

## مقایسه عملکرد فرکانسی بهینه‌سازی شده برداشت‌کننده‌های انرژی تک لایه مگنتو-الکترو-الاستیک و پیزوالکتریک با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس

استادیار، گروه مکانیک، پردیس صنعتی شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز، دشت آزادگان، ایران،  
 m.mooryshirbani@scu.ac.ir

استادیار، گروه مکانیک، پردیس صنعتی شهدای هویزه دانشگاه شهید چمران اهواز، دشت آزادگان، ایران،  
 e.alavi@scu.ac.ir

میثم موری شیربانی\*

سید احسان علوی

### چکیده

هدف در این مقاله، بهینه‌سازی و مقایسه پاسخ فرکانسی برداشت‌کننده‌های انرژی مگنت و الکترو-الاستیک و پیزوالکتریک است. به این منظور، از الگوریتم بهینه‌سازی جدید شاهین هریس استفاده شده است. پیکربندی برداشت‌کننده‌های تحلیل شده تک‌لایه هستند که شامل یک لایه همگن در زیر و یک لایه با خواص فعال الکتریکی (پیزوالکتریک) و الکترومغناطیسی (مگنتو-الکترو-الاستیک) در بالای آن است. متغیرهای بهینه‌سازی تک هدفه پاسخ فرکانسی ولتاژ و توان‌های الکتریکی برداشتی شامل فرکانس تحریک، پارامترهای هندسی و مدارهای الکتریکی متصل به الکترودها و سیم‌پیچ‌های خارجی اطراف لایه‌های فعال هستند. نتایج بهینه‌سازی در توابع هدف ولتاژ و توان‌های الکتریکی متفاوت به دست آمده‌اند که نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی بهینه عملکرد برداشت‌کننده‌ها دارند. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی نمایان شد که علی‌رغم اینکه برداشت‌کننده‌هایی پیزوالکتریک دارای بیشینه توان برداشتی بیشتری هستند؛ اما عملکرد برداشت‌کننده‌های مگنتو-الکترو-الاستیک در تولید بیشینه جریان تولیدی بسیار قابل توجه است که این ویژگی در راه‌اندازی تجهیزات الکترونیکی در مقیاس میکرو و نانو از اهمیت بسیاری برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، پاسخ فرکانسی، برداشت‌کننده‌های انرژی، مگنتو-الکترو-الاستیک، پیزوالکتریک، الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس.

### Comparing the optimized frequency performance of magneto-electro-elastic and piezoelectric unimorph energy harvesters using Harris Hawk's optimization algorithm

M. M. 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

#### Abstract

This article aims to optimize and compare the frequency response of magneto-electro-elastic (MEE) and piezoelectric energy harvesters. For this purpose, the newly proposed optimization algorithm, Harris Hawk, has been employed. The analyzed energy harvesters are configured as unimorph devices comprising a homogeneous layer at the bottom and an active layer with electromagnetics (MEE) or piezoelectric properties at the top. The optimization variables for single-objective optimization include the excitation frequency, geometric parameters, and electric circuits connected to the electrodes and external coils around the active layers. The optimization yields diverse optimal results for voltage and electrical power outputs, which is crucial in optimizing the harvester's performance. A comprehensive conclusion reveals that although piezoelectric harvesters exhibit higher maximum harvested power, the performance of MEE harvesters in generating maximum produced current is notably significant. This characteristic holds substantial importance in deploying electronic devices at the micro and nano scales.

**Keywords:** Optimization, Frequency response, Energy harvesters, Magneto-Electro-Elastic, Piezoelectric, Harris Hawk's optimization.

این حوزه هستند. استفاده از این فناوری دارای پیامدهای زیست‌محیطی زیادی از جمله، کاهش زیاده‌های شیمیایی ناشی از جایگزینی باتری‌ها و سودآوری اقتصادی با کاهش هزینه‌های نگهداری است. از دیگر پتانسیل‌های این فناوری می‌توان به فعال کردن برنامه‌های کنترلی بی‌سیم به عنوان عنصری در جهت افزایش امنیت عمومی اشاره کرد. با توجه به پتانسیل ذکر شده، حوزه برداشت انرژی، توجه دانشگاهیان و صنعتگران را به خود جلب کرده است که منتج به تحقیقات گسترده و تولید محصولات جدیدی شده است [۴-۶]. در حالی که مواد پیزو سرامیک از قرن بیستم دارای استفاده‌های کاربردی بسیاری بودند؛ اما کاربرد آن‌ها در جاذب‌های انرژی ارتعاشی تا اواسط

#### ۱- مقدمه

فرایند به دست آوردن انرژی از محیط اطراف و تبدیل آن به انرژی الکتریکی قابل استفاده را برداشت انرژی گویند. در دو دهه گذشته، برداشت انرژی از انرژی اتلاف شده در محیط به منظور راه‌اندازی ادوات الکترونیکی با توان پایین، توجه بسیاری از محققین را جلب کرده است [۳-۱]. هدف از این فناوری، فراهم کردن منابع انرژی الکتریکی در نقاط دور از دسترس و شارژ کردن وسایل ذخیره انرژی از جمله باتری‌ها و خازن‌ها است. به عبارت دیگر، سیر تکاملی تولید قطعات الکترونیکی با توان پایین از یک‌سو، و نیاز به پیدا کردن راه‌حلی جهت تأمین انرژی حسگرهای بی‌سیم از سویی دیگر، از عوامل توجه به

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.mooryshirbani@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۳۰/۰۴/۱۱

دهه ۱۹۹۰ پیشنهاد نشده بود. مهم‌ترین دلیل این تأخیر آن بود که پیرو سرمایه‌ها توان پارازیتی تولید می‌کردند که به‌تنهایی قابل استفاده برای کاربرد در وسایل الکتریکی نبودند. در اواخر قرن ۲۰ با توجه با قانون مور [۷]، تمامی مدارها به سمت کوچک‌سازی پیش رفت. طبق قانون مور، ترانزیستورها باید هر یک یا دو سال یک‌بار به اندازه ۵۰ درصد کوچک شوند، بنابراین انرژی مورد نیاز آن‌ها به تناسب این کوچک‌سازی به سمت کم‌مصرف شدن پیش رفت. پیشرفت سیستم‌های MEMS، محدودیت‌های فیزیکی دستگاه‌های الکترومکانیکی کوچک را پس زد و مرزهای جدیدی برای تحقیق و گسترش حسگرها و عملگرهای کم‌هزینه و کم‌مصرف رقم زد [۸]؛ بنابراین، به دلیل پیشرفت مدارها به سمت کوچک شدن، دیگر توان پارازیتی حاصل از پیروالکتریکی‌ها بی‌مصرف نبود. برداشت‌کننده‌های انرژی ارتعاشی، از مبدل‌های الکترومکانیکی که قابلیت وابسته کردن حداقل دو میدان را دارند، از جمله مواد پیروالکتریک [۹ و ۱۰] و مگنتو-الکترو-الاستیک استفاده شده است [۱۱ و ۱۲]. مبدل‌های پیروالکتریک و مگنتو-الکترو-الاستیک دارای چگالی انرژی بالاتری در مقایسه با مبدل‌های الکترواستاتیک و الکترومغناطیسی هستند که باعث شده است در دهه گذشته، تمرکز و مطالعه بیشتری بر روی آنها صورت گیرد. از مهم‌ترین کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی تحلیلی و عددی برداشت انرژی از مواد پیروالکتریک، می‌توان به کارهای ارتزک و اینمن اشاره کرد که با در نظر گرفتن پارامترهای الکتریکی و مکانیکی به مدل‌سازی تحلیلی برداشت‌کننده‌های انرژی پیروالکتریک پرداختند و سپس نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه و صحت‌سنجی کردند [۱۳]. اوایل قرن ۲۱، جاذب‌های انرژی ارتعاشی پیروالکتریکی بسیار دور از ذهن بود؛ اما تحقیقات روی این مسأله گسترش یافت. کاربرد بالقوه این فناوری بسیار گسترده بود؛ اما یکی از زمینه‌های بسیار کاربردی این فناوری، در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. جاذب‌های انرژی ارتعاشی پیروالکتریکی، اغلب به‌صورت تیر و عموداً یکسر گیردار و دولایه، به کار گرفته شده‌اند [۱۴]. از جمله کارهای شاخص و ابتدایی، طراحی و ساخت ژنراتور توسط روندی و همکاران است [۱۵]. توان خروجی ژنراتور طراحی شده آن‌ها برای بسیاری از دستگاه‌های میکروالکترونیکی کم‌مصرف کافی است.

مواد مگنتو-الکترو-الاستیک، علاوه بر میدان الکتریکی، نسبت به میدان مغناطیسی هم حساسیت دارند و با وجود یکی از این میدان‌ها، می‌توان میدان دیگر را تولید کرد [۱۶]. 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 پیروالکتریک ممتاز و کاربردی‌تر کند. سیستم‌های برداشت‌کننده مگنتو-الکترو-الاستیک به عنوان یک روش جدید به منظور بالا بردن چگالی توان برداشت شده الکتریکی، اولین بار توسط شیربانی و همکاران به کارگیری و تحلیل شدند [۱۷ و ۱۸]. برداشت‌کننده‌های پیشنهادی، دارای ساختار یکسر گیردار با لایه‌های کامپوزیت‌های مغناطیسی-الکتریکی-الاستیک هستند که در اثر تحریک ارتعاشی طولی و عرضی پایه، می‌توانند پتانسیل الکتریکی و مغناطیسی متناوب تولید کنند. یکی از نتایج مهم کار آن‌ها، تأثیر مثبت طراحی ساختارهای جدید و مدار مورد استفاده برای سیم‌پیچ‌های خارجی اطراف لایه‌های مگنتو-الکترو-الاستیک بود که از جمله می‌توان به افزایش ۴۳ درصدی توان

کل برداشتی اشاره کرد. روش‌های بهینه‌سازی در مهندسی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، زیرا سعی می‌شود بهترین راه‌حل‌ها با توجه به وزن محدودیت‌ها و اهداف مختلف برای مسائل پیچیده کشف شود. در مهندسی مکانیک، روش‌های بهینه‌سازی برای طراحی و تجزیه و تحلیل سازه‌ها، سیستم‌ها و فرایندهایی که به طور کارآمد نیروها، تنش‌ها و شرایط دینامیکی را تحمل می‌کنند، به کار می‌روند [۱۹] و [۲۰]. الگوریتم‌های بهینه‌سازی به مهندسان کمک می‌کنند تا بهترین تنظیمات یا پارامترهایی که منجر به عملکرد بهتر، کاهش هزینه و افزایش ایمنی می‌شوند، پیدا کنند. هدف در این مقاله ارائه دیدگاه جامع و مقایسه‌ای بین برداشت‌کننده‌های انرژی تک لایه مگنتو-الکترو-الاستیک و پیروالکتریک، با تمرکز اصلی بر روی بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم جدید بهینه‌سازی شاهین هریس<sup>۱</sup> است. فرایند بهینه‌سازی شامل در نظر گرفتن توابع هدف مختلف است تا بتوان با شناسایی راه‌حل‌های بهینه، معیارهای طراحی را بهبود بخشند. بهینه‌سازی انجام شده رویکرد جامعی را برای دستیابی به بالاترین سطوح کارایی و عملکرد ارائه می‌دهد که به تناسب با حالات و الزامات و نیازهای عملیاتی مختلف پاسخ می‌دهد. الگوریتم شاهین هریس، یک الگوریتم فرا ابتکاری جدید است که در سال ۲۰۱۹ ارائه شده است [۲۱]. الگوریتم‌های فرا ابتکاری دسته‌ای از الگوریتم‌ها هستند که به صورت گسترده توسط محققان در ایران و جهان برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ریشه و پیدایش الگوریتم‌های فرا ابتکاری به الگوریتم ژنتیک برمی‌گردد که با تکیه بر نظریه تکامل داروین، یک الگوریتم ریاضی برای حل مسائل بهینه‌سازی مطرح می‌کند. از آن به بعد با مطالعه و پژوهش بر روی رفتارهای مختلف موجود در طبیعت، الگوریتم‌های تکاملی و فرا ابتکاری متعددی معرفی شده است. هر الگوریتم تکاملی جدیدی که معرفی می‌شود برای اثبات قدرت خود در بهینه‌سازی باید بر روی دوفاز مهم یعنی اکتشاف<sup>۲</sup> و بهره‌برداری<sup>۳</sup> تمرکز خوبی داشته باشد و بتواند تعادلی خوبی بین این دوفاز ایجاد کند و سپس بر روی مسائل موجود مختلف امتحان شود و نتایج آن با الگوریتم‌های قدیمی‌تر مقایسه شود. الگوریتم شاهین هریس، به خوبی تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری را اعمال کرده است و با توجه به نتایجی که در شبیه‌سازی‌ها بر روی مسائل موجود و توابع هدف مختلف به دست آمده است توانایی خود را در یافتن پاسخ‌های بهینه‌تر و سریع‌تر را به نسبت سایر الگوریتم‌ها نشان داده است [۲۲-۲۴].

## ۲- برداشت‌کننده‌های تک‌لایه مگنتو-الکترو-

### الاستیک و پیروالکتریک

در مقاله حاضر، عملکرد برداشت‌کننده‌های تک‌لایه که شامل لایه‌های با خواص فعال مغناطیسی-الکتریکی-الاستیک (برداشت‌کننده مگنتو-الکترو-الاستیک) و پیروالکتریک (برداشت‌کننده پیروالکتریک) هستند با الگوریتم شاهین هریس بهینه‌سازی و تحلیل می‌شوند. در اینجا، منظور از برداشت انرژی، برداشت انرژی ارتعاشی است که از ارتعاش پایه تیر حاصل می‌شود. با ارتعاش عرضی پایه، تیر

<sup>1</sup> Harris Hawk's optimization (HHO)

<sup>2</sup> Exploration

<sup>3</sup> Exploitation

$$V_E^M(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MEr} F_{Ar}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)} e^{j\omega t}}{\left[ \frac{1}{\gamma_{RE} R_E} + \gamma_{CM} j\omega C_M \right] + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MEr} \alpha_{EMr}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)}} + n_{ME} \left[ \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MEr} \alpha_{MMr}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)} - \chi_{ME} \right] \quad (1)$$

$$V_M^M(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MMr} F_{Ar}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)} e^{j\omega t}}{\left[ R_M + j\omega L_c \right] + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MMr} \alpha_{MMr}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)}} + n_{EM} \left[ \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MMr} \alpha_{EMr}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)} - \chi_{EM} \right] \quad (2)$$

$$V_E^P(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MEr} F_{Ar}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)} e^{j\omega t}}{\left[ \frac{1}{\gamma_{RE} R_E} + \gamma_{CM} j\omega C_M \right] + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \vartheta_{MEr} \alpha_{EMr}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)}} \quad (3)$$

$$V_M^P(t) = 0 \quad (4)$$

شایان ذکر است که نتایج تا مد سوم ارتعاشی محاسبه می‌شوند. همان‌طور که در کارهای گذشته توضیح داد شد برای بررسی همگرایی و دقت نتایج به دست آمده، پنج مد ارتعاشی اول در نظر گرفته شد و مشاهده شد که تغییر قابل توجهی در نتایج پس از مد ارتعاش سوم وجود ندارد. این مهم‌ترین و منطقی‌ترین دلیل برای توقف محاسبات در پایان مد سوم است. همچنین نتایج به دست آمده نشان دادند که توان برداشت شده در مدهای ارتعاشی ابتدایی، چندین برابر بیشتر از مقادیر متناظر در مدهای بالاتر است و همچنین حداکثر توان برداشت شده در مد اول ارتعاشی و در اطراف اولین فرکانس طبیعی تیر برداشت‌کننده است. با استفاده از قانون اهم ( $V=RI$ ) و به دست آوردن عبارات تحلیلی برای  $V_E$  و  $V_M$  می‌توان روابط تحلیلی مربوط به جریان ایجاد شده دو سر الکترودها  $i_E$  و جریان القاشده در سیم‌پیچ‌ها  $i_M$  را به دست آورد. در نهایت، روابط فرکانسی توان الکتریکی برداشتی توسط الکترودها  $P_E$ ، توان مغناطیسی برداشتی توسط سیم‌پیچ‌ها  $P_M$  و توان کلی برداشت‌شده مغناطیسی-الکتریکی  $P_{ME}$  توسط تیر برداشت‌کننده به دست می‌آید [۱۳ و ۱۸].

$$P_E(t) = \frac{V_E(t)^2}{2R_E} \quad (5)$$

$$P_M(t) = \frac{V_M(t)^2}{2R_M} \quad (6)$$

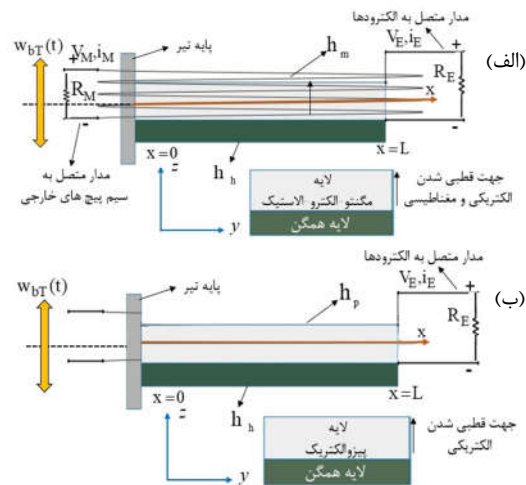
$$P_{ME}(t) = P_E(t) + P_M(t) \quad (7)$$

## ۲-۲- فرایند بهینه‌سازی تک هدفه برداشت‌کننده‌های

### مورد بررسی

بهینه‌سازی در رشته‌های مهندسی یکی از مفاهیم کلیدی است که در طراحی و بهبود فرایندها، سیستم‌ها و محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مفهوم در تلاش برای بهینه کردن یک سیستم، فرایند یا

دچار کرنش شده و با قطبی شدن الکتریکی برای حالت پیزوالکتریک (شکل الف ۱) و قطبی شدن الکتریکی و مغناطیسی برای حالت مگنتو-الکترو-الاستیک (شکل ب ۱)، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی و مغناطیسی در راستای محورهای 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 برداشت انرژی الکتریکی) با ضخامت بسیار کم که سرتاسر طول تیر را در بر گرفته‌اند. برای برداشت‌کننده‌های مگنتو-الکترو-الاستیک سیم‌پیچ‌هایی خارجی (جهت استفاده از میدان مغناطیسی القا شده و برداشت انرژی مغناطیسی) در راستای ضخامت تیر تعبیه شده‌اند. از دیگر فرضیات، می‌توان به این اشاره کرد لایه‌های برداشت‌کننده، دارای اتلاف دی‌الکتریک، مقاومت الکتریکی و مغناطیسی داخلی ناچیز هستند. شکل ۱ پیکربندی‌هایی که در کار حاضر تحلیل می‌شوند را نمایش می‌دهد. این پیکربندی‌ها دارای طرح‌های نامتقارن هستند که تنها یک لایه با خواص فعال الکتریکی-مغناطیسی به کار برده می‌شود.



شکل ۱- پیکربندی‌های برداشت‌کننده‌ی تک لایه (الف) مگنتو-الکترو-الاستیک (ب): پیزوالکتریک

در شکل ۱،  $V_E$ ،  $V_M$ ،  $i_E$ ،  $i_M$  و  $R_M$  به ترتیب نشان دهنده ولتاژ تولیدی، جریان ایجاد شده و مقاومت الکتریکی خارجی دو سر الکترودها، ولتاژ، جریان القا شده و مقاومت الکتریکی خارجی دو سر سیم‌پیچ‌های خارجی اطراف لایه مگنتو با  $N$  دور هستند. همچنین  $w_{BT}(t)$  معرف تحریک عرضی پایه تیر هستند.

## ۲-۱- پاسخ فرکانسی برداشت‌کننده‌های تک لایه مگنتو-

### الکترو-الاستیک و پیزوالکتریک

با حل معادلات دیفرانسیل کوپل حاکم بر تیرهای برداشت‌کننده، عباراتی تحلیلی جهت پیش‌بینی پاسخ فرکانسی آن‌ها در شرایط تحریک هارمونیک پایه با فرکانس  $\omega$ ، استخراج شده‌اند [۱۳ و ۱۸]. عبارات ولتاژ دو سر الکترودها  $V_E$  و سیم‌پیچ‌ها  $V_M$ ، به صورت روابط زیر به دست آمده‌اند (بالانویس  $p$  نمایانگر برداشت‌کننده پیزوالکتریک و  $M$  برای برداشت‌کننده مگنتو-الکترو-الاستیک است) [۱۳ و ۱۸]:

موصول به وجود می‌آید تا منابع را بهینه کرده و عملکرد را به حداکثر برساند. بهینه‌سازی به مهندسان کمک می‌کند تا به روش‌های بهتری برای طراحی، مدیریت و بهبود سیستم‌ها و فرایندها دست یابند که این امر منجر به بهبود کارایی، صرفه‌جویی در منابع و افزایش کیفیت و عملکرد می‌شود. روش بهینه‌سازی شاهین هریس که در حوزه بهینه‌سازی مسائل مختلف کاربرد دارد، با توجه به رفتار جمعیتی این شاهین‌های شکارچی در هنگام شکار، ارائه شده است. شاهین‌های هریس به صورت گروهی شکار می‌کنند و با همکاری و هماهنگی، بهینه‌سازی و تسریع در دستیابی به هدف را فراهم می‌کنند. این روش از چندین مرحله برای بهبود جواب بهینه استفاده می‌کند. به کمک این الگوریتم، می‌توان بهینه‌سازی مسائل پیچیده را با استفاده از الهام از رفتار طبیعی و هماهنگی گروهی شاهین‌های هریس بهبود بخشید. این روش از مزایای مختلفی نظیر سادگی پیاده‌سازی، قابلیت انطباق با مسائل مختلف و قابلیت کاربرد در حوزه‌های گوناگون بهره می‌برد. این الگوریتم از ترکیبی از استراتژی‌های اکتشافی<sup>۱</sup> و استخراجی<sup>۲</sup> استفاده می‌کند. این تنوع در جستجو به الگوریتم کمک می‌کند که بتواند بهینه‌ترین نقاط را با دقت بیشتری پیدا کند. عملکرد الگوریتم HHO به صورت زیر است [۲۱]:

**جدول ۱- توابع هدف بهینه‌سازی برداشت‌کننده‌های تک لایه**

حالت بهینه‌سازی	مگنتو-الکترو-الاستیک	پیزوالکتریک
حالت اول	بیشینه‌سازی $V_E$	بیشینه‌سازی $V_E$
حالت دوم	بیشینه‌سازی $P_E$	بیشینه‌سازی $P_E$
حالت سوم	بیشینه‌سازی $V_M$	-
حالت چهارم	بیشینه‌سازی $P_M$	-
حالت پنجم	بیشینه‌سازی $P_{ME}$	-

$$L \leq 100\text{mm}$$

$$b \leq 10\text{mm}$$

$$h_h + h_p \leq 1\text{mm}$$

$$h_h + h_m \leq 1\text{mm} \quad (A)$$

$$R_E \ \& \ R_M \leq 10^6 \Omega$$

$$N \leq 10$$

$$0 \leq \eta \leq 2$$

در مورد سرعت عمل همگرایی، الگوریتم شاهین هریس بر اساس ارتقا و بهینه‌سازی الگوریتم‌های جستجو و تکاملی عمل می‌کند تا به سرعت عمل بالاتری در جستجوی فضای حل مسئله برسد. این شامل بهبود عملکرد جستجوی محلی و بررسی فضای جستجو برای پیدا کردن جواب‌های بهینه است. این روش با اجتناب از گیر افتادن در شیب‌های محلی و بهره‌گیری از تنوع جمعیت، به سرعت عمل بیشتری در همگرایی و پیدا کردن جواب‌های بهینه نزدیک به مسئله دست می‌یابد. الگوریتم‌های استفاده شده مطابق شرایط و روابط کار حاضر در برنامه متلب کدنویسی شده است. بعد از انجام فرایند بهینه‌سازی، استخراج نتایج صورت گرفته است. نتایج بهینه‌سازی در بخش بعدی ارائه و بررسی شده‌اند.

### ۳- بررسی و مقایسه نتایج بهینه‌سازی و عملکرد فرکانسی برداشت‌کننده‌های تک لایه

در این قسمت، نتایج عددی بهینه‌سازی شده جهت مقایسه عملکرد برداشت‌کننده‌های مورد بررسی در کار حاضر، ارائه می‌شوند. باید ذکر شود که،  $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$  با درصد حجمی ۵۰ به عنوان لایه مگنتو-الکترو-الاستیک (به اختصار مگنتو)، PZT-5 به عنوان لایه پیزوالکتریک (به اختصار پیزو) و آلومینیوم به عنوان لایه همگن انتخاب شده‌اند.

پارامترهای طراحی بهینه برداشت‌کننده‌های تک لایه به کمک روش بهینه‌سازی شاهین هریس استخراج و در جداول ۲ (مگنتو-الکترو-الاستیک) و ۳ (پیزوالکتریک) آورده شده‌اند.

- ۱- مکان‌یابی اولیه شاهین‌ها<sup>۳</sup>: ابتدا، یک جمعیت اولیه از شاهین‌ها (حلقه‌ها) در فضای جستجوی مسئله تولید می‌شود. این شاهین‌ها نقش احتمالی حل‌های مسئله را ایفا می‌کنند.
- ۲- مرحله شکار و اشتراک گذاری اطلاعات: در این مرحله، شاهین‌ها با یکدیگر تعامل دارند. شاهینی که بهترین حل را دارد به عنوان شاهین ملکه شناخته می‌شود (اطلاعات خود را با سایر شاهین‌ها به اشتراک می‌گذارد). این اشتراک باعث بهبود جمعیت به طور کلی می‌شود.
- ۳- مرحله تقابل<sup>۴</sup>: در این مرحله، شاهین‌ها به صورت گروهی به دنبال بهبود حل‌های خود و افزایش تنوع جمعیت می‌پردازند. شاهین‌ها با توجه به مکان‌های مختلفی که در مرحله قبلی به آن‌ها دست یافته‌اند، جستجوی گسترده‌تری انجام می‌دهند.
- ۴- تعیین مکان جدید شاهین‌ها: با استفاده از اطلاعات به دست آمده از مرحله قبلی، مکان جدیدی برای هر شاهین محاسبه می‌شود. این مکان جدید بر اساس یک فرمول بهینه‌سازی و با در نظر گرفتن اطلاعات جمعیت به‌روزرسانی می‌شود.
- ۵- ارزیابی و بهبود جمعیت: پس از به‌روزرسانی مکان‌ها، حل‌های جدید ارزیابی می‌شوند و بهترین حل‌ها در جمعیت نگه داشته می‌شوند. این گام تکرار می‌شود تا به یک حل بهینه یا حلی نزدیک به حالت بهینه دست یافته شود.

در ادامه با توجه به کارآمدی روش بهینه‌سازی فوق، عملکرد فرکانسی برداشت‌کننده‌های مگنتو-الکترو-الاستیک و پیزوالکتریک به صورت تک هدفه بهینه‌سازی و تحلیل شد. در جدول ۱ توابع هدف برای هر پیکربندی ذکر شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در

<sup>1</sup> Exploration  
<sup>2</sup> Exploitation  
<sup>3</sup> Hawks  
<sup>4</sup> Confrontation

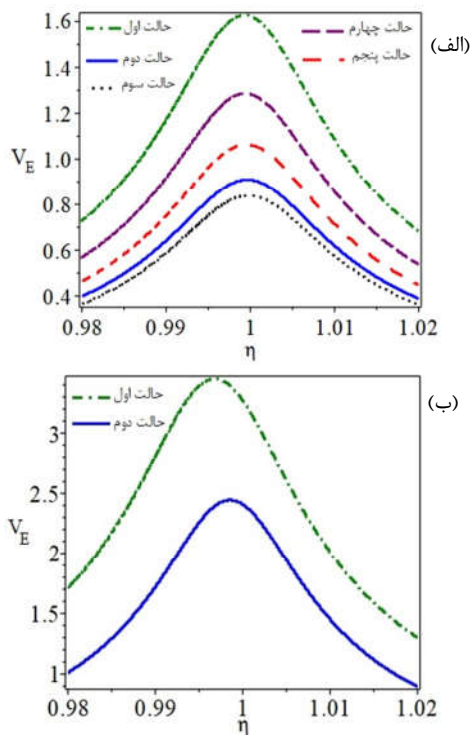
جدول ۲- پارامترهای طراحی بهینه تک هدفه برداشت‌کننده تک لایه

مگنتو-الکترو-الاستیک					
برداشت‌کننده مگنتو-الکترو-الاستیک					
متغیرهای طراحی	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم
$R_E (\Omega)$	۱۵۸۴۸۹	۳۹۸۱۰	۳۴۷۶۳	۷۹۴۳۲	۵۰۱۱۹
$R_M (\Omega)$	۵۲/۸	۱۱۹/۱	۱۳۰/۴	۳۳/۳	۳۱/۱
$\eta$	۰/۹۹۹۲۷	۰/۹۹۹۵۸	۰/۹۹۹۷۶	۰/۹۹۹۲۷	۰/۹۹۹۴۷
$h_m$ (mm)	۰/۱۸۸۴	۰/۱۰۰۱	۰/۱۳۳۳	۰/۱۳۴۹	۰/۱۳۲۵
$h_h$ (mm)	۰/۸۱۱۶	۰/۸۹۹۹	۰/۸۶۶۷	۰/۸۶۵۱	۰/۸۶۷۵
$b$ (mm)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
$L$ (mm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
$N$	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

جدول ۳- پارامترهای طراحی بهینه تک هدفه برداشت‌کننده تک لایه

پیزوالکتریک		
برداشت‌کننده پیزوالکتریک		
متغیرهای طراحی	حالت اول	حالت دوم
$R_E (\Omega)$	۳۱۶۲۲۷	۳۹۸۱۱
$\eta$	۰/۹۹۶۸۰	۰/۹۹۸۵۲
$h_p$ (mm)	۰/۲۹۳۱	۰/۲۳۲۲
$h_h$ (mm)	۰/۷۰۶۹	۰/۷۶۷۸
$b$ (mm)	۱۰	۱۰۰
$L$ (mm)	۱۰۰	۱۰۰

پیزو (در حالت اول) می‌تواند تا ۲/۲۱ برابر نسبت به برداشت‌کننده مگنتو، ولتاژ  $V_E$  بیشتری تولید کند که نسبت قابل‌توجهی است. همچنین مشاهده شده است که حداکثر ولتاژ در نسبت فرکانس تحریک کمتر از یک رخ می‌دهد که به ترتیب برای حالت مگنتو و پیزو، ۰/۹۹۹۲۷ و ۰/۹۹۶۸۰ اندازه‌گیری شده است. این پدیده نشان دهنده این است که مدارهای الکتریکی متصل به تیر برداشت‌کننده، سبب افزایش نسبت میرایی تیر می‌شود. این نسبت فرکانسی، به عنوان نسبت فرکانس میرایی تیر برداشت‌کننده  $\eta_{dam}$  تعریف می‌شود. با استفاده از رابطه  $\eta_{dam} = (1 - \zeta_{Elec}^2)^{0.5}$ ، نسبت میرایی الکتریکی تیرهای برداشت‌کننده  $\zeta_{Elec}$  را می‌توان به دست آورد. مقدار  $\zeta_{Elec}$ ، برای حالت مگنتو و پیزو به ترتیب ۰/۰۳۸۲ و ۰/۰۷۹۹ اندازه‌گیری شده است. حالت پیزو، علی‌رغم داشتن نسبت میرایی الکتریکی بیشتر، دارای حداکثر ولتاژ  $V_E$  بیشتری است که نشان دهنده مفید بودن استفاده از مدارهای الکتریکی کویل شده برای آن است. مقایسه نتایج بهینه‌سازی در توابع هدف اول و دوم برداشت‌کننده پیزو نشان دهنده تفاوت ۴۶/۹۴ درصدی در تولید ولتاژ دو سر الکترودهاست. همچنین در برداشت‌کننده مگنتو، حداکثر و حداقل مقدار ولتاژ تولیدی  $V_E$  به ترتیب در انتخاب تابع هدف اول و سوم رخ می‌دهد که تفاوت بیش از ۹۹/۸۸ درصدی نسبت به هم دارند. به عنوان مهم‌ترین نتیجه‌گیری از نتایج رسم شده، می‌توان به این اشاره کرد که برداشت‌کننده پیزو نسبت به حالت مگنتو، دارای حداکثر ولتاژ  $V_E$  بیشتری است و از این جهت دارای اولویت بیشتری است تا به هدف طراحی برداشت‌کننده‌ای با حداکثر ولتاژ برداشت شده دست یافت.



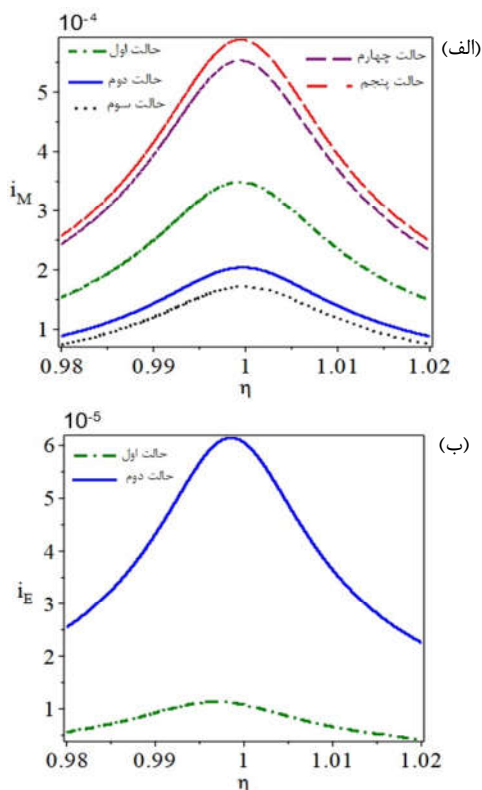
شکل ۲- حالات مختلف بهینه سازی ولتاژ ایجاد شده دو سر الکترودها در برداشت‌کننده تک لایه (الف) مگنتو-الکترو-الاستیک (ب): پیزوالکتریک

مقدار به دست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی برای سه متغیر  $b$ ،  $L$  و  $N$  نشان می‌دهد که همواره با افزایش آنها پاسخ سیستم صعودی است. به عبارتی، بیشترین مقادیر توان، جریان و ولتاژ در حداکثر مقدار آنها حاصل می‌شود. از نظر فیزیکی می‌توان بیان کرد که هر چقدر طول و عرض بیشتر باشند کرنش انتهای تیر بیشتر خواهد بود و با توجه به روابط کویل الکتریکی-مکانیکی، این امر منجر به تولید ولتاژ و توان بیشتری هم خواهد شد. همچنین در مورد پارامتر  $N$  نیز می‌توان ذکر کرد که تعداد دور سیم‌پیچ بیشتر معادل با ولتاژ القایی بیشتری نیز خواهد بود و می‌توان توان بیشتری را از سیم‌پیچ‌ها برداشت کرد.

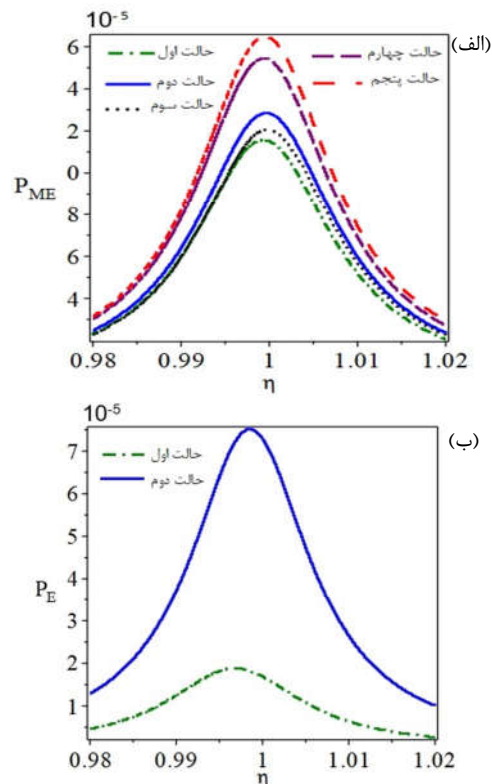
گام بعد از به دست آوردن متغیرهای طراحی بهینه برداشت‌کننده‌ها، تحلیل و مقایسه پاسخ‌های فرکانسی عملکرد آنها است. به همین منظور، فرکانس تحریک  $\omega$ ، نسبت به اولین فرکانس طبیعی  $\omega_1$  بی‌بعد شده است و پاسخ‌های فرکانسی نسبت به فرکانس تحریک بی‌بعد شده  $\eta$  و در اطراف اولین فرکانس طبیعی‌شان که دارای حداکثر عملکرد از نظر ولتاژ ایجاد شده و توان برداشتی هستند، رسم شده‌اند. سپس با کمک روابط (۱) و (۳)، در شکل ۲، پاسخ فرکانسی ولتاژ  $V_E$  ایجاد شده توسط هر یک از برداشت‌کننده‌ها، در اطراف اولین فرکانس طبیعی‌شان، رسم شده است. برای رسم این نتایج، پارامترهای طراحی بر اساس مقادیر بهینه جداول ۲ و ۳ انتخاب شده‌اند. همان‌طور که از نتایج مشخص است حداکثر مقادیر بهینه ولتاژ  $V_E$  برای حالت مگنتو و پیزو به ترتیب  $۱/۶۲۴۷ \text{ Vs}^2/\text{m}$  و  $۳/۵۹۳۶ \text{ Vs}^2/\text{m}$  اندازه‌گیری شده‌اند که نشان دهنده این است در بهینه‌ترین حالت برداشت‌کننده

در ادامه تحلیل نتایج، مقایسه عملکرد برداشت‌کننده‌های مگنتو و پیزو در تولید توان کل الکتریکی  $P_{ME}$  برای حالت مگنتو و  $P_E$  برای حالت پیزو) با رسم شکل ۳ صورت می‌گیرد که چگونه نوع برداشت‌کننده و پارامترهای مدارهای الکتریکی، توان برداشت شده توسط الکترودها و سیم‌پیچ‌های خارجی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها می‌توان ساختار مناسب‌تری برای برداشت‌کننده‌ها، انتخاب کرد. به این منظور، در ابتدا با استفاده از روابط (۵) و (۷)، پاسخ فرکانسی توان کل برداشت شده نسبت به مجذور شتاب تحریک پایه بازنویسی شدند. با توجه به نتایج رسم شده، حداکثر مقادیر بهینه توان کل برداشتی برای حالت مگنتو و پیزو به ترتیب  $۱۱/۲۶۷ \mu Ws^4/m^2$  و  $۷۵/۱۱۰ \mu Ws^4/m^2$  محاسبه شده‌اند. در بهینه‌ترین حالت برداشت‌کننده پیزو (در حالت دوم) می‌تواند تا  $۶/۶۷$  برابر نسبت به برداشت‌کننده مگنتو (حالت پنجم بهینه‌سازی)، توان کل بیشتری برداشت کند. در این حالت هم برداشت‌کننده پیزو علی‌رغم داشتن نسبت میرایی الکتریکی بیشتر، دارای حداکثر توان کل برداشت شده بیشتری است. در برداشت‌کننده مگنتو، تفاوت حداکثر توان حالت پنجم به حداقل مقدار توان تولیدی در انتخاب تابع هدف اول بیش از  $۳۴/۹۵$  درصدی است. همچنین نتایج بهینه‌سازی توابع هدف اول و دوم برداشت‌کننده پیزو نشان دهنده تفاوت  $۳/۶۸$  برابری در تولید توان الکتریکی است.

انتقال اطلاعات، کنترل دستگاه‌ها و فعالیت‌های الکترونیکی است و اهمیت بسیار زیادی در فناوری‌های پیشرفته دارد. با توجه به مقادیر بهینه، برداشت‌کننده پیزو دارای اهمیت و جایگاه بالاتری از نظر تولید ولتاژ و توان کل الکتریکی است. اما از آنجایی که تولید حداکثر مقدار جریان الکتریکی، یکی از اهداف مهم طراحی برداشت‌کننده‌های جدید است عملکرد فرکانسی جریان‌های تولیدی برداشت‌کننده‌های تک‌لایه در شکل ۴ بررسی شده است. بر خلاف انتظار، عملکرد برداشت‌کننده مگنتو در تولید جریان الکتریکی بسیار قابل‌توجه است. با توجه به نتایج، حداکثر مقادیر بهینه جریان الکتریکی دو سر سیم‌پیچ‌های خارجی اطراف لایه فعال  $i_M$  در حالت پنجم بهینه‌سازی و به میزان  $۵۸۷/۷۰ \mu As^2/m$  ثبت شده است. در حالی که جریان دو سر الکترودها  $i_E$  در بهینه‌ترین حالت ممکن برداشت‌کننده تک‌لایه پیزو (حالت دوم) می‌تواند به مقدار  $۶۱/۴۳ \mu As^2/m$  برسد که تا  $۹/۵۷$  برابر نسبت به برداشت‌کننده مگنتو، کمتر است. در بدترین حالت برداشت‌کننده مگنتو (حالت سوم) نسبت به بهترین حالت برداشت‌کننده پیزو (حالت دوم)، تولید جریان الکتریکی  $i_M$  حدود  $۲/۸۰$  برابر تولید جریان الکتریکی  $i_E$  است. به عنوان مهم‌ترین نتیجه‌گیری از نتایج رسم شده، می‌توان به این اشاره کرد که برداشت‌کننده مگنتو نسبت به حالت پیزو، دارای تولید جریان الکتریکی بسیار بیشتر و قابل‌توجهی است و از جهت رسیدن به هدف طراحی برداشت‌کننده‌ای با حداکثر جریان برداشت شده دارای اولویت بیشتری است.



شکل ۴- حالات مختلف بهینه سازی جریان ایجاد شده (الف) دو سر سیم پیچ های اطراف لایه مگنتو-الکترو-الاستیک (ب): دو سر الکترودهای لایه پیزو الکترونیک

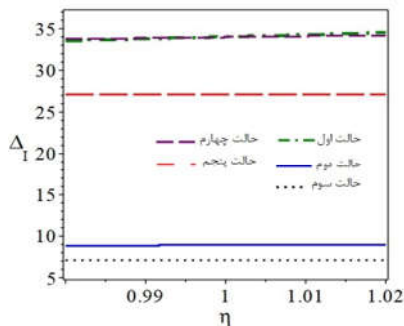


شکل ۳- حالات مختلف بهینه سازی توان کل برداشتی در برداشت‌کننده‌ی تک لایه (الف) مگنتو-الکترو-الاستیک (ب): پیزو الکترونیک

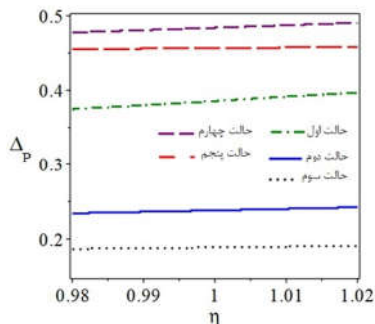
در مقیاس میکرو و نانو، جریان الکتریکی اساسی‌ترین ابزار برای

سازی ولتاژ دو سر الکترودها  $V_E$  ایجاد می شود که بسیار نزدیک به مقادیر در حالت چهارم بهینه سازی به منظور بیشینه سازی توان تولیدی توسط سیم پیچ ها است. در ادامه و با بررسی نسبت توان ها  $\Delta_P$  مشخص شد که در حالت پنجم و چهارم بهینه سازی، سهم سیم پیچ از توان تولیدی به ترتیب ۴۵/۶۹ و ۴۸/۹۲ درصد است. در کمترین حالت هم (حالت سوم)، سهم سیم پیچ ها از جریان حدود ۹ برابر الکترودها و سهم آن در توان تولیدی ۱۹/۵۷ درصد است که نشان دهنده ویژگی مثبت استفاده از سیم پیچ در اطراف لایه فعال و افزایش قابل توجه جریان و توان تولیدی به طور همزمان است.

در مقایسه‌ای دیگر، با استفاده از پارامترهای طراحی بهینه‌سازی تک‌هدفه، مقادیر عملکرد بهینه برداشت‌کننده‌های مگنتو و پیزو در جداول ۳ و ۴ استخراج شده است. مقایسه نتایج تابع هدف توان کل و ولتاژ برداشتی برای حالت مگنتو، نشان دهنده تفاوت ۴۲/۳۸ درصدی توان کل و تولید ۷۷/۱۲ درصد جریان بیشتر است که برای راه‌اندازی یک مدار الکتریکی بسیار حائز اهمیت است. همچنین اگر هدف تولید ولتاژ بیشتر باشد با انتخاب تابع هدف مربوطه می‌توان تا ۵۲/۲۲ درصد ولتاژ بیشتری را برداشت کرد. حالات مختلف بهینه‌سازی در برداشت‌کننده پیزو نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه ۳/۶۸ برابری توان کل و ۴۶/۹۳ درصدی ولتاژ تولیدی است. علاوه بر این برای تولید جریان بیشتر، حالت دوم بهینه‌سازی در اولویت بالاتری است که می‌تواند تا ۵/۴۱ برابر جریان بیشتری تولید کند.



شکل ۶- نسبت جریان های ایجاد شده دو سر سیم پیچ و الکترودها در برداشت کننده تک لایه مگنتو-الکترو-الاستیک



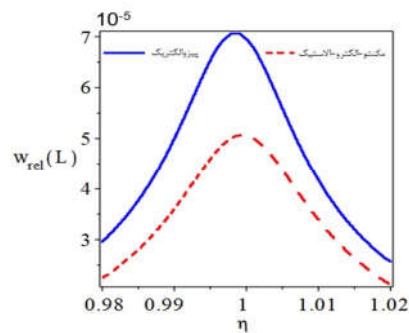
شکل ۷- نسبت توان های تولید شده دو سر سیم پیچ و الکترودها در برداشت کننده تک لایه مگنتو-الکترو-الاستیک

به منظور بررسی علت تفاوت توان کل برداشتی، نتایج مرتبط با تغییر مکان نسبی تیر برداشت‌کننده  $w_{rel}$ ، تحلیل می‌شوند. از جمله دلایل دیگر بررسی آن، می‌توان به نقشی اساسی آن در تعیین حجم برداشت‌کننده اشاره کرد. در این راستا، در ابتدا با روابط، تغییر مکان نسبی انتهای تیر  $w_{rel}(L)$  نسبت به دامنه تحریک پایه، آورده می‌شود [۱۳ و ۱۸].

$$w_{rel}^M(L) = \frac{[F_{Ar} - \alpha_{EMr} V_E - \alpha_{MMr} V_M] \phi(L)}{[(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)]} \quad (9)$$

$$w_{rel}^P(L) = \frac{[F_{Ar} - \alpha_{EMr} V_E] \phi(L)}{[(\omega_r^2 - \omega^2) + j(2\zeta_r \omega_r \omega)]} \quad (10)$$

با توجه به اینکه بهترین عملکرد از نظر تولید توان کل حالت‌های پنجم و دوم برای برداشت‌کننده‌های مگنتو و پیزو است این دو حالت برای رسم و بررسی پاسخ فرکانسی  $w_{rel}$ ، در نظر گرفته شده‌اند همان‌طوری که در شکل ۵ نمایان می‌شود، حالت پیزو دارای تغییر مکان نسبی بیشتری است. در واقع، دلیل ایجاد شدن توان بیشتر در این حالت، ایجاد شدن تغییر مکان بیشتر و بالطبع کرنش بیشتر در برداشت‌کننده پیزو است. در نتیجه توانسته است توان بیشتری را ایجاد کند. حداکثر مقدار  $w_{rel}$  ایجاد شده در برداشت‌کننده پیزو ۳۹/۶۵ درصد نسبت به برداشت‌کننده مگنتو، بیشتر است.



شکل ۵- بیشترین تغییر مکان نسبی تیر در برداشت کننده‌ی تک لایه (الف) مگنتو-الکترو-الاستیک (ب): پیزوالکتریک

همچنین به منظور بررسی ویژگی‌های مثبت برداشت‌کننده‌های مگنتو دو پارامتر  $\Delta_I$  و  $\Delta_P$  معرفی می‌شوند. پارامترهای  $\Delta_I$  و  $\Delta_P$  به ترتیب، نسبت جریان و توان تولید شده توسط سیم‌پیچ‌ها به الکترودها هستند که در شکل‌های ۶ و ۷ برای پنج حالت بهینه‌سازی و در محدوده فرکانس طبیعی برداشت‌کننده مگنتو رسم شده‌اند.

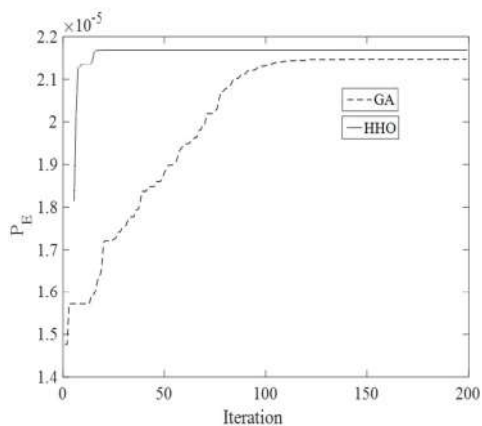
$$\Delta_I = \frac{i_M}{i_E} \quad (11)$$

$$\Delta_P = \frac{P_M}{P_E} \quad (12)$$

نتایج رسم شده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان دهنده ی اعداد بسیار جالبی است. بیشینه نسبت جریان  $\Delta_I$  در حدود ۳۴/۵۲ است به این معنی که جریان تولیدی دوسر سیم پیچ، بسیار بزرگ تر از جریان دو سر الکترودها است و این ویژگی مثبت میتواند به راه اندازی برداشت کننده ای با جریان الکتریکی بیشینه کمک کند. نکته جالب توجه دیگر این است که بیشینه مقدار  $\Delta_I$  در حالت اول بهینه سازی یعنی بیشینه

جدول ۴- مقادیر بهینه تک هدفه عملکرد برداشت کننده تک لایه مگنتو-الکترو-الاستیک

برداشت کننده مگنتو-الکترو-الاستیک					
متغیرهای طراحی	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم
$V_E$ ( $Vs^2/m$ )	۱/۶۲۵	۰/۹۰۷	۰/۸۳۸	۱/۲۸۳	۱/۰۶۲
$P_E (\times 10^{-4})$ ( $Ws^4/m^2$ )	۸/۳۴۹	۱/۰۳۷	۱/۰۱۴	۱/۰۳۴	۱/۱۲۷
$i_E (\times 10^{-4})$ ( $As^2/m$ )	۱/۰۲۶	۲/۲۸۲	۲/۴۱۵	۱/۶۱۸	۲/۱۲۰
$V_M$ ( $Vs^2/m$ )	۰/۰۱۸۴	۰/۰۲۴۳	۰/۰۲۲۳	۰/۰۱۸۲	۰/۰۱۷۶
$P_M (\times 10^{-4})$ ( $Ws^4/m^2$ )	۳/۳۱۷	۲/۴۷۱	۱/۹۱۹	۵/۰۴۴	۵/۱۸۰
$i_M (\times 10^{-4})$ ( $As^2/m$ )	۳/۴۸۹	۲/۰۳۷	۱/۷۱۷	۵/۵۲۹	۵/۸۷۷
$P_{ME} (\times 10^{-4})$ ( $Ws^4/m^2$ )	۱/۱۵۶	۱/۲۸۵	۱/۲۰۶	۱/۵۳۸	۱/۶۴۶



شکل ۸- عملکرد سرعت همگرایی الگوریتم های بهینه سازی تک هدفه شاهین هریس (HHO) و ژنتیک (GA)

#### ۴- نتیجه گیری

روش های بهینه سازی از اهمیت بسیاری در مسائل مختلف علمی و صنعتی برخوردار هستند. همگرایی و سرعت عمل این روش ها از جمله اصول اساسی در ارزیابی کارایی آن هاست. یک روش بهینه سازی مؤثر، با همگرایی سریع و دقیق به جواب نهایی مسئله می رسد. در کار حاضر، عملکرد برداشت کننده های تک لایه شامل لایه های با خواص فعال مغناطیسی-الکتریکی-الاستیک و پیزوالکتریک با استفاده از الگوریتم تک هدفه شاهین هریس بهینه سازی و تحلیل شدند. الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس یک الگوریتم فراابتکاری جدید و کارآمد برای حل مسائل بهینه سازی است که ساختار ساده ای دارد و پیاده سازی آن نسبتاً آسان است، در عین حال کارایی بالایی در حل مسائل پیچیده بهینه سازی دارد. به عنوان مهم ترین نتیجه گیری از نتایج رسم شده، می توان به این اشاره کرد که برداشت کننده پیزو نسبت به حالت مگنتو، دارای حداکثر ولتاژ و توان تولیدی بیشتری است و از این جهت دارای اولویت بیشتری است تا به هدف طراحی برداشت کننده ای با حداکثر ولتاژ و توان دست یافت. همچنین با توجه به نتایج، می توان به عملکرد بسیار قابل توجه و بهتر برداشت کننده مگنتو در تولید جریان اشاره کرد و در رسیدن به هدف طراحی برداشت کننده ای با حداکثر جریان تولیدی دارای اولویت بیشتری است. در نهایت مقایسه نتایج همگرایی نشان دادند که یکی از مزایای اصلی روش شاهین هریس، همگرایی سریع آن است. با بهره گیری از این روش، می توان به سرعت بسیار بالایی در هدف بهینه سازی دست یافت.

#### ۵- نمادها

$b$	عرض برداشت کننده (m)
$\Delta_I$	نسبت جریان تولید شده توسط سیم پیچ ها به الکترودها
$\Delta_P$	نسبت توان تولید شده توسط سیم پیچ ها به الکترودها
$\eta$	نسبت فرکانس بی بعد تیر برداشت کننده
$\eta_{dam}$	نسبت فرکانس بی بعد میرایی تیر برداشت کننده
$F_{Ar}$	دامنه نیروی الکتریکی ناشی از مدار متصل به الکترودها (N)
$h_h$	ضخامت لایه همگن (m)
$h_m$	ضخامت لایه مگنتو-الکترو-الاستیک (m)

جدول ۵- مقادیر بهینه تک هدفه عملکرد برداشت کننده تک لایه پیزوالکتریک

برداشت کننده پیزوالکتریک		
متغیرهای طراحی	حالت اول	حالت دوم
$V_E$ ( $Vs^2/m$ )	۳/۵۹۴	۲/۴۴۶
$P_E (\times 10^{-4})$ ( $Ws^4/m^2$ )	۲/۰۴۲	۷/۵۱۱
$i_E (\times 10^{-4})$ ( $As^2/m$ )	۱/۱۳۶	۶/۱۴۳

یکی از ویژگی های اساسی که برای مقایسه الگوریتم های بهینه سازی مورد توجه قرار می گیرد، همگرایی و سرعت عمل این روش هاست. همگرایی به معنای تمایل روش بهینه سازی در رسیدن به جواب بهینه است به منظور بررسی همگرایی روش بهینه سازی شاهین هریس در شکل ۸، توان برداشت شده توسط الکترودها به عنوان تابع هدف مورد مطالعه قرار گرفته است. ملاحظه می شود که پس از تعداد تکرارهای کمی پاسخ بهینه سازی حاصل شده است. جهت بررسی سرعت همگرایی پاسخ در بهینه سازی به روش شاهین هریس، در شکل ۸ توان برداشت شده توسط الکترودها با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. پارامترهای انتخابی شکل ۸ همانند رابطه (۸) در نظر گرفته شده اند. ملاحظه می شود که پاسخ الگوریتم شاهین هریس در مقایسه با الگوریتم ژنتیک در تعداد تکرارهای بسیار کمتری همگرا شده و مقدار تابع هدف نیز بیشتر است؛ لذا می توان نتیجه گرفت که الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس در مقایسه با الگوریتم ژنتیک دقت و سرعت بالاتری در استخراج مقدار بهینه تابع هدف دارد و الگوریتم توانمندتری در حل مساله فوق است.



- [5] Wang Y, Wang H, Xuan J, Leung DY. Powering future body sensor network systems: A review of power sources. *Biosensors and Bioelectronics*. 2020 Oct 15;166:112410.
- [6] Meng W, Yang Y, Zhang R, Wu Z, Xiao X. Triboelectric-electromagnetic hybrid generator based self-powered flexible wireless sensing for food monitoring. *Chemical Engineering Journal*. 2023 Oct 1;473:145465.
- [7] Moore GE. Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*. 1998 Jan;86(1):82-5.
- [8] Zadan M, Patel DK, Sabelhaus AP, Liao J, Wertz A, Yao L, Majidi C. Liquid crystal elastomer with integrated soft thermoelectrics for shape memory actuation and energy harvesting. *Advanced Materials*. 2022 Jun;34(23):2200857.
- [9] Kim HS, Kim JH, Kim J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International journal of precision engineering and manufacturing*. 2011 Dec;12:1129-41.
- [10] 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.
- [11] Abdehvand MZ, Rognizadeh SA, Sedighi HM. Modeling and analysis of a coupled novel nonlinear magneto-electro-aeroelastic lumped model for a flutter based energy harvesting system. *Physica Scripta*. 2020 Dec 11;96(2):025213.
- [12] Moory Shirbani M, Shishesaz 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.
- [13] 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.
- [14] Sharma S, Kiran R, Azad P, Vaish R. A review of piezoelectric energy harvesting tiles: Available designs and future perspective. *Energy Conversion and Management*. 2022 Feb 15;254:115272.
- [15] 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.
- [16] Vinyas M. Computational analysis of smart magneto-electro-elastic materials and structures: review and classification. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021 May;28(3):1205-48.
- [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] Shishesaz M, Shirbani MM, Sedighi HM, Hajnayeb A. Design and analytical modeling of magneto-electro-mechanical characteristics of a novel magneto-electro-elastic vibration-based energy harvesting system. *Journal of Sound and Vibration*. 2018 Jul 7;425:149-69.
- [۱۹] جعفری فشارکی ج، مدنی س ق، گلای س، بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر الگوی قرارگیری بهینه عملگرهای پیزوالکتریک در کاهش تمرکز تنش با استفاده از الگوریتم پرندهگان. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۸، د. ۴۹، ش. ۱، ص ۶۳-۷۲.
- [۲۰] مرآمی میلانی س، خوشبختی سرای ر، نجفی م، تحلیل ترمواقصادی و بهینه‌سازی چندهدفه چرخه‌های بازیافت تلفات حرارتی یک موتور ژنراتور گازسوز. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۳، ص ۲۱۱-۲۲۰.
- [21] Heidari AA, Mirjalili S, Faris H, Aljarah I, Mafarja M, Chen H. Harris hawks optimization: Algorithm and

ضخامت لایه پیزوالکتریک (m)	$h_p$
جریان تولیدشده دو سر الکترودها (A)	$i_E$
جریان تولیدشده دو سر سیم‌پیچ‌ها (A)	$i_M$
عدد یک‌ه موهومی	$j$
ضریب خودالقایی سیم‌پیچ‌ها (H)	$L_c$
طول برداشت‌کننده (m)	$L$
اندیس بالانویس نمایشگر مگنتو-الکترو-الاستیک	$M$
تعداد دور سیم‌پیچ‌ها	$N$
پارامتر نسبت ولتاژ	$\eta_{ME}$
اهم (واحد مقاومت الکتریکی)	$\Omega$
اندیس بالانویس نمایشگر پیزوالکتریک	$p$
توان الکتریکی برداشتی توسط الکترودها (W)	$P_E$
توان الکتریکی برداشتی توسط سیم‌پیچ‌ها (W)	$P_M$
توان کل برداشتی توسط برداشت‌کننده مگنتو-الکترو-الاستیک (W)	$P_{ME}$
مقاومت الکتریکی متصل به الکترودها ( $\Omega$ )	$R_E$
مقاومت الکتریکی متصل به سیم‌پیچ‌ها ( $\Omega$ )	$R_M$
ولتاژ ایجادشده دو سر الکترودها (V)	$V_E$
ولتاژ ایجادشده دو سر سیم‌پیچ‌ها (V)	$V_M$
تحریک پایه در جهت عرضی (m)	$w_{BT}$
تغییر مکان هر نقطه تیر مگنتو نسبت به پایه‌اش (m)	$w_{rel}^M$
تغییر مکان هر نقطه تیر پیزوالکتریک نسبت به پایه‌اش (m)	$w_{rel}^P$
ضریب کوپل الکتریکی-مکانیکی در مختصات مودال (N.m/V)	$\alpha_{EMr}$
ضریب کوپل مغناطیسی-مکانیکی در مختصات مودال (N.m/V)	$\alpha_{MMr}$
ضریب مودال کوپل الکتریکی-مغناطیسی ( $\Omega/s$ )	$\chi_{EM}$
ضریب مودال کوپل مغناطیسی-الکتریکی ( $\Omega/s$ )	$\chi_{ME}$
ضریب مودال کوپل مکانیکی-الکتریکی (A.s)	$\eta_{MER}$
ضریب مودال کوپل مکانیکی-مغناطیسی (A.s)	$\eta_{MMr}$
فرکانس طبیعی مد $m$ (rad/s)	$\omega_r$
فرکانس تحریک پایه تیر (rad/s)	$\omega$
نسبت میرایی الکتریکی تیرهای برداشت‌کننده	$\zeta_{Elec}$
نسبت میرایی مد $m$	$\zeta_r$

## ۶- مراجع

- [1] Li Y, Yu H, Su B, Shang Y. Hybrid micropower source for wireless sensor network. *IEEE Sensors Journal*. 2008 May 23;8(6):678-81.
- [2] La Rosa R, Livreri P, Trigona C, Di Donato L, Sorbello G. Strategies and techniques for powering wireless sensor nodes through energy harvesting and wireless power transfer. *Sensors*. 2019 Jun 12;19(12):2660.
- [۳] مامندی ا، یوسفی ش، بررسی بازدهی برداشت انرژی ارتعاشی تیر پیزوالکتریک با استفاده از روش اجزای محدود. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۱، ص ۲۰۹-۲۱۸.
- [4] Singh J, Kaur R, Singh D. Energy harvesting in wireless sensor networks: A taxonomic survey. *International Journal of Energy Research*. 2021 Jan;45(1):118-40.

- applications. Future generation computer systems. 2019 Aug 1;97:849-72.
- [22] Alavi SE, Shirbani MM, Tondro MK. Optimization of gasket-plate heat exchanger based on entransy principles using new method of Harris Hawks. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2023 Jul 5:1-4.
- [23] Dhawale D, Kamboj VK, Anand P. Optimum generation scheduling incorporating wind energy using HHO-IGWO algorithm. Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2023 Dec;10(1):1-21.
- [24] Shirbani MM, Alavi SE. Multi-Objective Optimization and Performance Analysis of Bimorph Magneto-Electro-Elastic Energy Harvesters. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2024 Jan 14.