در سطح اتصال با انتخاب درست پارامترهای لیزر می‌باشد که باعث بهبود استحکام اتصال شده است.

Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint

Amir Kariman Moghadam¹, Saeed Rahnema^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, srahnama@birjand.ac.ir

Keywords

Surface Treatment, Adhesive Joint, Composite, Mode I Fracture

Abstract

Compared to mechanical joining methods, adhesive bonded joints have uniform stress distribution, good fatigue performance and better weight reduction effect. Some failures in the adhesive bonded joints are caused by the presence of contamination and inappropriate roughness in the joint surfaces. In this study, the effect of different surface treatment on the mechanical behavior of the composite/aluminum adhesive joint in the mode I of fracture is investigated by using Double-cantilever beam specimen. Surface treatment has been done with three methods of Peel Ply Processing, Sanding and Laser for composite adherent and two methods of Sanding and Laser for aluminum adherent. In the laser surface treatment method, the transverse distance of the grooves and the spots diameter are fixed, and the scanning speed and power of the machine are variable. The surface roughness measurement of the adherents shows the increase of the surface roughness up to a certain value of the laser energy density, but after that the roughness has decreased due to the melting of the adherent surface. The results show an increase of 13.43% and 7.46% in the critical strain energy release rate of the mode I of fracture using the laser surface treatment method compared to the Sanding method and the Peel Ply Processing method, respectively. Also, examination of the fracture surface of the joint shows an increase in the failure mode of fiber tearing at the joint surface with the correct selection of laser parameters, which has improved the strength of the joint.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Kariman Moghadam, A., Rahnema, S., "Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2116-2127, 2023.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1990008.1828

1- مقدمه

پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) به دلیل استحکام ویژه و مدول الاستیک بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و مقاومت در برابر خستگی، به طور گسترده در صنایع هوافضا، الکترونیک، خودرو، دریایی، صنایع راه آهن و سایر بخش‌ها استفاده می‌شوند. برای بهبود عملکرد سازه‌های مهندسی و در عین حال کاهش هزینه‌ها، طراحی سازه‌ها بر اساس ویژگی‌های مواد مختلف و استفاده ترکیبی از چند ماده (به ویژه استفاده ترکیبی از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن و فلزات) انجام می‌شود. فن‌آوری اتصال بین پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن و سایر مواد یک موضوع بسیار مهم در استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن در کاربردهای عملی است. در مقایسه با روش‌های اتصال مکانیکی سنتی، اتصال چسبی دارای توزیع تنش یکنواخت، عملکرد خستگی خوب و اثر کاهش وزن بهتر می‌باشد [1].

در میان عوامل مؤثر بر استحکام اتصالات چسبی، عملیات سطحی چسبندنده‌ها قبل از ایجاد اتصالات چسبی یکی از عوامل بسیار مهم می‌باشد. عملیات سطحی لایه‌های مرزی ضعیف را از بین می‌برد، سطح را تمیز می‌کند، انرژی سطح (در درجه اول از طریق اکسیداسیون) را تغییر می‌دهد و ویژگی‌های میکرومکانیکاری^۱ را بهبود می‌بخشد. اثر خالص این تغییرات پیوند بین سطحی، اتصال مکانیکی بین چسب و چسبندنده و مقاومت بیشتر در برابر عوامل محیطی و به ویژه اثر رطوبت می‌باشد [2]. برای به دست آوردن استحکام بهینه اتصال چسبی، افزایش انرژی سطح بستر با فرایندهای عملیات سطوح خاص ضروری است. یک عملیات سطحی مناسب باید باعث پخش آسان چسب روی چسبندنده و تقویت‌کننده تعامل مولکولی و جذب فیزیکی شود. شکل-شناسی^۲ سطح چسبندنده عملیات سطحی شده باید منجر به پیوندهای مکانیکی برای تقویت اتصال شود. عملیات مکانیکی مانند ماسه‌زنی، سنباده‌زنی و سنگ-زنی سطح بالاتری را برای ایجاد اتصال ایجاد می‌کند. این عملیات سطحی استحکام اتصال را افزایش می‌دهد، اما باعث ناهمگونی سطح عملیات سطحی شده و در نتیجه دوام پایین اتصال می‌شود [3,4].

همچنین روش عملیات سطحی شیمیایی مانند حکاکی یا آندایزینگ^۳ و پوشش با مواد شیمیایی فعال به عنوان جایگزین عملیات مکانیکی استفاده می‌شود. چنین عملیاتی، سطح را فعال می‌کند و باعث ایجاد شکل‌شناسی متخلخل و همگن می‌شود. با این حال، عملیات شیمیایی برای امنیت انسان و محیط زیست خطرناک هستند [4].

یک جایگزین مناسب برای عملیات سطحی ساینده و شیمیایی استفاده از لیزر و پلاسما است. عملیات سطحی پلاسما دو عیب دارد: زمان باز بسیار کوتاه (چند ساعت) که بدان معنی است پیوند باید بلافاصله پس از اصلاح انجام شود و نیاز به خلاء و گازهای مخصوص برای انجام عملیات سطحی است [4]. برای اتصال چسب از لیزرهای برقی استفاده شده و استحکام اتصال به طرز چشمگیری بهبود یافته است. بسترهای آزمایش شده شامل آلیاژهای آلومینیوم، آلومینا، مس، پلیمرهای مختلف، کامپوزیت‌ها، آلیاژهای تیتانیوم، الیاف پلی‌اتیلن، الیاف کولار و غیره بودند. نتایج نشان داده است که استحکام اتصال با تمیز کردن سطح از آلاینده‌ها، از بین بردن لایه‌های مرزی ضعیف، ایجاد اتصال متقابل و ایجاد یک شکل‌شناسی زبر و بسیار یکنواخت بهبود یافته است. همچنین عملیات سطحی با لیزر تأثیری بر خواص مکانیکی چسبندنده ندارد [4]. عملیات سطحی بهینه لیزر نیاز به انتخاب پارامترهای مناسب فرآیند برای هر

ماده چسبندنده (قطر دایره لیزر، توان دستگاه، سرعت اسکن و فاصله عرضی شیارها) دارد [4]. شکل 1 نحوه اجرای عملیات سطحی با استفاده از روش لیزر را نشان می‌دهد.

سطح برای پاکسازی آلودگی روغن، حذف لایه اکسید (در فلزات) و تحریک فعالیت سطحی آماده‌سازی می‌گردد. افزایش زبری سطح تا حد مشخصی نیز می‌تواند باعث افزایش استحکام اتصال گردد [5]. در مطالعات قبلی روش‌های عملیات سطحی مختلفی مانند اچ شیمیایی، عملیات پلاسما، سایش مکانیکی، سنبلاست و عملیات سطحی لیزری انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

رادوسکی تأثیر عملیات مکانیکی بر زبری سطح و خواص مکانیکی اتصال چسبی تک لبه فولادی را بررسی کرده است. روش‌های عملیات سطحی سنگ-زنی^۴، نرمه پرداخت‌کاری^۵ و پرداخت‌کاری عالی^۶ استفاده شده است [6]. هر سه روش عملیات مکانیکی سطوح باعث افزایش استحکام برشی اتصال گردیده است اما روش نرمه پرداخت‌کاری بیشترین تأثیر را بر افزایش استحکام برشی داشته است. سورنیتو و همکارانش تأثیر عملیات سطحی اتصال چسبی الیاف کربن بر مقاومت مکانیکی و شکل‌شناسی شکست را با استفاده از نمونه تک لبه بررسی کردند [7]. در این تحقیق از سه روش ماسه‌زنی، سنگ‌زنی و پوسته-کنی برای عملیات سطحی استفاده شده است، نتایج نشان دهنده کاهش استحکام اتصال با استفاده از روش پوسته کنی بوده است.

نجف پور و همکارانش تأثیر کیفیت سطح در عمر خستگی قطعات آلومینیومی ترمیم شده با وصله کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان دهنده افزایش عمر خستگی تا 7٪ با انتخاب سنباده مناسب بوده است [8]. ژان و همکارانش تأثیر عملیات سطحی با اشعه لیزر مادون قرمز^۷ و روش پوسته کنی^۸ را در اتصال چسبی الیاف کربن مورد بررسی قرار دادند [9]. در این تحقیق از نمونه تک لبه برای بررسی تأثیر عملیات سطحی استفاده شده است. نتایج نشان دهنده افزایش استحکام برشی در هر دو روش نسبت به سطوح عملیات سطحی نشده می‌باشد، اما روش پوسته کنی تأثیر بیشتری بر استحکام برشی اتصال چسبی دارد.

سان و همکارانش تأثیر عملیات سطحی توسط لیزر بر خواص شیمیایی، شکل‌شناسی و استحکام برشی اتصال چسبی تک لبه کامپوزیت/کامپوزیت را بررسی کردند [10]. آن‌ها تأثیر افزایش چگالی انرژی لیزر بر استحکام برشی

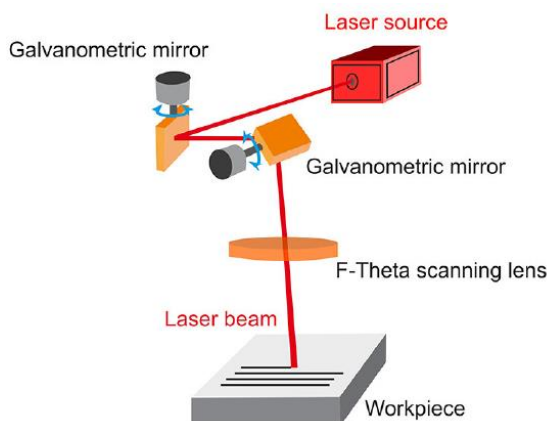


Fig. 1 laser surface treatment process

شکل 1 فرآیند عملیات سطحی لیزری

⁵ Lapping

⁶ Superfinish

⁷ Infrared Laser Processing

⁸ Peel Ply Processing

¹Micro- Topographical

² Morphology

³ Anodizing

⁴ Grinding

برای تولید چسبنده کامپوزیتی از الیاف کربن تک جهت با وزن 250 گرم در هر مترمربع به عنوان تقویت کننده و رزین اپوکسی LR660 به عنوان زمینه استفاده شده است. تعداد لایه‌های چسبنده کامپوزیتی 11 عدد و با زاویه صفر درجه می‌باشد. چسبنده‌های کامپوزیتی جهت کاهش حباب‌های هوا با روش نفوذ در خلاء (VIP) ساخته شده‌اند. مطابق با استاندارد ASTM D2584 کسر حجمی الیاف 59.4٪ محاسبه شده است. همچنین خواص مکانیکی چسبنده کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D3039 از آزمایش تجربی بدست آمده است. خواص مکانیکی چسبنده کامپوزیتی مطابق جدول 1 می‌باشد. جنس چسبنده آلومینیومی از آلومینیوم T6 - 7075 که بطور گسترده در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌باشد. همچنین برای ایجاد اتصال از چسب دو جزئی Araldite 2015 استفاده شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم T6-7075 و چسب Araldite 2015 مطابق جدول 2 می‌باشد.

2-2- آماده‌سازی سطوح اتصال

برای آماده‌سازی سطح چسبنده‌ها از سه روش پوسته کنی (PP)، سنباده زدن (S) و عملیات سطحی لیزر (LA) استفاده شده است. برای نمونه‌های (PP) از روش پوسته کنی برای آماده‌سازی سطح چسبنده کامپوزیتی استفاده شده و از سنباده شماره 120 برای آماده‌سازی سطح چسبنده آلومینیومی استفاده شده، همچنین در رویکرد سنباده زدن برای هر دو چسبنده کامپوزیتی و آلومینیومی از سنباده شماره 120 استفاده شده است. عملیات سطحی لیزر توسط دستگاه Yb: fiber با حداکثر توان نامی 30 وات، طول موج 1050 نانومتر و فرکانس 20 کیلوهرتز انجام شده است. الگوی عملیات سطحی عمود بر مسیر رشد ترک در تمامی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین چگالی انرژی لیزر به عنوان پارامتر مؤثر در تغییر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. چگالی انرژی لیزر مطابق رابطه زیر بدست می‌آید [16].

$$ED = \frac{P}{V \cdot \phi_s} \quad (2)$$

در این رابطه ED چگالی انرژی پالس، V سرعت اسکن و ϕ_s قطر دایره لیزر می‌باشد. در این پژوهش 7 حالت مختلف برای چسبنده‌های کامپوزیتی و آلومینیومی مطابق با جدول 3 برای عملیات سطحی لیزر با فاصله عرضی شیارها $50 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی چسبنده کامپوزیتی

Table 1 Mechanical properties of composite adherent

$v_{12} = v_{13} = v_{23}$	E_{33}	E_{22}	E_{11}
	(GPa)	(GPa)	(GPa)
0.29	7.43	7.43	94.5

جدول 2 خواص مکانیکی چسبنده آلومینیومی و چسب [14,15]

Table 2 Mechanical properties of aluminum adherent and adhesives [14,15]

	ν	E
		(GPa)
Araldite 2015	0.3	1.85
AL 7075-T6	0.33	71.4

را در ده حالت مختلف بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان دهنده افزایش استحکام برشی با افزایش چگالی انرژی لیزر تا حد مشخصی بوده است. تاوو همکارانش تأثیر عملیات سطحی توسط لیزر CO₂ بر چقرمگی شکست مود اول شکست را در اتصال چسبی کامپوزیتی با استفاده از نمونه تیر یکسرگیردار دولبه بررسی کردند [11]. در نتایج آن‌ها روش ماسه‌زنی (SB) بیشترین مقدار چقرمگی شکست، روش پوسته‌کنی (PP) کمترین مقدار چقرمگی شکست و تابش لیزر CO₂ بین روش پوسته‌کنی و روش ماسه‌زنی بوده است. موریرا و همکارانش تأثیر عملیات سطحی توسط لیزر Yb-KYW را بر رفتار اتصال چسبی کامپوزیت/کامپوزیت در مود اول شکست را بررسی کردند [12]. آن‌ها از نمونه تیر یکسرگیردار دولبه برای انجام آزمون‌های استاتیکی استفاده کرده‌اند. در تحقیق آن‌ها توان لیزر و فاصله شیارها ثابت و قطر دایره لیزر و سرعت اسکن متغیر در نظر گرفته شده بود. نتایج نشان دهنده افزایش تا 10٪ در چقرمگی شکست مود اول با انتخاب مناسب پارامترهای لیزر می‌باشد.

در این مقاله تأثیر سه نوع عملیات سطحی سنباده‌زنی، پوسته کنی و لیزر در اتصال چسبی مود اول شکست آلومینیوم - پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن با استفاده از نمونه تیر یکسرگیردار دولبه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در عملیات سطحی لیزر قطر دایره لیزر و فاصله عرضی شیارها ثابت خواهند بود اما سرعت اسکن و توان نامی دستگاه برای داشتن سطوحی با زبری متفاوت متغیر خواهد بود. تأثیر نوع عملیات سطحی بر زبری سطح چسبنده‌ها، چقرمگی شکست مود اول شکست و همچنین سطح شکست ایجاد شده در اتصال مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

2- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا مراحل آماده‌سازی نمونه‌های تیر یکسرگیردار دولبه ارائه خواهد شد، سپس مراحل انجام آزمون مود اول شکست بیان خواهد شد.

2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی رفتار اتصال چسبی در مود اول شکست مطابق استاندارد ASTM D5528 از نمونه تیر یکسرگیردار دولبه استفاده شده است. هندسه نمونه تیر یکسرگیردار دولبه در شکل 2 نشان داده شده است. در شکل 2 طول کلی نمونه $(L = 200 \text{ mm})$ ، ضخامت چسبنده آلومینیومی $(h_{AL} = 3 \text{ mm})$ ، عرض نمونه $(B = 25 \text{ mm})$ و ضخامت چسب $(t_{adhesive} = 0.4 \text{ mm})$ می‌باشند. ضخامت چسبنده کامپوزیتی (h_{CFRP}) برای داشتن نمونه متقارن طبق رابطه زیر بدست می‌آید [13]:

$$\frac{h_{CFRP}}{h_{AL}} = \left(\frac{E_{AL}}{E_{CFRP}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

در رابطه فوق E_{AL} مدول یانگ آلومینیوم و E_{CFRP} مدول یانگ چسبنده کامپوزیتی می‌باشد. بعد از محاسبه مدول یانگ چسبنده کامپوزیتی در جهت الیاف و قرار دادن در رابطه $h_{CFRP} = 2.6 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. همچنین طول ترک اولیه $(a_0 = 60 \text{ mm})$ می‌باشد.

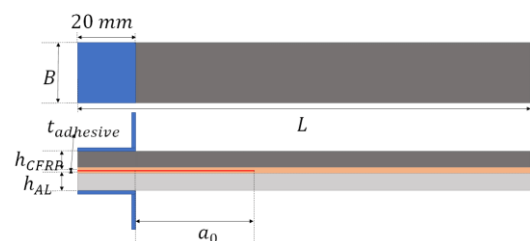


Fig. 2 Double-cantilever beam geometry

شکل 2 هندسه تیر یکسرگیردار دولبه

جدول 3 پارامترهای عملیات سطحی لیزری

Table 3 Laser surface treatment parameters

شماره نمونه	چسبده آلومینیومی			چسبده کامپوزیتی		
	توان نامی متوسط (W)	سرعت اسکن (mm/s)	چگالی انرژی لیزر (J/mm ²)	توان نامی متوسط (W)	سرعت اسکن (mm/s)	چگالی انرژی لیزر (J/mm ²)
LA - 1	6	1000	0.17	4.5	1500	0.085
LA - 2	9	1000	0.34	6	2000	0.085
LA - 3	18	1000	0.51	9	1200	0.21
LA - 4	12	300	1.14	7.5	1000	0.21
LA - 5	18	300	1.71	13.5	1500	0.25
LA - 6	12	90	3.81	10.5	800	0.37
LA - 7	18	90	5.71	12	600	0.37

فرآیند عملیات سطحی لیزری برای چسبده CFRP به این شکل است که الیاف کربن توسط تابش لیزر ارسالی ابتدا در طی فرآیند لیزر گرم می‌شوند، زیرا هدایت حرارتی عمودی¹ الیاف کربن از رزین بیشتر است. سپس الیاف کربن گرما را به محیط اطراف هدایت می‌کنند و در نهایت، رزین سطح حذف می‌شود [9].

3-2- شکل‌شناسی سطح چسبده‌ها

در تحقیق حاضر برای شکل‌شناسی سطح عملیات سطحی شده چسبده‌ها از میکروسکوپ الکترونی و دوربین دیجیتال استفاده شده است. همچنین از دستگاه زبری سنجی TR200 جهت بررسی زبری متوسط سطح چسبده‌ها استفاده شده است.

4-2- تجهیزات آزمون مود اول شکست

آزمون مود اول شکست مطابق با استاندارد ASTM D5528 انجام شده است. دستگاه آزمون کشش ژوئیک 250 با ظرفیت 5 تن و مجهز به نیروسنج 2 کیلونیوتنی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. همچنین دوربین دیجیتال سونی با سرعت فیلم‌برداری 100 فریم بر ثانیه برای ثبت رشد ترک در حین انجام آزمون استفاده شده است. شکل 3 تصویری از تجهیزات آزمون مود اول شکست را نشان می‌دهد. مطابق با استاندارد برای هر حالت تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، همچنین آزمون مود اول به صورت کنترل جابه-جایی و با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه توسط نیروسنج 2 کیلونیوتنی انجام شده است.

5-2- رویکرد محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست

در این تحقیق نرخ رهایی انرژی کرنشی با روش تئوری تیر اصلاح شده، محاسبه شده است. معادله نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش تیر ساده، برای یک تیر یکسرگیردار ساده به صورت زیر است [17]:

$$G = \frac{3F\delta}{2Ba} \quad (3)$$

¹ Vertical thermal conductivity

که F بار اعمالی، δ جابه‌جایی نقطه اعمال بار، b عرض نمونه و a طول ترک اولیه می‌باشد. در عمل این عبارت بدلیل اینکه تیر به طور کامل گیردار نیست و امکان چرخش در حین بارگذاری وجود دارد، مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی را بیشتر محاسبه می‌کند. به همین دلیل برای از بین بردن اثرات چرخش و اصلاح رفتار تیر یکسرگیردار یک مقدار اصلاحی $|\Delta|$ به طول ترک a اضافه می‌شود ($a + |\Delta|$). مقدار $|\Delta|$ به صورت عملی و از نمودار ریشه سوم نرمی $G^{1/3} = \left(\frac{\delta}{b}\right)^{1/3}$ برحسب طول ترک a بدست می‌آید. شکل 4 به صورت شماتیک منحنی $G^{1/3}$ را برحسب طول ترک و مقدار اصلاحی Δ را نشان می‌دهد. در نتیجه نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی در روش تیر اصلاح شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$G_{IC} = \frac{3F_C\delta_C}{2B(a + |\Delta|)} \quad (4)$$



Fig. 3 Test equipments

شکل 3 تجهیزات آزمون

همچنین با توجه به شکل 5.f و 5.g با افزایش چگالی انرژی لیزر به 3.81 J/mm² و 5.71 J/mm² سطح آلومینیوم ذوب شده و شیارهای ایجاد شده را پر می‌کند. شکل 6 تصویربرداری توسط دوربین دیجیتال از سطح چسبنده‌های کامپوزیتی با حالت‌های مختلف آماده‌سازی سطح را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است، با افزایش چگالی انرژی لیزر مقدار رزین باقی‌مانده در سطح چسبنده‌های کامپوزیتی کاهش پیدا کرده است که باعث ایجاد اتصال بین چسب و الیاف کربن می‌شود. همچنین با توجه به شکل 6.e و 6.f با کاهش سرعت اسکن و توان دستگاه لیزر که باعث تغییر انرژی لیزر از 0.25 J/mm² به 0.37 J/mm² شده است، تغییر زیادی در مقدار رزین باقی‌مانده در سطح چسبنده کامپوزیتی مشاهده نشده است، و این بیانگر این موضوع است که با سرعت بیشتر و صرف انرژی کمتر در نمونه LA5 می‌توان کیفیت سطح یکسانی با نمونه LA6 ایجاد نمود. همچنین روش پوسته‌کنی باعث ایجاد یک سطح با زبری یکنواخت و روش سنباده‌زنی باعث سایش لایه رزین سطحی چسبنده کامپوزیتی و ایجاد یک سطح زبر شده است.

در ادامه زبری متوسط چسبنده‌های کامپوزیتی و آلومینیومی ارائه شده است. شکل 7 نتایج زبری‌سنجی برای چسبنده‌های کامپوزیتی و آلومینیومی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 7 سعی شده است پارامترهای دستگاه لیزر برای چسبنده کامپوزیتی به نحوی انتخاب گردد که زبری سطح آلومینیوم و کامپوزیت دارای اختلاف کم باشند. همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده، با افزایش چگالی انرژی لیزر تا مقدار 1.71 J/mm² که مربوط به نمونه LA5 می‌باشد زبری سطح چسبنده آلومینیومی افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر چگالی انرژی لیزر به 3.81 J/mm² و 5.71 J/mm² در نمونه‌های LA6 و LA7 بدلیل ذوب شده سطح آلومینیوم زبری سطحی کاهش پیدا کرده است.

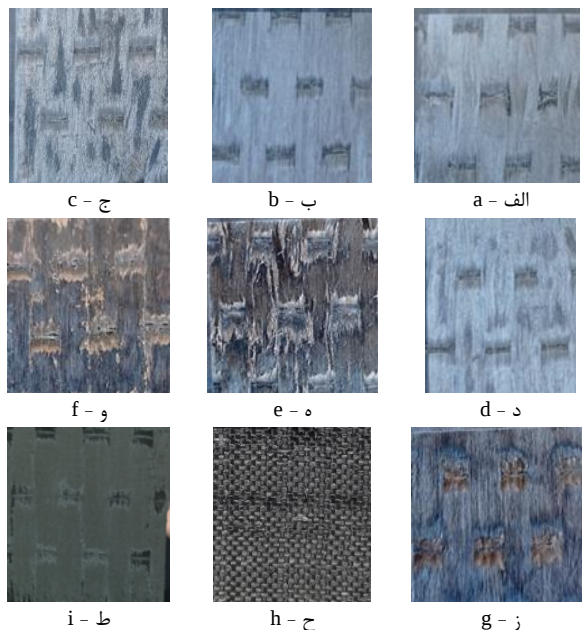


Fig. 6 Images of roughness produced by different process of surface treatment for CFRP adherent, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

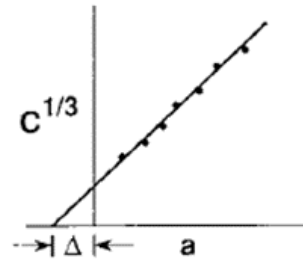


Fig. 4 Schematic of $C^{1/3}$ vs. crack length a [17]

شکل 4 شماتیک منحنی $C^{1/3}$ را برحسب طول ترک a

3- نتایج

در این قسمت نتایج بدست آمده از شکل‌شناسی سطوح عملیات سطحی شده و آزمون تجربی مود اول شکست اتصال چسبی با حالت‌های مختلف آماده‌سازی سطح اتصال ارائه شده است.

1-3 شکل‌شناسی سطوح

در این قسمت شکل‌شناسی میکروسکوپی و عکسبرداری سطوح عملیات سطحی شده و همچنین زبری متوسط سطح چسبنده‌ها ارائه شده است. شکل 5 تصویر میکروسکوپی از سطح چسبنده‌های آلومینیومی عملیات سطحی شده با حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 5 سطوح آلومینیومی عملیات سطحی توسط لیزر از یک الگوی همگن برای ایجاد زبری پیروی کرده، اما روش سنباده‌زنی یک سطح ناهمگن را ایجاد کرده است. از طرفی با توجه به شکل 5 با افزایش چگالی انرژی لیزر عمق شیارهای ایجاد شده در سطوح چسبنده‌های آلومینیومی افزایش پیدا کرده است.

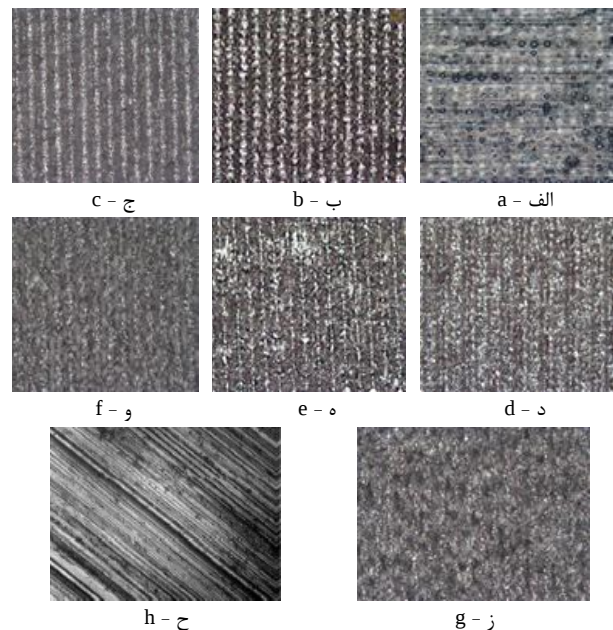


Fig. 5 Microscopic images of roughness produced by different process of surface treatment for AL adherent at 5x, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

شکل 5 تصویر میکروسکوپی زبری ایجاد شده با فرآیندهای مختلف آماده‌سازی سطح برای چسبنده آلومینیومی با بزرگنمایی 5 برابر (الف) نمونه LA1، (ب) نمونه LA2، (ج) نمونه LA3، (د) نمونه LA4، (ه) نمونه LA5، (و) نمونه LA6، (ز) نمونه LA7، (ح) نمونه S

در شکل 8 نمودارهای نیرو - جابه‌جایی بدست آمده از آزمون مود اول شکست با رویکردهای متفاوت آماده‌سازی سطح اتصال نشان داده شده است. در نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای تشخیص شروع رشد ترک از روش انحراف از حالت خطی و بازدید چشمی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است تا مرحله شروع رشد ترک رفتار تمام نمودارها خطی می‌باشد، سپس با اعمال جابه‌جایی بیشتر رشد ترک اتفاق افتاده است. با افزایش چگالی انرژی لیزر و افزایش زبری سطح چسبنده‌ها بار بحرانی شروع رشد ترک افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شکل 8.e بیشترین بار برای نمونه‌های عملیات سطحی شده توسط لیزر در نمونه LA5 و به مقدار 116.347 N در جابه‌جایی نقطه اعمال بار 6.451 mm اتفاق افتاده است. در شکل 8.e و 8.f بار بحرانی شروع رشد ترک اختلاف کمی با یکدیگر دارد اما بعد از شروع رشد ترک افت‌های ناگهانی در نمودار نیرو - جابه‌جایی در شکل 8.f مشاهده می‌شود که این افت‌های ناگهانی می‌تواند باعث کاهش نرخ رهایی انرژی کرنشی گردند. همچنین همان‌طور که در شکل 8.h نشان داده شده است، در نمونه عملیات سطحی شده به روش پوسته‌کنی بیشترین بار به مقدار 120.51 N در جابه‌جایی 9.68 mm اتفاق افتاده است. برای نمونه عملیات سطحی شده با روش سنباده‌زنی (نمونه SS) بار بحرانی شروع رشد ترک نسبت به نمونه PP و نمونه‌های LA5 و LA6 کاهش پیدا کرده است که بدلیل کاهش زبری سطحی چسبنده کامپوزیتی می‌باشد. با توجه به شکل‌های 7 و 8 افزایش چگالی انرژی لیزر باعث افزایش زبری سطح و افزایش بار بحرانی شروع رشد ترک شده است، اما در نمونه LA7 با وجود افزایش چگالی انرژی لیزر زبری سطح چسبنده‌ها کاهش پیدا کرده است و این موضوع باعث کاهش بار بحرانی شروع رشد ترک در نمونه LA7 شده است.

شکل 9 تصویر مسیر رشد ترک ثبت شده توسط دوربین دیجیتال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 9 در تمامی نمونه‌ها بعد از شروع رشد ترک ابتدا خرابی چسب³ و سپس خرابی اتصال⁴ در سطح تماس چسب و چسبنده کامپوزیتی مشاهده شده است. منحرف شدن مسیر رشد ترک به سمت سطح تماس چسبنده کامپوزیتی و چسب به دو دلیل می‌باشد؛ اول اینکه در دستگاه آزمون کشش جابه‌جایی به تکیه‌گاهی پایینی اعمال می‌گردد و تکیه‌گاه بالایی ثابت است، دوم اینکه نامتقارنی جزئی در سفتی خمشی و هندسه چسبنده کامپوزیتی و آلومینیومی می‌تواند عامل این اتفاق باشد.

در ادامه نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی نسبت به طول ترک (نمودار مقاومت در برابر رشد ترک) برای مود اول شکست برای تمامی نمونه‌ها در شکل 10 نشان داده شده است. در این نمودارها برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی از روش تئوری تیر اصلاح شده استفاده شده است. نمودار مقاومت یا نمودار انرژی شکست بر حسب طول ترک برای مواد ترد مسطح است، چرا که انرژی سطح نسبت به خواص مواد تغییر نمی‌کند [18].

این درحالی است که زبری سطح ایجاد شده با روش سنباده‌زنی برای چسبنده آلومینیومی کمتر از نمونه‌های LA5، LA6 و LA7 می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار زبری متوسط برای چسبنده کامپوزیتی با روش پوسته‌کنی ایجاد شده است. همچنین نمونه‌های LA5، LA6 و LA7 که کمترین رزین باقی‌مانده در سطح را داشتند دارای زبری بیشتری نسبت به دیگر چسبنده‌های کامپوزیتی عملیات سطحی شده با روش لیزر می‌باشند. از طرفی روش سنباده‌زنی نسبت به نمونه‌های LA5 و LA7 دارای زبری کمتری می‌باشد.

2-3- نتایج آزمون مود اول شکست

در این قسمت نتایج بدست آمده از آزمون تجربی مود اول شکست اتصال چسبی با رویکردهای متفاوت آماده‌سازی سطح اتصال ارائه شده است. مطابق با استاندارد برای هر کدام از شرایط آماده‌سازی سطحی سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است.

ابتدا نمودارهای نیرو - جابه‌جایی بدست آمده برای نمونه‌های مود اول شکست ارائه شده است. مطابق با استاندارد ASTM D5528 برای تشخیص شروع رشد ترک در نمودار نیرو و جابه‌جایی می‌توان از سه روش انحراف از حالت خطی¹ (NL)، بازدید چشمی² (VIS) و انحراف 5٪ بار بحرانی حداکثر استفاده نمود [17]. در روش انحراف از حالت خطی بار بحرانی برای شروع رشد ترک، انحراف از حالت خطی یا همان شروع غیرخطی شدن نمودار بار - جابه‌جایی می‌باشد. در روش بازدید چشمی با استفاده از دوربین مجهز به لنز مخصوص (چشم مسلح) شروع رشد ترک در حین بارگذاری رصد می‌شود. در روش انحراف 5٪ بار بحرانی حداکثر پس از بدست آوردن منحنی بار - جابه‌جایی، خطی از محل شروع منحنی اولیه رسم شده، طوری که به مقدار نرمی اولیه بدست آمده از قسمت خطی نمودار 5٪ اضافه می‌شود. اگر خط جدید منحنی بار - جابه‌جایی را در محلی بعد از نقطه بار حداکثر قطع کرد، در این صورت بار حداکثر به عنوان بار بحرانی شروع رشد ترک در نظر گرفته می‌شود.

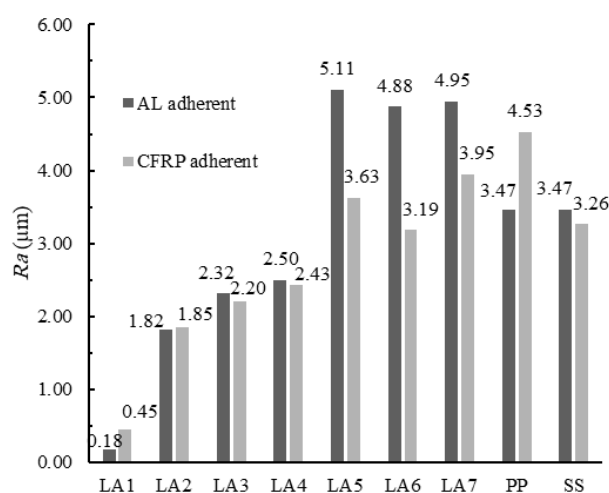


Fig. 7 Average roughness of AL and CFRP adherent

شکل 7 اندازه زبری متوسط سطح چسبنده‌های آلومینیومی و کامپوزیتی

¹ Deviation from Linearity

² Visual Observation

³ Cohesive Failure

⁴ Adhesive Failure

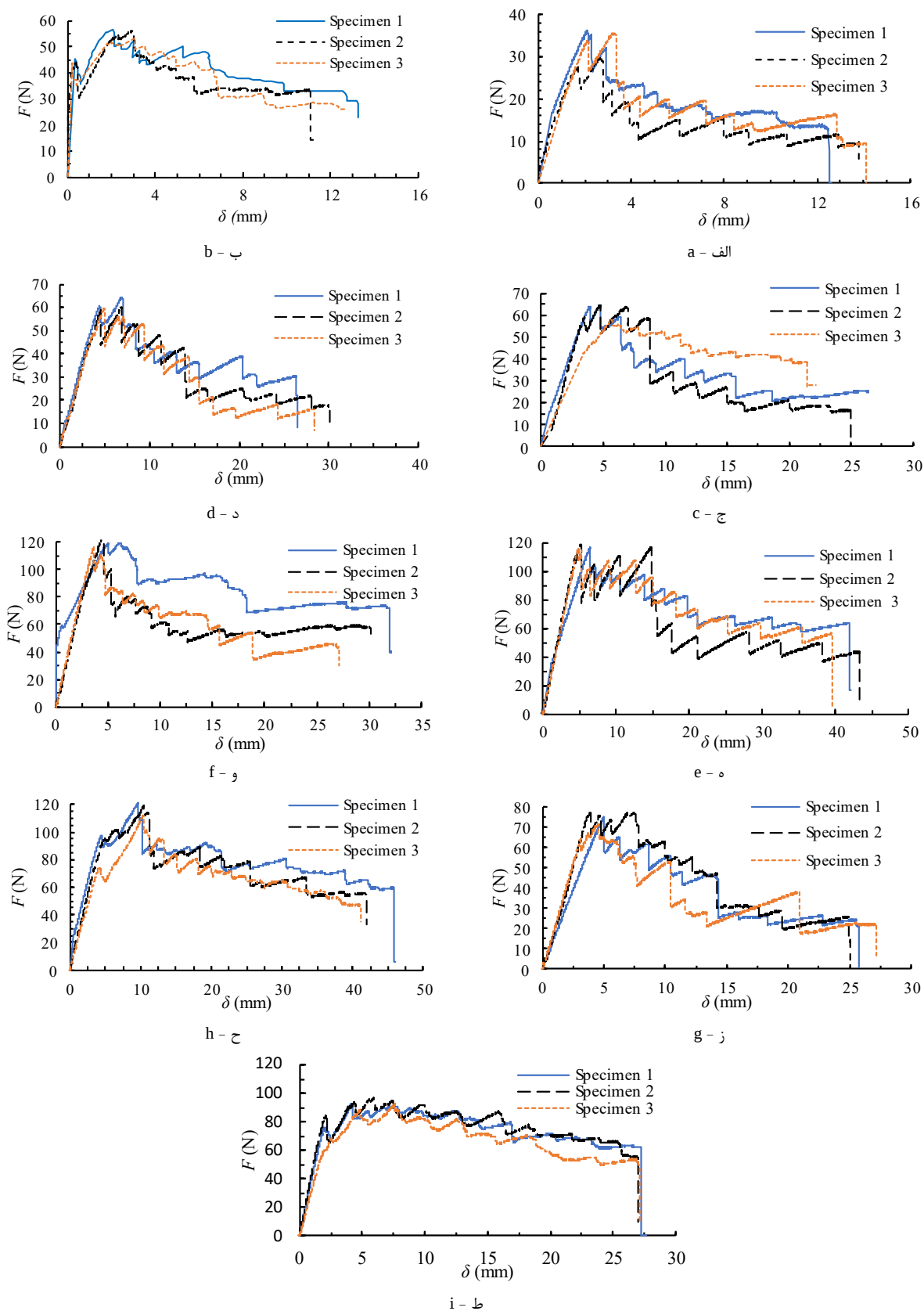


Fig. 8 Load – displacement curve, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

شکل 8 نمودار نیرو - جابه‌جایی (الف: نمونه LA1، ب: نمونه LA2، ج: نمونه LA3، د: نمونه LA4، ه: نمونه LA5، و: نمونه LA6، ز: نمونه LA7، ح: نمونه PP، ط: نمونه S)

با توجه به شکل 10 نرخ رهایی انرژی کرنشی برای تمامی نمونه‌ها به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند، که بیانگر رفتار ترد¹ برای چسب استفاده شده در اتصال می‌باشد. همچنین مقاومت اتصال در برابر رشد ترک برای نمونه‌های LA5 و PP بیشترین مقدار می‌باشد. با توجه به شکل 6 و 7 در نمونه LA5 چسبده کامپوزیتی دارای حداقل مقدار رزین باقی مانده در سطح اتصال و بیشترین مقدار زبری سطح نسبت به دیگر چسبده‌های کامپوزیتی عملیات سطحی شده توسط لیزر می‌باشد، از طرفی برای نمونه فوق چسبده آلومینیومی دارای بیشترین مقدار زبری سطح می‌باشد که باعث مقاومت بیشتر در برابر رشد ترک برای نمونه LA5 شده است. همچنین با توجه به شکل 9.e که مربوط به نمونه LA5 می‌باشد، نمودار مقاومت در برابر رشد ترک بعد از یک مقدار افزایش اولیه از طول ترک 85 mm به بعد به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند که بیانگر پایداری بیشتر رشد ترک در نمونه فوق می‌باشد.

در شکل 10.f نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک برای نمونه LA6 را نشان داده شده است، روند کاهشی در رفتار نمودار مقاومت ماده مشاهده می‌شود که بدلیل افت‌های ناگهانی در مقدار نیرو در نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه فوق ایجاد شده است. افت‌های ناگهانی در نمودار نیرو - جابه‌جایی می‌تواند بدلیل کاهش زبری سطح آلومینیوم و CFRP نسبت به نمونه LA5 باشد. همچنین در شکل 10.g نیز روند کاهشی در رفتار نمودار مقاومت ماده مشاهده شده است. همانند شکل 10.f افت ناگهانی نیرو در نمودار نیرو - جابه‌جایی می‌تواند بدلیل کاهش زبری سطح آلومینیوم نسبت به نمونه LA5 ایجاد گردد. این افت‌های ناگهانی در مقدار نیرو باعث کاهش ناگهانی در مقدار نرمی (δ_p) نمونه‌های فوق می‌گردد که در نتیجه آن روند کاهشی در نمودار مقاومت ماده مشاهده می‌شود. از طرفی با توجه به معادله (4) نرخ رهایی انرژی کرنشی وابستگی مستقیم به مقدار نیرو و جابه‌جایی دارد پس افت ناگهانی در مقدار نیرو می‌تواند باعث روند کاهشی در نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک باشد.

در ادامه مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست محاسبه شده است. جدول 4 مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی بدست آمده از آزمایش تجربی به همراه انحراف معیار² (SD) آن‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شکل 11 مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست نشان داده شده است. با توجه به شکل بیشترین مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول مربوط به نمونه LA5 و به مقدار 0.67 N/mm می‌باشد. بررسی زبری سطح و شکل‌شناسی سطح نمونه LA5 نشان دهنده بیشترین مقدار زبری برای چسبده آلومینیومی و همچنین کمترین مقدار رزین باقی‌مانده در سطح چسبده کامپوزیتی می‌باشد. بررسی نتایج شکل 10 بترتیب نشان دهنده افزایش 13.43٪ و 7.46٪ در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست برای نمونه LA5 در مقایسه با نمونه S و PP می‌باشد. همچنین با توجه به شکل 11 می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روش آماده‌سازی سطح پوسته‌کنی برای چسبده کامپوزیتی نسبت به روش سنباده‌زنی در حالتی که برای هر دو حالت چسبده آلومینیومی با سنباده مشابه آماده‌سازی شده باشد می‌تواند باعث افزایش 6.45٪ در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست گردد.

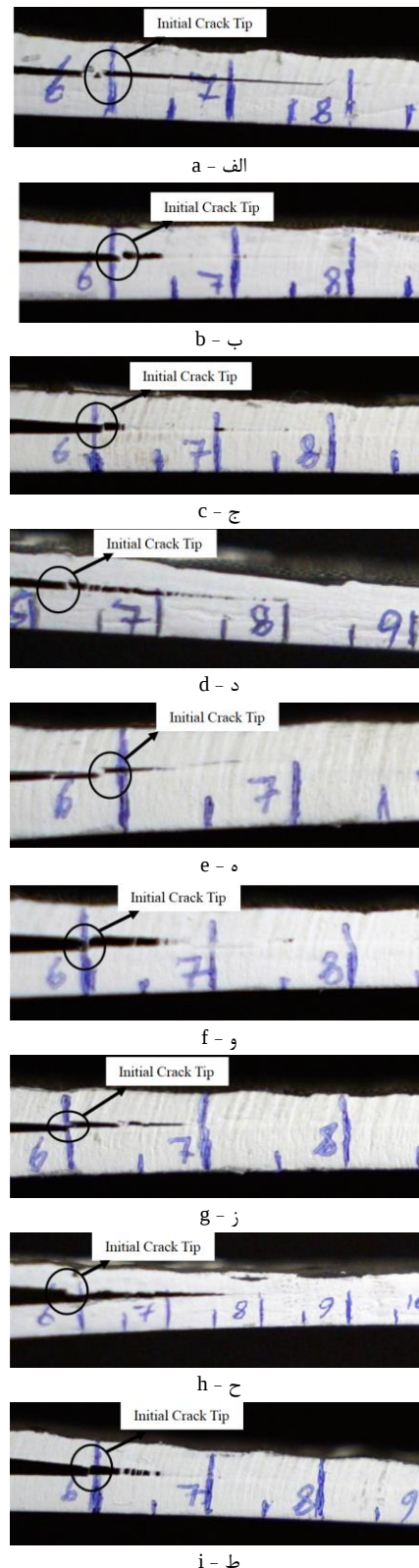


Fig. 9 Crack growth path a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S
 شکل 9 مسیر رشد ترک (الف) نمونه LA1، (ب) نمونه LA2، (ج) نمونه LA3، (د) نمونه LA4، (ه) نمونه LA5، (و) نمونه LA6، (ز) نمونه LA7، (ح) نمونه PP، (ط) نمونه S

² Standard deviation

¹ Brittle

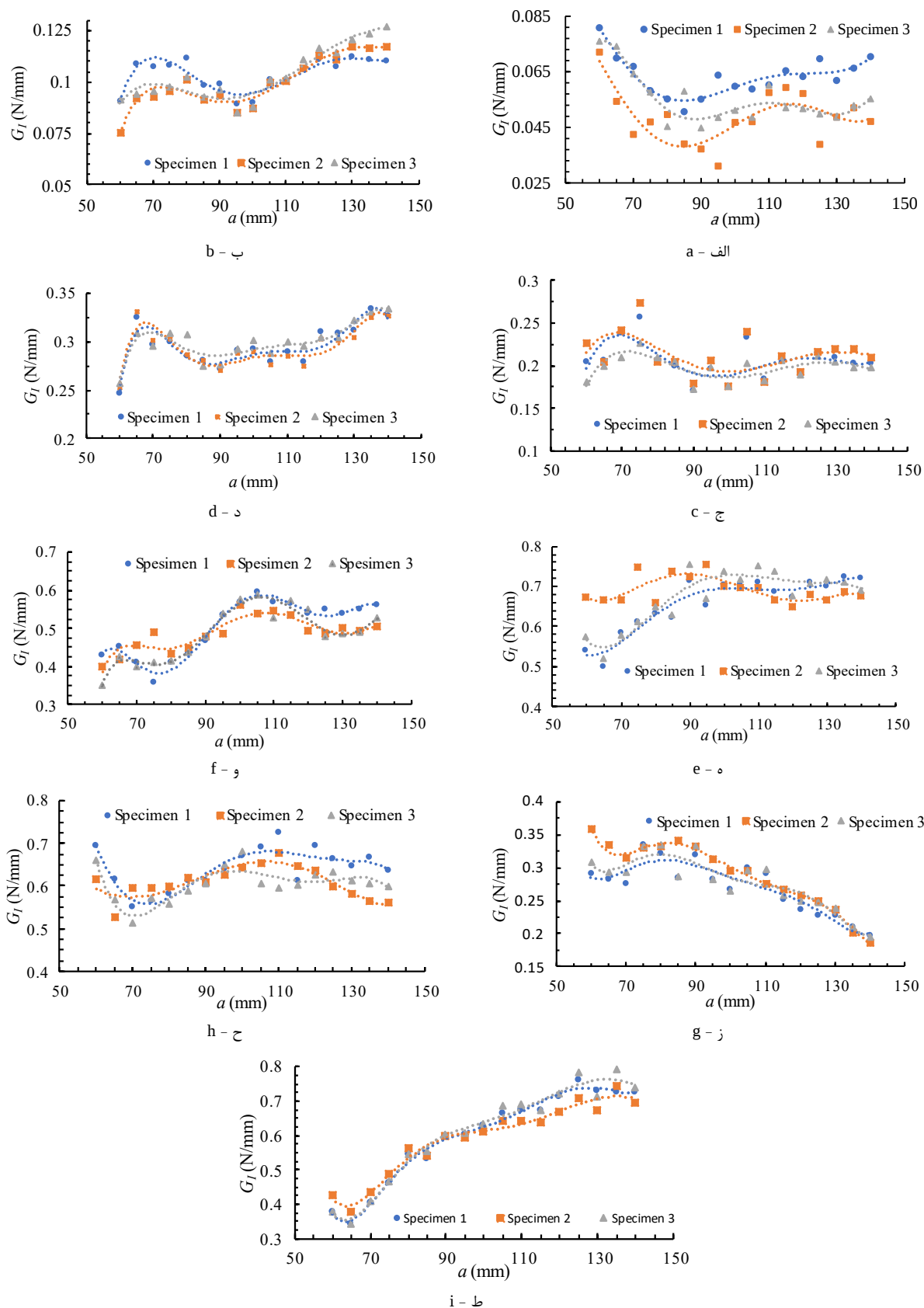


Fig. 10 R - curve, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

شکل 10 نمودار مقاومت در برابر رشد ترک (الف) نمونه LA1، (ب) نمونه LA2، (ج) نمونه LA3، (د) نمونه LA4، (ه) نمونه LA5، (و) نمونه LA6، (ز) نمونه LA7، (ح) نمونه PP، (ط) نمونه S

جدول 4 نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی با رویکردهای مختلف آماده سازی

سطحی و انحراف معیار

Table 4 Critical strain energy release rate with different surface treatment approaches and standard deviation

SD	G _{IC} میانگین (N/mm)	G _{IC} (N/mm)			نمونه
		Specimen3	Specimen2	Specimen1	
0.01	0.05	0.05	0.04	0.06	LA-1
0.02	0.1	0.1	0.08	0.12	LA-2
0.02	0.2	0.18	0.22	0.2	LA-3
0.01	0.3	0.29	0.3	0.31	LA-4
0.02	0.67	0.67	0.69	0.65	LA-5
0.03	0.49	0.46	0.5	0.53	LA-6
0.02	0.27	0.25	0.3	0.26	LA-7
0.02	0.62	0.61	0.6	0.65	PP
0.01	0.59	0.6	0.59	0.57	SS

در ادامه سطح شکست نمونه ها با حالت های مختلف عملیات سطحی در شکل 12 مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل 12.a که مربوط به نمونه LA1 می باشد، شکست اتصال¹ در سطح تماس بین چسب و چسبنده کامپوزیتی اتفاق افتاده است این در حالی است که مقدار جزئی پارگی الیاف² هم مشاهده شده است. اما با افزایش چگالی انرژی لیزر و در نتیجه افزایش زبری سطح چسبنده ها در نمونه های LA2 و LA3 به مقدار پارگی الیاف اضافه شده و خرابی اتصال در سطح تماس بین چسبنده کامپوزیتی و چسب کمتر می شود.

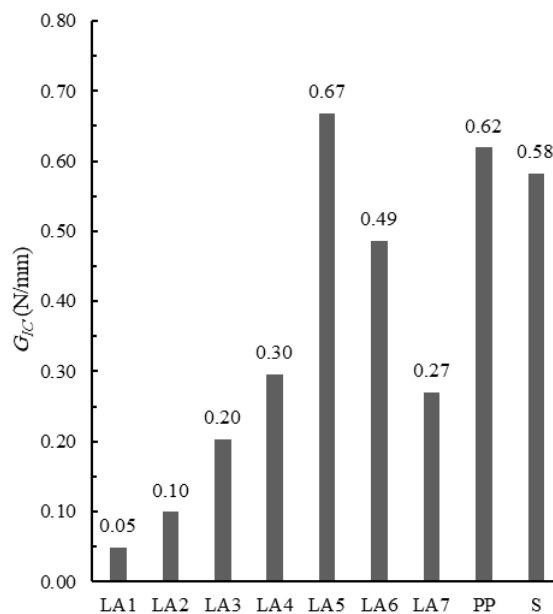


Fig 11 Mode I critical strain energy release rate with different surface treatment approaches

شکل 11 نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول با رویکردهای مختلف آماده سازی سطح

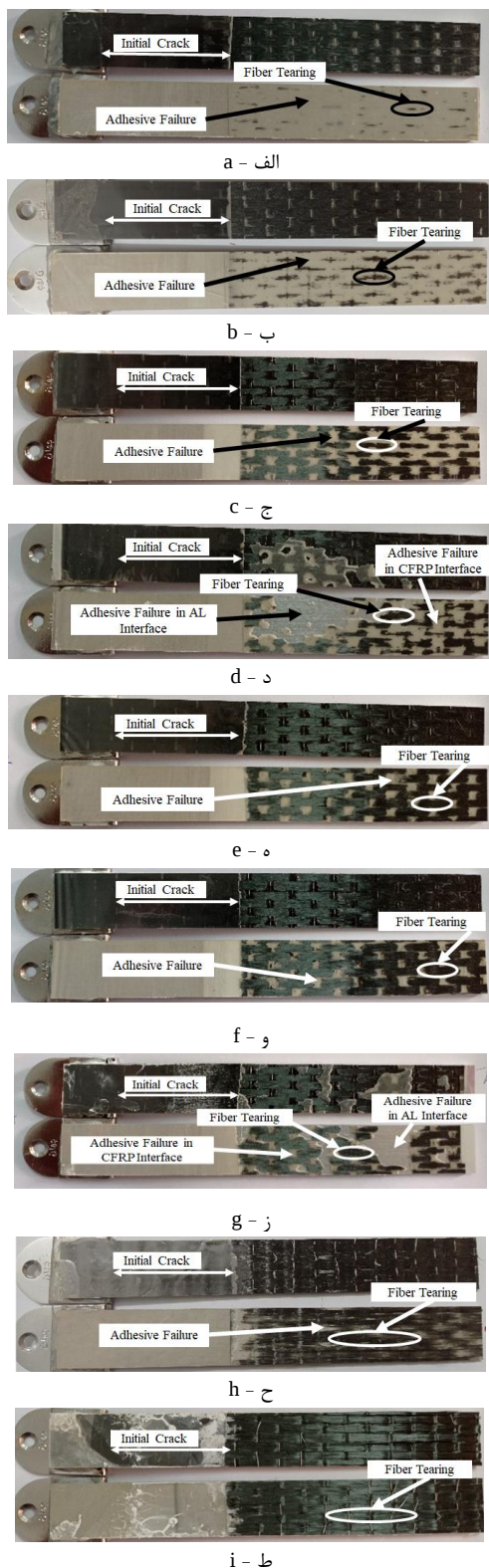


Fig 12 Fracture surface with different surface treatment approaches a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

شکل 12 سطح شکست با حالت های مختلف عملیات سطحی الف) نمونه LA1، ب) نمونه LA2، ج) نمونه LA3، د) نمونه LA4، ه) نمونه LA5، و) نمونه LA6، ز) نمونه LA7، ح) نمونه PP، ط) نمونه S

² Fiber Tearing

¹ Adhesive Failure

سطحی شده توسط لیزر با افزایش چگالی انرژی لیزر مقدار رزین باقی مانده در سطح اتصال کاهش می‌یابد و باعث ایجاد پیوند بین الیاف و چسب شده که موجب افزایش استحکام اتصال می‌گردد.

با انتخاب درست پارامترهای دستگاه لیزر می‌توان نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول را برای چسب Araldite 2015 به مقدار 0.67 N/mm محاسبه نمود و استحکام اتصال را نسبت به روش سنباده‌زنی برای چسبده‌ها 13.43% درصد افزایش داد.

استفاده از روش آماده‌سازی سطح پوسته‌کنی برای چسبده کامپوزیتی نسبت به روش سنباده‌زنی در حالتی که برای هر دو حالت چسبده آلومینیومی با سنباده مشابه آماده‌سازی شده باشد می‌تواند باعث افزایش 6.45% در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست گردد.

برای آماده‌سازی سطوح اتصال انتخاب درست پارامترهای لیزر می‌تواند باعث افزایش زبری سطح آلومینیوم و همچنین کمترین رزین باقی‌مانده در سطح چسبده کامپوزیتی گردد که در نتیجه آن رشد ترک پایدار اتفاق خواهد افتاد.

در اتصال چسبی پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن به آلومینیوم چگالی انرژی لیزر بالا برای چسبده آلومینیومی باعث ذوب شدن سطح چسبده و کاهش زبری سطح چسبده آلومینیومی و در نتیجه کاهش استحکام اتصال می‌گردد.

در اتصال چسبی پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن به آلومینیوم منحرف شدن مسیر رشد ترک به سمت چسبده کامپوزیتی و ایجاد حالت خرابی پارگی الیاف در سطح تماس چسب و چسبده کامپوزیتی استحکام اتصال را افزایش می‌دهد.

5- فهرست علائم

a	طول ترک (mm)
B	عرض نمونه تیر یکسرگیردار دولبه (mm)
C	نرمی نمونه (mm/N)
E	مدول یانگ (GPa)
ED	چگالی انرژی لیزر (J/mm^2)
F	بار اعمالی (N)
h	ضخامت چسبده (mm)
P	توان نامی دستگاه لیزر (W)
Ra	زبری متوسط (μm)
V	سرعت اسکن لیزر (mm/min)

علائم یونانی

δ	جابه‌جایی نقطه اعمال بار (mm)
Δ	طول اصلاح شده ترک مود اول (mm)
ν	ضریب پواسون (بی‌بعد)
ϕ_s	قطر دایره لیزر (μm)
زیرنویس‌ها	
AL	آلومینیوم
c	بحرانی
CFRP	کامپوزیت

در اتصال چسبی کامپوزیت- فلز ایجاد خرابی اتصال در سطح مشترک فلز و چسب بدلیل پیوند مولکولی ضعیف‌تر فلز با چسب و همچنین ایجاد شکست ترد¹، باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد [19]. با توجه به شکل 12.d که مربوط به نمونه LA4 می‌باشد، سه نوع شکست، خرابی اتصال در تماس چسب و چسبده آلومینیومی، خرابی اتصال در سطح تماس چسب و چسبده کامپوزیتی و پارگی الیاف مشاهده شده است. بررسی تصویر میکروسکوپی از سطح چسبده آلومینیومی نمونه LA4 که در شکل 5.d نشان‌دهنده ذوب شدن سطح آلومینیوم برای نمونه فوق می‌باشد که در نتیجه مقاومت سطح آلومینیوم کاهش پیدا کرده و باعث ایجاد خرابی اتصال در سطح تماس چسبده آلومینیومی و چسب شده است.

در اتصال چسبی الیاف کربن به فلز حالت خرابی پارگی الیاف حالت شکست مناسب می‌باشد که باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد [20]. در شکل 12.e برای نمونه LA5 مقدار زیادی پارگی الیاف که حالت شکست مناسب در اتصال چسبی الیاف کربن به فلز می‌باشد و مقدار کمی شکست در سطح تماس چسب و چسبده آلومینیومی اتفاق افتاده است. این موضوع باعث شده است که نمونه LA5 بیشترین مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست را نتیجه دهد. اما برای نمونه LA7 با توجه به شکل 12.g شکست اتصال در سطح تماس چسب و چسبده آلومینیومی، شکست اتصال در سطح تماس چسب و چسبده کامپوزیتی و پارگی الیاف مشاهده شده است. ایجاد حالت خرابی اتصال در سطح تماس چسب و آلومینیوم باعث ایجاد شکست ترد برای نمونه LA7 می‌شود، در نتیجه نمودار مقاومت ماده برای نمونه فوق روند کاهشی پیدا کرده و نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول کاهش یافته است. با توجه به شکل 5.g بدلیل ذوب شده سطح چسبده آلومینیومی در چگالی انرژی لیزر 5.71 J/mm^2 استحکام سطح آلومینیوم در نمونه LA7 کاهش می‌یابد و باعث ایجاد حالت خرابی اتصال در سطح تماس چسب و آلومینیوم برای نمونه فوق می‌گردد. همچنین برای نمونه PP که در شکل 12.h نشان داده شده است، مانند نمونه LA5 مود پارگی الیاف در سرتاسر سطح شکست به همراه مقدار جزئی خرابی اتصال در سطح تماس چسبده کامپوزیتی و چسب شده است، که باعث رفتار مطلوب برای اتصال فوق گردیده است. برای نمونه S با توجه به شکل 12.i تنها حالت پارگی الیاف مشاهده شده، که این موضوع باعث کاهش نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست نسبت به نمونه‌های LA5 و PP شده است.

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر عملیات سطحی چسبده‌ها در رفتار شکست اتصال چسبی مود اول کامپوزیت / آلومینیوم مورد بررسی شده است. آماده‌سازی سطح اتصال چسبده کامپوزیتی با سه رویکرد سنباده‌زنی، پوسته‌کنی و عملیات لیزری انجام شده است. همچنین چسبده آلومینیومی با سه دو رویکرد سنباده‌زنی و عملیات لیزری برای اتصال آماده شده است. سپس تأثیر نوع عملیات سطحی بر رفتار شکست اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

برای چسبده‌های آلومینیومی عملیات سطحی شده توسط لیزر با افزایش چگالی انرژی لیزر زبری سطحی افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر چگالی انرژی لیزر بدلیل ذوب شده سطح آلومینیوم زبری سطح کاهش یافته و باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد. همچنین برای چسبده کامپوزیتی عملیات

¹ Brittle Fracture

6- مراجع

- [18] Anderson, T. L., "Fracture mechanics: fundamentals and applications", Third Edition, Boca Raton: CRC press, pp. 38-40, 2005.
- [19] Han, G., Tan, B., Cheng, F., Wang, B., Leong, Y.K. and Hu, X., "CNT toughened aluminium and CFRP interface for strong adhesive bonding", Nano Materials Science, Vol. 4, No. 3, pp. 266-275, 2022.
- [20] Chen, Y., Li, M., Yang, X. and Wei, K., "Durability and mechanical behavior of CFRP/Al structural joints in accelerated cyclic corrosion environments," International Journal of Adhesion and Adhesives" Vol. 102, pp. 102695, 2020.
- [1] Mu, W., Na, J., Tan, W., Wang, G., Shen, H. and Li, X., "Durability of adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints subjected to coupled temperature and alternating load" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 99, pp. 102583, 2020.
- [2] Alfano, M., Lubineau, G., Furgiele, F. and Paulino, G. H., "Study on the role of laser surface irradiation on damage and decohesion of Al/epoxy joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 39, pp. 33-41, 2012.
- [3] Rotel, M., Zahavi, J., Tamir, S., Buchman A. and Dodiuk, H., "Pre-bonding technology based on excimer laser surface treatment", Appl. Surface Sci. Vol. 154-155, pp. 610-616, 2000.
- [4] Strobel, M., Lyons, C.S. and Mittal K.L., "Plasma Surface Modification of Polymers: Relevance to Adhesion", CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 201-210, 1994.
- [5] Fenga, Z., Zhaoa, H., Tana, C., Chena, B., Songa, X. and Feng, J., "Influence of laser process parameters on the characteristic of 30CrMnSiA steel substrate and adhesively bonded joints," Optics and Laser Technology, Vol. 123, pp. 105920, 2020.
- [6] Rudawska, A., "Selected aspects of the effect of mechanical treatment on surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 50, pp. 235-243, 2014.
- [7] Sorrentino, L., Polini, W., Bellini, C. and Parodo, G., "Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 85, pp. 225-233, 2018.
- [8] Najafpour Mollabashi, M., Safarabadi, M., Haghighi Yazdi, M., "Experimental investigation of surface finishing in cracked aluminum plates reinforced by composite patch under fatigue loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1171-1176, 2021.
- [9] Zhan, X., Li, Y., Gao, C., Wang, H. and Yang, Y., "Effect of infrared laser surface treatment on the microstructure and properties of adhesively CFRP bonded joints", Optics and Laser Technology, Vol. 106, pp. 398-409, 2018.
- [10] Sun, C., Min, J., Lin, J., Wan, H., Yang, S. and Wang, S., "The effect of laser ablation treatment on the chemistry, morphology and bonding strength of CFRP joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 84, pp.325-334, 2018.
- [11] Tao, R., Alfano, M. and Lubineau, G., "Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 109, pp. 84-94, 2018.
- [12] Moreira, R. D. F., Oliveira, V., Silva, F. G. A., Vilar, R. and De Moura, M. F. S. F., "Influence of femtosecond laser treated surfaces on the mode I fracture toughness of carbon-epoxy bonded joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 82, pp.108-113, 2018.
- [13] Kim, W. S. and Lee, J. J., "Fracture characterization of interfacial cracks with frictional contact of the crack surfaces to predict failures in adhesive-bonded joints", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 76, No. 12, pp. 1785-1799, 2009.
- [14] Indeck, J., Demeneghi, G., Mayeur, J., Williams, C. and Hazeli, K., "Influence of reversible and non-reversible fatigue on the microstructure and mechanical property evolution of 7075-T6 aluminum alloy", International Journal of Fatigue, Vol. 145, pp. 106094, 2020.
- [15] De Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G. and Gonçalves, J.P.M., "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints", International Journal of Solids and Structures, Vol. 46, No. 6, pp. 1589-1595, 2009.
- [16] Musiari, F., Moroni, F., Favi C. and Pirondi, A., "Durability assessment of laser treated aluminium bonded joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 93, pp. 102323, 2019.
- [17] ASTM, D5528-01: Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, *American Standard of Testing Methods*, vol. 03, no. Reapproved 2007. pp. 1-12, 2014.



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)

اطلاعات مقاله: چکیده (سبک عنوان چکیده)

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژگان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

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

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:
Composites, Foam, Shear, Deflection

Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت¹) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

کپی و سپس چسباندن (پیست²) متن خود در این فایل، سبک³ مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:

Paste option → match with Destination format

³ Style

¹ Template

² Paste

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2128-2131, 2023. <https://doi.org/...>

...

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، غیرایتنالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک می‌آیند (توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتنالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن² 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 (گریدلاین³) 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.

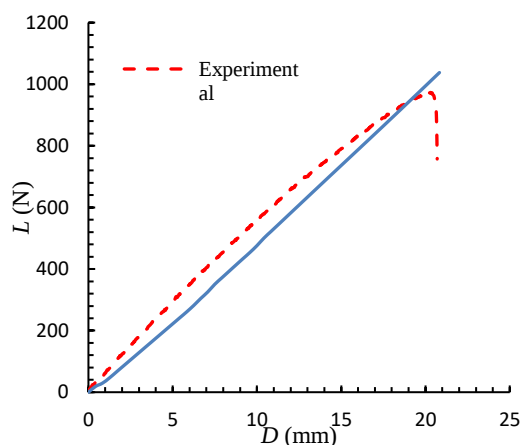


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی 5 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.

1-2- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی¹ 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 1.2 صحیح و 1/2 غلط می‌باشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

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

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
 - عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
 - جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
 - به همگی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
 - جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
 - استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
 - در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
 - متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
 - جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.
- برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم		
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها ^(*)	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

^(*) فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله¹ موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث 9pt² و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدرو برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ³ استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطری بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله $(a.b)$ به جای نقطه ضرب $(a \cdot b)$ استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املای زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها»ی جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهات» و «ساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

1-4- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان³ مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم‌علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست‌علایم باید دقیقاً یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست‌علایم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

E مدول یانگ (Nm^{-2})

P نیرو (Nm^{-2})

T دما (K)

علایم یونانی

σ تنش (Nm^{-2})

ε کرنش

بالانویس‌ها

k تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست‌علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کروشه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً تاکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.
- ✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.
- ✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به‌طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote