

## طراحی بهینه یک ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری برای تامین انرژی الکتریکی فیوز پرتابه‌های با اندازه کوچک

امیرحسین رجبی<sup>۱</sup>، حسین لکزیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۸/۰۲/۰۶، پذیرش: ۹۸/۰۶/۲۵)

### چکیده

این تحقیق به تشریح طراحی بهینه یک ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری می‌پردازد که از طریق انرژی مکانیکی پرتابه و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، انرژی مورد نیاز فیوز پرتابه را تامین می‌کند. ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری ارائه شده با بهره‌گیری از قانون القای فارادی به تولید انرژی می‌پردازد و متشکل از ۳ قطعه؛ آهنربای حلقه‌ای، بوبین فلزی و صفحه برشی می‌باشد. برای تعیین میزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترها بروی انرژی تولیدی ژنراتور و همچنین به حداکثرسانی انرژی، بهینه‌سازی با استفاده از RSM-CCD صورت گرفت تا با مشخص کردن مقدار بهینه هر پارامتر، انرژی حداکثری نیز حاصل شود. این درحالی‌است که برای شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی از نرم‌افزار Maxwell 3D استفاده شده است. با حاصل شدن ابعاد بهینه اجزای ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری، آزمایش نیز جهت راستی‌آزمایی با نتایج حل عددی انجام شد. با توجه به انرژی مکانیکی پرتابه که ناشی از شتاب اولیه می‌باشد، دستگاه تست شوک برای حل تجربی انتخاب شد. نتایج به دست آمده در رنج شتاب  $800g$  نشان می‌دهد که در حل تجربی ولتاژ  $14V$  در خازنی با ظرفیت  $100 \mu F$  در مدت  $1/9 ms$  شارژ می‌شود و این در حالی‌است که در حل عددی  $14/8V$  در مدت زمان  $1/5 ms$  شارژ می‌شود که تطابق خوبی با یکدیگر دارند. همچنین برای ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری یک سازوکار امنیت طراحی شد تا سبب فعال‌سازی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری در شتاب‌های بالاتر از  $800g$  شود و تحلیل آن نیز توسط آباکوس انجام شد. نتایج حاصله از بهینه‌سازی بیانگر آن است که نه تنها انرژی تولیدی ژنراتور الکترومغناطیسی افزایش یافته بلکه علاوه بر کاهش حجم، تاثیر هر قطعه نیز بر عملکرد ژنراتور تعیین شده است.

### کلیدواژه‌ها: منبع تغذیه، ژنراتور الکترومغناطیسی، روش المان محدود و فیوز الکتریکی

#### ۱. مقدمه

فیوز یکی از مهمترین اجزای مهمات است که وظیفه ایمن نگه داشتن مهمات در زمان حمل و نقل و فعال‌سازی در هنگام مواجهه با هدف را دارد [۱-۲]. فیوز در گذشته به صورت مکانیکی طراحی می‌شد که با توسعه فناوری‌های الکترونیکی، طراحی فیوز به سمت فیوز الکتریکی تغییر یافت [۳] که ویژگی‌هایی نظیر وزن کم، هزینه پایین ساخت و کم حجم بودن را دارد. اگرچه طی سال‌های اخیر، فیوز لیزری نیز با بهره‌گیری از فناوری آپتیک طراحی شده است که ویژگی‌هایی نظیر تداخل قوی ضد الکترومغناطیسی و دقت بالا در موقعیت هدف را دارد [۴-۵]. اما به دلیل معایبی همچون کاهش نسبت سیگنال به نویز که ناشی از پخش شدگی نور و میرایی آن در هوای نظیر: مه‌آلود، گردوغبار، دودی و غیره می‌باشد [۴-۶]، سبب محدودیت در استفاده از آن شده است.

در شکل (۱) ساختار یک فیوز الکتریکی آمده است [۷] همان‌طور که مشخص است پس از دریافت اطلاعات از واحد تنظیم‌کننده<sup>۱</sup> پردازشی بروی آن توسط مدار پردازشگر اطلاعات<sup>۲</sup> صورت گرفته و در نهایت اطلاعات پردازش شده وارد MCU<sup>۳</sup> می‌شود که متناسب با اطلاعات، MCU تصمیم نهایی مینی‌بر Fire یا Arm را ارسال می‌کند. همچنین برای انرژی درخواستی MCU، یک منبع تغذیه طراحی شده است. این منبع تغذیه ابتدا انرژی تولیدی ژنراتور را در خازن ذخیره می‌کند و سپس از طریق مدار پردازشگر انرژی<sup>۴</sup>، انرژی MCU را تامین می‌کند. در گذشته از باتری‌ها بعنوان منبع تغذیه استفاده می‌شد اما به دلیل معایبی همچون عمر محدود انبارداری و سمی بودن، با محدودیت مواجه شده‌اند. بنابراین، امروزه از منابع توان دیگری جهت تامین انرژی

<sup>1</sup> Setter Unit

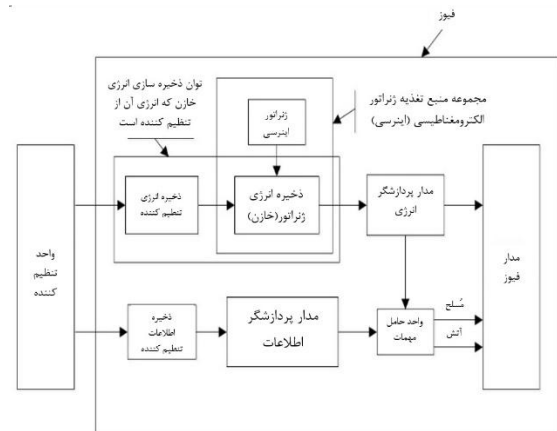
<sup>2</sup> Information Processing Circuit

<sup>3</sup> Munitions Carrier Unit (MCU)

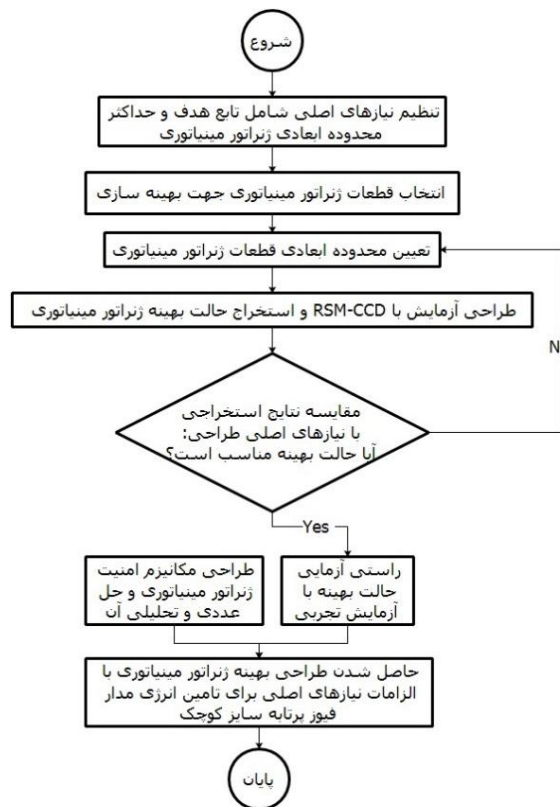
<sup>4</sup> Energy Processing Circuit

فیوز استفاده می‌شود.

شوک مکانیکی ناشی از شتاب اولیه پرتابه، انرژی الکتریکی تولید می‌کرد. پس از آن نیز با هدف توسعه آن پژوهش‌های مختلفی انجام شد [۲۰-۲۳]. درحالی‌که این ژنراتور مزایایی متعددی دارد اما معایبی همچون تعدد قطعات و مونتاژ آن‌ها سبب شد تا در این تحقیق، طراحی ژنراتور جدیدی بر مبنای همین سازوکار ارائه شود که از ساختار ساده‌تر و قطعات کمتری برخوردار باشد. با توجه به نیاز فیوز به ژنراتور سبک‌وزن در پرتابه در عین‌حالی‌که انرژی نه‌تنها آفت نکند که با افزایش مقدار مواجه شود، لذا طرح بهینه‌ای مطابق با ساختار موجود در شکل (۲) ارائه شده است که به موجب آن، علاوه بر افزایش انرژی و کاهش وزن ژنراتور، تاثیرگذاری هر یک از پارامترها بر عملکرد ژنراتور نیز استخراج شده است.



شکل (۱): ساختار یک فیوز الکتریکی [۷].



شکل (۲): فلوچارت طراحی و بهینه ژنراتور الکترومغناطیسی بکار رفته در این تحقیق.

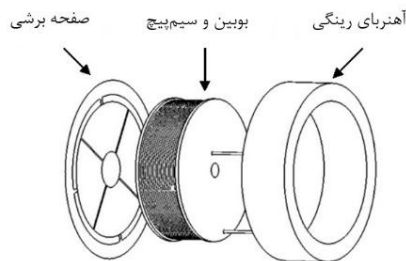
## ۲. ساختار ژنراتور الکترومغناطیسی و بهینه‌سازی چند هدفه آن

ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری ارائه شده (شکل (۳)) می‌تواند از شتاب اولیه پرتابه استفاده کرده و با تبدیل آن به انرژی الکتریکی، انرژی مورد نیاز فیوز پرتابه را در طول مدت پروازش تامین نماید. طرح این ژنراتور نسبت به نمونه قبلی که در شکل (۴) به نمایش درآمده است، علاوه بر برخورداری از تعدد

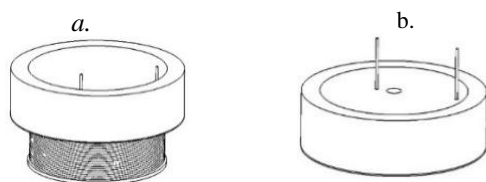
امروزه منابع توان فیوز را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد؛ توان شیمیایی و توان فیزیکی. توان شیمیایی که از طریق فرآیند شیمیایی، انرژی الکتریکی تولید می‌کند شامل باتری حرارتی و باتری اسیدی می‌باشد [۹-۸]. از جمله مزایای باتری حرارتی می‌توان به چگالی انرژی بالا، عدم تخلیه خود به خودی و قابلیت اطمینان بالا اشاره کرد [۱۱-۱۰] درحالی‌که باتری اسیدی مزایایی نظیر اِمدانس داخلی پایین، شدت جریان خروجی بالا و هزینه‌ی پایین ساخت، را دارد [۱۳-۱۲]. باین حال عیب مشترک منابع توان شیمیایی، فعال‌سازی تاخیری، حجیم و سنگین بودن آن‌ها، می‌باشد [۷] که سبب محدودیت استفاده در پرتابه‌ها ابعاد-کوچک می‌شود. از سوی دیگر، توان فیزیکی که از طریق انرژی مکانیکی به تولید انرژی الکتریکی می‌پردازد؛ ژنراتورهای نظیر الکترواستاتیک [۱۴]، الکترومغناطیس و پیزوالکتریک [۱۵]، گازی [۱۶] و بادی [۱۷] را در برمی‌گیرد. اگرچه هر یک از ژنراتورهای نامبرده دارای مزایایی می‌باشند اما معایبی همچون؛ نیاز به شارژ اولیه جهت راه‌اندازی در الکترواستاتیک، شدت جریان خروجی پایین در پیزوالکتریک، حجیم بودن و عدم استفاده از فرآیند احتراق و انرژی بادی در ژنراتورهای گازی و بادی، سبب محدودیت در استفاده از ژنراتورهای نامبرده در پرتابه‌های ابعاد-کوچک می‌شود. این درحالی‌است که ژنراتور الکترومغناطیسی نه‌تنها مزایایی نظیر؛ سبک‌وزن بودن، هزینه‌کم و امکان ساخت در ابعاد کوچک جهت استفاده در پرتابه‌های ابعاد-کوچک را دارا می‌باشد بلکه با اِمدانس داخلی پایین و شدت جریان خروجی بالا سبب تسریع در شارژ خازن شده و امکان استفاده سریع از منبع تغذیه را فراهم می‌کند.

ژنراتورهای الکترومغناطیسی مینیاتوری [۱۸] به سه ساختار تقسیم می‌شوند: هارمونیک، نوسانی و خطی. در این تحقیق فرم الکترومغناطیسی خطی مورد بررسی قرار گرفته است. برای اولین بار بازل [۱۹] ژنراتور الکترومغناطیسی خطی را معرفی کرد که با

را دارد. همچنین برای بوبین نیاز است تا از جنس فلز مغناطیسی انتخاب شود تا بتواند شار مغناطیسی آهنربا را از خود عبور دهد. که در این ژنراتور جنس بوبین از آهن کم کربن می‌باشد. در واقع، با توجه به عبور شار مغناطیسی از درون این بوبین و ایجاد یک حلقه بسته از شار به دور سیم پیچ است که سبب تولید ولتاژ می‌شود و در صورت انتخاب فلز غیر مغناطیسی یا مواد دیگر غیر مغناطیسی این کمیت تولید نخواهد شد. در حالی که ژنراتور مینیاتوری از طریق شوک ناشی از شتاب به تولید ولتاژ می‌پردازد نیاز به سازوکاری احساس شد تا ژنراتور مینیاتوری را از خطرات فعال سازی در زمان‌های ناخواسته مصون نگه دارد بدین منظور به طراحی یک صفحه برشی پرداخته شد. این صفحه به انتهای بوبین فلزی به وسیله جوش‌های نقطه‌ای متصل است تا در زمانی که ژنراتور مینیاتوری تحت شوک‌های ناشی از حمل و نقل، سقوط و یا برخورد به زمین را تجربه می‌کند، از فعال سازی آن جلوگیری به عمل آید. بدین منظور با طراحی این صفحه برشی، از عملیاتی شدن ژنراتور مینیاتوری در رنج شتاب مورد نظر اطمینان حاصل می‌شود و همچنین حداقل رنج شتاب ژنراتور مینیاتوری برای فعال سازی تعیین می‌شود. این طراحی از این حیث اهمیت دارد که سایر مدارهای الکترونیکی پرتابه، وابسته به منبع تغذیه مذکور می‌باشد. بنابراین، طراحی صورت گرفته از فعال سازی فیوز در زمان ناخواسته جلوگیری کرده و سبب عدم فعال سازی مجدد آن در زمان عملیات می‌شود.



شکل (۵): اجزای تشکیل دهنده ژنراتور.

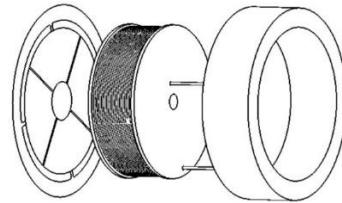


شکل (۶): حالات قرارگیری آهنربا و بوبین نسبت به یکدیگر.

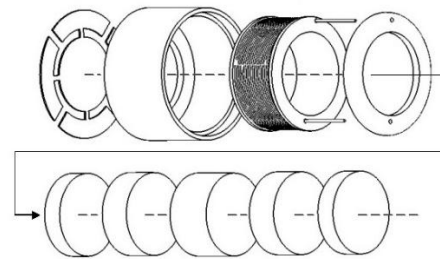
## ۲-۲. بهینه سازی با RSM-CCD

RSM یکی از روش‌های بهینه سازی است که به طور گسترده جهت به دست آوردن حالت بهینه یک خروجی که تابع چند پارامتر ورودی می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق مدل RSM-CCD که مبتنی بر ۵ سطح می‌باشد جهت

قطعات کمتر، کاستن از حجم ژنراتور، سبک تر کردن وزن آن، سبب سوار کردن ساده تر قطعات ژنراتور نیز شده است. از سوی دیگر بدلیل اهمیت حجم ژنراتور و انرژی تولیدی آن، بهینه سازی مبتنی بر RSM بروی ژنراتور الکترومغناطیسی انجام شد تا نه تنها سبب افزایش انرژی تولیدی آن و تعیین تاثیر هر یک از قطعات بروی انرژی تولیدی شود، بلکه حجم ژنراتور را نیز کاهش دهد.



شکل (۳): طرح جدید ارائه شده ژنراتور.



شکل (۴): طرح قبلی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری.

## ۲-۱. ساختار ژنراتور

ژنراتور الکترومغناطیسی ارائه شده همان طور که در شکل (۵) آمده است، از اجزایی همچون؛ آهنربای رینگ، بوبین فلزی به همراه سیم پیچ و صفحه برشی<sup>۱</sup> تشکیل شده است. نحوه قرارگیری قطعات نسبت به یکدیگر نیز بدین صورت است که آهنربا در پیرامون بوبین قرار گرفته و صفحه برشی نیز از طریق جوش‌های نقطه‌ای به بوبین متصل شده است. زمانی که پرتابه (مهمات) از اسلحه شلیک می‌شوند، پرتابه در ابتدای حرکت خود تحت تاثیر شتاب اولیه ناشی از شلیک (شوک مکانیکی) قرار می‌گیرد که می‌توان از این شتاب برای حرکت آهنربا استفاده کرد این در حالی است که در طراحی انجام شده، سایر اجزای ژنراتور ثابت بوده و حرکت از آن‌ها سلب شده است. در اثر حرکت آهنربا پیرامون بوبین، این صفحه برشی برش خورده و سبب آزاد سازی آهنربا و به تبع آن تولید انرژی می‌شود. آهنربا و بوبین در ابتدای فرآیند، نسبت به یکدیگر می‌توانند ۲ وضعیت را اختیار کنند که در شکل (۶) نشان داده شده‌اند، که از این دو حالت، حالت (b) به دلایلی همچون کاستن از حجم فضای اشغالی و تولید انرژی بیشتر انتخاب شد. جنس آهنربای رینگ از نئودیمیوم درجه ۳۵ می‌باشد. مواد تشکیل دهنده این آهنربا متشکل از نیکل، آهن و برم می‌باشد و نیروی ضد مغناطیس شونده  $10^5 \times 1/76 \text{ A/m}$

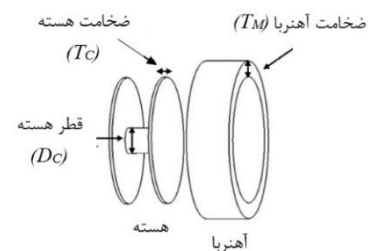
<sup>1</sup> Shear Plate

جدول (۱): ابعاد در نظر گرفته شده برای اجزای ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری متناسب با شکل (۷).

متغیرهای ورودی	نمادها	سطوح در نظر گرفته شده (برحسب میلی‌متر)				
		-۲	-۱	۰	+۱	+۲
قطر هسته	$D_c$	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
ضخامت هسته	$T_c$	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳
ضخامت آهنربا	$T_M$	۰/۵	۱/۵	۲/۵	۳/۵	۴/۵
قطر سیم کویل	$T_w$	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳

براساس تعداد پارامترها و سطوح انتخابی، RSM-CCD، ۲۵ طرح را جهت انجام آزمایش پیشنهاد کرد این درحالی است که به روش سنتی باید ۶۲۵ آزمایش صورت می‌گرفت. این ۲۵ طرح در جدول (۲-I) آمده است.

بهینه‌سازی انتخاب شد. با توجه به تعیین ۴ پارامتر هندسی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری (شکل (۷)) شامل قطر هسته، ضخامت هسته، ضخامت آهنربا و قطر سیم، جهت بهینه‌سازی و ۵ سطحه بودن هر پارامتر، محدوده تغییرات هر پارامتر به‌همراه سطوح گُذبندی شده در جدول (۱) ذکر شده‌اند. این درحالی است که ارتفاع مجموعه ژنراتور بنا به محدودیت جایگیری در فیوز، در مقدار ۷/۹mm ثابت فرض شده است.

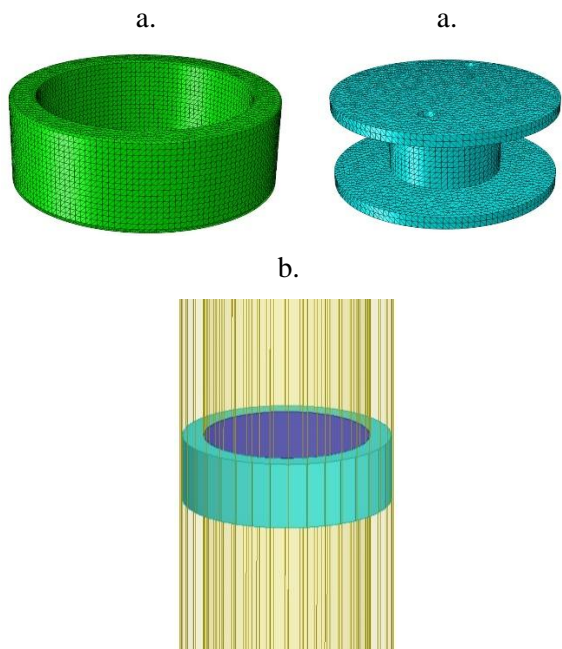


شکل (۷): پارامترهای در نظر گرفته شده جهت بهینه‌سازی.

جدول (۲): ویژگی‌ها و نتیجه هر یک از ۲۵ حالت پیشنهادی مدل RSM-CCD

آزمایش	$D_c$	$T_c$	$T_M$	$T_w$	اندوکتانس (میلی هنری)	مقاومت (اهم)	تعداد دورسیم	ولتاژ (ولت)	انرژی (میلی ژول)	
									I	II
۱)	۱۲	۱/۵	۲/۵	۰/۱	۳۴/۱۱	۱۳۰	۱۴۰۰	۱۱۴/۸	۲۴/۸	
۲)	۱۳	۱	۱/۵	۰/۱۵	۱۳/۳۵	۳۵/۷	۸۰۰	۴۳/۳	۱۵/۷	
۳)	۱۰	۱/۵	۲/۵	۰/۲	۲/۸۶	۸/۱	۴۰۰	۲۷/۸	۳۱/۴	
۴)	۱۲	۱/۵	۰/۵	۰/۲	۵/۳۸	۱۲/۲	۵۳۰	۱۱/۳	۲/۱	
۵)	۱۲	۱/۵	۲/۵	۰/۳	۰/۳۸	۱/۶	۱۵۰	۱۰/۷	۳۰/۸	
۶)	۱۴	۱/۵	۲/۵	۰/۲	۱/۱	۶/۵	۲۵۰	۱۸/۴	۲۱/۳	
۷)	۱۲	۲/۵	۲/۵	۰/۲	۰/۶۷	۴/۷	۲۰۰	۱۵/۱	۱۷/۲	
۸)	۱۲	۱/۵	۴/۵	۰/۲	۰/۵	۴	۱۸۰	۱۴/۹	۲۶/۲	
۹)	۱۱	۱	۳/۵	۰/۲۵	۰/۶	۲/۸	۲۱۰	۱۷/۶	۳۵/۶	
۱۰)	۱۳	۲	۳/۵	۰/۲۵	۰/۲	۱/۶	۱۰۰	۷/۶	۱۴/۷	
۱۱)	۱۱	۱	۳/۵	۰/۱۵	۵/۲	۲۴/۵	۶۵۰	۴۷/۸	۳۴/۴	
۱۲)	۱۳	۱	۳/۵	۰/۱۵	۲/۹	۱۸	۴۳۰	۳۳/۱	۲۴/۳	
۱۳)	۱۳	۲	۱/۵	۰/۲۵	۰/۷	۳/۳	۲۰۰	۱۱/۲	۱۲/۸	
۱۴)	۱۳	۱	۳/۵	۰/۲۵	۰/۴	۲/۳	۱۵۰	۱۱/۶	۲۳/۲	
۱۵)	۱۳	۲	۳/۵	۰/۱۵	۱/۴	۱۱/۸	۲۸۰	۲۲	۱۷/۶	
۱۶)	۱۱	۱	۱/۵	۰/۲۵	۱/۷	۵/۲	۳۶۰	۲۳/۴	۳۵/۱	
۱۷)	۱۱	۱	۱/۵	۰/۱۵	۱۲/۷	۴۰	۱۰۰۰	۴۶/۴	۱۶/۳	
۱۸)	۱۱	۲	۳/۵	۰/۲۵	۰/۳	۲	۱۴۰	۱۲/۶	۳۳/۲	
۱۹)	۱۱	۲	۱/۵	۰/۱۵	۵/۹	۲۶	۶۵۰	۳۳/۲	۱۵/۲	
۲۰)	۱۱	۲	۳/۵	۰/۱۵	۲/۵	۱۵/۸	۴۲۰	۳۷	۳۶	
۲۱)	۱۱	۲	۱/۵	۰/۲۵	۰/۸۴	۳/۵	۲۴۰	۱۲/۵	۱۷/۴	
۲۲)	۱۳	۲	۱/۵	۰/۱۵	۴/۹	۲۳/۷	۵۳۰	۲۹/۸	۱۲/۷	
۲۳)	۱۳	۱	۱/۵	۰/۲۵	۱/۴	۴/۹	۳۰۰	۱۵	۱۷/۷	
۲۴)	۱۲	۰/۵	۲/۵	۰/۲	۲/۹	۱۰/۹	۴۷۰	۲۶/۸	۱۸/۷	
۲۵)	۱۲	۱/۵	۲/۵	۰/۲	۱/۶	۷/۷	۳۳۰	۲۴/۸	۳۲/۶	

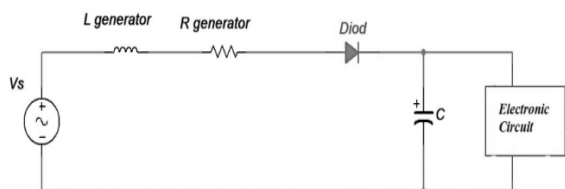
طراحی از طریق گزینه راستی‌آزمایی، نرم‌افزار به حل معادلات مکسول مربوطه پرداخت.



شکل (۸): مدل‌سازی ژنراتور الکترومغناطیسی در مکسول.

#### ۴-۲. مدار الکتریکی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری

در شکل (۹) مدار معادل ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری نشان داده شده است. با توجه به این‌که قرار است این ژنراتور به‌عنوان منبع تغذیه جهت تامین انرژی مدار الکتریکی یک پرتابه عمل کند لذا انتهای مدار ژنراتور به مدار الکترونیکی متصل شده است در حالی‌که بین واحد تامین انرژی و مصرف کننده انرژی، خازنی قرار گرفته تا بتواند با ذخیره‌سازی انرژی تولیدی، منبعی مطمئن و کافی برای تامین انرژی واحدهای مصرف کننده باشد. ظرفیت خازن از طریق روابط (۲) محاسبه شده است.



شکل (۹): مدار معادل ژنراتور به همراه مصرف کننده انرژی.

ژنراتور الکترومغناطیسی ارائه شده مداری مشابه شکل (۹) را دارد

پس از انجام آزمایش‌ها، RSM-CCD، مطابق رابطه (۱) یک مدل را ارائه می‌دهد که متناسب با نتایج، این مدل می‌تواند درجه دو و ... باشد.

$$y = f(A, B, C, D) + \epsilon \Rightarrow f(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^4 b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $y$  از پارامترهای  $A, B, C, D: x_1, x_2, x_3, x_4$  که پارامترهای طراحی استاندارد شده است و  $\epsilon$  که خطای تخمینی می‌باشد، حاصل می‌شود. در صورتی‌که محدوده متغیرهای ورودی منطقی و واریانس پاسخ همگن باشد، یک چندجمله‌ای درجه دو به مانند تقریب تیلور حاصل می‌شود.

#### ۳-۲. شبیه‌سازی مدل ژنراتور در مکسول

نرم‌افزار مکسول جهت شبیه‌سازی میدان الکترومغناطیسی انتخاب شد. با توجه به محیط‌های کاری متفاوت در مکسول، شبیه‌سازی‌ها در محیط کاری دینامیک گذرا، به دلیل تغییرات زمان و حرکت یک منبع مغناطیسی همچون آهنربا، انجام شد. از سوی دیگر باتوجه به موجود بودن ۶ حلگر مختلف در مکسول، که برای حل معادلات مکسول مبتنی بر هدف مشخص شده ایجاد شده‌اند، حلگر مغناطیس گذرا برای شبیه‌سازی انتخاب شد. در این ژنراتور قطعه متحرک، یک آهنربای رینگ می‌باشد که قرار است تحت شتاب  $g \cdot 10^8$  از مجاورت بوبین یک حرکت سریع را تجربه کند. ابتدا در بخش طراحی این محیط کاری قطعاتی همچون آهنربا و بوبین طراحی شد. بعد از طراحی، باتوجه به عدم اختصاص مستقیم شتاب به قطعه متحرک در نرم‌افزار مکسول، ابتدا یک باند حرکتی تعریف شد سپس آهنربای رینگ در درون آن قرار گرفت و در نهایت شتاب به باند حرکتی اعمال شد (شکل (۸-a)) تا نه تنها سبب حرکت آهنربای رینگ شود بلکه سبب تغییرات شار مغناطیسی در اطراف سیم‌پیچ نیز شود. مجموعه نیرو محرکه‌ی القایی می‌شود. باتوجه به تولید شار مغناطیسی از طریق سیم‌پیچ، نیاز بود تا ویژگی‌های سیم‌پیچ تعریف شود که در ماژول تحریک انجام شد. پس از وارد کردن مقاومت و اندوکتانس و تعداد دور سیم‌پیچ در این بخش، مدل‌سازی وارد بخش می‌ش‌زنی می‌شود. پس از می‌ش‌زنی مطابق شکل (۸)، مدت زمان انجام حل، ۲ms انتخاب شد که پس از چک کردن همه الزامات

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{2\alpha\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \Rightarrow \tan \varphi = \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (10)$$

با توجه به حاصل شدن پاسخ خصوصی معادله ناهمگن (۶)، و با فرض معادله (۱۱) پاسخ عمومی به فرم (۱۲) حاصل شد.

$$I_{1h} = + \frac{dQ_{1h}}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{d^2 Q_{1h}}{dt^2} + 2\alpha \frac{dQ_{1h}}{dt} + \omega_0^2 \frac{Q_{1h}}{C} = 0 \quad (12)$$

با فرض  $Q_{1h}(t) = Ke^{st}$  خواهیم داشت:

$$s^2 Ke^{st} + 2\alpha s Ke^{st} + \omega_0^2 Ke^{st} = 0 \Rightarrow \quad (13)$$

$$s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0 \Rightarrow s = \frac{-2\alpha \pm \sqrt{(2\alpha)^2 - 4\omega_0^2}}{2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (14)$$

$$\text{if: } \zeta > 1 \Rightarrow Q_{1h}(t) = K_1 e^{s_1 t} + K_2 e^{s_2 t} \quad (15)$$

$$\text{if: } \zeta = 1 \Rightarrow Q_{1h}(t) = (K_1 t + K_2) e^{s_1 t} \quad (16)$$

$$\text{if: } \zeta < 1 \Rightarrow Q_{1h}(t) = K_1 e^{-\alpha t} \cos(\omega_n t) + K_2 e^{-\alpha t} \sin(\omega_n t) \quad (17)$$

که در آن،  $\omega_n = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$  می‌باشد. با توجه به حاصل شدن پاسخ عمومی و همچنین حل بخش خصوصی معادله (۶) پاسخ نهایی به صورت (۱۸) خواهد بود:

$$I_1 = I_{1h} + I_{1p} \quad (18)$$

که در آن،  $C, R, L, L_g$  و  $I_0$  به ترتیب اندوکتانس، مقاومت الکتریکی، ظرفیت خازن و شدت جریان سیم پیچ مونتاژ شده در مدار مغناطیسی می‌باشد. با توجه به این که ولتاژ تولیدی در یک نیم سیکل سینوسی به وجود می‌آید و مورد ذخیره سازی قرار می‌گیرد لذا در بخش نخست؛ ولتاژ متناوب سینوسی را در نظر گرفته شده و در بخش دوم به دلیل عدم ذخیره سازی ولتاژ، سمت راست تساوی برابر صفر قرار گرفته است.

با توجه به حاصل شدن جریان‌ها در هر دو حالت می‌توان ولتاژ ذخیره شده در خازن را از رابطه (۱۹) محاسبه نمود.

$$V_C = \frac{1}{C} \left( \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} I_1 dt + \int_{\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} I_2 dt \right) \quad (19)$$

## ۲-۵. صفحه برشی

در طرح ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری ارائه شده، سازوکار مکانیکی وجود دارد که ضامن امنیت مجموعه ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری می‌باشد. در نقل و انتقال و یا

که در مجموع با ۳ جزء معادل گیری شده است. با توجه به تعریف توان و ارتباط مستقیم آن با حاصل ضرب ولتاژ در جریان الکتریکی و با عنایت به این که می‌توان با انتگرال گیری از توان بر حسب زمان به سطح انرژی تولیدی دست یافت لذا ظرفیت خازن جهت شارژ شدن در مدار از طریق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$P = V \times I \rightarrow E = \int P \cdot dt \rightarrow E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (2)$$

با توجه به ولتاژ تولیدی از طریق ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری و متناوب بودن آن می‌توان فرض نمود که:

$$V_s = E_0 \cdot \sin(\omega t) \quad 0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

که در آن،  $E_0$  دامنه ولتاژ تولیدی و  $\omega$  فرکانس ولتاژ تولیدی می‌باشد که توسط حرکت آهنربا به دست می‌آید. با توجه به تولید ولتاژ سینوسی توسط ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری و نیاز به ذخیره سازی نیم موج مثبت این سیگنال، لذا معادلات حاکم به دو بخش تقسیم شده‌اند. با به کارگیری قانون دوم کیرشهف برای حلقه سمت چپ شکل (۹) می‌توان نوشت:

$$L_g I_{1p} + R_g I_{1p} + \frac{1}{C} \int I_{1p} dt = V_0 \sin(\omega t) \Rightarrow \quad (4)$$

با به کارگیری تغییر متغیر رابطه (۵)، معادله (۴) به فرم (۶) تبدیل می‌شود.

$$I_{1p} = + \frac{dQ_{1p}}{dt} \quad (5)$$

$$L \frac{d^2 Q_{1p}}{dt^2} + R \frac{dQ_{1p}}{dt} + \frac{Q_{1p}}{C} = V_0 \sin(\omega t) \Rightarrow \quad (6)$$

با توجه به ناهمگن بودن معادله (۶)، معادله دارای دو جواب عمومی و خصوصی می‌باشد که برای حل بخش حل خصوصی معادله از تغییر متغیر (۷) استفاده شد.

$$Q_{1p}(t) = Q_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (7)$$

با فرض  $\alpha = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ؛ پس از جایگذاری (۷) در معادله (۶)، معادله به فرم زیر تبدیل شد.

$$-Q_0 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi) + 2\alpha \omega Q_0 \sin(\omega t - \varphi) + \omega_0^2 \sin(\omega t - \varphi) = \frac{V_0}{L} \sin(\omega t - \varphi) \Rightarrow \quad (8)$$

$$Q_0 \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\alpha\omega)^2} = \frac{V_0}{L}$$

$$Q_0 = \frac{\frac{V_0}{L}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\alpha\omega)^2}}; I_{1p} = + \frac{dQ_{1p}}{dt} \Rightarrow \quad (9)$$

$$I_{1p} = \frac{\frac{V_0}{L}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_0}{\omega} - 1\right)^2 + (2\alpha)^2}}$$

برای به دست آوردن اختلاف فاز نیز با فرض  $\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0}$  از روابط

بردار می‌توان نوشت:

سایرین بوده و همچنین بالاترین معدل مربع واریانس را بعد از مدل مکعبی دارا می‌باشند. از سوی دیگر مدل مکعبی نیز اگرچه معدل مربع واریانس بالایی دارد اما به دلیل اختیار P-Value بزرگتر از مقدار تعیین شده، نامطلوب به حساب آمده است.

جدول (۳): تحلیل آماری سطح انرژی

مدل	پیوستگی p-value	پیش‌بینی		نتیجه
		معدل	مربع	
خطی	۰/۰۰۰۴	۰/۵۴۸۲	۰/۴۲۷۰	قابل قبول
برهم‌کنش	۰/۵۴۹۹	۰/۵۲۷۶	۰/۳۳۳۶	-----
درجه ۲	۰/۰۱۷۱	۰/۷۸۱۵	-----	قابل قبول
مکعبی	۰/۳۰۸۰	۰/۹۰۳۹	-----	نشدنی

تحلیل واریانس برای پارامتر سطح انرژی نیز در قالب جدول (۴) ارائه شده است. F-Value مدل برابر ۷/۱۳ و کمتر از ۰/۱۸٪ شانس وجود دارد که F-Value ناشی از فقط نویز باشد. همچنین در این مدل جملاتی که Prob>F کمتر از ۰/۰۵ باشند، مهم و معنی‌دار هستند که نتایج حاصله بیانگر آن است، جملات  $D_c, T_M, T_M^2, T_C^2$  همگی قابل قبول و معنی‌دار می‌باشند و در این میان با توجه به مقدار F-Value پارامتر  $T_M$  (ضخامت آهنربا) می‌توان دریافت که بیشترین تاثیر را بر روی افزایش انرژی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری دارد در مقابل؛ پارامتر  $T_W$  (قطر سیم) کمترین تاثیر ممکنه را با F-Value برابر ۲/۳، بر روی انرژی دارد. با توجه به مقدار  $SS^1$  در جدول (۴) می‌توان تاثیر هر یک از پارامترها را بر حسب درصد وزنی استخراج نمود. پارامتر  $T_M$  که بیشترین F-Value را دارد به میزان ۳۶/۱٪ بر روی کمیت انرژی تاثیرگذار است و همچنین پارامترهای  $T_C, D_c$  که به ترتیب ۲۵/۶٪ و ۴/۹٪ تاثیرگذاری دارند در حالی که در بین سایر پارامترها، پارامتر  $T_W$  کمترین تاثیر را با ۲٪ دارد. همچنین با توجه به تاثیر برهم‌کنشی که پارامترها بر روی انرژی دارند می‌توان به  $D_c T_M$  و  $T_W T_C$  اشاره نمود که بیشترین تاثیرگذاری را به ترتیب با ۴/۱٪، ۲٪، ۲٪ بر روی انرژی حاصله دارند این در حالی است که درصد وزنی باقی‌مانده ۱٪ می‌باشد. مطلوبیت مدل نیز با معیارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مقدار کمیت، نسبت سیگنال به نویز برابر ۱۰/۰۰۴ می‌باشد. با توجه به تعیین عدد ۴ به عنوان مقدار استاندارد برای این کمیت و حاصل شدن عدد ۱۰/۰۰۴ که بزرگتر از مقدار

جابجایی‌ها احتمال وارد شدن شوک ناخواسته نظیر افتادن ژنراتور بر روی زمین وجود دارد که سبب فعال‌سازی آن می‌شود. به دلیل ارتباط ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری به فیوز و چاشنی پرتابه، لذا احتمال انفجار در زمان نامناسب وجود دارد به خاطر این مسئله، صفحه برشی طراحی شد تا از این قبیل عوامل مخرب جلوگیری به عمل آورد. منظور از صفحه برشی یک ورق نازک فلزی است که به انتهای بوبین فلزی از طریق جوش‌های نقطه‌ای متصل شده است تا از حرکت آهنربا که بر روی آن قرار گرفته جلوگیری کند. این صفحه به گونه‌ای طراحی شده که در شرایط خاصی از شتاب برش خورده (رابطه (۲۰)) و سبب آزادسازی آهنربای رینگ شود که به موجب آن انرژی الکتریکی تولید شود. برای طراحی این پین، ابتدا ورق فولادی با ضخامت ۰/۲mm در نظر گرفته شد سپس این ورق تحت آزمایش کشش قرار گرفت تا خواص مکانیکی آن نظیر مدول یانگ و منحنی تنش-کشش استخراج شود. پس از استخراج نتایج، با توجه به معلوم بودن شتاب اعمالی به ورق و جرم آهنربا، از طریق رابطه (۲۱) سطح مقطع موثر حاصل شد. همچنین از طریق نرم‌افزار آباکوس نیز این مسئله حل شد که نتیجه آن که در بخش نتایج آمده، ذکر شده است.

شرایطی که صفحه برشی باید داشته باشد به شرح زیر است:

$$\tau_{steel} > \tau_{load} \quad \text{الف) ژنراتور ایمن باشد} \quad (20)$$

$$\tau_{steel} \leq \tau_{load} \quad \text{ب) ژنراتور فعال شود.}$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{m \times a}{A} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)،  $\tau$  تنش برشی، F نیروی اعمالی از جانب آهنربا به صفحه برشی، A سطح مقطع موثر که آهنربا به آن نیرو وارد می‌کند، می‌باشد.

### ۳. نتایج و بحث

پس از استخراج نتایج از نرم‌افزار مکسول برای هر آزمایش مطابق جدول (۲-Π)، تحلیلی بر روی آن توسط ANOVA انجام شد و معادله انرژی استخراج شد (رابطه (۲۲)).

$$\begin{aligned} \text{انرژی} = & +۲۲/۶ - ۴/۳۶ \times A - ۱/۹ \times B + ۵/۱۸ \times C + ۱/۲۳ \times D \\ & - ۰/۲۲ \times AB - ۲/۱۴ \times AC - ۱/۳۳ \times AD + ۰/۶۷ \times BC - ۱/۵۲ \\ & \times BD - ۱/۷۹ \times CD - ۱/۳۹ \times A^2 - ۳/۴۹ \times B^2 - ۴/۴۴ \times C^2 - ۱/۰۲ \\ & \times D^2 \end{aligned} \quad (22)$$

تحلیل آماری مدل ارائه شده در جدول (۳) لیست شده است. بر مبنای نتایج و تحلیل آماری، مدل رگرسیون درجه دو و خطی معنی‌دار است. این در حالی است که P-Value آن‌ها کمتر از

<sup>1</sup> Sum Of Squares

استاندارد است می‌توان نتیجه گرفت نسبت سیگنال به نویز به‌عنوان یک طراحی بهینه مورد استفاده قرار بگیرد. حاصله معنی‌دار است. لذا می‌توان گفت که مدل ارائه‌شده می‌تواند

#### جدول (۴): تحلیل واریانس مدل درجه دو سطح پاسخ پارامتر انرژی.

پاسخ تحلیل واریانس برای مدل درجه دوم سطح پاسخ						
جدول آنالیز واریانس						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F	Remark
Model	۱۷۸۴/۱۵	۱۴	۱۲۷/۴۴	۷/۱۳	۰/۰۰۱۸	معنی‌دار
$D_c$	۴۵۶/۷۵	۱	۴۵۶/۷۶	۲۵/۵۶	۰/۰۰۰۵	معنی‌دار
$T_c$	۸۷/۰۲	۱	۸۷/۰۲	۴/۸۷	۰/۰۵۱۹	
$T_M$	۶۴۳/۷۷	۱	۶۴۳/۷۷	۳۶/۰۲	۰/۰۰۰۱	معنی‌دار
$T_w$	۳۶/۲۶	۱	۳۶/۲۶	۲/۰۳	۰/۱۸۴۸	
$D_c \times T_c$	۰/۷۷	۱	۰/۷۷	۰/۰۴۳	۰/۸۴۰۲	
$D_c \times T_M$	۷۳/۵۳	۱	۷۳/۵۳	۴/۱۱	۰/۰۰۷	
$D_c \times T_w$	۲۸/۳۶	۱	۲۸/۳۶	۱/۵۹	۰/۲۳۶۴	
$T_c \times T_M$	۷/۱۶	۱	۱۶/۷	۰/۴۰	۰/۵۴۱۱	
$T_c \times T_w$	۳۶/۹۱	۱	۳۶/۹۱	۲/۰۷	۰/۱۸۱۲	
$T_M \times T_w$	۵۱/۴۸	۱	۵۱/۴۸	۲/۸۸	۰/۱۲۰۵	
$D_c^2$	۲۱/۷۱	۱	۲۱/۷۱	۲/۲۱	۰/۲۹۶۲	
$T_c^2$	۱۳۷/۲۸	۱	۱۳۷/۲۸	۷/۶۸	۰/۰۱۹۷	معنی‌دار
$T_M^2$	۲۲۲/۲۹	۱	۲۲۲/۲۹	۱۲/۴۴	۰/۰۰۵۵	معنی‌دار
$T_w^2$	۱۱/۸۴	۱	۱۱/۸۴	۰/۶۶	۰/۴۳۴۶	
باقی مانده	۱۸۷/۷۱	۱۰	۱۷/۸۷			
مجموع هسته	۱۹۶۲/۸۶	۲۴				
Std. Dev.	۴/۲۳		مربع واریانس	۰/۹۰۹۰		
Mean	۲۲/۶۸		معدل مربع واریانس	۰/۷۸۱۵		
C.V. %	۱۸/۶۴		نسبت سیگنال به نویز	۱۰/۰۰۴		

شانس وجود دارد که F-Value ناشی از فقط نویز باشد. همچنین در این مدل جملاتی که Prob>F کمتر از ۰/۰۵ باشند، مهم و معنی‌دار هستند که نتایج حاصله بیانگر آن است، جملات  $D_c$ ،  $T_M$ ،  $T_M^2$ ،  $T_c^2$  همگی قابل قبول و معنی‌دار می‌باشند و در این میان با توجه به مقدار F-Value پارامتر  $T_M$  (ضخامت آهنربا) می‌توان دریافت که بیشترین تاثیر را بر روی افزایش انرژی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری دارد در مقابل؛ پارامتر  $T_w$  (قطر سیم) کمترین تاثیر ممکنه را با F-Value برابر ۲/۳، بر روی انرژی دارد. با توجه به مقدار  $SS^1$  در جدول (۴) می‌توان تاثیر هر یک از پارامترها را بر حسب درصد وزنی استخراج نمود. پارامتر  $T_M$  که بیشترین F-Value را دارد به میزان ۳۶/۱٪ ~ بر روی کمیت انرژی تاثیرگذار است و همچنین پارامترهای  $T_c$ ،  $D_c$  که به ترتیب ۲۵/۶٪ ~ و ۴/۹٪ ~ تاثیرگذاری دارند در حالی که در بین سایر پارامترها، پارامتر  $T_w$  کمترین تاثیر

مطابق نتایج حاصله از RSM-BBD سطوح بهینه هر یک از پارامترها حاصل شد که در جدول (۶) لیست شده‌اند.

#### جدول (۵): سطوح بهینه حاصله از روش RSM-CCD.

پارامترهای ژنراتور	$T_w$	$T_M$	$T_c$	$D_c$	انرژی پیش- بینی شده
مقدار	۰/۱۵	۳/۵	۲	۱۱	۳۶/۴ mj

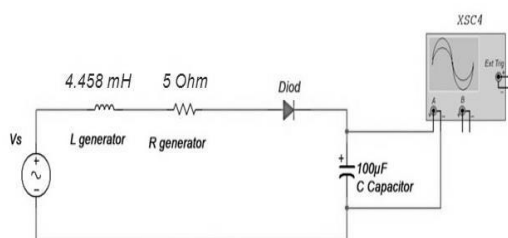
نیاز است تا ولتاژ الکتریکی تولید شده از طریق یک مدار، در داخل یک خازن با ظرفیت معین ذخیره شود. ظرفیت خازن از طریق رابطه (۲۳) محاسبه شد. شارژ شدن خازن با توجه به تولید ولتاژ با فرکانس معلوم صورت گرفت. شکل (۱۰) نیز مدار طراحی شده را نشان می‌دهد که اسیلوسکوپ به دو سر خازن جهت مشاهده شارژ شدن، اعمال شده است و در شکل (۱۱) نحوه شارژ شدن خازن مشاهده می‌شود.

تحلیل واریانس برای پارامتر سطح انرژی نیز در قالب جدول (۴) ارائه شده است. F-Value مدل برابر ۷/۱۳ و کمتر از ۰/۱۸٪

<sup>1</sup> Sum Of Squares



در حدود  $5\Omega$  و اندوکتانس  $4/458\text{ mH}$  را دارا می‌باشد.



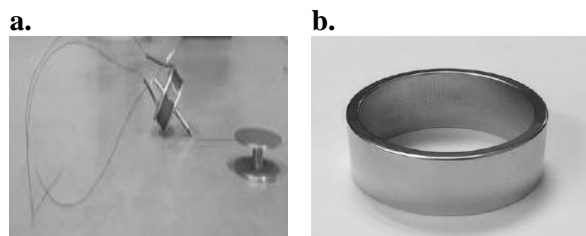
شکل (۱۰): شماتیکی از مدار در نظر گرفته شده جهت شارژ خازن.

### ۳-۱. ساخت ژنراتور بهینه و نتایج تجربی آن

با توجه به ویژگی‌های مورد نیاز طرح بهینه ژنراتور الکترومغناطیسی که در جدول (۶) آمده است، پس از استخراج مشخصات هندسی ژنراتور الکترومغناطیسی بهینه، قطعات ساخته و مونتاژ شدند (شکل (۱۱)). برای انجام آزمایش؛ به دلیل قرارگیری ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری در شتاب  $800\text{ g}$ ، فیکسچری ساخته شد تا علاوه بر سلب حرکت ژنراتور الکترومغناطیسی در حین آزمایش، آن را نیز به دستگاه تست شوک متصل کند.

جدول (۶): ویژگی‌های مورد نیاز فیوز پرتابه.

مورد مورد نیاز	خصوصیت
۱) قطر مجموعه ژنراتور	$\leq 30\text{ mm}$
۲) ارتفاع مجموعه ژنراتور	$\leq 10\text{ mm}$
۳) وزن ژنراتور	$\leq 15\text{ gr}$
۴) شارژ ولتاژ تولیدی در $100\mu\text{F}$	$\leq 12\text{ V}$
۵) زمان شارژ ولتاژ تولیدی در $100\mu\text{F}$	$\leq 2\text{ msec}$
۶) شتاب بحرانی برای عملیاتی شدن	$\leq 500\text{ g}$



شکل (۱۱): قطعات ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری به همراه.

را با  $2\% \sim$  دارد. همچنین با توجه به تاثیر برهم کنشی که پارامترها بروی انرژی دارند می‌توان به  $T_w T_c$  و  $T_w T_M$  و  $D_c T_M$  اشاره نمود که بیشترین تاثیرگذاری را به ترتیب با  $4/1\% \sim$ ،  $2\% \sim$ ،  $2\% \sim$  بروی انرژی حاصله دارند این در حالی است که درصد وزنی باقی مانده  $1\% \sim$  می‌باشد. مطلوبیت مدل نیز با معیارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مقدار کمیت، نسبت سیگنال به نویز برابر  $10/004$  می‌باشد. با توجه به تعیین عدد ۴ به عنوان مقدار استاندارد برای این کمیت و حاصل شدن عدد  $10/004$  که بزرگتر از مقدار استاندارد است می‌توان نتیجه گرفت نسبت سیگنال به نویز حاصله معنی دار است. لذا می‌توان گفت که مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان یک طراحی بهینه مورد استفاده قرار بگیرد.

مطابق نتایج حاصله از RSM-BBD سطوح بهینه هر یک از پارامترها حاصل شد که در جدول (۶) لیست شده‌اند.

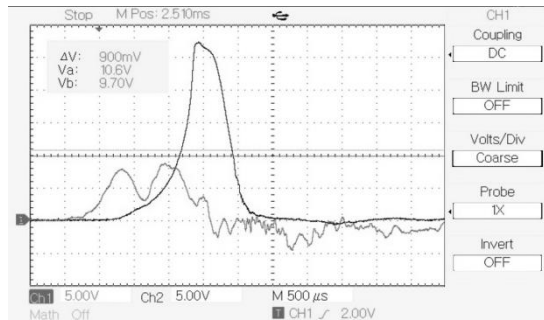
جدول (۵): سطوح بهینه حاصله از روش RSM-CCD.

پارامترهای	$T_w$	$T_M$	$T_c$	$D_c$	انرژی
ژنراتور					پیش‌بینی شده
مقدار	$0/15$	$3/5$	$2$	$11$	$36/4\text{ mJ}$

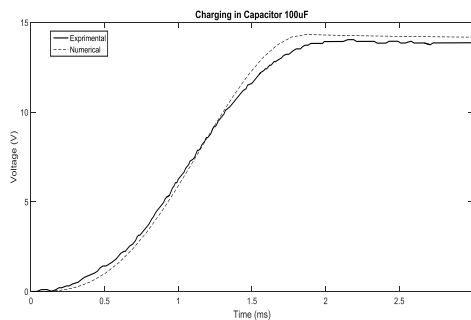
نیاز است تا ولتاژ الکتریکی تولیدشده از طریق یک مدار، در داخل یک خازن با ظرفیت معین ذخیره شود. ظرفیت خازن از طریق رابطه (۲۳) محاسبه شد. شارژ شدن خازن با توجه به تولید ولتاژ با فرکانس معلوم صورت گرفت. شکل (۱۰) نیز مدار طراحی شده را نشان می‌دهد که اسیلوسکوپ به دو سر خازن جهت مشاهده شارژ شدن، اعمال شده است و در شکل (۱۱) نحوه شارژ شدن خازن مشاهده می‌شود.

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \Rightarrow C = \frac{2E}{V^2} \quad (23)$$

که در رابطه (۲۳)،  $E$  انرژی تولیدی برحسب  $[J]$ ،  $V$  ولتاژ تولیدی برحسب  $[V]$  و  $C$  نیز ظرفیت خازن برحسب  $[F]$  می‌باشد. با توجه به قانون القای فارادی، افزایش تعداد دور سیم سبب می‌شود تا ولتاژ تولیدی نیز بیشتر شود لذا بنابر فضای باقی‌مانده در بوبین جهت سیم‌پیچی از  $25$  حالت پیشنهادی RSM-CCD، تمام آن فضا با تعداد دور سیم مطابق با جدول (II-۲) پُر شد. پس از حاصل شدن حالات بهینه، از  $400$  دور سیم لاکه با قطر  $0/2$  میلی‌متر در فضای موجود استفاده شد که مقاومت الکتریکی



شکل (۱۳): سیگنال ولتاژ تولیدی به همراه سیگنال شتاب اِعمالی به ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری



شکل (۱۴): مقایسه بین شارژ خازن  $100\mu\text{F}$  با دو روش عددی و تجربی.

### ۲-۳. طراحی سازوکار امنیت ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری

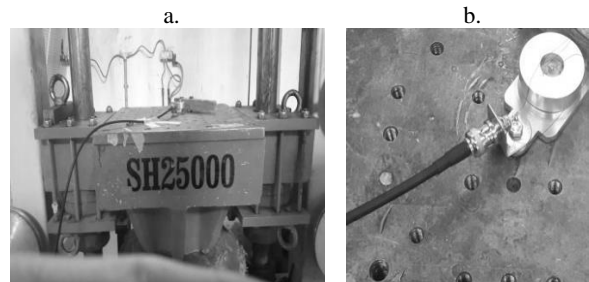
در طراحی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری یک سازوکار امنیت به کار رفته است. این سازوکار به گونه‌ای طراحی شده تا از فعال سازی ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری و به متعاقب آن تولید انرژی، در شتاب‌های زیر  $800\text{g}$  جلوگیری کند (رابطه (۲۴)). این طراحی شامل یک ورق فولادی با ضخامت  $0.2\text{mm}$  است. این ورق به وسیله جوش‌های نقطه‌ای به انتهای محفظه ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری متصل می‌شود. با توجه به تنش برشی ورق فولادی و همچنین جرم و شتاب قطعه متحرک ژنراتور، با استفاده از رابطه (۲۴) سطح مقطع موثر ورق برابر  $0.274\text{mm}^2$  حاصل شد.

$$\tau_{ts} = \frac{F}{A} \quad (24)$$

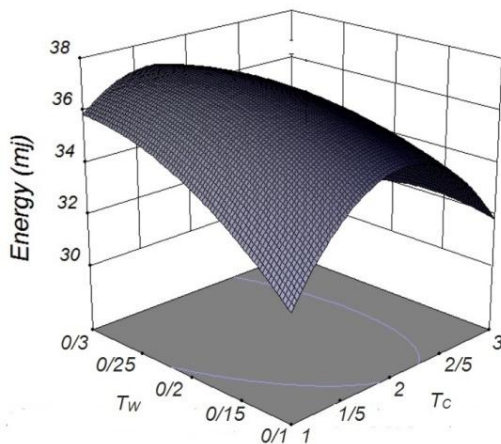
که در آن،  $\tau_{ts}$  تنش برشی برحسب [Pa]،  $F$  نیروی وارد شده به ورق برشی برحسب [N] و  $A$  نیز سطح مقطع موثر ورق که برحسب [ $\text{mm}^2$ ] می‌باشد. شکل (۱۱) تساویری از ورق و برش ورق توسط هسته ژنراتور الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.

فیکسچر (a): بوبین و بوبین سیم‌پیچی شده، (b): آهنربای رینگ (c): مونتاژ کامل ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری.

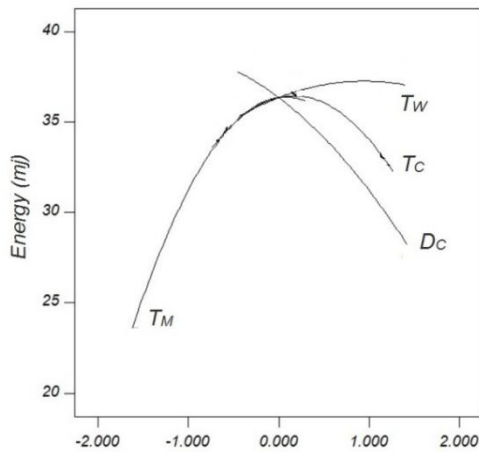
دستگاه انجام آزمایش تجربی، دستگاه تست شوک انتخاب شد. همچنین برای اندازه‌گیری شتاب اِعمالی به مجموعه ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری از یک شتاب‌سنج مستقر بروی دستگاه استفاده شد (شکل (۱۲)). شکل (۱۳) سیگنال شارژ خازن به همراه سیگنال شتاب اِعمالی را نشان می‌دهد که مشخص می‌کند خازن  $100\mu\text{F}$  در مدت زمان  $1/9\text{ms}$  شارژ می‌شود. همچنین شکل (۱۴) نیز مقایسه‌ای بین شارژ خازن در دو روش عددی و تجربی را به تصویر کشیده است.



شکل (۱۲): دستگاه تست شوک به همراه مونتاژ ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری بروی آن.



شکل (۱۷): برهم‌کنش میان پارامترهای ضخامت هسته و قطر سیم.

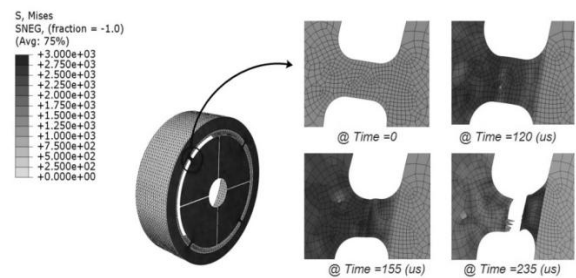


شکل (۱۸): میزان تاثیرگذاری ۴ پارامتر بر انرژی.

### ۶. نتیجه‌گیری

از پارامترهای مهم در توسعه منابع تغذیه جهت تامین انرژی مدارهای الکتریکی پرتابه‌ها می‌توان به؛ کم حجم بودن، سبک وزن بودن و راندمان بالای انرژی اشاره کرد. بدین جهت ژنراتور الکترومغناطیسی مبتنی بر آهنربای رینگی ارائه شد تا برخلاف نمونه قبلی در کاهش حجم و وزن و افزایش انرژی اثرگذار باشد. با توجه به به‌کارگیری روش RSM برای بهینه‌سازی این ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری و نتایجی که حاصل شد می‌توان تحلیل نتایج را به‌صورت زیر جمع‌بندی نمود:

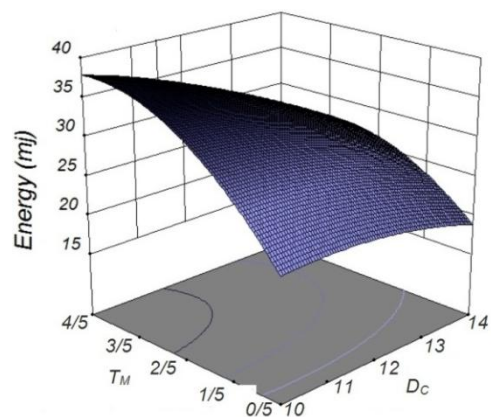
(۱) در بخش آهنربا می‌توان نتیجه گرفت با توجه به افزایش انرژی که از افزوده شدن قطر آهنربا حاصل می‌شود؛ قطر آهنربا رابطه مستقیمی با انرژی دارد بطوری‌که با افزایش قطر آهنربا می‌توان انتظار انرژی بیشتری داشت.



شکل (۱۵): برش خوردن بین برشی توسط آهنربای رینگی.

### ۳-۳. بحث بروی نتایج

اشکال ۳ بعدی سطح پاسخ ارائه شده توسط مدل رگرسیون درجه دو رابطه (۲) تشریح می‌شوند که می‌توان با کمک آن‌ها تأثیر هر یک از پارامترهای مستقل بروی کمیت انرژی را بررسی کرد. شکل (۱۶) برهم‌کنش میان دو پارامتر قطر هسته و ضخامت آهنربا بروی کمیت انرژی می‌باشد که با توجه به شکل، درحالی- که سایر پارامترها در مقدار بهینه خود ثابت فرض شده‌اند مشخص می‌شود هرچه پارامترهای ارتفاع و قطر آهنربا افزایش می‌یابد انرژی تولیدی نیز بیشتر می‌شود. با تعیین ضخامت آهنربا برابر ۳/۵mm و قطر هسته ۱۱mm بیشترین مقدار انرژی که معادل ۳۶/۴ mJ باشد، حاصل شده است. در شکل (۱۷) نیز، که سایر پارامترها در مقدار بهینه خود ثابت فرض شده‌اند اثرگذاری دو پارامتر قطر سیم بوبین و ضخامت هسته بروی کمیت انرژی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که ضخامت هسته، کمترین تاثیرگذاری را بر تولید انرژی پس از قطر سیم دارد این درحالی است که با اختیار ضخامت ۲mm، بیشترین انرژی حاصل می‌شود. از سوی دیگر، قطر سیم نیز با مقدار ۰/۱۵mm سبب تولید بیشترین انرژی شده است. همچنین شکل (۱۸) نیز میزان تاثیرگذاری ۴ پارامتر بروی کمیت انرژی را نشان می‌دهد که هرچه شیب هر پارامتر بیشتر باشد از تاثیرگذاری بیشتری بر کمیت انرژی برخوردار است.



شکل (۱۶): برهم‌کنش میان پارامترهای قطر هسته و ضخامت آهنربا.

- [8] Standard, "Fuze and Fuze Components, Environmental and Performance Tests," Department of Defense Test Method, MIL-STD-331C, USA, 2005.
- [9] Sang-Hee Yoon, Joong-Tak Son, and Jong-Soo Oh, "Miniaturized g- and spin-activated Pb/HBF<sub>4</sub>/PbO<sub>2</sub> reserve batteries as power sources for electronic fuzes," Journal of Power Sources, vol. 162, no. 2, pp. 1421-1430, 2006.
- [10] Jaewan Kim, Jinwoo Oh, and Hoseong Lee, "Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles," Applied Thermal Engineering, vol. 149, pp. 192-212, 2019.
- [11] Jiabin Yan, Xiaoping Lia Deyang Yan, and Youguo Chen, "Review of Micro Thermoelectric Generator," Journal of Microelectromechanical systems I, vol. 27, no. 1, pp. 1-18, 2018.
- [12] P. T. Moseley, D. A. J. Rand, A. Davidson, and B. Monahov, "Understanding the functions of carbon in the negative active-mass of the lead-acid battery: A review of progress," Journal of Energy Storage, vol. 27, pp. 272-90, 2018.
- [13] G. J. May, A. Davidson, and B. Monahov, "Lead batteries for utility energy storage: A review," Journal of Energy Storage, vol. 15, pp. 145-57, 2018.
- [14] V. Janicek and M. Husak, "Designing the 3D electrostatic microgenerator," Journal of Electrostatics, vol. 17, no. 3, pp. 214-219, 2013.
- [15] Abu Raihan Mohammad Siddique, Shohel Mahmud, and Bill Van Heyst, "A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms," Energy Conversion and Management, vol. 106, pp. 728-47, 2015.
- [16] S. K. Chou, W. M. Yang, K. J. Chua, J. Li, and K. L. Zhang, "Development of micro power generators -A review," Applied Energy, vol. 88, no. 1, pp. 1-16, 2011.
- [17] A. Mishra, P. M. Tripathi, and K. Chatterjee, "A review of harmonic elimination techniques in grid connected doubly fed induction generator based wind energy system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 89, pp. 1-15, 2018.
- [18] D. P. Arnold, "Review of Microscale Magnetic Power Generation," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 11, pp. 3940-51, 2007.
- [19] C. Buzzell, "Electrical setback generator," United states of America, Patent 3,981,245, September 21, 1976.
- [20] Yue Fu, Wen-zhong Lou and Long-fei Zhang, "The simulation for a new anomagnetic setback generator," J. Nanoengineering and Nanosystems, vol. 225, pp. 177-180, 2012.
- [21] Qiao Lu, Liming Li, and Guofu Yin, "Optimization Design of Setback Generator For Initiating Explosive Devices," MATEC Web of Conferences, pp. 1-5, 2017.
- [22] C. Pompermaier, K. Flavio Jorge Haddad, A. Zambonetti, M. V. Ferreira da Luz, and Ion Boldea, "Small Linear PM Oscillatory Motor: Magnetic Circuit Modeling Corrected by Axisymmetric 2-D FEM and Experimental Characterization," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 3, pp. 1389-1396, 2011.
- [23] Jiabin Wang, Weiya Wang, Geraint W. Jewell, and David Howe, "A Low-Power, Linear, Permanent-Magnet Generator/Energy Storage System," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 3, pp. 640-648, 2002.

(۲) در بخش قطر بوبین فلزی؛ نتایج حاصله نشان می‌دهد که هرچه قطر بوبین کمتر باشد در به حداکثر رساندن انرژی نقش بیشتری ایفا می‌کند در حالی که با افزایش قطر، انرژی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.

(۳) در بخش ضخامت بوبین نیز با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که این ضخامت تابعی از قطر آهنربا، قطر بوبین فلزی و همچنین شتاب اولیه است که متناسب با انتخاب هر یک از عوامل ذکر شده، ضخامت مقدار متفاوتی را تجربه خواهد کرد لذا به مانند ۲ نتیجه‌گیری قبلی، نمی‌توان رابطه الکترومغناطیسی بین انرژی و ضخامت بوبین پیدا کرد.

همچنین طراحی و تحلیل دو سازوکار این ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری بر مبنای روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزارهای Maxwell 3D و Abaqus شکل گرفته است. ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری ارائه‌شده در حالت تجربی نشان داده که می‌تواند ۱۴ V را در مدت زمان ۱/۹ ms در خازنی با ظرفیت ۱۰۰ uF شارژ کند که در قیاس با روش عددی خطای ۵% را دارا می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان نتیجه گرفت که از ژنراتور الکترومغناطیسی مینیاتوری ارائه شده می‌توان به‌عنوان راه‌حلی مناسب، بهینه و جایگزین باطری‌ها جهت تامین انرژی مدارهای الکتریکی پرتابه‌ها استفاده کرد.

## ۷. مراجع

- [1] Xiuyuan Li, Yulong Zhao, Tengjiang Hu, Wenju Xu, You Zhao, Yingwei Bai, and Wei Ren, "Design of a large displacement thermal actuator with a cascaded V-beam amplification for MEMS safety-and-arming devices," Microsyst. Technol., vol. 21, no. 11, pp. 2367-74, 2015.
- [2] Tengjiang Hu, Yulong Zhao, You Zhao, and Wei Ren, "Integration design of a MEMS based fuze," Sensors and Actuators A, vol. 268, pp. 193-200, 2017.
- [3] Sang-Hee Yoon, Jong-Soo Oh, Young-Ho Lee, and Seok-Woo Lee, "Miniaturized Inertia Generators as Power Supplies for Small-Caliber Fuzes." IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 7, pp. 2300-2306, 2005.
- [4] Wei Zhang, Yinlin Li, Zhonghua Huang, and Chao Ma, "Fog backscattering interference suppression algorithm for FMCW laser fuze based on normalized frequency spectrum threshold," Optik, vol. 131, pp. 188-193, 2017.
- [5] Fengjie Wang, Huimin Chen, Chao Ma, and Lixin Xu, "Construction of backscattering echo caused by cloud in laser fuze," Optik, vol. 171, pp. 153-160, 2018.
- [6] Yujuan Tang, Zhong Yang, Xinjie Wang, and Jiong Wang, "Research on the piezoelectric ultrasonic actuator applied to smart fuze safety system," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 53, pp. 303-313, 2017.
- [7] Li Hong, He Zhang, and Hao-jie Li, "Design of a Fuze Power Supply to Small Caliber Time Fuze," Applied Mechanics and Materials, vol. 433-735, pp. 197-200, 2013.

---

## **Optimum Design of A Miniaturized Electromagnetic Generator for Electrical Energy Supply of A Small Size Projectile's Fuse**

**A. H. Rajabi, H. Lexian \***

**Malek-Ashtar University of Technology**

(Received: 26/04/2019, Accepted: 16/09/2019)

### **Abstract**

*This research describes the optimum design of a Miniaturized Electromagnetic Generator (MLG) which supplies electrical energy for the projectile fuse. It supplies the energy by converting the mechanical energy of the projectile into electrical energy. The MLG presented, consists of three parts; a ring magnet, a metal bobbin, and a shear plate and produces the energy by applying the Faraday induction law. To maximize the energy and determine the effect of each parameter on the energy, optimization was performed using RSM, while numerical simulations were performed by Maxwell 3D. Having obtained the MLG parts' optimum dimensions, an experimental test was used to verify the numerical results. Due to the mechanical energy of the projectile resulting from the initial acceleration, the shock test was selected as the experimental test. The results obtained in the 800'g acceleration range with a capacitor of 100uF show the charge rates of 14V in 1.9ms and 14.8V in 1.5ms for the experimental test and the numerical method respectively, displaying good conformity between them. Also, a safety mechanism was designed to activate MLG at accelerations higher than 800'g and its analysis was carried out by Abaqus. In addition to reducing the volume, the results of the optimization led not only to increased energy production by MLG, but also, to the determination of each part's effect on the MLG's performance.*

**Keywords:** Power Supply, Electromagnetic Generator, FEM, Electrical Fuse

---

\* Corresponding author E-mail: Lexian@mut.ac.ir