**طراحی و ساخت نانوژنراتور تریبوالکتریک تک الکترود مارپیچ، به منظور برداشت انرژی از حرکات تصادفی محیط[[1]](#footnote-1)**

**چکیده**

 در این مقاله یک نانوژنراتور تریبوالکتریک تک الکترود مارپیچ[[2]](#footnote-2) طراحی و ساخته شده است. این طراحی خاص و ساده به گونه­ای است که همزمان می­تواند انرژی های مکانیکی چرخشی و رفت و برگشتی را تبدیل به انرژی الکتریکی نماید. در اکثر نانوژنراتورهای ساخته شده با ساختارهای مختلف، حداکثر توان خروجی، تنها در یک جهت یا یک مسیر مشخص بدست می­آید و به محض تغییر در نحوه یا مسیر حرکت پیش­بینی شده، توان خروجی به شدت کاهش می­یابد؛ اما نانوژنراتور ساخته شده کاملاً مستقل از مسیر و جهت حرکت بوده و می­توان از آن به منظور برداشت انرژی از حرکات غیر قابل پیش­بینی و تصادفی استفاده نمود. با توجه به این قابلیت این ساختار می تواند در ابعاد کوچک، به منظور برداشت انرژی از حرکت امواج دریا و حرکت محور دستگاه­های صنعتی و در ابعاد بزرگتر در توربین­های بادی که با سرعت های متغیر و در مسیرهای متفاوت حرکت می­کنند مورد استفاده قرار گیرد. در این نانوژنراتور تماس به صورت روبشی بر روی الکترود انجام می­گیرد. برای بررسی تاثیر تعداد دور، سایر پارامترها ازجمله ضخامت الکترودها، فاصله الکترودها از هم و فرکانس روبش به ترتیب 25µm و 1.5mm و 2Hz و ثابت در نظر گرفته شده است. تعداد دورهای مورد استفاده 4، 8، 16 و 20 دورمی­باشد. نانوژنراتور در فرکانس کم، توانایی تولید توانی حدود mW/m2 1.21 را دارد که با افزایش فرکانس نوسانات افزایش خواهد یافت.

**کلمات کلیدی:** نانوژنراتور[[3]](#footnote-3)- تریبوالکتریک[[4]](#footnote-4) – الکترود مارپیچ[[5]](#footnote-5) – برداشت انرژی[[6]](#footnote-6)- لغزشی[[7]](#footnote-7)

**1- مقدمه**

 امروزه استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر، با توجه به محدودیت منابع فسیلی، رشد بالای مصرف انرژی در دنیا و آلودگی جو زمین بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی نیاز بشر به استفاده از سیستم­های بی سیم و در دسترس نبودن و محدودیت استفاده از منابع تغذیه ثابت در سنسورها و مدارات الکترونیکی پیشرفته، نیاز همزمان به منابع تجدیدپذیر و قابل حمل جهت کاربردهایی همچون ساخت شارژرها و منابع تغذیه در ابعاد کوچک و استفاده در سیستم های بیسیم تا ابعاد بزرگتر همچون تولید توان الکتریکی برای منازل و ساختمان­ها و مصارف صنعتی را افزایش داده است. یکی از ساده ترین روش­ها برای دستیابی به این هدف، استفاده از خواص ذاتی مواد در تبدیل انرژی مکانیکی حاصل از حرکت های تلف شونده محیطی به بار الکتریکی و استفاده از آن برای شارژ منابع تغذیه خودشارژشونده[[8]](#footnote-8) می­باشد.]1[ در بسیاری از تحقیقات موجود از نانوژنراتور های پیزوالکتریک[[9]](#footnote-9) به منظور تبدیل انرژی جنبشی به الکتریکی با استفاده از خواص مواد پیزو استفاده شده است که اساس عملکرد آنها، اعمال نیروی خارجی و در نتیجه جهت گیری دو قطبی­ها می­باشد. ]1و2[ اما انتقال انرژی در نتیجه بارهای الکترواستاتیک ایجاد شده در سطح دو ماده غیرهمجنس در هنگام تماس و جداسازی آنها نیز انجام می­شود. در این حالت بدلیل تفاوت در الکترون خواهی دو ماده در حال تماس، بارهای الکترواستاتیک منتقل شده و ایجاد یک پتانسیل الکتریکی و در نتیجه تولید جریان در بار خروجی می­کنند. بر این اساس نانوژنراتورهای تریبوالکتریک ساخته می­شوند که برای تبدیل انرژی جنبشی به الکتریکی با استفاده از مواد تریبوالکتریک با حداکثر تفاوت ممکن در الکترون خواهی طراحی می­شوند. این نانوژنراتورها برای اولین بار در سال 2012 توسط وانگ[[10]](#footnote-10) به دنیا معرفی شد ]3[.

ابتدایی ترین نوع نانوژنراتور تریبوالکتریک حالت جداسازی با تماس عمودی[[11]](#footnote-11) بود. این نوع نانوژنراتور از دو لایه دی­الکتریک غیرهمجنس با دو الکترود در بالا و پایین ساخته می شود. تماس بین دو لایه دی­الکتریک توسط نیروی خارجی باعث انتقال بارهای الکتریکی در محل تماس شده و هنگامی که دو لایه تریبوالکتریک از هم جدا می­شوند، افت ولتاژ بین دو الکترود ایجاد می­شود. در این هنگام اگر دو الکترود با یک بار الکتریکی به هم متصل شوند، الکترون های آزاد برای ایجاد یک پتانسیل متقابل و تعادل میدان الکترواستاتیک[[12]](#footnote-12)، از یک الکترود به الکترود دیگر جریان می­یابند. هنگامی که تماس بین دو لایه برقرار می­شود، پتانسیل ایجاد شده توسط بارهای تریبوالکتریک خنثی شده و جهت جریان معکوس می­شود [4و5]. در نانوژنراتور تریبوالکتریک نوع لغزشی افقی[[13]](#footnote-13) نیز هنگامی که دو لایه تریبوالکتریک روی هم حرکت می­کنند بارهای الکتریکی بین دو سطح منتقل شده و یک قطبش افقی در جهت سایش ایجاد می­شود که با جاری شدن جریان در بار خارجی میدان الکترواستاتیک ایجاد شده توسط بارهای الکتریکی متعادل می­شود. حرکت کشویی متناوب و محدود، یک خروجی متناوب ایجاد می­کند که می­تواند به صورت چرخشی همانند چرخش استوانه­ای و یا چرخش دیسکی باشد [6]. ساخت نانو ژنراتور تریبوالکتریک با تنها یک لایه و یک الکترود در تماس با محیط مناسب نیز امکانپذیر است که لایه الکترود همزمان نقش لایه تریبوالکتریک و الکترود را بر عهده دارد. این ساختار برای اولین بار در سال 2013 ارائه شد ]7 [.در این نوع نانوژنراتور میتوان یکطرف که الکترود و یا دی­الکتریک است به محیط متحرک وصل نمود در حالیکه طرف دیگر ثابت می­باشد. انتقال بار با در نظر گرفتن مناسب مواد انجام می­شود. نانوژنراتورتک الکترودی نیزمی­تواند به دو صورت تماس عمودی و لغزشی ساخته شود.که در نوع عمودی با جدا شدن و تماس مجدد الکترود و لایه تریبوالکتریک جریان الکتریکی به صورت متناوب در بار خروجی ایجاد می­شود [8].

در این مقاله ساخت نانوژنراتور تریبوالکتریک تک الکترود نوع لغزشی ارائه شده است. در نانوژنراتورهای تریبوالکتریک تک الکترود مشابه ]6-8[، مسیر حرکت لایه ها بر روی هم، تنها به صورت رفت و برگشتی و در یک مسیر مشخص بوده که این عامل باعث ایجاد محدودیت در بکارگیری و وابستگی نانوژنراتور و توان خروجی آن به مسیر حرکت می­شود. اما در ساختار ارائه شده در این مقاله، حرکت لایه ها بر روی هم به صورت آزادانه و در تمامی جهات امکانپذیر و توان خروجی نانوژنراتور مستقل از مسیر حرکت می­باشد. از این ساختار می­توان به منظور برداشت انرژی از حرکات غیر قابل پیش­بینی و تصادفی همانند لقی­ دستگاه­ها و جابه­جایی­های تصادفی استفاده نمود. این ساختار در ابعاد کوچک می­تواند به منظور برداشت انرژی از حرکت امواج دریا و حرکت محور دستگاه­های صنعتی و در ابعاد بزرگتر در توربین­های بادی که با سرعت های متغیر و در مسیرهای متفاوت حرکت می­کنند مورد استفاده قرار گیرد.

**2- بررسی تحلیلی عملکرد نانوژنراتور تریبوالکتریک تک الکترودی لغزشی**

اصول عملکرد نانوژنراتورهای تریبوالکتریک بر اساس انتقال بار الکترواستاتیک بین دو سطح در تماس با هم و القای بارهای معادل در الکترودهای خروجی و در نتیجه، جریان الکتریکی در بار خروجی می­باشد. هر ساختار تریبوالکتریکی شامل دو ماده ای است که در تماس با هم قرار می‌گیرند. . فاصله x میان دو لایه تریبوالکتریک بر اثر اعمال نیروی مکانیکی تغییر می­کند. پس از اینکه دو لایه به هم تماس داده می­شوند، بر روی سطح هر یک، بارهای مخالف یکدیگر(بارهای تریبوالکتریک) ایجاد می‌شود که بارها تنها از طریق دو الکترود فلزی به بار خروجی منتقل می­شوند. اگر بارهای منتقل شده از یک الکترود به الکترود دیگر را Q تعریف کنیم، بارهای روی یک الکترود +Q و بارهای روی الکترود دیگر -Q خواهد بود ]5-7[ بر این اساس یک اختلاف پتانسیل بین دو الکترود فلزی ایجاد می­شود که دارای دو قسمت می­باشد. قسمت اول ناشی از بارهای تریبوالکتریک قطبیده شده است که با VOC(x) نمایش داده می‌شود و تابعی از فاصله x است و قسمت دوم ولتاژ ناشی از بارهای Q جابجا شده خواهد بود. اگر فرض کنیم در این ساختار هیچ بارتریبوالکتریکی وجود نداشته باشد، این ساختار یک خازن معمولی خواهد بود. بنابراین این بارهای منتقل شده، ولتاژ Q/C(x)- را تولید می‌کنند که C ظرفیت خازنی بین دو الکترود می­باشد. پس کل ولتاژ بین دو الکترود به صورت زیر است]10[

در معادله فوق قسمت VOC(x) با علامت مثبت و قسمت Q/C(x) با علامت منفی ظاهر شده است بدین معنی که هرگاه دو سطح در کمترین فاصله از هم قرار دارند VOC(x) مقدار حداکثر و Q/C(x) کمترین مقدار ممکن را داراست و بلعکس. همچنین هنگامی که دو سطح در فاصله­ی خاصی از هم قرار می­گیرند و مقدار VOC(x) و Q/C(x) با هم برابر می­شود، ولتاژ خروجی برابر صفر خواهد بود.

 چنانچه به الکترودها بار خارجی اعمال شود اختلاف پتانسیل فوق منجر به هدایت بارهای الکتریکی از یک الکترود به الکترود دیگر می‌شود. در وضعیت اتصال کوتاه معادله فوق بصورت زیر خواهد بود:]10[

 یک خازن معمولی از دو لایه رسانا و یک دی الکتریک ما بین آنها تشکیل شده است. اختلاف ولتاژ اعمالی بین این صفحات باعث ایجاد میدان الکتریکی بین آنها می شود. این میدان الکتریکی نه تنها به طور مستقیم بین صفحات وجود دارد، بلکه یک میدان الکتریکی بین لبه­ها نیز ایجاد می-شود که به آن اثر لبه می­گویند و خازن ایجاد شده از این میدان الکتریکی را خازن اثر لبه[[14]](#footnote-14) یا خازن میدان نشتی[[15]](#footnote-15) می­نامند. با توجه به اثر لبه­ها، ظرفیت خازن صفحه موازی بیشتر از ظرفیت محاسبه شده توسط فرمول است. اثر لبه­ها زمانی رخ می دهد که میدان الکتریکی، سطح همپوشانی را گسترش دهد. از آنجا که در ساختار پیشنهادی علاوه بر خازن اثر لبه، خازن­های دیگر نیز موثر هستند برای محاسبه ساختار پیشنهادی از رابطه زیر استفاده می­شود: ]12[

**3- نتایج تجربی نانوژنراتور تک الکترود ساخته شده**

 شکل1- الف) شماتیک و ساختار کلی نانوژنراتور تک الکترود مارپیچ ساخته شده را نشان می­دهد که الکترودهای مارپیچ برروی لایه 1.6mm از فیبر فنلی[[16]](#footnote-16) قرار دارند. برروی الکترودهای مارپیچ یک لایه 200µm از [[17]](#footnote-17)PVC قرار گرفته است که تمامی این قسمت ها، بخش ثابت نانوژنراتور را تشکیل می دهند. بر روی این لایه­ها یک لایه از پلی اورتان[[18]](#footnote-18) با ضخامت 3cm به صورت رفت و برگشتی روی لایه PVC با فرکانس ثابت 2Hz سایش پیدا می کند. در تمامی نمونه ها طول و عرض هر سه لایه پلی اورتان، PVC و فیبر فنلی با هم برابر و متناسب با تعداد دورهای الکترودهای مارپیچ هستند.

 در این مقاله تعداد دورهای 4، 8، 16، 20 مورد بررسی قرار گرفته که به ترتیب طول و عرض لایه ها 2، 3، 4،6 و 10 سانتی متر مربع بوده است. ضخامت، عرض و فاصله بین الکترودها در تمامی موارد ثابت و به ترتیب 32µm، 0.25mm و 1.5mm می باشد. همانند سایر نانوژنراتورهای تک الکترود، در اینجا نیز الکترود مسی هم نقش لایه تریبوالکتریک و هم نقش الکترود را برعهده دارد.

برای ساخت این نانوژنراتور ابتدا ماسک متناسب با تعداد دورها را ساخته و با استفاده از اسیدپرکلرودوفر[[19]](#footnote-19) به کمک فرایند اچینگ[[20]](#footnote-20)، الکترودها با تعداد دورهای متفاوت بر روی فیبر فنلی ایجاد می گردد. سپس یک لایه PVC بر روی الکترود قرا گرفته و روی آن ثابت می شود. در انتها یک لایه پلی اورتان جهت سایش بر روی قسمت ثابت نانوژنراتور قرار می گیرد.

 اساس عملکرد این نانوژنراتور همانند سایر نانوژنراتورهای تک الکترود تریبوالکتریک بر پایه جابه­جایی بارها بین لایه پلی اورتان، PVC، و مس می باشد که در اینجا عمل تزریق بار توسط الکترودهای مسی به لایه پلی اورتان انجام می گیرد و پلی اورتان به صورت یون منفی و مس به صورت یون مثبت تبدیل خواهد شد.

 شکل1- ب) ساختار الکترودهای نانوژنراتور ساخته شده را نشان می دهد. مارپیچ بودن الکترودها این مزیت را به این ساختار می فزاید که دارای توان حداکثری در زوایای 360 درجه باشد، برخلاف سایر ساختارها همانند ساختار شانه ای که برای داشتن توان حداکثر، رفت و برگشت می بایست در مسیری مشخص صورت گیرد. مزیت دیگر ساختار ساخته شده، در نوع حرکت قسمت متحرک است که می تواند به جای حرکت رفت و برگشتی[[21]](#footnote-21)، از حرکت دوّار استفاده نمود. این مزایا امکان بهره گیری ساختار ساخته شده در کاربردهای متنوع را فراهم می­کند که علاوه بر داشتن توان خروجی مناسب استفاده همزمان در طراحی های مختلف و طراحی های ترکیبی را میسر خواهد کرد.
 ویژگی بارز این نانوژنراتور استفاده آن در حرکات تصادفی و غیرقابل پیش بینی دستگاههاست؛ چراکه ضعف تمامی نانوژنراتورهای ساخته شده موجود با فناوری­های متفاوت، داشتن حداکثر راندمان در یک جهت یا یک مسیر مشخص است و به محض تغییر در نحوه یا مسیر حرکت پیش­بینی شده، توان خروجی به شدت تحت تاثیر قرار می­گیرد اما نانوژنراتور ساخته شده در این مقاله کمترین وابستگی به مسیر و جهت حرکت لایه­ها بر روی هم را داراست. شکل1- ج) دستگاه ساخته شده جهت تست نانوژنراتور ار نشان می­دهد. این دستگاه امکان اندازه­گیری با فرکانس های ثابت و نیرو و سرعت سایش ثابت را فراهم می­کند. شکل1-د) توپوگرافی[[22]](#footnote-22) لایه فنلی که الکترودها بر روی آن ایجاد شده­اند را نمایش می­دهد که توسط میکروسکوپ نیروی اتمی[[23]](#footnote-23) گرفته شده است. مزیت اصلی استفاده از AFM، اندازه گیری در ابعاد مختلف با قدرت تفکیک بسیار زیاد و ارائه داده های سه بعدی به شیوه عددی می­باشد. همانگونه که در شکل 1-د) مشاهده می­شود متوسط پستی و بلندی های سطح در سطح لایه فنلی برابر 204.4nm است که نشان از سطح تقریبا یکنواخت و صافی است که الکترودها بر روی آن ایجاد گردیده اند. کوچک بودن این عدد نشان از اصطکاک کم سطح و در نتیجه خوردگی کمتر لایه سایش شونده و تاثیر کم سطح، بر میزان خروجی دارد.

**بحث و بررسی نتایج**

 برای بررسی تاثیر تعداد دور، سایر مقادیر ازجمله ضخامت الکترودها، فاصله الکترودها از هم و فرکانس روبش ثابت و به ترتیب 0.25 میلی متر، 1.5 میلی متر و 2Hz در نظر گرفته شده و تعداد دورهای متفاوت 4، 8، 16 و 20 دور مورد بررسی قرار گرفته است.

 در ادامه جریان، ولتاژ و توان لحظه ای و متوسط اندازه گیری شده در نانوژنراتور ساخته شده بر اساس تعداد دورهای متفاوت الکترودها نمایش داده شده است. شکل2 جریان لحظه ای اندازه گیری شده در نانوژنراتور ساخته شده با تعداد دور الکترودهای 4و 8و 16 و 20 را نشان می دهد. مقایسه مقادیر بدست آمده، گویای روند افزایشی جریان لحظه­ای با افزایش تعداد دور الکترودهای مارپیچ است که این نتیجه با توجه به مباحث تئوری و افزایش سطح هم­پوشانی لایه سایش شونده و الکترودها قابل توجیه است. شکل3 ولتاژ لحظه ای اندازه گیری شده در نانوژنراتور ساخته شده با تعداد دور الکترودهای 4و 8 و 16 و 20 را نشان می­دهد. همانگونه که مشاهده می­شود ولتاژ لحظه ای اندازه گیری شده با تعداد دور الکترود 20 دارای بیشترین مقدار و برابر 27.81 ولت پیک تا پیک می­باشد. در واقع با افزایش تعداد دور، ولتاژ نیز افزایش می یابد که این مسئله از تحلیل ریاضی و محاسبات تئوری پیروی می­کند و علت آن افزایش سطح همپوشانی الکترودها و لایه تریبوالکتریک می­باشد. جدول1 مقایسه نتایج حاصل از اندازه­گیری جریان و ولتاژ لحظه­ای نانوژنراتور ساخته شده با تعداد دورهای متفاوت را نشان می­دهد. همانگونه که مشاهده می شود نانوژنراتور ساخته شده دارای حداکثر ولتاژ 27.81 ولت و حداکثر جریان 0.0696 میکروآمپر برای تعداد دور 20 بوده و بررسی­های انجام شده در خصوص تعداد دور الکترودهای دایره ای، حاکی از افزایش همزمان ولتاژ و جریان با افزایش تعداد دور می­باشد. در واقع تعداد دور با جریان و ولتاژ نسبت مستقیم داشته و از تحلیل ریاضی و محاسبات تئوری پیروی می­کند. در واقع هرچه مساحت الکترودها و سطح همپوشانی افزایش پیدا می کند، جریان و ولتاژ نیز افزایش می­یابد.

 شکل5-الف) مقایسه نموداری ولتاژ متوسط اندازه­گیری شده با تعداد دور الکترودهای متفاوت را نشان می­دهد که حاکی از افزایش همزمان ولتاژ و جریان با افزایش تعداد دور می­باشد. که با توجه به افزایش مساحت الکترودها و سطح همپوشانی این روند افزایشی جریان و ولتاژ امری بدیهی به نظر می­رسد. شکل 5-ب) ولتاژ متوسط اندازه­گیری شده در نانوژنراتور ساخته شده با تعداد دور الکترودهای متفاوت را نشان می­دهد. همانگونه که مشاهده می­شود با افزایش تعداد دور ولتاژ نیز افزایش می­یابد که با توجه به تحلیل تئوری قابل پیش­بینی بود. در اینجا با افزایش تعداد دور از 4 دور به 20 دور، ولتاژ از 0.9 ولت تا حدود 2 ولت افزایش پیدا می­کند. شکل5-ج) نموار FFT گرفته شده از خروجی نانوژنراتور ساخته شده با تعداد دور 20 را نشان می­دهد. همانگونه که قبلاً هم عنوان شد و در شکل هم مشاهده می­شود فرکانس روبش تقریباً 2Hz می­باشد. شکل5-د) مقایسه ولتاژ لحظه­ای اندازه­گیری شده با تعداد دور الکترودهای مختلف را نشان می­دهد. همانگونه که مشاهده می­شود با افزایش تعداد دور ولتاژ لحظه­ای نیز افزایش پیدا می­کند.

 **4- نتیجه گیری**

 در این مقاله یک نانوژنراتور تریبوالکتریک تک الکترود مارپیچ به منظور برداشت انرژی های مکانیکی چرخشی و رفت و برگشتی طراحی و ساخته شد. ویژگی خاص این نانوژنراتور عدم وابستگی آن به مسیر و جهت حرکت لایه­ها بر روی هم و استفاده از آن در حرکات غیر قابل پیش­بینی و تصادفی همانند لقی­ دستگاه­ها و جابه­جایی­های تصادفی همانند حرکت امواج است. چرا که در غالب نانوژنراتورهای ساخته شده با فناوری­های متفاوت، توان حداکثر، تنها در یک جهت یا یک مسیر مشخص حاصل می­گردد و به محض تغییر در نحوه یا مسیر حرکت پیش­بینی شده، توان خروجی به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش می­یابد. بررسی تاثیر تعداد دور الکترودهای دایره ای بر روی آن نیز حاکی از افزایش همزمان ولتاژ و جریان با افزایش تعداد دور بود. حداکثر توان قابل دریافت در این نانوژنراتور با تعداد 20 دور حاصل شد، که با مقاومت الکترود 8 اهم حداکثر توان اندازه­گیری شده از این نانوژنراتور mW/m2 1.2 بود.

1. Design and Fabrication of a Spiral Single Electrode Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Energy from Environmental Random Motions [↑](#footnote-ref-1)
2. Spiral single electrode Triboelectric nanogenerator [↑](#footnote-ref-2)
3. Nanogenetator [↑](#footnote-ref-3)
4. Triboelectric [↑](#footnote-ref-4)
5. Spiral electrode [↑](#footnote-ref-5)
6. Energy harvesting [↑](#footnote-ref-6)
7. Sliding [↑](#footnote-ref-7)
8. Self-Power [↑](#footnote-ref-8)
9. Piezoelectric [↑](#footnote-ref-9)
10. Z.L.Wang [↑](#footnote-ref-10)
11. Vertical contact seperation Triboelectric nanogenerator [↑](#footnote-ref-11)
12. Electrostatic Field [↑](#footnote-ref-12)
13. Latral sliding triboelectric nanogenerator [↑](#footnote-ref-13)
14. Fringing effect capacitance [↑](#footnote-ref-14)
15. Fringing field capacitance [↑](#footnote-ref-15)
16. Phenolic Fiber [↑](#footnote-ref-16)
17. Polyvinyl chloride [↑](#footnote-ref-17)
18. Polyurethane [↑](#footnote-ref-18)
19. FeCl3 [↑](#footnote-ref-19)
20. Etching [↑](#footnote-ref-20)
21. Reciprocating motion [↑](#footnote-ref-21)
22. Topography [↑](#footnote-ref-22)
23. Atomic Force Microscopy (AFM) [↑](#footnote-ref-23)