

# طراحی و امکان‌سنجی ساخت میکروگریپر با استفاده از کامپوزیت‌های فلز - بسپار یونی (IPMC)

علمی مقداری (استاد)

سید حنیف محبوبی (دانشجوی دکتری)

مژده سجادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حسین نجات‌پیشکناری (دانشجوی دکتری)

محمدزمان فروتن (دانشجوی کارشناسی ارشد)

قطب علمی طراحی، رباتیک و اتوماسیون، دانشگاه صنعتی شریف

کامپوزیت‌های فلز - بسپار یونی (IPMC)<sup>۱</sup> به‌عنوان حس‌گر یا عملگر با نام «حس‌گر-عملگر نرم» یا «ماه‌پچه‌ی مصنوعی» نیز شناخته می‌شوند. در سال‌های اخیر در زمینه‌ی ساخت، مدل‌سازی و گسترش کاربردهای این مواد شاهد پیشرفت‌های شایانی بوده‌ایم. همچنین اخیراً سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در زمینه‌ی عملگرها و حس‌گرهای هوشمند کاربرد گسترده‌ی یافته است. در تحقیق حاضر با توجه به روش‌های ساخت در مقیاس میکرومتری ایده‌هایی برای طراحی و ساخت میکروگریپر با استفاده از کامپوزیت‌های فلز - بسپار یونی ارائه خواهد شد. ابزار مورد نظر کاربردهای بالقوه‌ی متعددی در سیستم‌های میکروروباتیکی و به‌خصوص برای کار در محیط‌های زیست‌شناختی خواهد داشت. همچنین اثرات غالب در مقیاس کاری این ابزار بررسی شده و مدل فرایند گیرایش اجسام برمبنای رفتار الکترومکانیکی گریپر استخراج خواهد شد.

meghdari@sharif.edu  
mahboobi@mech.sharif.edu  
m\_sajjadi@mech.sharif.edu  
nejat@mech.sharif.edu  
m.z.forootan@mech.sharif.edu

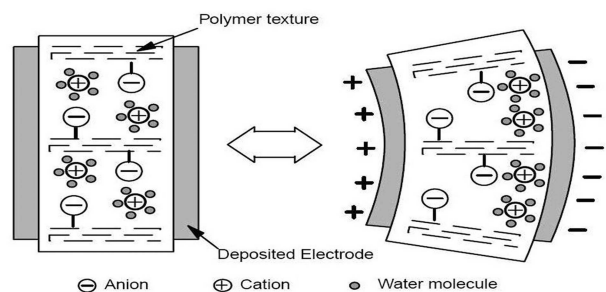
واژگان کلیدی: سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، میکروگریپر رباتیکی، کامپوزیت فلز - بسپار یونی، ماه‌پچه مصنوعی.

## مقدمه

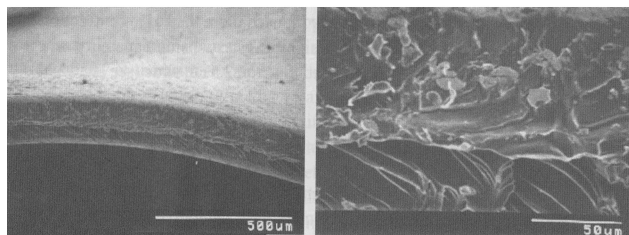
طبق بررسی‌های انجام شده، IPMC یکی از کاراترین بسپارهای الکترواکتیو (EAP) است که قابلیت به حرکت درآوردن سازه‌ها را دارد. ولتاژ تحریک پایین آن و قابلیت تغییرشکل زیاد، برای بسیاری از محققین جذابیت زیادی دارد. در مقابل، نیروی کم خروجی و تکرارناپذیری حرکت آن نکاتی است که باید بیشتر به آن توجه شود تا به‌کارگیری آن عملاً امکان‌پذیر باشد. همچنین خواص آب‌دوستی، که از جنبه‌های مثبت آن محسوب شده، می‌تواند یک عامل منفی در کاربرد آن محسوب شود. در هر صورت محرک یک مبدل انرژی نیز به حساب می‌آید و ولتاژ تحریک پایین مسلماً باعث افزایش جریانی خواهد شد که موجب نیروی خروجی است. بنابراین به نظر می‌رسد که این هم یک عامل محدودکننده است.

بهترین عملکرد این بسپارها در محیط مرطوب است. اصولاً پلی‌الکترولیت‌ها گروه‌های یونی‌شونده‌ی بر روی ستون مولکولی خود تشکیل می‌دهند. این گروه‌های یونی‌شونده از خاصیت تجزیه‌شدن و تشکیل بار خالص در محیط‌های حلال متنوع برخوردارند. این بارهای خالص که به شبکه‌های بزرگ مولکولی متصل شده‌اند و به پلی‌یون معروف‌اند، میدان الکتریکی را به شدت (در حدود  $10^6 V/m$ ) افزایش می‌دهند. لذا ماهیت تغییرشکل‌های الکترومکانیکی این نوع سیستم‌های پلی‌الکترولیتی قابلیت آنها در فعالیت همزمان با میدان الکتریکی خارجی اعمال

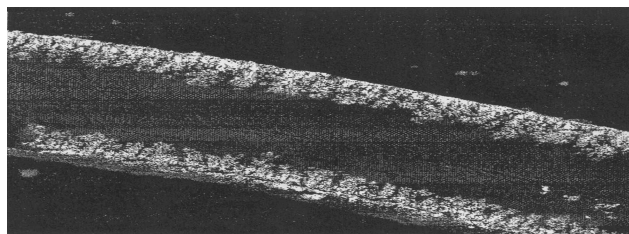
کامپوزیت‌های فلز - بسپار یونی (IPMC) محرک‌های فعالی هستند که در حضور ولتاژ کم تغییرشکل زیادی از خود بروز می‌دهند.<sup>[۱]</sup> چنان که در شکل ۱ نشان داده شده است، حرکت کامپوزیت‌های فلز - بسپار یونی (IPMC) اساساً به دلیل عدم توازن چگالی آب در ضخامت آن صورت می‌گیرد. چون مولکول‌های آب که با یون‌های تعادلی جفت شده‌اند به یک سو منتقل می‌شوند، باعث خمیدگی و تغییرشکل محرک می‌شوند و در نتیجه IPMC به طرف آند حرکت می‌کند.



شکل ۱. توزیع عمومی بار در بسپار یونی حاضر در میدان الکتریکی.<sup>[۲]</sup>



شکل ۲. نمای ریزگراف‌های اسکن‌شده از ساختمان نوارهای IPMC. [۳]



شکل ۳. نفوذ ذرات نقره در داخل ناحیه‌ی مرزی شبکه‌ی بسپاری. [۳]

شده، افزون بر میدان داخلی خود آنها است. به‌ویژه اگر فضای میانی شبکه‌ی پلی‌الکترولیت از مایعی یونی پر شده باشد، آنگاه جابه‌جایی این یون‌ها در این ساختار به دلیل میدان الکتریکی اعمال شده می‌تواند موجب تغییر شکل همزمان شبکه‌ی مولکولی شود. شکل ۲ تصویر میکروسکوپی با دو مقیاس متفاوت از ساختمان نوار IPMC را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳ نفوذ ذرات نقره در داخل ناحیه‌ی مرزی شبکه بسپاری را نشان می‌دهد.

## تاریخچه و کاربردها

در دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی برای اولین بار تلاش‌هایی برای درک سازوکار حس‌گری و تحریک کامپوزیت‌های فلز-بسپاری یونی (IPMC)، کامپوزیت‌های رسانا - بسپاری یونی (IPCC) و ژل‌های بسپاری یونی صورت گرفته است. درباره‌ی طراحی مفهومی، سینماتیک و دینامیک ساختمان ربات‌های شناگر با استفاده از ژل‌های یونی الکترواکتیو بحث‌هایی صورت گرفته است. [۴، ۵] در این بررسی‌ها مجموعه‌ی از معادلات انتقال یون، همراه با معادلات پیوستگی، پایداری اندازه‌ی حرکت و پایداری انرژی با در نظر گرفتن اثر میدان الکتریکی اعمالی ارائه کرد. درباره‌ی مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی ماهیچه‌های بسپاری کنترل‌شده با الکتروسیسته، به‌عنوان مواد فعال مورد استفاده در سازه‌های قابل تطبیق، مقالاتی ارائه شده است. [۶، ۷] و با فرض معادلات نئو-هوکین برای کشسانی شبکه‌ی بسپاری، یک شبیه‌سازی اجزاء محدود دوبعدی از تحرک صفحه‌ی ژل بسپاری یونی پلی‌الکترولیت ارائه شده است. اخیراً مدل‌های قابل قبولی از ژل‌های بسپاری یونی به‌عنوان ماهیچه‌های مصنوعی قابل کنترل الکتریکی از محیط‌های دینامیکی مختلف ارائه شده است، که برای دست‌یابی به نتایج نظری و تجربی بر روی غشاء‌های غیر یونی بسپارهای پلاتینی ماهیچه‌های مصنوعی مطالعه‌ی این نوشتارها ضروری است.

برای فرموله‌کردن یک نظریه‌ی میکروالکترومکانیکی درباره‌ی ژل‌های بسپاری یونی، به‌عنوان ماهیچه‌های مصنوعی در کاربردهای رباتیکی تلاش‌هایی صورت گرفته است. [۸-۱۲] در خصوص خمش کامپوزیت‌های پلاتین با غشای پلی‌الکترولیت از طریق تحرک الکتریکی نیز بحث‌های بسیار شده است [۱۳] و با در نظر گرفتن جمله‌ی بسای الکترواسمزی در معادلات انتقال نظریه‌ی درباره‌ی سازوکارهای تحریک در

IPMC ارائه شده است. محققین مدلی از پاسخ الکترومکانیکی کامپوزیت فلز - بسپاری یونی بر مبنای نیروهای دافعه-جاذبه‌ی الکترونیکی در IPMC ارائه کردند [۱۴] اما بعدها ضمن تجدیدنظر بر تحقیق خود، بر نقش انتقال کاتیون‌های آب‌پوشی شده در داخل خوشه‌ها و شبکه‌ی پلی‌الکترولیت در IPMC تأکید کردند. [۱۵]

مدلی از محرک IPMC برای کاربردهای رباتیکی بر مبنای پدیده‌های شیمی-فیزیکی در تادوکورو [۱۶] ارائه شده است. به‌منظور توصیف خصوصیات لازم برای درک اساس سازوکار حس‌گری و تحریک، نمودارهایی از نیروی متوقف‌کننده نسبت به زمان برای یک نوار خم‌شونده‌ی بسپاری یونی تحت موج‌های مختلف سینوسی، مثلثی، مربعی و دندان‌اره‌ی رسم کردند. [۱۷]

ماهیچه‌های IPMC به‌کارگرفته شده در این تحقیق از یک غشاء یونی فلئوئوردار (نفیون-۱۱۷) که به‌صورت شیمیایی با فلزی نظیر نقره یا پلاتین مرکب، تشکیل شده است. یکی از خواص جالب این ماده قابلیت جذب مقادیر زیادی از یک حلال قطبی مانند آب است. نقره، یونی فلزی است که به‌وسیله‌ی ناحیه‌ی آب‌دوست بسپاری احاطه شده و به‌طور پیوسته به اتم‌های فلزی نظیرش تغییر می‌یابد که این سبب شکل‌گیری الکترودهای دندان‌اره‌ی می‌شود.

نفیون ترکیبی بسپاری از پرفلورینات است که با داشتن گروه سولفونیک اسید از قابلیت تعویض یون برخوردار می‌شود که به‌صورت پودر و نیز به‌صورت غشا کاربردهای وسیعی به‌عنوان کاتالیزور تجاری دارد. [۱۸] این بسپاری به دلیل آن که می‌تواند خواص متفاوتی از خنثی تا اسیدی قوی و قلیایی قوی ایجاد کند، ضمن آن که در شرایطی احیاء‌کننده و اکسایش‌دهنده نیز می‌باشد، بسیار جالب و سودمند است.

فلورو سولفونیل دی فلورو استیل فلورید یک حد واسط بسیار مهم در صنایع تولید غشاهای تعویض یونی (نظیر نفیون) به‌شمار می‌آید. نفیون یک غشاء تعویض یونی است که در ساول‌های الکترولیتیک، مخصوصاً در الکترولیز کارورسدیم برای تهیه‌ی کلرو و سود سوزآور، کاربردهای بسیار وسیعی دارد. از دیگر کاربردهای تجاری رزین‌های تعویض یون فلورینه، ساخت بسپارهایی با هدایت الکتریکی است.

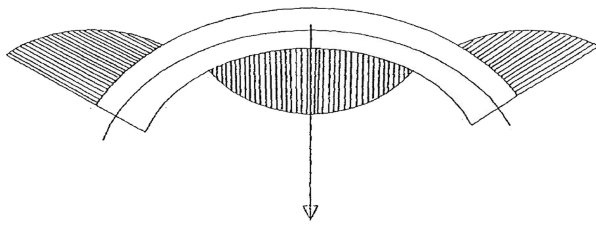
درباره‌ی کاربرد مواد IPMC با غشاء یونی به‌عنوان حس‌گر تحقیقاتی انجام شده است [۱۹] که ضمن آن، از غشاء این مواد به‌عنوان حس‌گر فشاری در داخل محفظه‌ی کوچکی که یک شتاب‌سنج کوچک را می‌ساخت، استفاده کردند. همچنین پدیده‌ی تأثیر ژل الکتریکی انعطاف‌پذیر در ارتباط با حس‌گری دینامیکی ژل بسپاری یونی مورد بحث قرار گرفته است. [۱۱]

اخیراً محرک‌های ماهیچه‌های مصنوعی براساس تحریک‌کننده‌های زیست‌شناختی ساخته شده‌اند. برای انجام این منظور، بسپارهای الکترواکتیو (EAP) قابلیت لازم را دارند و به‌لحاظ برخورداری از قابلیت کوچک‌کردن مجموعه بسیار سودمندند؛ خواص مکانیکی آنها نیز کاملاً شبیه سیستم‌های زیست‌شناختی است. [۲۰] در کاربردهای رباتیک محرک‌های ماهیچه‌های مصنوعی از بسپارهای الکترواکتیو مانند IPMC، ژل‌های بسپاری-یونی، بسپارهای رسانا و کشپارهای (الاستومرهای) دی‌الکتریک استفاده شده است. در دهه‌ی اخیر از IPMC بیشتر به‌عنوان محرک استفاده شده و تحقیقات پایه‌ی و ارزنده‌ی در این خصوص انجام شده است.

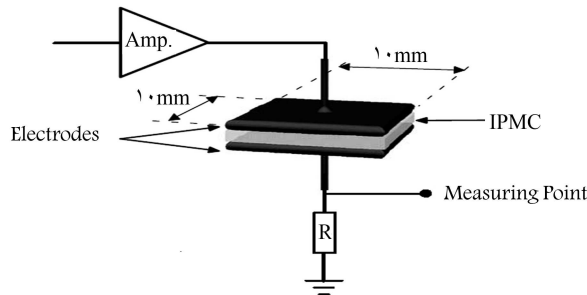
## مدل‌های موجود برای رفتار ماهیچه‌های مصنوعی [۲۱]

### الف) مدل الکترومکانیکی

این مدل نوار IPMC را یک تیر یک سرگیردار اوپلر-برنولی در نظر می‌گیرد و جابه‌جایی هر نقطه در طول تیر را تابعی از موقعیت آن نقطه و زمان بیان می‌کند.



شکل ۵. توزیع غیر یکنواخت نیروهای کولنی در راستای محور زل مختصات فضایی هر واحد بین  $5^{nm}$  - ۳ است. [۲۸]



شکل ۶. مدار الکتریکی برای آزمایش مقدماتی. [۲]

#### د) مدل الکتریکی معادل IPMC

این مدل در واقع مداری پیدا می‌کند که رفتاری شبیه به رفتار نوار IPMC از خود نشان می‌دهد. این مدل تجربی عملت رفتار نوار را بررسی نمی‌کند. برای به دست آوردن مدل الکتریکی نوار ژل بسیار یونی بین دو الکترود هم‌اندازه خود ثابت شده و افت ولتاژ در عرض ضخامت آن اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۶).

#### ه) مدل سازی ترمودینامیک بازگشت‌ناپذیر خطی و حل در حالت پایدار

اساس حس‌گری و تحریر نوار ژل بسیار یونی را می‌توان با استفاده از ترمودینامیک خطی بازگشت‌ناپذیر توسط رابطه‌ی آنساگر بیان کرد. در حالت استاتیکی اثرات الکترومکانیکی بر اساس انتقال یون (عمود بر ماده) و حلال (که می‌تواند آب باشد) قابل توصیف است. نیروهای مزدوج میدان الکتریکی و گرادیان فشار هستند. با استفاده از رابطه‌ی گفته شده و رابطه‌ی بین گرادیان فشار و انحنا [۲۲]، و نیز رابطه‌ی انحنا و گشتاور برای تیر اویلر-برنولی به رابطه‌ی ساده‌ی بین انحنا و میدان الکتریکی اعمالی می‌رسیم:

$$\tilde{\kappa}_E = (L/KY)\tilde{E} \quad (۴)$$

که در آن  $L$  ضریب عرضی آنساگر،  $Y$  مدول یانگ مربوط به ژل بسیار یونی و  $E$  میدان الکتریکی اعمالی است.  $K$  ضریب گذردهی داریسی است که مقدار آن معادل  $K \sim 10^{-18} m^2 / cP$  است. [۲۸]

#### روش‌ها و مراحل پیشنهادی برای تولید میکروگرید IPMC

محققین در نخستین ایده‌ی استفاده از IPMC در میکروگریدهای رباتیکی [۲۳] از برش لیزری به‌عنوان روش دست‌یابی به الگوهای ریزسنجی استفاده کردند؛ اگرچه

تنشی که در تیر در اثر اعمال میدان الکتریکی القا می‌شود با رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$\sigma_E(S, \eta, t) = \epsilon_0 DE^{*2}, Pa \quad (۱)$$

که در آن  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ (و معادل  $10^{-12} c^2 / Nm^2$ ) و  $D$  ثابت دی‌الکتریک قسمت بسیار IPMC است. این تنش معادل تنش القا شده توسط بارها در لایه‌ی فازی نزدیک سطح در نظر گرفته می‌شود و به این ترتیب انحناء که رابطه‌ی ساده‌ی با گشتاور و در نتیجه تنش در طول تیر دارد به صورت تابعی از میدان الکتریکی متوسط  $E_{ave}^* = H^{-1} \int E^*(S, \eta, t) d\eta$  به دست می‌آید:

$$K_E(S, t) = a^* \times E_{ave}^{*2} \quad (۲)$$

$$a^* = \lambda \pi \epsilon_0 D_{ave} / EH \quad (۳)$$

که در آن  $a^*$  مشخصه‌ی ماده، و  $D_{ave}$  ثابت دی‌الکتریک متوسط سطح میانی مقطع تیر است.

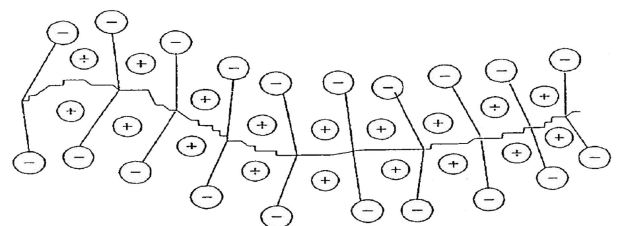
#### ب) مدل پخش پیوستار الکترومکانیکی برای خمش نامتقارن ژل‌های بسیار یونی

در این مدل تراوش الکتریکی، حرکت ذرات معلق مایع به‌وسیله‌ی نیروی الکتروفورز<sup>۲</sup> و پخش یونی گونه‌های مختلف مد نظر قرار می‌گیرد، و توزیع فضایی کاتیون‌ها و آنیون‌ها درون شبکه‌ی ژل بسیار یونی -- قبل و بعد از اعمال میدان الکتریکی -- بررسی می‌شود. سپس عبارت دقیقی برای بیان مشخصات تغییر شکل ژل بسیار یونی به صورت تابعی از عوامل مختلف ایجاد می‌شود. این عوامل شامل قدرت میدان الکتریکی یا گرادیان ولتاژ، ابعاد ژل بسیار یونی، و مشخصات فیزیکی ژل بسیار یونی مانند ضریب پخش یون‌های مثبت ( $D_{GM}$ ) و یون‌های منفی ( $D_{GP}$ )، ضریب کشسانی ( $E$ )، دما ( $T$ )، غلظت یون‌های مثبت ( $C_{GM}$ )، غلظت یون‌های منفی ( $C_{GP}$ )، مقاومت ( $R_g$ ) و ظرفیت ژل بسیار یونی ( $C_g$ ) هستند.

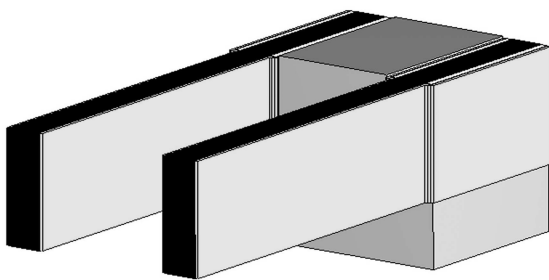
#### ج) مدل سازی میکروالکترومکانیکی تغییر شکل نامتقارن ژل‌های بسیار یونی

در این مدل فرض شده است که قطعات بسیاری که حامل بارهای مثبت‌اند، در طول یک زنجیره‌ی بسیاری به صورت استوانه‌یی توزیع شده‌اند و مستقل از زاویه‌ی استوانه‌یی  $\theta$  هستند (شکل ۴).

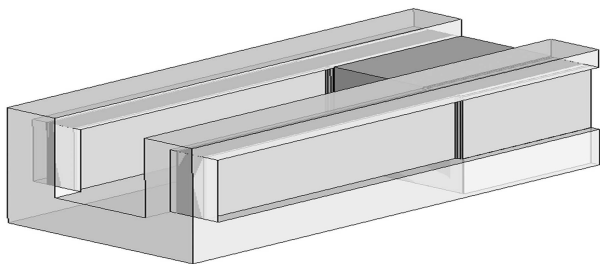
با این فرض، و با در نظر گرفتن میدان دافعه و جاذبه میان ردیف‌های بارهای ثابت یا متحرک همسایه در ژل بسیار یونی می‌توان نیروهای دافعه و جاذبه‌ی کولنی مؤثر در تغییر شکل ژل بسیار یونی را محاسبه و رفتار آن را پیش‌بینی کرد (شکل ۵). در این مدل با فرض رفتار تئو-هوکین برای نوار ژل بسیار یونی پس از یافتن رابطه‌ی تنش برحسب پارامترهایی مانند بار جمع‌شده روی سطح و مشخصات هندسی نوار می‌توان تغییر شکل آن را به دست آورد.



شکل ۴. هندسه‌ی فضایی یک قطعه‌ی بسیاری محلی با بارهای ثابت. [۲۸]



شکل ۸. شکل نهایی طرح اول برای ساخت میکروگرید.



شکل ۹. لایه‌های قربانی به صورت شفاف‌تر در شکل دیده می‌شوند. این لایه‌ها پس از نشان دادن فلز حل می‌شوند.

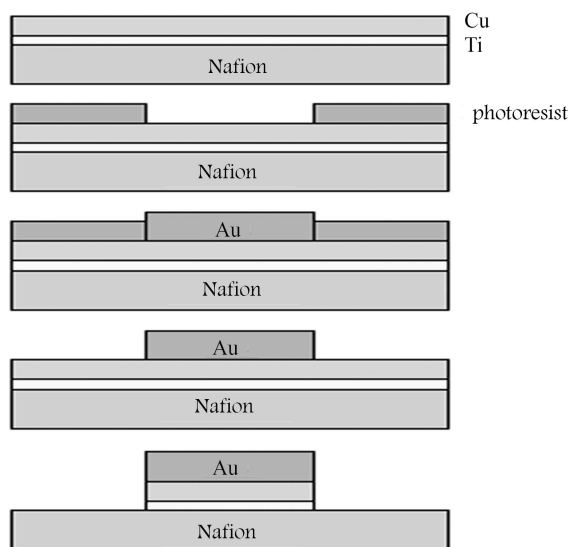
جنس نفیون است که در بخش‌های ابتدایی در مجاورت با الکترودهای مسی قرار می‌گیرد. مرحله‌ی بعدی لایه‌نشانی فلز نقره است که طی آن روی دو سمت عرضی نوارهای نفیون را می‌پوشانند. لازم به ذکر است که وجود لایه‌های قربانی در سایر جهات باعث پوشیدگی انتخابی سطوح مورد نظر خواهد شد (شکل ۹) در نهایت با حل شدن لایه‌ی قربانی سطوح جانبی نوارها بدون لایه‌ی فلزی باقی می‌مانند. طول، ارتفاع و ضخامت هر یک از عملگرها به ترتیب ۳۰۰، ۱۰۰ و ۳۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است.

این روش به خاطر نسبت زیاد ارتفاع به ضخامت در نوار ژل بسیار یونی، در کاربرد لایه‌نشانی مشکل‌ساز است. علاوه بر آن الگوی لایه‌ی قربانی کمی پیچیده است.

### طرح دوم

طرح دوم برای میکروگرید شامل ساخت لایه‌به‌لایه‌ی گرید از راستایی دیگر است. در این روش از یک الگوی ارائه‌شده<sup>[۲۸]</sup> برای ساخت کامپوزیت IPMC استفاده می‌کنیم. شکل ۱۰ نمای شماتیک این طرح را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود در این طرح، تیرها نسبت به یکدیگر در راستایی عمودی قرار دارند و بدین ترتیب با روش‌های مرسوم میکروماشین‌کاری موجود سازگاری بیشتری دارد. لازم به ذکر است که تیر زیرین از جنس سیلیکون بوده و برخلاف تیر بالایی از جنس IPMC فعال نیست. تیر بالایی می‌تواند شامل سیلیکون و IPMC یا فقط شامل IPMC باشد. در صورت وجود لایه‌ی سیلیکونی در تیر بالایی استحکام آن افزایش می‌یابد و بدین ترتیب انعطاف‌پذیری آن در گیرایی اجسام نرم کاهش یافته و ولتاژ لازم برای تحریک آن بیشتر خواهد شد. مراحل ساخت نوار کامپوزیت استفاده شده در این طرح، طبق شکل ۱۱ عبارت خواهد بود از:

۱. استفاده از سیلیکون به عنوان زیرلایه همراه با الکترودهایی از جنس مس با هدف برقراری ارتباط الکتریکی (لایه‌ی مذکور قبلاً توسط لیتوگرافی برای زدایش در مراحل بعدی آماده شده است)؛



شکل ۷. روند تولید محرک IPMC با استفاده از نفیون و کامپوزیت‌های فلزی.<sup>[۲۹]</sup>

این روش علی‌رغم سادگی و سرعت بالا از دقت کافی برخوردار نیست. آنان در طول سالیان گذشته تحقیقات گسترده‌ی در راستای ایده‌ی میکروگرید انجام داده‌اند.<sup>[۲۴-۲۷]</sup> در پژوهش حاضر به دنبال روش‌های مبتنی بر میکروماشین‌کاری سطحی خواهیم بود. روش‌هایی که برای ساخت نوار کامپوزیت در اندازه‌ی میکرو استفاده می‌شود باید با دیگر روش‌های موجود تولید سیستم‌های میکروالکترومکانیکی هماهنگ باشد تا بتوان در ادامه‌ی تولید، قطعه‌ی از نوار کل سازه را به عنوان گرید ایجاد کرد. روش اول شامل نشان دادن نانوپودر نقره روی نوار نفیون است.<sup>[۲۸]</sup> فرایند جدید ساخت محرک IPMC مشتمل بر استفاده از نانوپودر نقره است که شامل قالب‌گیری محلول رقیق نفیون با نانوپودر نقره روی شیشه، فشردن و چسباندن با استفاده از محلول نفیون روی فیلم الکتروود و اضافه کردن لایه‌ی چسبیده، لایه‌نشانی الکتروود<sup>۳</sup> نقره و شکل‌دهی الکتریکی نیکل برای ساخت صفحه‌ی اتصال است. این روش در قسمت پیشین توضیح داده شده است که شامل نشان دادن فلز روی یک سطح است -- بدون یونیزه کردن آن، به طوری که در نهایت فلز نشانده شده به صورت اتم فلزی بماند.

روش دوم نشان دادن فلز به روش الکتروود روی نفیون است.<sup>[۲۹]</sup> روند ساخت محرک IPMC در شکل ۷ نشان داده شده است. الکتروودهای فلزی از لایه‌های دانه‌دار تیتانیوم و مس و لایه‌ی ضخیم‌تری از طلا تشکیل شده است. برای تمیز شدن سطح نفیون، نمونه‌ی آن را ابتدا در اسیدکلریدریک می‌جوشانند؛ سپس به منظور افزایش چسبندگی سطح آن را مورد کنده‌کاری (پرتاب آرگون) قرار می‌دهند؛ آنگاه لایه‌های دانه‌دار (با ضخامت ۵۰۰ آنگستروم برای تیتانیوم و ۲۵۰۰ آنگستروم برای مس) را به روی غشاء در خلاء پرتاب می‌کنند. بدین ترتیب طلا تا ۲ میکرومتر صفحه‌نشانی می‌شود تا الکتروودها تکمیل شوند. الکتروودها هنگام آزمایش با نوار سمباده چسبندگی خوبی نشان دادند.

### طرح‌های پیشنهادی برای میکروگرید

#### طرح اول

این طرح شامل دو تیر یک‌سرگردار از جنس IPMC است که نسبت به هم در یک راستای افقی قرار می‌گیرند (شکل ۸). فرایند ساخت بر مبنای ایجاد دو تیر از

## مدل سازی

در این بخش، تحلیلی از نیروهای مبادله شده بین ذرات و تیرهای یک سرگردار ارائه می شود و سپس براساس مدل ارائه شده مقدار ولتاژ محرک اعمالی به IPMC برای نگاه داری ذره تحت تأثیر عوامل خارجی محاسبه می شود. شکل ۱۲ وضعیت قرارگیری ذره ی کروی در گریز را نمایش می دهد.

رابطه تنش و کرنش بر مبنای قانون هوک و با فرض اعتبار کشسانی خطی قابل استفاده است. همچنین می توان از سایر معادلات سازگاری غیرخطی بین تنش و کرنش نیز استفاده کرد.<sup>[۱۸]</sup> با فرض اول، بیشترین تنش ایجاد شده در تیر از رابطه ی ۵ به دست می آید:

$$\sigma = \frac{Mh}{2I} \quad (5)$$

که در آن  $M$  بیشینه ی گشتاور در تیر IPMC،  $h$  ضخامت تیر و  $I$  گشتاور اینرسی تیر هستند. روابط هندسی بین کرنش، شعاع انحنا، ضخامت و طول تیر طبق رابطه ی ۶ و ۷ است:

$$\epsilon = \frac{h}{2\rho} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{L^2 + \delta^2}{2\delta} \approx \frac{L^2}{2\delta} \quad (7)$$

که در آنها  $L$  طول تیر،  $\delta$  خیز تیر،  $\rho$  شعاع انحنای تیر است. همچنین رابطه ی بین گرادیان فشار و تنش در تیر عبارت است از:

$$\nabla p \cong \frac{2\sigma}{h} \quad (8)$$

از طرفی با توجه به نحوه ی عملکرد IPMC، رابطه ی بین گرادیان فشار و میدان الکتریکی اعمال شده عبارت است از:<sup>[۱۸]</sup>

$$\nabla p = \frac{\lambda}{K} E \quad (9)$$

که در آن  $\lambda$  ضریب کراس،  $K$  ضریب گذردهی دارسی، و  $E$  میدان الکتریکی است. با استفاده از رابطه های ۸ و ۹ داریم:

$$\frac{2\sigma}{h} = \frac{\lambda}{K} E \quad (10)$$

از طرفی طبق قانون هوک داریم:

$$\sigma = Y \epsilon \quad (11)$$

که در آن  $\epsilon$  کرنش، و  $Y$  مدول یانگ است. با جایگزینی رابطه ی ۱۱ در رابطه ی ۵ داریم:

$$\frac{2Y\epsilon}{h} = \frac{\lambda}{K} E \quad (12)$$



شکل ۱۲. مدل ساده از عملگر IPMC و ذره ی گرفته شده.

۲. نشاندن لایه یی از فلز نقره به روش الکترولس؛

۳. قالب گیری محلول رقیق نفیون با نانوپودر نقره روی لایه ی فلزی: از محلول رقیق نفیون برای حل کردن نانوپودر نقره و قالب گیری محلول آن استفاده می شود (محلول ۰/۵٪ Ag-Nafion®، ۰/۲ g/ml)؛

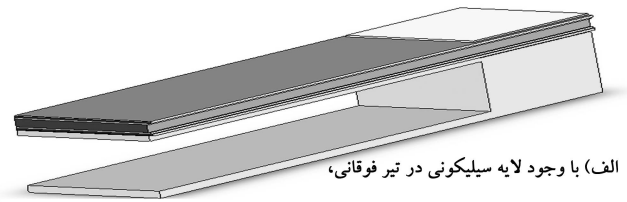
۴. برای کامل کردن ساندویچ IPMC می توان این فرایند را با ترتیب معکوس تکرار، و لایه ی فوقانی نانوپودر نقره را تکمیل کرد. راه دیگر نشاندن نقره به دیگر روش های فیزیکی یا شیمیایی (مثل روش بخار فلز یا پرتاب فلز روی سطح بسیار<sup>[۳۰]</sup>) است؛

۵. نشاندن نقره به روش الکترولس بر روی لایه ی قبلی فلز نقره؛

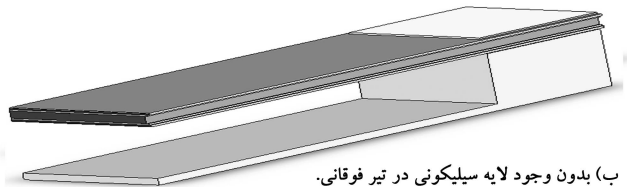
۶. لایه نشاننی، الگودهی و زدایش مس با هدف تشکیل الکترودهای رویی مسی؛

۷. زدایش لایه ی سیلیکونی.

طول، عرض و ضخامت عملگر به ترتیب ۴۰۰، ۱۰۰ و ۲۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. این روش از جهت سازگاری با روش های ساخت سیستم های میکروالکترومکانیکی از روش قبلی کاربردی تر است و امکانات مورد نیاز برای انجام آن در کشور موجود است.

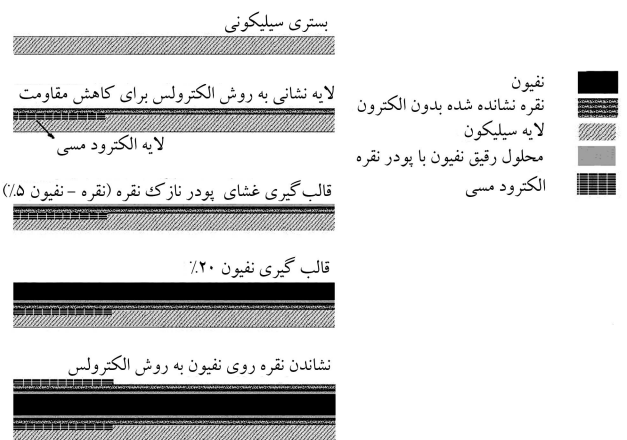


الف) با وجود لایه سیلیکونی در تیر فوقانی،



ب) بدون وجود لایه سیلیکونی در تیر فوقانی.

شکل ۱۰. شکل نهایی میکروگر بیر در طرح دوم.



شکل ۱۱. مراحل ساخت نوار کامپوزیت استفاده شده در طرح دوم.

همچنین از جایگزینی رابطه‌ی ۶ در رابطه‌ی ۱۲ داریم:

$$\frac{2Y}{\rho} = \frac{\lambda}{K} E \quad (13)$$

و با جایگزینی رابطه‌ی ۷ در رابطه‌ی ۱۳ داریم:

$$\frac{4Y\delta}{L^2} = \frac{\lambda}{K} E \quad (14)$$

حال با توجه به رابطه‌ی بین ولتاژ و میدان الکتریکی  $E = \frac{V}{h}$  داریم:

$$\delta = \frac{\lambda L^2 V}{4YKh} \quad (15)$$

در اثر اعمال ولتاژ به تیر IPMC، این تیر خم شده و در اثر برخورد با ذره نیرویی بین آنها مبادله می‌شود. از طرفی تیر دیگر نیز در مقابل پایین آمدن ذره مقاومت می‌کند. رابطه‌ی بین جابه‌جایی‌های ناشی از اعمال ولتاژ، نیروی به وجود آمده و فاصله‌ی موجود عبارت است از:

$$\frac{\lambda L^2 V}{4YKh} - \frac{PL^2}{2Y_1I_1} + \frac{PL^2}{3Y_2I_2} = \delta \quad (16)$$

که در آن  $P$  نیروی عمودی اعمال شده به ذره است.

ولتاژ اعمال شده به ذره باید به اندازه‌ی باشد که بتواند نیروی خارجی  $F$  را تحمل کند. از طرفی رابطه‌ی نیروی اصطکاک به وجود آمده بین ذره و تیرها عبارت است از: [۲۱]

$$f_i = \mu_i N \quad i = 1, 2 \quad (17)$$

$$N = A + P \quad (18)$$

$$A = 4\pi R\gamma_L \quad (19)$$

که در آن‌ها  $f$  نیروی اصطکاک،  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $A$  نیروی چسبندگی بین ذره و تیر،  $R$  شعاع ذره،  $\gamma_L$  انرژی سطحی مایع بایستی نیروی اصطکاک بین ذره و تیر نیروی خارجی را جبران کند، یعنی:

$$F = f_1 + f_2 = (\mu_1 + \mu_2)N = (\mu_1 + \mu_2)(4\pi R\gamma_L + P) \quad (20)$$

$$P = \frac{F}{\mu_1 + \mu_2} - 4\pi R\gamma_L \quad (21)$$

با جایگزینی رابطه‌ی ۲۱ در رابطه‌ی ۱۶ داریم:

$$\frac{\lambda L^2 V}{4YKh} + \frac{L^2}{3} \left( \frac{F}{\mu_1 + \mu_2} - 4\pi R\gamma_L \right) \left( \frac{1}{Y_2I_2} - \frac{1}{Y_1I_1} \right) = \delta \quad (22)$$

$$V = \left( \delta + \frac{L^2}{3} \left( \frac{F}{\mu_1 + \mu_2} - 4\pi R\gamma_L \right) \left( \frac{1}{Y_1I_1} - \frac{1}{Y_2I_2} \right) \right) / \left( \frac{\lambda L^2}{4YKh} \right) \quad (23)$$

رابطه‌ی ۲۳، ارائه‌گر رابطه‌ی بین ولتاژ و نیروی اعمالی برحسب پارامترهای مختلف سیستم است. همان‌طور که دیده می‌شود ولتاژ با وزن ذره رابطه‌ی مستقیم دارد و با افزایش وزن ذره، ولتاژ اعمالی به صورت خطی افزایش می‌یابد. کامپوزیت‌های فلز - بسیار یونی قادر به تحمل نیروی عرضی تا حدود ۴۰ برابر وزن خود هستند. [۲۲] با توجه به این که طول، عرض و ضخامت عملگر به ترتیب ۴۰۰، ۱۰۰ و ۲۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است، جرم یک میکروتیر برابر است با:

$$M = \rho V \approx 2.75 \times 10^{-6} \frac{gr}{m^3} \times 8 \times 10^{-12} m^3 = 2 \times 10^{-6} gr$$

لذا این میکروتیر قادر به تحمل نیرویی تا حدود  $F = 7.84 \times 10^{-7} N$  است؛ و به عبارت دیگر ذراتی با جرم کم‌تر از  $M = 8 \times 10^{-6} gr$  قابل تحمل‌اند (فرض کرده‌ایم که حداقل ضریب اصطکاک ایستایی بین میکروتیر و ذره در حدود ۰٫۲۵ است). از طرفی برای مقایسه، جرم ذره‌ی بی به شعاع ۳۰ میکرومتر که چگالی  $\rho = 4 \times 10^{-6} \frac{gr}{m^3}$  را دارد برابر است با:

$$M = \rho V = 4 \times 10^{-6} \frac{gr}{m^3} \times \frac{4}{3} \times \pi \times 30^3 \times 10^{-18} m^3 = 4.752 \times 10^{-7} gr$$

همان‌طور که دیده می‌شود جرم ذره نسبت به جرم قابل تحمل ناچیز است.

## نتیجه‌گیری

در این نوشتار ابتدا مروری بر اصول عملکرد، تاریخچه و کاربردهای کامپوزیت‌های فلز-بسیاریونی صورت پذیرفت تا پتانسیل کاربرد عضلات مصنوعی به‌عنوان میکروگرید بر بررسی شود. این ابزار می‌تواند به‌عنوان بخشی از یک سیستم میکروروباتیکی و به‌خصوص در کاربردهای زیست‌شناختی مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه، با توجه به برخی روش‌های نوین برای تولید نوار کامپوزیت و سایر اصول حاکم بر میکرو ماشین‌کاری، دو طرح برای ساخت میکروگرید ارائه شد که یکی از آن دو ساده‌تر و عملیاتی‌تر بود. در پایان مدل‌سازی ابزار در فرایند گیرایش اجسام با هدف تعیین ولتاژ لازمه برای عملکرد مطلوب صورت گرفت.

## پانویس

1. ionic polymer-metal composite
2. electrophoresis
3. electroless plating

## منابع

1. Nemat-Nasser, S. and Thomas, C. "Ionomeric polymer-metal composites, electroactive polymer (EAP) actua-

tors as artificial muscles - reality, potential and challenges", edited by Bar-Cohen, SPIE, Chap. 6, (2001).

2. Jung, K.; Nam, J.; and Choi, H. "Investigations on actuation characteristics of IPMC artificial muscle actuator", *Sensors and Actuators A*, **107**, pp. 183-192 (2003).
3. Bringing material to life (IPMC Kit User's Manual), Artificial Muscles Science, Environmental Robots Inc., (2003).
4. Shahinpoor, M. "Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using active polymer ionic polymeric gels", Proc.

- ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. on Active Materials & Adaptive Structures, Alexandria, VA, (Nov. 1991).
5. Shahinpoor, M. "Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using ionic polymeric ionic polymeric gel muscles", *Smart Mater. Struct.*, **1**, pp. 91-94 (1992).
  6. Segalman, D.; Witkowski, W.; Adolf, D.; and Shahinpoor, M. "Theory of electrically controlled polymeric muscles as active materials in adaptive structures", *Smart Mater. Struct.* **1**, pp. 44-54 (1992).
  7. Segalman, D.; Witkowski, W.; Adolf, D.; and Shahinpoor, M. "Numerical simulation of dynamic behavior of polymeric ionic polymeric gels", ICIM'92: Proc. 1st. Int. Conf. on Intelligent Materials, Tsukuba, Japan, (July 1992).
  8. Shahinpoor, M. "Micro-electro-mechanics of ionic polymeric ionic polymeric gels as artificial muscles for robotic applications", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Atlanta, GA, (May 1993).
  9. Shahinpoor, M. "Electro-mechanics of bending of ionic polymeric gels as synthetic muscles for adaptive structures adaptive structures and material systems", G.P. Carman and E. Garcia, (ed.), New York, ASME Publication AD-35, pp. 11-22 (1993).
  10. Shahinpoor, M. "Continuum electromechanics of ionic polymeric ionic polymeric gels as artificial muscles for robotic applications", *Smart Mater. Struct.*, **3**, pp. 367-372 (1994).
  11. Shahinpoor, M. "Spring-loaded ionic polymeric gel linear actuator", US Patent Specification 5,389,222 US Department of Energy, Sandia National Laboratories, (February 14, 1995).
  12. Shahinpoor, M. "Micro-electro-mechanics of ionic polymeric ionic polymeric gels as electrically-controllable artificial muscles" *Int. J. Intell. Mater. Syst.*, **6**, pp. 307-314 (1995).
  13. Asaka, K.; Oguro, K.; Nishimura, Y.; Mizuhata, M.; and Takenaka, H. "Bending of polyelectrolyte membrane-platinum composites by electric stimuli, II. Response kinetics", *Electron anal Chemistry*, **480**, pp. 186-198 (2000).
  14. Nemat-Nasser, S. and Li, J.Y. "Electromechanical response of ionic polymer-metal composites", *J. Appl. Phys.*, **87**, pp. 3321-3331 (2000).
  15. Nemat-Nasser, S. "Micro-mechanics of actuation of ionic polymer-metal composites (IPMCs)", *J. Appl. Phys.* **92**, pp. 2899-2915 (2002).
  16. Tadokoro, S. "An actuator model of ICPF for robotic applications on the basis of physico-chemical hypotheses", *Proc. IEEE ICRA*, pp. 1340-1346 (2000).
  17. Shahinpoor, M. and Mojjarrad, M. "Ion-exchange membrane-metal composite artificial muscle actuator load characterization and modeling", *Smart Materials Technologies, Proc. SPIE*, **3040**, pp. 294-301 (1997).
  18. Shahinpoor, M. and Kim, K.J. "Ionic polymer-metal composites, I. Fundamentals", *Smart Materials and Structures*, **10**, pp. 819-933 (2001).
  19. Sadeghipour, K.; Salomon, R.; and Neogi, S. "Development of a novel electrochemically active membrane and 'smart' material based vibration sensor/damper", *Smart Mater. Struct.*, **1**, pp. 172-179 (1992).
  20. Bar-Cohen, Y. "Electro active polymer (EAP) actuator as artificial muscles", In: SPIE Press, (2001).
  21. Shahinpoor, M. and Kim, K.J. "Ionic polymer-metal composites, III. Modeling and simulation as biomimetic sensors, actuators, transducers, and artificial muscles", *Smart Materials and Structures*, **13**, pp. 1362-1388 (2004).
  22. De Gennes, P.G.; Okumura, K.; Shahinpoor, M.; and Kim, K.J. "Mechanoelectric effects in ionic polymeric gels", *Europhys. Lett.*, **50**, pp. 513-518 (2000).
  23. Lumia, R., and Shahinpoor, M. "Microgripper design using electro-active polymers", Proc. SPIE Smart Materials and Structures Conf., New Port Beach, CA, USA, Pub. No. SPIE 3669-30, pp. 322-329 (March 1-5, 1999).
  24. Lumia, R. and Shahinpoor, M. "Artificial muscle microgripper", Proc. First World Congress on Biomimetics and Artificial Muscle, Albuquerque, New Mexico, USA, (Dec. 9-11, 2002).
  25. Doele, U.; Lumia, R.; and Shahinpoor, M. "Grasping flexible objects using artificial muscles micro-grippers", Proc. 2004 World Automation Conf. (WAC 2004), Seville, Spain, (June 28-July 1, 2004).
  26. Deole, U. "Artificial muscle microgripper", M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, (2005).
  27. Doele, U.; Lumia, R.; and Shahinpoor, M. "Design and test of IPMC artificial muscle microgripper", Proc. Third World Congress On Biomimetics, Artificial Muscle and Nano-Bio, Lausanne, Switzerland, (May 25-28, 2006).
  28. Chung, C.K.; Fung, P.K.; Hong, Y.Z.; Ju, M.S.; Lin, C.C.K.; and Wu, T.C. "A novel fabrication of ionic polymer-metal composites (IPMC) actuator with silver nano-powders", *Sensors and Actuators B*, **117**, pp.367-375 (2006).
  29. Tung, S.; Witherspoon, S.R.; Roe, L.A.; Silano, A., Maynard D.P.; and Ferraro, N. "A MEMS-based flexible sensor and actuator system for space inflatable structures", *Smart Mater. Struct.*, **10**, pp. 1230-1239 (2001).
  30. Maluf, N. and Williams, K. An introduction to micro-electromechanical systems engineering-2nd ed., Artech House, (2004).
  31. Sitti, M.; Hashimoto, H. "Controlled pushing of nanoparticles: modeling and experiments", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **5**, pp. 199-211 (2000).
  32. Shahinpoor, M. and Kim, K. J. "Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications", *Smart Mater. Struct.*, **14**, pp. 197-214 (2005).

