



## ساخت و ارزیابی سامانه برداشت انرژی بر پایه مواد هوشمند تریبولکتریک

محمد گهری<sup>الف\*</sup>، حسن معصومی<sup>ب</sup>، روح‌اله باقرزاده<sup>پ</sup>

<sup>الف</sup> استادیار، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، moh-gohari@arakut.ac.ir

<sup>ب</sup> کارشناسی ارشد، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

<sup>پ</sup> پژوهشکده فناوری‌های نو، پژوهشکده مهندسی مواد و فناوری‌های پیشرفته، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده	واژگان کلیدی
همواره انرژی یکی از نیازهای بشر بوده است و در حال حاضر انرژی الکتریکی، جزئی از ملزومات زندگی روزانه بشر شده است. یکی از راه‌های تأمین انرژی، تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریسیته با استفاده از ژنراتورهای تریبولکتریک می‌باشد. در این مقاله سعی شده اصول کاری این ژنراتورها بحث و راه‌حلی برای بهبود عملکرد آن و همچنین ارائه ساختار جدید برای استفاده از آن مطرح گردد. مهم‌ترین تحقیقات در زمینه عملکرد، شامل بهبود مواد، بهبود هندسه سطح، بهبود ساختار و ... می‌گردد. در این تحقیق تأثیر دو پارامتر بر تولید الکتریسیته بررسی شد که شامل میزان زبری سطح مختلف و زاویه قرارگیری دو صفحه غیر هم‌جنس بود. خروجی شامل ولتاژ برای زوایای مختلف قرارگیری دو سطح اصلاح‌شده نسبت به هم شامل یک سطح PVC و سطح دیگر آلومینیم مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید ولتاژ تولیدی برای نسبت قرارگیری دو صفحه با زاویه پولیش غیر صفر درجه در شماره‌های مختلف کاغذ سنباده نسبت به حالت قرارگیری صفر درجه در تحقیقات پیشین، بهبود قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت با افزایش زبری دو سطح و افزایش زبری می‌توان الکتریسیته بیشتری تولید کرد.	برداشت انرژی، تریبولکتریک، ریزساختار، مواد هوشمند.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵

## Fabrication and Evaluation Energy Harvesting based on Smart Triboelectric Material

M. Gohari<sup>a\*</sup>, H. Masomi<sup>b</sup>, R. Bagherzadeh<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Solid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 3818146763, Iran

<sup>b</sup> Department of Solid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 3818146763, Iran

<sup>c</sup> New Technologies Research Center, Advanced Textile Materials and Technology Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### KEYWORDS

Energy Harvesting,  
Triboelectric,  
Microstructure,  
Smart Material.

Received: October 04, 2021

Revised: October 16, 2021

Accepted: October 17, 2021

### ABSTRACT

One of the ways to convert mechanical energy into electricity is the use of triboelectric generators. In this paper, it has tried to discuss the principles of these generators and improve their performance, as well as present new structures for their use. The most important researches on improving performance include improving materials, improving surface geometry, improving structures, and more. A solution is proposed to improve the surface geometry, which involves changing the angle of the double-corrected surface by sandpaper with different grit sizes. The output voltage was investigated for different angles of adjustment of the two modified tribo surface relative to each other, including a PVC surface and another surface of aluminum. It was found out that the produced voltage for the two-surface placement ratio with non-zero polishing angle in different grit sizes of sandpaper was significantly improved in comparison with zero-degree mentioned in previous studies.

انرژی نقش حیاتی در شکل دادن وضعیت انسان و تمدن ایفا می‌کند. نیاز مردم به انرژی مانند نیازشان به زنده ماندن است. در طول تاریخ، برخی از مهم‌ترین فعالیت‌های زندگی بشری بستگی به تولید انرژی و مصرف آن بوده و رشد تمدن بعلاوه تحول جوامع بشری، وابسته به تبدیل انرژی برای استفاده انسان بوده است. برای ده‌ها هزار سال، مردم صرفاً متکی به انرژی شیمیایی به‌دست‌آمده از غذایی که انرژی مکانیکی کار کردن عضلات را تولید می‌کرد، بودند. به‌رحال، به لطف هوش انسان، مردم بیشتر از گذشته چگونگی تولید، نگهداری و استفاده انرژی برای متمدن شدن را فهمیدند. از این‌رو بشر انواع مختلف انرژی را در مقیاس‌های مختلف بکار برد. شاید به توان گفت با توسعه دستگاه‌های الکتریکی، انرژی الکتریکی بیشترین نیاز انسان امروزی در مقیاس‌های مختلف است [۱]. به معنای دیگر، با افزایش شگرف در تعداد وسایل الکترونیکی قابل حمل، توسعه تکنولوژی‌های مرتبط با ذخیره انرژی اهمیت زیادی دارد زیرا اکثر آن‌ها به‌وسیله باتری‌ها کار می‌کنند. گرچه توان مصرفی هرکدام نسبتاً کوچک است، اما تعداد کل وسایل بسیار زیاد است. بالغ بر سه میلیارد نفر در سرتاسر جهان تلفن همراه دارند. با اجرای شبکه سنسور در سرتاسر جهان، میلیارد‌ها سنسور بایستی در سرتاسر جهان پخش شوند که توان‌دهی چنین شبکه عظیمی شامل تریلیون‌ها سنسور به‌وسیله باتری‌ها از نظر پیدا کردن مکان، تعویض باتری‌ها و بازرسی عملکرد مناسب باتری‌ها به‌طور متناوب باید ممکن باشد. برداشت انرژی از محیطی که سنسور در آن کار می‌کند، راه‌حل امکان‌پذیری است. این زمینه بحث نانو انرژی است که تأمین انرژی برای میکرو/نانو سیستم‌ها<sup>۱</sup> به‌طور پایدار، بدون نگهداری و عملکرد خود تغذیه است.

پایداری منبع انرژی هم مهم است زیرا تضمین‌کننده عملکرد وسیله در طول مدتی طولانی است. به‌عنوان مثال سلول خورشیدی را در نظر بگیرید که به‌طور شدیدی وابسته به‌روز یا شب بودن، آب‌وهوا یا حتی فصل است. این دلیلی است که تکنولوژی‌هایی برای تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریسیته برای سنسورهای خودشارژ<sup>۲</sup> را توسعه می‌دهند [۲]. ایده خود شارژی در سال ۲۰۰۶ با تحقیق نانوزنراتورهای پیزوالکتریک (PENGs)<sup>۳</sup> معرفی شد که از اثر پیزوالکتریک نانوسیم‌ها<sup>۴</sup> برای تبدیل انرژی مکانیکی کوچک به الکتریسیته استفاده می‌کند. این مطالعات الهام‌بخش رشته نانوانرژی<sup>۵</sup> است. نانوزنراتور تریبولکتریک (TENG)<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۲ معرفی شد. استفاده از بارهای الکترواستاتیکی<sup>۷</sup> تولیدشده روی سطوح دو ماده مختلف زمانی که در تماس فیزیکی قرار می‌گیرند، باعث می‌شود بارهای تریبولکتریک القاشده هنگام جدا شدن صفحات مولد، افت پتانسیل کند که می‌تواند موجب تحریک الکترون‌ها به شارش بین دو الکتروود ساخته‌شده در دو ماده شود. تحقیق در زمینه نانوزنراتورها الهام‌بخش تمایلی جهانی بوده زیرا اهمیت آن نه‌تنها به خاطر منبع قدرت، بلکه به خاطر سنسورهای خودشارژ با کاربردهای گسترده در زمینه اینترنت اشیا<sup>۸</sup>، پایش محیط‌زیست، مراقبت سلامتی، علم دارویی، پایش زیربنایی<sup>۹</sup> و امنیت است [۳]. برداشت انرژی راه‌حل مناسبی برای استحصال انرژی‌های موجود در محیط است تا با کمک آن بتوان الکتریسیته مورد نیاز را در مقیاس کوچک هم تولید کرد.

حرکت مکانیکی در همه جای محیط و زندگی روزانه مردم وجود دارد که در سال‌های اخیر، هدفی جذاب برای برداشت انرژی به‌عنوان مکمل امیدوارکننده برای منابع سوخت سنتی و منبع قدرت جایگزین بالقوه برای وسایل الکترونیک باتری دار شده است. تا همین اواخر، مکانیزم‌های برداشت انرژی مکانیکی محدود به مبدل مبتنی بر اثر الکترومغناطیس<sup>۱۰</sup>، اثر الکترواستاتیکی و اثر پیزوالکتریک بود [۴]. سابقه ژنراتور تریبولکتریک به وسیله‌ای مکانیکی برمی‌گردد که الکتریسیته ساکن یا الکتریسیته را به‌وسیله بردارشدن تماسی در ولتاژ بالا تولید می‌کرد. محبوب‌ترین آن‌ها ماشین ویمشاست<sup>۱۱</sup> و ژنراتور وندگراف<sup>۱۲</sup> است که به ترتیب در سال‌های ۱۸۸۰ و ۱۹۲۹ معرفی شدند. هر دو ماشین از بارهای ساکن ذخیره‌شده که به‌وسیله

<sup>1</sup> Micro/nanosystems

<sup>2</sup> Self-powered

<sup>3</sup> Piezoelectric nanogenerator

<sup>4</sup> Nanowire

<sup>5</sup> Nanoenergy

<sup>6</sup> Triboelectric nanogenerator

<sup>7</sup> Electrostatic

<sup>8</sup> Internet of things

<sup>9</sup> Infrastructure monitoring

<sup>10</sup> Electromagnetic

<sup>11</sup> Wimshurst machine

<sup>12</sup> Van de Graaff generator

باردارشدن تماسی تولید می‌شد، استفاده می‌کردند. بارهای تماسی از تسمه مدور به برس فلزی به‌وسیله تخلیه بار هاله‌ای منتقل می‌شد (مثلاً میدان الکتریکی القاشده جرقه هوا)؛ زمانی که چگالی بار ذخیره‌شده به مقدار بحرانی می‌رسید، تخلیه بار الکتریکی بین دو الکترود مخالف روی می‌داد. به نظر می‌رسد این ژنراتور تریبولکتريک منبع ولتاژ بالایی است و تا زمانی که تخلیه بار الکتریکی اتفاق نیفتد، جریانی وجود ندارد [۲].

## ۲-۱- قانون جابجایی ماکسول برای فهم نانوزنراتورها

برای درک درست مفهوم تولید انرژی الکتریکی با تریبولکتريک باید معادلات اساسی ماکسول را بررسی کرد. معادلات اساسی ماکسول<sup>۱۳</sup> که الکترومغناطیس را شکل می‌دهد بدین گونه بیان می‌شود [۳]:

$$\nabla \cdot D = \rho_f \quad (۱)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (۲)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (۳)$$

$$\nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۴)$$

که  $E$  میدان الکتریکی<sup>۱۴</sup>،  $B$  میدان مغناطیسی<sup>۱۵</sup>،  $H$  میدان مغناطیسی کننده<sup>۱۶</sup>،  $\rho_f$  چگالی بار الکتریکی آزاد<sup>۱۷</sup>،  $J_f$  چگالی جریان الکتریکی آزاد<sup>۱۸</sup> و  $D$  میدان جابجایی<sup>۱۹</sup> می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (۵)$$

که  $P$  میدان قطبی شدن<sup>۲۰</sup> و  $\varepsilon_0$  گذردهی در خلاء<sup>۲۱</sup> می‌باشد. برای محیط همسانگرد  $D = \varepsilon E$  که  $\varepsilon$  گذردهی دی‌الکتریک‌ها<sup>۲۲</sup> است.

در رابطه ۴، عبارت دوم قانون جابجایی ماکسول<sup>۲۳</sup> است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (۶)$$

جریان جابجایی اولین بار به‌وسیله ماکسول در سال ۱۸۶۱ فرض شد و برای در نظر گرفتن رابطه بین قانون آمپر برای میدان مغناطیسی و قانون پیوستگی بارهای الکتریکی معرفی شد. جریان جابجایی جریان الکتریکی حرکت بارهای آزاد نیست اما یک میدان الکتریکی متغیر با زمان (خلاء یا محیط)، به‌اضافه سهمی از حرکت آرام مرز بارها در اتم‌ها، قطبی شدن دی‌الکتریک<sup>۲۴</sup> در مواد است. در رابطه ۶، جزء اول  $\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$  در جریان جابجایی، تولید موج الکترومغناطیس را موجب می‌شود که بعدها برای توسعه رادیو، رادار، تلویزیون و ارتباطات بی‌سیم دوربرد به کار گرفته شد. عبارت دوم  $\frac{\partial P}{\partial t}$  با سیگنال خروجی نانوژنراتورها ارتباط دارد. این عبارت مرتبط با قطبیدگی محیط است که خصوصیات اصلی نانوژنراتور پیزوالکتريک و تریبولکتريک از آن گرفته می‌شود. در کنار کاربردها در خازن‌ها، عبارت دوم تولید تکنولوژی جدید انرژی و سنسورهای خودشارژ را نشان می‌دهد، برای مثال نانوژنراتورها که کاربردهای گسترده‌ای در اینترنت اشیا، شبکه سنسورها<sup>۲۵</sup>، انرژی آبی<sup>۲۶</sup> و حتی داده‌های کلان<sup>۲۷</sup> دارد. عبارت  $\frac{\partial P}{\partial t}$  مستقیماً مرتبط با جریان الکتریکی خروجی نانوژنراتورها می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، کاربرد جریان جابجایی در انرژی و سنسورها، نانوژنراتورها می‌باشند [۳].

<sup>13</sup> Fundamental Maxwell's equations

<sup>14</sup> Electric field

<sup>15</sup> Magnetic field

<sup>16</sup> Magnetizing field

<sup>17</sup> Free electric charge density

<sup>18</sup> Free electric current density

<sup>19</sup> Displacement field

<sup>20</sup> Polarization field

<sup>21</sup> Permittivity in vacuum

<sup>22</sup> Permittivity of the dielectrics

<sup>23</sup> Maxwell's displacement current

<sup>24</sup> Dielectric

<sup>25</sup> Sensor network

<sup>26</sup> Blue energy

<sup>27</sup> Big data

اثر تریبوالکتريک تماسی است که باردارشدن تماسی را القا می‌کند که ماده پس از تماس با ماده دیگر از طریق اصطکاک به صورت الکتريکی باردار می‌شود. اثر تریبوالکتريک دلیل اصلی الکترواستاتیک است. علامت بارهای ایجاد شده به وسیله ماده بستگی به قطبیت مربوط به آن در مقایسه با ماده‌ای که در تماس با آن قرار می‌گیرد دارد [۵]. اثر تریبوالکتريک احتمالاً جزء چند اثری است که هزاران سال شناخته شده است. گرچه یکی از بیشترین اثراتی است که هر کدام از ما حتماً هر روز از آن استفاده می‌کنیم، مکانیزم باردارشدن تماسی هنوز با بحث در حال تحقیق است. به طور کل اعتقاد بر این است که پس از تماس دو ماده مختلف، پیوند شیمیایی بین برخی قسمت‌های دو سطح ایجاد می‌شود که چسبندگی نام دارد و بارها از ماده‌ای به ماده دیگر، برحسب پتانسیل الکتروشیمیایی<sup>۲۸</sup> آن‌ها حرکت می‌کنند. بارهای انتقالی می‌توانند الکترون یا حتی یون/مولکول باشند. زمانی که جدا می‌شوند، برخی اتم‌های پیوند تمایل به نگه‌داشتن الکترون‌های بیشتر و برخی تمایل به از دست دادن الکترون دارند که می‌تواند بارهای تریبوالکتريک روی سطح را تولید کند [۵].

چهار حالت اصلی ژنراتورهای تریبوالکتريک [۶] به همراه مزایا، ویژگی‌ها و کاربردهای منحصربه‌فردشان وجود دارد که شامل حالت تماس - جدایش عمودی (CS)<sup>۲۹</sup> [۷ و ۸]، حالت لغزش جانبی (LS)<sup>۳۰</sup> [۹]، حالت تک الکترون (SE)<sup>۳۱</sup> [۱۰] و حالت لایه تریبوالکتريک آزاد (FT)<sup>۳۲</sup> [۱۱] می‌شود. برای همه این حالات اساسی نانوزنراتورهای تریبوالکتريک، اولاً حداقل یک جفت سطوح تریبوالکتريک در تماس باهم وجود دارد (برای حالت FT معمولاً دو جفت سطوح تریبوالکتريک وجود دارد)؛ همچنین حداقل دو الکترون که با دقت از یکدیگر عایق شده‌اند وجود دارد [۶]. بررسی مواد مناسب برای تولید ژنراتور تریبوالکتريک خود امر مهمی است که باید لحاظ گردد [۱۲ و ۱۳]. حتی مواد در دسترس مانند آب نیز در این زمینه برای تولید اثر تریبوالکتريک بررسی شده‌اند [۱۴]. روند توسعه تحقیقات به تولید با راندمان بیشتر [۱۵] و نحوه تولید صفحات پلیمری با قالب نیز انجامیده است [۱۶]. همچنین با ورود فناوری نانو لایه پوشانی با کمک این فناوری جهت اصلاح ساختار تماس بررسی شده است [۱۷ و ۱۸]. کاربردهای عمومی مانند تولید الکتريسیته در لباس و وسیله‌های جانبی در مراجع مختلف بررسی شده‌اند [۱۹ و ۲۰] و انواع هیبریدی نیز مطالعه شده‌اند [۲۱ و ۲۲].

در کشور ایران نیز تحقیقاتی در این زمینه انجام گرفته است. به‌طور مثال، در سال ۱۳۹۵، آشکارساز نور فرابنفش خودبایاس بر پایه نانوزنراتور تریبوالکتريک انجام پذیرفت [۲۳]. در تحقیق دیگر، در مخابرات بی‌سیم برای تولید انرژی الکتريکی از ژنراتور تریبوالکتريک ساخته شده بهره برده شد [۲۴]. همچنین با استفاده از نانومیله‌های اکسید روی یک میکرو ژنراتور ساخته شد تا راندمان تولید الکتريسیته آن اندازه‌گیری شود [۲۵]. به‌علاوه موارد یادشده، مولد هیبریدی ساخته شده است که هم‌زمان از دو اثر پیزوالکتريک و تریبوالکتريک باهم استفاده می‌کند [۲۶].

روش‌های ترکیبی با دیگر انواع مولدها مانند پیزوالکتريک، پیروالکتريک و فتوشیمیایی نیز از موارد مطالعه دانشمندان است تا افزایش بهره‌وری تولید الکتريسیته را بررسی کنند. به‌طور مثال افزایش الکتريسیته تولیدی در مولد تریبوالکتريک ترکیب شده با پیزوالکتريک مورد تأیید قرار گرفته است [۲۷]. در گزارش دیگر، نحوه ساخت ترکیبی مولد فتوولتا و مولد تریبوالکتريک به‌عنوان یک فناوری جدید ارائه شده است [۲۸ و ۲۹].

موارد ذکر شده تلاش‌های انجام شده در این زمینه پژوهشی جدید را یادآور می‌شود و با توجه به نیاز فناوری‌های جدید به انرژی‌های تجدیدشونده، در این مقاله سعی شده است تا بومی‌سازی ژنراتورهای تریبوالکتريک همراه با بهینه‌سازی ریزساختار صفحات آن جهت تولید الکتريسیته بیشتر مطالعات مورد نیز بر پارامترهای مؤثر انجام پذیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای تولید ژنراتور تریبوالکتريک با توان تولید بیشینه، سعی شده تا اثر تغییر زاویه دو سطح تریبو در ژنراتور که به‌وسیله سنبله با شماره‌های مختلف، پولیش شده‌اند، به‌منظور یافتن زاویه بهینه، بررسی شود. در تحقیقات قبلی [۱۷] روشی ارائه گردید که در آن دو سطح تریبو که با سنبله پولیش شده‌اند، به‌منظور ایجاد تماس مناسب، در یک راستا روی هم

<sup>28</sup> Electrochemical potential

<sup>29</sup> Vertical contact-separation mode

<sup>30</sup> Lateral sliding mode

<sup>31</sup> Single-electrode mode

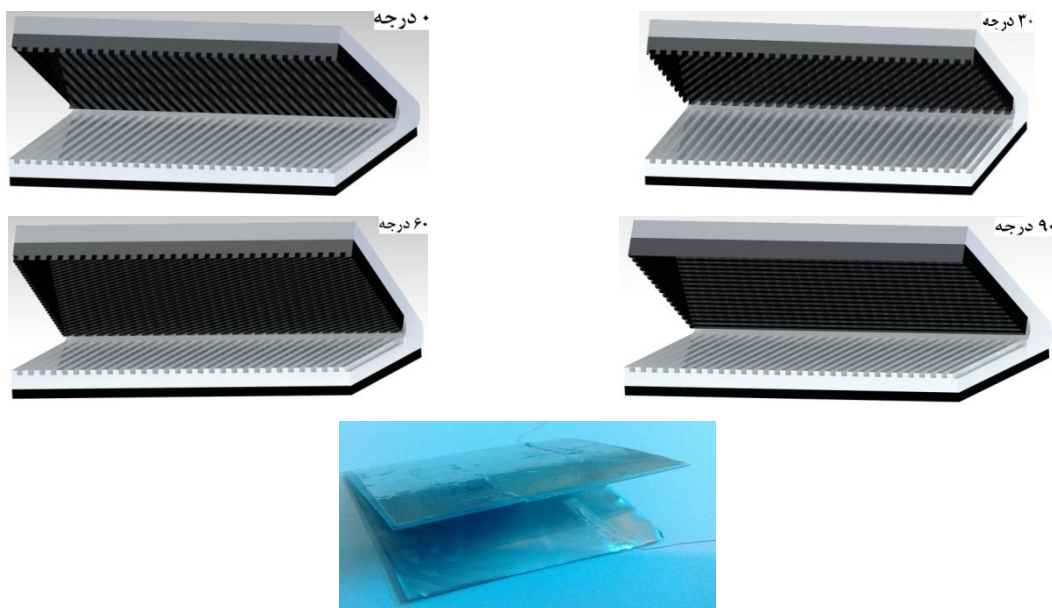
<sup>32</sup> Freestanding triboelectric-layer mode

قرار می‌گیرند. در این تحقیق، فرضیه این‌طور در نظر گرفته شد که اگر دو سطح در یک راستا نباشند و زاویه بین آن‌ها تغییر کند، خروجی الکتریکی (ولتاژ) نیز تغییر می‌کند؛ بنابراین سعی در یافتن زاویه بهینه قرارگیری دو سطح روی یکدیگر گردید. در واقع فرض بر این شد که زاویه بهینه در زوایایی غیر از صفر درجه (یعنی در یک راستا قرار داشتن) است؛ بنابراین زوایای ۰ تا ۹۰ درجه (۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰) بررسی گردیدند.

به‌منظور داشتن خروجی مناسب برای ژنراتور تریبولکتریک، باید دو ماده منتخب که توانایی تولید اثر تریبولکتریک و فاصله مناسبی از هم دارند، انتخاب شوند. برای این منظور، آلومینیم که الکترون‌ده است و پی‌وی سی (PVC)<sup>۳۳</sup> که الکترون گیر است، از پایین جدول، با فاصله مناسبی که در جدول از هم دارند، انتخاب شدند. ضخامت PVC،  $260 \mu m$  و از نوع شفاف می‌باشد. آلومینیم با ضخامت  $90 \mu m$  و خلوص ۹۹.۹۹٪ می‌باشد.

## ۲-۱- اصلاح سطح تماس در ژنراتور

به‌منظور افزایش خروجی ژنراتور، لازم است تا ساختار سطح اصلاح شود. در این تحقیق، برای اصلاح سطح از روش اصلاح با ذرات ساینده استفاده گردید و چهار زاویه استقرار مختلف (۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰) مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شد. برای این منظور، از سنباده با شماره‌های مختلف (۱۰۰ و ۴۰۰) استفاده شد. ابتدا صفحه‌ای از PVC در یک راستای مشخص، به‌وسیله سنباده با شماره‌های ذکرشده، با توجه به زمان بهینه در تحقیقات قبلی، به مدت ۴ دقیقه [۱۷] برای ایجاد خراش‌های لازم روی سطح، پولیش گردید (شکل ۲). سپس صفحه‌ای از آلومینیم نیز به همین ترتیب به مدت ۴ دقیقه با شماره‌های مختلف سنباده، پولیش گردید. تصاویر میکروسکوپی سطح مواد پس از پولیش، در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۱ شماتیک ساختار ژنراتور با اصلاح سطح توسط سنباده در زوایای مختلف (۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰) و تصویر یکی از ژنراتورهای ساخته‌شده



شکل ۲ پولیش صفحات تریبو با شماره‌های مختلف سنباده

<sup>33</sup> Polyvinyl chloride



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری سطوح تریبولکتریک پولیش شده با شماره‌های مختلف سنباده

با توجه به استفاده از حالت تماس- جدایش عمودی و لزوم تحریک نانوژنراتورها با ضربات استاندارد، از دستگاه تحریک مکانیکی استفاده گردید. به منظور اندازه‌گیری ولتاژ، جریان و بار، برای هرکدام از نانوژنراتورها و تأثیری که تغییر در نیروی اعمالی، فرکانس ضربات و فاصله دو صفحه تریبو بر میزان خروجی نانوژنراتورها دارد، لازم است تا اعمال ضربه بر نانوژنراتورها به وسیله دستگاهی استاندارد که بتوان نیروی اعمالی، فرکانس ضربات و فاصله صفحات را به صورت کنترل شده و یکسان برای همه نمونه‌ها اعمال کرد، صورت گیرد. برای این منظور از دستگاه مولد حرکت نوسانی شکل ۴- الف استفاده گردید. با توجه به این که این دستگاه فاصله صفحات را به صورت حداقلی نگه می‌دارد و نیروی اعمالی کم است، برای اندازه‌گیری ولتاژ معمول نانوژنراتور تریبولکتریک از دستگاه تحریک مکانیکی دیگری که فاصله صفحات را به صورت حداکثر می‌توان اعمال کرد و نیروی اعمالی تقریباً در حالت حداکثر و اشباع خود قرار دارد، استفاده گردید (شکل ۴- ب).



(ب)



(الف)

شکل ۴ دستگاه‌های تحریک مکانیکی (الف) قابلیت تغییر نیروی اعمالی و فرکانس ضربه [۳۰] (ب) قابلیت تغییر فرکانس ضربات و اعمال فاصله صفحات به صورت حداکثر

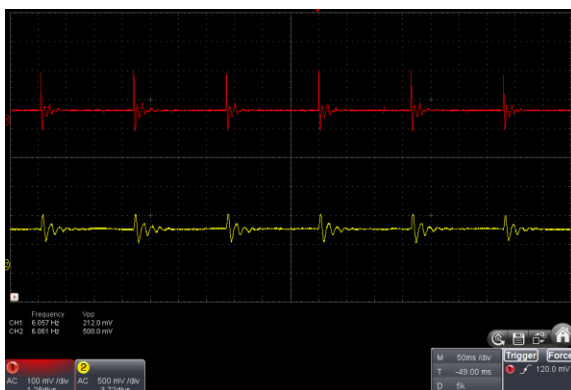
### ۳- نتایج

ولتاژ به دست آمده هر ژنراتور تریبولکتريک به وسیله دستگاه تحریک مکانیکی شکل ۴- الف به دست آمد که مقدار آن برای شماره سنبله ۱۰۰ در زوایای مختلف در شکل ۵ و برای شماره سنبله ۴۰۰ در زوایای مختلف در شکل ۶ آمده است.

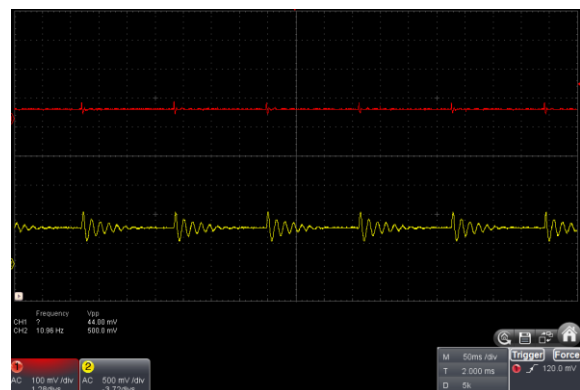
در اصلاح سطح با سنبله شماره ۱۰۰، بیشترین خروجی ولتاژ به دست آمده مربوط به زاویه ۶۰ درجه با  $272\text{mV}$  و پس از آن به ترتیب زوایای ۹۰ درجه با  $244\text{mV}$ ، ۳۰ درجه با  $212\text{mV}$  و ۰ درجه با  $44\text{mV}$  می‌شود. در اصلاح سطح با سنبله شماره ۴۰۰، بیشترین خروجی ولتاژ به دست آمده مربوط به زاویه ۳۰ درجه با  $156\text{mV}$  و پس از آن به ترتیب زوایای ۹۰ درجه با  $120\text{mV}$ ، ۶۰ درجه با  $100\text{mV}$  و ۰ درجه با  $20\text{mV}$  می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در هر دو مورد در زوایای غیر از ۰ درجه و در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه خروجی بالاتری را شاهد هستیم. عوامل پیچیده‌تر شدن، افزایش مساحت و افزایش زبری سطح تماس باعث افزایش توان خروجی ژنراتورها می‌شود. به نظر می‌رسد با تغییر زاویه بین دو صفحه تریبو، ناحیه تماس میکروسکوپی دو صفحه، پیچیده‌تر شده و علاوه بر آن باعث افزایش مساحت تماس دو صفحه و بیشتر شدن زبری بین دو صفحه می‌شود. علاوه بر آن، انتقال الکترون بین دو صفحه در زوایای غیر از ۰ درجه، با پیچیده‌تر شدن سطح تماس، به دلیل برخورد بیشتر برآمدگی‌های ایجاد شده روی سطوح باهم که منجر به افزایش زبری سطح هم می‌شود، راحت‌تر صورت می‌گیرد. در نتیجه مشاهده می‌شود که خروجی ولتاژ همه زوایا از زاویه صفر درجه بیشتر است. ساده‌ترین نحوه تماس دو صفحه با زاویه صفر درجه نسبت به هم است که به نظر می‌رسد تماس واقعی بدین شکل صورت نگیرد و خراش‌ها به صورت کامل در همدیگر منطبق نشوند. با افزایش زاویه، صفحات در محل تلاقی‌های با سطح مقطع خاصی روی هم قرار می‌گیرند که می‌توان این نوع تماس را با ساخت صفحات به روش قالب‌گیری مقایسه نمود. بدین شکل که برخورد دو صفحه در این برآمدگی‌ها صورت می‌گیرد و باعث به وجود آمدن عوامل افزایش توان خروجی ژنراتورها که در بالا اشاره گردید، می‌شود. البته باید توجه داشت که خروجی‌های به دست آمده با دستگاه تحریک مکانیکی به دلیل ساختار این دستگاه و لزوم قرارگیری دو صفحه تریبو در فاصله کمی از هم و اعمال نیروی کم، پایین و در حد چند صد میلی‌ولت می‌باشد. خروجی زرد رنگ در شکل ۵، مرتبط با خروجی لودسل می‌باشد که همان‌طور که مشاهده می‌گردد، برای تمامی آزمایش‌ها، ارتفاع دستگاه به گونه‌ای تنظیم شده تا ولتاژ پیک تا پیک لودسل، مقدار  $500\text{mV}$  باشد. با ثابت بودن نیروی اعمالی و فرکانس ضربه زدن، تنها پارامتر شکل هندسی سطح نمونه‌ها باهم فرق دارد که می‌توان این اختلاف ولتاژ تولیدی را فقط به آن نسبت داد. با آزمایش دیگری که با دستگاه تحریک مکانیکی شکل ۴- ب انجام شد، به دلیل اعمال نیرو و فاصله در حد اشباع، خروجی ولتاژ در حد چند ده ولت می‌باشد؛ اما به دلیل اینکه نیروی اعمالی تأثیر زیادی روی خروجی دارد و در این دستگاه، نیروی اعمالی روی نمونه‌ها تقریباً ثابت است ولی دقیق نمی‌باشد، از دستگاه شکل ۴- الف نیز به منظور مقایسه دقیق‌تر نمونه‌ها استفاده گردید. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶، مشاهده می‌شود که روند افزایش ولتاژ، در هر دو آزمایش برای زوایای غیر از ۰ درجه افزایش داشته است. افزایش شدید ولتاژ در شکل ۷ نسبت به شکل ۵، با فاصله زیاد دو صفحه در نوع قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه تحریک مکانیکی شکل ۴- ب، مرتبط

است. در واقع، دستگاه شکل ۴-ب، به نمونه‌ها اجازه می‌دهد تا صفحاتشان نسبت به هم حداکثر فاصله‌ای که با توجه به شکل خمیده برگشت پذیرشان می‌توانند داشته باشند، پیدا کنند. وقتی نمونه‌ها در این دستگاه قرار داده می‌شوند، دو صفحه تریبو، در ابتدا فاصله مناسبی از هم دارند. با روشن کردن دستگاه، بازو به سمت پایین حرکت کرده و با برخورد به صفحه بالایی، دو صفحه را در تماس کامل باهم قرار می‌دهد. با بازگشت بازو به سمت بالا، به دلیل خاصیت برگشت پذیری ژنراتور، صفحه بالایی ژنراتور به مکان اولیه خود بازمی‌گردد؛ اما چنانچه از دستگاه تحریک مکانیکی شکل ۴-الف استفاده گردد، نمونه‌ها بین دو صفحه فلزی که روی لودسل قرار دارد، محکم می‌شوند و در این حالت، فاصله بسیار کمی بین دو صفحه تریبو برقرار است. بازو با روشن شدن دستگاه به صفحه فلزی بالایی ضربه وارد کرده که این ضربه به ژنراتور و لودسل هم منتقل می‌شود. در نتیجه صفحات ژنراتور در تماس کامل باهم قرار گرفته و با برگشت بازو به سمت بالا، صفحه بالایی به جایگاه اولیه خود بازمی‌گردد. با مقدار ولتاژی که لودسل تولید می‌کند نیز می‌توان به نیروی وارد شده به ژنراتور دست یافت که با کم و زیاد کردن ارتفاع قرارگیری نمونه، این نیرو قابل تغییر است.

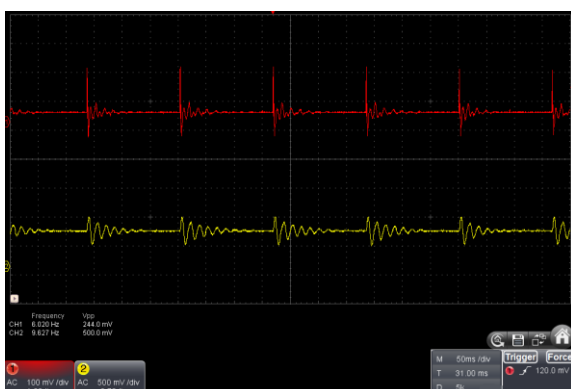
استفاده از چنین مکانیزمی برای اصلاح سطوح تریبو الکتریک، روشی ارزان قیمت، ساده، با سرعت تولید بالا و با قابلیت استفاده در مقیاس‌های بزرگ را برای تولید ژنراتور تریبو الکتریک، معرفی می‌کند. یکی از دلایل عدم توسعه ژنراتورهای تریبو الکتریک، استفاده از تجهیزات گران قیمت نظیر پلاسما و یا قالب‌گیری است که با محدودیت اندازه در تولید و صرف زمان زیاد نیز همراهند که با کمک این روش می‌توان به توسعه این ژنراتورها کمک کرد. ضمن آنکه در این تحقیق از فویل آلومینیم پشت چسب‌دار به عنوان الکتروود استفاده شد که باز هم ویژگی‌های ارزان بودن، سادگی استفاده، سرعت بالای الکتروودگذاری و الکتروودگذاری در مقیاس‌های بزرگ را دارد. بدین ترتیب در تحقیق ارائه شده، هم اصلاح سطح و هم الکتروودگذاری ویژگی‌های مثبت بالا را باهم دارند در حالی که مرجع [۱۷] که مدعی داشتن این ویژگی‌هاست، تنها این ویژگی‌ها را در بخش اصلاح سطح ارائه کرده است.



(ب)



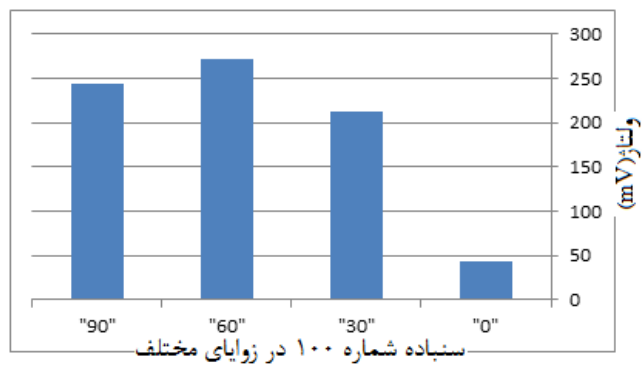
(الف)



(ت)

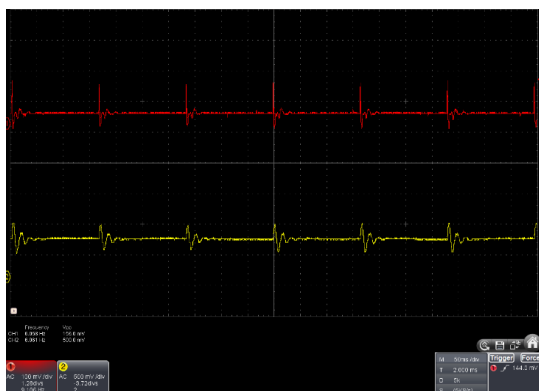


(پ)

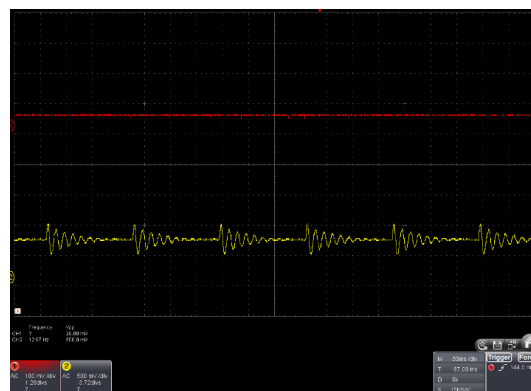


(ث)

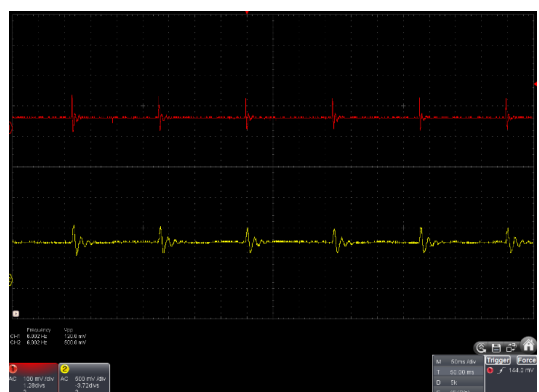
شکل ۵ اندازه‌گیری ولتاژ برای سنباده شماره ۱۰۰ (با دستگاه شکل ۳-۴-الف): الف) زاویه ۰، ب) زاویه ۳۰، پ) زاویه ۶۰، ت) زاویه ۹۰. ولتاژ خروجی کانال ۱ (رنگ قرمز) مرتبط با ولتاژ خروجی ژنراتور تریبولکتریک (هر واحد معادل ۱۰۰mV) و ولتاژ خروجی کانال ۲ (رنگ زرد) مرتبط با لودسل می‌باشد (هر واحد معادل ۵۰۰mV)



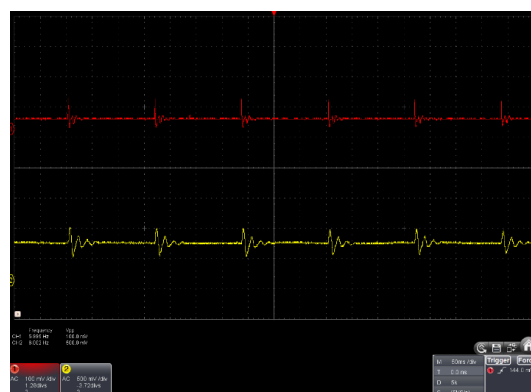
(ب)



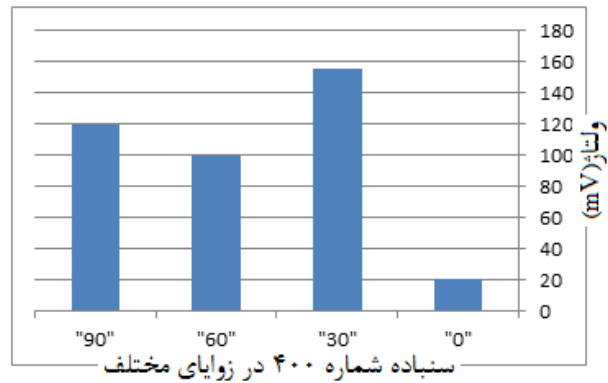
(الف)



(ت)

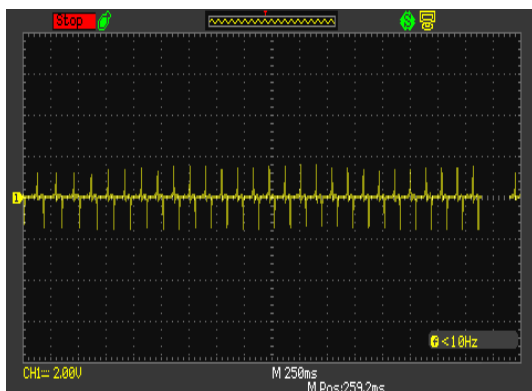


(پ)

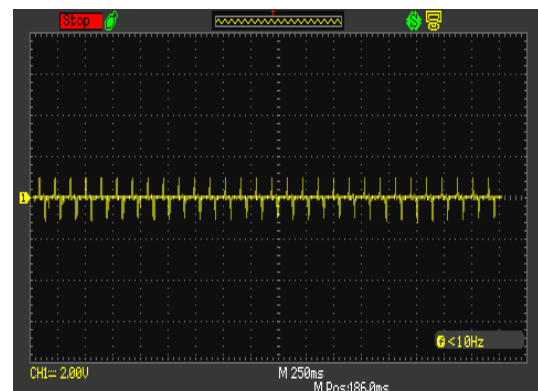


(ث)

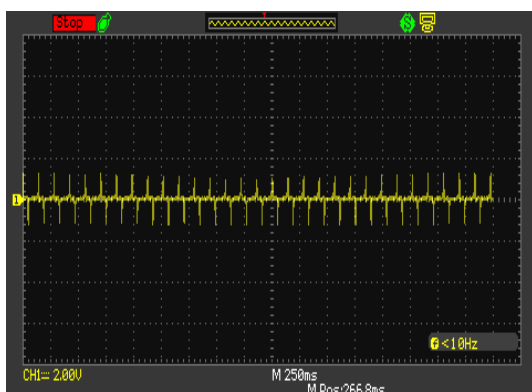
شكل ۶ اندازه گيري ولتاژ براي سنباده شماره ۴۰۰ (با دستگاه شكل ۳-۴-الف): الف) زاويه ۰، ب) زاويه ۳۰، پ) زاويه ۶۰، ت) زاويه ۹۰. ولتاژ خروجي کانال ۱ (رنگ قرمز) مرتبط با ولتاژ خروجي ژنراتور تریبوالکتريک (هر واحد معادل ۱۰۰mV) و ولتاژ خروجي کانال ۲ (رنگ زرد) مرتبط با لودسل می باشد (هر واحد معادل ۵۰۰mV)



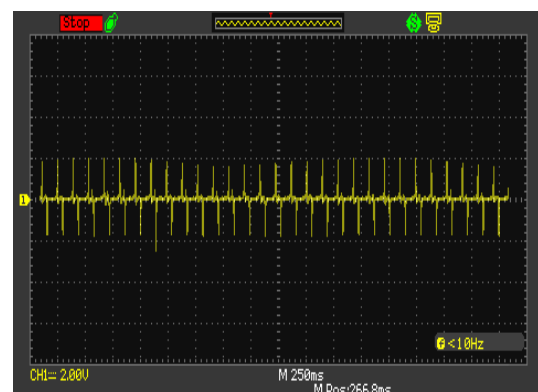
(ب)



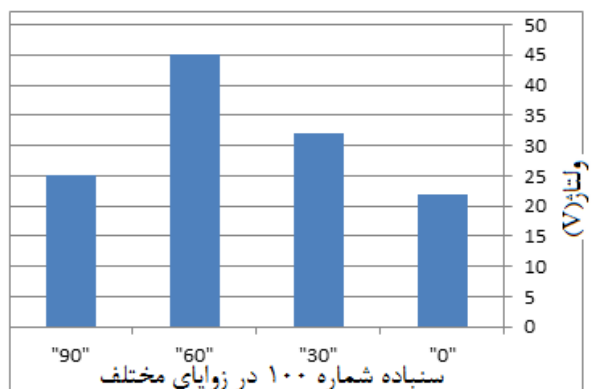
(الف)



(ت)

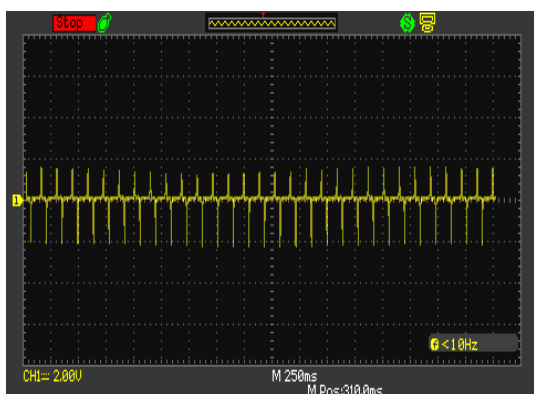


(پ)

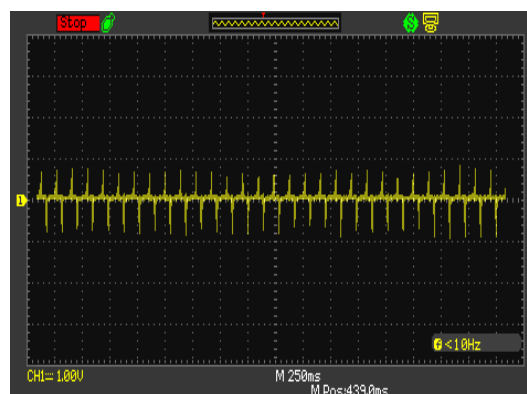


(ث)

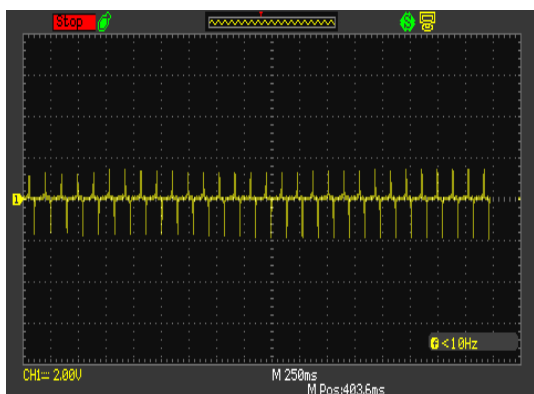
شکل ۷ اندازه‌گیری ولتاژ برای سنباده شماره ۱۰۰ (با دستگاه شکل ۳-۴-ب): الف) زاویه ۰، ب) زاویه ۳۰، پ) زاویه ۶۰، ت) زاویه ۹۰. هر واحد معادل ۲۰۷)



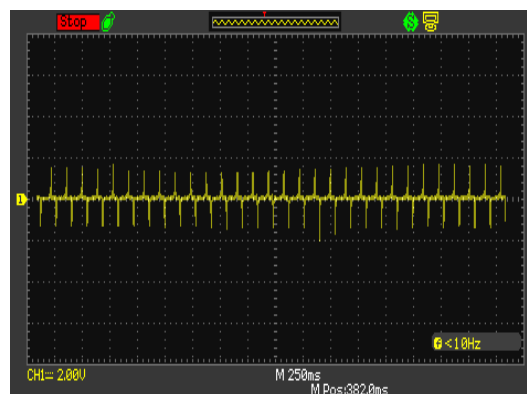
(ب)



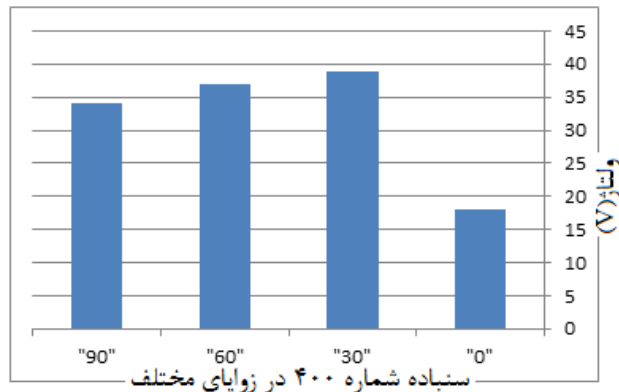
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۸ اندازه‌گیری ولتاژ برای سنباده شماره ۴۰۰ (با دستگاه شکل ۳-۴-ب): الف) زاویه ۰ (هر واحد معادل ۱۰۷)، ب) زاویه ۳۰، پ) زاویه ۶۰، ت) زاویه ۹۰ (هر واحد معادل ۲۰۷)

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق همان‌طور که گفته شد برای رسیدن به جریان الکتروسیسته بیشینه، یک ژنراتور تریبولکتريک ساخته شد که زوایای صفحات تریبولکتريک متفاوت و زبری‌های متفاوت در آن بررسی گردید. این راهکار یعنی اصلاح نحوه استقرار جدید برای اصلاح ساختار سطح تریبو شامل تغییر زاویه سطوح پولیش شده به‌وسیله سنباده باعث دست یافتن به خروجی بالاتر ولتاژ در همه زوایا (۳۰، ۶۰، ۹۰) با شماره سنباده ۱۰۰ و ۴۰۰ نسبت به مراجع گذشته که پولیش دو سطح نسبت به هم فقط در زاویه صفر درجه انجام شده بود. بدین ترتیب این نتایج می‌تواند برای تولید ژنراتورهای کوچک‌مقیاس برای ساخت حسگرها و عملگرهای تجهیزات هوشمند بکار برود.

#### ۵- فهرست علائم

عنوان	علامت اختصاری
میدان الکتریکی	$E$
میدان مغناطیسی	$B$
میدان مغناطیسی کننده	$H$
چگالی بار الکتریکی آزاد	$\rho_f$
چگالی جریان الکتریکی آزاد	$J_f$
میدان جابجایی	$D$
میدان قطبی شدن	$P$
گذردهی در خلاء	$\epsilon_0$
گذردهی دی‌الکتریک	$\epsilon$
ولتاژ مدار باز	$V_{oc}$
جریان مدار بسته	$I_{sc}$
فاصله بین دو صفحه دی‌الکتریک	$d'$
پتانسیل الکتریکی	$U$
چگالی بار القاشده	$\sigma'$
توان	$W$
مقاومت	$R$
جریان	$I$

## ۵- مراجع

- [1] Xu C. Hybrid cell for harvesting multiple-type energies (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology). Georgia Tech. 2012.
- [2] Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS nano*. 2013;7:9533-9557.
- [3] Wang Z L. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators. *Materials Today*. 2017;20:74-82.
- [4] Chen J. Triboelectric nanogenerators (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology). Georgia Tech. 2016.
- [5] Wang Z L, Lin L, Chen J, Niu S, Zi Y. Triboelectric nanogenerators. Berlin, Germany: Springer International Publishing. 2016.
- [6] Zi Y, Wang Z L. Nanogenerators: An emerging technology towards nanoenergy. *Apl Materials*. 2017;5:074103.
- [7] Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors—Principles, problems and perspectives. *Faraday discussions*. 2015;176:447-458.
- [8] Niu S, Wang S, Lin L, Liu Y, Zhou Y S, Hu Y, Wang Z L. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy & Environmental Science*. 2013;6:3576-3583.
- [9] Niu S, Liu Y, Wang S, Lin L, Zhou Y S, Hu Y, Wang Z L. Theory of sliding-mode triboelectric nanogenerators. *Advanced materials*. 2013;25:6184-6193.
- [10] Niu S, Liu Y, Wang S, Lin L, Zhou Y S, Hu Y, Wang Z L. Theoretical investigation and structural optimization of single-electrode triboelectric nanogenerators. *Advanced Functional Materials*. 2014;24:3332-3340.
- [11] Niu S, Liu Y, Chen X, Wang S, Zhou Y S, Lin L, Xie Y, Wang Z L. Theory of freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators. *Nano Energy*. 2015;12:760-774.
- [12] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L. Flexible triboelectric generator. *Nano energy*. 2012;1:328-334.
- [13] Zhang C, Tang W, Han C, Fan F, Wang Z L. Theoretical comparison, equivalent transformation, and conjunction operations of electromagnetic induction generator and triboelectric nanogenerator for harvesting mechanical energy. *Advanced Materials*. 2014;26:3580-3591.
- [14] Wang Z L, Jiang T, Xu L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks. *Nano Energy*. 2017;39:9-23.
- [15] Wang Z L, Chen J, Lin L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy & Environmental Science*. 2015;8:2250-2282.
- [16] Chen Y, Lin Y C, Huang C W, Wang C W, Chen L J, Wu W W, Huang Y. Kinetic competition model and size-dependent phase selection in 1-D nanostructures. *Nano letters*. 2012;12:3115-3120.
- [17] Zhao L, Zheng Q, Ouyang H, Li H, Yan L, Shi B, Li Z. A size-unlimited surface microstructure modification method for achieving high performance triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*. 2016;28:172-178.
- [18] Lee C J, Choi A Y, Choi C, Sim H J, Kim S J, Kim Y T. Triboelectric generator for wearable devices fabricated using a casting method. *RSC advances*. 2016;6:10094-10098.
- [19] Bai P, Zhu G, Lin Z H, Jing Q, Chen J, Zhang G, Ma J, Wang Z L. Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions. *ACS nano*. 2013;7:3713-3719.
- [20] Li X H, Han C B, Zhang L M, Wang Z L. Cylindrical spiral triboelectric nanogenerator. *Nano Research*. 2015;8:3197-204.
- [21] Quan T, Wang X, Wang Z L, Yang Y. Hybridized electromagnetic–triboelectric nanogenerator for a self-powered electronic watch. *Acs Nano*. 2015;9:12301-12310.

- [22] Chen J, Yang J, Li Z, Fan X, Zi Y, Jing Q, Guo H, Wen Z, Pradel K C, Niu S, Wang Z L. Networks of triboelectric nanogenerators for harvesting water wave energy: a potential approach toward blue energy. *ACS nano*. 2015;9:3324-3331.
- [23] Keshvari A, Darbari S. UV detection by Triboelectric Generator. Conference in Optic and Photonics. Iran. 2016.
- [24] Ghorbanzade A, Azari A. Triboelectric Nano Generator for Energy Harvesting in Wireless Telecommunications. 4th Iranian Conference of Cominucations. 2017.
- [25] Rajab M, Ghorbani M. Nano Piezoelectric Generator Based on ZnO. 33th Conference of Physics. 2016.
- [26] Latifi, M., Bagherzadeh, R. Hybrid Pizo-Triboelectric Energy Nanogenerator from Woollen fabric and PVDF/BaTiO3 Nanofibrous Layer. *Advanced Materials and New Coatings*. 2020;9:2474-2481.
- [27] Chen X, Ren Z, Han M, Wan J, Zhang H. Hybrid energy cells based on triboelectric nanogenerator: from principle to system. *Nano Energy*. 2020;75:104980.
- [28] Qiu C, Wu F, Lee C, Yuce M R. Self-powered control interface based on Gray code with hybrid triboelectric and photovoltaics energy harvesting for IoT smart home and access control applications. *Nano Energy*. 2020;70:104456.
- [29] Zhao L, Duan J, Liu L, Wang J, Duan Y, Vaillant-Roca L, Yang X, Tang Q. Boosting power conversion efficiency by hybrid triboelectric nanogenerator/silicon tandem solar cell toward rain energy harvesting. *Nano Energy*. 2021;82:105773.
- [30] Bagheri M M, Latifi M, Merati A A, Bagherzade R. Fabrication of Nano-string by Piezoelectricity Property. 10th National Conference in Textile Engineering. Isfahan. 2015.