

مدل سازی و شبیه سازی عملکرد و ساخت نمونه آزمایشگاهی پرتابگر الکترومغناطیسی^۱

مهدی فخرآبادی^۱، اشرف زاده^۲،
محمود ترابی^۲، کاظم پوربدخشان^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۲۳

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۰۷/۱۱

چکیده

امروزه مطالعه و تحقیق بر روی مدل سازی، شبیه سازی، ساخت و بهبود عملکرد پرتابگرهای الکترومغناطیسی، یکی از زمینه های اصلی تحقیقات بسیاری از دانشگاه ها و مراکز پژوهشی دنیاست. کاربردهای فراوان پرتابگرها در حوزه نظامی و هوافضا و جنگ های هوایی است. در این مقاله، مشخصات نمونه ساخته شده، مدل سازی، شبیه سازی و نتایج آزمایش نمونه آزمایشگاهی پرتابگر ریلی با قدرت ۲/۲ کیلو ژول گزارش شده است. در مدل انتخاب شده، مقادیر جریان ریل، شتاب، سرعت، موقعیت، نیروی وارده بر پرتابه، راندمان پرتابگر با استفاده از نرم افزار MATLAB شبیه سازی و نمایش داده می شود. پس از ساخت و

^۱ شناسه دیجیتال (DOI): 10.22051/jap.2018.11079.1047

^۲ دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

* نویسنده مسئول: k.poorbadakhshan@qiet.ac.ir

آزمایش نهایی پرتابگر، سرعت خروج پرتابه از دهانه پرتابگر، شدت جریان تخلیه بانک خازنی به ترتیب با استفاده از حسگر مادون قرمز و سیم‌پیچ روگوفسکی اندازه‌گیری می‌شود. سرعت خروج پرتابه از دهانه پرتابگر ریلی به بیش از 100 m/s می‌رسد. در انتها، این اندازه‌ها با مقادیر مشابه شبیه‌سازی مقایسه می‌شود. آثار تخریبی پلاسمای ایجاد شده در ریل‌ها قابل توجه است.

واژه‌های کلیدی: پرتابگر ریلی، پرتابگر الکترومغناطیسی، بانک خازنی، پرتابه، سیم‌پیچ روگوفسکی.

۱. مروری بر تاریخچه مسئله

بسیاری از کشورها برای پرتابگرهای الکترومغناطیسی دورنمای وسیعی در نظر گرفته‌اند. دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی فراوانی در حال توسعه کار در این زمینه هستند [۱]. ساخت پرتابگر ریلی به عنوان یک اسلحه نیاز به شناخت طیف بسیار گسترده‌ای از علوم، تحقیقات و فناوری‌ها است. از جمله می‌توان به این رشته‌ها اشاره نمود علوم ریاضی و کنترل: مدل‌سازی و بررسی حالت گذرا، رشته‌های مواد و مکانیک: خواص الکترومغناطیسی، رفتارهای اتمی، ویژگی‌های مکانیکی و گرمایی مواد، رشته قدرت: ذخیره‌سازی انرژی و شکل دهی پالس‌های قدرتی [۲]. اهداف ساخت مولد پالس‌های قدرتی بسیار زیادند. برای نمونه چندین کاربرد عمده در حوزه نظامی و فضایی و جنگ‌های هوایی را می‌توان نام برد [۲-۴]. در حقیقت اساس پرتابگرهای ریلی و این گونه سیستم‌ها ایجاد ارتباط بین انرژی الکتریکی و جنبشی در یک آرمیچر شتاب‌دهنده است [۵، ۶].

از طرف دیگر، شبیه‌سازی و مدل‌سازی سیستم‌های مولد پالس‌های قدرتی و پرتابگرهای ریلی نیز پایه بسیاری از تحقیقات هستند. برای مثال، استفاده از روش اجزاء محدود (FEM) برای مدل‌سازی این مولد به کار رفته است [۷]. پارامترهایی در مدل‌سازی و کالیبره نمودن دستگاه کلیدی هستند که باید در نظر گرفته شوند [۸]. تحلیل پارامترهای الکتریکی سیستم مولد پالس‌های قدرتی از نظر پایداری و قابلیت اطمینان نیز مهم است [۹]. توصیف سیستم توسط نمودار $V-I$ (ولتاژ-جریان) نیز روش مهمی است [۱۰]. تحلیل پدیده انتشار امواج الکترومغناطیسی در طی مرحله پرتاب و مدل‌گذرای سیستم، از دیگر مراحل شبیه‌سازی این سیستم است [۷]. علاوه بر مدل‌های خطی، مدل‌های غیرخطی نیز برای سیستم پرتابگر الکترومغناطیسی ارائه شده است [۱۲]. همچنین مدل‌سازی سیستم با توابع توزیع احتمالی نوع دیگر مدل‌سازی در این پدیده‌ها است [۱۴].

زیرشاخه دیگری که تعداد بسیار زیادی از دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی در آن شاخه فعال هستند، ساخت پرتابگرهای الکترومغناطیسی است. در نتیجه محققان این مراکز بر روی مفاهیم و نمونه‌های آزمایشگاهی و آزمایش سیستم متمرکز شده‌اند. استفاده از مواد خاص و اتصالات تونلی ابررسانا برای ساخت پرتابگری با حساسیت زیاد، انرژی مصرفی کم و اندازه کوچک در دستور کار آنها قرار دارد [۱۵]. مواد سازنده پرتابگر ریلی باید طوری عمل کند که عملکرد نامطلوبی نداشته [۱۶] و راندمان مولد پالس قدرتی نیز افزایش یابد [۱۷].

پرتابگرهای ریلی در بازه بسیار وسیعی از میزان انرژی، ولتاژ، سرعت، پارامترهای ژئومتری و مکانیکی عمل می‌کند [۱۰]. آزمایش پرتابگری با کالیبر بالا و جریان سیم‌پیچی زیاد و پرتابگری با مقیاس واقعی در آزمایشگاه مؤلفین [۱۸] انجام شده است. مقاله [۱۹] ساخت مولد پالس قدرتی با خازن‌های بزرگی را برای تولید پرتابگر الکترومغناطیسی را شرح می‌دهد. کاهش دمای ریل‌ها هدف تحقیق [۲۰] بوده است. شبکه‌های شکل‌دهی پالس در [۲۱] شبیه‌سازی و شرح داده شده است. در گزارش [۲۲] اندازه پارامترهای آرمیچر برای افزایش سرعت سیستم طراحی مجدد شده است. ساخت راه‌اندازی و آزمایش سیستم مولد پالسی با قدرت معادل ۲ مگا ژول در [۲۳] بیان شده است. ساختار مکانیکی پرتابگرهای ریلی الکترومغناطیسی در [۲۴] به صورت مشروح ذکر شده است.

در این مقاله، نتیجه آزمایش موفق نمونه آزمایشگاهی ساخته شده، مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک پرتابگر ریلی که در آزمایشگاه توان پالسی دانشگاه صنعتی قوچان راه‌اندازی و آزمایش شده است ارائه می‌شود. در ابتدا مولد پالس قدرتی ۲/۲ کیلو ژول طراحی و با استفاده از نرم‌افزارهای مورد نظر شبیه‌سازی شد. ساخت پرتابگر ریلی نیز با اجزاء موجود در بازار انجام گرفت. در نهایت سیستم به طور موفقیت‌آمیز آزمایش شد و توانست پرتابه مورد نظر را با سرعت مناسب از دهانه خود رها نماید. مقایسه اندازه‌گیری‌های انجام شده با مقادیر شبیه‌سازی نزدیکی آنها را به یکدیگر بیان می‌کند.

۲. مدل‌سازی و شبیه‌سازی

در سیستم‌های مولد پالس قدرتی، براساس نیروی لورنتس جریان سیم‌پیچ باعث شتاب گرفتن پرتابه می‌شود [۲۵]. درحقیقت، سیستم را می‌توان با یک مدار الکتریکی ساده مدل کرد که این مدار انرژی ذخیره شده در بانک خازنی را روی ریل‌ها تخلیه می‌کند. بنابراین مدار یک پرتابگر، رفتاری شبیه سیستم RLC با حالت خودالقایی میرای بحرانی دارد. هدف از شبیه‌سازی این سیستم، به‌دست آوردن جریان سیم‌پیچ، موقعیت، سرعت و شتاب پرتابه و نیروی اعمال شده بر آن است.

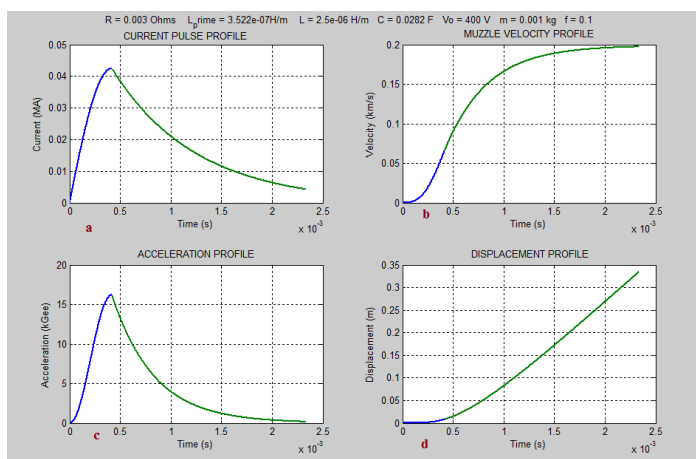
پرتابگر الکترومغناطیسی شامل چندین زیرسیستم است. از جمله: بانک خازنی، مجموعه گاز فشرده، ریل‌ها، پرتابه و ماژول کنترل سرعت. ریل‌ها قسمت اصلی پرتابگر ریلی هستند که انرژی الکتریکی را بر مبنای نیروی لورنتس به انرژی جنبشی تبدیل می‌کنند. این نیرو می‌تواند متناسب با فاصله بین ریل‌ها تغییر یابد. فرمول‌های زیر مبنای مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌باشند [۲۶].

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (۱)$$

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{(R+l)^2}{R^2} \quad (۲)$$

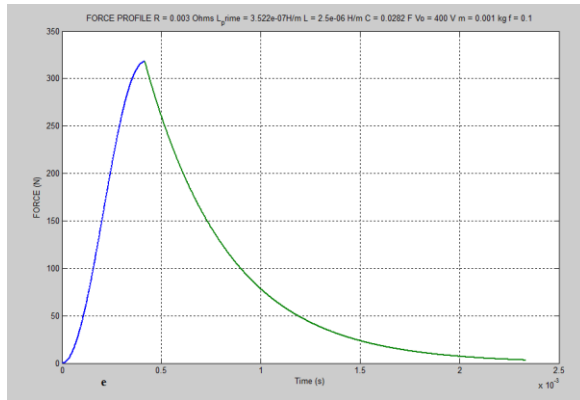
$$F = \frac{1}{2} L' I^2 \quad (۳)$$

که در آن‌ها، B میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ بی‌نهایت است و برای تقریب میدان مغناطیسی ریل‌های مستطیلی از آن استفاده می‌شود. L' و F به ترتیب شیب مشتق القایی و نیروی اعمالی بر پرتابه را نشان می‌دهند. قابل توجه است که L' نقش مهمی در تحلیل داشته و ارتباط بین معادلات الکتریکی و الکترومغناطیسی را برقرار می‌کند. همان‌طور که اشاره شد، روش‌های فراوانی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود [۷]. در این مقاله از روش تحلیلی برای محاسبه L' استفاده می‌کنیم [۱۴]، همچنین از نرم‌افزار MATLAB برای انجام محاسبات و رسم نمودارها بهره می‌بریم. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های (۱ تا ۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، می‌توان مشاهده نمود که جریان، نیرو و شتاب در زمان ۰/۴ میلی ثانیه اتفاق می‌افتند.

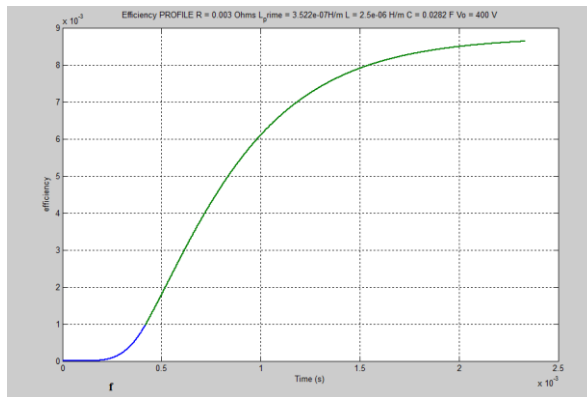


شکل ۱ جریان سیم‌پیچ (بالا-چپ)، سرعت پرتابه (بالا-راست)، شتاب پرتابه (پایین-چپ)

و میزان جابه‌جایی پرتابه (پایین-راست) برحسب زمان



شکل ۲ نیروی وارد بر پرتابه بر حسب زمان



شکل ۳ راندمان تبدیل انرژی در سیستم بر حسب زمان

۳. مشخصات نمونه آزمایشگاهی

همان‌طور که اشاره شد، پرتابگر الکترومغناطیسی شامل این زیرسیستم‌هاست: بانک خازنی، کپسول گاز فشرده، ریل مسی، سخت‌افزار راه‌انداز و کنترل و پرتابه. بانک خازنی منبع ذخیره انرژی است که می‌تواند پس از دریافت فرمان از سیستم راه‌انداز در ریل‌های مسی تخلیه شود. کپسول گاز و شیر برقی تشکیل یک زیرسیستم معجزا می‌دهند که سرعت اولیه پرتابه را ایجاد می‌کند. این سرعت اولیه از ذوب شدن احتمالی ریل‌ها بر اثر قوس الکتریکی بین آن‌ها جلوگیری نماید [۲۶]. شمش‌های مسی دارای ۳۳cm طول، ۲cm عرض و ۵mm ضخامت هستند و بر روی یک صفحه MDF با مساحت 60cm^2 سوار شده‌اند. رابط‌های مسی نیز درون این MDF قرار گرفته‌اند. به این دلیل از مس استفاده شده که هدایت الکتریکی زیادی دارد و نقطه ذوب آن نسبت به اغلب رساناها بالاتر است. بانک خازنی شامل شش خازن $460\mu\text{F}$ با حداکثر ولتاژ 400V است

که با استفاده از یک نوار مسی به صورت موازی با هم قرار گرفته‌اند. کل انرژی ذخیره‌شده در بانک خازنی ۲/۲ kJ خواهد شد. دو حسگر مادون قرمز برای تعیین موقعیت پرتابه و محاسبه سرعت خروج آن از دهانه ریل بر MDF قرار داده شده است. سرعت محاسبه‌شده توسط میکروکنترلر بر روی LCD نمایش داده می‌شود. شکل (۴) نمونه آزمایشگاهی پرتابگر ریلی و اجزاء آن را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.



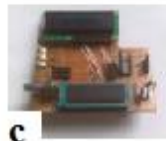
a

الف



b

ب



c



د



e

ه

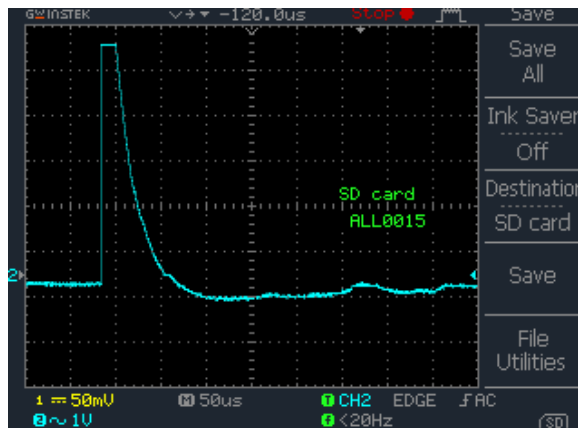
شکل ۴ اجزاء پرتابگر؛ (الف) نمونه آزمایشگاهی پرتابگر ریلی (ب) ریل‌ها (ج) سخت‌افزار راه‌انداز (د) حسگرها و پرتابه (ه) تریستور

شیر برقی که بین کپسول گاز فشرده و ورودی ریل قرار دارد با منبع ۱۲ ولتی تغذیه می‌شود. بلافاصله پس از عملکرد شیر، فشار گاز، سرعت اولیه‌ای برای پرتابه ایجاد کرده و آن را به داخل ریل‌های پرتابگر می‌راند. حرکت پرتابه با استفاده از حسگر نوری قرار گرفته بر روی ابتدای ریل تشخیص داده می‌شود. از یک سوئیچ نیمه‌هادی سریع (SKT160 semikron) به طور سری با بانک خازنی و ریل‌ها استفاده کرده‌ایم. پس از حرکت پرتابه بانک خازنی از طریق این سوئیچ

اجازه تخلیه در ریل‌ها می‌یابد. پرتابه از آلومینیوم ساخته شده، وزن آن ۵ gr و سرعت خروج آن از دهانه ریل به ۱۰۰m/s می‌رسد.

۴. آزمایش و اندازه‌گیری

آخرین مرحله در این پروژه، انجام آزمایش و آزمایش نهایی است. برای اندازه‌گیری جریان از سیم‌پیچ روگوسکی استفاده شده است. ولتاژ این سیم‌پیچ که توسط نمایشگر ۲۵GWINSTEK اندازه‌گیری می‌شود، معرف جریان اصلی است. شکل (۵) خروجی این سیم‌پیچ را نشان می‌دهد. مقدار حداکثر این نمودار حداکثر ولتاژ را نشان می‌دهد. متوسط میزان جریان حدود ۲/۵KA است که با استفاده از نسبت دور سیم‌پیچ محاسبه شده است. این مقدار نزدیک مقدار شبیه‌سازی است. پس از تخلیه بانک خازنی، مدار RLC دوباره آماده شارژ شده و ثابت زمانی مورد نظر را می‌سازد.



شکل ۵. خروجی سیم‌پیچ روگوسکی

۵. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به رفتارهای مدار RLC، مقدار حداکثر ولتاژ تخلیه بستگی به اندازه پارامترهای طراحی و میزان میرایی مدار دارد. زمانی که تخلیه صورت می‌گیرد، بین پرتابه و ریل و در هر دو طرف پرتابه، پلاسمای داغ و غیر متعادلی در فضا ایجاد می‌شود (فاصله کمتر از ۲/۵ mm). بررسی سطح پرتابه و ریل‌ها در شکل (۴) نشان می‌دهد که بعد از هر شلیک، اثر تخریبی نامطلوبی در ریل ایجاد شده است. نقاط تخریب‌شده کوچکی بر سطح ریل به چشم می‌خورد که به علت گرمای شدید و ذوب حاصل از جریان دشارژ است. یون‌های پر انرژی پلاسمای هوا باعث این اثر تخریبی می‌شوند.

این اثر باعث افزایش اصطکاک بین پرتابه و ریل می‌شود. در نتیجه مقدار اولیه انرژی الکتریکی تبدیل شده به انرژی گرمایی افزایش یافته و راندمان سیستم کم می‌شود. علاوه بر این، سطح ریل‌ها ناهموار شده و باعث تشدید این حالت می‌شوند. این اتفاق احتمالاً به دلیل تخلیه قله جریان در این قسمت است که نتایج شبیه‌سازی نیز این احتمال را تأیید می‌کند. شکل (۱) نشان می‌دهد که حداکثر جریان در ابتدای تخلیه صورت می‌گیرد. بنابراین با استفاده از روشی مؤثر می‌توان خط شکل دهی پالسی برای تولید پالس مربعی استفاده نمود. این نوع پالس، اثرات گرمایی و تلفات را با کم کردن مقدار قله جریان کاهش می‌دهد.

مراجع

1. P. Lehmann, "Overview of the electric launch activities at the French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL)," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 1, pp. 24-28, 2003.
2. H. D. Fair, "Advances in Electromagnetic Launch Science and Technology and Its Applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 225-230, 2009.
3. I. R. McNab, "Progress on Hypervelocity Railgun Research for Launch to Space," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 381-388, 2009.
4. M. R. Palme, "Midterm to far term applications of Electromagnetic guns and associated power technology," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 1, pp. 345-350, 1993.
5. S. M. Esmaelia, "Calculation of inductance Gradient in Railgun (in persian)," *Tabriz university journal*, vol. 29, 2003.
6. A. P. Noel; A. Challita; D. P. Bauer, "A novel railgun launch package concept," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 1, pp. 97-100, 2001.
7. S. A. Taher; M. Jafari; M. Pakdel, "A New Approach for Modeling Electromagnetic Railguns," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 5, pp. 1733-1741, 2015.
8. L. Chen; J. He; S. Xia; Z. Xiao; D. Feng, "Some Key Parameters for Rectangular Caliber Railgun System," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, no. 5, pp. 2493-1497, 2013.
9. X. Guo; L. Dai; Q. Zhang; F. Lin; Q. Huang; T. Zhao, "Influences of Electric Parameters of Pulsed Power Supply on Electromagnetic Railgun System," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 9, pp. 3260-3267, 2015.
10. J. Dong; J. Zhang; J. Li; Y. Gui; Y. Cui; S. Li; N. Su, "The 100-kJ Modular Pulsed Power Units for Railgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, pp. 275-278, 2011.
11. G. Becherini; S. D. Fraia; G. Genovesi; A. Petri; S. Hundertmark; M. Schneider; B. Tellini, "Characterization of EM Emission During the Operation of Solid and Plasma Armature Rail Launchers," *IEEE Transaction on plasma science*, vol. 39, no. 1, pp. 22-28, 2011.

12. T. Siaenen; M. Schneider; J. Hogan, "Block Diagram Model for the Simulation of an Electromagnetic Rail Accelerator System," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 5, pp. 1580-1584, 2015.
13. H. D. Fair, "Progress in Electromagnetic Launch Science and Technology," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 1, pp. 93-98, 2007.
14. J. F. Kerrisk, "Current Distribution and Inductance Calculations for RAIL-GUN Conductors," NOV, Los Alamos, 1987.
15. P. Lehmann; Minh Duc Vo; W. Wenning, "Comparative study of railgun housings made of modern fiber wound materials, ceramic, or insulated steel plates," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 200-205, 2005.
16. D. A. Wetz; T. J. Watt; D. Surls; M. T. Crawford, "Investigation into the Behavior of Armature Ejecta in Electromagnetic Launchers," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 3, pp. 947-952, 2011.
17. C. Gong; X. Yu; X. Liu, "Study on the System Efficiency of the Capacitive Pulsed-Power Supply," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 5, pp. 1441-1447, 2015.
18. M. Crawford; R. Subramanian; T. Watt; D. Surls; D. Motes; J. Mallick; D. Barnette; S. Satapathy; J. Campos, "Design and Testing of a Large Caliber Railgun," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 256-260, 2009.
19. Y. Liu; F. Lin; L. Dai; Q. Zhang; L. Lee; Y. Han; W. Li; W. Lu, "Development of a Compact 450 kJ Pulsed Power Supply System for Electromagnetic Launcher," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, pp. 304-309, 2011.
20. J. Gallant; P. Lehmann, "Experiments with brush projectiles in a parallel augmented railgun," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 188-193, 2005.
21. E. Spahn; G. Buderer; C. G. Blum, "Novel PFN with current turn-off capability for electric launchers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 1, pp. 398-402, 2001.
22. L. Chen; J. He; Z. Xiao; Y. Pan, "Study on the Length of Trailing Arm of Monolithic C-Armature in a 20-mm Caliber Railgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, pp. 417-421, 2011.
23. B. Lee; S. An; S. H. Kim; Y. H. Lee; K. S. Yang; Y. S. Jin; Y. B. Kim; J. Kim; C. Cho; S. H. Yoon; I. S. Koo, "Operation of a 2.4-MJ Pulsed Power System for Railgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014.
24. J. T. Tzeng, "Structural mechanics for electromagnetic railguns," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 246-250, 2005.
25. L. A. Miller, E. E. Rice, R. W. Earhart, R. J. Conlon, "Preliminary analysis of space mission Applications for electromagnetic launchers," Final Tech. Rep. to NASA on Contract NAS3-23 354, Battelle Columbus Lab., 1984.
26. J. Nie, "An Analytic Expression of Inductance Gradient for Rail-Type Electromagnetic Launcher," *IEEE Transaction of Plasma Science*, 2012.