



Increasing the Performance of Bending Nanoactuator through Three-layer Nanostructure based on Polypyrrole Nanowire, Nano-Thick Gold Contacts and Polyether Sulfone Substrate

Mahsa Mahdavinia¹, Gholamreza Kiani^{2*}, Ayub Karimzadgavidel³, Elahe Habibzadeh⁴

¹PhD Student, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

²Associate Professor, Department of Organic and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

³Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

⁴MSc Student, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:
Original Research

Received: 11.09.2023
Revised: 02.17.2024
Accepted: 03.04.2024

Keyword:
Actuator
Actuation
Conductive Polymer
Polyether Sulfone
Polypyrrole
Electroactive Polymer

***Corresponding Author:**
Gholamreza Kiani
Email: g.kiani@tabrizu.ac.ir

The bending actuators find extensive applications in the fields of medicine and industry, often likened to artificial muscles. Due to the inherent properties of conductive polymers, substantial research has been conducted to enhance their utilization and improve performance. In the current study, a three-layer configuration was proposed for creating an actuator. This configuration consisted of a polyethersulfone substrate, a gold layer to enhance conductivity, and polypyrrole with nanowire as the electroactive polymer. The aim was to induce bending motion. First, polypyrrole nanowires with a size of 120 nm were synthesized under mild conditions with iron chloride as an oxidant. The gold layer was deposited using a vacuum deposition method, with a thickness of 70 nm. Additionally, a polyethersulfone layer was chemically synthesized, with an estimated thickness of 120 micrometers. Subsequently, the samples were subjected to testing to examine the angle of deviation and the durability of the structure. The results obtained indicated an approximate deviation angle of 35 degrees. Furthermore, the degree of durability suggested an improvement in layer adhesion within the structure compared to similar samples.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The structure of conductive polymers and the conduction mechanism in these polymers have made ion exchange between the polymer and the surrounding environment possible. The exchange of ions between the conductive polymer and the environment causes a change in the volume of the polymer and the appearance of the actuation phenomenon. The characteristic of actuation in conductive polymers makes them fall into the group of electroactive polymers. Lightweight, durable and cheap structure and their high tensile properties have attracted a great deal of attention to these actuators. Among the disadvantages of these polymers as actuators are their low actuation force and dryness. Actuators play a crucial role in various fields ranging from robotics and automation to biomedical devices and aerospace applications. The continuous pursuit of improved actuator performance drives researchers to explore innovative materials and design strategies. In this context, this extended abstract aims to present an investigation on increasing the performance of bending actuators through the implementation of a three-layer structure. The proposed configuration utilizes a polyether sulfone substrate, gold contacts, and undoped polypyrrole as the electroactive polymer. This article introduces a novel approach to increase the performance of bending actuators through the implementation of a three-layer structure. The proposed configuration consists of a polyether sulfone substrate, gold contacts for improved conductivity, and undoped polypyrrole as the electroactive polymer. This research aimed to investigate the effects of this three-layer structure on actuator performance.

Methodology

The synthesis process involved obtaining polypyrrole without dopant, with a thickness of approximately 50 micrometres, through a multi-step electrochemical synthesis. The gold layer, with a thickness of 70 nm, was deposited using a layer-by-layer method. Additionally, a polyether sulfone layer, approximately 120 micrometres thick, was chemically synthesized. Thus, in the first electrochemical synthesis of polypyrrole, 20 ml of acetonitrile was combined with 5 ml of dichloromethane 0.5 M AOT as surfactant and 0.3 M pyrrole monomer at room temperature. To prevent aggregation of surfactant particles, the prepared solution was placed under inert argon gas for 15 minutes until the time of synthesis. The electrochemical method used in this research was potentiodynamic polymerization. The three-electrode system includes a cell for keeping the synthesis solution and three electrodes called working electrode, auxiliary electrode and reference electrode. The polypyrrole prepared in this research is without anionic or cationic dopant. In similar works, the construction stages are carried out in such a way that first the first layer is prepared with a specific thickness. Then, using vacuum deposition, a layer of gold is created on the first layer; and finally, using the electropolymerization method, polypyrrole with the desired thickness is deposited into the system. The main difference between the present research and other similar works is in the stages of construction and the use of polyethersulfone as a passive layer. Thus, in this innovative method, polypyrrole was first synthesized by electrochemical method and with an approximate thickness of 50 micrometres, on a stainless steel metal electrode, then using vacuum deposition, a layer of Gold with a thickness of 70 micrometres was created on synthesized polypyrrole. In the next step, an inactive layer of polyethersulfone was chemically synthesized on gold, and finally, by leaving the whole system for more than 24 hours inside distilled water, the desired three-layer structure was obtained.

Results and discussion

To test the system, a triangular voltage wave in the range of -0.65 and 0.8 V was applied to the working electrode with a sweep speed of 40 millivolts per second. Due to the absence of dopant in the synthesized polypyrrole, the absence of any ion release during the oxidation and reduction of the polymer and the resulting contraction was predictable. By studying the sources that used lithium perchlorate for doping and actuator testing, it can be found that the dominant actuation mechanism is anion exchange type, so by applying a positive potential to the actuator, oxidation polymer was found and the conditions for the entry of negative perchlorate ions (ClO_4^-) and as a result of polypyrrole expansion were provided. According to the structure of the bending actuator, the increase in the created length will follow the bending of the actuator. By reducing the voltage and returning the polymer to the reduced state (here neutral), the anions that had penetrated the polymer are released again to neutralize the polymer, which causes the polymer to contract and return to the actuator state. The results of the potential versus current diagram showed that the current amplitude in each cycle is greater than the previous cycle, which indicates the growth of the polymer with repeated cycles. In addition, the points related to the oxidation and reduction of monomer and polymer can be identified well. The samples were then evaluated to assess the angle of deviation and the durability of the structure. The results revealed an average deviation angle of approximately 35 degrees. Moreover, the durability analysis indicated an improvement in the adhesion between the layers when compared to similar samples.

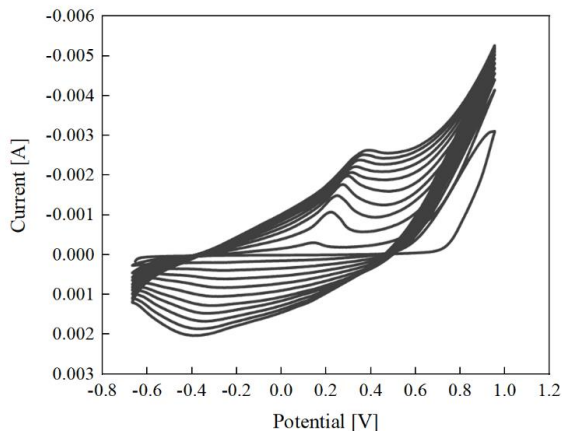


Figure 1. Cell current behavior during potentiodynamic polymerization.

Conclusion

This research demonstrates the potential of the proposed three-layer structure in enhancing the performance of bending actuators. The findings highlight the importance of the selected materials and their impact on actuator functionality. These insights contribute to the development of more efficient and reliable actuator systems in various applications.

افزایش عملکرد نانومحرک خمشی از طریق نانو ساختار سه لایه مبتنی بر نانوسیم پلی پیرول، کنتاکت‌های طلائی با ضخامت نانویی و بستر پلی اتر سولفون

مهسا مهدوی‌نیا^۱، غلامرضا کیانی^{۲*}، ایوب کریم‌زاد قویدل^۳، الهه حبیب‌زاده^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- ۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۴- دانشجوی ارشد، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

عملگرهای خمشی کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های پزشکی و صنعتی دارند که از آن جمله می‌توان به ماهیچه‌های مصنوعی اشاره کرد. با توجه به ماهیت پلیمرهای رسانا، تحقیقات وسیعی برای گسترش کاربرد آن‌ها در این محرک‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها انجام شده است. در تحقیق حاضر، یک ساختار سه‌لایه شامل پلی اتر سولفون به‌عنوان بستر، لایه طلا به‌عنوان کنتاکت برای افزایش رسانایی و پلی پیرول با ساختار نانوسیم به‌عنوان پلیمر الکتروفعال، برای ساخت عملگر خم شونده پیشنهاد شد. در یک فرایند چند مرحله‌ای، نخست نانوسیم‌های پلی پیرول تحت شرایط ملایم با کلرید آهن به‌عنوان یک اکسیدان در اندازه ۱۲۰ نانومتر سنتز شد. سپس لایه‌نشانی طلا به‌روش لایه‌نشانی خلأ و به ضخامت ۷۰ نانومتر و سنتز شیمیایی یک لایه پلی اتر سولفون به ضخامت تقریبی ۱۲۰ میکرومتر، ساخته شدند و در نهایت پاسخ‌دهی نمونه‌ها از نظر زاویه انحراف و ماندگاری ساختار بررسی شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، زاویه انحراف به‌دست‌آمده در حدود ۳۵ درجه است. میزان ماندگاری قطعه تهیه‌شده نیز بیانگر بهبود در چسبندگی بین لایه‌های ساختار نسبت به نمونه‌های مشابه است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

کلید واژگان:

عملگر
پلیمر رسانا
پلی اتر سولفون
پلی پیرول
پلیمر الکتروفعال

*نویسنده مسئول: غلامرضا کیانی

پست الکترونیکی:

g.kiani@tabrizu.ac.ir

مقدمه

ساختار پلیمرهای رسانا و مکانیسم رسانش در این پلیمرها، تبادل یون بین پلیمر و محیط اطراف را میسر ساخته است، به طوری که می‌توان با اکسیدکردن یا احیاکردن پلیمر و برهم‌زدن تعادل بار درون پلیمر، یون‌ها را مجبور کرد تا از داخل پلیمر به محیط بیرون خارج یا از محیط بیرون به داخل پلیمر وارد شوند (سیور و همکاران، ۲۰۲۳)^۱. تبادل یون بین پلیمر رسانا و محیط، باعث تغییر در حجم پلیمر و نمایان‌شدن پدیده اکچویشن (فعال‌سازی)^۲ می‌شود (سیور و همکاران، ۲۰۲۳).

خاصیت فعال‌سازی در پلیمرهای رسانا باعث می‌شود که در گروه پلیمرهای الکتروفعال^۳ قرار گیرند (مادن و همکاران، ۲۰۰۲)^۴. پلیمرهای الکتروفعال، قابلیت کاربردی خوبی در ساخت سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی، ماهیچه‌های مصنوعی، ادوات پزشکی، همچنین میکرو و نانوبات‌ها دارند و پژوهش‌های قابل توجهی در مورد آن‌ها صورت می‌گیرد (آریس-پاردیلا و همکاران، ۲۰۱۲؛ مادن و همکاران، ۲۰۰۲)^۵. وزن سبک، ساختار مقاوم و ارزان و خواص کششی بالای آن‌ها سبب توجه زیادی به این محرک‌ها گردیده است (آریس-پاردیلا و همکاران، ۲۰۱۲). از معایب این پلیمرها به‌عنوان عملگر (فعال‌کننده)^۶، می‌توان به نیروی کم‌فعال‌سازی و خشکی آن اشاره کرد (نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۰)^۷.

تحقیق بر روی مواد پلیمری و توسعه کاربردهای جدید برای عملگرهای پلیمری، در حال گسترش است (ملینگ و همکاران، ۲۰۱۹)^۸. در پلیمرهای الکتروفعال، دو اصل ویژه برای فعال‌سازی می‌تواند تعریف شود: پلیمرهای الکتروفعال الکتریکی، تحت تأثیر نیروی میدان الکتریکی یا کولمبی کار می‌کنند درحالی‌که عملکرد پلیمرهای الکتروفعال یونی، براساس جابجایی یون‌ها است (ملینگ و همکاران، ۲۰۱۹).

از متداول‌ترین پلیمرهایی که بیشترین بررسی‌ها بر روی آن‌ها صورت گرفته است، می‌توان به پلی‌آنیلین^۹، پلی‌تیوفن^{۱۰}، پلی‌پیرول^{۱۱} و پلی‌استیلن^{۱۲} اشاره کرد (چن و همکاران، ۲۰۱۹؛ دانماتم و همکاران، ۲۰۲۲؛ تینگ و همکاران، ۲۰۲۱)^{۱۳}. پلی‌پیرول به‌عنوان یکی از پلیمرهای رسانای مرسوم، دارای توانایی ایجاد پدیده فعال‌سازی است و می‌تواند به‌عنوان پلیمر الکتروفعال مورد استفاده قرار گیرد (تینگ و همکاران، ۲۰۲۱). بیشترین کاربردها بر روی عملگر پلی‌پیرول صورت گرفته است (اسماعیل و همکاران، ۲۰۲۰؛ تینگ و همکاران، ۲۰۲۱)^{۱۴}. دلیل کاربرد ویژه پلی‌پیرول می‌تواند پایداری در شرایط جوی و بیولوژیکی آن باشد. فعالیت الکتریکی در محدوده وسیعی از pH، قابلیت کار در مایعات بدن مثل خون یا پلاسما، وزن سبک، زیست‌تخریب‌پذیری و نیاز به ولتاژ پایین، از دیگر مزایای این پلیمر است (کیفر و همکاران، ۲۰۲۱)^{۱۵}. برخلاف پلی‌استیلن که به‌آسانی

¹ Seurre

² Actuation

³ Electroactive polymers

⁴ Madden

⁵ Arias-Pardilla

⁶ Actuator

⁷ Nejadfard

⁸ Melling

⁹ Polyaniline

¹⁰ Polythiophene

¹¹ Polypyrrole

¹² Polyacetylene

¹³ Chen; Danmatam; Ting

¹⁴ Ismail

¹⁵ Kiefer

با اکسیژن واکنش می‌دهد، برای پلی‌پیرول قرار گرفته در محلول الکترولیت این مورد کمتر دیده می‌شود. از طرفی، پلی‌آنیلین، فعالیت الکتریکی خود را در محیط‌های اسیدی با pH کمتر از ۳-۴ نشان می‌دهد و رفتار فعال‌کنندگی آن به شدت به میزان pH وابسته است (کیفر و همکاران، ۲۰۲۱). در حالی که پلی‌پیرول در محدوده وسیعی از pH دارای فعالیت الکتریکی است و می‌تواند در pH طبیعی کار کند. رفتار کششی به‌جز محرک‌هایی با تبادل یون، هم آنیونی و هم کاتیونی نیز خطی و بدون تحول است (لیو و همکاران، ۲۰۱۹).^۱ به دلیل امکان رسیدن به کشش‌های بالا با بازه هیستریزس کم، عملگرهای پلیمر رسانا را می‌توان به موقعیت‌های مختلفی انتقال داد و حالت آن‌ها را حفظ کرد و عملکرد آن‌ها فقط به تغییر بین دو حالت انقباض کامل و انبساط کامل محدود نشود (آکند و همکاران، ۲۰۲۱).^۲ کشش کلی و معمول برای عملگرهای پلیمر رسانا در حدود ۱-۳ درصد است که این مقدار به یون‌های دوپانت^۳، محلول الکترولیت، نیروی اعمالی و ولتاژ تحریک وابسته است (جندرون، ۲۰۱۹).^۴

برای افزایش سرعت کشش تا ۱۰ درصد می‌توان کارهای دیگری از قبیل استفاده از الکترودهای چین‌دار، پلیمرهای متخلخل، یون‌های دوپانت با اندازه کوچک‌تر یا نازک‌تر کردن فیلم‌ها و فیبرها انجام داد (جندرون، ۲۰۱۹). نقاط قوت عملگرهای پلیمر رسانا نسبت به نانولوله‌های کربنی، کشش بالا و اقتصادی‌تر بودن آن‌ها است، در حالی که عملگرهای نانولوله‌های کربنی، استحکام و مدول بالاتری دارند (ونگ و همکاران، ۲۰۲۳).^۵

برای تحریک عملگر می‌توان هردو سیگنال الکتریکی جریان و ولتاژ را به‌عنوان محرک به‌کار برد (ونگ و همکاران، ۲۰۲۳). در بیشتر مطالعات صورت‌گرفته، با اعمال یک سیگنال ولتاژ با شکل موج مثلثی به بررسی پارامترها و رفتار اکچویتر می‌پردازند (چن و همکاران، ۲۰۲۲؛ ونگ و همکاران، ۲۰۲۳).^۶ مهم‌ترین پارامتر بررسی‌شده برای عملگرها، میزان کشش تولیدشده توسط اکچویتر است که به‌صورت درصد افزایش طول برای عملگرهای خطی و درجه برای عملگرهای پیچشی است. سرعت کشش نیز به‌عنوان یکی از دیگر پارامترهای اصلی بررسی می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۲۱).^۷

یک گروه تحقیقاتی، در بررسی‌های صورت‌پذیرفته در منابع علمی، تحریک خارج از صفحه هیدروژل پلی-ایزوپروپیل‌اکریل‌امید^۸ را با استفاده از خواص اکسایش/کاهش یک فیلم پلی‌پیرول بررسی کردند. نتایج نشان داد که فیلم‌های پلی‌پیرول/دو دسیل بنزن سولفونات^۹ بزرگ‌ترین سویه (۲۰ درصد) را با یک تحریک کاتیونی به نمایش می‌گذارند. این گروه اثبات کردند که مدول یانگ هیدروژل کامپوزیت در حدود ۱۰ کیلو پاسکال بود که بدون توجه به حالت ردوکس پلی‌پیرول ثابت باقی ماند. همچنین نشان داده شد که فیلم رشدیافته پلی‌پیرول/دو دسیل بنزن سولفونات در هیدروژل پلی‌ایزوپروپیل‌اکریل‌امید بیش از ۲ برابر تحریک فیلم پلی‌پیرول/دو دسیل بنزن سولفونات را به‌تنهایی با تغییر الکتروشیمیایی حالت ردوکس عرضه می‌دارد. این سیستم، کاربردهای بالقوه‌ای برای محرک‌های نرم، کنترل شارژ یون، تحویل دارو یا اعمال محرک‌های الکتریکی برای مطالعات کشت سلولی دارد (تینگ و همکاران، ۲۰۲۱).

¹ Liu

² Akande

³ Dopant

⁴ Gendron

⁵ Weng

⁶ Chen

⁷ Chen

⁸ Isopropylacrylamide

⁹ Dodecylbenzene sulfonate

در تحقیقی دیگر، یک محرک چندلایه با کارایی بالا گزارش شد که در آن یک لایه پلی‌پیرول بر روی یک بستر پلی‌اتیلن گلیکول ترفتالات از طریق یک پلیمریزاسیون اکسیداسیون شیمیایی قرار گرفت (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱).^۱ در بررسی دیگر، گروهی از محققان سنتز لایه‌های پلیمری مبادله یونی مبتنی بر پلی‌پیرول/پلی‌وینیل الکل حاوی الکترودهای PEDOT:PSS/SWNT/IL را ارائه دادند که در پاسخ به ولتاژ اعمال شده دچار تغییرات ساختاری می‌شوند. در نهایت مشخص گردید که این محرک از نظر مکانیکی، پایدار و انعطاف‌پذیر ساخته شده است و از طریق ترکیبی هم‌افزایی از ترکیب پلی‌پیرول/پلی‌وینیل الکل حاوی سطوح الکتروکود PEDOT:PSS/SWNT/IL پتانسیل قابل توجهی به‌عنوان ماده محرک برای کاربردهای میکروباتیک دارد (هو و همکاران، ۲۰۱۹).^۲

ادغام مواد نانوساختار، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محرک‌های خمشی نشان داده است. هدف از این بررسی، روشن کردن تأثیر ادغام نانوسیم‌های پلی‌پیرول در ساختار محرک سه‌لایه است که با برجسته کردن تأثیر نانوساختار بر عملکرد محرک، بر کاربردهای عملی و پیشرفت‌های بالقوه در زمینه دستگاه‌های انعطاف‌پذیر خواهد بود. طراحی نوآورانه در محرک خمشی سه‌لایه، همراه با پلی‌پیرول نانوساختار، یک روش امیدوارکننده برای توسعه محرک‌های خمشی پیشرفته با کارایی و دوام بهبودیافته است. برای این منظور، میزان ماندگاری و زاویه انحراف محرک نیز بررسی می‌شود.

روش انجام آزمایش

آماده‌سازی مونومر زیر تیتیر

پیش از به‌کاربردن مونومر پیرول (ساخت شرکت مرک آلمان)، لازم است مراحل برای آماده‌سازی و خالص‌سازی مونومر طی گردد که شامل عبور مونومر از روی آلومینا یا تقطیر با سیستم خلأ می‌باشد. این کار به دلیل واکنش‌پذیری بالای پیرول با اکسیژن هوا است از این رو نخست با استفاده از سیستم خلأ، پیرول تقطیر گردید و درون ظرف شیشه‌ای قرار داده شد. در ادامه، به‌منظور جلوگیری از تماس با اکسیژن هوای موجود در فضای خالی ظرف و اکسیدشدن پیرول، هوای به‌جامانده، با گاز بی‌اثر آرگون جایگزین شد و سپس برای استفاده در مراحل بعدی، ظرف از تماس با نور عایق و درون یخچال نگهداری شد (کسیسومیاجولا و همکاران، ۲۰۱۰).^۳

سنتز پلی‌پیرول به روش الگوی نرم

نخست روش سنتز پلی‌پیرول با استفاده از یک روش معمول شرح داده می‌شود. در ابتدا، متیل اورانژ در آب یونیزه شده حل گردید تا مخلوط A را تشکیل دهد. همزمان، هگزا هیدرات کلرید آهن در آب دیونیزه حل شد تا محلول اکسیدان B ایجاد شود. سپس محلول B به‌صورت قطره‌ای به مخلوط A اضافه شد. فرایند پلیمریزاسیون حاصل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت انجام گردید. محصول سنتز شده از طریق فیلتراسیون جمع‌آوری گشت و با استفاده از سوکسله، توسط آب و اتانول برای حذف اکسیدان، متیل اورانژ و الیگومرها شستشو داده شدند. در نهایت، پودر پلی‌پیرول در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت در آون خلأ خشک گردید (زانو و همکاران، ۲۰۱۶).^۴

¹ Wang

² Hu

³ Kasisomayajula

⁴ Zhao

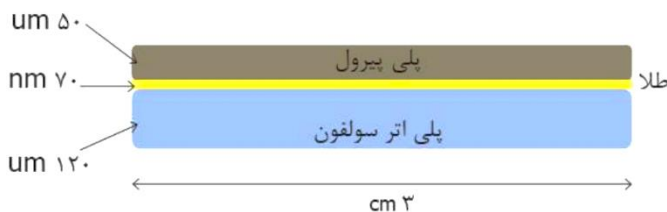
روش لایه‌نشانی پلی‌پیرول بر روی استیل ضدزنگ در تهیه محرک خمشی

بستر استیل ضدزنگ، با استون کاملاً تمیز شد تا هرگونه آلودگی یا ناخالصی از بین برود و با آب مقطر آبکشی و در آخر بستر کاملاً خشک گردید. سپس پلی‌پیرول در یک حلال مناسب مانند استونیتریل یا آب حل گردید تا یک محلول همگن تشکیل شود. غلظت محلول پلی‌پیرول باید براساس ضخامت و خواص فیلم موردنظر بهینه شود. در ادامه، از یک تکنیک رسوب‌گذاری مناسب مانند پوشش غوطه‌وری، برای اعمال یکنواخت محلول پلی‌پیرول بر روی بستر استیل ضدزنگ استفاده شد (کسیسومیاجولا و همکاران، ۲۰۱۰).

طراحی محرک (عملگر)

طراحی و راه‌اندازی عملگر پلی‌پیرول باید امکان مشاهده فعال‌سازی و بنابراین به‌دست‌آوردن جزئیات پاسخ‌دهی پلی‌پیرول به عوامل اکسایش و کاهش را فراهم کند. راه‌های متنوعی برای ایجاد پدیده فعال‌سازی در فیلم پلیمری وجود دارد. در تحقیق حاضر، یک عملگر میله‌ای خم‌شونده به‌کار گرفته شد که کشش و فشار صفحه‌ای را به رفتار پیچشی انتقال می‌دهد. یک مشکل در استفاده از نوارهای تک‌لایه، غلبه‌بر محدودیت حاصل از نفوذ بار در طول نوار است. عملگرهای خم‌شونده، یک روش مقرون‌به‌صرفه برای تحلیل کشش در پلی‌پیرول هستند زیرا آن‌ها فقط به یک پلیمر به‌عنوان بستر و یک لایه فلزی نازک نیاز دارند و جابه‌جایی می‌تواند با یک دوربین استاندارد تحلیل شود (تنگ و همکاران، ۲۰۲۲)^۱.

برای عملگرهای خم‌شونده، طرح‌های مختلفی شامل عملگرهای دولایه، سه‌لایه و چندلایه مطرح و ساخته شده است (دو و همکاران، ۲۰۱۰)^۲. سیستم موردنظر در این تحقیق، دارای ساختار سه‌لایه است: لایه اول (بستر) یک لایه بی‌اثر است و نقشی در مکانیسم فعال‌سازی نخواهد داشت. این لایه در مقابل تغییرات طولی سیستم مقاومت دارد و تغییرات طولی را به حرکت پیچشی و خمشی تبدیل می‌کند. در کارهای صورت‌گرفته در منابع، ضخامت این لایه در حدود ۲۰۰-۲۵ میکرومتر انتخاب شده است (گیو و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۱۹)^۳. در بررسی حاضر، با توجه با مراحل اختصاصی نمونه‌سازی، این لایه به‌صورت آماده و با ضخامت مشخص تهیه نشده است. سنتز شیمیایی این لایه، دقت ضخامت آن را کاهش داده است ولی با دقتی نسبتاً خوب می‌توان ضخامت آن را در تمام نمونه‌ها حدود ۱۲۰ میکرومتر در نظر گرفت.



شکل ۱. ساختار سه‌لایه طراحی شده برای عملگر پلی‌پیرول به همراه اندازه‌های مربوط به طول و ضخامت.

¹ Tang

² Du

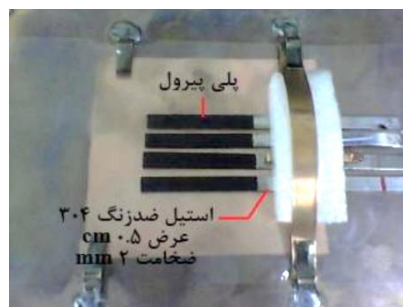
³ Guo; Li

لایه‌نشانی طلا

در نهایت ۴ نمونه به روش ذکر شده برای استفاده در مراحل بعدی آماده شد. به منظور جلوگیری از تخریب پلی‌پیرول در دمای بالا، در هنگام استفاده از دستگاه لایه‌نشانی، جریان مربوط به اشعه الکترونی با کنترل جریان فیلمان، محدود شد. هرچند این کار سرعت لایه‌نشانی را کاهش می‌داد ولی این اطمینان را می‌داد که با ادامه لایه‌نشانی نمونه‌ها تخریب نخواهند شد. سطح نمونه‌ها توسط طلا با درجه خلوص ۹۹/۹ درصد و تحت سرعت متوسط لایه‌نشانی $0.1 \text{ A}^0/\text{s}$ تا ضخامت ۷۰ نانومتر لایه‌نشانی شدند. در نمونه‌های مشابه، ضخامت لایه‌نشانی در حدود ۷۰-۴۰ نانومتر گزارش شده است (یilmaz و همکاران، ۲۰۱۹).^۱ وجود بیش از حد ناخالصی‌هایی نظیر مس در طلا استفاده شده برای لایه‌نشانی، موجب خواهد شد که هنگام آزمایش نمونه‌ها، مس احیا گردد و باعث خوردگی لایه شود. بنابراین درجه خلوص طلا استفاده شده باید تا حد ممکن بالا باشد تا از جداسدن لایه‌ها در هنگام آزمایش جلوگیری شود.



(ب)



(ف)

شکل ۲. تصاویر آماده‌سازی نمونه برای لایه‌نشانی الف) تصویری از نمونه‌ها و محکم کردن آن‌ها بر روی نگهدارنده پیش از لایه‌نشانی طلا ب) تصویر نمونه‌ها پس از لایه‌نشانی.

سنتر پلی‌اتر سولفون^۲

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد لایه نهایی ایجاد شده، لایه‌ای به ضخامت تقریبی ۱۲۰ میکرومتر متشکل از پلی‌اتر سولفون می‌باشد که به روش شیمیایی بر روی پلی‌پیرول پوشش داده شده با طلا ایجاد می‌شود. محلول شیمیایی سنتر از حل کردن مونومر در ۲۰ میلی‌لیتر DMSO^۳ (ساخت شرکت دکتر مجلی) به‌عنوان حلال با نسبت وزنی ۶ درصد به‌دست آمد. نمونه‌ها با دقت وزن شد و با استفاده از قطره‌چکان، محلول به آرامی روی آن‌ها پخش گردید. در نهایت در آون را به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا فیلم اولیه تشکیل شود.

^۱ Yilmaz

^۲ Polyethersulfone

^۳ Dimethylsulfoxide



شکل ۳. تصویری از عملگرهای تهیه‌شده.

مراحل ساخت

در تحقیقات مشابه انجام‌گرفته، مراحل ساخت بدین صورت است که ابتدا لایه اول به‌صورت آماده و با ضخامت مشخص تهیه می‌گردد. سپس با استفاده از لایه‌نشانی خلأ، یک لایه طلا، روی لایه اول ایجاد می‌شود و در نهایت با استفاده از روش الکتروپلیمریزاسیون، پلی‌پیرول با ضخامت موردنظر، بر روی سیستم ترسیب می‌گردد (کزازی، ۲۰۱۹). تفاوت عمده تحقیق حاضر با دیگر تحقیقات مشابه، در مراحل ساخت و استفاده از پلی‌اترسولفون به‌عنوان لایه غیرفعال است به‌طوری که در این روش ابداعی، ابتدا پلی‌پیرول با ساختار نانوسیم و با ضخامت تقریبی ۵۰ میکرومتر، بر روی الکترود فلزی از جنس استیل ضدزنگ لایه‌نشانی گردید، سپس با استفاده از لایه‌نشانی خلأ، لایه‌ای از طلا به ضخامت ۷۰ میکرومتر بر روی پلی‌پیرول سنتز شده ایجاد شد و در مرحله بعد لایه غیرفعال از جنس پلی‌اترسولفون به‌صورت شیمیایی روی طلا سنتز گردید و در نهایت، با قراردادن کل سیستم به‌مدت بیشتر از ۲۴ ساعت درون آب مقطر، ساختار سه‌لایه موردنظر حاصل گردید.

آزمایش نمونه‌ها

نمونه‌های به‌دست‌آمده پیش از آزمون، نیاز به جداسازی از روی الکترودهای استیل داشتند. بدین منظور با استفاده از یک تیغه تیز، قسمت‌های کناری نمونه‌ها برای بازکردن مسیر نفوذ آب، تراش داده شدند. در مرحله آخر نمونه‌ها به‌مدت ۲ شبانه‌روز داخل آب مقطر قرار گرفتند و در نهایت عملگرها به‌آرامی از روی الکترودها جدا شدند. عملگرها توسط تیغه تیز در ابعاد $3\text{ cm} \times 2\text{ mm}$ برش داده شدند و با استفاده از سرسیم‌های صنعتی و یک سیم مسی، امکان اتصال الکتریکی آن‌ها ایجاد شد.

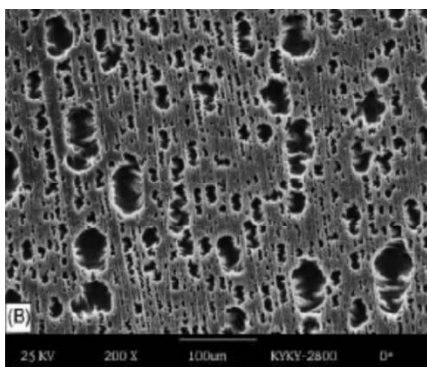
آماده‌سازی سیستم آزمایش

پلی‌پیرول تهیه‌شده در تحقیق حاضر، با دوپانت آنیونی است. محلول الکترولیت تست، از حل کردن لیتیم‌پرکلرات ۰/۵ مولار در ۲۵ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه (با مقاومت الکتریکی بالا) به‌دست آمد. سیستم مورد استفاده برای تست عملگر، سیستم سه‌الکترودی استفاده‌شده در مرحله سنتز پلی‌پیرول بود، با این تفاوت که این بار رفتار جریان و ولتاژ عملگر به‌عنوان الکترود کار بررسی شد.

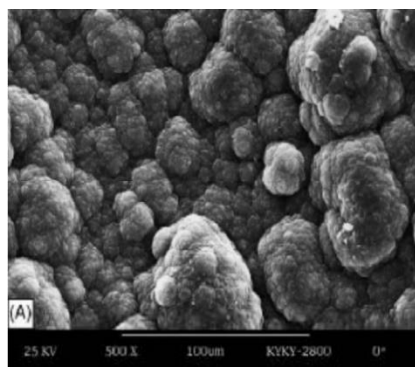
نتایج و بحث

آنالیز میکروسکوپی

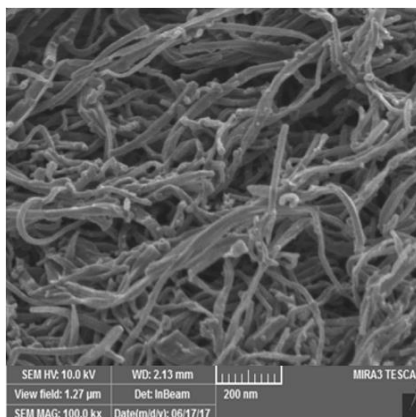
شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل TESCAN MIRA۳) از هر دو سطح پلی-پیرول لایه‌نشانی شده بر روی الکتروود استیل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر (ب) مشخص است، سطحی از پلی-پیرول که بر روی الکتروود، لایه‌نشانی شده است، از سطحی که در تماس با محلول الکتروولیت بوده است بسیار صاف‌تر می‌باشد. سطح در تماس با محلول، دارای ناهمواری‌های زیادی است. واضح است که با لایه‌نشانی طلا بر سطح ناهموار، به دلیل نفوذ ذرات طلا در این ناهمواری‌ها، این دو لایه چسبندگی مطلوب و مستحکمی با هم خواهند داشت. به علاوه، به دلیل ضخامت کم لایه طلا، این ناهمواری‌ها در سطح ایجاد شده پس از لایه‌نشانی طلا هم وجود خواهند داشت و این امر، چسبندگی خوب لایه نهایی (لایه پلی‌اترسولفون که به صورت شیمیایی سنتز شده) را هم تضمین خواهد کرد.



(ب)



(الف)

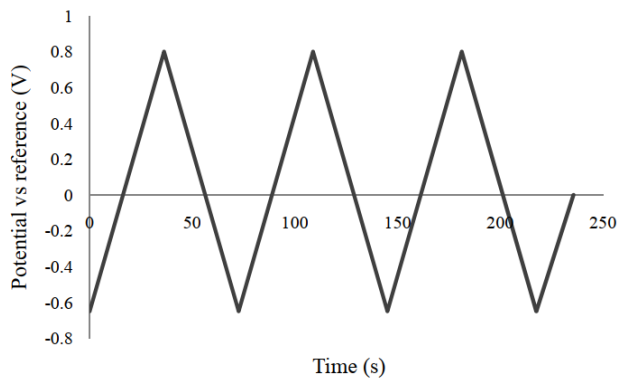


(پ)

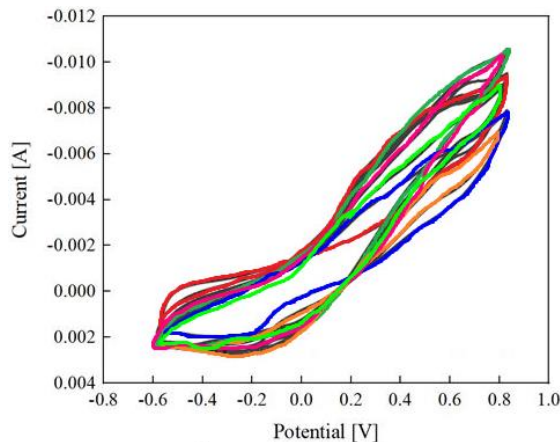
شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پلی‌پیرول الکتروسنتز شده بر روی استیل (الف) از سطحی که بر روی الکتروود سنتز شده (ب) سطحی که با محلول در تماس بوده است. (پ) تصویر نانو سیم‌های پلی‌پیرول سنتز شده.

آزمون اکچویتر

به‌منظور تست، یک موج ولتاژ مثلثی در محدوده $0/۶۵$ و $0/۸$ ولت، با سرعت جاروب ۴۰ میلی‌ولت بر ثانیه به الکتروود کار به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۵ اعمال گردید. با توجه به نبود دوپانت در پلی‌پیرول سنتز شده، خارج‌نشدن هرگونه یون در هنگام اکسایش و کاهش پلیمر و انقباض حاصل از آن، قابل پیش‌بینی بود. با مطالعه منابعی که از لیتیوم‌پرکلرات برای دوپینگ و تست عملگر استفاده کردند، می‌توان دریافت مکانیسم غالب فعال‌سازی از نوع تبادل‌شونده آنیونی است، بدین صورت که با اعمال پتانسیل مثبت به الکتروود کار (اکچویتر)، پلیمر اکسایش می‌یابد و شرایط برای ورود یون‌های منفی پرکلرات (ClO_4^-) و در نتیجه انبساط پلی‌پیرول، فراهم می‌شود. با توجه به ساختار عملگر خم‌شونده، افزایش طول ایجادشده، خمش عملگر را به‌دنبال خواهد داشت. با کاهش ولتاژ و برگرداندن پلیمر به حالت کاهش‌یافته (در اینجا خنثی)، آنیون‌هایی که به‌داخل پلیمر نفوذ کرده بودند، مجدداً برای خنثی‌کردن پلیمر از آن خارج می‌شوند که انقباض پلیمر و برگشتن عملگر به حالت اولیه را به‌دنبال خواهد داشت. شکل ۶، رفتار جریان سلول را در هنگام آزمون نشان می‌دهد. نقاط اکسایش و کاهش پلیمر در این شکل قابل تشخیص است.



شکل ۵. شکل موج ولتاژ اعمال شده به عملگر نسبت به الکتروود رفرنس.

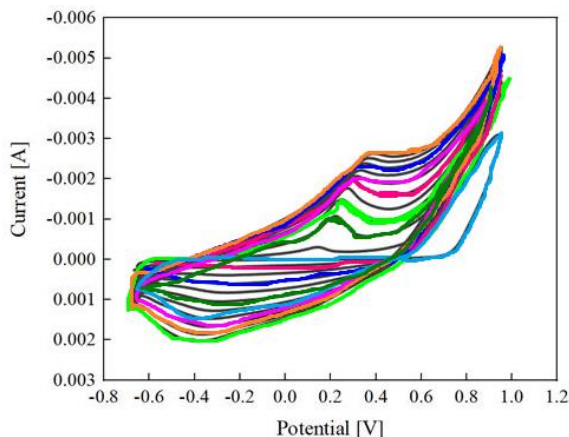


شکل ۶. نمودار جریان سلول برحسب پتانسیل الکتروود کار.

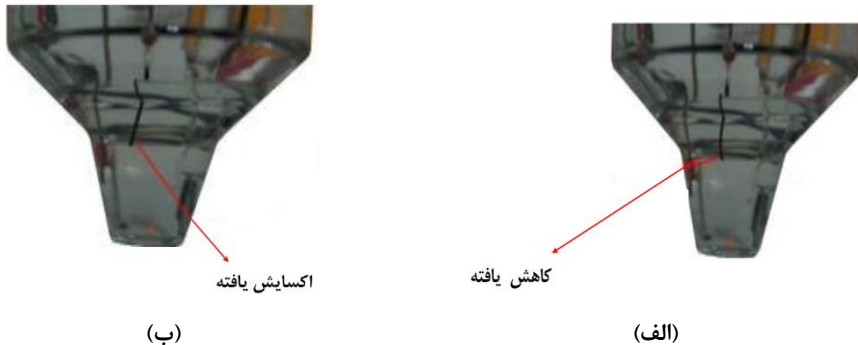
شکل موج ولتاژ اعمال شده به صورت مثلثی متقارن در محدوده $0/7$ - تا 1 ولت و با سرعت جاروب 40 میلی‌ولت بر ثانیه است. این شکل موج، به تعداد 20 سیکل به سیستم اعمال شد تا پلی‌پیرول با ضخامتی حدود 50 میکرومتر بر روی الکتروود کار تهیه شود. شکل ۹، رفتار جریان سلول در هنگام اعمال پتانسیل را برای 10 سیکل به خوبی نشان می‌دهد. محور افقی، نشان‌دهنده پتانسیل اعمالی به الکتروود کار نسبت به الکتروود رفرنس برحسب ولت است و محور قائم، مقادیر جریان سلول برحسب آمپر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، دامنه جریان در هر سیکل نسبت به سیکل قبل، بیشتر است که بیانگر رشد پلیمر با تکرار سیکل‌ها است. همچنین نقاط مربوط به اکسایش و کاهش مونومر و پلیمر به خوبی قابل تشخیص است. نمودار CV بالا رفتار ردوکس نانو ساختار پلی‌پیرول را در محرک نشان می‌دهد. پیک‌های ردوکس به خوبی تعریف شده، با رفتار الکتروشیمیایی مشخصه پلی‌پیرول، مطابقت دارد که نشان‌دهنده ادغام موفقیت‌آمیز PPy-Au در طراحی محرک است. پاسخ فعلی، ثابت و برگشت‌پذیر است که نشان‌دهنده ثبات و چرخه‌پذیری خوب مواد است.

تأثیر نانو ساختار بر عملکرد محرک

ساختار نانوسیم پلی‌پیرول، چندین مزیت را به عملکرد محرک می‌دهد: اولاً، نسبت سطح به حجم بالای نانوسیم‌ها، فعالیت الکتروشیمیایی را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود راندمان تحریک می‌شود. ثانیاً، انعطاف‌پذیری نانوسیم‌ها امکان انطباق بهتر با بستر پلی‌اتر سولفون را فراهم می‌آورد و حرکات خمشی کارآمدتری را ممکن می‌سازد. در نهایت، نانوذرات طلا به همراه نانوسیم‌های پلی‌پیرول رسانایی بیشتری را ارائه می‌کنند که برای تحریک سریع، بسیار مهم است. به‌طور خلاصه، نانوسیم‌های پلی‌پیرول بدون دوپینگ مورد استفاده در محرک خمشی سه لایه به‌طور قابل توجهی به عملکرد آن کمک می‌کند. نمودار CV شواهدی از پایداری الکتروشیمیایی و برگشت‌پذیری مواد ارائه می‌دهد که کارایی نانو ساختار در کاربردهای محرک را بیشتر توجیه می‌کند.



شکل ۷. رفتار جریان سلول در طول پلیمریزاسیون پتانسیودینامیک.



شکل ۸. تصویر عملگر در حال تست (الف) در حالت کاهش یافته کامل (ب) در حالت اکسایش یافته کامل. قسمت عملگر، توسط نرم‌افزار گرافیکی، نمایان تر شده است.

تست استحکام و چسبندگی

یکی از مشکلات عملگرهای خم‌شونده سه‌لایه‌ای که با روش‌های قبلی ساخته می‌شود و لایه‌نشانی طلا در آن‌ها قبل از سنتز پلیمر انجام می‌گردد، جداشدن پلیمر از سطح الکتروود (لایه/طلا بستر) بعد از چندین بار آزمایش بود (لالگانی دزکی و بادغی، ۲۰۲۳)^۱. از آن‌جا که در این روش‌ها، لایه بستر به‌صورت آماده تهیه می‌شود، معمولاً سطحی صاف دارد و الکتروودی که از لایه‌نشانی طلا بر روی آن‌ها ایجاد می‌شود نیز صیقلی و صاف بود، به همین دلیل پس از چندین بار آزمایش، لایه پلیمری تحت تنش‌های ایجادشده (در هنگام اعمال افزایش حجم) با نفوذ ذرات محلول بین لایه طلا و پلیمر، این دو لایه از هم جدا می‌گردد و ساختار عملگر خم‌شونده، تخریب می‌شود. حتی بدون آزمایش عملگر نیز با قراردادن عملگر در محلول آزمایش به‌مدت محدود، محلول بین طلا و پلیمر نفوذ می‌کند و باعث جداشدن لایه‌ها از یکدیگر می‌شود.

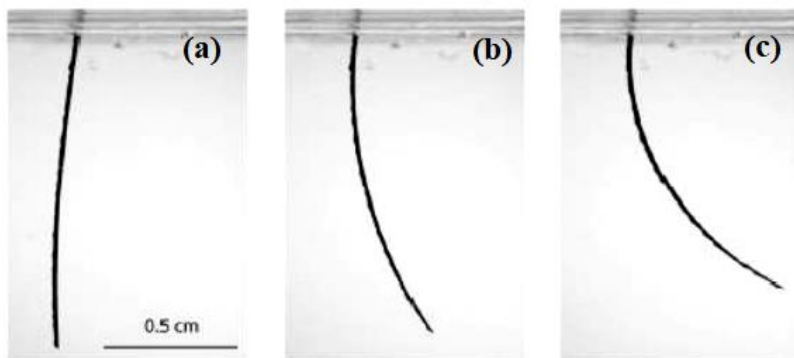
مهم‌ترین مزیت در تحقیق حاضر، بهبود این نقصان بود. اکچویترهای ساخته‌شده پس از حدود ۵۰۰ سیکل آزمایش، به مدت ۱ هفته درون محلول آزمایش قرار داده شدند و سپس مجدداً تحت ۱۰۰ چرخه فعال‌سازی آن‌ها را بررسی کرد. نتیجه به‌دست‌آمده تأییدکننده ادعای این بررسی بود و نشان داد که سیستم فوق از لحاظ چسبندگی و حفظ ساختار، مناسب‌تر از نمونه‌های مشابه است. در حقیقت افزودن نانو ساختارهای پلی‌پیرول به محرک خمشی می‌تواند فاکتور چسبندگی را به‌دلیل خواص چسبندگی ذاتی این ماده افزایش دهد. زبری سطح پلی‌پیرول در سطح نانو، به افزایش سطح تماس و چسبندگی کمک می‌کند. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی آن می‌تواند برهمکنش‌های قوی‌تری را با سطوح دیگر ایجاد کند.

همچنین در تحقیق حاضر، نوآوری «بازگشت رویشی» بررسی شد. آنالیز میکروسکوپی شامل یک میکروسکوپ 1600×1200 و یک رایانه شخصی برای تجزیه و تحلیل تصاویر جامع بود. به‌منظور بهینه‌سازی جابه‌جایی برای تجزیه و تحلیل تصویر، نمونه‌ها تقریباً ۲ درجه کج شدند و یک خط کالیبراسیون اولیه در میدان دید گنجانده شد. تجزیه و تحلیل ولتاژها و تصاویر ثبت‌شده با استفاده از نرم‌افزار Matlab انجام شد. منحنی محرک با یک دایره تعبیه شده بود تا خطای هندسی به حداقل برسد و از تئوری پرتو کلاسیک برای محاسبه کشش اعمال‌شده براساس شکل محرک استفاده شد. محرک خمشی، متشکل از سه لایه ppy/طلا/بستر بود که انحنا آن توسط معادله تیموشنکو^۲ به‌دست

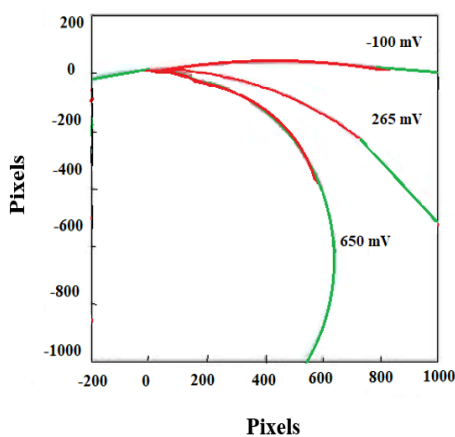
¹ Lalegani Dezaki & Bodaghi

² Timoshenko

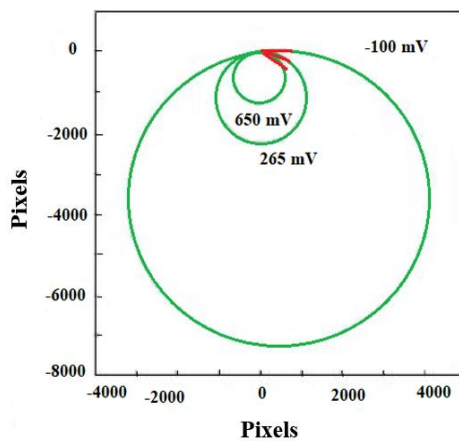
آمد. این معادله، پارامترهای مختلفی از جمله شعاع، انحنا و خواص مواد لایه‌های زیرلایه و ppy را در نظر می‌گیرد. با فرض تنش ثابت در سراسر ضخامت لایه ppy، از این معادله برای استنتاج نیروهای نرمال و شرایط تعادل گشتاور استفاده شد. مشخص گردید که به دلیل ضخامت کم آن نسبت به سایر لایه‌ها، تأثیر لایه طلا بر محاسبات، حذف شده است. زمانی که محرک به سمت لایه بستر خم شد، کشش ایجاد شده مثبت بود.



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۹. تصاویر حاصل از ارزیابی انحنای محرک خمشی (الف) تصاویر حاصل از میکروسکوپ (ب) ارزیابی منحنی با انطباق دایره‌هایی بر روی شکل کلی انحنای محرک با نرم‌افزار Matlab برای محرک خمشی ppy در سه ولتاژ مختلف ۱۰۰، ۲۶۵ و ۶۵۰ میلی‌ولت.

تکنیرپذیری

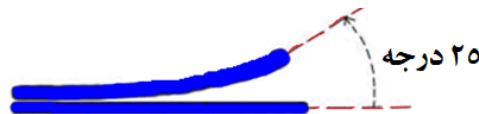
یکی از فاکتورهای مهم در ساخت عملگرها، امکان تولید دوباره آن‌ها با مشخصات موردنظر است (روست و همکاران، ۲۰۱۶)^۱. وجود جزئیات بسیار در مسیر ساخت، به‌خصوص مرحله سنتز پلیمر، می‌تواند به‌عنوان مشکلی، دقت ساخت این عملگرها را کاهش دهد ولی در حالت کلی می‌توان گفت محصول به‌دست‌آمده در سنتز الکتروشیمیایی، نسبت به روش‌های ساخت شیمیایی، دارای مشخصات تکرارپذیرتری است. در این تحقیق، تقریباً تمام نمونه‌هایی که با یک روش مشخص ساخته می‌شدند، جزئیات عملگری یکسانی داشتند.

تخمین زاویه انحراف و پیش‌بینی حالت ماندگار

با استفاده از تصاویر گرفته‌شده از فیلم تست و استفاده از نرم‌افزار گرافیکی می‌توان زاویه انحراف را به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۱۰ تخمین زد. زاویه انحراف در یک محرک خمشی، معمولاً از طریق اعمال یک نیرو یا محرک خارجی مانند میدان الکتریکی، انرژی حرارتی یا فشار مکانیکی به‌دست می‌آید. این باعث تغییر شکل محرک می‌شود و در نتیجه زاویه انحراف قابل اندازه‌گیری ایجاد می‌شود. این حالت برای ولتاژ اعمالی ۰/۸ ولت حاصل شد بنابراین با فرض خطی بودن عملگر در محدوده ۰ تا ۰/۸ ولت، می‌توان میزان انحراف عملگر را از تقسیم بیشینه انحراف عملگر به ولتاژ متناظر با آن، به ازای هر ولت محاسبه کرد و رابطه الکترومکانیکی بین میزان انحراف عملگر (به‌عنوان خروجی) و ولتاژ اعمالی به عملگر (به‌عنوان ورودی) را برای حالت ماندگار به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$S = \frac{\text{deg}}{v} = \frac{25}{0.8} = 31.25 \rightarrow \text{Deg} \infty = 31.25 \times V_{app}$$

در این رابطه، V_{app} ولتاژ اعمالی به عملگر و $\text{Deg} \infty$ میزان انحراف عملگر در حالت ماندگار است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. تصاویر حاصل از تخمین زاویه انحراف (الف) تخمین حداکثر زاویه انحراف برای عملگر (ب) تصاویر گرفته‌شده از عملگر در هنگام آزمایش، از سمت چپ به ترتیب در ولتاژهای ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ ولت.

¹ Rosset

نتیجه گیری

این تحقیق یک ساختار سه لایه متشکل از پلی اتر سولفون به عنوان یک بستر، یک لایه طلا برای رسانایی افزایش یافته و پلی پیرول با ساختار نانوسیم به عنوان یک پلیمر الکتروفعال را برای ایجاد یک محرک خمشی ارائه کرد. محرک خمشی سه لایه متشکل از پلی پیرول-طلا و پلی اتر سولفون برای ویژگی های عملکرد آن بررسی شد. محرک تغییر قابل توجهی در زاویه خمش با اعمال یک ولتاژ خارجی نشان داد که می تواند به نانو ساختار لایه PPy-Au نسبت داده شود. نانوسیم های پلی پیرول مورد استفاده در این مطالعه، انعطاف پذیری و هدایت الکتریکی عالی را ارائه می کنند که برای کاربردهای محرک، بسیار مهم است. نتایج زاویه انحراف، تقریباً ۲۵ درجه و چسبندگی بهتر بین لایه ها را در مقایسه با نمونه های مشابه نشان داد. این یافته ها پتانسیل ساختار سه لایه پیشنهادی را در توسعه محرک های خمشی با عملکرد و دوام افزایش یافته نشان می دهد. اکچویترهای ساخته شده پس از حدود ۵۰۰ سیکل آزمایش، به مدت ۱ هفته درون محلول آزمایش قرار داده شدند و سپس مجدداً تحت ۱۰۰ سیکل اکچویشن بررسی شدند. نتیجه به دست آمده تأیید کننده ادعای این بررسی بود و نشان داد که سیستم فوق از لحاظ چسبندگی و حفظ ساختار، مناسب تر از نمونه های مشابه است. در نهایت، ادغام نانوسیم های پلی پیرول در محرک خمشی به طور قابل توجهی کارایی آن را افزایش داده است. این پیشرفت را می توان به خواص منحصربه فرد نانوسیم ها، به ویژه نسبت مساحت سطح بزرگ و ویژگی های مکانیکی، الکتریکی و الکتروشیمیایی ویژه آن ها نسبت داد. نانوسیم های پلی پیرول، عملکرد محرک را با ارائه رسانایی و انعطاف پذیری بیشتر تقویت می کند که منجر به فعال سازی مؤثر تر محرک می شود.

References

- Akande, G., Ajayi, S. A., Fajobi, M. A., Oluwole, O. O., & Fayomi, O. S. I. (2021). Advancement in the Production and Applications of Conductive Polymers (CPs). *Key Engineering Materials*, 886, 12-29. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.886.12>
- Arias-Pardilla, J., Otero, T. F., Martínez, J. G., & Ismail, Y. A. (2012). Biomimetic sensing-actuators based on conducting polymers. In A. D. J. Motheo (Ed.), *Aspects on Fundamentals and Applications of Conducting Polymers* (pp. 87-112). Intechopen. <https://doi.org/10.5772/29348>
- Chen, Q., Yan, X., Lu, H., Zhang, N., & Ma, M. (2019). Programmable Polymer Actuators Perform Continuous Helical Motions Driven by Moisture. *American Chemical Society Applied Materials & Interfaces*, 11(22), 20473-20481. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06398>
- Chen, S., Tan, M. W. M., Gong, X., & Lee, P. S. (2022). Low-Voltage Soft Actuators for Interactive Human-Machine Interfaces. *Advanced Intelligent Systems*, 4(2), 2100075. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100075>
- Chen, Y., Yang, J., Zhang, X., Feng, Y., Zeng, H., Wang, L., & Feng, W. (2021). Light-driven bimorph soft actuators: design, fabrication, and properties. *Materials Horizons*, 8(3), 728-757. <https://doi.org/10.1039/D0MH01406K>
- Danmatam, N., Nakburee, W., Pearce, J., & Pattavarakorn, D. (2022). Smart carboxymethyl cellulose/polythiophene hydrogel for electrically driven soft actuators: Physical and thermal properties and electroactive performances. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(38), e52904. <https://doi.org/10.1002/app.52904>
- Du, P., Lin, X., & Zhang, X. (2010). A multilayer bending model for conducting polymer actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 163(1), 240-246. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.06.002>

- Gendron, D. (2019). Conducting Polymer Based Ionic Polymer Metal Composite Actuators. In Inamuddin & A. M. Asiri (Eds.), *Ionic Polymer Metal Composites for Sensors and Actuators* (pp. 35-52). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13728-1_3
- Guo, Y., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2021). Review of Dielectric Elastomer Actuators and Their Applications in Soft Robots. *Advanced Intelligent Systems*, 3(10), 2000282. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000282>
- Hu, F., Xue, Y., Xu, J., & Lu, B. (2019). PEDOT-based conducting polymer actuators. *Frontiers in Robotics and Artificial Intelligence*, 6, 114. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00114>
- Ismail, Y. A., Shabeeba, A. K., Sidheekha, M. P., & Rajan, L. (2020). Conducting Polymer/Hydrogel Systems as Soft Actuators. In Inamuddin, R. Boddula, & A. M. Asiri (Eds.), *Actuators and Their Applications: Fundamentals, Principles, Materials, and Emerging Technologies* (pp. 211-252). Wiley-Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781119662693.ch9>
- Kasisomayajula, S. V., Qi, X., Vetter, C., Croes, K., Pavlacky, D., & Gelling, V. J. (2010). A structural and morphological comparative study between chemically synthesized and photopolymerized poly(pyrrole). *Journal of Coatings Technology and Research*, 7(2), 145-158. <https://doi.org/10.1007/s11998-009-9186-0>
- Kazazi, M. (2019). High-performance electrode based on electrochemical polymerization of polypyrrole film on electrophoretically deposited CNTs conductive framework for supercapacitors. *Solid State Ionics*, 336, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.03.021>
- Kiefer, R., Nguyen, N. T., Le, Q. B., Anbarjafari, G., & Tamm, T. (2021). Antagonist Concepts of Polypyrrole Actuators: Bending Hybrid Actuator and Mirrored Trilayer Linear Actuator. *Polymers*, 13(6), 861. <https://doi.org/10.3390/polym13060861>
- Lalegani Dezaki, M., & Bodaghi, M. (2023). A Review of Recent Manufacturing Technologies for Sustainable Soft Actuators. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10(6), 1661-1710. <https://doi.org/10.1007/s40684-023-00533-4>
- Li, J., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2019). Dielectric Elastomer Spring-Roll Bending Actuators: Applications in Soft Robotics and Design. *Soft Robotics*, 6(1), 69-81. <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0037>
- Liu, S., Masurkar, N., Varma, S., Avrutsky, I., & Reddy Arava, L. M. (2019). Experimental Studies and Numerical Simulation of Polypyrrole Trilayer Actuators. *American Chemical Society Omega*, 4(4), 6436-6442. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00032>
- Madden, J. D., Madden, P. G., & Hunter, I. W. (2002, March 18-21). *Conducting polymer actuators as engineering materials*. Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices, San Diego, California, United States. <https://doi.org/10.1117/12.475163>
- Melling, D., Martinez, J. G., & Jager, E. W. H. (2019). Conjugated Polymer Actuators and Devices: Progress and Opportunities. *Advanced Materials*, 31(22), 1808210. <https://doi.org/10.1002/adma.201808210>
- Nejadfard, A., Berns, K., & Vonwirth, P. (2020, August 24-26). *Technical advantages and disadvantages of biarticular actuators in bipedal robots*. 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Moscow, Russian Federation. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.48>
- Rosset, S., Araromi, O. A., Schlatter, S., & Shea, H. R. (2016). Fabrication process of silicone-based dielectric elastomer actuators. *Journal of Visualized Experiments*, 2016(108), e53423. <https://doi.org/10.3791/53423>

- Seurre, L., Aréna, H., Ghenna, S., Soyer, C., Grondel, S., Plesse, C., Nguyen, G. T. M., Vidal, F., & Cattan, E. (2023). Behavior of conducting polymer-based micro-actuators under a DC voltage. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 380, 133338. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133338>
- Tang, X., Li, H., Ma, T., Yang, Y., Luo, J., Wang, H., & Jiang, P. (2022). A Review of Soft Actuator Motion: Actuation, Design, Manufacturing and Applications. *Actuators*, 11(11), 331. <https://doi.org/10.3390/act11110331>
- Ting, M. S., Narasimhan, B. N., Travas-Sejdic, J., & Malmström, J. (2021). Soft conducting polymer polypyrrole actuation based on poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 343, 130167. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130167>
- Wang, X., Li, L., Liu, E., Wang, J., Han, X., Cao, Y., & Lu, C. (2021). High-Performance Multiresponsive Bilayer Actuators Based on Micro-/Nanostructured Polypyrrole for Robust Smart Devices. *American Chemical Society Applied Nano Materials*, 4(5), 5349-5359. <https://doi.org/10.1021/acsnm.1c00689>
- Weng, M., Ding, M., Zhou, P., Ye, Y., Luo, Z., Ye, X., Guo, Q., & Chen, L. (2023). Multi-functional and integrated actuators made with bio-inspired cobweb carbon nanotube-Polymer composites. *Chemical Engineering Journal*, 452, 139146. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139146>
- Yılmaz, O. C., Sen, I., Gurses, B. O., Ozdemir, O., Cetin, L., Sarikanat, M., Seki, Y., Sever, K., & Altinkaya, E. (2019). The effect of gold electrode thicknesses on electromechanical performance of Nafion-based Ionic Polymer Metal Composite actuators. *Composites Part B: Engineering*, 165, 747-753. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.050>
- Zhao, J., Wu, J., Li, B., Du, W., Huang, Q., Zheng, M., Xue, H., & Pang, H. (2016). Facile synthesis of polypyrrole nanowires for high-performance supercapacitor electrode materials. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26(3), 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.05.015>