

## طرح بهینه پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی چندمرحله‌ای با ساختار نوین نامتقارن

رضا حق مرام<sup>۱</sup>، مرتضی قاسمی نژاد<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار برق- قدرت، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، ۲- دانشجوی دکتری برق- قدرت، دانشگاه شاهد تهران  
(دریافت: ۹۵/۰۸/۰۴، پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۶)

**چکیده:** پرتابگرهای الکترومغناطیسی القایی کوپلی چندمرحله‌ای علی‌رغم پیچیدگی خاص، امروزه به دلیل توانایی در شتاب‌دادن اجسام سنگین بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. سیم‌پیچ‌ها در پرتابگرهای الکترومغناطیسی القایی کوپلی چندمرحله‌ای توسط مدار راه‌انداز مرتباً تغذیه می‌شوند تا جریان‌های به‌وجود آمده بتوانند نیروهای الکترومغناطیسی برای شتاب‌دادن پرتابه ایجاد کنند. در ساختار متقارن، طول سیم‌پیچ‌ها باهم برابر است در حالی که در ساختار نوین نامتقارن، طول سیم‌پیچ‌ها باهم متفاوت بوده و به تدریج کاهش می‌یابد. در این مقاله، پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی چندمرحله‌ای با ساختار نامتقارن، معرفی شده است. طول و تعداد دور سیم‌پیچ‌ها و زمان‌های کلیدزنی مختلفی انتخاب شده است تا تحریک سیم‌پیچ‌ها بهترین نتایج را ارائه دهد. شبیه‌سازی الکترومغناطیسی این پرتابگر با استفاده از روش اجزا محدود در حالت گذرا انجام گرفته است. سه مدل با ساختار متقارن و ساختار نامتقارن باهم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ساختار نامتقارن عملکرد بهتری دارد و دارای سرعت حداکثری به‌طور متوسط به میزان ۶/۵۷٪ بیش‌تر از ساختار متقارن می‌باشد. همچنین بهترین مدل برای دست‌یابی به بیش‌ترین سرعت پرتابه شناسایی شده است که به اندازه ۱۱/۵۲٪ سرعت پرتابه بیش‌تر و به اندازه ۶۲٪ طول پرتابگر کم‌تر دارد.

**کلید واژه‌ها:** پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی، تجزیه و تحلیل اجزاء محدود، سرعت پرتابه، ساختار نامتقارن

### ۱- مقدمه

رساند [۲]. هم‌چنین، حرکت پرتابه درون لوله باید با زمان تحریک کوپل‌ها هماهنگ شود و ولتاژ و فرکانس منابع متصل به کوپل‌ها با افزایش سرعت پرتابه افزایش یابد [۳]. پرتابگر القایی کوپلی دارای ویژگی‌های خاصی می‌باشند که آن‌ها را از انواع دیگر پرتابگرها متمایز می‌کند.

از جمله ویژگی‌های پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۴]:

۱- فشار مکانیکی هم بر روی آرمیچر و هم بر روی قسمت لوله پرتابگر در روی سطح بزرگی پخش می‌شود، بنابراین فشار مکانیکی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و امکان افزایش جرم پرتابه را مهیا می‌سازد.

۲- پرتابه موجود در پرتابگر هیچ‌گونه تماس مکانیکی با قسمت لوله پرتابگر ندارد و در فضای موجود درون لوله پرتابگر به صورت معلق می‌باشد که باعث جلوگیری از ایجاد جرقه و اصطکاک و فرسودگی قطعات و افزایش طول عمر لوله پرتابگر می‌شود.

۳- می‌توان وزن مفید پرتابه را به مقدار قابل توجهی افزایش داد که خود باعث افزایش بازده و کاهش هزینه‌ها می‌شود.

۴- نسبتاً به جریان کم‌تری در سیم‌پیچ‌های لوله پرتابگر و آرمیچر نسبت به حالت ریلی (ریل‌گان‌ها) مورد نیاز است که این خود

پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی شاخه مهمی از خانواده پرتابگرهای الکترومغناطیسی است که دارای چند مزیت می‌باشد. این مزایا عبارتند از: نداشتن تماس مکانیکی بین پرتابه و لوله پرتابگر، بازدهی بالاتر و قابلیت پرتاب پرتابه سنگین، که کاربرد آن در صنایع نظامی امیدوارکننده است [۱].

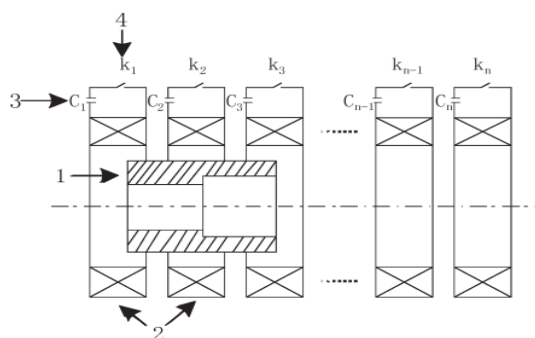
این شتاب‌دهنده‌ها علی‌رغم پیچیدگی خاص، امروزه به دلیل توانایی در شتاب‌دادن اجسام سنگین بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساده‌ترین ساختار آن از یک سیم‌پیچ بر روی یک هسته و یک آرمیچر که همان پرتابه می‌باشد، تشکیل شده است. با دادن انرژی ناگهانی و زیاد به سیم‌پیچ در مدت زمان کوتاه یک میدان مغناطیسی بالایی تولید می‌شود که باعث اعمال نیرو به پرتابه و شتاب‌دادن آن می‌شود. از آنجایی که پرتابه در داخل لوله هنگام حرکت و شتاب‌گیری با نقطه‌ای در تماس نمی‌باشد و توسط نیروهای الکترومغناطیسی در هوا معلق است، مسئله پایداری برای این پرتابه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد و طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که انحرافات اولیه گلوله حذف و گلوله در محور لوله حرکت نماید تا بتوان فاصله هوایی مورد نیاز را به حداقل

استفاده کرده است.

سرعت خروجی پرتابه با افزایش تعداد دور سیم پیچ و همچنین ولتاژ شارژ خازن افزایش می‌یابد. با این وجود، انتخاب دیگر پارامترها برای پرتابگر القایی کوپلی چندمرحله‌ای باید به دقت انجام شود تا بهترین عملکرد را داشته باشد [۲۰-۱۶].

در این مقاله، ساختاری نوین برای پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی چندمرحله‌ای در حالت نامتقارن ارائه شده است. نوآوری و هدف این مقاله، رسیدن به سرعت پرتابه بالاتر و زمان پرتاب کمتر نسبت به مدل متقارن است. شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزا محدود در حالت گذرا انجام گرفته است.

سه مدل با جزئیات ارائه، و یک پرتابه با وزن ۰/۰۵ kg انتخاب شده است. مدار تحریک پرتابگر القایی کوپلی چند مرحله‌ای طوری طراحی شده است که بانک‌های خازنی در حدود ۷۰۰۰ V شارژ شده و در مدت زمان حدود ۸-۷ ms تخلیه می‌شوند. (شکل (۱)).



شکل (۱): ساختار چندمرحله‌ای مدار راه‌انداز خازنی پرتابگر القایی کوپلی (ICG). (۱) آرمیچر (۲) سیم پیچ تحریک (۳) بانک‌های خازنی (۴) کلید

## ۲- مدل ریاضی

در این بخش معادلات میدان و نیروی الکترومغناطیسی حاکم بر پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی ارائه می‌شود.

### ۲-۱- معادلات میدان الکترومغناطیسی

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شد، نواحی حل اجزای پرتابگر به دو ناحیه جریان غیرگردابی  $\Omega_1$  و ناحیه جریان گردابی  $\Omega_2$  تقسیم شده است. ناحیه جریان غیرگردابی اشاره به سیم پیچ تحریک و واسطه نارسانا، از جمله عایق و منطقه هوا در اطراف واحد پرتابه دارد. منطقه جریان گردابی اشاره به آرمیچر دارد. به شرط این که جریان‌های جابجایی نادیده گرفته شوند، معادلات کنترل میدان مغناطیسی و میدان گردابی در طول فرآیند پرتاب

باعث افزایش سرعت کلیدزنی، افزایش بازده سامانه و کاهش هزینه کلی پرتابگر می‌شود.

۵- کوپل‌ها به‌طور انفرادی قابل تعویض و خودنگهدار می‌باشند.

۶- قابلیت ایجاد فشاری تا صد برابر بیش‌تر به ازای جریان معین وجود دارد.

۷- توانایی کارکردن با منابع انرژی مختلف را دارند.

مدار راه‌انداز خازنی پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی به‌طور عمده از سیم پیچ‌های تحریک، پرتابه، بانک خازن، کلید دی‌الکتریک جامد و سیستم کنترل تشکیل می‌شود [۶-۵]. مکانیزم عملی آن با استفاده از تزویج مغناطیسی بین کوپل (سیم پیچ) تحریک و آرمیچر است که شبیه به یک موتور خطی است. سیم پیچ‌های تحریک پی‌درپی انرژی را برای ایجاد میدان مغناطیسی گذرا می‌دهند. این میدان گذرا جریان القایی در آرمیچر متحرک متصل به پرتابه تولید می‌کند. جریان القاء شده در آرمیچر و میدان‌های مغناطیسی در سیم پیچ‌های تحریک متقابلاً بر یکدیگر اثر می‌گذارند و نیروهای لورنتس<sup>۱</sup> را تولید می‌کنند. از آنجایی که سیم پیچ‌های تحریک ثابت هستند، نیروهای لورنتس محوری آرمیچر را در لوله پرتابگر به جلو می‌رانند [۹-۷].

یکی از اولین مدل‌های ارائه شده پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی چندمرحله‌ای در سال ۱۹۹۳ توسط آزمایشگاه ملی سانديا<sup>۲</sup> معرفی شد. پرتابگر معرفی شده بسیار حجیم بوده و قابلیت پرتاب در بازه ۱۰ g تا ۵ Kg تا شتاب ۱ Km/s را دارا بود [۱۰]. در سال ۲۰۰۴، آزمایشگاه ملی سانديا و موسسه لاکهین مارتین<sup>۳</sup> با همکاری یکدیگر یک پرتابگر القایی کوپلی پنج‌مرحله‌ای برای پرتاب موشکی به وزن ۶۵۰ Kg با ارتفاع عمودی ۷/۳ m را با موفقیت آزمایش کردند [۱۱]. در مرجع [۱۲]، تبدیل مدل کامل به مدل‌های چندمرحله‌ای کوچک‌تر صورت گرفت و هر یک از این مدل‌ها به‌عنوان یک مسئله با ابعاد کوچک‌تر مورد بررسی قرار گرفت. در این مرجع، یک نمونه ۱۶ مرحله‌ای با انرژی ذخیره شده ۳۱ MJ، می‌توانست یک پرتابه ۱۶ kg را به سرعت ۲۰۴۰ m/s برساند به طوری که انرژی جنبشی پرتابه در حدود ۱۰ MJ بوده و بنابراین در حدود ۳۰٪ این پرتابگر بازده داشته است. علاوه بر این، موسسه لاکهین مارتین از سال ۲۰۰۵ بر روی یک سامانه تحریک چندمرحله‌ای برای پرتابگر القایی کوپلی مطالعه می‌کند [۱۳]. در مرجع [۱۴]، در پروسه طراحی مدار راه‌انداز استرس‌ها و تنش‌های مکانیکی نیز در نظر گرفته شده است. مرجع [۱۵]، مدل‌سازی یک پرتابگر القایی سه مرحله‌ای را ارائه و برای اعتبارسنجی نتایج از روش اجزاء محدود

1- Lorentz  
2- Sandia National Laboratory  
3- Lockheed Martin Institute

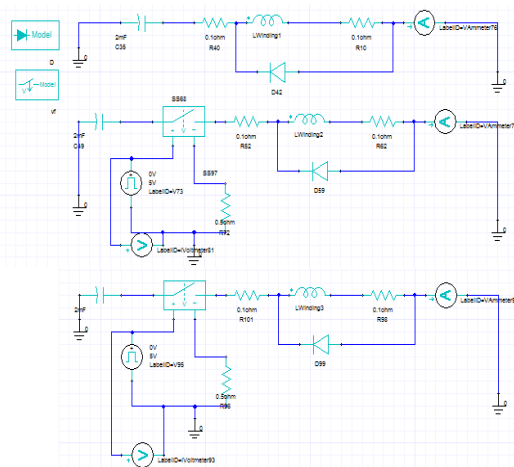
مرحله‌ای، با سیم‌پیچ‌هایی به طول L1، L2 و L3 و با فاصله S بین آن‌ها، در شکل نشان داده شده است.

طول‌های سه سیم‌پیچ استفاده شده، مختلف هستند. اثر طول سیم‌پیچ L1، L2 و L3 و تعداد دور برای هر سیم‌پیچ از دلایل اصلی برای ایجاد مقادیر مختلف سرعت پرتابه برای پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوبلی سه‌مرحله‌ای می‌باشد. هر سیم‌پیچ دارای تعداد دور مشخص و پرتابه در صفر محور y به‌عنوان موقعیت اولیه قرار داده شده است. پرتابه یک سیلندر آلومینیوم توخالی به طول 80 mm و وزن 0.05 kg است.

یک باند (مسیر) در شبیه‌سازی اضافه شده است تا به پرتابه فرصت حرکت در طول مسیر مورد نظر را تا زمانی که آن را ترک می‌کند، بدهد. ساختار با استفاده از روش اجزا محدود و با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسافت<sup>۱</sup> مدل شده است. مدار تحریک طوری طراحی شده است که انرژی اولیه آن قادر به پرتاب این پرتابه باشد. (شکل (۲)).



شکل (۳): ساختار اجزای پرتابگر



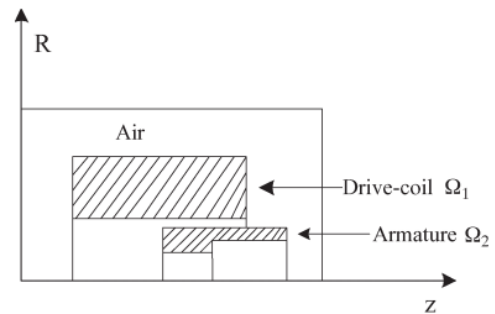
شکل (۴): ساختار مدار تحریک

با توجه به معادلات ماکسول و شرایط شبه‌ایستای میدان گردابی به شرح زیر است:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_s \quad \text{in } \Omega_1 \quad (1)$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \nabla \varphi + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma c \times \nabla \times A = 0 \quad \text{in } \Omega_2 \quad (2)$$

به طوری که  $J_s$  چگالی جریان،  $A$  پتانسیل مغناطیسی برداری،  $\varphi$  پتانسیل اسکالر الکتریکی،  $\mu$  نفوذپذیری نسبی،  $\sigma$  رسانایی از جنس آلومینیوم و  $c$  سرعت آرمیچر است. (شکل (۲)).



شکل (۲): نواحی حل مسئله

## ۲-۲- معادلات نیروی الکترومغناطیسی

مدل فیزیکی آرمیچر به تعداد زیادی عنصر برای تجزیه و تحلیل تقسیم می‌شود و نیروی اعمالی روی هر عنصر به صورت زیر است:

$$f_e = J_e \times B_e \quad (3)$$

به طوری که،  $J_e$  و  $B_e$  به ترتیب چگالی جریان گردابی و چگالی شار مغناطیسی می‌باشد. بنابراین، کل نیروی وارده بر آرمیچر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = \int_V J_e \times B_e \, dV \quad (4)$$

نیروهای الکترومغناطیسی اعمالی در آرمیچر، نه تنها بارهای منبع در تجزیه و تحلیل ساختاری هستند بلکه اساس و اتصال ارتباط بین میدان مغناطیسی و ساختار هستند.

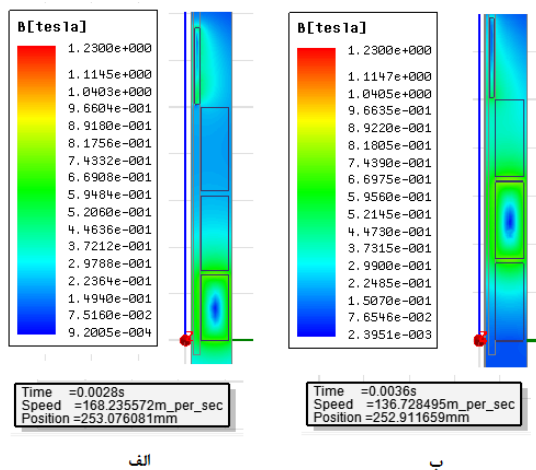
## ۳- تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی المان محدود

ساختار اجزای پرتابگر در شکل (۳) نشان داده شده است. ساختار ارائه شده در این مقاله، پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوبلی چندمرحله‌ای نامتقارن است. این ساختار مورد بررسی قرار گرفته و با پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوبلی معمولی چندمرحله‌ای متقارن مقایسه شده است. مدلی از پرتابگر القایی کوبلی سه

#### ۴-۱- پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی سه

##### مرحله‌ای نامتقارن مدل ۱

برای مقایسه، ساختار نامتقارنی شامل سیم‌پیچ‌هایی به طول ۷۰، ۸۰ و ۹۰ mm و پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی سه مرحله‌ای متقارنی با طول سیم‌پیچ ۸۰ mm شبیه‌سازی شده‌اند. اندازه میدان‌های مغناطیسی برای این دو مدل در شکل (۵) نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که اندازه میدان‌های مغناطیسی در طول باندهی که پرتابه در داخل آن حرکت می‌کند تقریباً ثابت است و تغییر چندانی نمی‌کند. سرعت پرتابه در حال خروج از پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی و مدت زمان پرتاب در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵): اندازه میدان‌های مغناطیسی مدل ۱ در طول حرکت پرتابه در حالت‌های متقارن و نامتقارن. الف) نامتقارن ب) متقارن

مدت زمان پرتاب، سرعت خروجی پرتابه و موقعیت پرتابه در پایین شکل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی متقارن کل طول سیم‌پیچ برابر با ۲۴۰ mm است. فاصله بین هر سیم پیچ ۵ mm در نظر گرفته شده است. بنابراین، طول کل پرتابگر ۲۵۰ mm است. با انتخاب بهینه زمان کلیدزنی سرعت خروجی پرتابه به ۱۳۶/۷۳ m/s می‌رسد. با وجود این، برای ساختار نامتقارن، سرعت خروجی پرتابه به ۱۶۸/۲۴ m/s می‌رسد که نسبت به حالت بهینه ساختار متقارن ۲۴٪ بیش‌تر است. باید دقت شود که پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی متقارن پس از طی طول ۲۵۰ mm و مدت زمان ۲/۸ ms به سرعت پرتابه‌اش یعنی m/s ۱۶۸/۲۴ می‌رسد در حالی که ساختار متقارن، پس از مدت زمان حدود ۳/۶ ms به سرعت پرتابه ۱۳۶/۷۳ می‌رسد. این بدان معنی است که زمان پرتاب برای ساختار نامتقارن پیشنهاد شده در حدود ۰/۸ ms یعنی در حدود ۲۲٪ کاهش پیدا کرده است. مقایسه بین پروفایل سرعت پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی متقارن و

یک بانک خازنی با کلیدزنی به مدار درایو سیم‌پیچ‌ها متصل شده است تا جریان سیم‌پیچ را به حدی برساند که بتواند نیرویی را که به پرتابه شتاب می‌دهد ایجاد کند. مدار تحریک برای ایجاد یک پالس تخلیه استفاده می‌شود که در شکل (۴) نشان داده شد. بانک خازنی استفاده شده دارای ظرفیت ۲ mF است. از نرم‌افزار سیرکت ادیتور<sup>۱</sup> شرکت تجاری انسافت برای طراحی مدار خارجی اعمال تحریک استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است ولتاژ اولیه در بانک‌های خازنی ۵۰۰۰ V است. یک دیود هرزگرد برای هر یک از سیم‌پیچ‌ها اعمال شده است تا از پالس دشارژ ناشی از نوسانات جلوگیری کند. یک سوئیچ هم در هر مدار برای اعمال دقیق زمان اعمال جریان هر یک از سیم‌پیچ‌ها تعبیه شده است. مشخصات مدار تحریک در جدول (۱) آورده شده است.

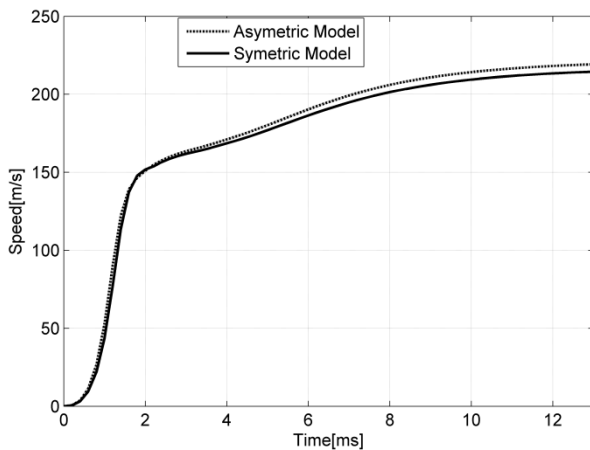
جدول (۱): مشخصات مدار تحریک

مقدار	مشخصه
۶۰ دور	تعداد دور سیم‌پیچ
۳۰ mm	عرض سیم‌پیچ
مس	جنس سیم‌پیچ
۵۰۰۰ V	مقدار شارژ اولیه خازن
۲ mF	اندازه خازن
۰/۱ Ω	مقاومت مدار تحریک

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در ساختار متقارن طول سیم‌پیچ‌ها با هم برابر است در حالی که در ساختار نامتقارن طول سیم‌پیچ‌ها با هم متفاوت است. در این مرحله طول هر یک از سیم‌پیچ‌ها طوری طراحی می‌شود تا بیش‌ترین تاثیر را در ایجاد اندوکتانس‌های متقابل برای ایجاد سرعت در پرتابه ایجاد کند. سپس براساس ساختار پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی سه مرحله‌ای نامتقارن شبیه‌سازی بر روی تاثیر طول سیم‌پیچ بر سرعت پرتابه انجام می‌شود تا بهترین طول سیم‌پیچ به دست آید. شبیه‌سازی برای سه حالت مختلف انجام شده است و با جزئیات در ادامه بحث خواهد شد. به این موضوع دقت شود که تمامی ساختارهای متقارن استفاده شده در این مقاله با زمان بهینه کلیدزنی و تعداد دور بهینه در نظر گرفته شده‌اند. زمان سوئیچینگ پارامتری تأثیرپذیر است که بر عملکرد پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی تاثیر می‌گذارد. این موضوع با جزئیات در مرجع [۲۱] شرح داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی متقارن، کل طول سیم‌پیچ برابر با ۱۸۰ mm است و با انتخاب بهینه زمان کلیدزنی سرعت خروجی پرتابه به ۱۶۴٫۷۵ m/s می‌رسد. با این وجود برای ساختار نامتقارن سرعت خروجی پرتابه به ۱۶۴٫۸۷ m/s می‌رسد که نسبت به ساختار متقارن تفاوت چندانی ندارد. همچنین زمان پرتاب هم تفاوت چندانی ندارد. مقایسه بین پروفایل سرعت پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی متقارن و نامتقارن در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر سرعت به دست آمده در ساختار نامتقارن، ۲۱۹٫۱ m/s است در حالی که در ساختار متقارن، ۲۱۳٫۴ m/s است. بنابراین در این مدل با این که سرعت خروجی پرتابه تغییر چندانی نداشت ولی حداکثر سرعت به دست آمده در ساختار نامتقارن به اندازه ۳٪ افزایش داشته است.

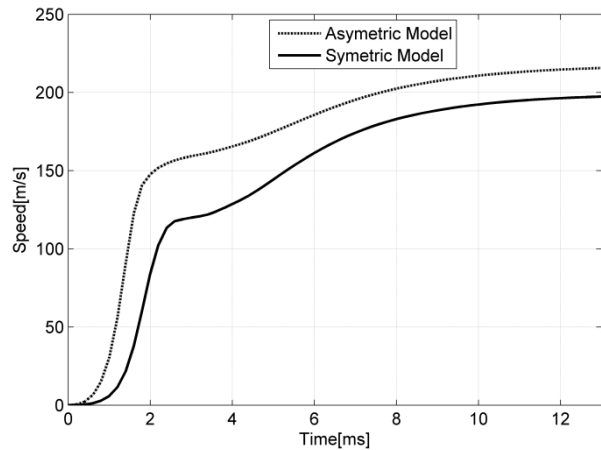


شکل (۸): مقایسه سرعت پرتابه مدل ۲ در حالت‌های متقارن و نامتقارن

### ۴-۳ - پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی سه مرحله‌ای نامتقارن مدل ۳

مطالعات شبیه‌سازی مراحل قبلی نشان می‌دهد که در پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی چندمرحله‌ای نامتقارن شتاب پرتابه بیش‌تر از پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی چندمرحله‌ای متقارن است. برای اطمینان از عملکرد بهتر پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی نامتقارن یک مدل دیگر از این نوع شبیه‌سازی شده است و با حالت متقارن مقایسه شده است. در این مدل طول سیم‌پیچ‌ها ۲۰، ۳۰ و ۴۰ mm است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت پرتابه بیش‌تری نسبت به مدل ۱، در این مدل به دست آمد. نمودار سرعت نسبت به زمان برای این پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی در شکل (۹) نشان داده شده است. حداکثر سرعت پرتابه ۲۴۳ m/s است. پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی متقارن با طول سیم‌پیچ ۳۰ mm

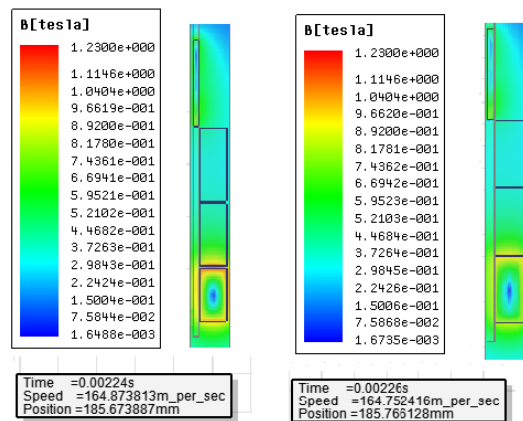
نامتقارن در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفایل سرعت در ساختار نامتقارن، به صورت پیوسته و نرم‌تر نسبت به ساختار متقارن تغییر می‌کند. همچنین حداکثر سرعت به دست آمده در ساختار نامتقارن به اندازه ۹٪ نسبت به ساختار متقارن بیش‌تر است.



شکل (۶): مقایسه سرعت پرتابه مدل ۱ در حالت‌های متقارن و نامتقارن

### ۴-۲ - پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی سه مرحله‌ای نامتقارن مدل ۲

در این بخش مطالعه‌ای جامع‌تر بر روی پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی سه مرحله‌ای نامتقارن انجام شده است. همان پرتابه توسط پرتابگر القایی کویلی با طولی متفاوت با مدل ۱ پرتاب شده است. طول پرتابگر در ساختار نامتقارن برابر با ساختار متقارن در نظر گرفته شده است. در این مدل، طول سیم‌پیچ‌ها ۵۰، ۶۰ و ۷۰ mm در ساختار نامتقارن و ۶۰ mm در ساختار متقارن در نظر گرفته شده است. (شکل (۷)).



الف

ب

شکل (۷): اندازه میدان‌های مغناطیسی مدل ۲ در حالت‌های متقارن و نامتقارن. (الف) نامتقارن (ب) متقارن

است که نشان‌دهنده کاهش ۴۹/۸۸٪ در طول پرتابگر و افزایش ۹/۸۸٪ در سرعت پرتابه نسبت به مدل ۲ می‌باشد.

اهمیت کاهش طول پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی از رسیدن به سرعت‌های پرتابه بالاتر آشکار می‌شود. بنابراین سومین مدل نامتقارن، سرعت پرتابه بالاتر و طول و زمان پرتاب کم‌تری نسبت به مدل‌های ۱ و ۲ دارد. برای توجیه عملکرد بهتر این ساختار نامتقارن، می‌توان از تحلیل زیر استفاده کرد. در طول پروسه پرتاب یک پرتابگر الکترومغناطیسی چندمرحله‌ای، با دشارژ شدن هر بانک خازنی در مدار تحریک جریانی در سیم پیچ ایجاد می‌شود. همان‌طور که در معادله ۳ نشان داده شده است این جریان، باعث به‌وجود آمدن چگالی جریان گردابی  $J_e$  در پرتابه یا همان آرمیچر می‌شود که از برهم‌کنش چگالی جریان گردابی  $J_e$  و میدان  $B_e$  نیروی به‌وجود می‌آید که باعث به جلو راندن پرتابه می‌شود. در این ساختار نامتقارن، با تحریک هریک از سیم‌پیچ‌ها بیش‌ترین نیرو ممکنه بر پرتابه به‌وجود می‌آید که باعث می‌شود پرتابه با سرعت بیش‌تری پرتابگر الکترومغناطیسی را ترک کند.

### ۵- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی دقیق و شبیه‌سازی عددی برای طراحی پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی موضوعی حیاتی است. در ساختار متقارن این پرتابگر، طول سیم‌پیچ‌ها باهم برابر است درحالی‌که در این مقاله ساختار نوین نامتقارن با طول سیم‌پیچ‌های متفاوت ارائه شد که این طول‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. در این مقاله، شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزا محدود در حالت گذرا بر روی پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی سه‌مرحله‌ای متقارن و نامتقارن انجام و مدار تحریک این پرتابگر نیز معرفی شد.

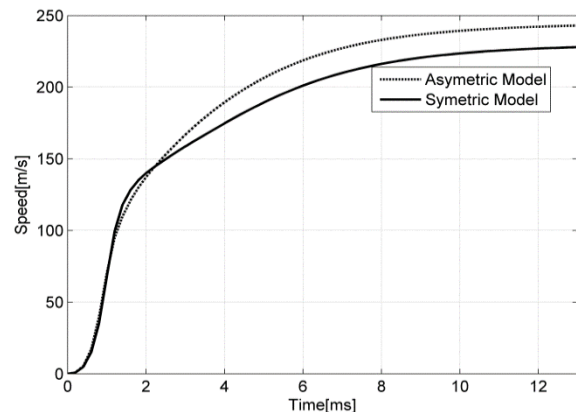
سه مدل پیشنهادی از پرتابگر با جزئیات بررسی شد. در کنار ساختار متقارن، ساختار نوین نامتقارن معرفی شده نیز برای حالات و زمان‌های کلیدزنی مختلف آزمایش و باهم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که:

(۱) ساختار نامتقارن دارای سرعت حداکثری به‌طور متوسط به میزان ۶/۵۷٪ بیش‌تر از ساختار متقارن می‌باشد. همچنین بهترین مدل برای دست‌یابی به بیش‌ترین سرعت پرتابه شناسایی شده است که به اندازه ۱۱/۵۲٪ سرعت پرتابه بیش‌تر و به اندازه ۶۲٪ طول پرتابگر کم‌تر دارد.

(۲) ساختار نامتقارن معرفی شده به‌عنوان طرح بهینه، در مقایسه با دو مدل دیگر دارای سرعت پرتابه بیش‌تر، طول سیم‌پیچ کم‌تر و زمان پرتاب کم‌تر و همچنین دارای افزایش سرعت نسبت به نوع متقارن خود می‌باشد.

(۳) در مجموع، دیده می‌شود که در مدل نامتقارن، پروفایل سرعت

حداکثر سرعت پرتابه‌ای در حدود ۲۲۶ m/s خواهد داشت. در این صورت، پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی نامتقارن افزایش ۷/۶٪ در سرعت پرتابه را نسبت به نوع متقارن خود نشان می‌دهد که همچنان تأیید می‌کند که حالت نامتقارن بهتر از حالت متقارن است. باید توجه شود که این مدل نامتقارن همچنان در زمان‌های کم‌تری به سرعت ماکزیمم خود نسبت به حالت متقارن می‌رسد.



شکل (۹): مقایسه سرعت پرتابه مدل ۳ در حالت‌های متقارن و نامتقارن

نتایج این سه مدل به صورت خلاصه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): شبیه‌سازی‌های حالت‌های مختلف برای پرتابگر

الکترومغناطیسی القایی کوپلی متقارن و نامتقارن

شماره مدل	طول کل سیم‌پیچ (mm)	طول هر سیم‌پیچ (mm)	حداکثر سرعت پرتابه (m/s)	درصد افزایش سرعت حداکثر
۱	۲۵۰	متقارن ۸۰.۸۰.۸۰	۱۹۷/۲	۹
		نامتقارن ۷۰.۸۰.۹۰	۲۱۵	
۲	۱۸۴	متقارن ۶۰.۶۰.۶۰	۲۱۳/۴	۳
		نامتقارن ۵۰.۶۰.۷۰	۲۱۹/۱	
۳	۹۰/۲	متقارن ۳۰.۳۰.۳۰	۲۲۶	۷/۶
		نامتقارن ۲۰.۳۰.۴۰	۲۴۳	

طول کل پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی مدل ۱ با فاصله بین سیم‌پیچ‌ها ۲۵۰ mm است. درحالی‌که، در مدل ۳، این طول برابر ۹۰/۲ mm است که نشان‌دهنده کاهش ۶۲/۲٪ در طول پرتابگر و افزایش ۱۱/۵۲٪ در سرعت پرتابه است. طول کل پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کوپلی مدل ۲ با فاصله بین سیم‌پیچ‌ها، ۱۸۴ mm است. درحالی‌که در مدل ۳، ۹۰/۲ mm

- [15] D. Kwak, Y. B. Kim, J. S. Kim, C. Cho, K.-S. Yang, S.-H. Kim, B.-H. Lee, S. An, Y.-H. Lee, and S. H. Yoon, "Modeling of 3-stage Electromagnetic Induction Launcher," *Journal of Magnetism*, vol. 20, pp. 394-399, 2015.
- [16] H. M. Mohamed, M. A. Abdalla, A. Mitkees, and W. Sabery, "Overlapped electromagnetic coilgun for low speed projectiles," *Journal of Magnetism*, vol. 20, pp. 322-329, 2015.
- [17] W. Liu, C. Cao, Y. Zhang, J. Wang, and D. Yang, "Parameters optimization of synchronous induction coilgun based on ant colony algorithm," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, pp. 100-104, 2011.
- [18] L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, and Z. Yadong, "Improvement of current filament method and its application in performance analysis of induction coil gun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, pp. 382-389, 2011.
- [19] X. Tao, S. Wang, Y. Huangfu, S. Wang, and Y. Wang, "Geometry and Power Optimization of Coilgun Based on Adaptive Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, pp. 1208-1214, 2015.
- [20] W. Liu, C. Yanjie, Y. Zhang, J. Wang, and D. Yang, "Parameters optimization of synchronous induction coilgun based on ant colony algorithm," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 39, pp. 100-104, 2011.
- [21] H. M. Mohamed, M. A. Abdalla, A. A. Mitkees, and W. S. Sabery, "Transient magnetostatic simulation and experimental verification of an electromagnetic coil launcher," in *Engineering and Technology (ICET), 2014 International Conference on*, pp. 1-4, 2014.

پرتابه به صورت پیوسته و نرم تغییر می‌کند درحالی‌که در برخی از مدل‌های متقارن پروفایل سرعت در دو مرحله افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل نامتقارن است.

## ۶- مراجع

- [1] M. Wang, Y. Cao, C. Wang, H. Wang, and J. Chen, "Trigger control research of electromagnetic coil launcher based on real-time velocity measurement," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 44, pp. 885-888, 2016.
- [2] K. Zhao, S. Cheng, and R. Zhang, "Influence of driving current's wave on accelerative performance of induction coil launcher," in *Electromagnetic Launch Technology, 2008 14th Symposium on*, pp. 1-4, 2008.
- [3] K. Leubner, R. Laga, and I. Dolezel, "Advanced Model of Electromagnetic Launcher," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, p. 223, 2015.
- [4] R. Haghmaram and A. Shoulaie, "Literature review of theory and technology of air-core tubular linear induction motors [electromagnetic launcher applications]," in *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International*, pp. 517-522, 2004.
- [5] Y. Zhang, J. Ruan, and T. Zhan, "Electromagnetic force analysis of a driving coil," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, pp. 1-6, 2012.
- [6] Y. Zhang, J. Ruan, Y. Hu, R. Gong, W. Zhang, and K. Liu, "Research of Driving Circuit in Coaxial Induction Coilgun," *Telkomnika*, vol. 11, 2013.
- [7] M. Cowan, M. Widner, E. Cnare, B. Duggin, R. Kaye, and J. Freeman, "Exploratory development of the reconnection launcher 1986-90," *Magnetism, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 563-567, 1991.
- [8] R. J. Kaye, E. C. Cnare, M. Cowan, B. W. Duggin, R. J. Lipinski, B. M. Marder, G. M. Douglas, and K. J. Shimp, "Design and performance of Sandia's contactless coilgun for 50 mm projectiles," *Magnetism, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 680-685, 1993.
- [9] W. Cravey, G. Devlin, E. Loree, S. Strohl, and C. Young, "Design and testing of a 25-stage electromagnetic coil gun," in *Pulsed Power Conference, 1995. Digest of Technical Papers., Tenth IEEE International*, pp. 1323-1328, 1995.
- [10] B. Zou, R. Li, M. Wang, D. Yang, and X. Chen, "Research on the Scaling Model of Electromagnetic Coil Launcher," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 1094-1099, 2013.
- [11] M. S. Aubuchon, T. R. Lockner, B. N. Turman, G. Root, L. Basak, R. Gaigler, B. Skurdal, and M. Floyd, "Results from sandia national laboratories/lockheed martin electromagnetic missile launcher (EMML)," in *2005 IEEE Pulsed Power Conference*, pp. 75-78, 2005.
- [12] Z. Su, W. Guo, B. Zhang, M. Li, C. Zhang, and J. Li, "The feasibility study of high-velocity multi-stage induction coilgun," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, pp. 1-4, 2012.
- [13] B. D. Skurdal and R. L. Gaigler, "Multimission electromagnetic launcher," *IEEE transactions on magnetism*, vol. 45, pp. 458-461, 2009.
- [14] T. Zhang, W. Guo, Z. Su, B. Cao, R. Ren, M. Li, X. Ge, and J. Li, "Design and Evaluation of the Driving Coil on Induction Coilgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, pp. 1203-1207, 2015.

