

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد یک تفنگ کویلی القایی

نگارنده: مصطفی شریفی

استاد راهنما

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور

دکتر امیر حسن نیا خیبری

بهمن ۱۳۹۶



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مصطفی شریفی با شماره دانشجویی ۹۴۱۰۲۴۴ رشته مهندسی برق- قدرت گرایش الکترونیک قدرت تحت عنوان: طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد یک تفنگ کویلی القایی که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u>خیلی خوب</u>)	☒ مردود
نوع تحقیق: ☒ نظری ☒ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر احمد دالبر	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر حسن نیا	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید مصطفی میرزاز	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسن تبار	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علیان		

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد دالبر

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ:

ساحت مقدس ولی عصر (عج)...

تشکر و قدردانی:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گرانقدر و دلسوزم، جناب آقای پروفیسور احمد دارابی، در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. همچنین سپاس از استاد مشاور دلسوزم جناب آقای دکتر امیر حسن‌نیا خیبری، دوست، همکار و همکلاسی عزیز آقای وحید منصوری‌فرد که خالصانه در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه در کنارم بودند و در نهایت، از خانواده عزیزم و دوستان مهربانم که همواره با تشویق خود باعث دلگرمی بنده در طی این دوره بودند تقدیر و تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **مصطفی شریفی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق قدرت - گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی** دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان **طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد یک تفنگ کویلی القایی تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی به خاطر مزایای ذاتی خود نسبت به تفنگ‌های با سوخت شیمیایی، از جمله نداشتن دود، صدا و جرقه زنی هنگام شلیک، قابلیت استفاده چند باره، عدم نیاز به اتصال بین گلوله و لوله و قابلیت دستیابی به سرعت‌های بالا، پتانسیل بالایی برای استفاده در کاربردهای نظامی، فضایی و صنعتی را دارا است. در این پایان‌نامه ابتدا طراحی یک تفنگ کوپلی القایی صورت می‌پذیرد. سپس این طراحی توسط نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer تحلیل عملکرد می‌شود. نتایج بدست آمده به کمک مدل تحلیلی و محیط سیمولینک متلب صحت‌سنجی می‌شوند. سپس عملکرد تفنگ طراحی شده (مخصوصاً سرعت پرتابه) با اصلاح پارامترهای کوپل استاتور تفنگ به روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer، تغییر ساختار تفنگ کوپلی القایی از حالت استوانه‌ای به مخروطی و استفاده از هسته مغناطیسی بهبود بخشیده شده است. همچنین بررسی تأثیر تغییر جنس پرتابه از مس به آلومینیوم و تغییر ساختار پرتابه از حالت سلونوئیدی به یکپارچه بر روی عملکرد تفنگ کوپلی القایی صورت پذیرفته است. در نهایت نیز تفنگ کوپلی القایی ساخته شده و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد. نتایج آزمایشات عملی تایید کننده نتایج شبیه‌سازی است.

کلمات کلیدی: تفنگ کوپلی القایی، روش اجزاء محدود، بهبود عملکرد، طراحی، مدل‌سازی، ساخت

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

شریفی م. دارابی ا. حسن‌نیا خیبری ا. و منصوری فرد و، (۱۳۹۶)، " طراحی و بررسی تأثیر تغییر پارامترهای کوئل بر روی عملکرد تفنگ کوئلی القایی "، ششمین کنفرانس بین‌المللی الکترومغناطیس مهندسی ایران (کام)، دانشگاه مالک اشتر.

فهرست مطالب

فصل اول: مفاهیم اولیه و ساختارهای تفنگ کویلی ۱

۱-۱ مقدمه‌ای بر تفنگ‌های کویلی ۲

۱-۱-۱ مزایای پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی ۵

۱-۱-۲ معایب پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی ۶

۲-۱ تفنگ کویلی ۶

۳-۱ اجزاء تفنگ‌های کویلی ۱۱

۱-۳-۱ منابع تغذیه ولتاژ بالا ۱۲

۲-۳-۱ بانک خازنی ۱۲

۳-۳-۱ منابع تغذیه ولتاژ پایین ۱۳

۴-۳-۱ کنترلر شارژ ۱۳

۵-۳-۱ مدار سنسورها ۱۳

۶-۳-۱ میکروکنترلر ۱۴

۷-۳-۱ مدار تریگر ۱۴

۸-۳-۱ سیم‌پیچ‌ها ۱۵

۴-۱ تئوری عملکرد تفنگ کویلی القایی ۱۵

فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته تفنگ‌های کویلی القایی ۱۹

۲۰	 ۱-۲ ساختار سیم‌پیچی
۲۲	 ۲-۲ ساختار پرتابه
۲۳	 ۳-۲ تأثیر پارامترهای بانک خازنی
۲۴	 ۴-۲ تأثیر نیروهای مکانیکی بر اجزاء تفنگ کویلی القایی
۲۶	 ۵-۲ استفاده از هسته مغناطیسی
۲۷	 ۶-۲ استفاده از ساختارهای چندمرحله‌ای
۳۰	 ۷-۲ بهینه‌سازی تفنگ کویلی القایی با استفاده از الگوریتم‌های مرسوم

فصل سوم: طراحی تفنگ کویلی القایی..... ۳۳

۳۴	 ۱-۳ مقدمه
۳۴	 ۲-۳ تعریف مسئله طراحی اولیه
۳۵	 ۳-۳ طراحی اولیه
۳۵	 ۱-۳-۳ طراحی خازن
۳۵	 ۲-۳-۳ طراحی کوئل و پرتابه
۳۸	 ۳-۳-۳ طراحی لوله
۳۹	 ۴-۳ شبیه‌سازی طراحی اولیه در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer
۴۱	 ۵-۳ تصدیق نتایج طراحی با استفاده از روابط تحلیلی و سیمولینک متلب
۴۵	 ۶-۳ اصلاح طراحی تفنگ به روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار JMAG-Designer
	 ۷-۳ تغییر ساختار تفنگ کویلی القایی از حالت استوانه‌ای به مخروطی به منظور افزایش سرعت
۴۶	 پرتابه

۸-۳ بررسی تأثیر هسته بر تفنگ کویلی القایی ۴۸

۹-۳ بررسی تغییر جنس پرتابه از مس به آلومینیوم و همچنین تغییر ساختار آن از حالت

سلونوئیدی به یکپارچه ۴۸

۱۰-۳ ساخت تفنگ کویلی القایی ۴۸

فصل چهارم: شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد تفنگ کویلی القایی.....۵۱

۱-۴ شبیه‌سازی طراحی اولیه ۵۲

۲-۴ تصدیق نتایج طراحی با استفاده از روابط تحلیلی و سیمولینک متلب ۶۱

۳-۴ اصلاح طراحی تفنگ به روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار JMAG-Designer ۶۴

۱-۳-۴ تغییر تعداد طبقه‌ها در قطرهای مختلف ۶۵

۲-۳-۴ تغییر طول کوئل در قطرهای مختلف ۶۶

۴-۴ تغییر ساختار تفنگ کویلی القایی از حالت استوانه‌ای به مخروطی ۶۸

۵-۴ بررسی تأثیر هسته بر تفنگ کویلی القایی ۷۱

۶-۴ بررسی تغییر جنس پرتابه از مس به آلومینیوم و تغییر ساختار آن از حالت سلونوئیدال به

یکپارچه ۷۲

۷-۴ ساخت تفنگ کویلی القایی ۷۵

۱-۷-۴ خازن ۷۵

۲-۷-۴ لوله ۷۶

۳-۷-۴ سیم‌پیچ کوئل استاتور ۷۶

۴-۷-۴ پرتابه ۷۷

۷۷.....۵-۷-۴ منبع تغذیه

۷۸.....۶-۷-۴ کلید

۷۹.....۷-۷-۴ پایه‌های نگهدارنده استاتور

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۸۳

۸۴.....۱-۵ نتیجه‌گیری

۸۶.....۲-۵ پیشنهادها

فصل ششم: پیوست‌ها..... ۸۷

۸۸.....۱-۶ مشخصات خازن

فصل هفتم: مراجع..... ۸۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: اجزاء تشکیل‌دهنده یک تفنگ کویلی رلوکتانسی ۷
- شکل ۱-۲: اجزاء تشکیل‌دهنده یک تفنگ کویلی القایی ۸
- شکل ۱-۳: اجزاء تشکیل‌دهنده یک تفنگ کویلی القایی تامپسون ۱۰
- شکل ۱-۴: اجزاء تشکیل‌دهنده یک تفنگ کویلی القایی حلزونی ۱۱
- شکل ۱-۵: اجزاء تشکیل‌دهنده یک تفنگ کویلی چندمرحله‌ای ۱۲
- شکل ۱-۶: کنترلر شارژ یک تفنگ کویلی چندمرحله‌ای و نحوه ارتباط آن با بخش تغذیه ۱۳
- شکل ۱-۷: مدار سنسور یک تفنگ کویلی چندمرحله‌ای ۱۴
- شکل ۱-۸: مدار تریگر یک تفنگ کویلی چندمرحله‌ای ۱۵
- شکل ۱-۹: نمایی ساده از نحوه عملکرد یک کویل‌گان القایی ۱۶
- شکل ۳-۱: نمایی از تفنگ کویلی القایی طراحی شده ۳۹
- شکل ۳-۲: مدار معادل تفنگ کویلی القایی ۴۱
- شکل ۳-۳: پارامترهای سیم‌پیچ برای استخراج روابط مربوط به اندوکتانس ۴۳
- شکل ۳-۴: روند صحت‌سنجی نتایج طراحی با استفاده از محیط سیمولینک متلب ۴۵
- شکل ۳-۵: تقسیم شارهای انتهایی به دو مؤلفه محوری و عمودی ۴۷
- شکل ۳-۶: مسیر حرکت پرتابه ۴۹
- شکل ۱-۴: نمای سه‌بعدی از تفنگ کویلی القایی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer ۵۲

- شکل ۲-۴: مدار تفنگ کویلی القایی در نرم‌افزار JMAG-Desiner ۵۳
- شکل ۳-۴: شکل موج جریان تخلیه خازن در کوئل استاتور ۵۴
- شکل ۴-۴: جریان القا شده در پرتابه ۵۵
- شکل ۵-۴: نیروی وارد شده به پرتابه ۵۵
- شکل ۶-۴: نیروی شعاعی وارد به پرتابه ۵۶
- شکل ۷-۴: توان الکتریکی ورودی کوئل استاتور تفنگ کویلی القایی ۵۶
- شکل ۸-۴: سرعت پرتابه بدون در نظر گرفتن اصطکاک ۵۷
- شکل ۹-۴: سرعت پرتابه با در نظر گرفتن اصطکاک ۵۸
- شکل ۱۰-۴: توزیع چگالی جریان در کوئل استاتور و پرتابه در موقعیت $x=0$ ۵۸
- شکل ۱۱-۴: توزیع چگالی شار در کوئل استاتور ۵۹
- شکل ۱۲-۴: توزیع چگالی شار در پرتابه ۵۹
- شکل ۱۳-۴: توزیع چگالی جریان در موقعیت $x=0$ ۶۰
- شکل ۱۴-۴: توزیع چگالی جریان در کوئل استاتور ۶۰
- شکل ۱۵-۴: توزیع چگالی جریان در پرتابه ۶۰
- شکل ۱۶-۴: برد پرتابه با احتساب اصطکاک ۶۱
- شکل ۱۷-۴: الف) مدار مربوط به محاسبه اندوکتانس خودی سیم‌پیچ کوئل استاتور و اندوکتانس متقابل ب) مدار مربوط به اندوکتانس خودی سیم‌پیچ پرتابه و اندوکتانس متقابل ۶۲
- شکل ۱۸-۴: اندوکتانس‌های تفنگ کویلی القایی در موقعیت‌های مختلف پرتابه ۶۲

- شکل ۴-۱۹: نمودار سرعت خروجی بر حسب زمان با استفاده از محیط سیمولینک متلب و نرم‌افزار اجزاء محدود ۶۴
- شکل ۴-۲۰: نمودار جریان تخلیه خازن بر حسب زمان با استفاده از محیط سیمولینک متلب و نرم‌افزار اجزاء ۶۵
- شکل ۴-۲۱: نمودار تأثیر تعداد طبقه‌ها در قطرهای مختلف هادی کوئل بر روی سرعت پرتابه ۶۶
- شکل ۴-۲۲: نمودار تأثیر تغییر طول کوئل در قطرهای مختلف هادی بر روی سرعت پرتابه ۶۸
- شکل ۴-۲۳: مقایسه بین طراحی مرجع و طراحی بهینه تفنگ کوئلی القایی با تغییر پارامترهای کوئل استاتور ۶۸
- شکل ۴-۲۴: تفنگ کوئلی القایی مخروطی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer ۶۹
- شکل ۴-۲۵: ماکزیمم سرعت بر حسب تغییر زاویه مخروط بر روی تفنگ کوئلی القایی ۷۰
- شکل ۴-۲۶: مقایسه بین حالت استوانه‌ای و مخروطی با زاویه ۵۵ درجه تفنگ کوئلی القایی ۷۰
- شکل ۴-۲۷: (الف) هسته تفنگ کوئلی القایی (ب) تأثیر هسته با ضخامت‌های مختلف بر روی تفنگ کوئلی القایی ۷۱
- شکل ۴-۲۸: مقایسه بین حالت با هسته و بدون هسته تفنگ کوئلی القایی ۷۲
- شکل ۴-۲۹: مقایسه بین سرعت پرتابه آلومینیومی و مسی ۷۳
- شکل ۴-۳۰: چگالی جریان پرتابه در دو جنس آلومینیوم و مس ۷۳
- شکل ۴-۳۱: سرعت پرتابه در دو حالت پرتابه از سیم مسی و به صورت یکپارچه مس ۷۴
- شکل ۴-۳۲: چگالی جریان‌های تولیدی در پرتابه در دو حالت سیم سلونوئیدی و یکدست مسی ۷۴
- شکل ۴-۳۳: خازن مورد استفاده در ساخت تفنگ ۷۶

- شکل ۴-۳۴: لوله تفنگ کویلی القایی ۷۶
- شکل ۴-۳۵: سیم پیچ کویل استاتور ۷۷
- شکل ۴-۳۶: پرتابه تفنگ کویلی القایی ۷۷
- شکل ۴-۳۷: اتوترانسفورماتور ۷۸
- شکل ۴-۳۸: یکسوساز مورد استفاده در تفنگ کویلی القایی ۷۸
- شکل ۴-۳۹: کلید تفنگ کویلی القایی ۷۹
- شکل ۴-۴۰: پایه‌های نگهدارنده استاتور ۷۹
- شکل ۴-۴۱: نحوه قرارگیری پایه‌های نگهدارنده استاتور ۸۰
- شکل ۶-۱: مشخصات خازن ۸۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: مشخصات مطلوب مسئله طراحی تفنگ کویلی القایی ۳۴
- جدول ۲-۳: مشخصات مربوط به بانک خازنی و انرژی ذخیره شده اولیه ۳۶
- جدول ۳-۳: مشخصات قطر هادی‌های استاتور و آرمیچر ۳۸
- جدول ۴-۳: مشخصات کلی پارامترهای طراحی تفنگ کویلی القایی ۴۰
- جدول ۱-۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و عملی تفنگ کویلی القایی با تغییر مکان اولیه پرتابه ۸۰
- جدول ۲-۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و عملی تفنگ کویلی القایی با تغییر ولتاژ خازن ۸۱
- جدول ۳-۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و عملی تفنگ کویلی القایی با تغییر ظرفیت خازن ۸۱

فهرست علائم اختصاری

F	نیروی اعمالی به پرتابه
i_p	جریان کوئل پرتابه
H_z	شدت میدان مغناطیسی محوری
E_{cap}	انرژی ذخیره شده در خازن
E_k	انرژی جنبشی پرتابه
ω_0	فرکانس نوسانات طبیعی سیستم
ω_d	فرکانس نوسانات رزونانس سیستم
R_{ac}	مقاومت AC سیم پیچ
R_{dc}	مقاومت DC سیم پیچ
I_{max}	پیک جریان کوئل استاتور
λ_1	شار پیوندی سیم پیچ کوئل استاتور
λ_2	شار پیوندی سیم پیچ کوئل پرتابه
i_1	جریان کوئل استاتور
i_2	جریان کوئل پرتابه
V_C	ولتاژ خازن
V_s	سرعت پرتابه
x	فاصله مرکز کوئل استاتور با مرکز کوئل پرتابه
w_{field}	انرژی سیستم مغناطیسی
B	چگالی شار سیم پیچ
n	تعداد دور بر واحد طول سیم پیچ
ϕ	شار پیوندی هر دور سیم
L_{11}	اندوکتانس خودی سیم پیچ کوئل استاتور
L_{22}	اندوکتانس خودی سیم پیچ کوئل پرتابه
L_{21}	اندوکتانس متقابل سیم پیچ کوئل استاتور و پرتابه
L_{12}	اندوکتانس متقابل سیم پیچ کوئل رتور و استاتور
L_{21Real}	اندوکتانس متقابل واقعی سیم پیچ کوئل استاتور

	و پرتابه
L_{12Real}	اندوكتانس متقابل واقعى سيم‌پيچ كويل رتور و استاتور
F_z	نيروى محورى وارد به پرتابه
F_r	نيروى شعاعى وارد به پرتابه

فصل اول

مفاهیم اولیه و ساختارهای تفنگ کویلی

۱-۱ مقدمه‌ای بر تفنگ‌های کویلی

موتورهای پالسی خطی تاریخچه‌ای به اندازه تاریخچه موتورهای دوار دارند. در سال ۱۸۳۸ اولین موتور الکتریکی خطی به وجود آمد. این موتور یاد موتورهای بخار را که دارای یک حرکت رفت و برگشتی بودند، تداعی می‌نمود. این موتور شامل دو کوئل به همراه دو میله از جنس آهن بود که در کوئل‌ها مشابه دو پیستون در سیلندرهای موتور بخار حرکت می‌کردند. امروزه این نوع موتور در طبقه موتورهای متناوب رلوکتانسی قرار می‌گیرد. اولین موتور خطی از نوع القایی در اواخر قرن ۱۹ ظهور پیدا کرد و طراحی آن بر پایه موتورهای القایی خطی بود.

اکثر موتورهای الکتریکی خطی با حرکت مشخص را می‌توان به پنج دسته کلی تقسیم نمود: ماشین‌های DC، رلوکتانسی، هیستریزیس، سنکرون و القایی [۱].

یکی از ماشین‌های خطی‌ای که در سال ۱۹۰۱ ظهور کرد، ماشین‌هایی بودند که با نام پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی شهرت یافتند. پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی انرژی مغناطیسی ناشی از انرژی الکتریکی را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کنند و برای شتاب دادن به جرم‌هایی در حدود صد میلی‌گرم تا چندین تن استفاده می‌شوند. سرعت پرتابه در شتاب‌دهنده‌های الکترومغناطیسی از نظر تئوری می‌تواند تا سرعت نور برسد اما در عمل به حدود ۱۰ کیلومتر بر ثانیه محدود می‌شود. سابقه تاریخی شتاب‌دهنده‌های الکترومغناطیسی به سال ۱۹۰۱ برمی‌گردد. در زمانی که هنوز کلیدهای روغنی مطرح نشده بودند یک فیزیکدان نروژی به نام بیرکلند^۱ در دانشگاه اسلو^۲ مشغول تحقیقات برای رفع مشکلات کلیدزنی جریان‌های بالا با کلیدهای چاقویی بود. وی هنگام آزمایش‌های عملی برای ساخت کلید جدیدی بر پایه القای الکترومغناطیسی متوجه شد که یک قطعه آهن با نیروی شدیدی جذب یک سیم‌پیچ شده و مثل یک پرتابه از داخل آن عبور کرد. اولین شتاب‌دهنده ساخت آقای بیرکلند در سال ۱۹۰۱ قادر بود قطعه آهنی به وزن ۰/۵ کیلوگرم را پرتاب کند. آقای

^۱ - Birkeland

^۲ - Oslo University

بیرکلند در سال ۱۹۰۲ دومین شتاب‌دهنده خود را طراحی کرد که می‌توانست یک پرتابه ۵۰۰ کیلوگرمی را شتاب دهد.

بعد از ساخت اولین مدل توسط بیرکلند، ۴۵ مدل دیگر تا قبل از جنگ جهانی دوم ساخته و ارائه گردید. در خلال جنگ جهانی دوم، کشورهای آلمان، ژاپن و ایالات‌متحده آمریکا در زمینه تحقیقات روی شتاب‌دهنده‌های الکترومغناطیسی بسیار فعال بودند. در سال ۱۹۴۱ آلمان یک شتاب‌دهنده الکترومغناطیسی (توپ مغناطیسی) با طول ۷۰ متر ساخت.

با وجود این، به دلایل محدودیت‌های تکنولوژیکی، اغلب این کوشش‌ها چندان موفق نبودند. بالاترین سرعت‌هایی که در این سال‌ها به آن دست یافته بودند از حدود چند صد متر بر ثانیه تجاوز نمی‌کرد. این محدودیت‌های تکنولوژیکی شامل ذخیره انرژی با قدرت‌های بالا، خواص مواد و تکنولوژی ادوات سوئیچ و قطع و وصل جریان‌های بالا است. توسعه تکنولوژی سال‌های اخیر بیشتر محدودیت‌های یاد شده را مرتفع نموده و موجب توسعه در امر طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌های الکترومغناطیسی با سرعت‌ها و قدرت‌های بالاتر شده است [۲].

تحقیقات در زمینه این تکنولوژی همچنان ادامه داشت تا اینکه در سال ۱۹۸۰ سمپوزیوم‌های دوسالانه‌ای به نام پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی توسط IEEE برگزار شد. هدف اصلی از توسعه تکنولوژی پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی، عبور از محدودیت‌های ذاتی در پرتاب‌کننده‌های شیمیایی و رساندن پرتابه به سرعت‌های بسیار بالا است. به این علت تحقیقات گسترده‌ای بر روی این پرتاب‌کننده‌ها شروع گردیده است [۳]. از نمونه‌های موفق ساخته شده در این زمینه می‌توان به تفنگ کویلی ۶ مرحله‌ای با جرم ۵ کیلوگرم که با سرعت $406 \frac{m}{s}$ در آزمایشگاه ساندیا^۱ تست شده و همچنین تفنگ کویلی دیگری که توسط این آزمایشگاه با پرتابه‌ای به جرم ۶۵۰ کیلوگرم و سرعت $\frac{m}{s}$ ۱۲ تست شده است، اشاره نمود. در چین نیز تست‌هایی بر روی تفنگ‌های کویلی از جمله یک تفنگ

^۱ -Sandia National Library

کویلی با پرتابه‌ای به جرم ۵ کیلوگرم به صورت پنج مرحله‌ای با سرعت $220 \frac{m}{s}$ صورت پذیرفته است [۴].

در پرتاب‌کننده‌های شیمیایی که نیرو توسط انفجار مواد شیمیایی تولید می‌گردد، عمده‌ترین عاملی که در سرعت خروجی پرتابه محدودیت ایجاد می‌کند عدم یکنواختی شتاب در طول مسیر پرتاب است. به گونه‌ای که نیروی زیادی فقط در بازه کوچکی از زمان و طی لحظات ابتدایی به پرتابه وارد می‌شود. با توجه به محدودیت استحکام مکانیکی که یک پرتابه معین دارد، امکان تحمیل یک نیروی زیاد در آن بازه کوچک زمانی وجود ندارد، لذا همان‌طور که قبلاً بیان شد پرتاب‌کننده‌های شیمیایی دارای محدودیت سرعت هستند و نهایتاً سرعت پرتابه را به ۲۰۰۰ متر بر ثانیه می‌رسانند. ولی در پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی به دلیل قابل کنترل بودن نیروی شتاب‌دهنده، می‌توان در تمامی طول مسیر و در مدت زمان بیشتری، حداکثر نیروی قابل تحمل توسط پرتابه را به آن اعمال نمود که بدین ترتیب سرعت خروجی بیشتری حاصل می‌گردد. بیش‌ترین سرعتی که تاکنون توسط این پرتاب‌کننده‌ها به دست آمده، نزدیک به ۷۰۰۰ متر بر ثانیه است [۳].

پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی به سه دسته تقسیم می‌شوند: پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی ریلی، پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی کویلی و پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی اتصال مجدد. پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی ریلی (تفنگ ریلی) یکی از انواع پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی هستند که قادر به شتاب دادن به اشیاء با سرعت بسیار زیاد تا $3 \frac{km}{s}$ هستند که این مقدار از سرعت اشیائی که توسط پرتاب‌کننده‌های معمولی که با سوخت جامد پر می‌شوند، بیشتر است. این پرتاب‌کننده مقدار بسیار زیادی از انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی در بازه زمانی بسیار کوتاهی با بازده الکتریکی به مکانیکی کم تبدیل می‌نماید. در این نوع از پرتاب‌کننده‌ها مشکلات اساسی‌ای در تحقیقات از جمله منبع طراحی تغذیه پالسی فشرده، لوله و آرمیچر و بسته‌های پرتابی یکپارچه ظاهر

شده است. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های طراحی پرتاب‌کننده ریلی عبور جریان بسیار بالای تولید شده مخصوصاً در سطح آرمیچر است [۵].

پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی اتصال مجدد (همچنین به لانچر دیسک یا صفحه نیز معروف است)، شامل دو کوئل است که در دو سمت پرتابه قرار می‌گیرند. وقتی که جریان به درون کوئل‌ها وارد می‌شود، جریان گردابی در پرتابه و برهم‌کنش جریان کوئل‌ها و جریان گردابی، پرتابه را حرکت می‌دهد. از آنجایی که پرتابه کوئل‌ها را ترک می‌کند، خطوط شار از کوئل‌ها مجدداً متصل می‌شوند، در نتیجه به این نام، نام‌گذاری شده‌اند. تفنگ‌های کوئلی القایی سیلندری شکل چندمرحله‌ای نیز می‌توانند به عنوان یک تفنگ کوئلی اتصال مجدد شناخته شوند [۶].

از دیگر انواع پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی، پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی کوئلی (تفنگ کوئلی) بوده که از جمله مزایای خوب آن نسبت به سایر پرتاب‌کننده‌ها می‌توان به عدم تماس مکانیکی با دیواره‌های لوله اشاره نمود. هر تفنگ کوئلی شامل تعداد دور مشخصی کوئل در اطراف یک لوله بوده که در داخل لوله آرمیچر برای حرکت در مسیر خود هدایت می‌شود. یک بانک خازنی در داخل کوئل تخلیه شده و جریانی در داخل کوئل جاری می‌شود که این جریان موجب انتقال نیرو به پرتابه و شتاب گرفتن آن در داخل لوله می‌شود [۷].

۱-۱-۱ مزایای پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی

از جمله مزایای این دسته از پرتاب‌کننده‌ها می‌توان به قابلیت دستیابی به سرعت‌های بالا، بازدهی بیشتر (در نوع تفنگ ریلی بازده تا ۵۰ درصد نیز می‌رسد)، هزینه کمتر (هزینه‌ی قرار دادن هر کیلوگرم محموله در مدار زمین در حدود ۲۰۰۰۰ دلار است که با این روش به ۶۰۰ دلار می‌رسد)، عدم نیاز به موتور و سوخت، در نتیجه کاهش وزن، کاهش خطاهای عملیاتی مانند اختلال در سامانه سوخت‌رسانی (افزایش میزان موفقیت)، افزایش توانایی جهت جابه‌جایی و نگهداری، به علت کاهش وزن و نداشتن سوخت قابلیت استفاده چندباره (سامانه پرتاب‌کننده باقی است و فقط پرتابه فرستاده می‌شود)، نداشتن دود، صدا و جرقه‌زنی هنگام شلیک، کاهش گرمای ایجادشده به علت نداشتن مواد منفجره، کاهش

زمان بین دو شلیک و افزایش تعداد دفعات آن (کاربرد در سلاح‌های تیربار)، کنترل برد و سرعت پرتابه به وسیله تغییر ولتاژ، بدون نیاز به تغییر زاویه پرتاب اشاره نمود.

۱-۲ معایب پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی

از جمله معایب این دسته از پرتاب‌کننده‌ها می‌توان به تحمیل بارهای مکانیکی زیاد و ایجاد تنش در ساختمان پرتاب‌کننده‌ها، محدودیت در جرم پرتابه (جرم پرتابه نهایتاً به چند صد کیلوگرم می‌رسد که در مقایسه با جرم‌های چند تنی بر اساس شیوه‌های معمول ضعف بزرگی است)، محدودیت در تأمین انرژی (برای تولید میدان‌های الکترومغناطیسی بزرگ و نیاز به انرژی زیادی در بازه کوتاهی از زمان است) و بازده پایین اشاره نمود.

۱-۲ تفنگ کویلی

تفنگ‌های الکترومغناطیسی کویلی دارای انواع مختلفی می‌باشند. هر تفنگ کویلی به طور کلی دارای چهار جزء اساسی بانک خازنی، کوئل، لوله و پرتابه است. نحوه عملکرد کلی این نوع از پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی به این صورت است که ابتدا بانک خازنی شارژ شده و پس از آن انرژی این بانک خازنی درون یک کوئل تخلیه می‌گردد. جریان به وجود آمده در کوئل، سبب اعمال نیرو به پرتابه شده و پرتابه شتاب می‌گیرد.

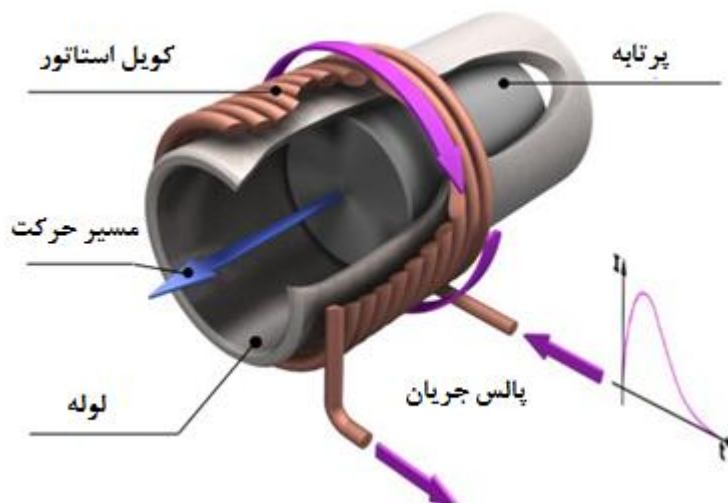
هر تفنگ کویلی را از جهات مختلف می‌توان تقسیم‌بندی نمود. از جهت تعداد مجموعه کوئل‌ها می‌توان آن را به دو دسته تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای تقسیم نمود.

در تفنگ کویلی یک مرحله‌ای فقط یک مجموعه کوئل با تعداد دور مشخص بر روی لوله پیچیده می‌شود و به دنبال آن پرتابه در داخل لوله فقط یک بار شتاب می‌گیرد و سپس در مسیر لوله به حرکت خود ادامه می‌دهد.

از مزایای تفنگ کویلی تک‌مرحله‌ای می‌توان به ساختار و سوئیچینگ ساده آن اشاره نمود. از جمله معایب این دسته از تفنگ‌های کویلی می‌توان به این مورد اشاره نمود که با افزایش مسافت طی شده توسط پرتابه به سرعت نیروی پیشران آن کاهش می‌یابد و با توجه به محدودیت سرعت پرتابه، برای

داشتن بردهای بیشتر پرتابه، جریان بسیار بالایی نیاز است که این امر سبب آسیب جدی به کوئل می‌شود. راه حل موجود برای رفع این مشکل استفاده از ساختار چندمرحله‌ای است که در این ساختار در همان زمان، پرتابه را می‌توان به سرعت‌های بالاتر رساند. در واقع در یک تفنگ کوئلی چندمرحله‌ای کوئل‌ها به ترتیب سوئیچ شده و در هر مرحله شتابی به پرتابه اعمال می‌گردد، در نتیجه به جای یک بار شتاب، از چند شتاب متوالی برای افزایش سرعت پرتابه استفاده می‌شود؛ اما از جمله معایبی که تفنگ‌های کوئلی چندمرحله‌ای دارند این است که تشخیص مکان دقیق پرتابه در لوله به منظور تعیین زمان سوئیچینگ کوئل هر مرحله سخت بوده که همین امر موجب پیچیدگی در کنترل آن می‌شود [۷].

از جهت نحوه عملکرد می‌توان تفنگ‌های کوئلی را به دو دسته کلی رلوکتانسی و القایی تقسیم نمود. تفنگ‌های کوئلی رلوکتانسی در اصل یک سیم‌لوله است که قادر به پرتاب یک پرتابه آهنی یا فولادی (به طور کلی فرومغناطیس) با زمان‌بندی دقیق جریان سیم‌پیچ است. شکل ۱-۱ اجزای یک طرح تفنگ کوئلی ساده را نشان می‌دهد.

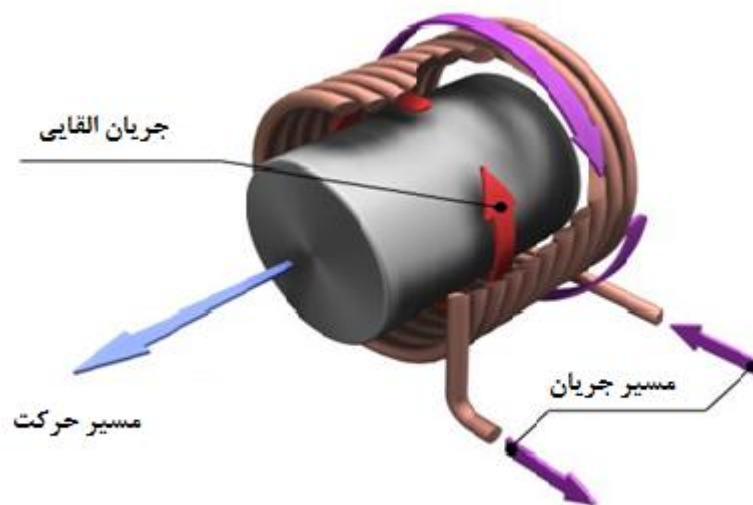


شکل ۱-۱: اجزاء تشکیل‌دهنده یک تفنگ کوئلی رلوکتانسی [۳]

سیم‌پیچ، دور یک لوله غیر هادی به عنوان مسیر عبور پرتابه، پیچیده می‌شود و پرتابه در انتهای لوله قرار می‌گیرد. اگر یک پالس جریان کوچک از سیم‌پیچ عبور نماید، پرتابه در طول سیم‌پیچ شروع به

شتاب گرفتن می‌نماید و اگر زمانی که پرتابه به وسط سیم‌پیچ برسد جریان قطع گردد، پرتابه با سرعتی زیاد از سیم‌پیچ خارج می‌شود. یک نکته مهم در طراحی تفنگ کوپلی زمان دقیق و شکل پالس جریان است.

تفنگ‌های کوپلی لوله‌ای القایی کلاسیک، در اصل از نظر ساختار معادل یک تفنگ کوپلی رلوکتانسی است. تفاوت آن‌ها در این است که پرتابه از طریق جریان گردابی القا شده توسط کوپل در آن، به سمت خارج کوپل دفع می‌شود. گلوله باید غیر فرومغناطیس (مانند مس یا آلومینیم) باشد و نقطه شروع نیازمند این است که اندکی خارج از مرکز کوپل باشد، در غیر این صورت، در هنگام شلیک نیرو در جهت درست به پرتابه اعمال نمی‌شود. ضرورتی ندارد که پرتابه یک رسانای خالص و یکپارچه باشد. پرتابه‌ای متشکل از کوپل اتصال کوتاه شده نیز می‌تواند استفاده شود که مزایایی مانند راندمان بالاتر دارد [۸].



شکل ۱-۲: اجزاء تشکیل‌دهنده یک تفنگ کوپلی القایی [۳]

تفنگ‌های کوپلی القایی خود به دو دسته سنکرون و آسنکرون تقسیم می‌شوند. در نوع آسنکرون کوپل‌ها می‌توانند به صورت سری یا موازی به یکدیگر متصل گردند و انرژی با یک زمان‌بندی مشخص و معین به کوپل‌ها داده شود. در نوع سنکرون کوپل‌ها پشت‌به‌پشت هم به ترتیب انرژی داده می‌شود [۹].

همان‌طور که بیان شد تفنگ‌های القایی به دو بخش سنکرون و آسنکرون قابل دسته‌بندی هستند. ابتدا در این قسمت به تشریح ویژگی‌های این دو نوع می‌پردازیم. آنالیزها نشان می‌دهد که تفاوت‌ها و شباهت‌های بسیاری بین کارایی و عملکرد این دو نوع وجود دارد از جمله:

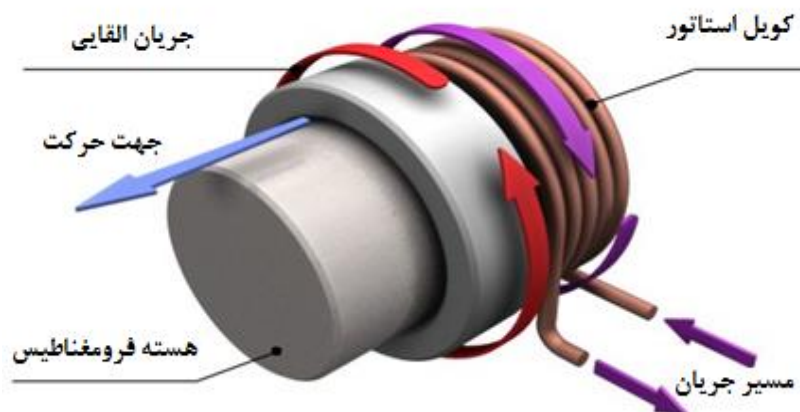
۱) نوسانات در شتاب هر دو بزرگ است. در تفنگ القایی آسنکرون، زمان گذر بین مراحل متوالی، طولانی‌تر از عرض پیک موج تخلیه خازن است؛ بنابراین ممکن است حتی انتقال بین دو مرحله به درستی صورت نپذیرد. در حالی که در یک تفنگ القایی سنکرون، فقط یک پیک شتاب در هر مرحله وجود دارد و می‌توان آن را در مواردی که تعداد زیادی کوئل با فاصله‌های بسیار نزدیک هم وجود دارند استفاده کرد به طوری که موج‌های شتاب همپوشانی خواهند داشت.

۲) توزیع جریان القایی در آرمیچر یک تفنگ القایی آسنکرون هموارتر از نوع سنکرون است. در یک تفنگ آسنکرون نسبت ماکزیمم به مینیمم پیک جریان حلقه آرمیچر بسیار کمتر از نوع سنکرون آن است [۱۰].

در دسته‌بندی‌ای ریزتر خود تفنگ‌های کوئلی القایی را می‌توان به انواع مرسوم کلاسیک، تامپسون، حلزونی و نیزه‌ای تقسیم نمود. نوع مرسوم کلاسیک آن همان نوعی است که در قسمت‌های قبل معرفی گردید.

تفنگ‌های کوئلی تامپسون به افتخار وسیله حلقوی جهنده آقای تامپسون^۱، به این اسم نام‌گذاری شد. این تفنگ کوئلی یکی دیگر از گونه‌های تفنگ‌های کوئلی القایی است و بر اساس همان قواعد تفنگ‌های کوئلی القایی کلاسیک کار می‌کند. پرتابه از یک ماده غیر فرومغناطیس مانند مس یا آلومینیم ساخته شده است. شکل ۱-۳ یک نوع از طراحی ممکن برای تفنگ‌های کوئلی تامپسون تک‌مرحله‌ای را نشان می‌دهد.

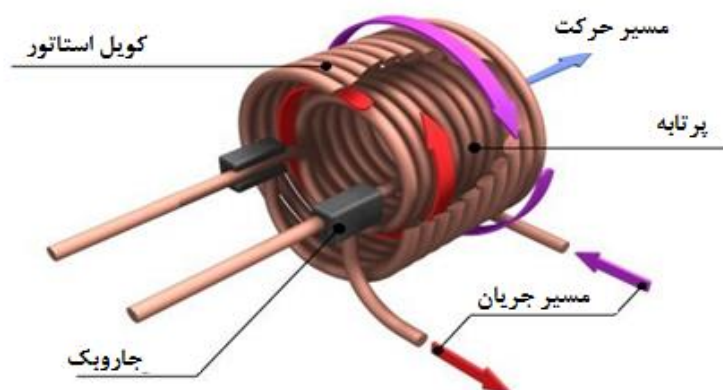
¹ -Thomson



شکل ۱-۳: اجزاء تشکیل دهنده یک تفنگ کوپلی القایی تامپسون [۳]

هنگامی که جریان وارد کوپل شود، هسته فرومغناطیس، مغناطیسی می‌شود و به دلیل اینکه دامنه شار مغناطیسی افزایش می‌یابد، جریان گردابی در پرتابه حلقوی ایجاد می‌شود. این جریان القا شده به وسیله جریان کوپل دفع شده و پرتابه از هسته به سمت خارج شلیک می‌شود. هرچقدر که شار سریع‌تر افزایش پیدا کند، جریان گردابی القایی بزرگ‌تر و نیروی منتهجه بر روی پرتابه بیشتر خواهد شد. برای کسب بهترین نتیجه، هسته باید به صورت مورق، مجموعه میله‌ها و یا مواد پودری ساخته شود. ضروری است که جریان گردابی در هسته را به حداقل برسانیم و در نتیجه مانع نوسان سریع شار شویم. به صورت کلی، به منظور تولید یک افزایش سریع شار معمولاً لازم است از پتانسیل چند صد ولت یا بالاتر استفاده کنیم [۱۱].

در تفنگ‌های القایی حلزونی دو سیم‌پیچ وجود دارد، سیم‌پیچ درایو (استاتور) و سیم‌پیچ پرتابه (آرمیچر). سیم‌پیچ آرمیچر به صورت سری به سیم‌پیچ استاتور به همراه جاروبکی که در انتهای بازوهای آرمیچر قرار دارند به صورت الکتریکی متصل می‌شوند. پرتابه در جهت مخالف جریان استاتور و آرمیچر، جهت می‌گیرد و یک نیروی دافعه مشابه با پرتاب‌کننده‌های القایی تولید می‌نماید. تفاوت این مورد در این است که مدت زمان نیروی دافعه محدود به بازه‌های زمانی تخلیه مغناطیسی نیست [۱۲].



شکل ۱-۴: اجزاء تشکیل دهنده یک تفنگ کویلی القایی حلزونی [۳]

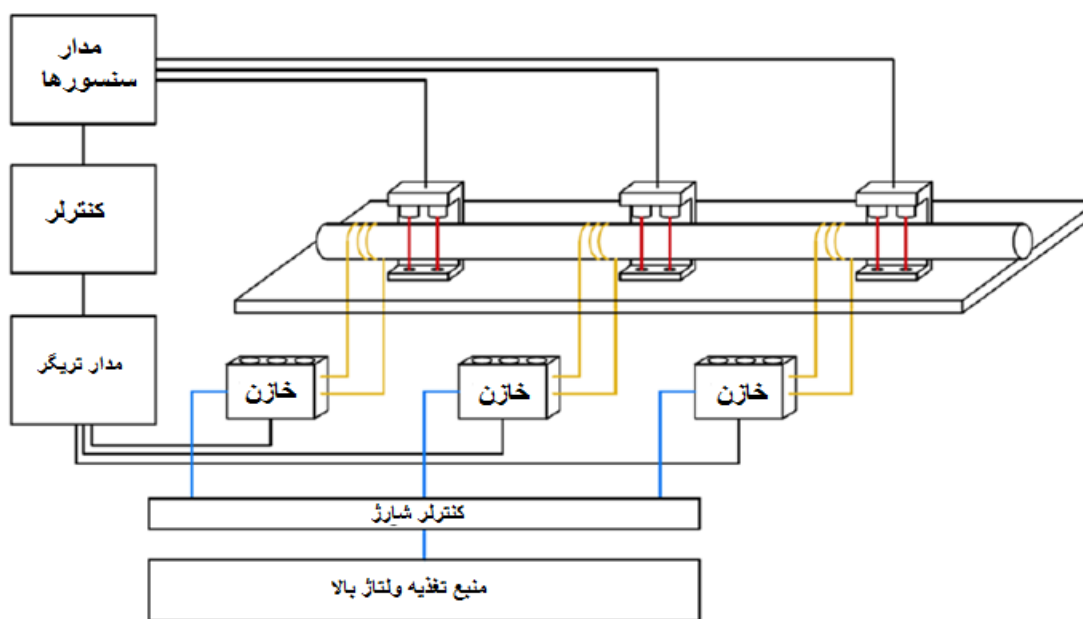
امکان این امر وجود دارد که پرتاب کننده‌ای با سیم پیچ حلزونی ساخت که آرمیچر یا پرتابه در خارج از یک استاتور دراز و باریک حرکت نماید. ریل‌ها در هر دو طرف پرتابه و کانال جاروبک‌های جریان در داخل استاتور و پرتابه قرار دارند. جاروبک‌ها به طوری قرار داده می‌شوند که یک بخش از انرژی استاتور به سرعت در پشت آرمیچر بدون در نظر گرفتن موقعیت آرمیچر و استاتور وجود داشته باشد [۱۳].

در تفنگ‌های کویلی القایی نیزه‌ای آرمیچر توسط یک جریان اولیه شارژ شده و در طول پرتاب همچنان ادامه می‌یابد (ثابت زمانی $\frac{L}{R}$ آن، کمتر از زمان پرتاب است). در ابتدای پرتاب، کویل‌ها فعال شده و همانطور که پرتابه به سمت کویل کشیده می‌شود، جریان هر سیم پیچ متوالی به سمت صفر نزدیک می‌شود. سوییچ‌های SCR^۱ که جریان‌ها را به سمت کویل‌ها کموتاسیون می‌کنند، زمانی که جریان به صفر نزدیک می‌شود، به صورت اتوماتیک خاموش می‌شوند؛ بنابراین نیروی ترمزی و یا جریان برگشتی تولید نمی‌شود [۱۴].

۱-۳ اجزاء تفنگ‌های کویلی

در شکل ۱-۵ نمای کلی از ساختار یک تفنگ کویلی چندمرحله‌ای (در اینجا سه مرحله‌ای) مشاهده می‌گردد:

^۱ -silicon controlled rectifiers



شکل ۱-۵: اجزاء تشکیل دهنده یک تفنگ کویلی چندمرحله‌ای [۳]

این ساختار از اجزاء اصلی‌ای چون منابع تغذیه ولتاژ بالا، بانک خازنی، کنترلر شارژ، منابع تغذیه ولتاژ پایین، مدار سنسورها، میکروکنترلر، مدار تریگر، سیم‌پیچی‌ها دارد.

۱-۳-۱ منابع تغذیه ولتاژ بالا

منبع تغذیه ولتاژ بالا به منظور شارژ بانک‌های خازنی با در نظر گرفتن یک کنترلر شارژ، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو نیرویی که موجب پرتاب گلوله می‌شود از منبع تغذیه ولتاژ بالا سرچشمه می‌گیرد.

۱-۳-۲ بانک خازنی

یک بانک خازنی تأمین کننده یک پالس انرژی برای شلیک است. همانطور که می‌دانید بانک خازنی از مجموعه‌ای از خازن‌ها به صورت موازی تشکیل شده (تا میزان ظرفیت آن‌ها با یکدیگر جمع شود و جریانه‌ای آن افزایش یابد). طبیعی است که هرچه انرژی ذخیره شده در بانک بیشتر باشد، گلوله برد و سرعت بیشتری خواهد داشت (با فرض راندمان ثابت).

ساخت خازن در محدوده ولتاژ کیلوولتی نیازمند عایق‌های قوی است. لذا این گونه خازن‌ها کمیاب و گران قیمت هستند اما خازن‌های الکتrolیتی با ولتاژ ماکزیمم ۴۰۰ ولت به سهولت در بازار قابل

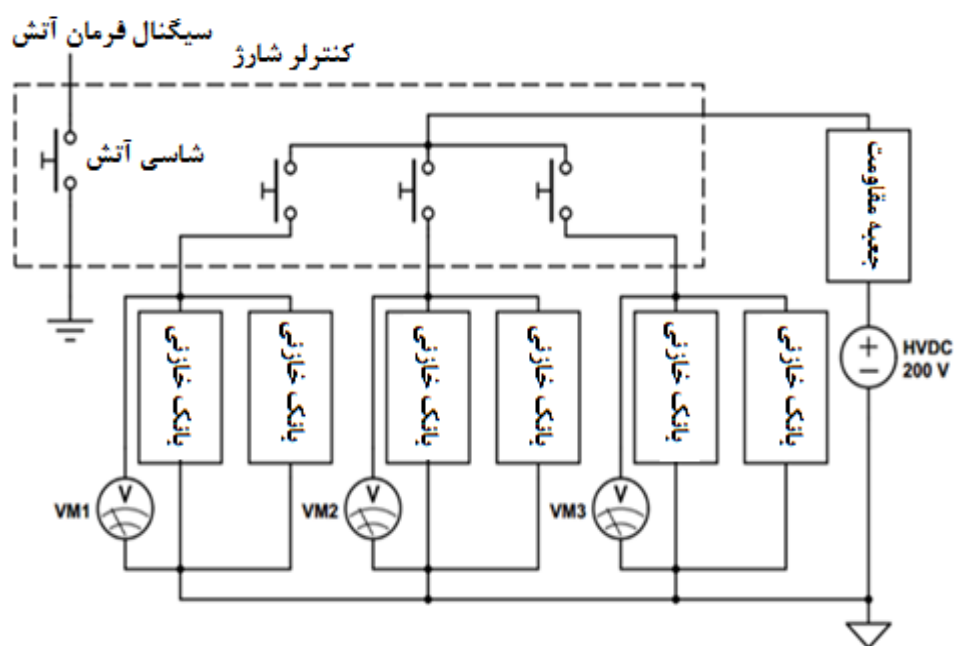
دستیابی هستند. این خازن‌ها را می‌توان با یک پل دیودی به برق شهر متصل کرده و آن‌ها را شارژ کرد؛ بنابراین سازندگان تفنگ کوپلی از بانک خازنی استفاده می‌کنند که انرژی بیشتری به گلوله منتقل شود اما به همان نسبت خطرات استفاده از آن نیز افزایش می‌یابد.

۳-۳-۱ منابع تغذیه ولتاژ پایین

منبع تغذیه ولتاژ پایین به منظور تأمین توان مورد نیاز برای مدار سنسور، میکروکنترلر و مدار تریگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۳-۱ کنترلر شارژ

کنترلر شارژ به خازن‌های موجود در مدار اجازه می‌دهد تا به ترتیب شارژ شوند. شکل ۶-۱ کنترلر شارژ را به همراه ارتباط آن با بخش منبع تغذیه را نشان می‌دهد (برای کوپل‌گان سه مرحله‌ای).

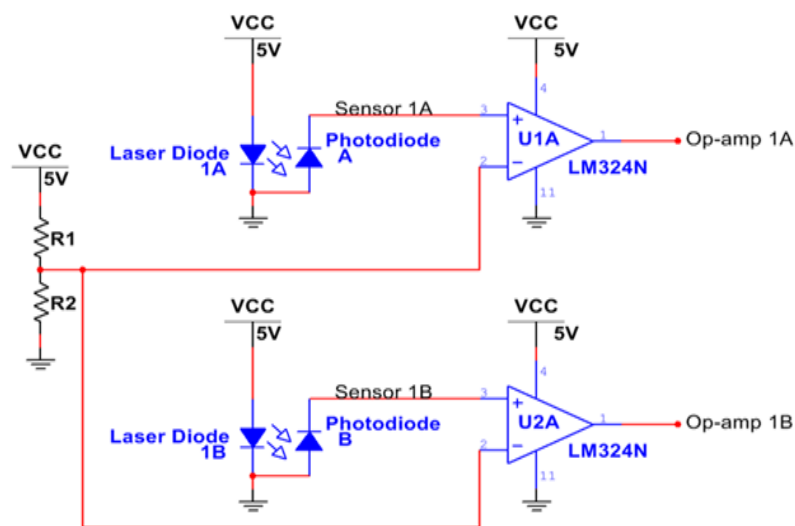


شکل ۶-۱: کنترلر شارژ یک تفنگ کوپلی چندمرحله‌ای و نحوه ارتباط آن با بخش تغذیه [۳]

۵-۳-۱ مدار سنسورها

مدار سنسورها شامل لیزرهای توان پایین، دیودهای نوری، پتانسیومتر و آمپلی‌فایر است. این مدار به منظور تشخیص مکان گلوله به منظور قطع و وصل به موقع و به ترتیب سیم‌پیچ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. طریقه کار مدار به این صورت است که هنگامی که گلوله از جلوی این لیزرها عبور کند

دیودهای نوری قطع خواهند شد. این وقفه منجر به ایجاد یک جریان در حد صد میلی ولت خواهد شد. سپس آمپلی‌فایر ولتاژ خروجی دیود را با ولتاژ مرجع که توسط پتانسیومتر ساخته می‌شود، مقایسه می‌نماید. ولتاژ مرجع در حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی ولت نوسان می‌کند. این محدوده ولتاژ مرجع، موجب تمایز آن از روشنایی محیط می‌شود. زمانی که ولتاژ مرجع از ولتاژ خروجی دیود نوری کمتر باشد، خروجی آمپلی‌فایر یک سیگنال ۴ ولت با درصد خطای ۱۵ درصد تولید می‌کند (high) و زمانی که سنسور از لیزر عبور نماید خروجی آمپلی‌فایر ۵ ولت با درصد خطای ۱۵ درصد می‌شود (low). شکل ۷-۱ یک نمونه از این نوع مدار را نشان می‌دهد:



شکل ۷-۱: مدار سنسور یک تفنگ کویلی چندمرحله‌ای [۳]

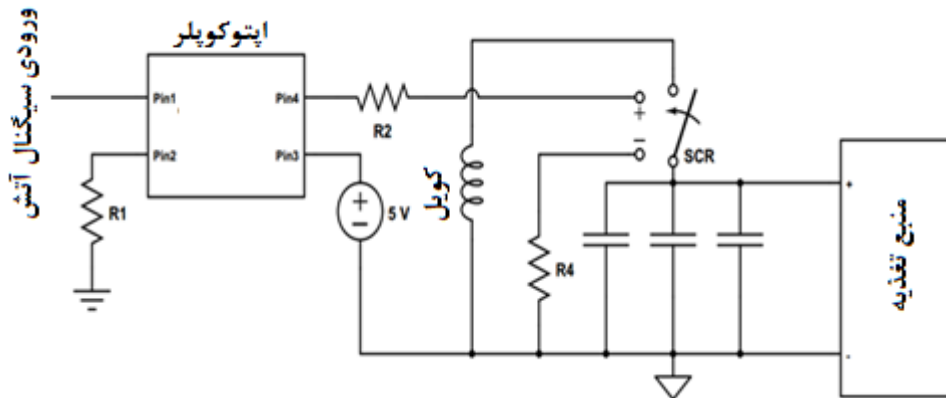
۱-۳-۶ میکروکنترلر

وظیفه میکروکنترلر صدور فرمان آتش برای اتصال جریان سیم‌پیچی‌ها است. برای این منظور میکروکنترلر با محاسبه سرعت گلوله در هنگام عبور از سنسورها و با در نظر گرفتن فاصله بین سنسورها و کوئل بعدی زمان صدور فرمان آتش برای روشن شدن سیم‌پیچ مرحله بعد را صادر می‌نماید.

۱-۳-۷ مدار تریگر

این مدار شامل اوپتوکوپلر، رله و سویچ SCR است. اوپتوکوپلر تأمین کننده ایزولاسیون لازم بین دو بخش با ولتاژ بالا و پایین است. رله در سر راه گیت سویچ SCR قرار می‌گیرد و برای روشن کردن

این سویچ بکار می‌رود. به عنوان نمونه برای تفنگ کوپلی سه مرحله‌ای فوق مدار تریگر به صورت زیر است.



شکل ۸-۱: مدار تریگر یک تفنگ کوپلی چند مرحله‌ای [۳]

۸-۳-۱ سیم پیچ‌ها

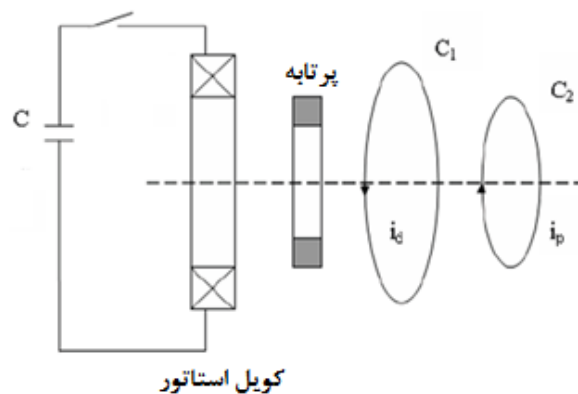
سیم پیچ به عنوان مهم‌ترین عنصر و قلب تپنده تفنگ‌های کوپلی نیازمند توجه خاصی است. پارامترهای مهم عبارت‌اند از: قطر سیم، طول سیم پیچی و تعداد لایه‌های سیم پیچی [۳].

۴-۱ تئوری عملکرد تفنگ کوپلی القایی

مفاهیم مربوط به یک تفنگ کوپلی القایی مشابه با موتورهای خطی است. زمانی که آرمیچر به موقعیت مورد نظر می‌رسد، کوپل مربوطه فعال شده و باعث القای یک حلقه جریان روی آرمیچر به وسیله تغییر تولید میدان مغناطیسی توسط کوپل‌ها می‌شود. نیروی اعمال شده از طرف کوپل به آرمیچر توسط رابطه (۱-۱) بیان می‌شود:

$$F = i_d i_p \frac{dM}{dz} \quad (1-1)$$

i_d جریان کوپل، i_p جریان آرمیچر، M اندوکتانس متقابل بین کوپل و آرمیچر و z جابجایی بین کوپل و آرمیچر است. معادله بالا نشان می‌دهد که نیرو متناسب با جریان کوپل، جریان آرمیچر و گرادیان اندوکتانس متقابل بین این دو است. شکل ۹-۱ نمایی ساده از یک نحوه عملکرد یک تفنگ کوپلی القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۱: نمایی ساده از نحوه عملکرد یک کویل گان القایی [۱۵]

عموماً به منظور افزایش میانگین نیروی F و افزایش شتاب در طول لوله، کویل‌ها را با ساختاری چندمرحله‌ای قرار می‌دهند که به کویل گان چندمرحله‌ای معروف است.

جریان سیم‌پیچ می‌تواند با توجه به توپولوژی مدار مثبت باشد. گرادیان اندوکتانس زمانی مثبت است که مرکز آرمیچر از مرکز کویل عبور کرده باشد؛ بنابراین جهت شارش جریان القایی، جهت نیرو را تعیین می‌نماید. جریان روی آرمیچر که با تغییر شار القاشده است، توسط فرمول (۲-۱) بیان می‌شود:

$$i_p = \frac{d\phi}{dt} \frac{1}{Z} = \frac{\mu}{Z} \int_A \frac{dH}{dt} dA \quad (2-1)$$

که Z امپدانس کویل آرمیچر، μ پرماییلیته، H شدت مغناطیسی و A سطح مؤثری است که کویل آرمیچر را پوشش می‌دهد.

با توجه به سهم شدت مغناطیسی محوری به تغییر شار کویل آرمیچر، مشتق شدت مغناطیسی محوری نسبت به زمان به صورت (۳-۱) بیان می‌شود:

$$\frac{dH_z}{dt} = \left(\frac{\partial H_z}{\partial i_d} \right) \frac{di_d}{dt} + \left(\frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \frac{dz}{dt} \quad (3-1)$$

بنابراین جریان ایجادشده روی آرمیچر با استفاده از رابطه (۴-۱) محاسبه می‌شود:

$$i_p = \frac{\mu}{Z} \int_A \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial i_d} \right) \frac{di_d}{dt} + \left(\frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \frac{dz}{dt} \right] dA \quad (4-1)$$

معادله بالا نشان می‌دهد که جریان آرمیچر وابسته به مشتق جریان کویل بوده و با توجه به زمان و مشتق شدت مغناطیسی محوری نسبت به جابجایی z است. مشتق جریان کویل نسبت به زمان با پارامترهای حلقه رابطه دارد و همچنین مشتق شدت مغناطیسی محوری نسبت به محور z با سرعت آرمیچر و افت جریان کویل رابطه دارد. زمانی که جریان کویل کاهش می‌یابد، اولین عبارت معادله بالا منفی خواهد شد. زمانی که آرمیچر در طی پرتاب از کویل عبور می‌نماید، شار همراه با آرمیچر تغییر می‌کند. شدت مغناطیسی محوری در سرعت‌های بالا به طور چشمگیری کاهش می‌یابد، بنابراین کاهش در شدت مغناطیسی محوری یکی از اصلی‌ترین عوامل منجر به وارونگی جریان بر روی گلوله است [۱۵].

در راستای انجام این پژوهش ابتدا مقالات و پروژه‌های مختلف در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفته و پس از آن یک تفنگ کویلی القایی طراحی شده و با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer آنالیز عملکرد می‌شود و در نهایت این تفنگ کویلی القایی ساخته شده است. پس از ساخت تست‌های مختلفی برای بررسی و تست عملکرد این تفنگ صورت پذیرفته است.

در پژوهش پیش رو در فصول بعدی ابتدا در فصل دوم به پیشینه پژوهش و مقالات و کارهای دیگران در زمینه تفنگ‌های کویلی القایی پرداخته خواهد شد و سپس در فصل سوم یک تفنگ کویلی القایی طراحی و نحوه شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer ارائه و همچنین نحوه ساخت تفنگ کویلی القایی تک‌مرحله‌ای بررسی خواهد گردید. در فصل چهارم نیز نتایج شبیه‌سازی و عملی ارائه می‌گردد.

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته تفنگ‌های کویلی القایی

در مقایسه با دیگر انواع پرتاب‌کننده‌های مغناطیسی، پرتاب‌کننده مغناطیسی کوپلی دارای تاریخچه پژوهش طولانی است [۷].

مطالعات صورت گرفته بر روی تفنگ‌های کوپلی را می‌توان به ۶ دسته کلی تقسیم نمود:

- ۱) استفاده از ساختارهای جدید با تغییر ساختار سیم‌پیچی [۷]، [۱۵]
- ۲) استفاده از ساختارهای جدید با تغییر ساختار پرتابه [۱۵] - [۱۹]
- ۳) تغییر در پارامترهای مربوط به بانک خازنی [۱۵]، [۲۰]
- ۴) بررسی تأثیر نیروهای مکانیکی بر اجزاء تفنگ کوپلی القایی [۹]، [۱۵]، [۲۱]
- ۵) استفاده از هسته‌های مغناطیسی کوپل شده با کوپل به منظور افزایش برد پرتابه [۱۱]، [۲۲]
- ۶) استفاده از ساختار چندمرحله‌ای برای افزایش سرعت پرتابه [۲۳] - [۳۲]
- ۷) بهینه‌سازی تفنگ‌های کوپلی با الگوریتم‌های شناخته شده و مرسوم [۴]، [۲۸]، [۳۳]

۲-۱ ساختار سیم‌پیچی

یکی از مسائل مهم در تفنگ‌های کوپلی القایی اثر ترمزی است. اثر ترمزی در یک تفنگ کوپلی بر طبق مفاهیم اولیه، در واقع همان نیروی ترمزی است که به خاطر کاهش شار تزویج آرمیچر، به وجود آمده و منجر به کاهش سرعت پرتابه و بازده تفنگ کوپلی القایی می‌شود [۱۵].

در این مقاله نویسندگان ابتدا به توضیح اثر ترمزی وارد بر آرمیچر پرداخته‌اند. پس از آن تأثیرات این اثر بر روی تفنگ کوپلی القایی بررسی شده و در مرحله بعدی با تغییر پارامترهای مدار از جمله افزایش ظرفیت خازن‌ها، ولتاژ خازن‌ها، کاهش مقاومت کوپل، کاهش جرم پرتابه و با کم کردن طول آن سعی در کاهش این اثر مخرب بر روی تفنگ‌های کوپلی شده است.

همانطور که در این مقاله اشاره شده است، تغییر ساختار کوپل‌ها موجب تغییر در نیروی الکترومغناطیسی و گرما در طی پرتاب می‌شود. تنظیم ساختار و جنس آرمیچر، توزیع گرمای ژولی و نیروی الکترومغناطیسی را بهبود می‌بخشد. به خاطر وجود اثر ترمزی در هر زمانی نیرویی مخالفی بعد از عبور آرمیچر از کوپل تولید می‌گردد.

توزیع چگالی جریان بر روی پرتابه یکسان نیست، همچنین اثر پوستی بر روی پرتابه به وجود می‌آید. منطقه نزدیک به سطح خروجی پرتابه دارای چگالی جریان بالایی بوده و بنابراین زمانی که شدت مغناطیسی محوری کاهش یابد، جریان معکوس زیادی در این ناحیه القا می‌شود. فاصله بین پرتابه و کویل خیلی کم است در نتیجه نیروی ترمزی بزرگی تولید می‌شود که دلیل آن تقابل بین جریان القایی و جریان کویل است. همچنین در این مقاله نتیجه گرفته شده است که افزایش سرعت آرمیچر به منظور کاهش کوپلینگ مغناطیسی بین آرمیچر و کویل، زمانی که جریان معکوس القا گردد، یا با بهینه‌سازی پارامترهای منبع تغذیه پالسی و آرمیچر می‌توان اثر ترمزی را کاهش داد و موجب افزایش بازده شد.

در این مقاله با افزایش ولتاژ شارژ و ظرفیت خازن‌ها موجب کاهش اثر ترمزی شده است. همچنین کاهش مقاومت کویل‌ها سبب کاهش افت سرعت و در نتیجه افزایش بهره شده است. همچنین با تغییر طول پرتابه، وزن‌های مختلف پرتابه حاصل شده است که در نتیجه در نتایج عملی ثابت گردیده که کاهش طول و به سبب آن کاهش وزن پرتابه موجب افزایش سرعت و در نتیجه کاهش اثر ترمزی و افزایش بهره می‌گردد.

از جمله معایب تغییر در پارامترهای فوق در تفنگ کوپلی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) افزایش ولتاژ شارژ نیاز به قدرت مکانیکی و عایق الکتریکی قوی‌ای دارد.

(۲) کاهش جرم آرمیچر از حدی نمی‌تواند کمتر شود زیرا جریان در پرتابه به اندازه کافی القا

نمی‌گردد [۱۵].

در پژوهشی دیگر یک تفنگ کوپلی با لوله‌های متفاوت، تعداد دورهای سیم‌پیچ متفاوت و همچنین با پرتابه‌هایی با طول و قطر متفاوت تست و نتایج آن ثبت گردیده است. همچنین از آنجا که منبع تغذیه در این تفنگ کوپلی القایی جایگزین خازن‌ها شده است، با افزایش تعداد پالس‌ها، عملکرد تفنگ کوپلی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷].

در این مقاله دیده می‌شود که استفاده از لوله‌ها با قطرهای مختلف و یا تعداد دورهای مختلف بر روی سرعت پرتابه اثر چندانی ندارند؛ اما افزایش طول پرتابه و افزایش قطر آن (کاهش فاصله هوایی) باعث افزایش سرعت پرتابه می‌گردد. همچنین با افزایش تعداد نیم‌موج‌های اعمالی به کوپل‌ها، به اندازه بسیار کمی سرعت پرتابه افزایش می‌یابد اما بهره تفنگ کوپلی کاهش می‌یابد.

همچنین مقایسه‌ای بین اندازه‌گیری سرعت توسط لیزر He-Ne با دیودهای نوری صورت پذیرفته که نتایج حاصله حاکی از آن است که تفاوت چندانی بین اعداد اندازه‌گیری شده توسط این ابزارها نیست [۱۷].

۲-۲ ساختار پرتابه

یک تفنگ کوپلی القایی را می‌توان با تغییر طول و عرض پرتابه، سرعت نهایی پرتابه را بهبود بخشید. در واقع هدف از مدل کردن یک تفنگ کوپلی برای فهمیدن این موضوع است که پارامترهایی چون چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی، اندازه پرتابه، چگالی جریان ماکزیمم و نیروی بازدارنده (اثر ترمزی) چگونه بر عملکرد یک تفنگ کوپلی اثر می‌گذارند [۱۸].

در این مقاله ابتدا مدلسازی از طریق روابط کوانرژي صورت پذیرفته است و توسط نرم‌افزارهای اجزاء محدود شبیه‌سازی و در نهایت ساخته شده و تست‌های مربوطه بر روی آن صورت پذیرفته است.

همچنین نشان داده شده است که افزایش عرض پرتابه با ثابت نگه‌داشتن طول آن سبب کاهش فاصله هوایی بین پرتابه و کوپل شده و سرعت پرتابه را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش طول پرتابه با ثابت نگه‌داشتن عرض آن، از حدی به بعد موجب کاهش نیرو و افزایش بیش از حد جرم پرتابه و در نتیجه کاهش سرعت می‌شود. در این مرجع بهینه‌ترین حالت برای طول پرتابه، یکسان بودن آن با طول کوپل اعلام شده است [۱۸].

تأثیر لایه‌لایه کردن در جهت طولی آرمیچر روی عملکرد تفنگ کوپلی با استفاده از روش حوزه تفاضل متناهی در صفحه (r - z) دوبعدی سیستم مختصات استوانه‌ای متقارن مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶].

در این مرجع لایه‌های بیرونی و درونی با رسانایی‌های متفاوت مورد تست و شبیه‌سازی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین نیروی جلوبرنده القایی زمانی به آرمیچر اعمال می‌گردد که رسانایی لایه خارجی آرمیچر کوچک‌تر از لایه داخلی آن باشد.

آقای بینگوی^۱ و همکاران سعی کرده‌اند تا با افزایش ضخامت پرتابه در قسمت انتهایی آن (معمولاً بیش‌ترین نیرو به قسمت انتهایی پرتابه وارد می‌شود) و استفاده از مواد با سختی زیاد در برابر حرارت در آن نقطه از تغییر شکل پرتابه تحت نیروهای الکترومغناطیسی زیاد وارده از طرف کویل، جلوگیری نمایند [۲۱].

در [۱۹] یک تفنگ کویلی القایی تک‌مرحله‌ای با ساختار سیم‌پیچی ۶ قطبی که در آن شش کویل به صورت دوار دور لوله قرار گرفته‌اند با ارائه ساختاری جدید برای پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است. در این تفنگ القایی به جای استفاده از یک آرمیچر در داخل لوله، از دو آرمیچر یکی در داخل لوله و دیگری در خارج و دور کویل‌ها استفاده کرده است. استفاده از چنین ترکیب کویل‌ها سبب افزایش نیروی شعاعی در پرتابه شده که خود موجب افزایش برد پرتابه است. از طرفی در مقایسه صورت گرفته بین پرتابه‌های تکی و دابل که در ولتاژهای مختلف صورت گرفته است، مشخص شده که استفاده از پرتابه‌های دابل موجب افزایش بازده در تبدیل انرژی می‌گردد.

۳-۲ تأثیر پارامترهای بانک خازنی

ژیانگ^۲ و همکاران به منظور آنالیز مشخصه‌های سرعت یک پرتاب‌کننده الکترومغناطیسی القایی، یک نمونه از نوع تک‌مرحله‌ای آن را ساخته و با نرم‌افزار اجزاء محدود شبیه‌سازی کرده‌اند. سپس وسیله اندازه‌گیری آن ساخته شده و نتایج عملی آن به دست آمده است [۲۰].

¹ -Zou Bengui

² -H. Xiang

نتایج حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ شارژ خازن‌ها، پیک موج شتاب نیز افزایش می‌یابد. در این مرجع تمهیداتی نیز برای جلوگیری از القای جریان آرمیچر در اندازه‌گیر شتاب و زدن صدمه به آن، اندیشیده شده است [۲۰].

در [۱۵] نیز همانطور که اشاره شد با افزایش ظرفیت خازن‌ها و ولتاژ خازن‌ها اثر ترمزی را کاهش داده است.

۲-۴ تأثیر نیروهای مکانیکی بر اجزاء تفنگ کویلی القایی

یک روش ریاضی از کوپلینگ ساختار مغناطیسی آرمیچر به منظور طراحی یک پرتابه با مقاومت در برابر تنش بالا و تضمین پرتاب آن، در [۲۱] تهیه شده است. جریان گردابی، نیروهای مغناطیسی، تغییر شکل و استرس وارد بر آرمیچر از جمله موارد بررسی شده در این مرجع می‌باشند. در این مرجع ذکر شده است که نیروی لورنتس وارد بر پرتابه شامل دو نیروی در جهت محوری (که موجب شتاب گرفتن پرتابه می‌شود) و نیروی در جهت شعاعی (که موجب تغییر شکل پرتابه و انحراف آن از مسیر شده و بازده را کاهش می‌دهد) است.

همچنین میزان استرس برای ضخامت‌های مختلف پرتابه اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی نشان داده که چگالی شار مغناطیسی، نیروهای مغناطیسی و تغییر شکل آرمیچر به خاطر توزیع ناهمسان چگالی شار و جریان گردابی در آرمیچر بوده که مقدار ماکزیمم تغییر شکل و همچنین ماکزیمم جریان گردابی در انتهای پرتابه رخ می‌دهد. با افزایش ضخامت پرتابه در قسمت انتهایی آن کمک به کاهش استرس در آن نقطه و عدم تغییر شکل پرتابه شده است. جریان گردابی و نیروی الکترومغناطیسی هر چه به صورت شعاعی از سطح پرتابه به مرکز آن می‌رویم، کاهش می‌یابد. در نتیجه از جمله راه‌های کاهش تغییر شکل پرتابه به موارد زیر اشاره شده است:

(۱) افزایش ضخامت پرتابه در قسمت انتهایی

۲) استفاده از مواد با سختی زیاد در برابر حرارت در قسمت انتهایی پرتابه. استفاده از این نوع مواد نه تنها از تغییر شکل جلوگیری می‌نماید بلکه این مواد دارای مقاومت کمی بوده و انرژی جنبشی و سرعت پرتابه را افزایش می‌دهند [۲۱].

همچنین می‌توان از دو روش ایستایی و پویا برای آنالیز نیروهای وارد بر کوئل استفاده کرد. کوئل‌های یک تفنگ کوئلی القایی به خاطر میدان شدید و متمرکزی که تولید می‌کنند تحت تأثیر سه نیروی متفاوت قرار دارند:

۱) نیرویی در جهت شعاعی برای منبسط کردن آن

۲) نیروی فشرده کننده کوئل‌ها

۳) نیرو در جهت محوری

حتی جدای از این ۳ نیرو، نیروی عکس‌العمل پرتابه نیز به کوئل وارد می‌شود [۹].

در این مقاله در طراحی کوئل‌ها هر دو مورد نیروی مکانیکی و عایق الکتریکی در نظر گرفته شده است. در این مرجع با تغییر جریان کوئل‌ها و همچنین تغییر خازن‌ها با ولتاژهای شارژ مختلف و پیک‌های جریان مختلف، نیروهای وارد بر کوئل‌ها محاسبه گردیده است. نتایج حاکی از آن است که روش ایستایی برای پرتاب‌کننده‌های چندمرحله‌ای پاسخ درستی نمی‌دهد زیرا نیرو در جهت محوری وارده بر کوئل‌ها نادیده گرفته می‌شود. در واقع در روش دینامیک پرتابه به اندازه شتاب در مرحله قبل، شتاب داده می‌شود و سپس با سرعت اولیه وارد کوئل خواهد شد و پس از آن محاسبات مربوط به شدت و استرس مکانیکی وارد بر کوئل محاسبه می‌گردد.

نتیجه به این صورت است که یک کوئل ایده‌آل کوئلی است که دارای ضخامت شعاعی کم و طول محوری کوتاه است. در واقع شعاع کم باعث ماکزیمم شدن کوپلینگ میدان بین کوئل و پرتابه شده و طول محوری کم نیز موجب مینیمم شدن نیروی شعاعی روی پرتابه می‌گردد. مواد عایقی‌ای که برای

کویل‌ها به کار می‌روند موجب مقاومت کویل در برابر نیروهای شعاعی و بخشی از نیروهای محوری می‌شود؛ و همچنین موجب ایزوله کردن کویل از ساپورت رسانا می‌گردد [۹].

۲-۵ استفاده از هسته مغناطیسی

یک تفنگ القایی را می‌توان از لحاظ وجود هسته از منظر وجود و عدم وجود هسته فرومغناطیس و با هسته فرومغناطیس ترکیبی (استفاده از دو لایه فرومغناطیسی و الکترومغناطیسی) مورد بررسی قرار داد [۲۲]. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از هسته فرومغناطیس سبب افزایش سرعت و کاهش تلفات مغناطیسی می‌شود. در مقایسه بین دو نوع با هسته فرومغناطیس و هسته ترکیبی می‌توان گفت که در صورت استفاده از هسته نسبت به حالت هسته ترکیبی، سرعت زیاد و پرتی میدان بیش‌تر است و برای یک تفنگ کویلی القایی با هسته ترکیبی، پرتی مغناطیسی کمتر و سرعت پرتابه نیز نسبت به هسته فرومغناطیس کمتر است.

همچنین نشان داده شده است که کاربردهایی که برای آن‌ها هسته فرومغناطیس در نظر گرفته شده است باعث افزایش بازده تفنگ کویلی و سرعت نهایی پرتابه شده است. همچنین با کاهش پرتی میدان سبب کاهش خطرات انسانی و تداخل در وسایل الکترونیکی اطرافش می‌شود. افزایش ضخامت بخش هسته فرومغناطیس این قابلیت را ایجاد می‌نماید که پارامترهای دینامیکی به همراه جرم هسته افزایش یابد. افزایش بخش الکترومغناطیسی (لایه بیرونی از جنس مس) موجب کاهش پارامترهای دینامیکی شده و افزایش جرم را کمینه می‌کند [۲۲].

در تفنگ کویلی القایی تامپسون می‌توان به جای استفاده از یک هسته، از سه هسته موازی برای جلوگیری از پرتی میدان الکترومغناطیسی استفاده کرد که موجب می‌شود پرتابه رینگی شکل آلومینیومی با سرعت بیش‌تری نسبت به تفنگی که خود آقای تامپسون اختراع کرده بود، شتاب گیرد.

از جمله مزایای دیگر این تفنگ کوپلی بهبود یافته نسبت به مدل سابق آن می‌توان از عدم اشباع مغناطیسی تا ولتاژهای بالاتری نسبت به مدل قبلی اشاره نمود [۱۱].

۲-۶ استفاده از ساختارهای چندمرحله‌ای

در یک تفنگ کوپلی القایی چند مرحله‌ای با بهینه ساختن پارامترهای خازن و زمان‌های سوئیچینگ، می‌توان سرعت پرتابه را افزایش داد [۲۳]. در این مرجع در قسمت شبیه‌سازی با تغییر مکان پرتابه نسبت به کوپل‌ها و تغییر در زمان‌بندی ورود جریان به کوپل‌ها، سعی در افزایش سرعت آن‌ها شده است.

همچنین نتایج حاکی از آن است که مدت زمان تخلیه در هر کوپل باید نسبت به کوپل قبلی کمتر باشد که برای این منظور اندوکتانس هر مجموعه کوپل نسبت به کوپل‌های قبل از خودش باید کمتر باشد. همچنین برای افزایش سرعت پرتابه، ظرفیت هر بانک خازنی نسبت به بانک خازنی مرحله قبل از خودش، باید کمتر باشد [۲۳].

در یک تفنگ کوپلی القایی می‌توان به جای استفاده از بانک خازنی به عنوان منبع انرژی، از ژنراتور استفاده نمود [۲۴].

در این مقاله مجموعه منبع تغذیه از سه موتور تشکیل شده است، که اولی نقش موتور محرک و دو ژنراتور با فرکانس‌های رتور متفاوت به عنوان ژنراتور به موتور محرک کوپل شده‌اند. مشکل استفاده از خازن این است که کل انرژی خود را نمی‌تواند به طور کامل به پرتابه اعمال کند. از طرفی مهم‌ترین مزیت استفاده از ژنراتور نسبت به خازن این است که مؤلفه DC جریان، نیروی عقب‌ران (ترمزی) تولید نمی‌کند. در منبع ژنراتوری برای غلبه بر این موضوع می‌توان طوری سوئیچینگ فازها را در منبع تغذیه ژنراتورها کنترل کرد که این مشکل حل شود [۲۴].

در [۲۵] امکان ساخت یک تفنگ کویلی القایی چندمرحله‌ای برای پرتابه‌های با جرم بالا و سرعت زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. تفنگ طراحی شده در این مرجع ۱۶۰ مرحله‌ای بوده و از آنجا که شبیه‌سازی آن سخت است یک روش محاسباتی با تقسیم تفنگ به چند قسمت مساوی و سازه‌های کوچک‌تر ارائه شده است. به عنوان مثال در این شبیه‌سازی یک تفنگ کویلی ۳۰ مرحله‌ای را مورد بررسی قرار داده و سرعت نهایی گلوله را به دست می‌آورد. سپس در شبیه‌سازی بعدی از همین مدل ۳۰ مرحله‌ای استفاده کرده با این تفاوت که سرعت اولیه پرتابه را برابر سرعت نهایی می‌گذارد و همین کار را تا اتمام ۱۶۰ مرحله تکرار می‌کند.

برای یک تفنگ کویلی چند مرحله‌ای می‌توان یک مدل عددی ارائه داد [۲۶]. در این مرجع فلوچارت شبیه‌سازی کدهای ارائه شده رسم شده است و پس از آن شبیه‌سازی کدها و برنامه‌نویسی آن‌ها با روش محاسباتی میدان مغناطیسی متقارن صورت پذیرفته است. از آنجا که جریان القایی در آرمیچر در طول لوله نامتقارن است، برای به دست آوردن روابط آن ابتدا آرمیچر را به تعداد مشخصی جرم مساوی و متحدالشکل تقسیم کرده که هر کدام از این جرم‌ها یک حلقه فلزی بوده که در مدار معادل با یک مقاومت و یک سلف شبیه‌سازی شده است.

در [۲۷] نیز با استفاده از روش ارائه شده در [۲۶] پرتابه را به ۱۰ قسمت مساوی و متحدالشکل تقسیم کرده و سپس مدار معادل و روابط حاکم بر آن را تشکیل داده است. نتایج این مقاله حاکی از آن است که همیشه برای یک تفنگ کویلی القایی زمانی که مرکز پرتابه به مرکز کوئل برسد، بهترین زمان برای تخلیه خازن در کوئل آن مرحله نیست بلکه در هر مرحله نقطه تخلیه خازن با مرحله قبل متفاوت است.

محمد^۱ و آبدالا^۲ یک تفنگ کویلی القایی سه مرحله‌ای را طراحی و سیم‌پیچی آن را از لحاظ تعداد دور در هر مرحله، ولتاژهای متفاوت کوئل و زمان سوئیچینگ مورد بررسی قرار داده‌اند. این تفنگ کویلی

^۱ -H. M. Mohamed

^۲ -M. A. Abdalla

هم از نظر سیم‌پیچی سه مرحله‌ای متقارن (یکسان بودن پارامترهای کوئل) و هم نامتقارن مورد مقایسه قرار گرفته است. در برخی موارد ساختار متقارن از منظر تعداد دور هر مرحله دارای سرعت پرتابه بیشتری بوده و از برخی جهات ساختار نامتقارن برتری دارد [۲۹].

در این مقاله دو نمونه از ساختارهای نامتقارن با یکدیگر مقایسه شده‌اند و از بین این دو، با سنجش همگی سه پارامتر ذکر شده یک کوئل، نتیجه می‌شود که ساختار نامتقارن تفنگ کوئلی القایی اول دارای سرعت پرتابه بیشتر، طول کوئل کمتر و زمان پرتاب کمتر نسبت به ساختار نامتقارن دوم است. همچنین در این مرجع برای یک تفنگ کوئلی القایی یک مدار تحریک طراحی و ارائه شده است.

ژانگ^۱ و همکاران عملکرد یک تفنگ کوئلی القایی ۶ مرحله‌ای را در جهات میدان مغناطیسی متفاوت به منظور افزایش بازده تفنگ مورد بررسی قرار داده‌اند. در واقع برای پارامترهای یکسان در سه مرحله آخر جهت میدان مغناطیسی را معکوس کرده‌اند. این امر سبب افزایش نیروی ترمزی بر روی پرتابه و همچنین افزایش جریان کوئل‌ها در حین عبور از سه مرحله پایانی شده است؛ اما در این مرجع با تغییر در پارامتر زمان سوئیچینگ، از بالا بودن جریان در این سه کوئل انتهایی حین تغییر جهت مغناطیسی استفاده کرده و سبب گشته تا پرتابه با سرعت‌ها بالاتری پرتاب شود [۳۰].

در [۳۱] یک مدل گرمایی-الکترومغناطیسی برای تفنگ کوئلی القایی ۱۵ مرحله‌ای (که در بخش ساخت، فقط بر روی ۶ مرحله از آن صورت کار شده است) ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که افزایش دما در لایه‌های بیرونی پرتابه و انتهای آن بیشتر از دیگر نقاط است. در مقایسه صورت گرفته بین دو پرتابه با جنس‌های آلومینیوم و مس مشاهده شده است که افزایش دما برای آرمیچر مسی کمتر از آرمیچر آلومینیومی است این در حالی است که از لحاظ سرعت پرتابه، هیچ‌گونه تفاوتی با یکدیگر ندارند [۳۱].

¹ -T. Zhang

می‌توان برای بهبود سرعت پرتابه از مدارات الکترونیکی استفاده نمود تا به کمک آن‌ها بتوان موقعیت دقیق پرتابه را به منظور سوئیچینگ بهتر تشخیص داد. از آنجا که اعمال سوئیچینگ در مکان نامناسب پرتابه در کوئل سبب ایجاد نیرویی در خلاف جهت حرکت و کاهش سرعت می‌شود که با استفاده از پرتوهای لیزر می‌توان مکان مناسب پرتابه را تشخیص داد. نام این مدار را مدار سوئیچ جریان گذاشته‌اند [۳۲].

۲-۷ بهینه‌سازی تفنگ کوئلی القایی با استفاده از الگوریتم‌های مرسوم

در [۲۸] از یک روش پیشرفته تحلیل در طراحی تفنگ کوئلی القایی بر پایه حلقه جریان ارائه شده است. در این مرجع برای انجام طراحی بهینه روش الگوریتم ژنتیک پی‌درپی و الگوریتم ژنتیک سنتی استفاده شده است. از جمله پارامترهای قابل تغییر و بهینه کردن توسط الگوریتم ژنتیک در تفنگ القایی که در این مرجع مورد استفاده قرار گرفته است، می‌توان به تعداد دور کوئل‌ها، موقعیت پرتابه در هنگام اعمال جریان به کوئل‌ها و فاصله بین کوئل‌ها اشاره نمود.

در [۴] عملکرد یک تفنگ کوئلی سه مرحله‌ای بر پایه روش فیلامنت جریان که در آن سرعت پرتابه به عنوان هدف قرار داده شده، با بهینه کردن هندسه و پارامترهای توان سعی در افزایش سرعت پرتابه در تفنگ کوئلی القایی شده است. در این مرجع به منظور آنالیز عملکرد تفنگ کوئلی القایی، مدل مدار معادل شامل محاسبات افزایش دما به کار گرفته شده است.

در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک تطبیقی سعی در بهینه‌سازی پارامترهایی چون طول پرتابه، ضخامت پرتابه، قطر خارجی پرتابه، تعداد دور کوئل‌ها، فاصله بین کوئل‌های متوالی، ولتاژ اولیه خازن و ظرفیت خازن‌ها به منظور افزایش سرعت پرتابه شده است. از جمله نتایج دیگر این بهینه‌سازی می‌توان به کاهش دما در کوئل‌ها اشاره نمود.

در [۳۳] نیز مدار معادل یک تفنگ کوئلی القایی پنج مرحله‌ای توسط روش فیلامنت جریان، به دست آمده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب شده غیر مسلط و بهینه‌سازی ذرات چندمنظوره از منظر پارامترهایی چون تعداد دور کوئل‌ها و زمان سوئیچینگ بهینه شده است.

در این پایان نامه به منظور بهبود سرعت نهایی پرتابه در یک تفنگ کویلی القایی با ارائه هندسه‌ای جدید برای این دسته از تفنگ‌ها به صورت مخروطی سرعت پرتابه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده از روش سعی و خطا توسط محیط نرم افزار اجزاء محدود JMAG-Designer پارامترهای کوئل استاتور به منظور افزایش سرعت خروجی پرتابه، مورد اصلاح قرار می‌گیرند. در نهایت نیز به منظور آزمایش عملکرد این دسته از تفنگ‌های کویلی، تغییر در جنس پرتابه و ساختار پرتابه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل سوم

طراحی تفنگ کویلی القایی

۳-۱ مقدمه

در این فصل یک تفنگ القایی کویلی طراحی شده و پس از آن این طراحی اولیه در نرم افزار اجزاء محدود JMAG-Designer مورد تحلیل عملکرد قرار می گیرد. سپس با شبیه سازی تفنگ کویلی القایی در محیط سیمولینک متلب، نتایج صحت سنجی می شوند. پس از آن روی طراحی موجود کارهای زیر به منظور بهبود و همچنین آزمایش عملکرد تفنگ کویلی القایی صورت می پذیرد:

(۱) اصلاح طراحی تفنگ به روش سعی و خطا در محیط نرم افزار JMAG-Designer

(۲) تغییر ساختار تفنگ کویلی القایی از حالت استوانه ای به مخروطی به منظور افزایش سرعت پرتابه

(۳) بررسی تأثیر هسته بر تفنگ کویلی القایی

(۴) بررسی تغییر جنس پرتابه از مس به آلومینیوم و همچنین تغییر ساختار آن از حالت سلنوئیدی به

یکپارچه

۳-۲ تعریف مسئله طراحی اولیه

مطلوب است طراحی تفنگ کویلی القایی برای یک سیستم با مشخصات مندرج در جدول ۳-۱. در این طراحی محدودیت سقف پیک جریان گذرای ۱۵۰۰۰ آمپر (با توجه به مشخصه کلید انتخابی برای ساخت تفنگ کویلی القایی) را نیز لحاظ می نماییم.

جدول ۳-۱: مشخصات مطلوب مسئله طراحی تفنگ کویلی القایی

نوع پارامتر	مقدار پارامتر	واحد پارامتر
وزن پرتابه	۶۰	گرم (g)
قطر پرتابه	۴۳/۴	میلی متر (mm)
ولتاژ	۴۴۰	ولت (V)
سرعت حداقل پرتابه	۳۰	متر بر ثانیه ($\frac{m}{s}$)
طول پرتابه	۲۷/۴	میلی متر (mm)

۳-۳ طراحی اولیه

۳-۳-۱ طراحی خازن

انرژی اولیه ذخیره شده در خازن‌ها قبل از تخلیه در سیم‌پیچ‌های استاتور تعیین‌کننده میزان انرژی مورد نیاز برای شتاب دادن به پرتابه است. با توجه به الزامات اولیه مورد نیاز (خواسته‌شده) سیستم پرتاب‌کننده و روابط مربوط به خازن‌ها، انرژی ذخیره شده و ولتاژ شارژ خازن‌ها به طور کامل مشخص می‌شوند.

$$E_{\text{cap}} = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (۱-۳)$$

در این طراحی به دنبال آن هستیم تا پرتابه‌ای به وزن حدوداً ۶۰ گرم را با سرعت تقریبی ۳۰ متر بر ثانیه پرتاب کنیم. طبق رابطه ۲-۳ انرژی جنبشی مورد نیاز برای شتاب دادن به پرتابه تا رسیدن به سرعت مورد نظر برابر با ۲۷ ژول است.

$$E_k = \frac{1}{2} m V_s^2 \quad (۲-۳)$$

با توجه به بازده بسیار پایین تفنگ‌های کوپلی (که در مقالات معمولاً از ۵ درصد تجاوز نکرده است) و همچنین در نظر گرفتن تلفات اهمی، مغناطیسی و تلفات مربوط به خازن، انرژی اولیه برای سیستم ۵۴۰ ژول در نظر گرفته شده است. به منظور قابل دسترسی بودن منبع تغذیه بانک خازنی ولتاژ ۴۴۰ ولت AC به عنوان ولتاژ کلی سیستم پرتاب‌کننده مورد نظر انتخاب می‌شود؛ بنابراین طبق رابطه ۱-۳ ظرفیت خازن مورد نیاز با مقدار ۵۵۷۸ میکروفاراد محاسبه می‌شود. با توجه به خازن‌های موجود در بازار یک عدد خازن ۶۸۰۰ میکروفارادی برای این طراحی انتخاب می‌گردد. جدول ۲-۳ مشخصات مربوط به بانک خازنی و انرژی ذخیره شده اولیه را نشان می‌دهد.

۳-۳-۲ طراحی کوپل و پرتابه

عملکرد هر تفنگ کوپلی الکترومغناطیسی و یا به طور کلی‌تر هر پرتاب‌کننده خطی الکترومغناطیسی به میزان زیادی به کوپل استاتور و تناسب آن با منبع تغذیه و آرمیچر دارد. در تفنگ‌های کوپلی

جدول ۳-۲: مشخصات مربوط به بانک خازنی و انرژی ذخیره شده اولیه

ولتاژ	ولت	۴۴۰
ظرفیت خازن	میکروفاراد	۶۸۰۰
انرژی ذخیره شده	ژول	۵۴۴

القای طبق رابطه ۳-۳ فرکانس نوسانات جریان، مرتبط با اندوکتانس کوئل و ظرفیت خازن است.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{11}C}} \quad (۳-۳)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad (۴-۳)$$

که در رابطه ۳-۴، $\alpha = \frac{R}{2L}$ است. از آنجا که مقاومت خازن مدار خیلی کم است، فرکانس میرایی نوسانات خیلی به فرکانس رزونانس سیستم نزدیک است. اندوکتانس کوئل استاتور باید به گونه‌ای انتخاب گردد تا فرکانس نوسانات سیستم را در محدوده معینی نگه‌داشته تا از پدیده‌هایی چون تخلیه کرونا و اثر پوستی جلوگیری نماید.

انتخاب قطر هادی کوئل استاتور باید با توجه به شرایط الکتریکی و عملی صورت پذیرد. انتخاب یک هادی ضخیم سبب می‌شود تا پیچیدن آن به دور لوله به صورت منظم و در کنار هم سخت باشد. این در حالی است که با افزایش قطر هادی تا حدی می‌توان مقاومت سیستم را کاهش داد، هر چند این مورد را فقط برای جریان DC می‌توان عنوان کرد و برای جریان AC باید اثر پوستی نیز در نظر گرفته شود. اثر پوستی به خاطر عبور جریان متناوب عبوری از استاتور در لایه‌های بیرونی هادی رخ می‌دهد. روابطی که مقاومت AC را به مقاومت DC مرتبط می‌سازد، در استاندارد IEC60287-1-1 آمده است. این روابط برای هادی‌ها با ضرایبی تجربی به دست آمده است. رابطه بین مقاومت AC و DC را می‌توان به وسیله رابطه ۳-۵ بیان کرد.

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + y_s + y_p)$$

$$y_s = 2.9 \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}, \quad x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} * 10^{-7} k_s \quad (5-3)$$

$$y_p = 2.9 \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2, \quad x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} * 10^{-7} k_p$$

که در آن y_s ضریب اثر پوستی و y_p ضریب اثر همجواری هستند. k_p و k_s نیز ضرایبی هستند که برای محاسبه ضریب اثر پوستی و ضریب اثر همجواری مورد استفاده قرار می گیرند که مقادیر آنها به ترتیب برای هادی های مسی با روکش لاکه برابر با ۰/۲۵ و ۰/۱۵ است. همچنین f فرکانس، d_c قطر هادی و s فاصله محوری بین هادی ها هستند.

همانطور که از رابطه ۳-۵ فهمیده می شود، با افزایش فرکانس یا افزایش قطر هادی اثر پوستی نیز افزایش می یابد. در اینجا بیشترین قطری از هادی را که می توان بر روی لوله پیچید (به منظور کاهش مقاومت) انتخاب کرده تا در فرکانسی نزدیک به ۳kHz عمل نماید. برای کوئل قطر ۲/۵ میلی متر انتخاب شده است.

پس از تعیین ظرفیت خازن، مقدار اندوکتانس کوئل باید طوری انتخاب شود که مقدار پیک جریان از ۱۵۰۰ آمپر تجاوز نکرده و فرکانس عملکرد نیز زیر ۳kHz باشد. این محدودیت عموماً به خاطر این موضوع است که باید اثر پوستی را در کوئل کاهش داد. رابطه ۳-۶ نحوه ارتباط بین پیک جریان و پارامترهای بالا را نشان می دهد.

$$I_{max} = \frac{V}{L_{11}\omega} \quad (6-3)$$

با توجه به سقف فرکانس و جریان تعیین شده، اندوکتانس سلف ۲ میکروهانری (طبق رابطه ۳-۵) انتخاب می گردد. از آنجا که تعداد دور کوئل بیشترین تأثیر را بر روی اندوکتانس خودی دارد، می توان تعداد دور را محاسبه نمود. از طرفی افزایش بیشتر تعداد دور استاتور سبب می شود تا مقاومت کوئل افزایش پیدا کرده و میرایی جریان زیاد شده و در نتیجه موجب کاهش عملکرد می شود. برای

این منظور تعداد دور ۱۵ انتخاب می‌گردد؛ بنابراین طول کویل با توجه به تعداد دور و قطر هادی برابر با ۳۷/۵ انتخاب می‌شود.

با توجه به تئوری تفنگ‌های الکترومغناطیسی القایی، نیروی محوری وارد بر پرتابه متناسب با گرادیان اندوکتانس متقابل بین کویل و پرتابه است. این گرادیان از طرفی مرتبط با نسبت شعاع هادی استاتور به هادی آرمیچر نیز است. از تحقیقات افراد دیگر بر روی تفنگ‌های کویلی القایی به سرعت مشخص می‌شود که افزایش قطر داخلی پرتابه موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود. از طرفی افزایش قطر داخلی پرتابه سبب افزایش میزان هادی به کار رفته دور پرتابه شده که موجب سنگین شدن آن و کاهش شتاب می‌شود. باید بین این دو پارامتر یک حد میانه انتخاب شود. نتیجه افزایش نسبت شعاع هادی استاتور به هادی آرمیچر این است که مقاومت کویل در هر دور افزایش می‌یابد و افزایش زیاد تعداد دورها روی استاتور و آرمیچر نامطلوب است. برای کاهش تلفات مسی در هر دو کویل، افزایش قطر هادی‌ها لازم است.

بدین منظور قطر هادی‌های کویل استاتور و آرمیچر مطابق جدول ۳-۳ انتخاب شده است.

جدول ۳-۳: مشخصات قطر هادی‌های استاتور و آرمیچر

ماکزیمم فرکانس برای داشتن جریان یکدست (KH)	مقاومت در هر متر ($\frac{m\Omega}{m}$)	قطر (mm)	
۳/۲	۴/۹	۲/۵۰	کویل استاتور
۵/۳	۶/۵۷	۱/۷	کویل آرمیچر

۳-۳-۳ طراحی لوله

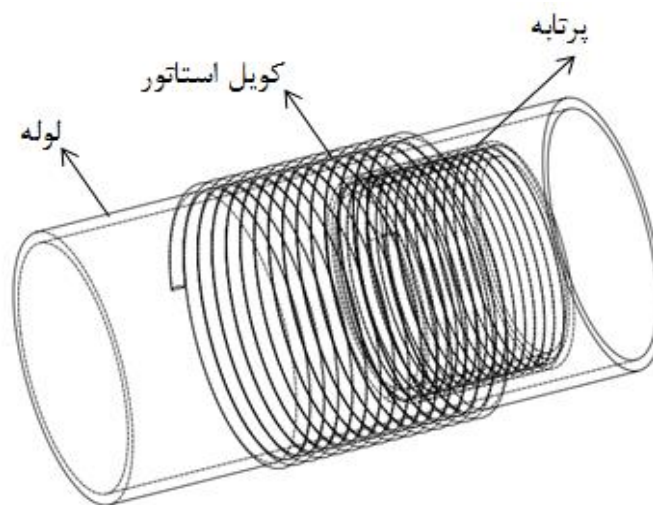
بدین منظور با توجه به این موضوع که فاصله هوایی در یک ماشین باید کم باشد و همچنین با در نظر گرفتن محدودیت‌های مکانیکی برای فاصله هوایی بین پرتابه و کویل، لوله‌ای با قطر داخلی ۴۶ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. به منظور القای بهتر ولتاژ در پرتابه نیز کمترین ضخامت ممکن برای

لوله و همچنین با در نظر گرفتن میزان استحکام مورد نیاز برای لوله، ضخامت آن برابر با ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

جنس لوله باید حتماً از مواد غیر فرومغناطیس و غیر هادی جریان باشد؛ بنابراین برای تفنگ‌های کوپلی‌ای که معمولاً چند مرحله‌ای هستند از موادی مانند پرسپکس که مانند شیشه شفاف می‌باشند، استفاده می‌شود. استفاده از این مواد برای تسهیل در استفاده از سنسورهای نوری جهت تشخیص مکان گلوله در داخل لوله و سوئیچینگ به موقع کوپل‌ها در موقعیت‌های مناسب است. در این طراحی از آنجا که تفنگ کوپلی القایی، یک مرحله‌ای طراحی شده و نیاز به مدار سوئیچینگ خاصی که در آن سنسورهای تعیین موقعیت بکار رود را ندارد، می‌توان از لوله‌هایی از جنس پلیمر استفاده کرد. مشخصات کلی پارامترهای طراحی در جدول ۳-۴ آورده شده است.

۳-۴ شبیه‌سازی طراحی اولیه در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۳-۴، تفنگ کوپلی القایی در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۳-۱ نمایی از تفنگ کوپلی القایی را نشان می‌دهد. جنس لوله، کوپل و پرتابه در تفنگ کوپلی القایی به ترتیب پلی‌اتیلن، مس و مس است. مکان اولیه پرتابه در تفنگ القایی دارای یک نقطه بهینه است به صورتی که در آن نقطه بیشترین نیرو به پرتابه



شکل ۳-۱: نمایی از تفنگ کوپلی القایی طراحی شده

جدول ۳-۴: مشخصات کلی پارامترهای طراحی تفنگ کویلی القایی

نوع پارامتر	مقدار پارامتر	واحد پارامتر
طول کویل	۳۷/۵	میلی متر (mm)
قطر هادی کویل	۲/۵	میلی متر (mm)
قطر داخلی کویل	۵۰	میلی متر (mm)
قطر خارجی کویل	۵۵	میلی متر (mm)
تعداد دور هادی کویل	۱۶	-
طول پرتابه	۲۷/۴	میلی متر (mm)
قطر هادی پرتابه	۱/۷	میلی متر (mm)
قطر داخلی پرتابه	۴۰	میلی متر (mm)
قطر خارجی پرتابه	۴۳/۴	میلی متر (mm)
طول لوله	۵۰۰	میلی متر (mm)
قطر داخلی لوله	۴۶	میلی متر (mm)
قطر خارجی لوله	۵۰	میلی متر (mm)
ولتاژ شارژ خازن	۴۴۰	ولت (V)
ظرفیت خازن	۶۸۰۰	میکروفاراد (μF)

جنس لوله، کویل و پرتابه در تفنگ کویلی القایی به ترتیب پلی اتیلن، مس و مس است. مکان اولیه پرتابه در تفنگ القایی دارای یک نقطه بهینه است به صورتی که در آن نقطه بیشترین نیرو به پرتابه وارد می شود. برای این منظور وسط پرتابه از وسط کویل باید به اندازه ۱۶ میلی متر جلوتر باشد.

پس از شبیه‌سازی مدل طراحی شده، نتایج مورد نظر از جمله چگالی شار، سرعت پرتابه و ... قابل دسترسی است.

۳-۵ تصدیق نتایج طراحی با استفاده از روابط تحلیلی و سیمولینک متلب

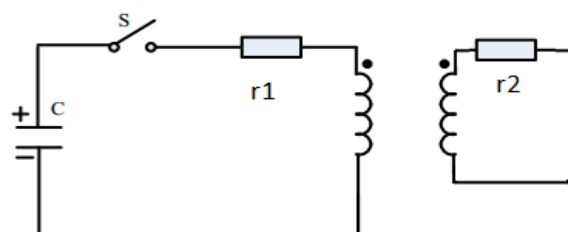
در این بخش با استفاده از نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی تفنگ کویلی القایی در نرم‌افزار اجزاء محدود، نتایج طراحی با استفاده از روابط تحلیلی و سیمولینک متلب تصدیق می‌شوند.

ابتدا به منظور کسب اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیستم برای تفنگ شبیه‌سازی شده، در موقعیت‌های مختلف پرتابه، از محل قرارگیری پرتابه در موقعیت $x=0$ (موقعیتی که مرکز پرتابه دقیقاً در مرکز کوئل قرار گرفته باشد) از دو جهت به طرفین تا فواصل نسبتاً دور (که با توجه به صفر شدن اندوکتانس متقابل کسب می‌گردد) به هر سیم‌پیچ (سیم‌پیچ مربوط به کوئل و پرتابه) یک جریان ثابت ۱ آمپر اعمال می‌گردد.

پس از آن اندوکتانس‌های خودی مربوط به کوئل و سیم‌پیچ پرتابه و همچنین اندوکتانس متقابل بین این دو، در موقعیت‌های مختلف پرتابه از نرم‌افزار استخراج می‌شود.

پس از استخراج مقادیر اندوکتانس‌ها، با استفاده از نرم‌افزار متلب، برای هر کدام از اندوکتانس‌ها یک معادله استخراج می‌شود.

مدار معادل کلی یک تفنگ کویلی القایی را می‌توان مشابه با شکل ۳-۲ در نظر گرفت.



شکل ۳-۲: مدار معادل تفنگ کویلی القایی

رابطه ۳-۷ بیانگر رابطه بین جریان‌ها، اندوکتانس‌ها و شارهای پیوندی در این مدار معادل است.

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

طبق رابطه ۳-۷ جریان‌ها را می‌توان بر حسب شارهای پیوندی نوشت.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (۸-۳)$$

با استفاده از KVL در مدار سمت چپ داریم:

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = V_c - r_1 \Gamma_{11}(x) \lambda_1 - r_1 \Gamma_{12}(x) \lambda_2 \quad (۹-۳)$$

با استفاده از KVL در مدار سمت راست داریم:

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = -r_2 \Gamma_{21}(x) \lambda_1 - r_2 \Gamma_{22}(x) \lambda_2 \quad (۱۰-۳)$$

همچنین داریم:

$$\frac{dV_c}{dt} = -\frac{1}{C} \Gamma_{11}(x) \lambda_1 - \frac{1}{C} r_1 \Gamma_{12}(x) \lambda_2 \quad (۱۱-۳)$$

برای پرتابه داریم:

$$\frac{dx}{dt} = V_s \quad (۱۲-۳)$$

طبق روابط مربوط به انرژی در یک سیستم مغناطیسی داریم:

$$W_{\text{field}} = \frac{1}{2} \Gamma_{11}(x) \lambda_1^2 + \Gamma_{12}(x) \lambda_2 \lambda_1 + \frac{1}{2} \Gamma_{22}(x) \lambda_2^2 \quad (۱۳-۳)$$

با استفاده از رابطه ۱۳-۳ برای نیرو داریم:

$$F = -\frac{\sigma W_{\text{field}}}{\sigma x} \quad (۱۴-۳)$$

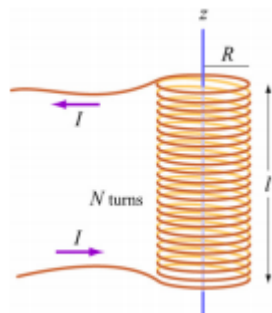
طبق قانون دوم نیوتن داریم:

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{m} F - \frac{1}{m} f_{\text{Load}} \quad (۱۵-۳)$$

که در روابط بالا λ_1 و λ_2 به ترتیب شارهای پیوندی سیم‌پیچ کوئل و سیم‌پیچ پرتابه، V_c ولتاژ شارژ خازن، r_1 مقاومت کوئل، r_2 مقاومت سیم‌پیچ پرتابه، C ظرفیت خازن، V_s سرعت پرتابه، x فاصله مرکز کوئل تا مرکز پرتابه، m جرم پرتابه و f_{Load} بار خارجی همانند اصطکاک است.

با استفاده از روابط ۳-۹ تا ۳-۱۵ و شبیه‌سازی آن‌ها در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب و همچنین استفاده از اندوکتانس‌های به دست آمده از شبیه‌سازی JMAG-Designer تمامی پارامترهای خروجی مورد نظر از تفنگ کوئلی مورد نظر حاصل می‌گردد. این مقادیر باید با مقادیر خروجی حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار اجزاء محدود یکسان باشند.

حال برای تصدیق نتایج طراحی باید با استفاده از روابط تحلیلی موجود، روابط عددی‌ای که با استفاده از مراحل فوق برای اندوکتانس‌ها کسب گردید را بر اساس پارامترهای ابعادی ورودی تفنگ کوئلی القایی از جمله ولتاژ شارژ خازن، مقاومت کوئل و سیم‌پیچ پرتابه، قطر کوئل، قطر پرتابه و... باید یافت.



شکل ۳-۳: پارامترهای سیم‌پیچ برای استخراج روابط مربوط به اندوکتانس
برای یک سیم‌پیچ با طول محدود l و تعداد دور N و جریان I و شعاع R می‌توان نوشت:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2l} = \frac{\mu_0 nI}{2} \quad (۱۶-۳)$$

که در رابطه ۳-۱۶، B چگالی شار سیم‌پیچ و n تعداد دور بر طول بوده که طبق رابطه ۳-۱۷ قابل محاسبه است.

$$n = \frac{N}{l} \quad (۱۷-۳)$$

شار پیوندی برای هر دور از سیم‌پیچ طبق رابطه ۳-۱۸ قابل محاسبه است.

$$\phi = BA_1 = \frac{\mu_0 nI(\pi R^2)}{2} \quad (۱۸-۳)$$

در نتیجه اندوکتانس خودی سیم‌پیچ را می‌توان طبق رابطه زیر محاسبه نمود.

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu_0 n^2 \pi R^2 l}{2} \quad (۱۹-۳)$$

لازم به ذکر است که مسیر دور زدن شار را با دو برابر l در نظر می‌گیرم.

برای اندوکتانس دو سیم‌پیچ که در داخل یکدیگر قرار دارند، در حالتی که هم‌مرکزند را می‌توان از معادله ۲۱-۳ محاسبه نمود.

$$\phi_{21} = BA = \frac{\mu_0 N_1 I_1 A}{2l} \quad (20-3)$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{N_2 \phi_{21}}{I_1} = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{2l} \quad (21-3)$$

با توجه به روابط مربوط به اندوکتانس خودی L_{11} (مربوط به کویل) و L_{22} (مربوط به سیم‌پیچ پرتابه) و رابطه ۲۱-۳ می‌توان مقدار اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ را در حالتی که هر دو هم‌مرکزند از رابطه ۲۲-۳ محاسبه نمود.

$$L_{12} = L_{21} = \sqrt{L_{11} L_{22}} \quad (22-3)$$

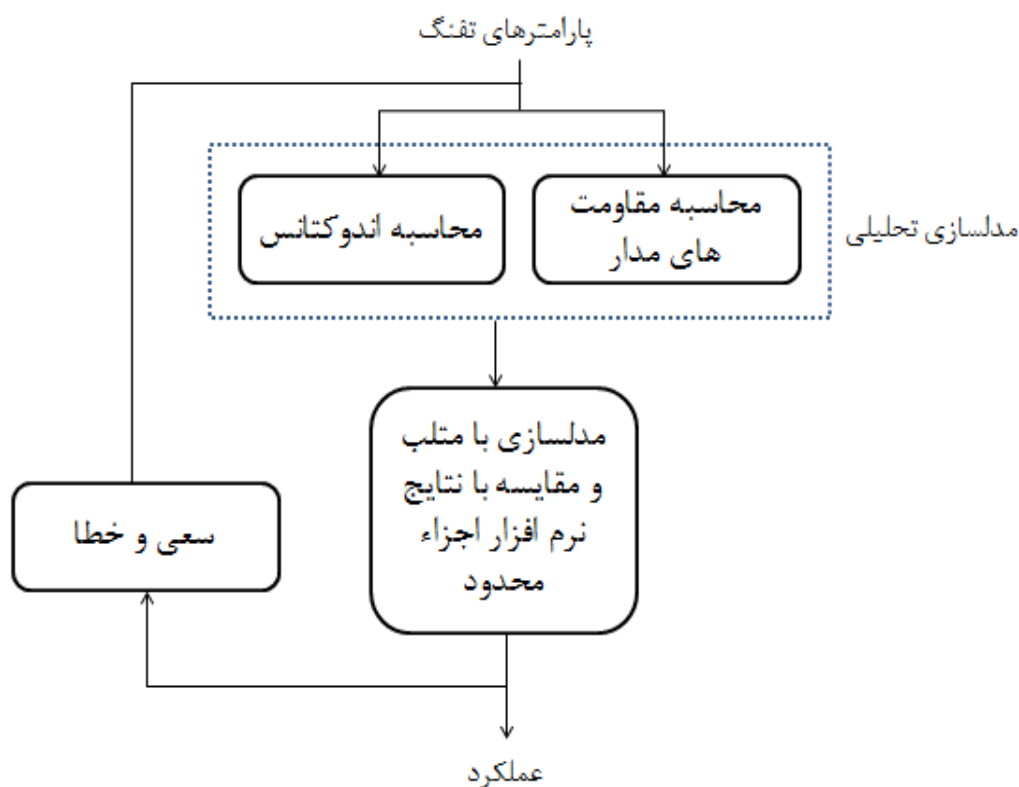
از آنجا که اندوکتانس متقابل به دست آمده از رابطه ۲۲-۳ با مقدار واقعی متغیر است معمولاً از یک ضریب k که بین دو عدد صفر و یک است، استفاده می‌شود.

$$L_{12\text{Real}} = L_{21\text{Real}} = k\sqrt{L_{11} L_{22}} \quad , \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (23-3)$$

با استفاده از روابط فوق می‌توان ضرایب عددی موجود در روابط مستخرج از نرم‌افزار اجزاء محدود را با پارامترهای ابعادی و مداری تفنگ کویلی القایی محاسبه نمود. روند کاری این مرحله به صورت شکل ۴-۳ است.

سپس بر روی طراحی اولیه، کارهای زیر صورت می‌پذیرد:

- (۱) اصلاح طراحی تفنگ به روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار JMAG-Designer
- (۲) تغییر ساختار تفنگ کویلی القایی از حالت استوانه‌ای به مخروطی به منظور افزایش سرعت پرتابه
- (۳) بررسی تأثیر هسته بر تفنگ کویلی القایی
- (۴) بررسی تغییر جنس پرتابه از مس به آلومینیوم و همچنین تغییر ساختار آن از حالت سلونوئیدی به یکپارچه



شکل ۳-۴: روند صحت‌سنجی نتایج طراحی با استفاده از محیط سیمولینک متلب

۳-۶ اصلاح طراحی تفنگ به روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار JMAG-

Designer

پس از شبیه‌سازی مدل طراحی‌شده، عملکرد تفنگ کویلی القایی در حضور تغییر پارامترهای کویل شبیه‌سازی و بررسی می‌گردد تا بهترین قطر هادی، طول کویل و تعداد طبقه‌ها برای این طراحی حاصل گردد.

پارامترهای مورد نظر کویل عبارت‌اند از: (۱) طول کویل (تعداد دور) (۲) تعداد طبقه‌های کویل (۳) قطر هادی کویل.

بدین منظور تفنگ کویلی القایی در ۸ قطر هادی مختلف، ۴ طبقه متفاوت و ۷ طول مختلف کویل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی مکان اولیه گلوله نسبت به مرکز کویل در تمامی حالت‌ها، ثابت نگه‌داشته شده است.

باید به این نکته توجه نمود که تعداد پارامترهای مورد بررسی برای یک تفنگ کوپلی القایی کم بوده اما بررسی تمامی این حالت‌ها نسبت به هم نیاز به صرف زمان و تعداد زیادی شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار اجزاء محدود دارد. بدین منظور در اینجا برای روش سعی و خطا، بهترین و کوتاه‌ترین مسیر به منظور دستیابی به مقادیر مطلوب پارامترهای کوپل، انتخاب و اجرا می‌شود.

برای این منظور ابتدا مدل مرجع را شبیه‌سازی و نتایج مورد نظر را استخراج می‌نماییم. برای استفاده صحیح از روش صحیح و خطا ابتدا تعداد طبقه‌های مختلف را در طول ثابت کوپل و در قطرهای مختلف هادی کوپل مورد بررسی قرار داده تا بهترین تعداد طبقه کوپل برای یک تفنگ القایی حاصل گردد؛ بنابراین یکی از پارامترهای مورد بررسی کوپل تعیین و ثابت در نظر گرفته می‌شود. پس از آن در قطرهای مختلف و در طول‌های مختلف سرعت پرتابه مورد بررسی قرار می‌گیرد. از درون این دو بررسی (تعداد طبقه‌ها و طول کوپل)، رفتار تغییر در قطر هادی نیز خودبه‌خود حاصل می‌گردد.

۳-۷ تغییر ساختار تفنگ کوپلی القایی از حالت استوانه‌ای به مخروطی به منظور

افزایش سرعت پرتابه

همانطور که در فصل اول بیان شد در یک تفنگ کوپلی القایی پرتابه از طریق جریان گردابی القاشده توسط کوپل در آن، طبق قانون فارادی به سمت خارج کوپل دفع می‌شود. گلوله باید از جنس مواد غیر فرومغناطیس (مانند مس یا آلومینیم) باشد و نقطه شروع نیازمند این است که اندکی خارج از مرکز کوپل باشد، در غیر این صورت، در هنگام شلیک، نیرو در جهت درست به پرتابه اعمال نمی‌شود. نیروی وارد شده بر پرتابه را می‌توان از رابطه ۳-۲۴ به دست آورد.

$$F = J \times B \quad (3-24)$$

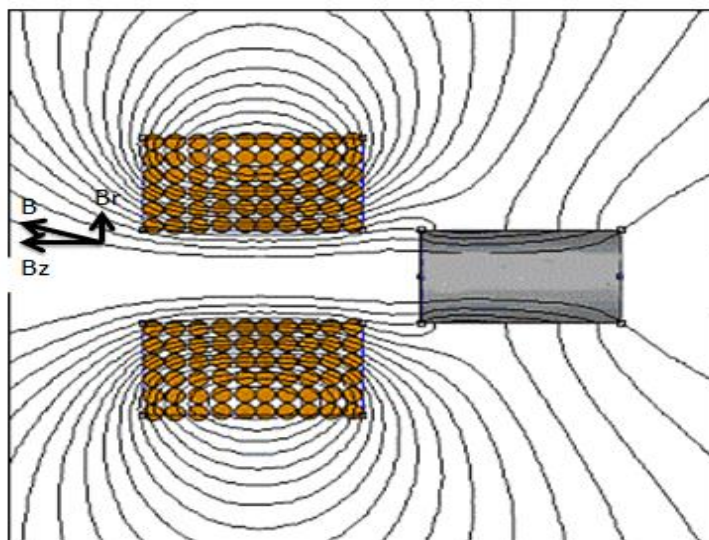
که در آن F بردار چگالی نیرو، J بردار چگالی جریان گردابی و B بردار چگالی شار سیستم است. بردار نیرو در هر جهتی می‌تواند باشد. با این وجود برای سادگی کار این نیروها به نیروهای شعاعی و محوری تقسیم می‌شوند؛ بنابراین چگالی شار مغناطیسی در دو جهت محوری و شعاعی قابل بررسی

است. مؤلفه‌های شعاعی شار باعث اعمال نیرو در جهت محوری به پرتابه و مؤلفه‌های محوری شار باعث اعمال نیرو در جهت شعاعی به پرتابه می‌شود. نیروهای محوری و شعاعی وارد بر پرتابه را به ترتیب می‌توان طبق روابط ۲۵-۳ و ۲۶-۳ محاسبه نمود.

$$F_z = J \times B_r \quad (25-3)$$

$$F_r = J \times B_z \quad (26-3)$$

از آنجا که طبق شکل ۵ شار تولیدی توسط کوئل‌ها در جهت محوری است و فقط در نواحی انتهایی کوئل (شکستگی شار) مؤلفه شعاعی در آن نمود پیدا می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که نیروی شعاعی وارد شده به پرتابه بیش‌تر از نیروی محوری وارد بر آن است؛ اما از آنجا که ساختار کوئل متقارن است نیروهای شعاعی یکدیگر را خنثی می‌کنند.



شکل ۳-۵: تقسیم شارهای انتهایی به دو مؤلفه محوری و عمودی

در این راستا می‌توان با تغییر شکل پرتابه و کوئل از حالت استوانه‌ای به حالت مخروطی، سعی در تغییر جهت شار مغناطیسی مؤثر در جهت شعاعی و افزایش نیروی محوری وارد بر پرتابه نمود. به این منظور از مکان اولیه پرتابه لوله را به صورت مخروطی و در زوایای مختلف تغییر شکل می‌دهیم. از آنجا که نیاز به ثابت بودن برخی پارامترهای اصلی از جمله فاصله هوایی و وزن پرتابه ضروری است، برای این منظور شکل پرتابه نیز از حالت استوانه‌ای به مخروطی تغییر شکل پیدا کرده و وزن آن نیز ثابت در نظر گرفته شده است.

با تغییر شکل سیستم تفنگ به حالت مخروطی، می‌توان زوایای مختلف مخروط را توسط روش سعی و خطا برای به دست آوردن بهترین زاویه، به منظور داشتن ماکزیمم سرعت پرتابه با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود به دست آورد.

۳-۸ بررسی تأثیر هسته بر تفنگ کویلی القایی

در این بخش نیز به بررسی تفنگ کویلی القایی در دو حالت با هسته مغناطیسی و بدون هسته پرداخته می‌شود. از آنجا که شار تولیدی که از هسته عبور می‌کند، در جهت محوری است، برای کاهش تلفات مربوط به جریان گردابی، هسته به دور کویل رول می‌شود (در جهت شعاعی موری می‌شود). پس از آن نیز تأثیر افزایش ضخامت هسته و طول آن با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود با روش سعی و خطا بررسی می‌گردد.

۳-۹ بررسی تغییر جنس پرتابه از مس به آلومینیوم و همچنین تغییر ساختار آن

از حالت سلونوئیدی به یکپارچه

در این بخش پرتابه را از دو جنس مختلف مس و آلومینیوم شبیه‌سازی کرده و عملکرد آن‌ها را از لحاظ تأثیر آن‌ها بر سرعت پرتابه و سایر موارد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن پرتابه را از حالت سیم‌پیچ مسی به یک استوانه مسی تبدیل نموده و نتایج حاصل از مقایسه آن‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

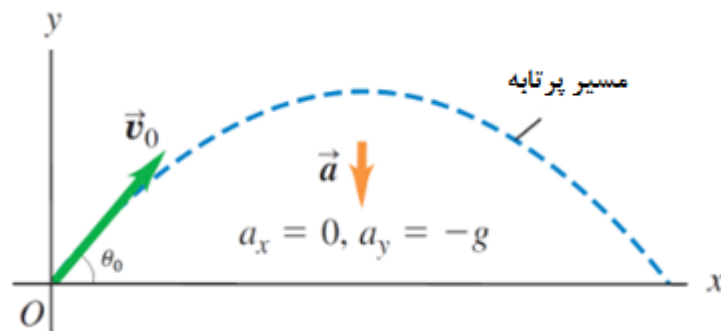
۳-۱۰ ساخت تفنگ کویلی القایی

پس از اتمام کارهای شبیه‌سازی، نمونه‌ای از طراحی اولیه ساخته شده و مورد تست قرار می‌گیرد.

۳-۱۰-۱ نحوه اندازه‌گیری سرعت پرتابه

پس از ساخت نهایی تفنگ کویلی القایی، به منظور تست آن و همچنین تطبیق نتایج تست با نتایج حاصل از شبیه‌سازی، می‌توان سرعت گرفتن پرتابه را به عنوان یک حرکت پرتابی در نظر گرفته و با توجه به معادلات حرکت، سرعت نهایی گلوله را بررسی کرد.

به هر جسمی که به آن یک سرعت اولیه داده شده باشد و مسیری را بپیماید که به طور کامل تحت تأثیر شتاب گرانشی و مقاومت هوا تعیین شود، پرتابه می‌گویند. برای بررسی این نوع حرکت، فرض می‌شود که هوا هیچ‌گونه اثری در حرکت پرتابه ندارد، شکل ۳-۶ مسیر پرتابه‌ای را تحت چنین شرایط ایده‌آلی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: مسیر حرکت پرتابه

در این نوع حرکت، می‌توان گفت که هیچ‌کدام از دو حرکت افقی و عمودی روی یکدیگر تأثیر نمی‌گذارند. این جنبه از حرکت این امکان را فراهم می‌سازد که مسئله حرکت دوبعدی به دو حرکت یک‌بعدی مستقل از یکدیگر تجزیه شود.

مطابق شکل ۳-۶ پس از پرتاب پرتابه چون در جهت افقی شتابی وجود ندارد، مؤلفه سرعت اولیه پرتابه در طول حرکت تغییر نمی‌کند. جابجایی افقی از مکان اولیه x_0 را با استفاده از معادله حرکت با شتاب ثابت ۳-۳۴ قابل محاسبه است. از این معادله می‌توان مقدار سرعت پرتابه پس از شتاب گرفتن در تفنگ را محاسبه نمود.

$$x - x_0 = V_s t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (3-34)$$

که در آن a (شتاب) صفر در نظر گرفته می‌شود.

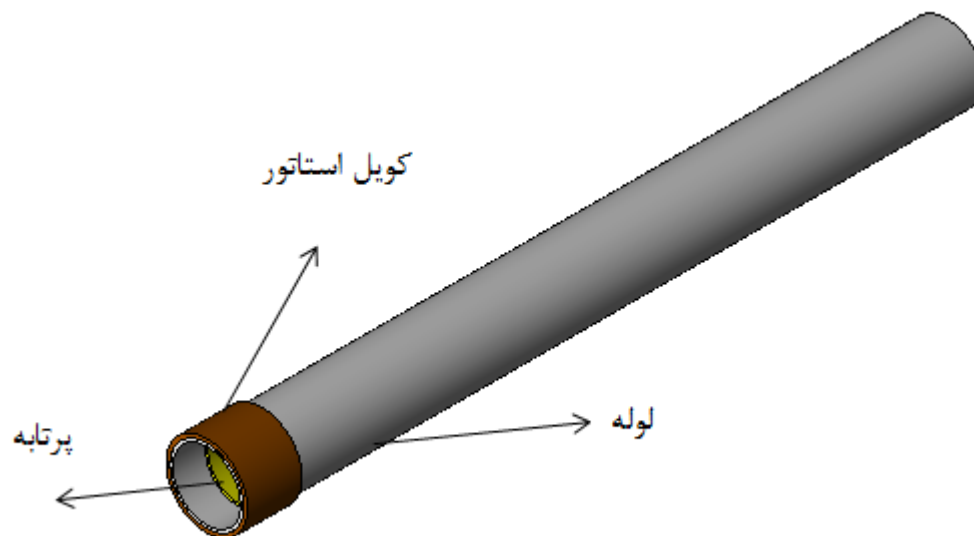
از آنجا که سرعت پرتابه خود به دو مؤلفه عمودی و افقی تقسیم می‌شود، برای راحتی در محاسبات می‌توان زاویه قرارگیری تفنگ (θ_0) را صفر در نظر گرفت تا مؤلفه عمودی سرعت صفر شود. با استفاده از این روش ساده، سرعت پرتابه در هنگام خروج از لوله به راحتی قابل محاسبه است.

فصل چهارم

شبه‌سازی و تحلیل عملکرد تفنگ کویلی القایی

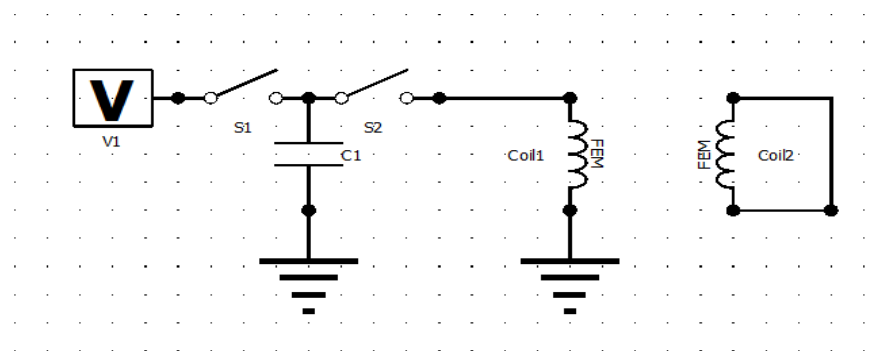
۱-۴ شبیه‌سازی طراحی اولیه

با توجه به مشخصات تفنگ کویلی القایی مندرج در جدول ۳-۴ با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer این تفنگ کویلی القایی شبیه‌سازی شده و نتایج آن برای ادامه روند کار استخراج می‌گردد. شکل ۱-۴ نمایشی از شبیه‌سازی سه‌بعدی این تفنگ است.



شکل ۱-۴: نمای سه‌بعدی از تفنگ کویلی القایی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer همانطور که مشاهده می‌شود از یک لوله با طول ۵۰۰ میلی‌متر به عنوان لوله تفنگ استفاده شده که با رنگ خاکستری در شکل ۱-۴ مشخص است. تعداد ۱۶ دور سیم با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر در وسط لوله بر روی آن پیچیده شده که با رنگ قهوه‌ای قابل مشاهده است. در این شکل مسیر حرکت گلوله در جهت عکس محور Z در نظر گرفته شده است. به این منظور مکان اولیه گلوله را باید طوری انتخاب نماییم تا نیرو در جهت درست به پرتابه اعمال گردد. همانطور که در فصول قبل ذکر شد مرکز گلوله باید ۱۶ میلی‌متر در جهت عکس محور Z باید جلوتر از مرکز کویل قرار گیرد. لازم به ذکر است که گلوله نیز از تعداد ۱۵ دور سیم مسی به دور یک نگهدارنده از جنس تفلون پیچیده می‌شود.

در این شبیه‌سازی جنس سیم‌های روی کویل و پرتابه و لوله به ترتیب مس، مس و پلی‌اتیلن انتخاب شده است. برای هر کدام از دو سیم‌پیچ جریان گردابی در شبیه‌سازی‌ها لحاظ گردیده و همچنین به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج از شبیه‌سازی سه‌بعدی به جای شبیه‌سازی دوبعدی استفاده شده است. سایر پارامترهای موجود در جدول ۳-۴ از جمله تعداد دور سیم‌پیچ، ظرفیت خازن، ولتاژ خازن و مقاومت هر کدام از سیم‌ها در مداری که برای این تفنگ کویلی القایی مطابق شکل ۲-۴ تعریف شده، اعمال می‌گردد.

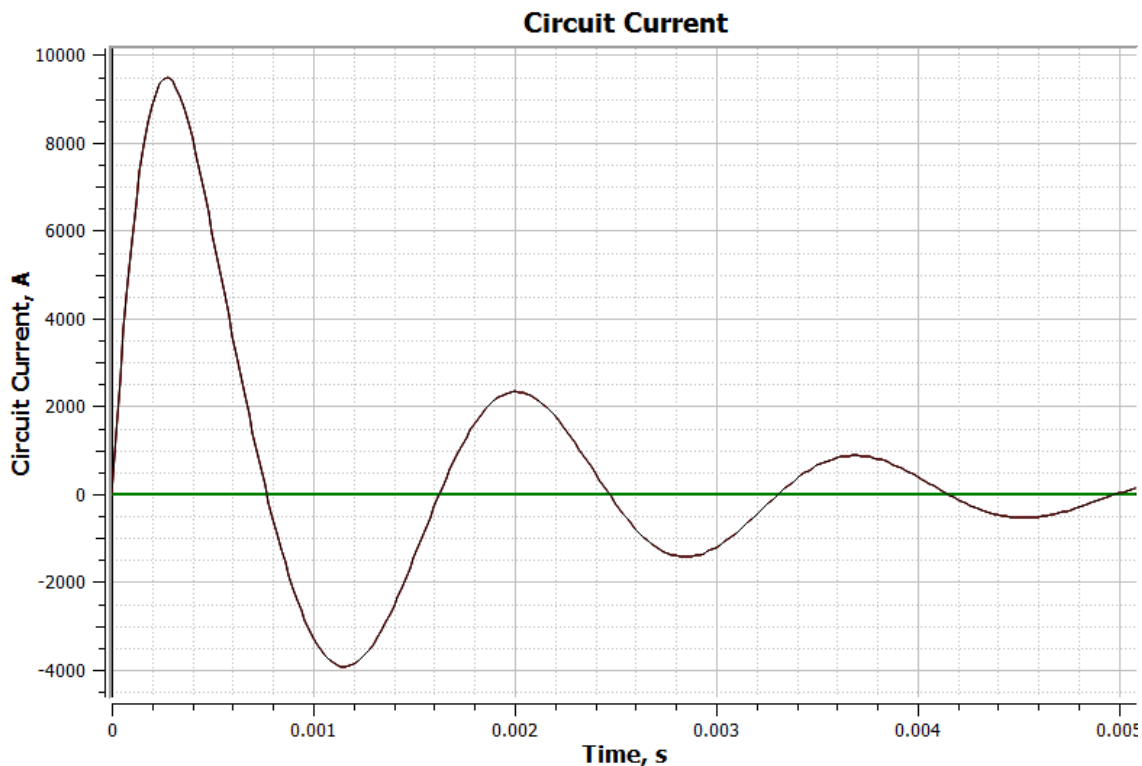


شکل ۲-۴: مدار تفنگ کویلی القایی در نرم‌افزار JMAG-Desiner

همانطور که از شکل ۲-۴ پیداست، دو سر سیم‌پیچ مربوط به پرتابه (Coil2) اتصال کوتاه می‌شود. از دو کلید برای شارژ و دشارژ خازن استفاده شده است.

منبع ولتاژ، یک منبع ولتاژ ثابت با ولتاژ ۴۴۰ ولت بوده که ابتدا خازن را شارژ نموده و پس از شارژ کامل خازن، توسط کلید اول از آن جدا می‌شود. پس از آن کلید دوم فعال شده و خازن در سیم‌پیچ مربوط به کویل (Coil1) تخلیه می‌شود.

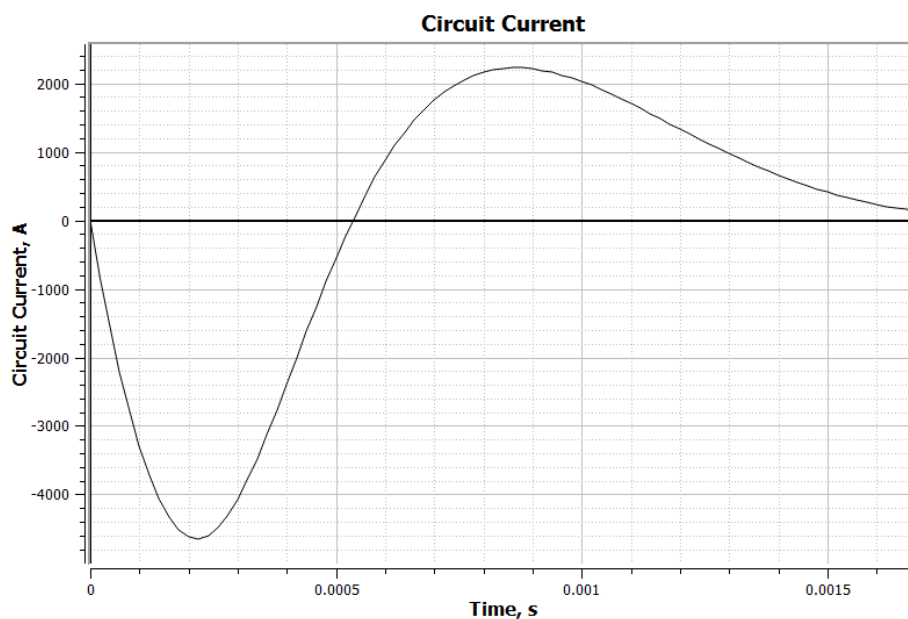
پس از انجام کارهای شبیه‌سازی به بررسی نتایج حاصل از آن می‌پردازیم. شکل ۳-۴ نمودار مربوط به جریان تخلیه خازن در سیم‌پیچ کویل استاتور است.



شکل ۳-۴: شکل موج جریان تخلیه خازن در کویل استاتور

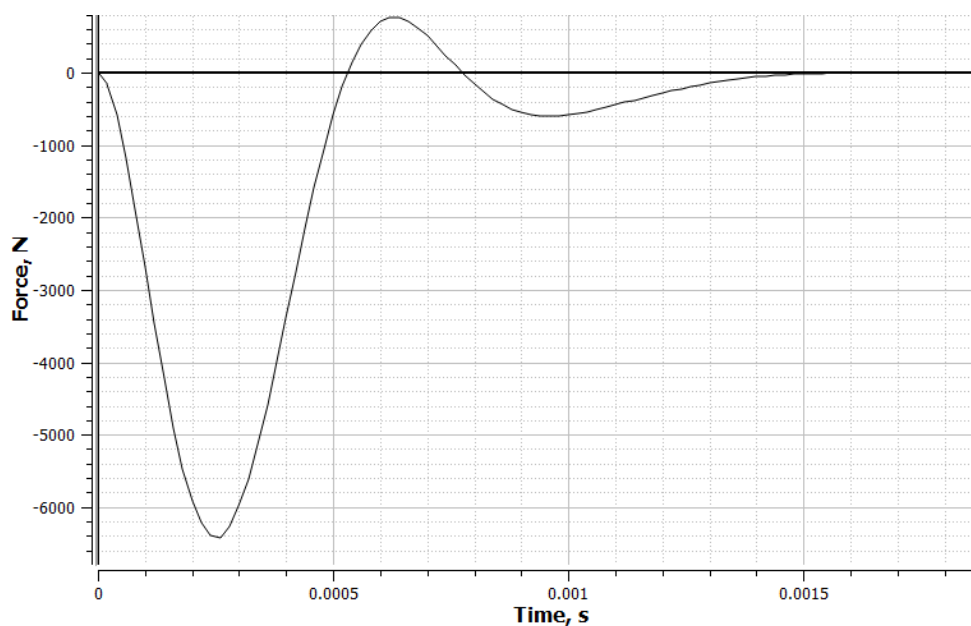
همانطور که از شکل ۳-۴ پیداست شرط موجود در تعریف مسئله مبنی بر اینکه پیک جریان جاری شده در کویل از ۱۵۰۰۰ آمپر تجاوز نکند، رعایت شده است. در این دسته از تفنگ‌ها چون نیروی وارد شده به پرتابه به صورت دفعی است، نیازی به قطع جریان نیست؛ اما در صورت قطع جریان توسط یک کلید در آخرین نقطه‌ای که نیرو در جهت حرکت پرتابه به آن اعمال می‌شود، می‌توان از افت نسبتاً کم سرعت جلوگیری نمود.

جریان القا شده در پرتابه در شکل ۴-۴ آورده شده است. همانطور که از شکل ۴-۴ مشخص است جریان القا شده در پرتابه مخالف جریان جاری شده در کویل استاتور بوده که همین امر سبب تولید نیرویی در جهت دفع این دو از یکدیگر می‌شود. از آنجا که لوله و کویل استاتور ثابت نگه‌داشته شده‌اند این نیرو سبب شتاب گرفتن پرتابه در جهت عکس محور Z می‌شود.



شکل ۴-۴: جریان القا شده در پرتابه

نیروی وارد شده به پرتابه در شکل ۴-۵ آورده شده است.

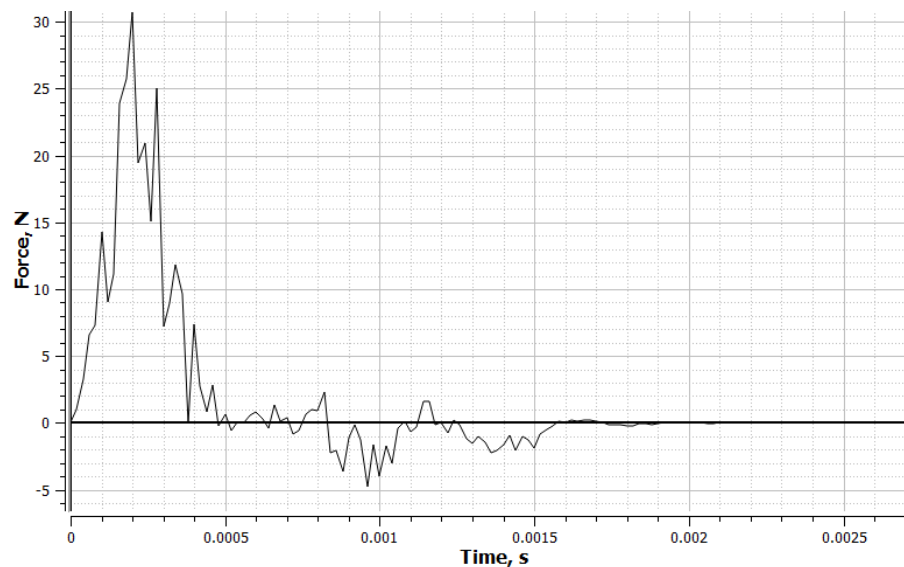


شکل ۴-۵: نیروی وارد شده به پرتابه

همانطور که از شکل ۴-۵ پیداست، مقدار تقریبی ۶۰۰۰ نیوتن در مدت کمتر از ۲ میلی ثانیه به پرتابه اعمال شده که موجب شتاب گرفتن آن می شود. از آنجا که این نیرو در جهت محور z بوده و جهت حرکت عکس محور z است در نتیجه نیرو در این شکل منفی می شود.

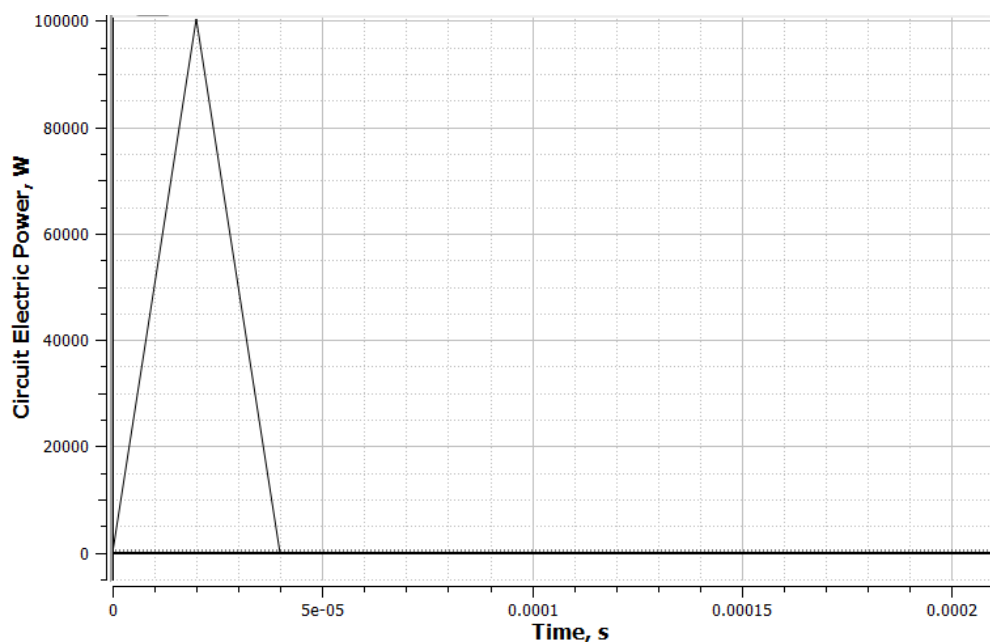
همانطور که در فصل سوم بیان گردید، به پرتابه در دو جهت شعاعی و محوری نیرو وارد می شود که نیروی مفید در این تفنگ، نیروی محوری (شکل ۱۱) است. در شکل ۴-۶ نیروی شعاعی وارد بر

پرتابه نشان داده شده است. بیش‌ترین نیروی تولید شده در این تفنگ به صورت شعاعی بوده اما به دلیل تقارن سیم‌پیچ، نیروهای در جهت شعاعی تقریباً همدیگر را خنثی می‌کنند که دلیل تفاوت زیاد نیروی محوری و شعاعی در این تفنگ این موضوع است. در نهایت برآیند نیروهای شعاعی در برابر برآیند نیروهای محوری بسیار ناچیز هستند.



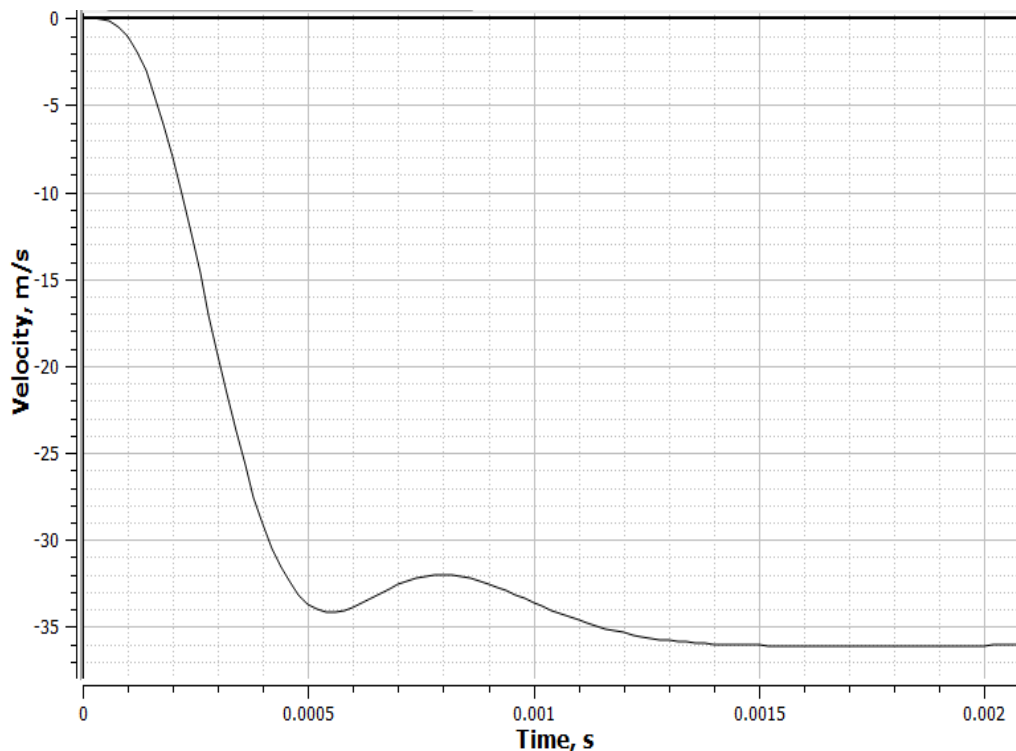
شکل ۴-۶: نیروی شعاعی وارد به پرتابه

توان الکتریکی تفنگ کوپلی القایی مطابق شکل ۴-۷ نشان داده شده است؛ که مقدار میانگین آن ۴۰۰ ژول بوده که به مقدار در نظر گرفته شده در طراحی نزدیک است.



شکل ۴-۷: توان الکتریکی ورودی کوپل استاتور تفنگ کوپلی القایی

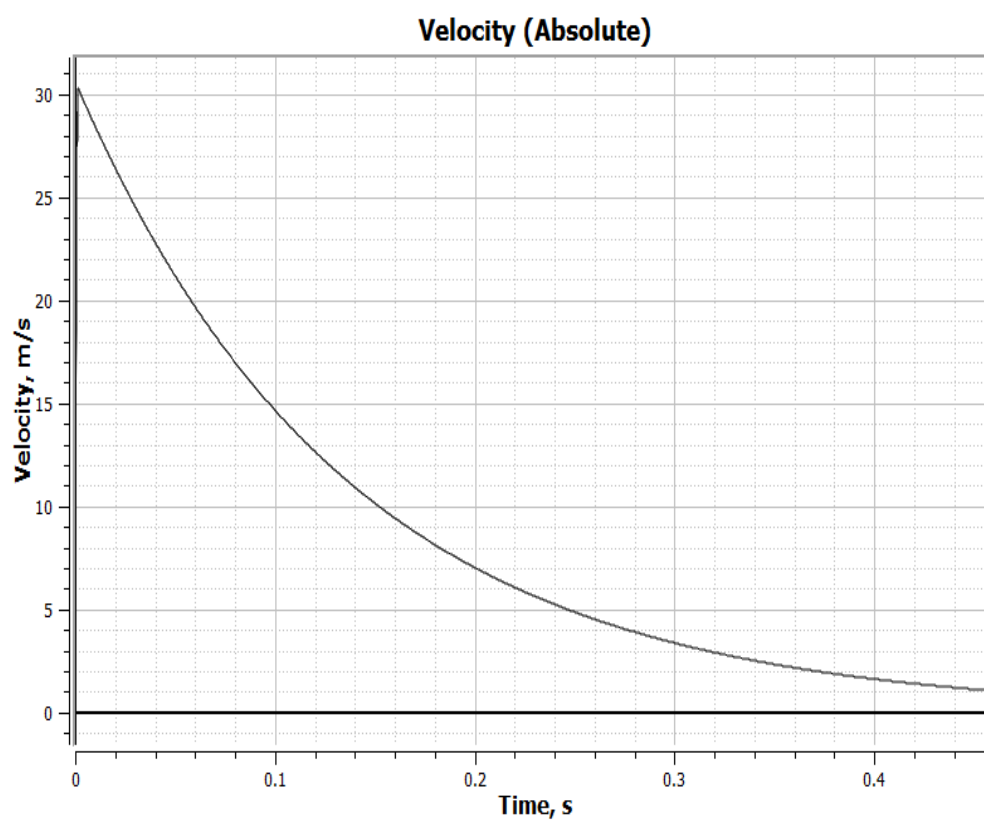
سرعت پرتابه بدون در نظر گرفتن اصطکاک مطابق شکل ۸-۴ به دست می‌آید.



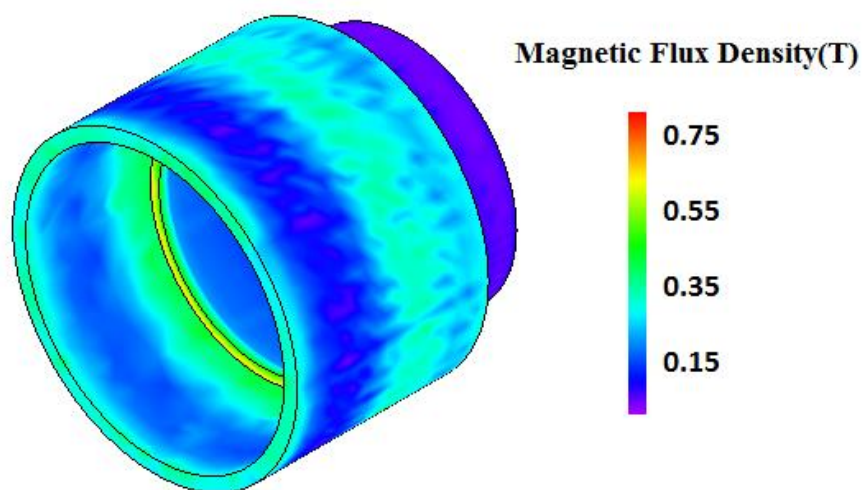
شکل ۸-۴: سرعت پرتابه بدون در نظر گرفتن اصطکاک

سرعت پرتابه با در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به اصطکاک به صورت شکل ۹-۴ است. همانطور که از دو شکل ۸-۴ و ۹-۴ مشخص است، سرعت نهایی ۳۶ متر بر ثانیه بوده که به مقدار سرعت در طراحی اولیه نزدیک است. همچنین کاهش سرعت پرتابه قبل از رسیدن به سرعت نهایی به خاطر تغییر جهت جریان و در نتیجه نیرو می‌باشد.

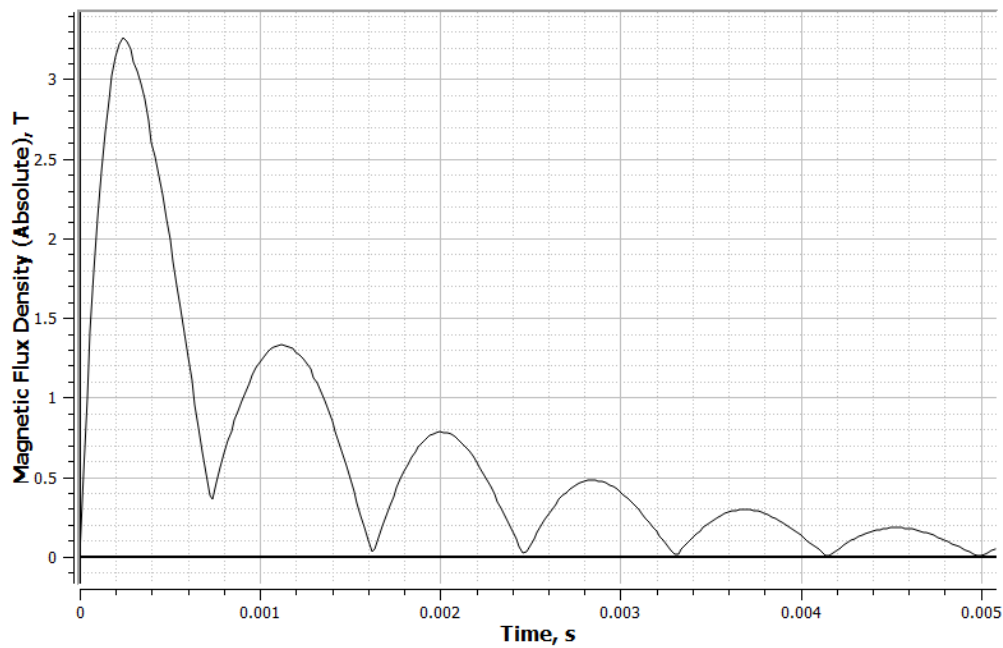
شکل ۱۰-۴ نشان‌دهنده توزیع چگالی شار در موقعیت $x=0$ است. میزان تغییر چگالی شار در مرحله‌های مختلف روی یک محور در شکل ۱۱-۴ برای کوئل استاتور آورده شده است. همچنین میزان تغییر چگالی شار در مرحله‌های مختلف روی یک محور در شکل ۱۲-۴ برای پرتابه آورده شده است.



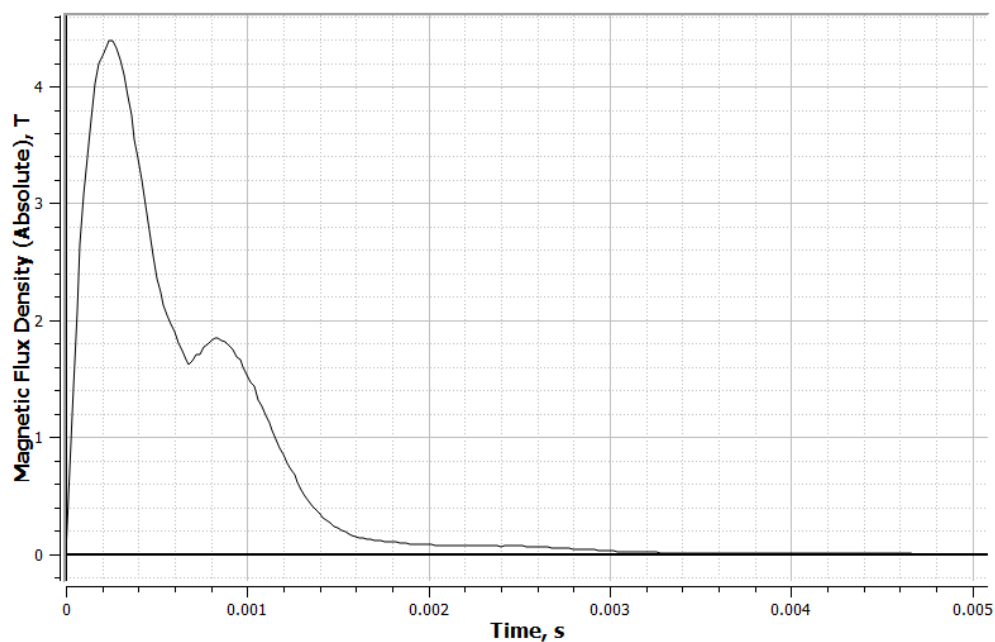
شکل ۴-۹: سرعت پرتابه با در نظر گرفتن اصطکاک



شکل ۴-۱۰: توزیع چگالی جریان در کوئل استاتور و پرتابه در موقعیت $x=0$



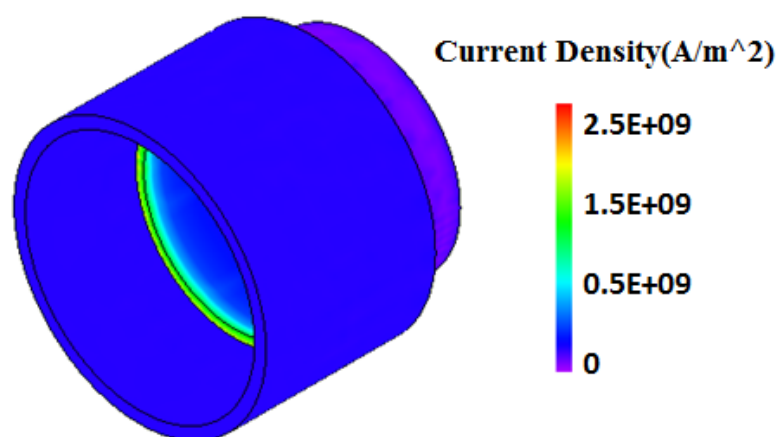
شکل ۴-۱۱: توزیع چگالی شار در کویل استاتور



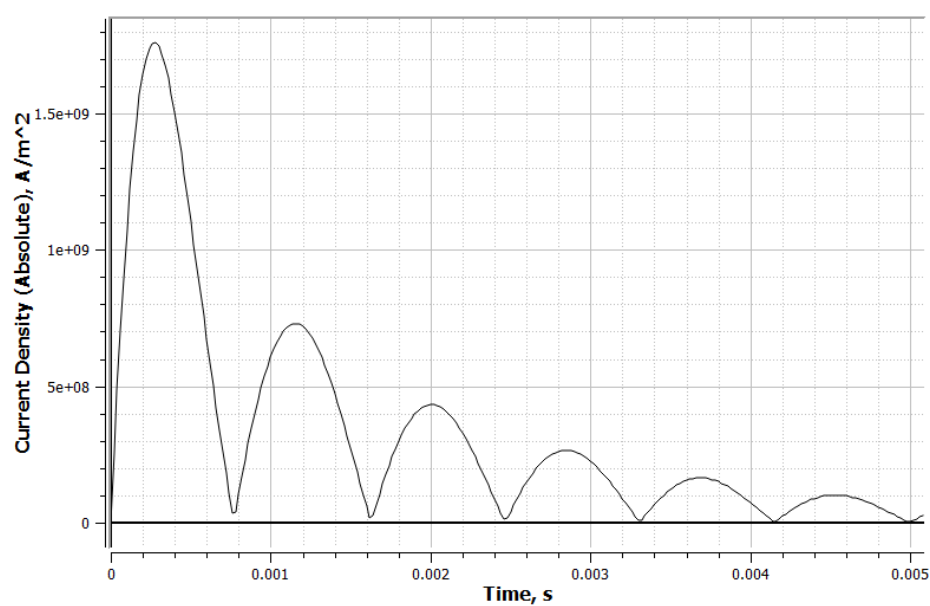
شکل ۴-۱۲: توزیع چگالی شار در پرتابه

شکل ۴-۱۳ نشان‌دهنده توزیع چگالی جریان در موقعیت $x=0$ برای استاتور و پرتابه تفنگ کوپلی القایی است.

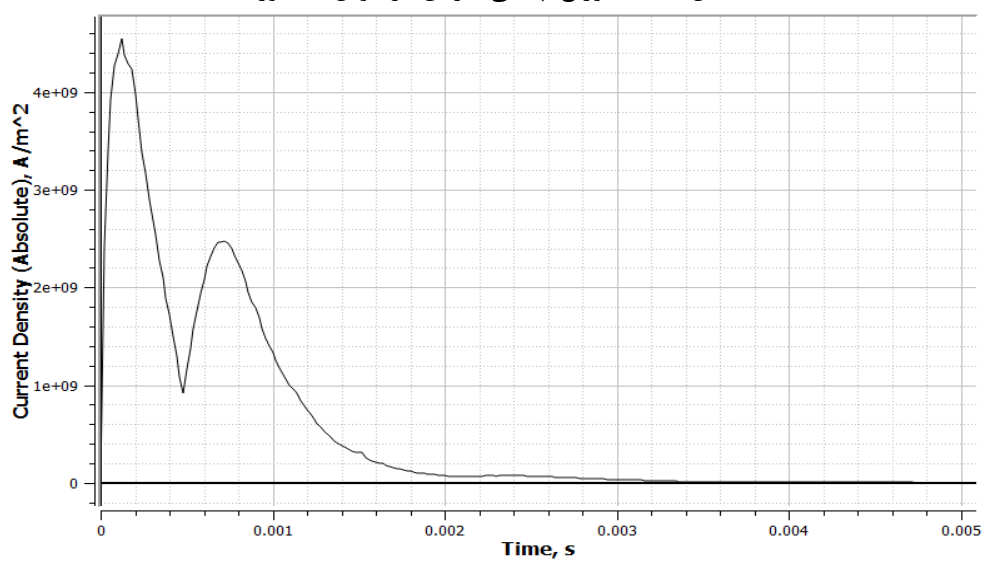
میزان تغییر چگالی جریان در مرحله‌های مختلف روی یک محور در شکل ۴-۱۴ برای کویل استاتور آورده شده است. همچنین میزان تغییر چگالی جریان در مرحله‌های مختلف روی یک محور در شکل ۴-۱۵ برای پرتابه آورده شده است.



شکل ۴-۱۳: توزیع چگالی جریان در موقعیت $x=0$

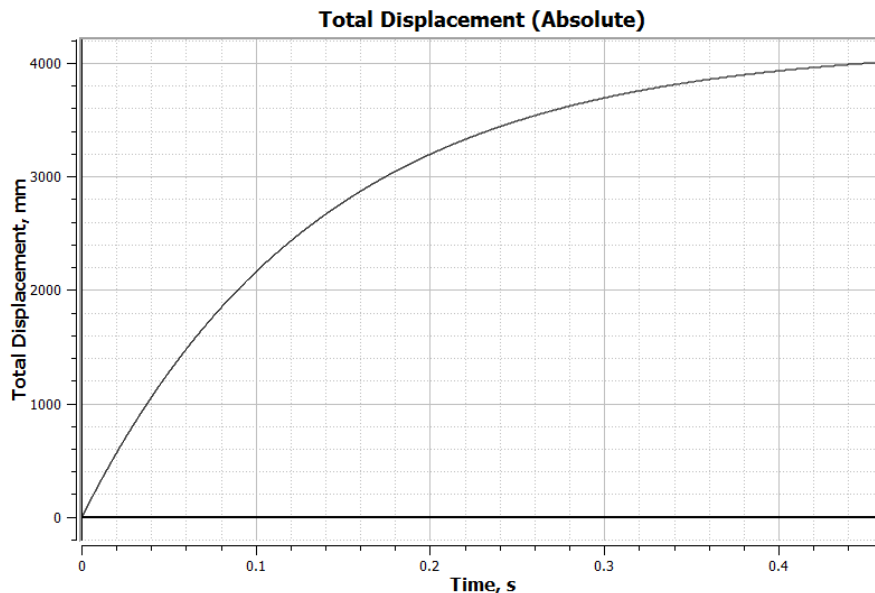


شکل ۴-۱۴: توزیع چگالی جریان در کویل استاتور



شکل ۴-۱۵: توزیع چگالی جریان در پرتابه

در حالتی که اصطکاک در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده باشد میزان برد پرتابه به صورت شکل ۴-۱۶ خواهد بود.

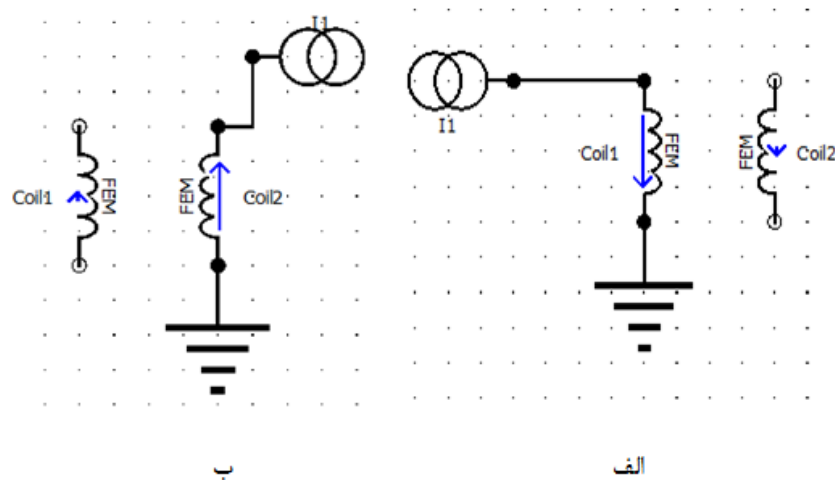


شکل ۴-۱۶: برد پرتابه با احتساب اصطکاک

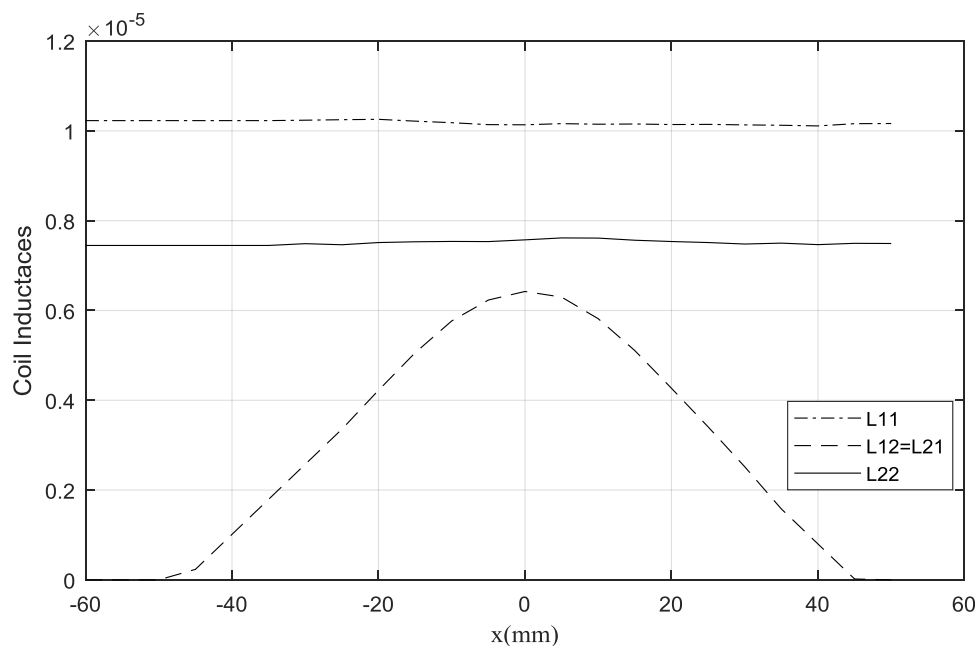
۴-۲ تصدیق نتایج طراحی با استفاده از روابط تحلیلی و سیمولینک متلب

در این قسمت ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer طراحی اولیه با مقادیر موجود در جدول ۳-۴ را با این تفاوت که در بخش مدار آن دیگر از خازن و منبع ولتاژ و کلیدها استفاده نمی‌شود، شبیه‌سازی می‌کنیم. روش کار به این صورت است که در مکان‌های مختلف پرتابه نسبت به کوئل استاتور ابتدا یک بار به سیم‌پیچ کوئل استاتور جریان یک آمپر را داده و دو سر سیم‌پیچ پرتابه را مدار باز می‌گذاریم. در این حالت مقدار شار پیوندی هر سیم‌پیچ را از نتایج کسب کرده و با تقسیم این مقادیر به جریان داده شده، اندوکتانس خودی و متقابل را در آن موقعیت به دست می‌آوریم. پس از آن منبع جریان را به سیم‌پیچ مربوط به پرتابه داده و سیم‌پیچ کوئل استاتور را مدار باز می‌کنیم. در این حالت نیز مقدار شار پیوندی هر سیم‌پیچ را از نتایج کسب کرده و با تقسیم این مقادیر به جریان داده شده، اندوکتانس خودی و متقابل را در آن موقعیت به دست می‌آوریم. حال با تغییر موقعیت پرتابه، این عمل را تکرار می‌کنیم تا برای اندوکتانس‌های خودی و متقابل مجموعه‌ای از نقاط حاصل گردند.

شکل ۴-۱۷ نمایی از مدار مربوط به دو حالت فوق برای محاسبه تفنگ کوپلی القایی است.



شکل ۴-۱۷: الف) مدار مربوط به محاسبه اندوکتانس خودی سیم‌پیچ کوپل استاتور و اندوکتانس متقابل ب) مدار مربوط به اندوکتانس خودی سیم‌پیچ پرتابه و اندوکتانس متقابل در اینجا در ۲۳ موقعیت مختلف پرتابه اندوکتانس‌های خودی و متقابل محاسبه شده‌اند. شکل ۴-۱۸ نمودار مربوط به این مقادیر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸: اندوکتانس‌های تفنگ کوپلی القایی در موقعیت‌های مختلف پرتابه
حال با استفاده از دستور Curve Fitting نرم‌افزار متلب برای هر کدام از این اندوکتانس‌ها، یک رابطه به دست می‌آوریم. روابط مربوط به اندوکتانس خودی و متقابل به صورت زیر است:

$$L_{11} = 10^{-5} \quad (۴-۱)$$

$$L_{22} = 7.5 \times 10^{-6} \quad (2-4)$$

$$L_{12} = L_{21} = 6.502 \times 10^{-6} e^{(-0.00112x^2)} \quad (3-4)$$

با تشکیل ماتریس L با استفاده از روابط ۱-۴ تا ۳-۴ داریم:

$$L = \begin{bmatrix} 10^{-5} & 6.502 \times 10^{-6} e^{(-0.00112x^2)} \\ 6.502 \times 10^{-6} e^{(-0.00112x^2)} & 7.5 \times 10^{-6} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

در مرحله بعد با به دست آوردن روابط اصلی با جایگذاری مقادیر L ، در روابط ۷-۳ الی ۱۵-۳ در محیط سیمولینک متلب پنج معادله اصلی ۹-۳، ۱۰-۳، ۱۱-۳، ۱۲-۳ و ۱۵-۳ را شبیه‌سازی کرده تا توسط این شبیه‌سازی نیز بتوانیم مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار اجزاء محدود را صحت سنجی کرده و برای ادامه تحلیل‌ها استفاده نمود.

شکل ۱۹-۴ سرعت پرتابه را در این برنامه نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۹-۴ مشخص است نمودار سرعت منطبق با نمودار سرعتی است که با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود به دست آمده است.

شکل ۲۰-۴ جریان تخلیه خازن را نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه‌ای که از نرم‌افزار اجزاء محدود حاصل گردیده است، مطابقت دارد.

حال پس از تطبیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی متلب و نرم‌افزار اجزاء محدود، باید روابط ۱-۴ تا ۳-۴ را بر اساس پارامترهای تفنگ کویلی القایی نوشت. برای این منظور همانطور که در فصل سوم اشاره شد، اندوکتانس‌های خودی برای دو سیم‌پیچ را می‌توان بر اساس رابطه ۱۹-۳ نوشت. با عددگذاری در رابطه ۱۹-۳ داریم:

$$L_{11} = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu_0 n^2 \pi R^2 l}{2} = \frac{4\pi \times \left(\frac{16}{0.037}\right)^2 \times \pi \times 0.0275^2 \times 0.037}{2} = 1.03 \times 10^{-5} \quad (5-4)$$

$$L_{22} = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu_0 n^2 \pi R^2 l}{2} = \frac{4\pi \times \left(\frac{15}{0.0274}\right)^2 \times \pi \times 0.0218^2 \times 0.0274}{2} = 7.2 \times 10^{-6} \quad (6-4)$$

رابطه ۳-۴ نشان می‌دهد که اندوکتانس متقابل را می‌توان به صورت یک تابع نمایی نوشت. در حالتی که کوئل استاتور و پرتابه هم‌مرکز هستند ($x=0$) می‌توان با استفاده از رابطه ۳-۲۳ ماکزیمم مقدار اندوکتانس متقابل برای دو سیم‌پیچ را محاسبه نمود. این مقدار ماکزیمم در تابع نمایی در واقع همان ضریب قبل از علامت عدد نپر (e) است.

طبق رابطه ۳-۲۳ برای اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ کوئل استاتور و رتور داریم:

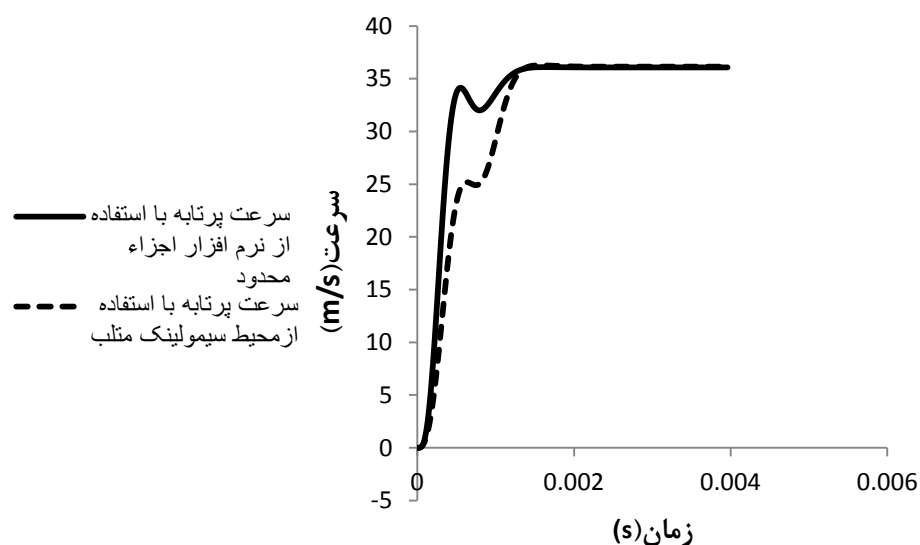
$$L_{12\text{Real}} = k\sqrt{L_{11}L_{22}} = 0.741\sqrt{10^{-5} \times 7.7 \times 10^{-6}} = 6.5 \times 10^{-6}, \quad k = 0.741 \quad (۷-۴)$$

همانطور که از رابطه ۷-۴ مشخص است این مقدار به صورت کاملاً دقیقی با ضریب پشت علامت عدد نپر (e) برابری می‌کند.

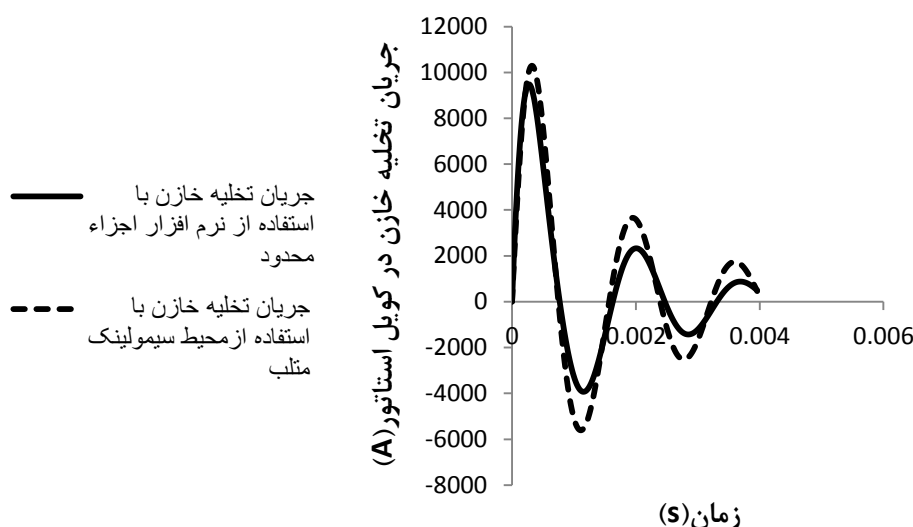
۳-۴ اصلاح طراحی تفنگ به روش سعی و خطا در محیط نرم‌افزار JMAG-

Designer

همانطور که در فصل سوم بیان گردید، ابتدا مدل مرجع را شبیه‌سازی و نتایج مورد نظر استخراج می‌گردد. برای استفاده صحیح از روش صحیح و خطا ابتدا تعداد طبقه‌ها مختلف را در طول ثابت کوئل و در قطرهای مختلف هادی کوئل مورد بررسی قرار داده تا بهترین تعداد طبقه کوئل برای یک تفنگ



شکل ۴-۱۹: نمودار سرعت خروجی بر حسب زمان با استفاده از محیط سیمولینک متلب و نرم‌افزار اجزاء محدود



شکل ۴-۲۰: نمودار جریان تخلیه خازن بر حسب زمان با استفاده از محیط سیمولینک متلب و نرم افزار اجزاء القایی حاصل گردد؛ بنابراین یکی از پارامترهای مورد بررسی کویل تعیین و ثابت در نظر گرفته می شود. پس از آن در قطرهای مختلف و در طول های مختلف سرعت پرتابه مورد بررسی قرار می گیرد. از درون این دو بررسی (تعداد طبقه ها و طول کویل)، رفتار تغییر در قطر هادی نیز خودبه خود حاصل می گردد.

بدین منظور تفنگ کویلی القایی در ۸ قطر هادی مختلف، ۴ طبقه متفاوت و ۷ طول مختلف کویل مورد بررسی قرار می گیرد. در این شبیه سازی مکان اولیه گلوله نسبت به مرکز کویل در تمامی حالت ها، ثابت نگه داشته شده است.

۴-۳-۱ تغییر تعداد طبقه ها در قطرهای مختلف

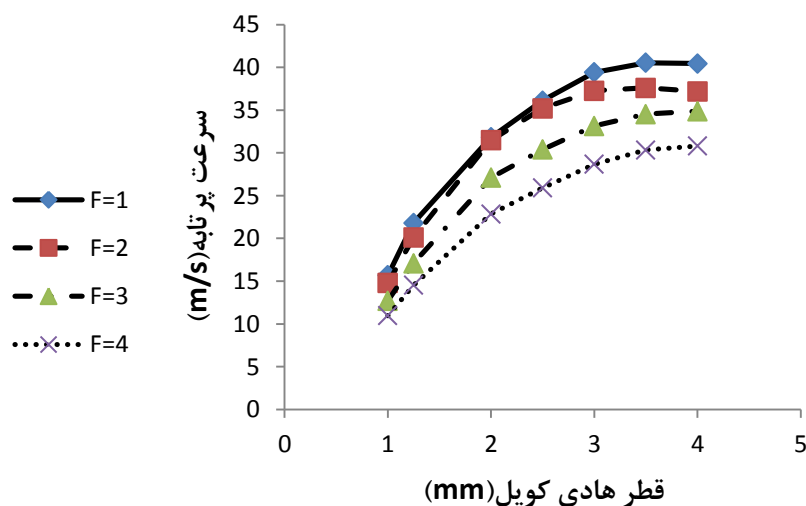
در ابتدا سعی در پیدا کردن بهترین تعداد طبقه کویل برای تفنگ کویلی طراحی شده در قطرهای مختلف می شود.

در هشت قطر متفاوت و چهار طبقه مختلف نتایج حاصل از شبیه سازی در زیر آورده شده است. در هشت قطر متفاوت و چهار طبقه مختلف نتایج حاصل از شبیه سازی به طور خلاصه در شکل ۴-۲۱ آورده شده است. مقادیر نشان داده شده در شکل ۴-۲۱ در بهترین حالت سویچ زنی (در بالاترین نقطه منحنی سرعت سویچ قطع شده و شارش جریان در کویل متوقف می شود) به دست آمده اند.

همچنین باید در نظر داشت در حین تغییر طبقه‌ها، طول کویل (۳۷/۵ میلی‌متر) و سایر پارامترهای مداری از جمله ظرفیت خازن، ولتاژ شارژ، مکان اولیه پرتابه و ابعاد دیگر تفنگ کویلی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که از شکل ۴-۲۱ مشخص است ساختار کویل یک طبقه در تفنگ کویلی القایی تأثیر بیشتری بر روی افزایش سرعت پرتابه دارد. دلیل این امر را می‌توان به این صورت استدلال نمود که افزایش تعداد طبقه‌ها موجب افزایش مقاومت کویل شده و به خاطر ثابت بودن پارامترهای تفنگ کویلی در قطرهای مختلف، با افزایش تعداد طبقه‌ها، جریان کویل کاهش یافته و از آنجا که نیروی وارد به پرتابه با ضرب جریان‌های دو سیم‌پیچ کویل استاتور و پرتابه رابطه مستقیم دارد، سبب کاهش نیروی وارد شده بر پرتابه می‌شود.

با در نظر گرفتن ساختار یک طبقه برای تفنگ کویلی القایی به ادامه تغییرها و بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۲۱: نمودار تأثیر تعداد طبقه‌ها در قطرهای مختلف هادی کویل بر روی سرعت پرتابه

۴-۳-۲ تغییر طول کویل در قطرهای مختلف

در این مرحله با ثابت در نظر گرفتن تعداد طبقه‌ها (یک طبقه) و سایر پارامترهای مداری و ابعادی تفنگ، فقط طول کویل در قطرهای مختلف هادی را دستخوش تغییر قرار می‌دهیم. این نکته قابل ذکر است که مرکز پرتابه نسبت به مرکز کویل در طول‌های مختلف ثابت در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴-۲۲ نتایج تغییر پارامتر طول کویل در قطرهای مختلف هادی به صورت خلاصه نشان داده شده است. از شکل ۴-۲۲ تأثیر قطر هادی بر روی سرعت نهایی را می‌توان مشاهده نمود. همان‌طور که از شکل ۴-۲۲ پیداست با افزایش قطر هادی سرعت پرتابه افزایش یافته و پس از مقدار مشخصی از قطر هادی، سرعت پرتابه کاهش می‌یابد. دلیل این نحوه رفتار تفنگ کویلی القایی را می‌توان در مقاومت AC آن جستجو نمود.

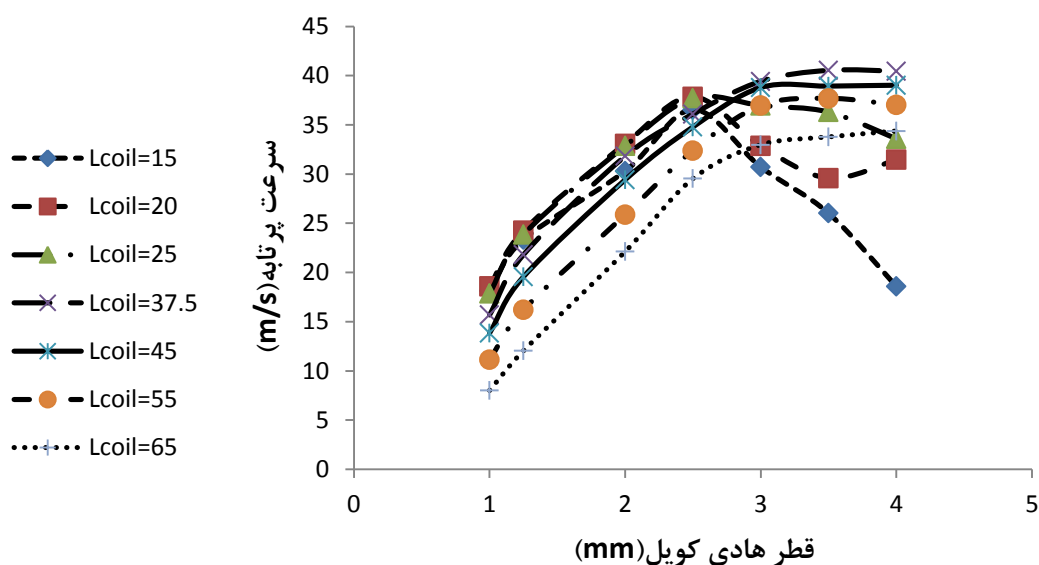
با افزایش قطر هادی تا حدی می‌توان مقاومت سیستم را کاهش داد، اما برای جریان AC باید اثر پوستی نیز در نظر گرفته شود. اثر پوستی به خاطر عبور جریان متناوب عبوری از هادی در لایه‌های بیرونی هادی رخ می‌دهد.

با افزایش فرکانس یا افزایش قطر هادی اثر پوستی در جریان گردابی القایی در پرتابه نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش قطر هادی ابتدا مقاومت کاهش یافته و در نتیجه موجب افزایش چگالی جریان القایی در پرتابه، نیرو و به دنبال آن‌ها سرعت پرتابه می‌شود و از قطر خاصی از هادی به بعد، اثر پوستی بر جریان گردابی القایی در پرتابه سلطه پیدا کرده و چگالی جریان پرتابه و در نتیجه نیروی وارد بر پرتابه کاهش یافته و سرعت پرتابه افت پیدا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این افت سرعت برای طول‌های پایین‌تر در قطرهای پایین‌تری رخ می‌دهد زیرا به خاطر جریان بالای کویل استاتور، جریان گردابی القایی در پرتابه سریع‌تر به مرحله غلبه اثر پوستی بر جریان آن می‌رسد.

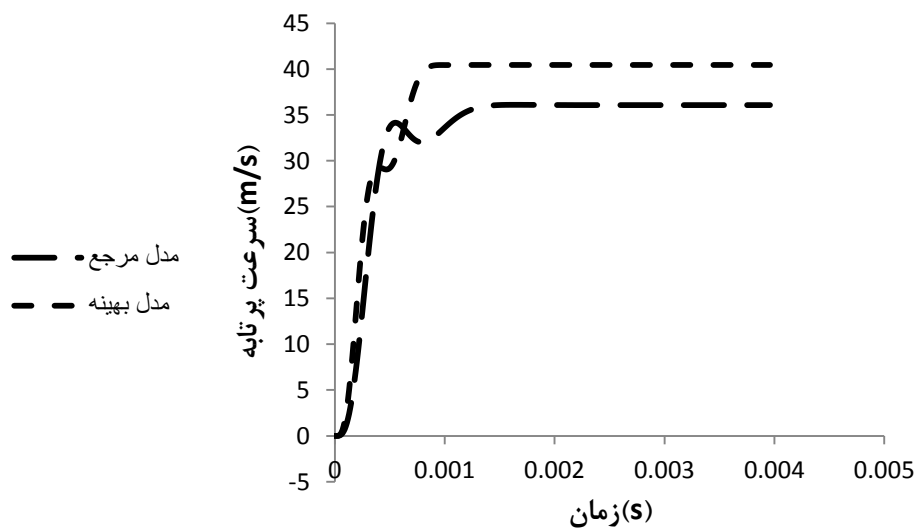
همان‌طور که از شکل ۴-۲۲ مشخص است، با تغییر طول کویل از مقادیر کم تا مقادیر زیاد ابتدا سرعت افزایش و پس از یک طول مشخص در هر قطر هادی کویل شروع به کاهش می‌نماید. در نتیجه برای هر تفنگ کویلی القایی متناسب با طول پرتابه مقدار بهینه‌ای وجود دارد که در اینجا این مقدار توسط نرم‌افزار اجزاء محدود محاسبه گردیده است.

از شکل‌های ۴-۲۱ و ۴-۲۲ با در نظر گرفتن سرعت پرتابه به عنوان هدف نهایی، مشاهده می‌شود که بهترین انتخاب برای تفنگ کویلی القایی طراحی‌شده قطر هادی ۴ میلی‌متر و ساختار یک طبقه با

طول کویل ۳۷/۵ میلی‌متر است. در شکل ۴-۲۳ نمودار سرعت دو حالت مرجع و بهترین حالت نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳: نمودار تأثیر تغییر طول کویل در قطرهای مختلف هادی بر روی سرعت پرتابه



شکل ۴-۲۴: مقایسه بین طراحی مرجع و طراحی بهینه تفنگ کویلی القایی با تغییر پارامترهای کویل استاتور

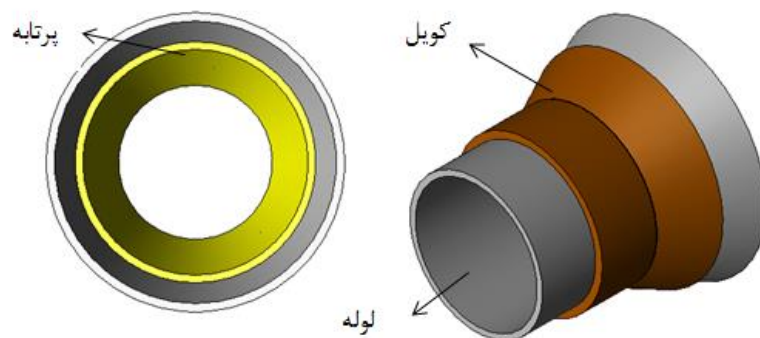
۴-۴ تغییر ساختار تفنگ کویلی القایی از حالت استوانه‌ای به مخروطی

همانطور که در فصل سوم بیان گردید شارها اکثراً در داخل کویل استاتور به صورت محوری بوده لذا بیش‌ترین نیروی تولیدی در یک تفنگ کویلی القایی شعاعی است که به خاطر متقارن بودن سیم‌پیچ

کویل تا حدودی اثر همدیگر را خنثی می‌کنند. در واقع می‌توان گفت که بخشی از شار که دارای مؤلفه شعاعی است سبب تولید نیروی محوری و به حرکت درآمدن پرتابه می‌شود.

در این راستا می‌توان با تغییر شکل پرتابه و کویل از حالت استوانه‌ای به حالت مخروطی، سعی در تغییر جهت شار مغناطیسی مؤثر در جهت شعاعی و افزایش نیروی محوری وارد بر پرتابه نمود. به این منظور از مکان اولیه پرتابه لوله را به صورت مخروطی و در زوایای مختلف تغییر شکل می‌دهیم. از آنجا که نیاز به ثابت بودن برخی پارامترهای اصلی از جمله فاصله هوایی و وزن پرتابه ضروری است، برای این منظور شکل پرتابه نیز از حالت استوانه‌ای (که فاصله هوایی نامتقارنی با لوله و کویل پیدا کرده است) به مخروطی تغییر شکل پیدا کرده و وزن آن نیز ثابت در نظر گرفته شده است.

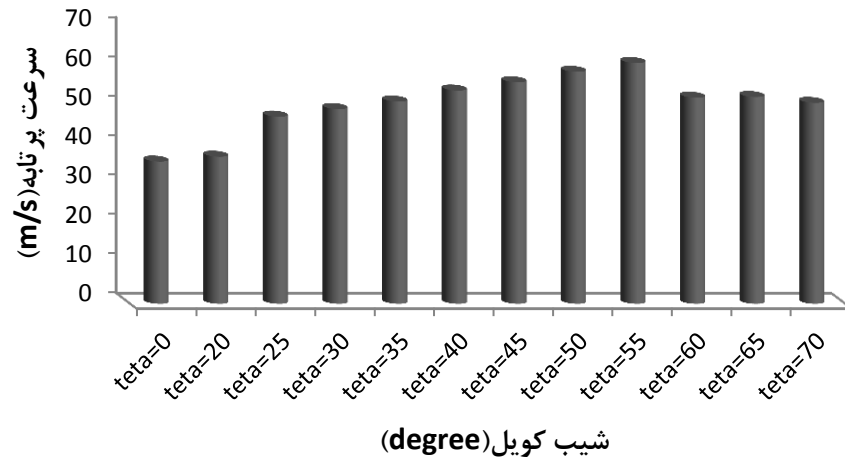
مدل مخروطی تفنگ کویلی القایی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار JMAG-Designer در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است. در این مدل تمامی پارامترهای دیگر از جمله فاصله هوایی، وزن پرتابه، جنس اجزاء و پارامترهای مداری از جمله ولتاژ، ظرفیت خازن و تعداد دور کویل ثابت در نظر گرفته شده است.



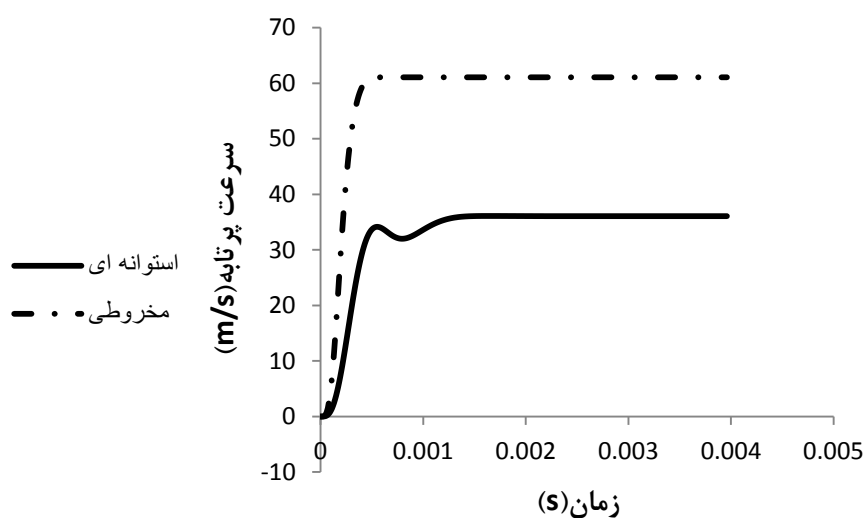
شکل ۴-۲۴: تفنگ کویلی القایی مخروطی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer

پس از شبیه‌سازی مدل‌های طراحی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود، عملکرد تفنگ کویلی القایی در شیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مقایسات صورت گرفته هدف افزایش سرعت پرتابه است. در شکل ۴-۲۵ در زوایای مختلف با رعایت ثابت بودن پارامترهای اساسی تفنگ کویلی سرعت

پرتابه مقایسه شده است. مقادیر نشان داده شده در نمودار در بهترین حالت سویچ زنی (در بالاترین نقطه منحنی سرعت، سویچ قطع شده و شارش جریان در کوئل متوقف می شود) به دست آمده اند.



شکل ۴-۲۵: ماکزیمم سرعت بر حسب تغییر زاویه مخروط بر روی تفنگ کوئلی القایی همانطور که از نمودار ۴-۲۵ پیداست بهترین زاویه برای مخروطی کردن تفنگ کوئلی القایی زاویه ۵۵ درجه نسبت به محور افقی است. در نمودار شکل ۴-۲۶ سرعت پرتابه در دو حالت استوانه ای و مخروطی با زاویه ۵۵ درجه با یکدیگر مقایسه شده اند. همچنین به منظور حل مشکل آئرو دینامیک پرتابه می توان در قسمتی از آن که در جلوی مسیر حرکت قرار دارد، قطعه ای دیگر از جنس عایق، وزن کم و شکل آئرو دینامیکی مناسب اضافه نمود.



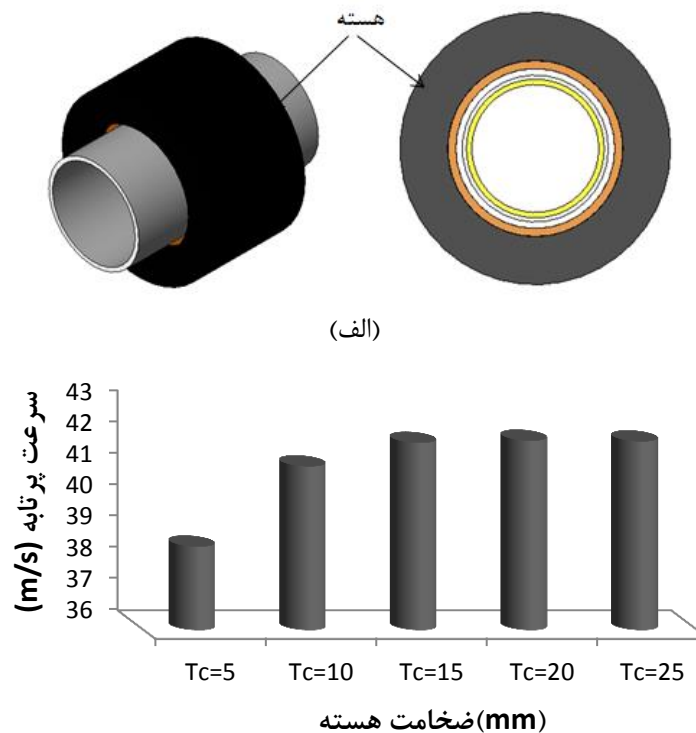
شکل ۴-۲۶: مقایسه بین حالت استوانه ای و مخروطی با زاویه ۵۵ درجه تفنگ کوئلی القایی

از شکل ۴-۲۶ مشخص می‌شود که تبدیل شکل از حالت استوانه‌ای به مخروطی بر روی یک تفنگ کویلی القایی دارای تأثیر بسیار مثبتی است.

۴-۵ بررسی تأثیر هسته بر تفنگ کویلی القایی

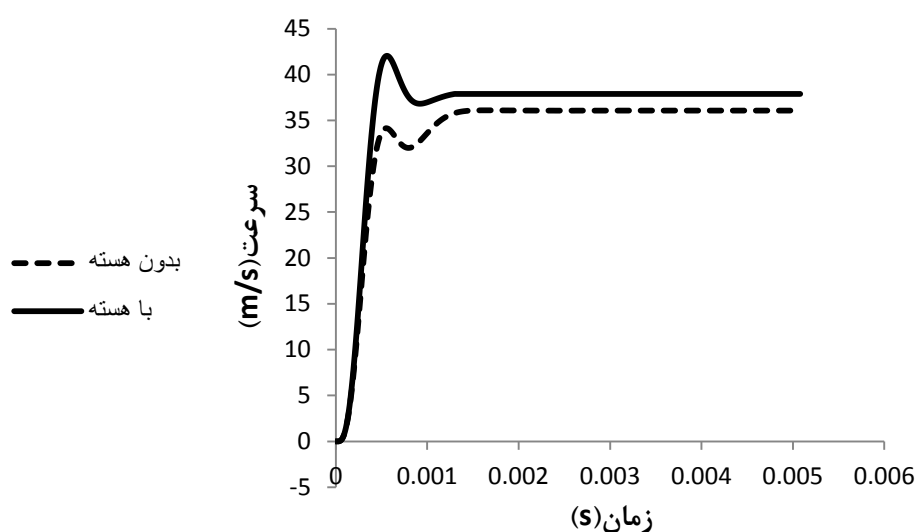
در این قسمت تفنگ کویلی القایی در حالت‌های مختلف با هسته و بدون هسته، تأثیر تغییر ضخامت هسته و همچنین طول هسته بر روی تفنگ‌های کویلی القایی بررسی و مقایسه می‌گردد تا بهترین قطر برای هسته حاصل گردد.

در شکل ۴-۲۷ الف نمایی از تفنگ کویلی القایی در حضور هسته را نشان می‌دهد. در شکل ۴-۲۷ ب تأثیر ضخامت هسته بر تفنگ کویلی القایی مشاهده می‌شود. مقادیر نشان داده شده در نمودار در بهترین حالت سوییچ‌زنی (در بالاترین نقطه منحنی سرعت، سوییچ قطع شده و شارش جریان در کویل متوقف می‌شود) به دست آمده‌اند. در این مقایسه تمامی پارامترهای تفنگ کویلی القایی ثابت نگه داشته شده و فقط هسته الکترومغناطیسی به آن اضافه شده است.



شکل ۴-۲۷: (الف) هسته تفنگ کویلی القایی (ب) تأثیر هسته با ضخامت‌های مختلف بر روی تفنگ کویلی القایی

همانطور که از شکل ۴-۲۷-ب پیداست از یک مقدار مشخص ضخامت به بعد سرعت پرتابه تقریباً ثابت است. برای این طراحی ضخامت ۲۰ میلی‌متر برای هسته انتخاب شده و در شکل ۴-۲۸ مقایسه‌ای بین تفنگ کویلی القایی بدون هسته و با هسته با ضخامت ۲۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود. از شکل ۴-۲۸ مشخص می‌شود که وجود هسته مغناطیسی بر روی یک تفنگ کویلی القایی دارای تأثیر مثبت است. علاوه بر این موضوع وجود هسته باعث استحکام مکانیکی بیشتر تفنگ و همچنین کاهش تداخلات الکترومغناطیسی بر روی وسایل محیط اطراف می‌شود.



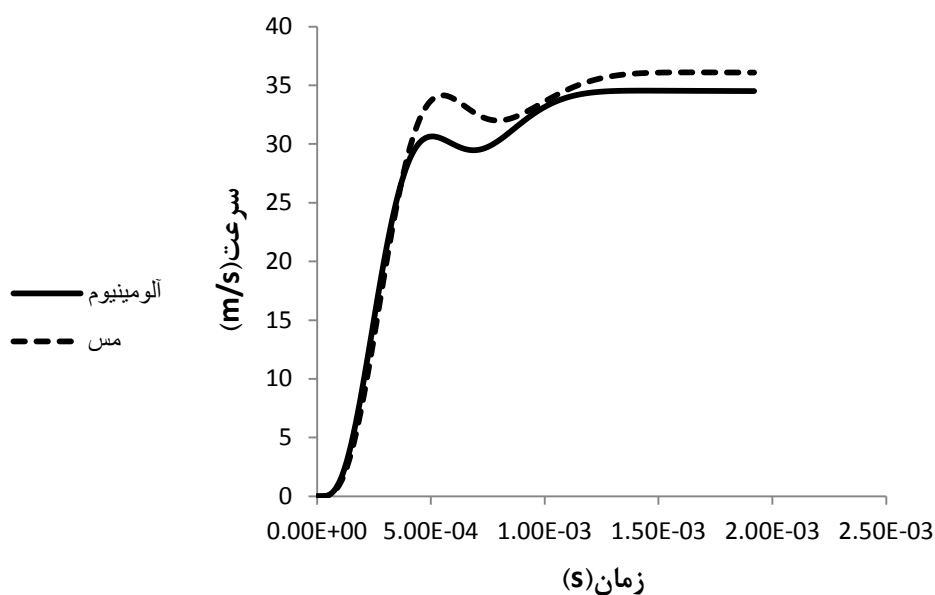
شکل ۴-۲۸: مقایسه بین حالت با هسته و بدون هسته تفنگ کویلی القایی

۴-۶ بررسی تغییر جنس پرتابه از مس به آلومینیوم و تغییر ساختار آن از حالت

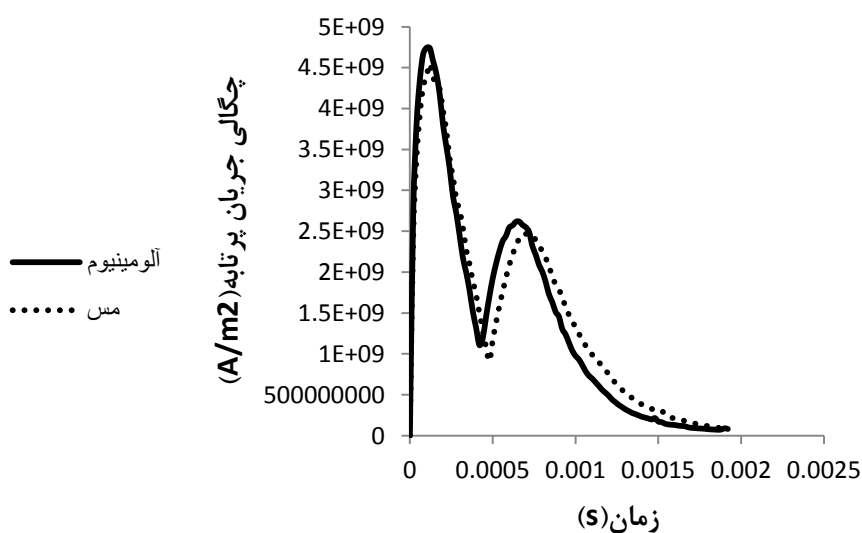
سلونوئیدال به یکپارچه

با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ابتدا جنس پرتابه را در دو حالت مسی و آلومینیومی قرار داده و از لحاظ برخی پارامترها با یکدیگر مقایسه می‌نماییم.

شکل ۴-۲۹ سرعت پرتابه را از دو جنس مس و آلومینیوم و در شرایط کاملاً یکسان نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۴-۲۹ مشخص است سرعت پرتابه در حالتی که از جنس آلومینیوم ساخته شده باشد، کمتر از حالت مسی است.

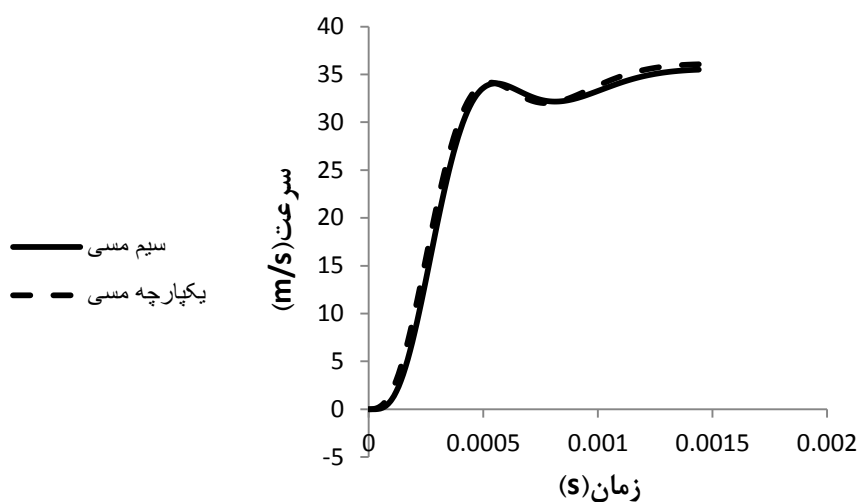


شکل ۴-۲۹: مقایسه بین سرعت پرتابه آلومینیومی و مسی
شکل ۴-۳۰: چگالی جریان پرتابه را از دو جنس آلومینیوم و مس نشان می‌دهد.



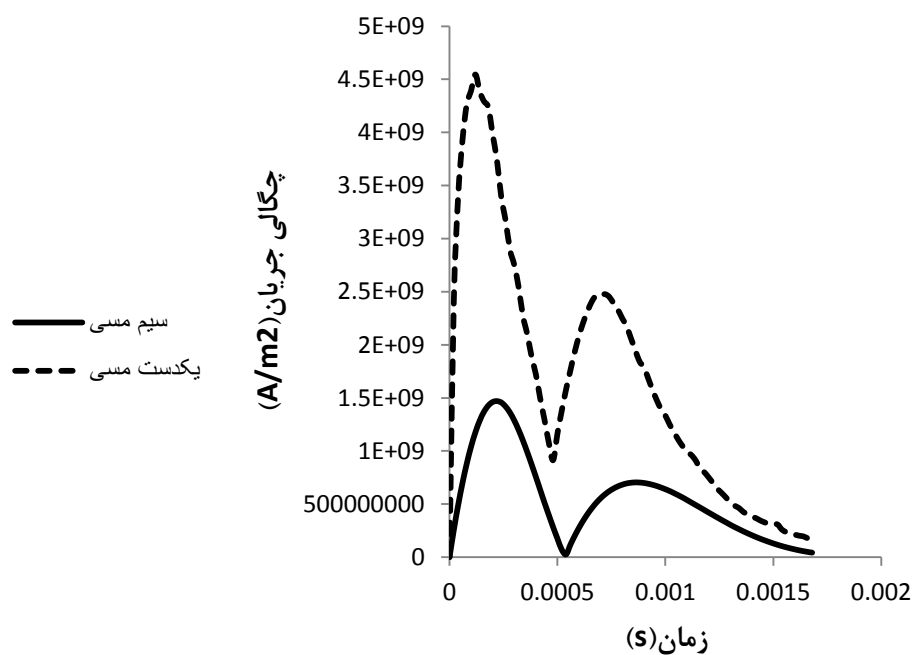
شکل ۴-۳۰: چگالی جریان پرتابه در دو جنس آلومینیوم و مس
شکل ۴-۳۱: سرعت پرتابه را در حالتی که پرتابه از سیم مسی و در حالتی که به صورت یکپارچه ساخته شده باشد، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت تقریباً در دو حالت ذکر شده یکسان است.

شکل ۴-۳۲: چگالی جریان‌های تولیدی در پرتابه را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر ساختار پرتابه از حالت یکپارچه به سلونوئیدال، توزیع جریان یکدست شده و پیک چگالی



شکل ۳۱-۴: سرعت پرتابه در دو حالت پرتابه از سیم مسی و به صورت یکپارچه مسی جریان کوچکتر خواهد شد. در واقع علت این امر را می‌توان در این موضوع جستجو کرد که شار تزویج در پرتابه نوع سلونوئیدال افزایش پیدا کرده و همین امر منجر به توزیع یکدست چگالی جریان می‌شود.

اما باید به این نکته نیز اشاره کرد که از لحاظ عملی، ساخت گلوله سلونوئیدال نسبت به گلوله یکپارچه کاری مشکل‌تر است.



شکل ۳۲-۴: چگالی جریان‌های تولیدی در پرتابه در دو حالت سیم سلونوئیدی و یکدست مسی

۴-۷ ساخت تفنگ کویلی القایی

ابتدا برای ساخت این مدل نمونه آزمایشگاهی ساخته می‌شود و پس از انجام تست بر روی این تفنگ کویل القایی، تمامی تجهیزات در یک پوسته مشابه به اسلحه جمع و به صورت یک مجموعه ارائه می‌گردد.

۴-۷-۱ خازن

یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های ساخت این دسته از تفنگ‌ها، انتخاب خازن مورد استفاده است. خازنی که در این تفنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد باید علاوه بر داشتن مشخصات کلی که در جدول ۳-۴ ذکر شد، دارای جریان خروجی اتصال کوتاه بسیار بالایی باشد به طوری که پاسخگوی جریان گذرای تخلیه شده در سیم‌پیچ کویل را داشته باشد.

بدین منظور پس از تحقیقات فراوان خازن ۴۰۰ ولت DC کنذیل مدل K01400682 با ظرفیت ۶۸۰۰ میکروفاراد انتخاب گردید.

مشخصات این خازن در شکل ۶-۱ پیوست ۱ آورده شده است. این دسته از خازن‌ها جزء خازن‌های فیلم متالایز می‌باشند. در فیلم‌های متالایز برای تولید خازن‌های AC از فیلم پلی‌پروپیلن به عنوان دی‌الکتریک استفاده می‌شود که یک سمت آن‌ها با فلزات روی و آلومینیوم پوشانده می‌شود. ضخامت فیلم‌ها متناسب با ولتاژ کاری خازن‌ها از ۴ تا ۱۲ میکرومتر می‌باشند که در عرض‌های مختلف بر روی قرقره‌های مخصوص پلاستیکی تهیه می‌گردند.

مهم‌ترین ویژگی خازن‌هایی که با این نوع فیلم تولید می‌شوند، خاصیت خودترمیم‌کنندگی است و در مقایسه با خازن‌های غیر خودترمیم‌کننده از ابعاد و وزن کمتری برخوردارند.

در شکل ۴-۳۳ خازن مورد استفاده در این تفنگ مشاهده می‌شود.

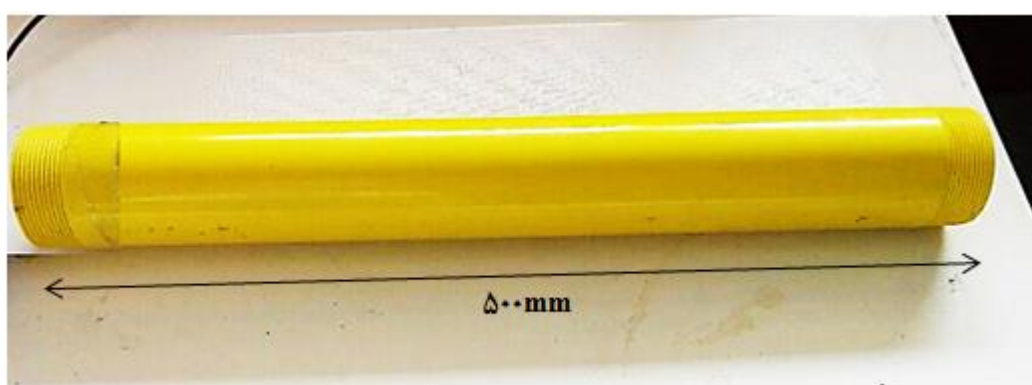


شکل ۴-۳۳: خازن مورد استفاده در ساخت تفنگ

۴-۷-۲ لوله

برای انتخاب لوله تفنگ کوپلی القایی به خاطر ضخامت کم آن امکان استفاده از مواد تفلون نیست؛ زیرا این مواد در ضخامت کم لوله تفنگ دارای استحکام کافی برای اینکه سیم پیچ کوپل بر روی آن‌ها قرار بگیرند را ندارد. بدین منظور از لوله‌های آماده رایزر با مشخصات مورد نظر استفاده می‌شود. جنس لوله PVC است.

شکل ۴-۳۴ این لوله را نشان می‌دهد. این لوله هنگام ساخت نمونه نهایی تا مقدار ۱۰۰ میلی‌متر کوتاه می‌شود اما در نمونه آزمایشگاهی از طول ۵۰۰ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۴-۳۴: لوله تفنگ کوپلی القایی

۴-۷-۳ سیم پیچ کوپل استاتور

مطابق با جدول ۴-۳ این سیم پیچ از ۱۶ دور سیم لاکه مسی با قطر ۲/۵ میلی‌متر تشکیل شده است که بر روی لوله پیچیده می‌شود. برای ثابت ماندن دوره‌های سیم پیچ در کنار یکدیگر از دو بست

کمربندی استفاده می‌شود. برای جلوگیری از برداشته شدن لاک روی سیم‌ها از رزین بر روی سیم‌پیچ‌ها استفاده می‌شود که استحکام مکانیکی آن را نیز قوت می‌بخشد.

شکل ۴-۳۵: نمایی از سیم‌پیچ کویل استاتور را که بر روی لوله پیچیده شده است، نشان می‌دهد.

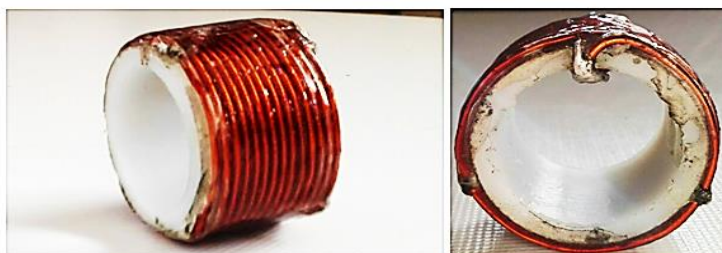


شکل ۴-۳۵: سیم‌پیچ کویل استاتور

۴-۷-۴ پرتابه

برای ساخت پرتابه از یک سیم با قطر $1/7$ میلی‌متر و تعداد دور ۱۵ مطابق با جدول ۳-۴ استفاده می‌کنیم. برای داشتن استحکام کافی این سیم‌پیچ، آن را بر روی یک استوانه توخالی با طول ۳۰ میلی‌متر و با ضخامت ۵ میلی‌متر می‌پیچیم.

دو سر سیم‌پیچ باید در پرتابه اتصال کوتاه گردند. شکل ۴-۳۶: پرتابه و محل اتصال دو سر سیم‌پیچ را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۶: پرتابه تفنگ کویلی القایی

۴-۷-۵ منبع تغذیه

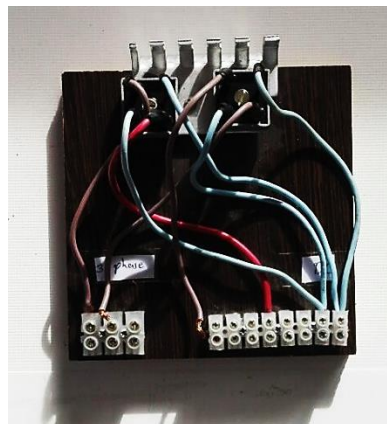
به منظور تغذیه این تفنگ کویلی القایی از منبع سه‌فاز و یک اتوترانسفورماتور سه‌فاز به منظور تولید ولتاژ دلخواه استفاده می‌شود. شکل ۴-۳۷: اتوترانسفورماتور را نشان می‌دهد. این اتوترانسفورماتور سه

فاز با ۳۰ کیلو ولت آمپر توان بوده که در ابعاد $150 \times 28 \times 33$ سانتی متر و با وزن ۱۰۵ کیلوگرم است. فرکانس ورودی این اتوترانسفورماتور متغیر، ۵۰ هرتز و ولتاژ ورودی آن ۳۸۰ ولت از نوع AC است. ولتاژ خروجی این اتوترانسفورماتور ۰ تا ۵۲۰ ولت از نوع AC و جریان خروجی آن نیز ۳۴.۶ آمپر است.



شکل ۴-۳۷: اتوترانسفورماتور

از آنجا که خازن تهیه شده DC بوده، لذا ولتاژ AC تولیدی توسط اتوترانسفورماتور را با استفاده از یک پل یکسوساز سه فاز به تک فاز، یکسو می نماییم. شکل ۴-۳۸ این یکسوساز را نشان می دهد. پل های دیودی به کار برده شده در شکل ۴-۳۸ قابلیت تحمل جریان دائمی ۳۵ آمپر را دارا هستند.



شکل ۴-۳۸: یکسوساز مورد استفاده در تفنگ کویلی القایی

۴-۷-۶ کلید

در اینجا از یک کلید سه فاز که قادر به تحمل ولتاژی که در حین اتصال کوتاه دو سر خازن است، استفاده شده است. شکل ۴-۳۹ این کلید را نشان می دهد. لازم به ذکر است که چند کلید متفاوت از

جمله کلیدهای سلکتوری، شاسی‌های استارت کامیون که قادر به عبور جریان بالا از خود می‌باشند مورد تست قرار گرفته است. این کلیدها قادر به تحمل ولتاژ معکوس گذرا روی خود را در حین اتصال کوتاه نداشتند. کلید شکل ۴-۳۹ دارای تحمل ولتاژ ۶۰۰ ولت و جریان ۳۰ آمپر در حالت دائمی می‌باشد.



شکل ۴-۳۹: کلید تفنگ کویلی القایی

۴-۷-۷ پایه‌های نگهدارنده استاتور

برای ثابت نگه داشتن لوله و سایر متعلقات، از پایه‌های شکل ۴-۴۰ می‌توان استفاده نمود. پایه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که می‌توان دو قطعه از آن‌ها را بر روی هم گذاشت به طوری که لوله در وسط آن‌ها قرار گیرد. سپس توسط سوراخ‌هایی که برای آن تعبیه شده است، به یکدیگر پیچ می‌شوند. شکل ۴-۴۰ و ۴-۴۱ به ترتیب نمایی از این پایه‌ها که از جنس چوب ساخته شده‌اند و نحوه قرارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴۰: پایه‌های نگهدارنده استاتور



شکل ۴-۴: نحوه قرارگیری پایه‌های نگهدارنده استاتور

۴-۸ نتایج آزمایشگاهی

به منظور حفظ ایمنی تست را در ولتاژی پایین‌تر از ۴۴۰ ولت انجام می‌گیرد. تست‌های صورت گرفته فقط به منظور آزمایش عملکرد تفنگ کوپلی القایی طراحی شده و همچنین مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد.

برای انجام تست‌ها، ابتدا با تغییر مکان اولیه پرتابه در تفنگ میزان سرعت و برد آن سنجیده می‌شود. در واقع با استفاده از رابطه ۳-۳۴ از روی برد پرتابه سرعت آن محاسبه می‌شود. در حالتی که فاصله مرکز کوپل تا مرکز پرتابه برابر با ۱۵ میلی‌متر است بیش‌ترین برد برای پرتابه حاصل گشت. لذا با مقایسه این عدد با مقدار ۱۶ میلی‌متر که در شبیه‌سازی به دست آمده، مطابقت این دو مقدار با یکدیگر مشهود است. اختلاف میان دو سرعت عملی و شبیه‌سازی به خاطر در نظر گرفتن پارامترهایی چون اصطکاک است. مقادیر این جدول به ازای ولتاژ ۳۵۰ ولت به دست آمده است.

جدول ۴-۱: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و عملی تفنگ کوپلی القایی با تغییر مکان اولیه پرتابه

مکان اولیه (فاصله مرکز کوپل تا مرکز پرتابه) (mm)	شبیه‌سازی ($\frac{m}{s}$)	عملی ($\frac{m}{s}$)
$x=0$	۰	۰
$x=5$	۴/۵	۲
$x=10$	۲۸	۲۲
$x=15$	۳۰	۲۵
$x=20$	۲۷	۲۰

پس از آن در ولتاژهای مختلف با ثابت نگه داشتن مکان اولیه پرتابه، تست صورت پذیرفت. نتایج کار حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ شارژ خازن سرعت و برد پرتابه افزایش می یابد.

جدول ۴-۲: مقایسه نتایج شبیه سازی و عملی تفنگ کویلی القایی با تغییر ولتاژ خازن

ولتاژ شارژ خازن (V)	شبیه سازی ($\frac{m}{s}$)	عملی ($\frac{m}{s}$)
۱۰۰	۳	۱
۲۰۰	۱۱	۷
۲۵۰	۱۷	۱۱
۳۰۰	۲۳	۱۸
۳۵۰	۳۰	۲۵

سپس با تغییر ظرفیت خازن از ۶۸۰۰ میکروفاراد به ۳۰۰ میکروفاراد مشخص شد که با کاهش ظرفیت خازن، سرعت نهایی پرتابه کاهش می یابد.

جدول ۴-۳: مقایسه نتایج شبیه سازی و عملی تفنگ کویلی القایی با تغییر ظرفیت خازن

ظرفیت خازن (μF)	شبیه سازی ($\frac{m}{s}$)	عملی ($\frac{m}{s}$)
۳۰۰	۶/۵	۳
۶۸۰۰	۳۰	۲۵

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه یک تفنگ کوپلی القایی طراحی شده و توسط نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer شبیه‌سازی شده و نتایج مورد نظر از آن استخراج گردیده است. پس از آن با استفاده از نتایج حاصله و همچنین به کمک مدل تحلیلی این تفنگ در محیط سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده تا طراحی و نتایج آن مورد تصدیق قرار گیرند.

سپس تأثیر تغییر پارامترهای کوپل بر روی عملکرد تفنگ کوپلی القایی طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG-Designer مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. تعداد طبقه‌های سیم‌پیچی، طول سیم‌پیچی و قطر سیم از جمله مهم‌ترین پارامترهای طراحی مؤثر بر عملکرد تفنگ‌های القایی می‌باشند که در این پایان‌نامه به آن‌ها پرداخته شده است. با توجه به اینکه بعد از خروج گلوله از دهانه تفنگ امکان اعمال هیچ‌گونه کنترلی بر روی سرعت و مسیر حرکت آن وجود ندارد، شاخصه عملکردی مطلوب برای تفنگ طراحی شده، استفاده حداکثری از انرژی مشخص ذخیره‌شده در بانک خازنی و دستیابی به حداکثر سرعت پرتابه در هنگام خروج از دهانه تفنگ تعریف‌شده است. روال طراحی و روش سعی و خطای پیشنهادی به تفصیل بیان شده است. این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که روش ارائه‌شده خواسته‌های طراحی را با دقت کافی برآورده می‌سازد.

در این تفنگ کوپلی القایی از آنجا که نیروی وارد شده بر پرتابه با جریان کوپل القا شده در پرتابه و کوپل استاتور رابطه مستقیم دارد، لذا ساختار یک طبقه نسبت به ساختارهای چندطبقه به خاطر مقاومت کم‌تر، با هدف دستیابی به بیش‌ترین سرعت، مناسب‌تر است.

با افزایش فرکانس یا افزایش قطر هادی اثر پوستی نیز افزایش می‌یابد. همین امر سبب می‌شود تا با افزایش قطر هادی ابتدا به خاطر کاهش مقاومت سرعت افزایش یافته و پس از قطر خاصی از هادی به بعد، به خاطر غلبه اثر پوستی در پرتابه، سرعت پرتابه کاهش یابد. همچنین با تغییر طول کوپل از مقادیر کم تا مقادیر زیاد ابتدا سرعت افزایش و پس از یک طول مشخص در هر قطر هادی کوپل

شروع به کاهش می‌نماید. در نتیجه برای هر تفنگ کوپلی القایی متناسب با طول پرتابه مقدار بهینه‌ای وجود دارد که در اینجا این مقدار توسط نرم‌افزار اجزاء محدود محاسبه گردیده است.

در راستای افزایش سرعت پرتابه علاوه بر انتخاب پارامترهای کوپل مناسب با استفاده از روش فوق، با ارائه یک ساختار جدید برای تفنگ‌های کوپلی القایی و تبدیل شکل آن‌ها از حالت استوانه‌ای به مخروطی سعی شده است تا سرعت پرتابه افزایش یابد. در این ساختار به علت افزایش نیروی محوری نسبت به حالت استوانه‌ای، سرعت پرتابه به میزان بسیار زیاد (حدود ۲۰۰٪) افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود و روش سعی و خطا بهترین زاویه برای شیب مخروط به دست آمده است.

پس از آن با هسته‌گذاری برای این دسته از تفنگ‌های القایی سرعت پرتابه بهبود بخشیده شده است. علاوه بر این موضوع وجود هسته باعث استحکام مکانیکی بیش‌تر تفنگ و همچنین کاهش تداخلات الکترومغناطیسی بر روی وسایل محیط اطراف می‌شود.

در نهایت نیز نمونه‌ی آزمایشگاهی از این تفنگ ساخته شده است و مورد تست و تحلیل عملکرد به منظور تأیید نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها شده است. این تست‌ها با مکان اولیه‌های متفاوت، ولتاژهای شارژ متفاوت و تغییر ظرفیت خازن صورت پذیرفته است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ و ظرفیت خازن، سرعت نهایی پرتابه افزایش یافته و برای مکان اولیه نیز می‌توان گفت که در هر طراحی نقطه‌ای وجود دارد که اگر پرتابه در آن نقطه قرار گیرد، سرعت آن بیشینه است.

پس از آن نیز این نمونه آزمایشگاهی برای تبدیل به نمونه قابل کاربرد در یک مجموعه مشابه با یک تفنگ آماده و ارائه شده است.

۵-۲ پیشنهادها

از آنجا که این دسته از تفنگ‌ها را می‌توان در کاربردهای مختلف نظامی و صنعتی استفاده نمود لذا با توجه به هر کاربرد موارد زیر پیشنهاد می‌گردد.

(۱) طراحی و تولید منبع تغذیه متناسب با کاربرد مورد نظر (ترجیحاً با حجم کم و قابل حمل)

(۲) توسعه طرح به ساختارهای چند مرحله

(۳) ساخت مدارات الکترونیکی برای قسمت سوئیچینگ

(۴) ارائه روشی برای کاهش زمان شلیک بین دو پرتاب متوالی

فصل ششم

پیوست‌ها

۱-۶ مشخصات خازن

شکل ۱-۶ مشخصات خازن مورد استفاده در ساخت تفنگ کویلی القایی را نشان می‌دهد.

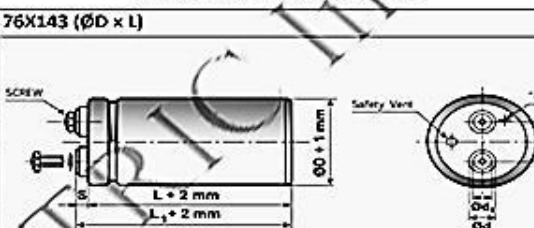
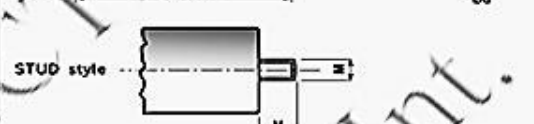


CAPACITOR SPECIFICATION

DATASHEET - K01

PART NUMBER: K01400682_M0J143

Stud and Insert style excluded [5]

Diagram of dimensions (unit = mm)						76X143 (ØD × L)
ØD	d	P	M	H	SCREW	
35	11	12.7	M8	12	SMA x 9.5	
51	18.5	22.2	M12	16	SMA x 9.5	
63	18.5	28.6	M12	16	SMA x 9.5	
76	18.5 23.2	31.8	M12	16	SMA x 9.5 6MA x 10	
90	23.2	31.8	M12	16	6MA x 10	
L1	L1 = L + 2.5mm L1 toll. +0 +3mm		L1 = L + 4.5 mm L1 toll. +1 + 3 mm			
S	M5 = 5 -0 +1mm from top of deck		M6 = 7 -1 +1mm from top of deck			
Marking Type • Identification Code Lot Rated capacitance (µF), Rated voltage (Vdc) Negative polarity: gold row Product compliant RoHS Directive						

ELECTRICAL PARAMETERS

Nominal Capacitance	6800	µF at 100 Hz
Tolerance Standard	M	= -20% +20% on request Q = -10% +30%
Temperature Range		-40°C to 85°C
Rated Voltage / Surge Voltage	400/440	VDC
Max Tang δ	0.15	at 100 Hz
Typical ESR	20	mΩ at 100 Hz
Typical Impedance Z	18	mΩ at 10 kHz
Maximum Leakage Current	6.00	mA after 5 mins at 20°C
Maximum Ripple Current	19.50	A rms at 85°C
Useful Life	> 12000	hours at 85°C for Vr ≤ 100V and for Vr ≥ 500V
Useful Life	> 15000	hours at 85°C for 100V < Vr < 500V
Reference Standards	CECC 30.300 IEC 384.4 Long Life Grade	

When ambient temperature and ripple frequency are different from 85°C and 100 Hz, ripple current shall be multiplied by the following compensating factor:

FREQUENCY	50 Hz	100 Hz	500 Hz	1000 Hz	> 10 kHz	TEMPERATURE	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C	85°C	95°C
FACTOR	0.8	1.0	1.2	1.3	1.5	FACTOR	2.2	2.1	1.8	1.6	1.4	1.0	0.5

شکل ۱-۶: مشخصات خازن

فصل هفتم

مراجع

- [1] E. A. Mendrela and Z. J. Pudlowski, "Transients and dynamics in a linear reluctance self-oscillating motor," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 1, pp. 183–191, Mar. 1992.
- [۲] خطیب‌زاده، (۱۳۸۷). پایان‌نامه کارشناسی "طراحی و ساخت پرتاب‌کننده مغناطیسی کوئل‌گان". مهندسی برق قدرت، دانشکده برق، دانشگاه شاهد. ۸۲ ص.
- [3] "Coilgun Systems." [Online]. Available: <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/>. [Accessed: 31-Dec-2017].
- [4] X. Tao, Sh. Wang, Y. Huangfu, S. Wang, and Y. Wang, "Geometry and power optimization of coilgun based on adaptive genetic algorithms," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 5, pp. 1208–1214, May 2015.
- [5] H. M. Mohamed, M. A. Abdalla, A. A. Mitkees, and W. S. Sabery, "Transient magnetostatic simulation and experimental verification of an electromagnetic coil launcher," in *2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, Cairo, 2014, pp. 1–4.
- [6] R. J. Kaye, E. L. Brawley, B. W. Duggin, E. C. Cnare, D. C. Rovang, and M. M. Widner, "Design and performance of a multi-stage cylindrical reconnection launcher," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 1, pp. 596–600, Jan. 1991.
- [7] Ch. Qi, F. Han, S. Cui, and Ch. Yang, "Study on position detection method of multi-stage coilgun projectile," in *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Melbourne, VIC, 2013, pp. 680–684.
- [8] J. A. Andrews and J. R. Devine, "Armature design for coaxial induction launchers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 1, pp. 639–643, Jan. 1991.
- [9] T. Zhang, W. Guo, Z. Su, B. Cao, R. Ren, M. Li, X. Ge and J. Li, "Design and evaluation of the driving coil on induction coilgun," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 5, pp. 1203–1207, May 2015.
- [10] D. M. Wang, P. Liu, H. Liu, J. Cheng, and Y. Zhu, "The design and structural analysis of a coilgun for low acceleration of heavy loads," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 1, pp. 160–165, 1999.
- [11] L. Gherman, M. Pearsica, C. Strimbu, and C.-G. Constantinescu, "Induction coilgun based on 'E-Shaped' design," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 39, no. 2, pp. 725–729, Feb. 2011.
- [12] T. G. Engel, D. Surls, and W. C. Nunnally, "Prediction and verification of electromagnetic forces in helical coil launchers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 1, pp. 112–115, Jan. 2003.
- [13] T. G. Engel, W. C. Nunnally, and J. Neri, "Development of a small-bore, high-efficiency, helical coil electromagnetic launcher," in *Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International Pulsed Power Conference (IEEE Cat. No.03CH37472)*, Dallas, TX, USA, 2003, pp. 1099–1102.
- [14] D. A. Bresie, J. L. Bacon, S. K. Ingram, K. S. Kennington, and D. A. Weeks, "SPEAR coilgun," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 1, pp. 467–472, Jan. 1995.
- [15] Z. Su, T. Zhang, W. Guo, J. Yue, H. Zhang, W. Fan, X. Sun and K. Huang, "Investigation of armature capture effect on synchronous induction coilgun," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 5, pp. 1215–1219, May 2015.
- [16] S. Aksoy, A. Balikci, Z. Zabar, and L. Birenbaum, "Numerical investigation of the effect of a longitudinally layered armature on coilgun performance," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 5–8, Jan. 2011.
- [17] Y. Uehara and S. Furuya, "Coilgun energized by commercial power supply," in *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, 2008*,

- pp. 1420–1425.
- [18] A. Khatibzadeh and M. R. Besmi, “Improve dimension of projectile for increasing efficiency of electromagnetic launcher,” in 4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Tehran, 2013, pp. 55–59.
 - [19] Z. Yan, X. Long, F. Lu, Y. Wang, and H. Liu, “Study of single-stage double-armature multipole field electromagnetic launcher,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 8, pp. 2381–2386, Aug. 2017.
 - [20] H. Xiang, B. Lei, Z. Li, Ch. Liang, K. Zhao, Q. Lv, Q. Zhang, “Acceleration characteristics in the launching of induction coilgun,” in 2014 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, La Jolla, CA, 2014, pp. 1–4.
 - [21] Z. Bengui, C. Yanjie, W. Jie, W. Huijin, and C. Xuehui, “Magnetic-structural coupling analysis of armature in induction coilgun,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 65–70, Jan. 2011.
 - [22] S. V. Oleksenko, “Influence of the ferromagnetic shield on efficiency of a hybrid mylti-stage coilgun,” in 2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), Dnipropetrovsk, 2015, pp. 1–4.
 - [23] M. Mahmoodi Vaneghi, A. A. Khatibzadeh, G. A. Khanbeigi, and M. R. Besmi, “Design and switching position optimization of multi-stage coilgun,” in 2011 International Conference on Business, Engineering and Industrial Applications, Kuala Lumpur, 2011, pp. 130–134.
 - [24] U. Hasirci and A. Balikci, “Design, implementation and test of a coilgun-type electromagnetic launcher prototype,” in 2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, 2009, pp. 237–240.
 - [25] Z. Su, W. Guo, B. Zhang, M. Li, C. Zhang, and J. Li, “The feasibility study of high-velocity multi-stage induction coilgun,” in 2012 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Beijing, 2012, pp. 1–4.
 - [26] R. Li, W. Liu, C. Shang, J. Wu, and Y. Cao, “Simulation on the inner trajectory motion of projectile in a three-stage synchronous inductive,” in 2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Victoria, BC, 2008, pp. 1–4.
 - [27] C. Yanjie, L. Wenbiao, L. Ruifeng, Zh. Yi, and Z. Bengui, “Study of discharge position in multi-stage synchronous inductive coilgun,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 1, pp. 518–521, Jan. 2009.
 - [28] N. Guo, Sh. Wang, J. Qiu, J. Guo Zhu, and Y. Guo, “Optimization with sequential GA and dynamic force analysis of capacitor-driven inductive coilgun,” in Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Chicago, IL, 2010, pp. 1–1.
 - [29] M. A. Abdalla and H. M. Mohamed, “Asymmetric multistage synchronous inductive coilgun for length reduction, higher muzzle velocity, and launching time reduction,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 44, no. 5, pp. 785–789, May 2016.
 - [30] T. Zhang, W. Guo, Z. Su, B. Cao, X. Sun, R. Ren, X. Ge, M. Li, “Investigation of magnetic field arrangement on launching performance of multistage synchronous induction coilgun,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1436–1442, Jul. 2017.
 - [31] T. Zhang, Z. Su, W. Guo, H. Zhang, W. Fan, Y. Chen, J. Li, K. Huang, “Research on the temperature field of multistage synchronous induction coilgun,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1295–1301, Jul. 2017.

- [32] M. B. Perotoni, M. Mergl, and V. A. Bernardes, "Coilgun velocity optimization with current switch circuit," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 6, pp. 1015–1019, Jun. 2017.
- [33] X. Niu, K. Liu, Y. Zhang, G. Xiao, and Y. Gong, "Multiobjective optimization of multistage synchronous induction coilgun based on NSGA-II," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1622–1628, Jul. 2017.

Abstract

Electromagnetic launcher due to its intrinsic advantages over chemical guns, such as lack of smoke, sound and ignition during firing, multiple usability, no need to connect bullets and tubes, and the ability to access speeds High, has a high potential for use in military, spatial and industrial applications. In this thesis, an induction coilgun is being designed. Then, this design is performed by JMAG-Designer's finite element software. The results are verified using the analytical model and the Simulink Matlab. Then, the performance of the designed gun (especially the projectile speed) was improved by modifying the gun stator coil parameters through a trial and error method in the JMAG-Designer finite element software environment, changing the structure of the cylindrical-to-cone induction coilgun, and using the magnetic core. The effect of the change in the shape of the projectile from copper to aluminum and the change in the structure of the projectile from the state of the solenoid to the integrated effect on the performance of the induction coilgun has been made. Finally, an induction is made and its results are compared with simulation results. The results of practical experiments confirm the simulation results.

Keywords: Induction Coilgun, Finite Element Method, Performance Improvement, Design



Faculty Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Design, manufacturing and performance testing of an
induction coilgun**

By: Mostafa Sharifi

Supervisor

Dr. Ahmad Darabi

Advisor

Dr. Amir Hassannia Kheibari

January 2018