

## ساخت ربات نرم خزنده با استفاده از کامپوزیت زمینه سیلیکون تقویت شده با سیال تغییر فازدهنده

امیرحسین ابراهیمی<sup>۱</sup>، حجت زامیاد<sup>۲</sup>، جواد صفایی<sup>۳</sup>، سمانه صاحبیان<sup>۴</sup>

s.saheblian@um.ac.ir

### چکیده

ساخت ربات‌های نرم با استفاده از سیستم‌های تحریکی نظیر عملگرهای پنوماتیکی، هیدرولیکی، الکتریکی، مغناطیسی و حافظه‌دار به علت وابستگی سیستم‌های مذکور به اجزایی نظیر لوله، دریچه، موتور، پمپ و کمپرسور عملکرد آن‌ها را به عنوان اجزایی مستقل محدود ساخته است. در این پژوهش بوسیله‌ی ساخت کامپوزیتی پلیمری با سیال تغییر فازدهنده به عنوان فاز ثانویه، رباتی نرم و پاسخگو به تحریک خارجی ساخته شد. عملگر ساخته شده قادر به جابه‌جایی به میزان ۲۵٪ (کشش عضلات طبیعی)، با صرف توانی معادل با ۱۰ W می‌باشد. دمای سطحی ماهیچه مصنوعی در طول چرخه‌های متعدد کاری در بازه دمایی ۵۵ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده که بیانگر عملکرد مطلوب ماده تحت شرایط تحریکی می‌باشد.

کلمات کلیدی: ربات نرم، ماهیچه مصنوعی، سیال تغییر فازدهنده، سیلیکون، اتانول

- 
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
  - ۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
  - ۳- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
  - ۴- گروه مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، محققین با الهام از علم زیست‌شناسی درصدد دستیابی به حرکات طبیعی با استفاده از تحریک خارجی قابل کنترل مطابق با سیستم‌های بیولوژیکی بوده‌اند [۱-۳]. در این میان ربات‌های نرم، ساخته شده از مواد نرم انعطاف‌پذیر و کشسان، امکان شبیه‌سازی حرکات مختلف جانوران زنده مانند راه رفتن، خزیدن، جهیدن و گرفتن را فراهم می‌آورند. ربات‌های نرم در حالت تحریک شده، قابلیت ایجاد تغییر شکل‌هایی قابل توجه و بزرگ با اعمال جریان و ولتاژی پایین می‌باشند [۴-۵]. علی‌رغم ربات‌های سخت که دارای ساختاری پیچیده و گران قیمت می‌باشند، استفاده از ربات‌های نرم جهت تقلید حرکات طبیعی موجودات زنده، به عنوان روش و تکنولوژی کارآمد و موثر بیان می‌شود [۶].

یکی از چالش‌های پیش‌روی محققین در حوزه ساخت ربات‌های نرم، عدم وجود روشی کارآمد جهت طراحی ربات‌هایی نرم با قابلیت ایجاد کرنش‌های بالا می‌باشد [۷-۸]. مشکل اساسی در دستیابی به این هدف، توسعه موادی برخوردار از قابلیت تحریک درونی/ذاتی، عملکرد حسی و تشخیصی و همچنین قابلیت کنترل کامپیوتری می‌باشد. علاوه بر این، طراحی ساز و کاری جهت اعمال موثر تحریک خارجی، به عنوان عامل کلیدی دیگر در ساخت ربات و عملگرهای نرم می‌باشد [۹-۱۱]. از جمله عملگرهای نرم رایج می‌توان به عملگرهای مبتنی بر تغییرات فشار هوا و یا سیال (عملگرهای پنوماتیکی) اشاره کرد. وابستگی عملگرهای پنوماتیکی به تجهیزاتی نظیر کمپرسور و دستگاه‌های تنظیم‌کننده فشار، موجب عدم کوچک‌سازی این عملگرها و استفاده از آن‌ها به عنوان اجزائی مستقل شده است [۱۲-۱۵]. از دیگر عملگرهای نرم می‌توان به عملگرهای مبتنی بر پلیمرهای الکترواکتیو و همچنین پلیمرها و آلیاژهای حافظه‌دار اشاره کرد. محدودیت عملگرهای مذکور در ایجاد کرنش‌های بالا و نیازمندی به ولتاژهای بالا جهت تحریک موجب عدم کارایی و استفاده بهینه از این دسته مواد شده است.

در این میان، مواد با قابلیت تغییر فاز (PCM<sup>3</sup>) جایگزین‌هایی مطلوب در برابر عملگرهای الکترومکانیکی می‌باشند [۱۶]. مواد تغییر فازدهنده با قابلیت ایجاد نیروی مکانیکی بواسطه انبساط سریع در دمای انتقال خود، قابلیت ایجاد کرنش و تغییر شکل‌های دلخواه را فراهم می‌آورند [۱۷-۱۹]. از جمله ابتدایی‌ترین مواد تغییر فازدهنده می‌توان به پارافین اشاره کرد که در سال ۱۹۳۰ از خواص ترمومکانیکی آن در دریچه‌های خودتنظیم شونده گلخانه‌ها استفاده شد [۲۰]. با استفاده از PCM‌ها و روش‌های مبتنی بر تغییر فاز برگشت‌پذیر از مایع به بخار، ایجاد کرنش‌های قابل توجه و بسیار بزرگ قابل دستیابی می‌باشد. هرچند که تاکنون سیستم‌های حاوی مکانیزم مذکور با مشکل کنترل و انبساط فاز مایع مواجه بوده‌اند [۲۱-۲۵]. از جمله پیشنهادات ارائه شده جهت محصورسازی فاز PCM، می‌توان به استفاده از فیلم‌های نازک فلزی، داربست‌های کربنی و جداره‌های پلیمری اشاره کرد.

<sup>3</sup>phase change material

در این پژوهش، ماهیچه‌ای نرم و قدرتمند بواسطه ترکیبی از خواص الاستیکی زمینه پلیمری و نیروی حاصل از سیال تغییر فازدهنده در دمای انتقال خود(تغییر فاز از مایع به بخار) ساخته شد. در ادامه عملکرد ربات نرم، ساخته شده از زمینه سیلیکون الاستومر و فاز ثانویه اتانول، توزیع شده به شکل میکرو حباب‌هایی درون زمینه مورد ارزیابی و مشخصه‌یابی قرار گرفت.

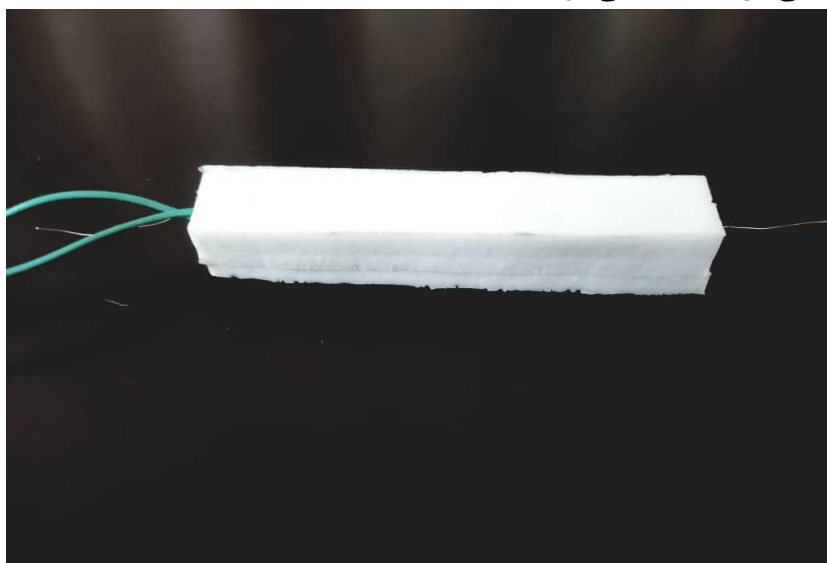
## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- مواد

این پژوهش از سیلیکون الاستومر دو جزئی(سیلیکون و هاردنر) که ماده‌ای سازگار زیست سازگار و دارای کاربری آسان می‌باشد، به عنوان زمینه پلیمری استفاده شد. هم‌چنین از اتانول (<math>99/5\%</math>) با نقطه جوش  $78/32^{\circ}\text{C}$ ، به عنوان فاز پاسخگو به گرما استفاده شد. جهت تحریک الکتریکی بواسطه ایجاد گرمای ژول، از سیم مقاومتی نیکل-کروم به قطر  $0/25\text{mm}$  استفاده شد.

### ۲-۲- آماده‌سازی کامپوزیت

کامپوزیت مورد نظر به کمک اختلاط مکانیکی سیلیکون با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ از اتانول ساخته شد. پس از انجام اختلاط، هاردنر با نسبت وزنی ۱ به ۵۰ به مخلوط اضافه گردید. در این مرحله، ماده جهت قالب‌گیری در شکل مورد نظر آماده و قالب‌گیری درون قالب از جنس پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) به ابعاد  $90 \times 15 \times 15\text{mm}$  با تعبیه سیم از جنس Ni-Cr به شکل ماریپیچ درون آن انجام شد. پس از قالب‌گیری، پخت نمونه در دمای اتاق و به مدت ۴ ساعت صورت گرفت. در شکل ۱، نمایی از ماهیچه پخت شده به همراه سیم‌پیچ و سنسور داخلی آن مشاهده می‌شود.



شکل ۱- نمایی از ماهیچه پخت شده به همراه سیم‌پیچ و سنسور داخلی آن.

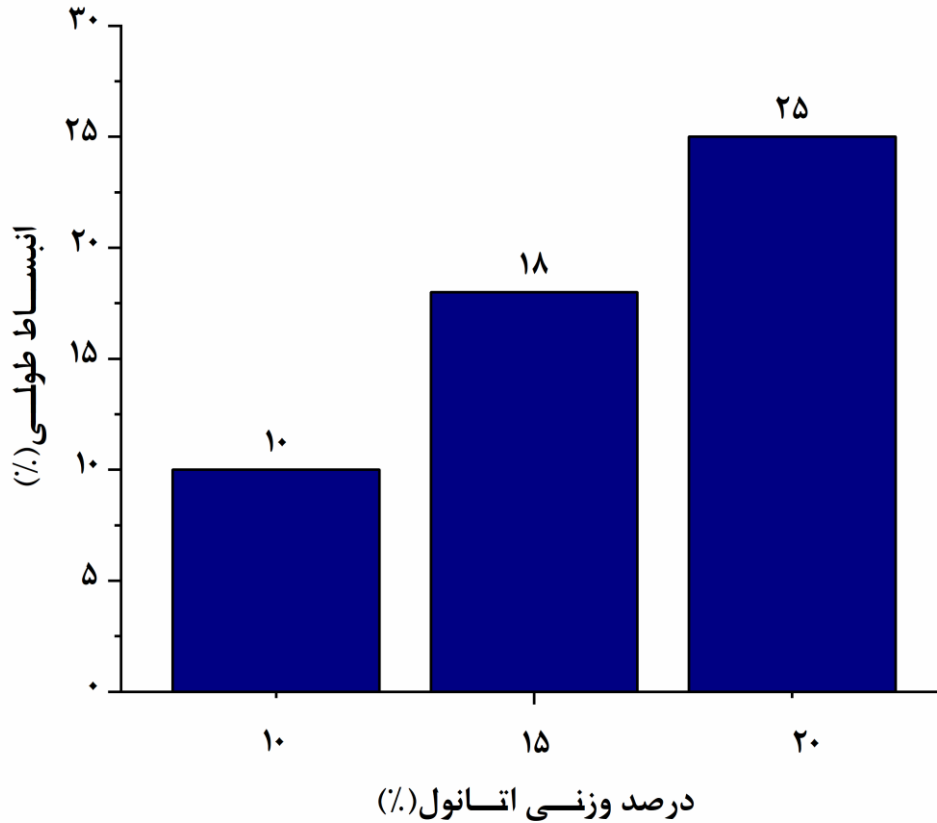
## ۲-۲- مشخصه‌یابی

ریزساختار عملگر نرم کامپوزیتی سیلیکون-تانول، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)، تحت ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۰Kv انجام شد. لازم به ذکر است که نمونه قبل از انجام آزمون، بصورت برودتی شکسته و سطح شکست با کند و پاش طلا، پوشش‌دهی شد. به منظور تحریک الکتریکی ماهیچه‌های نرم بواسطه ایجاد گرمای ژول از منبع تغذیه آنالوگ مدل R&S NGPV (Rohde & Schwarz) استفاده شد. در هر سیکل کاری عملگر تحت توان ۱۰ وات تحریک شد. جهت بررسی تغییرات دمای مغزی ماهیچه در حین سیکل‌های تحریکی، از حسگر تشخیص دما مدل LM35 (ژاپن) استفاده گردید.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- انتخاب بهینه درصد وزنی فاز فعال

عامل کلیدی در سنجش مقدار بهینه درصد وزنی فاز فعال درون کامپوزیت، حداکثر طول انبساطی دست‌یافتنی متناظر با آن درصد وزنی در یک سیکل تحریکی معین است. برای این منظور سه نمونه کامپوزیتی با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ از اتانول، با تعبیه ۷۵cm سیم از جنس نیکل-کروم درون آن‌ها تهیه گردید. تمامی نمونه‌ها تحت شرایط تحریک الکتریکی مشابه (۱۰W) قرار گرفتند. شکل ۲ بیانگر تغییرات طول، متناظر با هر یک از درصدهای وزنی مذکور می‌باشد.



شکل ۲- نمودار ستونی تغییرات طول بر حسب درصد سیال تغییر فازدهنده.

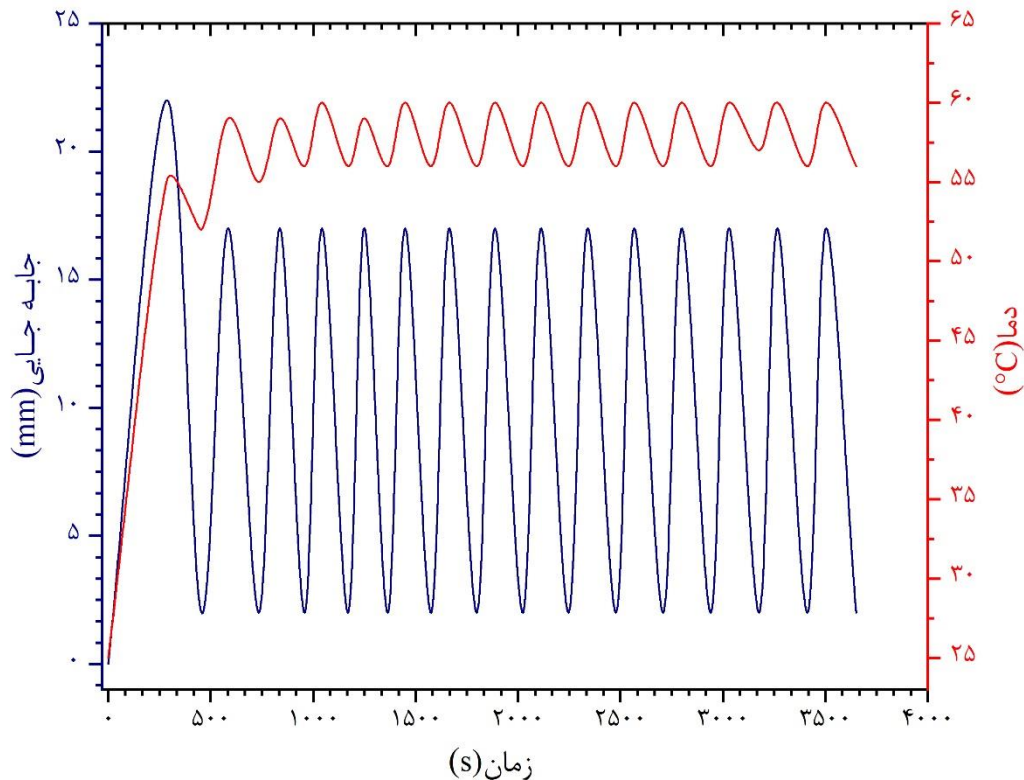
جهت انتخاب درصد بهینه اتانول به منظور برآورده کردن هدف پژوهش مبنی بر شبیه‌سازی رفتار حرکتی ماهیچه‌های طبیعی، دست‌یابی به مقدار کرنش انبساطی معادل با حداقل ۲۰٪ (کرنش کششی عضلانی غالب در حیوانات) به عنوان عامل کلیدی در نظر گرفته شد [۱۹]. مطابق با نتایج بدست آمده، درصد وزنی معادل با ۱۵٪ اتانول به عنوان مقدار بهینه سیال تغییر فاز دهنده درون ماهیچه انتخاب گردید.

### ۲-۳- ارزیابی عملکرد حرکتی و پاسخ دمایی عملگر نرم

در ماهیچه مصنوعی ساخته شده، تغییر فاز مایع به گاز اتانول به عنوان عاملی جهت انبساط زمینه سیلیکونی معرفی می‌گردد. جهت بررسی تغییرات دمایی و جابه‌جایی ماهیچه مصنوعی، کامپوزیتی با ۱۵٪ وزنی اتانول ساخته و تحت تحریک الکتریکی (۱۰ وات) قرار گرفت. کامپوزیت در اثر گرمای ژول از دمای اتاق (۲۵°C) شروع به گرم شدن نموده و این گرمایش تا نقطه جوش اتانول (T= ۷۸/۳۲°C) ادامه پیدا کرد. با قرارگیری سنسور تشخیص دما بر روی سطح ماهیچه، تغییرات دمایی آن در بازه T=۲۵°C تا T=۵۹°C ثبت شد (شکل ۳). با رسیدن دمای سطح به حدود ۵۵°C انبساط ماده به علت جوشش اتانول با سرعت بیشتری



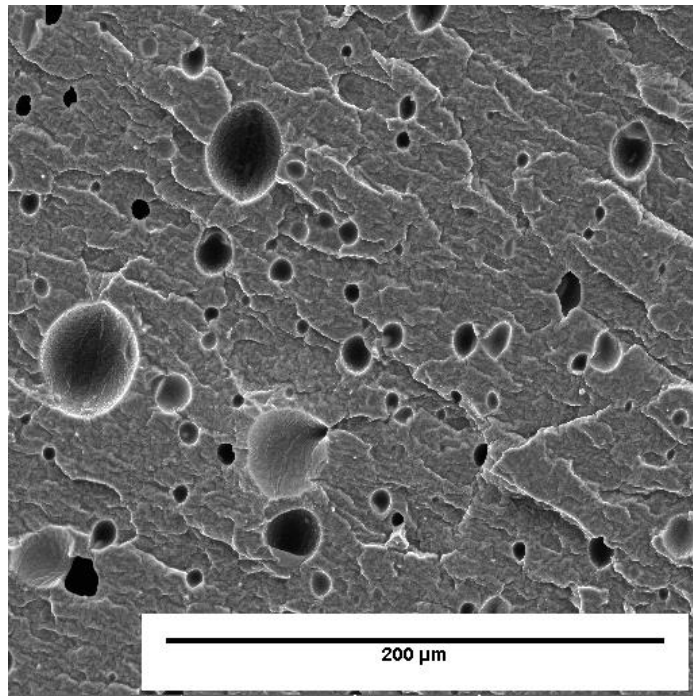
اتفاق افتاده و مقدار جابه‌جایی ثبت شده متناظر با آن حدوداً  $22\text{mm}$  ( $25\%$ ) ثبت شد (شکل ۳). با ثابت نگه‌داشتن متغیر جابه‌جایی معادل با  $25\%$  طول اولیه، تغییرات دمایی و رفتار حرکتی ماهیچه در سیکل‌های کاری مختلف تحت آزمون قرار گرفت. در سیکل اول کاری با توجه به هم‌دما بودن ماهیچه با محیط پیرامون ( $25^\circ\text{C}$ )، برای رسیدن به دمای  $78/32^\circ\text{C}$  و ایجاد جابه‌جایی تعیین شده، مدت زمان تقریبی معادل با  $250\text{s}$  سپری شد. با توجه به انباشت انرژی حرارتی داخل ماده، دومین سیکل تحریکی از دمایی معادل با  $52^\circ\text{C}$  شروع شد، که منجر به کاهش طول مدت تحریک به زمان حدودی  $100\text{s}$  جهت رسیدن به مقدار جابه‌جایی یکسان گردید. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با رسیدن کامپوزیت به پایداری دمایی، بیشینه و کمینه دمای سطحی معادل با  $25\%$  و  $1/185\%$  جابه‌جایی به ترتیب برابر با  $59^\circ\text{C}$  و  $56^\circ\text{C}$  می‌باشد. لازم به ذکر است که ماهیچه مصنوعی در اثر انبساط حرارتی، دچار تغییر شکل پلاستیک شده به طوری که مقدار کرنش مذکور در پایان هر سیکل برابر با  $1/66\text{mm}$  معادل با  $1/185\%$  طول کل ماهیچه می‌باشد. با توجه به توزیع همگن و یکنواخت اتانول در بسته‌ها و کپسول‌هایی با اندازه میکرونی در زمینه سیلیکونی، هدر رفت اتانول با گذشت زمان و در اثر سیکل‌های متعدد کاری به حداقل مقدار خود رسیده که مویدی بر این ادعا قابلیت ماهیچه در رسیدن به مقدار جابه‌جایی تعیین شده در تمامی سیکل‌ها در مدت زمان تحریک مشابه ( $100\text{s}$ ) می‌باشد.



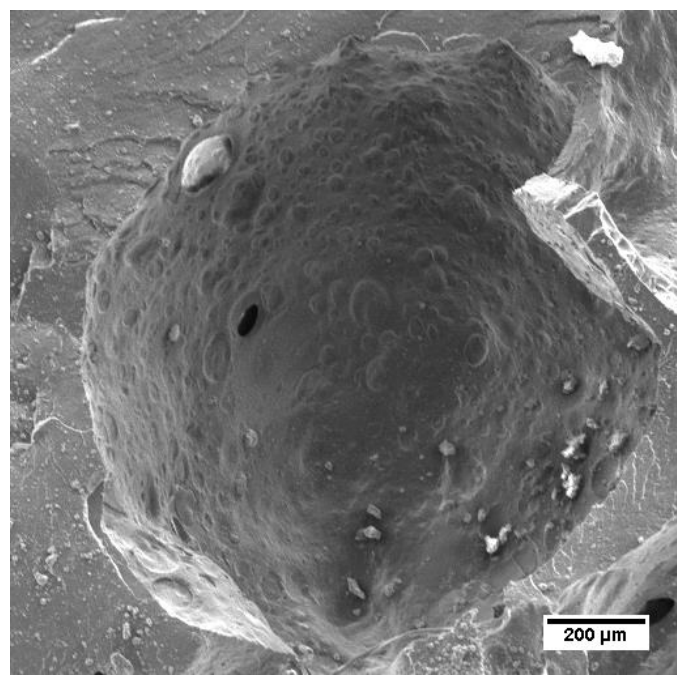
شکل ۳- تغییرات دما و جابه‌جایی ماهیچه مصنوعی در طول سیکل‌های تحریکی مختلف بر حسب زمان.

### ۳-۳- بررسی ریزساختار کامپوزیت

جهت بررسی ریزساختاری، کامپوزیت با ۱۵٪ وزنی اتانول ساخته و پس از طی ۱۵ سیکل تحریکی، ساختار میکروسکوپی آن مورد تحقیق قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اتانول پس از اختلاط، درون زمینه سیلیکونی در داخل بسته و میکروکپسول‌هایی به بزرگی میکرون (الف-۴) و حفرات هوایی با ابعاد بزرگتر (ب-۴) توزیع شده است. در ساختار میکروسکوپی کامپوزیت، حفرات هوایی به ابعاد ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر در کنار میکروکپسول‌های ریز با میانگین قطر ۲۰ میکرومتر مشاهده شد. جالب توجه است که حفرات کوچک با اندازه میکرونی، حتی بر روی سطوح داخلی حفرات هوایی بزرگ نیز مشاهده می‌شوند (ب-۴). لازم به ذکر است علی‌رغم برخورداری عملگر نرم از ریزساختاری پیچیده و چروک، هیچگونه میکرو ترکی داخل زمینه پلیمری مشاهده نمی‌گردد.



الف





ب

شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی FESEM کامپوزیت با ۱۵٪ وزنی اتانول پس از اعمال سیکل‌های تحریکی متعدد. الف- میکروکپسول‌های میکرونی، ب- حفرات هوایی.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش کامپوزیت پلیمری متشکل از سیلیکون الاستومر به عنوان زمینه و اتانول به عنوان سیال تغییر فازدهنده ساخته شد. کامپوزیت حاصله به عنوان ربات نرم معرفی و خواص آن مورد ارزیابی قرار گرفت. درصد وزنی معادل با ۱۵٪ از سیال تغییر فازدهنده به عنوان مقدار بهینه فاز ثانویه جهت عملکرد مطلوب ماهیچه در نظر گرفته شد. طبق مشاهدات انجام شده بر روی ساختار میکروسکوپی ماهیچه به کمک میکروسکوپ FESEM، مشخص شد که اتانول در سراسر زمینه سیلیکونی و داخل بسته‌هایی کروی شکل در اندازه میکرونی و همچنین داخل حباب‌های هوایی توزیع شده است. طبق داده‌های حاصله، با رسیدن دمای سطح به حدود  $55^{\circ}\text{C}$  انبساط ماده به علت جوشش اتانول با سرعت بیشتری صورت گرفته و حرکت ماده مشاهده شد. با رسیدن کامپوزیت به پایداری دمایی، حداکثر و حداقل دمای سطحی معادل با ۲۵٪ و ۱/۸۵٪ جابه‌جایی به ترتیب برابر با  $59^{\circ}\text{C}$  و  $56^{\circ}\text{C}$  ثبت شد.

#### ۵- مراجع

- 1- Trivedi, D., Rahn, C. D., Kier, W. M. & Walker, I. D. Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future research. *Appl. Bionics Biomech.* 5, 99–117 (2008).
- 2- Trimmer, B. Soft robots. *Curr. Biol.* 23, R639–R641 (2013).
- 3- Kim, S., Laschi, C. & Trimmer, B. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends Biotechnol.* 31, 287–294 (2013).
- 4- Laschi, C. & Cianchetti, M. Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2, 3 (2014).
- 5- Rus, D. & Tolley, M. T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature* 521, 467–475 (2015).
- 6- Verma MS, Ainla A, Yang D, et al. A soft tube-climbing robot. *Soft Robot* 2018;5:133–137.
- 7- Gu G, Zou J, Zhao R, et al. Soft wall-climbing robots. *Sci Robot* 2018;3:eaat2874.
- 8- Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, et al. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. *Sci Robot* 2018;3:ear7555.
- 9- Marchese AD, Katzschmann RK, Rus D. Whole arm planning for a soft and highly compliant 2D robotic manipulator. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, 2014:554–560.
- 10- Tolley MT, Shepherd RF, Mosadegh B, et al. A resilient, untethered soft robot. *Soft Robot* 2014;1:213–223.

- 11- F. Ilievski, A.D. Mazzeo, R.F. Shepherd, X. Chen, G.M. Whitesides, Soft Robotics for Chemists, *Angew. Chemie.* 123 (2011) 1930-1935.
- 12- J.C. Case, E.L. White, R.K. Kramer, Soft Material Characterization for Robotic ACCEPTED MANUSCRIPT Applications, *Soft Robot.* 2 (2015) 80-87.
- 13- D. Rus, M.T. Tolley, Design, fabrication and control of soft robots, *Nature.* 521 (2015) 467-475.
- 14- Wu J, Yuan C, Ding Z, et al. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. *Sci Rep* 2016;6:24224.
- 15- Jin B, Song H, Jiang R, et al. Programming a crystalline shape memory polymer network with thermo- and photo reversible bonds toward a single-component soft robot. *Sci Adv* 2018;4:eaa03865.
- 16- Do TN, Phan H, Nguyen TQ, et al. Miniature soft electromagnetic actuators for robotic applications. *Adv Funct Mater* 2018;28:1800244.
- 17- Hu W, Lum GZ, Mastrangeli M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion. *Nature* 2018; 554:81-85.
- 18- Hu W, Lum GZ, Mastrangeli M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion. *Nature* 2018; 554:81-85.
- 19- Sridar, S. et al. Hydro Muscle -a novel soft fluidic actuator. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE, 2016)*.
- 20- Mirfakhrai T, Madden JDW, Baughman RH. Polymer artificial muscles. *Mater Today* 2007;10:30-38
- 21- Yang Y, Terentjev EM, Wei Y, et al. Solvent-assisted programming of flat polymer sheets into reconfigurable and self-healing 3D structures. *Nat Commun* 2018;9: 1906.
- 22- Morin, S. A. et al. Camouflage and display for soft machines. *Science* 337, 828-832 (2012).
- 23- Kang DJ, An S, Yarin AL, et al. Programmable soft robotics based on nano-textured thermo-responsive actuators. *Nanoscale* 2019
- 24- An S, Kang DJ, Yarin AL. A blister-like soft nano-textured thermo-pneumatic actuator as an artificial muscle. *Nanoscale* 2018
- 25- Lipton, J. I., Angle, S., Banai, R. E., Peretz, E. & Lipson, H. Electrically actuated hydraulic solids. *Adv. Eng. Mater.* (2016).