مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، شهریور 1400، دوره 8، شماره 6، ص.ص. 21- 25

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

تحلیل عددی و آزمایش خواص مکانیکی کامپوزیت یونی-پلیمری-فلزی

حمید سلیمانی‌مهر[1*]، امین نصراله[2]

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- کارشناس، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تهران، کد پستی 1477893855، Soleimanimehr@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

این مقاله به عنوان یکی از مقالات برتر در هفدهمین همایش ملی و ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید ایران (ICME2021) انتخاب شده است.

کلیدواژگان:

کامپوزیت پلیمری-یونی-فلزی

تحلیل المان محدود

مواد هوشمند

الکترومکانیک

چکیده

موادی که خاصیت الکترومکانیکی دارند، در صورتی که تحت اعمال ولتاژ قرار گیرند، دچار تغییر شکل می‌شوند؛ این مواد امروزه کاربردهای متنوعی دارند به همین علت توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در تحقیق انجام شده یک غشا از جنس کامپوزیت یونی-پلیمری- فلزی با هسته‌ی پلیمری از جنس نافیون که یک پلیمر الکتراکتیو می‌باشد و الکترود از جنس پلاتین که یک فلز نجیب است، ساخته شده و تحت اعمال ولتاژهای ثابت 2، 3/3 و 5 ولت قرار می‌گیرد. مقادیر جابجایی به صورت تجربی محاسبه شده و در تحلیل المان محدود قرار داده شدند تا مدول یانگ محاسبه شود. هدف این مقاله بدست آوردن مدول یانگ ماده ساخته شده با استفاده از معلومات ولتاژ و جابجایی و جایگذاری در تحلیل المان محدود می‌باشد. با بررسی‌های صورت گرفته، مدول یانگ ماده‌ی مذکور برابر با $0/5645\times10^9$ پاسکال می‌باشد که عددی با دقت بالا است و می‌توان از آن در کاربردهای مختلف مواد کامپوزیت یونی-پلیمری-فلزی استفاده کرد. همچنین نشان داده شد که برخلاف خاصیت غیر خطی بودن این ماده، مدول الاستیسیته آن تا ولتاژ 5 ولت تغییر چشم‌گیری نمی‌کند.

Numerical and experimental analysis on the properties of ionic-polymer-metal composites

Hamid Soleimanimehr*, Amin Nasrollah

Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1477893855 Tehran, Iran, soleimanimehr@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 April 2021

First Decision: 26 April 2021

Accepted: 7 July 2021

Keywords:

Ionic-polymer-metal composite

Finite element analysis

Smart material

Electromechanics

Abstract

Electromechanical material under applied voltage will be deformed; nowadays these materials have diverse abilities which caused enormous attention and interest on them. In this research, a membrane from ionic – polymer - metal composites are manufactured; its strain is significant. Its main core is based on an electroactive core named Nafion® and the electrodes are made of metals such as Platinum which is a noble metal. Then 3 different voltages applied to the ionic – polymer - metal composites which were 2, 3.3 and 5 volts in step form; it should be mentioned that this is the last safe amount of voltage after measuring the deformation combining it with voltage and analyzing it with finite element method; however, it is a theoretical method. the young module or in the other word elasticity modulus, is measured which is 0.5645×10^9 Pa and is a precise amount which can be used in the future research; it should be mentioned that according to the experimental test, although the geometry and material has nonlinear properties, up to 5 volts.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های یونی-پلیمری-فلزی، امروزه به علت توانایی‌های بسیار بالایی که دارا هستند توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند؛ این ماده با اعمال ولتاژهای کمتر از 5 ولت واکنش نشان می‌دهد و علاوه بر این در صورت جابجایی و تغییرشکل در مقیاس میلی‌ولت، ولتاژ تولید می‌کند که می‌توان از آن در انواع سنسورها استفاده کرد. این مواد در صنایع مختلفی کاربردهای متعددی دارند؛ به عنوان مثال در سیستم‌ها و روبات‌های دریایی، میکروپمپ‌ها، سنسورها و غیره [1]. قابلیت و انعطاف‌پذیری بالای این مواد سبب کاربردی بودن آن‌ها در صنایع مختلف شده است.

کامپوزیت یونی-پلیمری-فلزی از سه لایه اصلی تشکیل شده‌اند: دولایه الکترود و یک لایه پلیمر به اسم نافیون؛ این پلیمر لایه وسطی ماده می‌باشد و اصلی‌ترین بخش ماده‌ی فوق‌الذکر می‌باشد. الکترودها با پیوند یونی به پلیمر متصل شده‌اند. شار یونی و کاتیونی در داخل پلیمر از بخش مثبت به منفی وجود دارد که علت اصلی کرنش و تغییر شکل می‌باشد.

توانایی‌های خاص این کامپوزیت‌ها باعث شده است که این

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Soleimanimehr, A. Nasrollah, Numerical and experimental analysis on the properties of ionic-polymer-metal composites, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 6, pp. 21- 25, 2021 (in Persian)

مواد در برق، مکانیک، تجهیزات پزشکی و بایو و همچنین در بحث جمع آوری انرژی [2] بسیار ارزشمند شوند زیرا این مواد خمش بسیار بالایی را در میان دو الکترودشان می‌توانند ایجاد کنند.

برای ساخت این ماده ارزشمند الکترودها باید از جنس فلزهای نجیب همچون وانادیوم، پالادیوم، پلاتین، طلا و یا نیکل باشند و در برابر اکسیدشدن و واکنش با اکسیژن و هوا مقاوم باشند؛ همچنین به منظور استفاده از این ماده داخل بدن انسان حتما باید سمی بودن و یا سازگاری زیستی جنس الکترود بررسی شود[3].

نافیون از عناصر مختلفی همچون کربن، گوگرد، فلوئور و اکسیژن و البته میزانی ناخالصی سطحی تشکیل شده است؛ فرمول شیمایی این ماده که پلیمری می‌باشد، C7HF13O5SC2F4 است. الکترود از جنس پلاتین Pt می‌باشد که با پلیمر مد نظر پیوندی یونی دارد[4].

برای ساخت کامپوزیت‌های یونی-پلیمری-فلزی پس از انتخاب جنس الکترود و تهیه نمک آن، هسته‌ی پلیمری که غالبا خشک است باید احیا و اصطلاحاً آبدار شود و پس از آن با تغییر عدد اکسایش نمک فلزی، فلز احیا شده بر روی پلیمر رسوب کرده و پیوندی یونی تشکیل دهد. نمایی از ساختار کامپوزیت یونی-پلیمری-فلزی در شکل 1 قابل مشاهده است. همچنین در شکل 2، نوعی از رفتار این ماده در حین اعمال ولتاژ نمایش داده شده است؛ همان طور که مشخص است نوار کامپوزیتی در حین اعمال ولتاژ تغییر شکل می‌دهد[5].

برای درک بهتر میزان جابجایی و مزایای کامپوزیت‌های یونی-پلیمری-فلزی، مقایسه‌ای در جدول 1 صورت گرفته است.

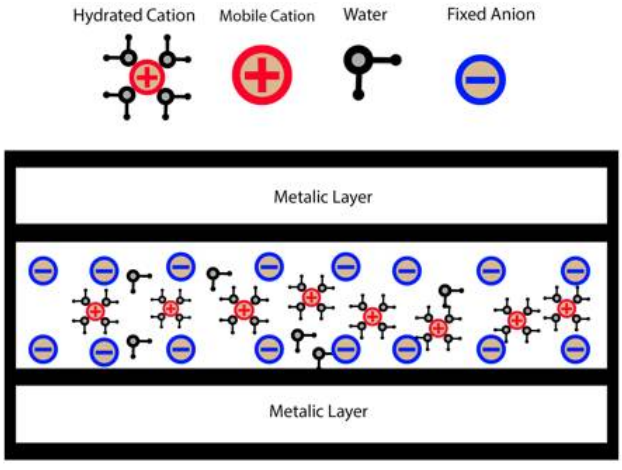

Fig. 1 Construction ionic-polymer-metal composites

شکل 1 ساختار کامپوزیت یونی-پلیمری-فلزی

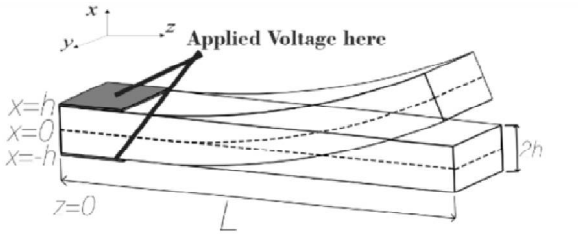

Fig. 2 Scheme of ionic-polymer-metal composites attitude while applying voltage.

شکل 2 شماتیکی از رفتار کامپوزیت حین اعمال ولتاژ

جدول 1 مقایسه کامپوزیت ذکر شده با سایر مواد هوشمند[6]

Table 1 A comparison of above-mentioned composites [6]

	کرنش (%)	تنش (MPa)	بازدهی (%)
پیزواکتریک	1/0	35	>75
اس ام اِی	>4	300>	>8/3
مگنتواستریکیو	2/0	-	<50
کاپموزیت یونی-پلیمری-فلزی	>40	3/0	>30

2- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

روش‌های متفاوتی برای محاسبه‌ی خواص مکانیکی مواد وجود دارد. پس از ساخت کامپوزیت یونی پلیمری فلزی، نیاز به بدست آوردن خواص این ماده برای انجام تحقیقات آتی بسیار بالا است. لذا در این تحقیق به صورت کاملاً عملی ماده فوق‌الذکر ساخته شده و تحت اعمال ولتاژ قرار می‌گیرد و میزان تغییر شکل آن محاسبه می‌شود، سپس توسط روش‌های عددی در نرم‌افزار تحلیل مهندسی نیز مدل‌سازی می‌شود و با روش‌های آزمون و خطا، مدول یانگ و ضریب پوآسون محاسبه می‌شود.

3- روش تحقیق

در تحقیق انجام شده ابتدا کامپوزیت یونی-پلیمری فلزی ساخته شد؛ بدین منظور هسته‌ی اصلی پلیمری یا همان نافیون به روش‌های مختلفی همچون بلاستینگ کاهش ضخامت شد تا این مقدار به 0/7 میلی‌متر برسد. به منظور کاهش خطا در اندازه‌گیری، پس انجام عملیات پرداخت سطح، تصویربرداری الکترونی انجام شد که در شکل 3 قابل مشاهده می‌باشد همچنین برای مشاهده کیفیت سطح، تصویری از بالا گرفته شد که در شکل 4 مشخص است.

پس از انجام عملیات سطح، توسط روش‌های شیمیایی متفاوتی الکترود از جنس پلاتین به دو سطح نافیون اضافه شد. طبق محاسبات صورت گرفته ضخامت هر الکترود برابر با 1 میکرون می‌باشد. تصویر ماده نهایی ساخته شده در شکل 5 قابل مشاهده است.

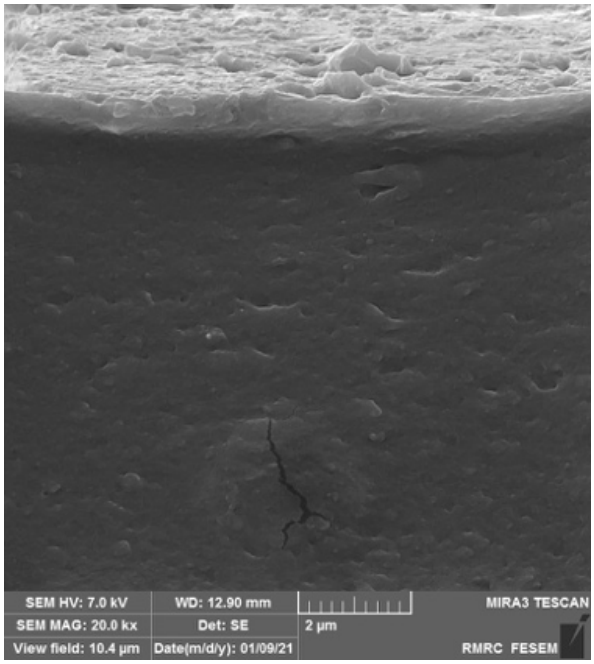

Fig. 3 Cross-section of the polymer-based core

شکل 3 سطح مقطع هسته‌ی پلیمری

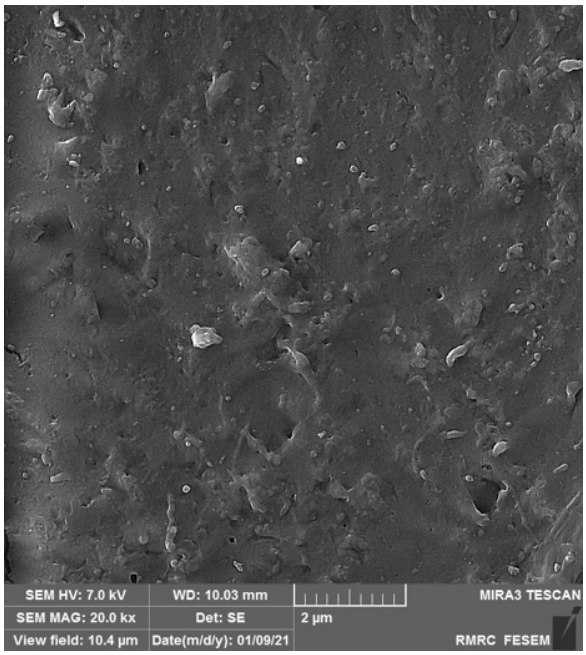

Fig. 4 Surface of the polymer-based core

شکل 4 سطح هسته پلیمری

در مرحله‌ی اول، ابتدا نواری به ابعاد 10 میلی‌متر در 40 میلی‌متر بریده شد. نوار بریده شده در سیستمی قرار گرفت که بتوان به آن ولتاژهای 2، 3/3 و 5 ولت اعمال شود و رفتاری همچون تیری یک سر گیردار داشته باشد. این سیستم در شکل 6 قابل مشاهده است.

همان‌طور که در شکل 6 قابل مشاهده است، نوار از سمت مثبت به سمت منفی انحنا پیدا می‌کند. پس از اعمال ولتاژ به نوار کامپوزیت یونی-پلیمری-فلزی، میزان جابجایی و تغییر شکل در مختصات عمومی مطابق جدول 2 بدست آمد.

Fig. 5 Final manufactured ionic-polymer-metal composites

شکل 5 کامپوزیت یونی-پلیمری-فلزی نهایی ساخته شده

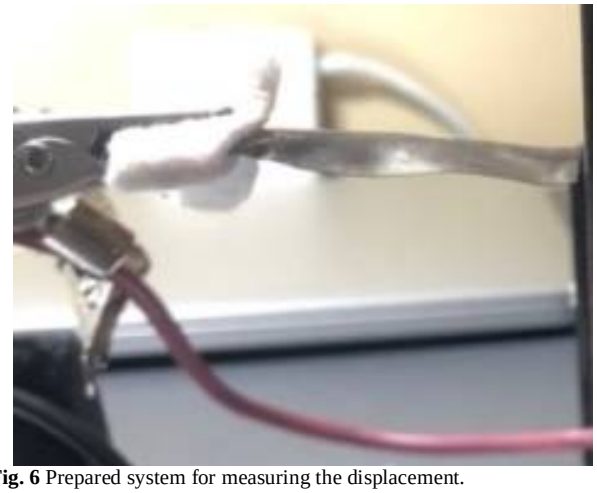

Fig. 6 Prepared system for measuring the displacement.

شکل 6 سیستم آماده شده برای بررسی میزان جابجایی

جدول 2 جاجایی ایجاد شده در نوار بر اثر اعمال ولتاژ مستقیم

Table 2 Displacement of the film affected by the applied DC voltage

ولتاژ اعمالی (V)	جابجایی (mm)
0/2	4/1
3/3	6/6
0/5	11/3

مرحله دوم، مدل سازی نوار کامپوزیتی است. مشخصات این مدل در جدول شماره 3 قابل مشاهده است و نهایتاً مدل دو بعدی طراحی شد؛ در این مرحله شبیه سازی به صورت دو بعدی در نرم‌افزار کامسول مالتی‌فیزیک انجام شده است.

برای تحلیل مدل طراحی شده، ابتدا مش‌بندی و المان‌بندی صورت گرفت. تمامی مش‌ها مثلثی هستند.

از آن‌جا که مشخصات الکترود از جنس پلاتین ثابت و مشخص می‌باشد، این مقدار به صورت داده‌های اولیه و ثابت به ماده مطابق جدول 4 اعمال شد.

جدول 3 ابعاد نوار مدل‌سازی شده

Table 3 Dimensions of the Modeled film

	اندازه (um)
ضخامت الکترود	1
ضخامت هسته	70
طول نوار	40000
عمق نوار	10000

جدول 4 مشخصات مکانیکی پلاتین [7]

Table 4 Mechanical properties of Platinum[7]

خواص	مقدار
مدول یانگ	$1/06\times10^{12}$ pa
ضریب پوآسون	0/385
چگالی	21450 kg/m^3
ضریب گذر دهی	1

سپس خواصی از هسته‌ی اصلی پلیمری ثابت در نظر گرفته شد و مدول یانگ از مقدار اولیه اش افزایش داده شد؛ همزمان که نوار با اعمال ولتاژهای ثابت 2، 3/3 و 5 ولت تغییر شکل می‌هد نوار به شکل 8 تغییر می‌کند این عمل تا زمانی که میزان اختلاف به کمتر از 10 درصد برسد ادامه می‌یابد. مشخصات نافیون در نظر گرفته شده در انتها مطابق جدول 5 می‌شود و مدول یانگ $0/57\times10^9$ است و همچنین قابل ذکر است که تیر مورد بررسی در تحلیل از تئوری تیر تیموشنکو پیروی می‌کند.

جدول 5 مشخصات مکانیکی پلیمر [8]

Table 5 Mechanical properties of the polymer[8]

خواص	مقدار
ضریب پوآسون	0/4870
چگالی	3 kg/m^3
ضریب گذر دهی	385

4- ارائه نتایج و بحث

پس از بررسی میزان جابجایی به صورت کاملاً تجربی با اعمال ولتاژ و تغییر میزان مدول یانگ، نهایتاً مقادیری مطابق با جدول 6 بدست آمد. این مقادیر مقایسه‌ی مقدار عددی و تئوری می‌باشد. قابل ذکر است که مدول یانگ برای ماده‌ی ساخته شده برابر با $0/57\times10^9$ پاسکال شد.

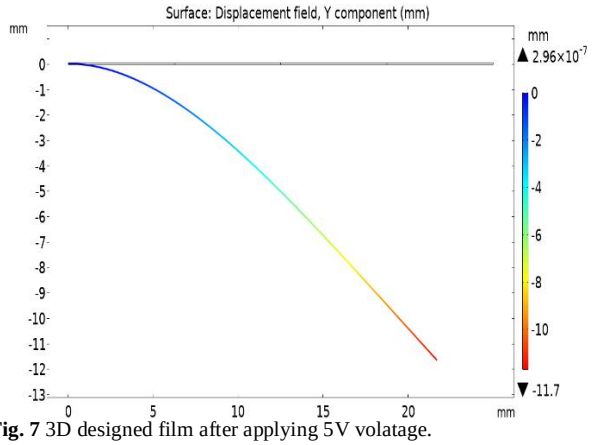

Fig. 7 3D designed film after applying 5V volatage.

شکل 7 نوار دو بعدی پس از اعمال ولتاژ 5 ولت

جدول 6 مقایسه جابجایی در داده‌های تئوری و عملی

Table 6 Comparison of theoretical and experimental data

ولتاژ اعمالی (V)	جابجایی تئوری (mm)	جابجایی عملی (mm)
2	4/3	4/1
3/3	6/5	6/6
5	11/7	11/3

5- نتیجه‌گیری

مواد مرکب یونی-پلیمر-فلزی موادی پرکاربرد هستند که با اعمال ولتاژ، دچار تغییر شکل می‌شوند. مدول یانگ این مواد که به صورت غشا مورد بررسی قرار می‌گیرند را نمی‌توان با تست‌های کشش و یا فشار معمولی مورد بررسی قرار داد؛ لذا با ترکیب مدل عددی و تجربی می‌توان این محاسبه را انجام داد. در این مقاله نشان داده شد که تحلیل عددی به خوبی میتواند رفتار این مواد را بررسی نماید. بدین معنی که مقدار عددی بدست آمده برای مدول یانگ با تقریب نسبتاً بالایی برابر با مدول یانگ نوار کامپوزیتی یونی-پلیمر-فلزی ساخته شده می‌باشد که برابر با $0/5645\times10^9$ پاسکال است. این مقدار با مقادیر مرسوم برای این نوع از مواد تطابق بالایی داشته و قابل استناد در آزمایش‌های آتی است.

همچنین طبق آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شد که مدول الاستیسیته، علی‌رغم خاصیت غیر خطی نافیون، تا ولتاژ 5 ولت تغییر زیادی نمی‌کند.

6- فهرست علایم

C کربن
H هیدروژن
F فلوئور
O اکسیژن
S گوگرد

7- مراجع

[1] Yılmaz O-C., Sen I., Oguz G-B., Ozdemir O., Cetin L., Sarıkanat M., Seki Y, Sever K., Akar E., 2019. "The effect of gold electrode thicknesses on electromechanical performance of Nafionbased Ionic Polymer Metal Composite actuators". Composites *Part B: Engineering*

[2] Shahinpoor M., 2003. "Mechanoelectrical phenomena in ionic polymers". *Math Mech Solids*, 8(3), pp. 8-281.

[3] Shahinpoor M., Bar-Cohen Y., Simpson JO., Smith J., 1998. "Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles - a review". *Smart Materials & Structures*, 7(6), pp. 15-30.

[4] Moeinkhah H., Jung JY., Jeon JH., Akbarzadeh A., Rezaeepazhand J., Park KC., 2013. "How does clamping pressure influence actuation performance of soft ionic polymer-metal composites?". *Smart Mater Struct*, 22(2), pp. 1-11.

[5] Rodrigue H., Wang W., Bhandari B., Han M-.W, Ahn S-H., 2015. "SMA-based smart soft composite structure capable of multiple modes of actuation.". *Composites Part B: Engineering*, 82(1), pp. 8-152.

[6] Swarrup J., Ganguli R., Madras G., 2019. "Studies to improve the actuation capability of low-frequency IPMC actuators for underwater robotic applications". *ISSS: Journal of Micro and Smart Systems*, 8(1), pp. 41-47.

[7] Feng G-H., Hou S-Y., 2018. "Investigation of tactile bump array actuated with ionic polymer–metal composite cantilever beams for refreshable braille display application.". *Sensors and Actuators A: Physical*, 275(1), pp. 137-47.

[8] Yu M., Shen H., Dai ZD., 2017. "Manufacture and Performance of Ionic Polymer-Metal Composites.". *J Bionic* Eng, 4(3), pp. 9-143.