

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۴

تهیه و بررسی مبدل پیزوالکتریک بر پایه نانوسیم های PVDF

محمد مهدی ابوالحسنی^{۱*}، حسنا سلیمانی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

abolhasani@kashanu.ac.ir

^۲ دکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

Hosna.soleymani.20@gmail.com

چکیده: در دهه گذشته، مواد پیزوالکتریک برای برداشت انرژی مکانیکی اتلاف شده از محیط مورد توجه زیادی قرار گرفته است. پیزوالکتریسیته اولین بار در کریستال های سرامیکی کشف شد. اما پیزوسرامیک ها سمی و شکننده هستند، بنابراین مواد پیزوالکتریک مبتنی بر پلیمر به دلیل انعطاف پذیری و زیست سازگاری عالی آن ها توسعه یافته اند. در این مقاله نانوسیم های پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF) با استفاده از الگوی نانو منافذ اکسید آلومینیوم (AAO) تهیه شده اند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مطالعه مورفولوژی نانوسیم ها استفاده شده است. نانو ژنراتورهای مبتنی بر نانوسیم های PVDF برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی ساخته شده اند. برای مشخص کردن عملکرد و کارایی نانو ژنراتورها، دستگاهی در آزمایشگاه تهیه شد که قابلیت ایجاد نیروی ضربه در فرکانس ۵ هرتز و نیروی ضربه ۲۰ نیوتن بر مترمربع را داشت. نانو ژنراتورهای توسعه یافته در این مطالعه با موفقیت بازده توان خروجی ۱٪ را نشان می دهند.

واژه های کلیدی: پیزوالکتریک، نانومبدل، نانوسیم، پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF).

و فعال PVDF فاز α آن است و فازی که خواص فیزیکی پلیمر از جمله پیزوالکتریک را دارد فاز β آن است [۵-۶]. بر روی تغییر فرم دو فاز از پلیمر با روش های مختلف از جمله قطبی کردن در میدان های قوی الکتریکی [۷] کریستالی کردن تحت فشار بالا [۸] کشش مکانیکی [۹] مطالعات بسیاری صورت گرفته است. اما این روش ها دارای معایب زیادی از جمله هزینه بر و زمان بر بودن است. بنابراین با روش های مرسوم افزایش فاز کریستالی β فرایند دشواری است. مطالعات نشان می دهند که با استفاده از روش های مختلف می توان به نانوساختارهای پیزوالکتریک PVDF دست پیدا کرد [۱۰].

از روش های به کار گرفته شده برای تقویت فاز β در PVDF، اضافه کردن پرکننده هایی از جمله نانو خاک رس، گرافن، کربن نانوتیوب ها، $BaTiO_3$ و نانوذرات فلزی است. مطالعات نشان داده اند که اضافه کردن این ذرات باعث هسته گذاری فاز β می شود که این نتیجه به اندازه ذرات اضافه شده، مقدار آن ها، برهم کنش بین پرکننده ها و پلیمر و سازگاری آن ها بستگی دارد [۱۱].

همچنین در دهه اخیر تهیه و ساخت نانوساختارهای تک بعدی در دنیا رو به افزایش است و صنایع پیشرفته در این زمینه در حال توسعه اند. در این میان نانوساختارهای تک بعدی پلیمری (IDPN) نیز قرار داشته اند که در سال های اخیر مطالعات بر روی این سری از نانوساختارها رو به افزایش است. نانوساختارهای تک بعدی بر پایه پلیمری را می توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. با نسبت طول به قطر بالا مانند نانوالیاف و نانولوله ها و... و در حالت دیگر نانولوله های کوچک تر و نانومیله ها بر پایه یک فیلم قرار دارند. آرایه های منظم پلیمری از نانوسیم ها یا نانولوله ها رفتار جالبی برای برنامه های کاربردی در فوتونیک، الکترونیک، حسگر، پوشش ها، تجزیه یا بیومدیکال را دارند [۱۲]. همچنین بالا بودن نسبت طول به قطر در نانوساختارهای تک بعدی به صورت اضافه شونده (فیلر) در دیگر نانوساختارهای کامپوزیتی مورد استفاده قرار می گیرند [۱۳]. همچنین این ساختارها مناسب برای مطالعات خواص وابسته به اندازه از قبیل خواص نوری یا خواص انتقال یا حتی مباحث دینامیک مولکولی است.

محققان در سال ۲۰۱۳ بر روی خواص پیزوالکتریک نانوسیم هایی از جنس PVDF مطالعاتی را انجام دادند. آن ها توانستند نانوسیم هایی از جنس PVDF با ساختار کریستالی β بدون قطبی سازی تهیه کنند. در واقع برای به دست آوردن پاسخ پیزوالکتریک مناسب، مولکول باید در میدان الکتریکی شدید یا

مهم ترین اصل در راه رسیدن به انرژی های پاک، به خصوص در مقیاس کوچک، طراحی و انتخاب مواد با ساختاری درست برای تبدیل کارآمد انرژی مکانیکی به الکتریکی است. مطالعات اخیر در این زمینه، پنجره جدیدی را در علوم مهندسی و مواد برای ذخیره سازی انرژی باز کرده است [۱]. یکی از این روش ها برداشت انرژی از نانومبدل های الکترومکانیک پیزوالکتریک است. پیزوالکتریک ها به دو دسته پیزو سرامیک های معدنی و پلیمرهای پیزوالکتریک تقسیم می شوند. دسته اول از مرسوم ترین مواد پیزوالکتریک و شامل $CdS, GaN, ZnO, BaTiO_3, PZT$ ، ZnS هستند. این مواد به صورت توده ای از کریستال های پروسکایت تشکیل می شوند که هر کریستال شامل یون های فلزی هستند که باعث ایجاد گشتاور دوقطبی در کریستال می گردند. با قرار دادن این مواد تحت میدان الکتریکی قوی، کل شبکه قطبی می گردد [۲]. پلیمرهای پیزوالکتریک به عنوان پلیمرهای الکتروفعال، دسته ای دیگری از پیزوالکتریک ها هستند که با قرارگیری در میدان الکتریکی قطبش پذیری نشان می دهند و با حذف میدان، دوقطبی های تشکیل شده در آن ها از بین نمی روند. نتایج بررسی «اثر مستقیم پیزوالکتریک» بر روی این مواد نشان داده اند که اعمال نیروی مکانیکی باعث کشیدگی دوقطبی ها و تغییر قطبش می شود به طوری که بارهای الکتریکی بر روی سطح ظاهر می شوند و با قرار دادن دو الکتروود در سطوح ماده پیزوالکتریک، می توان جریان الکتریکی را اندازه گرفت. همچنین اعمال ولتاژ الکتریکی در ماده باعث چرخش دوقطبی ها، ایجاد کشش و تغییر ابعاد آن خواهد شد (اثر معکوس پیزوالکتریک) [۳].

در بین پلیمرهایی که خاصیت پیزوالکتریک ارائه می کنند مانند Poly(lactic acid) (PLLA)، Polyamide 11 (PA 11)، Poly(vinylidene fluoride) (PVDF)، Poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA)، fluoride (PVDF) نه تنها به دلیل رفتار پیزوالکتریک فوق العاده، بلکه به خاطر فرایندپذیری، استحکام مکانیکی و مقاومت شیمیایی از سایرین متمایز شده اند. نمونه استفاده این پلیمر در ترانسدوسرهای با فرکانس شنوایی مثلاً در میکروفون ها، هدفون ها و بلندگوها، ترانسدوسرهای مافوق صوت مانند پروب های سونوگرافی، صفحه کلید لوازم الکترونیکی، باتری های شارژشونده، مبدل های انرژی و حسگرهای تنفسی به کار می رود [۴]. فاز اصلی

نمونه به مدت زمان ۳۰۰ ثانیه تحت ولتاژ ۴۰V قرار داده شد که این مرحله آندایز نرم است. پس از آن ولتاژ اعمال شده آندایز با نرخ ۰/۴ V/s، به ۱۳۰V افزایش و به مدت زمان ۳۶۰۰ ثانیه به نمونه اعمال گردید. از اینجا به بعد نمونه وارد فاز آندایز سخت می‌شود. در طول فرایند آندایز، دمای الکترولیت، در 0°C ثابت نگه داشته شد و با توجه به گرماده بودن این فرایند از همزن پاششی برای خنک کردن سطح نمونه استفاده شده که دائماً در حال پاشش محلول الکترولیت بر سطح نمونه است. برای دستیابی به نانو ساختارهای پلیمری بدون نقص لازم است محلول پلیمری کاملاً هموزن و عاری از هرگونه ناخالصی و حباب باشد. بدین منظور ابتدا میزان مشخصی از پلیمر و حلال با درصد وزنی مشخص با دقت وزن می‌شوند. از آنجا که فرایند انحلال پلیمرها به دلیل بزرگ مولکول بودن آنها، فرایندی چندمرحله‌ای است، معمولاً طولانی‌تر از انحلال نمک‌هاست.

ابتدا حلال به ساختار پلیمرها و فضای خالی بین آنها نفوذ و موجب تورم پلیمر می‌شود. در ادامه، زمانی که فاصله بین زنجیرهای پلیمری به حدی رسید که گره‌خوردگی‌ها باز شوند، فرایند انحلال آغاز می‌گردد. با توجه به سیستم پلیمر-حلال، فرایند انحلال می‌تواند تا مرحله تورم یا انحلال کامل پیش برود. زمان لازم برای انحلال پلیمر در حلال، وابسته به نوع حلال، جرم مولکولی پلیمر و غلظت پلیمر در محلول است. پلیمر مورد استفاده در این پژوهش PVDF می‌باشد که به صورت دانه‌های سفیدرنگ و جامد تجاری موجود است. حلال مورد استفاده در این پروژه، دی متیل فرمامید (DMF) است که یک حلال نسبتاً خوب و شناخته شده برای PVDF می‌باشد. پس از اضافه شدن مواد با درصد وزنی مشخص و طبق فرمولاسیون، ظرف حاوی مواد که یک مگنت نیز در آن قرار داده شده است، بر روی همزن مغناطیسی در دمای 50°C قرار گرفته و اجازه داده می‌شود به مدت ۲۴ ساعت عمل هم زدن ادامه یابد. قالب‌های نانوحفره تهیه شده در مرحله قبل، پس از شستشو و خشک شدن کامل در محلول پلیمر با غلظت ۲۰٪ وزنی از پلیمر PVDF، در داخل یک ظرف دربسته، غوطه‌ور می‌شود تا فرایند تر شدن صورت گیرد. سپس ظرف حاوی محلول و قالب داخل آون در دمای 60°C به مدت ۲۰ ساعت قرار می‌گیرد [۱۶]. بعد از گذشت زمان، قالب آلومینای متخلخل از داخل محلول پلیمری خارج شده، در دمای محیط قرار داده و خشک می‌شود.

برای بررسی مورفولوژی نانوسیم‌ها از تصویربرداری

تحت کشش مکانیکی در یک دمای خاص قرار گیرد [۱۴]. از مزیت‌های این ساختارها می‌توان به کاربرد آنها در ساخت دیسک‌های نانومتری، حسگرهای بیولوژیکی و دستگاه‌های لمسی اشاره کرد. در این روش از قالب‌گیری استفاده می‌شود که قالب‌ها به روش آندایز کردن آلومینیوم (AAO) با تخلخل نانومتری تهیه می‌شوند [۱۵]. ساخت آلومینای متخلخل با حفرات نانومتری، با استفاده از اکسیداسیون آلومینیوم در یک الکترولیت امکان‌پذیر است. در این روش، از آلومینیوم به عنوان آند استفاده می‌شود. در اینجا آلومینا محصول واکنش اکسایش آندی آلومینیوم است و به صورت یک لایه چسبیده روی آلومینیوم تشکیل می‌شود. به فرایند اکسیداسیون آندی آلومینیوم، به اصطلاح آندایزینگ گفته می‌شود. در این روش، ساخت نانوسیم‌های پلیمری که با قطرهای کم ساخته می‌شوند، به این صورت است که در ابتدا محلول پلیمری با غلظت مناسب تهیه و نمونه آلومینا نانوحفره سنتز شده، در محلول پلیمری غوطه‌ور می‌گردد و داخل حفرات نمونه آلومینا متخلخل با فرایند (به روش) نفوذ از محلول پلیمری پر می‌شود. هدف اصلی در این مقاله ساخت نوع جدیدی از نانو مبدل پیزوالکتریک بر پایه نانوسیم‌های PVDF است که بتواند انرژی مکانیکی حاصل از نیروی فرکانس‌های ضربه‌ای ثابت را با بازدهی خوب به انرژی الکتریکی قابل ذخیره تبدیل کند.

۲. مواد و روش‌ها

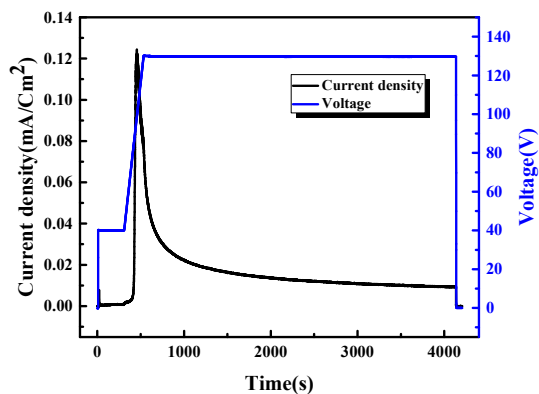
۲.۱. مواد

در این پژوهش، PVDF با وزن مولکولی 270000 g/mol و ورقه آلومینیوم خالص از شرکت Sigma-Aldrich و حلال DMF خالص، اگزالیک اسید، سدیم هیدروکسید و اتانول، از شرکت مرک آلمان تهیه شد.

۲.۲. روش ساخت

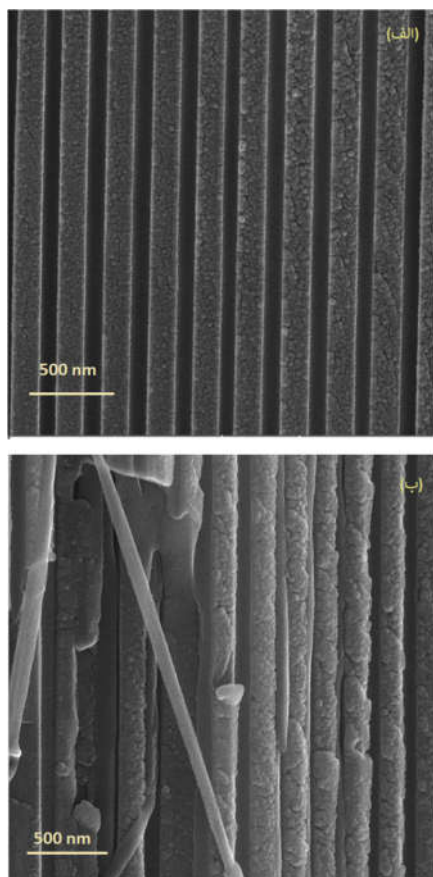
در این پژوهش، فرایند آندایز سخت در یک سلول الکتروشیمیایی که دارای سه بخش شامل کاتد، آند و محلول الکترولیت است، انجام پذیرفت. در فرایند آندایز، از فلز آلومینیوم با درصد خلوص بالا به عنوان آند و با درصد خلوص پایین به عنوان کاتد و از اگزالیک اسید $0/3$ مولار محلول در آب به عنوان محلول الکترولیت استفاده شد. فرایند آندایز سخت به کار گرفته شده در این پژوهش به این صورت است که ابتدا

1. Anodic Aluminum Oxide
2. Al_2O_3
3. Infiltration



شکل (۲): بررسی نمودار جریان-ولتاژ آندایز

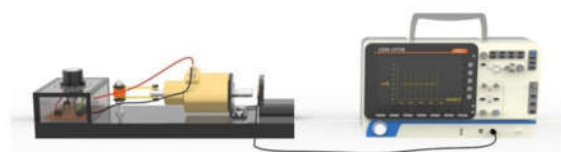
قالب‌های متخلخل آلومینا خودنظم‌یافته بعد از فرایند عریض‌سازی آماده‌ی استفاده برای ساخت نانوسیم‌های پلیمری می‌شوند. تصویر SEM از نمای عرضی این قالب در شکل (۳- الف) نشان داده شده است.



شکل (۳): مورفولوژی: الف. قالب نانوحفره آلومینا؛ ب. نانوسیم‌های PVDF در قالب آلومینا پایه

محللول پلیمری پس از نفوذ به داخل حفرات، تمامی دیواره آن‌ها را خیس می‌کند. این فرایند به‌سرعت صورت می‌گیرد اما پس شدن حفرات بعداً رخ می‌دهد. برای جلوگیری از تبخیر همزمان

میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل FESEM, Mira 2-XMU و برای برداشت انرژی الکترومکانیک از دستگاه ضربه‌زن با یک اهرم به قطر ۱ سانتی‌متر و شتاب چکش 0.1m/s^2 (شکل ۱) استفاده شده است. با توجه به نیروی اعمال‌شده که توسط یک حسگر فشاری تجاری^۱ (FSR) اندازه‌گیری شده است. در این سیستم با اعمال نیروی فشاری بر حسگر پیزوالکتریک تجاری یک برداشت ولتاژ صورت می‌گیرد. با توجه به مقدار ولتاژ و نمودار کالیبراسیون حسگر فشاری تجاری مقدار نیروی اعمال‌شده اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمون با توجه به نمودار و مقدار ولتاژ برداشتی، 20 N/g اندازه‌گیری شده است.



شکل (۱): شمای دستگاه برداشت انرژی از نانومبدل پیزوالکتریک

۳. بحث و نتایج

آندایز سخت یک روش سریع برای ساخت قالب آلومینا نانوحفره است. در آندایز سخت به دلیل ایجاد جریان‌های بالا در همان مرحله اول آندایز، نمونه‌ای با خودنظم‌یافتگی بالا به دست می‌آید. شکل (۲) آندایز آلومینیوم تحت شرایط اعمال ولتاژ (نیرو محرکه ولتایی) را نشان می‌دهد. در ابتدا ولتاژ ۴۰ ولت به مدت ۵ دقیقه اعمال می‌شود و سپس ولتاژ، با نرخ 0.4 ولت بر ثانیه، تا ۱۳۰ ولت افزایش می‌یابد و به مدت یک ساعت بر نمونه اعمال می‌گردد (نمودار آبی‌رنگ). همچنین در شکل (۲) نمودار جریان الکتریکی در فاز آندایز سخت مشاهده می‌شود (نمودار مشکی‌رنگ) که دارای یک قله بلند در ابتدای ورود به شرایط آندایز سخت می‌باشد و در نهایت در طول پتانسیل (نیرو محرکه) ثابتی که اعمال می‌شود (130V)، به‌طور نمایی به‌صورت تابعی از زمان کاهش می‌یابد؛ زیرا در آندایز سخت، به دلیل جریان بالا عمق حفره‌ها به‌سرعت زیاد شده، سپس جریان واکنش آنیونی داخل حفرات را پر کرده و جریان آندایز کاهش می‌یابد.

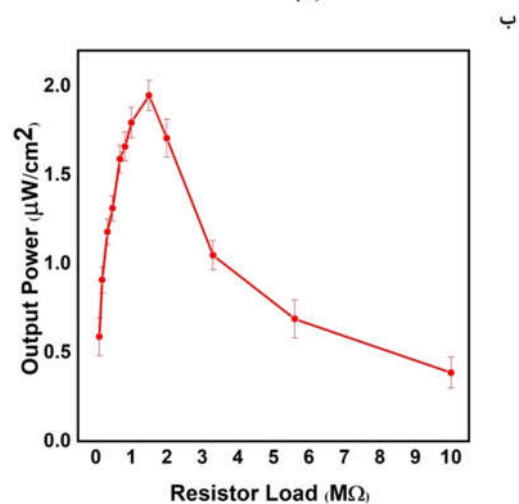
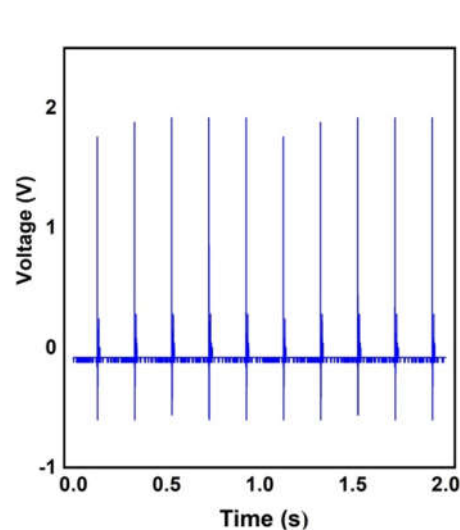
نانومبدل تشکیل شده از نانوسیم های PVDF و دو الکتروود از جنس آلومینیوم توسط اهرم دستگاه ضربه زن با بسامد ۵Hz مورد آزمایش قرار گرفت. برای برداشت حداکثر انرژی الکتریکی نانومبدل به خوبی بر روی دستگاه روبه روی اهرم ضربه زن محکم گردید.

شکل (۴-الف) نمودار ولتاژ خروجی برای نانومبدل تهیه شده نانوسیم های پلیمری را نشان می دهد. مقدار متوسط ولتاژ خروجی 0.13 ± 0.19 V است که با توجه به میزان نیروی اعمال شده ولتاژ مناسبی برای برداشت انرژی الکتریکی از نانومبدل می باشد. این امر با تئوری افزایش خواص پیزوالکتریک با افزایش فاز بلورینگی β به دلیل وجود محدودیت فضایی ایجاد شده توسط حفرات نانومتری قالب آلومینا، رابطه مستقیم دارد که منجر به بهبود خروجی ولتاژ مدار باز نانومبدل می شود. علاوه بر این، ایجاد دوقطبی های منظم در ساختار نانوسیم ها بدون اعمال نیروی میدان مغناطیسی موجب افزایش ضریب پیزوالکتریک و مشاهده خروجی بهتر پیزوالکتریک از مبدل می شود. بنابراین ایجاد نیروی الکتریکی از مبدل پیزوالکتریک تحت فشار مکانیکی خارجی، به دلیل وجود دوقطبی های منظم در لایه های کریستالی نانوسیم ها، به خوبی قابل درک است [۱۸]. بنابراین استفاده از محدودیت فضایی در ساخت نانوسیم ها عملکرد خوب نانومبدل را در پی دارد.

اما برداشت انرژی به عنوان اصلی ترین هدف یک نانوژنراتور به مقاومتی که بر سر مسیر جریان آن قرار می گیرد بستگی دارد و هنگامی که مقاومت داخلی نانوژنراتور با مقاومتی خارجی در مدار برابری کند، توان تولید شده نانومبدل به حداکثر میزان خود می رسد. بنابراین تغییر دادن مقاومت خارجی که بر سر مسیر قرار می گیرد یک روش متداول تجربی برای رسیدن به حداکثر توان است [۱۹].

طراحی دستگاه های برداشت انرژی می تواند بسیار متفاوت باشد؛ به همین دلیل روش های آزمون اندازه گیری نیز می توانند نسبتاً متنوع باشند، اما در برخی مطالعات روش کلی برای توصیف چنین دستگاه هایی وجود دارد که به خوبی شناخته شده است. در این روش، یک مقاومت را به مدار برداشت کننده های انرژی اضافه می کنند، زمانی که مقاومت بارگزاری شده با مقاومت داخلی مولد برابر شود توان خروجی به حداکثر می رسد. بنابراین معمول است که مقاومت بارگزاری را برای یافتن نقطه حداکثر توان تغییر دهند. از این رو متوسط زمان برداشت و اندازه گیری توان برای مقاومت

حلال در این موارد نیاز است که دما و فشار بیشتری اعمال شود. بعد از گذشت زمان ماند لازم برای اطمینان از پرس شدن حفرات قالب متخلخل (۳h)، قالب از محلول خارج و در دمای محیط قرار داده می شود تا حلال آن تبخیر گردد و نانوسیم ها تشکیل شوند. شکل (۳-ب) نانوسیم های پلیمری را نشان می دهد. نانوسیم های پلیمری با نفوذ محلول پلیمری و به حفرات قالب بعد از تبخیر حلال خود، مطابق با طول ($68 \mu\text{m}$) و قطر (120 nm) قالب تشکیل شده است. در این حالت سایت های بازی لویس (c-f) در امتداد زنجیره های PVDF با سایت های اسیدی لویس (O-H) در سطح قالب آلومینا تشکیل پیوند می دهند [۱۷]. بنابراین پلیمر به سطح حفرات آلومینا می چسبد و تشکیل نانوسیم های هم راستا را می دهد. موفولوژی نانوسیم های پلیمری به خوبی شبیه قالب آلومینا نانوحفره قرار گرفته است.



شکل (۴): الف. نمودار ولتاژ مدار باز نانومبدل؛ ب. مقادیر توان محاسبه شده از نانومبدل با استفاده از مقاومت های بارگزاری شده در مدار

20 N/m^2 بر واحد سطح است. همچنین $IN=1 \text{ (j/m)}$ ؛ بنابراین مقدار انرژی مکانیکی بر واحد حجم $20 \mu\text{J/cm}^3$ اندازه‌گیری شده است. از این رو با قرار دادن مقادیر انرژی‌ها در رابطه (۳) در این سیستم بازده ۱۴٪ محاسبه شد.

این نتایج و مقادیر ولتاژ و توان خروجی از این نانومبدل‌ها، با توجه به روش ساخت نانوسیم‌ها بدون نیاز به میدان الکتریکی و در دمای محیط و شرایط عملیاتی بسیار مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی از منابع انرژی‌های مکانیکی موجود در محیط اطراف از جمله انرژی باد است.

۴. نتیجه‌گیری

در راستای اهداف زیست‌محیطی، راه‌های مؤثر مختلفی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی و کاهش مصرف آن مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا در این پژوهش سعی بر این بوده است که با استفاده از پلیمر هوشمند PVDF نانومبدل برای برداشت انرژی از محیط اطراف معرفی گردد؛ که به نتایج زیر دست یافته شده است:

آندایز آلومینیوم خالص به روش سخت با نیرو محرکه 130 V ، یک قالب متخلخل با نظم بالا با قطر 120 nm ساخته شده است. نانوسیم‌های پلیمری با استفاده از روش نفوذ محلول پلیمری با غلظت ۲۰٪ وزنی از پلیمر PVDF/DMF ساخته شده است. نانوسیم‌های PVDF به کمک روش نفوذ در قالب‌های آلومینا با فاز الکتروفعال β تهیه شد. این نانوسیم‌ها در ساخت نانومبدل برای برداشت انرژی مورد استفاده قرار گرفت. و در پایان مقادیر ولتاژ مدار باز و توان برداشت انرژی از مبدل اندازه‌گیری شد که نتایج با توجه به هزینه کم ساخت و اقتصادی بودن آن مناسب برای تجاری شدن است. همچنین این نانومبدل‌ها به دلیل حساسیت بالایی که دارند تونایی استفاده به‌عنوان حسگر در صنایع مختلف از جمله صنایع بیولوژیکی را دارند.

خارجی بارگزاری شده بر واحد ثانیه، با رابطه (۱) اندازه‌گیری می‌شود [۲۰].

$$P_{elec} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} V \times Idt \quad (1)$$

که τ یک دوره (بازه) زمانی برحسب ثانیه، I میزان جریان و V ولتاژ خروجی مدار در زمان مقاومت خارجی نصب‌شده در مدار است.

اما در بسیاری از موارد به دلیل کوچک بودن بازه زمانی مورد نظر برای پیدا کردن نقطه بهینه از توان لحظه‌ای یا آنی استفاده می‌شود که با استفاده از رابطه (۲) قابل اندازه‌گیری است:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

که P توان لحظه‌ای و V ولتاژ خروجی از نانوترانزور با بارگذاری مقاومت R است. در این آزمایش، مقادیر توان خروجی از نانومبدل‌ها بر اساس مقاومت‌های خارجی ۰/۱ تا ۱۰ مگا اهم که در مدار بارگزاری شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۴-ب). مقدار بیشینه توان برای مبدل بر پایه نانوسیم‌های PVDF $2/1 \mu\text{W/cm}^2$ برای مقاومت ۱/۵ مگا اهمی است. این نتایج نشان می‌دهند که مقاومت درونی مبدل بسیار کم و برای برداشت انرژی بازدهی خوبی را داراست.

برای اندازه‌گیری و محاسبه بازده از رابطه (۳) استفاده می‌شود [۲۱]:

$$\eta_{max} = W_e / W_m \quad (3)$$

در این رابطه $W_e = P \cdot \text{Hz} / w$ انرژی تولیدی بر واحد حجم و W_m انرژی مکانیکی اعمال‌شده است. در اینجا p توان اندازه‌گیری شده بر واحد سطح و w ضخامت مبدل ($0/15 \text{ cm}$) و بسامد چکش 5 Hz است. بنابراین مقدار انرژی برداشت‌شده بر واحد حجم برابر است با $2/8 \mu\text{J/cm}^3$ و با داشتن نیروی وزن واردشده به مبدل، شتاب چکش و رابطه $F=ma$ مقدار نیروی واردشده بر مبدل $0/002 \text{ Kg.m/s}^2 \text{ (N)}$ اندازه‌گیری شده است. با توجه به مساحت مؤثر نیروسنج 1 cm^2 ، مقدار نیروی آن معادل

مراجع

- [1] Mari, C., Garcí, G, ´rrez, Amelia Linares, Jaime J. Herna´ndez, Daniel R. Rueda, Tiberio A. Ezquerro, Pedro Poza, and Richard J. Davies. "Confinement-Induced one-dimensional ferroelectric polymer arrays", Nano Lett, Vol. 10, pp.1472–1476, 2010.
- [2] Zhu, G.A., Yang, R.S., Wang, S.H. and Wang, Z.L., "Flexible high-output nanogenerator based on lateral zno nanowire array", Nano Lett; Vol. 10, No. 8, pp. 3155 – 3151, 2010.

- [3] Mokhtari, F., Latifi, M. and Shamshirsaz, M., "Electrospinning/electrospray of polyvinylidene fluoride (PVDF): piezoelectric nanofibers", Vol. 107, No. 8. pp. 1055-1037, 2016.
- [4] Fukada, E., "History and recent progress in piezoelectric polymers. *IEEE trans ultrason ferroelect freq control*", Vol. 47, No. 6, pp. 1290-1277, 2000.
- [5] Xu, J.N., Johnson, M. and Wilkes, G.L., "A tubular film extrusion of poly (vinylidene fluoride): structure/process/property behavior as a function of molecular weight", *Polymer.*, Vol. 45, pp. 27-53, 2004.
- [6] Branciforti. M.C., Sencadas, V., Lanceros-Mendez, S. and Gregorio, R., "New technique of processing highly oriented poly (vinylidene fluoride) films exclusively in the β phase", *J Polym Sci Part B Polym Phys.*, Vol, 45, pp. 2793, 2007.
- [7] Jijun, W., Huihui, L., Jichun, L., , Yongxin, D., Shidong, J. and Shouke, Y. "On the α to β transition of carbon-coated highly oriented PVDF ultrathin film induced by melt recrystallization", *J. Am. Chem. Soc.*, , Vol. 125, No. 6, pp. 1496–1497, 2003.
- [8] Takeshi, H., Masashi, K. and Hiroji, O., "Improved piezoelectricity in thick lamellar β form crystals of poly (vinylidene fluoride) crystallized under high pressure", *Journal of Applied Physics*, Vol. 79, pp. 1996, 2016.
- [9] Tang, Ch.W., Li, B., Sun, L., Lively, B. and Zhong. W.H., "The effects of nanofillers, stretching and recrystallization on microstructure, phase transformation and dielectric properties in PVDF nanocomposites", *Eur Polym J* , Vol. 48, No. 6, pp. 1072-1062, 2012.
- [10] Abolhasani, M.M. and Zarejousheghani, F., "Cheng Z, Naebe M. A facile method to enhance ferroelectric properties in PVDF nanocomposites", *RSC Adv*, Vol. 5, No. 29, pp. 22479-22471, 2015.
- [11] Yang, Y., et al. "Flexible piezoelectric pressure sensor based on polydopamine-modified *BaTiO₃/PVDF composite film for human motion monitoring*", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 301, pp. 111789, 2020.
- [12] Dersch, R., Steinhart, M., Boudriot, U., Greiner, A. and Wendorff, J. H. "Nanoprocessing of polymers: applications in medicine, sensors, catalysis, photonics, *Polym*", *AdV. Technol*, Vol. 16, pp. 276, 2005.
- [13] Chen, J. T., Shin, K., Leiston-Belanger, J. M., Zhang, M. and Russell, T. P. "Amorphous carbon nanotubes with tunable properties via template wetting", *AdV. Funct. Mater.* Vol. 16, pp. 1476, 2006.
- [14] Valentina, C., Stefano, S., Katarzyna, B. and Giancarlo, C., "Nanoconfinement: an effective way to enhance PVDF piezoelectric properties", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 5, pp. 6430–64, 2013.
- [15] Cao, G. and Liu, D. *Adv. "Template-based synthesis of nanorod, nanowire, and nanotube arrays"*, *Colloid Interface Sci*, Vol. 136, pp. 45–64, 2008.
- [16] Martín, J., et al., "Segmental dynamics of semicrystalline poly (vinylidene fluoride) nanorods", *Macromolecules*, Vol. 42, No. 14, pp. 5395-5401, 2009.
- [17] Martín, J., et al. "Relaxations and relaxor-ferroelectric-like response of nanotubularly confined poly (vinylidene fluoride) ", *Chemistry of Materials*, Vol. 29, pp. 3515-3525, 2017.
- [18] Whiter, R. A., Vijay N. and Sohini K., "A scalable nanogenerator based on selfpoled piezoelectric polymer nanowires with high energy conversion efficiency", *Advanced Energy Materials*, Vol. 4, pp. 1400519, 2014.
- [19] Dicken, J., et al., "Power-extraction circuits for piezoelectric energy harvesters in miniature and low-power applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No.11, pp. 4514-4529, 2012.
- [20] Briscoe, J., et al. "Measurement techniques for piezoelectric nanogenerators", *Energy & Environmental Science*, Vol.6, pp. 3035-3045, 2013.

- [21] Jian, F., Xungai, W. and Tong, L., "*Electrical power generator from randomly oriented electrospun poly (vinylidene fluoride) nanofibre membranes*", J. Mater. Chem., Vol. 21, pp. 11088, 2011.