



Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal

Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal

<http://masm.araku.ac.ir>

ISSN: 2783-4220



Fabrication a Nano Magnetic Slime and Its Applications

Mohammad Gohari ^{a*}, Mona Tahmasebi ^b, Abbas Pak ^c, Alireza Farhadi ^a

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

^b Department of Agricultural Engineering Research, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension, Organization (AREEO), Arak, Iran

^c Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Gohari M, Tahmasebi M, Pak A, Farhadian A. Fabrication and Evaluation Energy Harvesting based on Smart Triboelectric Material. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(3):398-412.

 <https://10.52547/masm.3.3.398>.

KEYWORDS

Nanomagnetic slime robot,
Elastomeric-metal hybrid robot,
Nano ferromagnetic,
Magnetic field,
Wearable sensor.

ABSTRACT

Miniature robots are being developed today and are used to monitor electrical equipment and medical applications such as drug delivery or minimal intervention. Polymeric robots presented for this purpose are compatible with the environment and have good performance, but they are not proper for narrow canals. A novel generation of flexible and soft robots has been created based on metallic fluids. Ultra-thin deformation and passage through narrow spaces make it possible to avoid damaging surrounding biological tissues. The efficiency of these robots also depends on the environment. Temporarily, hybrid robots based on elastomer-metal have been introduced, which are flexible like slime and have the ability to control stiffness with magnetic fields like magnetorheological fluid. In this article, the construction of a nano-magnetic slime robot is explained, and some of its physical and rheological properties are reported. Also, the applications of the proposed slime robot are investigated by experimental tests.

Extended Abstract

1. Introduction

Soft robotics is an impartially new sub-category of robotics, which combines conventional principles of robot design with studying fluids, Nanomaterials, soft polymers, and extra simply deformable matter [1-3]. At the center of several soft robotics platforms are adaptive materials that show excellent deformable shape or volume under different external situations, which are vital for generating mechanical motions [4-6]. They are non-invasive [2], adaptive [3], and easily available [6]. Thus, micro soft robots are a proper candidate for medical engineering [7,8], drug delivery [13,14], non-invasive surgery [15], etc.

Until now, most soft robots are made with elastomers and magnetic particles [27, 28]. Although they are flexible, they have limitations in shape deformation vs. external geometry [35, 36]. In contrast, ferrofluid or fluid-based robots show smooth motion [44, 45] while keeping their characteristic [50]. The current paper aims to present a novel microrobot based on polyvinyl alcohol gel contents nano called Magnetic Nano Slime Robot (MNSR). Some rheological properties of MNSR such as velocity speed in locomotion, viscosity, and its application as a motion sensor are described.

* Corresponding author. Tel.: +989125044137

E-mail address: moh-gohari@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.3.3.398>.

Received: October 02, 2023; Received in revised form: November 17, 2023; Accepted: December 20, 2023

© Author



2. Methodology and Results

Nano ferromagnetic (60%) and borax were added to PVA gel to reach MNSR. This process is shown in Fig.1. The stability of this gel is high because the covalence bands of the polymer are strong.

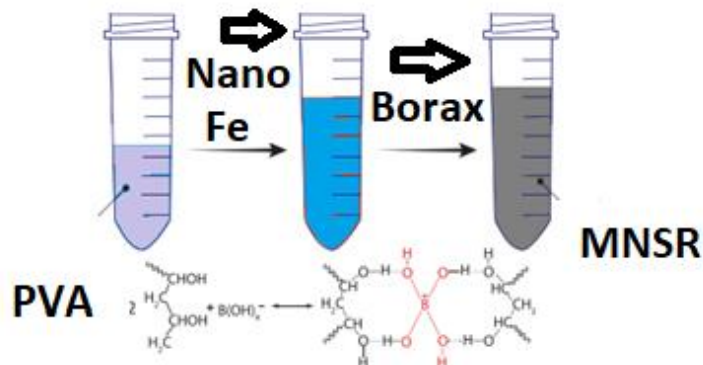


Figure 1. Composition of nano slime

The statical viscosity is measured by the required force of sliding plates including MNSR between two plates. The apparatus for this issue is exhibited in Fig. 2. The obtained viscosity was 0.091 Pas while the speed of the plate was 2cm/s, and the tension force was 0.47 N.

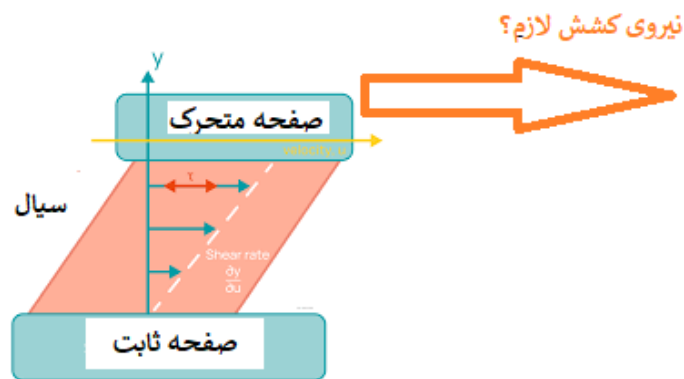


Figure 2. Viscosity measurement

Also, the diagram of Force-deformation was obtained for this product and shown in Fig. 3. When the magnetic field is available and when is not available Fig. 4 and 5 are reached, respectively. As can be seen, the viscosity and velocity of movement are adjustable and controllable by magnetic field.



Figure 3. Deformation and force measurement

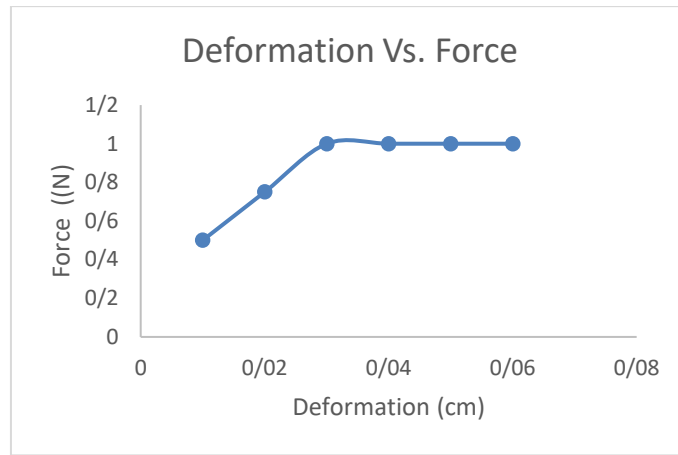


Figure 4. Force-Deformation without magnetic field

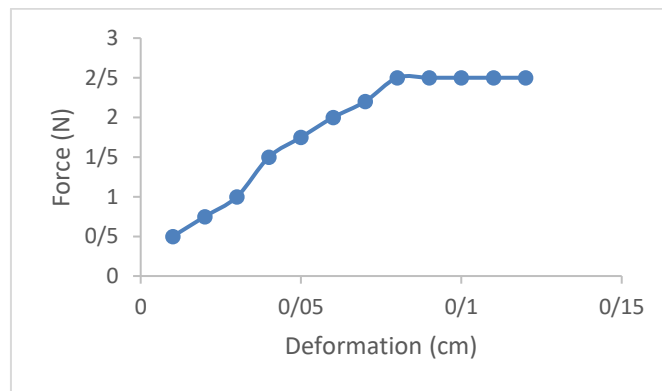


Figure 5. Force-Deformation with magnetic field

2.1. Velocity of yield point

In most nanorobots, the velocity of the locomotion yield point is important. Thus, by a magnetic with 1700 Gauss, nano slime is moved as Fig. 6, and the velocity of that has been recorded as 0.001 m/s.

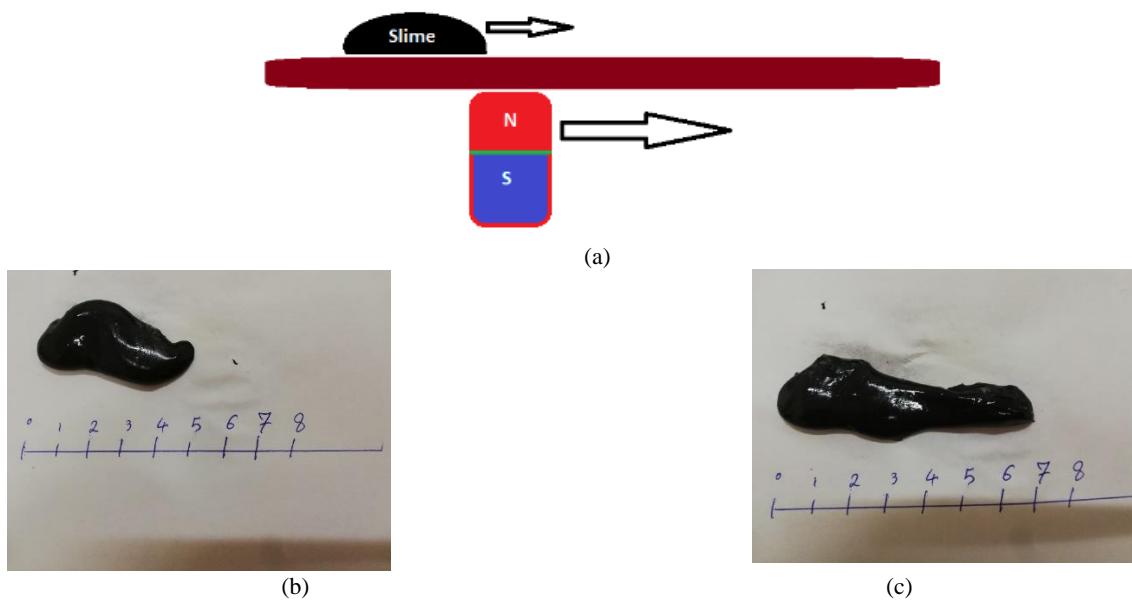


Figure 6. (a) movement of nano slime, (b) start point, (c) endpoint

2.2. Possibility of movement and activity

Furthermore, this nano slime composition can be used as a wearable sensor to measure human body movement. Fig.7 shows the resistance measurement of nano slime while it is covered on the hand. Thus, it can measure body activity and displacement of organs.



Figure 7. Measurement of body motions

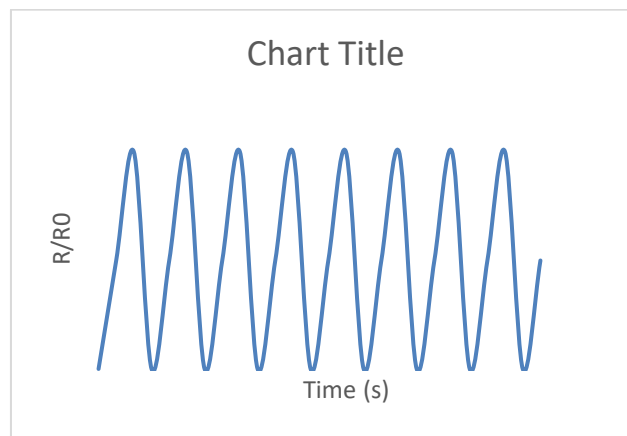


Figure 8. Resistance measurements

3. Conclusions

In this article, a reconfigurable multifunctional nanomagnetic slime is proposed, which is used to build robots that use spatio-temporal programmed external magnetism. Compared to existing elastomer-based soft robots, our approach allows for more deformation in this nanomagnetic slime. It achieves robots that are able to adapt to very limited conditions, such as the environment of passing through a narrow channel. The results of the experiments showed that compared to the existing metal liquid-based robots, the nanomagnetic slime robot can adapt to complex interface environments. Such as water or air, as well as the tests performed, it is revealed that the robot can reach the target location by changing shape and programmable behaviors such as looping and rotating operations and various other functions that have been demonstrated.

Also, the evaluation of the robot showed that it was possible to capture the object through rotation and spreading modes to remove foreign materials. In addition, the existence of electrical conductivity has also made it possible to establish a connection in faulty electronic circuits with the help of magnetic navigation. Electrical conduction has provided another possibility, and that is the use of this magnetic nano slime in monitoring systems based on electrical resistance measurement. This feature has made it possible to use this phenomenon for wearable equipment to monitor the human body in an adaptive way such as a motion sensor, while allowing for free movement and activity.



ساخت نمونه نانو اسلایم مغناطیسی و کاربردهای آن

محمد گهری^{الف*}، منا طهماسبی^ب، عباس پاک^ج، علیرضا فرهادی^د

^{الف} دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، moh-gohari@arakut.ac.ir

^ب استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران، tahmasebi.mona@gmail.com

^ج استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بو علی سینا، همدان، ایران، a.pak@basu.ac.ir

^د دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، amir1379@gmail.com

چکیده	واژگان کلیدی
ربات‌های مینیاتوری امروزه در حال توسعه هستند و برای پایش تجهیزات الکتریکی و امور پزشکی مانند دارورسانی و یا مداخله حداقلی استفاده می‌شوند. ربات‌های پلیمری که برای این منظور ارائه شده‌اند سازگاری با محیط و کارایی خوبی دارند اما امکان تغییر قطر محدودی دارند. نسل جدیدی از ربات‌های انعطاف پذیر و نرم به عرصه آمده‌اند که بر اساس سیال‌های فلزی کار می‌کنند. تغییر شکل فوق‌العاده باریک و عبور از فضاهای محدود این امکان را فراهم می‌کند که از آسیب رساندن به بافت‌های بیولوژیکی اطراف خودداری شود. این ربات‌ها نیز کارایی‌شان وابسته به محیط است. در این مقاله ربات‌های هیبریدی بر پایه الاستومر-فلز معرفی شده است که مانند اسلایم انعطاف دارند و مانند سیال مگنتورئولوژیک قابلیت کنترل سفتی با میدان مغناطیس دارند و ربات نانو اسلایم مغناطیسی نامیده شد. در این مقاله ساخت ربات اسلایم نانو مغناطیس توضیح داده شده است و مواردی از خواص فیزیکی و رئولوژیکی آن گزارش گردید و همچنین مواردی از کاربرد آن مانند حسگر حرکتی بدن انسان توسط آزمایش‌های تجربی بررسی شده است.	ربات اسلایم نانومغناطیس، ربات هیبریدی الاستومر-فلزی، نانوفرومگنتیک، میدان مغناطیس، حسگر پوشیدنی.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۶
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹

۱- مقدمه

ربات‌های مینیاتوری که به محرک‌های خارجی پاسخ می‌دهند دارای این مزیت هستند که کمتر تهاجمی [۱، ۲] هستند، تطابق پذیرند [۳، ۴]، و در دسترس بودن آن‌ها راحت‌تر است [۵، ۶]. به همین علت آن‌ها را به کاندیدهای هیجان‌انگیز برای کاربردهای مهندسی پزشکی [۷، ۸] و بیوسیستم تبدیل می‌کند [۸-۱۲] مانند تحویل هدفمند دارو [۱۳، ۱۴] جراحی کم تهاجمی [۱۵]، و پیوند سلولی [۱۶، ۱۷] به دلیل ایمنی میدان مغناطیسی خارجی انتخاب مناسب و امنی برای فعال کردن ربات‌های مقیاس کوچک است [۱۸، ۱۹]. علاوه بر آن، دقت و پاسخ سریع نیز مزیت این روش کنترل حرکت ربات است [۲۰-۲۲]. کنترل میدان مغناطیس نیز توانایی اجرای دستورات مختلف و پیچیده [۲۳، ۲۴] را با الگوریتم‌های متنوع فراهم می‌نماید [۲۵، ۲۶].

تا اینجای کار بیشتر ربات‌های نرم بدن^۱ که با محرک مغناطیسی کنترل می‌شوند از الاستومرهای نرم مخلوط شده با ذرات مغناطیسی سخت ساخته شده‌اند [۲۷، ۲۸]. چنین ربات‌های نرم مبتنی بر الاستومر قابلیت انجام چند حالت حرکتی [۲۹، ۳۰]،

^۱ Soft body robots

سازگاری با محیط‌های رابط پیچیده [۳۱، ۳۲]، و فضاهای محدود را برای عمل‌های دخالت رباتیک فراهم می‌کند [۳۳-۳۵]. با این حال، عملکرد ربات‌های نرم مبتنی بر الاستومر به دلیل شکل‌های از پیش طراحی شده آن‌ها محدود شده است [۳۶، ۳۵] و نمی‌توان آن‌ها را مجدداً در موقعیت مورد نظر پیکربندی کرد [۳۷، ۳۸]. علاوه بر این، چون بر پایه الاستومر نرم است روبات‌ها قابلیت تغییر شکل محدودی دارند و نمی‌توانند از فضاهایی که به‌طور قابل توجهی کوچک‌تر از ابعاد آن‌ها عبور کنند [۳۹، ۴۰]. هر چند خاصیت تطابق پذیری با بدن انسان دارند اما تطابق پذیری هندسی ندارند [۴۱، ۴۲] و در بعضی شرایط شیمیایی نیز این تطابق از بین می‌رود [۴۳].

در مقابل، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که روبات‌های کوچک مبتنی بر سیال، مانند ربات‌های پلیمری همان‌طور که بر اساس فلز مایع^۲ یا فروسیال^۳ است [۴۴-۴۶]، ملایم‌تر و نرم‌تر رفتار می‌کنند. ربات‌های نرم مبتنی بر سیالات تغییر شکل پذیری بهتری نشان می‌دهند [۴۷، ۴۸] و نسبت به ربات‌های نرم مبتنی بر الاستومر به دلیل ویژگی‌های جریان سیال خود که به آن‌ها اجازه می‌دهد به راحتی از موانع عبور کنند [۴۹، ۵۰]. تغییر شکل فوق‌العاده باریک و عبور از فضاهای محدود این امکان را فراهم می‌کند که از آسیب رساندن به بافت‌های بیولوژیکی اطراف خودداری شود [۵۱، ۵۲]. به‌عنوان مثال، با ساخت یک آرایه الکترومغناطیس، یک ربات نرم مبتنی بر فروسیال هوشمند قابل تغییر شکل و تعاملی که می‌تواند از کانال‌های باریک با قطر ۱.۵ میلی‌متر عبور کند و عملکردهای مختلفی را انجام دهد ساخته شد [۵۳]. علاوه بر این، محققان همچنین کنترل مدارهای الکتریکی و پمپاژ سیال را با استفاده از روبات‌های نرم مبتنی بر فلز مایع دریافته‌اند [۵۴].

با این حال، ربات‌های مبتنی بر فلز فروسیال و مایع به مقدار زیادی وابسته به محیط‌های عملیاتی هستند؛ به‌عنوان مثال، فروسیال‌های مبتنی بر روغن به سطوح آب‌دوست احاطه شده توسط محلول‌های مبتنی بر آب برای حفظ شکل قطرات کروی نیاز دارند تا بدون چسبیدن به بستر^۴ [۵۳] عمل کنند. در حالی که فلزات مایع برای حفظ شکل به محلول‌های قلیایی یا اسیدی نیاز دارند تا اینکه قطرات کروی بدون چسبیدن به بستر حرکت کنند [۵۵، ۵۶]. بنابراین لازم است که ویژگی‌های آن را با هم ترکیب کنیم تا تغییر شکل‌های بزرگ ربات‌های مبتنی بر مایع با خاصیت سازگاری ربات‌های مبتنی بر الاستومر برای ایجاد ربات‌های نرم جدید ایجاد گردد.

برای پاسخ این تقاضا، ربات‌های اسلایم^۵ نانو مغناطیسی چندمنظوره با تغییر شکل‌ها و سازگاری بزرگ پیشنهاد می‌شود. در مقاله حاضر ساخت یک اسلایم نانو مغناطیسی و مکانیسم اساسی تغییر شکل آن ارائه می‌گردد. در مقایسه با روبات‌های نرم مبتنی بر الاستومر، ربات اسلایم پیشنهادی تغییر شکل بهتری دارد، به‌عنوان مثال، از طریق یک لوله باریک عبور می‌کند و محیط‌های پیچ‌وخم پیچیده را طی مسیر می‌کند. علاوه بر این، در مقایسه با ربات‌های نرم مبتنی بر مایع موجود، ربات اسلایم سازگاری محیطی بیشتری دارد و امکان حرکت نه‌تنها در سیالات دو فاز بلکه در هوا و حتی در سطوح مختلف مانند سطوح هیدروژلی^۶، فلزی و پلاستیکی را داراست. همچنین نشان داده خواهد شد که این ربات چندین عملکرد قابل تنظیم مجدد، مانند گرفتن و تحویل اشیاء از طریق حالت پیچش و پیچیدن و انتقال مواد مضر را داراست که می‌تواند آن را برای ساخت ربات‌های زیستی در کشاورزی [۵۷] و پزشکی مناسب کند. علاوه بر این، ربات اسلایم نانو مغناطیس توانایی خود ترمیمی و هدایت الکتریسیته دارد و اجازه می‌دهد به‌عنوان یک وسیله الکتریکی استفاده شود، به‌عنوان یک سنسور فشار مقاومتی و یا ارتعاش سنج برای نظارت بر حرکت انسان [۵۸] و یا به‌عنوان یک کلید کنترل مدار بکار رود [۵۹]. بنابراین، ربات مبتنی بر سیال غیر نیوتنی پیشنهادی دارای خواص تغییر شکل بزرگ، پیکربندی مجدد، خود ترمیمی و رسانایی در دستگاه‌های پوشیدنی و کاربردهای زیست پزشکی است. بومی‌سازی این نوع از ربات و اندازه‌گیری برخی پارامترهای رئولوژیکی آن به‌عنوان دامنه نوآوری این تحقیق در نظر گرفته شده است. در ادامه مراحل تولید، ارزیابی خواص و کاربرد آن توضیح داده خواهد شد.

^۲ fluid-based robots

^۳ ferrofluid

^۴ Substrate

^۵ slime

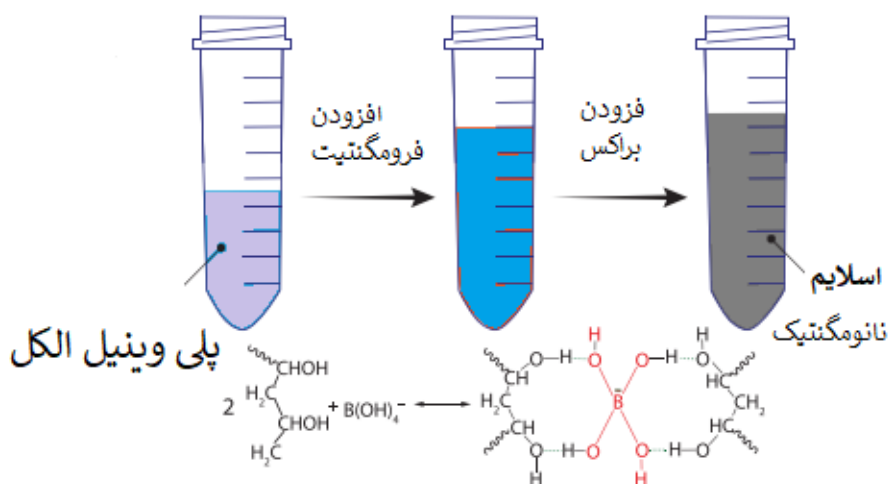
^۶ Hydrogel

۲- مواد و روش‌ها (آماده‌سازی اسلایم)

طرح آماده‌سازی اسلایم نانو مغناطیسی در شکل ۱ نشان داده شده است. ذرات نانو فرومگنتیت با عیار ۶۰ درصد و بوراکس^۷ به‌طور متوالی به محلول پلی وینیل الکل^۸ (PVA) اضافه شدند تا اسلایم نانو مغناطیسی به دست آمد. در شکل ۱ واکنش‌های حیاتی لازم برای تشکیل اسلایم نانو مغناطیسی نشان داده شده است که عمدتاً از طریق برهمکنش یون‌های بورات^۹ چهار عاملی با گروه -OH تشکیل می‌شود. پلی وینیل الکل با بوراکس واکنش شیمیایی می‌دهد و یک شبکه پلیمری متقابل ایجاد می‌کند. زنجیره‌های پلیمری منفرد توسط پیوندهای کووالانسی تشکیل می‌شوند که پیوندهای قوی هستند. در ساخت اسلایم، زنجیره‌های پلیمری منفرد توسط پیوندهای هیدروژنی کم قدرت به هم متصل می‌شوند. شبکه پلیمری حاصل از رشته‌های پلی وینیل الکل تشکیل شده است که توسط مولکول‌های بورات کنار هم قرار گرفته‌اند. روشن است که این اتصال عرضی به دلیل سهولت جریان و جدا شدن اسلایم سست است. باین‌حال، حتی اگر این اتصال عرضی سست است، خواص پلیمر حاصل را تغییر می‌دهد.

PVA که در آن یون‌های بورات چهار ظرفیتی از طریق آن تولید می‌شوند هیدرولیز بوراکس^{۱۰} رخ می‌دهد و یک اسلایم مغناطیسی تشکیل می‌گردد که محتوی بیش از ۹۰ درصد وزنی آب دارد، به این معنی است که اساساً یک هیدروژل متخلخل است. ساختار متخلخل برای انبساط پذیری و پاسخ سریع اسلایم مغناطیسی مطلوب است. علاوه بر این، سمیت سلولی برای اسلایم بررسی شد. غلظت تا ۴۰۰ میکروگرم در میلی‌لیتر اسلایم غیر مغناطیسی برای سلول‌های NIH 3T3 غیر سمی است که نشان‌دهنده زیست سازگاری عالی آن است. باین‌حال، ذرات فرومگنتیک سمی هستند، بنابراین باید زیر ۳۰ درصد افزوده گردند.

اسلایم مغناطیسی دارای قابلیت تغییر شکل فعال و غیرفعال است و با تغییر شکل خارجی محیط اطراف می‌توان شکل آن را تغییر داد. همچنین با میدان مغناطیسی می‌توان آن را با استفاده از خواص رئولوژیکی با مرزهای محیطی سازگار کرد. خواص رئولوژیکی و مغناطیسی اسلایم با استفاده از آزمایش اندازه‌گیری نیروی لازم برای لغزش بین دو صفحه اندازه‌گیری شد (شکل ۲). با این آزمایش مقدار گرانشی استاتیکی ۰/۰۹۱ پاسکال ثانیه اندازه‌گیری شد. ابعاد صفحه لغزشی ۶ سانتی‌متر در ۶ سانتی‌متر بود و ضخامت لایه اسلایم نیز ۵ میلی‌متر ثبت شد. نیروی برشی لازم برای رسیدن صفحه به سرعت ۲ سانتی‌متر بر ثانیه ۰/۴۷ نیوتن توسط نیروسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد.



شکل ۱ مراحل آماده‌سازی اسلایم نانو مغناطیسی

⁷ Borax

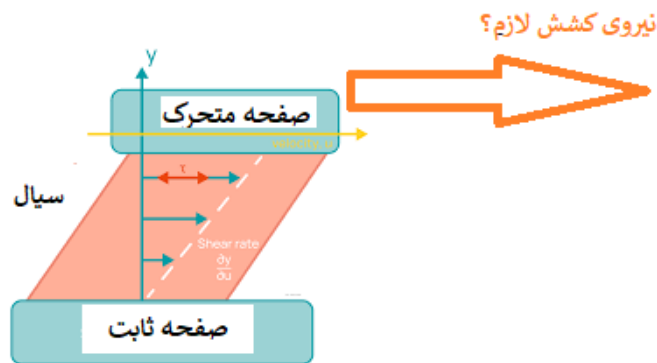
⁸ Poly vinyl alcohol

⁹ Borat Ions

¹⁰ Hydrolyze of Borat Ions



(الف)



(ب)

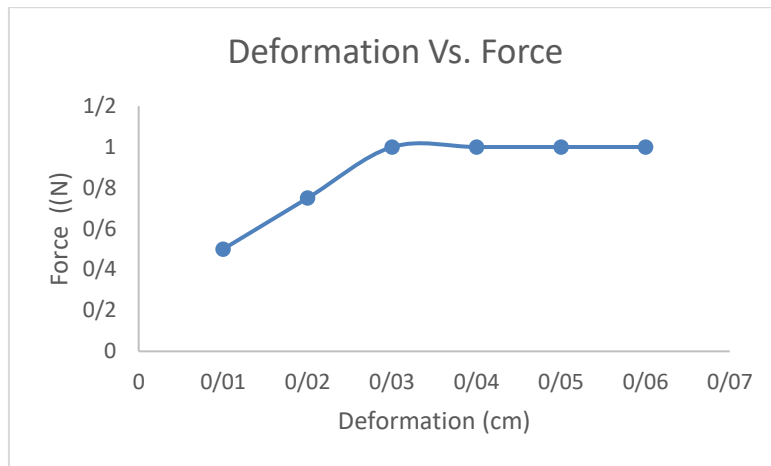
شکل ۲ اندازه‌گیری تنش برشی لایه اسلایم توسط صفحه لغزشی جهت محاسبه گرانروی استاتیکی، (الف) نیروسنج استفاده شده، (ب) روش آزمون اندازه‌گیری صفحه متحرک و محاسبه تنش برشی

۲-۱- تحلیل نمودار نیرو-جابجایی

همچنین نمودار نیرو-جابجایی برای اسلایم مغناطیسی مورد نظر توسط نیروسنج اندازه‌گیری و ترسیم شد. این نمودار در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این سیال رفتار غیر نیوتنی دارد و پس از رسیدن نیروی کشش به مقدار ۱ نیوتن تغییر شکل یا همان جابجایی بدون تغییر نیرو به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. در مرحله بعد، آزمایش کشش با آهنربا نئودیم^{۱۱} با بزرگی ۱۷۰۰ گوس انجام پذیرفت (شکل ۴). نمودار در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در حضور نیروی مغناطیس نیروی بیشتری برای رسیدن به حد جاری‌سازی اسلایم لازم است به‌طوری‌که نیروی ثابت ۲/۵ برابر حالت بدون مغناطیس است.

اعمال میدان مغناطیسی خواص مکانیکی اسلایم مغناطیسی را به دلیل نیروهای دوقطبی- دوقطبی مغناطیسی افزایش می‌دهد. ویسکوالاستیسیته وابسته به میدان مغناطیسی عمدتاً به برهمکنش بین ذرات مجاور نسبت داده می‌شود. مغناطیسی شدن در اسلایم فعل‌وانفعالات زنجیره پلیمری را متراکم می‌کند و ساختار را سفت تر می‌کند. اثر مغناطیسی باعث می‌شود اسلایم‌های مغناطیسی با اعمال میدان، سفتی و گرانروی قابل تنظیم از خود نشان دهند؛ بنابراین با یک میدان مغناطیسی بنابراین می‌توان سفتی را کنترل کرد.

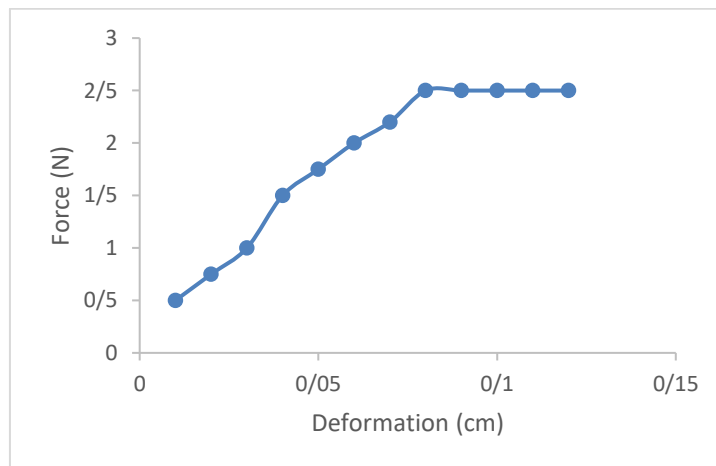
¹¹ Neodymium



شکل ۳ نمودار نیرو-جابجایی در اسلایم نانو مغناطیس (محتوی ۳۵ درصد نانو فرومگنتیک)



شکل ۴ آزمایش نیرو-جابجایی با آهنربای ۱۷۰۰ گوس

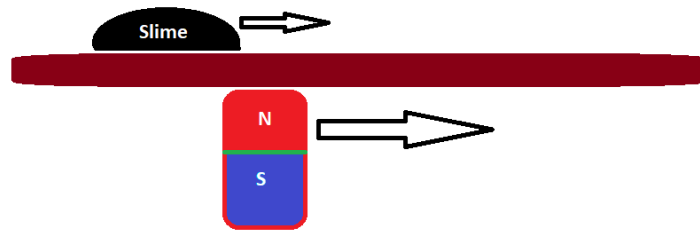


شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی اسلایم نانو مغناطیس با کشش مغناطیس

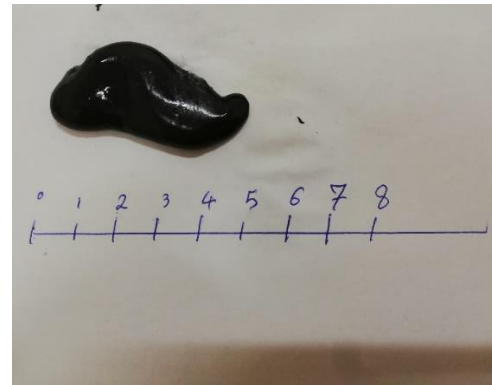
۲-۲- تحلیل سرعت جاری شدن

برای بررسی سرعت جاری شدن و کنترل حرکت به صورت فعال از آهنربای ۱۷۰۰ گوسی استفاده شد (شکل ۶- الف). همان طور که در شکل ۶- ب نشان داده شده است، اسلایم توسط میدان مغناطیس به حرکت درآمد. برای رسیدن به طول ۵ سانتی متر، زمان لازم ۵۰ ثانیه ثبت شد و برای رسیدن به طول ۷ سانتی متر این زمان به عدد ۸۰ ثانیه رسید؛ یعنی سرعت

متوسط حرکت با میدان مغناطیس ۰/۰۰۱ متر بر ثانیه است.



(ب)

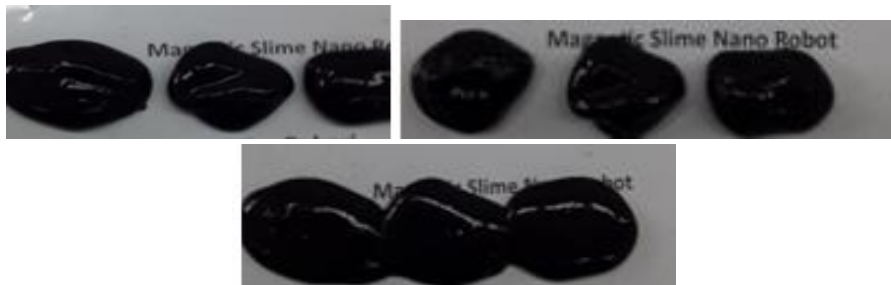


(الف)

شکل ۶ اندازه‌گیری سرعت حرکت توسط میدان مغناطیس

۳-۲- امکان اتصال المان‌های مجزا

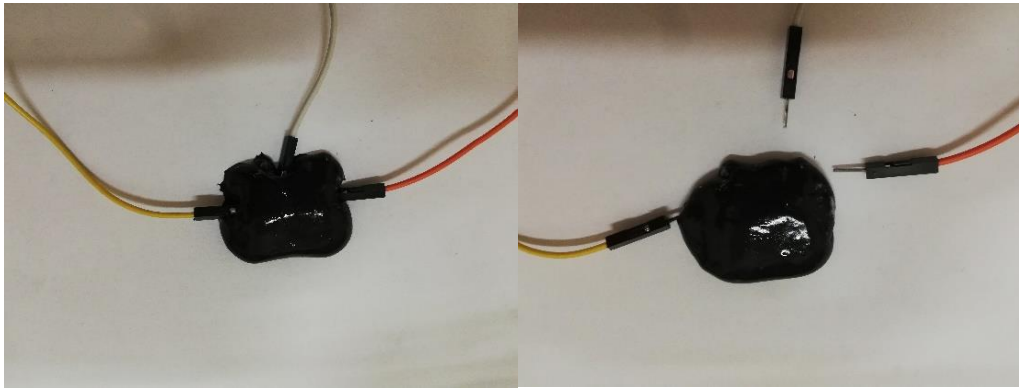
یکی از خواصی که برای اسلایم مغناطیسی نانو می‌توان ذکر کرد اتصال مجدد بخش‌های گسیخته شده است. همان‌طور که در شکل ۷ می‌توان دید با میدان مغناطیس امکان اتصال و اختلاط مجدد تعداد بخش‌های جدا وجود دارد.



شکل ۷ مراحل زمانی اتصال بخش‌های جدا شده اسلایم نانو مغناطیس با کمک میدان مغناطیس

۴-۲- امکان برقراری اتصال رسانا و جابجایی قطعات

یکی از کاربردهایی که اسلایم نانو مغناطیس می‌تواند داشته باشد برقراری اتصال رسانا بین چند هادی منقطع شده است. از آنجایی که این اسلایم رساناست می‌تواند با حرکت کردن و در بر گرفتن سیم‌های رابط گسیخته دوباره اتصالات را برقرار نماید. این امر می‌تواند به صورت کنترل از راه دور و توسط میدان مغناطیسی برای تعمیر سامانه‌های دور از دسترس انجام گیرد. نمونه‌ای از این کاربرد در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸ اتصال رسانای سیم‌های منقطع توسط اسلایم نانو مغناطیسی با کمک میدان مغناطیسی

علاوه بر خاصیت ذکر شده در برقراری اتصال، امکان تغییر شکل ویسکوالاستیک کنترل شده این سیال غیر نیوتنی می‌تواند جابجایی اجسام خارجی در بدن انسان را فراهم کند. در شکل ۹ در برگرفتن یک پیچ و جابجایی آن توسط اسلایم نمایش داده شده است.



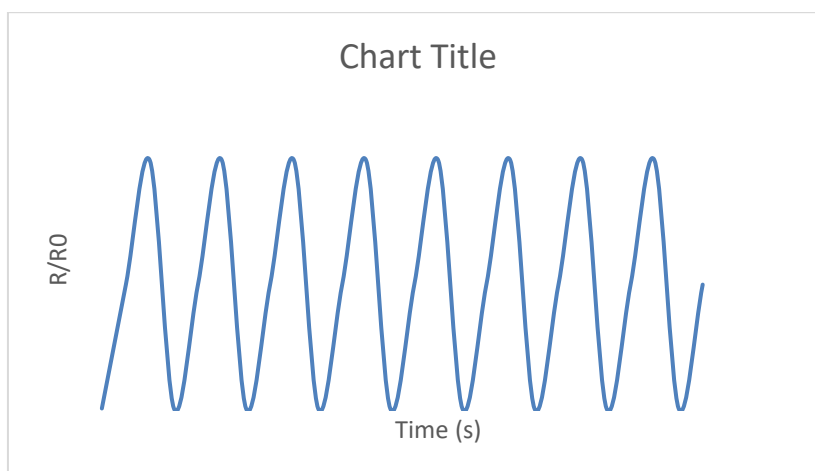
شکل ۹ در برگرفتن و جابجایی اجسام خارجی توسط اسلایم

۲-۵- امکان اندازه‌گیری جابجایی و حرکت

نانواسلایم مغناطیسی می‌تواند تغییرات فشار وارده و یا حرکت را به صورت مقاومت الکتریکی نشان دهد. از این رو به صورت یک حسگر بر روی مچ دست قرار داده شد تا بتواند باز و بسته شدن مچ را ثبت کند (شکل ۱۰). در نمودار ۱۱، نوسانات مقاومت الکتریکی در برابر حرکت انگشت دست نشان داده شده است. بدین ترتیب این ساختار بسیار منعطف و خود ترمیم شونده می‌تواند به عنوان حسگر پایش قابل پوشیدن برای انسان بکار رود.



شکل ۱۰ استفاده از نانو اسلایم برای ثبت و اندازه‌گیری حرکت در اندام انسانی



شکل ۱۱ تغییرات مقاومت الکتریکی در حرکت متناوب انگشت دست

۳- نتیجه گیری

در این مقاله اسلایم نانو مغناطیسی چند منظوره قابل تنظیم مجدد پیشنهاد شد که جهت ساخت ربات‌هایی که از مغناطیسی خارجی برنامه‌ریزی شده مکانی-زمانی استفاده می‌کنند کاربرد دارد. در مقایسه با ربات‌های نرم مبتنی بر الاستومر موجود، رویکرد ما امکان تغییر شکل بیشتر در این اسلایم نانو مغناطیسی است و رسیدن به ربات‌هایی که قادر به تطبیق با شرایط بسیار محدود هستند مانند محیط‌هایی عبور از یک کانال باریک. نتایج آزمایش‌ها نشان داد در مقایسه با ربات‌های مبتنی بر مایعات فلزی موجود، ربات اسلایم نانو مغناطیسی می‌تواند با محیط‌های رابط پیچیده سازگار شود؛ مانند آب یا هوا و همچنین تست‌های اجرا شده مشخص کرد ربات می‌تواند به مکان هدف با تغییر شکل و رفتارهای قابل برنامه‌ریزی مانند عملیات حلقه کردن و چرخش و سایر عملکردهای مختلفی که نشان داده شده است دست پیدا کند. برای این اسلایم نانو مغناطیسی تولید شده، حرکت و گرفتن شی مانند پیچ یا سیم با کمک ناوبری مغناطیسی در کانال‌های باریک بسیار کوچک‌تر از اندازه آن‌ها امکان‌پذیر است. همچنین ارزیابی ربات نشان داد که عملیات ضبط شی از طریق حالت‌های چرخش و پخش شدن برای خروج مواد خارجی امکان‌پذیر بود. به‌علاوه، وجود خاصیت رسانایی الکتریسیته نیز امکان برقراری اتصال در مدارهای الکترونیکی معیوب را با کمک ناوبری مغناطیسی فراهم کرده است. رسانش الکتریکی امکان دیگری نیز فراهم کرده است و آن استفاده از این نانو اسلایم مغناطیسی در سامانه‌های پایش بر پایه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی است. این ویژگی باعث شده است بتوان از این پدیده برای تجهیزات پوشیدنی پایش بدن انسان به‌صورت تطبیق‌پذیر مانند حسگر حرکتی استفاده کرد درحالی‌که امکان حرکت و فعالیت آزادانه را ایجاد می‌کند.

۴- مراجع

- [1] Bandari VK, Nan Y, Karnaushenko D, Hong Y, Sun B, Strigow F, et al. A flexible microsystem capable of controlled motion and actuation by wireless power transfer. *Nature Electronics*. 2020;3:172-80.
- [2] Zhao Y, Xuan C, Qian X, Alsaid Y, Hua M, Jin L, et al. Soft phototactic swimmer based on self-sustained hydrogel oscillator. *Science Robotics*. 2019;4:eaax7112.
- [3] Qian X, Zhao Y, Alsaid Y, Wang X, Hua M, Galy T, et al. Artificial phototropism for omnidirectional tracking and harvesting of light. *Nature Nanotechnology*. 2019;14:1048-55.
- [4] Tang S, Zhang F, Gong H, Wei F, Zhuang J, Karshalev E, et al. Enzyme-powered Janus platelet cell robots for active and targeted drug delivery. *Science Robotics*. 2020;5:eaba6137.
- [5] Gao W, Sattayasamitsathit S, Manesh KM, Weihs D, Wang J. Magnetically Powered Flexible Metal Nanowire Motors. *Journal of the American Chemical Society*. 2010;132:14403-5.

- [6] Wang B, Chan KF, Yuan K, Wang Q, Xia X, Yang L, et al. Endoscopy-assisted magnetic navigation of biohybrid soft microrobots with rapid endoluminal delivery and imaging. *Science Robotics*. 2021;6:eabd2813.
- [7] Wang J, Gao W. Nano/Microscale Motors: Biomedical Opportunities and Challenges. *ACS Nano*. 2012;6:5745-51.
- [8] Fusco S, Sakar MS, Kennedy S, Peters C, Bottani R, Starsich F, et al. An Integrated Microbotic Platform for On-Demand, Targeted Therapeutic Interventions. *Advanced Materials*. 2014;26:952-7.
- [9] Peyer KE, Zhang L, Nelson BJ. Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications. *Nanoscale*. 2013;5:1259-72.
- [10] Li J, Esteban-Fernández De Ávila B, Gao W, Zhang L, Wang J. Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification. *Science Robotics*. 2017;2:eam6431.
- [11] Wang X, Qin XH, Hu C, Terzopoulou A, Chen XZ, Huang TY, et al. 3D Printed Enzymatically Biodegradable Soft Helical Microswimmers. *Advanced Functional Materials*. 2018;28:1804107.
- [12] Wang B, Kostarelos K, Nelson BJ, Zhang L. Trends in Micro-/Nanorobotics: Materials Development, Actuation, Localization, and System Integration for Biomedical Applications. *Advanced Materials*. 2021;33:2002047.
- [13] Sun M, Fan X, Meng X, Song J, Chen W, Sun L, et al. Magnetic biohybrid micromotors with high maneuverability for efficient drug loading and targeted drug delivery. *Nanoscale*. 2019;11:18382-92.
- [14] Wang Q, Chan KF, Schweizer K, Du X, Jin D, Yu SCH, et al. Ultrasound Doppler-guided real-time navigation of a magnetic microswarm for active endovascular delivery. *Science Advances*. 2021;7:eabe5914.
- [15] Leong TG, Randall CL, Benson BR, Bassik N, Stern GM, Gracias DH. Tetherless thermobiochemically actuated microgrippers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009;106:703-8.
- [16] Li J, Li X, Luo T, Wang R, Liu C, Chen S, et al. Development of a magnetic microrobot for carrying and delivering targeted cells. *Science Robotics*. 2018;3:eaat8829.
- [17] Jeon S, Kim S, Ha S, Lee S, Kim E, Kim SY, et al. Magnetically actuated microrobots as a platform for stem cell transplantation. *Science Robotics*. 2019;4:eaav4317.
- [18] Dong Y, Wang L, Xia N, Wang Y, Wang S, Yang Z, et al. Multi-stimuli-response programmable soft actuators with site-specific and anisotropic deformation behavior. *Nano Energy*. 2021;88:106254.
- [19] Yu J, Jin D, Chan K-F, Wang Q, Yuan K, Zhang L. Active generation and magnetic actuation of microrobotic swarms in bio-fluids. *Nature Communications*. 2019;10:5631.
- [20] Yu J, Wang B, Du X, Wang Q, Zhang L. Ultra-extensible ribbon-like magnetic microswarm. *Nature Communications*. 2018;9:3260.
- [21] Xie H, Fan X, Sun M, Lin Z, He Q, Sun L. Programmable Generation and Motion Control of a Snake-like Magnetic Microrobot Swarm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2019;24:902-12.
- [22] Law J, Wang X, Luo M, Xin L, Du X, Dou W, et al. Microrobotic swarms for selective embolization. *Science Advances*. 2022;8:eabm5752.
- [23] Sun M, Fan X, Tian C, Yang M, Sun L, Xie H. Swarming Microdroplets to a Dexterous Micromanipulator. *Advanced Functional Materials*. 2021;31:2011193.
- [24] Sun M, Liu Q, Fan X, Wang Y, Chen W, Tian C, et al. Autonomous Biohybrid Urchin-Like Microperforator for Intracellular Payload Delivery. *Small*. 2020;16:1906701.
- [25] Sun M, Chen W, Fan X, Tian C, Sun L, Xie H. Cooperative recyclable magnetic microsubmarines for oil and microplastics removal from water. *Applied Materials Today*. 2020;20:100682.

- [26] Hu W, Lum GZ, Mastrangeli M, Sitti M. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion. *Nature*. 2018;554:81-5.
- [27] Xu T, Zhang J, Salehizadeh M, Onaizah O, Diller E. Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions. *Science Robotics*. 2019;4:eaav4494.
- [28] Du X, Cui H, Xu T, Huang C, Wang Y, Zhao Q, et al. Reconfiguration, camouflage, and color-shifting for bioinspired adaptive hydrogel-based millirobots. *Advanced Functional Materials*. 2020;30:1909202.
- [29] Kuang X, Wu S, Ze Q, Yue L, Jin Y, Montgomery SM, et al. Magnetic Dynamic Polymers for Modular Assembling and Reconfigurable Morphing Architectures. *Advanced Materials*. 2021;33:2102113.
- [30] Wang T, Joo H-J, Song S, Hu W, Keplinger C, Sitti M. A versatile jellyfish-like robotic platform for effective underwater propulsion and manipulation. *Science Advances*. 2023;9:eadg0292.
- [31] Lu H, Zhang M, Yang Y, Huang Q, Fukuda T, Wang Z, et al. A bioinspired multilegged soft millirobot that functions in both dry and wet conditions. *Nature Communications*. 2018;9:3944.
- [32] Cheng Y, Chan KH, Wang XQ, Ding T, Li T, Zhang C, et al. A Fast Autonomous Healing Magnetic Elastomer for Instantly Recoverable, Modularly Programmable, and Thermorecyclable Soft Robots. *Advanced Functional Materials*. 2021;31:2101825.
- [33] Zhang J, Ren Z, Hu W, Soon RH, Yasa IC, Liu Z, et al. Voxellated three-dimensional miniature magnetic soft machines via multimaterial heterogeneous assembly. *Science Robotics*. 2021;6:eabf0112.
- [34] Kim Y, Parada GA, Liu S, Zhao X. Ferromagnetic soft continuum robots. *Science Robotics*. 2019;4:eaax7329.
- [35] Huang H-W, Sakar MS, Petruska AJ, Pané S, Nelson BJ. Soft micromachines with programmable motility and morphology. *Nature Communications*. 2016;7:12263.
- [36] Carlson JD, Jolly MR. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*. 2000;10:555-69.
- [37] Olabi AG, Grunwald A. Design and application of magneto-rheological fluid. *Materials & Design*. 2007;28:2658-64.
- [38] Kim J, Chung SE, Choi S-E, Lee H, Kim J, Kwon S. Programming magnetic anisotropy in polymeric microactuators. *Nature Materials*. 2011;10:747-52.
- [39] Zrínyi M, Barsi L, Büki A. Ferrogel: a new magneto-controlled elastic medium. *Polymer Gels and Networks*. 1997;5:415-27.
- [40] Schumacher CM, Herrmann IK, Bubenhofer SB, Gschwind S, Hirt AM, Beck-Schimmer B, et al. Quantitative recovery of magnetic nanoparticles from flowing blood: trace analysis and the role of magnetization. *Advanced Functional Materials*. 2013;23:4888-96.
- [41] Nguyen VQ, Ahmed AS, Ramanujan RV. Morphing Soft Magnetic Composites. *Advanced Materials*. 2012;24:4041-54.
- [42] Lum GZ, Ye Z, Dong X, Marvi H, Erin O, Hu W, et al. Shape-programmable magnetic soft matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016;113.
- [43] Kim Y, Yuk H, Zhao R, Chester SA, Zhao X. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials. *Nature*. 2018;558:274-9.
- [44] Čejková J, Banno T, Hanczyc MM, Štěpánek F. Droplets As Liquid Robots. *Artificial Life*. 2017;23:528-49.
- [45] Wang X, Guo R, Liu J. Liquid metal based soft robotics: materials, designs, and applications. *Advanced Materials Technologies*. 2019;4:1800549.

- [46] Li F, Shu J, Zhang L, Yang N, Xie J, Li X, et al. Liquid metal droplet robot. *Applied Materials Today*. 2020;19:100597.
- [47] Chen S, Wang H-Z, Zhao R-Q, Rao W, Liu J. Liquid metal composites. *Matter*. 2020;2:1446-80.
- [48] Zhang BW, Cao L, Tang C, Tan C, Cheng N, Lai WH, et al. Atomically dispersed dual-site cathode with a record high sulfur mass loading for high-performance room-temperature sodium-sulfur batteries. *Advanced Materials*. 2023;35:2206828.
- [49] Yu W, Lin H, Wang Y, He X, Chen N, Sun K, et al. A ferrobotic system for automated microfluidic logistics. *Science Robotics*. 2020;5:eaba4411.
- [50] Zhou M, Wu Z, Zhao Y, Yang Q, Ling W, Li Y, et al. Droplets as Carriers for Flexible Electronic Devices. *Advanced Science*. 2019;6:1901862.
- [51] Serwane F, Mongera A, Rowghanian P, Kealhofer DA, Lucio AA, Hockenbery ZM, et al. In vivo quantification of spatially varying mechanical properties in developing tissues. *Nature Methods*. 2017;14:181-6.
- [52] Mongera A, Rowghanian P, Gustafson HJ, Shelton E, Kealhofer DA, Carn EK, et al. A fluid-to-solid jamming transition underlies vertebrate body axis elongation. *Nature*. 2018;561:401-5.
- [53] Du X, Cui H, Xu T, Huang C, Wang Y, Zhao Q, et al. Reconfiguration, camouflage, and color-shifting for bioinspired adaptive hydrogel-based millirobots. *Advanced Functional Materials*. 2020;30:1909202.
- [54] Kim S, Moon H, Kwon H, Lee G, Yu D, Choi J, et al. Organic Vapor-Jet Printing with Reduced Heat Transfer for Fabrication of Flexible Organic Devices. *Advanced Materials Technologies*. 2019;4:1800332.
- [55] Li F, Kuang S, Li X, Shu J, Li W, Tang SY, et al. Magnetically- and Electrically-Controllable Functional Liquid Metal Droplets. *Advanced Materials Technologies*. 2019;4:1800694.
- [56] Li X, Li S, Lu Y, Liu M, Li F, Yang H, et al. Programmable digital liquid metal droplets in reconfigurable magnetic fields. *ACS applied materials & interfaces*. 2020;12:37670-9.
- [57] Tahmasebi M, Gohari M, Emami A. An Autonomous Pesticide Sprayer Robot with a Color-based Vision System. *International Journal of Robotics and Control Systems*. 2022;2:115-23.
- [58] Gohari M, Abd Rahman R, Raja RI, Tahmasebi M. Bus seat suspension modification for pregnant women. 2012 International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE): IEEE; 2012. p. 404-7.
- [59] Gohari M, Hemmat A, Afzal A. Design, construction and evaluation of a variable-depth tillage implement equipped with a GPS. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 2010;41.