تأثیر رسانش پایا بر پاسخ فرکانسی برداشتکنندههای انرژی دولایهٔ مگنتو-الکترو-الاستیک با اتصال سری و موازی

میثم موری شیربانی*	استادیار، گروه مکانیک، پردیس صنعتی شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز، دشت آزادگان، ایران، m.mooryshirbani@scu.ac.ir
سید احسان علوی	استادیار، گروه مکانیک، پردیس صنعتی شهدای هویزه دانشگاه شهید چمران اهواز، دشت آزادگان، ایران، e.alavi@scu.ac.ir
حسين سالمي خزعليه	دانشجوی کارشناسیارشد، گروه مکانیک، پردیس صنعتی شهدای هویزه دانشگاه شهید چمران اهواز، دشت آزادگان، ایران، hossain.salmi@gmail.com

چکیدہ

برداشت انرژی از انرژی مکانیکی اتلافی محیط به عنوان یکی از روشهای تأمین منبع الکتریکی و جایگزینی برای باتریهای شیمیایی در مقیاس کوچک مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. هدف و نوآوری اصلی این مقاله به دست آوردن پاسخ تحلیلی و امکانسنجی افزایش برداشت انرژی با استفاده از برداشت کنندههای دولایه مگنتو-الکترو-الاستیک در شرایط رسانش پایا است. به این منظور ابتدا، معادلات الکتریکی و مکانیکی مربوطه با بهرهگیری از قانون گوس، اهم و فرضیات تیر اویلر-برنولی استخراج شدهاند. سپس با حل این معادلات و به دست آوردن پاسخ تحلیلی، حداکثر مقادیر توان، ولتاژ و جریان الکتریکی در شرایط گرادیان دمایی پایا به دست آمدهاند. نتایج نشان دهنده تولید بیشتر جریان، ولتاژ، و توانهای برداشتی با افزایش دما است. همچنین، جریان تولیدی دو سر الکترودها حالت سری ۲/۱ برابر حالت موازی است که اهمیت بالاتر اتصال سری در هدف تولید جریان بیشتر است. تولیدی دو سر الکترودها حالت سری ۲/۱ برابر حالت موازی است که اهمیت بالاتر اتصال سری در هدف تولید جریان بیشتر است. علاوه بر این حداکثر مقادیر تولیدی دو سر الکترودها حالت سری ۲/۱ برابر حالت موازی است که اهمیت بالاتر اتصال سری در هدف تولید جریان بیشتر است. تولیدی دو سر الکترودها حالت سری ۱/۱ برابر حالت موازی است که اهمیت بالاتر اتصال سری در هدف تولید جریان بیشتر است. برابری توان کل برداشتی در دمای ۲۰۵۵، است استی و موازی ۳/۱۵۶۷۳و ۳/۱۵۶۷۳ و ۲/۵×۲۵۷۵ اندازه گیری شد که نشان دهنده تولید ۳/۲

واژههای کلیدی: برداشت انرژی، باتریهای شیمیایی، مقیاس کوچک، گرادیان دما، مگنتو-الکترو-الاستیک، اتصال موازی و سری.

Steady-State Conduction Effects on the Frequency Responses of Bimorph Magneto-Electro-Elastic Energy Harvesters in Series and Parallel Connections

M. Moory Shirbani	Department of Mechanical Engineering, Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran
S. E Alavi	Department of Mechanical Engineering, Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran
H. Salemi Khazaliye	Department of Mechanical Engineering, Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran

Abstract

The extraction of energy from ambient mechanical energy dissipation has received significant attention as an alternative method for providing electrical power and replacing chemical batteries, particularly at small scale. This paper's main objective and innovation is to obtain an analytical response and feasibility study of increasing energy harvesting using bimorph magneto-electro-elastic harvesters under steady conduction conditions. For this purpose, the relevant electrical and mechanical equations have been extracted using Gauss's, Ohm's, and the Euler-Bernoulli beam assumptions. Then, the maximum values of power generation, voltage, and electric current under a constant temperature gradient have been obtained by solving these equations and obtaining an analytical answer. The numerical results show that the current, voltage, and power output are increased with increasing temperature. Also, the current in the series case is 2.1 times that of the parallel case, which is the higher importance of the series connection to produce to be $3.5673 \ \mu Ws^4/m^2$ and $0.8287 \ \mu Ws^4/m^2$ for series and parallel connections, respectively, indicating that 4.3 times more total power is produced in series connection.

Keywords: Energy harvesting, Chemical batteries, Small scale, Temperature gradient, Magneto-electro-elastic, Series and parallel connections.

این حوزه هستند. با توجه به این اهمیت، حوزهٔ برداشت انرژی جایگاه مهمی در صنعت و دانشگاه پیدا کرده است [۱ و ۲]. انرژی مکانیکی در فرم ارتعاشات مکانیکی، حرکت بدن و یا جریان سیال قابلیت تبدیل به انرژی الکتریکی را داراست [۳ و ۴]. انرژی موجود در ارتعاشات محیط، به دلیل قابلیت دسترسی در مکانها و زمانهای گوناگون از اقبال

۱– مقدمه

هدف از فنّاوری برداشت انرژی، فراهم کردن منابع انرژی الکتریکی در نقاط دور از دسترس و شارژ کردن وسایل ذخیرهٔ انرژی از جمله باتری و خازن است. به عبارت دیگر، سیر صعودی تولید قطعات الکترونیکی با توان کم از یکسو و نیاز به پیدا کردن راهحلی جهت تأمین انرژی حسگرهای بی سیم از سویی دیگر، از عوامل مهم توجه به

[®] نویسندگان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.mooryshirbani@scu.ac.ir تاریخ دریافت: ۲۰/۰۷/۰۹ تاریخ پذیرش: ۲۰/۱۰/۱۷

خوبی برخوردار شده است. برداشتکنندههای انرژی ارتعاشی، از مبدل های الکترومکانیکی مانند مواد هوشمند (پیزوالکتریک' [۵ و ۴] و مكنتو-الكترو-الاستيك' [٧]) كه قابليت وابسته كردن حداقل دو ميدان را دارند، استفاده شده است. جاذبهای انرژی ارتعاشی پیزوالکتریکی، اغلب به صورت تیر و عموماً یکسر گیردار و دولایه، به کار گرفته شده اند. ازجمله کارهای شاخص و ابتدایی، طراحی و ساخت ژنراتور توسط روندی و همکاران در سال ۲۰۰۳ است [۸]. از مهمترین کارهای انجام شده در زمینهٔ مدلسازی تحلیلی و عددی برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک، می توان به کارهای ارترک و اینمن اشاره کرد که با در نظر گرفتن پارامترهای الکتریکی و مکانیکی به مدلسازی تحلیلی برداشت کننده های انرژی پیزوالکتریک پرداختند و سپس نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه و صحت سنجی کردند [۹ و ۱۰]. در ادامه با استفاده از حل ریلی-ریتز راهحل تحلیلی دیگری توسط ژائو ارائه شد، او با استفاده از این راهحل، قادر به ارائه مداری شبیهسازی شده برای بررسی مسائل پیچیدهتر در حوزه زمان شد [۱۱]. شبیهسازی المان محدود توسط امینی و همکاران انجام شد و تطابق مناسب با راه حلهای تحلیلی ارائه شده، اثبات گردید [۱۲ و ۱۳]. محققین در کارهای بعدی بر روی بهرهبرداری از پارامترهای غیرخطی مکانیکی متمرکز شدند و مدلهای الکترومکانیکی خطی قبلی را اصلاح کردند. بر همین اساس، از جاذبهای انرژی با دامنه حرکتی بزرگ استفاده شد که منتج به بهبود عملکرد پهنای باند برداشتکنندههای پیزوالکتریک شد که برای یک تیر یکسر گیردار، آن برداشت غيرمتعارف به نظر مىرسيد [۱۴]. از طرق مختلفى همچون، تغيير نوع ماده پيزوالكتريك، تغيير الگوى الكترودها، تغيير جهت قطبش، لايهاى كردن ماده براى افزايش حجم فعال و تنظيم فركانس تحريك دستگاه این تغییر صورت میگیرد. نوع ماده پیزوالکتریک، تأثیر بسزایی بر كارايي سيستم برداشت انرژي دارد. تاكنون مواد پيزوالكتريك متعددي در این زمینه استفاده شدهاند که رایجترین آنها PZT است [۱۵]. اگرچه، این مواد کاربردهای زیادی در برداشت کنندههای انرژی پیدا کردهاند اما زمانی که تحت بارگذاری چرخه ای قرار می گیرند، موادی مستعد در رشد ترک ناشی از خستگی هستند [۱۶]. برای حذف این عیب، محققین به بررسی دیگر مواد جدیدتر هوشمند با انعطاف پذیری بالاتر پرداختهاند. مواد هوشمند مگنتو-الكترو-الاستيك، علاوه بر ميدان الكتريكي، نسبت به ميدان مغناطيسي هم حساسيت دارند و با وجود یکی، دیگری را میتوان با توجه به خواص ماده تولید کرد [۱۷]. به عبارت دیگر، این مواد قابلیت تبدیل انرژیهای مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی به یکدیگر را دارند که این ویژگی میتواند کاربرد آنها را نسبت به مواد پیزوالکتریک ممتاز و کاربردی تر کند. مواد مگنتو-الکترو–الاستیک از ترکیب خواص مواد پیزوالکتریک و پیزومغناطیس ٔ ساختهشده و برای لایههای برداشت کننده استفاده می شوند بهعنوانمثال از ارتعاش پایه تیر یکسر گیردار، تیر دچار کرنش شده و با قطبي شدن الكتريكي و مغناطيسي يك اختلاف پتانسيل الكتريكي و مغناطیسی در راستای محور قطبی به وجود میآید که قابلیت تولید

توان الکتریکی را دارد [۱۸ و ۱۹]. سیستمهای برداشتکننده مگنتو-الكترو-الاستيك، اولينبار توسط شيرباني و همكاران بهكارگيري و تحلیل شدند [۲۰ و ۲۱]. یکی از نتایج کار آنها، تأثیر مثبت طراحی ساختارهای جدید و مدار مورد استفاده برای سیم پیچهای خارجی اطراف لايه هاى مگنتو-الكترو-الاستيک بود كه از جمله مىتوان به افزایش قابل توجه توان کل برداشتی اشاره کرد. در این مقاله تأثیر تغییرات دما بر رفتار مواد مگنتو-الکترو-الاستیک بررسی می شود. به این منظور ابتدا، معادلات الکتریکی و مکانیکی مربوطه با بهره گیری از قانون گوس و اهم و نیز با فرض انتقال حرارت پایا بدون منبع حرارتی در لایههای تیر برداشتکننده و نیز با فرض تیر اویلر-برنولی استخراجشدهاند. در نتیجه، برداشت کننده به عنوان یک ساختار نازک فرض شده است به طوری که اثرات تغییر شکل برشی قابل اغماض است که با توجه به طراحی و ساخت برداشت کنندهها به صورت ساختارهای نسبتاً نازک، فرضی منطقی و معقول است. از آنجا که برداشت کنندهها به صورت ساختارهای بسیار نازک هستند، میدانهای الكتريكي و مغناطيسي درون صفحهاي ناچيز و قابل صرفه نظر كردن هستند. هدف و نوآوری اصلی این مقاله به دست آوردن پاسخ تحلیلی سیستم و امکانسنجی افزایش برداشت انرژی با استفاده از مواد مگنتو-الكترو-الاستيك در شرايط رسانش پايا است. سپس ميزان توليد توان، ولتاژ و جریان الکتریکی در شرایط گرادیان دمایی پایا بررسی شد.

۲- برداشت کنندههای دولایه مگنتو-الکترو الاستیک تحت تأثیر گرادیان دمایی

در مقاله حاضر، با ارتعاش پایه، تیر دچار کرنش شده و با قطبی شدن هم زمان الكتريكي و مغناطيسي، اختلاف پتانسيل الكتريكي و مغناطیسی در راستای محور قطبی تیر به وجود آمده و امکان تولید توان الکتریکی را مهیا میسازد. این تیر از الکترودهای هادی الکتریکی (جهت استفاده از میدان الکتریکی ایجاد شده) و سیم پیچهای خارجی (جهت استفاده از میدان مغناطیسی القا شده و برداشت انرژی مغناطیسی) تشکیل شده است. شکل ۱ پیکربندیهایی دو لایه مورد تحلیل در کار حاضر را نمایش میدهد. این پیکربندیها دارای طرحهای متقارن و اتصال لایه ها به صورت سری (شکل ۱ الف) و موازی (شکل ۲ ب) هستند. در این شکل، i_M ،V_M ،R_E ،i_E ،V_E و R_M به ترتیب نشان دهندهی ولتاژ، جریان ایجاد شده و مقاومت الکتریکی خارجی دو سر الكترودها، ولتاژ، جريان القا شده و مقاومت الكتريكي خارجي دو سر سیمپیچهای خارجی هستند. همچنین w_{bT} معرف تحریک عرضی پایه ی تیر است. همچنین، b عرض تیر، h_M ضخامت لایه مگنتو-الکترو-الاستیک (به اختصار مگنتو)، h_h ضخامت لایه همگن، T_U و T_L به ترتیب دماهای لایههای بالایی و پایینی مگنتو هستند. مقدار Th دمای لایه همگن را نشان میدهد. رسانایی گرمایی لایههای مگنتو و همگن به ترتیب K_M و K_h هستند. در اولین گام، معادلات اساسی مکانیکی، الکتریکی، و مغناطیسی مواد فعال مگنتو و رفتار مکانیکی برای لایه همگن آورده می شوند. به دلیل استفاده از سیستمهای برداشت کننده

¹ Piezoelectric

² Magneto-Electro-Elastic

³ Piezomagnetic

⁴ Total harvested power

در دماهای مختلف، دما یکی از پارامترهای اساسی در این روابط هستند که در روابط هر دو لایه مگنتو و همگن لحاظ می شوند.



الاستیک (الف) اتصال سری (ب): اتصال موازی

معادلات (۱) تا (۳) به ترتیب روابط مکانیکی- الکتریکی-مغناطیسی در لایه مگنتو (بالانویس M) و رابطه ۴ تنش در لایه همگن (بالانویس h) را بیان می کنند [۲۱].

$$\begin{split} &\sigma_i^M = C_{ik}^M \varepsilon_k^M - e_{ki}^M E_k^M - f_{ki}^M H_k^M - \beta_i^M \Delta T_M \qquad (1) \\ &D_i^M = e_{ik}^M \varepsilon_k^M + h_{ik}^M E_k^M + g_{ik}^M H_k^M - p_i^M \Delta T_M \qquad (7) \\ &B_i^M = f_{ik}^M \varepsilon_k^M + g_{ik}^M E_k^M + \mu_{ik}^M H_k^M + \lambda_i^M \Delta T_M \qquad (7) \end{split}$$

$$\sigma^{h}_{ik} = C^{h}_{ik} \varepsilon^{h}_{i} - \beta^{h}_{i} \Delta T_{h}$$
^(*)

که در این معادلات D_i ، σ_i و B_i به ترتیب نشان دهندهٔ مؤلفههای تانسور تنش، بردار جابهجایی الکتریکی و شار مغناطیسی هستند، همچنین h_{ij} ، C_{ij} فرایب تانسور سختی الاستیک، ضرایب دیالکتریک و مغناطیسی هستند. این دسته از مواد دارای تأثیر همزمان میدانهای کرنش ،E_k الکتریکی E_k و مغناطیسی H_k بر روی تنش، جابهجایی الکتریکی و شار مغناطیسی با ضرایب پیزوالکتریک eij، پیزومغناطیس f_{ij} و الکترومغناطیس g_{ij} هستند. ثابتهای تنش گرمایی مواد مگنتو و همگن بر اساس مدول الاستیک و ضرایب انبساط گرمایی ، برابر با β_M و β_h هستند. با فرض انتقال گرمای یک بعدی α_h ، α_M گرادیان دمایی تنها در امتداد ضخامت برداشت کننده وجود دارد. توزیع دما نسبت به دمای محیط To بین لایههای برداشت کننده مگنتو به صورت زیر محاسبه می شود [۲۱]:

$$\Delta T_{ML}(Z) = T_L - T_o = T_L + \frac{T_U - T_L}{\left[\frac{1}{K_h}h_h + \frac{2}{K_M}h_M\right]} \times (\Delta)$$

$$\left[\frac{1}{K_h}h_h + \frac{1}{K_M}h_M + \frac{1}{K_M}(Z - 0.5h_h)\right], 0.5h_h \le Z \le 0.5h_h + h_M$$

$$\Delta T_{MU}(Z) = T_U - T_o = T_L + \frac{T_U - T_L}{\left[\frac{1}{K_h}h_h + \frac{2}{K_M}h_M\right]} \times (F)$$

$$\left[\frac{1}{K_M}(Z + h_M + 0.5h_h)\right], -0.5h_h - h_M \le Z \le -0.5h_h$$

$$\Delta T_V(Z) = T_V - T_V - T_L \times (F)$$

$$\Delta T_{h}(Z) = T_{h} - T_{o} = T_{L} + \frac{10^{-1}L}{\left[\frac{1}{K_{h}}h_{h} + \frac{2}{K_{M}}h_{M}\right]} \times \left[\frac{1}{K_{M}}h_{M} + \frac{1}{K_{h}}(Z + 0.5h_{h})\right], -0.5h_{h} \le Z \le 0.5h_{h}$$
(V)

با فرض ایزنتروپیک و تیر اویلر-برنولی، روابط (۱) تا (۴) به صورت زیر بازنویسی میشوند [۲۱]: $\sigma_{1}^{M} = C_{11}^{M} \epsilon_{1}^{M} - e_{13}^{M} E_{3}^{M} - f_{13}^{M} H_{3}^{M} - \beta_{1}^{M} \Delta T_{M}$ (λ) $D_{3}^{M} = e_{13}^{M} \epsilon_{1}^{M} + h_{33}^{M} E_{3}^{M} + g_{33}^{M} H_{3}^{M} - p_{3}^{M} \Delta T_{M}$ (۹) $B_3^M=f_{13}^M\epsilon_1^M+g_{33}^ME_3^M+\mu_{33}^MH_3^M+\lambda_3^M\Delta T_M$ $(1 \cdot)$ $\sigma_1^h = C_{11}^h \epsilon_1^h - \beta_1^h \Delta T_h$ (11)همچنین، کرنش ₁6، میدانهای الکتریکی E₃ و مغناطیسی H₃ برای لایههای بالایی (L) و پایینی (U) به صورت زیر هستند (اتصالهای سری و موازی به ترتیب با اندیسهای s و p مشخص شدهاند) [۲۱]: $\epsilon_1 = -zw_{rel,xx}$ (17) $E_{3}^{pU}(t) = -\frac{V_{E}(t)}{h_{M}}, E_{3}^{pL}(t) = +\frac{V_{E}(t)}{h_{M}}$ (17) $E_3^{sU}(t) = E_3^{sL}(t) = -\frac{V_E(t)}{V_E(t)}$ (14) $H_{3}^{p}(t) = H_{3}^{s}(t) = \frac{Ni_{M}(t)}{h_{M}}$ (1Δ)

 w_{rel} تأثير دو جابه جایی تحریک پایه $w_b(t)$ و تغییر مکان نسبی در جابهجایی کلی تیر w(x,t) در رابطه (۱۶) مشاهده می شود (x,t):[۲۱]

$$w(x,t) = w_{rel}(x,t) + w_b(x,t)$$
(19)

معادله دیفرانسیل حرکت حاکم بر ارتعاشات اجباری تیر یکسر گیردار برداشتکنندههای دولایه مگنتو تحت تأثیر گرادیان دمایی به صورت معادله (۱۷) بیان می شود [۲۱]:

$$EI_{eq} w_{rel,xxxx} + (N_{xT})w_{rel,xx} + mw_{rel,tt} + v_{em}V_E(t)[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx}] + v_{mm}V_M(t)[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx}] = -mw_{b,tt}$$
(17)

سختی خمشی معادل مقطع تیر مرکب Eleq و جرم بهازای واحد

طول تیر m به صورت زیر محاسبه میشود: $\int_{2}(\frac{h_{h}}{h_{h}}+hM)^{3}$.]

$$EI_{eq} = C_{11}^{M} b \left\lfloor \frac{h_{h}^{2}}{12} \right\rfloor + C_{11}^{M} b \left\lfloor \frac{2(\frac{2}{2} + 1101)}{3} - \frac{(h_{h})^{3}}{12} \right\rfloor$$
(1A)
$$m = b(\rho_{h}h_{h} + 2\rho_{M}h_{M})$$
(19)

 $m = b(\rho_h h_h + 2\rho_M h_M)$

$$\upsilon_{em}^{p} = 2\upsilon_{em}^{s} = -be_{13}^{M}h_{M}$$
 ($\Upsilon \cdot$)

$$\upsilon_{mm}^{p} = \upsilon_{mm}^{s} = -f_{31}^{M} b. \frac{N}{R_{M}} (h_{M} + h_{h})$$
 ((1))

در رابطه (۱۷)، پارامتر N_{xT} نشان دهنده نیروی ناشی از بار گرمایی در جهت طول تیر برداشت کننده است که می توان آن را از رابطه (۲۲) به دست آورد [۲۱]:

$$\begin{split} N_{xT} &= \int_{-0.5h_h}^{-0.5h_h} b\beta_1^M \Delta T_{MU} dz + \int_{-0.5h_h}^{+0.5h_h} b\beta_1^h \Delta T_h dz + \\ \int_{-0.5h_h}^{0.5h_h+h_M} b\beta_1^M \Delta T_{ML} dz \end{split} \tag{YY}$$

برای استفاده از ولتاژ تولید شده (VE(t، الکترودها را به مقاومت

$$\omega_{\rm r}^2 = \frac{{\rm EI}_{\rm eq}}{m} \left[\left({\rm S}_{\rm lr}^2 - \frac{{\rm N}_{\rm xT}}{2{\rm EI}_{\rm eq}} \right)^2 - \left(\frac{{\rm N}_{\rm xT}}{2{\rm EI}_{\rm eq}} \right)^2 \right] \tag{(\%)}$$

پس از جاگذاری رابطه (۲۷) در روابط (۱۷)، (۲۳) تا (۲۵) و اعمال شرایط عمود بودن توابع شکل مد، معادلات الکترومکانیکی کوپل شده در مختصات مودال به صورت زیر به دست میآیند [۲۰]:

$$\begin{split} \ddot{\eta}_{r}(t) + 2\zeta_{r}\omega_{r}\dot{\eta}_{r}(t) + \omega_{r}^{2}\eta_{r}(t) + \alpha_{em}V_{E}(t) + \alpha_{mm}V_{M}(t) = N_{r}(t) \quad (\texttt{T}\Delta) \\ \gamma_{C}C_{M}\dot{V}_{E}(t) + \gamma_{R}\frac{V_{E}(t)}{R_{E}} = \Theta_{em}\dot{\eta}_{r}(t) + \chi_{me}\dot{V}_{M}(t) \quad (\texttt{T}\gamma) \\ L_{e}\dot{V}_{M}(t) + R_{M}V_{M}(t) = \Theta_{mm}\dot{\eta}_{r}(t) + \chi_{me}\dot{V}_{E}(t) \quad (\texttt{T}\gamma) \\ \Delta e c_{em}\dot{U}_{r}(t) + R_{m}V_{M}(t) = \Theta_{mm}\dot{\eta}_{r}(t) + \chi_{me}\dot{V}_{E}(t) \quad (\texttt{T}\gamma) \\ \Delta e c_{em}\dot{U}_{r}(t) + R_{m}V_{M}(t) = \Theta_{mm}\dot{\eta}_{r}(t) + \chi_{me}\dot{V}_{E}(t) \quad (\texttt{T}\gamma) \\ \bar{U}_{r}\dot{U}_{r}(t) + R_{m}V_{M}(t) = \Theta_{mm}\dot{\eta}_{r}(t) + \chi_{me}\dot{V}_{L}(t) \quad (\texttt{T}\gamma) \\ \Delta e^{p}_{em} = 2\alpha^{s}_{em} = -be^{M}_{13}(h_{h} + h_{M})W_{rel,x}(L) \quad (\texttt{T}\Lambda) \\ \alpha^{p}_{mm} = \alpha^{s}_{mm} = -f^{M}_{31}NR_{M}b(h_{h} + h_{M})W_{rel,x}(L) \quad (\texttt{T}\gamma) \\ C_{M} = \frac{h^{M}_{33}bL}{h_{r}} \quad (\texttt{F}\cdot) \end{split}$$

$$L_{c} = \mu_{33}^{M} N^{2} \frac{bL}{h_{M}}$$
(*1)

$$\chi^p_{em} = \chi^s_{em} = \chi^p_{me} = \chi^s_{me} = g^M_{33} N R_M \frac{bL}{h_M}$$
 (F7)

$$\begin{split} \Theta^{p}_{em} = \Theta^{s}_{em} = -be^{M}_{l3}(h_{h} + h_{M})W_{rel,x}(L) \qquad (\ref{algebra}) \\ \Theta^{p}_{mm} = \Theta^{s}_{mm} = -f^{M}_{31}NR_{M}b(h_{h} + h_{M})W_{rel,x}(L) \qquad (\ref{algebra}) \\ Q^{p}_{R} = 2\gamma^{p}_{R} = 2 \qquad (\ref{algebra}) \end{split}$$

$$\gamma_{\rm C}^{\rm p} = 2\gamma_{\rm C}^{\rm p} = 1 \tag{(FF)}$$

۲-۲ پاسخ فرکانسی برداشتکنندههای دولایه مگنتو ۱لکترو-الاستیک تحت تأثیر گرادیان دمایی

با حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر برداشت کنندههای دولایه مگنتو، عباراتی تحلیلی جهت پیش بینی پاسخ فرکانسی آنها در شرایط تحریک هارمونیک پایه با دامنه W_{AT} و فرکانس ۵۰ استخراج می شود. در این شرایط، پاسخ ارتعاشی تیر در مختصات مودال ($\eta_r(t)$ ، ولتاژهای VE(t) و (V_M به صورت هارمونیک با فرکانس ۵۰ خواهند بود [۲۱].

$$V_{E}(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \Theta_{mer} N_{Ar}}{\left[(\omega_{r}^{2} - \omega^{2}) + j(2\zeta_{r}\omega_{r}\omega)\right]} e^{j\omega t}}{\left[(\frac{1}{\gamma_{R}R_{E}} + \gamma_{C}j\omega C_{M}) + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \Theta_{mer} v_{emr}}{\left[(\omega_{r}^{2} - \omega^{2}) + j(2\zeta_{r}\omega_{r}\omega)\right]}\right]^{+}} \qquad (fV)$$

$$n_{me} \left[\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \Theta_{mer} v_{mmr}}{\left[(\omega_{r}^{2} - \omega^{2}) + j(2\zeta_{r}\omega_{r}\omega)\right]} - \chi_{me}\right]}$$

$$V_{M}(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \Theta_{mmr} N_{Ar}}{\left[(\omega_{r}^{2} - \omega^{2}) + j(2\zeta_{r}\omega_{r}\omega)\right]} e^{j\omega t}}{\left[(R_{M} + j\omega L_{e}) + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \Theta_{mmr} v_{mmr}}{\left[(\omega_{r}^{2} - \omega^{2}) + j(2\zeta_{r}\omega_{r}\omega)\right]}\right]^{+}} \qquad (fA)$$

$$n_{em} \left[\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \Theta_{mmr} v_{emr}}{\left[(\omega_{r}^{2} - \omega^{2}) + j(2\zeta_{r}\omega_{r}\omega)\right]} - \chi_{em}\right]$$

در حالی که N_Ar، دامنه تابع نیروی مکانیکی (N_rt ، به صورت زیر بیان میشود [۲۱]:

$$N_{r}(t) = N_{Ar}e^{j\omega t}, N_{Ar} = -m\omega^{2}W_{AT}\int_{0}^{L}q_{r}(x)dx \qquad (49)$$

با استفاده از قانون اهم (V=R*i) و به دست آوردن عبارات تحلیلی PM میتوان روابط تحلیلی توانهای برداشتی P_M ،P_E و P_M الکتریکی R_E متصل می شوند. سپس، با استفاده از قانون گاوس، اهم و روابط (۱۰)، (۱۲) و (۱۴)، نتیجه به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{split} & \frac{V_E^s(t)}{R_M} + \frac{h_{33}^{M}bL}{2h_M}\dot{V}_E^s(t) = -0.5e_{31}^M(h_M + h_h)bw_{rel,xt}(L,t) + \\ & R_M^{M} + \dot{V}_M^s(t) + p_3^M bL \frac{\partial\Delta T_M(0.5(h_M + h_h))}{\partial t} \end{split} \tag{77}$$

حرکت نسبی بین لایه مگنتو و حلقههای سیم پیچ در حین تحریک ارتعاشی، شار عبوری از حلقههای سیم پیچ را تغییر می دهد. در نتیجه با استفاده از قانون القای فارادی، ولتاژ القا شده در سیم پیچهای خارجی بر حسب تعداد حلقهها N و تغییرات چگالی شار مغناطیسی B₃^M به صورت زیر نوشت [70]:

$$V_{M}(t) = \sum_{i=1}^{N} \prod_{A_{i}} \frac{\partial B_{33}^{M}}{\partial t} dA$$
 (YΔ)

سپس با استفاده از جاگذاری روابط (۱۰) تا (۱۵) در رابطه (۲۴)، معادلات دیفرانسیلی زیر به عنوان معادلات دیفرانسیلی مدار الکتریکی دو انتهای سیمپیچها به دست میآید:

$$\begin{split} v_{M}^{s,p} &= \int_{0}^{L} b \left[-f_{31}^{M} (h_{h} + h_{M}) w_{rel,xx} - \frac{g_{33}^{M}}{h_{M}} V_{E}^{s,p}(t) + \frac{\mu_{33}^{M}}{h_{M}} \frac{N}{R_{E}} V_{M}^{s,p}(t) \right] dx \\ &= -f_{31}^{M} t_{Mc} b w_{rel,x}(L,t) - \frac{g_{33}^{M} b L}{h_{M}} V_{E}^{s,p}(t) + \frac{\mu_{33}^{M} b L}{h_{M}} \frac{N}{R_{M}} \dot{V}_{M}^{s,p}(t) \end{split}$$
(79)

با استفاده از روش جداسازی متغیرها، میتوان جابهجایی نسبی تیر را تابعی از شکل مد (q,(t) و پاسخ زمانی (q,(t به صورت زیر نوشت [۲۰]:

$$v_{rel}(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} q_r(x) \eta_r(t)$$
 (YY)

سپس حل معادله ارتعاشات آزاد تیر برداشتکننده با استفاده از تکنیک جداسازی متغیرها، به صورت زیر به دست میآید:

$$EI_{eq}q_{r}^{(4)} - N^{T}q_{r}^{(2)} - m\omega_{r}^{4}q_{r} = 0$$
(YA)

در معادله (۲۸) ۵۰، ۵۰ فرکانس طبیعی مدهای ارتعاشی است. تابع شکل مد را میتوان با تعیین ضرایب مشخصه معادلات S₁ و S₂ برای هر دما به دست آورد.

$$q_{r}(x) = \frac{1}{\sqrt{mL}} \begin{bmatrix} \cosh S_{1r}x - \cosh S_{2r}x + \\ \Lambda_{r} \left(-\sinh S_{1r}x + \frac{S_{1r}}{S_{2r}} \sin S_{2r}x \right) \end{bmatrix}$$
(Y9)
$$\Lambda_{r} = - \begin{bmatrix} \frac{S_{1r}^{2} \cosh S_{1r}L + S_{2r}^{2} \cos S_{2r}L}{S_{r}^{2} \sinh \theta_{1L} + S_{1r}S_{2r} \sin S_{2r}L} \end{bmatrix}$$
(Y•)

متغیرهای معادلات S1 و S2 برای با حل دترمینان زیر به دست میآیند [۲۱]:

$$\det \begin{bmatrix} S_{lr}^2 \cosh S_{rl}L + S_{2r}^2 \cos S_{2r}L & S_{lr}^2 \sinh S_{lr}L + S_{lr}S_{2r} \sin S_{2r}L \\ S_{lr}^3 \sinh S_{lr}L - S_{2r}^3 \sin S_{2r}L & S_{lr}^3 \cosh S_{lr}L + S_{lr}S_{2r}^2 \cosh S_{2r}L \end{bmatrix} = 0 \qquad (\texttt{``)}$$

با توجه به اینکه اختلاف دما در راستای ضخامت تیر باعث ایجاد نیروی محوری N_T میشود، سه پارامتر ۵_۲، S₁ و S₂ وابسته به N_T، به صورت زیر به دست میآیند[۲۱]:

$$S_{Ir}^{2} = \frac{N_{xT}}{2EI_{eq}} + \sqrt{\left(\frac{N_{xT}}{2EI_{eq}}\right)^{2} + \left(\frac{m\omega_{r}^{2}}{EI_{eq}}\right)^{2}}$$
(YY)

$$S_{2r}^{2} = -\frac{N_{xT}}{2EI_{eq}} + \sqrt{\left(\frac{N_{xT}}{2EI_{eq}}\right)^{2} + \left(\frac{m\omega_{r}^{2}}{EI_{eq}}\right)^{2}}$$
(°°)

را به دست آورد (۲۰۱۰ ۹۰–۹۶). از آنجایی که برداشتکنندهها در نزدیکی اولین فرکانس طبیعیشان، دارای حداکثر عملکرد از نظر ولتاژ، جریان و توان برداشتی هستند، تحت تحریک در فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی شان قرار میگیرند. در کار حاضر هم با این فرض، توابع تحلیلی استخراج شده در روابط (۴۷) و (۴۸) در نزدیکی مده اول ارتعاشی بررسی و تحلیل شدهاند و ولتاژ، جریان و توان تولیدی در مدهای دوم، سوم و ... نسبت به مود اول ناچیز و قابل صرفه نظر کردن هستند.

۳- نتایج عددی پاسخ دینامیکی

در ادامه، نتایج عددی عملکرد برداشت کنندههای دولایه مگنتو در دماهای مختلف ارائه میشوند. در جدول ۱ پارامترهای خواص و هندسی لایههای برداشت کننده ارائه شده است. شایان ذکر است که BaTiO3-CoFe2O4 با درصد حجمی ۵۰ به عنوان لایه مگنتو و آلومینیوم به عنوان لایهٔ همگن انتخاب شدهاند [۲۰].

جدول ۱- پارامترهای خواص و ابعاد برداشتکننده های دو لایه مگنتو-الکترو-الاستیک [۲۱]

C_{11}^M (GN m ⁻²)	۱۸۷/۵	g ₃₃ (N s V ⁻¹ C ⁻¹)	2000
C_{11}^h (GN m ⁻²)	۷۵	$\mu_{33} \ (\mu \ N \ s^2 \ C^2)$	۸۳/۵۰
$e_{31}(C m^{-2})$	-8/۵	$\rho_h(kg\ m^{\text{-}3})$	77.7
$f_{31}(N A^{-1})$	77.	$\rho_M(kgm^{\text{-}3})$	۷۵۰۰
$h_{33}(\mu \ C^2 \ N^{1} \ m^{2})$	۰/۰۱۵	$\beta_M (MC^{-1} N^{-1} m^{-2})$	۲/۵۳۱
h _M (mm)	٠/۵	$\beta_h(MC^{\text{-}1}N^{\text{-}1}m^{\text{-}2})$	١/٢٢۵
h _h (mm)	١	K _M (Wm°C)	۷۵
b (mm)	١٠	K _h (Wm°C)	204
L (mm)	۵۰	$R_{M}\left(\Omega ight)$	۱۰۵
Ν	١٠	$R_E(\Omega)$	١٠٣

پاسخ فرکانسی جریان، ولتاژ و توانهای برداشت شده در دماهای مختلف، بر حسب فرکانس بی بعد شده نسبت به اولین فرکانس طبیعی سیستم ($\Omega = 0/\omega$)، ارائه شدهاند. سپس، با در نظر گرفتن دمای محیط م۰۲۰ دماهای سطح بالا و پایین نیز به ترتیب Ω° ۲۰ در نظر گرفته شدند. این حالت به عنوان حالت بدون اختلاف دمایی شناخته می شود. در ادامه، با تغییر دمای سطح بالا و ثابت نگهداشتن دمای سطح پایین منجر به ایجاد اختلاف دما در تیر برداشتکننده خواهد شد. برای هر اختلاف دما، مقدار تغییر در پارامترهای مذکور برای دو اتصال سری و موازی ترسیم شدهاند. پاسخ فرکانسی جریان تولیدی دو سر الکترودها افزایش می بابد. در دمای Ω° ۲۰ و (الف) رسم افزایش می بابد. در دمای Ω° ۲۰ و فرکانس بدون افزایش می بابد. در دمای Ω° ۲۰ و فرکانس بدون افزایش می بابد. در دمای Ω° ۲۰ و فرکانس بدون می شود. همچنین بیشترین جریان تولیدی برابر با می شود. همچنین بیشترین جریان تولیدی برابر با می شود.

اندر دمای T_{MU}=۱۴۰° برسم نمودار برای اتصال T_{MU}=۱۴۰° موازی در شکل ۲ (ب)، روند نامنظم افزایش و کاهش تغییرات جریان ie مشاهد شد، به طوری که مقادیر بیشترین و کمترین جریان تولیدی به ترتیب در دماهای ۲٬۹۹۲ و ۲۰°۶ به میزان μAs²/m μAs²/m = ie(man) iف(max) برابری حالت سری نسبت به موازی است که اهمیت بالاتر اتصال سری در هدف تولید بیشتر جریان تولیدی دو سر الکترودها است.



شکل ۲-پاسخ فرکانسی جریان دو سر الکترودهای برداشت کنندهی دو لایه با اتصال(الف) سری (ب): موازی تحت تاثیر گرادیان دمایی

در شکلهای ۳ عملکرد فرکانسی جریان تولیدی دو سر سیم پیچ های خارجی برای دماهای مختلف لایه بالایی رسم شده اند. برای اتصال سری و در دمای $2^{\circ} 7$ و $2^{\circ} 949.7 = \Omega$ حداکثر جریانی به میزان $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ حداکثر جریانی به میزان $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ حداکثر جریان ست، در حالی که در دمای $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ حداکثر جریان Mi برابر با $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ محداکثر $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ حداکثر جریان Mi برابر با $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ مقدار با شبت حداکثر $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ معدار با شبت حداکثر $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ مقدار با $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ ادامه پیدا کرد. سپس در دمای $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ مقدار با $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ ادامه پیدا کرد. سپس در دمای $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ مقدار به حداقل و حداکثر مقادیر جریان $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ موازی هم حداقل و حداکثر مقادیر جریان $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ $1^{\circ} - 1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ $1^{\circ} - 1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ $1^{\circ} - 1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ $1^{\circ} - 1^{\circ} - 1^{\circ} 0$ و $1^{\circ} - 1^{\circ}$

و (ب) در عدد مقاومت الکتریکی دو سر الکترودها $R_{\rm E}$ مرب شوند. در دمای $^{\circ}$ دمای $^{\circ}$ حالت سری، حداکثر ولتاژ ایجاد شده برابر با $V_{\rm E}$ محماعا، مقدار $V_{\rm E}$ است. پس از افزایش ولتاژ در تمامی دماها، مقدار آن در دمای $V_{\rm E}$ است. پس از افزایش ولتاژ میری شد. با روندی آن در دمای $^{\circ}$ ۲۰۵ Vs²/m اندازه گیری شد. با روندی متفاوت برای اتصال موازی، حداقل و حداکثر مقادیر ولتاژ $V_{\rm E}$ در $V_{\rm S}^{2}/m$ در ماهای $^{\circ}$ ۲۰۹ Vs²/m (160 Vs²/m) در اندازه $V_{\rm S}^{2}/m$ در اندان $V_{\rm S}^{2}/m$ در دمای $^{\circ}$ ۲۰۹۹ Vs²/m (160 Vs²/m) در $V_{\rm S}^{2}/m$ در دماهای $^{\circ}$ ۲۰۹ در اندازه گیری شد که تفاوت ۲۰٫۳۹ (اندازه گیری شد. که تفاوت ۲۰٫۳۹ (اندازه گیری شد که تفاوت ۲۰٫۳۹ (ا



شکل ۳-پاسخ فرکانسی جریان ایجاد شده دو سر سیم پیچ ها در برداشت کنندهی دو لایه با اتصال(الف) سری (ب): موازی تحت تاثیر گرادیان دمایی

در شکلهای ۳ (الف) و (ب)، تأثیر دما بر تغییرات ولتاژ دو سر سیم پیچ های اطراف لایه مگنتو محاسبه شده اند. پاسخ فرکانسی ولتاژ القائی دو سر سیم پیچها نشان دهنده روند مشابه تغییرات با جریان I_A است. حداقل مقادیر ولتاژ V_M در دمای $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ برای اتصال سری و دمای As²/m مادیار ولتاژ V_M در دمای $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ برای اتصال سری و دمای (S^2/m برای اتصال موازی به ترتیب به میزان $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ مقادیر ولتاژ V_M در $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ برای اتصال موازی به ترتیب به میزان $V_{s}^{2/m}$ مقادیر ولتاژ دمای $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ با مشاهده شکلهای ۴، مشخص است که روند توان برداشت شده ع مشابه روند جریان تولید شده I_{s} در دماهای مختلف است. در شده ع مشابه روند جریان تولید شده ای در داهای مختلف است. در مقدار $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ به میزان $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ ، به میزان $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ به مقدار $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ با $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ به میزان $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ ، به میزان مقدار $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ با $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ به میزان $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ به مقدار $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ با با برایر از می مقدار $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ با با برایر توان هم حداکثر توان ع مقدار $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ با برایر افزایش را نسبت به دمای $\Sigma^{\circ} \cdot 7$ نشان میدهد.



شکل ۴-پاسخ فرکانسی توان برداشت شده دو سر الکترودها در برداشتکنندهٔ دولایه با اتصال (الف) سری (ب): موازی تحت تأثیر گرادیان دمایی

به جهت بررسی میزان تأثیر مثبت سیمپیچهای خارجی بر توان برداشتی، در شکلهای ۵ توان برداشت شده P_M رسم شده است. در اتصال سری و دمای $^{\circ}$ ۰۲، حداکثر توان P_{M} به میزان ۰/۰۱۶۰ μWs⁴/m² تولید میشود در حالیکه این مقدار با افزایش ۲/۴۷ برابری در دمای ۲۰۳۵ برابر با ۳⁴/ws⁴/m² است. همچنین در اتصال موازی حداکثر توان P_M در دمای ℃۱۴۰۰، برابر با ۰/۰۳۱۸ μWs⁴/m² است که ۱/۳۹ برابر افزایش را نسبت به دمای ۰۲ ۲۰ نشان میدهد. در نهایت با رسم شکل های ۶، روند تغییرات توان کل برداشت شده P_{ME} در دماهای مختلف بررسی شده است. حداقل مقادیر توان کل PME در دمای °۲۰، به ترتیب برای اتصال $\cdot/\Delta\DeltaFF\muWs^4/m^2$ و موازی به میزان Ws^4/m^2 و $\cdot/TTFA$ $\mu Ws^4/m^2$ است که تفاوت ۱٫۶۶ برابری حالت موازی با سری است. همچنین، حداکثر مقادیر برداشتی توان P_{ME} در دمای ℃۱۴۰۰، برای اتصال $\cdot/\Lambda \Upsilon \Lambda \Psi W s^4/m^2$ و شوازی به میزان شو $\pi/\Delta S \Psi W s^4/m^2$ و موازی به میزان $\cdot/\Lambda \Upsilon \Lambda \Psi W s^4/m^2$ است که نشان دهنده برتری ۴/۳۰ برابری اتصال سری در تولید توان كل بيشتر است.



شکل ۵-پاسخ فر کانسی توان برداشت شده دو سر سیم پیچها در برداشتکنندهٔ دولایه با اتصال (الف) سری (ب): موازی تحت تأثیر گرادیان دمایی



شکل ۶-پاسخ فرکانسی توان کل برداشت شده در برداشتکنندهٔ دولایه با اتصال (الف) سری (ب): موازی تحت تأثیر گرادیان دمایی

برای بررسی چگونگی تأثیر نسبت ضخامت لایههای برداشتکننده بر حداكثر مقادير جريان، ولتاژ، توان و جابهجايي نسبي، سه حالت مختلف انتخاب شده است. با تغییر دمای لایه بالایی و بررسی نمودارهای پاسخ فرکانسی، حداکثر مقادیر پارامترهای برداشتکننده و دماهای متناظر آنها استخراج شدند و در جداول ۲ و ۳، به ترتیب برای اتصالات سری و موازی ارائه شدهاند. مشاهده می شود که در حالت اول و برای هر دو اتصال، حداکثر مقادیر عملکرد برداشتکننده در دمای ۲۰°۰۲ رخ میدهد. در مقابل، برای حالات دوم و سوم اتصال سری، حداکثر مقادیر پارامترهای الکتریکی در دمای ^C۰۰۲ برداشت می شود در حالی که برای اتصال موازی این مورد در دمای C°۱۴۰ رخ میدهد. این نشان میدهد که افزایش دما همیشه عامل مثبتی برای تولید جریان، ولتاژ و توان برداشتی بیشتر نیست. حداکثر توان کل برداشتی برای اتصالات سری در حالت سوم و اتصال موازی در حالت اول و برابر با $^{\circ}$ ۵/۲۵۷۹ $\mu Ws^4/m^2$ و $^{\circ}$ ۵/۲۵۷۹ $\mu Ws^4/m^2$ در دمای $^{\circ}$ دیدگاه دیگر، می توان با کاهش ضخامت لایه مگنتو و افزایش دمای سطح بالای برداشت کننده، تولید پارامترهای الکتریکی را بهبود بخشید. همچنین نتایج استخراج شده نشاندهنده تأثیر مثبت کاهش

میپیی نیج استوری شده می و افزایش دمای نسان مین ایر سبع نیس ضخامت لایه مگنتو و افزایش دمای لایه بالایی برداشت کننده است. همچنین، تأثیر مثبت افزایش ضخامت لایه مگنتو و کاهش دمای لایه بالایی آن مشاهده میشود. نتایج اتصال سری نشاندهنده حداکثر مقادیر در حالت سوم طراحی است. اتصال سری دارای حداکثر مقادیر بیشتری نسبت به اتصال موازی است. به عنوان مثال، توان کل برداشتی در اتصال سری ۶/۳۴ برابر مقدار اتصال موازی است. یکی از دلایل قابل ذکر برای این رخداد، تغییر مکان نسبی تیر است بیشتر اتصال سری نسبت به اتصال موازی است. علاوه بر این، از نتایج این جداول استنباط میشود که اگر هدف اصلی، طراحی برداشت کننده ای با ضخامت لایه مگنتو ناز کتر باشد، میتوان با افزایش دمای سطح بالایی آن منجر به افزایش تولید جریان، ولتاژ و توان کل برداشتی شد.

نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. شماره پیاپی ۱۱۰۰ جلد ۵۵. شماره ۱. بهار، ۲۰۱۴، صفحه ۲۹–۸۸ – پژوهشی کامل- میثم موری شیربانی و همکارلن

جدول ۲- بیشینه مقادیرپارامترهای عملکرد برداشتکننده دولایه با اتصال سری مگنتو-الکترو-الاستیک تحت تاثیر گرادیان دمایی

	$\begin{array}{c} h_h \!\!=\!\! 2h_M \!\!=\!\! 1mm \\ T_{MU} \!=\!\! 140 \end{array}$	$\begin{array}{c} h_{h} = h_{M} = 1mm \\ T_{MU} = 20 \end{array}$	$\begin{array}{c} 2h_{h}=h_{M}=1mm\\ T_{MU}=20 \end{array}$
$i_{E}(\times^{s} \cdot \cdot) \cdot)$ (As ² /m)	٨/٣٩٩٧	۸/۸۶۳۹	1./220.
$i_{M}(\times^{p} \cdot \cdot \cdot)$ (As ² /m)	۸/۸۹۴۳	٨/١۴٩٨	٧/٧٩٢۵
V_{E} (Vs^{2}/m)	•/\\٣٩٩	•/٨٨۶٣	١/• ٣٢٥
V _M (Vs ² /m)	•/••AA	•/••٨١	•/••YA
$\frac{P_{\rm E}(\times^{\rm P-} \cdot)}{({\rm Ws}^4/{\rm m}^2)}$	34444	31/9274	۵/۲۲۷۵
$\frac{P_{M}(\times^{9-})}{(Ws^{4}/m^{2})}$	•/•٣٩۵	•/•٣٣٢	•/• ٣• ٣
$\frac{P_{ME}(x^{*} \cdot \cdot)}{(Ws^4/m^2)}$	37/0873	5/9818	۵/۲۵۷۹
$\frac{W_{rel}(\times^{p} \cdot \cdot)}{(m/m)}$	۵/۱۳۸۴	1/9988	٣/١٨۵٩

جدول ۱- بیسینه مفادیر پارامترهای عملکرد برداست دسده دولایه با						
اتصال موازى مگنتو-الكترو-الاستيك تحت تاثير گراديان دمايي						
	$\begin{array}{c} h_h = 2h_M = 1mm \\ T_{MU} = 140 \end{array}$	$\substack{ h_h = h_M = 1 mm \\ T_{MU} = 140 }$	$\begin{array}{c} 2h_h = h_M = 1mm \\ T_{MU} = 140 \end{array}$			
$i_{E}(\times^{s} \cdot \cdot) \cdot)$ (As ² /m)	% /9977	7/777	۳/۲۵۸۵			
$i_{M}(\times^{s} \cdot \cdot \cdot)$ (As ² /m)	٧/٩٨٠٣	۵/۹۸۶۳	۵/۸۶۸۳			
V_{E} (Vs ² /m)	•/٣٩٩٢	•/٢٣٣٢	•/322			
V_{M} (Vs ² /m)	•/••٧٩	•/••۵٩	•/••۵٨			
$\frac{P_{\rm E}(\times^{\text{F-}})}{({\rm Ws}^4/{\rm m}^2)}$	•/४१۶٩	•/7771	•/۵۳•٩			
$\frac{P_{M}(\times^{s} \cdot \cdot)}{(Ws^{4}/m^{2})}$	•/•٣١٨	•/• ١٧٩	•/• ١٧٢			
$\frac{P_{ME}(\times^{\$-1})}{(Ws^4/m^2)}$	•/٨٢٨٧	•/٢٩٠٠	•/۵۴۸۱			
$\frac{W_{rel}(x^{*} \cdot \cdot)}{(m/m)}$	4/8410	1/14.4	۲/۰ ۳۴۲			
$\frac{(Ws^4/m^2)}{P_{ME}(\times^{\flat-1}\cdot)}$ $\frac{(Ws^4/m^2)}{W_{rel}(\times^{\flat-1}\cdot)}$ $\frac{(m/m)}{(m/m)}$	•/•٢١٨ •/٨٢٨٧ ۴/۶۴١۵	•/•174 •/74••	•/۵۴۸۱ •/۵۴۸۱			

به منظور بررسی پارامترهای مدارهای الکتریکی بر حداکثر میزان توان برداشتی، شکلهای ۷ (تأثیر مقاومت الکتریکی R_E) و ۸ (تأثیر مقاومت الكتريكي $R_{
m M}$) استخراج شدهاند. همان گونه كه از اين شكلها ملاحظه می شود در دو اتصال سری و موازی، افزایش مقاومت الکتریکی همواره تأثیر مثبتی در افزایش حداکثر مقدار توان کل برداشتی ندارد. به طوری که حداکثر توان تولیدی در مقادیر $R_{\rm E}$ =۱۰^۴ Ω و ،۱۴۰ $^{\circ} \mathrm{C}$ به میزان رخ میدهد. در اتصال موازی و در دمای C_{M} ، ا R_{M} ۲٫۶۹ برابر توان بیشتر به میزان ۸/۴۲۴۳µWs⁴/m² نسبت به اتصال سری است. همچنین برای اتصال موازی بر خلاف اتصال سری، در تمامی مقادیر مقاومتهای الکتریکی، افزایش دما منجر به تولید توان کل بیشتری میشود.

همچنین در هر دو اتصال، حداقل مقادیر توان در حالت رخ میدهد که دمای متناظر برای حالت سری و موازی به $R_{
m E}$ =۱۰ $^{r}\Omega$ ترتيب ℃۸۰ و ℃۲۰ است. همچنين شايان ذکر است که برداشت کنندههای دولایه مگنتو برای اولین بار توسط موری و همکاران معرفی شدند [۲۲]. به منظور بررسی صحت نتایج، با توجه به حضور گرادیان دمایی در این مطالعه و نبود آن در مقاله دیگر، مقایسه روابط و نتایج ارائه شده در دمای محیط با کار شیربانی و همکاران صورت گرفت [۲۲]. با وجود شباهت کامل در دمای محیط در این مطالعه، تطابق کامل در ضرایب استخراجی و نتایج مشاهده شد. از آنجایی که در هر دو كار پاسخ تحليلي سيستم استخراج شدهاند هرگونه كوچكترين مغایرت در نتایج به معنای استخراج نادرست پاسخ تحلیلی در حضور گرادیان دمایی است که بعد از بررسی در کار حاضر مشاهده نشد. به عنوان نمونه مقایسهای بین توان کل استخراجی حالت موازی در شکل ۹ صورت گرفته است که تأیید کننده این امر است.





شكل V-تأثير مقاومت الكتريكي R_E بر حداكثر مقدار توان كل برداشت شده در برداشت كنندهٔ دولایه مگنتو با اتصال (الف) سری (ب): موازی تحت تأثیر گرادیان دمایی



برداشت شده در برداشت كنندهٔ دولایه مگنتو با اتصال (الف) سری (ب): موازی تحت تأثیر گرادیان دمایی

٨۶



برداشت کنندهٔ دولایه مگنتو با اتصال موازی

۴- نتیجهگیری

برداشت کننده کار حاضر، شامل دولایه با خواص فعال مگنتو و یکلایه میانی همگن است که تحت شرایط هدایت حرارت یکبعدی و پایدار قرار گرفته است. ساختارهای فوق، به صورت اتصال سری و موازی الکترودهای متصل به لایههای مگنتو تحلیل و بررسی شدهاند. امکان بهبود عملکرد برداشتکننده با ایجاد تنش مکانیکی اضافی در لایههای مگنتو که ناشی از توزیع دما بین لایههای تیر است، بررسی شده است. فرض بر این است که توزیع دما بین لایهها به صورت انتقال حرارت یکبعدی، پایدار و بدون منبع گرمایی داخلی است. در گام بعدى، معادلات الكتريكي-مكانيكي-مغناطيسي حاكم بر برداشتكننده تحت گرادیان دما در راستای ضخامت استخراج شدند. سپس در سه نسبت ضخامت متفاوت، تأثیر گرادیان دمایی بر پاسخهای فرکانسی جریان، ولتاژ و توان برداشتی توسط الکترودها و سیم پیچهای خارجی بهتفصیل تحلیل شده است. با کمک نتایج رسم شده مشخص شد که میزان توان برداشتی رابطه مستقیمی با دمای سطح بالای تیر دارد. همچنین، نتایج نشان میدهند که بهترین حالت برداشت انرژی در اتصال سری زمانی است که لایههای مگنتو دو برابر لایه همگن ضخامت داشته باشند در حالی که برای اتصال موازی، با ضخامت بیشتر لایه همگن حداکثر توان برداشت می شود. علاوه بر این، بهترین نوع اتصال، اتصال سری است. مقادیر بالاتر توان، جریان و ولتاژ در اتصال سری ناشی از جابه جایی نسبی بیشتر نسبت به اتصال موازی است. همچنین کاهش ضخامت و افزایش دمای لایه بالایی برداشت کننده به طور هم زمان، نتیجه مطلوبی در افزایش توان برداشتی دارد. به عبارتی میتوان بیان کرد اگر برداشتکننده در محیطی با منبع حرارتی قرار گیرد که علاوه بر انرژی ارتعاشی اتلافی، نگاهی هم به برداشت بخشی از انرژی حرارتى موجود داشته باشد آنگاه حداكثر مقادير پارامترهاى الكتريكى در شرایطی رخ میدهد که لایه مگنتو سمت دمای بیشتر و لایه همگن سمت دمای کمتر قرار گرفته باشد. علاوه بر این، افزایش ضخامت لایههای مگنتو و کاهش دمای سطح بالای آن نتیجه مشابهی به همراه دارد. در نهایت، اگر هدف اصلی، طراحی برداشت کننده ای با ضخامت لايه مگنتو نازکتر باشد، ميتوان با افزايش دماي سطح بالايي آن منجر به افزایش تولید جریان، ولتاژ و توان کل برداشتی شد.

۵– نمادها

- ^αh ضرایب انبساط گرمایی لایهٔ همگن (^۲⁻¹) ^αM ضرایب انبساط گرمایی لایهٔ مگنتو-الکترو-الاستیک (^{۲-}K)
 - b عرض تیر برداشت کننده (m)
 - (N/m^2) سختی خمشی معادل مقطع تیر مرکب EI_{eq}
 - Ω نسبت فرکانس تحریک بی بعد شده
 - h انديس بالانويس نمايشگر لايهٔ همگن
 - h_h ضخامت لايهٔ همگن (m)
 - h_m ضخامت لايهٔ مگنتو-الکترو-الاستيک (m)
 - i_E جریان تولید شدهٔ دو سر الکترودها (A)
 - i_M جریان تولید شدهٔ دو سر سیم پیچها (A)
 - رسانایی گرمایی لایهٔ همگن (Wm°C)
 - سانایی گرمایی لایهٔ مگنتو-الکترو-الاستیک(Wm°C) (Wm°C)
 - L_c ضریب خودالقایی سیمپیچها (H)
 - (m) طول برداشت کننده (
 - M انديس بالانويس نمايشگر لايهٔ مگنتو-الكترو-الاستيک
 - N تعداد دور سیمپیچها N
 - N) دامنه نیروی تحریک خارجی (N)
 - N_{xT} بار گرمایی در جهت طول تیر برداشت کننده (N)
 - p اندیس بالانویس نمایشگر اتصال موازی
 - (W) توان الکتریکی برداشتی توسط الکترودها $P_{\rm E}$
 - P_M توان الکتریکی برداشتی توسط سیم پیچها (W)
 - توان كل برداشتى توسط برداشتكننده دولايهٔ مگنتو− الكترو-الاستيک (W)
 - مقاومت الكتريكي متصل به الكترودها (Ω) مقاومت الكتريكي متصل م
 - R_M مقاومت الكتريكي متصل به سيم پيچها (Ω)
 - ^S اندیس بالانویس نمایشگر اتصال سری
 - T_h دمای لایهٔ همگن (C°)
 - T_L دمای لایهٔ بالایی برداشت کننده (°C)
 - T₀ دمای محیط (°C)
 - (°C) دمای لایهٔ پایینی برداشت کننده T_U
 - θ_{MEr} ضریب مودال کوپل مکانیکی-الکتریکی (A.s)
 - (A.s) ضریب مودال کوپل مکانیکی-مغناطیسی $\Theta_{\rm MMr}$
 - (V) ولتاژ ایجادشدهٔ دو سر الکترودها V_E
 - V_M ولتاژ ایجادشدهٔ دو سر سیم پیچها (V)
 - (m) تحریک پایه در جهت عرضی $W_{\rm bT}$
 - ^wrel تغییر مکان هر نقطه تیر نسبت به پایهاش (m)
 - XEM ضريب مودال كوپل الكتريكي-مغناطيسي (Ω/s)
 - XME ضریب مودال کوپل مغناطیسی-الکتریکی (Ω/s) ۵۰ فرکانس تحریک پایه تیر (rad/s)

۶- مراجع

- Wei C, Jing X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017 Jul 1;74:1-8.
- [2] Bizon N, Tabatabaei NM, Blaabjerg F, Kurt E. Energy harvesting and energy efficiency. Technology, Methods, and Applications. 2017;37.

- [19] Moory Shirbani M, Shishehsaz M. Modeling of a novel magneto-electro-elastic energy harvesting system subjected to applied electric voltage with simultaneous use as an electrical actuator system. Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment. 2023 Apr 1;14(2):168-76.
- [20] Shishesaz M, Shirbani MM, Sedighi HM, Hajnayeb A. Design and analytical modeling of magneto-electromechanical characteristics of a novel magneto-electroelastic vibration-based energy harvesting system. Journal of Sound and Vibration. 2018 Jul 7;425:149-69.
- [11] سالمی خزعلیه ح. بررسی عملکرد فرکانسی برداشت کننده های مگنتو-الکتروالاستیک تحت اختلاف دمایی بین لایه های آن. پایاننامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۴۰۲.
- [۲۲] موری شیربانی م. مدل سازی برداشت انرژی در مواد الاستیک-الکتریکی- مغناطیسی. پایان نامهٔ دکتری تخصصی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۹۶.

- [3] Zhao X, Zhu WD, Li YH. Closed-form solutions of bending-torsion coupled forced vibrations of a piezoelectric energy harvester under a fluid vortex. Journal of Vibration and Acoustics. 2022 Apr 1;144(2):021010.
- [4] Alavi SE, Shirbani MM, Hassani AM. Analytical Investigation of the Effect of Temperature Difference Between Layers of Unimorph Piezoelectric Harvesters. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering. 2023 Apr 25:1-4.
- [5] Kaghazian A, Hajnayeb A, Sedighi HM. Analyzing a bimorph piezoelectric nanoscale actuator under primaryresonance excitation. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2023 Apr;64(2):297-307.
- [6] Zhao YF, Gao YS, Wang X, Markert B, Zhang SQ. Finite element analysis of functionally graded magneto-electroelastic porous cylindrical shells subjected to thermal loads. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2024 Sep 1;31(17):4003-18.
- [7] Alavi SE, Moory Shirbani M. Multi-objective Optimization of Double pipe Heat Exchangers from the Point of View of Efficiency and Economics. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. 2024 Mar 5(Articles in Press).
- [8] Roundy S, Wright PK, Rabaey J. A study of low-level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. Computer communications. 2003 Jul 1;26(11):1131-44.
- [9] Erturk A, Inman DJ. A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters. Journal of Vibration and Acoustics. 2008 Jun 11;130(4):041002.
- [10] Erturk A, Inman DJ. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. Smart materials and structures. 2009 Jan 13;18(2):025009.
- [11] Zhao X, Zhu WD, Li YH. Closed-form solutions of bending-torsion coupled forced vibrations of a piezoelectric energy harvester under a fluid vortex. Journal of Vibration and Acoustics. 2022 Apr 1;144(2):021010.
- [12] Amini Y, Fatehi P, Heshmati M, Parandvar HJ. Time domain and frequency domain analysis of functionally graded piezoelectric harvesters subjected to random vibration: Finite element modeling. Composite Structures. 2016 Feb 1;136:384-93.
- [13] Amini Y, Emdad H, Farid M. Finite element modeling of functionally graded piezoelectric harvesters. Composite Structures. 2015 Oct 1;129:165-76.
- [14] Zhang B, Liu H, Zhou S, Gao J. A review of nonlinear piezoelectric energy harvesting interface circuits in discrete components. Applied Mathematics and Mechanics. 2022 Jul;43(7):1001-26.
- [15] Jegadeesan K, Shankar K, Datta S. Design Optimization of Smart Laminated Composite for Energy Harvesting Through Machine Learning and Metaheuristic Algorithm. Arabian Journal for Science and Engineering. 2024 Aug 16:1-4.
- [16] Salazar R, Serrano M, Abdelkefi A. Fatigue in piezoelectric ceramic vibrational energy harvesting: A review. Applied Energy. 2020 Jul 15;270:115161.
- [17] Shirbani MM, Shishesaz M, Sedighi HM, Hajnayeb A. Parametric modeling of a novel longitudinal vibration-based energy harvester using magneto-electro-elastic materials. Microsystem Technologies. 2017 Dec;23:5989-6004.
- [18] Mangalasseri AS, Mahesh V, Mukunda S, Mahesh V, Ponnusami SA, Harursampath D. Vibration-based energy harvesting characteristics of functionally graded magnetoelectro-elastic beam structures using lumped parameter model. Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2022 Jul;10(5):1705-20.