

بررسی تاثیر نحوه توزیع حرارت بر عملکرد محرک نرم سیلیکون-اتانول

محبوبه قاسم‌زاده نامقی^(۱) حجت زامیاد^(۲) محسن حداد سبزوار^(۳) سمانه صاحبیان سقی^(۴)

^۱ کارشناسی ارشد متالورژی و مواد؛ دانشگاه فردوسی مشهد m.ghasemzade.namaghi@gmail.com

^۲ دکترای مهندسی پزشکی؛ دانشگاه فردوسی مشهد mohammadianmaral8@gmail.com

^۳ استاد؛ دانشگاه فردوسی مشهد haddadm@um.ac.ir

^۴ استادیار؛ دانشگاه فردوسی مشهد s.sahebian@um.ac.ir

* نویسنده مسئول: سمانه صاحبیان سقی

چکیده در پژوهش حاضر ربات نرم سیلیکونی با ماده تغییر فاز دهنده اتانول ساخته شد و تاثیر نوع توزیع حرارت به ساختار و سرعت پاسخ دهی آن مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال جریان الکتریکی، گرمای ژول حاصل از مقاومت سیم‌پیچ در نمونه ایجاد شده و با تغییر فاز و ایجاد فشار بخار اتانول در این ساختار انبساط و کرنش حاصل می‌شود. شرایط توزیع حرارت در کامپوزیت سیلیکون-اتانول بسیار با اهمیت است. نتایج نشان داد که نمونه با قطر سیم‌پیچ ۱ سانتی‌متر (برابر با ۳۴٪ حجمی از نمونه که داخل سیم‌پیچ قرار گرفته به حجم کل نمونه) دارای ثبات عملکردی در طی سیکل‌های مختلف در توزیع ابعاد عیوب یکنواخت بود. تحلیل دماهای مرکز و سطح نمونه اختلافی برابر با حدود ۲۱ درجه سانتی‌گراد نشان داد و میانگین زمان پاسخدهی طی سه روز کاری برابر با ۱۶۱.۳ ثانیه به دست آمد. در نمونه با قطر سیم‌پیچ ۰.۸ سانتی‌متر (برابر با ۲۲.۳۳٪ حجمی از نمونه که داخل سیم‌پیچ قرار گرفته به حجم کل نمونه) میزان اختلاف دمای سطح و مرکز ۲۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین زمان پاسخدهی طی سه روز کاری ۱۶۵ ثانیه بود. در نمونه با قطر سیم‌پیچ ۰.۵ سانتی‌متر (برابر با ۸.۷۲٪ حجمی از نمونه که داخل سیم‌پیچ قرار گرفته به حجم کل نمونه) میزان اختلاف دمای سطح و مرکز ۸۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین زمان پاسخ دهی طی سه روز کاری ۱۱۳ ثانیه اندازه‌گیری شد.

واژه‌های کلیدی محرک نرم، کامپوزیت، سیلیکون، ماده تغییر فاز دهنده، انتقال حرارت، اتانول.

Investigating the Effect of Heat Distribution on the Performance of Silicone-Ethanol Soft Actuator

M. Ghasemzadeh namghi H. Zamyad M. Haddad sabzevar S. Sahebian

Abstract

In the current research, a silicone soft robot was made with ethanol phase changer and the effect of the type of heat distribution on its structure and response speed was investigated. By applying an electric current, Joule heat is generated from the resistance of the coil in the sample, and by changing the phase and creating the ethanol vapor pressure in this structure, expansion and strain are obtained. The conditions of heat distribution in silicone-ethanol composite are very important. The results showed that the sample with a coil diameter of 1 cm (equal to 34% of the volume of the sample placed inside the coil to the total volume of the sample) had functional stability during different cycles in the uniform distribution of defects. The analysis of the temperatures of the center and surface of the sample showed a difference of about 21 °C and the average response time during three working days was 161.3 s. In the sample with a coil diameter of 0.8 cm (equal to 22.33% of the volume of the sample placed inside the coil to the total volume of the sample), the difference between surface and center temperature was 25 °C and the average response time during three working days was 165 s. In the sample with a coil diameter of 0.5 cm (equal to 8.72% of the volume of the sample placed inside the coil to the total volume of the sample), the temperature difference between the surface and the center was measured as 85°C and the average response time was 113 s during three working days.

Key Words soft actuator, silicone Composite, phase change material, heat transfer.

ربات‌ها به طور قابل توجهی در زمینه‌های مختلفی مانند نظامی، پزشکی، اکتشاف، حمل و نقل و حتی استفاده شخصی و خانگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با الهام از تنوع زیستی در طبیعت، تلاش‌های زیادی برای ساخت ربات‌های نرمی انجام شده تا ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند سبک وزنی، هزینه کم و انعطاف‌پذیری بالا در ربات حاصل شود. در مقایسه با ربات‌های صلب که تغییر شکل‌پذیر نیستند، ربات‌های نرم می‌توانند با تغییر شکل‌های متنوع در صورت مواجهه با موانع به راحتی از آن عبور کرده و شکل خود را برای دسترسی به محیط تغییر دهند [۱-۳].

ایجاد انطباق با محیط اطراف در سیستم‌های رباتیک به آرامی در طی چندین دهه رشد کرده است. ظهور رباتیک نرم در سال ۱۹۵۸ اتفاق افتاد؛ وقتی که مک کیبین^۱ برای دختر فلج خود یک ارتز دستی نرم با ماهیچه مصنوعی ساخت. در دهه ۲۰۰۰، رباتیک الهام گرفته شده از محیط زیست، تبدیل به زیربنای رباتیک نرم شد و اصول دنیای طبیعی را در طراحی ربات‌ها ادغام کرد [۴، ۵]. ویژگی‌های موجودات زنده، مهندسان و محققان را برانگیخته تا عناصر الهام‌گرفته از طبیعت را در ساختارهای رباتیک خود ادغام کنند و ربات‌ها را به توانایی تعامل سازگار با محیط‌های غیرقابل پیش‌بینی و ناشناخته مجهز کنند [۳].

برای طراحی ربات‌های نرم، طیف گسترده‌ای از مواد نرم از جمله محرک‌های الاستومری دی‌الکتریک^۲ [۲]، هیدروژل‌ها [۶]، کامپوزیت‌های پلیمر-فلز حافظه‌دار^۳ [۷]، کامپوزیت‌های مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده [۵، ۸] و پلیمرهای الکترواکتیو^۴ [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله روش‌های فعال‌سازی ربات‌های نرم می‌توان به فعال‌سازی با سیال، الکترواستاتیک/الکتروشیمیایی حرارتی، مغناطیسی و بیوهیبریدی اشاره کرد [۱۰]. اکثر روش‌های فعال‌سازی معمولاً انرژی زیادی مصرف می‌کنند و اغلب به تجهیزات اضافی یا محیط‌های مرطوب نیاز دارند که باعث محدودیت در کاربری آن‌ها می‌شود [۱۱].

در واقع فن‌آوری‌های فعال‌سازی موجود دارای محدودیت‌های ذاتی هستند. به عنوان مثال، پلیمرهای حافظه دار کرنش‌های کمی (کمتر از ۱۰٪) را ایجاد می‌کنند. پلیمرهای دی‌الکتریک معمولاً به ولتاژ محرکه بزرگی در حدود چند کیلوولت نیاز دارند. محرک‌های مغناطیسی نیز به موتورهای و مجموعه بزرگی از ماشین‌آلات نیاز دارند. محرک‌های سیال (که بر اساس انرژی پنوماتیکی یا هیدرولیکی است) بر اساس ایجاد یک جابجایی بزرگ در زمان کوتاه، امیدوارکننده‌ترین محرک‌ها هستند. با این حال، محرک‌های سیال فعلی هنوز نیاز به سیستم‌های تولید فشار داشته که دارای ابعادی بزرگ می‌باشند و کوچک‌سازی آن‌ها دشوار است [۱۲].

محرک‌های مکانیکی که محرک‌های خارجی، از جمله گرما، نور، جریان الکتریکی، pH، رطوبت و میدان مغناطیسی را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کنند، اجزای ضروری در موتورهای مدرن با طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله ربات‌ها، ماهیچه‌های مصنوعی، و سیستم‌های میکروالکترو مکانیکی هستند. از زمان بهبود موتور بخار توسط وات، تغییر قابل توجه در حجم یا شکل مواد ناشی از تبدیل فاز، یکی از مهم‌ترین نیروهای محرک عملگرها بوده است. [۱۳].

محرک‌های کامپوزیتی الاستومر-ماده تغییر فاز دهنده^۵ (PCMEC) از زمینه الاستومری نرم و سیال تشکیل شده‌اند. این سیال به صورت میکرو حباب‌ها در زمینه توزیع شده است. هنگام افزایش دما، تغییر فاز در هر حباب سبب انبساط زمینه می‌شود. این دسته از محرک‌ها به دلیل چگالی انرژی بالا، فشار محرک، هزینه کم و فراوری آسان، برای کاربردهای رباتیک نرم امیدوارکننده هستند. زمینه الاستومری و مواد مورد استفاده در این ربات‌ها بر قابلیت‌های مکانیکی محرک‌های PCMEC تأثیرگذار است [۱۴-۱۶].

¹ MacKibben

² Dielectric elastomer actuators (DEAs)

³ Shape memory alloy (SMA)

⁴ Shape memory alloy (SMA)

⁵ Phase change material Elastomer Composite (PCMEC)

Gilles Decroly و همکارانش [۱۴] در پژوهشی مربوط به استفاده از مواد تغییرفازدهنده در رباتیک نرم، به بررسی تاثیر نوع ماده تغییرفاز دهنده مایع در زمینه سیلیکون پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که انتخاب یک سیال مناسب می‌تواند کرنش و سرعت عملکرد را افزایش دهد و استفاده از مایع مبتنی بر فلئوئر Novec باعث کاهش دمای تحریک به ۳۴ درجه سانتیگراد می‌شود. Kaplon و همکارانش [۱۷ و ۱۸] از اتانول به عنوان PCM در ساخت ربات نرم استفاده کردند. آن‌ها یک کامپوزیت نرم با استفاده از ماده اولیه سیلیکون و اتانول ساختند و در مبنای تئوری خود به بررسی فشاربخار اشباع اتانول در دمای محیط و در دمای تبخیر اتانول پرداختند. همچنین تاثیر عواملی مانند درصد حجمی بهینه فاز اتانول در سرعت عملکرد و جابه‌جایی نیز مورد بررسی قرار گرفت و نشان دادند که با افزایش درصد حجمی فاز مایع تا مقدار ۳۰ درصد، عملکرد ماده به مقدار مطلوب می‌رسد.

Kang و همکاران [۱۹] ترکیبی از ماتریس نرم الاستومر سیلیکونی و یک تشک نانوفیبر پلی اکریلونیتریل آغشته به اتانول تعبیه شده در زمینه سیلیکون را ساختند. در این کار از تحریک حرارتی اتانول محصور شده در لایه نانوالیاف الکترورسی شده که به طور نامتقارن در زمینه انعطاف‌پذیر سیلیکون تعبیه شده است، استفاده و گزارش کردند که عملکرد یک محرک به عواملی مانند شرایط عملیاتی (انرژی حرارتی اعمال شده)، و تعداد لایه‌های غیرفعال بستگی دارد. از آنجایی که قابلیت انطباق با شرایط برنامه ریزی شده برای یک ربات بسیار حائز اهمیت است، لذا بایستی نوع عملکرد ربات به صورتی قابل اطمینان باشد و مدت زمان پاسخگویی و میزان کرنش مد نظر در زمان تعریف شده اتفاق بیفتد تا بتوان از نظم ساختاری موجود در ربات برای کارایی مد نظر بهره گرفت.

در این پژوهش با توجه به اهمیت منبع حرارتی در عملکرد عملگر نرم، کامپوزیت سیلیکون-اتانول، با تکیه بر انتخاب شرایط بهینه انتقال حرارت ساخته شده است. گرما به کمک سیم پیچ مقاومتی از جنس نیکل-کروم به کامپوزیت اعمال شد. چهار قطر متفاوت سیم‌پیچ در نمونه سازی لحاظ شد تا بهینه سازی پارامترهای سیم‌پیچ تعبیه شده در کامپوزیت انجام شود. با بررسی میزان عیوب ایجاد شده در ریزساختار، میزان افت وزن، و یکنواختی عملکرد نمونه طی سیکل‌های کاری متعدد نیز بهترین شرایط مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد مورد استفاده

مواد مورد استفاده در ساخت نمونه‌های پژوهش حاضر شامل: سیلیکون دوجزئی مدل T25 تهیه شده از چین، اتانول ۹۶٪ تهیه شده از شرکت مرک آلمان و سیم نیکل-کروم مدل اسپارک تهیه شده از چین می‌باشد.

۳- روش نمونه‌سازی

ابتدا سیلیکون و اتانول به روش اختلاط مکانیکی به طور کامل با یکدیگر مخلوط شدند. درصد بهینه اتانول با توجه به حداکثر میزان قابلیت اختلاط اتانول در سیلیکون، به روش تجربی و معادل با ۲۵٪ وزنی انتخاب شد. انتخاب درصد وزنی مذکور با در نظر گرفتن دو عامل کلیدی غنی شدن ساختار سیلیکون از اتانول و اختلاط کامل اتانول در بستر سیلیکون و ایجاد ساختاری یکنواخت از سیلیکون-اتانول تعیین شد.

در گام بعد هاردنر به مخلوط اضافه شده و مخلوط نهایی به قالبی که از قبل با قرار دادن سیم پیچ نیکل-کروم در قسمت مرکزی آن آماده شده است، تزریق گردید. سپس قالب در ظرف در بسته ای اشباع از اتانول به مدت ۴ تا ۵ ساعت برای پخت نمونه در محیطی با دمای کمتر از ۲۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت. سیم‌پیچ‌های نیکل-کروم از سیم به طول ۱۲۰ سانتی متر با قطرهای ۰.۵، ۰.۸ و ۱ سانتی متر در ساخت نمونه کامپوزیتی استفاده شد. در نامگذاری نمونه‌های کامپوزیتی از مخفف CPCMX استفاده شده است که X نشان دهنده قطر سیم پیچ می باشد. شماتیکی از مدل قالب در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱) مدل قالب استفاده شده در ساخت نمونه کامپوزیتی سیلیکون-اتانول.

۴- مشخصه‌یابی

به منظور بررسی عملکرد محرک‌های کامپوزیتی، با اعمال ولتاژ به دو سر سیم‌پیچ تعبیه شده در قسمت مرکزی نمونه و عبور جریان از سیم‌پیچ، حرارت ناشی از مقاومت سیم‌پیچ ایجاد شد. حرارت با توزیع در سراسر نقاط کامپوزیت باعث تغییر فاز بسته‌های اتانول شده و در نتیجه‌ی تولید فشار بخار ناشی از تبخیر اتانول، انبساط الاستومر و جابه‌جایی در قطعه حاصل شد. میزان جابه‌جایی مد نظر برای این نمونه‌ها به مقدار ۲۲٪ طول اولیه در نظر گرفته شده است. با رسیدن به این کرنش، سیکل گرمایش قطع و نمونه تا رسیدن به طول اولیه و دمای مرکزی حدود ۴۰- ۳۵ درجه سانتی‌گراد تحت سیکل استراحت قرار می‌گیرد. تمامی نمونه‌ها با توان یکسان ۱۶ وات توسط منبع تغذیه مدل LEADER LSP- 156 مورد ارزیابی قرار گرفتند.

حین اعمال ولتاژ به نمونه‌ها، به کمک دوربین و عکس‌برداری لحظه‌ای میزان جابه‌جایی نمونه‌ها ثبت و به کمک سنسور دمایی نوع PT1000 تعبیه شده در قسمت مرکزی و سطح نمونه، میزان تغییرات دما حین دوره تحریک و استراحت نمونه‌ها نیز ثبت شده است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- آنالیز حرارتی

با طراحی سیم‌پیچ با قطرهای مختلف، برای هر نمونه المان حرارتی متفاوتی حاصل می‌شود. حجمی از نمونه که در قسمت داخلی سیم‌پیچ قرار می‌گیرد به حجم کل نمونه، یکی از پارامترهای کلیدی در تعیین میزان یکنواختی یا عدم یکنواختی در انتقال حرارت از سیم‌پیچ به حجم نمونه است.

در توصیف شرایط انتقال حرارت از سیم‌پیچ به نمونه می‌توان سیم‌پیچ را به یک استوانه حرارتی با قطر مشخص تشبیه کرد. بنابراین باید توجه داشت حجمی از ماده که در داخل سیم‌پیچ قرار گرفته است محصور شده در یک استوانه حرارتی می‌باشد که از دیواره‌های سیم‌پیچ به صورت عرضی و از تمام جهات حرارت را جذب کند. ولی نواحی بیرونی سیم‌پیچ از یک سمت با منبع حرارتی و از سمت دیگر با سطح هوا در تماس هستند در نتیجه بدیهی است که در نواحی بیرونی سیم‌پیچ انتقال حرارت کندتر صورت پذیرد. با در نظر داشتن این نکته، در نمونه CPCM0.5 تنها ۷.۲۵٪ از حجم کل نمونه در قسمت داخلی سیم‌پیچ قرار گرفته و فاصله کوتاهی بین دو جداره استوانه برای انتقال حرارت در بخش مرکزی وجود دارد بنابراین انتظار می‌رود انتقال حرارت و افزایش دما در مرکز این نمونه بسیار سریع اتفاق بیفتد. اما در نواحی بیرونی سیم‌پیچ که حجم بیشتری از کل ماده را در بر گرفته است به دلیل اینکه حرارت فقط از یک جهت به ماده منتقل می‌شود، فاصله سیم‌پیچ تا سطح نمونه نیز بسیار حائز اهمیت است و در نمونه CPCM0.5 این فاصله برابر با ۵/۰ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود انتقال حرارت به سطح نمونه کندتر انجام پذیرد.

در نمونه CPCM0.8، حجمی برابر با ۲۲/۳۴٪ از کل نمونه در داخل سیم‌پیچ قرار دارد و در واقع با افزایش قطر سیم‌پیچ و افزایش حجم ماده‌ای که در داخل آن قرار گرفته روند سرعت انتقال حرارت در ناحیه مرکزی کندتر و در عوض با کاهش فاصله سیم‌پیچ از سطح نمونه، انتقال حرارت به نواحی بیرونی تا سطح نیز با سرعت بهتری انجام پذیرد.

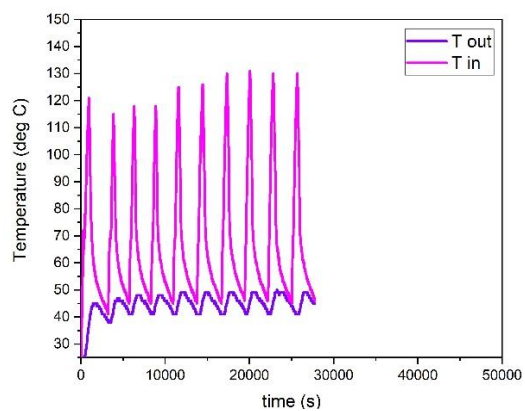
در نمونه CPCM1، حجمی برابر با ۳۴/۹۰٪ از حجم کل نمونه محصور شده در استوانه حرارتی است و فاصله سیم‌پیچ تا سطح نمونه برابر با ۰/۲۵ سانتی‌متر است و انتظار می‌رود با کوتاه شدن این فاصله انتقال حرارت در نواحی بیرونی سیم‌پیچ سریع‌تر اتفاق بیفتد و از طرفی در ناحیه داخلی سیم‌پیچ به دلیل بزرگتر بودن قطر سیم‌پیچ انتقال حرارت با نرخ سرعت مناسبی صورت پذیرد و از تمرکز حرارتی زیاد در مغز نمونه کاسته شود.

به طور کلی میزان انتقال حرارت و افزایش دما در نزدیک به سیم پیچ سریع‌تر رخ می‌دهد و در این نقاط ماده تغییر فاز دهنده زودتر شروع به تغییر فاز می‌کند و در مقابل نواحی دور از سیم پیچ به سبب عایق بودن سیلیکون دیرتر گرما را جذب نموده و بنابراین بعضی نقاط آماده‌ی تغییر فاز و ایجاد کرنش در نمونه هستند و بعضی نقاط هنوز به میزان کافی حرارت را جذب نکرده‌اند، این موضوع باعث می‌شود برای ایجاد حرارت کافی در تمام نقاط کامپوزیت، سرعت پاسخدهی تا رسیدن به کرنش مناسب نیز افزایش یابد. از طرفی با افزایش زمان سیکل تحریک، میزان افت وزن نمونه و خروج اتانول از ساختار تشدید می‌شود.

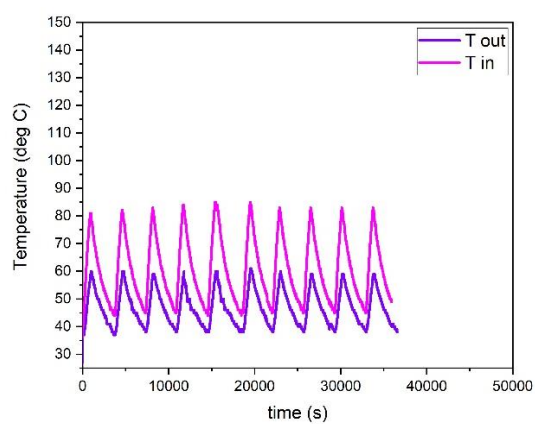
به منظور بررسی شیب حرارتی ایجاد شده در نمونه، سنسور دمایی در قسمت مرکزی و روی سطح نمونه قرار گرفته و طی سیکل تحریک و استراحت نمونه‌ها، در مغز و سطح نمونه‌ها دما ثبت شده است. نمودارهای دمایی نمونه‌ها در شکل ۲ آمده است. اختلاف دمای زیادی بین سطح و مغز نمونه CPCM0.5 به دلیل تمرکز حرارتی در قسمت مرکزی نمونه و عدم انتقال حرارت صحیح در حجم نمونه است. به گونه‌ای که دمای مغز نمونه تا رسیدن به کرنش ۲۲٪، به دمای بیشتر از ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و دمای سطح نمونه در حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد است. در واقع وجود تفاوت در نرخ انتقال حرارت به نقاط مختلف نمونه CPCM0.5 باعث ایجاد شیب حرارتی بین سطح و مرکز نمونه می‌شود. با توجه به عملکرد نمونه وابسته به انتقال حرارت در تمامی نقاط آن است، دمای مرکز نمونه تا حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای جوش اتانول (۷۸ درجه سانتی‌گراد) افزایش یافته و در نتیجه میزان افت وزن در اثر افزایش دمای نمونه تشدید می‌شود. محرک سیلیکونی با افزایش دما بیشتر از دمای جوش اتانول دچار شوک حرارتی شده و اگرچه در سیکل‌های کاری اولیه روند پاسخدهی سریع تری از خود نشان می‌دهد، اما طی سیکل‌های متعدد و در روز دوم و روز سوم کاری (هر روز کاری شامل ۱۰ سیکل تحریک و استراحت است) نمونه دچار افت عملکرد بیشتری شده و کاهش وزن قابل توجهی در نمونه مشاهده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که روند عملکردی قطعه دچار تغییرات بیشتری به سایر نمونه‌ها است.

اما در نمونه CPCM0.8 و CPCM1 که نمودارهای دمای آن‌ها در شکل (ب) ۲ و (ج) ۲ آمده است، تفاوت در دمای مغز و سطح نمونه کاهش یافته و حداکثر دمای مرکز نمونه تا حدود دمای جوش اتانول افزایش یافته است. کاهش میزان اختلاف دمای مرکز و سطح نمونه به معنی ایجاد شرایط یکنواخت در انتقال حرارت از منبع حرارتی (سیم پیچ) به نواحی مختلف کامپوزیت است که باعث بهبود عملکرد نمونه در سیکل‌های کاری متعدد و کاهش میزان عیوب در ریزساختار خواهد شد. از مقایسه بین نمودارهای دمای مرکز و سطح سه نمونه می‌توان مشاهده کرد که در نمونه CPCM1 کمترین میزان اختلاف دمای مرکز و سطح نمونه وجود دارد. نکته مهم دیگر آن که در نمونه CPCM0.5 تغییر شکل نمونه معطوف به بخش مرکزی بوده اما با افزایش قطر سیم‌پیچ، سطح نمونه‌ها افزایش دمایی را در طی سیکل کاری حس می‌کنند که نشان دهنده اثر سطح در ایجاد کرنش نمونه می‌باشد.

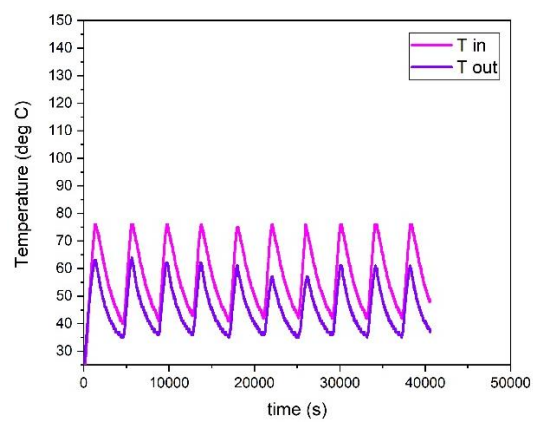
میزان اختلاف دمای مغز و سطح سه نمونه CPCM0.5، CPCM0.8 و CPCM1 به ترتیب برابر با میانگین دمایی ۸۵، ۲۵ و ۲۱ درجه سانتی‌گراد طی ۳۰ سیکل کاری ثبت شده است.



(الف)



(ب)

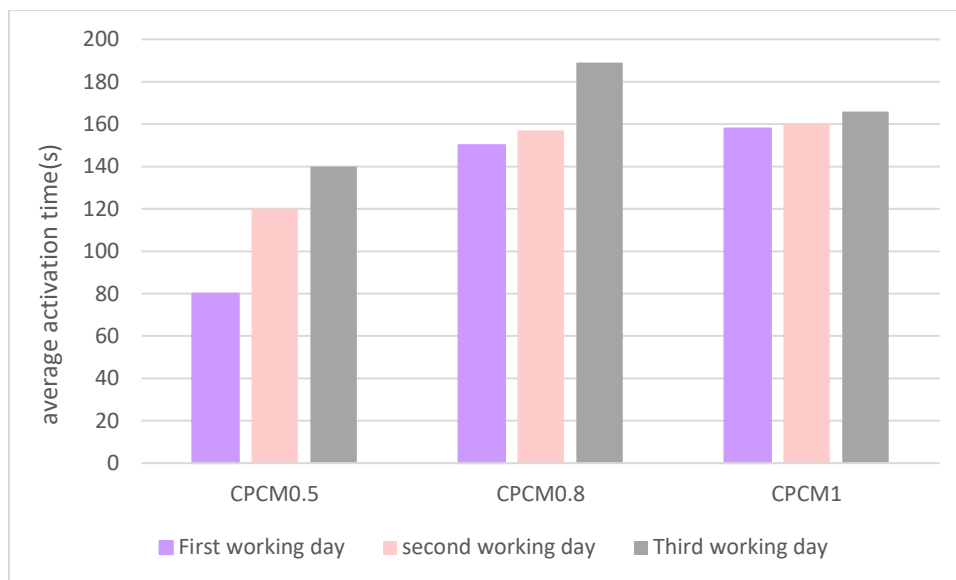


(ج)

شکل ۲) نمودارهای دمای مرکز و سطح نمونه کامپوزیتی طی ده سیکل تحریک و استراحت (روز کاری دوم) الف: نمونه CPCM0.5 ب) نمونه CPCM0.8 ج) نمونه CPCM1.

۲-۵- آنالیز عملکردی

با توجه به اینکه طول عمر محرک نرم ساخته شده در این پژوهش تحت تاثیر عواملی از جمله دما، مدت زمان اعمال توان به نمونه و یکنواختی انتقال حرارت در تمام نقاط کامپوزیت است؛ بنابراین توصیف رفتار این نمونه ها تابعی از عوامل محیطی و ساختاری می باشد. در نتیجه لازم است برای انتخاب بهترین نمونه از نظر عملکرد، عواملی مانند زمان تحریک، شیب افت وزن طی روزهای کاری متعدد، یکنواختی ریزساختار و میزان عیوب بعد از سیکل های کاری متعدد و میزان یکنواختی توزیع حرارت مورد بررسی قرار گیرد. در نمودار شکل ۳ میانگین زمان تحریک سه نمونه برای هر روز کاری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود روند پاسخدهی نمونه CPCM1 یکنواخت بوده و تفاوت چندانی در زمان پاسخدهی این نمونه در سه روز کاری مشاهده نمی شود. ولی نمونه CPCM0.5 در روز اول در میانگین زمانی ۸۰ ثانیه و در روز سوم در زمانی حدود ۱۰۷۵ برابر زمان روز اول (۱۴۰ ثانیه) به جابجایی مطلوب رسیده است و در واقع در این نمونه روند یکنواختی در پاسخدهی طی سیکل های کاری متعدد مشاهده نمی شود. علت این موضوع وجود شوک حرارتی در مغز نمونه است که در طی سیکل های اول که نمونه اشباع از اتانول است، به سرعت به کرنش مطلوب رسیده ولی در طی سیکل های کاری بیشتر، نمونه قابلیت عملکرد سریع خود را به دلیل ایجاد عیوب ریزساختاری و افت میزان اتانول موجود در ساختار از دست می دهد.



شکل ۳) میانگین زمان تحریک سه نمونه طی سه روز کاری اول، دوم و سوم.

در نمودار شکل ۴ میزان اتانول باقیمانده در ساختار قابل مشاهده است. نمونه CPCM0.5 پس از پایان دوره کاری میزان عملکرد مطلوب و افت وزن کمی داشته ولی در دوره کاری دوم و سوم میزان اتانول باقیمانده در ساختار با سایر نمونه ها برابری می کند، در واقع با وجود اینکه این نمونه پس از روز کاری اول مقدار بیشتری اتانول در ساختار داشته اما از نظر میانگین زمان عملکرد و سرعت پاسخدهی تفاوت زیادی با نمونه CPCM1 ندارد و برعکس آن نمونه CPCM1 به دلیل اینکه شرایط مطلوب تری از نظر منبع حرارتی دارد، در هر سه دوره کاری عملکردی یکنواخت از خود نشان می دهد و طی تمام سیکل های کاری با وجود اینکه میزان اتانول باقیمانده در ساختار مقدار کمی کمتر از نمونه CPCM0.5 است ولی از نظر زمان پاسخگویی شرایطی مشابه در هر سه روز کاری نشان می دهد. ضمن اینکه به سبب تجربه دماهای پایین تر در مغز نمونه CPCM1 چگالی و ابعاد عیوب نسبت به نمونه CPCM0.5 کمتر خواهد بود.

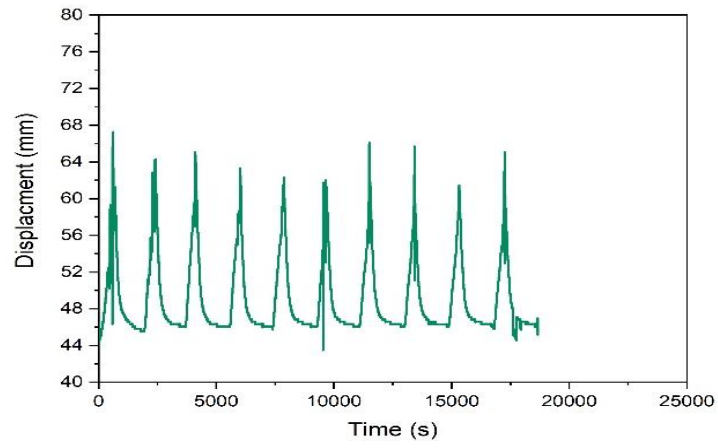
از آنجایی که برای بررسی و پیش بینی عملکرد یک ربات نرم لازم است ربات به طور قابل اطمینانی به عملکرد مورد نیاز پاسخ دهد و در مواجهه با شرایط مد نظر بتواند رفتار مورد انتظار را نشان دهد، لذا یکنواختی عملکرد ربات طی سیکل‌های کاری متعدد بسیار حائز اهمیت است.

اگرچه در مواردی که نیاز به پاسخگویی و عملکرد محدود وجود دارد، یعنی تعداد سیکل کاری کمی از نمونه مورد انتظار است، می‌توان از رباتی با شرایط نمونه CPCM0.5 استفاده کرد اما باید در نظر داشت که تخریب ساختاری در چنین حالتی شدید است و نمی‌توان بر عملکرد قابل انطباق با شرایط تعریف شده در سیکل‌های کاری با تعداد زیاد، از این نمونه انتظار داشت.

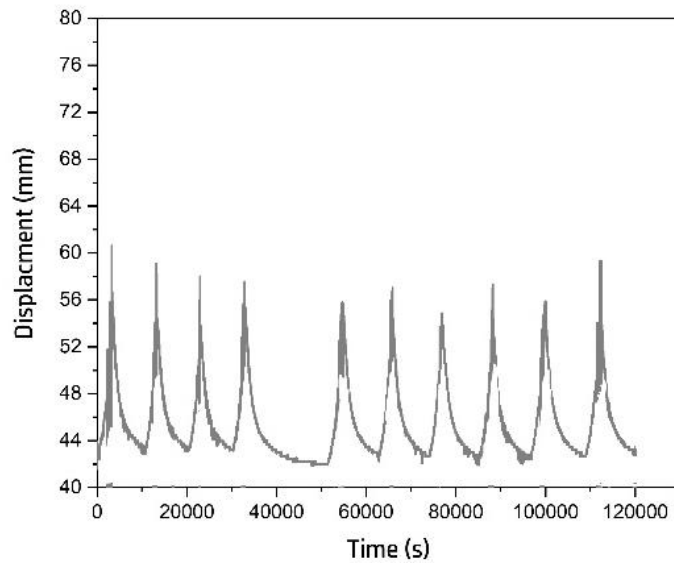
میزان جابه‌جایی در نظر گرفته شده برای این سه نمونه مقدار ۲۲٪ طول اولیه در نظر گرفته شده است. نمودارهای جابه‌جایی بر حسب زمان برای سه نمونه در روز کاری سوم در شکل ۵ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود افت عملکردی در سومین روز کاری برای هیچ یک از نمونه‌ها ثبت نشده است و مقدار ۲۲٪ جابه‌جایی تا سیکل آخر برای تمامی نمونه‌ها وجود دارد. بنابراین میزان جابه‌جایی ۲۲٪ برای هر سه نمونه به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شده و میزان افت وزن، تخریب ساختار و سایر پارامترها برای نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴) درصد اتانول باقیمانده نمونه CPCM0.5 ، CPCM0.8 و CPCM1 طی سه روز کاری.



(الف)



(ب)



(ج) نمونه CPCM1.

در این پژوهش ربات سیلیکونی با ماده تغییر فاز دهنده اتانول ساخته شد. تاثیر منبع حرارتی و یکنواختی حرارت تولید شده در ساختار بر سرعت عملکرد، طول عمر ربات، عیوب ریزساختاری و میزان کرنش ایجاد شده در زمان مشخص مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که مقدار بهینه نسبت حجمی از ساختار که در داخل سیم پیچ قرار گرفته به حجم کل نمونه برابر ۳۴.۹٪ (نمونه CPCM1) می باشد. حداکثر اختلاف دمای بین مغز و سطح نمونه CPCM1 برابر ۲۰ درجه سانتی گراد نشان دهنده یکنواختی توزیع حرارت است. شیب افت وزن نمونه CPCM1 کمتر از سایر نمونه ها است که نشان دهنده عملکرد یکنواخت نمونه طی سی سیکل کاری می باشد.

- [١] Kladovasilakis, N., et al., *A Novel Soft Robotic Exoskeleton System for Hand Rehabilitation and Assistance Purposes*. Applied Sciences, 2023. **13**(1): p. 553.
- [٢] Wang, Y., et al., *Dielectric elastomer actuators for artificial muscles: A comprehensive review of soft robot explorations*. Resources Chemicals and Materials, 2022. **1**(3): p. 308-324.
- [٣] Rusu, D.-M., et al., *Soft Robotics: A Systematic Review and Bibliometric Analysis*. Micromachines, 2023. **14**(2): p. 359.
- [٤] Hawkes, E.W., C. Majidi, and M.T. Tolley, *Hard questions for soft robotics*. Science robotics, 2021. **6**(53): p. eabg6049.
- [٥] Mwasi, E., *Ethanol phase transition driven silicone actuator for soft robotic prosthetic arm*. 2020.
- [٦] Nasser, R., et al., *Programmable nanocomposites of cellulose nanocrystals and zwitterionic hydrogels for soft robotics*. Nature Communications, 2023. **14**(1): p. 6108.
- [٧] Lalegani Dezaki, M., et al., *Adaptive reversible composite-based shape memory alloy soft actuators*. Sensors and Actuators A: Physical, 2022. **345**: p. 113779.
- [٨] Li, X., et al., *Soft actuators based on liquid–vapor phase change composites*. Soft Robotics, 2021. **8**(3): p. 251-261.
- [٩] Liu, C., et al., *High water content electrically driven artificial muscles with large and stable deformation for soft robots*. Chemical Engineering Journal, 2023. **472**: p. 144700.
- [١٠] Vougioukas, S., *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*. Agricultural robotics, 2019. **2**(1): p. 365-392.
- [١١] Kang, D.J., et al., *Programmable soft robotics based on nano-textured thermo-responsive actuators*. Nanoscale, 2019. **11**(4): p. 2065-2070.
- [١٢] Chellattoan, R., A. Yudhanto, and G. Lubineau, *Low-voltage-driven large-amplitude soft actuators based on phase transition*. Soft robotics, 2020. **7**(6): p. 688-699.
- [١٣] Ma, H., et al., *Recent advances for phase-transition materials for actuators*. Journal of Applied Physics, 2020. **128**(١٠)
- [١٤] Decroly, G., et al., *Optimization of Phase-Change Material–Elastomer Composite and Integration in Kirigami-Inspired Voxel-Based Actuators*. Frontiers in Robotics and AI, 2021. **8**.
- [١٥] Miriyev, A., G. Caires, and H. Lipson, *Functional properties of silicone/ethanol soft-actuator composites*. Materials & Design, 2018. **145**: p. 232-242.
- [١٦] Krpovic, S., K. Dam-Johansen, and A.L. Skov, *Importance of Mullins effect in commercial silicone elastomer formulations for soft robotics*. Journal of Applied Polymer Science, 2021. **138**(19): p. 50380.
- [١٧] Kaplon, T. and A. Milecki, *Research on the Use of Silicon-Ethanol Composite in Actuators*. Materials, 2022. **15**(23): p. 8570.
- [١٨] Kaplon, T. and A. Milecki, *Linear Drive Based on Silicon/Ethanol Composite*. Polymers, 2021 . : (١٦) ١٣ p. 2668.
- [١٩] Kang, D. J., et al. (2019). "Programmable soft robotics based on nano-textured thermo-responsive actuators." Nanoscale **11**(4): 2065-2070.