



بررسی اثرات زمان و دمای پخت بر خواص مکانیکی و تخریب حرارتی چرم مصنوعی ساخته شده از پی وی سی

مهدی زمانی¹، محمود مهرداد شکریه^{2*}

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

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، shokrieh@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/09/14

پذیرش: 1402/01/20

کلیدواژگان

پی وی سی امولسیون، چرم مصنوعی، دما و زمان پخت، خواص مکانیکی، تخریب حرارتی

پلی وینیل کلراید بعنوان سومین پلیمر پرمصرف در دنیا از جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف برخوردار است. با توجه به کاربرد روزافزون چرم مصنوعی، بررسی و بهینه‌سازی شرایط پخت یکی از خلأهای تحقیقاتی در این زمینه به‌شمار می‌رود. هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر دما و مدت‌زمان پخت بر خواص مکانیکی چرم مصنوعی و همچنین شناسایی دما و زمان بهینه پخت است. در پژوهش حاضر، فیلم‌های چرم مصنوعی با استفاده از روش پوشش‌دهی با تیغه تهیه شدند و سپس در دما و مدت‌زمان‌های مختلف جهت انجام فرآیند پخت قرار گرفتند. بررسی رنگ نمونه یکی از روش‌های تشخیص میزان تخریب حرارتی است. در این تحقیق با استفاده از این روش میزان تخریب حرارتی و تأثیر آن بر خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تأثیر شرایط پخت بر رفتار مکانیکی چرم مصنوعی، نمونه‌های دمبلی شکل تهیه شدند و تحت آزمون کشش تک محوری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به دلیل حرکات مولکولی بالای ذرات در دمای 190°C، پلاستی‌سایزر به خوبی به زنجیره‌های پی وی سی امولسیونی نفوذ می‌کند و در نتیجه خواص مکانیکی آن را افزایش می‌دهد. افزایش مدت‌زمان پخت در دمای ثابت ابتدا سبب افزایش خواص مکانیکی می‌گردد، سپس به دلیل تخریب حرارتی، خواص مکانیکی نمونه کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج، شرایط پخت تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی چرم مصنوعی دارد. با شناسایی دما و زمان بهینه پخت، تولید چرم‌های مصنوعی با خواص مکانیکی بالا بدون استفاده از پرکننده‌های خاص امکان‌پذیر گردید.

Investigation of curing time and temperature effects on mechanical properties and thermal degradation of artificial leather made of PVC

Mahdi Zamani¹, Mahmood Mehrdad Shokrieh^{1*}

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

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

Keywords

Emulsion PVC; Synthetic leather; Temperature and time of curing; Mechanical properties; Thermal degradation.

Abstract

Polyvinyl chloride owns a special place in various industries as the third most used polymer worldwide. Due to the widespread usage of synthetic leather, one of the research gaps in this field is the study and optimization of curing conditions. The present research aims to investigate the effects of temperature and time of curing on the mechanical properties of synthetic leather to establish the optimal temperature and time of curing. To this end, synthetic leather films were prepared using the knife coating technique (KCT). Then specimens were placed at different temperatures and times to perform the curing process. Thermal degradation was determined by checking the color of the samples. Also, to investigate the effect of curing conditions on the mechanical behavior of synthetic leather, dumbbell-shaped samples were prepared and subjected to uniaxial tensile tests. The results showed that due to the high molecular motions of the particles at 190°C, the plasticizer penetrates well into the chains of emulsion PVC and thus increases its mechanical properties. Additionally, the mechanical properties of the synthetic leather were enhanced by increasing the cure time at constant temperatures. Afterward, thermal degradation occurred due to the long-term curing process, reducing mechanical properties. According to the obtained results, the curing conditions can significantly affect the mechanical properties of synthetic leather. Likewise, identifying the optimal temperature and time of curing in the artificial leather industry allows the development of products with high mechanical properties without special fillers.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Zamani, M., Shokrieh, M. M., "Investigation of curing time and temperature effects on mechanical properties and thermal degradation of artificial leather made of PVC," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 1, pp. 2132-2137, 2023.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1973973.1812

1- مقدمه

پی‌وی‌سی نام اختصاری پلی‌وینیل کلراید است که یکی از مهم‌ترین پلیمرهای ترموپلاستیک پرمصرف در جهان محسوب می‌شود. پی‌وی‌سی بعد از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن سومین ترموپلاستیک پرمصرف در دنیا می‌باشد. با توجه به اینکه محصولات پی‌وی‌سی از طریق فرآیندهای مختلف تولید می‌گردد، به‌همین دلیل امکان دستیابی به خواص و ویژگی‌های منحصر به‌فردی وجود دارد [1]. در طول دهه‌های گذشته پی‌وی‌سی بعنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرها شناخته می‌شود و به‌دلیل خواص الکتریکی، مقاومت شیمیایی، اشتعال‌پذیری کم و هزینه تولید پایین بصورت گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. صنایع مختلفی از جمله اسباب بازی کودکان، لوازم پزشکی، ساختمان‌سازی و روش‌های سیم‌های برق با پی‌وی‌سی در ارتباط است [2-4].

بهبود و تغییر خواص پی‌وی‌سی از طریق افزودنی‌های مختلف از جمله پرکننده‌های آلی و معدنی، پلاستی‌سایزر، پایدارکننده حرارتی و روان‌کننده مورد توجه محققان زیادی بوده است. تأثیر مقادیر متغیر پایدارکننده و روان‌کننده بر میزان فیوژن آمیزه پی‌وی‌سی سخت توسط بیدگلی و همکاران [5] با استفاده از دستگاه برابندر پلاستیکوردر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که میزان افزودنی‌های مختلف از جمله روان‌کننده و پایدارکننده بر خواص رئولوژیکی و رفتار فیوژن پی‌وی‌سی سخت تأثیر بسزایی دارد.

تأثیر پرکننده‌ها بر خواص رزین پی‌وی‌سی به عوامل مختلفی از جمله شکل، اندازه، جنس، ویژگی‌های سطح و میزان پراکندگی در ماتریس پی‌وی‌سی بستگی دارد. در این راستا پرکننده‌های زیادی جهت تقویت خواص مکانیکی پی‌وی‌سی مورد استفاده قرار گرفته است [6-9]. رایج‌ترین پرکننده مورد استفاده در پی‌وی‌سی نرم و چرم مصنوعی کربنات کلسیم است و مصرف جهانی آن در سال‌های اخیر بیش از ده میلیون تن است [10]. چن¹ و همکاران [11] به بررسی تأثیر کربنات کلسیم در اندازه میکرومتر بر خواص مکانیکی و دمای انتقال شیشه‌ای پی‌وی‌سی صلب پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد 15PHR از میکروکربنات کلسیم سبب افزایش استحکام کششی و تنش تسلیم به ترتیب تا 7 و 11 درصد می‌گردد، همچنین دمای انتقال شیشه‌ای نیز به میزان 1.2 درجه سانتی‌گراد می‌شود. طی تحقیقات دیگر ذرات نانوکربنات کلسیم توسط نینگ چن² و همکاران [7] به ماتریس پی‌وی‌سی افزوده شد و میزان استحکام کششی نهایی با افزودن 10 PHR نانوکربنات کلسیم تا 7 درصد افزایش یافت. در تحقیقات دیگر دانه‌های شیشه³ [3]، خاکستر بادی⁴ [12]، سیلیکا⁵ [13]، تالک⁶ [14] و کربن سیاه⁷ [15] نیز برای تقویت خواص مکانیکی به رزین پی‌وی‌سی افزوده شده‌است. ارمیس و همکاران [3] به بررسی تأثیر دانه‌های شیشه در مقادیر 5، 10 و 20 درصد وزنی بر خواص مکانیکی و تریبولوژی پی‌وی‌سی نرم مورد استفاده از کابل‌های برق خودرو پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش میزان دانه‌های شیشه سبب کاهش مقاومت کششی، کرنش پارگی⁸، ضریب اصطکاک و مقادیر نرخ فرسایش می‌گردد و از طرفی مدول کششی و سختی افزایش می‌یابد.

هاشم‌نژاد و کفاشی [16] جهت بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی فوم‌های پی‌وی‌سی از پراکسید آلی و مونومر تری متیل پروپان تری متاکریلات⁹ جهت

شبکه‌ای کردن فوم استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش میزان پراکسید و مونومر تری متیل پروپان تری متاکریلات، درصد ژل تشکیل شده و چگالی شبکه افزایش می‌یابد. همچنین استحکام کششی نهایی و پایداری ابعادی در دمای بالا بهبود می‌یابد. لازم به‌ذکر است که در این تحقیقات میزان زرد شدگی و تغییر رنگ نمونه‌ها معیاری برای پایداری حرارتی در نظر گرفته شده‌است.

مقاومت شیمیایی بالای پی‌وی‌سی در برابر اسیدها، بازها و روغن‌ها سبب شده تا پی‌وی‌سی در صنایع مختلف بکار گرفته‌شود، همچنین اعطاف‌پذیری پی‌وی‌سی به کمک مقادیر مختلفی از پلاستی‌سایزرها¹⁰ از جمله فتالات‌ها¹¹، تریملیتات‌ها¹²، آدیپات‌ها¹³ و روغن سویا¹⁴ و روغن‌های گیاهی دیگر می‌تواند در محدوده وسیعی تغییر کند [3]. ولی‌پور و انتظام [17] در پژوهشی نیز به بررسی اثر نرم‌کننده‌های دی‌اکتیل فتالات و روغن سویا بر خواص فیزیکی و مکانیکی پی‌وی‌سی پرداختند. بخش اصلی تولید پی‌وی‌سی، ترکیب رزین پی‌وی‌سی و پلاستی‌سایزر برای تشکیل یک خمیر پی‌وی‌سی یا پلاستیسول مایع است که می‌تواند با حرارت کنترل‌شده از طریق یک فرآیند پخت به یک پلاستیسول جامد تبدیل شود. به طور سنتی، فتالات‌ها به‌دلیل هزینه پایین، به طور گسترده به عنوان پلاستی‌سایزر در پی‌وی‌سی نرم مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، به دلیل ظهور برخی مشکلات مربوط به مهاجرت مواد غذایی، استفاده از آن‌ها بعنوان پلاستی‌سایزر محدودتر شده است [18] و [19]. از آنجایی که روش تولید چرم مصنوعی بصورت پوشش‌دهی با تیغه است بنابراین عدم تورق لایه‌ها و تقویت خواص مکانیکی، دو پارامتر حائز اهمیت می‌باشد. زمانی و همکاران [20] در پژوهشی از مقادیر مختلف پی‌وی‌سی سوسپانسیونی داخل پلاستیسول چرم مصنوعی استفاده کردند که طبق نتایج بدست آمده استفاده از 6 PHR پودر پی‌وی‌سی سوسپانسیونی سبب افزایش استحکام کششی نهایی و مدول الاستیک به ترتیب تا 5 و 15 درصد می‌شود، همچنین به‌دلیل برهمکنش بهتر لایه‌ها با یکدیگر، افزایش زبری سطح بین لایه‌ها و میزان ترشوندگی پدیده تورق لایه‌ها بطور کامل مرتفع شد.

تغییر رنگ نمونه پس از پخت و خواص مکانیکی نمونه، دو راه برای بررسی میزان تخریب حرارتی و پخت کامل نمونه‌های پی‌وی‌سی نرم و چرم مصنوعی است. فنولار و همکاران [21] در تحقیقات خود به این موضوع پرداخته‌اند. علاوه بر این در برخی از تحقیقات به تأثیر افزودنی‌ها بر زمان پخت آمیزه‌های پلیمری پرداخته شده است، برای مثال شعبانی و همکاران [22] در تحقیقات خود به بررسی اثر الیاف چرم طبیعی بر خواص مکانیکی و دمای پخت آکریلونیتریل بوتادین پرداخته‌اند. اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه شرایط پخت پلیمرها و افزایش خواص مکانیکی چرم مصنوعی و پی‌وی‌سی نرم به کمک پرکننده‌ها و افزودنی‌های مختلف انجام شده است، اما بهینه‌سازی شرایط پخت که یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر خواص مکانیکی به‌شمار می‌رود نیازمند بررسی دقیق می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر دو متغیر دما و زمان پخت بر خواص مکانیکی و میزان تخریب حرارتی چرم مصنوعی می‌باشد که با مقایسه نتایج بدست آمده دما و زمان پخت بهینه شناسایی می‌گردد. با توجه به بازه دمای پخت پی‌وی‌سی نرم که از دمای 150 درجه سانتی‌گراد تا 200 درجه سانتی‌گراد می‌باشد، دماهای 160 درجه سانتی‌گراد، 170 درجه

⁸ Rupture strain⁹ TMPTMA¹⁰ Plasticizer¹¹ Phthalate¹² Trimellitate¹³ Adipate¹⁴ Soybean Oil¹ Chen² Ning Chen³ Glass bead⁴ Fly Ash⁵ Silica⁶ Talc⁷ Carbon Black

جدول 1 فرمولاسیون پلاستیسول نمونه‌ها

Table 1 The Plastisol formulation of samples

پی‌وی‌سی	پلاستیسایزر	روان‌کننده	پایدارکننده حرارتی
100	60	18	5
مقدار (PHR)			

2-3- روش ساخت

روش ساخت نمونه‌ها در این تحقیق با توجه به روش تولید چرم مصنوعی در صنعت طراحی شد. در شکل 1 نحوه ساخت نمونه‌ها مشاهده می‌شود، در مرحله اول اجزاء تشکیل دهنده پلاستیسول (جدول 1)، به مدت ده دقیقه در دمای محیط توسط آمیزنده با سرعت 2000 دور بر دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند، همچنین برای جداسازی ذرات کلوخه شده و ناخالصی، پس از اختلاط پلاستیسول از فیلتر عبور داده شد. جهت شبیه‌سازی فرآیند پوشش‌دهی با تیغه‌آدر صنعت، پلاستیسول به کمک دستگاه فیلم‌کش بصورت فیلم‌هایی با ضخامت 2 میلی‌متر، بر روی کاغذهای نسوز⁵ کشیده شد و جهت تکمیل فرآیند پخت، هر کدام با توجه به جدول 2 در مدت‌زمان مشخصی در دمای مشخص قرار گرفتند و در مرحله آخر به کمک سنبه نمونه‌های دمبل‌ی شکل با توجه به استاندارد برش خوردند. لازم به ذکر است که تعداد 5 نمونه برای هر کدام از شرایط پخت که در جدول 2 با علامت ✓ مشخص شده است، برای انجام آزمون کشش تهیه شدند.

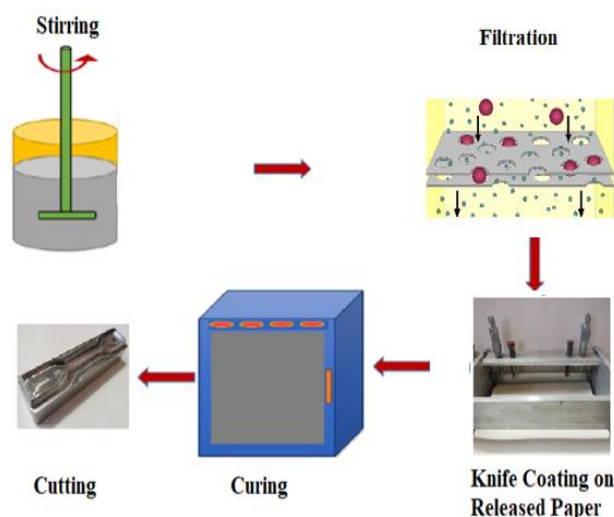


Fig. 1 The schematic of samples preparation

شکل 1 شماتیک آماده‌سازی نمونه‌ها

جدول 2 دما و زمان پخت نمونه‌ها

Table 2 Temperature and curing time of samples

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min			✓	
8 min		✓	✓	✓
10 min	✓	✓	✓	✓
12 min	✓	✓	✓	✓
14 min		✓	✓	
16 min		✓	✓	
18 min		✓		

⁴ Knife Coating Technique (KCT)

⁵ Released Paper

سانتی‌گراد، 180 درجه سانتی‌گراد و 190 درجه سانتی‌گراد جهت پخت نمونه‌های تحقیق حاضر مد نظر قرار گرفتند [23]. پلاستیسول این نمونه‌ها در شرایط یکسان با ترکیبی ثابت تهیه شد و نمونه‌ها در دماهای 160 درجه سانتی‌گراد، 170 درجه سانتی‌گراد، 180 درجه سانتی‌گراد و 190 درجه سانتی‌گراد در مدت‌زمان‌های مختلف قرار گرفتند و در نهایت با بررسی هر دو رنگ نمونه‌ها پس از پخت و انجام آزمون کشش مقادیر بهینه دما و زمان پخت شناسایی شد.

نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد، افزایش زمان پخت در هر نمونه در ابتدا به دلیل نفوذ بهتر پلاستی‌سایزر در زنجیره‌های پی‌وی‌سی امولسیون سبب افزایش خواص مکانیکی و سپس به دلیل تخریب حرارتی نمونه‌ها خواص مکانیکی افت می‌کند. همچنین افزایش دما تا 190 درجه سانتی‌گراد به دلیل افزایش و تسهیل جنبش ذرات، فرآیند پخت به‌خوبی انجام شده و خواص مکانیکی بالاتری در مدت‌زمان کمتر مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج، برای نمونه‌های فیلم چرم مصنوعی با ضخامت 2 میلی‌متر، دما و زمان بهینه پخت به ترتیب برابر 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 12 دقیقه است.

2- نوآوری و اهداف تحقیق

میزان تقاضا برای چرم مصنوعی طی سال‌های اخیر، به دلیل کاربردهای فراوان مانند مبلمان، خودرو، لوازم جانبی الکترونیکی و پوشاک افزایش یافته است. هزینه پایین، رنگ‌بندی مختلف، تولید آسان و وزن پایین از دیگر مزایای چرم مصنوعی است [24]. با توجه به مصارف متعدد چرم مصنوعی، مطالعه و تقویت خواص مکانیکی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از پرکننده‌ها و الیاف مختلف جهت تقویت خواص مکانیکی چرم مصنوعی صورت پذیرفته است اما تاکنون تأثیر شرایط پخت بر رفتار مکانیکی چرم مصنوعی مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی شرایط پخت چرم مصنوعی از طریق اندازه‌گیری خواص مکانیکی و بررسی میزان تغییر رنگ و تخریب حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد بررسی میزان تغییرات در خواص مکانیکی چرم مصنوعی با توجه به شرایط پخت تأثیر به‌سزایی بر نحوه تولید چرم مصنوعی در صنعت می‌گذارد. در پژوهش انجام شده، سعی بر آن شد تا با توجه به روش تولید چرم مصنوعی در صنعت، شرایط بهینه از نقطه نظر دما و مدت‌زمان پخت مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور نمونه‌های مختلف در شرایط مختلف تهیه شد و سپس جهت مقایسه خواص مکانیکی آن‌ها با یکدیگر تحت آزمون کشش قرار گرفتند، همچنین با توجه به مسئله تخریب حرارتی در پی‌وی‌سی، رنگ نمونه‌ها و مقایسه آن با نتایج آزمون کشش نیز مورد بررسی قرار گرفت.

3- روش تحقیق

1-3- مواد اولیه

همانطور که در جدول 1 نیز آمده است، فرمولاسیون پلاستیسول به کار رفته شامل رزین پی‌وی‌سی امولسיוنی¹، پلاستی‌سایزر از نوع روغن دی‌اکتیل فتالات²، پایدار کننده حرارتی از نوع باریم-کادمیوم-روی³ بصورت مایع و روان‌کننده هیدروکربنی می‌باشد. با توجه به جدول 1 فرمولاسیون تمام نمونه‌ها ثابت و شرایط ساخت پلاستیسول آن‌ها یکسان است.

¹ E-PVC 6834

² DOP

³ Ba-Ca-Zn Heat Stabilizer

4- نتایج و بحث

منظور از پخت در مرحله آخر تولید چرم مصنوعی به معنای نفوذ پلاستی‌سایزر به زنجیره‌های پی‌وی‌سی آمولسیون‌ی است. جهت امتزاج¹ و انعقاد² ذرات پی‌وی‌سی، پلاستی‌سول تحت حرارت قرار می‌گیرد و در نتیجه استحکام پلاستی‌سول بالا می‌رود که خواص مکانیکی محصول به ترکیب پلاستی‌سول و شرایط پخت آن وابسته است [25].

با توجه به استاندارد آزمون کشش پلاستیک‌ها³ [26]، نمونه‌ها در اندازه مشخص برش خوردند و آماده برای آزمون کشش شدند. جهت محاسبه مدول الاستیک، استحکام نهایی کششی و کرنش پارگی، نمونه‌ها توسط دستگاه کشش یونیورسال Santam STM-150 با نیروسنج⁴ 500 نیوتن، فاصله بین دو گیره 65 میلی‌متر و با سرعت 50 میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمون کشش قرار گرفت. در شکل 2 تصویری از نمونه در شروع و حین آزمون کشش آمده‌است.



Fig. 2 Sample at the beginning of the tensile test (left) and during the tensile test (right)

شکل 2 نمونه در ابتدای آزمون کشش (چپ) و حین آزمون کشش (راست)

نمودارهای تنش-کرنش برای محاسبه مدول الاستیک تمام نمونه‌ها استفاده شد و نتایج آن به صورت میانگینی با حداکثر انحراف معیار 0.2 در جدول 3 تا جدول 5 آمده‌است. لازم به ذکر است که مدول الاستیک نمونه‌ها برابر شیب نمودار تنش-کرنش از نقطه آغاز تا 20 درصد کرنش کششی است. با استفاده از روش رگرسیون خطی، تا این میزان کرنش میزان ضریب همبستگی بیشینه بود.

جدول 3 مدول الاستیک نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال در دما و زمان پخت متفاوت

Table 3 The elastic modulus values of the samples in MPa at different temperatures and times of curing

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min	-	-	5.2	-
8 min	-	5.4	5.67	7.59
10 min	5.17	5.43	5.68	7.93
12 min	5.22	5.58	5.93	7.96
14 min	-	6.2	7.15	-
16 min	-	6.34	7.28	-
18 min	-	6.36	-	-

جدول 4 استحکام کششی نهایی نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال در دما و زمان پخت متفاوت

Table 4 The ultimate tensile strength values of the samples MPa at different temperatures and times of curing

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min	-	-	6.87	-
8 min	-	6.33	8.02	9.58
10 min	4.33	7.46	8.11	9.79
12 min	5.46	8.03	8.13	9.83
14 min	-	8.8	9.19	-
16 min	-	8.75	9.1	-
18 min	-	8.7	-	-

جدول 5 کرنش پارگی نمونه‌ها در دما و زمان پخت متفاوت

Table 5 The rupture strain of samples at different temperatures and times of curing

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min	-	-	%135	-
8 min	-	%134	%232	%267
10 min	%126	%217	%248	%268
12 min	%142	%232	%255	%268
14 min	-	%254	%260	-
16 min	-	%255	%258	-
18 min	-	%250	-	-

جهت درک بهتر و مقایسه تغییرات خواص مکانیکی در شکل 3 تا شکل 5 نمودارهای تغییرات مدول الاستیک، استحکام کششی نهایی و کرنش پارگی با شرایط مختلف از نظر دما و مدت زمان پخت نیز آمده است. علاوه بر این، نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌ی بهینه (نمونه‌ی پخت شده در دمای 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 12 دقیقه) در شکل 6 مشاهده می‌شود.

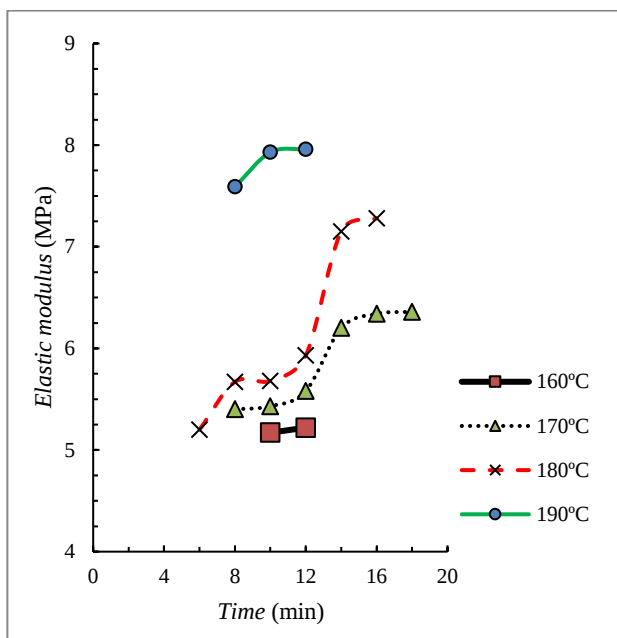


Fig. 3 Diagram of the changes in the elastic modulus of samples at various temperatures and times of curing

شکل 3 نمودار تغییرات مدول الاستیک نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مختلف پخت

³ ASTM D638

⁴ Load Cell

¹ Fusion

² Gelation

ساختار، خواص مکانیکی به بالاترین حد خود در آن دما می‌رسد و پس از آن تخریب حرارتی در نمونه شدت گرفته و سبب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد.

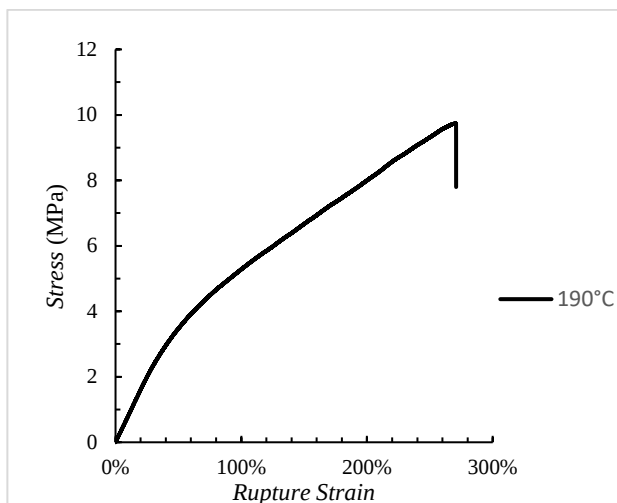


Fig. 6 The Stress-Strain diagram of the optimal specimen

شکل 6 نمودار تنش-کرنش نمونه بهینه

در دمای 190 درجه سانتی‌گراد بدلیل جنبش مولکولی بالاتر ذرات، نفوذ پلاستی‌سایزر در ذرات پی‌وی‌سی امولسیون‌ی بهتر است و در مدت‌زمان کمتری رخ می‌دهد. علت بالاتر بودن خواص مکانیکی در مدت‌زمان پخت کمتر در این دما همین امر است. افزایش دما به میزان بالاتر از 190 درجه سانتی‌گراد به دلیل سرعت بالای تخریب حرارتی و همچنین به وجود آمدن مشکلاتی در روند تولید صنعت چرم مصنوعی در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفت.

تخریب حرارتی در پی‌وی‌سی به معنای جدا شدن کلر از زنجیره‌ی پلیمر است و این فرآیند موجب تغییر رنگ نمونه می‌گردد. بررسی رنگ نمونه‌ها یکی از روش‌های شناسایی تخریب حرارتی است. فنولار و همکاران [21] نیز در تحقیقات خود از این روش برای بررسی میزان تخریب حرارتی استفاده کرده‌اند. در شکل 7 تصاویر نمونه‌ها و میزان تغییر رنگ نمونه‌ها آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، توافق خوبی میان نتایج تخریب حرارتی در این تحقیق با تحقیقات فنولار و همکاران [21] و همچنین نتایج آزمون کشش برقرار است.

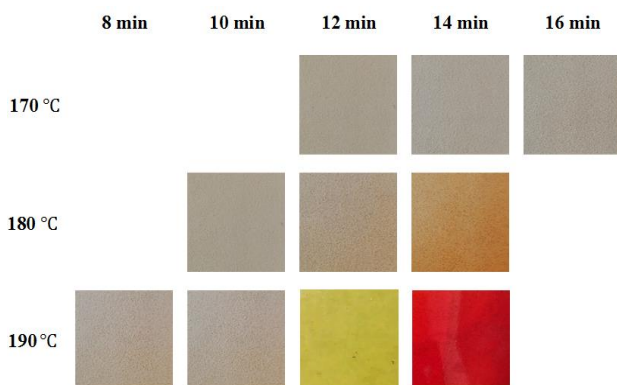


Fig. 7 The effect of temperature and time of curing on color and thermal degradation of samples

شکل 7 تأثیر دما و مدت‌زمان پخت بر رنگ و تخریب حرارتی نمونه‌ها

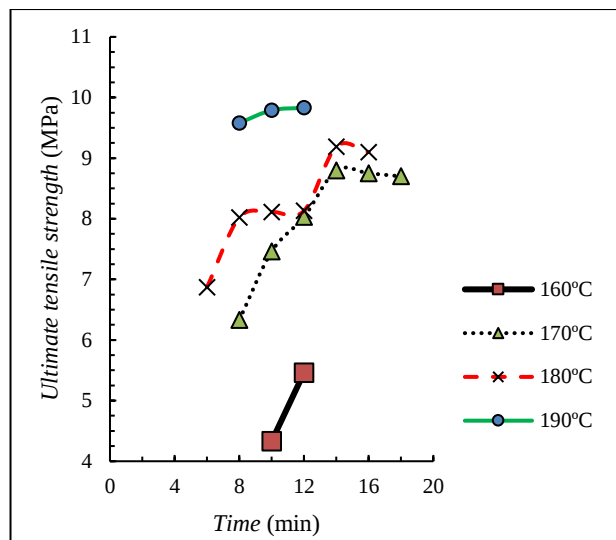


Fig. 4 Diagram of the changes in the ultimate tensile strength of samples at various temperatures and times of curing

شکل 4 نمودار تغییرات استحکام نهایی کششی نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مختلف پخت

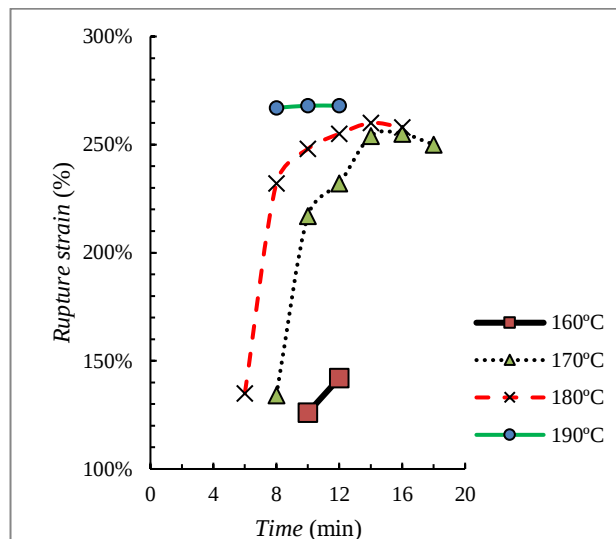


Fig. 5 Diagram of the changes in the rupture strain of samples at various temperatures and times of curing

شکل 5 نمودار تغییرات کرنش پارگی نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مختلف پخت

با توجه به شکل 3 تا شکل 5، دمای 160 درجه سانتی‌گراد به دلیل خواص مکانیکی بسیار پایین نمونه‌ها، دمای مناسبی برای نفوذ پلاستی‌سایزر به داخل زنجیره‌های پی‌وی‌سی نمی‌باشد. در دمای 170 درجه سانتی‌گراد و 180 درجه سانتی‌گراد با افزایش مدت‌زمان پخت بدلیل شروع نفوذ پلاستی‌سایزر ابتدا خواص مکانیکی با شیب زیاد افزایش می‌یابد و پس از نفوذ اولیه روغن دی‌اکتیل فتالات در برخی ذرات پی‌وی‌سی امولسیون‌ی، افزایش خواص مکانیکی با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. دلیل این امر وجود ذرات کلوخه‌شده¹ و با اندازه بزرگ‌تر در ساختار پلاستی‌سول پی‌وی‌سی است. نفوذ در ذرات کلوخه‌شده با اندازه‌ی بزرگ‌تر نیازمند زمان بیشتری است و تا هنگامی که نفوذ پلاستی‌سایزر در این ذرات رخ ندهد، این ذرات سبب نقص ساختاری و تمرکز تنش در نمونه می‌شود و مانع از افزایش خواص مکانیکی می‌گردند. پس از نفوذ کامل و همگن شدن

¹ Agglomerated particles

5- نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد و استفاده روزافزون از چرم مصنوعی، بررسی تأثیر شرایط پخت و شناسایی دما و مدت‌زمان بهینه پخت امری ضروری است. در این پژوهش به بررسی تأثیر دما و مدت‌زمان پخت بر خواص مکانیکی چرم مصنوعی پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد تغییرات شرایط و انتخاب دقیق زمان و دمای پخت تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی می‌گذارند.

بطور کلی با افزایش دمای پخت تا 190 درجه سانتی‌گراد به دلیل افزایش جنبش مولکولی ذرات، میزان نفوذ پلاستی‌سایزر به زنجیره‌های پلیمری بهبود می‌یابد و در نتیجه امکان دستیابی به خواص مکانیکی بالاتری در مدت‌زمان کم فراهم می‌شود. با افزایش مدت‌زمان پخت در دمای ثابت، ابتدا خواص مکانیکی به دلیل نفوذ پلاستی‌سایزر بین زنجیره‌های پی‌وی‌سی با شیب زیاد افزایش می‌یابد. پس از نفوذ اولیه پلاستی‌سایزر به ذرات پی‌وی‌سی با اندازه کوچک‌تر، با افزایش مدت‌زمان پخت روند افزایش خواص مکانیکی از جمله استحکام نهایی کششی و مدول الاستیک با شیب کمتری اتفاق می‌افتد، زیرا نفوذ پلاستی‌سایزر به ذرات پی‌وی‌سی کلوخه شده در ماتریس پلیمری نیازمند مدت‌زمان بیشتری است و این ذرات کلوخه شده همانند نقص در ماتریس پلیمری سبب افت خواص مکانیکی می‌شود. با شروع نفوذ پلاستی‌سایزر در ذرات کلوخه شده و همگن‌تر شدن ساختار دوباره روند افزایش استحکام کششی نهایی و مدول الاستیک با شیب بیشتری مشاهده شد و در نهایت بدلیل تخریب حرارتی در مدت‌زمان‌های بالا، خواص مکانیکی افت می‌کند.

با توجه پژوهش‌های انجام شده در حوزه تقویت خواص مکانیکی چرم مصنوعی و پی‌وی‌سی نرم با استفاده از افزودنی‌های مختلف، بهینه‌سازی شرایط پخت تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی دارد برای مثال تغییر دما از 160 درجه سانتی‌گراد به 190 درجه سانتی‌گراد سبب افزایش مدول الاستیک، کرنش پارگی و استحکام کششی نهایی به ترتیب تا 52، 89 و 80 درصد می‌گردد. با مد نظر قرار دادن نتایج این پژوهش در صنایع مرتبط با پی‌وی‌سی نرم خصوصاً صنعت چرم مصنوعی با کمترین هزینه و بدون استفاده از افزودنی‌های ویژه، می‌توان محصولات با خواص مکانیکی و کیفیت بالا تولید کرد.

تقدیر و تشکر: بدینوسیله نویسندگان از حمایت مالی بعمل آمده توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور با شماره 97024007 تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

6- مراجع

- [1] Titow, M. V., "PVC technology," Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] Shah, B. L. and Shertukde, V. V., "Effect of plasticizers on mechanical, electrical, permanence, and thermal properties of poly (vinyl chloride)," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 90, No. 12, pp. 3278–3284, 2003.
- [3] Ermis, K., Unal, H. and Gunay, M., "Glass bead effects on tribological and mechanical properties of plasticized polyvinyl chloride cable used in vehicles as a filler," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 235, No. 11, pp. 2432–2439, 2021.
- [4] Somheil, T., "Study: global PVC demand to grow 3.2% annually through 2021," Resin Pricing, Building Construction, 2014.
- [5] Maqqari Bidgoli, M., Garmabi, H. and Akbarian, M., "Investigation of the effect of stabilizers and lubricants on the fusion rate of rigid PVC blend," In Persian, 9th National Congress of Chemical Engineering of Iran, 2004.
- [6] Yarahmadi, N., Jakubowicz, I. and Hjertberg, T., "The effects of heat treatment and ageing on the mechanical properties of rigid PVC," Polymer Degradation Stability Journal, Vol. 82, No. 1, pp. 59–72, 2003.
- [7] Chen, N., Wan, C., Zhang, Y. and Zhang, Y., "Effect of nano-CaCO₃ on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend," Polymer Testing Journal, Vol. 23, No. 2, pp. 169–174, 2004.
- [8] Awad, W.H., Beyer, G., Benderly, D., Ijdo, W.L., Songtipya, P., del Mar Jimenez-Gasco, M., Manias, E. and Wilkie, C.A., "Material properties of nanoclay PVC composites," Polymer Journal, Vol. 50, No. 8, pp. 1857–1867, 2009.
- [9] Xie, X. L., Liu, Q. X., Li, R. K. Y., Zhou, X. P., Zhang, Q. X., Yu, Z. Z. and Mai, Y. W., "Rheological and mechanical properties of PVC/CaCO₃ nanocomposites prepared by in situ polymerization," Polymer Journal, Vol. 45, No. 19, pp. 6665–6673, 2004.
- [10] Rothon, R. and Chris, P., "Fillers for Polymer Applications," Springer International Publishing, Ed. 1, pp. 149–160, 2017.
- [11] Chen, C., Li, H., Teng, C. and Yang, C., "Fusion, electrical conductivity, thermal, and mechanical properties of rigid poly (vinyl chloride)(PVC)/carbon black (CB) composites," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 99, No. 5, pp. 2167–2173, 2006.
- [12] Khoshnoud, P. and Abu-Zahra, N., "The effect of particle size of fly ash (FA) on the interfacial interaction and performance of PVC/FA composites," Journal of Vinyl and Additive Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 134–143, 2019.
- [13] Syabani, M., Amaliyana, I. N. A. and Hermiyati, I., "Silica from Geothermal Waste as Reinforcing Filler in Artificial Leather," Key Engineering Materials Journal, Vol. 849, pp. 78–83, 2020.
- [14] Tuen, B. S., Hassan, A. and Bakar, A. A., "Mechanical Properties of Talc- and (Calcium carbonate) -Filled Poly (vinyl chloride) Hybrid Composites," Journal of Vinyl and Additive Technology, Vol. 18, No. 2, pp. 76–86, 2012.
- [15] Islam, I., Sultana, S., Kumer Ray, S., Parvin Nur, H. and Hossain, M., "Electrical and tensile properties of carbon black reinforced polyvinyl chloride conductive composites," Journal of Carbon Research, Vol. 4, No. 1, pp. 15, 2018.
- [16] Hashem Nejad, M. and Babak, K., "Improving the physical and mechanical properties of PVC foams using peroxide curing system," In Persian, 8th National Congress of Chemical Engineering of Iran, 2013.
- [17] Valipoury, N. and Entezam, M., "Physico-mechanical properties of cross-linked polyvinyl chloride (PVC) by electron irradiation method: The effect of plasticizer," In Persian, 17th National Congress of Chemical Engineering of Iran, 2020.
- [18] Wang, Q. and Storm, B. K., "Separation and analysis of low molecular weight plasticizers in poly (vinyl chloride) tubes," Polymer Testing Journal, Vol. 24, No. 3, pp. 290–300, 2005.
- [19] Marcilla, A., García, S. and García-Quesada, J. C., "Migrability of PVC plasticizers," Polymer Testing Journal, Vol. 27, No. 2, pp. 221–233, 2008.
- [20] Zamani, M., Shokrieh, M. M. and Rahimian-Koloor, S. M., "Study of mechanical behavior of synthetic leather in the presence of PVC suspension resin," 17th National Conference and 6th International Conference on Manufacturing Engineering, 2021.
- [21] Fenollar, O., García, D., Sánchez, L., López, J. and Balart, R., "Optimization of the curing conditions of PVC plastisols based on the use of an epoxidized fatty acid ester plasticizer," European Polymer Journal, Vol. 45, No. 9, pp. 2674–2684, 2009.
- [22] Shabani, M., Jalali Arani, A. and Ramezani Dakhel, H., "The Effect of Leather Fiber upon Vulcanization Characteristics and Physical-Mechanical Properties of Elastomeric Compounds," In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 391–397, 2007.
- [23] Cheremisinoff, N.P., "Advanced polymer processing operations," University Press of Mississippi, Vol. 2, No. 1, pp. 39–68, 1998.
- [24] Roh, E. K., Oh, K. W. and Kim, S. H., "Effect of raising cycles on mechanical, comfort, and hand properties of artificial suede," Textile Research Journal, Vol. 84, No. 18, pp. 1995–2005, 2014.
- [25] Rybachuk, G. V., Kozlova, I. I., Mozzhukhin, V. B. and Guzeev, V. V., "PVC plastisols: Preparation, properties, and application," Polymer Science Series C, Vol. 49, No. 1, pp. 6–12, 2007.
- [26] ASTM-D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1," American Society for Testing and Materials, No. January 2004, pp. 1–15, 2006.



مقایسه سختی و خواص تریبولوژیکی نانوکامپوزیت‌های آلیاژ آلومینیوم 5083 با استفاده از پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی با فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی

مصطفی گلی¹، احمد افسری^{2*}، سید احمد به‌گزین³، سید محمدرضا ناظم‌السادات⁴

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز

2- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز

3- استادیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دانشکده فنی و مهندسی باهنر شیراز، شیراز

4- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز

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

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/11/19

پذیرش: 1402/03/26

کلیدواژگان

فرایند اصطکاکی-اغتشاشی،

آلیاژ آلومینیوم 5083،

نانوکامپوزیت سطحی،

تریبولوژی، مقاومت سایشی، سختی

چکیده

از فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی برای تولید ماده کامپوزیتی با زمینه فلزی بر روی آلیاژ پایه آلومینیوم 5083 به‌منظور بهبود خواص سختی و تریبولوژیکی استفاده شد. از پودر تقویت‌کننده دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی استفاده گردید و تعداد پاس‌ها برای انجام فرایند تغییر داده شد. ریزساختار مواد کامپوزیتی تولیدشده با میکروسکوپ الکترونی روبشی و لایه‌های سطحی کامپوزیت توسط میکرو سختی مورد بررسی قرار گرفتند. این روش در 4 پاس، باعث حداکثر 32.3 درصد افزایش سختی در نانوکامپوزیت سطحی حاصل از پودر نانولوله کربنی و 21.6 درصد افزایش سختی در نانوکامپوزیت سطحی حاصل از پودر دی‌بوراید تیتانیوم نسبت به فلز پایه گردید. نمونه‌های تولیدشده با چهار پاس حاوی پودر نانولوله کربنی، دارای سختی 8 درصد بیشتر از سختی نمونه‌هایی با پاس مشابه با پودر دی‌بوراید تیتانیوم است. بیشترین مقاومت سایشی در 4 پاس حاصل گردید به‌طوری‌که مقاومت سایشی حاصل‌شده در حالت استفاده از نانولوله کربنی حدود 45 درصد بیش از حالت استفاده از پودر TiB_2 بوده و عمر کاری قطعه در شرایط سایشی را می‌توان با این عملیات تا 3.5 برابر افزایش داد.

Comparison of hardness and tribological properties of AA5083 aluminum alloy nanocomposites using TiB_2 powder and carbon nanotube with friction-stir process

Mostafa Gooli¹, Ahmad Afsari^{1*}, Sayed Ahmad Behgozin², Sayed Mohammad Reza Nazemassadat¹

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

2- Department of Mechanical Engineering, Engineering College of Bahonar, Shiraz, Technical and vocational university, Iran

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

Keywords

Friction stir processing, AA5083 Aluminum Alloy, Surface Nanocomposite, Tribology, Wear resistance, Hardness

Abstract

Friction stir process (FSP) was used to improve hardness and tribological properties of Al-5083 aluminum alloy through formation of metal matrix composite (MMC) material. The process involved the use of titanium diboride powder (TiB_2) and carbon nanotubes reinforcing materials. The number of passes during the process was varied. Observations of the microstructure of the composite materials were made using scanning electron microscopy (SEM), while the composited surface layers were examined using microhardness testing. After conducting four passes using FSP, the surface nanocomposite obtained from carbon nanotubes and TiB_2 yielded a maximum increase in hardness of 32.3%, and 21.6% compared to the base alloy respectively. Moreover, the samples produced with four passes, containing carbon nanotubes, showed a hardness 8% greater than the samples produced with the same number of passes, but with TiB_2 . Additionally, the highest wear resistance was also obtained using four passes. The wear resistance exhibited by the carbon nanotube-reinforced composite was approximately 45% greater than the TiB_2 powder-reinforced composite. Hence, the use of FSP can potentially increase the working life of the part in wear conditions by up to 3.5 time.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Gooli, M., Afsari, A., Behgozin, S. A., Nazemassadat, S. M. R., "Comparison of hardness and tribological properties of AA5083 aluminum alloy nanocomposites using TiB_2 powder and carbon nanotube with friction-stir process, Vol. 10, No. 1, pp. 2138-2146, 2023.

https://doi.org 10.22068/JSTC.2023.1988946.1824

1- مقدمه

قطعه‌کار می‌چرخد، زمانی که پین بر روی ماده می‌نشیند پیشانی و سطوح جانبی آن با سطح ماده تماس پیدا کرده و بر اثر چرخش و گذشت زمان، ناحیه انتخاب‌شده در تماس به دلیل اصطکاک شدید موجود بین ابزار و قطعه گرم می‌شود. در این روش امکان کنترل عمق اغتشاش، سرعت پیشروی و سرعت چرخشی ابزار وجود دارد. به دلیل عدم ایجاد ذوب در این فرآیند، این روش را می‌توان جزو روش‌های حالت جامد تولید کامپوزیت فلزی تقسیم‌بندی نمود [1، 2 و 3].

با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و ساخت نانو کامپوزیت سطحی به‌منظور بهبود خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری فولاد کم‌کربن با افزودن نانوذرات TiB_2 به آلایژ ماتریس فولاد کم‌کربن، انجام‌شده و میکرو سختی تا 200 ویکرز بالاتر از فلز پایه ایجاد شد. همچنین نشان داده شد که با افزایش تنش کاری نمونه به حدود 28 درصد، نانو کامپوزیت سطح مقاومت کششی بهتری از خود نشان می‌دهد [4 و 5]. همچنین با اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در فولاد کم‌کربن، دانه‌بندی ساختار تحت مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی می‌تواند تا ابعاد 0.5 میکرومتر ریز شود و استحکام کششی نمونه‌های فرآوری شده در شرایط بهینه فرآیند تا 50 مگاپاسکال افزایش یابد به همین ترتیب سختی نمونه‌های فرآوری شده تا حدود 2.5 برابر فلز پایه می‌تواند افزایش داشته و با بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها در نتیجه فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، متعاقباً رفتار تریبولوژیکی بهبود پیدا کرده و نرخ سایش نمونه‌ها هم حدود 28 درصد کاهش می‌یابد اما اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تغییری در خواص خوردگی فولاد کم‌کربن ایجاد نمی‌کند [6].

در تحقیقی به‌منظور بهبود خواص سطحی و تریبولوژیکی آلایژ آلومینیوم 6061، لایه‌های نانو کامپوزیت سطحی حاوی نانوذرات TiB_2 ، $Al_2O_3-TiB_2$ ، ZrO_2 و CNT توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلایژ آلومینیوم ایجاد گردیده است. افزایش تعداد پاس‌ها سبب افزایش سختی نانو ماده مرکب سطحی شده و بیشترین سختی و کمترین ضریب سایش هم در حالت استفاده از $Al_2O_3+TiB_2$ حاصل شده است [7]. در تحقیقی دیگر، پراکندگی توده‌ای تقویت‌کننده نانولوله کربن در کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم 6061، موردبررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها در معرض تعداد پاس‌های گوناگون فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از یک تا چهار پاس بوده است. مشاهدات ریزساختاری با به‌کارگیری میکروسکوپ الکترونی روبشی حکایت از سطح بهسازی شده و پراکندگی مناسب ذرات نانویی در 4 پاس در زمینه دارد [8].

توزیع و پایداری نانولوله‌های کربنی چند دیواره 5 در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی چند پاسه کامپوزیت‌های آلایژ آلومینیوم 5059 در تحقیقی موردبررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده که تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی بر روی این آلایژ به‌وسیله نانولوله‌های کربنی چند دیواره با توزیع یکنواخت و درصد حجمی بالا با ساختار نانویی تقویت‌کننده به‌وسیله فرآیند اصطکاکی اغتشاشی چند پاسه با ابزارها و شرایط فرآیندی مختلف امکان‌پذیر است [9]. رابطه بین خواص مکانیکی آلایژهای آلومینیوم و پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی شش دسته متفاوت آلایژهای آلومینیوم (7075-1100-2219-2024-6061-7039) با استفاده از سطوح متفاوتی از پارامترهای فرآیند اجرا شده است. شرایط بهینه برای به دست آوردن حداکثر مقاومت برای هر آلایژ با استفاده از روش ریاضی و آماری پاسخ سطح 6 مورد شناسایی قرار گرفته و روابط تجربی بین خواص مکانیکی فلز پایه آلایژهای

بیشتر قطعاتی که در صنعت بکار گرفته می‌شوند از فلزات و آلایژها ساخته‌شده‌اند و خواص سطحی آن‌ها، نظیر مقاومت به سایش، سختی و غیره در بسیاری از کاربردهای صنعتی تعیین‌کننده عمر قطعه می‌باشد. لیکن متأسفانه این قطعات به‌طور کلی دارای خواص مکانیکی و تریبولوژیکی ضعیفی هستند. اما عامل بالقوه بالایی برای تولید قطعات بر پایه فلز با خواص مکانیکی و تریبولوژیکی بهبودیافته وجود دارد. خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، نسبت استحکام به وزن بالا، چگالی کم، مقاومت در برابر خوردگی، بازیافت و دیگر خواص مطلوب باعث شده که آلومینیوم و آلایژهای آن به‌عنوان مناسب‌ترین و مفیدترین انتخاب در بسیاری از کاربردها باشد. از طرفی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای ایجاد تغییرات میکرو ساختاری در مواد به کار می‌رود و مدت‌ها است که گرمادهی اصطکاکی به‌عنوان روش اتصال، فرآوری و عملیات بر روی مواد استفاده می‌گردد و از مهم‌ترین مزیت‌های این روش، می‌توان به بازدهی انرژی بالا و سازگاری خوب با محیط‌زیست اشاره کرد. این فرآیند از آغاز برای اتصال آلایژهای آلومینیوم کاربرد داشته و در صنایع هوافضا، راه‌آهن، خودروسازی و صنایع دریایی بکار گرفته می‌شود. با توجه به حرکت چرخشی و روبه‌جلوی ابزار، مناطق مختلف فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی را می‌توان به دو ناحیه پیشروی¹ و پس‌رو² تقسیم‌بندی کرد که در شکل 1 مشاهده می‌شود [1].

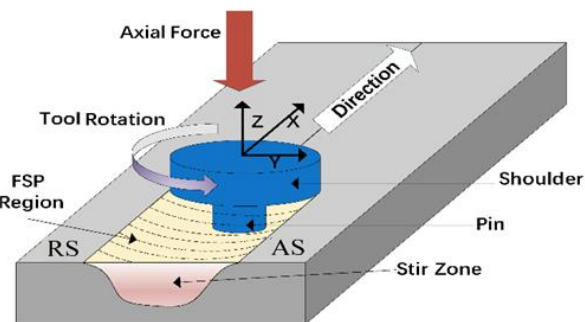


Fig 1 Schematic of the direction of linear and rotary movement of the tool and the naming of different process areas [1].

شکل 1 شماتیک جهت حرکت خطی و چرخشی ابزار و نام‌گذاری نواحی مختلف فرآیند [1].

در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی خواص فلز پایه نظیر استحکام تسلیم، سختی و شکل‌پذیری، توسط جریان پلاستیک شدید³ ماده تحت چرخش ابزار غیرمصرفی، کنترل می‌شود. پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نظیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی و نیروی محوری ابزار، نقش عمده‌ای در کیفیت فرآیند ایفا می‌کنند. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روشی است که بر پایه روش جوشکاری اصطکاکی برای بهسازی ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی فلزات به‌خصوص کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم ابداع شد، لیکن با این تفاوت که در این فرآیند، عمل جوشکاری انجام نمی‌گیرد. ابزار غیر مصرفی به درون قطعه نفوذ کرده و دو ماده، شامل ماده پایه و ماده تقویت‌کننده را باهم مخلوط می‌نماید و با تولید کامپوزیت زمینه فلزی⁴، خواص بهینه‌ای نسبت به فلز مادر ایجاد می‌گردد. در این روش از یک ابزار استوانه‌ای شکل دربردارنده شانه و پین استفاده شده است به‌گونه‌ای که پین بر روی محل از پیش تعیین‌شده‌ای از سطح

⁴ MMC, Metal Matrix Composite

⁵ Multi Wall Carbon Nano Tubes (MWCNT)

⁶ Response Surface Methodology, (RSM)

¹ AS, Ascending Side

² -RS, Retreating Side

³ SPD, Severe Plastic Deformation

به‌طور یکنواخت در ناحیه فلز جوش توزیع می‌شوند. همچنین ریز سختی‌ها در شرایط بهینه به دلیل حضور ذرات سخت‌کننده افزایش می‌یابد [16]. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا ماده مرکب سطحی بر پایه آلایژ آلومینیوم 5083 با استفاده از روش اصطکاکی اغتشاشی تولید شود و به بررسی و مقایسه خواص نمونه‌های تولیدشده پرداخته شود. در این راستا از نانوذرات دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی، به‌عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده گردید. بررسی ریزساختاری، ارزیابی سختی و خواص تریبولوژیکی نمونه‌های تولیدشده به‌منظور بررسی موفقیت‌آمیز فرآیند در تولید مواد مرکب سطحی نیز به عمل می‌آید. هرچند افزودن ذرات سرامیکی دی‌بوراید تیتانیوم (TiB_2) به زمینه آلومینیومی تغییر چندانی در چگالی ماده به وجود نمی‌آورد، لیکن باعث افزایش قابل‌توجهی در استحکام ویژه کامپوزیت می‌شود. این بهبود به نسبت استحکام به وزن در کامپوزیت‌ها، نقش کلیدی در بهینه‌سازی و صرفه-جویی ماده برای استفاده در کاربردهای سازه‌ای دارد.

2- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلایژ آلومینیوم 5083 انجام گرفت و ترکیب شیمیایی آلایژ مورد استفاده در فرآیند از طریق آنالیز کوانتومتری مشخص شد. ماده اولیه به شکل ورق به ضخامت 6 میلی‌متر به شکل مستطیل به ابعاد 150×70 میلی‌متر به‌وسیله دستگاه وایرکات برش داده شد. این عمل به‌منظور جلوگیری از تاب برداشتن قطعه‌کار انجام شد تا در نهایت اختلاف سطح نمونه‌ها در حدود 0.05 میلی‌متر باقی بماند. در نمونه‌هایی از ورق که باید حاوی دو نوع پودر باشند، شیارهایی با طول 130، عرض 1 و عمق 3 میلی‌متر مطابق شکل 2، ایجاد گردید. قبل از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی سطح نمونه‌ها جهت زدودن آلودگی‌ها و چربی‌های ناشی از فرآیند برشکاری و فرزکاری به‌وسیله الکل تمیز گردید.

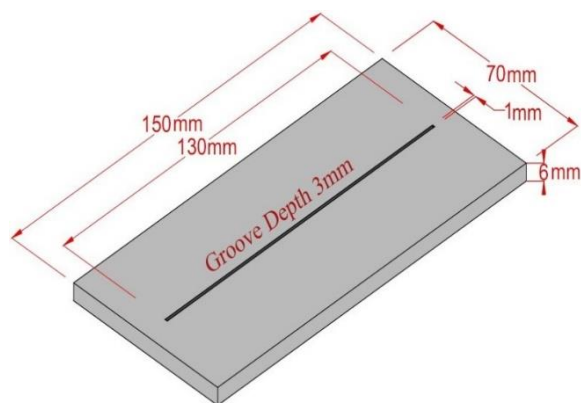


Fig 2 Schematic of the sample of the cut piece with a middle groove
شکل 2 شماتیک نمونه قطعه برش خورده و دارای شیار وسط

جهت کامپوزیت سازی در این پژوهش، از پودرهای دی‌بوراید تیتانیوم (TiB_2) و نانولوله کربنی به‌عنوان ماده تقویت‌کننده استفاده گردید. دی‌بوراید-تیتانیوم یکی از پایدارترین ترکیبات دو عنصر تیتانیوم و بور است. سختی زیاد، پایداری شیمیایی و نقطه ذوب بالا، مقاومت در برابر اسید، مقاومت به سایش و شوک‌های حرارتی از خواص مهم این ماده می‌باشد. در یک نانولوله کربنی، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای آرایش می‌گیرند. یعنی یک لوله توخالی که جنس دیواره آن از اتم‌های کربن است. آرایش اتم‌های کربن در دیواره این ساختار استوانه‌ای، دقیقاً مشابه آرایش کربن در

آلومینیوم و پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بهینه‌شده برقرار گردید. این روابط می‌تواند به‌طور مؤثر در پیشگویی پارامترهای بهینه‌شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با توجه به خواص فلز پایه شناخته‌شده (مقاومت تسلیم، ازدیاد طول و سختی) بکار رود [10].

در تحقیقی پودرهای Al و TiO_2 برای تولید کامپوزیت آلومینیوم از طریق فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با چند پاس بر اساس آنالیزهای ترمودینامیکی بکار گرفته شد و بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند واکنش بین Al و TiO_2 را ایجاد نماید و آزمون کشش نشان داد که کامپوزیت‌های در جا تولیدشده رفتار کارسختی و ترکیبی خوب از شکل‌پذیری و استحکام را از خود نشان می‌دهد [11]. در پژوهشی انتخاب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای کامپوزیت‌های سطحی آلایژ آلومینیوم بازیافتی 6063 تقویت‌شده با دی‌اکسید تیتانیوم برای عملکرد تریبولوژیکی بهتر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های سطحی تولیدشده با سرعت چرخش بالای 2442 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 50 میلی‌متر بر دقیقه، 45 درصد ریزسختی سطح را بهبود بخشیده و ضریب اصطکاک و نرخ سایش را به ترتیب 39 و 73 درصد نسبت به مواد پایه کاهش داده است [12].

تأثیر سرعت چرخشی و تقویت‌کننده‌ها روی سایش و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ترکیبی آلومینیوم از طریق فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بررسی شده است تا اثر ذرات تقویت‌کننده نظیر کاربید سیلیسیم، گرافیت و سرعت چرخش بر روی سایش و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ترکیبی سطحی آلایژ آلومینیوم مشخص شود. نتایج نشان داد که ذرات تقویت‌کننده نظیر کاربید سیلیسیم و گرافیت به‌طور یکنواخت در ناحیه اغتشاشی توزیع می‌شوند و ریز سختی در شرایط بهینه به دلیل حضور و اثر سختی ذرات کاربید سیلیکون افزایش می‌یابد [13]. لایه‌های کامپوزیتی سطحی حاوی ذرات $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$ ، $\text{ZrO}_2\text{-TiB}_2$ و CNT در اندازه‌های نانو با پردازش اغتشاشی اصطکاکی بر روی بسترهای آلایژ آلومینیوم ساخته شدند و نتایج حاکی از آن است که افزایش تعداد پاس‌ها تا چهار مورد منجر به اصلاح مناسب ریزساختار و متعاقب آن بهبود در خواص مکانیکی و سایش می‌شود [14].

در پژوهشی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در ساخت کامپوزیت‌های سطحی هیبریدی آلومینیوم با تعبیه ذرات تقویت‌کننده یعنی اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) یا آلومینا، نیتريد بور (BN) و گرافیت (Gr) با کاربید بور (B_4C) با حجم برابر بررسی شده است. از نظر استحکام و سختی، کامپوزیت‌های سطحی با ترکیبات Al_2O_3 و B_4C خواص مکانیکی بهتری نسبت به سایر ترکیبات داشتند. نتایج مطالعات سایش نشان می‌دهد که سطوح پردازش‌شده اصطکاکی اغتشاشی مقاومت بهتری در برابر سایش در مقایسه با مواد پایه در شرایط لغزش خشک از خود نشان می‌دهند. غلبه سایش ساینده در تمام موارد کامپوزیت‌های سطحی علیرغم وجود ترک‌های ریز و لایه‌لایه شدن روی سطح فرسوده مشاهده شد. تجزیه و تحلیل نتایج تفرق اشعه ایکس 1 نشان می‌دهد که هیچ فاز ثانویه یا بین فلزی در منطقه پردازش‌شده تشکیل نشده است [15]. تأثیر تقویت‌کننده‌های کاربید سیلیسیم و آلومینا و سرعت چرخشی روی سایش و خواص مکانیکی آلایژ آلومینیوم AA6061-T6 بر اساس کامپوزیت‌های ترکیبی سطحی تولیدشده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همه ذرات تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های ترکیب سطحی

¹ X Ray Diffraction, (XRD)

قطعه، تنظیم زمان دقیق برای گرم و خمیری شدن اولیه بدون پیشروی ابزار و تنظیم دقیق زمان بین دو پاس جهت سرد شدن دستگاه از مواردی است که باید قبل از شروع عملیات به‌دقت تعیین شود. در این رابطه مشخصات پارامترهای اعمالی در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی ابزار 1600 دور در دقیقه، سرعت پیشروی ابزار 31 میلی‌متر بر دقیقه، عملیات با تعداد 1، 2 و 4 پاس، قطر پین 3 میلی‌متر، قطر شانه ابزار 5 میلی‌متر و طول پین 18 میلی‌متر، انتخاب گردید درحالی‌که هندسه پین به‌صورت استوانه‌ای شکل و زاویه انحراف ابزار 2.75 درجه طراحی گردید. عمق نفوذ شانه ابزار در قطعه کار هم 0.2 میلی‌متر است.

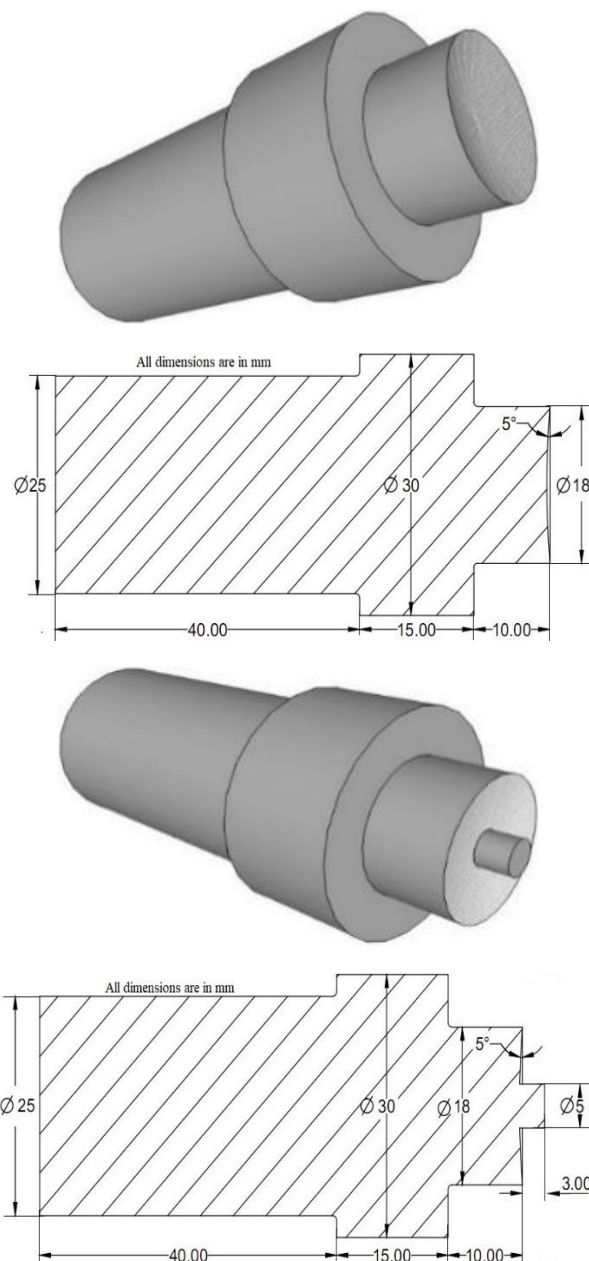


Fig 3 CAD model and map of tool number 1 (top) and tool number 2 (bottom)

شکل 3 نقشه و مدل CAD ابزار شماره 1 (بالا) و ابزار شماره 2 (پایین)

صفحات گرافین است. با رول شدن صفحات گرافین، نانولوله‌های کربنی تشکیل می‌دهند. نانولوله‌های کربنی به دودسته کلی نانولوله‌های کربنی تک دیواره ۱ و نانولوله‌های کربنی چند دیواره تقسیم‌بندی می‌شوند. چنانچه نانولوله کربنی فقط شامل یک لوله از گرافیت باشد، تک دیواره و اگر شامل تعدادی از لوله‌ها با مرکز مشترک باشد چند دیواره نامیده می‌شود. اندازه کوچک، چگالی کم، سختی و استحکام بالا و همچنین خواص الکتریکی عالی از مهم‌ترین خواص آن‌ها محسوب می‌گردد. نانولوله‌های کربنی یکی از مستحکم‌ترین مواد به شمار می‌روند و دارای نسبت استحکام به وزن بالا هستند و این موضوع، دلیل کاربرد آن‌ها را به‌عنوان ماده پرکننده در تولید نانوکامپوزیت‌ها به‌خوبی روشن می‌سازد. پودر دی‌بوراید تیتانیوم مدول کشسانی در حدود 510-575 گیگاپاسکال و سختی 1800 نوپ و نانولوله کربنی مدول کشسانی 300-1000 گیگاپاسکال و استحکام 10-500 گیگاپاسکال داشته و به‌عنوان پر استحکام‌ترین ماده طبیعت شناخته می‌شود [18-19].

ابزارهای بکار رفته در این تحقیق از دو میلگرد خام به قطر 32 میلی‌متر از جنس فولاد گرم کار 1.2344 (فولاد H13 در استاندارد AISI و X40CrMoV5-1 در استاندارد DIN) تهیه شدند. سیلیسیم و کرم در این فولادها برای افزایش مقاومت به اکسیداسیون در دماهای بالا و عناصر وانادیوم و مولیبدن برای حفظ استحکام در شرایط کار گرم را در خوددارند.

قطعات خام اولیه در ابتدا مطابق نقشه‌های شکل 3 تحت عملیات تراشکاری قرار گرفتند. به‌منظور جلوگیری از بالا رفتن ابزار در ابزارگیر در اثر فشار اعمالی، یک پله به قطر 30 میلی‌متر روی هر دو ابزار ایجاد گردید. دنباله ابزار که دارای قطر 25 میلی‌متر می‌باشد دقیقاً متناسب با قطر ابزارگیر ماشین فرز طراحی گردیده و سپس عملیات سنگ‌زنی بر روی هر دو ابزار انجام گردید. درنهایت برای دستیابی به‌سختی مناسب برای عملیات، ابزارهای ساخته‌شده تا حدود سختی 52 ± 2 راکول سی، تحت عملیات حرارتی، آبدهی و بازگشت قرار داده شدند. ابزار شماره 1 دارای شانه (پیشانی) صاف و بدون زائده می‌باشد وظیفه آن بستن رویه شیار وسط نمونه‌ها، بعد از اعمال پودر در داخل شیار می‌باشد و به دلیل آنکه این ابزار باید جریان مواد را با اعمال زاویه کنگی به پشت سرخود هدایت نماید دارای سطحی مقعر با زاویه جزئی به سمت مرکز ابزار می‌باشد. اما ابزار شماره 2 در قسمت پیشانی، دارای یک پین استوانه‌ای شکل به قطر 5 میلی‌متر و ارتفاع 3 میلی‌متر است. ارتفاع 3 میلی‌متر به‌منظور نفوذ پودر به عمق فلز زمینه در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بوده و متناسب با ضخامت 6 میلی‌متری ورق آلومینیوم 5083 انتخاب‌شده است.

در این تحقیق تأثیر تعداد 1، 2 و 4 پاس (گذر یا عبور)، بر روی خواص مکانیکی و تریبولوژیکی در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلایز آلومینیوم 5083 با استفاده از دو نوع ماده تقویت‌کننده TiB_2 و CNT موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور عملیات بر روی هفت نمونه انجام پذیرفت، در ابتدا نمونه شماره 1 که بدون شیار است و بدون این‌که پودری اعمال شود با استفاده از ماشین فرز محور عمودی با یک پاس تحت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفت و سپس انجام عملیات بر روی شش نمونه دیگر با تعداد 1، 2 و 4 پاس برای پودر تقویت‌کننده TiB_2 و با همین تعداد پاس برای تقویت‌کننده CNT انجام پذیرفت.

بستن قطعه بر روی ماشین، قرار دادن پودرها در شیار قطعه، ساعت کردن افقی قطعه، تنظیم ابزار در وسط قطعه در محل شیار، تنظیم زاویه کنگی محور ماشین فرز، تنظیم سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار، مماس کردن ابزار به

¹ Single Wall Carbon Nano Tubes, (SWCNT)

پیشروی و دورانی ابزار، میزان حرارت ورودی به ماده کنترل شده و از سیلان ماده پایه به صورت پلیسه جلوگیری می‌گردد. از سوی دیگر با کاهش میزان نفوذ ابزار در قطعه، اصطکاک که لازمه ایجاد حرارت است به شدت کاهش می‌یابد و در اثر کم شدن حرارت تولیدی، ماده پایه سیلان لازم را پیدا نمی‌کند و احتمال به وجود آمدن عیوب ساختاری از جمله حفرات، افزایش می‌یابد. در این موارد نیروهای وارده به ابزار و دستگاه فرز مورد استفاده در انجام عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به شدت افزایش می‌یابد.

پس از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، عملیات برش، مانت، سنباده‌زنی، پولیش و نمدمالی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. سپس از نمونه‌های آماده شده توسط میکروسکپ نوری تصویربرداری شده تا نحوه توزیع پودر در ناحیه اغتشاشی مورد بررسی قرار گیرد. در این آزمایش، پس از انجام حکاکی (اچ کردن) علاوه بر توزیع ذرات، ریزساختار و دانه‌بندی آلایژ نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش سختی به روش ویکرز و با استفاده از دستگاه خودکار سختی‌سنج میکرو بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. اعمال نیرو به مقدار 100 گرم و با حرکت میز صلیبی صورت گرفت. در این آزمایش جانمایی محل سختی و اندازه‌گیری قطر اثر، با دقت یک میکرون قابل‌دستیابی است. دستگاه سایش‌سنج، از نوع پین روی دیسک ساینده با سختی 50 راکول سی و با اعمال تنش 100 کیلوپاسکال بر روی پین با مقطع 2.25 سانتیمتر مربع بوده و سرعت خطی 10 متر بر دقیقه برای مسافت 3000 متر برای هر نمونه به طور جداگانه با استاندارد ASTM G99 انجام شد تا رفتار سایشی سطوح نانو کامپوزیت‌های ایجاد شده مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند.

3- بحث و تحلیل نتایج

بازرسی چشمی پس از پایان فرآیند اصطکاکی اغتشاشی جهت بررسی ظاهری نمونه‌ها صورت گرفت و در نمونه‌های بدون پودر با یک پاس و همچنین در نمونه‌های با پودر، با یک و دو چهار پاس، تفاوت ظاهری یا عیوب در ناحیه اغتشاشی مشاهده نگردید.

1-3- بررسی‌های متالوگرافی

ریزساختار ورق آلایژ آلومینیوم 5083 قبل از اعمال عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل اعمال روش تولید با فرآیند نوردکاری دارای دانه‌بندی خشن و کشیده شده می‌باشد. بررسی ریزساختاری نشان می‌دهد که شیار ایجاد شده بر روی سطح ورق بعد از اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به طور کامل از بین رفته است. همچنین ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی در ناحیه اغتشاش یافته به گونه‌ای پراکنده شده‌اند که در اثر اختلاط، اثری از تجمع یا توده‌ای شدن پودرها، بخصوص در نمونه‌هایی با چهار پاس باقی نمانده است.

در شکل 5-الف که قطعه تولیدی با چهار پاس همراه با پودر دی‌بوراید-تیتانیوم می‌باشد نقاط سیاه‌رنگ نشانگر عیب حفره تونلی و نقاط سفیدرنگ نشان‌دهنده ذرات دی‌بوراید-تیتانیوم می‌باشد. شکل 5-ب که قطعه تولیدی با چهار پاس همراه با پودر نانولوله را نشان می‌دهد. نقاط سیاه‌رنگ در اینجا نیز نشان‌دهنده عیب حفره تونلی بوده و تارهای مویی شکل که به صورت تقریباً محو در زمینه توزیع شده‌اند، رشته‌های نانولوله کربنی می‌باشند.

با مشاهده تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در هر دو نوع پودر، اندازه و نحوه توزیع نانوذرات در داخل فلز پایه قابل مشاهده است. در مورد آلایژهای آلومینیوم به طور معمول دو ناحیه ریزساختاری عمده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل ناحیه هم‌خورده یا اغتشاشی و ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکال، قابل تمایز است. در صورت وجود ذرات تقویت‌کننده، کامپوزیت سطحی در ناحیه اغتشاشی تشکیل گشته و سبب ریزدانه شدن و بهبود جهت‌گیری دانه‌ها از نظر هم محور بودن نیز می‌شود. در میکروسکوپ الکترونی

به دلیل آنکه ماده واقع شده در زیر ابزار در اثر اصطکاک و گرما حالت خمیری پیدا می‌نماید جهت هدایت این ماده خمیری به سمت پشت ابزار و انجام عمل فورجینگ، لازم است به کنگی ماشین فرز زاویه‌ای در حدود 2.75 درجه در جهت خلاف پیشروی ابزار داده شود. ابزار شماره 1 فاقد پین بر روی پیشانی خود بوده وظیفه بستن رویه شیار به عمق 3 میلی‌متر و محبوس نمودن پودرها را به عهده دارد. بعد از عمل بسته شدن شیار به وسیله ابزار شماره 1، ابزار شماره 2 در ابزار گیر نصب می‌شود و آماده مراحل بعدی می‌گردد. زمان لازم برای گرم و خمیری شدن بدون پیشروی ابزار در حدود 5 دقیقه است که تغییر رنگ ابزار و بالا رفتن دما در آن به خوبی محسوس است. در نمونه‌های دو چهار پاس به همراه دو نوع ماده تقویتی در پایان پاس اول، ابزار به نقطه مبدأ انتقال یافته و با تکرار عملیات در حالی که قطعه همچنان گرم است، پاس دوم و پاس‌های بعدی اجرا می‌گردد. در انتهای حرکت ابزار در طول نمونه، ابزار با توقف پیشروی، به طور عمودی از محل عملیات خارج می‌شود. شکل 4 فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به وسیله ابزار شماره 1 و 2 را نشان می‌دهد.



Fig 4 (a) Covering the groove using tool number one and (b) performing the process with multiple passes using tool number two.

شکل 4 (الف) پوشاندن شیار به وسیله ابزار شماره یک و (ب) اجرای فرآیند با پاس - های متعدد به وسیله ابزار شماره دو.

بدیهی است که در حین فرآیند، بازدید و کنترل چشمی، جهت کنترل عدم بروز نقص در ظاهر نمونه به طور کامل وجود داشته و پس از اطمینان از صحت عمل در پاس اول، نسبت به اجرای پاس دوم اقدام گردیده است. در انتهای حرکت ابزار و در پایان اختلاط فلز پایه و ماده تقویت‌کننده، یک حفره که همان اثر نوک پین ابزار است در محل خروج ابزار تشکیل می‌گردد. این حفره مهم‌ترین عیب ظاهری فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بوده و با افزودن طول قطعات و با انجام عمل برش، این عیب را می‌توان حذف نمود. در حین اجرای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی نمونه‌ها، مقداری از ماده پایه عمدتاً در طرف پیشرو حرکت ابزار به دلیل افزایش میزان عمق نفوذ و همچنین حرارت ورودی ابزار، منجر به تشکیل پلیسه‌های نازک می‌گردد. با کنترل عمق نفوذ، سرعت

ذرات تقویت کننده TiB_2 و MWCNT با افزایش تعداد پاس های ابزار بهبود یافته و در چهار پاس، توزیع تجمعی ذرات به وضوح کاهش داشته است. همان گونه که پیش بینی می شد افزودن ذرات TiB_2 و MWCNT باعث متوقف شدن مهاجرت مرزدانه ها و جلوگیری از رشد دانه های تبلور مجدد یافته شده و همچنین با ایجاد مراکز جوانه زنی در ساختار و باعث شکستن دانه های بزرگ تر به اندازه های کوچک تر از طریق ایجاد دانه های جدید دینامیکی پیوسته گردیده است [7].

2-3- بررسی سختی

سختی در نقاطی با فاصله قرینه از مرکز خط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بررسی گردیده و پروفیل سختی، برای نمونه های حاوی پودرهای TiB_2 و MWCNT رسم شد. در نمونه های حاوی پودر دی بوراید تیتانیوم و نانولوله، در شش نقطه اول سنجش سختی در دو طرف خط مرکز با فاصله 200 میکرومتر از سطح صورت پذیرفته است و پس از آن فواصل سنجش به 400 میکرومتر افزایش یافته است. نمودارهای شکل های 6 و 7 میزان سختی در مقطع عرضی نمونه فرآوری شده حاوی دو نوع ماده تقویت کننده با چهار پاس را نشان می دهد. در حالی که حوزه بررسی در این تحقیق تنها محدود به منطقه اغتشاشی می باشد تفسیر نمودارهای سختی می تواند ارزیابی درستی از چگونگی تغییرات خواص مکانیکی در نواحی مختلف از جمله منطقه اغتشاش یافته را ارائه نماید. به وسیله کنترل عمق نفوذ ابزار در ناحیه اغتشاشی می توان با اندازه گیری سختی در سطح، برآوردی از چگونگی توزیع ذرات تقویت کننده و اندازه دانه های حاصل در پایان فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به دست آورد. با توجه به این که آلیاژ مورد استفاده Al5083-H112 از سری 5000 بوده و قابلیت عملیات حرارتی را ندارد پس از طریق رسوب سختی نمی توان سختی و استحکام آن را افزایش داد و تنها از طریق کاهش اندازه دانه ها، کارسرد و از طریق بهبود نحوه قرارگیری دانه ها با ایجاد دانه های هم محور دست یابی به این هدف امکان پذیر است.

به علت وجود عناصر آلیاژی ممکن است مکانیزم ترمیمی بخصوصی در این آلیاژ 5083 در طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی رخ دهد. آلومینیوم دارای انرژی نقص در چیده شدن صفحات اتمی بزرگی است که تبلور مجدد دینامیکی پیوسته و ایجاد ریزدانه ها بدون جوانه زایی و رشد را در این آلیاژ محتمل تر می سازد. اثر دیگر عناصر آلیاژی این است که مقدار و توزیع آن ها می تواند حرکت مرزدانه ها را محدود نموده و مانع رشد دانه ها گردد که این به اثر زرنر 2 مشهور است. زمانی که توزیع همگن عناصر آلیاژی و فازهای ثانویه صورت می گیرد بازایی دینامیکی و تبلور مجدد دینامیکی غیر پیوسته نیز محدود می شود و این پدیده احتمال وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته را در ناحیه اغتشاشی با افزایش پاس، افزایش می دهد بنابراین دانه های هم محور در این آلیاژ با حرکت مرزهای فرعی و تبدیل هر دانه به چند دانه کوچک تر به دست می آید ولی وجود عناصر آلیاژی می تواند باعث کاهش انرژی نقص در چیده شدن صفحات اتمی آلومینیوم و فعال شدن ایجاد دانه های جدید از طریق غیر پیوسته و با روش جوانه زنی و رشد گردد. [17].

با توجه به شکل 6 و 7 که سختی را برحسب فاصله از مرکز منطقه اغتشاشی نشان می دهد و مقایسه سختی نمونه با یک پاس و بدون پودر با نمونه اولیه مشاهده می شود که سختی متوسط در اثر فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی فقط در حدود 1.5 ویکرز به سختی متوسط آلیاژ افزوده است در حالیکه با استفاده از پودر نانولوله و 1 پاس در این عملیات منجر به افزایش سختی حدود 3.5 درصد گردید. با اعمال ذرات تقویت کننده TiB_2 در 2 و 4 پاس عملیات،

رویشی و استفاده از آشکارساز الکترون برگشتی¹، اجزاء دارای میانگین عدد اتمی بالاتر، روشن تر دیده می شوند (نانوذرات) و نقاط دارای عدد اتمی پایین تر، تیره تر دیده می شوند. در تصاویر، پراکندگی ذرات TiB_2 به صورت رنگ روشن در زمینه آلیاژ پایه آلومینیوم 5083 به خوبی مشاهده می گردد.

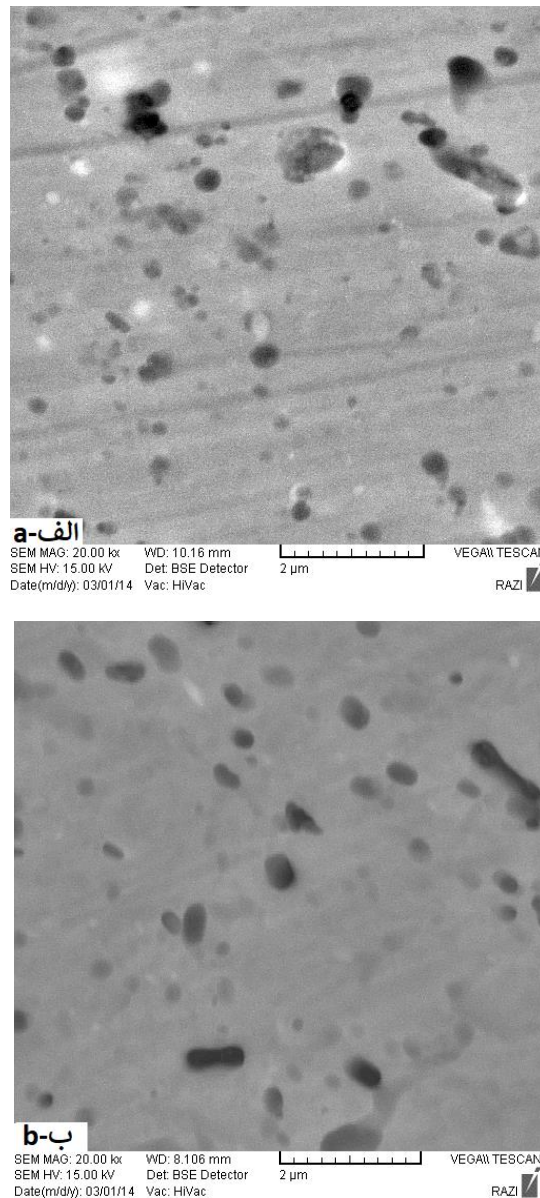


Fig 5 SEM image using backscattered electron of samples with four passes, (A) sample containing TiB_2 powder and (B) sample containing MWCNT powder.

شکل 5 تصویر SEM با استفاده از الکترون برگشتی از نمونه های با چهار پاس، (الف) نمونه حاوی پودر TiB_2 و (ب) نمونه حاوی پودر MWCNT.

نحوه توزیع ذرات در تصاویر گویای این مطلب است که پس از اعمال چهار پاس توسط ابزار، هر دو نوع ماده تقویت کننده با آلیاژ پایه دارای لایه مرزی مشخص بوده و از توزیع همگنی در زمینه فلزی برخوردار می باشند. نحوه توزیع

¹ Electron Back Scatter Diffraction, (EBSD)

² Zener effect

غیریکنواختی بین سمت راست و چپ وسط کم شده و با کاملاً از بین برو و در نهایت یک پروفیل سختی یکنواختی را در سه منطقه به وجود آورد. ترکیب عوامل مختلف در هر نقطه از منطقه اغتشاشی از جمله درجه حرارت، مقدار تغییر شکل مکانیکی، مقدار پودر در آن نقطه، میزان واکنش پودر با زمینه و نوع مکانیزم‌های تولید دانه‌های جدید اعم از پیوسته، غیر پیوسته یا هندسی می‌تواند بر میزان سختی نهایی مؤثر باشد. این آزمایش به‌خوبی اثر ذرات تقویت‌کننده و تعداد پاس و اثر میزان توزیع ذرات بر سختی و در نتیجه بر میزان ایجاد دانه‌های جدید و رشد دانه‌ها و اثر غیریکنواختی تغییر شکل در سمت پیشرو پس‌رو بر توزیع پودر را نشان می‌دهد.

افزودن نانوذرات، با جلوگیری از رشد دانه در ناحیه اغتشاش یافته، توزیع سختی نمونه‌های تولیدی را بهبود می‌بخشد. این پدیده بخصوص در نمونه‌های با چهار پاس با بالا رفتن عدد سختی نمونه‌ها مشخص است. یعنی افزوده شدن TiB_2 و MWCNT در ناحیه اغتشاش یافته، باعث می‌گردد که اثر افت سختی ناشی از کاهش نایجایی‌ها را از بین ببرد. پیش‌بینی می‌شود با کاهش حرارت تولیدی در واحد طول از طریق کاهش سرعت دورانی تا حدود 1200 دور بر دقیقه و افزایش سرعت خطی تا 50 میلی‌متر بر دقیقه و همچنین افزایش سرعت سرد شدن از طریق رعایت فواصل زمانی به‌منظور خنک شدن کامل نمونه‌ها و سریع خنک کردن نمونه‌ها و افزایش تعداد پاس بتوان به عده‌های سختی بالاتری نیز دست پیدا نمود.

با مقایسه دو نمودار سختی نمونه‌های حاصل شده با پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی با یکدیگر این استنباط وجود دارد که در شرایط یکسان، سختی در نمونه‌های انجام‌شده با پودر دی‌بوراید تیتانیوم در همه نقاط، کمتر از نمونه‌های حاوی نانولوله باشد. دلیل این اختلاف در سختی، توزیع بهتر ذرات پودر نانولوله کربنی در زمینه و همچنین سختی ذاتی بالاتر ذرات نانولوله کربنی می‌باشد. این تفاوت سختی در هر نقطه با افزایش تعداد پاس بیشتر می‌شود.

2-3- رفتار سایشی

هدف از ایجاد کامپوزیت سطحی با دو نوع پودر نانوی مورد استفاده، ارتقاء خواص تریبولوژیکی آلایز پایه و در نهایت مقایسه چگونگی تأثیر دو نوع ماده تقویت‌کننده مورد استفاده در فرآیند بر رفتار سایشی کامپوزیت تولیدشده می‌باشد. مطابق آزمون انجام‌شده، از طریق محاسبه و رسم نمودار کاهش وزن نمونه اولیه نسبت به مسافت طی شده و مقایسه ضریب اصطکاک نسبت به زمان سایش می‌توان به بررسی خواص سایشی نمونه‌های تولیدشده پرداخت. شکل 8 و 9 افزایش سایش در نمونه خام و نمونه فاقد ذرات تقویت‌کننده همراه با نمونه‌های حاوی پودر دی‌بوراید تیتانیوم با 2 و 4 پاس و شکل 10 و 11 نیز نمودارهای کاهش وزن و نرخ سایش را در حالت استفاده از پودر نانولوله کربنی در 1 و 2 و 4 پاس نشان می‌دهد. این تصاویر بیانگر تغییرات سطحی یا توپوگرافیکی سطوح در معرض سایش بوده و اثر بازدارنده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و پودر و تعداد پاس را بر نرخ سایش نشان می‌دهد. کاهش نرخ سایشی در قطعات می‌تواند در نتیجه اثر وجود ذرات نانولوله و ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و ریز شدن دانه‌ها باشد.

نتیجه آزمایش سایش در دو نمونه خام و نمونه بدون پودر تقویت‌کننده با یک پاس بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشد. قطعه خام به دلیل ساختار درشت حاصل از روش تولید در مقایسه با قطعه تک پاس بدون پودر که تحت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، ریزدانه‌تر شده است دارای ضریب اصطکاک بالاتری می‌باشد. به دلیل سختی لایه‌های کامپوزیتی حاصل‌شده، نمونه‌های با چهار پاس و پودر تقویت‌کننده دارای کمترین نرخ سایش است. درحالی‌که نمونه‌هایی با دو پاس، یک پاس و پودر تقویت‌کننده و نمونه بدون پودر تقویت‌کننده با یک

سختی متوسط 8.36 و 11.8 درصد نسبت به فلز پایه افزایش می‌یابد در حالیکه با استفاده از نانولوله کربنی این افزایش سختی در 2 و 4 پاس برابر 8.71 و 18.8 درصد نسبت به فلز پایه می‌باشد. با مقایسه بین دو نوع ماده تقویت‌کننده، مشاهده می‌شود که در 2 پاس تفاوت معنی‌داری بین سختی متوسط دیده نمی‌شود اما افزایش پاس به 4 باعث ایجاد تفاوت حدود 6.5 درصدی در سختی متوسط می‌گردد. به‌طور کلی رفتار سختی در منطقه اغتشاشی را می‌توان به سه منطقه میانی-سمت راست یا منطقه پس‌رو- منطقه سمت چپ یا پیشرو تقسیم کرد. در منطقه وسط با عرض 1 میلی‌متر (1000 میکرومتر)، شیار اولیه ایجادشده برای واردکردن پودر را نشان داده و یک پیک در وسط داشته و در لبه‌ها حداقل سختی وجود دارد و در دو طرف راست و چپ نیز با دور شدن از مرکز فرایند اغتشاشی سختی‌ها حالت افزایشی داشته و در انتهای منطقه اغتشاشی به حداکثر خود می‌رسند.

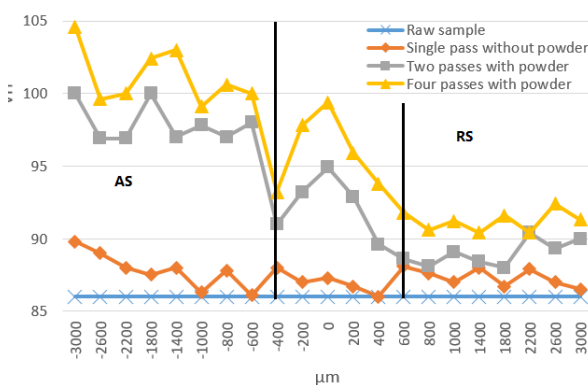


Fig 6 Vickers hardness diagram of samples containing TiB_2 powder

شکل 6 نمودار سختی ویکرز نمونه‌های حاوی پودر TiB_2

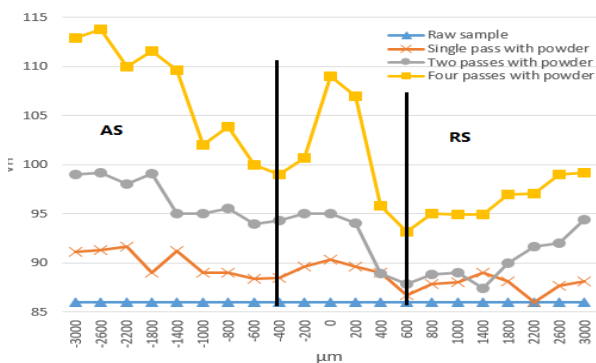


Fig 7 Vickers hardness diagram of samples containing MWCNT nano powder

شکل 7 نمودار سختی ویکرز نمونه‌های حاوی پودر نانویی MWCNT

با افزایش پاس در تمام مناطق، منحنی‌های سختی به سمت مقادیر بزرگ‌تر انتقال یافته و تفاوت سختی‌ها واضح‌تر می‌شود. افزایش پاس، باعث انتقال ذرات از منطقه وسطی بیشتر به منطقه پیشرو پس‌رو گردیده و بر ایجاد دانه‌های ریز و سخت‌تر شدن ساختار اثر می‌گذارد. بنابراین به نظر می‌رسد تعداد 4 پاس و همچنین میزان نیروی عمودی اعمالی در فرایند برای توزیع کامل مواد تقویت‌کننده و سیلان کامل مواد کافی نبوده و به همین دلیل رفتار سختی در دو طرف منطقه مرکزی یکسان نیست. حرکت ترجیحی مواد در سمت پیشرو باعث انتقال بیشتر پودر در سمت چپ و سختی بیشتر شده است. انتظار می‌رود که در صورت اعمال فشار عمودی بیشتر یا افزایش پاس این

پاس به ترتیب در مراحل بعدی قرار دارند، قطعه خام دارای بیشترین نرخ سایش می‌باشد. در نمودار شکل‌های 8 و 10 روند افزایشی کاهش وزن متناسب مستقیمی با ضریب اصطکاک و مقدار سختی نمونه‌ها دارد. تغییرات کاهش وزن در نمونه خام تا نمونه چهار پاس، حاصل ریزش دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی و همگن شدن توزیع ذرات سخت‌کننده نانویی در داخل زمینه می‌باشد. خواص ضد سایشی مربوط به ذرات نانولوله نیز تأثیر مستقیمی بر روی کاهش وزن نمونه در اثر سایش در قطعات دارای پاس‌ها یا گذر بالاتر دارد. می‌توان نتیجه گرفت که با اجرای پاس‌های بالاتر، مهم‌ترین مشکل استفاده از ماده تقویت-کننده نانویی که همان غلبه بر نیروهای تجمع و پیوستگی و اندروالسی آن‌ها است می‌تواند مرتفع شده و تجزیه و توزیع همگن ذرات زمخت و خشن و پراکنده کردن این ذرات در ماتریس شبکه ماده پایه، منجر به کم شدن کاهش وزن ناشی از سایش در نمونه‌های دارای پاس بالاتر در طی آزمون سایش گردد. با مقایسه دو نمودار سایش در نمونه‌هایی با پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی با یکدیگر به این نتیجه می‌توان دست یافت که میانگین نرخ سایش در نمونه دارای پودر دی‌بوراید تیتانیوم در همه نقاط دارای عدد میانگین بالاتری نسبت به نمونه دارای نانولوله می‌باشد. دلیل این رفتار، توزیع بهتر ذرات پودر نانولوله در ساختار کامپوزیت زمینه و همچنین وابستگی مقاومت سایشی به مقدار سختی، ضریب اصطکاک و سختی ذاتی بسیار بالای ذرات نانولوله کربنی نسبت به ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و احتمالاً واکنش متفاوت سطحی این ذرات با زمینه آلومینیومی می‌باشد. در هر دو حالت استفاده از پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله با افزایش مسافت، نرخ سایش به مقدار نسبتاً ثابتی رسیده و فاصله نرخ سایش نمونه‌ها هم کمتر می‌شود. در نمونه‌های با 4 پاس تغییرات خاصی در نرخ سایش با افزایش مسافت وجود ندارد، زیرا شرایط سطح تغییر نمی‌کند و ذرات تقویت‌کننده به‌طور موثری در عمق سطح نفوذ کرده و به‌صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. در نمونه بدون پودر و یک پاس و نمونه خام این تغییرات وزن با مسافت چشمگیر است. آثار ضعیف یک پاس فرایند اصطکاکی-اغتشاشی نیز آنقدر قوی نبوده تا باعث افزایش سختی قابل توجه شود و جلوی سایش را بگیرد. با افزایش مسافت مقدار سایش در نمونه خام و یک پاس بدون پودر مثل بقیه نمونه‌ها نیز به محدوده تقریباً ثابتی می‌رسد که می‌تواند ناشی از وجود یک‌نوع تعادل بین جسم ساینده و جسم در حال سایش باشد. پدیده کارسختی در اثر کار مکانیکی و جدا شدن ذرات از دیسک ساینده و افزایش گرما در جسم تحت سایش می‌تواند شرایط سایشی را به حالت تعادلی برساند. میزان کاهش وزن کل در نمونه‌ها پس از 3000 متر مسافت می‌تواند معیار خوبی برای قایسه مقاومت سایشی نمونه‌ها باشد. با توجه به اینکه با افزایش مقاومت سایشی میزان کاهش وزن کمتر می‌شود می‌توان با تقسیم میزان کاهش وزن نمونه اولیه بر کاهش وزن بقیه نمونه‌ها به اعدادی برای مقایسه تمامی نمونه‌ها رسید. با توجه به این فرض با انجام فرایند اصطکاکی 1 پاسه بدون مواد تقویت‌کننده، کاهش وزن از 98.4 در نمونه اولیه به 82.7 میلی گرم می‌رسد بنابراین مقاومت سایشی عملاً نسبت به فلز اولیه 1.19 برابر شده است. بر این اساس مقاومت نمونه‌های حاوی TiB_2 با 2 و 4 پاس نسبت به نمونه اولیه به ترتیب 1.52 و 2.46 برابر شده است. این مقاومت در نمونه‌های حاوی پودر نانولوله و 1 و 2 و 4 پاس نیز نسبت به نمونه اولیه به ترتیب 1.35 و 1.91 و 3.58 برابر شده است. با توجه به اعداد ذکرشده مشخص است که استفاده از ذرات تقویت‌کننده و افزایش پاس تا چه حد می‌تواند بر مقاومت سایشی آلایژها مؤثر باشد همچنین اثر نوع ذرات تقویت‌کننده بر مقاومت سایشی را در تعداد پاس ثابت می‌توان باهم مقایسه کرد. با توجه به این مطلب و مقایسه 3.58 با 2.46 نشان می‌دهد که در 4 پاس اثر ذرات نانولوله کربنی تقریباً 1.45 برابر

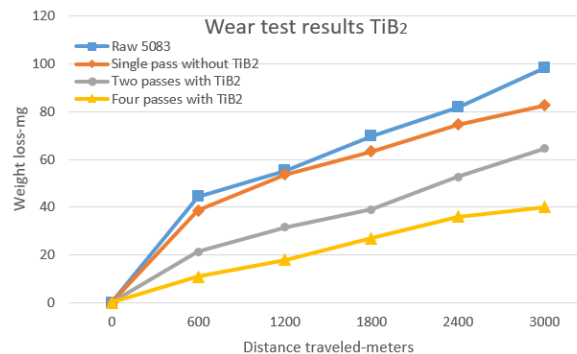
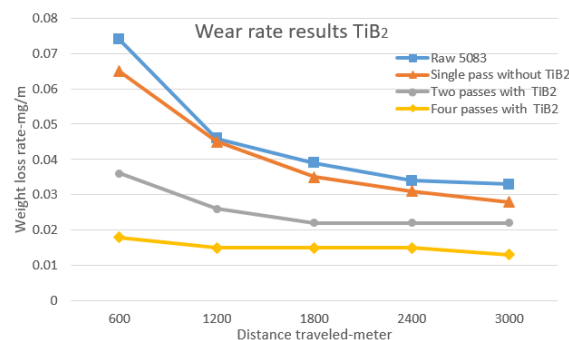
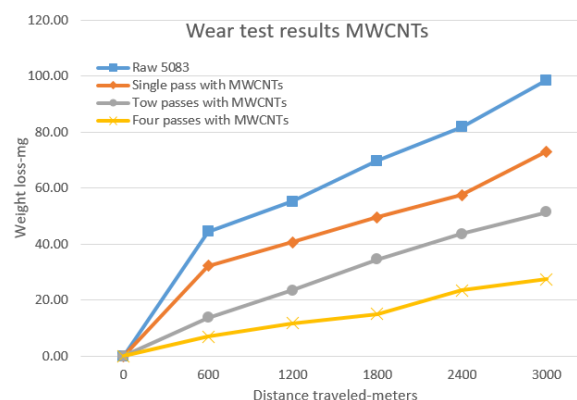
Fig 8 Graph of weight loss of samples containing TiB_2 powderشکل 8 نمودار کاهش وزن نمونه‌های حاوی پودر TiB_2 Fig 9 Graph of wear rate with pin sliding distance in samples containing TiB_2 powderشکل 9 نمودار نرخ سایش با مسافت لغزش پین در نمونه‌های حاوی پودر TiB_2 

Fig 10 Graph of weight loss of samples containing MWCNT powder

شکل 10 نمودار کاهش وزن نمونه‌های حاوی پودر MWCNT

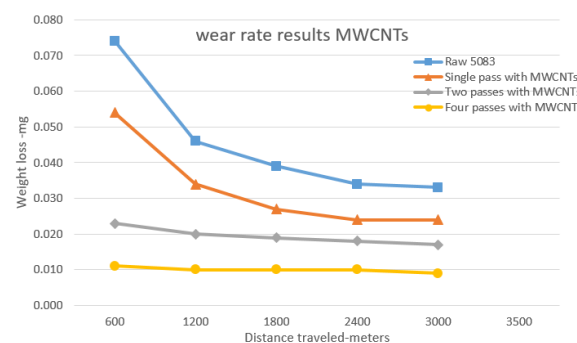


Fig 11 Graph of wear rate with pin sliding distance in samples containing MWCNT powder

شکل 11 نمودار نرخ سایش با مسافت لغزش پین در نمونه‌های حاوی پودر MWCNT

- [3] 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*, No. 3, pp. 100059, 2021.
- [4] Khademi, A.R., and Afsari, A., "Fabrications of surface nanocomposite by friction stir processing to improve mechanical and microstructural properties of low carbon steel," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 70, No.5, pp.1193-1198, 2017.
- [5] Rabiezadeh, A., & Afsari, A., "Effect of nanoparticles addition on dissimilar joining of aluminum alloys by friction stir welding," In Persian, *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, Vol.4, No.2, pp. 23-34, 2019.
- [6] Rabiezadeh, A., Afsari A., Bahmani A., and Sohrabzadeh S., "Effects of friction stir processing on mechanical, tribological and corrosion resistance of low carbon steel." In Persian, Vol.48, No.3, pp.115-124, 2018.
- [7] Rabiezadeh, A., and A. Afsari. "Effect of Strengthening Particles on Microstructure and Tribological Properties of Aluminum Based Nano-composites." In Persian, *Nanomaterials*, Vol. 8, No.25, pp. 1-10, 2016.
- [8] Rabiezadeh, A., Afsari, A., Mohammadi M., "Production and investigation of properties of aluminum surface nanocomposite /carbon nanotube (Al-CNT) produced by friction-stir process," In Persian, *Journal of New Materials*, Vol.3, No.2, pp. 13-23, 2012.
- [9] Izadi, H. and Gerlich, A.P., "Distribution and stability of carbon nanotubes during multi-pass friction stir processing of carbon nanotube/aluminum composites". *Carbon*, Vol. 50, No. 12, pp. 4744-4749. 2012.
- [10] Rajakumar, S., Balasubramanian V., "Establishing relationships between mechanical properties of aluminum alloys and optimized friction stir welding process parameters," *Materials and Design*, No. 40, pp.17-35. 2012.
- [11] Zhang, Q., Xiao, B. L., Wang, Q. Z., & Ma, Z. Y., "In situ Al₃Ti and Al₂O₃ nanoparticles reinforced Al composites produced by friction stir processing in an Al-TiO₂ system." *Materials Letters*, Vol. 65, No.13, pp. 2070-2072, 2011.
- [12] Teo, G. S., Liew, K. W., & Kok, C. K., "A Study on Friction Stir Processing Parameters of Recycled AA 6063/TiO₂ Surface Composites for Better Tribological Performance." *Metals*, Vol. 12, No.6, pp. 973, 2022.
- [13] Devaraju, A., Kumar A., Kotiveerachari B., "Influence of rotational speed and reinforcements on wear and mechanical properties of aluminum hybrid composites via friction stir processing." *Materials and Design*, No.45, pp. 576-585, 2013.
- [14] Rabiezadeh, A., and Afsari, A. "Production of Dispersed Ceramic Nano-Particles in Al Alloy Using Friction Stir Processing." *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol.5, No. 3, pp. 41-57, 2016.
- [15] Sadoun, A., Ibrahim, A., & Abdallah, A. W., "Fabrication and evaluation of tribological properties of Al₂O₃ coated Ag reinforced copper matrix nanocomposite by mechanical alloying." *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 8, No.4, pp. 1228-1238, 2020.
- [16] Devaraju, A., Kumar A., Kumaraswamy A, Kotiveerachari B., "Influence of reinforcements (SiC and Al₂O₃) and rotational speed on wear and mechanical properties of aluminum alloy 6061-T6 based surface hybrid composites produced via friction stir processing." *Materials and Design*, Vol. 51, pp.331-341. 2013.
- [17] Yazdipour, A., and Dehghani, K., "Modeling the microstructural evolution and effect of cooling rate on the Nano-grains formed during the friction stir processing of Al5083." *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 1-2, pp.192-197, 2009.
- [18] Shadler, L. S., "Polymer based and polymer-filled nanocomposites", *Nanocomposites science and technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004
- [19] Pradeep, P. Samuel Ratna Kumar, P. S., Lawrence D., Jayabal S., "Characterization of particulate reinforced aluminum 7075/TiB₂ composites", *Int. J.of civil Eng. And Technology*, Vol. 8, No.9, pp178-190, 2017

قوی‌تر از اثر ذرات TiB₂ در افزایش مقاومت سایشی بوده است. یک تعبیر دیگر از این اعداد می‌تواند این باشد که عمر کاری قطعات در شرایط سایشی با پودر نانولوله کربنی و انجام 4 پاس فرایند می‌تواند تا 3.5 برابر افزایش یابد.

4- نتیجه‌گیری

تولید نانوکامپوزیت‌های سطحی آلایژ آلومینیوم 5083 با پودر دی‌بوراید-تیتانیوم و آلایژ آلومینیوم 5083 با نانولوله با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی با پارامترهای فرایندی ثابت قطر پین و شانه ابزار، زاویه کنگی دستگاه و درنهایت سرعت پیشروی 31 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار 1600 دور بر دقیقه با موفقیت انجام پذیرفت. هندسه انتخاب‌شده ابزار فرایند اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید نانوکامپوزیت‌ها مورد مطالعه در این روش تجربی با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت. درنهایت نتایج زیر حاصل گردید:

- اجرای فرایند اصطکاکی اغتشاشی بدون پودر بر روی آلایژ آلومینیوم 5083، از طریق ریز کردن ساختار و افزایش چگالی نابیایی‌ها موجب افزایش اندازه سختی در ناحیه اغتشاش یافته تا 89.8 ویکرز (4.4 درصد افزایش سختی) گردیده است.
- ترکیب نانو پودرهای دی‌بورایدتیتانیوم و نانولوله در سطح آلایژ آلومینیوم 5083 به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به بهبود ریزساختار از طریق کاهش اندازه دانه و در نتیجه افزایش مقدار سختی در نانوکامپوزیت سطحی حاصل‌شده نسبت به فلز پایه گردیده است.
- اجرای فرایند اصطکاکی اغتشاشی با تعداد پاس‌های بالاتر منجر به حداکثر 32.3 درصد افزایش سختی در نانوکامپوزیت سطحی حاصل از پودر نانولوله کربنی و حداکثر 21.6 درصد افزایش در سختی نمونه حاوی پودر دی‌بورایدتیتانیوم نسبت به فلز پایه گردیده است.
- نمونه‌های حاصل از فرایند اصطکاکی اغتشاشی در نمونه چهار پاس با نانولوله، حداکثر سختی تقریباً 8 درصد و سختی متوسط حدود 6.5 درصد بیش از سختی نمونه حاصل از نمونه چهار پاس با پودر دی‌بورایدتیتانیوم می‌باشد.
- ارزیابی کاهش وزن و نرخ سایش در آزمایش مقاومت به سایش به روش پین بر روی دیسک در نمونه‌های یک، دو چهار پاس ابزار، در کامپوزیت‌های حاصل از نانولوله و دی‌بورایدتیتانیوم نشان داد که افزایش تعداد پاس‌ها در فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث بهبود خواص سایشی نانوکامپوزیت‌های سطحی آلومینیوم 5083 با نانولوله و آلومینیوم 5083 با دی‌بورایدتیتانیوم در مقایسه با آلایژ خام پایه گردید.
- مقایسه رفتار سایشی در نمونه‌های حاصل از پودرهای دی‌بورایدتیتانیوم و نانولوله‌های کربنی نشان داد که وجود این نانو پودرها منجر به بهبود خواص سایشی در مقایسه با نمونه بدون پودر شده است. با اعمال پودر دی‌بوراید-تیتانیوم و نانولوله کربنی، میزان سایش در 4 پاس به ترتیب 61 درصد و 73 درصد نسبت به نمونه خام کاهش پیدا کرده است و نمونه حاوی نانولوله کربنی پس از 4 پاس، مقاومتی سایشی 45 درصد بزرگ‌تر از نمونه حاوی دی‌بوراید تیتانیوم در تعداد پاس مشابه داشته و می‌تواند عمر کاری این قطعات آلومینیومی در معرض سایش را تا 3.5 برابر افزایش دهد.

5- منابع

- [1] Mishra, R. S., and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing." *Materials science and engineering: R: reports*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [2] Węglowski, M. S., "Friction stir processing-State of the art," *Archives of civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18, No.1, pp. 114-129, 2018.



مروری بر چاپ چهاربعدی پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری

عارف انصاری پور¹، محمد حیدری رارانی^{2*}، رسول مهشید³

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 16846-13114، m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/01/24

پذیرش: 1402/02/25

کلیدواژگان

چاپ چهاربعدی، پلیمرهای حافظه شکل، کامپوزیت، محرک، لایه‌نشانی ذوبی

چکیده

با توسعه و گسترش چاپ سه‌بعدی و ارتقاء به چاپ چهاربعدی، این امکان برای سازه‌های چاپ سه‌بعدی معمول فراهم شده است که در طول زمان با اعمال یک یا چند محرک به‌طور هم‌زمان آن‌ها را به ساختاری پویا تبدیل کنند. چاپ چهاربعدی قادر است یک هندسه ساده را به یک هندسه پیچیده تبدیل کند بدون اینکه نیازی به چاپ هندسه پیچیده از ابتدا باشد. همچنین چاپ چهاربعدی هزینه‌های تولید را کاهش، مواد کمتری را هدر و سرعت تولید را افزایش می‌دهد و ویژگی‌هایی مانند خود مونتاژی، خودسازگاری و خود ترمیمی را به ویژگی‌های مرتبط با سازه‌های چاپ سه‌بعدی اضافه می‌کند. در این مطالعه، ابتدا انواع مواد هوشمند و سازوکارهای فعال‌سازی مورد استفاده در چاپ چهاربعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با تمرکز بر پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری، خواص و ویژگی‌های چاپ چهاربعدی تشریح می‌شود. در ادامه انواع روش‌های ساخت افزودنی مورد استفاده در چاپ چهاربعدی پلیمرها شرح داده می‌شود و در یک بخش جداگانه، تأثیر پارامترهای فرآیندی چاپ با استفاده از یک چاپگر FDM بر پاسخ مواد مورد استفاده به محرک اعمال شده مورد بحث قرار می‌گیرد. علاوه بر این، گسترش چاپ چهاربعدی در صنایع مختلف مانند پزشکی، هوافضا، حسگرها، رباتیک و سایر زمینه‌های کاربردی دیگر که چاپ چهاربعدی در آن‌ها وارد شده مورد بحث قرار گرفت و در پایان این پژوهش، چالش‌های موجود و فرصت‌های آتی توضیح داده شده است.

A review of 4D printing of polymers and polymer composites

Aref Ansaripour¹, Mohammad Heidari-Rarani^{1*}, Rasoul Mahshid¹

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

* P.O.B. 16846-13114, Isfahan, Iran, m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir

Keywords

4D printing, Shape memory polymers, Composites, Stimulus, Fused deposition modeling (FDM)

Abstract

With the development and expansion of 3D printing and upgrading to 4D printing, it became possible for static 3D printed structures to turn them into a dynamic structure over time by applying one or more stimuli simultaneously. 4D printing was able to transform a simple geometry into a complex geometry without the need for printing the entire geometry from the beginning. Also, 4D printing reduced production costs, wasted fewer materials, increased production speed, and added features such as self-assembly, self-compatibility, and self-healing to the features related to 3D printed structures. In this study, first, different types of smart materials (such as shape memory polymers, shape memory alloys, hydrogels, etc.) and activation mechanisms (such as water, heat, pH, etc.) used in 4D printing were evaluated. Then, focusing on polymers and polymer composites, the properties and characteristics of 4D printing were described. In the following, the types of 3D printing methods utilized in the 4D printing of polymers were explained, and in a separate section, the effect of the printing process parameters using an FDM printer on the response of the materials used to the applied stimulus is discussed. Furthermore, the expansion of 4D printing in various industries such as medicine, aerospace, sensors, robotics, and other fields of application in which 4D printing entered was discussed and at the end of this study, the existing challenges and future opportunities were profoundly discussed.

1- مقدمه

1-1- تعریف و تاریخچه چاپ سه‌بعدی

چاپ سه‌بعدی یک فناوری مهندسی است که اساس آن قرارگیری لایه‌های پی‌درپی بر روی یکدیگر است [1]. چاپ سه‌بعدی به دلیل سرعت بالا، دقت زیاد و هزینه پایین تولید توجه‌های زیادی را به خود معطوف کرده و به طور

فزاینده‌ای در سراسر دنیا در حال پیشرفت است و در زمینه‌های بسیاری مانند مهندسی پزشکی [2]، هوافضا [3]، خودروسازی [4]، قالب‌سازی [5] و غیره گسترش پیدا کرده است [6-10] نحوه ساخت قطعات با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی به این صورت است که فرایند ساخت با ترسیم یک مدل سه‌بعدی به کمک کامپیوتر (CAD) و با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی شروع می‌شود.

- در یک تعریف ابتدایی، چاپ چهاربعدی به این صورت تعریف شد:
چاپ چهاربعدی = چاپ سه‌بعدی + زمان
که ویژگی یا عملکرد یک ساختار چاپ سه‌بعدی می‌تواند به عنوان تابعی از زمان تغییر یابد [26].
- چاپ چهاربعدی یک روش نمونه‌سازی سریع نسل جدید است که چاپ سه‌بعدی و مواد فعال (هوشمند) را ادغام می‌کند تا معماری‌های چاپی را قادر سازد در طول زمان تغییر شکل دهند [26]. در تعریف بیان شده نسبت به تعریف ابتدایی واژه‌ای تحت عنوان مواد هوشمند یا فعال به تعریف ابتدایی اضافه شده است.
- چاپ چهاربعدی استفاده از مواد هوشمند را امکان‌پذیر می‌کند، این مواد توانایی دارند از روشی از پیش تعیین‌شده در پاسخ به یک محرک خارجی تبدیل شوند؛ که بعد چهارم چاپ چهاربعدی به زمان اشاره دارد [17].

با توجه به تعاریف فوق و تعاریف دیگر در تعریفی جامع می‌توان چاپ چهاربعدی را این‌گونه بیان کرد که چاپ چهاربعدی ترکیبی از چاپ سه‌بعدی با مواد هوشمند [8] یا ترکیبی از ساختارهای چند ماده‌ای است [26] که به روشی از پیش برنامه‌ریزی شده به محرک‌های مختلف و متعدد خارجی می‌توانند پاسخ دهند [17] که به عنوان تابعی از زمان تکامل می‌یابند و رفتار هوشمندانه‌ای را از خود نشان می‌دهند [26].

3-1- مقایسه بین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

در چاپ سه‌بعدی تمرکز اصلی بر روی ساخت سازه‌هایی با یک یا چند ماده که عمدتاً عملکرد استاتیکی دارند است، از این رو کاربردهایی که نیاز به عملکرد دینامیکی دارند چاپ سه‌بعدی نمی‌تواند آن‌ها را برآورده کند [8]. از این رو چاپ چهاربعدی برای برطرف کردن چنین نیازهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل 2 تفاوت بین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی را نشان می‌دهد.

مواد پاسخگو به محرک جزء اصلی چاپ چهاربعدی‌اند که این مواد خود به چندین دسته تقسیم می‌شوند. قابلیت این گروه از مواد با ویژگی‌های همچون خود حسی^۷، تصمیم‌گیری^۸، پاسخگویی^۹، حافظه شکل^{۱۰}، خودسازگاری^{۱۱}، چند کارکردی^{۱۲} و خود تعمیری^{۱۳} تعریف می‌شود [26].

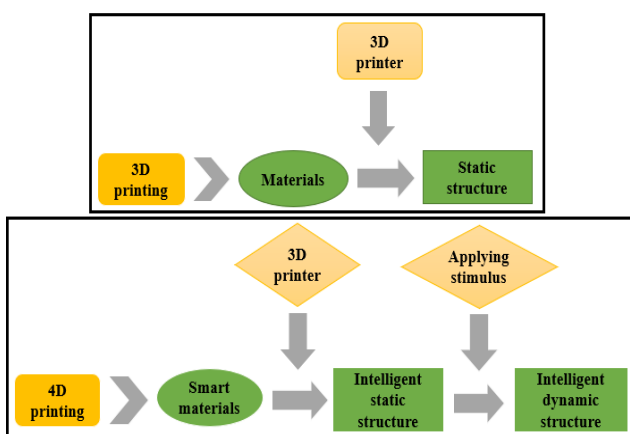


Fig. 2 The difference between 3D and 4D printing

شکل 2 تفاوت بین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

سپس مدل ایجاد شده با پسوند STL به نرم‌افزارهای رابط چاپگرهای سه‌بعدی به عنوان مثال Cura و Simplify3D و غیره داده می‌شود که در آن مدل سه‌بعدی برش داده شده و برخی از پارامترهای چاپ را به مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های چاپ برای چاپگر تبدیل می‌کند که معمولاً G-code را به عنوان خروجی نرم‌افزار ارائه می‌دهند. در نهایت فایل برش داده شده به دستگاه چاپگر سه‌بعدی ارسال می‌شود و چاپگر هر یک از لایه‌ها را بر روی یکدیگر چاپ می‌کند که در نتیجه یک شکل سه‌بعدی در این فرایند ایجاد می‌شود [11-13]. شکل 1 نمای کلی از فرایند چاپ سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

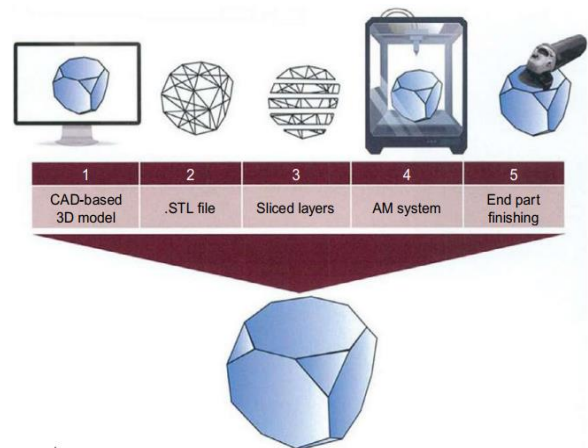


Fig. 1 Overview of the 3D printing process [14]

شکل 1 مروری بر فرایند چاپ سه‌بعدی [14]

پس از معرفی چاپ سه‌بعدی (ساخت افزایشی^۱) توسط چالز هال^۲ در سال 1986 به نام استریولیتوگرافی^۳ (SLA) و با انقضای حق امتیازهای قبلی انگیزه‌های عظیمی برای نوآوری در فناوری‌ها و مواد جدید برای ساخت افزایشی به وجود آمده است [15-18]. ساخت افزایشی دارای روش‌های مختلف چاپی بسیاری است که توانایی چاپ انواع مواد فراهم می‌کنند. به عنوان مثال می‌توان از روش‌های مختلف ساخت افزایشی در چاپ انواع پلیمرها استفاده کرد؛ از روش‌های رایج چاپ سه‌بعدی پلیمرها می‌توان به لایه‌نشانی ذوبی^۴ (FDM) [19]، SLA [20]، تفجوشی لیزری انتخابی^۵ (SLS) [21] نام برد [13]. در بخش 6 بیشتر در مورد روش‌های چاپ سه‌بعدی توضیح داده می‌شود.

2-1- تاریخچه و تعریف چهاربعدی

تاریخچه‌ای ابتدایی چاپ چهاربعدی با پیشرفت و توسعه‌ی فناوری چاپ سه‌بعدی همراه بوده است. تحقیقات در زمینه چاپ چهاربعدی برای اولین بار توسط تیپیتس^۶ در سال 2013 در موسسه فناوری ماساچوست معرفی و آغاز گردید و تاکنون توجهات بی‌سابقه‌ای را به خود جلب کرده که در بسیاری از صنایع همچون پزشکی [22]، هوافضا [23]، رباتیک نرم [24] و حسگرها [25] مورد استفاده قرار گرفته است [8,26].

تعاریف و برداشت‌های گوناگونی از مفهوم چاپ چهاربعدی از ابتدا تاکنون بیان شده است که تعدادی از آن‌ها در ذیل آورده شده است:

⁸ Decision making

⁹ Responsiveness

¹⁰ Shape memory

¹¹ Self-adaptability

¹² Multi-functionality

¹³ Self-repair

¹ Additive manufacturing

² Chuck Hull

³ Stereolithography

⁴ Fused deposition modeling

⁵ Selective laser sintering

⁶ Tibbits

⁷ Self-sensing

2- مواد هوشمند

تعریف مواد هوشمند نیز یک چالش است. در ادبیات تعاریف متعددی برای مواد هوشمند موجود است که گاهی باهم تناقض‌هایی دارند، با اینکه تعاریف موجود تفاوت‌هایی در جزئیات با یکدیگر دارند ولی یک توافق کلی برای تعریف آن در جامعه علمی وجود دارد. مواد هوشمند، مواد یا محصولات مشتق شده‌ای هستند که می‌توانند خواص فیزیکی یا شیمیایی خود را در واکنش به یک محرک خارجی مانند گرما [29]، رطوبت [30]، PH [31]، نور [32] و غیره به‌طور برگشت‌پذیر تغییر دهند [33,34]. به‌طور ساده‌تر مواد هوشمند از نظر ماهیت خاص هستند و هنگامی که تحت معرض محرک‌های خارجی مختلف قرار می‌گیرند، شکل و ویژگی ابعادی متفاوتی پیدا می‌کنند که ممکن است شکل و ویژگی ابعادی آن‌ها چندین بار به‌صورت کنترل شده تغییر یابد [35].

مواد هوشمند شامل دسته‌بندی‌های مختلفی بر اساس پاسخگویی به محرک‌ها، جنس ماده، عامل تحریک‌کننده و کاربردها می‌باشند. در زیر دسته‌بندی‌ای بر اساس انواع مواد هوشمند که توانایی تغییر شکل به انواع محرک‌های مختلف را دارند آورده شده است [34]:

- پلیمرهای حافظه شکل^۱ (SMPs) [36]
- آلیاژهای حافظه شکل^۲ (SMAs) [37]
- پیزوالکتریک‌ها^۳ [38]
- مگنتو استریکتیوها^۴ [39]
- هیبریدهای حافظه شکل^۵ (SMHs) [40]

و غیره.

1-2- پلیمرهای حافظه شکل (SMP)

پلیمرهای حافظه شکل دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که می‌توانند از یک یا چند شکل تعریف شده به شکل دائمی تحت اعمال محرک‌های خارجی همچون حرارت (دما)، رطوبت، آب، PH، نور، میدان مغناطیسی و الکتریکی تبدیل شوند [8,17,41,42]. پلیمرهای حافظه شکل با توجه به ویژگی‌هایی مانند وزن کم، توانایی در تغییر شکل‌های بزرگ، ساخت و برنامه‌ریزی آسان، تخریب‌پذیری و زیست‌سازگاری بالا، آن‌ها را کاندید برای کاربردهای بسیاری کرده است [17,43,44].

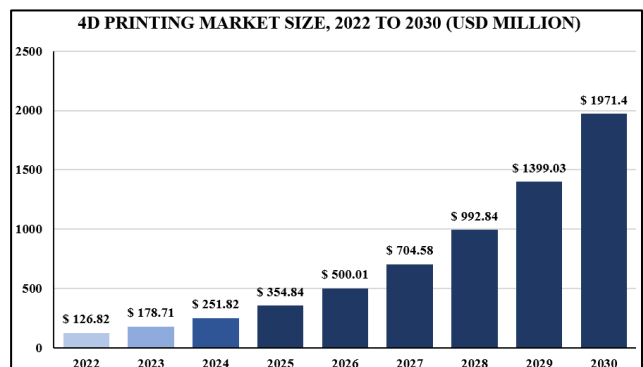
جهت فعال‌سازی پلیمرهای حافظه شکل با استفاده از گرما، شکل دائمی تحت تنش‌های بالای دمای انتقال شیشه‌ای^۶ به دست می‌آید. اگر این تنش اعمال شده هنگامی که پلیمر زیر دمای انتقال شیشه‌ای سرد می‌شود ثابت بماند، پلیمرهای حافظه شکل به‌صورت تغییر شکل یافته باقی می‌ماند تا زمانی که دوباره بالای دمای انتقال شیشه‌ای خود گرم شود [17]. پلیمرهای حافظه شکل چند مرحله‌ای نیز وجود دارند که می‌توانند بیش از دو شکل را به‌خاطر بسپارند که توانسته‌اند عملکرد سازه‌های چاپ شده چهاربعدی را تا حد زیادی بهبود ببخشند. تحریک برای تغییر شکل پلیمرهای حافظه شکل چند مرحله‌ای چاپ شده چهاربعدی معمولاً با گرما دادن مستقیم در دماهای مختلف انجام می‌شود [44].

از رایج‌ترین پلیمرهای حافظه شکل به عنوان مثال می‌توان از پلی‌لاکتیک اسید^۷ (PLA) [45]، (مت)اکریلات^۸ [46]، پلی‌پورتان^۹ [47] و کلرید پلی‌وینیل^{۱۰} [48] نام برد. پلیمرهای حافظه شکل امروزه در کاربردهایی مانند

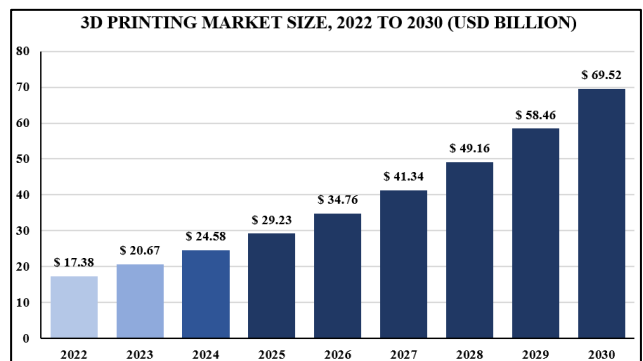
چاپ چهاربعدی توسعه هدفمند ساختار چاپ سه‌بعدی از نظر شکل، ویژگی و عملکرد است که توانایی دستیابی به خودمونتاژی، چند کارکردی و خود تعمیری را داراست و همچنین وابسته به زمان، مستقل از چاپگر، قابلیت پیش‌بینی دارد [26].

1-3-1- مقایسه بازار جهانی چاپ سه‌بعدی و چاپ چهاربعدی

با گسترش چاپ چهاربعدی طی چند سال اخیر وب‌سایت "precedence research" در یک پیش‌بینی ارزش بازار جهانی این فناوری را از سال 2022 تا 2030 از 126.82 میلیون دلار آمریکا به 1971.4 میلیون دلار تخمین زده است. که در شکل 3-الف روند پیش‌بینی توسعه بازار این فناوری قابل مشاهده است. طی پیش‌بینی دیگر این وب‌سایت در مورد چاپ سه‌بعدی (شکل 3-ب) ارزش بازار این فناوری از 17.38 میلیارد دلار آمریکا در سال 2022 به 69.52 میلیارد دلار در سال 2030 خواهد رسید. از مقایسه این دو نمودار می‌توان دریافت که ارزش بازار چاپ چهاربعدی نسبت به چاپ سه‌بعدی در سال 2022 از 0.73 درصد به 2.84 درصد در سال 2030 افزایش خواهد یافت که رشد 289.04 درصدی را نشان می‌دهد. این افزایش نشان دهنده رشد و توجه به این فناوری طی سالیان آتی خواهد بود.



الف-ا



ب-ب

Fig. 3 Global market size forecast for a) 4D printing and b) 3D printing [27,28]

شکل 3 پیش‌بینی اندازه بازار جهانی برای الف) چاپ چهاربعدی و ب) چاپ سه‌بعدی [27,28]

¹ Shape memory polymers

² Shape memory alloys

³ Piezoelectrics

⁴ Magnetostrictives

⁵ Shape memory hybrids

⁶ Glass transition temperature

⁷ Polylactic acid

⁸ (Meth)acrylate

⁹ Polyurethane

¹⁰ Polyvinyl chloride

چگالی و هزینه پایین، ساخت و برنامه‌ریزی آسان، زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری بالاتر می‌باشند. یکی از نقطه‌ضعف‌های آلیاژهای حافظه شکل این است که در طی هر چرخه تبدیل فاز نایجایی‌ها و نقص‌هایی ریزساختاری در آن‌ها ایجاد می‌شود [17,43].

3- سازوکارهای فعال‌سازی

موادی که در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند به طور کلی مواد هوشمند هستند که می‌توانند در طی زمان در پاسخ به یک یا چند محرک خارجی ویژگی‌ها و عملکرد خود را تغییر دهند. سازوکارهای مختلفی برای فعال‌سازی مواد هوشمند وجود دارد که یک ساختار چاپ شده چهاربعدی می‌تواند عملکرد خود را بر اساس آن‌ها نشان دهد [8,26]. برخی از این سازوکارها در ادامه توضیح داده شده‌اند.

3-1- محرک آب یا رطوبت

ساختارهای خود تکاملی ابتدا با استفاده از مواد آب‌دوست شناخته شدند. زمانی که در آب غوطه‌ور می‌شوند انبساط می‌یابند و اشکال و تغییر شکل‌های از پیش برنامه‌ریزی شده‌ای را از خود نشان می‌دهند [62]. برخی از مواد هوشمند به محرک آب یا رطوبت واکنش نشان می‌دهند و اکنون بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. دسته‌ای از مواد پلیمری که توانایی پاسخگویی به محرک آب را دارند هیدروژل‌ها هستند که ساختارهای آب‌دوست آن‌ها را قادر می‌سازد که مقدار زیادی آب را در شبکه‌های سه‌بعدی خود نگه دارند [63]. ساختار هیدروژل‌ها متشکل از شبکه‌های سه‌بعدی از زنجیره‌های پلیمری است که از اتصالات عرضی تشکیل شده‌اند، زمانی که هیدروژل‌ها با رطوبت در تماس باشند تا 200 درصد هم می‌توانند حجم خود را گسترش بدهند. هیدروژل‌ها قابلیت چاپ بالایی دارند و همچنین آن‌ها سازگاری بسیار خوبی با محیط‌زیست را از خود نشان می‌دهند؛ ولی یکی از مشکلات اصلی آن‌ها واکنش معکوس (برگشت) کند آن‌ها است که باید زمان زیادی را صبر کرد تا خشک شوند که برای رفع این مشکل محققین فعالیت‌هایی را انجام داده‌اند [8].

فان⁶ و همکاران [64] مفهوم حافظه شکل هیبریدی پاسخگو به آب را پیشنهاد دادند و مزایای آن‌ها را در قالب دو مثال بیان کردند. رابو⁷ و همکاران [62] یک ساختار خود تکاملی پویا را با دو ماده چاپ کردند، آن‌ها از یک پلیمر آب‌دوست برای افزایش اندازه و همچنین مواد منبسط کننده آب‌دوست برای فعال کردن سازوکار تاشوندگی استفاده کردند. مائو⁸ و همکاران [65] با چاپ سه‌بعدی پلیمر حافظه شکل و هیدروژل که هر دو ماده توانایی پاسخگویی به محرک را دارند، ساختاری سه‌بعدی را چاپ کردند. آن‌ها رویکرد تورم هیدروژل در پاسخگویی به آب را به عنوان نیروی محرک جهت تغییر شکل سازه و تغییرات مدول الاستیک با دما در پلیمر حافظه شکل برای تنظیم زمان تغییر شکل مورد استفاده قرار دادند.

3-2- محرک گرما یا دما

برخی از مواد هوشمند به حرارت یا دما پاسخ می‌دهند، تغییر شکل در این مواد عمدتاً به دو سازوکار اثر تغییر شکل⁹ [66] یا اثر حافظه شکل⁹ [67] مرتبط می‌شود [8].

در تحریک با استفاده از گرما در پلیمرها دو سطح دمایی و یک بار خارجی لازم است. یک دما (مانند دمای انتقال شیشه‌ای یا دمای انتقال ذوب کریستالی) بالاتر از دمای بحرانی و دمای دیگر باید پایین‌تر از دمای بحرانی ماده هوشمند

زیست پزشکی [49]، سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی [50]، صنعت نفت و گاز [51]، هواضا [52]، الکترونیک [53] و ساختارهای خود گشودنی [17] به کار می‌روند.

2-2- آلیاژهای حافظه شکل (SMA)

آلیاژهای حافظه شکل دسته دیگری از مواد هوشمند حافظه شکل‌اند که هم می‌توانند حافظه مکانیکی و هم حرارتی داشته باشند [17]. زمانی که در معرض محرک‌های خاصی همچون گرمایی-مکانیکی قرار می‌گیرند تغییر شکل می‌دهند و پس از حذف محرک شکل ابتدایی قبل از تغییر شکل خود را بازیابی می‌کنند. آن‌ها توانایی به خاطر سپردن یک شکل خاص را حتی پس از تغییر شکل شدید در دماهای پایین دارند [54,55]. اثر حافظه شکل نتیجه تبدیل بین دو فاز کریستالی مختلف (آستنیت-مارتنزیت) در آلیاژهای حافظه شکل است. ساختار شبکه‌ای منحصربه‌فرد این مواد منجر به رفتار تغییر شکل می‌شود که بسیار متفاوت با آلیاژهای فلزی معمولی است. این مواد می‌توانند تغییر شکل‌های بزرگی را تحمل و بازیابی کنند و پسماند مکانیکی را در چرخه‌های بارگذاری-تخلیه از خود نشان دهند. علاوه بر این، خواص این آلیاژها نیز به دما بستگی دارد [17,55,56].

یکی از معروف‌ترین آلیاژهای حافظه شکل، آلیاژ نیکل-تیتانیوم است که به نایتینول¹ معروف است [57]. از مهم‌ترین کاربردهای آلیاژهای حافظه شکل می‌توان به استفاده در صنعت خودرو [54]، صنعت هواضا [54]، زیست پزشکی [54]، عمران [58]، اتصالات لوله‌ها [58]، موتورهای حرارتی [58]، میکرو محرک‌ها [58] و غیره اشاره کرد.

3-2- پیژوالکتریک

برخی از مواد توانایی تولید بار الکتریکی بر روی سطوح خود در اثر اعمال تنش مکانیکی را دارند که به این دسته از مواد پیژوالکتریک گفته می‌شود و به اثری که تنش مکانیکی را به بار الکتریکی تبدیل می‌کند اثر مستقیم پیژوالکتریک گفته می‌شود. در این مواد یک اثر معکوس نیز وجود دارد بدین معنا که در اثر اعمال یک میدان الکتریکی این مواد می‌توانند کرنش مکانیکی از خود نشان دهند [59]. از این دو اثر مستقیم و معکوس در این مواد می‌توان در حسگرها و عملگرها بهره برد [60].

4-2- مگنتو استریکتیو

دسته دیگری از مواد هوشمند که توانایی پاسخگو به میدان مغناطیسی و کرنش مکانیکی را دارند مگنتواستریکتیوها هستند. این مواد می‌توانند در اثر اعمال یک میدان مغناطیسی دچار ازدیاد طول شوند که این اثر در این مواد به اثر ژول² معروف است. اثر دیگری که در این مواد وجود دارد اثر ویلاری³ است که در مقابل اثر ژول قرار می‌گیرد. این اثر زمانی ایجاد می‌شود که این مواد دچار کرنش مکانیکی شوند که در این صورت می‌تواند یک میدان مغناطیسی از خود ساطع کنند. یکی از رایج‌ترین مگنتواستریکتیوها ترفنول-دی⁴ است که می‌توان از آن در حسگرها و محرک‌های مغناطیسی از آن استفاده کرد [61].

5-2- مقایسه SMA و SMP

یک نقطه ضعف بالقوه برای پلیمرهای حافظه شکل استحکام کششی و سفتی کم آن‌ها در مقایسه با آلیاژهای حافظه شکل است. با این حال، بسیاری از نانوکامپوزیت‌های حافظه شکل در حال توسعه‌اند تا به بهبود رسانایی، پاسخ الکتریکی و خواص مکانیکی آن‌ها کمک کنند [17]. پلیمرهای حافظه شکل دارای مزایای زیادی نسبت به آلیاژهای حافظه شکل مانند بازیابی کرنش بالا،

⁶ Raviv

⁷ Mao

⁸ Shape change effect

⁹ Shape memory effect

¹ Nitinol

² Joule effect

³ Villari effect

⁴ Terfenol-D

⁵ Fan

3-3- محرک PH

برخی از مواد هوشمند توانایی پاسخ دادن به تغییرات مقدار PH را دارند و با توجه به مقدار PH دچار تغییر شکل و حجم می‌شوند [8,70]. این دسته از مواد معمولاً به دو دسته بر حسب گروه عاملی موجود در آن‌ها تقسیم می‌شوند: پلی‌اسیدها و پلی‌بازها. این مواد دارای گروه عاملی یونیزاسیون‌اند که می‌توانند پروتون‌ها را با تغییر مقدار PH به اشتراک (پذیرش یا اهدا) بگذارند. تغییر در حجم آب‌گریزی مسئله‌ای اساسی است که در این‌گونه از مواد با دافعه الکترواستاتیکی بین بارهای ایجاد شده روی آن‌ها رخ می‌دهد که دلیل آن‌هم فروپاشی یا انبساطی است که در آن‌ها ایجاد می‌شود. مواد پلی‌اسید در طی زمان با تغییر مقدار PH به دلیل آزاد شدن پروتون دچار انبساط می‌شوند ولی پلی‌بازها به دلیل پذیرش پروتون دچار انقباض می‌شوند [8,35].

نادگورنی⁶ و همکاران [71] با اکستروژن کردن ماده پلی (2-وینیل پیریدین)⁷ (P2VP) و اضافه کردن 12 درصد وزنی آکریلونیتریل بوتادین استایرن⁸ (ABS) و رسیدن به فیلامنتی با قابلیت پاسخگویی به PH و چاپ که بتوان آن‌ها با یک چاپگر معمولی سه‌بعدی چاپ کرد را تولید کردند. همچنین قطعات چاپ شده توسط آن‌ها قابلیت برگشت‌پذیری به شکل اولیه بعد از اعمال محرک را از خود نشان داد. وو⁹ و همکاران [72] در مطالعه‌ای یک دستگاه اندازه‌گیری مقدار PH را با استفاده از چاپگر FDM و از جنس فیلامنت‌های ABS و کامپوزیت ABS و پلی (4-وینیل پیریدین)¹⁰ (P4VP) را چاپ کردند. دستگاه چاپ شده توسط آن‌ها پس از غوطه‌ور شدن در محلولی با PH در حدود 5 باعث به وجود آمدن یک دافعه الکترواستاتیکی بین واحدهای پروتونه شده می‌شد که حاصل آن تورم بخش چاپ شده دستگاه از جنس ABS/P4VP بود.

3-4- محرک الکتریکی

دسته‌ای از مواد هوشمند نیز وجود دارند که نسبت به اعمال الکتریسیته از خود واکنش نشان می‌دهد مثلاً با اعمال الکتریسیته دچار تغییر در ابعاد خود می‌شوند. یک نمونه از موادی که در اثر اعمال الکتریسیته دچار کرنش می‌شوند پیژوالکتریک‌ها هستند. همانطور که در بخش 2-3 گفته شد یک وابستگی الکترومکانیکی در پیژوالکتریک‌ها برقرار است؛ که می‌توان از این وابستگی الکترومکانیکی در حسگرها و عملگرها بهره برد. مواد پیژوالکتریک را می‌توان برای کاربردهای چاپ چهاربعدی نیز استفاده کرد، زیرا تحت تأثیر نیروی مکانیکی هم می‌توانند تغییر شکل دهند [8,73].

3-5- محرک مغناطیسی

میدان مغناطیسی یک محرک غیرمستقیم است که توانایی ایجاد تغییر شکل در مواد هوشمند را دارد که می‌توانند در چاپ چهاربعدی مورد استفاده قرار بگیرند، به این دسته مواد پاسخگوی مغناطیسی گفته می‌شود [8]. برگر¹¹ و همکاران [74] نانوذرات اکسید آهن Fe_3O_4 را در لایه‌های هیدروژل متخلخل جاسازی کردند که این ذرات به هیدروژل اجازه می‌دهد تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی از راه دور نسبت به اعمال میدان پاسخگو باشد. یو¹² و همکاران [75] یک نانوکامپوزیت زیست‌تخریب‌پذیر را ارائه کردند که می‌تواند به محرک حرارت و میدان مغناطیسی پاسخ بدهد. نانوکامپوزیت آن‌ها شامل پلی (ε-کاپرولاکتون)¹³ و نانوذرات اکسید آهن بود. ذرات نانو اکسید

باشد. خواص فیزیکی ماده مانند دمای بحرانی یا دمای انتقال شیشه‌ای یا دمای انتقال ذوب کریستالی نقش حیاتی در این تحریک ایفا می‌کنند. ساختار چاپ شده حساس به دما را می‌توان تا دمایی بالاتر از T_g تا T_1 گرم کرد که این گرم کردن می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل و کرنش در ساختار چاپ شده شود. سپس باید ساختار را تا تحت فشار خارجی تا زیر T_g تا T_2 خنک کرد که در این مرحله تنش حرارتی حذف شده و مواد به طور موقتی شکل خواهند گرفت و در نهایت برای رسیدن به شکل اولیه باید در شرایط تنش آزاد تا دمای T_1 گرم شوند. شکل 4 جریان سازوکار حرارتی را برای پلیمرهای حافظه شکل نشان می‌دهد [26,35].

لین¹ و همکاران [68] فیلامنت‌هایی از جنس PLA و PLA ترکیب شده با سوکسینات پلی بوتیلن² (PBS) را ساختند و هندسه‌هایی مانند ستاره دریایی و استنت اندولومینال³ را با آن‌ها چاپ کردند. آن‌ها قطعات چاپ شده را در حمام آب گرم در دمای $20^\circ C + T_g$ حرارت دادند تا به تغییر شکل موقت از پیش برنامه‌ریزی شده‌ای دست یابند. یو⁴ و همکاران [69] تعدادی نمونه از جنس PLA و کامپوزیتی از جنس PLA تقویت شده با الیاف کربن (PLA/CFPLA) را با ضخامت‌های مختلف چاپ کردند، آن‌ها جهت فعال‌سازی قطعات با استفاده از محرک گرما نمونه‌های چاپ شده را در حمام آب $80^\circ C$ قرار دادند تا دچار تغییر شکل شوند و همچنین نتایج آزمایش‌های تجربی خود را نیز با شبیه‌سازی المان محدود نیز مقایسه کردند. وان⁵ و همکاران [44] با استفاده از پلیمرهای حافظه شکل و ذرات اکسید آهن ساختار گلی را طراحی کردند که توانایی پاسخ‌گویی به دو محرک گرما و میدان مغناطیسی را داشت.

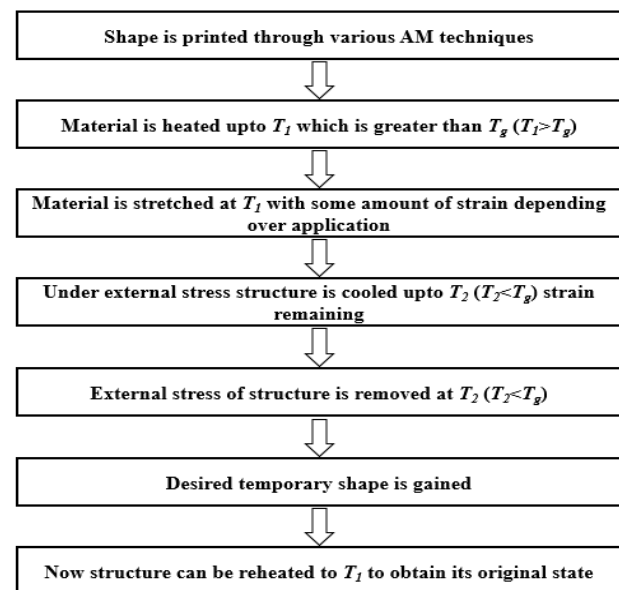


Fig. 4 Classified diagram for the activation of shape memory polymers [35]

شکل 4 نمودار طبقه‌بندی شده برای فعال‌سازی پلیمرهای حافظه شکل [35]

⁸ Acrylonitrile butadiene styrene

⁹ Wu

¹⁰ Poly(4-vinylpyridine)

¹¹ Breger

¹² Yu

¹³ Poly(ε-caprolactone)

¹ Lin

² Polybutylene succinate

³ Endoluminal stent

⁴ Yu

⁵ Wan

⁶ Nadgorny

⁷ Poly(2-vinylpyridine)

تا سه برابر تغییر طول بدهد. زنگ⁶ و همکاران [84] یک رویکرد طراحی و ساخت خود مونتاژ متوالی را ارائه کردند که با فعال‌سازی حرارتی محرک‌های دو لایه تحقق میابد و شبکه‌های دوبعدی را به سه‌بعدی تبدیل می‌کند. آن‌ها یک ساختار جعبه تاشو را به عنوان مثال برای نشان دادن روش مورد استفاده در این تحقیق به کار بردند.

2-4- خودسازگاری

سازه‌های چاپ چهاربعدی توانایی سازگاری با محیط پیرامون خود را دارند. بدین مفهوم که ممکن است یک ساختار چاپ چهاربعدی بسته به شرایط محیطی در پاسخ به یک محرک به سرعت پاسخ بدهد درحالی‌که در محیطی دیگر برای پاسخ‌دهی نیاز به زمان بیشتری داشته باشد که این توانایی در جهت تطبیق‌پذیری را می‌توان خودسازگاری اسم‌گذاری کرد که در طراحی بافت یا دستگاه‌های پزشکی و دستگاه‌های الکترومکانیکی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد [8].

ژائو⁷ و همکاران [85] در مطالعه‌ای که بر روی پلیمرهای حافظه شکل در زمینه زیست پزشکی انجام دادند بیان کردند که این پلیمرها می‌توانند در دستگاه‌های تطبیقی زیست پزشکی بکار روند که باعث کاهش آسیب به بافت‌ها حین کاشتن این دستگاه‌ها می‌شود و بهتر می‌تواند با بافت‌های اطراف محل کاشت مطابقت داشته باشند و اینکه زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری قابل تنظیمی را می‌توانند از خود نشان دهند.

3-4- خودترمیمی

توانایی خودترمیم شونده برای محرک‌های نرم یک توانایی مطلوب است که می‌تواند عمر ساختار را افزایش بدهد و همچون رفتاری مانند بافت‌های طبیعی را تقلید کنند [86]. خودترمیم شونده‌ای از جمله پیشرفت‌های امیدوارکننده‌ای است که می‌تواند در مواد مورد استفاده در نمایشگرها، تلفن‌هایی همراه و ربات‌ها استفاده شود که قابلیت ترمیم شدن در دمای اتاق را داشته باشند [87]. اینورنیزی⁸ و همکاران [86] ماده هوشمند جدیدی را با قابلیت چاپ چهاربعدی که یک پلیمر حافظه شکل با سازوکار فعال‌سازی حرارتی با قابلیت خودترمیم شونده است را توسعه دادند. اشیاء چاپ شده با این پلیمر رفتار خود ترمیم شونده خوبی را پس از عمل ترمیم نشان دادند. شکل 5 یک لاستیک برگشت‌پذیر حرارتی را نشان می‌دهد که از موادی مانند اسیدهای چرب و اوره تشکیل شده است که توانایی خودترمیم شونده در دمای اتاق را دارد [87].

آهن علاوه بر ایجاد امکان پاسخ‌گویی به میدان مغناطیسی به بهبود پاسخ‌گویی حرارتی به دلیل رسانایی گرمایی ذرات اکسید آهن کمک کردند. ژو¹ و همکاران [76] یک جوهر کامپوزیتی از جنس پلی(دی متیل سیلوکسان)² و نانوذرات آهن را برای چاپ چهاربعدی برگشت‌پذیر در واکنش به اعمال میدان مغناطیسی با زمان پاسخ‌گویی سریع را توسعه دادند. پلی(دی متیل سیلوکسان) به عنوان یک زمینه نرم برای نانوذرات آهن این اجازه را به این ذرات می‌دهد که با خاموش و روشن شدن محرک سریعاً از خود واکنش نشان دهند. آن‌ها از این جوهر کامپوزیتی در یک ساختار پروانه‌ای شکل استفاده کردند که این ساختار می‌توانست با قرارگیری در یک میدان مغناطیسی بال‌های خود را تکان بدهد.

4- خواص مواد چاپ چهاربعدی

می‌توان ساختارهای پیچیده را با استفاده از چاپ سه‌بعدی چاپ کرد. ولی چاپ چهاربعدی می‌تواند یک ساختار ساده سه‌بعدی چاپ شده را به یک ساختار پیچیده تبدیل کند [77]. همچنین می‌توان با استفاده از چاپ چهاربعدی ویژگی‌هایی مانند خود مونتاژی³ [78]، خودسازگاری [79] و خود ترمیمی⁴ [80] را به سازه‌های چاپ سه‌بعدی اضافه کرد و پتانسیل استفاده از چاپ چهاربعدی را نسبت به چاپ سه‌بعدی بالا برد چون یک ساختار پویا را در مقابل یک ساختار استاتیکی قرار می‌دهد که می‌تواند در کاربردهای متنوعی قابلیت بهره‌برداری داشته باشد.

1-4- خودمونتاژی

خودمونتاژی یک ساختار را می‌توان جایگزینی برای ساخت یک ساختار پیچیده دانست که در شرایط دشوار محیطی می‌تواند بسیار مفید باشد [77]. چشم‌انداز محصولاتی با ساختارهای خودمونتاژی بسیاری گسترده شده و این‌گونه ساختارها می‌توانند با توجه به شرایط محیطی مونتاژ شوند و قابلیت تکرار داشته باشند؛ بنابراین چاپ چهاربعدی به کمک مواد هوشمند، آینده و فرصت‌های بسیاری را در بخش‌های مختلف به وجود آورده است [81].

یک از کاربردهای خودمونتاژ شونده استفاده از این ویژگی در چاپ استنت‌ها در کاربردهای پزشکی است. تحقیقات برای به دست آوردن استنت‌هایی با نسبت انقباض بالا که کمترین آسیب را به بدن وارد کند در حال انجام است. نسبت انقباض‌های مختلف را می‌توان بسته به پارامترهای هندسی و چیدمان لایه‌ها در این استنت‌ها به دست آورد [82]. به عنوان مثال مان⁵ و همکاران [83] یک استنت با استفاده از پلی‌لاکتیک اسید نوع پزشکی طراحی و چاپ کردند که با توجه به شرایط محیطی و با قابلیت خودمونتاژی می‌توانست



Fig. 5 Self-healing rubber composite at room temperature. The sequence of images from left to right shows cutting, connecting, repairing and stretching the tire after healing [87]

شکل 5 کامپوزیت لاستیکی خودترمیم شونده در دمای اتاق. توالی تصاویر از چپ به راست، برش، اتصال، تعمیر و کشش لاستیک را پس از بهبود نشان می‌دهد [87]

⁵ Manen
⁶ Zeng
⁷ Zhao
⁸ Invernizzi

¹ Zhu
² Poly(dimethylsiloxane)
³ Self-assembly
⁴ Self-healing

درحالی‌که تغییرات شکل در مواد تغییر شکل ذاتاً برگشت پذیر هستند ولی در مواد حافظه شکل معمولاً یک تبدیل یک‌طرفه از حالت برنامه‌ریزی شده به حالت تعادل (اصلی) است [90].

مؤمنی و همکاران [26] در مروری که بر مقالات داشته‌اند بیان کردند که یک ماده تغییر شکل بلافاصله پس از اعمال محرک شکل خود را تغییر می‌دهد و بلافاصله پس از حذف محرک به شکل دائمی خود بازمی‌گردد. در حالی‌که اثر حافظه شکل شامل یک چرخه دو مرحله‌ای است که مرحله اول مرحله برنامه‌ریزی است که در آن یک ساختار از شکل اولیه خود تغییر شکل می‌دهد و در یک شکل موقت پایدار می‌ماند و در مرحله دوم که مرحله بازیابی نام دارد در آن شکل اصلی می‌تواند با یک محرک مناسب بازیابی شود. همچنین می‌توان با آزمایش‌ها تجربی امکان چاپ چهاربعدی یک‌طرفه و دوطرفه را با استفاده روش FDM تک ماده نشان داد [91].

6- روش‌های چاپی

چاپگرهای سه‌بعدی جدید و پیشرفته عمدتاً در فناوری‌های پیشرفته ساخت افزایشی استفاده می‌شوند [92]. از دهه‌های گذشته تاکنون روش‌های چاپی متنوعی برای چاپ مواد هوشمند یا فرامواد مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به FDM [93]، SLS [94]، فتوپلیمریزاسیون مخزنی⁴ (VP) [95]، نوشتن مستقیم با جوهر⁵ (DIW) [96] و اشاره کرد [97]. شکل 7 انواع روش‌های رایج ساخت افزایشی در چاپ چهاربعدی را به صورت یک طرح‌واره نشان می‌دهد.

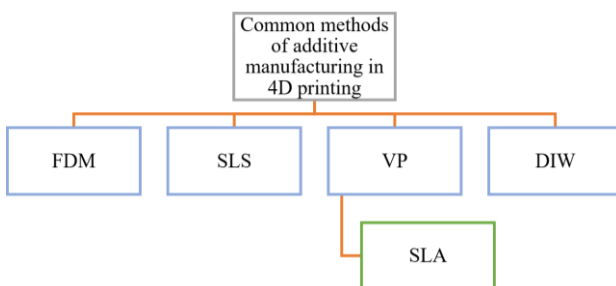


Fig. 7 Common methods of additive manufacturing in 4D printing
شکل 7 روش‌های رایج ساخت افزایشی در چاپ چهاربعدی

6-1- لایه‌نشانی مذاب (FDM)

روش لایه‌نشانی مذاب یا همان ساخت فیلامنت ذوب‌شده⁶ (FFF) محبوب‌ترین روش مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی پلیمرها است [8,98]؛ که به دلیل قابلیت اطمینان بالا، عملکرد ساده، هزینه کم، دسترسی آسان، تنوع زیاد رشته‌های مصرفی و توانایی ساخت قطعات با هندسه‌های پیچیده بسیار محبوب شده است و در صنعت چاپ سه‌بعدی چه در کاربردهایی با مقیاس خانگی، شرکت‌های کوچک و بزرگ و همچنین در صنایع مختلف مانند خودروسازی، هوانوردی، ساخت‌وساز، زیست پزشکی، آکوستیک و ساخت ساندویچ پانل‌ها⁷ برای نمونه‌سازی سریع مورد استفاده قرار گرفته است [99-103].

مبنای کاری چاپگر FDM به این صورت است که از رشته‌های ترموپلاستیک به عنوان مواد اولیه برای چاپ قطعات استفاده می‌کند. این

5- انواع مواد پلیمری مورد استفاده در چاپ چهاربعدی

دسته‌بندی‌های مختلفی برای طبقه‌بندی مواد پلیمری مورد استفاده در چاپ چهاربعدی وجود دارد که یکی از آن‌ها دسته‌بندی بر اساس نوع مواد مصرفی است. در ساختارهای چاپ شده، چاپ چهاربعدی ممکن است از یک ماده در ساختار طراحی شده یا از چند ماده بسته به طراحی سازه مورد نظر استفاده کرد. همچنین می‌توان از مواد کامپوزیتی و روش‌های مختلف چاپ برای ساخت اشیاء چند منظوره سفارشی‌سازی شده برای بسیاری از نیازها استفاده کرد [88]. طی دسته‌بندی دیگر می‌توان پلیمرهای حافظه شکل را به سه دسته یک‌طرفه، دوطرفه و چندگانه تقسیم‌بندی کرد. پلیمرهای حافظه شکل یک‌طرفه را برای یک مرحله تغییر شکل می‌توان برنامه‌ریزی کرد و چنانچه احتیاج به انقباض یا انقباض بیشتر باشد محرک دیگری اعمال می‌شود تا ماده در لحظه خواسته شده تغییر شکل مورد نیاز را به خود بگیرد. پلیمرهای حافظه‌شکلی که در یک مرحله برنامه‌ریزی شده‌اند اما تغییر شکل برگشت‌پذیر می‌دهند به آن‌ها پلیمرهای حافظه شکل دوطرفه می‌گویند و برای انقباض و انقباض بیشتر به هیچ محرک دیگری نیاز ندارند بلکه با خاموش شدن همان محرک به شکل اولیه خود بازمی‌گردند. پلیمرهای حافظه شکل چندگانه دارای دو یا چند شکل موقت هستند که این ویژگی در تغییر شکل بیشتر به T_g گسترده آن ماده بستگی دارد. برای درک بهتر از پلیمرهای حافظه شکل یک‌طرفه، دوطرفه و چندگانه می‌توان به شکل 6 مراجعه کرد [35,89].

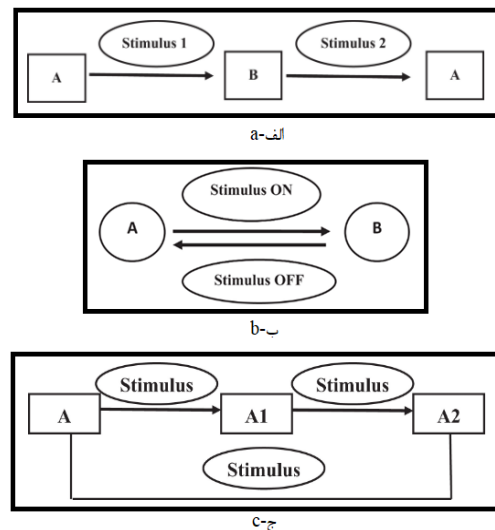


Fig. 6 Schematic of shape memory polymers (SMPs)- a) one-way, b) two-way, c) multiple [35]

شکل 6 طرح‌واره‌ای از پلیمرهای حافظه شکل (SMPs) - (الف) یک‌طرفه، (ب) دوطرفه، (ج) چندگانه [35]

ژو¹ و همکاران بیان کردند که مواد پاسخگو به محرک‌ها را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد:

- 1) مواد تغییر شکل² که در آن‌ها نوع خاصی از تغییر شکل در ساختار ماده اولیه کدگذاری شده است.
- 2) مواد حافظه شکل³ که هیچ‌گونه تغییر شکل از پیش تعیین‌شده‌ای را ندارند، اما امکان برنامه‌ریزی دگرگونی‌های شکل پیچیده در صورت نیاز را می‌دهند.

¹ Zhou

² Shape-changing materials

³ Shape-memory materials

⁴ Vat photopolymerization

⁵ Direct ink writing

⁶ Fused filament fabrication

⁷ Sandwich panels

مطالعه‌ای با استفاده از چاپگر FDM و به کمک اشعه UV سازه‌های محافظ آرنج را بر اساس شبکه‌های کوپلیستر^۲ حافظه شکل سنتز شده را ارائه دادند.

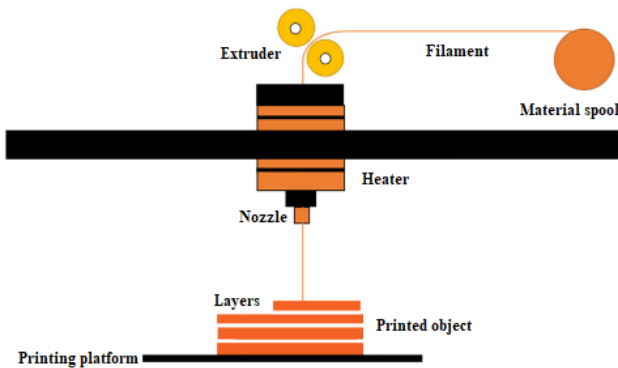


Fig. 8 FDM printer components [107]

شکل 8 اجزای چاپگر FDM [107]

رشته‌ها به وسیله یک نازل داغ ذوب می‌شوند. سپس رشته‌های ذوب شده به صورت لایه به لایه بر روی هم قرار می‌گیرند و ساختارهای سه بعدی مورد نظر را ایجاد می‌کنند. شکل 8 اجرای کلی چاپگر FDM را نشان می‌دهد [99,100].

اخیراً در مطالعه‌ای از رشته‌های PLA با استفاده از چاپگر FDM برای ساخت اجزای هندسی پیچیده در فرآیند چاپ چهاربعدی با پتانسیل جاذب‌های تنش استفاده شده است [104]. بدایق و همکاران [105] مطالعه‌ای را بر روی متا ساندویچ‌های جاذب انرژی برگشت پذیر تولید شده توسط فناوری چاپ چهاربعدی با چاپگر FDM بر روی یک پلیمر حافظه شکل انجام دادند. رفتار این سازه‌ی هوشمند حین بارگذاری در شکل 9 قابل مشاهده است، شکل 9-د-د پایان حرارت دادن ساختار چاپ شده را بالاتر از دمای T_g و خنک کاری تا دمای محیط را نشان می‌دهد. همچنین چنگ^۱ و همکاران [106] در

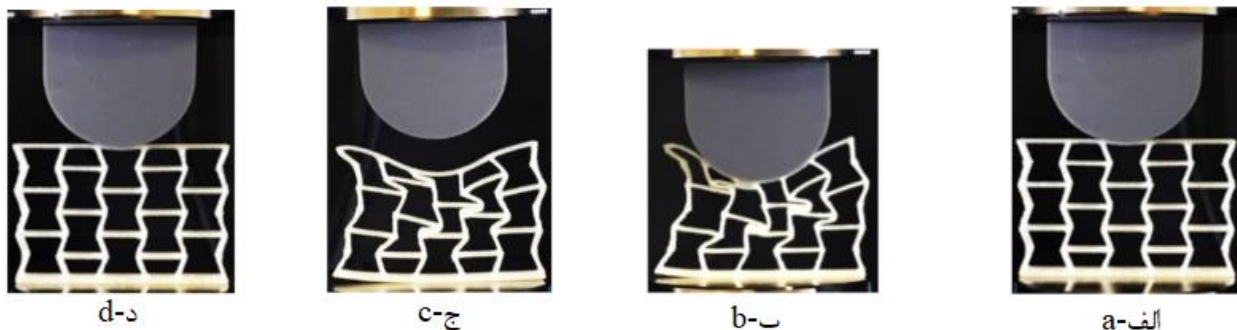


Fig. 9 Behavior of an SMP energy absorbing structure - a) Start of loading, b) End of loading, c) End of loading, d) End of heating-cooling [105]

شکل 9 رفتار یک سازه جذب کننده انرژی SMP - (الف) شروع بارگذاری، (ب) پایان بارگذاری، (ج) پایان بارگذاری، (د) پایان گرمایش-سرمايش [105]

می‌دهد. پلوسزایسکی^۵ و همکاران [115] با روش SLS پارچه‌های سبکی با عملکرد مغناطیسی را ایجاد کردند که می‌تواند در پاسخ به یک میدان مغناطیسی پاسخگو باشند. همچنین آن‌ها از این پارچه فعال را که می‌تواند جایگزینی به جای آتل‌های غیرفعال فلزی در یک مهربند مفصلی ساده باشد را تعبیه کردند تا به سفتی قابل کنترلی دست پیدا کنند.

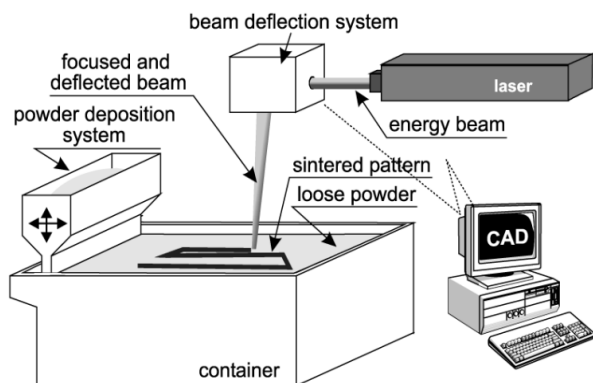


Fig. 10 An overview of a SLS printer [108]

شکل 10 یک نمای کلی از یک چاپگر SLS [108]

2-6- تف جوشی لیزر انتخابی (SLS)

تف جوشی لیزر انتخابی (SLS) یکی از روش‌های در حال رشد نمونه سازی سریع است [108]. در این روش با تابش پرتوی لیزر به عنوان منبعی برای ذوب یا تف جوشی ذرات پودر در یک مسیر از پیش تعریف شده برای توسعه محصول از طریق رسوب لایه به لایه استفاده می‌شود. شکل 10 نمای کلی از اجزای تشکیل دهنده چاپگر SLS را نشان می‌دهد [8,109].

یکی از مزایای بسیار خوب SLS سهولت ترکیب مواد پودری مختلف است که طیف وسیعی از مواد را باهم ترکیب می‌کند و به طور گسترده توانایی پردازش هر ماده پودری مانند پلیمرها (پودرهای پلیمری مانند PU، PCL، PEEK و PA)، فلزات، سرامیک‌ها، ماسه‌ها و همچنین توانایی تولید انواع مواد کامپوزیتی را دارد [108,110,111,112]. برخلاف فناوری FDM، امکان چاپ معماری‌های توخالی را بدون نیاز به پشتیبانی^۳ را می‌دهد که به کاهش زمان چاپ، کاهش اتلاف مواد کمک می‌کند و هزینه بازیافت مواد پودری پس از هر لایه را کاهش می‌دهد [113].

اوپانگ^۴ و همکاران [114] یک نوع پلی اورتان حاوی پیوند برگشت پذیر با شبکه قابل تطبیق کووالانسی با عملکردهای خود ترمیمی و حافظه شکلی برای چاپ چهاربعدی با فناوری SLS ایجاد کردند. مطالعات آن‌ها نشان از عملکرد خود ترمیمی عالی باراندمان بالاتر از 98 درصد را داشت. این مطالعه الگویی برای طراحی پلیمرها/کامپوزیت‌های پویا برای چاپ چهاربعدی SLS ارائه

⁴ Ouyang
⁵ Ploszajski

¹ Cheng
² Copolyester
³ Support

توسعه دادند. شکل 12 پاسخگویی شبکه چاپ شده به شکل توپ را در گذر زمان در آب 65 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. ژائو⁹ و همکاران [125] یک نوع پلی‌اورتان آکریلات⁸ را سنتز کردند. سپس آن را با اکریلت اپوکسی⁹، ایزوبورنیل آکریلات¹⁰ و با آغازگر رادیکال فوتوپلیمر¹¹ ترکیب کردند. آن‌ها فوتو پلیمر ساخته شده را از طریق چاپ سه‌بعدی به روش استریولیتوگرافی مورد استفاده قرار دادند. میائو¹² و همکاران [126] یک معماری با توانایی چند پاسخگویی از طریق چاپ چهاربعدی مبتنی بر روش استریولیتوگرافی را توسعه دادند که در آن از مفهوم تغییر شکل ناشی از تنش برای دستیابی به برنامه‌ریزی مجدد چاپ چهاربعدی استفاده می‌شود.

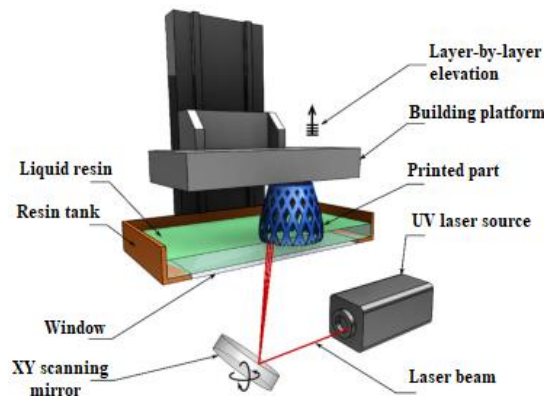


Fig. 11 Components of a typical SLA printer [123]

شکل 11 اجزای یک چاپگر SLA عمومی [123]

4-6- جوهر نویسی مستقیم (DIW)

جوهر نویسی مستقیم (DIW) که به نام چاپ مستقیم جوهر نیز شناخته می‌شود مشابه روش FDM است؛ روشی است که در دسته بندی اکستروژن مواد قرار می‌گیرد و ابتدا توسط سزارانی¹³ و همکاران در آزمایشگاه ملی سانديا¹⁴ در سال 1997 معرفی شد [8,127]. این روش، یک روش آسان، سازگار و ارزان است که برای طیف وسیعی از مواد مانند سرامیک‌ها [128] (همچون آلومینا، زیرکونیا و کامپوزیت‌های آن‌ها [127])، پلیمرهای ترموست و کامپوزیت‌های آن‌ها [129,130]، فلزات [131] استفاده می‌شود [132]. ریولو¹⁵ و همکاران [133] از چاپگر DIW برای ساخت قطعاتی از جنس خاک رس کائولینی استفاده کردند. اجزای چاپگر استفاده شده آن‌ها در شکل 13 قابل مشاهده است.

روش کار با DIW به این صورت است که از نازل‌هایی برای رسوب لایه به لایه جوهرهای ویسکوالاستیک تحت فشار برای چاپ ساختارهای طراحی شده استفاده می‌کند [134–136]. اندازه نازل در روش DIW می‌تواند بر کیفیت قطعات چاپی اثرگذار باشد. همچنین می‌توان برای بالا بردن وضوح چاپ از میکرو نازل‌ها استفاده کرد [137].

مو¹⁶ و همکاران [138] به بررسی تأثیرات اصلاح شرایط پخت در سیم‌های ساخته‌شده از جنس نانوذرات نقره به روش DIW پرداختند و نشان دادند که این سیم‌ها می‌توانند برای کاربردهای چاپ چهاربعدی و ماشین‌های نرم استفاده شوند.

3-6- فوتوپلیمریزاسیون مخزنی (VP)

فوتوپلیمریزاسیون مخزنی یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که در آن از مواد حساس به نور استفاده می‌شود و مواد از طریق اشعه ماوراءبنفش یا پرتو لیزر پلیمریزه می‌شوند که باعث خشک شدن مواد به روشی کنترل شده خواهد شد [109]. این فرآیند فقط برای آن دسته از مواد هوشمند مانند پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری که به نور حساس هستند قابل استفاده است [116,117].

اخیراً نیز چاپ زیستی مبتنی بر VP که یک روش چاپ نوظهور زیستی برای کاربردهای مختلف مهندسی بافت است به دلیل دقت بالای ساخت مورد استفاده قرار گرفته است [118]. تانگ¹ و همکاران [119] به کمک روش VP ساختارهای متخلخل الهام گرفته شده زیستی را با قابلیت پاسخگویی به رطوبت را ایجاد کردند. فانگ² و همکاران [120] اثر حافظه چند شکل پلیمرهای شیشه‌ای سخت را با استفاده از روش VP و با معرفی پیوند هیدروژن غیرکووالانسی قربانی در شبکه پلیمر را نشان دادند.

1-3-6- استریولیتوگرافی (SLA)

استریولیتوگرافی SLA یک روش پلیمریزاسیون مخزنی است. از SLA به عنوان قدیمی‌ترین فناوری ساخت افزایشی یاد می‌شود [20,121]. قطعات ایجاد شده توسط SLA دارای وضوح سطح بسیار بالایی هستند اما هزینه ساخت بسیار زیادی دارند. تاکنون دسته‌بندی‌های مختلفی از فرآیندهای SLA ارائه شده است مانند SLA مبتنی بر لیزر و پردازش نور دیجیتال³ (DLP)، همچنین روش‌های تخصصی آن‌ها مانند پلیمریزاسیون دو فوتونی⁴ (TPP) یا تولید رابط مایع پیوسته⁵ (CLIP)، از روش‌های SLA می‌توان برای ساخت قطعاتی با هندسه‌های بسیار پیچیده استفاده کرد [121].

در این روش چاپی که مواد به‌صورت لایه به لایه بر روی هم قرار می‌گیرند. به نحوی که یک ماده حساس به نور (فوتوپلیمر)، رزین قابل پخت با قرارگیری در معرض پرتوی مرئی، نور UV، اشعه ایکس یا پرتو الکترونی جامد می‌شود [20,100,122]. در این فرایند رزین به نور تابیده شده پاسخ می‌دهد و پس از تابش، به‌صورت موضعی واکنش پلیمریزاسیون شیمیایی را فعال می‌کند که منجر به پخت مناطقی می‌شود که تحت تابش نور اعمالی بودند. پس از توسعه اولین لایه به این روش یک فیلم رزین تازه اعمال می‌شود و تحت تابش قرار می‌گیرد و پخت می‌شود؛ بنابراین، قطعه به‌صورت تدریجی لایه پس از لایه رشد می‌کند [121].

شکل 11 یک نمونه چاپگر SLA را نمایش می‌دهد که یک مخزن شفاف از رزین قابل پخت پر شده است در حالی که سکوی چاپ در مخزن غوطه‌ور است، پرتوی لیزر سکوی چاپ را شناسایی می‌کند و ساختار را مطابق با الگوی داده شده به آن لایه به لایه ایجاد می‌کند. بسته به نوع چاپگر ممکن است جهت حرکت سکوی چاپ از پایین به بالا یا بالعکس باشد [123]. از پارامترهای اصلی فرایند که بر کیفیت قطعات چاپ شده با استفاده از چاپگر SLA چاپ شده‌اند، می‌توان به عمق پر کردن، ضخامت لایه و پخت تکمیلی اشاره کرد [20].

چونگ⁶ و همکاران [124] یک فوتو پلیمر قابل چاپ با شبکه tBA-co-DEGDA و با ویژگی‌های حافظه شکل را با موفقیت توسط دستگاه SLA

⁹ Epoxy acrylate
¹⁰ Isobornyl acrylate
¹¹ Photopolymer
¹² Miao
¹³ Cesarani
¹⁴ Sandia
¹⁵ Revelo
¹⁶ Mu

¹ Tang
² Fang
³ Digital light processing
⁴ Two-photon polymerization
⁵ Continuous liquid interface production
⁶ Choong
⁷ Zhao
⁸ Polyurethane acrylate

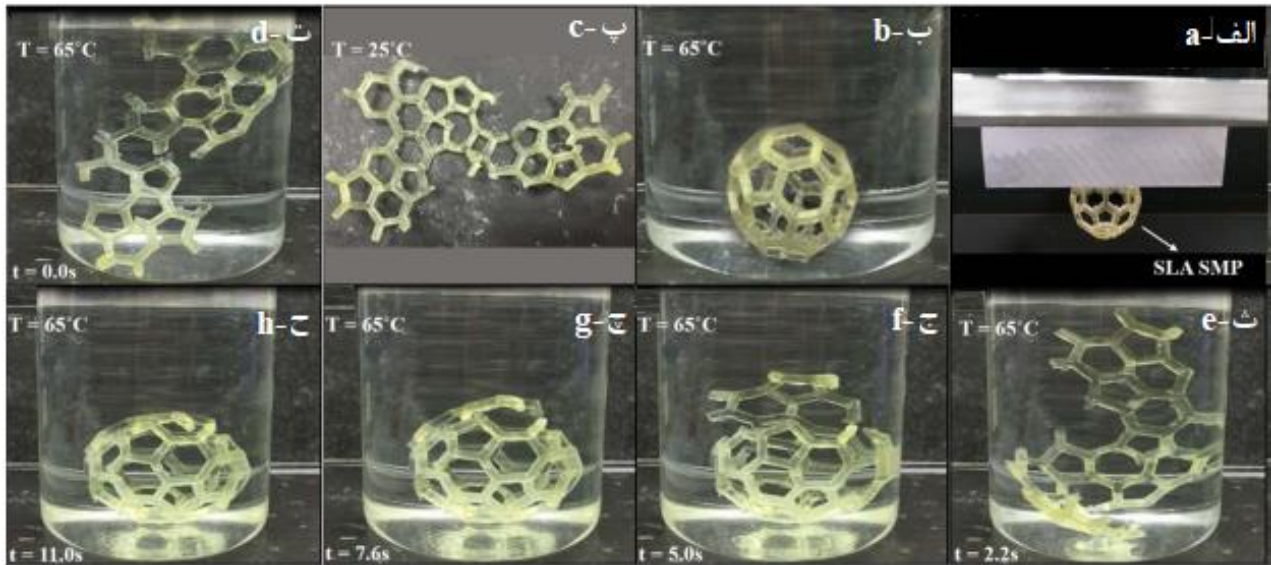


Fig. 12 a) Bucky ball printed by SLA printer, b) Final shape change in 65°C water, c) Initial shape before heating, d-h) Deformation stages over time in 65°C water [124]

شکل 12 الف) توپ باکی چاپ شده توسط چاپگر SLA، ب) تغییر شکل نهایی در آب با دمای 65°C (پ) شکل اولیه قبل از گرمایش، ت-ح) مراحل تغییر شکل در گذر زمان در آب 65°C [124]

7- پارامترهای مؤثر بر چاپ چهاربعدی

پاسخ‌گویی به محرک و تغییر شکل ناشی از پاسخ فقط تابعی از ماده نیست بلکه به فرایند ساخت نیز مرتبط می‌شود. در این قسمت به برخی از پارامترهای مؤثر در چاپ چهاربعدی با استفاده از چاپگر FDM پرداخته می‌شود. از پارامترهای مؤثر بر پاسخ در چاپ با استفاده از چاپگر FDM می‌توان به سرعت چاپ، دمای صفحه ساخت، دمای نازل، ضخامت لایه، درصد پر شوندگی و الگوی چاپی اشاره کرد؛ شکل 14 یک نمای کلی از پارامترهای مؤثر چاپ چهاربعدی بر پاسخ‌گویی به محرک در ساختارهای چاپ شده با استفاده از چاپگر FDM را نشان می‌دهد.

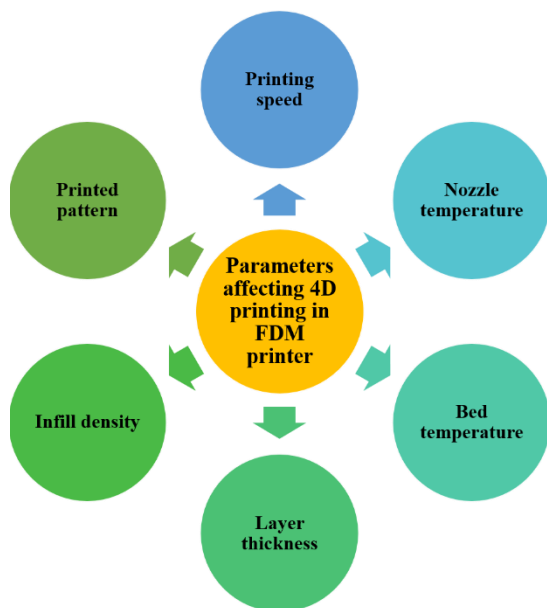


Fig. 14 Effective parameters of 4D printing using FDM printer

شکل 14 پارامترهای مؤثر چاپ چهاربعدی با استفاده از چاپگر FDM

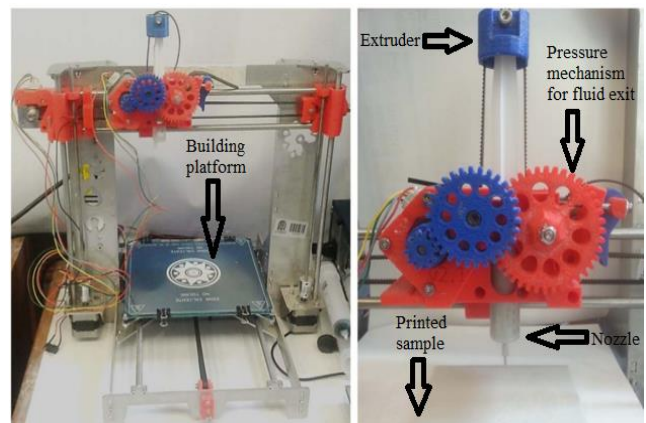


Fig. 13 A sample of DIW 3D printer [133]

شکل 13 یک نمونه چاپگر سه‌بعدی DIW [133]

الاستومرهای کریستال مایع به دلیل توانایی‌هایی همچون قابلیت برنامه‌ریزی، برگشت‌پذیری و تحریک سریع گزینه جذابی در میان مواد فعال برای چاپ چهاربعدی می‌باشند ولی از سوی دیگر محدودیت‌هایی برای چاپ این مواد وجود دارد از این رو پنگ¹ و همکاران [139] یک روش جدید با استفاده از روش DIW برای چاپ این مواد را ارائه کردند تا معماری‌های سه‌بعدی فعال ایجاد شده را در یک فرایند یک مرحله‌ای ساخت افزایشی ایجاد کنند. در مطالعه‌ای ونگ² و همکاران [140] رویکردی برای طراحی و ساخت سازه‌های خودمونتاز شونده با تغییر شکل‌های بزرگ را ارائه کردند. آن‌ها ساختارهای لولایی و نواری شکل از جنس رزین پلیمری قابل پخت، الیاف کوتاه شیشه و همچنین فوم سلیکا را با استفاده از روش DIW چاپ کردند و تغییر شکل ناشی از ناهمسانگردی ایجاد شده به وسیله لایه گذاری را مورد مطالعه قرار دادند.

² Weng

¹ Peng

1-7- سرعت چاپ

سرعت چاپ یک پارامتر مؤثر بر مقدار پاسخ‌دهی در چاپ چهاربعدی با استفاده از چاپگر FDM است. سرعت چاپ ممکن است نقشی کلیدی در مقدار پیش کرنش ایجاد شده حین ساخت داشته باشد. به همین علت منطقی است که سرعت‌های بالاتر بار مکانیکی بیشتری را فراهم کنند که ممکن است باعث ایجاد پیش کرنش بیشتر شوند [141].

بدای و همکاران [142] در مطالعه‌ای مقطعی را با سه سرعت مختلف 20، 40 و 60 میلی‌متر بر ثانیه از جنس PLA را چاپ کردند و تغییر شکل خمشی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که بیشترین تغییر شکل خمشی به ترتیب مربوط به سرعت 60، 40 و 20 میلی‌متر بر ثانیه بوده است. نتایج آن‌ها در شکل 15 قابل مشاهده است. جمشیدی و همکاران [143] با بررسی اثر سرعت چاپ دریافتند که با افزایش سرعت چاپ انحنای تغییر شکل در نمونه‌های مورد مطالعه توسط آن‌ها افزایش می‌یابد که علت آن را ناشی از سرد شدن با سرعت بیشتر و زمان کمتر برای خنک شدن در سرعت‌های بالا دانستند که باعث ذخیره تنش بیشتر در قطعات می‌شود. حسین‌زاده و همکاران [144] با روش طراحی آزمایش مکعب مرکزی یافتند که پیش کرنش اعمالی در چاپ چهاربعدی ماده PLA رابطه‌ای مستقیم با سرعت چاپ دارد. راجکومار¹ و همکاران [145] دریافتند که افزایش سرعت چاپ منجر به یک عمل خمشی بیشتر می‌شود که در امتداد جهت چاپ لایه‌های بالایی غالب است. آبرومند و همکاران [146] بر مطالعه‌ای که بر روی فیلامنت‌های تجاری PET-G در چاپ چهاربعدی به روش FDM داشتند بیان کردند که سرعت چاپ بالاتر ویژگی‌های خود خم‌شوندگی و بازیابی شکل را بالا می‌برد.

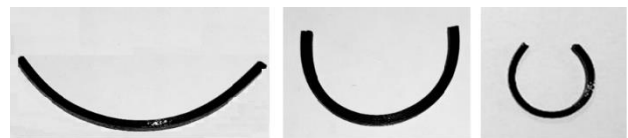


Fig. 15 Bending deformation of specimens printed by FDM method with different printing speeds. From right to left, the change of shape related to printing speeds of 60, 40 and 20 mm/s [142]

شکل 15 تغییر شکل خمشی نمونه‌های چاپ شده به روش FDM با سرعت‌های مختلف چاپی. از راست به چپ، تغییر شکل مربوط به سرعت چاپی 60، 40 و 20 میلی‌متر بر ثانیه است [142]

2-7- دمای نازل

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر ذخیره پیش کرنش در قطعات چاپ چهاربعدی دمای نازل است. تزرجانی و همکاران [147] با استفاده از روش سطح پاسخ تأثیر چهار پارامتر مؤثر در چاپگر FDM را بر پیش کرنش ذخیره‌شده در نمونه‌های چاپ شده را بررسی کردند که یکی از پارامترهای مورد بررسی توسط آن‌ها دمای نازل بود. آن‌ها دمای نازل را در سه سطح مختلف مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند تفاوت دمایی تأثیر زیادی بر پیش کرنش ندارد. بدای و همکاران [141] در مطالعات خود به بررسی اثر دمای مایع ساز به عنوان یک پارامتر مؤثر بر فرایند برنامه‌ریزی لایه به لایه در چاپ چهاربعدی پرداختند. آن‌ها با اشاره به این‌که دمای نازل یک پارامتر ناشناخته است ولی می‌توان دمای مایع ساز را توسط نرم‌افزار Craft-Ware کنترل و مشخص کرد اثر دمای نازل

را از طریق دمای مایع ساز بررسی کردند و دریافتند که هرگونه افزایش در دمای مایع ساز اثر منفی بر پیش کرنش دارد.

3-7- دمای صفحه ساخت

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در کنترل ایجاد و ذخیره پیش کرنش در قطعات چاپ شده دمای صفحه ساخت می‌باشد، پیش کرنش ذخیره شده در لایه‌های مختلف به دلیل گرادیان دما در جهت ضخامت است، که از دو عامل ایجاد می‌شود:

- فاصله لایه چاپ شده از صفحه ساخت
- تأثیر دمای لایه چاپی

در کل می‌توان اثر دمای صفحه ساخت و دمای نازل را به این صورت بیان کرد که لایه‌هایی که در پایین و نزدیک به صفحه ساخت قرار دارند تحت تأثیر دمای بالای صفحه ساخت قرار می‌گیرند و همچنین چاپ لایه‌های بالایی بر روی لایه‌های پایینی بر روی پیش کرنش لایه‌هایی پایینی اثر خواهد داشت و مقداری از پیش کرنش ذخیره‌شده در آن‌ها را آزاد می‌کند در نتیجه لایه‌هایی که در ابتدا چاپ شده‌اند و پایین نزدیک صفحه ساخت هستند کمترین مقدار پیش کرنش را دارند و برعکس لایه‌هایی بالایی که دورتر به صفحه ساخت هستند پیش کرنش ذخیره شده بیشتری را دارند [141, 142]. شکل 16 تصویری از این تفسیر را نشان می‌دهد.

تزرجانی و همکاران [147] اثر دمای صفحه ساخت را بر روی نمونه‌های چاپ شده از جنس PLA را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دمای صفحه ساخت را در سه سطح 25، 45 و 65 درجه سانتی‌گراد بررسی کردند که یک سطح بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای و در دو سطح دیگر کمتر از آن بود. آن‌ها مشاهده کردند، با کاهش دمای صفحه ساخت پیش کرنش بیشتری در نمونه‌های چاپ شده ذخیره می‌شود.

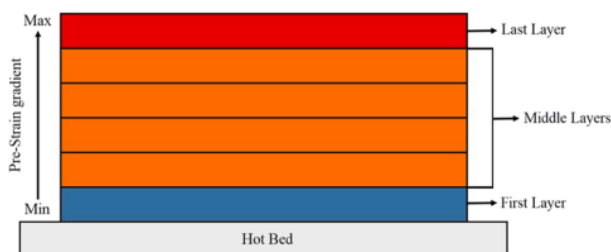


Fig. 16 Pre-strain stored between layers in a specimen printed by a FDM printer in 4D printing [147]

شکل 16 پیش کرنش ذخیره شده بین لایه‌ها در یک نمونه چاپ شده توسط یک چاپگر FDM در چاپ چهاربعدی [147]

4-7- ضخامت لایه

ضخامت لایه به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی فرایند چاپ نیز تأثیر قابل توجهی در میزان تغییر شکل و زمان فعال‌سازی در قطعات چهاربعدی دارد. هرچه ضخامت بیشتر باشد زمان بیشتری باید صرف شود که قطعات ضخیم‌تر به دمای انتقال شیشه‌ای و به حالت شیشه‌ای نرم برسند. قبل از رسیدن قطعات به حالت شیشه‌ای نرم فعال‌سازی انجام نمی‌شود، زیرا سفتی بالای قطعات در برابر پاسخگویی در دماهای پایین مقاومت می‌کند، از همین رو زمان فعال‌سازی نیز افزایش می‌یابد [83, 148].

وانگ² و همکاران [148] به مطالعه اثر ضخامت لایه و ضخامت هندسه قطعات در تغییر شکل و زمان فعال‌سازی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد

² Wang

¹ Rajkumar

امتداد جهت چاپ، ناهمسانگردی و گرادیان حرارتی در طول ساخت لایه به لایه معرفی شده است که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر خواص ماکروسکوپی، پایداری ابعادی و عملکرد ساختاری تأثیر بگذارد [145].

الشبلی^۲ و همکاران [152] با استفاده از چاپگر FFF با تغییر در الگوهای چاپ برای ساختارهای تک‌ماده‌ای و چند ماده‌ای به بررسی تغییر شکل خمشی در سازه‌های طراحی شده پرداختند و اثر پر شونده‌گی در این سازه‌ها را نیز بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد الگوهای مختلف چاپی تأثیری مستقیم بر میزان تغییر شکل دارد. شکل 18 تأثیر الگوهای چاپی مختلف مطالعه شده توسط آن‌ها را در یک جنس ماده نشان می‌دهد. نام^۳ و همکاران [153] مطالعه‌ای بر روی تأثیر الگوی چاپ و درصد پر شونده‌گی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در الگو خطی با کاهش تراکم پر شدن بازایی شکل کاهش می‌یابد و در الگوی مکعبی با تراکم پایین‌تر کوتاه‌ترین زمان بازایی شکل را نشان می‌دهد و قطعاتی که درصد پر شونده‌گی 100 درصد را دارا بودند طولانی‌ترین زمان بازایی شکل را از خود نشان دادند و همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که چگالی پر شدن و دمای بالا بازایی بهتری را فراهم می‌کند و دما و تراکم پر شدن پایین باعث تضعیف بازایی می‌شود.

راجکومار و همکاران [145] اثرات سرعت چاپ، دمای صفحه ساخت و ضخامت را بر تغییر شکل دیسک‌های چاپی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش تراکم پر شدن دیسک‌ها می‌توانند با محدودیت کمتری منقبض شوند. نیازی و همکاران [91] با مطالعه بر روی قطعات نواری شکل PLA، PETG، TPU و PA 6 تغییر شکل ناشی از حرارت را در مواد مذکور را مورد مطالعه قرار دادند. همه مواد مورد مطالعه آن‌ها یک واکنش تغییر شکل ناشی از ناهمسانگردی را به شیوه‌ای از پیش برنامه‌ریزی شده نشان داد. نتایج آن‌ها نشان داد که هرچه درصد پر شونده‌گی کلی قسمت بالا به پایین در قطعات نواری شکل کمتر باشد، زاویه انحنای آن‌ها بیشتر خواهد شد. جمشیدی و همکاران [143] بر روی چیدمان لایه‌ها در قطعات نواری شکل مطالعه‌ای انجام دادند که نتایج آن‌ها نشان داد که برای ماده PLA چیدمان $[0_n/90_n]$ بیشترین انحراف را نشان می‌دهد. گو^۴ و همکاران [154] اثرات ناشی از ایجاد ناهمسانگردی با استفاده از چیدمان‌های مختلف طولی و عرضی در نمونه‌های نواری شکل چاپ شده از جنس ABS را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد قطعاتی که به عنوان مثال فقط در جهت طولی چاپ شده‌اند کمترین تغییر شکل را از خود نشان می‌دهند اما نمونه‌هایی که لایه‌چینی در آن‌ها به‌صورت طولی و عرضی بوده است تغییر شکل به مراتب بیشتری را از خود نشان می‌دهند.

مؤثرترین پارامتر در به تأخیر انداختن زمان پاسخ ضخامت نمونه است که با افزایش ضخامت لایه و هندسه قطعات زمان بیشتری صرف فعال‌سازی خواهد شد. همچنین ضخامت لایه می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر نیروی بازایی داشته باشد. نتایج مانن^۱ و همکاران [149] نشان داد که با افزایش ضخامت لایه مقدار تغییر شکل در نمونه‌های چاپ شده کاهش می‌یابد. شکل 17 بیانگر اثر ارتفاع لایه بر روی کرنش در نمونه‌های چاپ چهاربعدی به روش FDM را نشان می‌دهد.

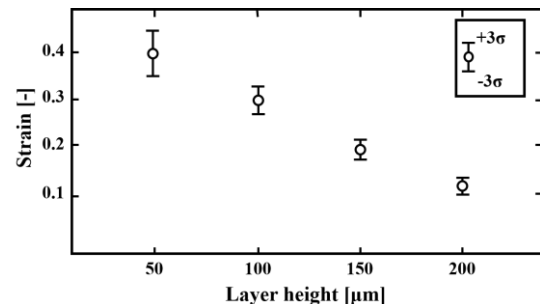


Fig. 17 Effect of layer height on strain in 4D printing in samples printed using FDM printer [149]

شکل 17 تأثیر ارتفاع لایه بر روی کرنش در چاپ چهاربعدی در نمونه‌های چاپ شده با استفاده از چاپگر FDM [149]

7-5- درصد پر شونده‌گی و الگوی چاپی

طراحی ریز معماری‌های الگوهای چاپی می‌تواند عملکردهای ساختاری مختلف و انعطاف‌پذیر را با ترکیب طرح‌های هندسی به ارمغان بیاورد. الگوهای چاپ اعم از خطوط مستقیم یا الگوهای چندضلعی با زاویه‌های مختلف طراحی شده است تا ویژگی‌های هدفمندی در چاپ چهاربعدی به دست آید که نیاز به درک بهتر تأثیر الگوهای پر کردن بر ناهمسانگردی و عملکرد سازه‌ها را برجسته می‌کند. سازه‌های چاپ چهاربعدی با الگوهای پرکننده مختلف تأثیر به سزایی در هدایت مسیر بار در کرنش ثابت بر رفتار پاسخگوی می‌تواند داشته باشد [150]. همچنین با تغییر درصد پر شدن به شیوه از پیش تعیین شده در چاپ سه‌بعدی به روش FDM می‌توان تغییر شکل جهت‌دار کنترل شده رفتار حرکتی یک ماده را مهندسی کرد [91]. همچنین الگوهای پرکننده چاپی مختلف می‌توانند ناهمسانگردی ساختاری را در جنبه‌های کشسانی، ویسکوالاستیسیته و اثر حافظه شکل به ارمغان بیاورند که تاکنون توجه بسیار کمی به آن‌ها شده است [151]. بسته به پارامترهای فرایند چاپ FDM کرنش‌های داخلی در

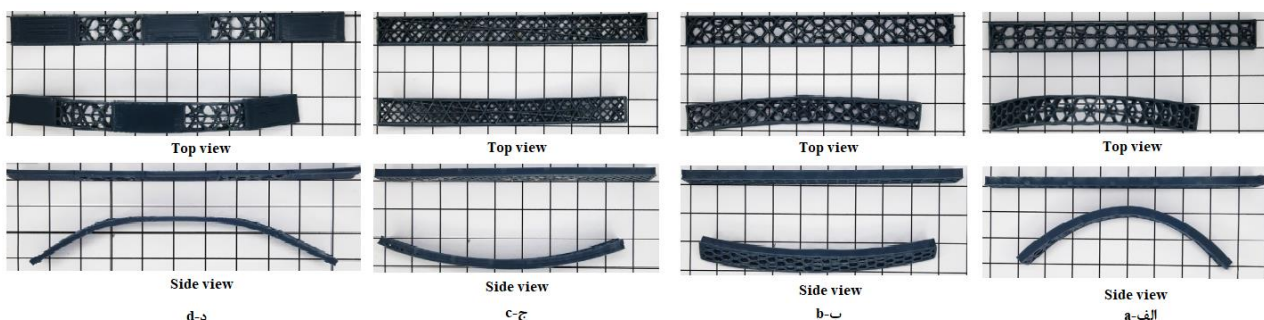


Fig. 18 Four different combined patterns printed with two viewing angles from top and from the side- a) Triangular and honeycomb pattern, b) Honeycomb and square pattern, c) Square and triangular pattern, d) Linear, honeycomb and triangular pattern [152]

شکل 18 چهار الگوی ترکیبی مختلف چاپ شده با دو زاویه دید از بالا و کنار- الف) الگوی مثلثی و لانه زنبوری، ب) الگوی لانه زنبوری و مربعی، ج) الگوی مربعی و مثلثی، د) الگوی خطی، لانه زنبوری و مثلثی [152]

³ Nam

⁴ Goo

¹ Manen

² Alshehly

8- کاربردها

در این بخش به تعدادی از زمینه‌های کاربردی مانند هوافضا [155]، پزشکی [156]، خودروسازی [157] و حسگرها [158] که امروزه چاپ چهاربعدی توانسته در آن‌ها ورود کند مورد بررسی قرار می‌گیرد. امید است که خواننده با آشنا شدن به یکی از این زمینه‌ها بتواند نتایج خارق‌العاده‌ای به دست آورد و آن‌ها را توسعه بدهد. چاپ چهاربعدی امروزه به فناوری بی‌حدوحد در زمینه‌های مختلف تبدیل شده است که پیشرفت‌های بیشتر در فناوری آن نیازمند تحقیقات بین‌رشته‌ای خواهد بود [159].

8-1- پزشکی

پلیمرهای حافظه شکل و کامپوزیت‌های مبتنی بر این پلیمرها امروزه جایگزین پلیمرهای سنتی شده‌اند که عاملی برای به وجود آمدن علاقه زیاد به توسعه دستگاه‌های زیست پزشکی پویا و هوشمند شده است. با این حال باید معیارهای خاصی برای طراحی و انتخاب پلیمرهای حافظه شکل رعایت شود [160,161]. یکی از محصولات قابل تنظیم در زمینه پزشکی استنت‌ها هستند که چاپ چهاربعدی امکان ساخت آن فراهم می‌کند [162,163]. استنت‌های چاپی مبتنی بر پلیمرهای حافظه شکل با کاهش قطر موقت اولیه از طریق برنامه‌ریزی و به حداقل رساندن برش جراحی حین قرارگیری کمک می‌کنند و به عنوان روشی غیرتهاجمی برای مقابله با ناهنجاری‌های فیزیکی طراحی شده‌اند. اختلاف دمای قبل از کاشت و بدن می‌تواند به استنت‌های چاپی این اجازه را بدهد که قطر اصلی خود را بعد از کاشت به دست آورند [109,164,165].

جی¹ و همکاران [166] یک استنت از جنس پلیمر حافظه شکل با استفاده از روش میکرو استریولیتوگرافی با وضوح بالا چاپ کردند. ژانگ² و همکاران [167] مجموعه‌ای از استنت‌ها را با الگوها و درصد‌های مختلف وزنی اکسید آهن اضافه شده به PLA را چاپ کردند و فعال‌سازی آن‌ها را در میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر ژائو³ و همکاران [82] استنت‌هایی با عملکرد خودآرایی نشأت گرفته از اورینگامی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که بسته به زوایا و شکل سلول‌های واحد استنت‌هایی با میزان انقباض متفاوت را می‌توان با تنظیم چیدمان‌های دوره‌ای و تنظیم پارامترهای هندسی به دست آورد. شکل 19 سه نمونه از ساختارهای استنت‌های مورد مطالعه آن‌ها بر مبنای اورینگامی را قبل و بعد از تا شدن را نشان می‌دهد.



Fig. 19 4D printed stents before and after folding [82]

شکل 19 استنت‌های چاپ چهاربعدی شده قبل و بعد از تا شدن [82]

فناوری چاپ چهاربعدی پتانسیل بسیار زیادی برای استفاده در زمینه ترمیم اندام و بازسازی بافت [168] و کاربردهای دارورسانی [169] نیز دارد [170]. از همین رو میائو⁴ و همکاران [171] با استفاده از روش چاپ لیزری سه‌بعدی، داربست‌های متخلخل زیست‌سازگار مبتنی بر یک آکریلات اپوکسید شده⁵ روغن سویای تجدیدپذیر را که توانایی حمایت از رشد سلول‌های بنیادی

مزانشیمی⁶ مغز استخوان انسان را دارد چاپ کردند. آزمایش‌های حافظه شکلی آن‌ها نشان داد که داربست در دمای 18- سانتی‌گراد شکل موقت خود را دارد و در دمای بدن انسان (37 درجه سانتی‌گراد) شکل اصلی خود را بازیابی می‌کند.

8-2- هوافضا

ساخت و تولید در فضا برای مأموریت‌های فضایی آینده‌ای اساسی است که هزینه‌های پرتاب و سبکی در مأموریت‌های فضایی را به دنبال دارد. اخیراً چاپ سه‌بعدی با چاپگر FDM در ایستگاه فضایی بین‌المللی⁷ (ISS) بر روی ماده ABS انجام شده است. تولید در فضا بر کاهش وابستگی به زمین کمک بسیاری می‌کند و باعث طولانی‌تر شدن این مأموریت‌ها بدون پشتیبانی از زمین خواهد شد. هدف دیگر می‌تواند استفاده از خود ظرفیت سیاره‌ها یا سیارک‌های پیرامون زمین جهت ساخت افزایشی باشد [172]. تلاش‌های بسیاری برای ترکیب مواد هوشمند مانند پلیمرهای حافظه شکل و آلیاژهای حافظه شکل برای توسعه در صنعت هوافضا انجام شده است و توجهات بسیار زیادی را به استفاده از پلیمرهای حافظه شکل برای سیستم‌های فضایی مانند آنتن‌های مبتنی بر فوم پلیمرهای حافظه شکل را به خود جلب کرده است [173] و از مزایای استفاده از پلیمرهای حافظه شکل در مأموریت‌های فضایی می‌توان به حجم کمتری از فضا که در این مأموریت‌ها اشغال می‌شود اشاره کرد [96,174].

8-3- خودروسازی

ویژگی‌های چاپ چهاربعدی که قبلاً بیان شد مانند خودمونتاژی، چندکاره بودن و خود ترمیمی گستره فوق‌العاده‌ای در صنعت خودرو دارد. به عنوان مثال زمانی که بدنه خودرو دچار آسیب دیدگی‌هایی مانند فرورفتگی یا خراش می‌شود، می‌توان از خواص تغییر شکل و خودترمیمی چاپ چهاربعدی استفاده کرد [157]. علاوه بر این از خاصیت خودترمیمی موادی که با فناوری چاپ چهاربعدی چاپ شده‌اند می‌توان لاستیک‌های خودروها را توسعه داد که با ایجاد انعطاف‌پذیری در سفتی، استحکام و کشش برای شرایط مختلف جاده‌ای مناسب باشند [175]. در صنعت خودرو با توجه به نیازهای جهانی به سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها با ویژگی‌هایی مانند پایداری، مقرون به صرفه بودن و سبک وزنی نیاز است [176] و صنعت خودرو دارای طیفی وسیعی از این دسته قطعات است که می‌توان از چاپ چهاربعدی برای بهره‌برداری در آن‌ها استفاده کرد [157].

8-4- حسگرها و رباتیک

از آنجا که ساختارهای چاپ چهاربعدی می‌توانند نسبت به رطوبت، دما، تنش، کرنش، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، PH و غیره پاسخگو باشند در حسگرها می‌توان از آن‌ها استفاده کرد [8]. رباتیک نرم رشته‌ای است که در آن ربات‌ها از مواد بسیار تغییر شکل‌پذیر ساخته می‌شوند که معمولاً از طراحی الهام گرفته زیستی پیروی می‌کنند [177]. امروزه ربات‌های نرم و محرک‌ها نیز به منطقه اصلی تمرکز برای کاربردهای چاپ چهاربعدی تبدیل شده‌اند [109]. چاپ چهاربعدی یک فناوری کلیدی در زمینه میکرو روباتیک است. برخلاف روش‌های سنتی میکرو ساخت، چاپ چهاربعدی تطبیق‌پذیری بالاتر، هندسه‌های پیچیده‌تر و طیف وسیعی از امکان‌های سنجش و تحریک را فراهم می‌کند و راه‌های جدیدتری را برای نسل بعدی میکرو ربات‌ها باز می‌کند [178]. در میان فناوری‌های چاپ سه‌بعدی TPP بالاترین وضوح (در حد نانومتر) را دارد و امکان ساخت ساختارهای پیچیده سه‌بعدی را با انواع مختلف اعم از فعال یا غیرفعال، آلی یا معدنی را می‌دهد که این امر در زمینه میکرو رباتیک

⁵ Epoxidized acrylate

⁶ Mesenchymal

⁷ International space station

¹ Ge

² Zhang

³ Zhao

⁴ Miao

9- چالش‌ها و آینده

چاپ چهاربعدی به عنوان یک فناوری جدید و روبه رشد که در مرحله توسعه قرار دارد و با چالش‌هایی روبه‌رو است که باید بر آن‌ها غلبه کند. در این قسمت به برخی از چالش‌ها و آینده‌ی مربوط به این فناوری جدید با تمرکز بر پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری پرداخته می‌شود.

سه چالش مهمی که چاپ چهاربعدی با آن روبه‌رو است مربوط به حوزه‌های طراحی، مواد و فناوری می‌باشد. طراحی ساختارهای هوشمند در چاپ چهاربعدی یک چالش مهم است که سازه مورد نظر باید با توجه به محیط پیرامون تغییرات مدنظر را اعمال کند، بنابراین باید سازه به نحوی طراحی شود که پاسخ مطلوب را به شرایط اعمالی نشان دهد. طراحی سازه‌ای هوشمند که حین ساخت بتوانند در خود پیش کرنش لازم را ذخیره کند خود وابسته به ماده مصرفی، روش ساخت و پارامترهای مؤثر دیگر است که چالشی در طراحی یک ساختار هوشمند است. چالش بعدی مربوط به خواص مواد مصرفی در چاپ چهاربعدی پلیمرها می‌شود. برخی از مواد مورد استفاده در چاپ چهاربعدی به صورت یک‌طرفه تغییر شکل می‌دهند که برای برخی از ساختارها پاسخی قابل قبول است اما گاهی نیاز است یک ساختار به صورت رفت و برگشت تغییر شکل بدهد که ممکن است طی این رفت و برگشت دوطرفه خاصیت ماده تضعیف یا ماده مصرفی تخریب شود. به عنوان مثال برخی هیدروژل‌ها پس از خیس و خشک شدن مکرر تخریب می‌شوند. در برخی از موارد نیاز است یک ماده به طیف وسیعی از محرک‌ها پاسخ بدهد یا تغییر شکل‌های بزرگی را از خود نشان بدهد که مستلزم ماده‌هایی با چند کارکرد متفاوت است که به این اهداف می‌توان با کامپوزیتی کردن مواد مورد استفاده دست‌یافت؛ اما هنوز چاپ چهاربعدی ابتدای این مسیر است و تاکنون تعدادی کمی مطالعه بر روی کامپوزیت‌های پلیمری در چاپ چهاربعدی انجام گرفته است که بیشتر آن‌ها نیز مربوط به افزودن ذرات به پلیمرها می‌شود. تحقیقات در آینده می‌تواند متمرکز بر اضافه نمودن الیاف کوتاه یا بلند، مصنوعی یا طبیعی به ساختارهای چاپ چهاربعدی باشد. کامپوزیت‌ها می‌تواند در آینده باعث رشد و توسعه چاپ چهاربعدی شوند و عاملی باشند که چاپ چهاربعدی در زمینه‌های صنعتی رشد سریع‌تری پیدا کند.

چالش دیگری که چاپ چهاربعدی با آن روبه‌رو است فناوری چاپ سه‌بعدی است که به‌غیر از چاپگر FDM که امروزه بیشتر از چاپگرهای دیگر در دسترس است مابقی چاپگرهای سه‌بعدی محدود به مراکز تحقیقاتی هستند و هر کدام محدودیت خاصی برای چاپ مواد را دارند. نیاز بعدی که می‌توان در حوزه فناوری به آن اشاره کرد توسعه نرم‌افزارهای چاپ چهاربعدی برای انواع روش‌های چاپی است توسعه این نرم‌افزارها باید سازوکار تغییر شکل، مواد هوشمند پایه، روش‌های چاپ و هندسه طراحی را در بر بگیرد که با توسعه و دسترسی آسان‌تر به این چاپگرها و نرم‌افزارها چاپ چهاربعدی می‌تواند رشد بسیار زیادی پیدا کند.

امروزه چاپ چهاربعدی نشان داده است که پتانسیل بسیار بالایی در بسیاری از زیرشاخه‌های مهندسی پزشکی دارد. بدین منظور توسعه سریع‌تر و مقرون‌به‌صرفه روش‌های چاپ زیستی ضروری است. همچنین نیاز به توسعه مواد هوشمند زیست‌سازگار وجود دارد که در سازگاری با محیط اطراف خود دارای محدودیتی نباشند و عملکردی را با چندین بافت و سیستم محرک ارائه کنند [180]. همچنین توسعه چاپگرهای زیستی کاربرپسند، خودکار، با وضوح بالا و بادوام در این زمینه ضروری است [181].

پزشکی بسیار جالب است که به این ساختارها اجازه می‌دهد در طی گذشت زمان یا اعمال یک محرک تغییر شکل بدهند یا تخریب شوند که همان مفهوم چاپ چهاربعدی را می‌رساند [177].

8-5- برنامه‌های کاربردی متفرقه

یو و همکاران [69] سه طرح خلاقانه را پیاده‌سازی کردند که هر سه طرح پیشنهادی در دمای 80 درجه سانتی‌گراد فعال می‌شوند. در طرح اول آن‌ها پوشش لامپ مدولار را اجرا کردند و در طرح دوم جابظری را برای کمک به افراد دارای معلولیت را پیاده‌سازی کردند و در طرح آخر آن‌ها یک پشتیبان کفش را طراحی کردند که در پیاده‌روی و کوهنوردی از صدماتی مانند پیچ‌خوردگی مچ پا جلوگیری می‌کند. شکل 20 طرح پشتیبان کفش اجرا شده توسط آن‌ها را نشان می‌دهد.



Fig. 20 Shoe support design with the aid of 4D printing [69]

شکل 20 طراحی پشتیبان کفش به کمک چاپ چهاربعدی [69]

زارک¹ و همکاران [179] یک کلید الکترونیکی برای روشن کردن یک چراغ LED با استفاده از پلیمر حافظه شکل حساس به دما را چاپ کردند. آن‌ها برای اتصال رسانایی در کلید از جوهر نقره بر روی سطح کلید استفاده کردند. زمانی که کلید در دمای محیط قرار دارد کلید دارای شکل موقت است و زمانی که کلید تا بالای دمای ذوب خود گرم می‌شود کلید بسته می‌شود و چراغ LED روشن می‌شود. شکل 21 کلید هوشمند و سازوکار روشن شدن آن را نشان می‌دهد.

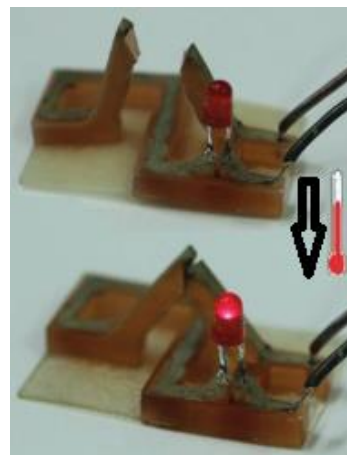


Fig. 21 Electric switch mechanism before and after heat activation [179]

شکل 21 سازوکار کلید الکتریکی قبل و بعد از فعال‌سازی با گرما [179]

¹ Zarek

- Angeles, pp. 1-269, 2017.
- [7] Upercraft, S. and Fletcher, R., "The rapid prototyping technologies," *Assem. Autom.*, Vol. 23, No. 4, pp. 318-330, 2003.
- [8] Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H. and Khosla, A., "4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges," *Polymer (Guildf.)*, Vol. 228, pp. 1358-1381, 2021.
- [9] Meshkizadeh, P., Hajideh, M. R., Farahani, M. R. and Heidari-Rarani, M., "Thermal signal reconstruction and employment of K clustering method for inspection of additive manufactured polymer parts," In Persian, *Nondestruct. Test. Technol.*, Vol. 2, No. 7, pp. 60-69, 2021.
- [10] Vălean, C., Marşavina, L., Mărghiş, M., Linul, E., Razavi, J. and Berto, F., "Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens," *Procedia Struct. Integr.*, Vol. 26, No. 2, pp. 313-320, 2020.
- [11] Aimar, A., Palermo, A. and Innocenti, B., "The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art," *J. Healthc. Eng.*, Vol. 2019, p. 5340616, 2019.
- [12] Wong, K. V. and Hernandez, A., "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mech. Eng.*, Vol. 2012, pp. 1-10, 2012.
- [13] Heidari-Rarani, M., "Residual stresses in additive manufacturing of polymers and polymer matrix composites," in *Residual Stresses in Composite Materials*, 2nd Edition, pp. 421-436, 2021.
- [14] Cotteleer, M., Holdowsky, J. and Mahto, M., "The 3D opportunity primer: The basics of additive manufacturing," *Deloitte University*, Westlake, pp. 1-17, 2014.
- [15] Chu H., et al., "4D printing: A review on recent progresses," *Micromachines*, Vol. 11, No. 9, p. 796, 2020.
- [16] Kianian, B., "Wohlers Report 2016: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapter title: The Middle East," 21st ed., Wohlers Associates Inc., Lund, pp. 1-335, 2016.
- [17] Mitchell, A., Lafont, U., Holyńska, M. and Semprimoschnig, C., "Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications," *Addit. Manuf.*, Vol. 24, pp. 606-626, 2018.
- [18] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. and Hui, D., "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [19] Wickramasinghe, S., Do, T. and Tran, P., "FDM-Based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments," *Polymers*, Vol. 12, No. 7, pp. 1-42, 2020.
- [20] Kaffle, A., Luis, E., Silwal, R., Pan, H. M., Shrestha, P. L. and Bastola, A. K., "3d/4d printing of polymers: Fused deposition modelling (fdm), selective laser sintering (sls), and stereolithography (sla)," *Polymers*, Vol. 13, No. 18, p. 3101, 2021.
- [21] Salazar, A., Rico, A., Rodríguez, J., Segurado J., Escudero, Seltzer, R. and Martin De La Escalera Cuillas, F., "Fatigue crack growth of SLS polyamide 12: Effect of reinforcement and temperature," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 59, pp. 285-292, 2014.
- [22] Javaid, M. and Haleem, A., "4D printing applications in medical field: A brief review," *Clin. Epidemiol. Glob. Heal.*, Vol. 7, No. 3, pp. 317-321, 2019.
- [23] Ntounoglou, K., Stavropoulos, P. and Mourtzis, D., "4D printing prospects for the aerospace industry: A critical review," *Procedia Manuf.*, Vol. 18, pp. 120-129, 2018.
- [24] Hann, S. Y., Cui, H., Nowicki, M. and Zhang, L. G., "4D printing soft robotics for biomedical applications," *Addit. Manuf.*, Vol. 36, p. 101567, 2020.
- [25] Tang, Y., Dai, B., Su, B. and Shi, Y., "Recent Advances of 4D Printing Technologies Toward Soft Tactile Sensors," *Front. Mater.*, Vol. 8, p. 658046, 2021.
- [26] Momeni, F., M. Mehdi Hassani, N. S., Liu, X. and Ni, J., "A review of 4D printing," *Mater. Des.*, Vol. 122, pp. 42-79, 2017.
- [27] Precedence research, "4D Printing Market", <https://www.precedenceresearch.com/4d-printing-market>, available in 1, June 2022.

با توجه به گسترش چاپ چهاربعدی در زمینه‌های مختلف لازم است مواد پلیمری چاپ چهاربعدی با عملکرد چندگانه توسعه یابند و به جهت توسعه بیشتر می‌توان آن‌ها را با مواد فلزی، سرامیکی و یا کامپوزیت‌های آن‌ها ترکیب کرد تا برخی از محدودیت‌های استفاده از پلیمرها در صنایع مختلف را کاهش دهند. همچنین ویژگی‌ها خودترمیمی و خودمونتاژی چاپ چهاربعدی می‌تواند در آینده به توسعه این فناوری کمک شایانی کنند. چرا که با استفاده از ویژگی خودترمیمی می‌توان از دورریز و بازیافت بیش از اندازه مواد مصرفی جلوگیری کرده و با استفاده از ویژگی خود مونتاژی می‌توان در کاهش زمان و هزینه جهت مونتاژ قطعات و فضای اشغال شده توسط آن‌ها کمک کرد.

10- جمع‌بندی

چاپ چهاربعدی از زمان آغاز به کار تا به امروز رشد قابل‌توجهی داشته است و نفوذ خود را در تعدادی از صنایع بالا برده است. چاپ چهاربعدی امروزه زمینه‌ای روبه‌پیشرفت برای ساخت قطعات خودمونتاژ، خودسازگار و خودترمیم را به وجود آورده است و به سرعت در حال پیشرفت می‌باشد. چاپ چهاربعدی امکان ساخت قطعاتی با ابعاد کوچک‌تر قبل از تغییر شکل به شکل اصلی را می‌دهد و همین امر باعث حمل و نقل آسان‌تر، جاگیر نبودن، کاهش وزن و طراحی آسان‌تر شده است. چاپ چهاربعدی که از فناوری چاپ سه‌بعدی با مواد هوشمند برای ایجاد سازوکارهای تغییر شکل در طول زمان استفاده می‌کند انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری بیشتری را نیز فراهم می‌کند.

با پیشرفت چاپ چهاربعدی در چاپ چند ماده‌ای مبتنی بر کامپوزیت‌های پلیمری حافظه شکل و تراز کردن مواد افزودنی از طریق میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به درک بهتر این فناوری جدید کمک می‌کند که نیازمند توسعه کامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمرها می‌باشد. مواد کامپوزیتی و کامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمرهای حافظه شکل که می‌توانند به چندین محرک برای دستیابی به چندین پاسخ متفاوت در محیط‌های چالش برانگیز ترکیب شوند مفید باشند و همچنین می‌توانند در موقعیت‌هایی که نیاز به تغییر شکل‌های بزرگ است از آن‌ها استفاده کرد. با توسعه روش‌های ساخت جدید و ترکیب روش‌های ساخت می‌توان هندسه‌های پیچیده‌ای با استفاده از مواد پلیمری و فلزی ایجاد کرد و بسیاری از محدودیت‌های را کنار گذاشت. در سال‌های اخیر چاپ چهاربعدی به سمت کاربردهای واقعی و عملی در حرکت بوده است و در زمینه‌های بسیاری مانند توسعه استنت‌های پزشکی، جاذب‌های انرژی، لوازم الکترونیکی، محرک‌ها، دستگاه‌های دارو رسان و گیره‌ها توسعه پیدا کرده است و در آینده‌ای نزدیک با رفع چالش‌های موجود جهان را متحول خواهد کرد.

11- منابع

- [1] Jiang, J., "A novel fabrication strategy for additive manufacturing processes," *J. Clean. Prod.*, Vol. 272, p. 122916, 2020.
- [2] Culmone, C., Smit, G. and Breedveld, P., "Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review," *Addit. Manuf.*, Vol. 27, pp. 461-473, 2019.
- [3] Blakey-Milner B., et al., "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Mater. Des.*, Vol. 209, p. 110008, 2021.
- [4] Charles, A., Hofer, A., Elkaseer, A. and Scholz, S. G., "Additive Manufacturing in the Automotive Industry and the Potential for Driving the Green and Electric Transition," in *Proceedings of the International Conference on Sustainable Design and Manufacturing*, pp. 339-346, Sep. 2022.
- [5] Shahbazi, A. and Zeinedini, A., "Impact response of E-glass/epoxy composite bi-directional corrugated core sandwich panels", *Polym. Polym. Compos.*, Vol. 29, No 9, pp. 1563-1574, 2020.
- [6] Noorani, R., "3D printing: technology, applications, and selection," 1st Editio. Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, Los

- [48] Aberoumand, M., et al., "4D Printing of Polyvinyl Chloride (PVC): A Detailed Analysis of Microstructure, Programming, and Shape Memory Performance", *Macromol. Mater. Eng.*, vol n/a, no n/a, pp. 2200677, 2023.
- [49] Liu, C., Qin, H. and Mather, P. T., "Review of progress in shape-memory polymers," *J. Mater. Chem.*, Vol. 17, No. 16, pp. 1543–1558, 2007.
- [50] Gall, K., Kreiner, P., Turner, D. and Hulse, M., "Shape-memory polymers for microelectromechanical systems," *J. Microelectromechanical Syst.*, Vol. 13, No. 3, pp. 472–483, 2004.
- [51] Patil, D. and Song, G., "A review of shape memory material's applications in the offshore oil and gas industry," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 26, No. 9, pp. 58–72, 2017.
- [52] Zhang, J., Wang, C. and Zhang, L., "Deployment of SMP Miura-ori sheet and its application: Aerodynamic drag and RCS reduction," *Chinese J. Aeronaut.*, Vol. 35, No. 8, pp. 121–131, 2022.
- [53] Zarek, M., Layani, M., Cooperstein, I., Sachyani, E., Cohn, D. and Magdassi, S., "3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices," *Adv. Mater.*, Vol. 28, No. 22, pp. 4449–4454, 2016.
- [54] Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A. and Gibson, M. A., "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities," *Mater. Des.*, Vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
- [55] Chopra, I. and Sirohi, J., "Shape Memory Alloys (SMAs)," in *Smart Structures Theory*, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 194–304, 2013.
- [56] Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M. and Ruth, J., "Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—Overview, limits and new ideas," *Mater. Struct.*, Vol. 38, No. 5, pp. 578–592, 2005.
- [57] Chaudhari, R., Vora, J. J. and Parikh, D. M., "A Review on Applications of Nitinol Shape Memory Alloy BT - Recent Advances in Mechanical Infrastructure," in *Proceedings of Recent Advances in Mechanical Infrastructure*, Springer, Singapore, pp. 123–132, 2021.
- [58] Schwartz, M., "Shape Memory Alloys, Applications," in *Smart materials—Encyclopedias*, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 921–936, 2002.
- [59] Uchino, K., "Chapter 1 - The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective", in *Woodhead Publishing in Materials*, K. B. T.-A. P. M. (Second E. Uchino, Red, Woodhead Publishing, pp. 1–92, 2017.
- [60] Aksel, E. and Jones, J. L., "Advances in Lead-Free Piezoelectric Materials for Sensors and Actuators", *Sensors*, Vol 10, No 3. pp. 1935–1954, 2010.
- [61] Olabi, A. G., and Grunwald, A., "Design and application of magnetostrictive materials", *Mater. Des.*, Vol 29, No 2, pp. 469–483, 2008.
- [62] Raviv, D., et al., "Active printed materials for complex self-evolving deformations", *Sci. Rep.*, Vol 4, No 1, pp. 1–8, 2014.
- [63] Ahmed, E. M., "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review," *J. Adv. Res.*, Vol. 6, No. 2, pp. 105–121, 2015.
- [64] Fan, K., et al., "Water-responsive shape memory hybrid: Design concept and demonstration," *Express Polym. Lett.*, Vol. 5, No. 5, pp. 409–416, 2011.
- [65] Mao, Y., et al., "3D Printed Reversible Shape Changing Components with Stimuli Responsive Materials," *Sci. Rep.*, Vol. 6, No. 1, p. 24761, 2016.
- [66] Grubbs, R. B. and Sun, Z., "Shape-changing polymer assemblies," *Chem. Soc. Rev.*, Vol. 42, No. 17, pp. 7436–7445, 2013.
- [67] Beloshenko, V. A., Varyukhin, V. N. and Voznyak, Y. V., "The shape memory effect in polymers," *Usp. Khim.*, Vol. 74, No. 3, pp. 285–306, 2005.
- [68] Lin, C., Liu, L., Liu, Y. and Leng, J., "4D printing of shape memory polybutylene succinate/polylactic acid (PBS/PLA) and its potential applications," *Compos. Struct.*, Vol. 279, p. 114729, 2022.
- [69] Yu, Y., et al., "Material characterization and precise finite element analysis of fiber reinforced thermoplastic composites for 4D
- [28] Precedence research, "3D Printing Market", 2023. <https://www.precedenceresearch.com/3d-printing-market>, available in 1, March 2023.
- [29] Xiao, X., Hu, J., Gui, X. and Qian, K., "Shape memory investigation of α -Keratin Fibers as Multi-Coupled stimuli of responsive Smart Materials," *Polymers*, Vol. 9, No. 3. p. 87, 2017.
- [30] Zheng, Q., Xu, C., Jiang, Z., Zhu, M., Chen, C. and Fu, F., "Smart Actuators Based on External Stimulus Response," *Front. Chem.*, Vol. 9, p. 650538, 2021.
- [31] Zeng, X., et al., "Novel pH-Responsive Smart Fabric: From Switchable Wettability to Controllable On-Demand Oil/Water Separation," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, Vol. 7, No. 1, pp. 368–376, 2019.
- [32] Raza, A., Hayat, U., Rasheed, T., Bilal, M. and Iqbal, H. M. N., "smart' materials-based near-infrared light-responsive drug delivery systems for cancer treatment: A review," *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 1497–1509, 2019.
- [33] Su, M. and Song, Y., "Printable Smart Materials and Devices: Strategies and Applications," *Chem. Rev.*, Vol. 122, No. 5, pp. 5144–5164, 2022.
- [34] Sobczyk, M., Wiesenhütter, S., Noennig, J. R. and Wallmersperger, T., "Smart materials in architecture for actuator and sensor applications: A review," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 33, No. 3, pp. 379–399, 2022.
- [35] Kumar, S., Singh, R., Batish, A. and Singh, T. P., "Additive manufacturing of smart materials exhibiting 4-D properties: A state of art review," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, Vol. 35, No. 9, pp. 1358–1381, 2022.
- [36] Leng, J., Lu, H., Liu, Y., Huang, W. M. and Du, S., "Shape-memory polymers - A class of novel smart materials," *MRS Bull.*, Vol. 34, No. 11, pp. 848–855, 2009.
- [37] Michaud, V., "Can shape memory alloy composites be smart?," *Scr. Mater.*, Vol. 50, No. 2, pp. 249–253, 2004.
- [38] Waghulde, K. B. and Kumar, B., "Vibration analysis of cantilever smart structure by using piezoelectric smart material", *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, Vol 4, No 3, pp. 353–375, 2011.
- [39] Peuzin, J. C., "Magnetostrictive Materials," *Encycl. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 18, No. 4, pp. 5101–5107, 2001.
- [40] Liang, R., Wang, L., Yu, H., Khan, A., Ul Amin, B. and Khan, R. U., "Molecular design, synthesis and biomedical applications of stimuli-responsive shape memory hydrogels", *Eur. Polym. J.*, Vol 114, pp. 380–396, 2019.
- [41] Yarali, E., Baniassadi, M. and Baghani, M., "Numerical homogenization of coiled carbon nanotube reinforced shape memory polymer nanocomposites," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 28, No. 3, p. 035026, 2019.
- [42] Jebellat, E., Baniassadi, M., Moshki, A., Wang, K. and Baghani, M., "Numerical investigation of smart auxetic three-dimensional meta-structures based on shape memory polymers via topology optimization," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 31, No. 15, pp. 1838–1852, 2020.
- [43] Lendlein, A. and Kelch, S., "Shape-memory polymers," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, Vol. 41, No. 12, pp. 2034–2057, 2002.
- [44] Wan, X., He, Y., Liu, Y. and Leng, J., "4D printing of multiple shape memory polymer and nanocomposites with biocompatible, programmable and selectively actuated properties," *Addit. Manuf.*, Vol. 53, p. 102689, 2022.
- [45] Liu, Y., et al., "Microstructural design for enhanced shape memory behavior of 4D printed composites based on carbon nanotube/polylactic acid filament", *Compos. Sci. Technol.*, Vol 181, pp. 107692, 2019.
- [46] Miao, J.-T., et al., "Dynamic Imine Bond-Based Shape Memory Polymers with Permanent Shape Reconfigurability for 4D Printing", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol 11, No 43, pp. 40642–40651, 2019.
- [47] Deng, Y., Zhang, F., Liu, Y., Zhang, S., Yuan, H. and Leng, J., "4D Printed Shape Memory Polyurethane-Based Composite for Bionic Cartilage Scaffolds", *ACS Appl. Polym. Mater.*, Vol 5, No 2, pp. 1283–1292, 2023.

- materials," *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, Vol. 54, No. 14, pp. 1365–1380, 2016.
- [91] Niazy, D., Elsabbagh, A. and Ismail, M. R., "Mono-material 4d printing of digital shape-memory components," *Polymers*, Vol. 13, No. 21, 2021.
- [92] Morgan, N. B., "Medical shape memory alloy applications - The market and its products," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 378, No. 1-2 SPEC. ISS., pp. 16–23, 2004.
- [93] Ly, S. T. and Kim, J. Y., "4D printing – fused deposition modeling printing with thermal-responsive shape memory polymers," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, Vol. 4, No. 3, pp. 267–272, 2017.
- [94] Wu, H., et al., "Selective Laser Sintering-Based 4D Printing of Magnetism-Responsive Grippers," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 13, No. 11, pp. 12679–12688, 2021.
- [95] Andreu, A., et al., "4D printing materials for vat photopolymerization," *Addit. Manuf.*, Vol. 44, p. 102024, 2021.
- [96] Joshi, S., et al., "4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges," *Appl. Mater. Today*, Vol. 18, p. 100490, 2020.
- [97] Akbari, S., Zhang, Y. F., Wang, D. and Ge, Q., "4D Printing and Its Biomedical Applications," in *3D and 4D Printing in Biomedical Applications*, 1st ed., Brighton, pp. 343–372, 2018.
- [98] Singh, S., Singh, G., Prakash, C. and Ramakrishna, S., "Current status and future directions of fused filament fabrication," *J. Manuf. Process.*, Vol. 55, pp. 288–306, 2020.
- [99] Yang, Y., Chen, Y., Wei, Y. and Li, Y., "3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 84, No. 9–12, pp. 2079–2095, 2016.
- [100] Cano-Vicent, A., et al., "Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects," *Addit. Manuf.*, Vol. 47, p. 102378, 2021.
- [101] Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani, M. and Zahedi, A. M., "Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 175, p. 107147, 2019.
- [102] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P. and Badrossamay, M. R., "Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, Vol. 35, No. 12, pp. 2435–2452, 2022.
- [103] Shahkarami, M. and Zeinedini, A., "Flexural Properties of 3D-printed hierarchical-sinusoidal corrugated core sandwich panels with natural fiber reinforced skins," *Polym. Polym. Compos.*, Vol. 30, p. 09673911221101299, 2022.
- [104] Barletta, M., Gisario, A. and Mehropouya, M., "4D printing of shape memory polylactic acid (PLA) components: Investigating the role of the operational parameters in fused deposition modelling (FDM)," *J. Manuf. Process.*, Vol. 61, pp. 473–480, 2021.
- [105] Bodaghi, M., Serjouei, A., Zolfagharian, A., Fotouhi, M., Rahman, H. and Durand, D., "Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 173, p. 105451, 2020.
- [106] Cheng, C. Y., et al., "4D printing of shape memory aliphatic copolyester via UV-assisted FDM strategy for medical protective devices," *Chem. Eng. J.*, Vol. 396, p. 125242, 2020.
- [107] Tahir, M., Rahimzadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K. and Lessard, L., "Experimental and analytical investigation of 3D printed specimens reinforced by different forms of recyclates from wind turbine waste," *Polym. Compos.*, Vol. 42, No. 9, pp. 4533–4548, 2021.
- [108] Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T. and Froyen, L., "Lasers and materials in selective laser sintering," *Assem. Autom.*, Vol. 23, No. 4, pp. 357–371, 2003.
- [109] Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Noroozi, R., Zolfagharian, A. and Bodaghi, M., "4D printing of shape memory polymer composites: A review on fabrication techniques, applications, and future perspectives," *J. Manuf. Process.*, Vol. 81, pp. 759–797, 2022.
- [110] Akbar, I., El Hadrouz, M., El Mansori, M. and Lagoudas, D., printing," *CAD Comput. Aided Des.*, Vol. 122, p. 102817, 2020.
- [70] Koetting, M. C., Peters, J. T., Steichen, S. D. and Peppas, N. A., "Stimulus-responsive hydrogels: Theory, modern advances, and applications," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, Vol. 93, pp. 1–49, 2015.
- [71] Nadgorny, M., Xiao, Z., Chen, C. and Connal, L. A., "Three-Dimensional Printing of pH-Responsive and Functional Polymers on an Affordable Desktop Printer," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 8, No. 42, pp. 28946–28954, 2016.
- [72] Wu, C. Y., Chen, J. R. and Su, C. K., "4D-printed pH sensing claw," *Anal. Chim. Acta*, Vol. 1204, p. 339733, 2022.
- [73] Liu, Q. S., Roux, B. and Velarde, M. G., "Thermocapillary convection in two-layer systems," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 41, No. 11, pp. 1499–1511, 1998.
- [74] Breger, J. C., et al., "Self-folding thermo-magnetically responsive soft microgrippers," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 7, No. 5, pp. 3398–3405, 2015.
- [75] Yu, X., Zhou, S., Zheng, X., Guo, T., Xiao, Y. and Song, B., "A biodegradable shape-memory nanocomposite with excellent magnetism sensitivity," *Nanotechnology*, Vol. 20, No. 23, p. 235702, 2009.
- [76] Zhu, P., Yang, W., Wang, R., Gao, S., Li, B. and Li, Q., "4D Printing of Complex Structures with a Fast Response Time to Magnetic Stimulus," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10, No. 42, pp. 36435–36442, 2018.
- [77] Zhou, Y., et al., "From 3D to 4D printing: approaches and typical applications," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 10, pp. 4281–4288, 2015.
- [78] Liu, X., et al., "Capillary-Force-Driven Self-Assembly of 4D-Printed Microstructures," *Adv. Mater.*, Vol. 33, No. 22, p. 2100332, 2021.
- [79] Grassi, G., Sparman, B. E. and Tibbitts, S., "Material agency and 4d printing," in *Material Balance: A Design Equation*, 1st ed., Springer International Publishing, Milan, pp. 53–63, 2021.
- [80] Kuang, X., Chen, K., Dunn, C. K., Wu, J., Li, V. C. F. and J. Qi, H., "3D Printing of Highly Stretchable, Shape-Memory, and Self-Healing Elastomer toward Novel 4D Printing," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10, No. 8, pp. 7381–7388, 2018.
- [81] Tibbitts, S., "4D Printing: Multi-Material Shape Change," *Archit. Des.*, Vol. 81, No. 1, pp. 116–121, 2014.
- [82] Zhao, W., Li, N., Liu, L., Leng, J. and Liu, Y., "Origami derived self-assembly stents fabricated via 4D printing," *Compos. Struct.*, Vol. 293, p. 115669, 2022.
- [83] Van Manen, T., Janbaz, S., Jansen, K. M. B. and Zadpoor, A. A., "4D printing of reconfigurable metamaterials and devices," *Commun. Mater.*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–8, 2021.
- [84] Zeng, S., Gao, Y., Tan, J. and Wei, Z., "Self-Assembly by 4D Printing: Design and Fabrication of Sequential Self-Folding," in *Proceedings of ASME 2022 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, American Society of Mechanical Engineers, p. V001T03A005, 2022.
- [85] Zhao, W., Yue, C., Liu, L., Liu, Y. and Leng, J., "Research progress of shape memory polymer and 4D printing in biomedical application," *Adv. Healthc. Mater.*, Vol. n/a, No. n/a, p. 2201975, 2022.
- [86] Invernizzi, M., Turri, S., Levi, M. and Suriano, R., "4D printed thermally activated self-healing and shape memory polycaprolactone-based polymers," *Eur. Polym. J.*, Vol. 101, pp. 169–176, 2018.
- [87] Bauer, S., Bauer-Gogonea, S., Graz, I., Kaltenbrunner, M., Keplinger, C. and Schwödiauer, R., "25th anniversary article: A soft future: From robots and sensor skin to energy harvesters," *Adv. Mater.*, Vol. 26, No. 1, pp. 149–162, 2014.
- [88] Rafiee, M., Farahani, R. D. and Theriault, D., "Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey," *Adv. Sci.*, Vol. 7, No. 12, p. 1902307, 2020.
- [89] Hager, M. D., Bode, S., Weber, C. and Schubert, U. S., "Shape memory polymers: Past, present and future developments," *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 49–50, pp. 3–33, 2015.
- [90] Zhou, J. and Sheiko, S. S., "Reversible shape-shifting in polymeric

- Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., Vol 171, p. 107584, 2023.
- [131] Skylar-Scott, M. A., Gunasekaran, S. and Lewis, J. A., "Laser-assisted direct ink writing of planar and 3D metal architectures," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, Vol. 113, No. 22, pp. 6137–6142, 2016.
- [132] Fu, K., et al., "Graphene Oxide-Based Electrode Inks for 3D-Printed Lithium-Ion Batteries," *Adv. Mater.*, Vol. 28, No. 13, pp. 2587–2594, 2016.
- [133] Revelo, C. F. and Colorado, H. A., "3D printing of kaolinite clay ceramics using the Direct Ink Writing (DIW) technique," *Ceram. Int.*, Vol. 44, No. 5, pp. 5673–5682, 2018.
- [134] Xu, C., Quinn, B., Lebel, L. L., Theriault, D. and L'espérance, G., "Multi-Material Direct Ink Writing (DIW) for Complex 3D Metallic Structures with Removable Supports," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 11, No. 8, pp. 8499–8506, 2019.
- [135] Lewis, J. A., "Direct ink writing of 3D functional materials," *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 16, No. 17, pp. 2193–2204, 2006.
- [136] Lewis, J. A. and Gratson, G. M., "Direct writing in three dimensions," *Mater. Today*, Vol. 7, No. 7, pp. 32–39, 2004.
- [137] Wan, X., Luo, L., Liu, Y. and Leng, J., "Direct Ink Writing Based 4D Printing of Materials and Their Applications," *Adv. Sci.*, Vol. 7, No. 16, p. 2001000, 2020.
- [138] Mu, Q., Dunn, C. K., Wang, L., Dunn, M. L., Qi, H. J. and Wang, T., "Thermal cure effects on electromechanical properties of conductive wires by direct ink write for 4D printing and soft machines," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 26, No. 4, p. 45008, 2017.
- [139] Peng, X., et al., "4D Printing of Freestanding Liquid Crystal Elastomers via Hybrid Additive Manufacturing," *Adv. Mater.*, Vol. 34, No. 39, p. 2204890, 2022.
- [140] Weng, S., et al., "4D Printing of Glass Fiber-Regulated Shape Shifting Structures with High Stiffness," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 13, No. 11, pp. 12797–12804, 2021.
- [141] Bodaghi, M., Damanpack, A. R. and Liao, W. H., "Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing," *Mater. Des.*, Vol. 135, pp. 26–36, 2017.
- [142] Bodaghi, M., Noroozi, R., Zolfagharian, A., Fotouhi, M. and Norouzi, S., "4D printing self-morphing structures," *Materials (Basel)*, Vol. 12, No. 8, 2019.
- [143] Jamshidi, M., Salimi Nezhad, I., Golzar, M. and Behraves, A. H., "Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting of flat structures to Three-Dimensional Shapes," In Persian, *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 7, No. 4, pp. 1271–1278, 2021.
- [144] Hosseinzadeh, M., Ghoreishi, M. and Narooei, K., "Investigation of the Effect of 3D Printing Parameters on the Bending Shape Recovery in 4D Printing Process," In Persian, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 22, No. 9, pp. 567–577, 2022.
- [145] Rajkumar, A. R. and Shanmugam, K., "Additive manufacturing-enabled shape transformations via FFF 4D printing," *J. Mater. Res.*, Vol. 33, No. 24, pp. 4362–4376, 2018.
- [146] Aberoumand, M., et al., "A comprehensive experimental investigation on 4D printing of PET-G under bending," *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 18, pp. 2552–2569, 2022.
- [147] Tezerjani, S. M. D., Yazdi, M. S. and Hosseinzadeh, M. H., "The effect of 3D printing parameters on the shape memory properties of 4D printed polylactic acid circular disks: An experimental investigation and parameters optimization," *Mater. Today Commun.*, Vol. 33, p. 104262, 2022.
- [148] Wang, J., Wang, Z., Song, Z., Ren, L., Liu, Q. and Ren, L., "Programming Multistage Shape Memory and Variable Recovery Force with 4D Printing Parameters," *Adv. Mater. Technol.*, Vol. 4, No. 11, p. 1900535, 2019.
- [149] Van Manen, T., Janbaz, S. and Zadpoor, A. A., "Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers," *Mater. Horizons*, Vol. 4, No. 6, pp. 1064–1069, 2017.
- [150] Liu, T., Liu, L., Zeng, C., Liu, Y. and Leng, J., "4D printed anisotropic structures with tailored mechanical behaviors and shape memory effects," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 186, p. 107935, 2020.
- [151] Garcia, C. R., et al., "3D printing of anisotropic metamaterials," *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, Vol. 34, No. PIERL12070311, pp. "Toward enabling manufacturing paradigm of 4D printing of shape memory materials: Open literature review," *Eur. Polym. J.*, Vol. 168, p. 111106, 2022.
- [111] Makvandi, P., et al., "Bioinspired microneedle patches: Biomimetic designs, fabrication, and biomedical applications," *Matter*, Vol. 5, No. 2, pp. 390–429, 2022.
- [112] Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S. and Basit, A. W., "Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines," *Int. J. Pharm.*, Vol. 529, No. 1–2, pp. 285–293, 2017.
- [113] Yang, D., et al., "3D/4D printed tunable electrical metamaterials with more sophisticated structures," *J. Mater. Chem. C*, Vol. 9, No. 36, pp. 12010–12036, 2021.
- [114] Ouyang, H., Li, X., Lu, X. and Xia, H., "Selective Laser Sintering 4D Printing of Dynamic Cross-linked Polyurethane Containing Diels-Alder Bonds," *ACS Appl. Polym. Mater.*, Vol. 4, No. 5, pp. 4035–4046, 2022.
- [115] Ploszajski, A. R., Jackson, R., Ransley, M. and Miodownik, M., "4D Printing of Magnetically Functionalized Chainmail for Exoskeletal Biomedical Applications," *MRS Adv.*, Vol. 4, No. 23, pp. 1361–1366, 2019.
- [116] Al Rashid, A., Ahmed, W., Khalid, M. Y. and Koç, M., "Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications," *Addit. Manuf.*, Vol. 47, p. 102279, 2021.
- [117] Davoudinejad, A., et al., "Additive manufacturing with vat polymerization method for precision polymer micro components production," *Procedia CIRP*, Vol. 75, pp. 98–102, 2018.
- [118] Ng, W. L., et al., "Vat polymerization-based bioprinting - process, materials, applications and regulatory challenges," *Biofabrication*, Vol. 12, No. 2, p. 22001, 2020.
- [119] Tang, T., Alfharhan, S., Jin, K. and Li, X., "4D Printing of Seed Capsule-Inspired Hygro-Responsive Structures via Liquid Crystal Templating-Assisted Vat Photopolymerization," *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 33, No. 5, p. 2211602, 2023.
- [120] Fang, Z., Lu, R., Chen, J., Zhao, Q. and Wu, J., "Vat photopolymerization of tough glassy polymers with multiple shape memory performances," *Addit. Manuf.*, Vol. 59, p. 103171, 2022.
- [121] Xu, X., Robles-Martinez, P., Madla, C. M., Joubert, F., Goyanes, A., Basit, A. W. and Gaisford, S., "Stereolithography (SLA) 3D printing of an antihypertensive polyprintlet: Case study of an unexpected photopolymer-drug reaction," *Addit. Manuf.*, Vol. 33, p. 101071, 2020.
- [122] Sun, C., Fang, N., Wu, D. M. and Zhang, X., "Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask," *Sensors Actuators, A Phys.*, Vol. 121, No. 1, pp. 113–120, 2005.
- [123] Pagac, M., et al., "A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing," *Polymers*, Vol. 13, No. 4, pp. 1–20, 2021.
- [124] Choong, Y. Y. C., Maleksaeedi, S., Eng, H., Wei, J. and Su, P. C., "4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography," *Mater. Des.*, Vol. 126, pp. 219–225, 2017.
- [125] Zhao, T., et al., "4D printing of shape memory polyurethane via stereolithography," *Eur. Polym. J.*, Vol. 101, pp. 120–126, 2018.
- [126] Miao, S., et al., "Stereolithographic 4D Bioprinting of Multiresponsive Architectures for Neural Engineering," *Adv. Biosyst.*, Vol. 2, No. 9, p. 1800101, 2018.
- [127] Shahzad, A. and Lazoglu, I., "Direct ink writing (DIW) of structural and functional ceramics: Recent achievements and future challenges," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 225, p. 109249, 2021.
- [128] Lewis, J. A., Smay, J. E., Stuecker, J. and Cesarano, J., "Direct ink writing of three-dimensional ceramic structures," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 89, No. 12, pp. 3599–3609, 2006.
- [129] Aw, J. E., et al., "Self-Regulative Direct Ink Writing of Frontally Polymerizing Thermoset Polymers," *Adv. Mater. Technol.*, Vol. 7, No. 9, p. 2200230, 2022.
- [130] Mahshid, R., Isfahani, M. N., Heidari-Rarani, M. and Mirkhalaf, M., "Recent advances in development of additively manufactured thermosets and fiber reinforced thermosetting composites: Technologies, materials, and mechanical properties",

- https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Printing_bricks_from_moon dust_using_the_Sun_s_heat, available in 5, March 2017.
- [173] Ishizawa, J., "Research on Application of Shape Memory Polymers to Space Inflatable Systems," Proceeding 7th Int. Symp. Artif. Intell. Robot. Autom. Sp., Vol. 400, pp. 1-4, 2003.
- [174] Hinkle, J., Lin, J. H. K. and Kling, D., "Design and materials study on secondary structures in deployable planetary and space habitats," in Proceedings of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 13t, Denver, pp. 2011-2024, 2011.
- [175] Carlota, V., "How will 4D printing disrupt our current manufacturing techniques?," <https://www.3dnatives.com/en/4d-printing-disrupting-current-manufacturing-techniques-230920194/#!> (accessed Sep. 23, 2019), available in 23, September 2019.
- [176] Baba, Z. U., Shafi, W. K., Haq, M. I. U. and Raina, A., "Towards sustainable automobiles-advancements and challenges," Prog. Ind. Ecol., Vol. 13, No. 4, pp. 315-331, 2019.
- [177] Xavier, M. S., et al., "Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications," IEEE Access, Vol. 10, pp. 59442-59485, 2022.
- [178] Adam, G., Benouhiba, A., Rabenorosoa, K., Clévy, C. and J. Cappelleri, D., "4D Printing: Enabling Technology for Microrobotics Applications," Adv. Intell. Syst., Vol. 3, No. 5, p. 2000216, 2021.
- [179] Zarek, M., Layani, M., Cooperstein, I., Sachyani, E., Cohn, D. and Magdassi, S., "3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices," Adv. Mater., Vol. 28, No. 22, pp. 4449-4454, 2016.
- [180] Phuhongsung, P., Zhang, M. and Bhandari, B., "4D printing of products based on soy protein isolate via microwave heating for flavor development," Food Res. Int., Vol. 137, p. 109605, 2020.
- [181] Oladapo, B. I., Adebisi, A. V. and Ifeoluwa Elemure, E., "Microstructural 4D printing investigation of ultra-sonication biocomposite polymer," J. King Saud Univ. - Eng. Sci., Vol. 33, No. 1, pp. 54-60, 2021.
- 75-82, 2012.
- [152] Alshebbly, Y. S., et al., "Variable stiffness 4D printing," in Smart Materials in Additive Manufacturing, volume 2: 4D Printing Mechanics, Modeling, and Advanced Engineering Applications, Elsevier, pp. 407-433, 2022.
- [153] Nam, S. and Pei, E., "The influence of shape changing behaviors from 4D printing through material extrusion print patterns and infill densities," Materials, Vol. 13, No. 17, p. 3754, 2020.
- [154] Goo, B., Hong, C. H. and Park, K., "4D printing using anisotropic thermal deformation of 3D-printed thermoplastic parts," Mater. Des., Vol. 188, p. 108485, 2020.
- [155] Wu, W., et al., "Metallic 4D Printing of Laser Stimulation," Adv. Sci., Vol. n/a, No. n/a, p. 2206486, 2023.
- [156] He, W., et al., "A Biocompatible 4D Printing Shape Memory Polymer as Emerging Strategy for Fabrication of Deployable Medical Devices," Macromol. Rapid Commun., Vol. 44, No. 2, p. 2200553, 2023.
- [157] Raina, A., Haq, M. I. U., Javaid, M., Rab, S. and Haleem, A., "4D Printing for Automotive Industry Applications," J. Inst. Eng. Ser. D, Vol. 102, No. 2, pp. 521-529, 2021.
- [158] Jiang, Y., et al., "Recent Advances in 3D Printed Sensors: Materials, Design, and Manufacturing," Adv. Mater. Technol., Vol. 8, No. 2, p. 2200492, 2023.
- [159] Wang, W., Liu, Y. and Leng, J., "Recent developments in shape memory polymer nanocomposites: Actuation methods and mechanisms," Coord. Chem. Rev., Vol. 320-321, pp. 38-52, 2016.
- [160] Serrano, M. C. and Ameer, G. A., "Recent insights into the biomedical applications of shape-memory polymers," Macromol. Biosci., Vol. 12, No. 9, pp. 1156-1171, 2012.
- [161] Shakibania, S., Ghazanfari, L., Raeeszadeh-Sarmazdeh, M. and Khakbiz, M., "Medical application of biomimetic 4D printing," Drug Dev. Ind. Pharm., Vol. 47, No. 4, pp. 521-534, 2021.
- [162] Zhou, Y., et al., "4D Printing of Shape Memory Vascular Stent Based on β CD-g-Polycaprolactone," Macromol. Rapid Commun., Vol. 42, No. 14, p. 2100176, 2021.
- [163] Lin, C., Zhang, L. J., Liu, Y. J., Liu, L. W. and Leng, J. S., "4D printing of personalized shape memory polymer vascular stents with negative Poisson's ratio structure: A preliminary study," Sci. China Technol. Sci., Vol. 63, No. 4, pp. 578-588, 2020.
- [164] Small, W., et al., "Shape memory polymer stent with expandable foam: A new concept for endovascular embolization of fusiform aneurysms," IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. 54, No. 6, pp. 1157-1160, 2007.
- [165] Yakacki, C. M., Shandas, R., Lanning, C., Rech, B., Eckstein, A. and Gall, K., "Unconstrained recovery characterization of shape-memory polymer networks for cardiovascular applications," Biomaterials, Vol. 28, No. 14, pp. 2255-2263, 2007.
- [166] Ge, Q., Sakhaei, A. H., Lee, H., Dunn, C. K., Fang, N. X. and Dunn, M. L., "Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers," Sci. Rep., Vol. 6, No. 1, p. 31110, 2016.
- [167] Zhang, F., Wen, N., Wang, L., Bai, Y. and Leng, J., "Design of 4D printed shape-changing tracheal stent and remote controlling actuation," Int. J. Smart Nano Mater., Vol. 12, No. 4, pp. 375-389, 2021.
- [168] Kumari, G., et al., "A voyage from 3D to 4D printing in nanomedicine and healthcare: Part II," Nanomedicine, Vol. 17, No. 4, pp. 255-270, 2022.
- [169] Osouli-Bostanabad, K., et al., "Traction of 3D and 4D Printing in the Healthcare Industry: From Drug Delivery and Analysis to Regenerative Medicine," ACS Biomater. Sci. Eng., Vol. 8, No. 7, pp. 2764-2797, 2022.
- [170] Ding, H., Zhang, X., Liu, Y. and Ramakrishna, S., "Review of mechanisms and deformation behaviors in 4D printing," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 105, No. 11, pp. 4633-4649, 2019.
- [171] Miao, S., et al., "4D printing smart biomedical scaffolds with novel soybean oil epoxidized acrylate," Sci. Rep., Vol. 6, No. 1, p. 27226, 2016.
- [172] Agency, E. S., "Printing bricks from moon dust using the Sun's heat,"



ساخت پنل ساندویچی با رویه کامپوزیتی الیاف شیشه/وینیل استر و هسته پلی وینیل-کلراید (PVC) مشبک به روش تزریق در خلأ (VIP) برای کاربردهای دریایی

طیبه اکبری¹، الهام شهابی قهفرخی^{2*}، سید حسین تقویان¹، مسلم نجفی²، سجاد مهدوی³

1- پژوهشگر، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

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

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/02/05

پذیرش: 1402/04/20

کلیدواژگان

پنل ساندویچی،

فرایند تزریق در خلأ،

فوم شیاردار،

کاربرد دریایی کامپوزیت ها

چکیده

در تحقیق حاضر روشی بر اساس فرایند تزریق در خلأ برای ساخت پنل های ساندویچی مورد استفاده در صنایع دریایی پیشنهاد شده است. خواص مکانیکی محصول ساخته شده با این روش نسبت به روش ساخت سنتی تر یعنی روش اتصال چسبی بهبود قابل اعتنا یی یافته و در عین حال از نقطه نظر اقتصادی نیز به کارگیری این روش مقرون به صرفه است. در این روش ساخت، رویه ها و اتصال آن ها به هسته در یک مرحله انجام می پذیرد که مزایایی همچون کاهش هزینه ساخت، افزایش سرعت تولید و ارتقای کیفیت اتصال رویه به هسته را در پی دارد. با توجه به کاربرد مدنظر یعنی کاربرد در صنایع دریایی، هسته از جنس فوم PVC (پلی وینیل-کلراید) شیاردار و رویه ها از جنس الیاف شیشه/وینیل استر انتخاب شده اند که موادی شناخته شده در صنایع دریایی هستند. خواص مکانیکی پنل ساندویچی ساخته شده با روش پیشنهادی در دو نوع بارگذاری خمشی و فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در محصول ساخته شده با روش پیشنهادی، استحکام خمشی 78%، استحکام فشاری 92% و جذب انرژی 101% نسبت به پنل ساندویچی ساخته شده با اتصال چسبی افزایش یافته است. عامل اصلی در بهبود خواص مکانیکی در این محصول، ایجاد شبکه ای از رزین در فضای خالی شیارهاست که ساختاری مشابه با هسته لانه زنبوری پر شده با فوم را به وجود آورده و باعث تقویت هسته، به ویژه در جهت ضخامت می شود

Fabrication of sandwich panels with glass/vinylester composite face-sheets and polyvinyl chloride (PVC) lattice core using vacuum infusion process for marine applications

Tayebeh Akbari¹, Elham Shahabi-Ghahfarokhi^{1*}, Seyed Hosein Taghavian¹, Moslem Najafi, Sajjad Mahdavi¹

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

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

Keywords

Sandwich panel,
Vacuum infusion process,
Grooved foam,
Marine application of composites

Abstract

In this research, a method based on the vacuum infusion process is proposed for making sandwich panels used in the marine industry. The mechanical properties of the product made with this method have been significantly improved compared to the adhesive bonding method, and also from an economic point of view, it's cost-effective to use this method. In this method, the construction of face-sheets and their adhesion to the core is done in a single step, which results in some benefits such as reducing construction costs, increasing the production speed and improving the quality of the face-sheets adhesion to the core. According to the intended application, i.e. application in the marine industry, the core is made of grooved polyvinyl chloride (PVC) foam and the face-sheets are made of glass/vinyl ester, which are well-known materials in the marine industry. The mechanical properties of the sandwich panel made by the proposed method have been investigated in both bending and compression loading. The results indicate that in the product made with the proposed method, the bending strength has increased by 78%, the compressive strength has increased by 92%, and the energy absorption has increased by 101% compared to the sandwich panel made by adhesive bonding method. The main factor in improving the mechanical properties of this product is the creation of a network of resin in the empty space of the grooves, which creates a structure similar to the foam filled honeycomb cores and strengthens the core, especially in the thickness direction.

1- مقدمه

پنل‌های ساندویچی از لحاظ معماری مشابه تیرهای I-شکل هستند که برای تحمل بارگذاری خمشی طراحی شده‌اند. قاعده حاکم بر این طراحی آن است که رویه‌ها مستحکم‌تر انتخاب شده و با فاصله گرفتن از صفحه میانی همانند بال تیر، تنش‌های عمودی ناشی از خمش را تحمل می‌کنند. هسته معمولاً استحکام کمتری داشته و همانند جان تیر وظیفه نگه‌داشتن رویه‌ها و نیز انتقال تنش‌های برشی ناشی از خمش را به عهده دارد. این طراحی هدفمند باعث می‌شود پنل‌های ساندویچی در تحمل بارهای خمشی بازده وزنی بالایی داشته و برای مقاصد سبک‌سازی مورد توجه قرار گیرند.

خواص مکانیکی یک پنل ساندویچی به خواص مکانیکی اجزای سازنده یعنی رویه و هسته، فاصله دو رویه از یکدیگر و کیفیت اتصال بین رویه و هسته وابسته است. بسته به کاربرد، رویه می‌تواند از جنس فلز یا چندلایه‌های کامپوزیتی باشد. هسته نیز انواع مختلفی دارد که متداول‌ترین آن‌ها هسته‌های فومی و لانه‌زنبوری هستند. ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری نسبت به هسته فومی عملکرد بهتری دارند اما قیمت تمام‌شده آن‌ها بالاتر است. در جهت ارتقای عملکرد هسته، نوآوری‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به هسته‌های لانه‌زنبوری پر شده با فوم¹ [3-1]، هسته‌های مشبک² [4-6]، هسته‌های چین‌دار³ [7-9]، هسته‌های پین‌دار⁴ [10,11] و هسته‌های متخلخل⁵ [12,13] اشاره نمود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ساختار هسته تأثیر قابل توجهی بر خواص نهایی ساختار ساندویچی دارد. به‌عنوان مثال یان و همکاران [14] پنل ساندویچی با رویه آلومینیومی و هسته چین‌دار زیگزاگ آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده و دریافتند ظرفیت تحمل بار و جذب انرژی نسبت به حالتی که هسته چین‌دار یا فوم آلومینیومی به‌تنهایی استفاده شوند به‌مراتب بیشتر است. ویو و همکاران [15] ظرفیت تحمل فشار خارج صفحه پنل ساندویچی با هسته مشبک پر شده با فوم را بررسی کرده و مشاهده کردند که بیشینه بار وارده نسبت به هسته فومی شانزده برابر بیشتر است. روش کار در این تحقیق به این صورت بوده است که بلوک‌های فوم ابتدا در پارچه از جنس الیاف شیشه با زاویه $\pm 45^\circ$ پیچیده شده‌اند. سپس بلوک‌ها بر روی لایه‌چینی مربوط به رویه زیرین پنل ساندویچی در کنار هم قرار گرفته و لایه‌چینی رویه بالایی پنل ساندویچی بر روی آن انجام شده و عملیات تزریق صورت گرفته است.

در سال‌های اخیر توسعه ساختارهای جدیدتری مانند هسته آگزتیک⁶ [16-18]، هسته سیال هوشمند مگنتورئولوژیکال [19] و هسته هیبرید [20] برای ارتقای عملکرد پنل‌های ساندویچی توجه محققان را به خود جلب کرده است. اما به‌کارگیری طرح‌های نوآورانه معمولاً با پیچیدگی بیشتر در ساخت هسته و افزایش قیمت تمام‌شده محصول همراه است که کاربرد آن را برای صنایع با فناوری متوسط محدود می‌کند. در بین انواع ایده‌های نوآورانه، ایده‌هایی در عمل کاربردی و عملیاتی خواهند شد که هزینه پیاده‌سازی آن از دید اقتصادی توجیه‌پذیر داشته باشد.

یک عامل تأثیرگذار بر قیمت تمام‌شده محصول، روش ساخت آن است. روش‌های مختلفی برای ساخت ساختارهای ساندویچی، بسته به جنس اجزای تشکیل‌دهنده و کاربرد مورد نظر وجود دارد. از جمله روش‌های ساخت رایج

⁷ Wet hand layup

⁸ Liquid molding

⁹ Adhesive bonding

¹⁰ Vacuum infusion process

¹¹ Vacuum-assisted resin transfer molding

¹² Polyvinyl chloride

¹ Foam filled honeycomb

² Lattice

³ Corrugated

⁴ Pin-reinforced

⁵ Porous

⁶ Auxetic

جدول 1 خواص اصلی اجزای تشکیل دهنده پنل ساندویچی

Table 1 The main properties of sandwich panel components

واحد	کمیت
60 GPa	مدول الاستیک الیاف شیشه
30 GPa	مدول برشی الیاف شیشه
0.23	ضریب پواسون الیاف شیشه
3 GPa	مدول الاستیک فوم PVC
3.5 MPa	استحکام تسلیم فشاری فوم PVC
2500 MPa	مدول الاستیک وینیل استر
1.004 g/cm ³	چگالی وینیل استر
350 cps	گرانروی وینیل استر
30 min	زمان ژل شدن وینیل استر

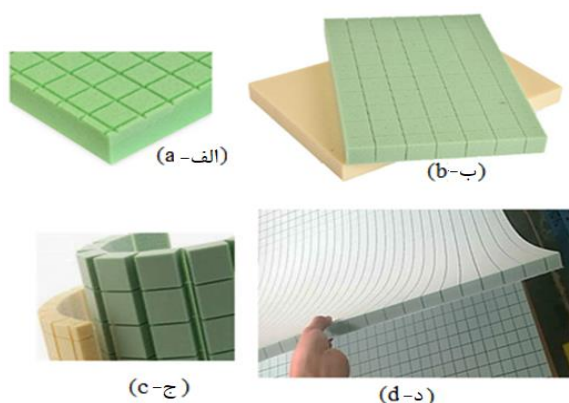


Fig. 1 Cross-grooved PVC foams, (a) shallow grooves, (b) through thickness grooves, (c) desired convex curvature in through thickness grooved foam and (d) finite concave curvature in through thickness grooved foam

شکل 1 فوم های PVC شیاردار، (الف) شیار کم عمق، (ب) شیار تمام عمق، (ج) انحنای محدب در فوم با شیار تمام عمق و (د) انحنای مقعر در فوم با شیار تمام عمق

در تحقیق حاضر فوم PVC با ضخامت 25 mm با شیارهای تمام عمق به ضخامت 1 mm استفاده شده است. فاصله شیارهای از یکدیگر 30 mm بوده و بنابراین بلوک های ایجاد شده مکعب هایی با طول اضلاع 30×30×25mm هستند.

2-2- ساخت پنل ساندویچی به روش تزریق در خلأ

ساخت پنل ساندویچی به روش تزریق در خلأ روشی کارآمد و محبوب است زیرا با وجود آن که تجهیزات پیچیده و پرهزینه ای ندارد اما خواص مکانیکی مناسبی در اثر اعمال خلأ در حین فرایند به دست می آید. علاوه بر خواص مکانیکی مناسب، از دیگر مزایای روش تزریق در خلأ می توان کاهش بخار مواد شیمیایی در فضای کارگاهی به ویژه هنگام کار با رزین وینیل استر که بوی قوی دارد، پاکیزگی محیط کار به دلیل محبوس بودن رزین در درون کیسه خلأ و کمتر بودن هزینه ها نسبت به فرایندهای دو قالبی³ را برشمرد.

مراحل اجرای فرایند تزریق در خلأ در کار حاضر به این صورت بوده است که سطح قالبی شیشه ای سه مرتبه با واکس جداکننده پوشش داده شده و هر بار پانزده دقیقه زمان داده می شود تا واکس خشک شود. سپس بر روی قالب به ترتیب سه لایه تنفس و یک لایه جداکننده مطابق شکل ۲ قرار داده می شود. ترتیب قرارگیری اجزای تشکیل دهنده پنل ساندویچی بر روی لایه جداکننده در شکل ۳ نشان داده شده است.

از روش حاضر از یک سو بهبود خواص مکانیکی و از سوی دیگر کاهش هزینه ماشینکاری، کاهش هزینه اپراتور و سرعت عمل در ساخت را در پی خواهد داشت که از حیث کاربردی مزیت مهمی به شمار می رود.

2-مواد و روش ساخت

1-2- مواد مورد استفاده در ساخت پنل ساندویچی

انتخاب نوع ماده برای اجزای تشکیل دهنده پنل ساندویچی بر اساس کاربرد مورد نظر یعنی کاربردهای دریایی صورت گرفته است. بر این اساس رویه ها از جنس الیاف شیشه/وینیل استر و هسته از نوع فوم PVC انتخاب شده است. رویه ها متشکل از چهار لایه نمد شیشه سوزنی (CSM¹) هستند که به لحاظ اقتصادی برای ساخت سازه های دریایی مناسب هستند. زنجیره مولکولی در وینیل استر به گونه ای است که در برابر نفوذ آب مقاوم است. خاصیت ضد آب بودن همراه با پایداری شیمیایی بالا و استحکام کششی مناسب باعث شده است تا رزین وینیل استر در کاربردهای دریایی جایگاه ویژه ای داشته باشد [20]. این رزین نسبت به رزین های اپوکسی و پلی استر گرانروی کمتری داشته و از این حیث برای فرایند تزریق گزینه مناسبی است. در تحقیق حاضر رزین وینیل استر به دلیل کاربرد دریایی و مناسب بودن برای فرایند تزریق در خلأ انتخاب شده است.

فوم های PVC از جمله هسته های رایج در کاربردهای دریایی بوده و با چگالی های متنوع در دسترس هستند. این نوع فوم از خواص مکانیکی خوبی برخوردار بوده و جذب آب در آن به دلیل ساختار سلول بسته آن پایین است. این ویژگی ها باعث شده است تا فوم های PVC گزینه جذابی در ساخت سازه های ساندویچی دریایی باشند [20]. ساختار سلول بسته در این نوع فوم از یک سو مزیت پایین بودن جذب آب را در آن به همراه می آورد، اما از طرف دیگر باعث می شود تا جذب چسب های مایع نیز در آن پایین بوده و موجب ضعف اتصال چسبی رویه به هسته خواهد شد. در سازه شناورها که به طور طبیعی در معرض بارهای تکرار شونده ناشی از کوبش امواج² هستند جدایش رویه از هسته، مود شکست رایجی است که نقطه ضعفی برای این نوع هسته های فومی محسوب شده و می بایست به گونه ای مرتفع گردد. استفاده از روش تزریق در خلأ در پژوهش حاضر، راهکاری در جهت بهبود کیفیت اتصال رویه به هسته PVC و به تعویق انداختن جدایش پوسته از هسته است.

برخی خواص اصلی الیاف شیشه، فوم PVC و رزین وینیل استر در جدول 1 ذکر شده است. گرانروی و زمان ژل شدن رزین وینیل استر مربوط به دمای اتاق یعنی در حدود 20°C می باشد. الیاف و رزین مورد استفاده از شرکت PMP تهیه شده اند.

فوم های PVC را می توان به راحتی برش زده و مانند شکل 1 شیارهایی به ضخامت دلخواه در آن ایجاد نمود. شیارهای ایجاد شده ممکن است مطابق شکل 1-الف (a) کم عمق و یا مطابق شکل 1-ب (b) تمام عمق باشند. در ایجاد شیارهای تمام عمق برای آنکه بلوک ها از هم جدا نشوند معمولاً پارچه یا اصطلاحاً مش نازکی را پیش از برش زدن فوم، به سطح زیرین آن چسبانده و پس از آن برشکاری انجام می شود. مزیت فوم های دارای برش تمام عمق نسبت به فوم های دارای شیار کم عمق آن است که در فوم با شیار تمام عمق، ایجاد انحنای محدب تا حد دلخواه مطابق شکل 1-ج (c) و ایجاد انحنای مقعر به صورت محدود (بسته به ضخامت شیار و تا تماس یافتن بلوک ها با یکدیگر) مطابق شکل 1-د (d) امکان پذیر خواهد بود.

¹ Chopped Strand Mat

² Slamming

³ Two-sided mold processes

بر روی قطعه کشیدگی و در نتیجه نازک شدگی در آن ایجاد نشود. در این مرحله مطابق شکل 4 پیش‌فرم تحت خلأ قرار گرفته و هوای داخل کیسه تخلیه می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با اعمال خلأ، اضافه کیسه به‌صورت چین‌خوردگی جمع شده و مزاحمتی ایجاد نخواهد کرد.

اعمال خلأ پیش از شروع تزریق با خارج کردن هوا از پیش‌فرم باعث می‌شود رویه‌ها تحت فشار اتمسفر فشرده‌تر شده و کسر حجمی الیاف در رویه‌ها بالاتر رود. همچنین فشار اتمسفر باعث می‌شود رویه‌های خشک، به‌خوبی ناهمواری‌های احتمالی موجود بر روی سطح هسته را پوشش داده و سطح تماس رویه با هسته افزایش یابد. افزایش سطح تماس از یک سو و به حداقل رسیدن احتمال تشکیل حباب در قطعه و به‌ویژه در محل اتصال هسته به پوسته از سوی دیگر باعث می‌شود تا اتصال پوسته و هسته با کیفیت مناسبی صورت پذیرد. به‌طور خاص در ساخت پل‌های ساندویچی با هسته‌های فومی سلول‌بسته که زیرآیندهای مناسبی در اتصال‌های چسبی نیستند، بهبود اتصال رویه به هسته مزیتی حائز اهمیت به شمار می‌رود.

چالش اصلی در به‌کارگیری روش تزریق در خلأ، انتخاب بهینه محل ورود و خروج رزین و محاسبه مسیر جریان رزین بر اساس آن به‌گونه‌ای است که ترشوندگی در همه نقاط قطعه‌کار و در کوتاه‌ترین زمان ممکن (تا پیش از ژله‌ای شدن رزین) صورت پذیرد. اگر هسته پل ساندویچی از نوع شیاردار باشد، هندسه شیارها نیز در روند انجام فرایند تزریق تأثیرگذار بوده و به متغیرهای طراحی افزوده می‌شود. در تحقیق حاضر ابعاد داخل صفحه نمونه پل ساندویچی ساخته‌شده 433×371 mm بوده است. شکل 5 نحوه نفوذ رزین در پیش‌فرم و روند خیس شدن رویه بالایی پل ساندویچی را در چند مقطع زمانی نشان می‌دهد. برای کوتاه‌تر کردن زمان تزریق، لوله‌های مارپیچ⁴ ورودی و خروجی رزین به‌موازات دو ضلع طولی پل تعبیه شده‌اند و به این ترتیب رزین در مسافت بین این دو در راستای عرض پل مطابق شکل 5-الف (a) جریان می‌یابد. همان‌طور که در شکل 5-ب (b) دیده می‌شود ابتدا محل شیارها در اطراف هر بلوک خیس شده و مرکز بلوک با قدری تأخیر زمانی خیس می‌شوند. هر اندازه ابعاد بلوک‌ها بزرگ‌تر باشد ترشوندگی مرکز بلوک با تأخیر بیشتری صورت گرفته و به زمان موردنیاز برای تکمیل فرایند افزوده می‌شود.



Fig. 4 Air evacuation from the preform by applying vacuum
شکل 4 تخلیه هوا از پیش‌فرم با اعمال خلأ

نکته قابل توجه دیگر، شیب‌دار بودن جبهه پیشروی رزین در مقطع پل در مراحل میانی فرایند مطابق شکل 5-الف (a) و شکل 5-ب (b) است که

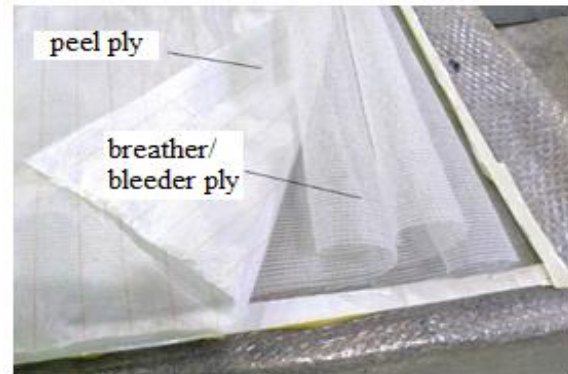


Fig. 2 Placing peel ply and breather plies over the glass mold

شکل 2 قرارگیری لایه جداکننده و لایه تنفس بر روی قالب شیشه‌ای

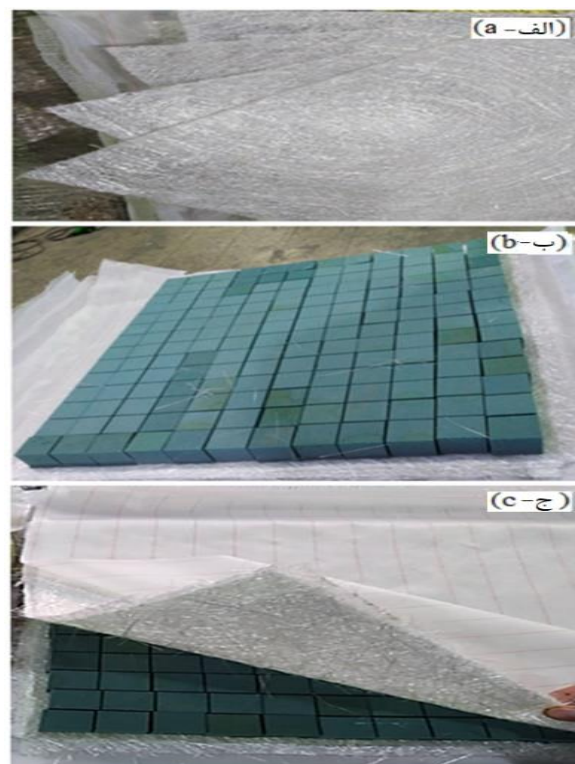


Fig. 3 Preform preparation steps, (a) laying up the lower face-sheet, (b) core placement and (c) laying up the upper face-sheet

شکل 3 مراحل آماده‌سازی پیش‌فرم، (الف) لایه‌چینی لایه زیرین، (ب) قرار دادن هسته و (ج) لایه‌چینی لایه رویین

ابتدا چهار لایه نمد شیشه سوزنی با الیاف بریده (به‌عنوان رویه زیرین) مطابق شکل 3-الف (a) بر روی لایه جداکننده قرار داده می‌شود. فوم‌های شیاردار بر روی لایه‌های الیاف شیشه سوزنی مطابق شکل 3-ب (b) قرار داده شده و لایه‌چینی قبلی به‌صورت معکوس یعنی به‌ترتیب با چهار لایه الیاف شیشه سوزنی به‌عنوان رویه بالایی، سه لایه تنفس و یک لایه جداکننده مطابق شکل 3-ج (c) بر روی فوم تکرار می‌شود.

پس از آماده شدن پیش‌فرم¹، در اطراف آن و بر روی قالب نوار آب‌بند² چسبانده می‌شود. سپس کیسه خلأ³ روی قطعه به‌گونه‌ای قرار داده می‌شود که کاملاً کشیده نبوده بلکه تا حدودی آزاد باشد تا در اثر اعمال خلأ و نشست

³ Vacuum bag
⁴ Spiral pipes

¹ Preform
² Sealant tape



Fig. 6 Curing resin at $T=70^{\circ}\text{C}$ using electrical heater

شکل 6 پخت رزین در دمای 70°C با استفاده از گرماتاب برقی

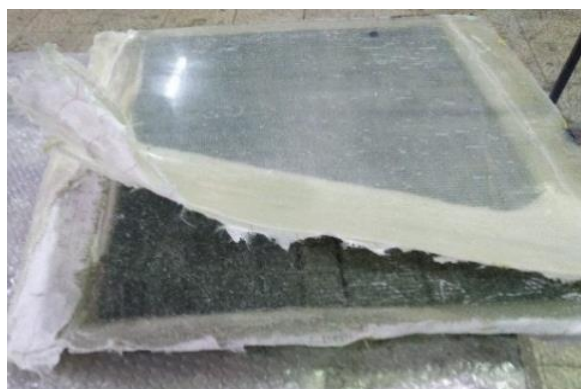


Fig. 7 Separating the peel-ply from the fabricated sandwich panel

شکل 7 جداکردن لایه جداکننده از نمونه پنل ساندویچی ساخته شده

استفاده از روش تزریق در خلأ در ساخت پنل ساندویچی با هسته شیاردار باعث می‌شود شبکه‌ای از رزین در فضای خالی شیارها تشکیل شود که هندسه آن برای یک سلول واحد در شکل 8 به صورت شماتیک نمایش داده شده است. شبکه رزینی تشکیل شده، منشوری شکل بوده و از این حیث با هسته‌های لانه زنبوری تشابه دارد. اما تفاوت آن با هسته‌های لانه زنبوری رایج آن است که مقطع آن به جای شش ضلعی‌های کنار هم چیده شده، مربع‌های کنار هم چیده شده بوده و جنس آن تابع جنس رزین است.

محبوبیت و کاربرد وسیع هسته‌های لانه زنبوری در کاربردهای پیشرفته نشان از عملکرد مطلوب این ساختار هندسی در مقایسه با هسته‌های یکپارچه دارد. بنابراین پنل ساندویچی ساخته شده به روش تزریق در خلأ نیز با داشتن شبکه‌ای از رزین، نسبت به نمونه فاقد شبکه رزینی خواص مکانیکی بالاتری خواهد داشت. برای بررسی کمی تأثیر تشکیل شبکه رزینی بر خواص مکانیکی پنل ساندویچی ساخته شده به روش تزریق در خلأ، نمونه‌هایی فاقد شبکه رزینی به عنوان نمونه شاهد، با مواد اولیه مشابه ساخته شده است. دلیل استفاده از هسته با شیار تمام عمق در نمونه شاهد آن است که اولاً ساختار هندسی نمونه شاهد تا حد ممکن مشابه نمونه‌های اصلی باشد. ثانیاً با توجه به کاربرد مورد نظر یعنی سازه و بدنه شناورهای دریایی، ایجاد انحنای ملایمی در ساخت پنل ساندویچی امکان پذیر گردد. تهیه پنل ساندویچی شاهد با استفاده از روش اتصال چسبی و در دو مرحله انجام گرفته است. در مرحله نخست رویه‌های بالایی و پایینی با روش تزریق در خلأ ساخته و به ابعاد مورد نیاز مطابق شکل 9 برشکاری می‌شوند.

به خوبی نشان می‌دهد رزین در رویه زیرین با سرعت بیشتری نسبت به رویه بالایی در حرکت است. اختلاف جبهه پیشروی رزین در رویه بالایی و پایینی دو دلیل عمده دارد. اولاً آن که گرانش زمین به ترشوندگی لایه زیرین کمک می‌کند و ثانیاً آن که لوله‌های مارپیچ تزریق و جمع‌آوری رزین، بر روی قالب و هم‌تراز با رویه پایینی قرار گرفته‌اند که باعث می‌شود مسیر عبور رزین در لایه زیرین کوتاه‌تر بوده و افت فشار کمتری در آن اتفاق افتد. پس از رسیدن جبهه رزین در رویه پایینی به انتهای خط تزریق مطابق شکل 5-ج (c) اختلاف جبهه پیشروی رزین در رویه بالایی و پایینی به تدریج کاهش یافته و در نهایت به صفر می‌رسد. فرایند تزریق با خیس شدن کامل رویه بالایی به اتمام می‌رسد. بحرانی‌ترین نقاط از نظر ترشوندگی مرکز بلوک‌هایی است که در دورترین نقطه از محل تزریق رزین قرار دارند. در صورتی که زمان لازم برای نفوذ رزین به نقاط نامبرده بیشتر از زمان ژل‌های شدن رزین باشد این نقاط خشک مانده و لازم است در جهت رفع این اشکال، متغیرهای مؤثر در انجام فرایند بازبینی شود. از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر نحوه ترشوندگی می‌توان به گرانشوری رزین، تعداد لایه‌های تنفس، ضخامت شیارها، ابعاد بلوک و دما اشاره نمود. با تنظیم این پارامترها، فرایند می‌بایست به گونه‌ای طراحی شود که زمان لازم برای رسیدن رزین به تمام نقاط قطعه کار کوتاه‌تر از زمان ژل‌های شدن رزین باشد.

پس از اتمام فرایند تزریق، نوبت به پخت رزین می‌رسد. گرما باعث می‌شود تا فرایند پخت با سرعت بیشتری صورت گیرد. در تحقیق حاضر فرایند پخت مطابق شکل 6 در فضای آزاد و با استفاده از گرماتاب به مدت 90 دقیقه و در دمای تقریبی 70°C انجام شده است. پس از اطمینان از تکمیل فرایند پخت، با جدا کردن لایه جداکننده مطابق شکل 7 فرایند ساخت پنل ساندویچی به پایان می‌رسد.

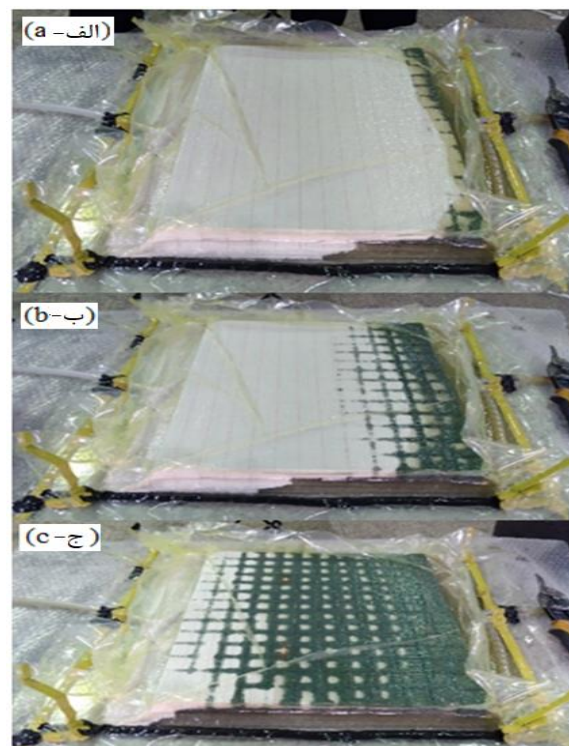


Fig. 5 Penetration of resin into the preform over time in (a) $t=3$ min, (b) $t=14$ min and (c) $t=32$ min

شکل 5 نفوذ رزین در پیش فرم با گذشت زمان در (الف) دقیقه سوم تزریق، (ب) دقیقه چهاردهم تزریق و (ج) دقیقه سی و دوم تزریق

جدول 2 ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای

Table 2 Dimensions of three point bending sample

mm	ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای
210	طول نمونه
90	عرض نمونه
1	ضخامت رویه‌ها
20	ضخامت هسته
1	ضخامت شیارهای هسته

برشکاری پل ساخته شده مطابق ابعاد گفته شده با دو روش آب افشان¹ و اره دیسکی رومیزی مطابق شکل 10 آزموده شد. ابتدا برشکاری آب افشان به کار گرفته شد اما کیفیت قابل قبولی حاصل نگردید. شکل 10-(الف) سطح برش خورده با روش آب افشان را نشان می دهد که فوم را در برخی نقاط قلوه کن کرده و سطحی ناهموار را در ناحیه هسته نتیجه داده است. پس از آن برشکاری با استفاده از اره رومیزی انجام شد که مطابق شکل 10-(ب) کیفیت مطلوبی داشته و برشکاری کلیه نمونه های آزمایش در ادامه کار با استفاده از این روش صورت گرفته است.

با بررسی دقیق مقاطع برش خورده مطابق شکل 11، دو نوع عیب در ساخت پل ساندویچی با هسته مشبک به روش تزریق در خلأ قابل مشاهده است. اولاً، در برخی نقاط حباب هایی در شبکه رزینی وجود دارد که نمونه آن در شکل 11-(الف) قابل مشاهده است. حباب ها بیشتر در نزدیکی لایه بالایی یعنی لایه ای که با کیسه خلأ در تماس بوده و با تأخیر بیشتری نسبت به لایه پایینی خیس می شود تشکیل می گردند. عیب دیگر عدم یکنواختی ضخامت ستون ها در شبکه رزینی است که علت آن نگه داشته شدن بلوک های فومی، تنها از طریق یک وجه با استفاده از مش یا پارچه است. در شکل 11-(ب) نمونه ای از تغییر ضخامت در شبکه قابل مشاهده است. وجود عیوب در ساختار قطعه باعث می شود تا نمونه های آزمایشی ساخته شده با این روش دقیقاً مشابه یکدیگر نبوده و در نتایج آزمایش ها به لحاظ آماری پراکندگی به وجود آید.

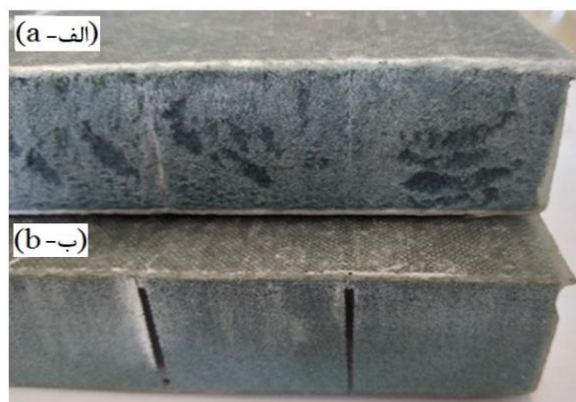


Fig. 10 Quality of cut surfaces using (a) water-jet and (b) table saw

شکل 10 کیفیت سطوح برش خورده از (الف) آب افشان و (ب) اره رومیزی

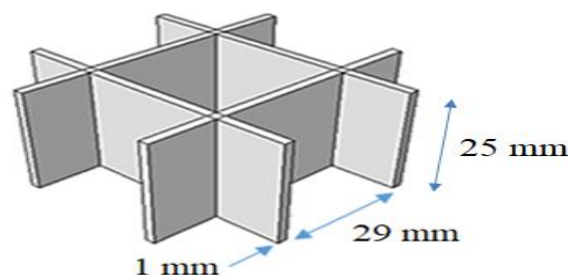


Fig. 8 The resin lattice solidified in the grooves

شکل 8 شبکه رزینی تشکیل شده در فضای شیارها

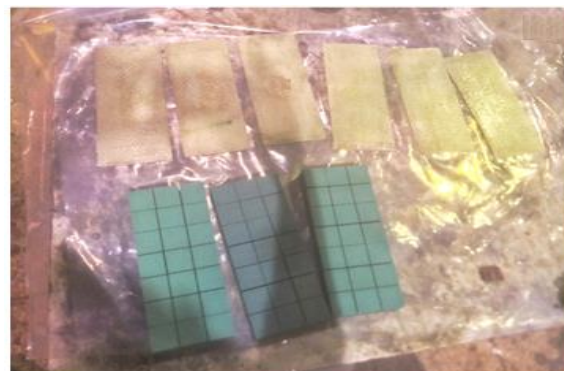


Fig. 9 Face-sheets fabricated by vacuum infusion after cutting and before adhesively bonding to the grooved foam core

شکل 9 رویه های ساخته به روش تزریق در خلأ پس از برشکاری و پیش از چسباندن شدن بر روی هسته شیاردار

در مرحله دوم رویه های ساخته شده بر روی سطوح بالایی و پایینی هسته مشبک با استفاده از چسب اپوکسی چسبانده و پخت آن در کیسه خلأ انجام شده است. ابعاد نمونه های شاهد ساخته شده (فاقد شبکه رزینی) همانند نمونه های اصلی (دارای شبکه رزینی) است که مقادیر آن در جدول 1 ذکر شده است.

3-2 آماده سازی نمونه های آزمایش

در تحقیق حاضر تأثیر وجود شبکه رزینی بر خواص مکانیکی پل ساندویچی در بارگذاری های خمشی و فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. این دو نوع بارگذاری در سازه های دریایی حائز اهمیت هستند. بارگذاری خمشی به دلیل پدیده کوبش امواج یکی از بارگذاری های اصلی وارد بر سازه شناور محسوب شده و با حرکت امواج، به صورت متوالی بر سازه وارد می شود. بارگذاری فشاری نیز در ضربات احتمالی وارد بر بدنه شناور در اثر برخورد ناخواسته آن با اسکله، صخره و یا سایر شناورها محتمل بوده و حائز اهمیت است.

برای بررسی رفتار پل ساندویچی در بارگذاری خمشی از آزمون خمش سه نقطه ای بر اساس استاندارد ASTM C393 استفاده شده است [25]. ابعاد نمونه آزمون خمش با رعایت محدودیت های ذکر شده در این استاندارد مطابق جدول 2 در نظر گرفته شده است.

رفتار پل ساندویچی در بارگذاری فشاری در راستای ضخامت بر اساس استاندارد ASTM C365 مورد بررسی قرار گرفته است [26]. نمونه دارای ابعاد مربعی به طول اضلاع 60×60 mm در داخل صفحه بوده و سایر ابعاد نظیر ضخامت رویه ها، ضخامت هسته و ضخامت شیار همانند ابعاد مذکور برای نمونه های خمشی در جدول 1 می باشد.

¹ Waterjet

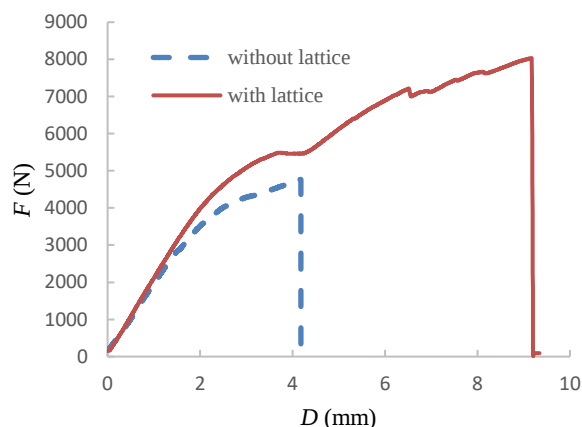


Fig. 13 Comparison of force-displacement diagrams obtained from the three-point bending tests for sandwich panel samples with resin lattice and without resin lattice

شکل 13 مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های پنل ساندویچی دارای شبکه رزینی و فاقد شبکه رزینی

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نمودار مربوط به نمونه فاقد شبکه رزینی شیب کمتری نسبت به نمونه اصلی داشته و بسیار زودتر از نمونه اصلی دچار شکست می‌شود. به گونه‌ای که حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه اصلی 78% درصد بیشتر از نمونه فاقد شبکه رزینی است. این اختلاف بیش از هر چیز به تفاوت در مود شکست ایجاد شده در هر یک از دو نمونه بازمی‌گردد. در نمونه اصلی، مود شکست ناکارآمد کننده شکست لایه زیرین تحت کشش است. در حالی که در نمونه فاقد شبکه رزینی پیش از رسیدن تنش به استحکام کششی در رویه زیرین، رویه از هسته جدا می‌شود. با توجه به شیاردار بودن هسته، جدا شدن رویه از هسته باعث می‌شود ساختار ساندویچی سازه از بین رفته و ظرفیت تحمل خمش در آن به شدت افت نموده و سبب سقوط منحنی نیرو-جابجایی شود.

شکل 14 موده‌های شکست ایجاد شده در رویه‌های بالایی و پایینی را در نمونه اصلی نشان می‌دهد. شکل 14-الف) ترک خوردگی رویه بالایی در محل تماس با سنبه و فشرده شدن فوم را در زیر سنبه نشان می‌دهد که در طی بارگذاری با ایجاد سر و صدایی ملایم به تدریج ایجاد شده و سبب بروز دندانه‌هایی در نمودار در نزدیکی مراحل پایانی بارگذاری می‌شود. شکل 14-ب) گسیختگی رویه پایینی را در سوی مقابل سنبه یعنی جایی که تنش‌های کششی ناشی از خمش بیشترین مقدار را دارند نمایش می‌دهد. شکست لایه زیرین برخلاف لایه رویین به‌طور ناگهانی و بدون علامت قبلی همراه با صدای شدیدی واقع شده و باعث سقوط آنی نمودار می‌شود.

برای داشتن مقایسه‌ای صحیح از عملکرد نمونه با افزوده شدن شبکه رزینی لازم است تا افزایش جرم ناشی از پر شدن فضای خالی شیارها با رزین نیز مورد توجه قرار گیرد. جرم نمونه، با و بدون شبکه رزینی با در نظر گرفتن چگالی وینیل استر، $\rho = 1045 \text{ kg/m}^3$ ، به ترتیب 248 g و 242.5 g بوده و اضافه شدن شبکه رزینی با جرم 5.5 g تنها 2% به جرم نمونه می‌افزاید. به عبارت دیگر 78% افزایش در حداکثر نیروی قابل تحمل معادل افزایش نیروی قابل تحمل ویژه به میزان 76.3% خواهد بود.

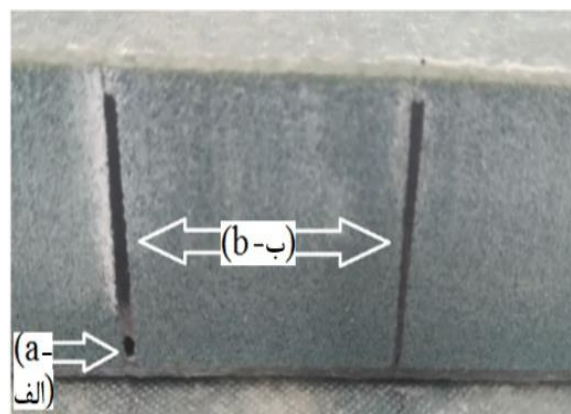


Fig. 11 Probable defects in sandwich panel fabrication, (a) bubble formation and (b) non-uniform thickness

شکل 11 عیوب محتمل در ساخت، (الف) تشکیل حباب و (ب) ضخامت نایک‌نواخت

با توجه به آن که ساخت پنل ساندویچی با هسته مشبک به روش تزریق در خلأ در ساخت پنل‌هایی در ابعاد بزرگ برای کاربردهای دریایی پیشنهاد شده است وجود چنین عیب‌هایی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب در طراحی بلامانع است.

3- نتایج و بحث

1-3- آزمون خمش سه نقطه‌ای

بررسی خواص خمشی پنل ساندویچی با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای صورت گرفته است. نحوه قرارگیری نمونه بر روی فیکسچر آزمون خمش سه نقطه‌ای با رعایت طول دهانه فیکسچر و فاصله دو تکیه‌گاه تا لبه‌ی نمونه (طبق دستورالعمل مذکور در استاندارد) در شکل 12 نشان داده شده است. دستگاه کشش به کاررفته برای انجام آزمایش‌ها ساخت شرکت سنتام مدل STM-150، واقع در آزمایشگاه خواص مکانیکی در پژوهشکده مهندسی کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر بوده است. اعمال بار به روش کنترل جابجایی و با نرخ 6 mm/min انجام گرفته است. آزمون دو مرتبه برای نمونه‌های اصلی (دارای شبکه رزینی) و دو مرتبه برای نمونه‌های شاهد (فاقد شبکه رزینی) تکرار شده است. شکل 13 نمودار نیرو-جابجایی را برای نمونه اصلی و نمونه فاقد شبکه رزینی در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. هر یک از نمودارها از میانگین دو تکرار انجام شده به دست آمده است.

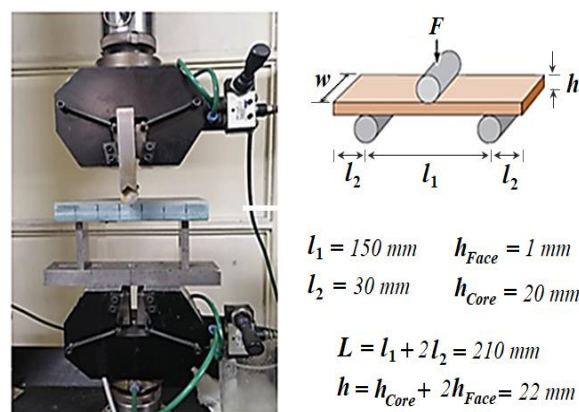


Fig. 12 Dimensions and placement of the sample in the three-point bending fixture

شکل 12 ابعاد نمونه و قرارگیری آن در فیکسچر آزمون خمش سه نقطه‌ای

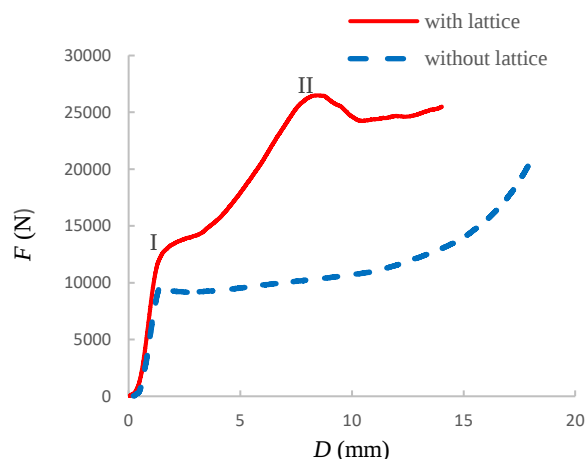


Fig. 16 Comparison of force-displacement diagrams obtained from the through thickness compression test for sandwich panel samples with resin lattice and without resin lattice

شکل 16 مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار در راستای ضخامت برای نمونه‌های پل ساندویچی دارای شبکه رزینی و فاقد شبکه رزینی

دو نمودار در مراحل اولیه آزمون تطابق نزدیکی با یکدیگر دارند تا جایی که نمونه فاقد شبکه رزینی (نمودار خط چین) در جابجایی 2.2 mm به آستانه تسلیم می‌رسد. در نقطه تسلیم، نمودار شکسته شده و شیب آن به صفر نزدیک می‌شود. شیب صفر نمودار به معنای وادادگی و عدم تحمل نیروی بیشتر در آن است. در این بخش، نیروی وارده صرف فشرده و متراکم شدن فوم می‌شود. نمودار تا جابجایی 9 mm تقریباً به حالت افقی ادامه می‌یابد تا آن که خلل و فرج فوم در اثر فشرده شدن پر شده و نمودار پس از جابجایی 9 mm مجدداً روند صعودی به خود می‌گیرد. روند نمودار در نمونه فاقد شبکه رزینی عمدتاً متأثر از رفتار فوم است. به همین خاطر نمودار مربوطه مشابه آنچه در رفتار فشاری فوم‌ها رایج است شامل سه بخش یعنی بخش الاستیک، بخش یکنواخت¹ و بخش تراکمی² است [27].

شکل 17 تغییر شکل دو نمونه آزمایش شده فاقد شبکه رزینی را نشان می‌دهد. در شکل 17-الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و در شکل 17-ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل به خوبی دیده می‌شود پدیده بشک‌ای شدن در برخی سطوح جانبی آزاد ایجاد شده است که در آزمون فشاری فوم تغییرشکلی شایع است. در صورتی که از وقوع پدیده کماتش پیشگیری شود ظرفیت تحمل فشار در قطعه افزایش می‌یابد.

در مقابل، در نمونه اصلی وجود شبکه رزینی باعث به تأخیر افتادن جابجایی در نقطه تسلیم و ادامه رفتار الاستیک تا حدود جابجایی 2.4 mm می‌شود. پس از این نقطه (نقطه I)، با ایجاد اولین شکست در دیواره‌ی شبکه رزینی، نمودار از حالت خطی خارج شده و کاهش چشمگیری در شیب نمودار نسبت به ناحیه الاستیک ایجاد می‌شود. این وادادگی پس از چندی بازایی شده، شیب نمودار به تدریج افزایش یافته و نمودار مجدداً صعود می‌کند تا آن که در نقطه II دومین شکست در دیواره رزینی اتفاق افتاده و نمودار افت دیگری را تجربه می‌کند.

مقایسه کیفی شکل دو نمودار حاکی از آن است که در نمونه فاقد شبکه رزینی روند نمودار یکنواخت‌تر بوده و روندی صعودی دارد. اما در نمونه اصلی شکست جداره‌های رزینی به تدریج صورت گرفته و به همین خاطر نمودار

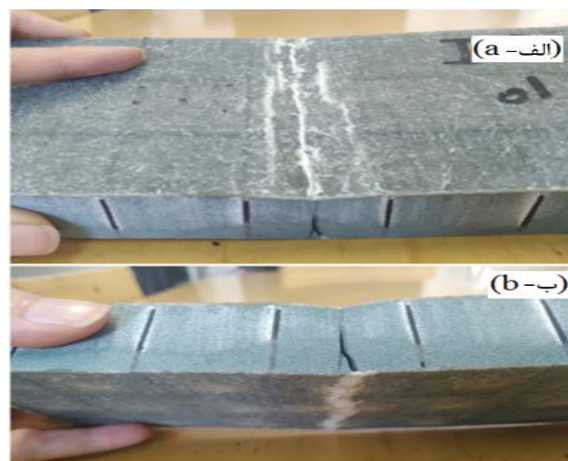


Fig. 14 Failure appeared in (a) upper face-sheet and (b) lower face-sheet in the sample with resin lattice under three-point bending test

شکل 14 شکست ایجاد شده در (الف) رویه بالایی و (ب) رویه پایینی در نمونه دارای شبکه رزینی تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

2-2-3 آزمون فشار

آزمون فشار مطابق شکل 15 با استفاده از دو صفحه فولادی که می‌توان آن‌ها را در مقایسه با نمونه آزمایش صلب فرض کرد انجام شده است. سطح تماس نمونه با فیکسچر روغن کاری شده است تا امکان لغزش رویه‌های بالا و پایین بر روی فیکسچر فراهم شده و بارگذاری وارده تا حد ممکن به فشار خالص نزدیک شود. برای انجام آزمون‌های فشار، از دستگاه کشش با مشخصات ذکر شده در بخش 1-3 استفاده شده است. بارگذاری با روش کنترل جابجایی و با نرخ 3 mm/min اعمال و آزمون تا جابجایی 14 mm ادامه یافته است.

آزمون دو مرتبه برای نمونه اصلی (دارای شبکه رزینی) و دو مرتبه برای نمونه شاهد (فاقد شبکه رزینی) تکرار شده است. برای نمونه فاقد شبکه رزینی دو نمودار بسیار به یکدیگر نزدیک است که به همگن بودن ساختار فوم به کاررفته بازمی‌گردد. اما در نمونه دارای شبکه رزینی تفاوت اندکی بین دو نمودار مشاهده شد که به ساختار ناهمگن شبکه رزینی در دو نمونه و وجود عیوبی همچون نایکنواختی در ضخامت شبکه رزینی و ایجاد حباب در آن مربوط می‌شود. میانگین دو تکرار انجام شده برای دو نمونه فاقد شبکه رزین و نمونه دارای شبکه رزین در شکل 16 با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

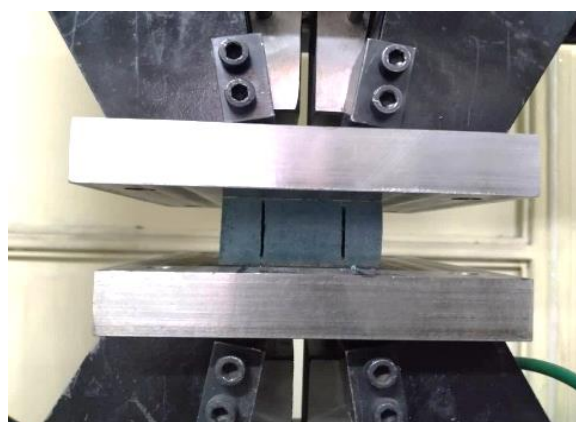


Fig. 15 The sample in the through thickness compression fixture

شکل 15 قرارگیری نمونه در فیکسچر آزمون فشار در راستای ضخامت

² Densification part

¹ Plateau part



Fig. 18 Deformation of the sample with resin lattice under through thickness compression, (a) four sides of the first samples and (b) four sides of the second sample

شکل 18 تغییر شکل نمونه دارای شبکه رزینی در اثر فشار عرضی، (الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و (ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم

4-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر روش ساختی مبتنی بر روش تزریق در خلأ به صورت تجربی اجرا شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. هسته مورد استفاده در این روش فوم PVC شیاردار بوده است. استفاده از فرایند تزریق در خلأ باعث می‌شود تا فضای خالی شیارها با رزین پر شده و پس از پخت، شبکه‌ای از رزین مشابه با هندسه شیارها ایجاد گردد. شبکه رزینی به شکل خودکار در طی فرایند تزریق شکل گرفته و نیازی به عملیات اضافه برای پیاده‌سازی آن وجود ندارد. این امر باعث می‌شود تا ساخت هسته‌ای متشکل از شبکه رزینی پر شده با فوم با این روش به سادگی و با هزینه پایین قابل پیاده‌سازی باشد.

در عین سادگی فرایند ساخت، استحکام خمشی، استحکام فشاری و ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌های ساخته شده با این روش نسبت به نمونه ساخته شده با روش اتصال چسبی به ترتیب 78%، 92% و 101% بهبود یافته است. در بارگذاری خمشی تأثیرگذارترین عامل در بهبود به دست آمده، به اتصال بهتر رویه با هسته در این روش ساخت بازمی‌گردد. زیرا در نمونه ساخته شده با روش اتصال چسبی جدا شدن رویه از هسته مانع ادامه بارگذاری شده است. در بارگذاری فشاری تأثیرگذارترین عامل در بهبود به دست آمده، محصور شدن بلوک‌های فومی با شبکه رزینی است که مانع بروز پدیده بشک‌های شدن در بلوک‌های فومی شده است.

مقایسه و جمع‌بندی نتایج حاصل نشان می‌دهد که تقویت هسته با شبکه رزین، استحکام فشاری در راستای ضخامت را بیشتر از استحکام خمشی تحت تأثیر قرار داده است. دلیل این امر آن است که رفتار خمشی پنل ساندویچی عمدتاً متأثر از هندسه و جنس رویه بوده و از ساختار و جنس هسته تأثیر کمتری می‌پذیرد. بررسی عملکرد محصول در سایر انواع بارگذاری‌هایی که از جنس و ساختار هسته تأثیر بیشتری می‌پذیرند در ادامه پژوهش پیشنهاد می‌شود. همچنین بررسی عملکرد محصول در بارگذاری‌های دینامیکی و خستگی و به‌ویژه در بارگذاری ضربه‌ای که در صنایع دریایی از ارزش کاربردی بالایی برخوردار است در ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شود. و در نهایت، موضوع حائز اهمیت دیگر بررسی مستقیم کیفیت اتصال رویه به هسته است تا به صورت کمی مشخص گردد که روش حاضر تا چه اندازه در ارتقای این ویژگی می‌تواند تأثیرگذار باشد.

مربوطه با افت و خیزهایی در طول بارگذاری همراه است. مقایسه کمی دو نمودار تا جابجایی 15 mm نشان می‌دهد که بیشترین نیرو در نمونه اصلی 92% بیشتر از نمونه فاقد شبکه رزینی است که ارتقای درخور اعتنایی است. تفاوت حائز اهمیت دیگر اختلاف قابل توجه بین سطح زیر منحنی این دو نمودار است که نشان دهنده ظرفیت جذب انرژی در هر یک از دو ساختار است. سطح زیر منحنی در پنل ساندویچی ساخته شده به روش تزریق در خلأ برابر با 277612 N.mm و در پنل ساندویچی فاقد شبکه رزینی 138021 N.mm است که حاکی از افزایش 101% در جذب انرژی در نمونه ساخته شده به روش تزریق در خلأ نسبت به نمونه فاقد شبکه رزینی است.

شکل 18 تغییر شکل دو نمونه اصلی (دارای شبکه رزینی) را نشان می‌دهد. در شکل 18-الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و در شکل 18-ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم نمایش داده شده است. با مقایسه نحوه تغییر شکل در نمونه دارای شبکه رزینی با نمونه فاقد شبکه رزینی نتیجه می‌شود که وجود شبکه رزینی باعث بهبود خواص فشاری پنل ساندویچی با سه مکانیزم مختلف می‌گردد. اول آن که شبکه رزینی در تحمل بار فشاری مستقیماً مشارکت می‌کند. این مشارکت تا جایی ادامه می‌یابد که شبکه رزینی تحت بار فشاری در اثر کمناش موضعی¹ [15] دچار واماندگی شود. دوم آن که وجود شبکه رزینی باعث مقید شدن سطوح جانبی آزاد در بلوک‌های فومی شده و مانع پدیده بشک‌های شدن در سطوح مقید می‌شود. سوم آن که محصور شدن بلوک‌های فومی در چارچوب رزینی باعث می‌شود تنش از حالت تک‌محوره به حالت سه محوره تبدیل شده و ظرفیت تحمل بار در فوم نیز به این ترتیب افزایش یابد.

با در نظر گرفتن مجموعه عوامل فوق نتیجه می‌شود که وجود مشبک رزین و بلوک‌های فومی در تماس با یکدیگر باعث هم‌افزایی و در نتیجه بهبود عملکرد هر یک از این دو جزء شده است. به گونه‌ای که از یک سو وجود بلوک‌های فومی در نقش بستر الاستیک² مانع کمناش سراسری³ جداره‌های رزینی می‌گردد [27]. از سوی دیگر وجود جداره رزینی با محصور کردن بلوک‌های فومی مانع ایجاد پدیده بشک‌های شدن و افزایش ظرفیت تحمل بار در فوم می‌شود.

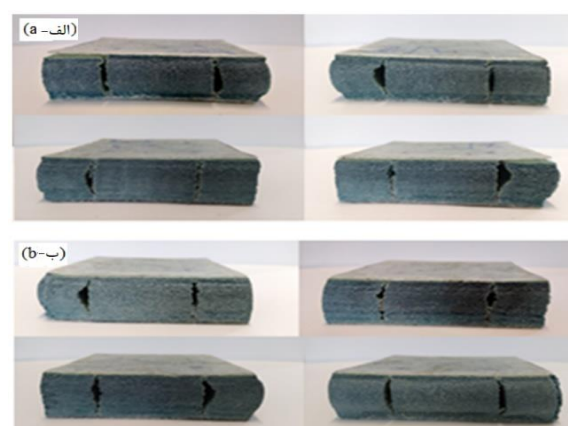


Fig. 17 Deformation of the sample without resin lattice under through thickness compression, (a) four sides of the first samples and (b) four sides of the second sample

شکل 17 تغییر شکل نمونه فاقد شبکه رزینی در اثر فشار عرضی، (الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و (ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم

³ Global buckling

¹ Local buckling

² Elastic foundation

5-مراجع

- with CNT-reinforced composite layers using Galerkin method”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1677-1686, 2022.
- [17] Hou, S., Li, T., Jia, Z. and Wang, L., “Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact”, Materials & Design, Vol. 160, No. 1, pp. 1305-1321, 2018.
- [18] Mazloomi, M.S. and Ranjbar, M., “Hybrid design optimization of sandwich panels with gradient shape anti-tetrachiral auxetic core for vibroacoustic applications”, Transport in Porous Media, Vol 9, No. 1, pp. 1-8, 2021.
- [19] Khorshidi, K. and Shabani, Y., “Free vibration analysis of sandwich plates with magnetorheological smart fluid core by using modified shear deformation theory,” In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 4, pp. 1826-1835, 2022.
- [20] Najafi, M. and Eslami-Farsani, R., “Introducing novel sandwich panels based on of cork/polyurethane foam hybrid core and composite grid structure for marine applications”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1064-1075, 2020.
- [21] Karlsson, K.F. and Aström, B.T., “Manufacturing and applications of structural sandwich components”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 28, No. 2, pp. 97–111, 1997.
- [22] Krzyżak, A., Mazur, M., Gajewski, M., Drozd, K., Komorek, A. and Przybyłek P., “Sandwich structured composites for aeronautics: methods of manufacturing affecting some mechanical properties”, International Journal of Aerospace Engineering, Vol 1, No. 1, pp 1-10, 2016.
- [23] Yousefi, A.L., Mohammadi, B. and Anbarzadeh, E., “Experimental study of bond strength between core and composite layers under tensile and shear loads in different methods of fabricating nucleate composite structures”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1659-1667, 2022.
- [24] Halimi, F., Golzar, M., Asadi, P. and Beheshty, M.H., “Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding”, Journal of composite materials, Vol. 47, No. 15, pp. 853-863, 2013.
- [25] Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, Annual Book of ASTM Standard, C 393-00, 2000.
- [26] Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Composite Cores, Annual Book of ASTM Standard, C 365/365-11a, 2011.
- [27] Ziaie, M., Zamani, F., Homayouni, S., Khaledi, H., Qareqani, A., Ziaie, M., “Numerical and experimental study on mechanical properties of glass fiber-reinforced polymer sandwich structure with polyurethane foam-filled M-shaped core”, Polymer Composites, Vol. 44, No. 2, pp. 1054-1070, 2023.
- [1] Khodaei, M., Safarabadi-Farahani, M. and Haghighi-Yazdi, M., “Numerical investigation of high velocity impact on foam-filled honeycomb structures including foam fracture model”, Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 29, No. 4, pp. 748-760, 2022.
- [2] Jayaram, R. S., Nagarajan, V.A. and Kumar, K.V., “Compression and low velocity impact response of sandwich panels with polyester pin-reinforced foam filled honeycomb core”, Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol 21, No 6, pp 2014-2030, 2019.
- [3] Jayaram, R. S., Nagarajan, V.A. and Kumar, K.V., “Low velocity impact and compression after impact behaviour of polyester pin-reinforced foam filled honeycomb sandwich panels”, Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol 24, No 1, pp157-173, 2022
- [4] Masoumiasl, S. and Rahimi, G.H., “Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of curved composite sandwich panels with lattice core”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 351-362, 2019.
- [5] Zarei, M. and Rahimi, G.H., “Global buckling load calculation of the of sandwich conical shells with lattice cores subjected to axial compression loading using a novel smeared method”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1217-1226, 2021.
- [6] Zarei, M., Rahimi, G.H. and Hemmatnezhad, M., “A novel smeared method for investigating the free vibrations of sandwich conical shells with lattice cores”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1163-1170, 2021.
- [7] Heidari-shahmaleki, E. and Zeinedini, A., “Application of cotton/epoxy laminated composites to fabricate the uni- and bi-directional cosine corrugated cores sandwich panels”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No.7, pp. 863-872, 2020.
- [8] Maher, R., Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., “The effect of shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1612-1627, 2021.
- [9] Taghizadeh, S.A., Farrokhgadi, A., Liaghat, G.H., Pedram, E., Malekinejad, H., Mohammadi, S.F. and Ahmadi, H., “Characterization of compressive behavior of PVC foam filled composite sandwich panels with different corrugated core shapes”, Thin-Walled Structures, Vol 135, No 1, pp. 160-172, 2019.
- [10] Balıkoğlu, F., Demircioğlu, T. K. and Arslan, N., “Compressive and flexural behaviour of pin reinforced marine composite sandwich beams”, Proceedings of the IV international EGE composite materials symposium, pp. 454-461, Izmir, Turkey, 2018
- [11] Toluei, A. and Etemadi, E., “Mechanical properties of multifunctional composite structures with z-pin core using numerical simulation of Hopkinson pressure bar test device”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 683-693, 2020.
- [12] Rahmani, M., Mohammadi, Y. and Kakavand, F., “Vibration analysis of truncated conical sandwich shell with porous FG core in different thermal loading ”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 694-704, 2020.
- [13] Torabizadeh, M.A., “Experimental study of the effect of impact shape and skin layout on the behavior of aluminum foam core sandwich panels at low velocity impact load”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1153-1162, 2021.
- [14] Yan, L.L., Yu, B., Han, B., Chen, C.Q., Zhang, Q.C. and Lu, T.J., “Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores”, Composites Science and Technology Vol 24, No. 86, pp. 142-148, 2013.
- [15] Wu, Z., Liu, W., Wang, L., Fang, H. and Hui, D., “Theoretical and experimental study of foam-filled lattice composite panels under quasi-static compression loading” Composites Part B: Engineering, Vol. 60, No. 1, pp.329-340, 2014.
- [16] Shabani, Y. and Khorshidi, K., “Free vibration analysis of rectangular doubly curved auxetic-core sandwich panels integrated



بررسی استحکام اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت الیاف ممتد شیشه پلی آمید 6

مجتبی عابدینی ندوشن¹، رضوان عابدینی^{2*}، رامین هاشمی³

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

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

اطلاعات مقاله

دریافت: 1402/03/01

پذیرش: 1402/05/02

کلیدواژگان:

جوش فراصوتی

کامپوزیت شیشه پلی آمید 6

کامپوزیت ترموپلاست

جوش التراسونیک

اتصال دهی کامپوزیت ترموپلاست

اتصال لبه روی هم

کامپوزیت الیاف ممتد (پیوسته)

چکیده

کامپوزیت‌های الیاف ممتد نسبت به کامپوزیت‌های الیاف کوتاه عملکرد مکانیکی بالاتری دارند به همین سبب به‌طور قابل توجهی در صنایع هوایی تولید و استفاده می‌شوند. یکی از روش‌های نوین اتصال کامپوزیت‌ها جوش فراصوتی (التراسونیک) می‌باشد. در این فرآیند با اعمال ارتعاشات توان بالا (100 الی 2000 وات) و فرکانس بالا (15 تا 100 کیلوهرتز) به محل اتصال دو قطعه، حرارت در محل اتصال ایجاد و باعث چسبیدن دو قطعه به هم می‌شود. در این تحقیق به بررسی پارامترهای اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت شیشه پلی آمید 6، تأثیر فیلم لایه واسط و جهت الیاف در استحکام اتصال پرداخته شده است و در انتها اتصال جوش فراصوتی با اتصال چسبی مقایسه شده است. در بررسی اتصال به‌صورت اتصال لبه روی هم، نمونه‌ها با توجه به استاندارد ASTM D5868 برش خوردند و پس از جوشکاری فراصوتی تحت آزمون کشش-برش قرار گرفتند. با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی متوسط برای زمان، فشار و توان مشاهده شد استفاده از یک لایه فیلم پلیمر خالص به‌عنوان فیلم لایه واسط استحکام جوش را افزایش می‌دهد. با تغییر جهت الیاف تمامی لایه‌ها به‌اندازه 90 درجه، استحکام جوش مقداری کاهش و مقدار بیرون زدگی پلیمر و الیاف بیشتر شد و کیفیت ظاهری کاهش یافت. در مقایسه اتصال جوش با اتصال چسب، مقدار استحکام جوش بالاتر از استحکام اتصال چسب بود و همچنین زمان صرف شده در اتصال جوش بسیار کمتر از زمان صرف شده در اتصال چسبی بوده است.

Investigating the strength of the ultrasonic welding of the polyamide 6 continuous fiber glass composite

Mojtaba Abedini Nodoushan, Rezvan Abedini*, Ramin Hashemi

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

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

Keywords

Ultrasonic welding,
Composites,
Polyamide 6 glass fiber,
Lap shear joint,
Continuous fiber glass composite

Abstract

Composites of continuous fibers have higher mechanical performance than short fibers, which is why they are produced and used significantly in the aviation industry. One of the new methods of joining composites is ultrasonic welding. In this process, by applying high power (100 to 2000 watts) and high frequency (15 to 100 kHz) vibrations to the joint of two parts, heat is generated in the joint and causes the two parts to stick together. In this research, the parameters of the ultrasonic welding of polyamide 6 glass composite, the effect of the interlayer film, and the direction of the fibers on the strength of the connection have been investigated. Ultimately, the ultrasonic welding connection has been compared with the adhesive bond. In examining the connection as an edge-to-edge connection, the samples were cut according to ASTM D5868 standard and subjected to a tensile-shear test after ultrasonic welding. Considering the average input parameters for time, pressure, and power, it was observed that using a pure polymer film layer as the interlayer film increases the welding strength. By changing the direction of the fibers of all layers by 90 degrees, the welding strength decreased a little. The amount of polymer and fiber protrusion increased, and the appearance quality decreased. In comparing the welding connection with the adhesive bond, the value of the welding strength was higher than the strength of the adhesive connection. Also, the time spent on the welding connection was much less than on the adhesive bonding.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Abedini Nodoushan, M., Abedini R, A., Hashemi, R., "Investigating the strength of the ultrasonic welding of the polyamide 6 continuous fiber glass composite," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 1, pp. 2176-2183, 2023.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2002326.1836

1- مقدمه

1-1- کامپوزیت‌ها و روش‌های اتصال‌دهی کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها به دلیل خواص ویژه و کاربرد فراوان آن‌ها مواد شگفت‌انگیز صنعت برشمرده می‌شوند. از ویژگی کامپوزیت‌های پایه پلیمری می‌توان به وزن کم، استحکام زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و پوسیدگی، عمر خستگی بالا، سهولت ساخت و هزینه پایین، اشاره کرد، که به همین دلایل به سرعت در حال گسترش هستند. کامپوزیت‌های ترموپلاست¹ به هنگام گرم شدن نرم شده و پس از سرد شدن ویژگی‌های خود را بازمی‌یابند، از این رو قابلیت بازیافت، اصلاح و جوش پذیری را دارند.

متداول‌ترین روش‌های اتصال قطعات پلاستیکی (پلیمری) و کامپوزیت‌های پایه پلیمری، روش‌های مکانیکی²، چسب³ و جوش⁴ هستند. هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارا هستند.

در روش‌های مکانیکی (پیچ و مهره، پرچ‌ها و اتصال‌دهنده‌ها و...) به راحتی مونتاژ می‌شوند، باز کردن آن‌ها (به جز پرچ) به آسانی صورت می‌گیرد، نیاز به آماده‌سازی سطح ندارند و بسیار فراوان یافت می‌شوند. در این روش وزن اعمالی به سازه بسیار است و همچنین تمرکز تنش ناشی از حفره‌های موجود باعث ترک و اشکال در سازه می‌شود.

در روش چسب، با پیشرفت‌های به دست آمده عملکردهای خوبی از چسب در اتصالات مشاهده می‌شود. امکان اتصال مواد غیرمشابه به یکدیگر و توزیع تنش یکنواخت و ناچیزی دارند. در این روش نیاز به آماده‌سازی سطح و در مواردی پخت سطح نیاز است. همچنین چسبندگی به اندازه روش مکانیکی نیست و باز کردن آن‌ها از هم مشکل است.

روش اتصال دیگر جوش است. در جوشکاری پلیمرها رابط اتصالی موجود است که با روش‌های مختلفی ذوب شده و پخش می‌شود و پس از سرد شدن مشاهده می‌شود دو قطعه را به هم متصل کرده است. چندین روش برای اتصال جوش کاربرد دارد، از جمله جوشکاری القایی⁵، لیزر⁶، اصطکاکی⁷، مقاومتی⁸ و فراصوتی (التراسونیک)⁹ [1-3].

قطعات نایلونی (پلی آمیدی) قالب‌گیری شده از بسیاری از ترموپلاستیک‌ها در برابر خستگی، خزش و ضربه‌های مکرر مقاوم‌تر هستند. تقاضا برای محصولات نایلونی تقویت‌شده با الیاف شیشه در صنایع خودروسازی زیاد است. در صنعت خودروسازی، فلزات در قطعاتی مانند منیفولدهای ورودی هوا، محفظه فیلتر هوا، رزوناتورها، چرخ‌دنده‌های زمان‌بندی، فن‌های رادیاتور و مخازن رادیاتور با نایلون‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه جایگزین شده‌اند. کامپوزیت‌های الیاف ممتد نایلونی به دلیل خواص مکانیکی بهتر نسبت به کامپوزیت‌های الیاف کوتاه به طور گسترده در صنایع هوایی و موارد مورد نیاز به استحکام بالاتر استفاده می‌گردد. از آنجایی که اکثر قطعات را نمی‌توان به صورت یک تکه تولید کرد، استفاده از جوش برای افزودن قطعات فرعی به قطعات اصلی لازم و ضروری است [4].

2-1- فناوری فراصوت توان بالا

امواج فراصوتی امواج الاستیک با فرکانس بالاتر از درون ماده فیزیکی عبور کرده و انرژی را منتقل نمایند. طیف فرکانس امواج فراصوت بالاتر از حد شنوایی انسان (20 کیلوهرتز) است. اجزای اصلی سیستم فراصوتی توان بالا (شکل 1) شامل یک ترانسیدوسر (مبدل) فراصوت و منبع تغذیه الکتریکی

برای تحریک آن است. میدان آکوستیک خروجی از ترانسیدوسر توسط یک محیط واسط جامد و یا مایع به ماده نهایی تحت عملیات یا ابزار منتقل می‌شود. از نظر محدوده تأثیرگذاری، ارتعاشات فراصوت را می‌توان در سه بخش تأثیرات میکروسکوپی و میکروساختاری، تأثیرات ماکروسکوپی و تأثیرات سطحی طبقه‌بندی کرد [5, 6].

فناوری فراصوت توان بالا در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی علمی و صنعتی از جمله فرآیندهای ساخت از قبیل ماشین‌کاری [7]، شکل‌دهی [6, 8]، متالورژی پودر (سرد و گرم [9]) و ساخت افزایشی [10] کاربرد دارند. استفاده از این فناوری در بسیاری از موارد مانند اتصال‌دهی فلزات [11]، اتصال‌دهی پلیمرها [12]، تا کاربردهای سونوشیمیایی نظیر همگن‌سازی و کاربردهای زیست‌محیطی به کاربردهای صنعتی انجامیده است.

جوشکاری فراصوتی یکی از محبوب‌ترین روش‌های جوشکاری در صنعت می‌باشد. از ویژگی‌های جوشکاری فراصوتی، سرعت بالا، اقتصادی بودن، قابلیت اتوماسیون بالا و به دلیل نرخ تولید بالا مناسب برای تولید انبوه است. با تجهیزات جمع‌وجور، اتصالاتی با مقاومت بالا تولید می‌کند. زمان جوشکاری در این روش کوتاه‌تر از هر روش دیگر جوشکاری است. برای حذف بخار جوش یا گرمای جوش نیازی به سیستم تهویه مجهر ندارد. این فرآیند بازدهی بالایی دارد انرژی کمی مصرف می‌شود و نتیجه خوبی می‌دهد و از بسیاری از روش‌های اتصال دیگر ارزان‌تر است. این فناوری، یکی از پرکاربردترین روش‌های جوشکاری برای اتصال ترموپلاستیک‌ها است که از انرژی فراصوت در فرکانس‌های بالا (15 تا 100 کیلوهرتز) برای تولید ارتعاشات مکانیکی با دامنه کم (10 تا 100 میکرومتر) استفاده می‌کند.

هنگامی که یک ماده ترموپلاستیک تحت ارتعاشات فراصوت قرار می‌گیرد، امواج ایستای سینوسی در ماده ایجاد می‌شود. بخشی از این انرژی در اثر اصطکاک بین مولکولی تلف می‌شود و گرمای زیادی در توده ماده تولید می‌کند. بخشی از این گرما به محل اتصال منتقل می‌شود، همان‌جایی که اصطکاک موضعی، گرما ایجاد می‌کند. این گرما، افزایش حرارت لازم برای اتصال‌دهی را فراهم می‌کند. مواد پلیمری ذوب می‌شوند. در اثر سرد شدن، جوش تشکیل می‌شود.

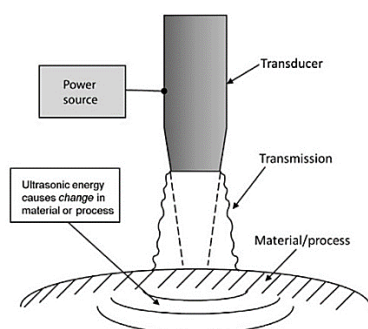


Fig. 1 The main components of the high power ultrasound system [5]

شکل 1 اجزای اصلی سیستم فراصوتی توان بالا [5]

مکانیزم عملکرد در جوش فراصوتی پلیمرها به ترتیب زیر است: پس از آماده‌سازی قطعات، قطعات داخل نگهدارنده گذاشته می‌شوند. منبع ارتعاشات

⁶ Laser welding

⁷ Frictional welding

⁸ Resistance welding

⁹ Ultrasonic welding

¹ Thermoplastic

² Mechanical fastening

³ Adhesive bonding

⁴ Fusion bonding

⁵ Induction

شبه فنر هستند و بخش زیادی از ارتعاشات را خودشان جذب می کنند [1].

[2].
آوراها بناتار و همکاران [14] در سال 1989 جوشکاری زمینه نزدیک را این گونه تعریف کردند که فاصله هورن تا محل اتصال حدود 6 میلی متر و کمتر باشد (شکل 3 الف). در این مطالعه جوشکاری فراصوتی زمینه نزدیک را برای مواد آمورف (اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) و پلی استایرن) و پلیمرهای نیمه کریستالی (پلی اتیلن و پلی پروپیلن)⁵ انجام دادند. نتایج تجربی نشان داد که تغییرات فشار جوشکاری تأثیر کمی بر اتلاف انرژی یا مقاومت اتصال مشترک دارد. افزایش دامنه ارتعاشات باعث افزایش اتلاف انرژی و افزایش مقاومت جوش می شود. برای پلیمرهای نیمه کریستالی، افزایش زمان جوشکاری باعث افزایش مقاومت جوش تا زمان جوشکاری زمینه نزدیک به 1.5 ثانیه می شود و بیشتر از آن مقاومت جوش را کاهش می دهد. برای پلیمرهای آمورف، مقاومت جوش با افزایش زمان جوشکاری تا زمان 0.8 ثانیه افزایش یافت. برای مدت زمان جوشکاری بیشتر، قدرت بسیار زیاد نیاز بود و باعث فشار بیش از حد روی دستگاه می شد که انجام نپذیرفت. آن ها دریافتند اعمال فشار در هنگام جوشکاری فراصوتی دو وظیفه مهم را اجرا می کند:

1. تماس خوبی بین هورن و قطعات ایجاد می کند تا انتقال انرژی به خوبی صورت پذیرد.
2. باعث ذوب هدایت کننده انرژی و جریان یافتن آن و جوش خوردن با قطعات می شود.

آوراها بناتار و ژانگ چنگی [15] در سال 1989 جوشکاری زمینه دور را این گونه تعریف کردند که فاصله هورن تا محل اتصال از 6 میلی متر بیشتر باشد (شکل 3 ب). در این مطالعه جوشکاری فراصوتی زمینه دور را برای مواد آمورف (اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) و پلی استایرن) و پلیمرهای نیمه کریستاله (پلی اتیلن و پلی پروپیلن) انجام دادند و دریافتند که جوشکاری زمینه دور برای پلیمرهای آمورف به خوبی عمل کرده است و مقاومت جوش با افزایش دامنه ارتعاشات، افزایش فشار و افزایش زمان جوشکاری بالاتر رفته است؛ اما برای مواد نیمه کریستالی جوشکاری زمینه دور موفق نبوده است و با این روش قسمتی از محل اتصال ذوب شده یا اصلاً ذوب نشده است.

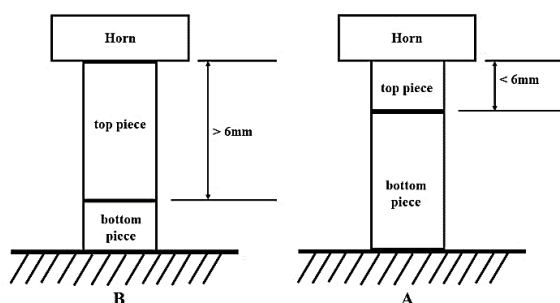


Fig. 3 a) Near field welding and b) Far field welding

شکل 3 الف) جوشکاری زمینه نزدیک و ب) جوشکاری زمینه دور

در اتصال دهی کامپوزیت ترموپلاست، ژانگلی و چانگ [16] در سال 2001 عوامل مؤثر بر استحکام اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت های پلی پروپیلن (PP)

روشن و با قطعه بالایی تماس پیدا می کند. ارتعاشات در محل اتصال دو قطعه اصطکاک را افزایش می دهد و به دمای مورد نیاز برای جوشکاری می رساند. سپس با فشار اعمال شده سطح های مشترک دو قطعه بیشتر باهم تماس می یابند و مقدار مذاب بیشتر می شود. وقتی ضخامت لایه ذوب و توزیع دما ثابت شود بعد از مدتی مشخص یا انرژی مشخصی که جوش به استحکام لازم یا فاصله مناسب برسد، منبع خاموش می شود و انرژی فراصوت شروع به کاهش می کند. فشار همچنان حفظ می شود، سپس یک پیوند مولکولی ایجاد می کند و در پایان سرد می شود [1، 2].

3-1- تجهیزات جوشکاری فراصوتی

تجهیزات جوشکاری فراصوتی عموماً شامل منبع تغذیه¹ (ژنراتور) برای ایجاد فرکانس مطلوب، ترانس دیوسر² یا مبدل برای ایجاد ارتعاشات مکانیکی از انرژی الکتریکی، بوستر³ برای تقویت یا تضعیف دامنه، هورن⁴ برای انتقال و تقویت یا تضعیف ارتعاشات، فیکسچر⁵ برای گرفتن قطعه، عملگر⁶ برای اعمال فشار و کنترل کننده⁷ برای کنترل عملیات جوشکاری و تکرار پذیری آن می باشد. نمونه یک دستگاه جوش فراصوتی و اجزا در شکل 2 نشان داده شده است.

4-1- پیشینه تحقیق

جوشکاری فراصوتی را می توان به دو روش جوشکاری زمینه نزدیک و زمینه دور (وابسته به نزدیکی منبع ارتعاشات به محل اتصال) تقسیم کرد (شکل 3). جوشکاری زمینه نزدیک برای مواد پلیمر نیمه کریستاله و نرم استفاده می شود و جوشکاری زمینه دور برای مواد سخت و آمورف استفاده می شود؛ دلیل این امر مقدار جذب ارتعاشات در ماده است. پلاستیک های آمورف ساختار مولکولی تصادفی دارند و در دامنه وسیعی از دما به تدریج نرم می شوند. آمورف ها در حالت گذار شیشه ای می شوند و در حالت مذاب مایع؛ جامد شدن آن ها هم تدریجی است به صورتی که از انجماد زودرس جلوگیری می کند.

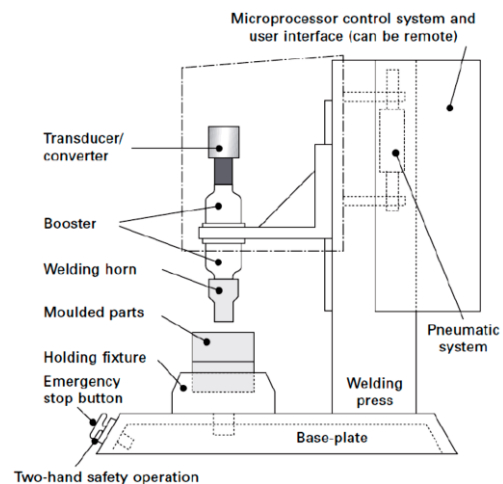


Fig. 2 Schematic of ultrasonic welding equipment [13]

شکل 2 نمای تجهیزات جوشکاری فراصوتی [13]

پلیمرهای آمورف ارتعاشات فراصوتی را به خوبی منتقل می کنند و می توانند با شرایط متنوعی جوشکاری شوند. پلاستیک های نیمه کریستالی توسط مناطق منظم ساختار مولکولی شان مشخص می شوند و گرمای زیادی لازم است تا این نظم را خراب کرد. وقتی در حالت جامد هستند مولکول های نیمه کریستالی

⁵ Fixture
⁶ Actuator
⁷ Controler
⁸ Polypropylene

¹ Power Supply/Generator
² Transducer
³ Booster
⁴ Horn

می‌شود. با افزایش زمان میزان فروروی هورن افزایش می‌یابد و انرژی جوش زیاد می‌شود و مقاومت محل اتصال افزایش می‌یابد تا مقدار بهینه (2.5 ثانیه و 0.18 مگاپاسکال) و پس‌از آن موجب کاهش مقاومت محل اتصال می‌شود. بالینکه داده‌ها پراکنده بود ولی برای به دست آوردن حداکثر مقاومت محل اتصال می‌توان از زمان جوش 2.1 ثانیه و فشار 0.15 مگاپاسکال استفاده کرد. ویژگی‌های کامپوزیت پلی آمید 6 شیشه با الیاف ممتد و خلأ تحقیق در اتصال‌دهی این نوع کامپوزیت محرک اصلی در انجام تحقیق حاضر بوده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای زمان، توان و فشار جوشکاری بر استحکام اتصال جوش فراصوت کامپوزیت الیاف پیوسته شیشه پلی آمید 6 بررسی شد. همچنین تأثیر فیلم لایه واسط، تغییر 90 درجه جهت الیاف در لایه‌ها بر استحکام به‌صورت موردی بررسی شد. در انتها مقایسه بین اتصال چسب و اتصال جوش فراصوت انجام گرفت. با استفاده از آزمون کشش-برش استحکام اتصال‌ها بررسی شد.

2- روش تحقیق

پلی آمید 6 (نایلون 6) از پرکاربردترین پلیمر در صنعت خودروسازی می‌باشد که استحکام فوق‌العاده‌ی کامپوزیت شیشه و کربن این پلیمر باعث شده در صنایع هوایی و هوافضا بسیار بکار رود. خواص مکانیکی بالا این کامپوزیت را برای استفاده در قسمت‌هایی که در طی دوره‌های طولانی در شرایط دمای بالا در معرض بارهای ایستا قرار دارند، به پیشنهادی مناسب تبدیل کرده است. پلی آمید 6 یک پلیمر نیمه کریستاله دارای خواص غیر سمی و چگالی پایین است. این ماده همچنین دارای مقاومت مکانیکی عالی، مقاومت در برابر سایش و مقاومت به خوردگی خوب است. سفتی بالاتر، مقاومت در برابر حرارت و ضربه نتیجه اضافه کردن الیاف به این پلیمر است. مشخصات ورق کامپوزیت و فیلم واسط استفاده‌شده در این تحقیق در جدول 1 بیان‌شده است.

جدول 1 ویژگی مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق

Table 1 Characteristics of raw materials used in this research

ویژگی	واحد	PA6	PA6/GF
چگالی	g/cm ³	1.3	1.7
استحکام کششی	MPa	35	265
درصد الیاف	%	0	60
جهت الیاف	degree	-	0/90/0/90/0/90/0
ضخامت	mm	0.3	2

کامپوزیت ترموپلاست استفاده‌شده در این تحقیق از ورق‌های پیش آغشته⁴ پلی آمید 6 شیشه تهیه‌شده‌اند که ورق‌های پیش آغشته با روش پالتروژن⁵ تولید شدند [21, 22]. برای تولید کامپوزیت ترموپلاست الیاف ممتد (پیوسته) از پیش آغشته‌ها، ابتدا ورق‌های پیش آغشته به‌اندازه قالب بریده‌شده است. سپس با استفاده از روش پرس گرم در دمای 235 درجه سانتی‌گراد و تحت فشار 20 بار ورق‌های پیش آغشته به کامپوزیت شیشه پلی آمید تبدیل شدند.

ورق کامپوزیت با استفاده از واترجت به‌اندازه استاندارد ASTM D5868 نمونه‌های لبه روی‌هم⁶ مطابق شکل 4 بریده شدند. برای بررسی 90 درجه

را بررسی کردند. در این تحقیق روی سه ماده پلی‌پروپیلن خالص¹، پلی‌پروپیلن با 10 درصد الیاف شیشه² و پلی‌پروپیلن با 30 درصد الیاف شیشه³ انجام شد. مقاومت اتصال کامپوزیت‌ها پس از جوشکاری توسط آزمون کشش-برش تعیین شد. فاکتورهای انتخاب‌شده در این آزمایش، زمان جوشکاری، هندسه هدایت‌کننده انرژی و دامنه ارتعاشات بود. در این تحقیق نشان داده شد که کامپوزیت‌های الیاف شیشه (GF) نسبت به پلیمرهای خالص به انرژی کمتری برای یک جوش خوب نیازمند هستند و وقتی الیاف در محل اتصال افزایش می‌یابد استحکام محل اتصال بیشتر می‌شود.

دبیری و همکاران در سال 2016 [17] تأثیر پارامترهای جوشکاری فراصوتی مانند زمان جوش، فشار هوا، زمان نگهداری و مقدار الیاف شیشه در کامپوزیت را بر استحکام کششی اتصالات جوش فراصوتی بررسی نمودند. کامپوزیت مورد تحقیق آن‌ها از گرانول‌های اکستروژده پلی آمید 6 و الیاف شیشه با روش پرس داغ تولیدشده است. نمونه‌ها با هندسه جوش T و مقادیر پارامترهای تعیین‌شده از طریق طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ جوش داده شدند و استحکام آن‌ها با استفاده از آزمون کشش بررسی شد. با تجزیه و تحلیل آماری، حداکثر استحکام اتصال را در دامنه 30-33 میکرون، 41 درصد الیاف شیشه، فشار 3.65 بار، زمان جوش 1.84 ثانیه و زمان نگهداری 0.9 ثانیه به دست آوردند. محققان دریافتند در میان پارامترها درصد الیاف شیشه مهم‌ترین عامل مؤثر بر استحکام جوش است و به دنبال آن فشار هوا، زمان جوش و زمان نگهداری قرار می‌گیرند.

در سال 2017 نیکویی و همکاران [18] به بررسی استحکام اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداختند. محققان تأثیر پارامترهای زمان، فشار، دامنه و درصد الیاف موجود در کامپوزیت را در استحکام کشش-برش اتصال جوش فراصوتی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند دامنه ارتعاش تأثیر بیشتری از عوامل دیگر بر استحکام جوش داشته است. سپس زمان و بعد درصد الیاف شیشه تأثیرگذار بودند. کمترین تأثیر در بین پارامترها را هم فشار نگهداری داشته است.

وانگ و همکاران [19] در سال 2017 روی زمان و دمای پیش‌گرمایش جوش فراصوتی کامپوزیت پلی آمید (نایلون) کربن 30 درصد الیاف بدون هدایت‌کننده انرژی پرداختند. پیش‌گرمایش باعث تمرکز انرژی جوش می‌شود و فشار جوشکاری را محلی سازی می‌کند، منطقه جوش متمرکزتر می‌شود و لبه‌های جوش کاهش یابند. کیفیت اتصال با افزایش دمای پیش گرم کاهش می‌یابد. با افزایش زمان پیش‌گرمایش حداکثر بار برشی افزایش می‌یابد و سپس به دلیل تخلخل‌های ایجادشده در لایه جوش، زمانی که اتصالات بیش‌ازحد گرم می‌شوند، حداکثر بار برشی کاهش می‌یابد.

یوهائو گائو و همکاران [20] در سال 2018 اتصال جوش الیاف کربن تقویت‌شده (با ضخامت 4 میلی‌متر) به نایلون 66 (پلی آمید 66) را بررسی نمودند و سعی کردند این اتصال را بدون استفاده از هدایت‌کننده انرژی انجام دهند. هنگامی که زمان جوشکاری به مقدار از پیش تعیین‌شده رسید، نوسان موج فراصوت متوقف‌شده و نمونه‌ها برای 3.0 ثانیه در زیر هورن نگهداشته شدند تا مرحله جامد شدن انجام پذیرد. با افزایش زمان جوشکاری مقاومت نایلون 66 افزایش می‌یابد. افزایش فشار هورن از 0.13 تا 0.17 مگاپاسکال نه‌تنها منجر به افزایش مقاومت محل اتصال در زمان جوش ثابت می‌شود، بلکه باعث کوتاه شدن زمان جوشکاری لازم برای به دست آوردن حداکثر مقاومت محل اتصال

¹ virgin polypropylene

² 10% glass-fiber filled polypropylene composites

³ 30% glass-fiber filled polypropylene composites

⁴ Prepreg

⁵ Pultrusion

⁶ Lap sheare joint

2-2- آزمون کشش-برش

برای بررسی استحکام محل اتصال نمونه‌های جوش داده‌شده از آزمون کشش-برش استفاده شد. طبق استاندارد ASTM D 5868 نمونه‌ها داخل فک دستگاه کشش قرار گرفتند و با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه کشیده شدند. در این پژوهش از دستگاه آزمون کشش استاندارد SANTAM ASTM_50 استفاده شد. حین اجرای آزمون به تمهیدات برای اعمال نیروی محوری به نمونه‌ها و جلوگیری از سرخوردن نمونه‌ها از روی فک‌ها توجه شد.

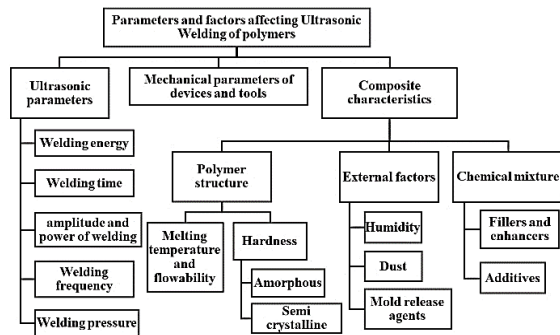


Fig. 5 Parameters and factors affecting ultrasonic welding of polymers and polymer based composites

شکل 5 پارامترها و عوامل موثر بر جوشکاری فراصوتی پلیمرها و کامپوزیت‌های پایه پلیمری

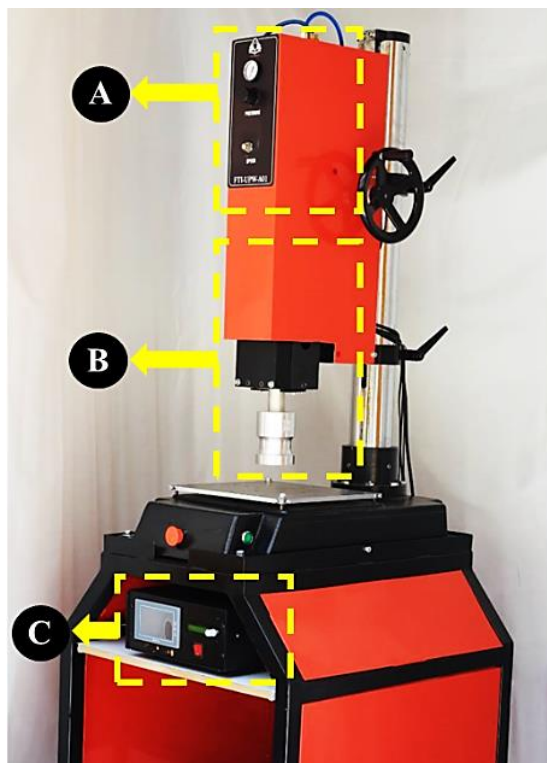


Fig. 6 The polymer ultrasonic welding device and polymer base composites used in this research, A) pneumatic actuator, B) vibration set including transducer, booster and horn, C) power source and controller

شکل 6 دستگاه جوش فراصوتی پلیمر و کامپوزیت‌های پایه پلیمری استفاده شده در این تحقیق، الف) عملگر پنوماتیک، ب) مجموعه ارتعاشی شامل ترانسیدوسر، بوستر و هورن، ج) منبع تغذیه و کنترلر

چرخش جهت الیاف کامپوزیت در استحکام اتصال جوش، تعدادی نمونه با 90 درجه تغییر جهت نسبت به جهت چینش اصلی برش داده شدند. بدین‌صورت جهت الیاف در این نمونه‌ها به‌صورت 90/0/90/0/90 از جهت طول نمونه‌ها بوده است.

پس از برش نمونه‌ها به دلیل جذب رطوبت پلی آمید 6، نمونه‌ها داخل اتوکلاو قرار داده شدند تا رطوبت حاصل از برش با واترجت روی استحکام جوش تأثیر نداشته باشند. سپس نمونه‌ها شماره‌گذاری و برای جوش آماده شدند.

1-2- انتخاب پارامترهای جوشکاری و مقادیر آن‌ها

همانطور که در شکل 5 نشان داده‌شده است پارامترهای تأثیرگذار زیادی در استحکام جوش فراصوتی تأثیر دارند، اما سه پارامتر زمان جوشکاری، فشار جوشکاری و توان از پارامترهای اصلی و قابل تنظیم روی دستگاه‌های جوشکاری فراصوتی هستند. به همین دلایل به تعیین بازه‌ی جوش برای این سه پارامتر با استفاده از دستگاه 2000 وات و 20 کیلوهرتز (شکل 6) پرداخته شد. ابتدا سه نمونه برای به دست آوردن بازه مقادیر پارامترها، به اصطلاح پیش تست، جوش داده شد. مقدار 2 ثانیه زمان جوش و فشار 2 بار و توان 100 درصد، جوش بیش‌ازحد، له شده و سوخته‌ای را حاصل کرد. در مقدار 0.3 ثانیه و 0.9 بار و توان 30 درصد، کم جوش خورده، در 2 ثانیه و 1 بار و توان 100 درصد، جوش خوب مشاهده شد. پس بازه زمان جوش از 0.3 ثانیه تا 2 ثانیه، بازه فشار جوشکاری از 0.9 بار تا 2 بار و بازه توان از 30 تا 100 درصد تعیین شد. نمونه‌ها با مقادیر بین این بازه‌ها جوشکاری شدند و پس از جوش مورد آزمون قرار گرفتند.

برای بررسی تأثیر فیلم واسطه تعدادی نمونه با یک لایه فیلم پلیمر خالص پلی آمید 6 با ضخامت 0.3 میلی‌متر در بین محل اتصال چند نمونه به هم جوش داده شدند (شکل 7) و استحکام آن‌ها با نمونه‌های اصلی مقایسه شد. در انجام جوشکاری نمونه‌های فیلم دار، تعدادی فیلم در اثر ارتعاشات فراصوت از بین دو قطعه سر خوردند و به‌صورت یکنواخت محل اتصال غنی از پلیمر نشد. این نمونه‌ها به علت خطا در انجام صحیح جوش کنار گذاشته شدند و نمونه‌هایی که فیلم واسطه به‌طور یکنواخت در بین محل اتصال ذوب شدند بررسی شدند.

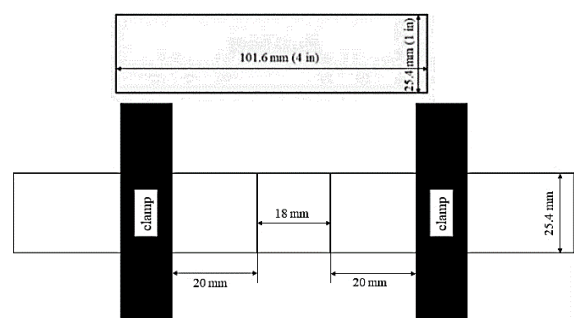


Fig. 4 Schematic size of cut standard samples and welding site schematic

شکل 4 نمای اندازه نمونه‌های استاندارد بریده‌شده و نمای محل جوشکاری

در بررسی تأثیر تغییر جهت 90 درجه الیاف، تعدادی نمونه که 90 درجه برش داده‌شده بودند به هم جوش داده شدند و استحکام آن‌ها با نمونه‌های اصلی مقایسه شد. یک نمونه هم با استفاده از چسب، چسبانده شد و استحکام آن با نمونه‌های جوش مقایسه شد.

در زمان بالا و توان بالا انرژی جوش بالا می‌رود (در نمونه 11 حدود 2316 ژول)، این انرژی بالا باعث بالا رفتن دما در محل اتصال و سیالیت بیش‌ازحد مذاب می‌شود. سیالیت بیش‌ازحد مذاب غیریکنواختی پلیمر و الیاف را به هم زده و باعث مشاهده نقاط تجمع پلیمر و نقاط فقدان پلیمر می‌شود.

3-1- تأثیر فیلم واسط

در جدول 3 نتایج استحکام نمونه‌های 8، 9، 10 و 11 جوشکاری شده با فیلم و بدون فیلم بیان شده است. مشاهده می‌شود استفاده از فیلم واسط در نمونه‌ها باعث افزایش استحکام جوش می‌شود. کیفیت ظاهری نمونه‌های با فیلم تفاوت زیادی با نمونه‌های بدون فیلم ندارد فقط در محل اتصال نمونه‌های جوش داده شده با فیلم، مقداری پلیمر اضافه، یا فیلم ذوب نشده مشاهده می‌شود (شکل 7 شماره 1). با دقت بیشتر روی جدول 3 می‌توان فهمید استفاده از فیلم واسط در جوشکاری فراصوتی شیشه پلی آمید 6 به‌طور میانگین حدود 9.75 درصد استحکام جوش را افزایش داده است. نمونه 8 در حالت بدون فیلم مقدار 1373 ژول و در حالت با فیلم 1249.7 ژول انرژی جوش داشته است. همچنین نمونه 9 در حالت بدون فیلم مقدار 2394 ژول و در حالت با فیلم 2012 ژول انرژی جوش داشته است. در حالت بدون فیلم نمونه 10، 2416 ژول و نمونه 11، 2647 ژول و در حالت با فیلم نمونه 10، 2146 ژول و نمونه 11، 2253 ژول بوده است. با مقایسه انرژی‌های جوش می‌توان فهمید استفاده از فیلم واسط انرژی جوش موردنیاز را کاهش می‌دهد. در این چند نمونه به‌طور میانگین حدود 12.5 درصد انرژی جوش کاهش یافته است.

در بررسی محل شکست نمونه‌های جوش داده شده دارای فیلم واسط با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد، در ناحیه جوش الیاف غنی از پلیمر و به‌صورت دسته‌جمعی به هم چسبیده‌اند (شکل 8). یکنواختی پخش پلیمر در بین الیاف باعث افزایش استحکام جوش شده است.

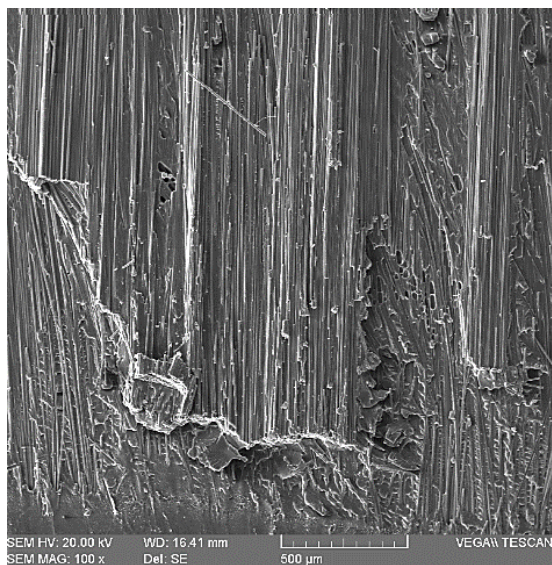


Fig. 8 SEM image of the failure point of sample 8F

شکل 8 تصویر SEM از محل شکست اتصال نمونه 8F

استفاده از یک‌لایه فیلم لایه واسط در ابتدای جوشکاری باعث تمرکز ارتعاشات در محل اتصال و شروع ذوب از پلیمر موجود در فیلم می‌شود و کم‌کم منطقه مذاب گسترش می‌یابد. همچنین استفاده از فیلم همانند استفاده از سپر

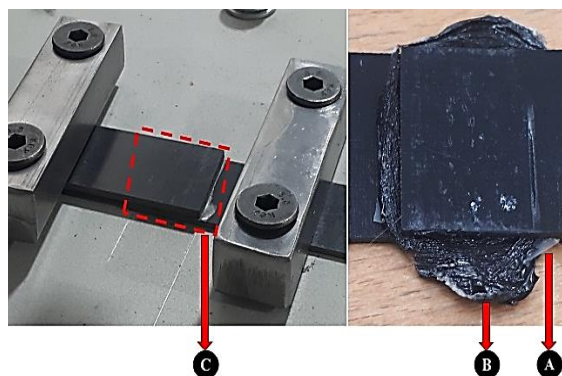


Fig. 7 The view of the welding area and sample 2F before and after welding, A) a part of the interface film after welding, B) polymer and fiber protrusion, C) the welding area of sample 2F before welding

شکل 7 نمای محل جوش و نمونه 2F قبل و بعد از جوشکاری، الف) قسمتی از فیلم واسط پس از جوش داده شدن، ب) بیرون‌زدگی پلیمر و الیاف، ج) محل جوش نمونه 2F قبل از جوشکاری

3-2- بررسی میکروساختار

پس از آزمون کشش-برش، سطح مقطع شکست برخی نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ نوری¹ (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی² (SEM) مشاهده شد.

3- نتایج و بحث

در جدول 2 مشاهده شد در بررسی اثر زمان بر استحکام جوش با افزایش زمان تا مقدار بهینه استحکام جوش افزایش یافته و بیشتر از آن استحکام اتصال کاهش یافته است. همچنین با افزایش توان استحکام جوش افزایش یافته است. فشار برای انجام جوشکاری فراصوتی یک پارامتر مهم است و برای یک جوش عامل فشار لازم است. با افزایش فشار استحکام جوش هم افزایش پیدا کرده است. مشاهده شد افزایش زمان جوش بیشتر از 2 ثانیه باعث کاهش استحکام اتصال جوش شده است. با بررسی محل اتصال مشاهده شد در برخی نقاط تجمع پلیمر و در برخی نقاط فقدان پلیمر وجود دارد.

جدول 2 نتایج استحکام نمونه‌های اصلی و بدون فیلم

Table 2 Strength results of original samples without film

نام نمونه	پارامترهای جوشکاری فراصوتی			استحکام کششی (MPa)
	زمان جوشکاری (s)	فشار جوشکاری (bar)	توان (%)	
1	1	1.35	65	13.23
2	1	1.35	30	4.76
3	1	1.35	100	21.82
4	1	1.8	65	17.65
5	1	0.9	65	13.1
6	0.5	1	40	2.64
7	1.8	1.35	65	15.38
8	1.77	1.05	74	15.3
9	1.8	1.8	100	26.3
10	2	1.8	100	27.2
11	2.3	1.8	100	23.4

¹ Optical Microscope (OM)

² Scanning Electron Microscopy (SEM)

مقایسه آزمون کشش-برش اتصال چسبی و نمونه‌های جوش فراصوتی بدون فیلم (9) و با فیلم (9F) در شکل 10 بیان شده است.

با مشاهده نتیجه می‌توان فهمید استحکام جوش فراصوتی بیشتر از استحکام اتصال چسبی است. برای مثال استحکام نمونه 9 که بدون فیلم جوش داده شده است 26.3 مگاپاسکال است، اما اتصال چسب 6.2 مگاپاسکال دارد. در این مقایسه، اتصال جوش به‌جز استحکام بالاتر (حدود 4 برابر)، زمان بسیار کمی مصرف می‌کند. در نمونه 9 کمتر از 2 ثانیه زمان اتصال‌دهی جوش بود و برای اتصال چسبی 72 ساعت صرف شد. این نشان‌دهنده بازدهی بالای جوش فراصوتی است. همچنین رفتار مکانیکی و استحکام اتصال چسبی به عوامل مختلف و محیطی وابسته است [23، 24]، اما در جوش فراصوتی به دلیل عدم استفاده از چسب و ماده واسط در محل اتصال به نظر می‌رسد ناحیه اتصال حساسیت کمتری نسبت به عوامل بیرونی و محیطی داشته باشد.

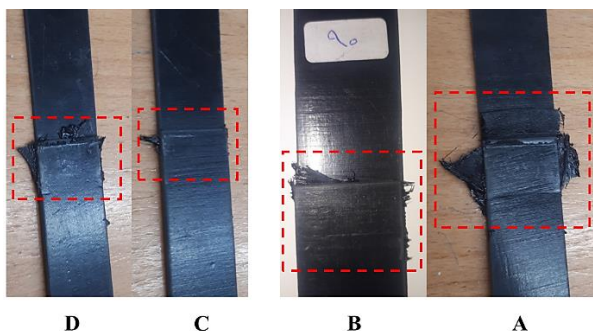


Fig. 9 Pictures A are sample 9.90, B is sample 8.90, C is sample 8, and D is sample 9.

شکل 9 تصاویر الف نمونه 9.90، ب نمونه 8.90، ج نمونه 8 و د نمونه 9

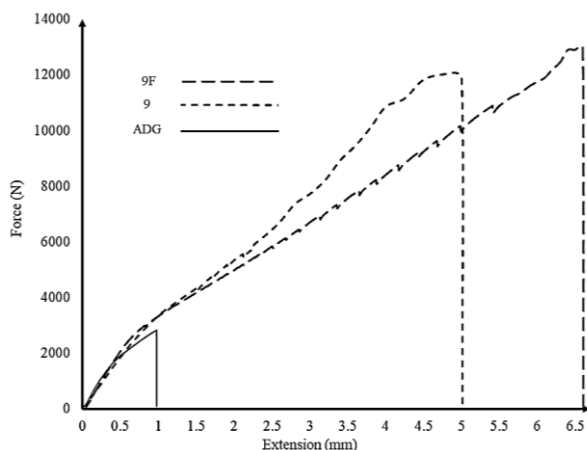


Fig. 10 Tensile-shear diagrams of adhesive joint (ADG) samples, ultrasonic welding joint without film (9) and with film (9F)

شکل 10 نمودارهای کشش-برش نمونه‌های اتصال چسبی (ADG)، اتصال جوش فراصوتی بدون فیلم (9) و با فیلم (9F)

4- نتیجه‌گیری

در بررسی استحکام اتصال جوشکاری فراصوتی کامپوزیت شیشه پلی آمید 6، مشاهده شد:

حرارتی اثرات سوء دمای بالا را کاهش می‌دهد و در محل اتصال حرارت را در پلیمر بیشتری نسبت به حالت بدون فیلم پخش می‌کند.

جدول 3 نتایج استحکام نمونه‌های جوش داده‌شده با فیلم واسط

Table 3 Strength results of welded samples with interlayer film

زمان جوشکاری (s)	فشار جوشکاری (bar)	توان (%)	استحکام کششی (MPa)		
			نام نمونه	بدون فیلم	نام نمونه
1.77	1.05	74	8F	15.3	8F
1.8	1.8	100	9F	26.3	9F
2	1.8	100	10F	27.2	10F
2.3	1.8	100	11F	23.4	11F

2-3- تأثیر تغییر 90 درجه جهت الیاف

در جدول 4 مشاهده می‌شود استفاده از نمونه‌هایی با 90 درجه اختلاف جهت الیاف با نمونه‌های اصلی استحکام جوش را کاهش دادند.

جدول 4 نتایج استحکام نمونه‌های 90 درجه جوش داده‌شده

Table 4 Strength results of 90° welded samples

زمان جوشکاری (s)	فشار جوشکاری (bar)	توان (%)	استحکام کششی (MPa)		
			نام نمونه	صفر درجه	نام نمونه
1.77	1.05	74	8F	15.3	90 درجه
1.8	1.8	100	9F	26.3	90 درجه

در شکل 9 مشاهده می‌شود نمونه‌های 90 درجه (تصاویر الف و ب) مقدار بیرون‌زدگی¹ پلیمر و الیاف بیشتری نسبت به نمونه‌های اصلی (تصاویر ج و د) داشتند. امواج فراصوت باعث بیرون راندن پلیمر مذاب و الیاف 90 درجه شدند و بیرون‌زدگی بیشتر شد. در نمونه‌های اصلی چون لایه اول 0 درجه بوده و الیاف در امتداد طول کل نمونه بوده، مقدار بیرون‌زدگی کمتر بوده و قسمت ذوب نشده پلیمر و الیاف، الیاف و پلیمر محل اتصال را نگه‌داشته‌اند. نمونه‌های 90 درجه در محل اتصال دو قطعه، لایه‌های 90 درجه دارند که هنگام ذوب پلیمر به‌صورت آزاد و شناور در پلیمر درمی‌آیند و با فشار هنگام جوشکاری به‌راحتی از محل اتصال به بیرون رانده می‌شوند. در نمونه‌ها مشاهده شد با افزایش فشار در نمونه‌های 90 درجه بیرون‌زدگی پلیمر و الیاف بسیار بیشتر از نمونه‌های اصلی است. این مورد به‌وضوح در مقایسه نمونه‌های 9.90 و 8.90 شکل 9 (الف و ب) مشخص است.

3-3- مقایسه استحکام جوش فراصوتی و اتصال چسب

یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در اتصال‌دهی کامپوزیت‌ها، اتصال چسبی است. برای مقایسه بین استحکام جوش فراصوتی با اتصال چسب، چسب معتبر تهیه شد. سپس یک نمونه استاندارد لبه روی هم به هم چسبانده شدند. به دلیل تأثیر حرارت روی پلیمر کامپوزیت، چسب‌ها پخته نشدند و از چسب‌هایی استفاده شد که نیاز به پخت داخل کوره نداشته باشند. نمونه کامپوزیت شیشه پلی آمید 6 با چسب اهو² 300 کیلوگرم آلمان چسبانده شد و سه روز (72 ساعت) تحت فشار 1 بار به آن‌ها فرصت خشک شدن کامل داده شد. سپس با آزمون کشش-برش استحکام اتصال چسبی بررسی شد. نتیجه آزمون کشش-برش برای اتصال چسبی در 6.2 مگاپاسکال بوده است. نمودار

² UHU

¹ Squeeze out

- [12] Unnikrishnan, T. G. and Kavan, P., "A Review Study in Ultrasonic-Welding of Similar and Dissimilar Thermoplastic Polymers and Its Composites" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, pp. 3294-3300, 2022.
- [13] Micus, S., Rostami, S. G., Haupt, M., Gresser, G. T., Meghraz, M. A. and Eskandarian, L., "Integrating Electronics to Textiles by Ultrasonic Welding for Cable-Driven Applications for Smart Textiles" *Materials*, Vol. 14, No. 19, pp. 573.2021, 5.
- [14] Benatar, A., Eswaran, R. V. and Nayar, S. K., "Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the near-Field" *Polymer Engineering & Science*, Vol. 29, No. 23, pp. 1689-1698, 1989.
- [15] Benatar, A. and Cheng, Z., "Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the Far-Field" *Polymer Engineering & Science*, Vol. 29, No. 23, pp. 1699-1704, 1989.
- [16] Liu, S.-J., Chang, I.-T. and Hung, S.-W., "Factors Affecting the Joint Strength of Ultrasonically Welded Polypropylene Composites" *Polymer Composites*, Vol. 22, No. 1, pp. 132-141, 2001.
- [17] Dabiry, Y., Sheikhi, M. and Nikoi, R., "An Experimental Study on the Tensile Behaviors of Ultrasonic Welded T-Joints for Polyamide Composite" *International Journal of Engineering*, Vol. 29, pp. 1783-1790, 2016.
- [18] Nikoi R, Sheikhi MM, Arab NBM. "Experimental analysis of effects of ultrasonic welding on weld strength of polypropylene composite samples". In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, 28(3):447-53, 2015.
- [19] Wang, K., Li, Y., Banu, M., Li, J., Guo, W. and Khan, H., "Effect of Interfacial Preheating on Welded Joints During Ultrasonic Composite Welding" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 246, pp. 116-122, 2017.
- [20] Gao, Y.-H., Zhi, Q., Lu, L., Liu, Z.-X. and Wang, P.-C., "Ultrasonic Welding of Carbon Fiber Reinforced Nylon 66 Composite without Energy Director" *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 140, No. 5, 2018.
- [21] Tutunchi, M., Golzar, M. and Behraves, A. H., "Investigation of Thermoplastic Pultrusion for Tubular Product Production Using Prepregs" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-32, 2015.
- [22] najafi, m., Golzar, M. and sadeghi, m., "Experimental Evaluation of Joint Strength in Polypropylene-Glass Fiber Reinforced Composites under Tensile Load" *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 39-46, 2019.
- [23] Ashofteh, R. S., Pourang, H., Mobasheri, M. and Khoramishad, H., "The Effects of Temperature Level and Stress-to-Strength Ratio on Creep Behavior of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 353-358, 2018.
- [24] Shamsaei, Z. and Khoramishad, H., "Deleterious Effects of Seawater, Acidic Water and Alkali Water on Mechanical Properties of Nanocomposite Adhesives" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 1, pp. 1936-1927, 2022.

- پارامتر زمان، توان و فشار تأثیر مثبت روی استحکام دارند و با افزایش این پارامترها تا مقدار بهینه، استحکام افزایش پیدا می‌کند. افزایش زمان بیشتر از 2 ثانیه باعث افزایش سیالیت بیش‌ازحد مذاب پلیمر و پیدایش مناطقی فاقد پلیمر در اتصال شده است که استحکام اتصال را کاهش داده است.
- با اضافه کردن یک لایه فیلم واسط در محل اتصال استحکام جوش بالا می‌رود و انرژی جوش موردنیاز کاهش پیدا می‌کند. استفاده از یک لایه فیلم لایه واسط در ابتدای جوشکاری باعث تمرکز ارتعاشات در محل اتصال می‌شود. همچنین استفاده از فیلم همانند استفاده از سپر حرارتی اثرات سوء دمای بالا را کاهش می‌دهد.
- با تغییر جهت الیاف در تمامی لایه‌های کامپوزیت به‌اندازه 90 درجه، کاهش استحکام و کاهش کیفیت ظاهری جوش مشاهده شد. بیرون‌زدگی پلیمر و الیاف بیشتر شد. همچنین با افزایش فشار مشاهده شد بیرون‌زدگی پلیمر بیشتر و کیفیت ظاهری کاهش پیدا می‌کند.
- در مقایسه اتصال جوش فراصوتی با اتصال چسبی، مشاهده شد استحکام جوش بسیار بالاتر از استحکام چسب بوده (در حدود 4 برابر) و همچنین زمان جوش بسیار ناچیز در مقایسه با زمان اتصال چسب بوده است.

5- مراجع

- [1] Benatar, A., "Ultrasonic Welding of Plastics and Polymeric Composites" in: *Power Ultrasonics*, Eds., pp. 295-312, 2015.
- [2] "Chapter 2 - Ultrasonic Welding" in: M. J. Troughton, *Handbook of Plastics Joining (Second Edition)*, Eds., pp. 15-35, Boston : William Andrew Publishing, 2009.
- [3] Bhudolia, S. K., Gohel, G., Leong, K. F. and Islam, A., "Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review" *Materials*, Vol. 13, No. 6, pp. 1284, 2020.
- [4] Troughton, M., "Handbook of Plastics Joining a Practical Guide, Second Edition", 2008 .
- [5] Gallego-Juárez, J. and Graff, K., "Introduction to Power Ultrasonics" in: *Power Ultrasonics*, Eds., pp. 1-6: Elsevier, 2015.
- [6] Abedini, R., Abdullah, A., Alizadeh, Y. and Fartashvand, V., "A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic Vibrations in Metal Forming" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 323-334, 2017.
- [7] Abdullah, A., Sotoodezadeh, M., Abedini, R. and Fartashvand, V., "Experimental Study on Ultrasonic Use in Dry Creep-Feed up-Grinding of Aluminum 7075 and Steel X210cr12" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 2, pp. 191-198, 2013.
- [8] Fartashvand, V., Abedini, R. and Abdullah, A., "Influence of Ultrasonic Vibrations on the Properties of Press-and-Sintered Titanium" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 236, No. 11, pp. 1518-1525, 2022.
- [9] Abedini, R., Abdullah, A. and Alizadeh, Y., "Ultrasonic Assisted Hot Metal Powder Compaction" *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 38, pp. 704-710, 2017.
- [10] Gujba, A. K. and Medraj, M., "Power Ultrasonic Additive Manufacturing: Process Parameters, Microstructure, and Mechanical Properties" *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2020, pp. 1064870, 2020.
- [11] Cheng, X. M., Yang, K., Wang, J., Xiao, W. T. and Huang, S. S., "Ultrasonic System and Ultrasonic Metal Welding Performance: A Status Review" *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 84, pp. 1196-1216, 2022.



بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

محمد کنگوئی¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۹۹۱۹، eslami@kntu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با الیاف یکی از چالش‌های بزرگ مهندسی در صنایع مختلف به دلیل محدودیت‌های تولید آن می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش اختلاط جریان برشی به عنوان روشی جدید در حالت نیمه جامد و با کمک نیروی برشی در فرآیند تولید کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف استفاده شود. بدین منظور الیاف بازالت (با درصدهای حجمی 2، 4 و 6) در مذاب آلومینیوم A356 توزیع شده و با ایجاد جریان برشی در محدوده دمای نیمه جامد آلومینیوم، نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شدند. جهت بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها از آزمون سختی برینل و پانچ برشی استفاده شد. همچنین بررسی‌های ریزساختاری به همراه آنالیز عنصری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش درصد الیاف بازالت به طور همزمان سختی، استحکام برشی و استحکام کششی بهبود یافته و در نهایت باعث بهبود استحکام نهایی کامپوزیت گردیده است. استحکام برشی از 119.1 مگاپاسکال برای نمونه بدون الیاف به 132.3 مگاپاسکال در کامپوزیت تقویت شده با 6 درصد حجمی الیاف بازالت افزایش یافت. همچنین نتایج آزمون سختی، افزایش سختی از 62.3 به 70.8 برینل را در نمونه حاوی 6 درصد حجمی الیاف بازالت نشان داد. استحکام کششی نهایی در این نمونه نیز بهبود 10.9 درصدی را نشان داد. بررسی‌های میکروساختاری نشان داد که تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک باعث بهبود خواص مکانیکی در این کامپوزیت شده است.

دریافت: 1402/03/13

پذیرش: 1402/05/18

کلیدواژگان

کامپوزیت زمینه فلزی،
اختلاط جریان برشی،
خواص مکانیکی،
رفتار سختی،
الیاف بازالت

Investigating the mechanical behavior and microstructure of basalt fibers-aluminum composite fabricated by thixomixing method

Mohammad Kangoobi¹, Reza Eslami-Farsani^{1*}

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

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

Keywords

Metal Matrix Composite,
Shear Mixing,
Mechanical Properties,
Hardness Behavior,
Basalt Fibers

Abstract

Fabricating Metal matrix composites (MMCs) reinforced by fibers is one of the biggest issues in the engineering in various industries, due to production limitations. In this research, it has been tried to fabricate aluminum matrix composites reinforced by fibers through thixomixing as a novel method in semi-solid state and by helping shear force. For doing this, the basalt fibers (with the volume fraction of 2, 4, and 6) were dispersed into the molten A356 aluminum and by creating the shear mixing in the range of semi-solid temperature of aluminum, the composites were fabricated. For investigating the mechanical behavior of fabricated composites, the Brinell hardness and shear punch tests were used. Also, microstructural investigations and elemental analysis by scanning electron microscope were performed. The obtained results showed that by increasing the fibers content, the hardness and shear strength were simultaneously improved, which resulted in improvement of the ultimate strength of composite. The shear strength was increased from 119.1 MPa (for without fibers sample) to 132.3 MPa (in reinforced composite by 6 vol.% basalt fibers). Also, the hardness test results showed an increase in Brinell hardness from 62.3 to 70.8 Hb in the sample with 6 vol.% of basalt fibers. The ultimate tensile strength in this sample also showed 10.9% improvement. Microstructural investigations depicted that the formation of intermetallic compounds at the interface improved the mechanical properties.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Eslami-Farsani, R., Kangoobi, M., "Investigation the mechanical behavior and microstructure of basalt fibers aluminium composite fabricated by thixomixing method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 1, pp. 2184-2192, 2023. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2002871.1839>

1- مقدمه

از جمله اهداف مهم در مهندسی مواد، دستیابی به مواد با خواص بهتر و در بسیاری از موارد، همراه کاهش هزینه‌های اقتصادی است. یکی از بزرگ‌ترین گروه‌های مواد مهندسی، کامپوزیت‌های زمینه فلزی هستند. با پیشرفت روزافزون علم و روش‌های جدید تولید مواد، و همچنین نیازمندی‌های روزافزون به ماده‌هایی جدید با ویژگی‌هایی همچون سبکی وزن، استحکام بالا و چقرمگی مناسب، توجه بسیاری از متخصصان و محققین مواد به این نوع از کامپوزیت‌ها جذب شده است. کامپوزیت‌های زمینه فلزی محدوده وسیعی از مواد پیشرفته را شامل می‌شوند که می‌توانند در بازه گسترده‌ای از کاربردها مانند صنایع هوافضا، خودرو، بایوفناوری، الکترونیک و ورزشی استفاده شوند. کامپوزیت‌های زمینه فلزی شامل یک تقویت‌کننده در یک زمینه فلزی هستند. این دسته از کامپوزیت‌ها دارای مزایایی نسبت به فلز پایه و تقویت‌کننده می‌باشند. از جمله این مزایا می‌توان به رسانایی گرمایی، مقاومت سایشی، مقاومت خزشی، پایداری ابعادی و بخصوص نسبت چقرمگی به وزن و استحکام به وزن مناسب نام برد [1-4]. معمولاً در کامپوزیت‌های زمینه فلزی از فلزات سبک نظیر Al و Mg به عنوان زمینه استفاده می‌شود.

عبدالعظیم¹ و همکاران [5] بر روی رفتار مکانیکی و سایشی کامپوزیت زمینه آلومینیوم حاوی الیاف کوتاه آلومینا با استفاده از روش ریخته‌گری تحقیق کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که فصل مشترک بین الیاف آلومینا و زمینه آلومینیوم می‌تواند به وسیله حضور عناصر آلیاژی در مذاب فلزی، استفاده از اتمسفر کنترل شده و پیش حرارت دهی الیاف قبل از ریخته‌گری بهبود یابد. حضور الیاف آلومینا به مقدار 2-12 درصد باعث اصلاح و ریزش ساختار یوتکتیک و سیلیسیم اولیه در آلیاژ شده است. همچنین گزارش شد که الیاف آلومینا باعث افزایش سختی و استحکام نهایی و کاهش چقرمگی شکست کامپوزیت شده است.

بابو و کانگ² [6] به وسیله آزمون فرورونده نانو³ روی رفتار مکانیکی کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوالیاف گرافیت و الیاف کوتاه آلومینا مطالعه کردند. در این تحقیق وجود نانوالیاف گرافیت و الیاف کوتاه آلومینا و رسوبات ناشی از آن بر رفتار سختی و مدول کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج نشان داد که وجود مقدار زیاد نابعایی در ناحیه پلاستیک اطراف نانوالیاف گرافیت باعث افزایش سختی و مدول شده است.

حجاری⁴ و همکاران [7] تأثیر اعمال فشار بر رفتار شکست و استحکامی کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف کربن پوشش داده شده با فلز نیکل را توسط ریخته‌گری فشاری مورد بررسی قرار دادند. فشارهای انتخاب شده 30، 50 و 70 MPa بودند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش فشار باعث جداشدن پوشش نیکل از سطح الیاف می‌شود. اما در فشار 30 MPa هیچ گونه جدایشی دیده نشد. کیونو⁵ و همکاران [8] تأثیر سیکل گرمایی بر رفتار کامپوزیت آلومینیوم-الیاف کربن را بررسی کردند. روش ساخت این محققان ریخته‌گری فشاری بود. نتایج نشان داد که تشکیل Al_4C_3 در فصل مشترک، مکانیزم تخریب ناشی از سیکل‌های گرمایی می‌باشد. همچنین جدایش فصل مشترک یکی از عوامل مهم و اصلی تخریب بوده است.

لی⁶ و همکاران [9] تأثیر دما و سرعت کرنش را بر خواص کامپوزیت آلومینیوم 7075 حاوی الیاف کربن مورد بررسی قرار دادند. این محققان ابتدا

روی سطح الیاف، پوششی از جنس مس ایجاد کرده و سپس با روش ریخته‌گری نفوذی، کامپوزیت ساخته شد. بررسی سطوح شکست نشان داد که با افزایش دما و سرعت کرنش شکست، شکل پذیری همراه با افزایش دانسیته حفرت رخ می‌دهد. با توجه به سطح شکست کامپوزیت در دمای محیط و سرعت کرنش کم، شکست به صورت جدایش بین لایه‌ای، جدایش الیاف-زمینه به همراه خمش و کمانش الیاف بوده است. در مقابل در سرعت کرنش‌های بالا، مقدار چسبندگی بیشتری بین الیاف و زمینه و همچنین تغییر شکل پلاستیک زمینه در اطراف الیاف مشاهده شد.

تاکنون روش‌های گوناگونی برای تهیه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات یا الیاف گزارش شده است. روش‌های مختلفی مانند ریخته‌گری تحت فشار، نفوذ دهی تحت خلأ فلز مذاب و یا ریخته‌گری پیوسته کنترل شده با امواج آلتراسونیک را می‌توان اشاره نمود [10 و 11]. همچنین پوشش دهی با فلزات (مس، تیتانیوم و نیکل) و یا پوشش دهی با سرامیک‌ها (نظیر آلومینا و زیرکینا) روی الیاف و استفاده از فلاکس‌های مذاب به منظور افزایش ترشوندگی الیاف برای تولید کامپوزیت‌های آلومینیوم-الیاف نیز استفاده شده است.

یکی از روش‌های نوین ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیومی، اختلاط جریان برشی⁷ است که قابلیت تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده مانند الیاف کربن را فراهم می‌کند و اولین بار توسط اکبرزاده و همکاران معرفی شد [10]. در روش اختلاط جریان برشی، پس از ذوب آلیاژ پایه (آلومینیوم)، دمای مذاب تا محدوده نیمه جامد کم شده و سپس الیاف فاز تقویت‌کننده به آن اضافه می‌شود. به علت خاصیت نیمه جامد با ایجاد تنش برشی روی الیاف، ترکیبات بین فلزی تشکیل شده که باعث افزایش چسبندگی بیشتر الیاف به زمینه می‌شوند. در واقع ترکیبات بین فلزی به صورت یک لایه میانی عمل می‌کنند که از یک سو به الیاف چسبیده و از سوی دیگر به زمینه می‌چسبند و نقش انتقال دهنده نیرو از زمینه به الیاف را بر عهده دارند [10].

الیاف بازالت به عنوان الیاف معدنی قابلیت استفاده در دمای بالا را دارد. بر اساس بررسی‌های انجام شده، تحقیق در مورد کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت بسیار محدود بوده است. نوآوری کار پژوهشی حاضر، استفاده از روش اختلاط جریان برشی به منظور ساخت این کامپوزیت می‌باشد. به عبارت دیگر، با قرار دادن آلومینیوم در محدوده نیمه جامد، الیاف بازالت به آلومینیوم اضافه شده و پس از اختلاط در این محدوده به صورت یک قطعه خام بارریزی می‌شود. سپس خواص مکانیکی و ریزساختاری آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. آزمون پانچ برشی⁸ (SPT)، یکی دیگر از آزمون‌های موضعی استفاده شده از سال 1984 به بعد است [12]. این آزمون روشی برای ارزیابی خواص مکانیکی موادی است که از نظر دسترسی محدودیت دارند. این روش برای آزمون مواد پرتودیده⁹، بایومواد، و کامپوزیت‌ها بکار برده شده است. داده‌های حاصل از SPT را می‌توان برای تعیین استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و افزایش طول بکار برد [12-15].

2- بخش تجربی

2-1- مواد اولیه

در این تحقیق از آلومینیوم A356 شرکت Xuxing Machinery استفاده شد. الیاف خرد شده بازالت با طول 4 mm نیز از شرکت Basaltex بلژیکی تهیه شد.

⁶ Lee⁷ Thixomixing⁸ Shear Punch Test⁹ Irradiated materials¹ Abd El-Azim² Babu and Kang³ Nanoindentation⁴ Hajjari⁵ Kyono

تکرارپذیری، روی هر دسته نمونه حداقل سه آزمون انجام گرفت و از میانگین اعداد گزارش شده برای هر حالت، استحکام برشی محاسبه شد. برای محاسبه تنش برشی نیز از رابطه 1 استفاده شد [13].

$$\tau = \frac{P}{\pi dt} \quad (1)$$

P بار اعمالی، t ضخامت نمونه و d میانگین اقطار سنبه و قالب هستند.

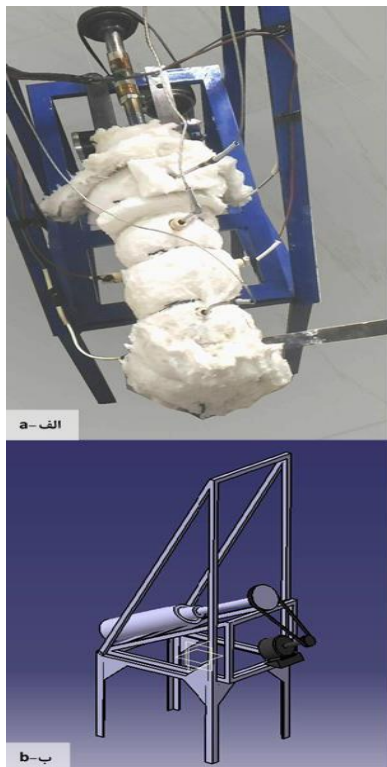


Fig. 1 The used mixture device for fabricating composite by thixomixing method, a) device image, and b) scheme of device

شکل 1 دستگاه همزن استفاده شده برای ساخت کامپوزیت به روش اختلاط جریان برشی: الف) تصویر دستگاه، ب) شکل شماتیک دستگاه

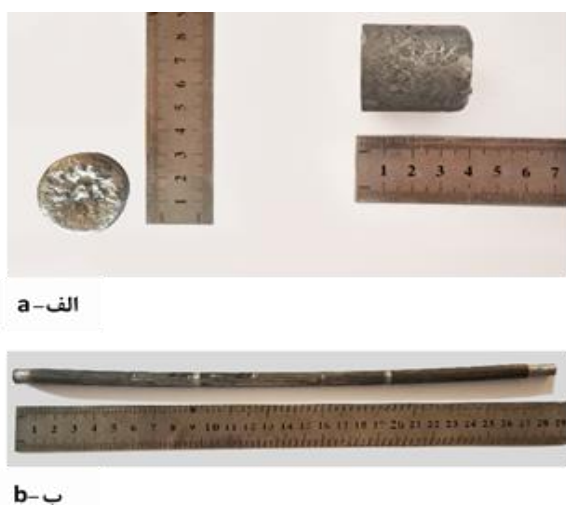


Fig. 2 the fabricated basalt fibers/aluminum composite by thixomixing method, a) casted sample, and b) extruded sample

شکل 2 کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی: الف) نمونه ریخته شده، ب) نمونه اکستروژن شده

چگالی این الیاف (بر اساس مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت سازنده) بین 2.38 تا 2.52 g/cm³ است. قطر هر لیف در حدود 2-4 μm، پایداری حرارتی آن 1350 °C و آهار آن از نوع سیلان بود. لازم به ذکر است که آهار الیاف بازالت پیش از عملیات تولید کامپوزیت باید حذف شود. بدین منظور الیاف بازالت ابتدا در محلول NaOH نیمه مولار به مدت 10 دقیقه قرار گرفت. جهت اطمینان از حذف آهار، الیاف خرد شده به مدت 10 دقیقه در دمای 530 °C قرار گرفت و در محیط کوره سرد شد.

2-2 روش تولید

شکل 1 دستگاه همزن استفاده شده در این کار تحقیقاتی را نشان می دهد که شامل یک قسمت ثابت (استاتور) و یک قسمت چرخنده (روتور) از جنس چدن خاکستری است. دلیل انتخاب چدن خاکستری ترشوندگی بسیار ناچیز آلومینیوم با چدن خاکستری است. فاصله بین استاتور و روتور 5 mm طراحی شد تا با استفاده از تنش برشی، مذاب نیمه جامد را با الیاف مخلوط نماید. موتور الکتریکی 24 V، 500 W با کنترلر سرعت نیز جهت اختلاط مذاب نیمه جامد با الیاف استفاده شد. بدنه همزن دارای المنت و سه کنترلر (جهت کنترل یکنواخت دما) بوده و در انتهای استاتور دریچه ای جهت خروج مواد تعبیه شده است.

آلیاژ آلومینیوم A356 در دمای 680 °C در کوره المنتی مافلی در بوته آلومینایی ذوب شد. پس از رسیدن به دمای مذکور، مذاب به مدت 10 دقیقه نگهداری شد و سپس گاززدا به آن اضافه گردید. در ادامه و بعد از 3 دقیقه نیز مذاب به درون دستگاه همزن برشی (که تا دمای 680 °C گرم شده بود)، انتقال یافت. الیاف خرد شده نیز به همزن اضافه شد و سپس دمای المنت آن روی 575 °C تنظیم گردید. سرعت چرخش به صورتی تنظیم شد که مخلوط شدن به صورت یکنواخت انجام پذیرد و با کاهش دما روتور از چرخش نیافتد. همچنین مواد نیمه جامد به علت سرعت زیاد روتور به استاتور نچسبند و اختلاط به صورت بهینه انجام گیرد.

پس از رسیدن به دمای 575 °C مخلوط به مدت 20 دقیقه نگهداری شد و در ادامه از دستگاه خارج شده و داخل قالب سرامیکی آلومینایی ریخته شد. تصویر کامپوزیت آلومینیوم/بازالت ساخته شده پس از ریخته گری اختلاط جریان برشی در شکل (الف-2) قابل مشاهده است. از آنجایی نمونه های تولیدی دارای تخلخل هستند، تمامی نمونه ها اکستروژن شدند. ضریب کاهش سطح اعمال شده 11 به 1 است. چهار گونه نمونه جهت انجام آزمون های مختلف تولید شد. نمونه های کامپوزیتی نیمه جامد بدون الیاف (SS)، با 2 درصد حجمی الیاف (SS-2)، با 4 درصد حجمی الیاف (SS-4)، و با 6 درصد حجمی الیاف (SS-6) تولید شدند. برای اکستروژن از قالب اکستروژن استوانه ای با قطر ورودی 30 mm و خروجی 9 mm استفاده شد. ابتدا نمونه و قالب تا دمای 410 °C گرم شده و سپس نمونه در دستگاه با نیروی 80 تن اکستروژن شد (شکل ب-2).

2-3 مشخصه یابی

چگالی نمونه ها به وسیله روش ارشمیدس اندازه گیری شد. در این روش ابتدا وزن واقعی نمونه توسط ترازو (با دقت 4 رقم اعشار) سنجیده شد (W) و سپس وزن غوطه خور شده نمونه در آب (وزن ظاهری) اندازه گیری شد (W'). از تقسیم وزن واقعی بر اختلاف این وزن با وزن ظاهری، چگالی محاسبه می شود. سختی نمونه ها با دستگاه Welltest با بار 31.5 kgf و ساچمه فروبرنده به قطر 2.5 mm در معیار برینل براساس استاندارد ASTM E10 اندازه گیری شد. نمونه ها به قطر 9 mm و ضخامت 0.7 mm آماده شدند و سپس آزمون پانچ برشی با قالب پانچ و سنبه تخت انجام شد. لازم به ذکر است به منظور ارزیابی

را می توان ناشی از نزدیک بودن میزان چگالی الیاف بازالت و فلز آلومینیوم دانست، به صورتی که با افزایش اندک در میزان الیاف بازالت، میزان تغییرات چگالی ناچیز می باشد. با رسیدن میزان الیاف بازالت به 6 درصد حجمی، چگالی واقعی بیش تر شده و به 2.629 g/cm^3 رسید. چگالی تئوری محاسبه شده برای کامپوزیت های حاوی 2، 4 و 6 درصد حجمی به ترتیب، 2.687 g/cm^3 ، 2.683 و 2.680 می باشند. مقایسه بین چگالی تئوری و واقعی بین هر یک از کامپوزیت های ذکر شده نشان می دهد که میزان اختلاف این دو چگالی به ترتیب، 1.610 ، 1.711 و 1.891 است.

با مقایسه چگالی تئوری و واقعی در تمامی کامپوزیت ها می توان بیان کرد که میزان اختلاف آن ها کمتر از 2 درصد است. دلیل این اختلاف کم بین چگالی تئوری و واقعی می تواند ناشی از خطاهای اندازه گیری باشد که مقدار آن ناچیز است. به نظر می رسد با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت میزان اختلاف چگالی تئوری و واقعی افزایش می یابد. یکی از نکاتی که باید مدنظر داشت، چسبیدن الیاف در حین اختلاط در محفظه دستگاه است. بنابراین هرچه میزان الیاف بیش تر باشد، امکان چسبیدن بیش تر الیاف به روتور و استاتور دستگاه افزایش می یابد که باعث کاهش میزان توزیع الیاف در زمینه آلومینیومی می شود. به همین دلیل می توان بیان کرد که با افزایش درصد الیاف، اختلاف چگالی نیز روندی افزایشی خواهد داشت.

جدول 1 چگالی اندازه گیری و محاسبه شده کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

Table 1 The measured and calculated densities of basalt fibers/aluminum composite by thixomixing method

نمونه	SS	SS-2%	SS-4%	SS-6%
وزن واقعی (g)	3.2345	3.4385	3.2554	3.4322
وزن درون آب (g)	2.0354	2.1377	2.0210	2.1267
تغییرات وزن (g)	1.1991	1.3008	1.2344	1.3055
چگالی واقعی (g/cm^3)	2.697	2.643	2.637	2.629
چگالی تئوری (g/cm^3)	2.697	2.687	2.683	2.680
میزان اختلاف (%)	---	1.610	1.711	1.891

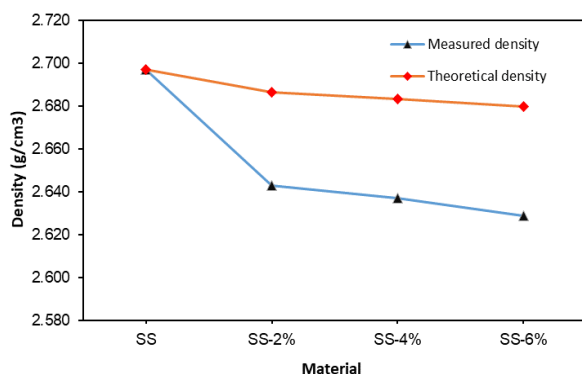


Fig. 4 The variation between measured and calculated densities in basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

شکل 4 تفاوت چگالی اندازه گیری شده و محاسبه شده در کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

شکل 3 به طور شماتیک نحوه برش در حین آزمون پانچ برشی را نشان می دهد. با توجه به این تصویر، تغییر شکل نمونه در منطقه ی باریکی بین قالب و سنبه متمرکز است، بدون این که تغییر شکلی خارج از منطقه ی دایره ای واقع شود [16]. در این آزمون سنبه ی استوانه ای کف تخت نمونه های دیسکی را با سرعت ثابت برش داد. برای آزمون سنبه برشی نمونه ها به ضخامت 1 mm توسط وایرکات برش خورده و با سمباده زنی به ضخامت 0.7 mm رسانده شدند. قالب پانچ با مشخصات قطر پانچ 3.175 mm و قطر حفره ی 3.225 mm استفاده شد. آزمون های مکانیکی در دمای محیط (با دستگاه یونیورسال سنتام 20 kN) با سرعت 0.25 mm.min^{-1} انجام شد. مطالعات ریز ساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM مدل Philips با ولتاژ کاری 30 kV) مجهز به سیستم های الکترون ثانویه، الکترون برگشتی و اسپکتومتری تفکیک انرژی انجام شد.

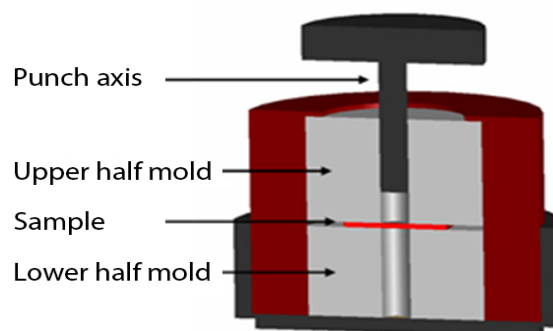


Fig. 3 Schematic illustration of sample during shear in punch shear test
شکل 3 تصویر شماتیک از نمونه در حال برش در آزمون پانچ برشی

3- نتایج و بحث

3-1- چگالی کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت

به دلیل انجام اختلاط به منظور ایجاد نیروی برشی در روش اختلاط نیمه جامد، میزان تخلخل در نمونه های کامپوزیتی ریخته شده به خاطر ورود هوا به درون آن ها افزایش می یابد. به همین دلیل نیاز است که نمونه های کامپوزیتی اکستروژن شوند تا میزان تخلخل موجود در آن ها کاهش یابد. زیرا اکستروژن باعث کاهش ضریب سطح تخلخل ها شده که در نهایت موجب بسته شدن یا حذف آن ها می شود. براساس نتایج دیگر محققان [17]، دمای مناسب برای اکستروژن نمونه های آلومینیومی در محدوده $400-450^\circ \text{C}$ است.

برای بررسی دقیق تر نیاز است که چگالی واقعی و چگالی تئوری محاسبه و با یکدیگر مقایسه شوند که نتایج آن در جدول 1 آورده شده است. شکل 4 نیز براساس جدول 1 به منظور نشان دادن دقیق تر رفتار چگالی تئوری و واقعی در کامپوزیت های ساخته شده رسم شده است. لازم به ذکر است که چگالی تئوری در کامپوزیت ها از قانون مخلوط ها و براساس رابطه 2 محاسبه شده است.

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2)$$

که در رابطه 2، ρ_c ، ρ_f ، ρ_m و V_m به ترتیب چگالی کامپوزیت، چگالی الیاف، کسر حجمی الیاف، چگالی آلومینیوم و کسر حجمی آلومینیوم هستند. چگالی الیاف 2.518 و چگالی آلومینیوم 2.69 g/cm^3 در نظر گرفته شدند. با توجه به شکل 4 می توان مشاهده کرد که چگالی واقعی کامپوزیت حاوی 2 درصد حجمی الیاف بازالت، 2.643 g/cm^3 می باشد. با افزایش درصد الیاف بازالت و رسیدن به 4 درصد حجمی در زمینه آلومینیومی چگالی واقعی تغییری آن چنانی نکرده و همان مقدار 2.637 g/cm^3 است. دلیل عدم تفاوت در چگالی

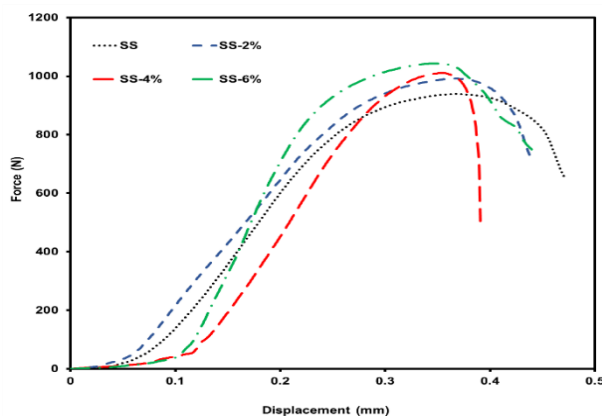


Fig. 6 The force-displacement curves of shear punch test for fabricated basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method
شکل 6 منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمون پانچ برشی برای نمونه‌های ساخته شده کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت به روش اختلاط جریان برشی

جدول 2 نتایج به دست آمده از آزمون پانچ برشی برای کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

Table 2 The obtained results from shear punch for basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

SS-6%	SS-4%	SS-2%	SS	نمونه
105.4	96.7	89.1	76.8	استحکام تسلیم برشی (MPa)
132.4	128.1	125.7	119.1	استحکام برشی نهایی (MPa)
186.5	171.1	157.7	135.9	استحکام تسلیم کششی (MPa)
238.3	230.6	226.3	214.4	استحکام کششی نهایی (MPa)

همچنین شکل‌های 7 و 8 به ترتیب استحکام برشی نهایی و استحکام کششی نهایی برای هر نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهند.

بر اساس شکل 7 می‌توان فهمید که استحکام برشی نهایی آلومینیوم ریخته شده به روش اختلاط جریان برشی 119 MPa است. افزودن 2 درصد حجمی الیاف بازالت به آلومینیوم ریخته شده به روش اختلاط جریان برشی باعث شد تا میزان استحکام برشی نهایی به 126 MPa برسد. این بدان معنی است که 5.9 درصد بهبود در استحکام برشی نهایی با افزودن تنها 2 درصد حجمی الیاف بازالت ایجاد شده است. با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت به 4 درصد حجمی این روند ادامه داشته و استحکام برشی نهایی به 128 MPa رسیده است که نشان‌دهنده بهبود 7.6 درصدی می‌باشد. همچنین با رسیدن درصد حجمی الیاف بازالت به 6 درصد حجمی، استحکام برشی نهایی به دست آمده 132 MPa می‌باشد که نشان‌دهنده بهبود 10.9 درصدی است. شکل 8 رفتار کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف خرد شده بازالت را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، در نمونه بدون الیاف بازالت، استحکام کششی نهایی 119 MPa می‌باشد. با افزودن الیاف بازالت، این خاصیت مکانیکی روندی افزایشی داشته است. به طوری که در نمونه حاوی 6 درصد حجمی الیاف بازالت مقدار آن به 132 MPa رسیده است. به عبارت دیگر، بهبود 10.9 درصدی در استحکام کششی نهایی در این نمونه حاصل شده است.

عوامل مختلفی باعث افزایش استحکام و سختی پس از اضافه نمودن الیاف بازالت به آلومینیوم ریخته شده توسط روش اختلاط جریان برشی می‌شوند. لازم به ذکر است که الیاف بازالت دارای استحکام بالاتری نسبت به آلومینیوم است. بنابراین اضافه کردن آن با مقدار و توزیع مناسب باعث ایجاد ساختار کامپوزیتی با استحکام بالا و شکل‌پذیری مناسب می‌شود که داده‌های سختی و استحکام برشی نهایی این موضوع را تأیید می‌نمایند. این بدان معنی است که

3-2- خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت

یکی از معیارهای مناسب برای بررسی رفتار مکانیکی مواد بخصوص فلزات و کامپوزیت‌های زمینه فلزی آزمون سختی است. نتایج حاصل آزمون سختی سنجی برینل روی نمونه‌های کامپوزیتی در شکل 5 آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد که نمونه آلومینیوم ریخته شده به روش اختلاط نیمه برشی دارای سختی 62.3 Hb می‌باشد. افزودن 2 درصد حجمی الیاف بازالت به این آلیاژ باعث شد تا میزان سختی تا 64.4 Hb افزایش یابد. این روند افزایشی با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت ادامه داشته، به صورتی که با افزایش الیاف بازالت تا 6 درصد حجمی، میزان سختی آن به 70.8 Hb رسید. به عبارت دیگر با افزودن 2، 4 و 6 درصد حجمی الیاف بازالت به آلومینیوم ریخته شده با روش اختلاط جریان برشی، سختی به ترتیب، به میزان 3، 10 و 13 درصد بهبود داشته است.

به دلیل موضعی بودن این آزمون می‌توان انتظار داشت که سختی‌های به دست آمده پراکندگی کمی داشته باشند که نتایج آزمون سختی آن را تأیید می‌نماید. در آزمون‌های سختی انجام شده در راستای اکستروژن و در راستای عمود بر اکستروژن نتایج تقریباً یکسان بود. همچنین سختی در راستای اکستروژن کمی کمتر به دست آمد که می‌تواند به دلیل جهت‌گیری ترکیبات بین‌فلزی در راستای اکستروژن باشد. عدم تفاوت زیاد در سختی‌های اندازه‌گیری شده در جهت‌های مختلف می‌تواند ناشی از ذات این کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت باشد که معمولاً در یک جسم کامل نتایج نهایی به دست آمده به خوبی این را تأیید می‌نماید. عامل دیگر برای روند بیان شده، ذات موضعی بودن آزمون سختی سنجی است.

آزمون مکانیکی دیگر که بر اساس آن می‌توان رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی ریخته شده با روش اختلاط جریان برشی را با یکدیگر مقایسه کرد، آزمون پانچ برشی است. این آزمون در دمای محیط انجام شد. داده‌های این آزمون به صورت نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد که در شکل 6 قابل مشاهده است. بر اساس این آزمون می‌توان استحکام تسلیم کششی و استحکام کششی نهایی را بر اساس رابطه‌های تجربی 3 و 4 به دست آورد [18].

$$\sigma_y = 1.77\tau_y \quad (3)$$

$$\sigma_{UTS} = 1.80\tau_{UTS} \quad (4)$$

که در آن τ_y تنش تسلیم برشی و τ_{UTS} استحکام برشی نهایی است [18]. نتایج حاصل از آزمون پانچ برشی به صورت خلاصه در جدول 2 آورده شده است.

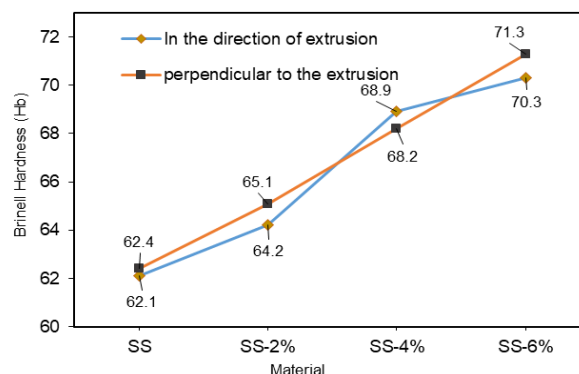


Fig. 5 The Brinell hardness for basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

شکل 5 سختی سنجی برینل برای کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

ترکیبات بین فلزی Al-Fe-Si (که بیشتر به صورت Al_5FeSi هستند) بهتر توزیع شده و باعث افزایش استحکام در آلومینیوم و کامپوزیت های آن شوند. همچنین تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Si-Mn-Fe باعث افزایش شکل پذیری در کامپوزیت می شود که توزیع یکنواخت این ترکیبات بین فلزی در ساختار این عملکرد را تشدید می نماید [21].

3-3- بررسی میکروسکوپی

به منظور بررسی عامل های تأثیرگذار بر خواص کامپوزیت های ساخته شده، مطالعه میکروسکوپی و ریزساختاری امری ضروری است. در اختلاط جریان برشی فاز نیمه جامد غیردندانه ای و کروی شکل، فاز اولیه آلفا (Al) درون مذاب (سیال غیرنیوتونی) تشکیل شده و عناصر آلیاژی به داخل مذاب پس زده می شوند. در این حالت غلظت عناصر آلیاژی درون مذاب افزایش می یابد و در نتیجه سیلیسیم در حین کاهش دما به صورت فازهای نسبتاً بزرگ تر از حالت ریخته گری متداول تولید می شود (شکل 9).

در شکل 10، نحوه توزیع ترکیبات بین فلزی و در شکل 11، توزیع الیاف بازالت با 2 و 4 و 6 درصد حجمی در زمینه آلومینیومی آورده شده است. با توجه به شکل 10 می توان مشاهده نمود که با افزایش درصد الیاف توزیع ترکیبات بین فلزی یکنواخت تر شده و همچنین اندازه آن ها کاهش یافته است. در روش اختلاط جریان برشی که براساس ریخته گری نیمه جامد پایه ریزی شده است، در ابتدا آلومینیوم اولیه جوانه زده و با کاهش دما در جلوی جبهه انجماد عناصر آلیاژی پس زده شده و غلظت عناصر آلیاژی افزایش پیدا می کند. با افزایش غلظت عناصر آلیاژی در مذاب باقی مانده ترکیب بین فلزی اولیه تشکیل می شود. با تشکیل فاز جامد اولیه دمای مذاب باقی مانده افزایش یافته و یا به عبارت دیگر گرمای تشکیل خود را به مذاب داده و اختلاف دمای مذاب باقی مانده با دمای بارریزی افزایش می یابد.

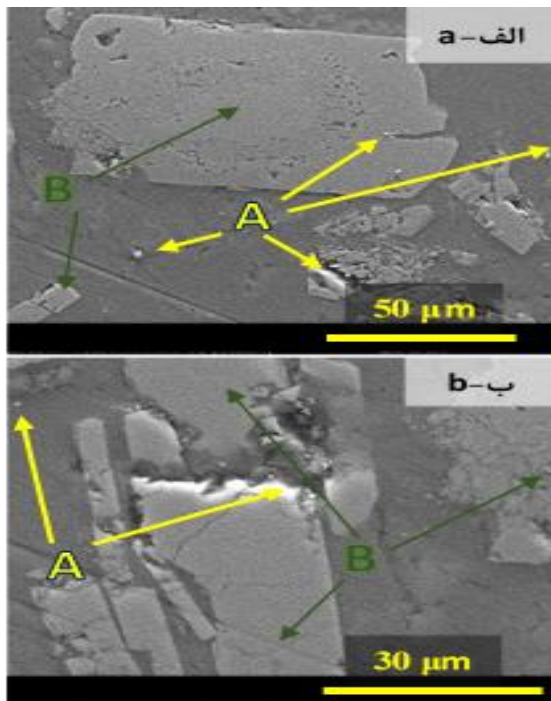


Fig. 9 Etched semi-solid sample, a) $Al_5FeSi/Al_9Fe_2Si_2$ intermetallic, b) primary Si

شکل 9 کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت حکاکی شده: الف) ترکیبات بین فلزی $Al_5FeSi/Al_9Fe_2Si_2$ ، ب) Si اولیه

الیاف بازالت قابلیت لازم برای کامپوزیت شدن با زمینه آلومینیوم را دارد. زیرا از آنجایی که آلومینیوم در دمای بالا در حالت نیمه جامد قرار دارد، بسیاری از الیاف رایج قابلیت تحمل دمای بالا را ندارند و خواص خود را از دست می دهند. نتایج تحقیقات هندرونورسیتو¹ و همکاران [19] با افزودن الیاف خرد شده بازالت به آلومینیوم مذاب نشان دادند که این الیاف قابلیت کامپوزیت شدن را دارد. می توان انتظار داشت با افزایش درصد بازالت تا درصد مشخصی روند بهبود استحکام و سختی ادامه داشته باشد. این درصد بهینه وابسته به قابلیت اختلاط، میزان ترشوندگی و قابلیت توزیع الیاف در زمینه دارد. در این کار پژوهشی، قابلیت تولید کامپوزیت به روش جریان اختلاط برشی با حداکثر 6 درصد وزنی الیاف بازالت امکان پذیر بود، چون الیاف بازالت روی دمای اختلاط جریان برشی و همچنین میزان گرانیوی آن تأثیر گذاشته و امکان تولید در دمای $575^\circ C$ را نمی دهد. بنابراین روند بهبود خواص در این کامپوزیت تا 6 درصد حجمی مشاهده شد. روندی مشابه در ریخته گری معمولی کامپوزیت آلومینیوم 7075-الیاف خرد شده بازالت توسط کارتیگیان² و همکاران گزارش شد [20].

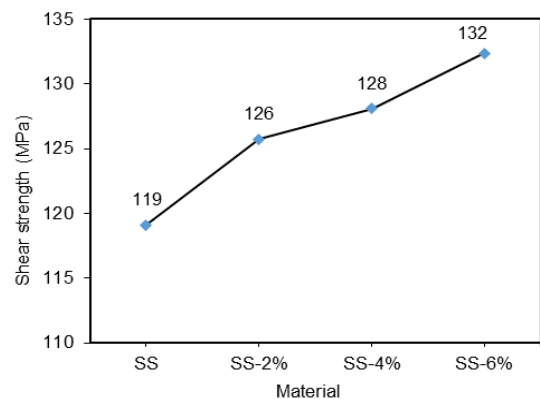


Fig. 7 The ultimate shear strength for fabricated basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

شکل 7 استحکام برشی نهایی برای کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

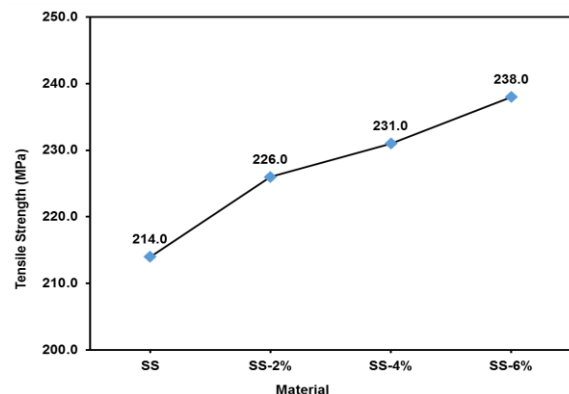


Fig. 8 The ultimate tensile strength for fabricated basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

شکل 8 استحکام کششی نهایی برای کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

معمولاً برای افزایش استحکام آلیاژ A356 (که یک آلیاژ ریخته گری است)، پس از ذوب ریزی و برای همگن کردن ساختار نهایی، عملیات حرارتی T6 روی قطعه انجام می شود. این عملیات حرارتی باعث می شود که سیلیسیم اولیه و

² Karthigeyan

¹ Hendronursito

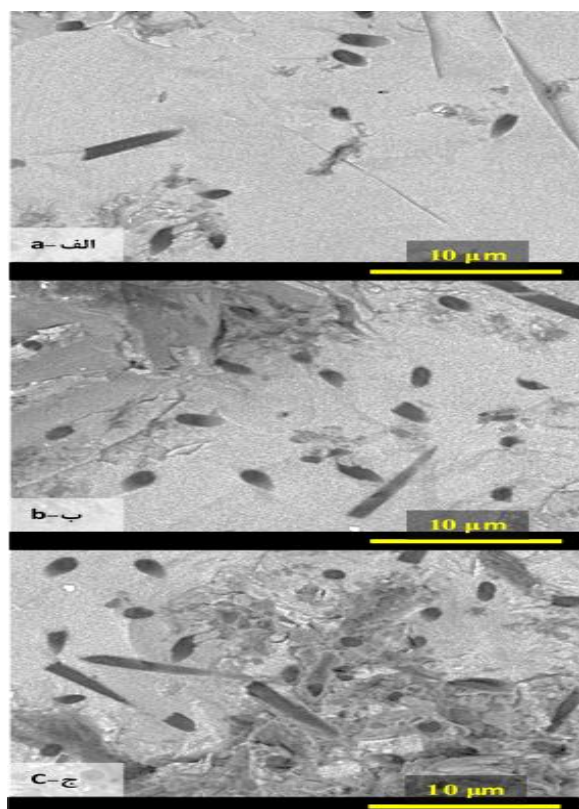


Fig. 11 SEM images from un-etched samples, a) sample with 2 vol.% of fibers, b) sample with 4 vol.% of fibers, c) sample with 6 vol.% of fibers
شکل 11 تصویر SEM کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت حکاکی نشده: الف) کامپوزیت با 2 درصد حجمی الیاف، ب) کامپوزیت با 4 درصد حجمی الیاف، ج) کامپوزیت با 6 درصد حجمی الیاف

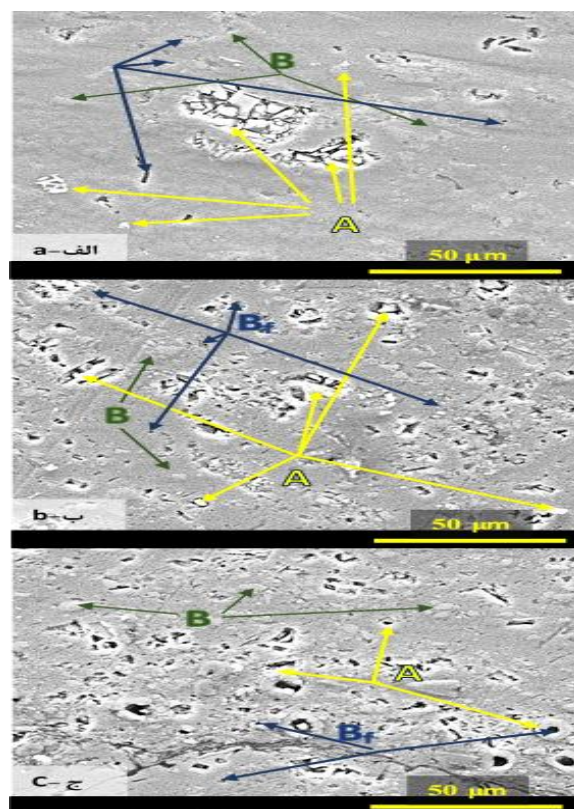


Fig. 10 SEM images from etched samples, a) sample with 2 vol.% of fibers, b) sample with 4 vol.% of fibers, c) sample with 6 vol.% of fibers, (A- $\text{Al}_5\text{FeSi}/\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ intermetallic, B- primary Si, Bf- basalt fibers)
شکل 10 تصاویر SEM کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت حکاکی شده: الف) کامپوزیت با 2 درصد حجمی الیاف، ب) کامپوزیت با 4 درصد حجمی الیاف، ج) کامپوزیت با 6 درصد حجمی الیاف، A- ترکیبات بین فلزی $\text{Al}_5\text{FeSi}/\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ ، B- سیلیسیم اولیه، Bf- الیاف بازالت

در شکل (الف-a)-12 اثر به جامانده از الیاف بازالت در زمینه آلومینیومی قابل مشاهده است. به منظور تشخیص عناصر موجود در ناحیه اثر الیاف بازالت آزمون آنالیز عنصری (EDX)¹ انجام شد (شکل (ب-b)-12). میزان عناصر در این ناحیه در جدول 3 آورده شده است. در دیگر روش های مرسوم ساخت کامپوزیت های پایه آلومینیومی معمولاً از پوشش های مختلف فلزی و یا سرامیکی بروی الیاف جهت افزایش ترشوندگی استفاده می شود. اما در روش اختلاط برشی لایه بین فلزی به صورت درجا در حین عملیات تولید می شود که باعث بهبود چسبندگی الیاف بازالت به زمینه آلومینیومی می شود. این لایه پوششی را می توان در شکل 10-c نیز مشاهده نمود.

4- نتیجه گیری

در این کار پژوهشی با استفاده از روش اختلاط جریان برشی کامپوزیت های زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف خرد شده بازالت (با درصدهای حجمی 2، 4 و 6) ساخته شدند. سپس خواص مکانیکی کامپوزیت های ساخته شده شامل سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی تحت بارگذاری برشی مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت بررسی ریزساختاری به منظور شناسایی مکانیزم های تأثیرگذار انجام شد. در ادامه، خلاصه نتایج نهایی به دست آورده شده اند.

1- با افزایش الیاف بازالت از صفر به 6 درصد حجمی، سختی از 62 به 71 Hb رسید.

2- با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت از صفر به 6 درصد حجمی، استحکام

این اختلاف باعث ایجاد فوق تبرید در مذاب می شود. هر چه مقدار این فوق تبرید زیادتر باشد و یا محل های مناسب جهت ایجاد ترکیبات بین فلزی بیشتر باشد، شعاع بحرانی جوانه زنی کمتر می شود. لذا در واحد حجم تعداد جوانه های پایدار بیش تر شده و در نتیجه ترکیبات بین فلزی ساختار ریزتر و یکنواخت تری خواهند داشت. وجود الیاف می تواند محل های مناسبی برای جوانه زنی غیرهمگن در مذاب نیمه جامد باشند. در نتیجه با افزایش درصد الیاف محل های جوانه زنی افزایش یافته و ساختار نهایی ریزتر و یکنواخت تر می شود [22]. این توزیع یکنواخت، افزایش استحکام کلی کامپوزیت را به همراه دارد.

وجود ذرات سیلیسیم اولیه کوچک تر و پراکندگی مناسب آن باعث بهبود خواص می شود. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد موافعی مانند ذرات سیلیسیم در برابر حرکت نابجایی ها، استحکام و سختی کامپوزیت افزایش می یابد. از طرف دیگر به علت وجود اکسید آهن و اکسید سیلیسیم در الیاف بازالت، روی الیاف ترکیب بین فلزی تشکیل شده که از یک جهت چسبندگی به الیاف داشته و از سوی دیگر به زمینه آلومینیومی چسبندگی دارد و فصل مشترک مناسب تری را ایجاد می نماید. این موضوع نشان دهنده افزایش ترشوندگی و در نهایت افزایش استحکام در راستای الیاف بازالت است. از آنجایی که الیاف بازالت کوتاه اولیه حین عملیات اختلاط برشی خرد شده اند و سپس در مذاب نیمه جامد پخش شده اند، خواص ناشی از استحکام الیاف در یک جهت کمی کاهش یافته و به سمت یکسان شدن در همه جهات پیش می رود [23 و 24].

¹ Energy Dispersive X-ray

5- منابع

- [1] Babalola, P. O., Bolu, C., Inegbenebor, O., and Odunfa, K. M., "Development of Aluminium Matrix Composites: A review," International Journal of Engineering and Technology Research, Vol. 2, pp. 1-11, 2014.
- [2] Akhlaghi, F., Eslami-Farsani, R., and Sabet, S. M. M., "Synthesis and Characteristics of Continuous Basalt Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites," Journal of Composite Materials, Vol. 47, No. 27, pp. 3379-3388, 2013.
- [3] Sabet, S. M. M., Akhlaghi, F., and Eslami-Farsani, R., "Production and Optimization of Aluminum-Basalt Composites by Hand Lay-Out Technique," Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Vol. 3, pp. 1826-1829, 2012.
- [4] Sabet, S. M. M., Akhlaghi, F., and Eslami-Farsani, R., "The Effect of Thermal Treatment on Tensile Properties of Basalt Fibers," Journal of Ceramic Science & Technology, Vol. 06, No. 03, pp. 245-248, 2015.
- [5] Abd El-Azim, A. N., Kassem, M. A., El-Baradie, Z. M., and Waly, M., "Structure and Properties of Short Alumina Fibre Reinforced AlSi18Cu1 Produced by Stir Casting," Materials Letters, Vol. 56, No. 6, pp. 936-969, 2002.
- [6] Babu, J. S. S., and Kang, C. G., "Nanoindentation Behaviour of Aluminium Based Hybrid Composites with Graphite Nanofiber/Alumina Short Fiber," Materials and Design, Vol. 31, No. 10, pp. 4881-4885, 2010.
- [7] Hajjari, E., Divandari, M., and Mirhabibi, A. R., "The Effect of Applied Pressure on Fracture Surface and Tensile Properties of Nickel Coated Continuous Carbon Fiber Reinforced Aluminum Composites Fabricated by Squeeze Casting," Materials and Design, Vol. 31, No. 5, pp. 2381-2386, 2010.
- [8] Kyono, T., Kuroda, E., Kitamura, E., Mori, T., and Taya, M., "Effects of Thermal Cycling on Properties of Carbon Fiber/Aluminum Composites," Journal of Engineering Materials, Vol. 110, No. 2, pp. 89-95, 1988.
- [9] Lee, W. S., Sue, W. C., and Lin, C. F., "The Effects of Temperature and Strain Rate on the Properties of Carbon-Fiber-Reinforced 7075 Aluminum Alloy Metal-Matrix Composite," Composites Science and Technology, Vol. 60, No. 10, pp. 1975-1983, 2000.
- [10] Akbarzadeh, E., "Characterization of Aluminum Silicon / Short Carbon Fiber Composites Fabricated by Novel Thixomixing Method", PhD. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2016.
- [11] Matsunaga, T., Matsuda, K., Hatayama, T., Shinozaki, K., and Yoshida, M., "Fabrication of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Aluminum-Magnesium Alloy Composite Wires Using Ultrasonic Infiltration Method," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 8, pp. 1902-1911, 2007.
- [12] Lucas, G. E., Shekherd, J. W., Odette G. R., and Panchanadeeswaran, S., "Shear Punch Tests for Mechanical Property Measurements in TEM Disc-Sized Specimens," Journal of Nuclear Materials, Vol. 122, No. 1-3, pp. 429-434, 1984.
- [13] Wanjara, P., Drew R. A. L., and Yue, S., "Application of Small Specimen Testing Technique for Mechanical Property Assessment of Discontinuously Reinforced Composites," Materials Science and Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 61-71, 2006.
- [14] Hosur, M. V., Waliul Islam, S. M., Vaidya U. K., and Kumar, A., "Dynamic Punch Shear Characterization of Plain Weave Graphite/Epoxy Composites at Room and Elevated Temperatures," Composite Structures, Vol. 70, No. 3, pp. 295-307, 2005.
- [15] Toloczko, M. B., Hamilton, M. L., and Lucas, G. E., "Ductility Correlations between Shear Punch and Uniaxial Tensile Test Data," Journal of Nuclear Materials, Vol. 283-287, pp. 987-991, 2000.
- [16] Guduru, R. K., Nagasekhar, A. V., Scattergood, R. O., Koch C. C., and Murty, K. L., "Finite Element Analysis of a Shear Punch Test," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 37A, pp. 1477-1483, 2006.
- [17] Tavighi, K., Emamy, M., Emami, A.R., "Effects of extrusion temperature on the microstructure and tensile properties of Al-16 wt% Al4Sr metal matrix composite," Materials and Design, Vol. 46, pp. 598-604, 2013.

برشی از 119 به 132 MPa افزایش یافت.

3- مکانیزم‌های بهبود استحکام در آلومینیوم شامل قابلیت کامپوزیت شدن با الیاف بازالت خرد شده، کاهش تخلخل در روش نیمه جامد با عملیات اکستروژن و کوچک شدن و توزیع بهتر ترکیبات بین‌فلزی (Al_5FeSi / $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$) و سیلیسیم اولیه بودند.

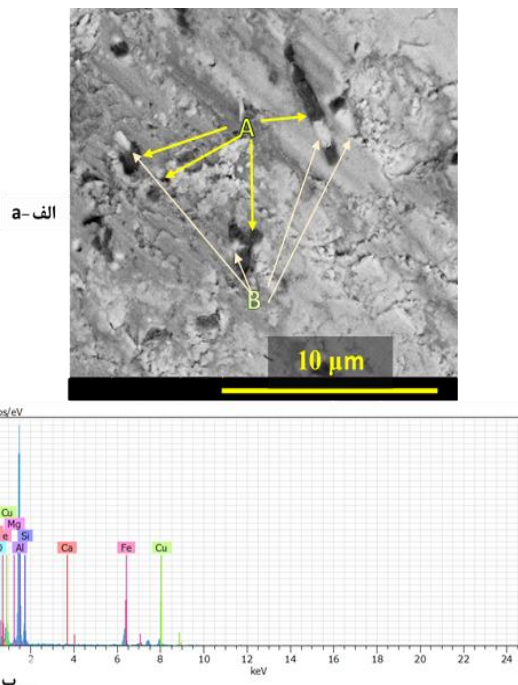


Fig. 12 Characterizing the mechanisms by using microscopic images from basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method, a) Foot-print from basalt fibers, b) EDX analysis from point C. (A-Foot-Print, B- Al_5FeSi / $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ intermetallic, C- EDX Point)

شکل 12 شناسایی مکانیزم‌ها با استفاده از تصویر میکروسکوپی از کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی: الف) اثرات به جامانده از الیاف بازالت، ب) نمودار آنالیز EDX در نقطه C، ا) اثرات به جامانده از الیاف، B - ترکیبات بین‌فلزی Al_5FeSi / $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ - C محل انجام آزمون EDX

جدول 3 آنالیز عنصری به دست آمده از EDX کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت در ناحیه اثر به جامانده از الیاف بازالت

Table 3 Obtained elemental analysis from EDX of basalt fibers/aluminum composites in the area of basalt fibers foot-print

عنصر	درصد اتمی	درصد وزنی
Al	62.5977	57.7172
Fe	7.52154	13.8702
Si	9.54237	9.47518
Cu	3.46914	7.13547
O	12.325	6.99328
Mg	2.88571	2.45605
Ca	1.65852	2.35264

- [18] Guduru, R. K., Darling, K. A., Kishore, R., Scattergood, R. O., Koch C. C., and Murty, K. L., "Evaluation of Mechanical Properties Using Shear-Punch Testing," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 395, No. 1-2, pp. 307-314, 2005.
- [19] Hendronursito, Y., Ojahan, T., Rajagukguk, Sofii, R. N. S. A., Isnugroho, K., Birawidha, D. C., and Al Muttaqii, M. A. M., "Analysis of Aluminum Basalt Particulate Composite Using Stirring Casting Method Through Taguchi Method Approach," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 807, No. 1, p. 012003, 2020.
- [20] Karthigeyan, R., Ranganath, G., and Sankaranarayanan, S., "Mechanical Properties and Microstructure Studies of Aluminium (7075) Alloy Matrix Composite Reinforced with Short Basalt Fibre," *European Journal of Scientific Research*, Vol. 68, No. 4, pp. 606-615, 2012.
- [21] Bazilah, N. F., Kamal, M. R. M., Maidin, N. A., Marjom, Z., Ali, M. A. M., and Ahmad, U. H., "T6 Solutionizing Heat Treatment Parameter of A356 Alloy by Investment Casting," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 834, No. 1, p. 012005, 2020.
- [22] Abbaschian, R., and Reed-Hill, R.E., "Physical Metallurgy Principles - SI Version," Cengage Learning, pp. 411-418, 2009.
- [23] Akbarzadeh, A., Picas, J. A., and Baile, M. T., "Orthogonal Experimental Design Applied for Wear Characterization of Aluminum/Csf Metal Composite Fabricated by The Thixomixing Method," *International Journal of Material Forming*, Vol. 9, No. 5, pp. 601-612, 2016.
- [24] Akbarzadeh, E., Barrachina, J. A. P., and Puig, M. B., "Thixomixing as Novel Method for Fabrication Aluminum Composite with Carbon and Alumina Fibers," *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, Vol. 9, No. 8, pp. 822-826, 2015.



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

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. 10, No. 1, pp. 2192-2195, 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، غیرایتالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک می‌آیند (توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن^۲ با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین^۳) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

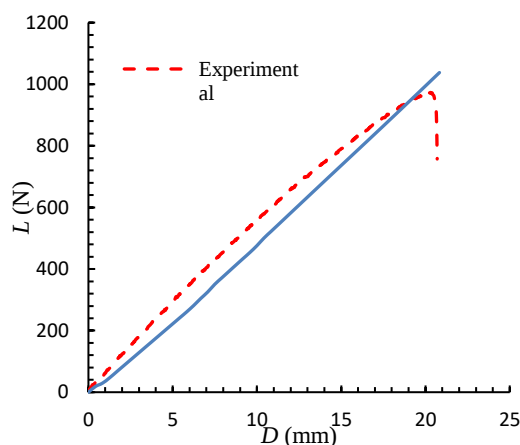


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی ۵ میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علائمی نظیر ، : ، ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علائم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک‌تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,5,7].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

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

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی^۱ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال ۱۰۲ صحیح و ۱/۲ غلط می‌باشد.

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

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

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت 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 مَث² 9pt و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدور 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 اندنوت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

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

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

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

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

مثال:

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

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

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

کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

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

مثال:

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

پایان نامه‌ها:

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

ثبت اختراع:

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

پایگاه‌های الکترونیکی:

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

استانداردها:

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

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و 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