

بهینه سازی چند هدفی منبع تغذیه پالسی برای تفنگ ریلی

مهرداد جعفربلند^(۱) - مهدی پیوندی^(۲)

(۱) دانشیار - گروه برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(۲) کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

تاریخ پذیرش: تابستان ۱۳۸۹

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۸۸

خلاصه: به طور کلی در طراحی منابع تغذیه پالسی ولتاژ شارژ بانک‌های خازنی و زمان سوئیچ شدن آنها از جمله پارامترهایی هستند که نقش اساسی در شکل و دامنه پالس خروجی ایفا می‌کنند. در این مقاله روشی جدید جهت طراحی منبع تغذیه پالسی پیشنهاد شده است. در این روش با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحت محیط نرم‌افزار MATLAB مجموعه‌ای از مقادیر ولتاژهای شارژ بانک‌های خازنی و زمان سوئیچ شدن آنها، برای بهینه سازی چند هدفی منبع تغذیه به دست آمده است. در این میان مطابق با نیازمندی‌های طراح یکی از این مجموعه مقادیر به عنوان بهترین راه حل انتخاب می‌شود. سرعت خروج پرتابه و راندمان کل سیستم اهدافی هستند که در بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند با این محدودیت که شتاب آرمیچر به کمتر از 10^6 متر بر مجذور ثانیه محدود شود. همچنین نتایج بهینه‌سازی با اهداف سرعت پرتابه و راندمان کل سیستم به طور جداگانه بررسی شده‌اند.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی، منبع تغذیه پالسی، تفنگ ریلی.

۱- مقدمه

تکنولوژی تفنگ الکترومغناطیسی سال‌های بسیاری است که بررسی می‌شود و منبع تغذیه پالسی (PPS) قسمت مهمی از آن می‌باشد. معمولاً این منابع از ماژول‌هایی که واحدهای شکل دهنده پالسی (PFUs) نامیده می‌شوند و بر اساس خازن‌ها و سوئیچ‌های نیمه هادی شکل می‌گیرند ساخته می‌شوند. این واحدهای شکل دهنده پالسی به چندین سگمنت تقسیم می‌شوند که هر سگمنت شامل چندین ماژول مشابه می‌باشد. کنترل منبع تغذیه پالسی در نحوی عملکرد تفنگ الکترومغناطیسی بسیار مهم است. برای مثال در چه ولتاژ و زمانی سوئیچ کردن واحدهای شکل دهنده پالسی بهترین عملکرد را با کمترین انرژی ورودی به ما می‌دهد؟ پیش از این بسیاری از محققان تحقیقات خود را بر روی مدل‌های شبیه سازی گزارش کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به گزارش ارائه شده در سال ۲۰۰۳ توسط برناردز اشاره کرد [۱]. در این تحقیق یک طراحی کلی برای منبع تغذیه پالسی بر پایه خازن پیشنهاد شده است که منبع تغذیه و مدل تفنگ ریلی را با استفاده از Micro-Cap VI که یک نرم افزار تحلیلی مدارهای الکتریکی می‌باشد شبیه سازی کرده‌اند. مدل ارائه شده شامل چهار سگمنت از واحدهای شکل دهنده پالسی می‌باشد که به روش ترتیبی سوئیچ می‌شوند. این چهار سگمنت به غیر از مقادیر القاگرهای داخلی‌شان، تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشند. در گزارش فوق چگونگی

تعیین مقادیر پارامترهای القاگرها و زمان سوئیچینگ بین سگمنت‌ها بیان نشده است. در سایر موارد نیز به نحوی تعیین پارامترهای عملیاتی مثل ولتاژ شارژ بانک‌های خازنی و زمان سوئیچ شدن آنها اشاره نشده است. در این مقاله قصد داریم ابتدا به طور خلاصه مدل شبیه‌سازی منبع تغذیه پالسی (PPS) و تفنگ ریلی را توضیح دهیم. سپس مدل بهینه سازی و روش‌های انجام بهینه سازی را ارائه کنیم و سرانجام در مورد نتایج بهینه سازی بحث کنیم.

۲- مدل شبیه سازی

الف- منبع تغذیه پالسی

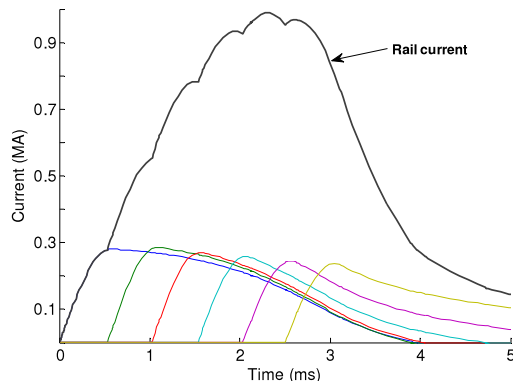
منبع تغذیه پالسی (PPS) از تعداد زیادی واحد شکل دهنده پالسی (PFU) شامل یک خازن، یک تریستور به عنوان سوئیچ، یک دیود حفاظتی و یک القاگر شکل دهنده پالسی تشکیل شده است. شکل (۱) ساختار یک PFU را نشان می‌دهد در حالی که این تریستور و دیود هر کدام شامل چندین تریستور و دیود سری و موازی می‌باشند. به دلیل آنکه منبع تغذیه پالسی در نظر گرفته شده شامل چندین سگمنت از واحدهای شکل دهنده پالسی می‌باشد و از لحاظ ساختاری هر یک از سگمنت‌ها مستقل از دیگری است به این نوع منبع، منبع انرژی تک‌ای گفته می‌شود و دارای مزایای بسیاری از جمله:

Table (1): The parameters of simulation

مقادیر	پارامترها
0.4μH/m	گرادیان اندوکتانس ریل
64μΩ/m	گرادیان مقاومت ریل
6m	طول ریل
200g	جرم گلوله
5kv	ولتاژ شارژ خازن‌ها
0.5ms	زمان تاخیر آتش شدن

ج- نتایج شبیه سازی

جدول (۱) تعدادی از پارامترهای مهم مدل تفنگ ریلی و مقادیر اولیه PPS را نشان می‌دهد. فرض کرده‌ایم جرم پرتابه 200 گرم و همه واحدهای شکل دهنده پالسی (PFU) در ولتاژ شارژ 5 کیلوگرم عمل کنند و زمان سوئیچینگ بین سگمنت‌ها در 0.5 میلی ثانیه ثابت شده است. بنابراین سگمنت اول در لحظه صفر سوئیچ می‌شود، سگمنت دوم در 0.5 میلی ثانیه، سگمنت سوم در 1 میلی ثانیه، سگمنت چهارم در 1.5 میلی ثانیه، سگمنت پنجم در 2 میلی ثانیه و در نهایت سگمنت ششم در لحظه 2.5 میلی ثانیه سوئیچ می‌شوند. شکل (۳) پالس جریان حاصل شده از منبع تغذیه فوق را نشان می‌دهد. جریان منبع، ترکیبی از جریان‌های شش سگمنتی است که یکی پس از دیگری به تفنگ اعمال می‌شوند. زمان‌های سوئیچینگ متفاوت اشکال پالسی گوناگونی را می‌سازد که موثرترین اثر را روی سرعت پرتابه و راندمان سیستم دارد. شکل (۴) سرعت پرتابه و شتاب آنرا نسبت به زمان نشان می‌دهد که این دو پارامتر از طریق جریان جاری در ریل‌ها محاسبه می‌شوند. چنانچه در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌کنید شکل منحنی جریان آرمیچر و شتاب پرتابه مشابه یکدیگر هستند. این امر به دلیل ارتباط مستقیم بین جریان آرمیچر و شتاب پرتابه از طریق معادله (۱) می‌باشد. سرعت پرتابه 2400 متر بر ثانیه می‌باشد که این به معنای انرژی جنبشی معادل 0.576 مگاژول خواهد بود. بنابراین راندمان کل یعنی نسبت انرژی جنبشی به انرژی ذخیره شده برابر 38.4% می‌شود.

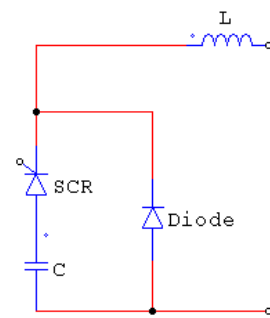


شکل (۳): جریان سگمنت‌ها و ریل
Fig. (3): The segments and rail currents

قابلیت انعطاف پذیری شکل پالس جریان خروجی (تقریباً می‌توان با انتخاب زمان‌های سوئیچینگ مناسب برای واحدهای شکل دهنده پالسی، پالس جریان دلخواهی را شکل داد).

درجه بالای اطمینان (واحدهای شکل دهنده پالسی به وسیله اندوکتانس‌هایشان از یکدیگر جدا شده‌اند. بنابراین زمانی که یکی از آنها دچار شکست شود به سایر واحدهای آسیبی نمی‌رسد).
قابلیت بالای ارتقا و توسعه (به سادگی می‌توان با اضافه کردن ماژول‌ها سیستم را ارتقا داد).

در این مقاله یک مدل منبع تغذیه پالسی شش سگمنتی برای بهینه‌سازی طراحی شده است. چنانچه در شکل (۲) نشان داده شده شش سگمنت به طور موازی به تفنگ ریلی وصل شده‌اند و هر سگمنت شامل ده ماژول PFU موازی می‌باشد.



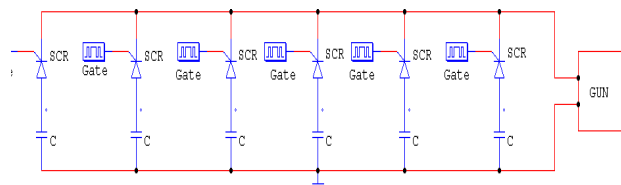
شکل (۱): ساختار یک PFU
Fig. (1): The structure of a PFU

ب- مدل تفنگ ریلی

یک مدل ساده تفنگ ریلی برای شبیه سازی انتخاب شده است [۲-۳]. فرض شده مقاومت و اندوکتانس در طول ریل به ترتیب با یک گرادیان مقاومت ثابت و یک گرادیان اندوکتانس ثابت افزایش می‌یابند. حرکت پرتابه به وسیله معادله شتاب تعیین شده است:

$$\alpha = L' I^2 / 2m \quad (1)$$

در این معادله I جریان لحظه‌ای آرمیچر، L' گرادیان اندوکتانس ریل و m جرم پرتابه است. همچنین این مدل تفنگ ریلی شامل یک مقاومت موازی در دهانه لوله پرتاب است تا جریان باقی مانده هنگام خروج پرتابه را کاهش دهد.



شکل (۲): ساختار منبع تغذیه پالسی شش سگمنتی
Fig. (2): The structure of the six-segments pulsed power supply

Table (2): The optimization model

جدول (۲): مدل بهینه سازی

اهداف		محدودیت	متغیرهای طراحی	
راندمان کل	سرعت آرمیچر m/s	شتاب m/s ²	زمان تاخیر ms	ولتاژ شارژ V
حداکثر	حداکثر	100000 >	0 < t _i < 5 i=1, ..., 5	2 < v < 10

ب- اهداف

سرعت پرتابه و راندمان کل دو هدفی هستند که در این مدل بررسی شده‌اند. این دو معیار در تضاد با یکدیگر هستند. بنابراین سازش بین آنها کاملاً ضروری است. برخلاف بهینه سازی تک هدفی، راه‌حل‌های به دست آمده در بهینه سازی چند هدفی یک تک نقطه نمی‌باشد. بلکه یک مجموعه از نقاط خواهد بود که به عنوان مجموعه بهینه پارتو شناخته می‌شوند. برای دو هدف موجود در مدل یک ردیف بهینه پارتو در صفحه ۲-D به وجود خواهد آمد که برای طراحی منبع تغذیه کاملاً مفید می‌باشد. طراح قادر است با توجه به تجربیات خود یکی از راه‌حل‌ها را به عنوان بهترین انتخاب کند.

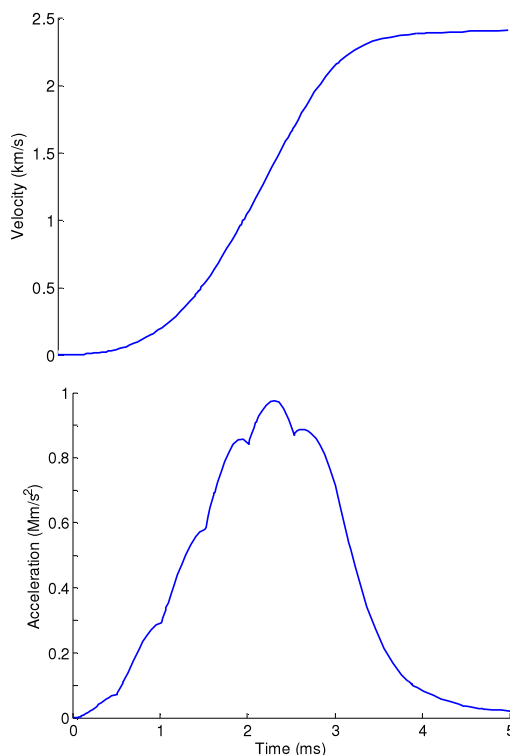
ج- محدودیت‌ها

می‌خواهیم ماکزیمم شتاب پرتابه را تا 10^6 متر بر مجذور ثانیه محدود کنیم. بنابراین یک محدودیت ماکزیمم شتاب روی مدل بهینه سازی اعمال می‌شود. هنگامی که m و L ثابت باشند ماکزیمم جریان آرمیچر به واسطه معادله (۱) رابطه مستقیمی با شتاب پرتابه دارد پس نیازی به محدود کردن آن نیست. شبیه سازی عددی تحت محیط نرم افزار MATLAB انجام شده است و مدل بهینه سازی در جدول (۲) خلاصه شده است.

۴- بهینه سازی

الف- الگوریتم بهینه سازی

نرم افزار MATLAB بسیاری از انواع تکنیک‌های بهینه سازی را برای مناسب سازی همه نوع مسئله طراحی تولید می‌کند. تکنیک‌های بهینه‌سازی در MATLAB به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۴]. بهینه سازی عددی، تکنیک‌های تجربه، استراتژیهای بهینه سازی و جستجویی. در اینجا به دلیل آنکه خیلی در مورد فضای پارامترها اطلاعات نداریم از تکنیک جستجویی^۱ استفاده می‌کنیم. تکنیک‌های جستجویی از متمرکز شدن روی یک ناحیه محلی اجتناب می‌کنند. آنها به طور کلی طراحی‌ها را در سرتاسر فضای پارامتر ارزیابی و بهینه جهانی^۲ را جستجو می‌کنند. از آنجایی که الگوریتم NSGA-II در بهینه سازی‌های چند هدفی به خوبی جواب می‌دهد از این الگوریتم در بهینه سازی مدل پیشنهادی استفاده می‌کنیم. شکل (۵) فلوچارت بهینه سازی را نشان می‌دهد.



شکل (۴): سرعت و شتاب پرتابه بر حسب زمان

Fig. (4): The speed and acceleration of the projectile

۳- مدل بهینه سازی

سرعت پرتابه 2400 متر بر ثانیه و راندمان کل سیستم 38.4% به وسیله پارامترهای اولیه و بدون اعمال محدودیت روی شتاب حاصل شده‌اند. برای آنکه بهینه سازی‌ها عملکرد بهتری را ایجاد کند لازم است که محدودیت‌هایی در نظر گرفته شود. در این بخش یک مدل بهینه سازی ارائه خواهد شد که شامل متغیرهای طراحی، اهداف و محدودیت‌ها می‌شود.

الف- متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی دسته‌ای از پارامترها هستند که در طول فرآیند بهینه سازی تغییر خواهند کرد. برای اجتناب از فضای خیلی بزرگ راه‌حل‌های موجود برای طراحی منبع تغذیه، پارامترهای مدل تفنگ ریلی را ثابت در نظر گرفته‌ایم. فرض می‌کنیم که همه واحدهای شکل دهنده پالس در ولتاژ مشابهی کار می‌کنند که این ولتاژ از 2 تا 10 کیلو ولت متغیر خواهد بود. پنج زمان سوئیچینگ بین شش سگمنت منبع تغذیه وجود دارد که از لحظات صفر تا 5 میلی‌ثانیه متغیر هستند. جرم پرتابه را از 100 تا 300 گرم متغیر فرض کرده‌ایم. اما آن را به عنوان یک متغیر طراحی در نظر نمی‌گیریم. پس در کل شش متغیر طراحی داریم که شامل یک مقدار برای ولتاژ شارژ بانک‌های خازنی و پنج زمان سوئیچینگ، برای پنج سگمنت منبع تغذیه می‌باشد.

Table (4): The optimization parameters to optimize the speed
جدول (۴): پارامترهای بهینه برای بهینه سازی سرعت

جرم گلوله (کیلوگرم)	ولتاژ شارژ (ولت)	زمان‌های آتش شدن سگمنت‌ها (میلی ثانیه)					
		0/00	0/28	2/51	3/21	3/73	3/91
0/1	5936/7	0/00	0/28	2/51	3/21	3/73	3/91
0/2	7235/9	0/00	0/14	2/16	3/10	3/61	3/82
0/3	7899/5	0/00	0/43	1/82	3/00	3/2	3/71

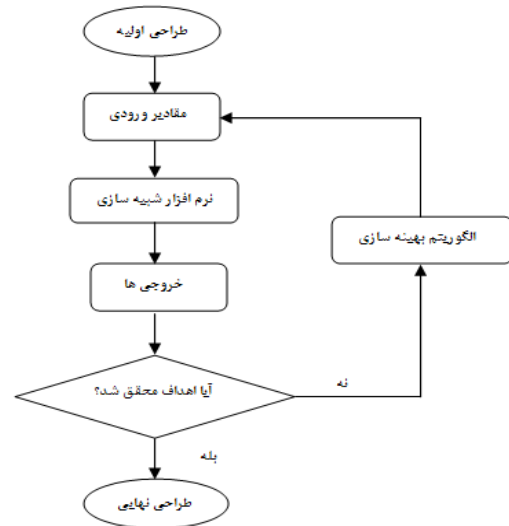
Table (5): The results of optimization to optimize the efficiency
جدول (۵): نتایج بهینه سازی برای راندمان

جرم گلوله (کیلوگرم)	سرعت گلوله (متر بر ثانیه)	راندمان	ماکزیمم شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
0/1	1930	%36/93	996769
0/2	2105	%38/01	1000000
0/3	1907	%39/48	998138

Table (6): The optimized parameters to optimize the efficiency
جدول (۶): پارامترهای بهینه برای بهینه سازی راندمان

جرم گلوله (کیلوگرم)	ولتاژ شارژ (ولت)	زمان‌های آتش شدن سگمنت‌ها (میلی ثانیه)					
		0/00	1/12	1/42	1/51	2/11	2/64
0/1	2709/3	0/00	1/12	1/42	1/51	2/11	2/64
0/2	4407/3	0/00	0/35	0/91	1/11	2/01	2/41
0/3	4773/7	0/00	0/96	1/32	1/42	1/50	2/21

مطابق جداول (۳)، (۵) و شکل‌های (۶)، (۷) به نظر می‌رسد که سرعت و راندمان بالا، نمی‌توانند در یک زمان حاصل شوند هنگامی که فقط یک بهینه‌سازی تک هدفی را اعمال می‌کنیم. مقایسه منحنی‌های شکل‌های (۶) و (۷) نشان می‌دهد که پالس‌های با جرم پرتابه مشابه، دارای پیک دامنه پالس مشابه می‌باشند که این امر به واسطه محدود کردن شتاب حاصل می‌شود. همچنین می‌توانیم در یابیم که جریان‌های با پالس پهن‌تر سرعت پرتابه بیشتر و راندمان نسبتاً کمتری تولید می‌کنند. چرا که جریان‌های با پالس پهن‌تر از یک شتاب بالا برای یک مدت زمان طولانی‌تر حاصل می‌شوند که این به معنای زمان سوئیچینگ طولانی‌تر بین سگمنت‌های شکل دهنده پالسی می‌باشد و جریان هر سگمنت می‌بایستی در مقایسه با همان سگمنت در حالت ماکزیمم راندمان نسبتاً بیشتر باشد. بنابراین سگمنت‌ها می‌بایستی در ولتاژ بزرگتری عمل کنند تا جریان‌های بزرگتری حاصل شود. در حالت ماکزیمم راندمان، پالس‌های سگمنت‌های متفاوت یکدیگر را هم پوشانی می‌کنند. بنابراین می‌توانند در ولتاژ پایین‌تری عمل کنند (جدول (۴) و (۵) را ببینید) که این به معنای انرژی ذخیره شده کمتر و راندمان بالاتر می‌باشد.



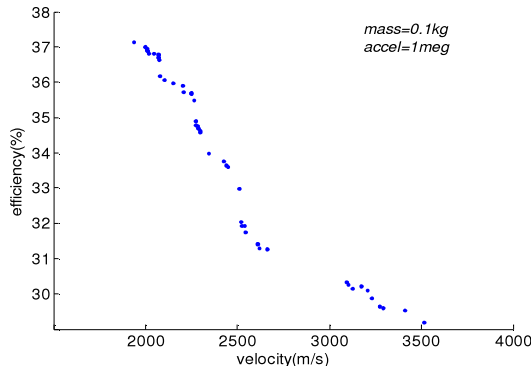
شکل (۵): فلوجارت بهینه سازی
Fig. (5): The optimization flowchart

۵- نتایج بهینه سازی الف- بهینه سازی تک هدفی

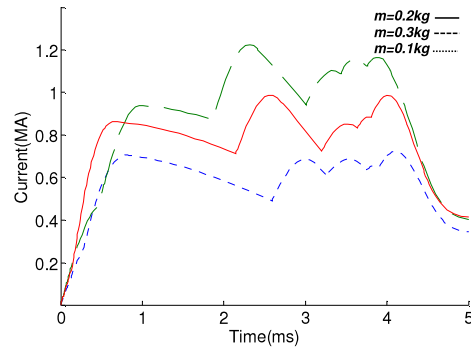
ابتدا بهینه سازی را به طور جداگانه برای ماکزیمم سرعت پرتابه و راندمان کل سیستم، به ترتیب با جرم‌های پرتابه 0.1، 0.2 و 0.3 کیلوگرم اجرا کردیم. جدول (۳) نشان می‌دهد که در جرم‌های گوناگون همه سرعت‌های بهینه پرتابه از 2800 تجاوز می‌کنند و هنگامی که پرتابه سنگین می‌شود ولتاژ شارژ بایستی افزایش پیدا کند. پارامترهای بهینه برای بهینه سازی سرعت در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. جدول (۵) نشان می‌دهد که در جرم‌های گوناگون همه راندمان‌های بهینه بزرگتر از 36% می‌باشند و هنگامی که پرتابه سنگین‌تر می‌شوند ولتاژهای شارژ بالاتر می‌روند. بنابراین سرعت‌ها نسبتاً کمتر از جدول (۳) می‌باشند. پارامترهای بهینه برای بهینه سازی راندمان در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. شکل (۶) پالس‌های جریان را برای حالت ماکزیمم سرعت با پارامترهای عملیاتی جدول (۴) نشان می‌دهد. شکل (۷) پالس‌های جریان را برای حالت ماکزیمم راندمان با پارامترهای عملیاتی جدول (۶) نشان می‌دهد.

Table (3): The results of speed optimization
جدول (۳): نتایج بهینه سازی برای سرعت

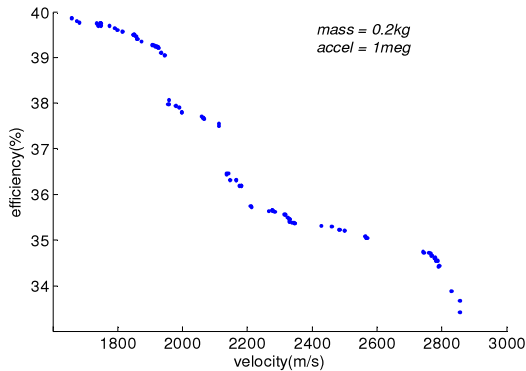
جرم گلوله (کیلوگرم)	سرعت گلوله (متر بر ثانیه)	راندمان	ماکزیمم شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
0/1	3518	%29/26	1000000
0/2	3070	%30/08	998539
0/3	2815	%31/76	999475



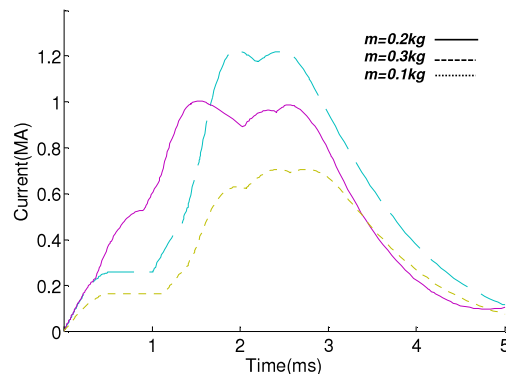
شکل (۸): ردیف پارتو برای پرتابه‌ای با جرم ۰/۱ کیلوگرم
Fig. (8): Parto ranges for projectile of 0.1 Kg mass



شکل (۶): جریان‌های حاصل از بهینه‌سازی با هدف ماکزیمم سرعت
Fig. (6): The currents obtained from optimization with maximum speed goal

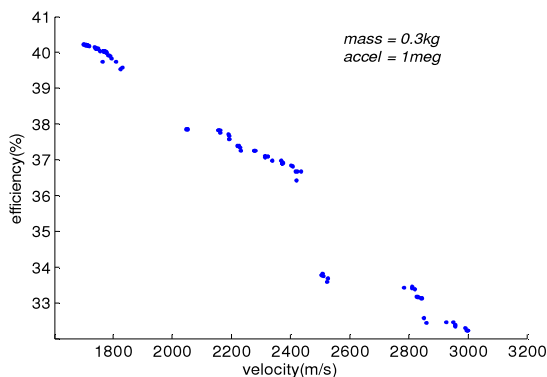


شکل (۹): ردیف پارتو برای پرتابه‌ای با جرم ۰/۲ کیلوگرم
Fig. (9): Parto ranges for projectile of 0.2Kg mass



شکل (۷): جریان‌های حاصل از بهینه‌سازی با هدف ماکزیمم راندمان
Fig. (7): The currents obtained from optimization to reach the maximum efficiency

شکل‌های (۸-۱۰) ردیف پارتو را به ترتیب با جرم پرتابه 0/1، 0/2 و 0/3 کیلوگرم نشان می‌دهند. با مقایسه مقادیر ماکزیمم سرعت و راندمان حاصل شده از بهینه‌سازی تک هدفی با مقادیر موجود در ردیف پارتو واضح است که نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی چند هدفی تا حد زیادی دقیق می‌باشند.



شکل (۱۰): ردیف پارتو برای پرتابه‌ای با جرم ۰/۳ کیلوگرم
Fig. (10): Parto ranges for projectiles of 0.3Kg mass

ب- بهینه‌سازی دو هدفی

ظاهراً یک سازشی بین سرعت و راندمان وجود دارد. بنابراین بهینه‌سازی دو هدفی ضروری است. در این بخش دو هدف را به طور همزمان به کار می‌گیریم و بهینه‌سازی را بر روی شش پارامتر طراحی اجرا می‌کنیم. الگوریتم‌های مربوط به بهینه‌سازی چند هدفی بسیار مهم هستند و بایستی به دقت آنها را انتخاب کرد و در پارامترهای متفاوت بررسی کرد. NSGA-II که از مشهورترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفی می‌باشد که توسط دب در سال 2002 پیشنهاد داده شد [۷-۵]. این الگوریتم به عنوان نوع بهبود یافته‌ای از الگوریتم NSGA دارای پیچیدگی محاسباتی بهتر، به دست آوردن نخبگان و حتی توزیع بیشتر افراد روی صف پارتو می‌باشد. در جدول (۷) مقادیر پارامترهای مهمی از الگوریتم تعیین شده است.

جدول (۷): پارامترهای الگوریتم

۱۰۰	اندازه جمعیت
۶۰	تعداد نسل
۰/۸	احتمال تولید مثل
۲۰	شاخص توزیع تولید مثل
۲۰	شاخص توزیع جهش

ج- اثر محدود کردن شتاب

به نظر می‌رسد محدود کردن شتاب اثر زیادی روی نتایج بهینه‌سازی گذارده است.

و زمان‌های سوئیچینگ سگمنت‌ها می‌باشند. شتاب پرتابه به عنوان یک محدودیت در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه سازی را به طور مختصر بیان می‌کنیم:

محدودیت شتاب اثر بزرگی روی سرعت پرتابه و راندمان سیستم می‌گذارد.

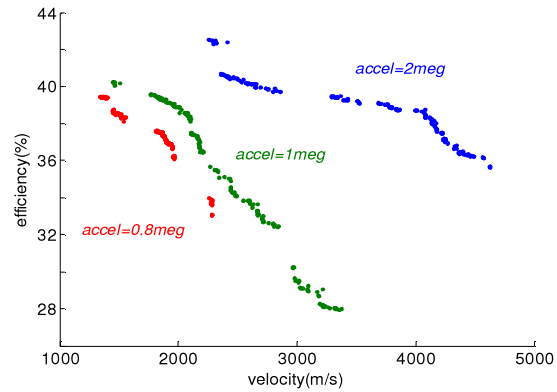
به واسطه محدود کردن شتاب، جریان‌های با پالس پهن باعث سرعت بالاتر اما راندمان پایین‌تر می‌شود.

برای افزایش شتاب یک پرتابه سنگین‌تر تا یک سرعت یا راندمان معین می‌بایستی ولتاژ شارژ افزایش یابد.

در پایان اشاره به این نکته ضروری است که نتایج به دست آمده تنها از شبیه سازی‌های کامپیوتری حاصل شده‌اند و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی برای بررسی درصد نزدیکی آنها به واقعیت لازم می‌باشد. در آینده برای بهبود عملکرد بهینه سازی می‌توان متغیرهای طراحی را افزایش داد که از جمله آنها می‌توان به پارامترهای منبع تغذیه پالسی و ولتاژ شارژ متفاوت برای هر سگمنت اشاره کرد. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن ولتاژ دهانه لوله پرتاب به عنوان یکی دیگر از اهداف بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه سازی چند هدفی مناسبی برای مدل‌های پیچیده‌تر طراحی کنیم.

پی‌نوشت:

- 1- Exploratory
- 2- Global



شکل (۱۱). ردیف‌های پارتو برای محدودیت‌های شتاب متفاوت
Fig. (11): Parto ranges for limited accelerations

برای اثبات آن، محدودیت را تا 2×10^6 متر بر مجذور ثانیه افزایش و سپس تا $0/8 \times 10^6$ متر بر مجذور ثانیه کاهش داده‌ایم. شکل (۱۱) محدودیت‌های متفاوت را در مورد ردیف‌های پارتو نشان می‌دهد. هنگامی که محدودیت را افزایش می‌دهیم سرعت و راندمان هر دو بزرگتر می‌شوند و هنگامی که محدودیت را کاهش می‌دهیم هر دو کوچکتر می‌شوند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل بهینه سازی دو هدفی جدید پیشنهاد شد. سرعت پرتابه و راندمان کل سیستم به عنوان اهداف بهینه سازی به طور همزمان بررسی شدند. متغیرها شامل ولتاژ شارژ بانک‌های خازنی

مراجع

- [1] J.S. Bernardes, M.F. Stumborg, T.E. Jean, "Analysis of a capacitor-based pulsed-power system for driving long-rang electromagnetic guns", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.39, No.1, pp.486-490, Jan. 2003.
- [2] B.T. McDaniel, J.J. Mankowski, D. Wetz, B. McHale, M. Kristiansen, "A bench top railgun with distributed energy sources and diagnostics", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.39, No.1, pp.185-190, Jan. 2009.
- [3] R.A. Marshall, W. Ying, "Railguns: Their science and technology Beijing", China: China Machine Press, 2004, pp.7-9.
- [4] MATLAB, The language of technical computing, Natick, MA: MathWorks, Inc. [Online]. Available: info@mathworks.com
- [5] C.M. Fonseca, P.J. Fleming, "Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization", In *Proc.5th Int. Conf. Genetic Algorithms*, 1993, pp.416-423.
- [6] R.L. Haupt, S.E. Haupt, "Practical genetic algorithms 2nd edition", New York: John Wiley, 2004.
- [7] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Trans. Evol. Com.*, Vol.6, No.2, pp.182-196, Apr. 2002.