

تاثیر مسیر رسانای الیاف کربن بر عملکرد ربات متحرک زمینه سیلیکون در حضور ماده تغییر فازدهنده اتانول و نانوالیاف

کربنی

چکیده

مواد تغییر فاز دهنده یکی از بخش‌های مورد استفاده در ساخت ربات‌های نرم است و مزایایی از جمله انعطاف‌پذیری ربات، پایداری شیمیایی و ایمنی برای انسان، در سال‌های اخیر به مواد پرکاربردی برای کمک به توان‌یابان تبدیل شده‌اند. در این پژوهش، به منظور برطرف نمودن مشکل انعطاف‌پذیری در نمونه‌های ربات مشابه و دارای مسیر رسانای فلزی، از پارچه الیاف کربنی به عنوان مسیر رسانا در ساخت ربات نرم زمینه سیلیکونی استفاده شده، ربات مذکور با نانوالیاف کربنی تقویت شده و اتانول بعنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده استفاده شده است. ارزیابی نمونه توسط آزمون‌های حرارتی، بررسی تصاویر حرارتی و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شده، باتوجه به نتایج به دست آمده، حضور ۰/۱ درصد وزنی نانوالیاف کربنی سبب بهبود هدایت حرارتی و کاهش هدررفت اتانول موجود در ساختار، با حفظ کرنش کلی ساختار شده، میزان هدررفت اتانول را از ۸۴ درصد به ۵۱ درصد کاهش داده است. افزایش درصد نانوالیاف کربنی به ۰/۵ درصد وزنی، به سبب افزایش صلبیت زمینه و افزایش عیوب ساختاری، میزان کرنش نمونه را تا ۱۰ درصد کاهش داد.

کلمات کلیدی: ربات نرم- سیلیکون- اتانول- ماده‌ی تغییر فاز دهنده- نانوالیاف کربن.

ربات‌های نرم امروزه به دلیل دارا بودن مشخصه‌هایی مانند قابلیت تغییر شکل بالا، پایداری و هزینه فرآوری کم، مورد استقبال زیادی در حوزه بیومواد قرار گرفته‌اند، هدف اصلی ساخت ربات‌های نرم فراهم کردن انعطاف پذیری مشابه سیستم‌های بیولوژیکی است [۱]، در حالی که در روند ساخت نسل قدیم ربات‌های پزشکی که از آن‌ها با نام ربات‌های سخت یاد می‌شود از موادی مستحکم و با انعطاف‌پذیری محدود مانند فلزات استفاده می‌شد که دایره حرکتی محدودی داشتند. بدنه ربات‌های نرم از مواد پلیمری به خصوص الاستومرها ساخته می‌شود. برای ساخت آن‌ها نیز می‌توان از روش‌های دستی یا پرینتر سه بعدی کمک گرفت. یکی دیگر از برتری‌های ربات‌های نرم نسبت به ربات‌های سخت، تمرکز بر سازگاری مکانیکی و ایمنی در تعامل با محیط و انسان [۲] و تنوع در قابلیت تغییر شکل به صورت انواع حرکات خمشی، چرخشی، انقباضی و کششی است. علاوه بر این، ربات‌های نرم می‌توانند از خود رفتار غیرخطی و وابسته به زمان نشان دهند. با استفاده از مدارهای کنترلی تعبیه شده در آن‌ها بتوان رفتار ربات مورد نظر را کنترل و در راستای هدف برنامه‌ریزی شده استفاده کرد [۳، ۴] یک ربات نرم ایده‌آل باید فشرده، کم هزینه، با قابلیت کنترل آسان و تغییر شکل بالا در زمان کم باشد [۵]. الاستومرهای مایع، الاستومرهای دی‌الکتریک و مواد حافظه‌دار، محرک‌های الکتروشیمیایی و محرک‌های نرم مغناطیسی از دیگر موادی هستند که در ساخت ربات‌های مذکور مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶، ۷، ۸] در این بین، الاستومر سیلیکون به عنوان یک الاستومر غیر خطرناک به طور گسترده در تولید ربات‌های نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. الاستومرها به دلیل ساختار زنجیره‌های بلند و پیوندهای عرضی، ترکیبی از کشسانی و انعطاف‌پذیری بالا را فراهم می‌کنند و قادر به تحمل تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر تحت کشش، فشار و خمش هستند [۱۰].

مواد تغییر فاز دهنده، که در دهه‌های اخیر به عنوان مواد پرکاربردی در مباحث مهندسی ذخیره انرژی و حتی در بحث‌های ساختمانی و عمرانی شناخته می‌شوند، به موادی اطلاق می‌شود که قابلیت تغییر فاز از حالت جامد به مایع، مایع به گاز و جامد به جامد و تغییر فاز بلوری دارند [۱۱]. برای ایجاد این تغییر حالت، مقداری انرژی را دریافت می‌کنند و طی فرآیند گرمایش و سرمایش، جذب و رهاسازی انرژی را از خود نشان می‌دهند [۱۲] استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در ربات‌های نرم منجر به ایجاد دامنه حرکتی گسترده‌ای در ساختار مانند حرکات موجودات زنده می‌شود [۱۳، ۱۴] تحریک ربات نرم بر پایه‌ی مواد تغییر فاز دهنده از فاز مایع به بخار نسبت به سایر مواد هوشمند دارای مزایایی از جمله ساخت ساده، وزن کم، دوام بالا، تغییر شکل زیاد و توان بارگذاری قابل توجه است [۱۵]. در این محرک‌ها، تبخیر مایع داخل بدنه‌ی ربات موجب تغییر حجم داخلی و در نتیجه تولید حرکت در ربات مذکور می‌شود [۱۶].

مواد تغییر فاز دهنده به صورت کلی در سه گروه مواد ارگانیک، غیرارگانیک و یوتکتیک دسته‌بندی می‌شوند که پارافین، استرها، اسیدهای چرب، هیدرات نمک‌ها و الکل‌ها جزء مواد تغییر فاز دهنده‌ی پرکاربرد شناخته می‌شوند [۱۷]. پایداری شیمیایی، طول عمر بالا و قابلیت بازیافت و همچنین عدم واکنش پذیری مواد تغییر فاز دهنده از مزیت‌های این دسته از مواد در ربات‌های نرم است. در مقابل هدایت حرارتی ضعیف، پایداری حرارتی ضعیف و نشت مواد هنگام تغییر فاز از معایب اصلی این ربات‌ها شناخته می‌شود

که می‌توان نقایص مذکور را با استفاده از مواد افزودنی به شکل نانولوله، نانوذره و نانو ورق، رفع و از مزیت آن‌ها در توسعه حرکات ربات بهره برد [۱۸، ۱۹].

در سال‌های اخیر، کارهای پژوهشی مشابهی در جهت ساخت ربات‌های نرم راه‌رونده انجام شده است. ابراهیمی و همکارانش [۲۰] در روند یکی از این تحقیقات از اختلاط مکانیکی سیلیکون- اتانول برای ساخت ماده مرکب و از سیم پیچ نیکل-کروم به عنوان بخش رسانا استفاده کرده‌اند. این گروه درصد بهینه‌ی اتانول در نمونه ربات را ۳۰ درصد و میزان کرنش حداکثری را ۲۱ mm پس از ۱۵ سیکل اعلام نموده‌اند. تحقیق تکمیلی انجام شده بر روی این نمونه ربات به عنوان انگشت سیلیکونی مصنوعی خم‌شونده نشان می‌دهد که افزودن اتانول بر پایه‌ی سیلیکونی باعث کاهش ضریب کشسانی نمونه و افزایش قدرت تحمل بار در نمونه شده است [۲۱]. در پژوهشی دیگر، حریری و ابراهیمی [۲۲]، موفق به ساخت رباتی متحرک متشکل از دو لایه‌ی فعال (سیلیکون- اتانول-ریبون نانوالیاف کربنی) و لایه‌ی غیرفعال (سیلیکون- اتانول) شدند. استفاده از نانوالیاف کربنی که به شکل شانه‌ای در لایه‌ی فعال چیده شده، وظیفه‌ی انتقال حرارت و تغییر فاز اتانول از حالت مایع به گاز را عهده‌دار بوده است. این گروه درصد بهینه‌ی اتانول برای ساخت نمونه ربات را ۲۳ درصد حجمی اعلام نمودند. جابجایی ثبت شده برای نمونه در مدت زمان ۱۸۰ ثانیه و به صورت خمشی معادل ۹ سانتی متر بوده و قابلیت باربرداری از ۱۰ گرم تا ۳۰۰ گرم توسط این نمونه وجود دارد [۲۳]. محمدی و همکاران [۲۴]، با استفاده از روش چاپ سه بعدی ماهیچه‌ی مصنوعی سیلیکونی و تقویت شده با الیاف کربنی ساختند. ماهیچه ساخته شده توسط این گروه به علت حضور نانوالیاف تقویت کننده پس از دریافت ولتاژ، قابلیت ارائه درجات مختلف سختی را دارد، این گروه به منظور کنترل ارتعاش و کنترل خودکار این ماهیچه از سیستم کنترل غیرخطی استفاده کرده و براساس الگوریتم یادگیری تقویتی استفاده کرده‌اند که موجب کاهش ارتعاشات ماهیچه و کاهش ۴۱٪ مصرف انرژی برای حرکت ماهیچه شده است.

به طور کلی، کامپوزیت‌های پایه‌ی سیلیکونی حاوی اتانول توزیع شده در حفره‌های میکرونی، قابلیت ایجاد کرنش و تنش با تحریک بالا در زمان کوتاه را به صورت خودکفا از خود نشان داده‌اند [۲۵]. انتخاب مناسب سیال-الاستومر می‌تواند کرنش و سرعت تحریک را افزایش داده، هم‌زمان دمای تحریک را کاهش دهد [۲۶]. به همین دلیل در روند پژوهش پیش رو با هدف افزایش الاستیسیته‌ی نمونه ماهیچه‌ی مصنوعی نسبت به نمونه‌های دارای مسیر رسانای فلزی، رباتی نرم با بدنه‌ی ماده مرکب هیبریدی سیلیکونی تهیه شد. در این ربات اتانول به عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده و بافته‌ی نانو الیاف کربنی برای بخش رسانای کامپوزیت به عنوان منبع حرارتی انتخاب شد. میزان کرنش، تخریب سطحی و هدررفت اتانول در نمونه‌ها برای ۵ سیکل کاری ۵ روزه بررسی گردید. همچنین نانو الیاف ناپیوسته کربنی به عنوان فاز تقویت کننده‌ی رسانایی حرارتی در ساخت بدنه‌ی نمونه مذکور استفاده شده تا میزان افزایش کرنش نمونه و بهبود عملکرد نمونه در سیکل‌های کاری نسبت به نمونه ربات‌های مشابه و فاقد فاز تقویت کننده مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

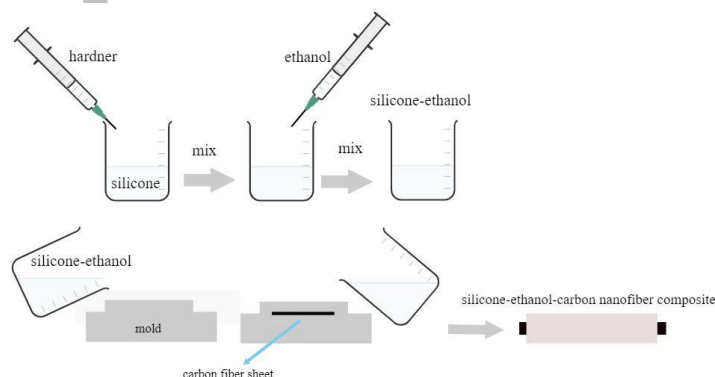
در جدول ۱، لیست مواد استفاده شده در ساخت کامپوزیت آورده شده است.

جدول ۱- مواد مورد نیاز برای ساخت کامپوزیت سه جزئی.			
ماده مصرفی	نام تجاری	مشخصات ماده	شرکت سازنده
اتانول	Ethanol	خلوص = ۹۹/۸ درصد	Simin Taak Co.
سیلیکون	Silicone	RTV-2 Siltech	Siltech
هاردنر	Hardner	-	Siltech
بافته‌ی الیاف کربنی	Carbon nanofiber texture	عرض الیاف = ۲/۵ سانتی متر	-

به منظور آماده‌سازی نمونه‌های ربات ابتدا مقدار ۱۰ سی سی سیلیکون را با ۲۳ درصد وزنی اتانول و ۵ درصد وزنی هاردنر به عنوان بخش تسریع‌کننده‌ی فرآیند پخت سیلیکون، همزده تا مخلوط همگنی به دست آید، سپس مقدار یک سوم از این مخلوط در قالب ریخته شد. پس از ۲ ساعت و قبل از پخت کامل سیلیکون، بافته‌ی الیاف کربنی با ابعاد ۱/۲۵ × ۴۵ سانتی متر به صورت شانه‌ای (زیگزاکی) درون قالب با ابعاد ۱/۵ × ۱/۵ × ۹ سانتی متر قرار گرفته و سپس باقیمانده‌ی مخلوط سیلیکون اتانول به قالب منتقل شد. لازم به ذکر است که میزان اتانول هدررفته در این بازه‌ی زمانی پس از توزین مخلوط محاسبه و به آن افزوده شد.

به منظور آماده‌سازی نمونه‌های با فاز تقویت‌کننده رسانای حرارتی، ابتدا مقادیر ۱/۰ و ۵/۰ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی الکترورسی شده توزین و با استفاده از دستگاه بال میل با دور دستگاه ۴۰ هرتز به مدت ۲ دقیقه خرد شد. سپس نانوالیاف خرد شده به اتانول افزوده و به منظور تهیه یک سوسپانسیون همگن به مدت ۲ دقیقه در حمام آلتراسونیک قرار داده شد. سپس به مخلوط هاردنر - سیلیکون تهیه شده، افزوده و هم زده شد تا به مخلوطی همگن تبدیل شود. مخلوط حاصل مشابه حالت قبل در دو مرحله به قالب منتقل گردید. شکل ۱، شماتیک فرایند آماده‌سازی نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

در جدول ۲، کدگذاری مربوط به نمونه‌های کامپوزیتی در پژوهش حاضر آمده است.

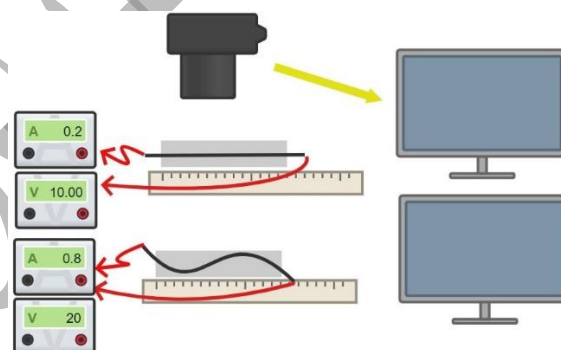


شکل ۱- شماتیک آماده سازی نمونه‌ها.

جدول ۲- کدگذاری نمونه‌های مورد آزمون.			
نمونه		طول بافته الیاف کربنی cm	فاز تقویت کننده %wt
۱	Pcm-45	۴۵	۰
۲	Pcm-45-0/1cnf	۴۵	۰/۱
۳	Pcm-45-0/5cnf	۴۵	۰/۵

۳- مشخصه یابی

بررسی عملکرد ربات نرم در حضور مسیر رسانای کربنی، با اعمال ولتاژ به دو سر مسیر رسانای الیاف کربنی و عبور جریان از آن انجام شد. حرارت با عبور جریان الکتریکی از مسیر رسانا و ناشی از اثر مقاومت در بافته‌ی الیاف کربنی ایجاد شد (شکل (۲)). حرارت ایجاد شده در کل کامپوزیت سبب افزایش دما و در ادامه تبخیر بسته‌های اتانول شده و افزایش فشار داخلی در نمونه گردید که نتیجه‌ی آن انبساط الاستومر و جابه‌جایی قطعه است. با توجه به سایر مطالعات مشابه در این زمینه، میزان جابه‌جایی در نظر گرفته شده برای این نمونه‌ها، میزان ۲۰ درصد طول اولیه است. با رسیدن به میزان جابه‌جایی مورد نظر، سیکل گرمایش قطع و نمونه تا رسیدن به طول اولیه و دمای حدود 40°C تحت استراحت قرار گرفت. تمامی ربات‌های نرم ساخته شده با توان یکسان ۶ وات توسط منبع تغذیه مدل LEADER LSP-156 مورد آزمایش عملکردی قرار گرفتند. روند انجام تست شامل ۳ روز کاری (هر روز کاری شامل ۵ سیکل گرمایش و بلافاصله بعد از آن ۵ سیکل استراحت است) به صورت روز دو میان (روز اول (۱)، روز سوم (۳) و روز پنجم (۵)) بوده است.



شکل ۲- شماتیک روند انجام آزمایش.

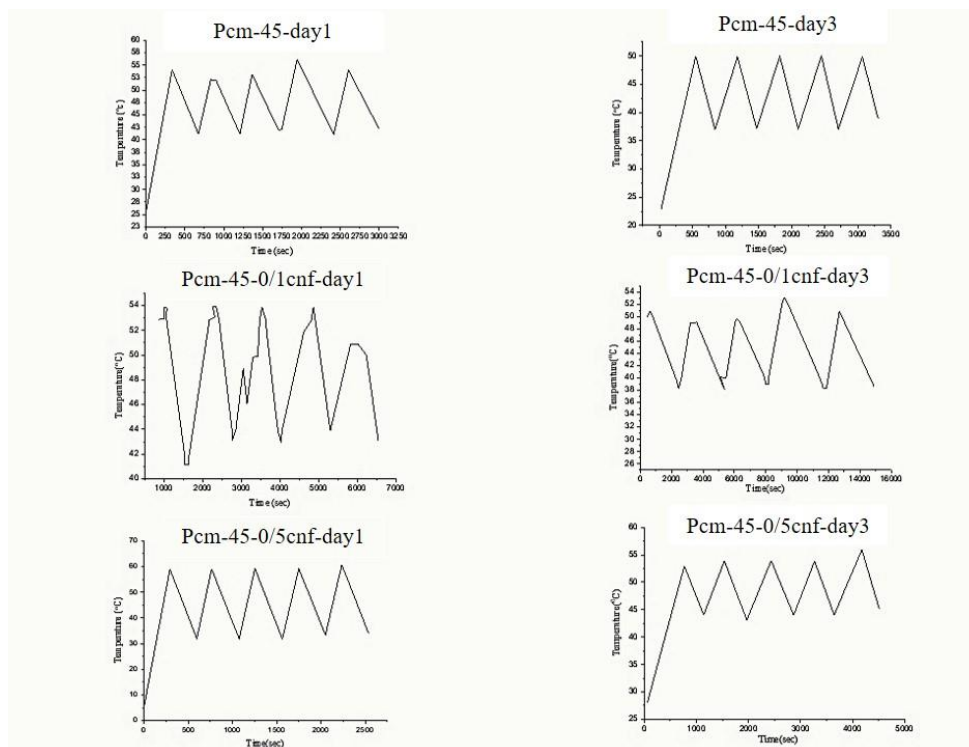
با استفاده از دوربین وبکم Genius مدل FaceCam1000 عکس‌برداری لحظه‌ای نمونه انجام شد تا میزان جابه‌جایی نمونه‌ها با استفاده از کدنویسی ثبت گردد. تصاویر حاصل در نرم افزار متلب مورد پردازش قرار گرفته است. از سنسور دمایی نوع PT1000 تعبیه شده در سطح نمونه، میزان تغییرات دما حین دوره تحریک و استراحت نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی اندازه حرارت

ایجاد شده در نواحی مختلف ساختار بعد از ۵ روز کاری (هر روز کاری شامل ۵ سیکل تحریک و استراحت) توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM, MIRA3 TESCAN) تحت ولتاژ شتاب دهنده 10kV انجام شد. به منظور آماده سازی نمونه ها، ابتدا توسط کاتر و به روش دستی برش هایی با ضخامت ۳ تا ۲ میلی متر از سطح مقطع عرضی ایجاد شد و نمونه ها در معرض هوای محیط قرار گرفتند تا اتانول باقیمانده در ساختار حذف و نمونه ها به منظور آماده سازی برای تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، تحت پوششی از طلا قرار گیرند.

۴- نتایج و بحث

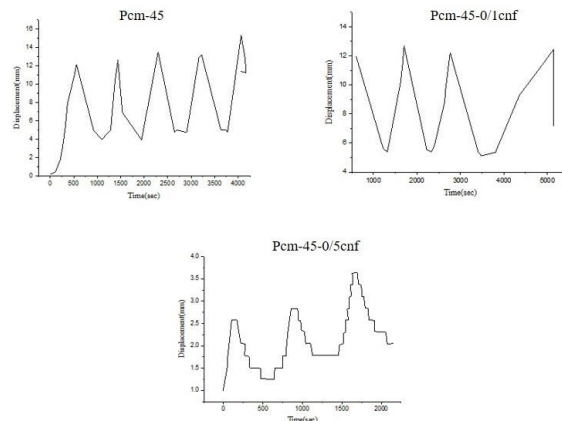
به منظور بررسی عملکرد ربات ساخته شده، ابتدا ربات تحت جریان الکتریکی قرار گرفته، مدت زمان تحریک و بازیابی نمونه ها طی ۵ سیکل کاری بررسی شد. با اعمال ولتاژ و ایجاد جریان در میان نانوالیاف کربنی که منبع حرارتی ربات است، نمونه شروع به تحریک و گرم شدن کرد. با افزایش دما، اتانول موجود در ساختار وارد فاز بخار شده و افزایش قابل توجه طول نمونه را سبب می شود. سپس با قطع جریان نمونه وارد فاز استراحت شده و با کاهش دما اتانول به حالت اولیه فاز مایع بازگشته و نمونه به طول اولیه خود بازمی گردد.

شکل ۳، روند تغییرات دمایی نمونه ها را در ۵ سیکل کاری روز اول و سوم نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد حداکثر دمای سطح نمونه Pcm-45-0.5cnf در هر سیکل تحریک، تا مقدار ۶۳ درجه سانتی گراد افزایش یافته است. در شکل ۴، روند تغییرات جابجایی نمونه های کامپوزیتی در سیکل های کاری روز پنجم به منظور مقایسه آمده است. علاوه بر این، در جدول ۳ اطلاعات مربوط به هر سه نمونه شامل حداکثر کرنش ایجاد شده، میزان افت وزن، مدت زمان تحریک و استراحت پس از پایان سیکل های کاری در روزهای ۱، ۳ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۳- روند تغییرات دمایی نمونه Pcm-45-0.5cnf در سیکل کاری روز اول.

حداکثر کرنش ایجاد شده در نمونه‌ی بدون فاز تقویت کننده (pcm-45) و نمونه‌ی دارای ۱/۰ درصد فاز تقویت کننده (-pcm45) ۲۰ درصد اندازه گیری شد. در صورتی که حداکثر کرنش ایجاد شده در نمونه‌ی دارای ۵/۰ درصد فاز تقویت کننده (0.1cnf)، معادل ۱۰ درصد بوده است. با افزایش درصد فاز تقویت کننده در کامپوزیت، حرکت زنجیره‌های پلیمری به دلیل برهم کنش و درهم پیچیدگی به وجود آمده میان زنجیره‌ها و نانوالیاف کربنی موجود در ساختار، کاهش یافته و منجر به تغییر شکل محدود و کاهش کرنش در نمونه‌ی مذکور شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، با مقایسه‌ی نمودارها در شکل ۴، کاهش روند افزایش طول نمونه‌ها در سیکل تحریک برای نمونه‌ی دارای ۵/۰ درصد وزنی نانوالیاف نسبت به دو نمونه‌ی دیگر، مشهود است.



شکل ۴- روند تغییرات طول نمونه‌ها در سیکل‌های کاری روز پنجم.

جدول ۳: مقایسه‌ی عملکردی روزانه نمونه‌های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی.

نمونه ربات	روز	زمان تحریک (s)	زمان استراحت (s)	کاهش وزن پس از هرروز $\pm 5\%$	کرنش $\pm 3\%$
Pcm-45	۱	۱۴۸	۳۶۲	۴۸	۲۲
	۳	۱۵۳	۳۰۷	۵۱	۲۰
	۵	۱۷۷	۴۰۱	۶۰	۱۶
Pcm-45-0.1CNF	1	۳۶۴	۳۲۹	۲۳	۲۰
	3	۲۵۰	۲۶۹	۳۸	۱۸
	5	۶۳۲	۳۱۹	۵۱	۱۶
Pcm-45-0.5cnf	۱	۳۶۶	۴۰۰	۴۰	۱۰
	۳	۲۷۵	۴۲۹	۵۴	۸
	5	۳۸۷	۳۱۸	۵۵	۵

شکل‌های ۵ الی ۷، روند تغییرات طول نمونه در سیکل‌های تحریک و استراحت را نشان می‌دهد. همانطور که در تصاویر مشاهده می‌شود قابلیت تغییر شکل کامپوزیت هیبریدی در حضور ۰/۱ درصد وزنی نانوالیاف کربنی مشابه با نمونه pcm-45 می‌باشد. در حالی که نمونه pcm45-0.5cnf در سیکل تحریک کرنش بسیار کمتری از حد تعیین شده از خود نشان داده است.

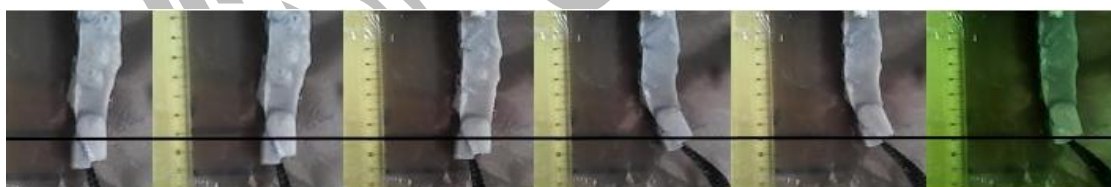


الف



ب

شکل ۵- تصاویر تغییر طول نمونه PCM-45 طی سیکل‌های الف) تحریک و ب) استراحت.



الف



ب

شکل ۶- تصاویر تغییر طول نمونه PCM-45-0.1cnf طی سیکل‌های الف) تحریک و ب) استراحت.



الف



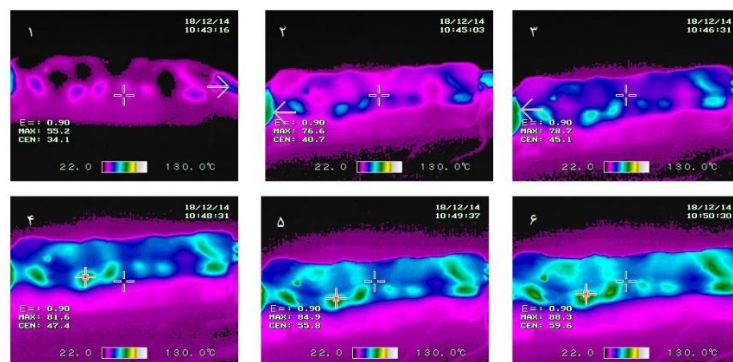
ب

شکل ۷- تصاویر تغییر طول نمونه PCM-45-0.5cnf طی سیکل های الف) تحریک و ب) استراحت.

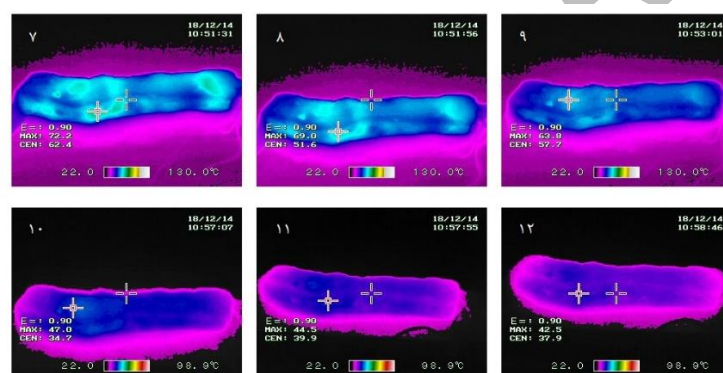
باتوجه به تصاویر، مشاهده می شود در روند سیکل استراحت مقداری از افزایش طول در نمونه های PCM-45 و PCM-45-0.1cnf حفظ شده است. به منظور کاهش زمان استراحت، دمای پایان سیکل آسایش، ۴۰ درجه سانتی گراد انتخاب شد که سبب تفاوت طول نمونه پس از استراحت با طول اولیه نمونه می باشد. تغییرات دمایی ایجادشده در نمونه ها طی سیکل های استراحت و تحریک توسط دوربین حرارتی ثبت و در شکل های ۸ الی ۱۳، آورده شده است. روند افزایش دما به صورت طیف رنگی از سیاه به سرخ آبی، سرمه ای، آبی، سبز، زرد، نارنجی، قرمز و سفید در بازه دمایی ۲۲ تا ۱۳۰ درجه سانتی گراد برای دو نمونه PCM-45 و PCM-45-0.1cnf و ۲۲ تا ۹۸ درجه سانتی گراد برای نمونه PCM-45-0.5cnf ثبت شده است. علت انتخاب بازه دمایی کمتر برای نمونه PCM-45-0.5cnf این بود که انتظار می رفت به دلیل حضور درصد بالاتر نانوالیاف در ساختار نمونه در دماهای کمتری نمونه عملکرد حرکتی نشان بدهد. همانطور که در شکل های ۸ و ۹ مشاهده می شود، در سیکل تحریک نمونه ی PCM-45، دمای نمونه در اطراف شانه های کربنی بیشتر بوده و در نتیجه خروج اتانول از این نواحی بیشتر است، این درحالیست که روند کاهش دما در سیکل بازایی از سطح و مغز نمونه به صورت یکنواخت تری رخ داده است. در نمونه های دارای فاز تقویت کننده (شکل های ۱۰-۱۳) افزایش و کاهش دما در هر دو سیکل تحریک و بازایی کمی یکنواخت تر صورت گرفته است. که به دلیل وجود فاز رسانای حرارتی که در ساختار کامپوزیت توزیع شده است. اما مشابه نمونه PCM-45 دما در اطراف شانه های کربنی بیشتر است.

نکته حائز اهمیت دیگر این است که در سیکل تحریک نمونه ی دارای ۰/۵ درصد وزنی فاز تقویت کننده، دما تا حدود ۱۲۷ درجه سانتی گراد افزایش یافته است که این امر به دلیل افزایش فاز تقویت کننده نانوالیاف کربنی در نمونه بوده است. در واقع وجود درصد بالاتر نانوالیاف کربنی با ایجاد موانع برای تحرک زنجیره های پلیمری، در ساختار صلبیت ایجاد کرده است و در نتیجه نمونه حتی تا دمای ۱۲۷ درجه سانتی گراد قابلیت تحرک و کرنش مد نظر را ندارد. به دلیل افزایش بیش از حد دما در سیکل تحریک نمونه مورد نظر، افزایش آسیب و عیوب ساختاری ایجاد شده در نمونه و خروج بیشتر اتانول از نمونه ی مذکور (جدول ۳) مشاهده

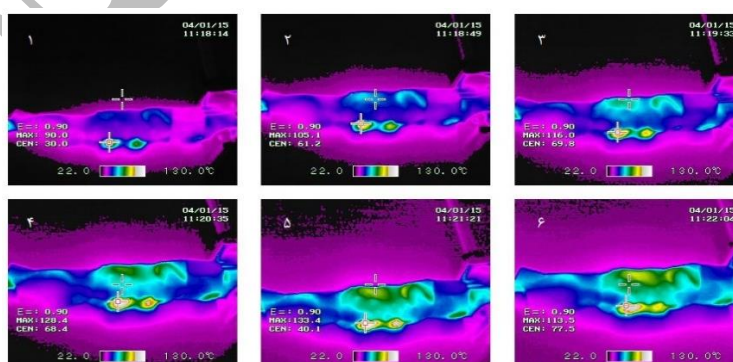
می‌شود. همچنین افزایش طول آن به طور قابل توجهی نسبت به دو نمونه دیگر کاهش یافته است (شکل ۷) که وجود فاز تقویت کننده سبب افزایش صلبیت و محدودیت کرنش نمونه شده است.



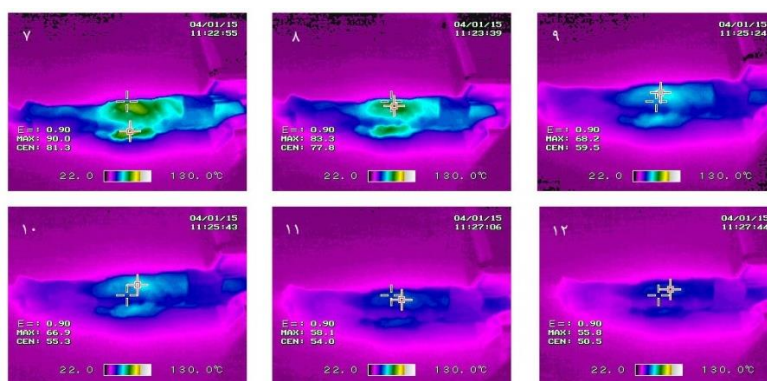
شکل ۸- روند افزایش دمای نمونه Pcm-45 در سیکل تحریک.



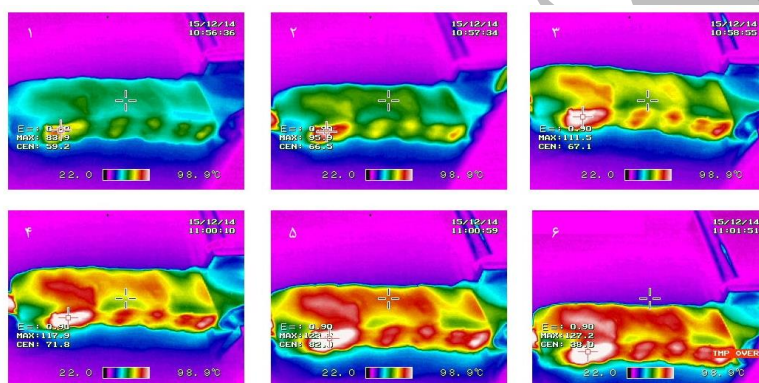
شکل ۹ - روند کاهش دمای نمونه Pcm-45 در سیکل استراحت.



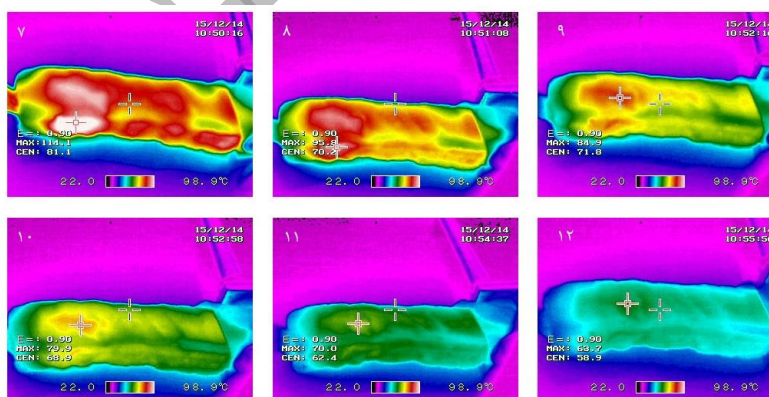
شکل ۱۰- روند افزایش دمای نمونه Pcm-45-0.1cnf در سیکل تحریک.



شکل ۱۱- روند کاهش دمای نمونه Pcm-45-0.1cnf در سیکل استراحت.

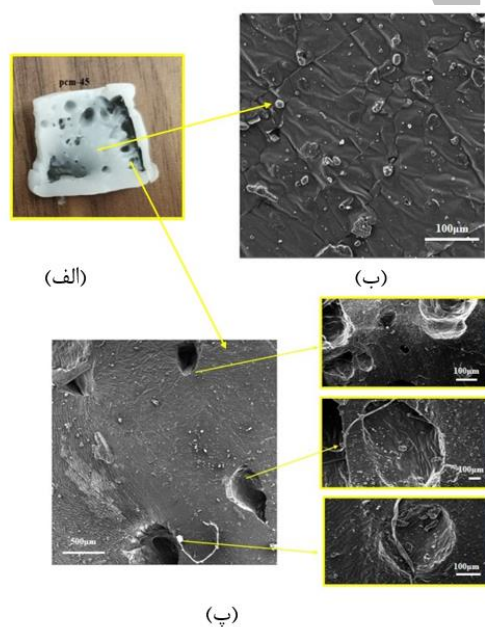


شکل ۱۲- روند افزایش دمای نمونه Pcm-45-0.5cnf در سیکل تحریک.

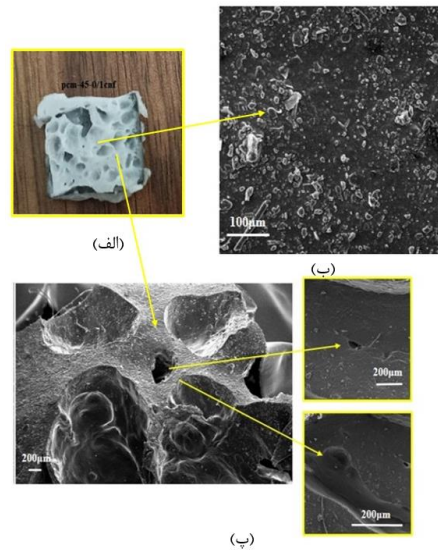


شکل ۱۳- روند کاهش دمای نمونه Pcm-45-0.5cnf در سیکل استراحت.

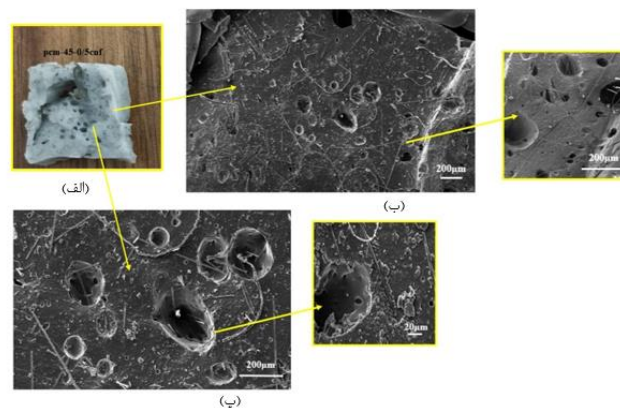
در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶، تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)، تهیه شده از نمونه‌ها پس از سیکل کاری، آورده شده‌است. همان‌طور که در تصاویر ماکروسکوپی نمونه‌ها قابل مشاهده است، در نمونه Pcm-45 به دلیل بالاتر بودن دما در اطراف بافته الیاف کربنی حفرات ایجاد شده در اطراف شانه‌ها بدلیل خروج بیشتر اتانول از این نواحی بیشتر بوده و با دور شدن از این نواحی به سمت بخش مرکزی نمونه، به دلیل کمتر بودن دما اندازه‌ی حفرات و خروج اتانول کاهش یافته است. در تصاویر مربوط به نمونه Pcm-45-0.1cnf و Pcm-45-0.5cnf حضور نانوالیاف کربنی در زمینه الاستومر مشاهده می‌شود و با افزایش درصد وزنی فاز تقویت‌کننده در نمونه Pcm-45-0.5cnf، میزان نانوالیاف در سطح مقطع افزایش یافته است. علاوه بر این در تصاویر حفرات سطحی و خروج اتانول در سطح و مغز نمونه‌های Pcm-45-0.1cnf و Pcm-45-0.5cnf به صورت یکنواخت‌تر بوده‌است، که نشان‌دهنده توزیع حرارت بهتر نسبت به نمونه بدون فاز تقویت‌کننده می‌باشد. تعداد حفرات سطحی در نمونه‌ی دارای ۰.۵ درصد وزنی فاز تقویت‌کننده در مقایسه با نمونه‌ی Pcm-45-0.1cnf نیز افزایش یافته است که بیانگر تاثیر حضور درصد بیشتر نانوالیاف کربنی و توزیع حرارت بهتر و افزایش قابل توجه دمای نمونه در طی سیکل تحریک نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۴- تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی سطح نمونه Pcm-45. (الف) تصویر ماکروسکوپی از سطح مقطع نمونه برش زده شده (ب) تصویر میکروسکوپی از ناحیه دور از الیاف بافته شده کربنی (منبع حرارتی) (پ) تصویر میکروسکوپی از ناحیه نزدیک به الیاف شده کربنی (منبع حرارتی).



شکل ۱۵- تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی سطح نمونه Pcm-45-0.1cnf. (الف) تصویر ماکروسکوپی از سطح مقطع نمونه برش زده شده (ب) تصویر میکروسکوپی از ناحیه نزدیک به الیاف بافته شده کربنی (منبع حرارتی) (پ) تصویر میکروسکوپی از ناحیه دور از الیاف بافته شده کربنی (منبع حرارتی).



شکل ۱۶- تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی سطح نمونه Pcm-45-0.5cnf. (الف) تصویر ماکروسکوپی از سطح مقطع نمونه برش زده شده (ب) تصویر میکروسکوپی از ناحیه دور از الیاف بافته شده کربنی (منبع حرارتی) (پ) تصویر میکروسکوپی از ناحیه نزدیک به الیاف بافته شده کربنی (منبع حرارتی).

از مقایسه تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها مشاهده می‌شود در نمونه Pcm-45، خروج اتانول از سطح نمونه باعث ایجاد تخریب سطحی در نمونه نشده‌است و میانگین اندازه‌ی حفرات ایجاد شده در نمونه‌ی مذکور در مقایسه با اندازه‌ی حفرات سطحی ایجاد شده در نمونه Pcm-45-0.1cnf بزرگتر بوده و نشان‌دهنده‌ی تاثیر فاز تقویت‌کننده در کاهش خروج اتانول و جلوگیری از تخریب سطح نمونه‌است. میانگین اندازه‌ی حفرات سطحی در نمونه دارای ۵/۰ درصدونی فاز تقویت‌کننده در مقایسه با نمونه‌ی دارای ۱/۰ درصد

وزنی نانوالیاف کربنی کوچک‌تر بوده اما تعداد این حفرات در نمونه‌ی ذکرشده بیش‌تر است. تعداد بیش‌تر حفرات سطحی در نتیجه‌ی افزایش دما تا ۱۲۷ در نمونه به‌وجود آمده و خروج بیش‌تر اتانول از نمونه را سبب شده‌است. این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی یک ربات نرم هیبریدی بر پایه‌ی سیلیکون-اتانول-نانوالیاف کربنی توانسته بخشی از محدودیت‌های متداول در نمونه‌های دارای مسیر رسانای فلزی را به‌ویژه در دو محور اصلی یعنی حفظ انعطاف‌پذیری ساختار و بهبود یکنواختی توزیع حرارت، برطرف کند. دلیل اصلی این بهبود استفاده از بافته‌ی الیاف کربنی به‌عنوان مسیر رسانا است که در مقایسه با المان‌های فلزی ناسازگاری مکانیکی کمتری با زمینه‌ی الاستومری داشته، احتمال تمرکز تنش، محدود شدن تغییر شکل موضعی و الاستیسیته‌ی کلی در ساختار زمینه کاهش می‌یابد. هم‌چنین، حضور نانوالیاف کربنی خردشده در زمینه، با ایجاد مسیرهای انتقال حرارت در مقیاس کوچک، توانسته رفتار حرارتی کامپوزیت را نسبت به نمونه‌ی فاقد فاز تقویت‌کننده اصلاح کند.

از مهم‌ترین نتایج این پژوهش آن است که افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانوالیاف کربنی بدون کاهش کرنش نهایی، عملکرد کلی سامانه را بهبود داده است. در این نمونه، کرنش بیشینه هم‌چنان ۲۰ درصد باقی مانده، اما هدررفت اتانول از ۸۴ درصد به ۵۱ درصد کاهش یافته‌است. در پژوهش انجام گرفته افزودن مقدار بهینه از نانوالیاف کربنی توانسته است میان نیاز بهبود انتقال حرارت در زمینه بدون از دست رفتن انعطاف‌پذیری یا افزایش آسیب ساختاری تعادل برقرار کند. به بیان دیگر، افزودن مقدار بهینه از نانوالیاف کربنی نه تنها مانعی برای حرکت زنجیره‌های پلیمری ایجاد نکرده، بلکه با توزیع یکنواخت‌تر گرما، از تمرکز حرارتی موضعی و تبخیر شدید اتانول در نواحی خاص جلوگیری کرده است. تحلیل تصاویر حرارتی نیز این تفسیر را تأیید می‌کند. در نمونه‌ی فاقد فاز تقویت‌کننده، دما در اطراف شانه‌های کربنی به‌طور محسوسی بیش‌تر بوده و این ناهمگنی حرارتی موجب خروج بیش‌تر اتانول از همین نواحی شده است. در مقابل، در نمونه‌های حاوی نانوالیاف کربنی، افزایش و کاهش دما در سیکل‌های تحریک و بازایی یکنواخت‌تر رخ داده است. این رفتار نشان می‌دهد که نانوالیاف کربنی نقش یک شبکه‌ی پخش‌کننده‌ی حرارت را ایفا کرده‌اند و توانسته‌اند گرمای تولیدشده در بخش رسانا را به‌صورت مؤثرتری در سرتاسر کامپوزیت توزیع کنند. پیامد مستقیم این موضوع، کاهش شیب دمایی، محدود شدن تبخیر موضعی اتانول و در نتیجه بهبود پایداری عملکرد در سیکل‌های کاری است.

از منظر مکانیزم تغییر شکل، عملکرد نمونه‌ها تابعی از دو پدیده‌ی هم‌زمان بوده است:

۱. تولید حرارت در مسیر رسانا،

۲. تغییر فاز اتانول و افزایش فشار داخلی در حفرات میکرونی.

هرگاه حرارت تولیدشده به‌صورت کنترل‌شده و یکنواخت به اتانول برسد، بخارشوندگی مؤثرتر رخ می‌دهد و افزایش طول نمونه با بازده بالاتری حاصل می‌شود. اما اگر توزیع حرارت ناهمگن باشد، بخشی از اتانول زودتر از ساختار خارج‌شده، بخش دیگر به دمای کافی برای تغییر فاز مؤثر نمی‌رسد. بنابراین، بهبود عملکرد نمونه‌ی دارای ۰/۱ درصد وزنی نانوالیاف کربنی را می‌توان ناشی از برقراری تعادل میان رسانایی حرارتی، نرمی زمینه، و قابلیت نگهداشت سیال فعال دانست.

در مقابل، نتایج نمونه‌ی دارای ۰/۵ درصد وزنی نانوالیاف کربنی نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد فاز تقویت‌کننده، لزوماً به بهبود عملکرد محرک منجر نمی‌شود. در این نمونه، کرنش بیشینه تا ۱۰ درصد کاهش یافته، در حالی که دمای نمونه در سیکل تحریک تا

حدود ۱۲۷ درجه سانتی گراد افزایش داشته است. این مشاهده بیانگر آن است که محدودیت اصلی در این حالت، افزایش صلبیت کامپوزیت و محدود شدن تحرک زنجیره‌های پلیمری است. در واقع، با افزایش غلظت نانوالیاف کربنی، برهم‌کنش میان فاز تقویت‌کننده و زنجیره‌های الاستومری تشدید شده و شبکه‌ای صلب‌تر درون زمینه شکل گرفته است. چنین ساختاری هرچند انتقال حرارت را تسهیل می‌کند، اما مانع از بروز تغییر شکل زیاد می‌شود و پاسخ مکانیکی سامانه را ضعیف می‌کند. افزایش دما در نمونه‌ی ۵/۰ درصد وزنی، برخلاف انتظار، باعث افزایش کرنش نشده و با افزایش آسیب ساختاری و خروج بیشتر اتانول همراه بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که بالا بردن دمای تحریک، راهبرد مناسبی برای ارتقای عملکرد این دسته از محرک‌ها نیست؛ زیرا در صورت نامتناسب بودن سختی زمینه با فشار حاصل از بخارشوندگی، انرژی ورودی صرف تخریب سطحی موضعی، ایجاد عیوب ساختاری و تسریع افت ماده‌ی فعال می‌شود. بنابراین، نتایج حاضر بر اهمیت بهینه‌سازی هم‌زمان خواص حرارتی و مکانیکی در طراحی ربات‌های نرم دارای ماده تغییر فاز دهنده تأکید می‌کند.

مشاهدات میکروسکوپی و ماکروسکوپی نیز این تحلیل را تکمیل می‌کنند. در نمونه‌ی فاقد فاز تقویت‌کننده، اندازه‌ی حفرات سطحی بزرگ‌تر بوده که نشان‌دهنده‌ی خروج موضعی‌تر و شدیدتر اتانول است. در نمونه‌ی دارای ۱/۰ درصد وزنی نانوالیاف، اندازه‌ی حفرات کاهش یافته و تخریب سطحی کمتر شده است. این نتیجه به‌خوبی با کاهش هدررفت اتانول و یکنواخت شدن میدان دمای هم‌خوانی دارد. در نمونه‌ی ۵/۰ درصد وزنی، هرچند اندازه‌ی میانگین حفرات کوچک‌تر گزارش شده، اما تعداد آن‌ها بیشتر است. این الگو می‌تواند ناشی از توزیع گسترده‌تر حرارت و در عین حال افزایش بیش‌ازحد دما در کل ساختار باشد. این وضعیت مؤید آن است که بهبود توزیع حرارت، اگر با کنترل دما و حفظ نرمی کافی همراه نباشد، می‌تواند به خروج گسترده‌تر اتانول و کاهش دوام عملکردی منجر شود. از نظر کاربردی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای توسعه‌ی ماهیچه‌های مصنوعی و سافت ربات‌های پوشیدنی یا کمکی، جایگزینی مسیرهای رسانای فلزی با ساختارهای رسانای کربنی می‌تواند راهبردی مؤثر باشد؛ زیرا این جایگزینی علاوه بر سازگاری مکانیکی بهتر با زمینه نرم، امکان طراحی سامانه‌هایی با تغییر شکل یکنواخت‌تر و آسیب کمتر را فراهم می‌کند. با این حال، این مزیت تنها زمانی محقق می‌شود که مقدار فاز تقویت‌کننده در بازه‌ی بهینه نگه داشته شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ۱/۰ درصد وزنی نانوالیاف کربنی در ساختار، نقطه‌ای نزدیک به بهینه بوده است. مقداری که توانسته بدون کاهش کرنش، پایداری حرارتی و نگهداشت اتانول را بهبود دهد. در مجموع، بحث حاضر نشان می‌دهد که رفتار این ربات‌نرم هیبریدی حاصل تعادل میان مؤلفه سه است: الاستیسیته‌ی زمینه‌ی سیلیکونی، تغییر فاز اتانول به‌عنوان منبع محرک و شبکه‌ی رسانای/تقویت‌کننده‌ی کربنی.

هرگونه تغییر در سهم یکی از این مؤلفه‌ها، می‌تواند تعادل میان کرنش، دمای عملکرد، دوام و هدررفت سیال را تغییر دهد. بنابراین، طراحی موفق این نوع محرک‌ها نه بر پایه‌ی بیشینه‌سازی یک ویژگی بلکه بر اساس بهینه‌سازی چند هدف صورت می‌گیرد. یافته‌های این پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد که تقویت ملایم کامپوزیت با نانوالیاف کربنی، راهکار مؤثرتری نسبت به افزایش شدید مقدار تقویت‌کننده است و می‌تواند مسیر مناسبی برای توسعه‌ی نسل جدید محرک‌های نرم با انعطاف‌پذیری بالا، پاسخ سریع و پایداری بهتر فراهم آورد.

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، نمونه‌های کامپوزیتی هیبریدی سه‌جزئی سیلیکون-اتانول-نانو الیاف خرد شده کربنی با کاربری استفاده در ربات‌های نرم متحرک ساخته شد. در این پژوهش به بررسی تاثیر نانوالیاف کربنی افزوده شده به کامپوزیت‌ها به عنوان فاز تقویت کننده کامپوزیت‌ها با هدف کاهش میزان هدررفت اتانول و بهبود توزیع حرارت نمونه‌های ربات، پرداخته شد. روند تغییرات کرنش سه نمونه‌ی ساخته شده دارای ۰، ۱/۵ و ۰/۵ درصد وزنی از فاز تقویت کننده پس از ۳ روز کاری در سیکل‌های تحریک و بازیابی بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که افزودن ۱/۵ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی به عنوان بخش تقویت کننده علاوه بر ایجاد کرنش ۲۰ درصد که مدنظر بود، باعث کاهش میزان هدررفت اتانول از نمونه شده است و همچنین از ایجاد تخریب سطحی به سبب تغییرات دمایی کمتر جلوگیری کرده است. این در حالی است که افزایش درصد وزنی فاز تقویت کننده به ۰/۵ درصد وزنی سبب افزایش صلبیت نمونه شده و حتی افزایش دما تا مقدار ۱۲۷ درجه سانتی‌گراد، سبب بهبود قابلیت تغییر شکل نگردیده است.

منابع

- [1] A. Miriyev, G. Caires, and H. Lipson, "Functional properties of silicone/ethanol soft-actuator composites," **Materials & Design**, vol. 145, pp. 232–242, 2018.
- [2] F. Tauber *et al.*, "Perspective for soft robotics: the field's past and future," **Bioinspiration & Biomimetics**, vol. 18, no. 3, p. 035001, 2023.
- [3] J. Wang and A. Chortos, "Control Strategies for Soft Robot Systems," **Adv. Intell. Syst.**, vol. 4, no. 5, 2022, doi: 10.1002/aisy.202100165.
- [4] X. Li, H. Duan, P. Lv, and X. Yi, "Soft Actuators Based on Liquid-Vapor Phase Change Composites," **Soft Robot.**, vol. 8, no. 3, pp. 251–261, 2021, doi: 10.1089/soro.2020.0018.
- [5] R. Chellattoan, A. Yudhanto, and G. Lubineau, "Low-voltage-driven large-amplitude soft actuators based on phase transition," **Soft Robotics**, vol. 7, no. 6, pp. 688–699, 2020.
- [6] H. Su *et al.*, "Pneumatic Soft Robots: Challenges and Benefits," **Actuators**, vol. 11, no. 3, pp. 1–14, 2022, doi: 10.3390/act11030092.
- [7] B. Trimmer, "Soft robots," **Curr. Biol.**, vol. 23, no. 15, 2013, doi: 10.1016/j.cub.2013.04.070.
- [8] J. Wang, D. Gao, and P. S. Lee, "Recent Progress in Artificial Muscles for Interactive Soft Robotics," **Adv. Mater.**, vol. 33, no. 19, p. 2003088, May 2021, doi: 10.1002/ADMA.202003088.
- [9] A. Miriyev, K. Stack, and H. Lipson, "Soft material for soft actuators," **Nat. Commun.**, vol. 8, no. 1, p. 596, 2017.
- [10] A. Miriyev, G. Caires, and H. Lipson, "Functional properties of silicone/ethanol soft-actuator

composites," **Mater. Des.**, vol. 145, pp. 232–242, 2018.

[11] M. Saqib and R. Andrzejczyk, "A review of phase change materials and heat enhancement methodologies," **Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.**, vol. 12, no. 3, May 2023, doi: 10.1002/WENE.467.

[12] Y. Cui, J. Xie, J. Liu, J. Wang, and S. Chen, "A review on phase change material application in building," **Adv. Mech. Eng.**, vol. 9, no. 6, pp. 1–15, 2017, doi: 10.1177/1687814017700828.

[13] K. Venkateswarlu and K. Ramakrishna, "Recent advances in phase change materials for thermal energy storage-a review," **J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.**, vol. 44, no. 1, pp. 1–17, 2022, doi: 10.1007/s40430-021-03308-7.

[14] R. I. Rubel **et al.**, "Phase Change Materials in High Heat Storage Application: A Review," **Arab. J. Sci. Eng.**, vol. 49, no. 11, pp. 14533–14551, Aug. 2024, doi: 10.1007/S13369-024-09519-Z.

[15] X. Li, H. Duan, P. Lv, and X. Yi, "Soft actuators based on liquid–vapor phase change composites," **Soft Robot.**, vol. 8, no. 3, pp. 251–261, 2021, doi: 10.1089/soro.2020.0018.

[16] M. Sogabe **et al.**, "A quick response soft actuator by miniaturized liquid-to-gas phase change mechanism with environmental thermal source," **Sens. Actuators A Phys.**, vol. 361, p. 114587, 2023.

[17] V. P. Panchamiya, A. Kuchimanchi, K. G. Kulkarni, and S. N. Havaladar, "A review on phase change materials: Development, Types, and Applications," **J. Phys. Conf. Ser.**, vol. 2426, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2426/1/012033.

[18] M. I. Lone and R. Jilte, "A review on phase change materials for different applications," **Mater. Today Proc.**, vol. 46, pp. 10980–10986, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.050.

[19] M. I. Lone and R. Jilte, "A review on phase change materials for different applications," **Mater. Today Proc.**, vol. 46, pp. 10980–10986, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.050.

[20] A. H. Ebrahimi, H. Zamyad, J. Safaei, and S. Sahebian, "Design and Characterization of Electrically Driven-Bioinspired Soft Actuator based on Silicon-Ethanol Composite," **J. Metall. Mater. Eng.**, vol. 32, no. 2, pp. 167–182, 2021, doi: 10.22067/jmme.2021.69610.1010.

[21] A. H. Ebrahimi, H. Zamyad, J. Safaei, and S. Sahebian, "Design and characterization of electro-active soft actuator based on phase transition of microencapsulated silicon-ethanol composite," **J. Thermoplast. Compos. Mater.**, vol. 37, no. 4, pp. 1499–1518, 2024, doi: 10.1177/08927057231197160.

[22] P. Azizihariri, A. H. Ebrahimi, H. Zamyad, and S. Sahebian, "Development of a phase-change material-based soft actuator for soft robotic gripper functionality: In-depth analysis of material composition, ethanol microbubble distribution and lifting capabilities," **Mater. Chem. Phys.**, vol. 311, p. 128435, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.128435.

[23] P. Azizihariri, A. H. Ebrahimi, H. Zamyad, and S. Sahebian, "Bending Movement Analysis of Soft Actuators Fabricated with Silicone-Ethanol, Carbon Fabric Composites," 2021.

[24] M. Mohammadi, A. Z. Kouzani, M. Bodaghi, Y. Xiang, and A. Zolfagharian, "3D-Printed Phase-Change Artificial Muscles with Autonomous Vibration Control," **Adv. Mater. Technol.**, vol. 8, no. 23, 2023, doi: 10.1002/admt.202300199.

[25] A. Miriyev, C. Trujillo, G. Caires, and H. Lipson, "Rejuvenation of soft material–actuator," **MRS Commun.**, vol. 8, no. 3, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1557/mrc.2018.30.

[26] G. Decroly **et al.**, "Optimization of Phase-Change Material–Elastomer Composite and Integration in Kirigami-Inspired Voxel-Based Actuators," **Front. Robot. AI**, vol. 8, 2021.