

علمی - پژوهشی

طراحی بهینه پرتابگر ریل گان جهت استفاده به عنوان توپ پدافندی

محمدحسین رنجبر^{۱*}، محمد مردانی شهربابک^۲

۱- استادیار، ۲- استاد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹)

چکیده

پرتابگر ریل گان از جمله تسلیحات نوظهور است که می‌تواند به‌عنوان سلاح آفندی و پدافندی مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که سرعت ثبت‌شده شلیک گلوله در پرتابگر ریل گان به چندین هزار متر بر ثانیه رسیده است، این پرتابگر گزینه بسیار مناسبی برای استفاده به‌عنوان توپ پدافندی در برابر موشک‌های دشمن است. در این مقاله ابتدا رفتار دینامیکی یک پرتابگر ریل گان توسط دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی مدل‌سازی می‌شود. سپس با حل این دستگاه معادلات با روش‌های عددی، متغیرهای فیزیکی پرتابگر شامل مکان و سرعت حرکت پرتابه (گلوله)، جریان تزریقی به ریل‌ها و ولتاژ بانک خازنی ذخیره‌ساز انرژی بر حسب زمان محاسبه می‌گردد. در نهایت توسط روش بهینه‌سازی تکامل تفاضلی، پارامترهای بهینه سامانه ریل گان برای رسیدن بیش‌ترین سرعت شلیک، تعیین می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از منبع ذخیره‌ساز انرژی ۳۰۰ مگاژولی و طراحی بهینه ریل‌ها و پارامترهای بانک خازنی، به سرعت‌های بیش از ۵۰۰۰ متر بر ثانیه دست‌یافت که برای کاربردهای پدافندی مناسب است.

کلیدواژه‌ها: بانک خازنی، تکامل تفاضلی، توپ پدافندی، دستگاه معادلات دیفرانسیل، ریل گان، گرادیان اندوکتانس.

Optimal Design of Railgun Launcher to be Implemented as a Defensive Artillery Gun

M. H. Ranjbar^{*}, M. Mardani ShahrBabak

Imam Hossein University

(Received: 20/02/2023, Accepted: 19/05/2023)

Abstract

Railgun launchers are emerging weapons that can be used as offensive or defensive weapons. Since the recorded speeds of firing shots of railgun launcher have reached several thousand meters per second, this launcher is a very good option to be implemented as a defensive artillery gun against enemy's missiles. In this paper, first, the dynamic behavior of a railgun launcher is modeled by a system of nonlinear differential equations. Then, by numerical solving of this system of equations, the physical variables of the launcher in terms of time including location and speed of movement of armature (bullet), current injected in the rails and voltage of capacitor bank are calculated. Finally, the optimal parameters of railgun launcher in order to achieve the highest firing speed are determined by means of differential evolution optimization method. The results have shown that an optimally designed 300 MJ energy-stored railgun could achieve firing shot speeds of more than 5000 m/s which are suitable for defensive applications.

Keywords: Capacitor Bank, Differential Evolution, Defensive Artillery Gun, System of Equations, Inductance Gradient.

*Corresponding Author E-mail: kpmranjbar@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

طراحی، مدل‌سازی رفتاری، آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی عملکردی شتاب‌دهنده ریل‌گان موضوع تحقیق شماری از پژوهش‌ها بوده است. در حوزه مدل‌سازی عملکرد سامانه ریل‌گان، طاهر و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۵ میلادی رفتار دینامیکی سامانه ریل‌گان را توسط دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی مدل‌سازی کرده و روشی برای حل آن در محیط سیمولینک متلب ارائه کرده‌اند. پنگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۲ رفتار حالت گذاری شتاب‌دهنده ریل‌گان را مدل‌سازی کرده‌اند. رفتار حالت گذاری سامانه می‌تواند تنش‌های حرارتی و مکانیکی وارده را دقیق‌تر مدل‌سازی نماید تا طراحی مهندسی به شکل دقیق‌تری انجام پذیرد.

در حوزه بهینه‌سازی عملکرد سامانه ریل‌گان، ژو و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۱ از یک طرح توزیع شده انرژی برای شتاب‌دهی در شتاب‌دهنده ریل‌گان استفاده کرده‌اند. این طرح توزیع شده انرژی بر مبنای شبکه شکل‌دهی پالس است و توانسته بازدهی سامانه تحت مطالعه را ۲ درصد افزایش دهد. لیو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ یک بهینه‌سازی دو هدف جهت بهینه‌سازی هم‌زمان ضریب انتقال انرژی و سرعت خروجی پرتابه ریل‌گان با تعیین بهینه وزن پرتابه، ولتاژ شارژ سامانه و مقدار ریپل جریان تزریقی به ریل‌ها، ارائه کرده‌اند. ملکی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ روشی جدید برای تغذیه ریل‌گان کامپالسیتور^۱ و بهبود عملکرد آن ارائه کرده‌اند. پژوهشی در سال ۲۰۱۷ به منظور بهینه‌سازی انتقال انرژی در سامانه ریل‌گان انجام شده است [۱۰]. ریعی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ روشی برای بهینه‌سازی نیروی اعمالی به پرتابه ریل‌گان با استفاده از بهینه‌سازی شکل موج جریان تزریقی به ریل‌ها، ارائه کرده‌اند. مرجع [۱۲] نیز در سال ۲۰۲۱ یک منبع تغذیه پالس القایی ۴۰ کیلوژولی برای بهینه‌سازی سرعت شتاب‌دهنده ریل‌گان معرفی کرده است.

در تحقیقات پیشین انجام‌شده در حوزه بهینه‌سازی عملکرد پرتابگر ریل‌گان، مسئله ساختار بانک خازنی و تأثیر آن بر روی پارامترهای مدار معادل ریل‌گان و در نتیجه رفتار دینامیکی آن، مغفول مانده است. ساختار بانک خازنی می‌تواند مقادیر ولتاژ اولیه شارژ سامانه، عرض پالس جریان تزریقی به ریل‌ها و مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های سری معادل بانک خازنی را تحت تأثیر قرار دهد که بر عملکرد سامانه تأثیرگذار است و در این مقاله بدان می‌پردازیم. در کنار بهینه‌سازی صورت‌گرفته، مسئله بررسی امکان‌پذیری^۲ استفاده از یک سامانه ریل‌گان به‌عنوان توپ پدافندی که باید حتماً برای مواجهه با آفند دشمن، عملکرد سریعی داشته باشد نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که

پرتابگر ریل‌گان یکی از انواع شتاب‌دهنده‌های الکترومغناطیس است که بر اساس برهم‌کنش میدان مغناطیسی و پرتابه حامل جریان الکتریکی عمل می‌کند. در پرتابگر ریل‌گان، تخلیه ناگهانی انرژی الکتریکی ذخیره‌شده یک بانک خازنی در یک ریل‌رسانا سبب واردشدن نیرو به پرتابه قرارگرفته مابین ریل‌ها می‌شود. بر اساس قانون لورنس، جریان شدید الکتریکی در ریل‌رسانا سبب ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف و درون فضای ریل شده که بر پرتابه حامل جریان شتابی معادل حاصل‌ضرب چگالی شار مغناطیسی در جریان عبوری از پرتابه، وارد می‌گردد [۱].

در سالیان گذشته نیروی دریای ایالات متحده استفاده از پرتابگر ریل‌گان را به‌عنوان سلاح آفندی عملیاتی کرده است [۲]. اخیراً نیز استفاده از سامانه ریل‌گان به‌عنوان سامانه پرتاب فضاپیماهای کوچک از ماه به ایستگاه فضایی توسط ناسا مطرح شده است [۳]. بررسی منابع و اطلاعات نشان می‌دهد که بیش‌ترین سرمایه‌گذاری بر روی سامانه‌های پرتاب ریلی توسط کشورهای آمریکا و چین صورت‌گرفته است [۴]. با این توصیف می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از سامانه ریل‌گان در جنگ‌های سالیان آینده و همچنین در اکتشافات فضایی بسیار محتمل است.

هدف این مقاله طراحی بهینه مفهومی جهت دستیابی به پرتابگر ریل‌گانی است که بتواند به‌عنوان سلاحی پدافندی در برابر موشک‌های تهاجمی دشمن عمل نماید. مزیت استفاده از ریل‌گان به‌عنوان توپ پدافندی در این است که قابلیت شلیک گلوله با سرعت بسیار زیاد را دارد. این امر به سامانه پدافندی کمک می‌نماید تا به‌محض تشخیص و ردیابی موشک‌های تهاجمی دشمن که به سمت سکوی مورد حفاظت در حرکت‌اند، به سمت آن‌ها شلیک شده و در مجاورت آن‌ها منفجر گردد. در این نوع از پدافند، مسئله زمان در دسترس برای شلیک با توجه به سرعت بالای موشک نزدیک شونده، بسیار حائز اهمیت است. به‌عنوان مثال، موشک‌های کروز با سرعت نسبتاً کم ۸۰۰ کیلومتر بر ساعت (۲۲۰ متر بر ثانیه) و موشک‌های بالستیک با سرعت‌های بالای حدود ۶ ماخ (حدود ۲۰۰۰ متر بر ثانیه) حرکت می‌کنند. در نتیجه برای دستیابی به سامانه پدافند موشکی کارآمد، سرعت شلیک توپ پدافندی باید بالاتر از ۲۰۰۰ متر بر ثانیه عمل کنند. در این مقاله سرعت مطلوب برای شلیک گلوله توپ پدافندی، ۵۰۰۰ متر بر ثانیه (بیش از دوبرابر سرعت موشک بالستیک) در نظر گرفته می‌شود.

به‌منظور طراحی مفهومی پرتابگر ریل‌گان باید در ابتدا معادلات دینامیکی سامانه ریل‌گان را مدل‌سازی و محاسبه کرد.

^۱ Compulsator^۲ Possibility assessment

با توجه به اینکه اندوکتانس مسیر جریان با توجه به جا بجایی

پرتابه تغییر می‌کند، داریم [۵]

$$V_L = \frac{d\lambda(t)}{dt} = L(t) \frac{di(t)}{dt} + i(t) \frac{dL(t)}{dt} \quad (2)$$

در رابطه بالا $L(t)$ اندوکتانس مسیر جریان است که خود به

مکان پرتابه وابسته است [۵]

$$L(t) = L' \times x(t) \quad (3)$$

در رابطه (۳) L' گرادیان اندوکتانس ریل است که پارامتری

ثابت است و $x(t)$ نیز مکان پرتابه است. گرادیان اندوکتانس ریل‌ها

به سطح مقطع و هندسه ریل‌ها وابسته است. به طرز مشابه،

مقاومت ریل‌ها نیز به مکان پرتابه وابسته است [۵]

$$R_{rails} = R' \times x(t) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، R' گرادیان مقاومت ریل‌ها است که پارامتری

ثابت است. گرادیان مقاومت ریل‌ها به جنس ریل و سطح مقطع

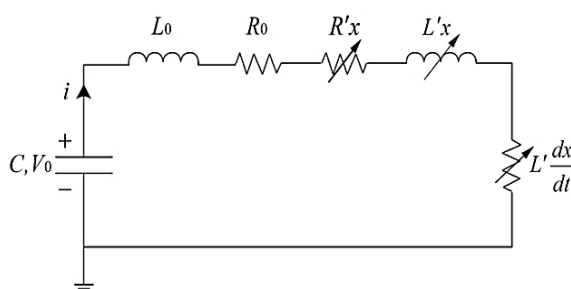
ریل وابسته است.

می‌توان مدار معادل ریل گان نشان داده شده در شکل (۱) را

بر حسب موقعیت پرتابه به صورت شکل (۲) نمایش داد. در مدار

معادل شکل (۲)، R_0 نشان دهنده مقاومت سری معادل بانک خازنی

به همراه مقاومت اتصالات و مقاومت پرتابه است.



شکل ۲. مدار معادل ریل گان بر حسب موقعیت پرتابه

برای مدار معادل شکل (۲) می‌توان رابطه ولتاژ کیرشلف را

به صورت زیر نوشت [۵]

$$-V_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + L_0 \frac{di(t)}{dt} + R_0 i(t) + R'_x(t) i(t) \quad (5)$$

$$+ L'_x(t) \frac{di(t)}{dt} + L' i(t) \frac{dx(t)}{dt} = 0$$

با گرفتن مشتق از رابطه (۵) و مرتب‌سازی خواهیم داشت [۵]

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} (L_0 + L'_x(t)) + \frac{di(t)}{dt} (R_0 + R'_x(t) + \quad (6)$$

$$2L' \frac{dx(t)}{dt}) + i(t) \left(\frac{1}{C} + R' \frac{dx(t)}{dt} + L' \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right) = 0$$

$$\frac{di(0)}{dt} = \frac{V_0}{L_0 + L'_x(0)}, \quad i(0) = 0$$

می‌توان با طراحی مناسب گرادیان اندوکتانس سامانه ریل گان به

همراه بهینه‌سازی ساختار بانک خازنی، به این هدف دست‌یافت.

ساختار مقاله بدین صورت است که در بخش دوم ابتدا معادلات

دینامیکی سامانه ریل گان تشریح گردیده و معادلات حرکت پرتابه

و جریان و ولتاژ ریل‌ها به صورت دستگاه معادلات دیفرانسیل

غیرخطی، مدل‌سازی می‌شود. از حل این دستگاه معادلات

دیفرانسیل، متغیرهای ریل گان بر حسب زمان تعیین می‌گردد. در

بخش سوم تأثیر پارامترهای سامانه ریل گان بر افزایش سرعت

خروجی پرتابه مورد بررسی قرار گرفته و الگوریتم تکامل تفاضلی^۱

برای حل مسئله بهینه‌سازی ساختار ریل گان، تشریح می‌گردد. در

بخش چهارم مسئله بهینه‌سازی، شبیه‌سازی گردیده و نتایج

مورد بحث قرار گرفته شده است. در نهایت در بخش پنجم

نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

۲. معادلات دینامیکی سامانه ریل گان

شکل (۱) شماتیک ساده سامانه ریل گان را نشان می‌دهد [۵].

مطابق این تصویر، بانک خازنی C تا ولتاژ اولیه V_0 شارژ می‌شود

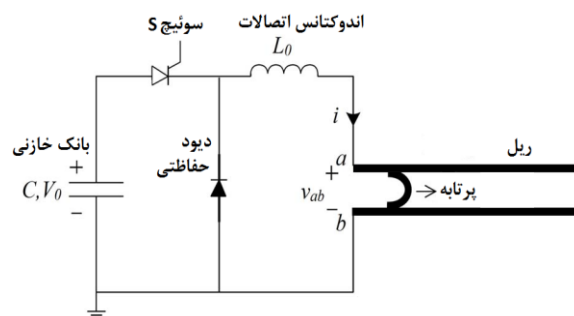
در حالی که سوئیچ S باز است. اندوکتانس L_0 و مقاومت R_0 نشانگر

مقادیر اندوکتانس و مقاومت سری معادل بانک خازنی به علاوه

اندوکتانس و مقاومت اتصالات سامانه است. با بسته شدن سوئیچ S

جریان از پرتابه و ریل‌ها عبور کرده و مطابق قانون لورنس سبب

اعمال نیرو به پرتابه می‌شود.



شکل ۱. شماتیک ساده سامانه ریل گان [۵]

همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، ولتاژ دو سر

ریل برابر با V_{ab} است. V_{ab} مطابق رابطه زیر برابر با افت ولتاژ

مقاومتی مسیر جریان در ریل و پرتابه به علاوه افت ولتاژ

اندوکتانسی مسیر جریان در ریل و پرتابه است [۵]

$$V_{ab} = (R_{rails} + R_{armature}) \times i + V_L \quad (1)$$

در رابطه بالا i جریان عبوری از ریل و پرتابه است، R_{rail}

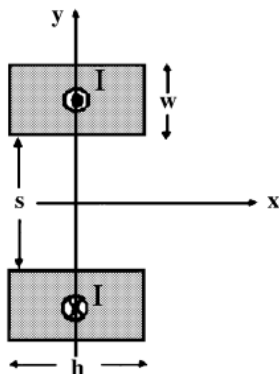
مقاومت ریل‌ها که متناسب با مکان پرتابه است، $R_{armature}$ مقاومت

پرتابه و V_L افت ولتاژ ناشی از اندوکتانس مسیر جریان در ریل و

پرتابه است.

¹ Differential Evolution

مناسب و بهینه مقدار L' در طراحی سامانه ریل‌گان بسیار حیاتی است.



شکل ۳. تصویری از سطح مقطع دو ریل مستطیلی شکل با ضخامت w ، عرض h و فاصله s [۱۴].

همان گونه که پیش‌تر بیان شد، گرادیان اندوکتانس ریل‌ها وابسته به طراحی و هندسه آن‌ها است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که با کاهش ضخامت و عرض ریل‌ها و افزایش فاصله دو ریل، می‌توان گرادیان اندوکتانس سامانه ریل‌گان را افزایش داد (شکل ۳ را ببینید) [۱۴]. مظفری و همکاران [۱۵] ادعا می‌کنند که ریل‌های مستطیلی بیش‌ترین گرادیان اندوکتانس را دارند.

۳-۲. بانک خازنی و تأثیر آن بر جریان

ساختار بانک خازنی به‌عنوان منبع انرژی ورودی ریل‌گان، در عملکرد آن تأثیر بسزایی دارد. ولتاژ و ظرفیت بانک خازنی و همچنین میزان مقاومت و اندوکتانس سری معادل بانک خازنی در مقادیر پارامترهای L_0 ، R_0 ، C ، V_0 ، در روابط (۶) و (۹) که رفتار دینامیکی ریل‌گان را مدل می‌سازد، متأثر از ساختار بانک خازنی است. ولتاژ بانک خازنی بر پیک جریان عبوری از ریل‌ها و در نتیجه پیک میدان مغناطیسی القایی در فضای بین ریل تأثیر می‌گذارد. همچنین میزان ظرفیت بانک خازنی میزان بار الکتریکی ذخیره‌شده در بانک خازنی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر، مقاومت و اندوکتانس سری معادل بانک خازنی باعث کاهش پیک جریان و افزایش زمان خیز جریان می‌شود که اثر منفی دارند.

به‌صورت منطقی، افزایش ولتاژ اولیه بانک خازنی و افزایش ظرفیت بانک خازنی که به افزایش انرژی ذخیره‌شده در آن منجر می‌شود، باعث افزایش سرعت خروجی پرتابه در شتاب‌دهنده ریل‌گان می‌شود. البته باید توجه داشت که طول ریل‌ها به‌گونه‌ای باشد که انرژی ذخیره‌شده تا قبل از رسیدن پرتابه به انتهای ریل به‌صورت مؤثری استفاده شود.

در رابطه (۶)، دو متغیر مجهول i و x وجود دارد. برای تعیین این دو مجهول نیاز است تا یک رابطه دیگر نیز به مدل سامانه اضافه شود که این رابطه از معادله مکانیکی حرکت پرتابه به دست می‌آید. مطابق مرجع [۵] انرژی میدان مغناطیسی تبدیل شونده به انرژی مکانیکی در ریل‌گان توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$W_{field} = \int_0^i \lambda di = \int_0^i Lidi = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (7)$$

نیروی وارد بر پرتابه از طرف میدان مغناطیسی برابر است با [۵]

$$F = \frac{\partial W_{field}}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} i^2(t) = \frac{1}{2} L'i^2(t) \quad (8)$$

در نتیجه می‌توان نوشت [۵]

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = \frac{1}{2} L'i^2(t) \\ \frac{dx(0)}{dt} = v_0, \quad x(0) = x_0 \end{cases} \quad (9)$$

با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل روابط (۶) و (۹) می‌توان رفتار دینامیکی سامانه ریل‌گان را مدل‌سازی کرد. روش عددی رانگ - کوتای مرتبه ۴ یکی از روش‌های حل دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی است. روش رانگ - کوتا این مزایا را دارد که به‌کارگیری آن ساده است، در حل معادلات به‌صورت پایدار عمل می‌کند و همچنین سرعت حل آن بالاست. از آنجایی که در این مقاله از روش الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی جهت تعیین بهینه پارامترهای بانک خازنی و گرادیان اندوکتانس استفاده شده است و این الگوریتم بهینه‌سازی یک الگوریتم تکرار شونده است، نیاز است تا روش حل معادلات دیفرانسیل در هر تکرار روشی سریع باشد تا زمان شبیه‌سازی طولانی نگردد. حل دستگاه معادلات مذکور، متغیرهای سامانه ریل‌گان از جمله جریان ریل‌ها بر حسب زمان، ولتاژ بانک خازنی بر حسب زمان، مکان قرارگیری پرتابه بر حسب زمان و سرعت پرتابه بر حسب زمان را حاصل می‌کند.

۳. طراحی بهینه ریل و بانک خازنی

۳-۱. هندسه ریل و گرادیان اندوکتانس

یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر عملکرد سامانه ریل‌گان، گرادیان اندوکتانس آن (L') است [۱۳]. گرادیان اندوکتانس ریل‌ها در روابط (۶) و (۹) پارامتری حیاتی است که در سرعت خروجی پرتابه (گلوله) نقش اساسی دارد. مطابق رابطه (۹)، افزایش گرادیان اندوکتانس به افزایش شتاب و نیروی وارد بر پرتابه می‌انجامد. از طرفی افزایش گرادیان اندوکتانس می‌تواند با افزایش پیک جریان عبوری از ریل مقابله نماید و پیک جریان را که در سرعت‌گیری پرتابه بسیار حیاتی است، کاهش دهد. لذا انتخاب

۳-۳. الگوریتم بهینه‌سازی تفاضل تکاملی

در این مقاله برای تعیین ساختار بهینه سامانه ریل گان از الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است [۱۶]. بدین منظور تابع هدف مسئله، سرعت نهایی پرتابه هنگام خروج از ریل در نظر گرفته شده است که باید ماکزیمم گردد. برای این مسئله، تعداد خازن‌های سری در هر شاخه m و تعداد شاخه‌های موازی n و گرادبان اندوکتانس ریل L' به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

طبیعتاً افزایش هر چه تعداد کل خازن‌های بانک خازنی ($N=m \times n$) بیشتر شود، سرعت خروجی افزایش و مسئله بهینه‌سازی محدود نمی‌شود. بدون در نظر گرفتن قید محدودساز، الگوریتم در هر تکرار برای افزایش سرعت خروجی تمایل خواهد داشت تا تعداد بیشتری شاخه موازی و خازن سری تولید نماید و مسئله را بر اساس آن حل کند. لذا قیدی تحت عنوان تعداد کل خازن قابل تهیه با توجه به منابع مالی محدود در دسترس، در الگوریتم ایجاد می‌کنیم:

$$m \times n = N_{access} \quad (10)$$

در رابطه فوق N_{access} تعداد کل خازن‌های در دسترس برای ساخت بانک خازنی است که مقداری ثابت و از پیش تعیین شده است.

به منظور نقض نشدن قید رابطه (۱۰) می‌توان میزان نقض شدن قید را با استفاده از ضریب جریمه، از تابع هدف کسر نمود تا الگوریتم نقض شدن قید را با هزینه مواجه کند. لذا تابع هدف نهایی مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\max Z = \frac{dx}{dt} \Big|_{x_f} - \alpha \left(\frac{m \times n}{N_{access}} - 1 \right) \quad (11)$$

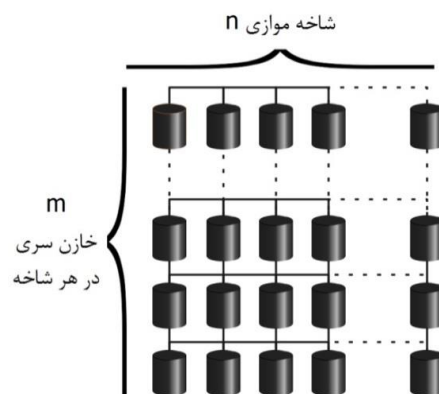
در رابطه فوق Z تابع هدف نهایی با در نظر گرفتن ضریب

جریمه قید (۱۰) است، $\frac{dx}{dt} \Big|_{x_f}$ همان سرعت پرتابه در انتهای ریل ($x=x_f$) است و α ضریب جریمه نقض قید (۱۰) است.

سازوکار الگوریتم به این صورت است که ابتدا جمعیت اولیه‌ای از متغیرهای بهینه‌سازی m ، n و L' ایجاد می‌کند. سپس به ازای هر جمعیت اولیه تولید شده از مقادیر تصادفی، ظرفیت معادل بانک خازنی و ولتاژ اولیه قابل شارژ بانک خازنی را محاسبه کرده و دستگاه معادلات شامل روابط (۶) و (۹) را حل می‌نماید. از حل معادلات (۶) و (۹) به ازای هر جمعیت اولیه تولید شده، سرعت پرتابه هنگام خروج از ریل محاسبه می‌شود. سپس مطابق الگوریتم تکامل تفاضلی، آن دسته از متغیرهای تصادفی در جمعیت اولیه که به بیشترین جواب برای تابع هدف (۱۱) بی انجامد، به عنوان والد‌های جمعیت ثانویه انتخاب می‌شود و توسط بردارهای تفاضلی، فرزندان آن متغیرها به وجود می‌آید. محاسبه تابع هدف برای فرزندان نیز انجام شده و از میان والدین و فرزندان، بهترین

فرض کنید تعداد N خازن مشابه در دسترس است که هر کدام مقدار انرژی E ژول را ذخیره می‌کند. در این صورت مقدار انرژی کل قابل ذخیره در دسترس برابر با NE خواهد بود. این N تعداد خازن را می‌توان به صورت m خازن سری در هر شاخه با n شاخه موازی به صورت شکل (۴) به هم اتصال داد.

مطابق شکل (۴)، هر چه تعداد خازن‌های سری در هر شاخه (m) بیشتر باشد، ولتاژ اولیه شارژ بانک خازنی (V_0) بیشتر خواهد بود و در مقابل ظرفیت معادل بانک خازنی (C)، کاهش می‌یابد.



شکل ۴. اتصال خازن‌ها در یک بانک خازنی

همچنین هر چه تعداد خازن‌های سری در هر شاخه بیشتر باشد، اندوکتانس سری معادل و مقاومت سری معادل بانک خازنی نیز بیشتر می‌شود. در سوی مقابل، هر چه تعداد شاخه‌های موازی (n) بیشتر باشد، ظرفیت معادل بانک خازنی بیشتر می‌شود و ولتاژ شارژ اولیه کاهش می‌یابد. در این حالت اندوکتانس سری معادل و مقاومت سری معادل بانک خازنی نیز کمتر است.

افزایش هر چه بیشتر ولتاژ اولیه شارژ بانک خازنی سبب افزایش بیشتر جریان تزریقی به ریل شده و نیروی وارد بر پرتابه را افزایش می‌دهد. در سوی مقابل، افزایش بیشتر خازن‌های سری در هر شاخه که به افزایش ولتاژ اولیه شارژ می‌انجامد، سبب زیاد شدن پارامترهای R_0 و L_0 شده و اثر معکوسی بر افزایش جریان دارد. لذا باید مصالحه‌ای بین افزایش تعداد خازن‌های سری در هر شاخه صورت پذیرد. همچنین در حالتی که طول ریل زیاد است، نیاز است شتابدهی در تمامی طول انجام پذیرد تا سرعت دهانه بر اثر اصطکاک طول ریل کاهش نیابد. در چنین حالتی باید ظرفیت بانک خازنی افزایش یابد که این امر با افزایش تعداد شاخه‌های موازی حاصل می‌گردد. البته افزایش بیش از اندازه ظرفیت بانک خازنی نیز سبب می‌شود که با خارج شدن پرتابه از ریل، قسمتی از انرژی ذخیره شده در بانک خازنی بدون استفاده باقی بماند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که ساختار و چینش خازن‌ها در بانک خازنی (مقدار m و n) نیز باید توسط روشی به صورت بهینه تعیین گردد.

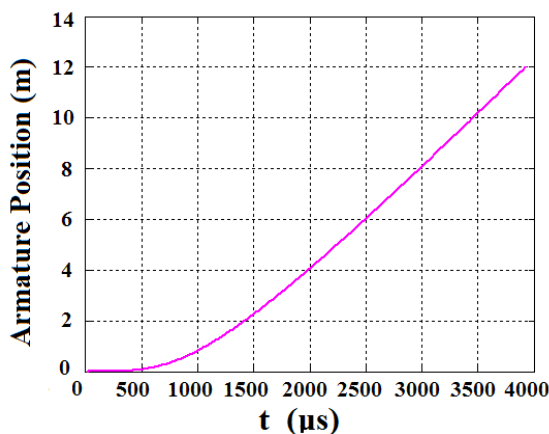
این ریل‌گان دارای ریلی با طول ۱۲ و پرتابه‌ای با وزن ۲۰ کیلوگرم است. مشخصات سایر پارامترهای ریل‌گان مدنظر، در جدول (۱) ارائه شده است.

در گام اول شبیه‌سازی فرض می‌شود که گرادیان اندوکتانس متر مطابق مشخصات جدول (۱)، ثابت و برابر $0/94$ میکرو هانری بر است. در این حالت، تعداد بهینه خازن‌های سری در هر شاخه و تعداد بهینه شاخه‌های موازی را با فرض در اختیار داشتن ۳۰۰۰ عدد خازن ۱ کیلوولتی 200000 میکروفارادی، محاسبه می‌شود. انرژی ذخیره‌شده در هر خازن (E) برابر با ۱۰۰ کیلوژول است و انرژی کل بانک خازنی (E_{tot}) برابر با ۳۰۰ مگاژول است.

با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB برای حالت فوق، مقدار بهینه m و n به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۰۰ و سرعت بیشینه پرتابه هنگام خروج از ریل، برابر با ۴۲۸۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است. در مقام مقایسه، مرجع [۵] بدون بهینه‌سازی، با یک بانک خازنی با انرژی ذخیره‌شده مشابه (۳۰۰ مگاژول)، به سرعت ۲۶۰۰ متر بر ثانیه رسیده است که چهل درصد از سرعتی که ما به آن دست یافتیم کمتر است (شکل ۱۲ مرجع شماره [۵] را ببینید). بنابراین بهینه‌سازی ارائه‌شده توانسته است سرعت خروجی آرمیچر ریل‌گان را به شکل قابل توجهی افزایش دهد.

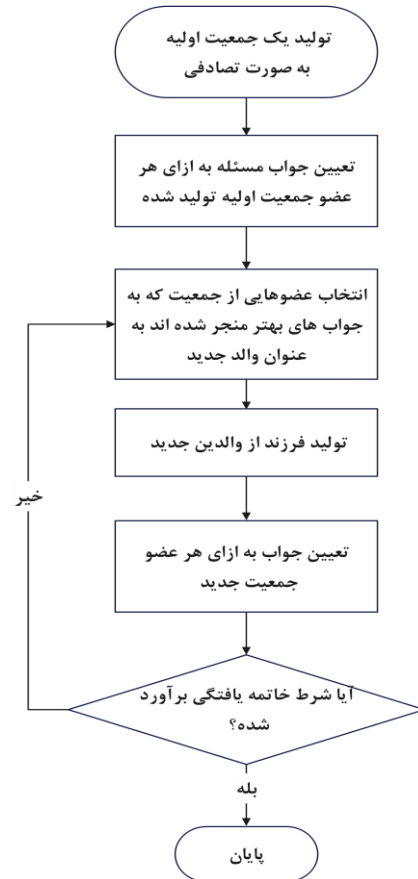
نمودارهای مکان پرتابه، سرعت حرکت پرتابه و جریان ریل‌ها بر حسب زمان برای حالتی که m و n به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۰۰ است، در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) رسم شده است.

همان گونه که در شکل (۶) مشخص است، پرتابه در لحظه $t=3930$ میکروثانیه به انتهای ریل رسیده و از آن خارج می‌شود. در این لحظه سرعت به عدد ۴۲۸۵ متر بر ثانیه رسیده است (شکل (۷) را ببینید).



شکل ۶. مکان پرتابه در درون ریل بر حسب زمان.

متغیرها به‌عنوان والدین گام بعدی انتخاب می‌شوند. روند تولید فرزند از والدین تا جایی ادامه می‌یابد که شرط خاتمه با رسیدن به جواب بهینه مسئله، حاصل گردد. شکل (۵) فلوجارت الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۵. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله کدنویسی الگوریتم تکامل تفاضلی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است و در هر تکرار الگوریتم، برای حل معادلات دستگاه دیفرانسیل روابط (۶) و (۹)، از حلگر ODE45 همین نرم‌افزار استفاده شده است. برای شبیه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی ارائه‌شده، از مشخصات سامانه ریل‌گان ارائه‌شده در مرجع [۱۷] بهره می‌گیریم.

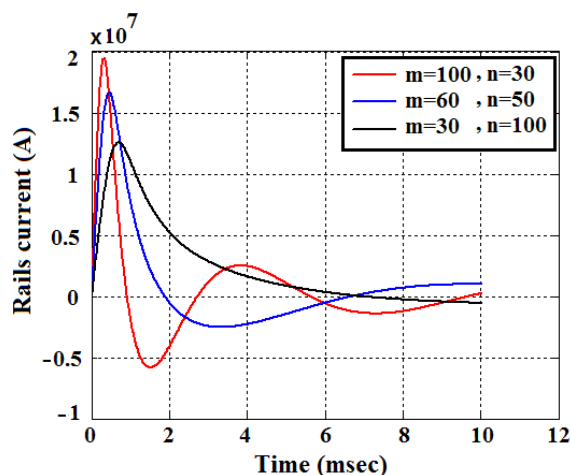
جدول ۱. مشخصات سامانه ریل‌گان شبیه‌سازی شده [۱۷]

عنوان	مقدار
L_0	۱ میکرو هانری
R_0	۰/۵ میلی اهم
وزن پرتابه (گلوله)	۲۰ کیلوگرم
گرادیان مقاومت	۴/۱۸ میکرو اهم بر متر
گرادیان اندوکتانس	۰/۹۴ میکرو هانری بر متر
طول ریل‌ها	۱۲ متر

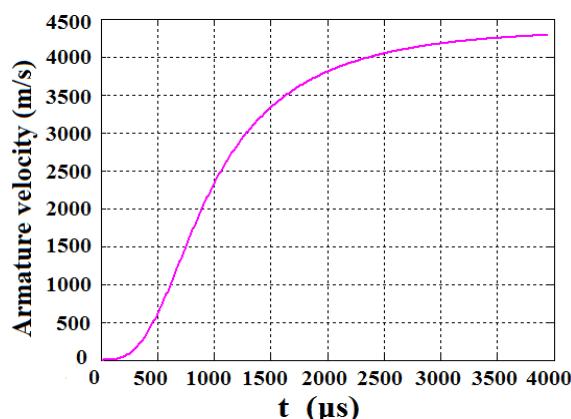
همان گونه که از شکل (۹) مشخص است، افزایش تعداد خازن‌های سری در هر شاخه به افزایش ولتاژ اولیه بانک خازنی (V_0) و نتیجتاً به افزایش پیک جریان تزریقی به ریل‌ها می‌انجامد.

مطابق قانون لورنس، بر پرتابه حامل جریان که در میدان القا شده توسط همین جریان قرار دارد، نیرویی اعمال می‌شود که به توان ۲ جریان وابسته است. لذا افزایش پیک جریان سبب افزایش نیروی وارده و در نتیجه افزایش سرعت پرتابه می‌شود. زمانی که تعداد خازن‌های سری در هر شاخه از ۳۰ عدد بیشتر می‌شود، ظرفیت خازنی بانک کاهش یافته تا جایی که جریان به سمت نوسانی شدن میل می‌کند. زمانی که جریان معکوس می‌شود، انرژی الکتریکی (بار الکتریکی) به درون خازن برمی‌گردد که این امر سبب می‌شود تا انتقال انرژی به صورت بهینه انجام نپذیرد.

شکل (۱۰) تغییر جریان سیستم به ازای مقادیر مختلف m و n را با فرض نامحدود بودن طول ریل نشان می‌دهد. از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه بالا بردن تعداد خازن‌های سری در هر شاخه می‌تواند ولتاژ اولیه بانک خازنی را بالا برده و سبب افزایش پیک جریان شود، ولی به دلیل نوسانی شدن جریان، انتقال انرژی به صورت مناسب انجام نمی‌پذیرد. همچنین در صورتی که با کاهش طول ریل سبب شویم که پرتابه قبل از منفی شدن جریان از ریل خارج شود، قسمتی از انرژی در بانک خازنی بلااستفاده باقی‌مانده و این مسئله نیز به افزایش سرعت کمکی نمی‌کند. افزایش تعداد شاخه‌های موازی برخلاف افزایش تعداد خازن‌های سری در هر شاخه سبب می‌شود که جریان از حالت نوسانی شدن خارج شود. در نهایت باید مصالحه‌ای بین افزایش تعداد خازن‌های سری در هر شاخه که سبب افزایش ولتاژ پیک جریان می‌شود و افزایش تعداد شاخه‌های موازی که سبب غیر نوسانی شدن جریان می‌شود، برقرار شود که همان نقطه بهینه سامانه است.

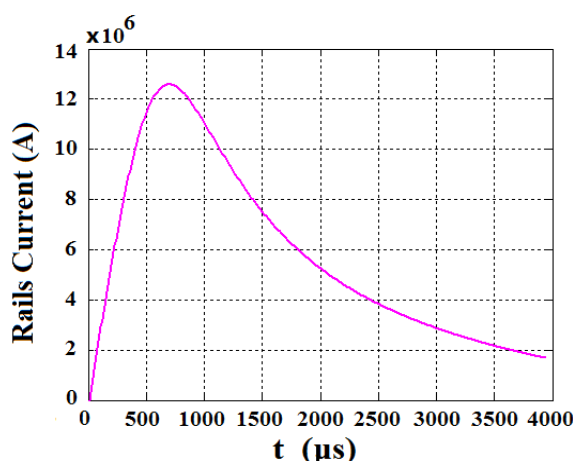


شکل ۱۰. جریان دینامیک ریل‌ها به ازای سه مقدار مختلف برای m و n



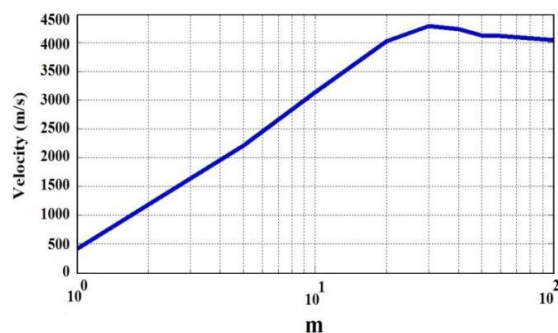
شکل ۷. سرعت حرکت پرتابه درون ریل بر حسب زمان

شکل (۸) نشان می‌دهد که انتخاب بهینه ساختار بانک خازنی که ظرفیت بانک خازنی را متأثر می‌سازد، سبب می‌شود تا جریان ریل‌ها به حالت نوسانی در نیاید. نوسانی شدن جریان و تأثیر سوء آن در نمودارهای شکل (۱۰) مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۸. جریان تزریقی به ریل‌ها بر حسب زمان

شکل (۹) منحنی تغییرات سرعت خروجی (سرعت پرتابه در انتهای ریل) ریل‌گان مورد مطالعه را بر حسب تعداد خازن‌های سری در هر شاخه (m) در حالی که تعداد کل خازن‌ها برابر ۳۰۰۰ عدد است ($m \times n = 3000$)، نشان می‌دهد.



شکل ۹. سرعت پرتابه به ازای مقادیر مختلف m (توجه شود که $n=3000/m$).

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی بهینه پرتابگر ریل‌گان برای رسیدن به سرعت‌های بالا جهت استفاده به‌عنوان توپ پدافندی مورد بحث قرار گرفت. نشان داده شد که رفتار دینامیکی پرتابگر ریل‌گان به‌صورت دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی مدل می‌شود که حل آن باید توسط روش‌های عددی انجام پذیرد. همچنین نشان داده شد که برخی از پارامترهای سامانه ریل‌گان مانند گرادیان اندوکتانس ریل‌ها و تعداد شاخه‌های سری و موازی بانک خازنی می‌تواند تأثیر چشمگیری بر بازدهی سامانه ریل‌گان داشته باشد. بدین منظور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی، سه پارامتر گرادیان اندوکتانس، تعداد خازن‌های سری در هر شاخه و تعداد شاخه‌های موازی به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شد و مقدار بهینه آن‌ها برای رسیدن به بیش‌ترین سرعت خروجی پرتابه محاسبه شد. نتایج نشان داد که با طراحی بهینه این سه پارامتر می‌توان به سرعت ۵۰۰۰ متر بر ثانیه برای شلیک پرتابه (گلوله) ۲۰ کیلوگرمی به ازای انرژی ذخیره‌شده ۳۰۰ مگاژول دست‌یافت که جهت استفاده به‌عنوان توپ پدافندی مناسب است. بهینه‌سازی ارائه‌شده در این مقاله از آنجایی که تنها در ساختار بانک خازنی (تعداد خازن‌های سری در هر شاخه و تعداد شاخه‌های موازی) تغییر ایجاد می‌کند، هزینه‌های تحمیلی و محدودیت خاصی ندارد. تنها منبع تغذیه DC شارژ اولیه بانک خازنی باید از منبع تغذیه ۷ کیلوولتی استفاده‌شده در مرجع [۵] به منبع تغذیه ۳۰ کیلوولتی در این مقاله تغییر یابد که چنین منبع تغذیه‌ای دور از دسترس نیست و طراحی آن قابل انجام است. همچنین سوئیچ نشان داده شده در شکل ۱ نیز باید قابلیت تحمل ۳۰ کیلوولت را به‌جای ۷ کیلوولت استفاده‌شده در مقاله مرجع [۵] داشته باشد که سوئیچ‌های تریستوری با این سطح ولتاژ در دسترس است.

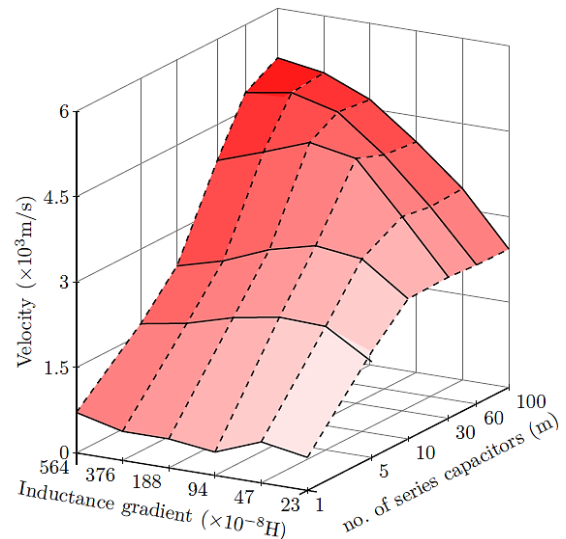
علائم اختصاری

V_{ab}	ولتاژ دو سر ریل‌ها
R_{rail}	مقاومت ریل‌ها
$R_{armature}$	مقاومت پرتابه
R_0	مقاومت معادل بانک خازنی، اتصالات و پرتابه
R'	گرادیان مقاومت ریل‌ها
L'	گرادیان اندوکتانس ریل‌ها
L_0	اندوکتانس معادل بانک خازنی و اتصالات
$x(t)$	مکان پرتابه در هر لحظه از زمان
x_0	مکان اولیه پرتابه
$dx(t)/dt$	سرعت پرتابه در هر لحظه از زمان
x_l	طول ریل‌ها

درعین حال، افزایش گرادیان اندوکتانس با خیزش جریان مقابله کرده و پیک جریان عبوری از ریل‌ها را کاهش می‌دهد. بنابراین باید مصالح‌های بین افزایش گرادیان اندوکتانس و افزایش پیک جریان صورت گیرد.

در گام دوم شبیه‌سازی هر سه متغیر L' ، m و n به‌عنوان پارامترهای بهینه‌سازی به الگوریتم اعمال می‌گردد. شکل (۸) تصویر سه‌بعدی سرعت پرتابه به ازای مقادیر مختلف گرادیان اندوکتانس و تعداد خازن‌های سری در هر شاخه (m) را نشان می‌دهد.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده از شکل (۱۱)، افزایش گرادیان اندوکتانس به افزایش سرعت پرتابه می‌انجامد منوط به اینکه تعداد خازن‌های سری در شاخه‌ها نیز هم‌زمان افزایش یابد. به‌عنوان مثال اگر تعداد خازن‌های سری در هر شاخه ۳۰ عدد باشد، افزایش گرادیان اندوکتانس از مقدار ۰/۲۳ میکرو هانری بر متر تا ۱/۸۸ میکرو هانری بر متر سبب افزایش سرعت پرتابه می‌شود. افزایش بیشتر گرادیان اندوکتانس از این مقدار سبب افت سرعت خروجی می‌شود که می‌توان با افزایش هم‌زمان تعداد خازن‌های سری در شاخه‌ها، سرعت را بیشتر کرد.



شکل ۱۱. سرعت خروجی پرتابه به ازای مقادیر مختلف L' و m

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش گرادیان اندوکتانس ریل‌ها به مقدار ۵/۶۴ میکرو هانری بر متر و انتخاب ۱۰۰ خازن سری در هر شاخه و ۳۰ شاخه موازی، می‌توان به سرعت شلیک ۵۰۰۰ متر بر ثانیه برای سامانه ارائه‌شده در جدول (۱) رسید که این مقدار سرعت جهت استفاده از سامانه به‌عنوان توپ پدافندی کفایت می‌کند.

- [11] Rabiei, A.; Keshtkar, A.; Gharib, L. "Study of Current Pulse Form for Optimization of Railguns Forces"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2018, 46, 1047–1053, <http://doi.org/10.1109/TPS.2018.2805329>.
- [12] Zuo, X.; Li, H.; Zhao, B.; Liu, J. "Optimization Design of a 40-kJ HTSPPT Module for Inductive Pulsed Power Supply"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2021, 49, 2380–2386. <http://doi.org/10.1109/TPS.2021.3097124>.
- [13] Chaudhuri, D.; Dalvi, S.; Khatri, M.; Chatterjee, S. "Design of Gate Drive Circuit for Thyristor Stack in Electromagnetic Railgun by Load-Line Analysis"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2021, 49, 383–388. <http://doi.org/10.1109/TPS.2020.3043345>.
- [14] Keshtkar, A. "Effect of Rail Dimension on Current Distribution and Inductance Gradient"; IEEE Trans. Magn. 2005, 41, 383–387. <http://doi.org/10.1109/TMAG.2004.838761>.
- [15] Mozaffari, S.; Bayati, M. "Analysis and Design of a Coaxial Electromagnetic Launcher considering Interfering Fields"; PhD Thesis, Razi University, 2017 (In Persian).
- [16] Zhou, Y.; Yan, P.; Sun, Y.; Yuan, W.; Zhang, D. "Adaptation of Population Size in Differential Evolution and its Effects on Localization of Target Nodes"; IEEE Access, 2022, 10, 107785–107798. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213060>.
- [17] Hodge, C. G.; Flower, J. O.; Macalindin, A. "A Comparison of Co-energy and Lorentz Force based Simulations of Railguns"; Proc. IEEE Electr. Ship Technol. Symp. 2009, 157–164. <http://doi.org/10.1109/20.101008>.

v_0	سرعت اولیه پرتابه
$i(t)$	جریان عبوری از ریل‌ها در هر لحظه از زمان
W_{field}	انرژی میدان مغناطیسی ریل گان
m	جرم پرتابه
C	ظرفیت کل بانک خازنی
V_0	ولتاژ شارژ اولیه بانک خازنی
N	تعداد خازن‌های بانک خازنی
E	انرژی ذخیره شونده در هر خازن
E_{tot}	انرژی کل بانک خازنی
m	تعداد خازن‌های سری در هر شاخه بانک خازنی
n	تعداد شاخه‌های موازی بانک خازنی
Z	تابع هدف بهینه‌سازی
α	ضریب جریمه نقض قید

۶. مراجع‌ها

- [1] Li, J.; Huang, K.; Fan, Z.; Su, Z.; Ren, R. "A Modeling and Measuring Method for Armature Muzzle Velocity based on railgun current"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2021, 49, 2272–2277. <http://doi.org/10.1109/TPS.2021.3089503>.
- [2] Han, J.; Pan, Y.; He, J. "Study of Employing Railguns in Close-in Weapon Systems"; IEEE Trans. Magn. 2009, 45, 641–644. <http://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008890>.
- [3] McNab, I. R.; Mcglasson, B. T. "Lunar Electromagnetic Mass Accelerator (LEMMA): An Initial Concept Assessment"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2022, 50, 3326–3333. <http://doi.org/10.1109/TPS.2022.3176218>.
- [4] McNab, I. R.; Mcglasson, B. T. "Brief History of EML Symposia: 1980-2018"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2019, 47, 1–7. <http://doi.org/10.1109/TPS.2018.2885269>.
- [5] Taher, S. A.; Jafari, M.; Pakdel, M. "A New Approach for Modeling Electromagnetic Railguns"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2015, 43, 1733–1741. <http://doi.org/10.1109/TPS.2015.2419272>.
- [6] Peng, Z.; Zhai, X.; Zhang, X.; Liu, H. "Analysis of Transient Characteristics of Electromagnetic Launchers using Analytical Method"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2022, 50, 3251–3261. <http://doi.org/10.1109/TPS.2022.3196146>.
- [7] Zhou, Y.; Yan, P.; Sun, Y.; Yuan, W.; Zhang, D. "Design of a Distributed-Energy-Store Railgun"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2011, 39, 230–234. <http://doi.org/10.1109/TPS.2010.2049032>.
- [8] Liu, X.; Yu, X.; Liu, X. "Performance Analysis and Parameter Optimization of CPPS-Based Electromagnetic Railgun System"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2016, 44, 281–288. <http://doi.org/10.1109/TPS.2010.2049032>.
- [9] Maleki, H.; Khanzade, M.H. "Modeling and Simulation of an Iron Core Compulsator with Permanent Magnet and Passive Compensation and introduce a new Methode to improve its Performance"; Third Int. Cong. Computer, electrical and communications 2016, 230–257. (In Persian).
- [10] Meyer, R. T.; DeCarlo, R. A.; Dickerson, J. "Energy Transfer Efficiency Optimization in an Electromagnetic Railgun"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2017, 45, 702–710. <http://doi.org/10.1109/TPS.2017.2669258>.