

مقایسه ی توان استحصال شده در دو سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی با فنریت های خطی و غیرخطی

چکیده: برداشت انرژی از انرژی اتلاف شده در محیط به منظور راه اندازی ادوات الکترونیکی با توان پایین، یکی از روش های رایج برای به کارگیری انرژی های تجدیدپذیر می باشد. هدف اصلی از این فناوری، فراهم کردن منابع انرژی الکتریکی در نقاط دور از دسترس و همچنین شارژ کردن وسایل ذخیره ی انرژی از جمله خازن و باتری می باشد. مطالعه حاضر به مقایسه ی توان استحصال شده از دو سامانه برداشت کننده ی انرژی الکترومغناطیسی با فنریت های خطی و غیرخطی (در دو حالت شبیه سازی در نرم افزار کامسول و کارهای آزمایشگاهی) که با استفاده از حرکت اعضای بدن انسان مورد ارتعاش قرار می گیرد، می پردازد. از نوآوری این پژوهش می توان به استفاده از فنریت به کار رفته در سامانه برداشت انرژی، که از یک سو دارای فنریت خطی و از سوی دیگر تحت تأثیر فنریت غیر خطی قرار دارد و همچنین صحت سنجی نتایج شبیه سازی با استفاده از سامانه آزمایشگاهی طراحی شده، اشاره نمود.

واژه های راهنما: انرژی های تجدیدپذیر، سامانه برداشت کننده ی انرژی الکترومغناطیسی، ادوات الکترونیکی، حرکت اعضای بدن انسان، فنریت غیرخطی

علی ریزه وندی

دانش آموخته کارشناسی ارشد

محمدرضا ذاکرزاده*

دانشیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشکده گان فنی، دانشگاه تهران،

تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

Ali Rizehvandi
M.Sc.

Mohammad Reza
Zakerzadeh*

Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, College of
Engineering, University
of Tehran, Tehran

Comparing the harvested power in two electromagnetic energy harvesting systems with linear and non-linear springs

Abstract: Energy harvesting from wasted energy in the environment in order to run low-power electronic devices is one of the common methods to use renewable energy. The main purpose of this technology is to provide sources of electrical energy in remote places and also to charge energy storage devices such as capacitors and batteries. The present study compares the harvested power from two electromagnetic energy harvesting systems with linear and non-linear spring (in two condition: COMSOL software and experimental results) which are vibrated by the human motion

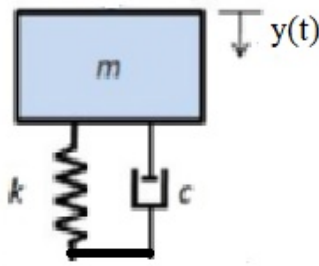
The innovation of this research is the spring that use in the energy harvesting system, which has linear spring on the one hand and is affected by non-linear spring on the other hand, as well as the validation of the simulation results using the design experimental system.

Keywords: Renewable energies, Electromagnetic energy harvesting system, Electronic devices, Human motion, Nonlinear spring

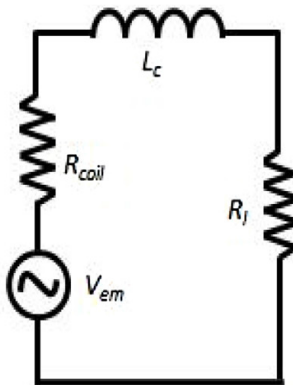
۱- مقدمه

بود، برای برداشت انرژی از حرکات بدن انسان پیشنهاد کردند. این وسیله یک لوله است که دو مغناطیس در دو انتها ثابت شده-اند و یک مغناطیس در وسط قرار دارد که آزادانه حرکت می‌کند. این شکل از طراحی سبب ایجاد یک فنریت مغناطیسی می‌شود [۱۵]. فیسل و همکاران دو گونه از ژنراتورهای چند فرکانسی را طراحی کردند، آن‌ها نتیجه گرفتند که هنگامی که چهار ژنراتور در یک مکان تعبیه شوند، بیشترین توان از آن‌ها برداشت می‌شود [۱۶]. پس از آن مانز و همکاران یک برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی که در آن از مغناطیس چند قطبی استفاده شده است، برای برداشت انرژی از ارتعاشات محیط پیشنهاد کردند [۱۷]. همچنین صلاح الدین و پارک یک تولید کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی را با یک سامانه جرم-فنر و مغناطیس-فنر ارائه دادند، آن‌ها در فرکانس ۶ هرتز توانی معادل ۲,۹۲ میلی وات برداشت کردند [۱۸]. سپس وانگ و همکاران مدل جدیدی از برداشت کننده‌ی الکترومغناطیسی را ارائه دادند که از حرکت انسان انرژی دریافت می‌کند [۱۹]. گی و همکاران نیز یک نوع ژنراتور بر اساس مغناطیس چند قطبی برای برداشت انرژی از راه رفتن انسان طراحی کردند. ماکزیمم توان دریافتی آن‌ها ۲۰ میلی وات بود [۲۰]. سپس اقبال و صلاح الدین یک برداشت کننده‌ی انرژی هیبریدی شامل پیزوالکتریک و الکترومغناطیس را به منظور بهره برداری از ارتعاشات ناشی از باد طراحی کردند [۲۱]. در [۲۲] یک برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی یکنواخت (EMEH) ارائه شد، به طوری که از یک تشدید کننده فنر آهنربایی محصور در یک لوله، مجموعه‌ای از سیم پیچ پیچیده شده در اطراف لوله و دو آهن‌ربا در دو انتهای لوله تشکیل شده بود. همچنین سه آهن‌ربا به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که برهمکنش در هر دو طرف آهنربای متحرک اعمال می‌شود. شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی تحت تحریک‌های هارمونیک نشان می‌دهد که سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی پیشنهادی در [۲۲] دارای توان خروجی مناسبی است به طوری که آزمایش‌های انجام شده بر روی تردمیل نشان می‌دهد که از نمونه اولیه ساخته شده در هنگام راه رفتن تقریباً نیم میلی وات می‌توان برداشت نمود. همانطور که مشخص است، مطالعات مختلف و قابل توجه‌ای در زمینه برداشت انرژی با استفاده از الکترومغناطیس انجام شده است، در این پژوهش، در سامانه غیرخطی گونه‌ای جدید از فنریت معرفی شده است به گونه‌ای که شش مغناطیس یکپارچه موجود درون لوله در سامانه برداشت انرژی غیرخطی از یک جهت متصل به یک فنر خطی می‌باشند و از طرف دیگر توسط یک مغناطیس ثابت، تحت تاثیر فنریت غیرخطی قرار دارند. این فنریت ویژه معرفی شده از جمله

در سال‌های اخیر به دلیل اهمیت موضوع انرژی و حیاتی بودن انرژی‌های تجدیدپذیر، تحقیقات آزمایشگاهی و عددی زیادی در زمینه برداشت انرژی از مواد هوشمند (پیزوالکتریک، الکترواکتیو پلیمر (EAP)، نایلون، فیبرهای نوری و غیره) و مواد الکترومغناطیس صورت گرفته است. کاتون و همکاران یک مدل جدیدی از برداشت کننده‌ی انرژی غیر خطی به وسیله‌ی تولید نیروی مغناطیسی پیشنهاد دادند [۳]. تانگ و یانگ یک ارتعاش کننده‌ی مغناطیسی را برای عریض کردن ناحیه‌ی رزونانس برداشت کننده‌ی پیزوالکتریک به کار بردند [۴]. گائو و همکاران یک مطالعه جامع بر اثرات میرایی غیر خطی هوا و "کشش به داخل" روی برداشت کننده‌ی انرژی الکترواستاتیک، انجام دادند [۵]. همچنین شی و همکاران یک برداشت کننده انرژی موج شناور نوسانی جدید بر اساس مکانیزم فضایی دوتایی X شکل برای سنسورهای خودکار در پل های عبوری از دریا پیشنهاد کردند [۶]. سان و همکاران مطالعاتی بر روی توسعه یک برداشت کننده انرژی ارتعاشی-بادی جدید با چگالی توان بالا همراه با ساختار بلوف-بدنه تودرتو انجام دادند [۷]. همچنین هانگ و همکاران عملکرد تولید انرژی یک ماشین برداشت پیزوالکتریک با قابلیت حمل و نقل جاده ای برای حذف انرژی از وسایل نقلیه عبوری را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. همچنین لی و همکاران عملکرد برداشت کننده‌های انرژی الکترومغناطیسی بر اساس آرایه‌های آهنربایی با قطبیت متناوب را در ساختارهای مختلف مورد مقایسه قرار دادند [۹]. همچنین استماتلو و همکاران آزمایشاتی بر روی برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک جدا شده از ارتعاشات پایه انجام دادند [۱۰]. تیاپور و همکاران یک برداشت کننده انرژی ترکیبی چندوجهی بر اساس مکانیزم‌های پیزوالکتریک-الکترومغناطیسی برای ارتعاشات محیطی با فرکانس پایین، طراحی کردند [۱۱]. همچنین پاول و همکاران یک دستگاه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی جدید برای تامین انرژی یک ربات یخ زدا و سنسورهای نظارت بر خطوط انتقال، طراحی کردند [۱۲]. از طرف دیگر برداشت انرژی از ارتعاشات محیط با استفاده از الکترومغناطیس، یا از طریق حرکت نسبی بین مغناطیس و سیم پیچ صورت می‌گیرد و یا از طریق یک کوئل در اثر تغییرات میدان مغناطیسی صورت می‌گیرد [۱۳]؛ برای مثال لی و همکاران مطالعاتی بر روی برداشت انرژی غیر خطی از ارتعاشات ناشی از حرکت دست انسان انجام دادند [۱۴]. سپس ساها و همکاران یک مدلی از برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی که شامل مغناطیس



شکل ۱ سامانه مکانیکی معادل



شکل ۲ سامانه الکتریکی معادل

برای بدست آوردن مدل ریاضی برای برداشت کننده از قانون دوم نیوتن و همچنین قانون القای الکترومغناطیس فارادی استفاده شده است. طبق قانون دوم نیوتن معادله حاکم بر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی به صورت زیر می باشد:

$$M\ddot{y} + (C_a + C_i + C_e)\dot{y} + ky + F_{mag}(y) + \frac{\dot{y}}{|y|} \mu Mg = F(t)$$

در رابطه‌ی (۱)، M جرم مغناطیس، C_a ضریب میرایی هوا، C_i ضریب میرایی مکانیکی و C_e ضریب میرایی الکتریکی می باشد. همچنین k سختی فنر و $F_{mag}(y)$ نیروی فنریت غیرخطی بین دو مغناطیس و μ ضریب اصطکاک می باشد. نیروی فنریت غیرخطی بین دو مغناطیس را مطابق رابطه (۲) می توان بیان نمود.

$$F_{mag}(y) = k_3 y^3 \quad (2)$$

به طور کلی معادله حاکم بر سامانه برداشت کننده‌ی انرژی الکترومغناطیسی به صورت رابطه (۳) قابل نمایش می باشد:

$$M\ddot{y} + (C_a + C_i + C_e)\dot{y} + ky + k_3 y^3 + \frac{\dot{y}}{|y|} \mu Mg = F(t) \quad (3)$$

نوآوری‌های این پژوهش نسبت به کارهای پیشین از جمله [۲۲] می باشد. مهم ترین نوآوری‌ها و مزایا پژوهش حاضر عبارتند از:

- ۱- معرفی سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی با فنریت جدید خطی - غیرخطی
- ۲- قرارگیری متفاوت سیم پیچ‌ها در اطراف لوله و مغناطیس‌ها جهت استحصال انرژی بیشتر از سامانه

۳- استفاده از تعداد مغناطیس‌های متحرک بیشتر جهت تقویت میدان مغناطیسی در اطراف آن‌ها و در نتیجه برداشت توان بیشتر از سامانه

در این پژوهش هدف مطالعه بر روی ارتعاشات خطی و غیرخطی سامانه برداشت انرژی، در هنگام حرکت انسان و همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو سامانه خطی و غیرخطی و در نهایت بهبود توان دریافتی برای تامین انرژی مدارهای الکترونیکی کم مصرف می باشد. در بخش‌های بعدی ابتدا معادلات ریاضی حاکم بر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار خواهد گرفت، سپس مسائل مربوط به شبیه سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس مورد تبیین و ارزیابی قرار خواهد گرفت، همچنین پس از آن سامانه آزمایشگاهی طراحی شده مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد، سپس به ارزیابی و مطالعه نتایج حاصل شده در دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی پرداخته می شود و در نهایت نتیجه گیری از پژوهش انجام شده ارائه می شود.

۲- معادلات ریاضی حاکم بر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی (۱)

۲-۱- تحلیل معادلات حاکم بر دو زیر سامانه مکانیکی و الکتریکی

هر سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی را می توان به دو سامانه مکانیکی و الکتریکی جداگانه معادل تقسیم بندی کرد. سامانه مکانیکی مطابق شکل (۱) یک سامانه جرم-فنر-دمپر ساده می باشد که در اثر فرکانس اعمالی از طرف انسان دچار ارتعاش می شود.

همچنین سامانه الکتریکی معادل، یک مدار الکتریکی مطابق شکل (۲) می باشد که جریان I از آن می گذرد و در آن R_{coil} مقاومت سیم پیچ، L_c اندوکتانس سیم پیچ، R_l مقاومت بار و V_{em} ولتاژ برداشت شده از سامانه می باشد.

لازم به ذکر است L و R به ترتیب اندوکتانس سیم پیچ و مقاومت کلی جریان می‌باشند. در نهایت توان استحصال شده از یک سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (10)$$

از معادله (۱۰) می‌توان برای محاسبه‌ی توان آنی تقریبی استفاده نمود.

۲-۲- تحلیل نیروی الکترومغناطیسی و فنریت غیرخطی بین دو مغناطیس

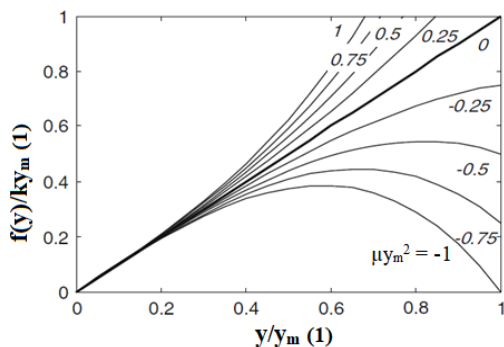
معادله‌ی نیروی الکترومغناطیسی غیر خطی بین دو مغناطیس طبق (۲۲) مطابق رابطه (۱۱) می‌باشد:

$$f(y) = ky(1 + \mu_{nl}y^2) \quad (11)$$

طبق معادله (۱۱) نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس تابع ضرائب ثابتی مثل ضرائب فنریت خطی و غیرخطی که به ترتیب با k و k_3 نمایش داده می‌شوند، و همچنین فاصله‌ی بین دو مغناطیس می‌باشد. که طبق (۲۲) k_3 ارتباط مستقیم با k و μ_{nl} دارد (طبق رابطه‌ی ۱۲):

$$k_3 = k \cdot \mu_{nl} \quad (12)$$

طبق معادله (۱۱) اگر μ_{nl} برابر با صفر شود، آن‌گاه نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس خطی بوده و فقط تابع k یا ضریب فنریت خطی می‌باشد. نحوه تغییرات نیروی الکترومغناطیسی با فاصله‌ی دو مغناطیس و μ_{nl} در نمودار بدون بعد در شکل (۳) به‌طور کامل مشخص می‌باشد.



شکل ۳ نحوه‌ی تغییرات نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس [۲۲]

برای پیش بینی ولتاژ در سیم پیچ اطراف آلیاژ، قانون القای فارادی را استفاده می‌کنیم. طبق این قانون هرگاه میزان شار مغناطیسی که از یک مدار بسته می‌گذرد تغییر کند، نیرو محرکه-ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است. این قانون ولتاژ القا شده در یک سیم پیچ به تعداد N حلقه و مساحت مدار بسته A را به تغییرات چگالی شار مغناطیسی (B) طبق (۱۵) به فرم رابطه (۴) ارتباط می‌دهد:

$$V = -NA \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

از طرفی تغییرات شار مغناطیسی با زمان را طبق (۱۵) به صورت رابطه (۵) نیز می‌توان نمایش داد:

$$V = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{d\phi}{dy} \left| \frac{dy}{dt} \right| \quad (5)$$

که ϕ شار مغناطیسی القا شده در سیم پیچ می‌باشد. همچنین dy/dt سرعت نسبی سامانه و $d\phi/dt$ گرادیان شار مغناطیسی می‌باشد. برای محاسبه‌ی شار مغناطیسی القا شده در یک دور سیم پیچ یا ϕ باید از معادله‌ی چگالی شار مغناطیسی یا میدان مغناطیسی (B) نسبت به سطح انتگرال بگیریم. پس از انتگرال گیری ϕ مطابق (۱۵) به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\phi = \frac{\mu_0 m}{2} \left[\frac{1}{(r^2 + y^2)^{1/2}} - \frac{y^2}{(r^2 + y^2)^{3/2}} \right] \quad (6)$$

با مشتق گیری از رابطه‌ی (۶) نسبت به y داریم:

$$\frac{d\phi}{dy} = \frac{\mu_0 m}{2} \left[\frac{2y^3}{(r^2 + y^2)^{5/2}} - \frac{3y}{(r^2 + y^2)^{3/2}} \right] \quad (7)$$

معادله (۷) تغییرات شار مغناطیسی در یک دور سیم پیچ با شعاع حلقه‌ی r را نشان می‌دهد، به طوری که فاصله‌ی مغناطیس متحرک از هر یک از مغناطیس‌های ثابت y می‌باشد. با تعمیم رابطه‌ی (۷) تغییرات شار مغناطیسی طبق (۱۵) برای یک سیم پیچ الکتریکی با تعداد دور N و طول l به صورت رابطه (۸) حاصل می‌شود:

$$\frac{d\phi}{dy} = \frac{\mu_0 m}{2} \sum_{n=-N/2}^{n=N/2} y_n \left[\frac{2y_n^2}{(r^2 + y_n^2)^{5/2}} - \frac{3}{(r^2 + y_n^2)^{3/2}} \right] \quad (8)$$

$$y_n = y + n \left(\frac{l}{N-1} \right)$$

کامسول مولتی فیزیکس یک نرم افزار شبیه سازی عمومی برای مدلسازی طرح‌ها، دستگاه‌ها و فرایندها در تمام زمینه‌های مهندسی، ساخت و تحقیقات علمی است. کاربر این نرم افزار علاوه بر استفاده از مدل سازی مولتی فیزیکس برای پروژه‌های خود، همچنین می‌تواند مدل های خود را به اپلیکیشن‌های شبیه سازی برای استفاده توسط سایر تیم‌های طراحی، بخش‌های تولید، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، تبدیل کند.

کامسول یک محیط شبیه سازی است که با در نظر گرفتن کاربردهای دنیای واقعی طراحی شده است. هدف از همه شبیه سازی‌ها تا آنجا که ممکن است بررسی تأثیراتی است که در واقعیت مشاهده می‌شوند. اگر بتوانیم تمام مواردی که در واقعیت اتفاق می‌افتد را در یک پروژه مهندسی یا علمی در شبیه سازی وارد کنیم، در حقیقت شبیه سازی بیشتر و بیشتر به مدل واقعی نزدیک می‌شود.

برای شبیه سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس ابتدا مشخصات هندسی لوله، فنر و مغناطیس‌ها در نرم افزار وارد شده سپس محیط اطراف نیز در نرم افزار شبیه سازی شده و در نهایت سامانه در هنگام راه رفتن انسان در سه فرکانس مختلف ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز در مدت زمان ۴ ثانیه در نرم افزار به طور جداگانه شبیه سازی شده است. در حقیقت پس از وارد کردن پارامترهای سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول، لوله‌ی استوانه‌ای و محیط اطراف آن شبکه بندی شده- اند که مشخصات آن در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد.

مطابق شکل (۴)، جهت نزدیک تر بودن محیط شبیه سازی به واقعیت، شبکه بندی سامانه در اطراف سیم پیچ با اندازه کوچکتر و با دقت بالاتری انجام شده است. همچنین در محیط شبیه سازی شرایط مرزی با این فرض تعیین شده است که: در اطراف مغناطیس متحرک جابه جایی در راستای افقی (در نرم افزار با Γ نمایش داده شده است) صفر در نظر گرفته شده و در راستای عمودی (در نرم افزار با Z نمایش داده شده است) به- صورت تابع هارمونیک در سه فرکانس مختلف ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز در نظر گرفته شده است.

در بخش ((بحث و نتایج)) به بررسی نتایج حاصل شده در محیط شبیه سازی و در نرم افزار کامسول پرداخته شده و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۵) نمایی دو بعدی از نحوه ارتعاش مغناطیس‌ها درون لوله در نرم افزار کامسول با توجه به شبکه بندی انتخاب شده برای آن قابل مشاهده است.

طبق شکل (۳) اگر $\mu \cdot ym2 > 0$ باشد، با افزایش فاصله‌ی بین دو مغناطیس، مقدار نیروی الکترومغناطیس به صورت سهموی بیشتر می‌شود. همچنین اگر $\mu \cdot ym2 = 0$ باشد، نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس خطی می‌باشد. در نهایت اگر $\mu \cdot ym2 < 0$ باشد، نیروی الکترومغناطیسی بین دو مغناطیس تا وسط افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد تا در نهایت به صفر برسد. به طور کلی رابطه‌ی نیروی فنریت غیرخطی مغناطیسی بین دو مغناطیس استوانه‌ای شکل طبق (۲۲) مطابق رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$F_{mag}(y, t) = -\frac{\pi\mu_0 M^2 r^4}{4} \left[\frac{1}{y(t)^2} + \frac{1}{(y(t)+2h)^2} + \frac{2}{(y(t)+h)^2} \right] \quad (13)$$

که

$$M = \frac{B}{\mu_0}$$

در رابطه (۱۳)، $F_{mag}(y,t)$ نیروی مغناطیسی بین دو مغناطیس استوانه‌ای، μ ضریب گذردهی فضای خالی (که مقدار آن برابر با $0,00000126$ هانری بر متر است)، B چگالی شار مغناطیسی (بر حسب تسلا)، Γ شعاع مغناطیس، h ضخامت مغناطیس، y جابه جایی و فاصله بین مغناطیس‌ها و t زمان می- باشد. حال از حاصل تقسیم نیروی فنریت غیرخطی مغناطیسی بر جابه جایی بین دو مغناطیس، فنریت غیرخطی بین دو مغناطیس طبق (۲۲) از رابطه‌ی (۱۵) به دست می‌آید.

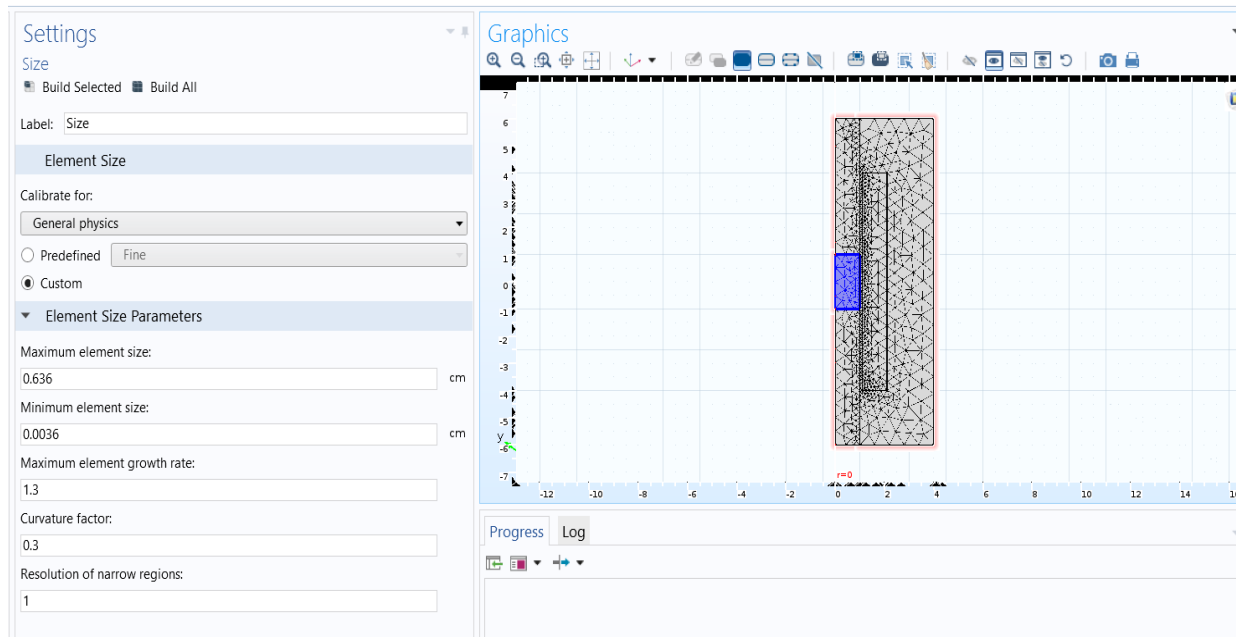
$$k_{nl} = \frac{F_{mag}(y, t)}{y(t)} = -\frac{\pi\mu_0 M^2 r^4}{4y(t)} \left[\frac{1}{y(t)^2} + \frac{1}{(y(t)+2h)^2} + \frac{2}{(y(t)+h)^2} \right] \quad (15)$$

طبق رابطه‌ی (۱۵) فنریت غیر خطی بین دو مغناطیس با چگالی شار مغناطیس و شعاع مغناطیس رابطه‌ی مستقیم و با فاصله‌ی بین دو مغناطیس رابطه‌ی عکس دارد.

به عبارت دیگر با کم کردن فاصله‌ی دو مغناطیس مقدار فنریت به طور قابل ملاحظه‌ای (با توان ۳) افزایش می‌یابد، به- طوری که اگر این فاصله بسیار کم شود و به صفر نزدیک شود، مقدار فنریت به سمت بی نهایت میل می‌کند.

۳- شبیه سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس

در این بخش چگونگی شبیه سازی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۴ نحوه‌ی شبکه بندی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول

لازم به ذکر است که مقاومت سیم پیچ طبق رابطه‌ی ۱۶ تابع پارامترهایی می‌باشد:

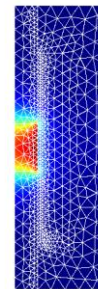
$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (16)$$

که ρ مقاومت ویژه سیم پیچ، L طول سیم پیچ و A مساحت مقطع سیم پیچ می‌باشد. روابط L و A طبق (۱۷) و (۱۸) می‌باشند:

$$L = N \pi D \quad (17)$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (18)$$

که در آن N تعداد دور سیم پیچ، D قطر لوله، و d قطر سیم مفتول می‌باشد. در روابط فوق با افزایش طول سیم پیچ (L) مقدار مقاومت سیم پیچ افزایش یافته و در نتیجه توان برداشت شده از سامانه کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش مساحت مقطع سیم پیچ (A) مقدار مقاومت سیم پیچ کاهش یافته و در نتیجه توان برداشت شده از سامانه افزایش می‌یابد، از این رو پارامترهای هندسی باید به‌گونه‌ای بهینه شوند که مقدار طول سیم پیچ کمترین مقدار و مساحت سیم پیچ بیشترین مقدار شوند تا مقاومت سیم پیچ کمترین مقدار شود و در نتیجه توان خروجی بیشینه شود.



شکل ۵ نمایی دو بعدی از ارتعاش مغناطیس درون لوله و شبکه بندی سامانه برداشت انرژی در نرم افزار کامسول

۴- سامانه آزمایشگاهی طراحی شده

در این بخش به بررسی سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده و نحوه‌ی بهینه سازی پارامترهای آن که در نرم افزار متلب با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده‌اند، پرداخته می‌شود. طبق رابطه‌ی (۱۰)، توان یک سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی با مجذور ولتاژ القا شده در خروجی سیم پیچ رابطه‌ی مستقیم و با مقاومت سیم پیچ (بار) رابطه‌ی عکس دارد. پس، سامانه‌ی بهینه است که در عین دریافت بیشترین ولتاژ القا شده در خروجی سیم پیچ، دارای کمترین مقدار مقاومت باشد در نتیجه برای بهینه سازی سامانه دو اصل زیر را باید در نظر گرفت:

ولتاژ برداشت شده بیشترین مقدار باشد.
مقاومت سیم پیچ تا حد امکان کمترین مقدار باشد.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک اعمالی جهت بهینه‌سازی متغیرهای سامانه برداشت انرژی الکترومغناطیسی مطابق ذیل می‌باشند:

نوع پارامترها پیوسته، احتمال جهش ۰/۱، احتمال جدایش ۰/۰۴۵، نوع ادغام تک نقطه‌ای و شرط توقف حصول حداکثر مقدار تابع برازندگی در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) مقدار بهینه پارامترها و مقدار نهایی تابع هدف (توان) آورده شده است.

جدول ۲ مقادیر بهینه پارامترهای سامانه آزمایشگاهی

مقدار	نماد	پارامتر
۱۶۰۰۰	N	تعداد دور
۰/۲	d (mm)	قطر سیم مفتول
۱۵۰	L (mm)	طول لوله
۷۰۳۷	l (m)	طول سیم پیچ
۱۶	D (mm)	قطر لوله
۶/۶۷	M (g)	جرم مغناطیس
۵۳۲	Rc (Ω)	مقاومت سیم پیچ
۱/۸۹	P (mw)	تابع هدف (توان)

این سامانه آزمایشگاهی شامل یک لوله به طول ۱۵۰ میلی متر و قطر ۱۶ میلی متر می‌باشد که در یک انتهای آن یک فنر خطی متصل شده است، به طوری که به فنر مورد نظر شش مغناطیس یکپارچه متصل شده و طرف دیگر مغناطیس‌ها توسط یک مغناطیس ثابت که در انتهای دیگر لوله قرار دارد، تحت تأثیر فنریت غیر خطی می‌باشد، به طوری که ارتفاع و قطر هر مغناطیس به ترتیب ۵ و ۱۵/۵ میلی متر می‌باشند. لازم به ذکر است که در اطراف لوله‌ی مورد نظر ۶ سیم پیچ متمرکز قرار دارد که دوتای انتهایی دارای ۲۰۰۰ دور و چهارتای میانی دارای ۳۰۰۰ دور می‌باشند. در شکل‌های (۶) و (۷) سامانه آزمایشگاهی مورد نظر قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مشخصات الگوریتم ژنتیک اعمال شده و نتایج همگرایی آن در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد. نحوه انجام کار آزمایشگاهی بر روی سامانه آزمایشگاهی طراحی شده به این صورت است که، سامانه آزمایشگاهی بر روی ساق پا نصب شده و سپس بر اساس ارتعاش مغناطیس درون لوله آزمایشگاهی در هنگام راه رفتن انسان عملکرد سامانه آزمایشگاهی در سه فرکانس تحریک ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول مورد مقایسه قرار گرفته است.

در ادامه به بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر توان برداشت شده در خروجی سیم پیچ پرداخته می‌شود. مسأله بهینه سازی به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

Maximize:

$$Power(V, R) = \frac{V^2}{R}$$

Subject to:

$$g_1(X) = L - N \pi D \quad (19)$$

$$g_2(X) = L^* - Nd$$

$$X_k^{\min} < X_k < X_k^{\max}$$

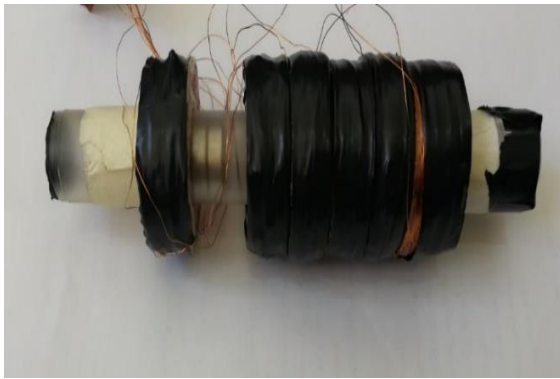
$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

در رابطه (۱۹) تابع برازندگی و قیدهای حاکم بر مسأله قابل مشاهده می‌باشند، به طوری که هر یک پارامترهای موجود در آن در توضیح روابط ۱۶، ۱۷ و ۱۸ معرفی شده‌اند. در واقع هدف از بهینه سازی بیشینه کردن تابع برازندگی (توان خروجی) با در نظر گرفتن قید اول که در واقع رابطه‌ی مربوط به طول سیم پیچ بوده و قید دوم که رابطه‌ی مربوط به طول لوله است، می‌باشد. هریک از پارامترهای معرفی شده نیاز به یک محدوده دارند که در جدول (۱) پارامترهای طراحی و محدوده آن‌ها معرفی شده‌اند:

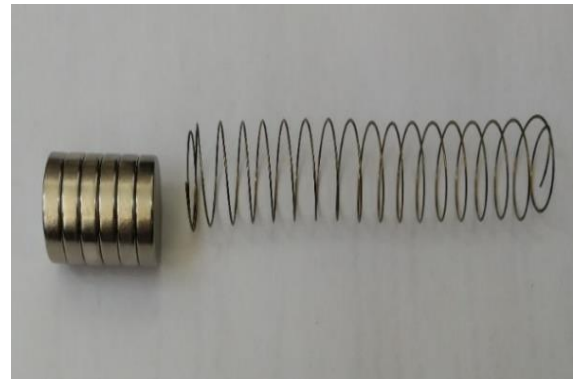
جدول ۱ محدوده تغییرات پارامترها

حد بالا	حد پایین	نماینده	پارامتر	عنوان پارامتر
inf	۰/۰۵	X1	L(m)	طول سیم پیچ
۲۰۰۰۰	۲	X2	N	تعداد دور
۲۰	۱	X3	D(mm)	قطر لوله
۱۰۰۰	۰/۱	X4	R(Ω)	مقاومت سیم پیچ
۱۰۰۰۰	۰	X5	K(N/m)	سختی فنر

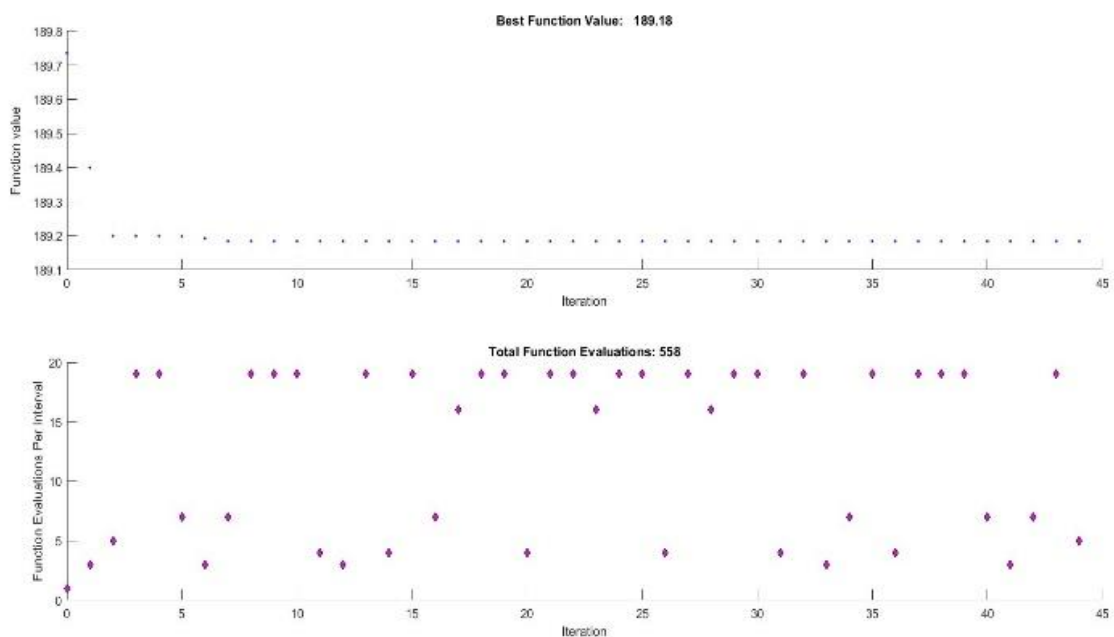
برای حل این مسأله با توجه به اینکه قیدها به صورت غیر خطی می‌باشند و مسأله دارای پیچیدگی‌های معادلاتی می‌باشد، الگوریتم ژنتیک را به عنوان روش حل انتخاب می‌کنیم. برای بهتر پیش رفتن فرآیند، حدود فوق به صورت دقیق، معقول و متناسب با سامانه آزمایشگاهی موجود انتخاب شده‌اند تا در مدت زمان کمتری به سامانه بهینه مورد نظر برسیم.



شکل ۷ سامانه آزمایشگاهی مورد نظر



شکل ۸ فنر و مغناطیس‌های به کار برده شده در سامانه آزمایشگاهی



شکل ۹ مشخصات الگوریتم ژنتیک به کار رفته جهت بهینه سازی پارامترهای سامانه آزمایشگاهی

سازی در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه پرداخته می‌شود. مکانیزم سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی به این صورت است که توسط مغناطیس دیگر تحت تأثیر یک فنریت غیرخطی قرار می‌گیرد. همین موضوع سبب افزایش احتمال برداشت توان‌های بیشتر از سامانه نسبت به حالت فنریت خطی می‌شود. در شکل (۹) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده با استفاده از فقط خطی (بدون فنریت غیرخطی) طبق نتایج آزمایشگاهی (که بر اساس قرار دادن سامانه آزمایشگاهی بر روی ساق پا در هنگام راه رفتن ثبت شده‌اند) و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۱/۵ هرتز، قابل مشاهده می‌باشد.

حال در ادامه به ارزیابی نتایج حاصل از برداشت انرژی از سامانه آزمایشگاهی (شکل ۷) و شبیه سازی در نرم افزار کامسول در سه فرکانس تحریک ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز پرداخته می‌شود.

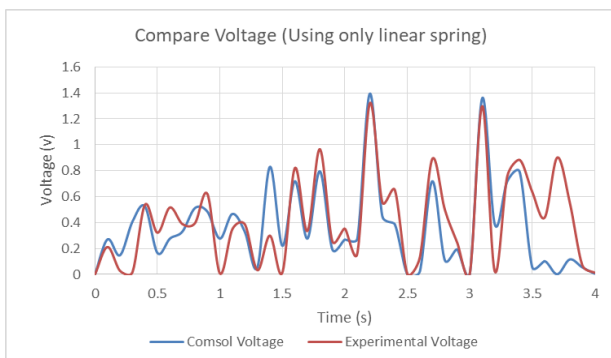
۵- بحث و نتایج

در این بخش به بررسی و مقایسه‌ی ولتاژ و توان استحصال شده در دو سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فنریت همزمان غیرخطی و خطی و سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فنریت خطی در سه فرکانس ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه

جدول ۳ توان استحصال شده از سامانه‌های برداشت انرژی خطی و غیرخطی (فرکانس ۱/۵ هرتز)

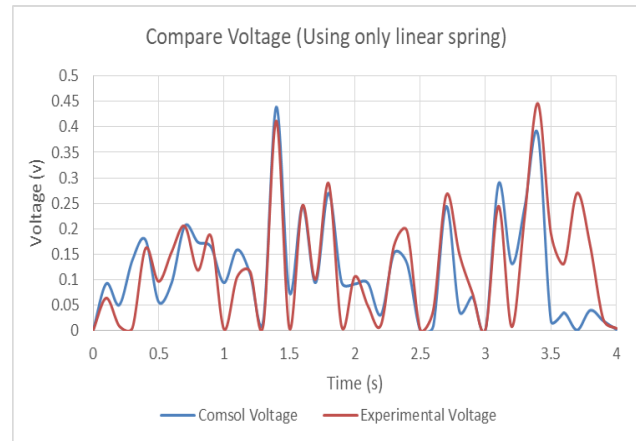
فهریت غیرخطی	فهریت خطی	روش	فرکانس ۱/۵ هرتز
۰/۰۳۴	۰/۰۱۱	آزمایش	توان RMS (mw)
۰/۰۳۲	۰/۰۰۹	شبیه سازی در کامسول	
۰/۲۴۸	۰/۰۶۵	آزمایش	توان ماکزیمم (mw)
۰/۱۷۳	۰/۰۸۲	شبیه سازی در کامسول	

مطابق جدول (۳)، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب ۲/۱ برابر و ۲/۵ برابر شده است. همچنین مقدار توان ماکزیمم در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب ۲/۸ برابر و ۱/۱ برابر شده است. طبق نتایج حاصل شده مزیت سامانه برداشت انرژی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت انرژی خطی در استحصال توان بیشتر در این فرکانس (فرکانس ۱/۵ هرتز) کاملاً نمایانگر می‌باشد. همچنین در شکل (۱۱) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده خطی (بدون فنریت غیرخطی) طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۲ هرتز، قابل مشاهده می‌باشد.



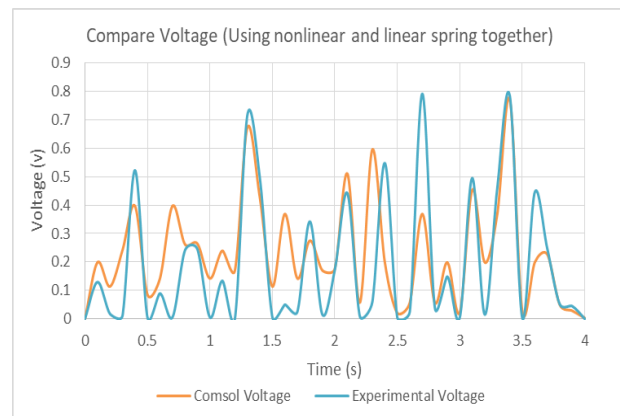
شکل ۱۱ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی خطی (فرکانس ۲ هرتز)

در شکل (۱۲) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده غیرخطی طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در فرکانس ۲ هرتز قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۹ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی خطی (فرکانس ۱/۵ هرتز)

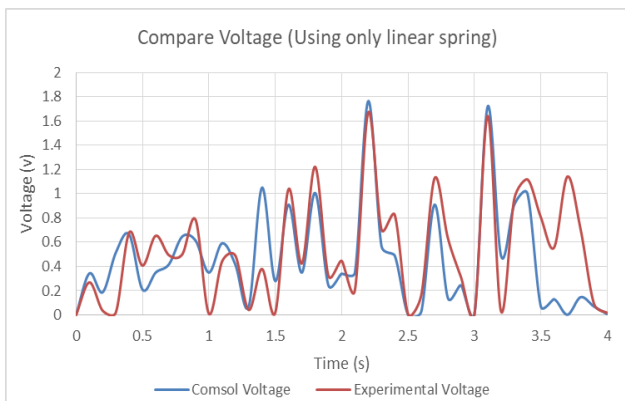
همچنین در شکل (۱۰) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده در حالت استفاده همزمان از فنر خطی و غیرخطی طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۱/۵ هرتز، قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۰ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی غیر خطی (فرکانس ۱/۵ هرتز)

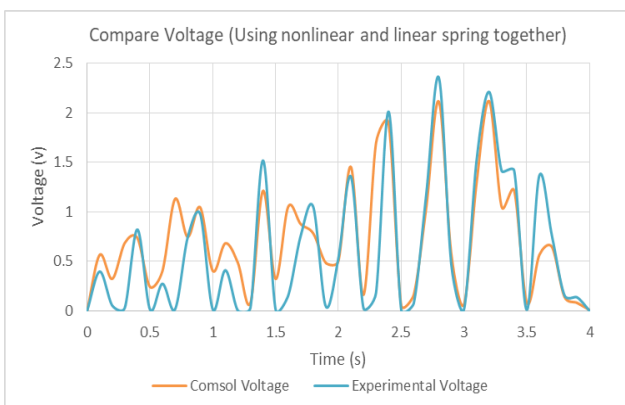
طبق شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه سازی انطباق قابل قبولی را دارا می‌باشد که این موضوع خود حاکی از دقت کارهای آزمایشگاهی گرفته شده می‌باشد. همانطور که از شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است در این فرکانس (فرکانس ۱/۵ هرتز) مقادیر ولتاژ ماکزیمم و ولتاژ RMS در سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی بیشتر می‌باشد. حال با در نظر گرفتن مقاومت بار ۲۰۰۰ اهم مقادیر توان استحصال شده از سامانه برداشت انرژی به‌طور کامل در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

استحصال توان بیشتر در این فرکانس نیز کاملاً نمایانگر می‌باشد. همچنین در شکل (۱۳) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده خطی (بدون فنریت غیرخطی) طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در مدت زمان ۴ ثانیه در فرکانس ۲/۵ هرتز، قابل مشاهده می‌باشد.



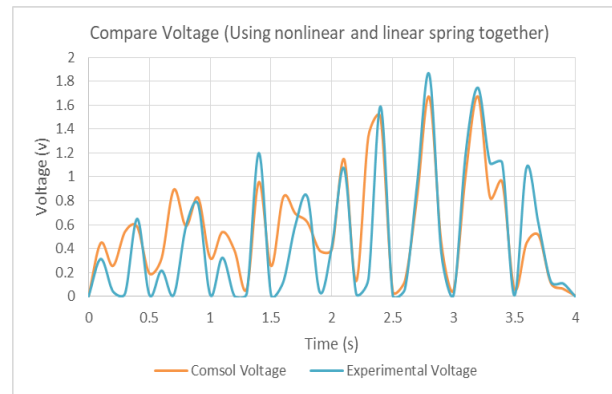
شکل ۱۳ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی خطی (فرکانس ۲/۵ هرتز)

در شکل (۱۴) ولتاژ خروجی سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی بهینه شده غیرخطی طبق نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه در نرم افزار کامسول در فرکانس ۲/۵ هرتز قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۴ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی غیر خطی (فرکانس ۲/۵ هرتز)

همانطور که از شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشخص است در این فرکانس (فرکانس ۲/۵ هرتز) نیز مقادیر ولتاژ ماکزیمم و ولتاژ RMS در سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی بیشتر می‌باشد. حال با در نظر گرفتن



شکل ۱۲ ولتاژ برداشت شده از سامانه برداشت انرژی غیر خطی (فرکانس ۲ هرتز)

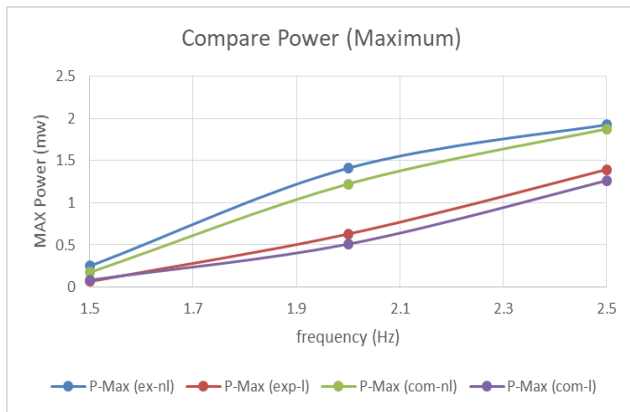
همانطور که از شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشخص است در این فرکانس (فرکانس ۲ هرتز) نیز مقادیر ولتاژ ماکزیمم و ولتاژ RMS در سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی بیشتر می‌باشد. حال با در نظر گرفتن مقاومت بار ۲۰۰۰ اهم مقادیر توان استحصال شده از سامانه برداشت انرژی به‌طور کامل در جدول (۴) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴ توان استحصال شده از سامانه‌های برداشت انرژی خطی و غیرخطی (فرکانس ۲ هرتز)

فرکانس ۲ هرتز	روش	فنریت خطی	فنریت غیرخطی
توان RMS (mw)	آزمایش	۰/۰۷۶	۰/۱۹
	شبیه سازی در کامسول	۰/۰۷۲	۰/۱۷۸
توان ماکزیمم (mw)	آزمایش	۰/۶۳	۱/۴۱۳
	شبیه سازی در کامسول	۰/۵۱	۱/۲۲۵

مطابق جدول (۴)، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۵۰ درصد و ۴۷ درصد افزایش یافته است.

همچنین مقدار توان ماکزیمم در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۲۴ درصد و ۴۰ درصد افزایش یافته است. طبق نتایج حاصل شده مزیت سامانه برداشت انرژی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت انرژی خطی در



شکل ۱۶ مقایسه توان ماکزیمم استحصال شده در سه فرکانس ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز برای دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی و مقایسه‌ی ولتاژ و توان استحصال شده در دو سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فنریت توام غیرخطی و خطی و سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی دارای فنریت خطی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی (که از سامانه آزمایشگاهی طراحی شده استخراج شده است) و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول در سه فرکانس ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز در مدت زمان ۴ ثانیه پرداخته شد. به طوری که در فرکانس ۱/۵ هرتز، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه با فنریت غیرخطی و خطی همزمان نسبت به سامانه با فنریت خطی به ترتیب ۲/۱ برابر و ۲/۵ برابر شده است. همچنین در فرکانس ۲ هرتز، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۵۰ درصد و ۴۷ درصد افزایش یافته است. همچنین در فرکانس ۲/۵ هرتز، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۶۸ درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج عملکرد سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی غیر خطی نسبت به سامانه برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی خطی مطلوب تر می‌باشد و مقدار توان استحصال شده بیشتر می‌باشد. برای تحقیقات آینده می‌توان از سامانه برداشت انرژی معرفی شده در فرکانس‌های بالاتر در شرایط دویدن انسان استفاده نمود و مطالعاتی را بر روی آن انجام داد. همچنین در آینده می‌توان بر روی سامانه برداشت انرژی هیبریدی که ترکیبی از الکترومغناطیس و پیزوالکتریک می‌باشد، برای بهبود توان استحصال شده مطالعاتی را انجام داد.

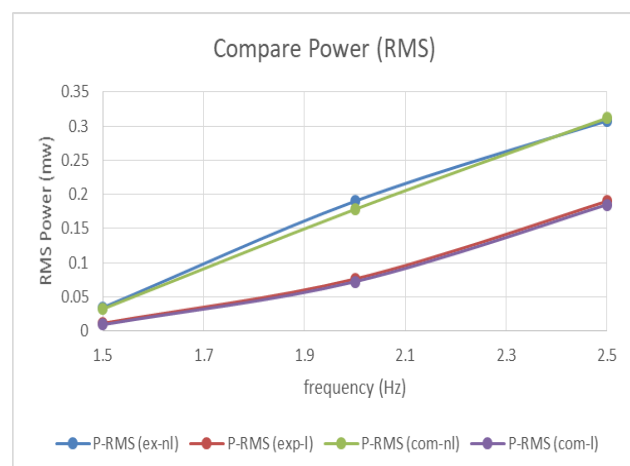
مقاومت بار ۲۰۰۰ اهم مقادیر توان استحصال شده از سامانه برداشت انرژی به طور کامل در جدول (۵) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۵ توان استحصال شده از سامانه‌های برداشت انرژی خطی و غیرخطی (فرکانس ۲/۵ هرتز)

فرکانس ۲ هرتز	روش	فنریت خطی	فنریت غیرخطی
توان RMS (mw)	آزمایش	۰/۱۹	۰/۳۰۸
	شبیه سازی در کامسول	۰/۱۸۵	۰/۳۱۲
توان ماکزیمم (mw)	آزمایش	۱/۳۹۶	۱/۹۲۹
	شبیه سازی در کامسول	۱/۲۶۵	۱/۸۷۹

مطابق جدول (۵)، مقدار توان RMS در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۶۲ درصد و ۶۸ درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار توان ماکزیمم در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار کامسول، در سامانه غیرخطی نسبت به سامانه خطی به ترتیب به میزان ۳۷ درصد و ۴۷ درصد افزایش یافته است. طبق نتایج حاصل شده مزیت سامانه برداشت انرژی غیرخطی نسبت به سامانه برداشت انرژی خطی در استحصال توان بیشتر در این فرکانس نیز کاملاً نمایانگر می‌باشد.

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب مقادیر توان‌های RMS و ماکزیمم استحصال شده در سه فرکانس ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز در دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۵ مقایسه توان RMS استحصال شده در سه فرکانس ۱/۵، ۲ و ۲/۵ هرتز برای دو حالت شبیه سازی و کار آزمایشگاهی

۷- مراجع

- [12] Paul, S., Chang, J.H., Design of novel electromagnetic energy harvester to power a deicing robot and monitoring sensors for transmission lines, *Energy Conversion and Management*, Vol. 197, 111868, (2019).
- [13] Halim, M.A., Rantz, R., Zhang, Q., Gu, L., Yang, K., and Roundy, S., An electromagnetic rotational energy harvester using sprung eccentric rotor, driven by pseudo-walking motion, *Appl Energy*, Vol. 217, pp. 66-74, (2018).
- [14] Liu, H., Gudla, S., Hassani, F.A., Heng, C.H., Lian, Y., and Lee, C.K., Investigation of the nonlinear electromagnetic energy harvesters from hand shaking, *IEEE Sensors Journal*, Vol.15(4), pp. 2356-64, (2015).
- [15] Saha, C.R., O'donnell, T., Wang, N., and McCloskey, P., Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147(1), pp. 248-253, (2019).
- [16] Foisal, A.R.M., and Hong, C., Chung, G.S., Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 182, pp. 106-13, (2020).
- [17] Munaz, A., Lee, B.C., and Chung, G.S., A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 201, pp. 134-40, (2013).
- [18] Salauddin, M., and Park, J.Y., Design and experiment of human hand motion driven electromagnetic energy harvester using dual Halbach magnet array, *Smart Mater Struct*, Vol. 26, 035011, (2017).
- [19] Wang, W., Cao, J., Zhang, N., Lin, J., and Liao, W.H., Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: design, modeling and experiments, *Energy Convers Manag*, Vol. 132, pp. 189-9, (2017).
- [20] Gui, P., Deng, F., Liang, Z., Cai, Y., Chen, J., Micro linear generator for harvesting mechanical energy from the human gait, *Energy*, Vol. 154, pp. 365-73, (2018).
- [21] Halim, M.A., Cho, H., Salauddin, M., and Park, J.Y., A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion, *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 249, pp. 23-31, (2016).
- [22] Kanqi, F., and Yiwei, Z., Capturing energy from ultra-low frequency vibrations and human motion through a monostable electromagnetic energy harvester, *Energy*, Vol. 169, pp. 356-3, (2019).
- [1] Colak, R., Bayindir, I., and Sefa, S., Demirbas, H., Using of alternative energy sources III, *Turkey: Renewable Energy Sources*, (2005).
- [2] Ergun, C., Yilmaz, S., Ozdemir, E., Gul, O., and Kalenderli, O., Piezoelectric materials and application areas, *In: Denizli International Materials Conference, Pamukkale, Turkey*, (2006).
- [3] Cottone, F., and Vocca, H., Gammaitoni, L., Nonlinear energy harvesting, *Physical Review Letters*, Vol. 102, Article ID. 080601, (2009).
- [4] Tang, L.H., Yang, Y.W., A nonlinear piezoelectric energy harvester with magnetic oscillator, *Applied Physics Letters*, Vol. 101, No. 9, (2012).
- [5] Guo, X., Zhang, Y., Fan, K., and Lee, C., A comprehensive study of non-linear air damping and "pull-in" effects on the electrostatic energy harvesters, *Energy Conversion and Management*, Vol. 203, 112264, (2020).
- [6] Xie, Q., Zhang, T., Pan, Y., Zhang, Z., Yuan, Y., and Liu, Y., A novel oscillating buoy wave energy harvester based on a spatial double X-shaped mechanism for self-powered sensors in sea-crossing bridges, *Energy Conversion and Management*, Vol. 204, 112286, (2020).
- [7] Sun, W., Guo, F., and Seok, J., Development of a novel vibro-wind galloping energy harvester with high power density incorporated with a nested bluff-body structure, *Energy Conversion and Management*, Vol. 197, 111880, (2019).
- [8] Hong, S.D., Kim, K.B., Hwang, W., Song, Y.S., Cho, J., Jeong, S.Y., Ahn, J.H., Kim, G.H., Cheong, H., and Sung, T.H., Enhanced energy generation performance of a lanandfilled road capable piezoelectric harvester to scavenge energy from passing vehicles, *Energy Conversion and Management*, (2020).
- [9] Li, Z., Yan, Z., Luo, J., and Yang, Z., Performance comparison of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration, *Energy Conversion and Management*, Vol. 179, pp. 132-140, (2019).
- [10] Stamatellou, A.M., and I.Kalfas, A., Testing of piezoelectric energy harvesters isolated from base vibrations, *Energy Conversion and Management*, Vol. 196, pp. 717-728, (2019).
- [11] Toyabur, R.M., Salauddin, M., Cho, H.O., and Park, J.Y., A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric electromagnetic mechanisms for low frequency ambient vibrations, *Energy Conversion and Management*, Vol. 168, pp. 454-466, (2018).