

هدایت‌گرهای پلیمریونی ساخته شده از مواد مرکب به عنوان سنسورهای بیومیمتیک، عملگرها و ماهیچه‌های مصنوعی

محسن شاهین پور^۱
استاد

ماهیچه‌های مصنوعی عمدتاً به دو دسته پلیمرهای یونی و پلیمرهای الکترواکتیو تقسیم بندی می‌گردند. در بخش پلیمرهای الکترواکتیو به ولتاژ زیادی در حدود 1-10 kw احتیاج است. مفاهیم هدایت‌گرهای پلیمریونی ساخته شده از مواد مرکب (IPCC) به عنوان سنسورهای بیومیمتیک و ماهیچه‌های مصنوعی، عملگرها و انتقال دهنده‌های نیرو در این مقاله‌ی کوتاه به طور اجمالی بررسی شده است. به طور خلاصه آخرین دست آوردهای تکنیک تولید IPCC، استفاده از قوانین حاکم مربوط به ساختار و همچنین خصوصیات الکتریکی و مکانیکی آنها توصیف خواهد گشت.

اردشیر گوران^۲
استاد

واژه‌های راهنما: ماهیچه‌های مصنوعی، هدایت‌گرهای پلیمریونی، الاستومر، محرک‌های رباتی

۱- مقدمه

اخیراً به اثبات رسیده است که پلیمرهای یونی (همانند پلیمر اسید سولفوریک ترکیب شده با فلور با نام تجارتی نافیون) در شکل ترکیب شده با فلزهای نیمه رسانا^۳ (به عنوان مثال هدایت‌گرهای مرکب پلیمریونی^۴ (IPCC)) در صورتی که در میدان‌های الکتریکی متغیر با زمان قرار بگیرند می‌توانند تغییر شکل‌های دینامیکی زیادی را از خود بروز دهند (شکل ۱) و همچنین به صورت معکوس تغییر شکل‌های دینامیکی یک پلیمر یونی می‌تواند عامل ایجاد میدان الکتریکی باشد (شکل ۲) [1-6]. مفاهیم اساسی الکتروترمودینامیک در پلیمرهای یونی بر پایه‌ی حرکت داخلی یونی و ذرات معلق توسط نیروی الکتریکی جدیدترین مدلی که توسط اوکورا^۵، شاهین پور^۶، کیم^۷، دی گنیس^۸ ارائه شده، توصیف گردید [7].

^۱ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مین، ایالات متحده آمریکا

^۲ نویسنده مسئول، استاد، موسسه تحقیقاتی استراکترونیک، اتاوا، کانادا ardashir.guran@mail.mcgill.ca

^۳ Conductive Metallic Medium

^۴ Ionic polymer-conductor compositi

^۵ Okmura

^۶ Shahinpoor

^۷ Kim

^۸ de Gennes

یکی از موضوعات مطرح در این میان، پتانسیل زیاد تکنولوژی (IPCC) جهت کاربرد به عنوان محرک‌های ربّاتی نرم، بازوهای مصنوعی و سنسورهای استاتیکی یا دینامیکی و انتقال دهنده‌های نیرو از مقیاس‌های میکرو تا ماکرو را می‌باشد.

شکل (۱) نمایش نوار (IPCC) می‌باشد، که تغییر شکل زیادی (بیش از ۴cm) را در حضور مقدار کمی ولتاژ نشان می‌دهد. باید توجه داشت که در زمان ۰/۵ ثانیه ۲ ولت به نمونه در ابعاد ۴×۱×۰/۲ اعمال می‌شود. تولید و ایجاد یک (IPCC) از طریق قشای تبادل گر یونی^۱ (IEM) به وسیله‌ی فلز مرکب شده، آغاز و با فرایندهای شیمیایی کاهشی ادامه می‌یابد. عبارت مبادله یونی (IEM) به موادی اشاره دارد که برای عبور انتخابی از میان یونهای تکبار (چه آینون یا کاتیون) طراحی شده‌اند. آنها غالباً از پلیمرهای گروه‌های یونی کوالانسی ثابت ساخته شده‌اند. از نمونه‌های رایج (IEM) می‌توان مواد زیر را نام برد:

(۱) آلکین‌های فلئوئوردار شده با زنجیره جانبی کوتاه که به گروه‌های یونی ختم می‌شوند (معمولاً سولفونات SO_3^- و کربکسیلات COO^- برای تبادل کاتیون و یا کاتیون‌های آمونیوم برای تبادل آنیون (شکل ۳)). اسکلت‌های پلیمری بزرگ استحکام مکانیکی این مواد را تضمین می‌کند و زنجیره‌های جانبی کوتاه، فضای برهم‌کنش گروه‌های یونی با آب را فراهم کرده و مسیر عبور برای یونهای مناسب را ایجاد می‌کند. معروفترین محصول در این زمینه «NafionTM of Du pont Co» می‌باشد [4].

این شکل جواب دینامیکی دریافتی از یک نوار IPCC (به ضخامت ۲ میلی‌متر) به بار تماسی دینامیکی در شکل پایه یک تیر یک سر گیردار^۲ را نشان می‌دهد. پاسخ الکتریکی نوسانی میرا که فرکانس تکرار بالاتر از ۱۰۰۰Z دارد، قابل مشاهده است. چنین رفتار الکترومکانیکی مستقیم ناشی از حرکت تصادفی یون‌هاست که این حرکت خود به علت اعمال تنشهای تحمیلی است. این موضوع نشان می‌دهد که اگر ما مقدار محدودی جریان حلال (آب) وارد کنیم (اجازه عبور فلوی جریان را ندهیم $J=0$)، یک به هم ریختگی (آمیختگی) در میدان الکتریکی E ایجاد می‌شود. همان‌طور که در بخش ۳ بحث خواهد شد این میدان را می‌توان به صورت دینامیکی کنترل کرد.

(۲) پلیمرهای بر پایه استرین دی وینیل بنزن که در آنها گروه‌های یونی از حلقه‌های فنیل تشکیل شده‌اند و اتم نیتروژن برای ثابت کردن گروه یونی آن قرار گرفته است. این پلیمرها به شدت به هم متصلند و کاملاً صلب هستند و گروه‌های یونی در آنها بسیار شبیه مواد ژلاتینی هستند. محبوبترین محصول آن جوهرهای یونی سری CR/AR می‌باشد.

در نافیون^۳ گروه یونی ثابت نسبتاً کمی وجود دارد. این گروه‌های یونی در انتهای زنجیره جانبی واقع شده‌اند و تا بتوانند خود را در جهت دلخواه در فضا قرار دهند. بنابراین آنها می‌توانند یک کانال نانوی جاذب آب به نام شبکه‌ی خوشه‌ای ایجاد کنند. توانایی انبساط IEM (بر اساس ماهیت آب‌دوستی) کاملاً با طبیعت پلیمرهای بر پایه انواع استرین (دی وینیل بنزن) که اصولاً توسط اتصال عرضی محدود شده‌اند، متفاوت می‌باشد.

¹ Ion Exchange Membrane (EMI)

² Cantiliver Configuration

³ NafionTM

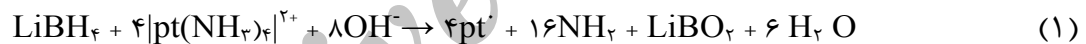
۲- روش ساخت و تولید

تهیه و ساخت ترکیبات (IPCC) نیاز کار شدید آزمایشگاهی دارد. جدیدترین تکنیک رایج تولید IPCC از ترکیب ۲ فرآیند متفاوت بدست آمده است [4,5].

فرآیند ترکیب اولیه و فرآیند الکترودی سطحی

به سبب فرآیندهای تهیه متفاوت، ساختارشناسی^۱ پلاتینیوم رسوب کرده بسیار با هم تفاوت دارد. فرآیند ترکیب اولیه نیاز به یک نمک مناسب پلاتینیوم همانند $\text{HCl}(\text{NH}_3)\text{pt}$ در بستر فرآیند کاهش شیمیایی دارد. این فرآیند مشابه فرآیندی است که توسط بعضی محققان همانند تاکنکا^۲ [8] و میل^۳ [9] و ارزیابی شده است.

اصول فرآیند ترکیب، فلزدار کردن سطح داخلی غشاء توسط کاهنده‌های شیمیایی همانند LiBH_4 یا NaBH_4 می‌باشد. IEM در محلول نمکی خیسانده می‌شود تا به کاتیون‌های پلاتینی اجازة نفوذ به غشاء نازک در طول فرآیند تبادل یونی را بدهد. سپس یک عامل کاهنده مناسب همانند LiBH_4 یا NaBH_4 جهت پلاتین‌دار کردن غشاء به کار برده می‌شود. سطح متخلخل IPCC به عمق معمولاً 1-20um لایه پلاتینی را پوشانده است. ماهیچه مصنوعی ساخته شده می‌تواند برای تولید بیشترین نیرو با تغییر چند پارامتر فرآیند مانند غلظت متغیر با زمان، نمک و عوامل کاهنده بهینه شود. (به کار بردن تکنیک تاکشی^۴ جهت تعیین بهینه پارامترهای فرآیند کاملاً مناسب به نظر می‌رسد [10]) واکنش ابتدایی عبارتست از:



در فرآیند الکترودی سطحی محصولات اولیه، علاوه بر لایه اولیه پلاتینیوم که توسط فرآیند ترکیب اولیه ایجاد شده است، چندین عامل کاهنده (در غلظت بهینه) جهت انجام واکنش مشابه واکنش معرفی می‌شوند. در حالت کلی، اکثریت نمک پلاتینیوم در محلول باقی می‌ماند و فرآیند کاهش و تولید فلز پلاتینیوم ادامه می‌یابد. فلزهای دیگر (یا محیط رسانا) همانند پلادیوم، نقره، طلا، کربن، گرافیت و نانوتیوب با موفقیت به کار برده شده‌اند.

۳- قوانین پدیده‌شناسی

تحقیقات اخیر گینس^۵ و همکارانش [7] فرمول‌بندی استاندارد آنساگر^۶ برای اصول مهم تحریک IPCC و پدیده دریافت پاسخ تحریک با استفاده از ترمودینامیک برگشت ناپذیر خطی را به صورت زیر بیان می‌کنند [4]:

¹ Morphology

² Takenaka

³ Millet

⁴ Taguchi

⁵ Gennes

⁶ Onsager

هنگامی که شرایط ایستا تحمیل می‌شود، یک توصیف ساده‌ی اثرات الکترومکانیکی بر پایه دو مدل انتقال امکان‌پذیر است: حرکت یون‌ها (با چگالی جریان، J ، نرمال نسبت به ماده) و انتقال حلال الکتروفورس (با شار Q) که می‌توانیم این عبارت را شار آب در نظر بگیریم. همچنین نیروهای مزدوج شامل میدان الکتریکی E و همچنین گرادیان فشار می‌باشد. معادله‌ی حاصل در فرم مختصر زیر بیان شده است:

$$J = \sigma E - L_{12} \nabla p \quad (۲)$$

$$Q = L_{12} \vec{E} - k \nabla p \quad (۳)$$

در روابط بالا ضرایب σ و k به ترتیب هدایت غشاء و نفوذپذیری دارسی^۱ می‌باشد.

ضرایب عرضی L_{12} ، L_{21} معمولاً برابرند $L_{12} = L_{21} = L$ ، و در مقیاس 10^8 $\left(\frac{ms^{-1}}{Watt.S - m^{-1}}\right)$ در نظر گرفته می‌شوند. سادگی فرمول بالا یک توصیف فشرده از اصول مهم هم تحریک و هم دریافت پاسخ در IPCC ارائه می‌دهد. بنابراین ما می‌توانیم آن را به سادگی در شکل (۴) نشان دهیم. چندین مدل جهت توصیف تمرکزهای گوناگون در طول توزیع گرادیان ارائه شده است [11,12,13]؛ هرچند، این مدل‌ها یا جنبه پدیده‌شناسی دارد [13] و یا خیلی کلی هستند [14]، و قادر به پیش‌گویی مجموعه‌های مختلف اطلاعاتی با همین قالب ریاضی و بیولوژیکی نمی‌باشد [1]. مدل‌های ارائه شده مشابه دایتون^۲ [5] و هسل^۳ [8]، بالاترین انواع richness در انحراف میانگین پیش‌بینی می‌کند اما در بعضی حالات [12,6]، پیش‌بینی آنها کیفی است. در حالت [2]، مدل فقط برهم‌کنش‌های قابل رقابت را در نظر می‌گیرد. هیچ مدل ریاضی قابل اندازه‌گیری برای تست همزمان پیشروی و تنش وجود ندارد. علاوه بر این، تئوری کلاسیک جانشینی^۴، وجود یک اجتماع رشد نیافته در محیط‌های نوسانی و یک اجتماع رشد نیافته را در محیط‌های پایا و باثبات بیان می‌کند، براساس این تئوری امکان تمرکز پایین در رژیم‌های توزیع متوسط محتمل است.

۴-۱- خصوصیات مکانیکی

شکل (۵) نتیجه تست کشش را بر حسب تنش نرمال به کرنش نرمال بر روی نوعی IPMC معمول (به فرم H^+ نسبت به (Nafion-۱۱۷)TM) (به شکل H^+) نشان می‌دهد. با شناسایی (NafionTM-۱۱۷) به عنوان یک ماده شروع کننده سازگار برای این نوع IPMC، این مقایسه می‌تواند مفید می‌باشد. افزایش کمی در استحکام مکانیکی IPMC ها وجود دارد (هم از لحاظ استحکام و هم مدول الاستیسیته)، اما آن هنوز از طیف ذاتی Nafion پیروی می‌کند. این بدین معنی است که در

¹ Darcy permeability

² Dayton

³ Hessle

⁴ Classical Succession Theory

کرنش کششی (مثبت) رفتار ——— قاطعانه از مواد پلیمری پیروی می‌کند تا از پودر فلزی (مواد مرکب الکترودی).

شکل ۵ تنش نرمال (σ_N) را در برابر کرنش نرمال ϵ_N برای IPMC و Nafion-۱۱۷TM نشان می‌دهد. توجه کنید که هر دو نمونه هنگام تست کاملاً هیدراته شده‌اند. اگرچه نتایج تست کشش طبیعت ذاتی IPMC ها را نشان می‌دهد، هنگامی که IPMC در حالت خمش عمل می‌کند، مشکل پیش می‌آید. به نظر می‌آید که عدم تشابه خواص مکانیکی ذرات فلز (الکتروود) و شبکه پلیمری بر روی هم موثر است. بنابراین برای ایجاد منحنی مناسب تنش - کرنش برای IPMC، نوار IPMC به طور مناسب جدا و در Cantilever Configuration تست می‌شود. در (Cantilever Configuration) انتهای تغییر مکان (δ) منجر به توزیع بار $w(st)$ می‌شود، به طوری که S طول کمان، طول شعاع L و t زمان می‌باشد. می‌توان مقدار تخمینی زیر را برای شعاع ρ منحنی در نظر گرفت.

$$\rho \cong \frac{L^2 + S^2}{2S} \quad (۴)$$

توجه داشته باشید شعاع منحنی p در حقیقت وابسته است به ماکزیمم کرنش کششی (مثبت) یا فشاری (منفی) در شعاع همانند که h ضخامت شعاع در انتهای آن است.

$$\epsilon \cong \frac{h}{2\rho} \quad (۵)$$

توجه کنید در حالت تحریک IPMC، کرنش کششی به سادگی قابل تشخیص است اما جداسازی آن سخت است. در کرنش منفی (فشردن مواد) ذرات فلز غالب هستند، بنابراین تجربه استحکام و مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به حالت رژیم کرنش مثبت همان ماده دارند. بنابراین توصیف ریاضی راجع به ساختار شعاع پایه تیر یک سر گیردار IPMC کمی بحث برانگیز است و باید به دقت توضیح داده شود. مسلماً نتایج بدست آمده از آزمایشها در دسترس است و باید تعقیب شود. تنش δ می‌تواند به راحتی به کرنش توسط قانون ساده‌ی هوک و با در نظر گرفتن الاستیسیته خطی و یا نوع غیرخطی معادله‌ی ساختاری نئو - هوک، مرتبط شود و نتیجتاً داریم:

$$\delta = \frac{Mh}{2I} \quad (۶)$$

که در آن δ تنسور تنش است، M بیشترین گشتاور در انتهای آن و I گشتاور مماس در مقطع عرض شعاع است. بنابراین گشتاور M می‌تواند براساس توزیع بار روی شعاع یا اعمال فعالسازی الکتریکی شعاع IPMC محاسبه شود. همچنین برای محاسبه‌ی گشتاور ممان که برای سطح مقطع مستطیلی با عرض b داریم $I = \frac{bh^2}{12}$ و تنش δ می‌تواند به کرنش وابسته باشد و نتایج نموداری آن در شکل ۶(۱) و ۶(۲) نشان داده شده است. این شکل‌ها، اثر برجستگی و رفتار استحکامی در برابر فعالسازی الکتریکی را نشان می‌دهد. در اینجا

فعالسازی الکتریکی اشاره به IPMC در حالت الکترومکانیکی دارد که افزایش استحکام ناشی از توزیع مجدد یونهای هیدراته و خصوصیات غیرخطی خواص الکترومکانیکی IPMC را نشان می‌دهد. بررسی بیشتر بر روی این مشاهدات مفاهیم بیشتری را همانند شیوه‌ی بالا بدست می‌دهد. توجه کنید، در شکل (۶) نمودار زیری اثر برجستگی^۱ و رفتار استحکامی در برابر فعال سازی الکتریکی را نمایش می‌دهد. برجستگی، همچنین یک پارامتر مهم و تأثیرگذار در خصوصیات مکانیکی است و به اشاره می‌توان گفت که برجستگی سبب ایجاد ضعف مکانیکی می‌شود. فعالسازی الکتریکی گرایش به استحکام سازی مواد ناشی از توزیع مجدد یونها در داخل IPMC دارد.

۴-۲- خصوصیات الکتریکی

جهت ارزیابی خواص الکتریکی IPMC، روش استاندارد امپدانس AC که می‌تواند مدار معادل الکتریکی را نیز به دست دهد، انتخاب شده است. نمودار امپدانس نشان داده شده در شکل ۷ وابستگی امپدانس IPMC به فرکانس را نشان می‌دهد. روی هم رفته، توجه به این نکته جالب است که IPMC در رنج فرکانس‌های بالا تقریباً مقاومتی است ($>50\text{ohm}$) و در رنج فرکانس‌های پایین، حالت خازنی دارد ($>100\mu\text{F}$).

بر اساس یافته‌های بالا ما یک مدار معادل الکتریکی ساده شده برای IPMC همانند آنچه در شکل (۸) نشان داده شده، پیشنهاد می‌کنیم. در این راستا، هر واحد ساده‌ی مداری به صورت متصل به یک سری دلخواه از سطوح مقاومت در سطح در نظر گرفته شده است. این رویکرد برپایه مشاهدات تجربی مقاومت الکتروود سطح (شکل ۸) در نظر گرفته شده است. چهار جزء برای هر واحد ساده‌ی مداری فرض شده است.

مقاومت سطحی الکتروود (R_s)، مقاومت پلیمر (R_p) خازن مرتبط به پلیمر یونی و لایه دوگانه در الکتروود سطح/دخالته الکتروولیت (C_d) و امپدانس (Z_w) که ناشی از مقاومت در برابر انتقال شارژ در نزدیک سطح الکتروود می‌باشد.

برای نمونه IPMC، اهمیت R_{ss} در ارتباط با R_s با فرمول $\sum \frac{R_{ss}}{R_s} \approx \frac{L}{t} \gg 1$ بیان شود که در آن t ,

L طول و ضخامت الکتروودها هستند. (این به صورت دو بُعدی می‌باشد باید توجه شود که مقدار نمونه t در حدود 10^{-1} تا 10^{-2} می‌باشد. بنابراین، این بیان قابل قبول است).

در نتیجه اضافه ولتاژ قابل توجه مورد نیاز است که در شرایط ولتاژ مؤثر در طول سطح نمونه IPMC باقی بماند. یک تکنیک مؤثر برای حل این مشکل، پوشاندن سطح الکتروود پلاتینی با لایه نازکی از یک فلز بسیار رسانا (مانند طلا) می‌باشد [6].

درک این که آب مستقر شده در IPMC فلوردار شده، تنها حلالی است که می‌تواند کشیدگی مناسب را در وضعیت تحریک ایجاد کند، مسئله دیگری به نام "ولتاژ تجزیه شیمیایی" را مطرح می-

¹ Swelling

کند. همان‌طور که به وضوح در شکل (۹) دیده می‌شود، ولتاژ تجزیه کمترین ولتاژی است که در آن پدیده الکترولیز به طول قابل توجه انجام می‌شود.

این شکل حاوی نموداری از شرایط پایدار جریان نسبت به ولتاژ DC کاربردی می‌باشد نشان داده می‌شود که افزایش ولتاژ تغییر کوچکی در جریان به همراه دارد. (که از قانون فوریر پیروی می‌کند) با تغییرات اندک در ولتاژ، افزایش قابل توجهی در جریان DC مشاهده می‌شود. با وجود اینکه ولتاژ ذاتی باعث جذب برق توسط آب به میزان 23^V می‌شود. اضافه ولتاژی (در حدود $0.3-0.5^V$) مشاهده می‌شود. باید توجه شود چنین جذب برقی توسط آب باعث کاهش بازده ترمودینامیکی IPMC می‌شود. توجه شود که SEM برای تخمین عمق نفوذ پلاتین در غشاء هسته استفاده می‌شود. متد ۴ برای اندازه‌گیری مقاومت سطح R_{ss} ، IPMC، استفاده می‌شود. واضح است هر چه نفوذ بیشتر شود مقاومت سطح کمتر می‌شود. ERI-K1100 بر قاعده‌ای استوار است که IPMC از ربات‌های محیطی تشکیل شده است.

← Inc دارای ضخامتی به طول $2/9^{nm}$ و دو الکتروود مناسب پلاتین/ طلا می‌باشد. شکل ۱۰ پاسخهای اندازه‌گیری شده پریودیک ولتاژ/جریان نمونه IPMC را نشان می‌دهد. (سرعت تصویربرداری $100mV/s$ است).

همان‌طور که دیده می‌شود، رفتار نسبتاً ساده‌ای از پسماند کم بدست آمده است.

توجه شود که واکنش IPMC خفیف است آن‌طور که کاهش یا افزایش با دامنه بیشتر از +4 ولت را نشان نمی‌دهد. به جز رفتار تجزیه در $\pm 1/5^V$ جایی که مصرف جریان زیادی در فرآیند برقکافت آشکار می‌شود، در کل رفتار IPMC یک رفتار ساده از حرکت یونها تحت تأثیر یک میدان الکتریکی را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۱)، فرکانس وابسته به IPMC در غالب تنش عمودی در برابر کرنش عمودی بیان شده است این فرکانس وابسته، حقیقتی را دنبال می‌کند که با افزایش فرکانس، کاهش جابجایی باریکه را در پی داریم. به هر حال یک مشاهده دقیق باید بیانگر این باشد که در فرکانس‌های پایین (0.1-1HZ)، مدول مؤثر IPMC تحت تأثیر ولتاژ به نظر، نسبتاً جزئی می‌آید که این به معنی آن است که گردش آب تا آنجا بالا است که از میان سطح متخلخل الکتروود جریان پیدا می‌کند، مخصوصاً در الکتروود پلاتینی، (که این تأثیر به صورت خیلی نرمال و معمول در آزمایشگاه مشاهده می‌شود) و به شبکه پلیمری مربوط نمی‌شود (که این باعث بازگشت ناپذیری می‌شود). در طرف دیگر در فرکانس‌های بالا (5-20HZ) این اثر خفیف است آن‌چنان که پدیده گردش آب از بین شبکه پلیمری انجام می‌شود (این به خاطر آن است که زمان کافی برای جاری شدن بر روی سطح الکتروود ندارد) بنابراین گردش آب در IPMC می‌تواند در مدول بزرگتر نسبت به این مدول در فرکانس‌های پایین، تجربه شود. جالب است که می‌توان قیاس مشابهی را با محرک‌های هیدرولیکی در این مورد، داشت. بدیهی است نشت آب یک ضرر مهم برای رسیدن به بازده بالا در مورد IPMC است. این مسئله برای رسیدن به بازده بالاتر و توان مخصوص IPMC، باید حل شود.

فعالیت اخیر شاهین‌پور [4] تلاشی در جهت تعیین عامل‌های مؤثر پاشیدگی (که جمع‌پذیر است) بوده است. یک نتیجه موفق، استفاده از عامل مؤثر پاشیدگی در حین فرآیند جوشکاری پلاتین که بهبود چشمگیری در مورد خصوصیت چگالی نیرو ایجاد کرده است.

نتیجه در شکل (۱۲) جایی که نیروی اندازه‌گیری شده نمونه بهبود یافته IPMC در برابر نمونه قرار داده شده، گزارش شده است. همان‌طوری که به روشنی دیده می‌شود، تکه‌های به هم مرتبط IPMC نشان داده شده است.

(i) یک پاسخ تیزتر از یک ورودی میدان الکتریکی

(ii) افزایش چشمگیر چگالی عمومی نیرو به میزان ۱۰۰٪

یک مشاهده کلیدی، ناپدید شدن مجازی جواب آخر، است که اغلب در مورد قرار داده شده IPMC دیده می‌شود، که جلوی نشت آب از سطح الکتروود را می‌گیرد. (یک قیاس با کیسه شنی) این چنین تأثیری را می‌توان به پیشینه قدرت IPMC نسبت به تمامی نمونه‌های IPMC ای که تا به حال گزارش شده، تفسیر کرد. در شکل (۱۳)، زیرنویس SEM در طول تصویر برداری X-Ray تهیه شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود، یک نفوذ خوب از پلاتین بدست آمده است و این معنی را می‌دهد که اثر جمع‌پذیر پراکندگی پلاتین را بالا می‌برد که این باعث نفوذ بهتر در IME می‌شود. یک راه مناسب برای رسیدن به این شرایط (پخش آزاد از دیواره یا غشاء متخلخل) استفاده از ضریب پخش مؤثر D_{eff} ، و اینکه به صورت یک بعدی به مسئله نگاه شود. با فرض جنبش‌های سریع برای واکنش رسوب‌گذاری آهن $Pt + 4NH_3 \rightleftharpoons [Pt(NH_3)_4]^{2+} + 2e^-$ غلظت رسوب پلاتین N_x ، با فرمول زیر بیان می‌شود.

$$N_x = \frac{C_{Pt}(\delta t)}{C_{Pt,i}} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\delta t}{\sqrt{4D_{eff}t}}\right) \quad (7)$$

علامت‌گذاری‌های C_{Pt} ، $C_{Pt,i}$ ، δt به ترتیب، رسوب‌گذاری پلاتین، رسوب‌گذاری پلاتین در سطح واسط، و عمق نفوذ ذره می‌باشد.

برای کاهش زمان نمونه ($t = 15^{\text{min}}$) (در شکل ۱۲ و ۱۳) رابطه ۷ برای $D_{eff} = 10^{-10}$ ، 10^{-9} ، $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ برای IPMC بهبود یافته، رسم شده است.

ضریب پخش مؤثر، می‌تواند تا میزان برای نمونه بهبود یافته IPMC تخمین زده شود. اگرچه این وضعیت جهت شبیه‌سازی (همسان کردن) تأثیر انتقال جرم و جنبش‌های چشمگیر قدری پیچیده است، با این وجود برآورد تخمینی $D_{eff} \sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ، مقدار مناسبی برای طراحی و مهندسی فرآیند جوشکاری پلاتین که در این جا برای نمونه بهبود یافته IPMC توضیح داده شده است.

در شکل (۱۵) نتیجه آنالیز پتانسیلی ارائه شده است. با فرض اینکه هیچگونه واکنشی (به جز برقافت) که جریان مصرف کند، وجود نداشته باشد. جریانی که برای اعمال پتانسیل الکتریکی از نمونه IPMC می‌گذرد، نشان داده شده است. جریان به صورت نمایی کم می‌شود. بار الکتریکی که

پس از زمان t می‌گذرد برابر با $Q_t = \int_0^t I_t dt$ است. خیلی خوب است که مقایسه مستقیمی بین Q_t و Q_t^{pvp} (رفتار pvp نمونه IPMC) و Q_t (نمونه قرار داده شده). داده‌های شکل ۱۹، $Q_t^{pvp}/Q_t \cong 1/1$ را نشان می‌دهد.

این به معنی آن است که با توجه به رفتار pvp این نمونه در حدود ۱۰٪ بیشتر بار الکتریکی مصرف می‌کند. سئوالی که پیش می‌آید این است که تنها دلیل افزایش ۱۰۰٪ نیرو، افزایش ۱۰٪ مصرف بار الکتریکی نیست. بنابراین می‌توان توضیح داد که تأثیر کیسه شنی که از نشست آب از میان سطح متخلخل الکتروود جلوگیری می‌کند، زمانی که باریکه IPMC خم می‌شود، با اهمیت می‌شود. یک قیاس خوب می‌تواند بین راه‌اندازهای هیدرولیکی، زمانی که عمل نشست انجام می‌شود، باعث می‌شود تا حلال به آرامی حل کند و نیروی جابجایی کارایی نداشته باشد.

چگالی بالای نیروی IPMC - نگاهی به برگشت‌پذیری خطی ترمودینامیکی: در رابطه با قوانین پدیداری و موارد برگشت‌ناپذیر ترمودینامیکی که در قسمت ۳ بررسی شد، زمانی که به الکترودهای ایده‌آل نفوذپذیر که عمل تحریک (راه‌اندازی) را انجام می‌دهد توجه می‌کنیم. این نتایج بدست می‌آید:

$$\nabla p = \frac{L}{K} \vec{E} \quad (۸)$$

همچنین گرادیان فشار از رابطه زیر هم برآورد می‌شود:

$$\nabla p \cong \frac{2\delta_{\max}}{h} \quad (۹)$$

که δ_{\max} ، h به ترتیب بیشترین تنش ایجاد شده تحت تأثیر میدان الکتریکی و ضخامت غشا است.

δ_{\max} زمانی بدست می‌آید که بیشترین نیرو در نوک IPMC برحسب پتانسیل الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۱۶) ما بیشینه تنش تولیدی δ_{\max} تحت تأثیر پتانسیل الکتریکی E_0 را ارائه می‌کنیم. برای هر دو نمونه، نمونه قراردادی و نمونه بهبود یافته، اطلاعات واقعی و تجربی محاسبه شده است. باید توجه شود که نمونه بهبود یافته (بوسیله متد جمع‌پذیری) بالاتر از نمونه قراردادی و نزدیک‌تر به نمودار تئوری می‌باشد.

محاسبات تئوری چنین اطلاعاتی را به دست می‌دهد $L_{12} = L_{21} = 2 \times 10^{-8}$ (ضریب سطح $(m/s/V/m)$ ، $k = 1/8 \times 10^{-18}$ (تراوایی مغناطیسی، m^2) و $h = 200 \mu m$ ، $\vec{E} = \frac{E_0}{h}$ (ضخامت غشا)

چگالی بالای نیروی IPMC - بازده ترمودینامیکی: نیروی خمشی IPMC بوسیله کرنش مؤثر IPMC به علت گردش آبی و این به دلیل توزیع مجدد یون‌هاست. این پدیده تحریکی القایی یونی هیدرولیکی نام دارد. به طور نمونه چنین نیروی خمشی‌ای که به میدان بستگی دارد در طول باریکه IPMC تعمیم داده می‌شود. بنابراین افت ولتاژ سطح اتفاق می‌افتد که می‌تواند کمینه باشد. باریکه IPMC به دلیل این تحریکات انتقالی القایی هیدرولیکی، خم می‌شود.

کل نیروی خمشی، F_t ، به طور تقریبی برابر با:

$$F_t \cong \int_0^L f_t dt \quad (۱۰)$$

که f چگالی نیرو در واحد طول است. با فرض توزیع یکنواخت بار روی طول IPMC، توان مکانیکی تولید شده بوسیله IPMC از معادله زیر بدست آمده است:

$$P_{out} \equiv F_t \int_{-S}^S v ds \quad (11)$$

علامت‌های S, V ، به ترتیب طول قوس و سرعت نوک نمونه IPMC در عمل هستند. در نهایت بازده ترمودینامیک E_{ff} از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_{ff,em} \% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (12)$$

که P_{in} توان الکتریکی ورودی به IPMC است. براساس رابطه (۱۲) نموداری را (که در شکل ۱۷ دیده می‌شود) می‌توان طرح‌ریزی کرد که بازده ترمودینامیکی نمونه IPMC به صورت تابعی از فرکانس نشان می‌دهد. توجه شود که این نمودار نتایج تجربی مربوط به نمونه قراردادی و هم چنین نمونه بهبود یافته IPMC را ارائه می‌کند. توجه شود که بازده‌های مناسب در حد فاصل $5-10^{Hz}$ برای این IPMC ها اتفاق می‌افتد. بازده‌های مناسب برای این IPMCها در حدود ۳٪-۲/۵ است. در فرکانس‌های پایین نشت آب از سطح الکتروود به نظر می‌رسد که باعث بالا رفتن بازده به طور چشمگیر شود. به هر حال نمونه بهبود یافته IPMC نشان می‌دهد که یک بهبود قابل توجه در بازده، زمانی که آب به داخل IPMC جریان پیدا می‌کند نسبت به زمانی که به بیرون از IPMC جاری می‌شود، در پی دارد. این همان بهره موردنظر است. چشمه‌های مهم مصرف انرژی از تحریک IPMC می‌تواند موارد زیر باشد:

- (۱) انرژی ضروری مکانیکی نیاز به کرنش منفی / مثبت برای باریکه IPMC دارد.
- (۲) پدیده هیستریزیس I/V به علت نفوذ آب از IPMC.
- (۳) گرمای کاهش یافته ژولی (در شکل ۱۸ نشان داده شده است)
- (۴) تجزیه به علت برقکاف آب
- (۵) نشت آب از الکتروود به بیرون.

با وجود اینکه تلاش ما جهت بهبود عمل IPMC بوسیله جلوگیری از نشت آب به بیرون از سطح متخلخل الکتروود بوده است، بازده‌های کلی ترمودینامیکی از همه انواع IPMC در محدوده $0/1 - 10^{Hz}$ تست شده‌اند که همگی تقریباً پایین هستند به هر حال باید توجه شود نتایج بدست آمده این مفهوم را می‌رساند که انواع دیگر محرک‌های خمشی هدایتگرهای پلیمری و مواد کریستالی در شرایط مشابه چنین بازده پایینی را نشان می‌دهند. این فرآیند از الکتروود شروع می‌شود و تا نوک باریکه IPMC تکثیر می‌شود. اختلاف دما بیشتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد زمانی که ولتاژ DC به میزان ۳ واحد برای نمونه IPMC در ابعاد $1/2 \times 7/0^{cm}$ استفاده می‌شود.

۵- نتیجه گیری و رقابت‌های آینده

در این مقاله جزئیات و خصوصیات اساسی مواد مرکب یونی پلیمر آهن (IPMC) در غالب حسگرهای زیست بومی، عملگرها (محرک‌ها) و ماهیچه‌های مصنوعی به طور مختصر ارائه شد. مقاله اخیر یافته‌هایی در این موارد، تکنیک‌های نوین تولید، قوانین پدیده‌ای و خصوصیات مکانیکی و الکتریکی این مواد را ارائه نمود، برای مشاهده جزئیات بیشتر می‌توانید به مراجع [15-17] مراجعه نمایید. واضح است که عمل تجاری کردن موفق نمونه IPMC به میزان زیاد به بهبود بازده ترمودینامیکی و چگالی نیروی تولید بستگی دارد. به خصوص افزایش مقیاس ابعادی نمونه IPMC یک فاکتور اصلی تهیه نیروی مناسب است. هدف نهایی از استفاده IPMC به عنوان حسگرهای زیست بومی و محرک‌ها (عملگرها)، براساس توسعه موفق سه بُعدی سیستم IPMC، که به عنوان ساختارهای هوشمند سه بُعدی قابل کنترل الکتریکی استفاده می‌شود تا حدی رویایی به نظر می‌رسد. در بخش پلیمرهای الکترواکتیو می‌توانید به [18-20] مراجعه نمایید. همچنین چندکاربرد جدید در نانومکانیک در [21-22] توضیح داده شده است. در ارتباطات آینده درباره تلاش‌مان برای رسیدن به این دست آوردها بیشتر بحث خواهیم کرد.

۶- سپاسگزاری

بخشی از این فعالیت توسط NRL/DARPA حمایت شده است. پژوهش بازوهای مصنوعی نویسنده اول در دانشگاه New-Mexico انجام شده است. بحث‌هایی که در این زمینه با آقای پروفسور دوگینس از دانشکده College de France انجام شد در نگارش این مقاله بسیار سودمند بوده است.

مراجع

- [1] Oguro, K., Asaka, K., and Takenaka, H., "Actuator Element", U.S. Patent Vol. 5, pp. 386-390, (1993).
- [2] Asada, A., Oguro, K., Nishimura, Y., Misuhata, M., and Takenaka, H., "Bending of Polyelectrolyte Membrane-platinum Composites by Electric Stimuli, I. Response Characteristics to Various Wave Forms", Polymer Journal, Vol. 27, pp. 436-440, (1995).
- [3] Shahinpoor, M., Adolf, D., Segalman, D., and Witkowski, W., "Electrically Controlled Polymeric Gel Actuators", US. Patent Vol. 5, pp. 250, (1993).
- [4] Shahinpoor, M., and Mojarrad, M., "Soft Actuators and Artificial Muscles", US. Patent, Vol. 6, pp. 109, (2000).
- [5] Shahinpoor, M., Bar-Cohen, Y., Simpson, J.O., and Smith, J., "Ionic Polymer-metal Composites (IPMC) as Biomimetic Sensors and Structures-A Review", Smart Materials and Structures, Vol. 7, pp. 15-30, (1998).

- [6] Shahinpoor, M., and Kim, K.J., "The Effect of Surface-electrode Resistance on the Performance of Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) Artificial Muscles, Smart Materials and Structures, Vol. 9, pp. 543-551, (2000).
- [7] De Gennes, P.G., Okumura, K., Shahinpoor, M., and Kim, K.J., "Mechanoelectric Effects in Ionic Gels", EPL(Europhysics Letters), Vol. 50, pp. 513-518, (2000).
- [8] Takenaka, H., Torikai, E., Kwarni, Y., and Wakabayshi, N., "Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 7, pp. 397-403 (1982).
- [9] Millet, P., Pineri, M., and Durand, R., "New Solid Polymer Electrolyte Composites for Water Electrolysis", Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 19, pp. 162-166, (1989).
- [10] Kim, K.J., Shahinpoor, M., and Razani, A., "Preparation of IPMCs for use in Fuel Cells, Electrolysis, and Hydrogen Sensors", Proceedings of SPIE 7th International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol. 3687, pp. 110-120, California, USA, March, (2000).
- [11] Bernardi, D.M., and Verbrugge, M.W., "A Mathematical Model of the Solid-polymer-Electrolyte Fuel Cell", Journal of Electrochemical Society, Vol. 139, pp. 2477-2491, (1992).
- [12] Pei, Q., Inganas, O., and Lundstrom, I., "Bending Bilayer Strips Built From Polyaniline for Artificial Electrochemical Muscles", Smart Materials and Structures, Vol. 2, pp. 1-5, (1993).
- [13] Shahinpoor, M., and Sorin Gabriel, P., "Bioelectric Sensor and Switch for Medical Imaging", US Patent and Trademark Office, US Patent Vol. 6, pp. 829, December, (2004).
- [14] Wang, Q., Du, X., Xu, B., and Cross, L.E., "Electromechanical Coupling and Output Efficiency of Piezoelectric Bending Actuators", IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, pp. 638-646, (1999).
- [15] Michopoulos, J., Shahinpoor, M., "Data-driven Inverse Modeling of Ionic Polymer Conductive Composite Plates", International Conference on Computational Science, Vol. 3992, pp. 131-138, Japan, Tsukuba, (2006).
- [16] Shahinpoor, M., "Shape Memory Alloy Temperature Sensor-2-CIP", US Patent and Trademark Office, US Patent Vol. 6, pp. 837, January, (2005).
- [17] Shahinpoor, M., Kim, K.J., and Mojarrad, M., "Artificial Muscles: Applications of Advanced Polymeric Nanocomposites", 1 Edition, Taylor and Frances Group, USA, Florence, (2007).
- [18] Liwu Liu, Jiuming Fan, Zhen Zhang, Liang Shi, Yanju Liu and Jinsong Leng, "Analysis of the Novel Strain Responsive Actuators of Silicone Dielectric Elastomer", Advanced Materials Research, Vols. 47-50, pp. 298-301, (2008).

- [19] Choi, H.R., Jung, K.M., Jung, M.Y., Koo, J.C., Nam, J.D., and Lee, Y.K., "Development of a Soft Linear Motion Actuator using Synthetic Rubber", Key Engineering Materials, Vols. 306-308, pp. 1193-1198, (2006).
- [20] Koo, J.C., Choi, H.R., Jung, M.Y., Jung, K.M., Nam, J.D., and Lee, Y.K., "Design and Control of Three-DOF Dielectric Polymer Actuator", Key Engineering Materials, Vols. 297-300, pp. 665-670, November, (2005).
- [21] Shahinpoor, M., "Ionic Polymeric Conductor Nano Composites (IPCNCs) as Distributed Nanosensors and Nanoactuators", Advances in Science and Technology, Vol. 3, pp. 70-81, September, (2008).
- [22] Guran, A., and Yousefghahari, B., "Shape-control of Carbon Nanotubes by Means of Nanofluidic Actuators", Proceedings of the Conference on Biomedical Applications of Functionalised Carbon Nanotubes", Technical University of Dresden, Vol. 12, Germany, September, (2010).

فهرست نمادهای انگلیسی

f: فرکانس

F: نیروی خمشی

h: ضخامت لایه

k: تراوایی مغناطیسی

L: طول تیر یک سر گیردار

P: توان الکتریکی

Q: بار الکتریکی

S: طول کمان تیر یک سر گیردار

t: زمان

Z: امپدانس

فهرست نمادهای یونانی

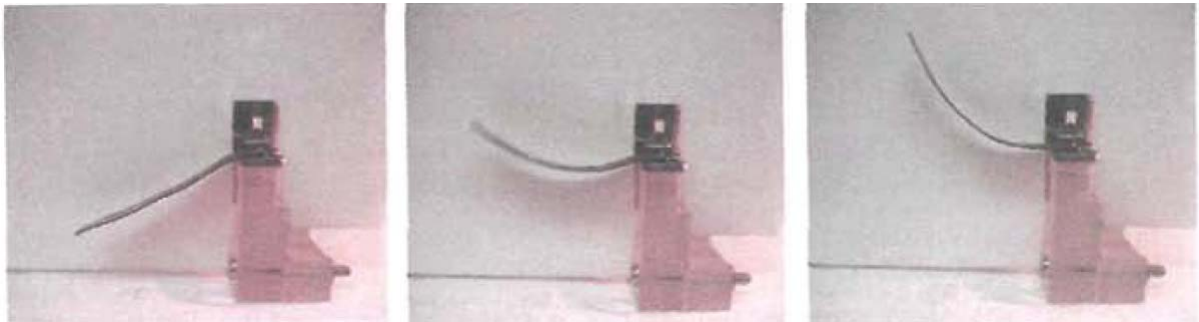
σ_N : تنش نرمال

ϵ_N : کرنش نرمال

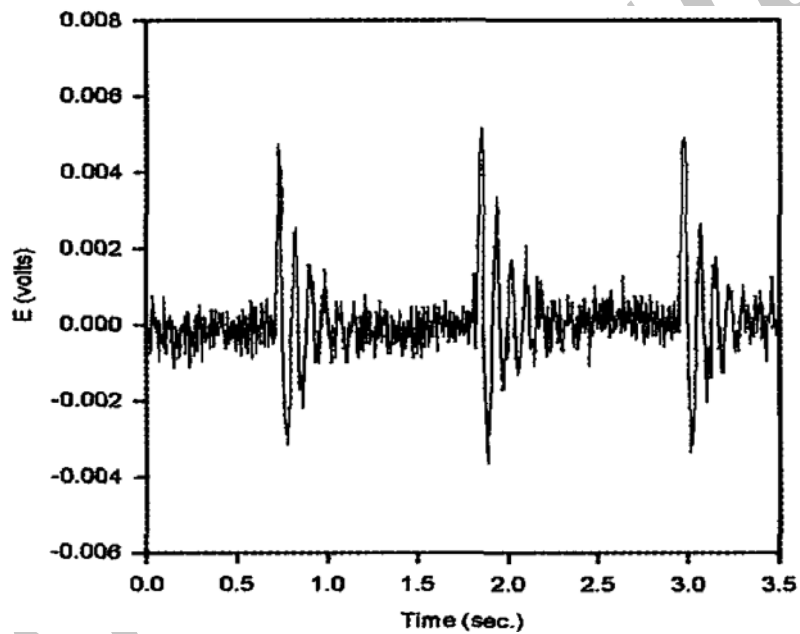
δ : تغییر مکان تیر یک سر گیردار

ρ : شعاع انحنای تیر یک سر گیردار

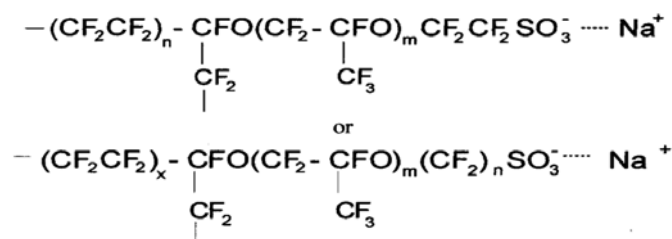
شکلها



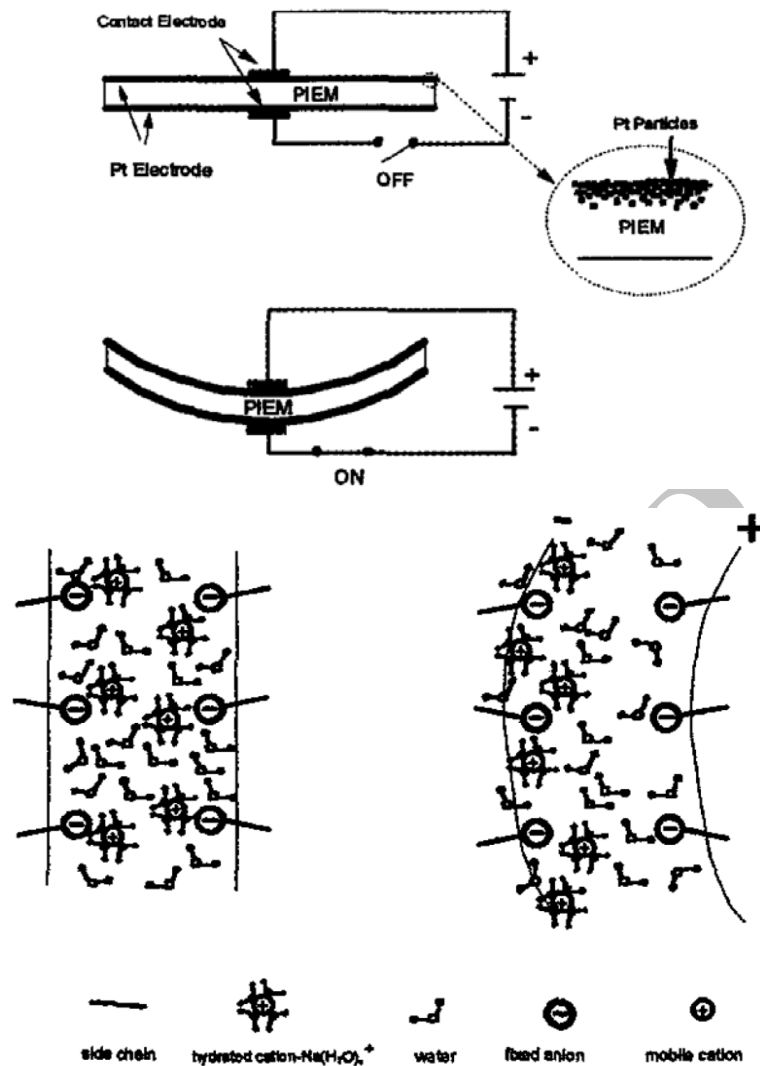
شکل ۱- نمایش حرکت متوالی نوار (IPCC) می باشد، که تغییر شکل زیادی (بیش از ۴ cm) رادرحضورمقدار کمی ولتاژ را نشان می دهد. توجه داشته باشید در زمان ۰/۵ ثانیه ۲ ولت، به نمونه در ابعاد ۴×۱×۰/۲ اعمال شده است .



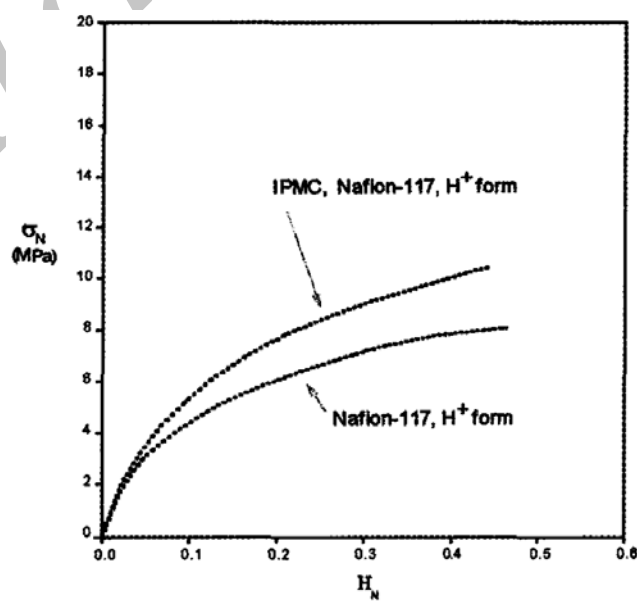
شکل ۲- یک نمونه پاسخ دریافتی از IPCC



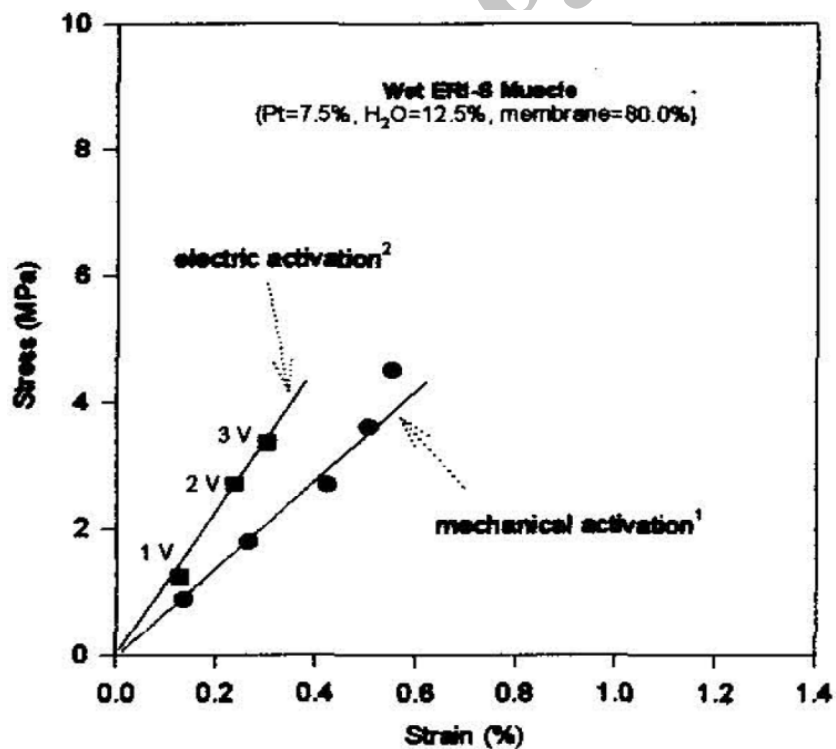
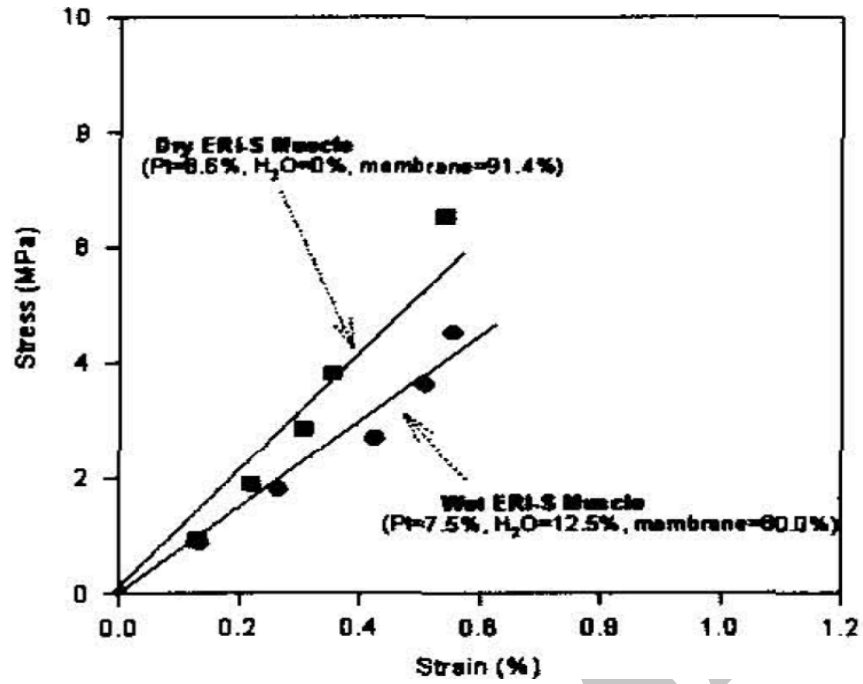
شکل ۳- اسید سولفونیک فلوئور دار شده (IEM). یون Na^+ در این مورد می تواند با یون های دیگر جایگزین گردد.



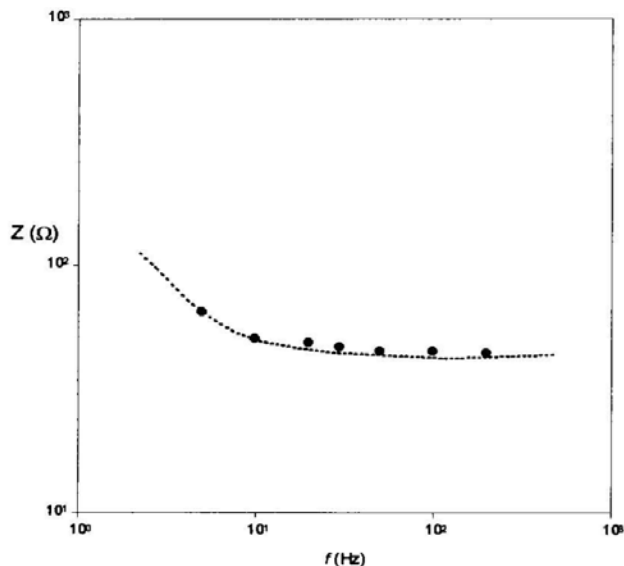
شکل ۴- طرح کلی ماهیچه مصنوعی IPCC و مراحل تحریک آن.



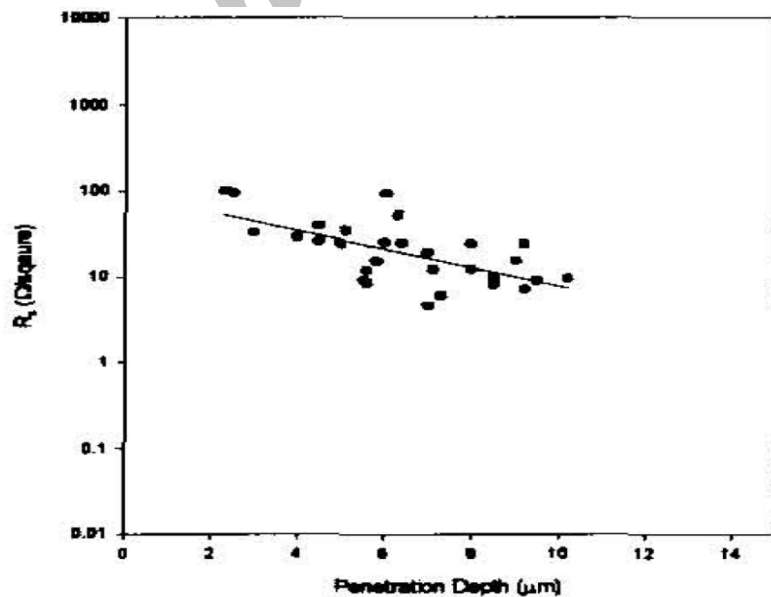
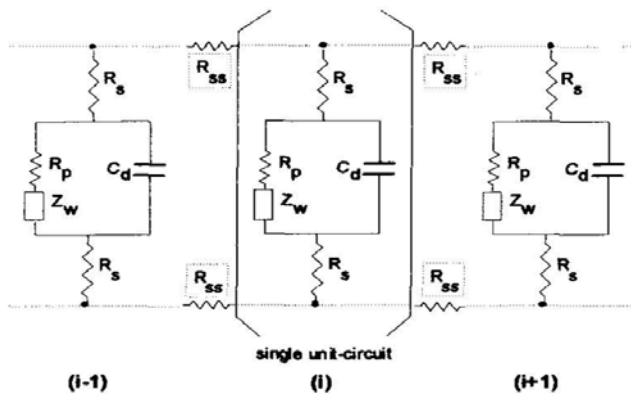
شکل ۵- نتایج تست کشش



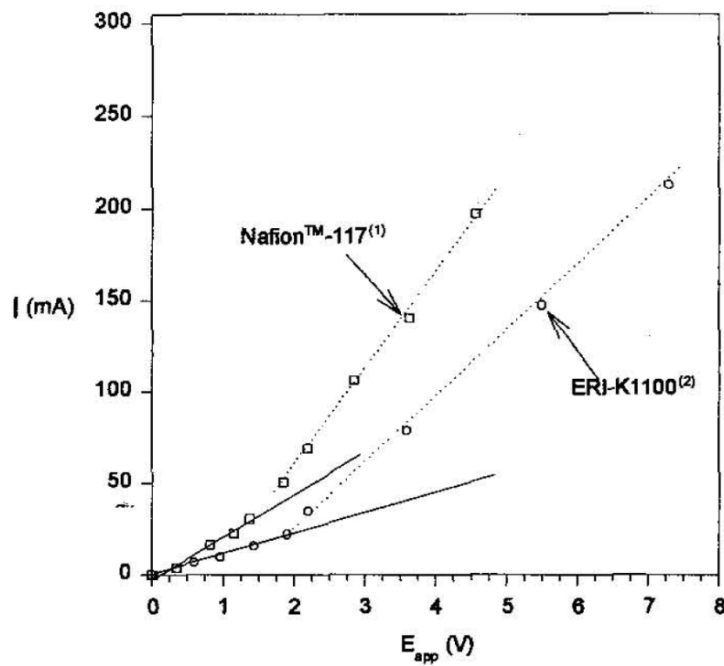
شکل ۶- مدل شکل تیر یک سر گیردار از IPMC و نمایش آزمایش کرنش مثبت/منفی در مد کاری IPMC



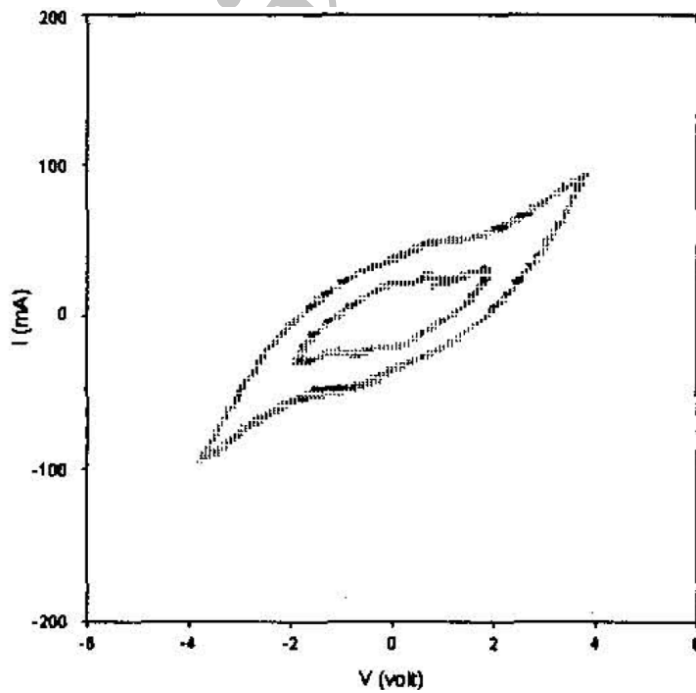
شکل ۷- مشخصه امپدانس AC اندازه گیری شده برای یک نمونه IPMC (نمونه مرطوب دارای ابعاد ۵ میلی متر عرض و ۲۰ میلی متر طول و ۰/۲ ضخامت است).



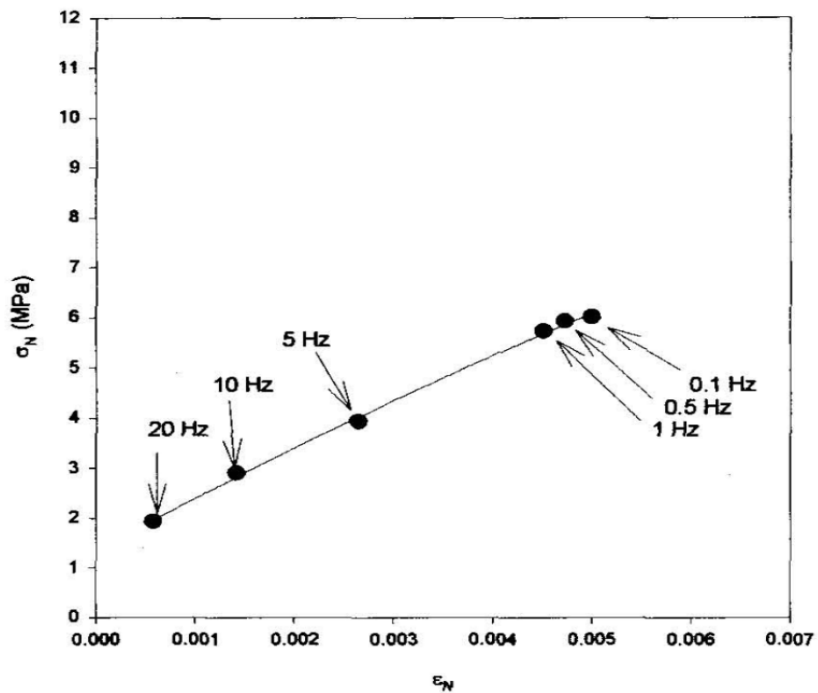
شکل ۸- یک مدار معادل ممکن برای نمونه IPMC (بالا) ومقاومت سطح اندازه گیری RS به صورت تابعی از عمق نفوذ پلاتین (پایین)



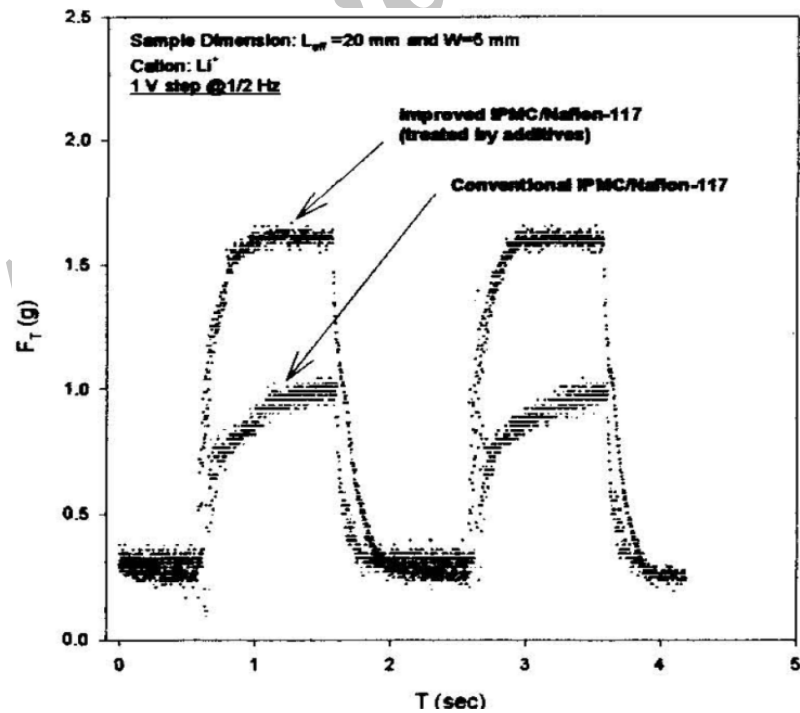
شکل ۹- جریان حالت پایدار، I ، نسبت به ولتاژ اعمالی، E_{app} ، در نمونه IPMC



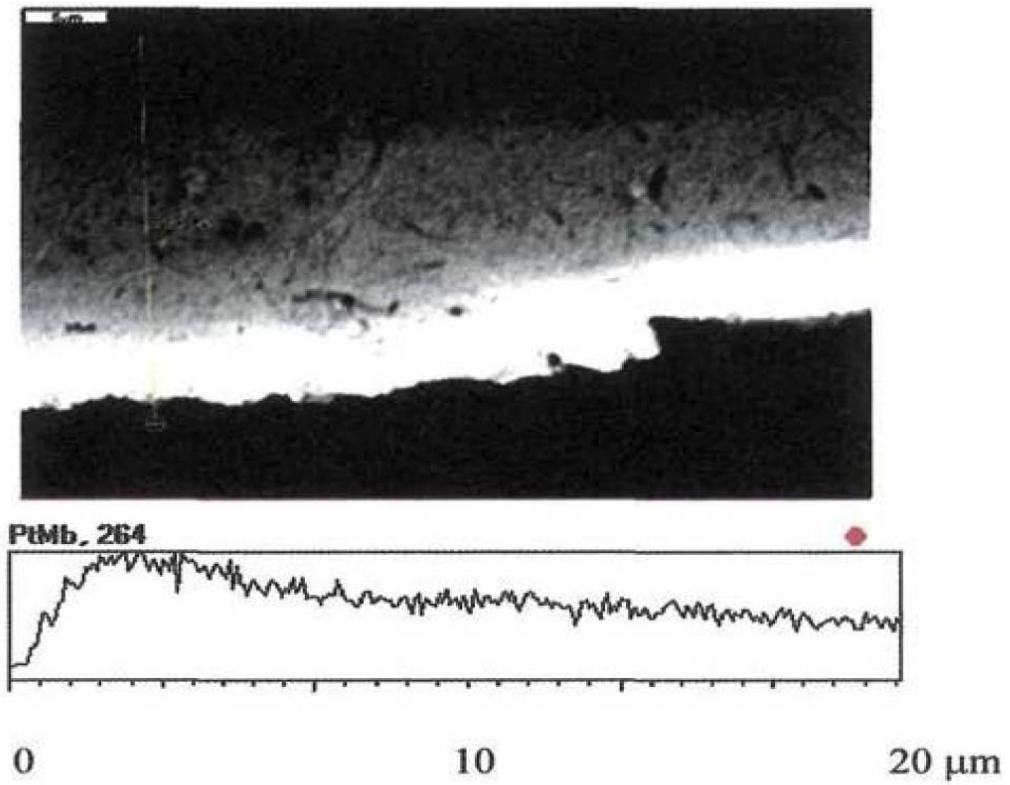
شکل ۱۰- منحنی I بر حسب V برای یک نمونه IPMC (Nafion)



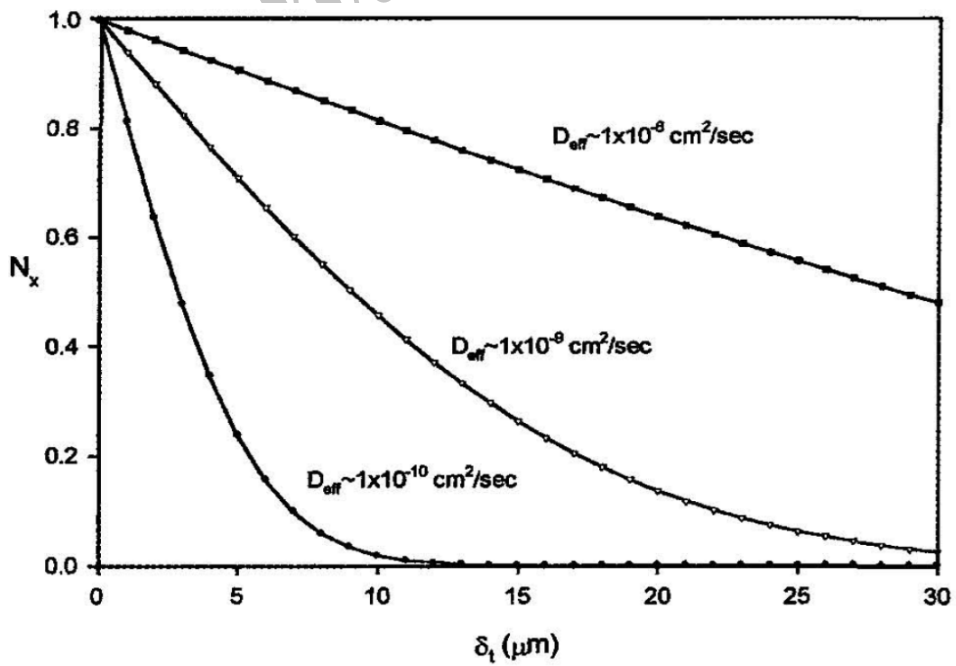
شکل ۱۱- فرکانس وابسته نمونه که در غالب تنش نرمال بر حسب کرنش نرمال تحت ولتاژ اعمالی پله ای ۱ ولت



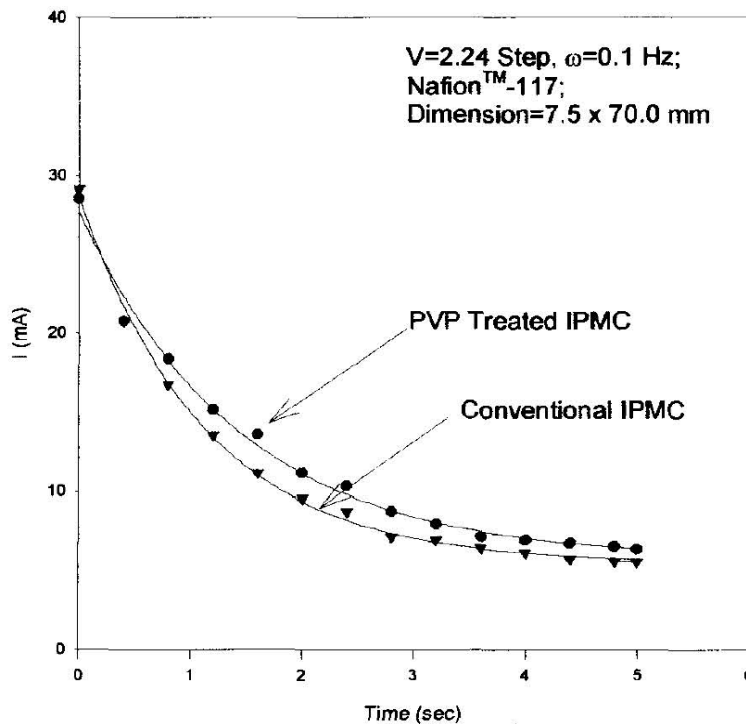
شکل ۱۲- رفتار پاسخ اجباری نمونه بهبود یافته IPMC بر حسب نمونه قرار داده شده IPMC



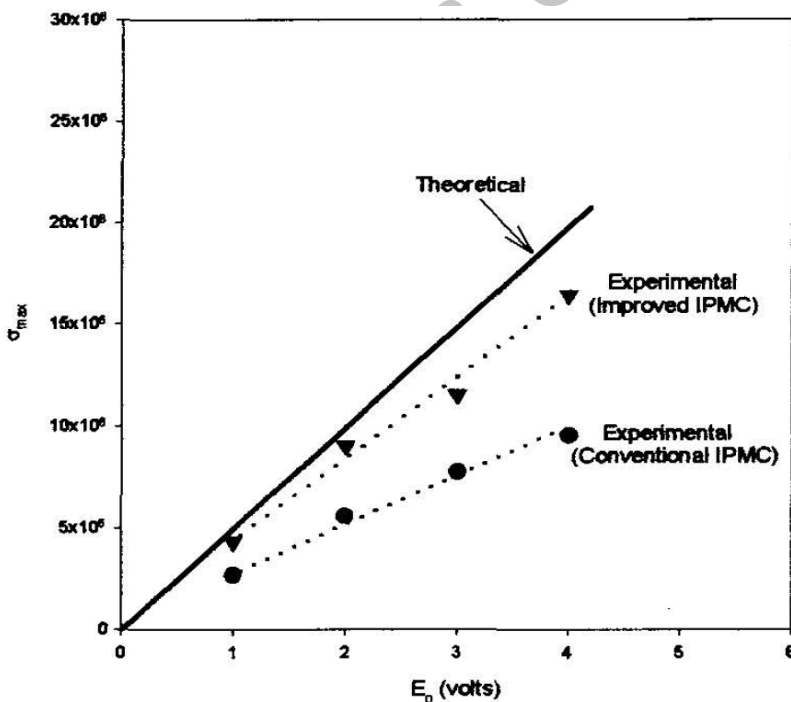
شکل ۱۳- یک نمونه میکرو گراف از IPMC، رفتار عامل پراکنده ساز (در بالا) و خطوط x-ray تصویر برداری شده (در پایین)



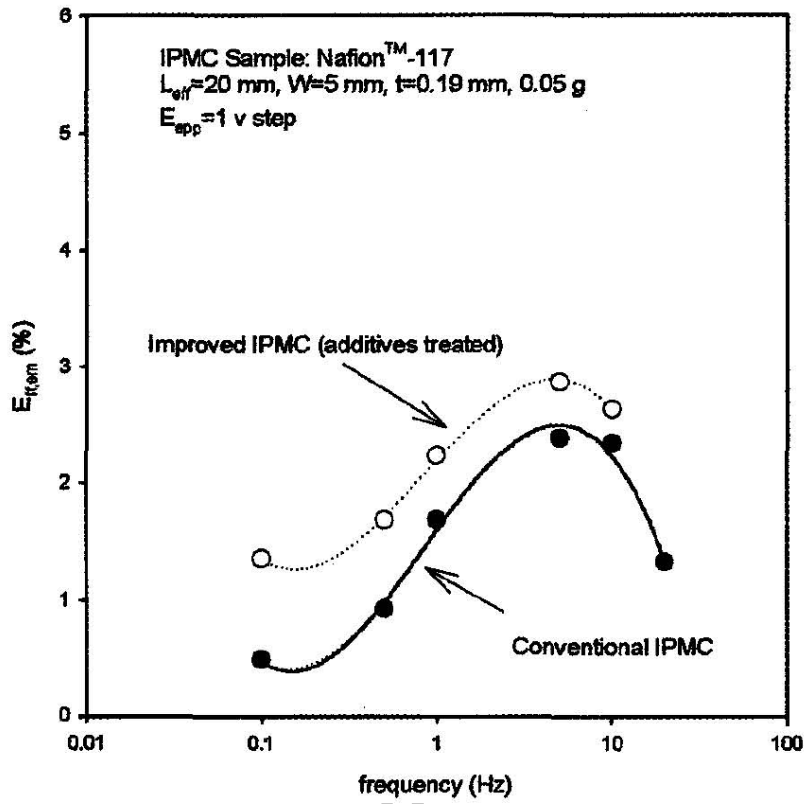
شکل ۱۴- پروفیل های نفوذ پلاتین در یک نمونه IPMC



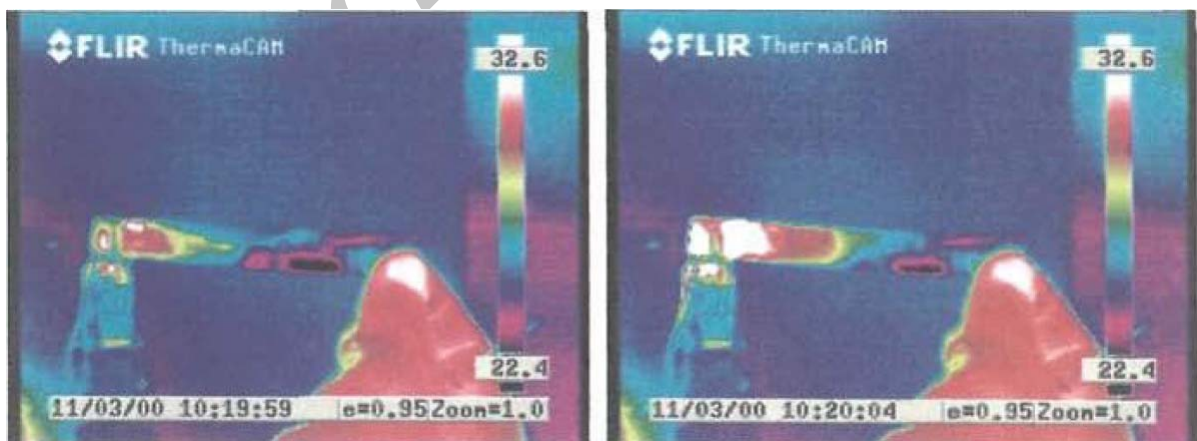
شکل ۱۵- آنالیز پتانسیلی کولومتریکی برای نمونه با رفتار جمع پذیر IPMC و نمونه قرار داد شده



شکل ۱۶- بیشترین تنش تولیدی نمونه IPMC در ولتاژ داده شده



شکل ۱۷- بازده ترمودینامیکی نمونه IPMC به صورت تابعی از فرکانس



شکل ۱۸- ترموگراف گرفته شده از IPMC در عمل

Abstract

The fundamentals of Ionic Polymer-conductor Composites (IPCC's) as biomimetic sensors/transducers/actuators and artificial muscles are briefly reviewed in this short paper. Briefly, the current state-of-the art IPCC manufacturing techniques, governing phenomenological laws, and mechanical and electrical characteristics are described.

Archive of SID