

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد یک تفنگ کوئلی رلوکتانسی

نگارنده : وحید منصوری فرد

استاد راهنما :

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر امیر حسن نیا خیبری

بهمن ۱۳۹۶

شماره ۱۵۳۲، ۱۳۹۷  
تاریخ: ۹۶/۱۱/۲

باسمه تعالی



دانشگاه تهران

مدیریت تحصیلات تکمیلی

### 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 وحید منصوری فرد با شماره دانشجویی ۹۴۱۷۰۳۴ رشته مهندسی برق- قدرت گرایش الکترونیک قدرت تحت عنوان: طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد یک تفنگ کویلی رلوکتانسی 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> )                                                             | <input checked="" type="checkbox"/> مردود |
| نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input checked="" type="checkbox"/> عملی |                                           |

| عضو هیأت داوران           | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---------------------------|--------------------|------------|-------|
| ۱- استاد راهنمای اول      | دکتر دارابی        | استاد      |       |
| ۲- استاد راهنمای دوم      |                    |            |       |
| ۳- استاد مشاور            | امیر حسن نیا       | استادیار   |       |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | مهندس میرزایی      | استادیار   |       |
| ۵- استاد ممتحن اول        | سید محمد اسد زار   | استاد      |       |
| ۶- استاد ممتحن دوم        | مجتبی شعیانی       | استادیار   |       |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد علی...  
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:

پدر و مادر مہربان و فداکارم، خواہر و برادر عزیزم

کہ با

عشق، محبت، راہنمائی، ہمدلی و ہمراہی ایشان این موفقیت میسر کردید.

## تشکر و قدردانی:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گرانقدر و دلسوزم، جناب آقای پروفسور احمد دارابی، در تمامی مراحل انجام این پایان نامه صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. همچنین سپاس از استاد مشاور دلسوزم جناب آقای دکتر امیر حسن‌نیا خیبری، دوست، همکار و همکلاسی عزیز آقای مصطفی شریفی 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 وحید منصوری فرد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت - الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد یک تفنگ کوپلی رلوکتانسی تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

## چکیده

در این پایان نامه، ضمن ارائه یک روند طراحی و روابط تحلیلی جهت بررسی رفتار تفنگ کوئیلی رلوکتانسی در حالت گذرا، به طراحی کوئیل یک نمونه تک مرحله‌ای از این تفنگ پرداخته می‌شود. این تفنگ قادر خواهد بود، پرتابه‌ای به جرم ۹ گرم را از حالت سکون، با رعایت سقف جریان مجاز و قابل تحمل اجزای تشکیل دهنده تفنگ، تا بیشترین سرعت ممکن شتاب دهد. همچنین، تأثیر تغییر پارامترهای کوئیل تفنگ با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود JMAG-Designer 16 مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و توسط نرم افزار MATLAB به اعتبارسنجی نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود. روند طراحی برپایه روش سعی و خطای پیشنهادی است که به تفصیل بیان شده است و نتایج شبیه‌سازی‌های آن ارائه می‌گردد. سپس با ارائه یک ایده جدید که شامل تعبیه کردن یک پوشش فرومغناطیس به دور کوئیل است، عملکرد تفنگ کوئیلی رلوکتانسی بهبود داده می‌شود. در پایان، نمونه عملی تفنگ طراحی شده، ساخته و نتایج آزمایش‌های عملی و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

**کلید واژه-** پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی، تفنگ کوئیلی رلوکتانسی، کوئیل الکترومغناطیسی،

طراحی، روش اجزاء محدود

## لیست مقالات مستخرج

- (۱) منصوری فرد و. دارابی ا. حسن‌نیا خیبری ا. و شریفی م، (۱۳۹۶)، "طراحی کوئل درایو و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف آن بر نحوه عملکرد تفنگ کوئلی رلوکتانسی"، ششمین کنفرانس بین‌المللی الکترومغناطیس مهندسی ایران (کام)، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.



## فهرست مطالب

|    |                                                       |
|----|-------------------------------------------------------|
| ۱  | فصل اول - مقدمه و تاریخچه.....                        |
| ۲  | ۱-۱ مقدمه.....                                        |
| ۳  | ۲-۱ مزایا و معایب پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی..... |
| ۵  | ۳-۱ تاریخچه.....                                      |
| ۱۲ | ۴-۱ مروری بر فصل‌های بعدی.....                        |
| ۱۳ | فصل دوم - ساختارهای تفنگ الکترومغناطیسی.....          |
| ۱۴ | ۱-۲ تفنگ‌های ریلی.....                                |
| ۱۸ | ۲-۲ تفنگ‌های کویلی.....                               |
| ۲۱ | ۱-۲-۲ اجزای تفنگ کویلی.....                           |
| ۲۱ | ۱-۲-۲-۱ منابع تغذیه ولتاژ بالا.....                   |
| ۲۲ | ۲-۲-۲-۱ منابع تغذیه ولتاژ پایین.....                  |
| ۲۲ | ۳-۲-۲ کنترلر شارژ.....                                |
| ۲۲ | ۴-۲-۲ مدار سنسورها.....                               |
| ۲۳ | ۵-۲-۲ میکروکنترلر.....                                |
| ۲۳ | ۶-۲-۲ مدار تریگر.....                                 |
| ۲۳ | ۷-۲-۲ کویل.....                                       |

|    |                                                  |
|----|--------------------------------------------------|
| ۲۴ | ..... کاربردهای تفنگ کویلی (۲-۲-۲)               |
| ۲۴ | ..... توپخانه تفنگ کویلی (۱-۲-۲-۲)               |
| ۲۵ | ..... سیستم‌های فضایی تفنگ کویلی (۲-۲-۲)         |
| ۲۶ | ..... اسلحه حمل و نقل تفنگ کویلی (۳-۲-۲-۲)       |
| ۲۷ | ..... تفنگ کویلی قابل حمل (۴-۲-۲-۲)              |
| ۲۷ | ..... تفنگ کویلی با آتش سریع (VRF) (۵-۲-۲-۲)     |
| ۲۸ | ..... انواع تفنگ‌های کویلی (۳-۲-۲)               |
| ۲۹ | ..... تفنگ‌های کویلی رلوکتانسی (۱-۳-۲-۲)         |
| ۳۵ | ..... تفنگ‌های کویلی القایی (۲-۳-۲-۲)            |
| ۳۹ | ..... تفنگ‌های کویلی اتصال مجدد (۳-۳-۲-۲)        |
| ۴۱ | ..... تفنگ‌های کویلی تامسون (۴-۳-۲-۲)            |
| ۴۲ | ..... مشخصات برخی از سلاح‌های معمول امروزی (۳-۲) |
| ۴۵ | ..... فصل سوم- روند طراحی و مدلسازی تحلیلی (۳)   |
| ۴۶ | ..... طراحی پرتابه (۱-۳)                         |
| ۴۶ | ..... جنس و خاصیت مغناطیسی پرتابه (۱-۱-۳)        |
| ۴۸ | ..... جرم و چگالی پرتابه (۲-۱-۳)                 |
| ۴۸ | ..... ابعاد پرتابه (۳-۱-۳)                       |

|    |                                                                     |
|----|---------------------------------------------------------------------|
| ۴۹ | ..... رسانی پرتابه (۴-۱-۳)                                          |
| ۴۹ | ..... انتخاب خازن (۲-۳)                                             |
| ۵۲ | ..... انتخاب پارامترهای مختلف کوئل (۳-۳)                            |
| ۵۲ | ..... مصالحه در طراحی (۱-۳-۳)                                       |
| ۵۳ | ..... معادله آندردانک (۲-۳-۳)                                       |
| ۵۵ | ..... محاسبه مقاومت سیم پیچ (۳-۳-۳)                                 |
| ۵۷ | ..... محاسبه اندوکتانس سیم پیچ (۴-۳-۳)                              |
| ۶۰ | ..... مدلسازی (۴-۳)                                                 |
| ۶۱ | ..... روابط تحلیلی (۱-۴-۳)                                          |
| ۶۸ | ..... راندمان (۲-۴-۳)                                               |
| ۶۹ | ..... فصل چهارم - طراحی، مدلسازی و شبیه سازی به روش اجزاء محدود (۴) |
| ۷۰ | ..... مدلسازی و شبیه سازی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود (۱-۴) |
| ۷۰ | ..... مسئله طراحی و پارامترهای طراحی (۱-۱-۴)                        |
| ۷۲ | ..... طراحی کوئل تفنگ به روش سعی و خطای پیشنهادی (۲-۱-۴)            |
| ۸۴ | ..... انتخاب مدل نهایی (۳-۱-۴)                                      |
| ۸۷ | ..... اعتبارسنجی نتایج (۲-۴)                                        |
| ۹۳ | ..... بهبود عملکرد (۳-۴)                                            |

|     |                                            |     |
|-----|--------------------------------------------|-----|
| ۴-۴ | تأثیر جنس پرتابه بر عملکرد تفنگ            | ۹۶  |
| ۵   | فصل پنجم - ساخت و آزمایش نمونه عملی        | ۹۹  |
| ۵-۱ | نحوه ساخت نمونه عملی                       | ۱۰۰ |
| ۵-۲ | نتایج نمونه عملی                           | ۱۰۲ |
| ۶   | فصل ششم - جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادها | ۱۰۷ |
| ۶-۱ | جمع‌بندی و نتیجه‌گیری                      | ۱۰۸ |
| ۶-۲ | پیشنهادهایی برای مطالعات آینده             | ۱۱۰ |
| ۷   | فصل هفتم - مراجع                           | ۱۱۱ |

## فهرست شکل‌ها و جداول

- شکل (۱-۱): تفنگ الکتریکی SIVA ..... ۶
- شکل (۲-۱): طرح اصلی آقای برکلند در مورد تفنگ الکترومغناطیسی ..... ۷
- شکل (۳-۱): بزرگترین تفنگ ساخته شده توسط برکلند واقع در موزه نروژ ..... ۷
- شکل (۴-۱): اولین تفنگ الکتریکی و پرتابه ساخته شده توسط ویلپلی ..... ۸
- شکل (۵-۱): دیاگرام ریل‌گان ساخته شده توسط ویلپلی ..... ۹
- شکل (۱-۲): نمایی از یک تفنگ ریلی ساده ..... ۱۴
- شکل (۲-۲): نمایی از یک تفنگ ریلی تقویت شده ..... ۱۷
- شکل (۳-۲): نمایی از یک تفنگ ریلی چند ریلی ..... ۱۷
- شکل (۴-۲): دیاگرام کلی یک تفنگ کوپلی ..... ۱۸
- شکل (۵-۲): شماتیک یک تفنگ کوپلی چند چند مرحله‌ای ..... ۲۰
- شکل (۶-۲): نمای کلی از اجزای یک تفنگ کوپلی چند مرحله‌ای ..... ۲۱
- شکل (۷-۲): نمایی شماتیک از یک پرتاب‌کننده رلوکتانسی ساده ..... ۲۹
- شکل (۸-۲): نمودار چگالی شار مغناطیسی و نیروی وارد شده به پرتابه در طول مسیر عبور از کوپل ... ۳۰
- شکل (۹-۲): گلوله استوانه‌ای به همراه شکاف در سطح جانبی ..... ۳۴
- شکل (۱۰-۲): شماتیک تفنگ کوپلی القایی (سنکرون) چند مرحله‌ای ..... ۳۵
- شکل (۱۱-۲): نمایی ساده از نحوه عملکرد یک تفنگ کوپلی القایی ..... ۳۷

|             |                                                                                            |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| شکل (۲-۱۲): | دیاگرام تفنگ کویلی القایی (آسنکرون) چند مرحله‌ای                                           | ۳۷ |
| شکل (۲-۱۳): | نمایی از یک تفنگ کویلی تک مرحله‌ای اتصال مجدد                                              | ۴۰ |
| شکل (۲-۱۴): | مراحل عملکرد یک تفنگ کویلی اتصال مجدد                                                      | ۴۱ |
| شکل (۲-۱۵): | نمای شبیه‌سازی شده تفنگ کویلی تامسون                                                       | ۴۲ |
| جدول (۲-۱): | مشخصات برخی از سلاح‌های معمول امروزی                                                       | ۴۳ |
| شکل (۳-۱):  | منحنی هیستریزیس یک ماده                                                                    | ۴۷ |
| شکل (۳-۲):  | مدار RLC ساده مورد استفاده در سیمولینک در شرایط $R = 0.5\Omega$ ، $I(0) = 0$ و $V_c = V_0$ | ۴۹ |
| شکل (۳-۳):  | پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۳۵ ولت و ۳۹۰۰ میکروفاراد                                       | ۵۰ |
| شکل (۳-۴):  | پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۲/۷ ولت و ۳۰۰۰ فاراد                                           | ۵۰ |
| شکل (۳-۵):  | پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۳۲۰ ولت و ۶۸۰۰ میکروفاراد                                      | ۵۰ |
| شکل (۳-۶):  | پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۳۲۰ ولت و ۵۰ میکروفاراد                                        | ۵۱ |
| شکل (۳-۷):  | نمودار جریان بر حسب افزایش دما ( $I - \Delta T$ ) در سیم ۱ میلی‌متر                        | ۵۵ |
| جدول (۳-۱): | نتایج حاصل از محاسبات بر اساس معادله آندردانک                                              | ۵۵ |
| شکل (۳-۸):  | پارامترهای محاسبه مقاومت یک کوئل                                                           | ۵۶ |
| شکل (۳-۹):  | نحوه جابجایی پرتابه                                                                        | ۵۸ |
| شکل (۳-۱۰): | سه حالت حرکتی در پرتاب کننده رلوکتانسی                                                     | ۶۳ |
| جدول (۴-۱): | مشخصات ابعادی تفنگ کویلی رلوکتانسی                                                         | ۷۰ |

- شکل (۱-۴): نمایی از تفنگ کوپلی رلوکتانسی شبیه‌سازی شده ..... ۷۱
- شکل (۲-۴): نحوه قرارگیری پرتابه در مکان اولیه ..... ۷۳
- شکل (۳-۴): جریان اعمال شده به کوپل ..... ۷۳
- شکل (۴-۴): تأثیر مکان اولیه پرتابه بر سرعت خروجی در سیم ۱ میلی‌متر ..... ۷۴
- شکل (۵-۴): نمودار اثر طول کوپل بر سرعت خروجی پرتابه در سیم ۱ میلی‌متر ..... ۷۴
- جدول (۲-۴): طول بهینه کوپل در قطرهای مختلف سیم ..... ۷۵
- شکل (۶-۴): نمودار جریان الکتریکی کوپل در قطرهای مختلف سیم ..... ۷۵
- شکل (۷-۴): نمودار نیروی وارد بر پرتابه در قطرهای مختلف سیم ..... ۷۶
- شکل (۸-۴): نمودار سرعت پرتابه در قطرهای مختلف سیم ..... ۷۶
- جدول (۳-۴): نتایج حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی سیم ۱ میلی‌متر ..... ۸۰
- جدول (۴-۴): نتایج حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی سیم ۱/۵ میلی‌متر ..... ۸۱
- جدول (۵-۴): نتایج حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی سیم ۲ میلی‌متر ..... ۸۲
- شکل (۹-۴): نمودار جریان الکتریکی کوپل در قطرهای مختلف سیم ..... ۸۳
- شکل (۱۰-۴): نمودار نیروی وارد بر پرتابه در قطرهای مختلف سیم ..... ۸۳
- شکل (۱۱-۴): نمودار سرعت پرتابه در قطرهای مختلف سیم ..... ۸۴
- شکل (۱۲-۴): مدار معادل استفاده شده در مدلسازی تفنگ رلوکتانسی طراحی شده ..... ۸۵
- شکل (۱۳-۴): بردار چگالی شار مغناطیسی و نحوه توزیع شار ..... ۸۵
- شکل (۱۴-۴): بردار توزیع چگالی جریان ..... ۸۶

- شکل (۴-۱۵): نمودار جریان الکتریکی کویل ..... ۸۶
- شکل (۴-۱۶): نمودار نیروی وارد بر پرتابه ..... ۸۷
- شکل (۴-۱۷): نمودار سرعت پرتابه ..... ۸۷
- شکل (۴-۱۸): نمایی بسیار ساده از مدار معادل حاکم بر سیستم تفنگ کویلی رلوکتانسی ..... ۸۸
- شکل (۴-۱۹): منحنی منطبق بر نقاط بدست آمده با استفاده از نرم افزار MATLAB ..... ۸۹
- شکل (۴-۲۰): نمایی از بلوک دیاگرام‌های سیمولینک نرم افزار MATLAB ..... ۹۰
- شکل (۴-۲۱): نمودار سرعت پرتابه بر حسب زمان در MATLAB و JMAG ..... ۹۱
- شکل (۴-۲۲): نمودار نیروی وارد بر پرتابه بر حسب زمان در MATLAB و JMAG ..... ۹۲
- شکل (۴-۲۳): نمودار جریان بر حسب زمان در MATLAB و JMAG ..... ۹۲
- شکل (۴-۲۴): نمایی از تفنگ رلوکتانسی پیشنهادی ..... ۹۳
- شکل (۴-۲۵): نمودار مقایسه‌ای سرعت دو مدل پیشنهادی و معمولی ..... ۹۴
- شکل (۴-۲۶): نمودار مقایسه‌ای جریان دو مدل پیشنهادی و معمولی ..... ۹۴
- شکل (۴-۲۷): نمودار مقایسه‌ای نیرو دو مدل پیشنهادی و معمولی ..... ۹۵
- جدول (۴-۲۶): تأثیر ضخامت پوشش فرومغناطیس کویل بر عملکرد سیستم ..... ۹۶
- شکل (۴-۲۸): نمودار B-H فریت و فولاد ..... ۹۷
- شکل (۴-۲۹): مقایسه سرعت خروجی پرتابه فولاد و فریت ..... ۹۷
- شکل (۵-۱): نمایی از گلوله فولادی تفنگ کویلی رلوکتانسی ..... ۱۰۰
- شکل (۵-۲): نمایی از خازن، کلید، کویل و لوله تفنگ کویلی رلوکتانسی ..... ۱۰۱



شکل (۳-۵): نمایی از پل دیودی و اتوترانس جهت شارژ خازن تفنگ کویلی رلوکتانسی ..... ۱۰۱

شکل (۴-۵): نمودار سرعت - مکان گلوله در شرایط سویچینگ ۰/۱ ثانیه ..... ۱۰۳

شکل (۵-۵): بانک خازنی ۳۰۰ میکروفارادی ..... ۱۰۳

شکل (۶-۵): نمودار سرعت - مکان گلوله در شرایط سویچینگ ۰/۱ ثانیه با بانک خازنی جدید ..... ۱۰۴







(فصل اول)

## مقدمه و تاریخچه

## ۱-۱) مقدمه

پرتاب کننده<sup>۱</sup> وسیله‌ای است که به وسیله آن جسم پرتاب شونده و یا اصطلاحاً پرتابه<sup>۲</sup> تا سرعت‌های بالایی شتاب داده شده و سپس رها می‌گردند. پرتاب کننده‌های مرسوم شیمیایی، صدها سال است که مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به طور مستمر پیشرفت کرده و به روز رسانی شده‌اند. پیشرفت این پرتاب کننده‌ها و سلاح‌ها از نقطه نظر سرعت خروجی پرتابه و محدودیت‌های سرعت، هم اکنون تقریباً نزدیک به بهترین و بهینه‌ترین حالت خود قرار دارند. محدودیت سرعت در پرتاب کننده‌ها و سلاح‌های شیمیایی، ضرورت جابجایی انباری از مواد شیمیایی خطرناک و قابل اشتعال که خطراتی نظیر انفجار ناخواسته باروت را به دنبال دارد و همچنین تولید دود، صدا و آتش ناشی از شلیک از جمله مواردی است که استفاده از نسل جدید پرتاب کننده‌ها و سلاح‌ها را توجیه می‌کند [۱]. یکی از عمده‌ترین عوامل محدودیت سرعت در پرتاب کننده‌های شیمیایی، عدم یکنواختی شتاب در پرتابه است. بطوریکه حداکثر نیروی ناشی از انفجار باروت، فقط در بازه بسیار کوتاهی از زمان به پرتابه اعمال می‌شود. در صورتیکه در پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی این قابلیت وجود دارد که در طول مدت پرتاب، حداکثر نیروی قابل تحمل پرتابه به آن وارد شود.

پس از اینکه پرتاب کننده‌های معمولی به نقطه اوج پیشرفت خود رسیدند، توجه پژوهشگران و مراکز علمی به پرتاب کننده‌ها و شتاب دهنده‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی EML<sup>۳</sup> معطوف گشت. پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی، از نیروی الکترومغناطیسی جهت شتاب دادن به اجسام استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها بهترین جانشین برای پرتاب کننده‌ها و تفنگ‌های معمولی از نقطه نظر بهبود سرعت و قدرت

---

1. Launcher  
2. Projectile  
3. Electromagnetic Launcher

تخریب بیشتر به شمار می‌روند. همچنین پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی پتانسیل افزایش برد پرتابه را دارند، در حالی که هیچگونه نیازی به مواد شیمیایی خطرناک و قابل اشتعال ندارند.

همانگونه که اشاره شد، هدف اصلی از توسعه تکنولوژی پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی، عبور از محدودیت‌های ذاتی در پرتاب کننده‌های شیمیایی و رساندن پرتابه به سرعت‌های بسیار بالا است. قابلیت عملیاتی شدن پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی در زمان گذشته نسبتاً دوری اثبات شد، اما در چند سال اخیر، تمرکز بر روی این مقوله افزایش یافته و تحقیقات گسترده‌ای در دست اجرا است. از آنجاییکه تکنولوژی‌های مرتبط با پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی از جمله منابع تغذیه، علم مواد و... توسعه یافتند، قابلیت استفاده کاربردی‌تر و پیشرفت سریعتر این پرتاب کننده‌ها سهولت یافت. اگرچه، تحقیقات در زمینه‌های کاربردی این پرتاب کننده‌ها، نظیر شتاب گلوله‌های سوخت هیدروژنی برای راکتورهای همجوشی، راه‌اندازی فضاپیماهای بدون سرنشین، درمان‌های سطحی به وسیله پالس‌های پلاسمایی شتاب داده شده، و... در حال انجام شدن است، اما اکثر تحقیقات همانند نحوه جایگزینی با سلاح‌های مرسوم و توپخانه‌ها و...، به سمت کاربردهای نظامی سوق داده می‌شود [۱].

## **(۲-۱) مزایا و معایب پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی**

به طور کلی، مزایای پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی نسبت به تفنگ‌های احتراقی و شیمیایی متداول امروزی را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

(۱) سرعت بالای پرتابه در دهانه لوله و قابلیت دست یابی به سرعت‌های بالاتر از سلاح‌های احتراقی

متداول امروزی

(۲) کاهش خطاهای عملیاتی مانند اختلال در سامانه سوخت رسانی (افزایش میزان موفقیت).

۳) افزایش توانایی جهت جابه‌جایی و نگهداری و کاهش خطر آن، به علت کاهش وزن و نداشتن مواد منفجره نظیر باروت و ... .

۴) نداشتن دود، صدا و جرقه زنی هنگام شلیک پرتابه.

۵) کاهش گرمای ایجاد شده نسبت به سلاح‌های متداول شیمیایی به علت نداشتن مواد منفجره.

۶) کنترل برد و سرعت پرتابه بوسیله تغییر ولتاژ، بدون نیاز به تغییر زاویه پرتاب و یا طراحی مجدد.

همچنین، همانند بسیاری از فناوری‌های جدید معرفی شده، پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی هنوز به اوج نقطه پیشرفت خود نرسیدند و جهت صنعتی شدن و کاربرد گسترده، هنوز راه درازی را در پیش دارند. برخی از مشکلات و معایب حال حاضر تفنگ‌های کوپلی که بدون شک در آینده‌ای نزدیک قابل حل خواهند بود، به شرح ذیل می‌باشد:

۱) تأمین منبع تغذیه مورد نیاز و قابل حمل.

۲) عدم استحکام کافی برای استفاده در میدان نبرد.

۳) تأخیر در زمان شارژ و دشارژ بانک خازنی.

به دلیل پیشرفت سریع تکنولوژی پرتاب‌کننده‌ها، هنوز سردرگمی در مورد توصیف و نامگذاری آن‌ها وجود دارد. این بدان معنی است که نام‌های بسیاری از پرتاب‌کننده‌ها، در طول تحقیقات تکامل یافته است و منجر به استفاده از اصطلاحات و لغات علمی مختلفی شده است که توسط نویسندگان و محققان، برای دستگاه‌های بسیار مشابه استفاده می‌شد [۱]. دو گونه کاملاً متمایز و متفاوت پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی، تفنگ‌های ریلی<sup>۱</sup> و تفنگ‌های کوپلی<sup>۲</sup> نام دارند [۲]. تفنگ‌های ریلی و تفنگ‌های

---

1. Railgun  
2. Coilgun



کویلی در جنگ افزارها و توپخانه‌ها به تفنگ گاوس<sup>۱</sup> نیز معروف می‌باشند. اما به طور رسمی، شتاب دهنده‌های خطی مغناطیسی خطاب می‌شوند [۳].

فعالیت‌های پراکنده‌ای از قرن نوزدهم در این زمینه آغاز گشته است. اما سرمایه گذاری اصلی مربوط به دو دهه اخیر می‌باشد. با اینکه تا کنون سیستم عملیاتی مهمی به طور رسمی با استفاده از این تکنولوژی گزارش نشده است، اما عملیاتی نمودن این سیستم‌ها در برنامه کاری چند سال آینده کشورهای پیشرفته قرار دارد. بسیاری از کشورها پیش‌بینی می‌کنند که در آینده‌ای نزدیک از پرتاب کننده‌ها و شتاب دهنده‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی می‌توان به عنوان سلاح استفاده کرد. واضح است که پرتاب کننده‌ها و شتاب دهنده‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی به عنوان یک شاخه تخصصی جدید از علم مطرح بوده و مثل هر علم جدیدی دارای نکات مبهم زیادی است. در ادامه این فصل مروری بر تاریخچه این پرتاب کننده‌ها و شتاب دهنده‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی خواهیم داشت.

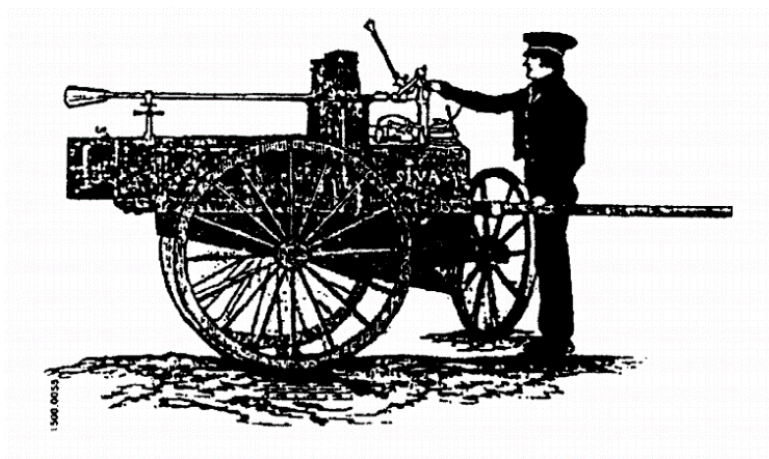
## ۱-۳) تاریخچه

از یک قرن پیش فعالیت‌های پراکنده‌ای برای استفاده از نیروی الکتریکی جهت شتاب اجسام صورت گرفته است. در طول این مدت، دانشمندان و محققان، ایده‌های جدیدی خلق و بر روی کارهای قبلی پیاده‌سازی می‌کردند که موجب پیشرفت‌ها و موفقیت‌های بزرگی در این زمینه می‌شد. اگرچه، گزارش‌های محدودی از فعالیت‌ها در این زمینه در قرن نوزدهم وجود دارد، اما قسمت اعظم پیشرفت و توسعه تفنگ‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی به قرن بیستم باز می‌گردد. فعالیت‌هایی در نروژ در سال ۱۹۰۱، پیشرفت‌های فرانسه در طول دوره جنگ جهانی اول و همچنین تحقیقات و پیشرفت‌های شگفت انگیز آلمان و ژاپن در طول دوره جنگ جهانی دوم نمونه‌هایی گواه بر صحت این مدعا است [۴].

---

1. Gauss Gun

اولین کوشش برای ساخت تفنگ الکتریکی به ۱۷۰ سال قبل برمی‌گردد. در آن زمان آقای بنینگ فیلد<sup>۱</sup> یک تفنگ الکتریکی به نام سیوا<sup>۲</sup> معرفی نمود. این شخص ادعا داشت که این سلاح از هر سلاح دیگری در جنگ ترسناک‌تر است و قادر است در فاصله بیش از یک مایلی، هر جسمی را نابود سازد و به تعداد ۲۰۰۰ عدد در دقیقه شلیک کند. البته این تفنگ هیچ‌گاه نتوانست چنین کاری را انجام دهد [۴].



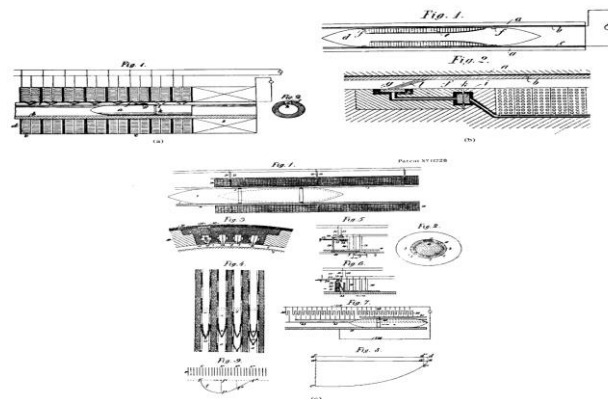
شکل (۱-۱): تفنگ الکتریکی SIVA [۴]

در سال ۱۸۴۵ پروفیسور چارلز پیج<sup>۳</sup>، شیمیدان کالج کلمبیای واشنگتن یک گزارش علمی منتشر کرد که در آن کوپل‌های حلزونی که می‌توانستند میله‌ای با بیش از ۳ پوند وزن را پرتاب کنند، را تشریح نموده بود [۴].

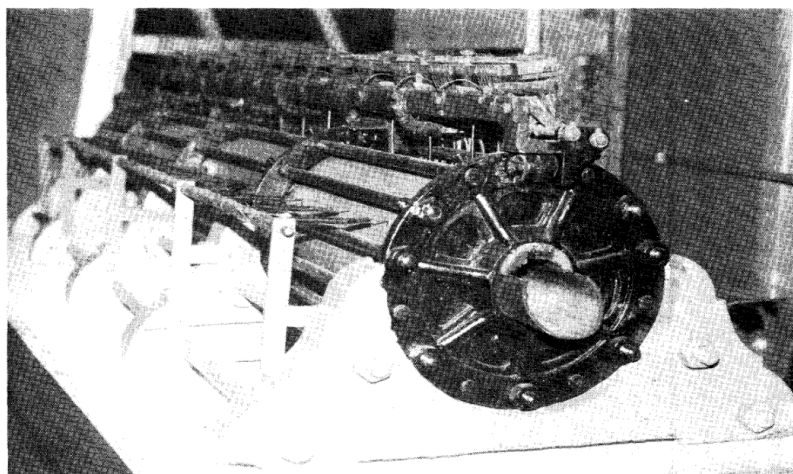
مطالعات آقای کریستین برکلند<sup>۴</sup> پژوهشگر نروژی، در اوایل قرن ۲۰، به نوعی اولین تلاش حقیقی و جدی برای توسعه تفنگ‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی بود [۴]. در سال ۱۹۰۱، در حالی که آقای برکلند مشغول توسعه یک بریکر جریان الکتریکی بر پایه القای مغناطیسی بود، متوجه شد یک قطعه آهن

- 
1. Benning Field
  2. SIVA
  3. Charles Page
  4. Kristian Birkeland

با یک نیروی قوی به سمت سِلنوئید جذب شد و همانند یک پرتابه به پرواز درآمد [۵]. این پدیده بارها در گذشته توسط افراد مختلف مشاهده شده بود، اما آقای برکلند اولین کسی بود که متوجه کاربرد عملی این پدیده به عنوان یک تفنگ الکترومغناطیسی شد. در مصاحبه‌ای که در سال بعد از این اتفاق منتشر شد، آقای برکلند اذعان داشت که پس از ۱۰ شب و روز محاسبات متوالی و کار بر روی جزئیات موضوع، اولین تفنگ ساخته شد. در اوایل تابستان ۱۹۰۱، آقای برکلند جزئیات طرح خود را ارائه و درخواست خود را مبنی بر ثبت اولین اختراع عملی خود، مطرح کرد [۶].

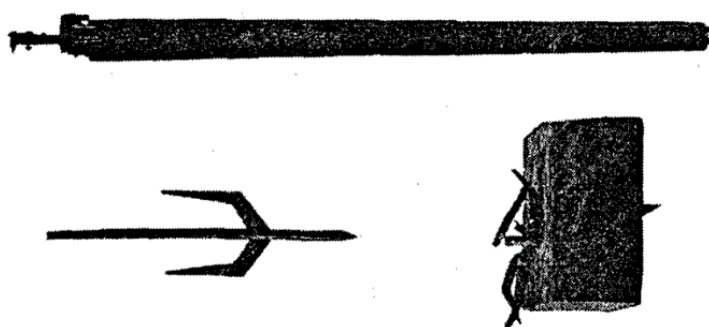


شکل (۱-۲): طرح اصلی آقای برکلند در مورد تفنگ الکترومغناطیسی [۴]



شکل (۱-۳): بزرگترین تفنگ ساخته شده توسط برکلند واقع در موزه نیرو [۴]

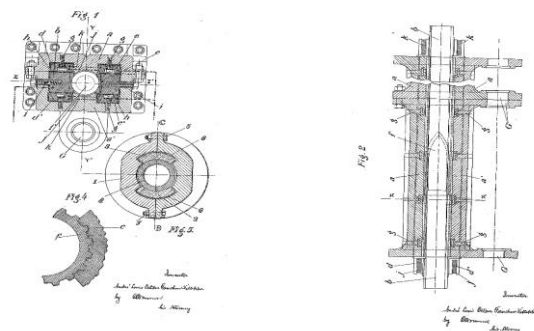
در سال ۱۹۱۶ آقای لویی اکتاو فاشون ویلپلی<sup>۱</sup> مخترع فرانسوی، مطالعات خود را بر روی تفنگ‌های الکتریکی آغاز نمود. در ۲۲ ژوئن همان سال، یک اختراع در این زمینه ارائه کرد که با ثبت آن موافقت نشد. او در سال ۱۹۱۷ با آزمایش یک سیستم عملی توانست نظر فرمانده ارتش را جلب کند. به طوریکه او را مأمور به ساخت توپ کالیبر ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر کردند. ولی با پایان جنگ جهانی اول در ۳ نوامبر ۱۹۱۸ این پروژه متوقف شد [۴].



شکل (۱-۴): اولین تفنگ الکتریکی و پرتابه ساخته شده توسط ویلپلی [۴]

ویلپلی دست از فعالیت نکشید و در سال‌های ۱۹۱۶ تا ۱۹۱۹ چندین اختراع در این زمینه ثبت نمود. یکی از اختراعات او، ساخت یک تفنگ ریلی با طول لوله ۲ متر بود که برای پرتاب پرتابه‌ای به طول ۲۷ سانتی‌متر با پره‌های ۷ سانتی‌متری به وزن ۵۰ گرم به کار گرفته شده بود. این سیستم که با ولتاژ ۴۰ تا ۵۰ ولت و جریان ۵ کیلوآمپر تغذیه می‌شد، می‌توانست پرتابه را تا سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه شتاب دهد. این پرتابه‌ها می‌توانستند یک هدف چوبی به ضخامت ۸ سانتی‌متر را در فاصله ۲۵ متری، سوراخ نمایند. در این سیستم، دو ریل موازی به وسیله یک پرتابه به یکدیگر متصل و کل دستگاه توسط یک میدان مغناطیسی احاطه شده بود. با عبور جریان از ریل‌ها و پرتابه، یک نیروی القایی، باعث سوق دادن پرتابه در امتداد ریل‌ها و سپس پرتاب آن می‌شد [۴].

1. Louis Octave Fauchon-Villeplee



شکل (۱-۵): دیاگرام تفنگ ریلی ساخته شده توسط ویلپلی [۴]

فعالیت‌ها، نقدها و پژوهش‌های آقای ا.ل. کورولکوف<sup>۱</sup> روس در سال ۱۹۲۳ میلادی از دیگر مواردی است که کمک شایانی به پیشرفت و توسعه تفنگ‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی کرد. آقای کورولکوف در گزارشی در همان سال، اختراعات آقای ویلپلی و برخی نظریاتش را در مورد تفنگ‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی به چالش کشید. از جمله اظهارات آقای ویلپلی که مورد انتقاد آقای کورولکوف واقع شد می‌توان به اعتقاد ایشان از چشم‌پوشی از جرقه‌های هنگام شلیک پرتابه، راندمان بالاتر تفنگ‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی و همچنین ساختار ساده و ارزان قیمت اینگونه تفنگ‌ها نام برد. در پایان گزارش، آقای کورولکوف اشاره‌ای به ضرورت استفاده از بانک‌های خازنی و باتری‌ها به جای چرخ‌های طیار می‌کند [۴].

در سال ۱۹۲۱ ساخت یک تفنگ کوپلی توسط مک لارن<sup>۲</sup> در آمریکا، نقطه شروعی برای کارهای اولیه در مورد تفنگ‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی در این کشور بوده است. او یک تفنگ کوپلی ساخت که با موج مغناطیسی رونده تولید شده به وسیله یک ژنراتور سه فاز فرکانس بالا، تغذیه می‌شد. برخلاف تفنگ‌های ریلی، موج رونده تفنگ کوپلی، جریانی در پرتابه القا می‌کرد که نیروی الکترومغناطیسی برای حرکت آن را به وجود می‌آورد. مک لارن عنوان کرد که ژنراتور باید توانایی ایجاد جریان زیاد در پریرود

1. A.L. Korol'kov  
2. Maclaren

زمانی کوتاه را داشته باشد. در سیستم او از آب، روغن و هوا، برای خنک کردن دستگاه استفاده می‌شد [۴]. کارهای انجام شده در آلمان بیشتر مربوط به جنگ جهانی دوم و توسط دکتر هانس‌لر<sup>۱</sup> بوده است. او در گزارشی در سال ۱۹۴۵ یک طرح پیشنهادی برای تفنگ ضدهوایی سرعت بالا را مطرح نمود که دست آوردهای قابل ستایشی داشت. همچنین برنامه ژاپن توسط آزمایشگاه تحقیقاتی صنایع نظامی و کمپانی الکتریکی توکیو شیبانرا<sup>۲</sup> در سال‌های ۱۹۴۲ تا ۱۹۴۴ در زمینه تفنگ‌های الکتریکی دنبال می‌شد و ژاپنی‌ها در این زمینه با آلمان‌ها تبادل اطلاعات داشتند. پس از پایان جنگ جهانی دوم فعالیت در زمینه شتاب دهنده‌های الکترومغناطیسی کاهش یافت [۴]. این فعالیت‌های پراکنده که گاهاً منجر به نتایج بسیار ازشمندی می‌شد تا دهه ۷۰ میلادی ادامه یافت. به دلیل توسعه و تحولات فراوان تکنولوژی‌های مستقل و پشتیبان تفنگ‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی مانند دستگاه‌های ذخیره سازی انرژی با تراکم بالا، بار دیگر نگاه‌ها به سمت این تکنولوژی معطوف شد و امکان عملیاتی و صنعتی شدن آن بیش از پیش رنگ و بوی واقعیت گرفت. در سال ۱۹۷۸، وزارت دفاع ایالات متحده آمریکا، جهت سامان‌دهی و متمرکز نمودن پژوهش‌ها در این زمینه، هیئتی را تشکیل داد. در نشستی که در آکادمی نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا در دسامبر ۱۹۷۸ برگزار شد، حدود ۶۰ دانشمند، پژوهشگر و مهندس در مورد تحولات اخیر و پیشرفت‌های تکنولوژی‌های پشتیبان به بحث پرداختند. همچنین در این نشست، کارگروه وزارت دفاع ایالات متحده آمریکا، لیستی از ۶ آزمایش احتمالی آینده را پیشنهاد نمود که به شرح ذیل می‌باشد [۱]:

(۱) طراحی و ساخت تفنگ ریلی به منظور پرتاب پرتابه‌ای به جرم ۰٫۳ کیلوگرم، با سرعت ۳

کیلومتر بر ثانیه و با استفاده از ژنراتور هم‌قطبی ۱۵ مگاژول.

(۲) طراحی و ساخت یک ژنراتور هم‌قطبی ۵ مگاژول با قطر ۲۶ اینچ و ارتفاع ۱۱ اینچ.

---

1. Hansler  
2. Tokyo Shibaura

۳) طراحی و ساخت تفنگ ریلی کوچک با سرعت ۱۰ کیلومتر بر ثانیه و با استفاده از منبع کمپرسور شار انفجاری.

۴) طراحی و ساخت تفنگ ریلی با گلوله‌های قابل نفوذ در اجسام فلزی.

۵) طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌ای با راندمان بالای ۵۰ درصد.

۶) طراحی و ساخت اهرم پلاسمایی شتاب‌دهنده.

ناسا<sup>۱</sup> نیز با همکاری اداره ریگن<sup>۲</sup> مطالعات خود را بر روی این موضوع آغاز کرد و بر روی امکان استفاده از تفنگ‌های الکترومغناطیسی جهت پرتاب اجسام به فضا تحقیق کرد. تحقیقات در زمینه این تکنولوژی همچنان ادامه داشت تا اینکه در سال ۱۹۸۰ سمپوزیوم‌های دوسالانه‌ای به نام پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی توسط IEEE برگزار گردید [۱].

تا کنون کاربردهای متفاوت و وسیعی برای پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی معرفی شده است که به طور خلاصه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) محدوده گسترده برای کاربرد های نظامی شامل سلاح های متداول جنگی، پرتاب موشک و راکت، سلاح‌های ضد زره، پرتابه‌های بالستیک و غیره.

۲) پرتاب میکرو ماهواره‌ها و محموله‌های فضایی کوچک جهت قرار دادن آنها در مدار های پایین زمین و همچنین تحقیقات جوی.

۳) کمک به پرتاب هواپیماهای بی‌سرنشین یا جنگنده‌ها از روی ناو هواپیمابر.

۴) کاربرد در آزمایشات و مطالعات مکانیکی ضربه و نفوذ.

---

1. NASA

2. Reagan's Administration

## ۴-۱) مروری بر فصل‌های بعدی

در این فصل، به طور مختصر، به معرفی پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی پرداخته شد. مزایای این پرتاب‌کننده‌ها، تاریخچه و سوابق تحقیقاتی آن از ابتدا تا کنون نیز مورد بررسی واقع، و در مورد ضرورت جایگزینی این نوع از پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی با پرتاب‌کننده‌های متداول و مرسوم امروزی صحبت شد. همچنین از دو مدل مهم و مشهور اینگونه پرتاب‌کننده‌ها نام برده شد. در فصل‌های بعدی، ابتدا به معرفی و بررسی دقیق انواع و ساختارهای مختلف پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی، مطالعات و پیشینه پژوهش‌ها از گذشته تا به امروز پرداخته می‌شود. در فصل سوم، ملزومات طراحی یک تفنگ کوپلی رلوکتانسی شامل نحوه انتخاب قطعات مورد استفاده در تفنگ و سپس روابط تحلیلی حاکم بر تفنگ کوپلی رلوکتانسی شامل محاسبه پارامترهای مورد نیاز، روابط ریاضی و تحلیلی دینامیکی حاکم بر تفنگ و... مطرح می‌شود. در فصل چهارم، پس از انتخاب پارامترهای ابعادی، یک نمونه از این تفنگ به وسیله نرم افزار اجزاء محدود JMAG Designer 16 مدل‌سازی می‌شود. پس از آن، با ارائه یک روش پیشنهادی مبتنی بر سعی و خطا، به طراحی کوپل تفنگ جهت رسیدن به بیشترین سرعت خروجی و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف کوپل بر هدف مطلوب پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به همراه تحلیل آن ارائه می‌شود. در همین فصل، با استفاده از روابط مرسوم، به تحلیل رفتار دینامیکی و پاسخ معادلات حالت سیستم تفنگ کوپلی رلوکتانسی پرداخته و نتایج حاصل از آن با شبیه‌سازی ارائه شده توسط نرم افزار اجزاء محدود مقایسه و اعتبار سنجی می‌شود. سپس با ارائه یک ایده جدید که شامل تعبیه کردن یک پوشش فرومغناطیس به دور کوپل است، عملکرد تفنگ کوپلی رلوکتانسی بهبود داده می‌شود. در فصل پنجم به نحوه ساخت، آزمایش، بررسی نتایج و تحلیل عملکرد نمونه عملی پرداخته و در فصل پایانی جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای مسیر پژوهشی آینده ارائه می‌شود.



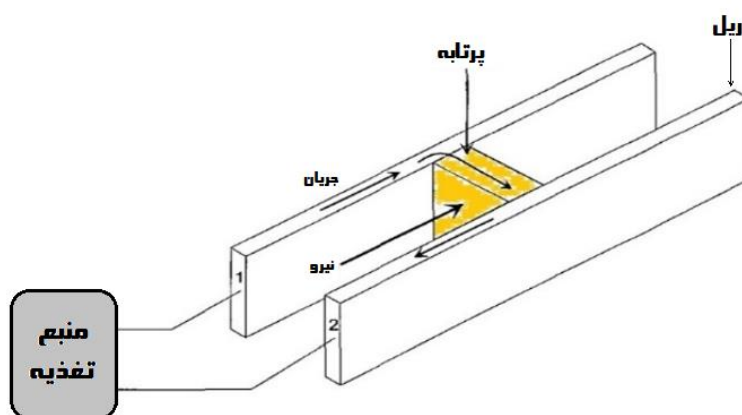
(فصل دوم)

## **ساختارهای تفنگ الکترومغناطیسی**

در این فصل به بررسی جامع انواع ساختارهای مختلف پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی، تئوری عملکرد و مطالعات پیشین و پیشرفت‌های آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲-۱) تفنگ‌های ریلی

به لحاظ ساختاری، تفنگ ریلی یکی از ساده‌ترین پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی است. ساختار ساده آن متشکل از دو ریل موازی رسانا است که در میان آن دو ریل موازی، یک پرتابه رسانا قرار می‌گیرد. شکل (۲-۱) نمایی از یک تفنگ ریلی ساده را نشان می‌دهد. هنگامی که منبع تغذیه‌ای که از قبل شارژ شده است، تخلیه می‌شود، جریان در ریل اول برقرار می‌شود، از پرتابه (آرمیچر) عبور می‌کند و از ریل دوم برمی‌گردد. این جریان باعث می‌شود که تفنگ ریلی شبیه یک آهنربای الکتریکی، میدان مغناطیسی پر قدرتی را در ناحیه بین ریل‌ها ایجاد کند. از برهم‌کنش جریان برقرار شده در پرتابه با میدان مغناطیسی تولید شده توسط جریان ریل‌ها، نیروی لورنتس تولید می‌شود که باعث می‌شود پرتابه به حرکت درآید [۱].



شکل (۲-۱): نمایی از یک تفنگ ریلی ساده [۱]

کارهای اولیه بر روی تفنگ‌های ریلی، توسط دانشگاه ملی استرالیا<sup>۱</sup> انجام شده است. دانشگاه ملی استرالیا دارای بزرگترین ژنراتور هم‌قطبی دنیا بود و همچنین تجربه‌های منحصر به فردی در زمینه‌ی کانتکت‌های در حال حرکت در جریان‌های بالا، در کارنامه خود داشت. آن‌ها قادر به ساخت موفقیت آمیز یک تفنگ ریلی شدند که قادر بود یک پرتابه ۳ گرمی را تا ۵/۹ کیلومتر بر ثانیه شتاب دهد [۷].

از جهت توسعه و پیشرفت پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی، تفنگ‌های ریلی به واسطه ساختار ساده خود، تبدیل به کانون توجهات شد. مرکز توسعه و پژوهش وستینگ‌هاوس<sup>۲</sup> جهت پیش‌بینی نحوه توزیع جریان و میدان مغناطیسی در تفنگ ریلی، مدل دو بعدی حالت ماندگار تهیه کرد [۸].

همچنین تفنگ ریلی با منبع انرژی توزیع شده، به وسیله مرکز الکترومغناطیس در دانشگاه تگزاس<sup>۳</sup> (CEMUT) ارائه شد. در این تفنگ ریلی، از منابع تغذیه چندگانه برای تغذیه یک جفت ریل پرتاب‌کننده استفاده شد و انتظار می‌رفت منابع چندگانه بتوانند به طور مؤثر جریان حداکثر را برای مدت طولانی‌تری در طول مدت پرتاب، حفظ کنند. نتایج حاصل از شبیه سازی حاکی از بهبود قابل توجه در عملکرد کلی تفنگ ریلی پیشنهادی بود [۹]. علاقه و توجه فراوان به تفنگ‌های ریلی را می‌توان از افزایش تعداد مقاله‌های ارائه شده در دومین سمپوزیم که در سال ۱۹۸۳ در بوستون برگزار گردید، مشاهده نمود. موضوعات کلی مطرح شده در این مقالات شامل استفاده از مدل‌های کامپیوتری مختلف، نصب و راه اندازی و آزمایش پرتاب‌کننده‌های ریلی بود. این علاقمندی گسترده‌تر شد و مطالعات و پژوهش‌ها در این زمینه به سمت ساختار و مدل‌های الکترومغناطیسی، فرسایش ریل و طراحی آرمیچر رفت [۱۰].

---

1. Australian National University  
2. Westinghouse Research and Development Centre  
3. Centre of Electromechanics at The University of Texas

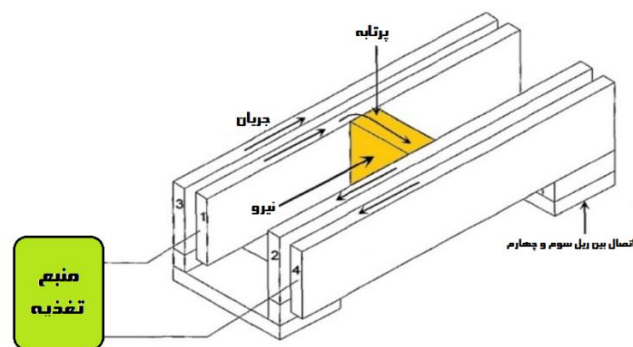
با پیشرفت چند پرتاب‌کننده متفاوت از جمله تفنگ‌های ریلی تقویت شده که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، دریچه‌های جدیدی از توسعه این تکنولوژی گشوده شد. راکول اینترنشنال<sup>۱</sup> طرحی را ارائه کرد که استفاده از دو ریل مکمل باعث افزایش میدان مغناطیسی می‌شود. این امر منجر به تولید نیروی بیشتری بر روی پرتابه بدون افزایش جریان ریل و یا پرتابه می‌شود. نتایج به این صورت بود که استفاده از ریل‌های مکمل نیروی بیشتری با همان جریان مشابه تولید می‌کند. اگرچه مشاهده شد که افزایش در تلفات حرارتی و اندوکتانس سیستم، راندمان کلی سیستم را کاهش می‌دهد [۱۰].

با افزایش درک ودانش در مورد محدودیت‌های تفنگ‌های ریلی، گونه متفاوتی از پرتاب‌کننده‌های هیبریدی پیشنهاد شد که شامل پیش پرتاب‌کننده‌های شیمیایی و انژکتورهای پلاسمایی می‌شدند [۱].

با گذشت زمان و با افزایش در دسترس بودن منابع انرژی، نیرو و جریان، پرتاب‌کننده‌های ریلی مجدداً مورد توجه و اهمیت قرار گرفت. یکی از مهمترین و عمده‌ترین کانون توجهات، فرسایش ریل‌های تفنگ‌های ریلی بود. با افزایش نیرو، و با هر شلیک، ریل‌های مسی که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گرفتند، بسیار زیاد آسیب می‌دیدند به طوری که باید جایگزین می‌شدند. به علاوه، نیروی تولید شده در طول پرتاب، ریل‌ها را به اطراف پرت می‌کرد و منفجر می‌شد [۱]. این مشکلات موجب تحقیقات بر روی این مسئله شد که چگونه مواد مختلف تحت شرایط شدید واکنش نشان می‌دهند. برای مقابله با مشکل فرسایش ریل‌ها، پوشش رسوب بخار شیمیایی با همکاری CEMUT و Ultramet توسعه یافت [۱۱].

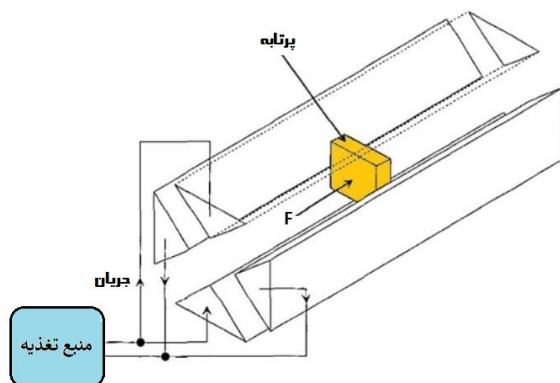
---

1. Rockwell International



شکل (۲-۲): نمایی از یک ریل‌گان تقویت شده [۱]

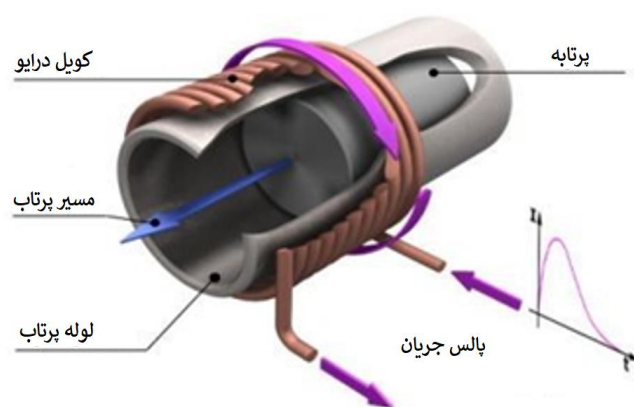
در دوره‌های بعدی مسیر مطالعات و پژوهش به سمت طراحی و بهبود عملکرد پرتابه‌ها سوق داده شد. علاوه بر آن، پیشرفت‌های حاصل شده در تفنگ‌های ریلی، احتمالات دیگری برای امکان استفاده از این تکنولوژی در پرتاب‌کننده‌های ماهواره‌ای زمین به فضا فراهم کرد [۱]. کارهای مدلسازی در CEMUT بر روی استفاده از تفنگ‌های ریلی چند ریلی انجام شد. این‌ها تفنگ‌های ریلی، همانطور که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است، تفنگ‌های ریلی تقویت شده نبودند. اما در عوض، ریل‌های اضافی برای کاهش جریان ریل و در نتیجه جریان اتصال داشتند. متأسفانه شبیه‌سازی‌ها نشان از کاهش ۴۰ درصدی نیروی وارد شده به پرتابه هنگام افزایش تعداد ریل‌ها از دو به چهار، داشت [۱۲].



شکل (۳-۲): نمایی از یک ریل‌گان چند ریلی [۱]

## ۲-۲) تفنگ‌های کویلی

به طور کلی، تفنگ‌های کویلی مجموعه‌ای از کویل‌های الکترومغناطیسی است که پرتابه را با سرعت بسیار بالایی شتاب می‌دهد. تفنگ کویلی از لحاظ مکانیکی کمی از تفنگ ریلی پیچیده‌تر است. اما از آنجا که هیچ‌گونه تماس مستقیمی بین پرتابه و کویل‌ها وجود ندارد، مشکلات خوردگی و فرسودگی و تولید جرقه زیاد که از مشکلات اساسی تفنگ‌های ریلی می‌باشند را ندارد [۱۳]. شکل (۲-۴) دیاگرام کلی یک تفنگ کویلی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۴): دیاگرام کلی یک تفنگ کویلی [۱۴]

در یک تفنگ کویلی از یک یا تعداد بیشتری کویل الکترومغناطیسی برای شتاب دادن به پرتابه استفاده می‌شود. کویل‌ها در امتداد لوله تفنگ قرار داده می‌شوند تا پرتابه به سرعت در امتداد لوله تفنگ، تحت تأثیر نیروهای مغناطیسی، شتاب گیرد. جریان عبور داده شده بزرگ و لحظه‌ای است. وقتی پرتابه به نزدیکی مرکز کویل می‌رسد، این جریان قطع شده و در کویل بعدی برقرار می‌شود. با تکرار این عمل پرتابه در مراحل متوالی به طور تصاعدی شتاب می‌گیرد.

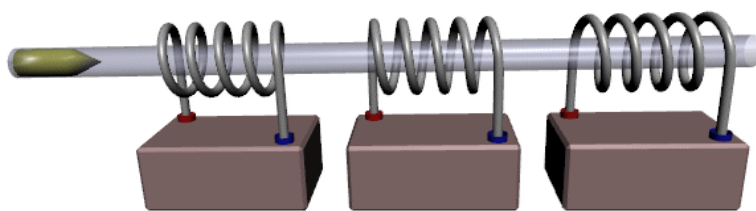
جریان، از یک منبع جریان با قابلیت تخلیه شدن سریع، که نوعاً یک باتری یا یک مجموعه خازن ظرفیت بالای ولتاژ بالا می باشد، تأمین می شود. از یک دیود برای محافظت از خازن ها نیز استفاده می شود تا از آن ها در برابر جهت گیری معکوس جریان پس از انجام عمل تخلیه محافظت شود. یکی از موانع و مشکلات اصلی ساخت عملی این تکنولوژی، علاوه بر تولید نیروی کافی و میدان مغناطیسی قوی، مشکل زمان بندی سویچینگ بین کویل ها است. از آنجاییکه پرتابه درون لوله با سرعت عبور می کند، سویچ زنی میدان مغناطیسی باید به شدت دقیق باشد.

برخلاف تفنگ های ریلی، تفنگ های کویلی می توانند به اندازه دلخواه، کوتاه و یا بلند ساخته شوند. بدین ترتیب دستیابی به سرعت های متفاوت امکان پذیر می شود. تفنگ های کویلی مزایای زیادی نسبت به تفنگ های ریلی دارند. اگرچه، نمونه های ساخته شده و کاربردی تفنگ های ریلی در حال حاضر بیشتر است، اما به تدریج تفنگ های کویلی جای آن ها را خواهند گرفت. به طور کلی تفنگ های کویلی انرژی کمتری مصرف می کنند، کم صداتر هستند و در ابعاد کوچکتری می توان آن ها را ساخت. از آنجاییکه در تفنگ های کویلی پرتابه هیچگونه تماسی با لوله پرتاب ندارد، اصطکاک بسیار کمی وجود دارد. در نتیجه، پرتابه در تفنگ کویلی می تواند شتاب بیشتری بگیرد و به سرعت های بالاتری برسد. همچنین به دلیل نداشتن ریل، تفنگ های کویلی می توانند به تعداد دفعات بیشتر و قدرت آتش بیشتری شلیک کنند. اما در حال حاضر می توان گفت پایداری و استحکام تفنگ های ریلی بیشتر است.

برای هر شلیک مقدار بسیار زیادی جریان مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین منبع تغذیه قوی اما قابل حمل و تکنولوژی انتقال انرژی برای ساخت نمونه عملی این تفنگ ها مورد نیاز است. همچنین تفنگ های کویلی به اندازه جنگ افزارها و توپخانه های معمولی نیروی پس زنی دارند که راه های مقابله و یا کاهش این نیرو در تفنگ باید گنجانده شود. به دلیل اینکه کل جریان توسط کویل ها مصرف می شود،

گرمای زیادی توسط این تفنگ‌ها تولید می‌شود که طراحی یک سیستم خنک کننده را ضروری می‌کند [۳].

تفنگ کویلی می‌تواند عملیات انتقال انرژی به پرتابه را در چند مرحله و از طریق چند کوئل انجام دهد. این نوع از تفنگ‌های کویلی به مراتب کاراتر و قوی‌تر از حالت‌های تک مرحله‌ای عمل می‌کنند و غالباً در کاربردهای عملی، از این نوع استفاده می‌شود. شکل (۵-۲) نمونه‌ای از یک تفنگ کویلی چند مرحله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲): شماتیک یک تفنگ کویلی چند مرحله‌ای [۱۴]

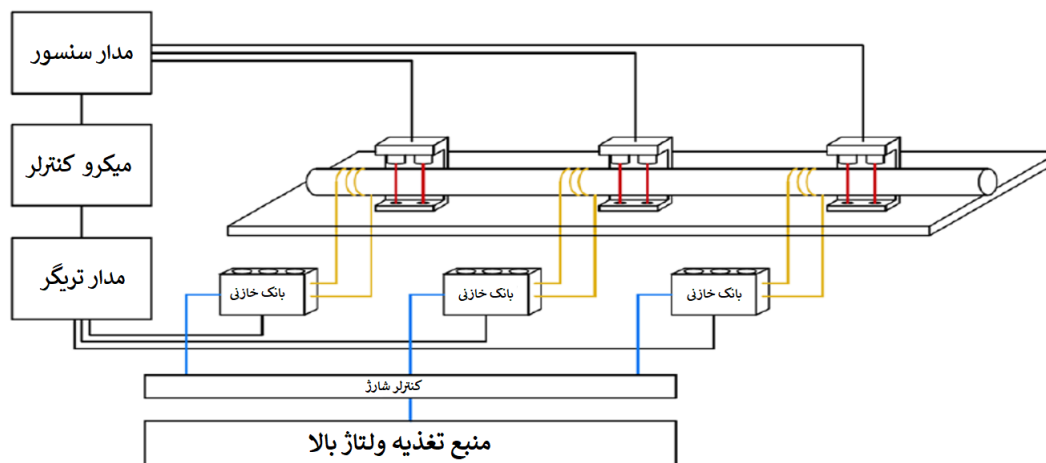
برای ساخت تفنگ کویلی چند مرحله‌ای باید چند کوئل را در امتداد مسیر حرکت گلوله قرار داد. به بیان ساده، عملکرد یک تفنگ کویلی چند مرحله‌ای به این صورت است که با اعمال یک جریان بالا و لحظه‌ای تنها به اولین کوئل از چند کوئل قرار گرفته در کنار یکدیگر در ساختار ماشین، پرتابه به سمت همان کوئل جذب می‌شود. سپس با قطع به موقع جریان این کوئل و تغذیه به موقع کوئل مجاور، پرتابه با شتاب از فضای داخل کوئل اول وارد فضای داخل کوئل بعدی می‌شود و این روند قطع و وصل تغذیه برای کوئل‌های بعدی به ترتیب انجام می‌گیرد تا اینکه تغذیه آخرین کوئل نیز قطع می‌شود. در این مرحله هسته متحرک تفنگ، فضای داخل تفنگ را با سرعت قابل توجه ترک نموده و وارد فضای آزاد می‌گردد.



عملیات فعالسازی ترتیبی کویل‌ها باید بسیار سریع انجام پذیرد و برای این منظور نمی‌توان از سیستم های مکانیکی استفاده کرد. این امر نیازمند یک سیستم کنترلی ترجیحاً هوشمند است تا موقعیت گلوله را در هر لحظه در طول مسیر بررسی کرده و مطابق با آن، کویل‌های پیش رو را فعال کند.

## ۲-۲-۱) اجزای تفنگ کویلی

در شکل (۶-۲) نمای کلی از ساختار و اجزای یک تفنگ کویلی چند مرحله‌ای (در اینجا سه مرحله‌ای) مشاهده می‌گردد [۱۵]. در ادامه به توضیح و بررسی هریک از اجزای تشکیل دهنده یک تفنگ کویلی چند مرحله‌ای پرداخته خواهد شد.



شکل (۶-۲): نمای کلی از اجزای یک تفنگ کویلی چند مرحله‌ای [۱۵]

## ۲-۲-۱-۱) منابع تغذیه ولتاژ بالا

یکی از نیازهای گریزناپذیر فناوری پرتاب‌کننده‌ها، هر مدلی که باشد، منابع تغذیه است. خازن‌ها روشی آسان و ساده جهت تولید پالس‌های انرژی الکتریکی مورد نیاز پرتاب‌کننده‌ها می‌باشند. اگرچه به لحاظ اندازه و هزینه، می‌تواند یک عامل بازدارنده باشد. همچنین یک فناوری ابتدایی در منابع تغذیه که بسیار

هم پر کاربرد است، ژنراتورهای هم قطبی می‌باشند. اما سایر منابع تغذیه مانند کامپالسیتورها [۱۶-۱۷] و نمونه‌های دیگر پیشنهادی [۱۸] در مقاله‌ها و طرح‌های پژوهشی، در سال‌های اخیر توسعه یافته و کاربردهایی داشته‌اند. با این وجود، منابع تغذیه خازنی به واسطه سادگی و انعطاف پذیری بالای خود، بسیار پر کاربرد و مورد استفاده هستند. در سال‌های اخیر پیشرفت‌ها و توسعه‌های فراوان و بسیار بزرگی در فناوری‌های منابع تغذیه حاصل شده که موجب پیدایش یک زمینه پژوهشی تقریباً مستقل شده است.

## **۲-۱-۲-۲) 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.

## **۲-۱-۲-۲) کنترلر شارژ**

کنترلر شارژ به خازن‌های موجود در مدار اجازه می‌دهد تا به ترتیب شارژ شوند.

## **۲-۱-۲-۲) مدار سنسورها**

مدار سنسورها شامل لیزرهای توان پایین، دیودهای نوری، پتانسیومتر و آمپلی‌فایر می‌باشد. این مدار به منظور تشخیص مکان گلوله به منظور قطع و وصل به موقع و به ترتیب کویل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. طریقه کار مدار به این صورت است که هنگامی که پرتابه از جلوی این لیزرها عبور کند، دیودهای نوری قطع خواهند شد. این وقفه منجر به ایجاد یک ولتاژ در حد صد میلی‌ولت 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 میلی‌ولت 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) [۱۵].

## **۲-۲-۱-۵) میکروکنترلر**

وظیفه میکروکنترلر صدور فرمان آتش برای اتصال جریان کوئل‌ها می‌باشد. 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 کوئل مرحله بعد را صادر می‌نماید.

## **۲-۲-۱-۶) مدار تریگر**

این مدار شامل اویتوکوپلر، رله و سویچ SCR می‌باشد. اویتوکوپلر تأمین کننده ایزولاسیون لازم بین دو بخش و با ولتاژ بالا و پایین می‌باشد و رله برای روشن کردن این سویچ بکار می‌رود.

## **۲-۲-۱-۷) کوئل**

کوئل، به عنوان مهمترین عنصر و قلب تپنده تفنگ کوئلی است. پارامترهای مهم یک کوئل در تفنگ کوئلی عبارتند از: قطر سیم، طول سیم پیچی، تعداد طبقات سیم‌پیچی. یک قانون تجربی نشان می‌دهد که طول کوئل و طول پرتابه تقریباً باید نزدیک به هم باشد. برای القای بهتر و یا کوئل مغناطیسی بهتر در یک پرتابه، علاوه بر برابری حدودی طول کوئل با طول پرتابه، می‌توان به برابری حدودی قطر کوئل با قطر پرتابه هم اشاره نمود (فاصله هوایی کم). در فصول بعدی به تفصیل به بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده بر نحوه عملکرد تفنگ کوئلی خواهیم پرداخت.

## ۲-۲-۲) کاربردهای تفنگ‌های کویلی [۱۹]

### ۲-۲-۲-۱) توپخانه تفنگ کویلی<sup>۱</sup>

اولین کاربرد عملی فناوری تفنگ‌های کویلی در قالب توپخانه می‌باشد. انتظار از عملکرد آنان حداقل برابر با تفنگ‌های ریلی است که توسط نیروی دریایی آمریکا توسعه داده شده است. بطوریکه سرعت دهانه فراتر از ۷ ماخ (۲۳۸۰ متر بر ثانیه) و برد آن حدود ۲۹۰ مایل (۴۶۷ کیلومتر) می‌باشد.

همچنین یکی از سلاح‌های جدیدی که آمریکا در حال تکمیل و تولید آن می‌باشد، دارای قدرت تخریب فراوان است و سرعتی حدود ۳۵ کیلومتر بر ثانیه دارد. سلاحهای متداول در لحظه شلیک سرعتی بالغ بر ۲ کیلومتر بر ثانیه دارند. طبق آزمایش‌های اولیه، این سلاح بعد از شلیک از فاصله ۷ کیلومتری یک ورقه آهنی به قطر ۳۰ سانتیمتری را در مدت زمان کمتر از ۱ ثانیه سوراخ کرد. آلیاژ پوسته این سلاح با گرافیت پوشانده شده تا حرارت شدید اصطکاک با هوا را تا حدی خنثی کند. توپخانه تفنگ کویلی پرتابه‌های خود را در محورهای سهمی گون که به ارتفاع ۸۰ مایل (۱۲۹ کیلومتر) می‌رسند، پرتاب می‌کند. در طول پرواز، اطلاعات مسیر خود را از ماهواره‌های GPS دریافت نموده و مسیر پرتاب خود را مطابق با تیغه حرکتی که بر روی قسمت انتهایی آن وجود دارد، تنظیم می‌کند.

تأمین نیرو و منبع تغذیه تفنگ کویلی کمی دشوار است، اما با طرح‌های متفاوت قابل حل می‌باشد. اگر تفنگ کویلی در ناوهای جنگی دریایی مورد استفاده قرار گیرد، موتور کشتی می‌تواند مقدار زیادی از جریان مورد نیاز را به طور مستقیم تأمین کند. اگر توپخانه بر روی زمین باشد، توپخانه به یک ژنراتور

---

1. Coilgun Artillery

سیار و آرایشی از کامپالسیتورها و چرخ‌های طیار که بر روی شاسی آن قرار دارد، نیازمند است. البته این امر موجب سنگینی و حجیم شدن توپخانه می‌شود.

در حالت دیگر منبع نیرو می‌تواند در یک وسیله نقلیه مجزا مانند کامیون به همراه یک ژنراتور سیار به همراه بانک‌های خازنی، ساخته شود. این روش موجب می‌شود که خود تفنگ کویلی به عنوان یک واحد مستقل تر و مجزاتر مطرح شود و همچنین کامیون‌های حامل ژنراتور این امکان را دارند که همزمان چند واحد تفنگ کویلی را تغذیه نمایند.

## **۲-۲-۲-۲) سیستم‌های فضایی تفنگ کویلی<sup>۱</sup>**

در ۵۰ سال اخیر که پرتاب کننده‌های فضایی به اندازه کافی مرسوم شدند، هزینه پرتاب‌ها به مدارهای فضایی کاهش پیدا کرد. این امر، امکان پرتاب بارهای سلاح‌های عظیم در مدار را فراهم کرد که در گذشته گمان برده می‌شد، هزینه‌های زیاد، مانع از عملی شدن آن شود. انرژی این ماهواره‌ها می‌تواند به وسیله تأسیسات هسته‌ای و یا به وسیله پنل‌های خورشیدی تأمین شود. همچنین می‌توان انرژی مورد نیاز را در بانک باتری‌های چرخ‌های طیار، ذخیره کرد. چرخ‌های طیار در طول محورهای مختلف آرایش پیدا می‌کنند تا علاوه بر ذخیره انرژی، به عنوان پایدارسازهای ژيروسکوپی نیز عمل نمایند. ماهواره‌های تفنگ کویلی می‌توانند هدف را در بالای اتمسفر شناسایی کند و به هدف شلیک کند. به علت وجود نیروی پس زدن، پس از هر بار شلیک رگباری، ماهواره باید مجدداً روی هدف خود تنظیم شود.

## ۲-۲-۳-۳) اسلحه حمل و نقل تفنگ کویلی<sup>۱</sup>

با کوچکتر کردن ابعاد تفنگ کویلی به اندازه کافی، می‌توان از آن‌ها در وسایل نقلیه زرهی و هواپیماهای جنگی استفاده کرد. از آنجا که طول لوله نسبت به توپخانه‌ها کوتاهتر می‌شود، نیروی بیشتری باید به کوئل اعمال شود تا سرعت نسبتاً بالای آن را تثبیت کند. در این سطح، از فناوری کلیدی و مهمی استفاده می‌شود که می‌تواند این نیروی اضافی را به صورت فشرده تأمین کند. ژنراتورهای قدرت محترقه<sup>۲</sup> (EPG). از این ژنراتورها به دو صورت استفاده می‌شود: در حالت اول خرج منفجره، چرخش زیادی در چرخ‌های طیار و یا کامپالسیورها به صورت آبی القا می‌کند. بطوریکه این چرخش، نیروی مورد نیاز را برای شلیک تولید می‌کند. در حالت دوم، از ترکیب مخصوصی از عناصر برای تهیه الکترون متراکم استفاده می‌شود که موجب تولید موج‌های انرژی بالا شده، انرژی آن مستقیماً خازن‌ها را تغذیه می‌کند.

به منظور ساده سازی اسلحه برای استفاده، مواد محترقه برای EPGها به دور آن‌ها ترکیب و ادغام می‌شود. بنابراین نیاز به منبع تغذیه مستقل حجیم برای اسلحه از بین می‌رود. همانند اسلحه‌های مدرن تنها چیزی که سرباز برای آماده سازی تفنگ برای شلیک انجام می‌دهد، مهمات است. برای استفاده در خط مقدم، پرتابه‌های تفنگ کویلی آتش مستقیم بسیار سریعتر از موشک‌ها پرواز می‌کنند و قدرت نفوذ بسیار بالاتری نسبت به سلاح‌های معمولی دارند. همچنین تفنگ کویلی‌ها با سرعت بیشتری قابلیت بارگیری دارند و سرعت شلیک بالاتری خواهند داشت.

- 
1. Coilgun Vehicle Weapons
  2. Explosive Power Generators

## ۲-۲-۲-۴) تفنگ کویلی قابل حمل<sup>۱</sup>

تفنگ کویلی‌ها همچنان بزرگ، سنگین و حجیم هستند. اما این امکان وجود دارد که اندازه آن به حد کافی کم شود تا یک سرباز بتواند آن را در میدان جنگ به وسیله بند کتف‌های مخصوص حمل کند. در این حالت، منبع تغذیه به شکل EPGها را می‌توان به اندازه کافی فشرده درست کرد که حداقل امکان حمل آن به صورت کوله پشتی فراهم شود. اما دو مشکل اساسی این گونه تفنگ‌ها مشکل تنظیم گرما و تصحیح و جبران نیروی پس زنی است. حتی یک تفنگ کویلی در ابعاد کوچک در هر شلیک می‌تواند نیروی پس زنی زیادی داشته باشد. در این صورت یک "کم" پایدار همانند بند کتف مخصوص مورد نیاز است. اما همچنان کافی نیست و سیستم‌های جبران ساز اثر پس زنی همانند هدایت گازهای اتلافی EPGها و یک وزنه تعادل برای کارکرد درست آن مورد نیاز است. تنظیم دما و گرما، یک مسئله جدی تلقی می‌شود. با وجود اینکه اصطکاک در شلیک هر پرتابه وجود ندارد، اما ثابت شارژ و دشارژ هر کویل، گرمای اتلافی زیادی را تولید می‌کند. برای جلوگیری از افت عملکرد و یا صدمات بزرگتر همچون ذوب شدن، یک سیستم خنک کننده مورد نیاز است. حتی اگر منبع تغذیه به اندازه کافی کوچک باشد، باز هم در ابعاد کوله پشتی کوچک هم یک سیستم خنک کننده مورد نیاز است تا ساخت این‌گونه تفنگ‌ها عملیاتی شود.

## ۲-۲-۲-۵) تفنگ کویلی با آتش سریع (VRF)<sup>۲</sup>

همانطور که در گذشته مطرح شد، یکی از موانع اصلی پژوهشگران جهت امکان‌پذیر کردن ساخت سیستم تفنگ کویلی‌های VRF، طراحی سیستم سویچینگ بسیار سریع کویل‌های شتاب دهنده

---

1. Man-Portable Coilguns

2. Cam

3. Very Rapid Fire Coilguns

می‌باشد. به تدریج، مورد انتظار است که این مسئله به طور کامل حل شود و سوییچینگ به نقطه‌ای برسد که کمترین زمان ممکن را در برگیرد. پرتابه هرچه سریعتر تغذیه شود، سریعتر شلیک می‌شود. با ترکیب این سیستم با سیستم تغذیه مهمات با سرعت بالا، می‌توان تفنگی خودکار و ویرانگر را طراحی کرد. اما این تفنگ ویرانگر اشکالات و موانع زیادی دارد. اولین و عمده‌ترین مانع، بحث تغذیه مورد نیاز آن است که نیازمند یک منبع بسیار نیرومند می‌باشد تا با بیشترین سرعت و نیرو شلیک کند. به دلیل احتیاج به تخلیه گازهای اتلافی EPG، سرعت اسلحه کم می‌شود. بنابراین آرایشی از باتری‌های چرخ‌های طیار پیشرفته و یا منبع با فناوری بالاتر مانند باتری‌های ابر رسانا می‌توان به جای آن استفاده کرد. اسلحه همچنین گرمای به شدت زیادی به هنگام شلیک تولید می‌کند که از جریان کویل‌ها و هوای بیش از حد گرم شده درون لوله نشأت می‌گیرد. بنابراین، در اینگونه تفنگ‌ها سیستم برودتی برای خنک سازی لوله لازم است. زیرا بدون آن، سیستم پس از اولین شلیک پیوسته و رگباری، ذوب می‌شود. نیروی پس زنی نیز همچنان یک مسئله بزرگ است. حدود هزار شلیک بر دقیقه حتی برای یک گلوله سوزنی شکل کوچک، نیروی پس زنی عظیمی تولید می‌کند. همچنین مسئله تغذیه مهمات و گنجایش آن مطرح است. تمامی موارد فوق مانع از این شدند که تفنگ کویلی‌های VRF قابل حمل، عملیاتی شوند. اگرچه به عنوان قابل حمل بر روی یک وسیله بسیار ایده‌آل می‌باشند.

## ۲-۲-۳) انواع تفنگ‌های کویلی

تفنگ‌های کویلی به طور کلی و از نقطه نظر نیروی وارده به پرتابه، به دو نوع القایی<sup>۱</sup> (نیروی دفعی) و رلوکتانسی<sup>۲</sup> (نیروی جذبی) تقسیم می‌شوند. تفنگ‌های کویلی القایی و تفنگ‌های کویلی رلوکتانسی از مهمترین و پرکاربردترین و مشهورترین مدل‌های تفنگ‌های کویلی می‌باشند. اما در برخی مقالات،

---

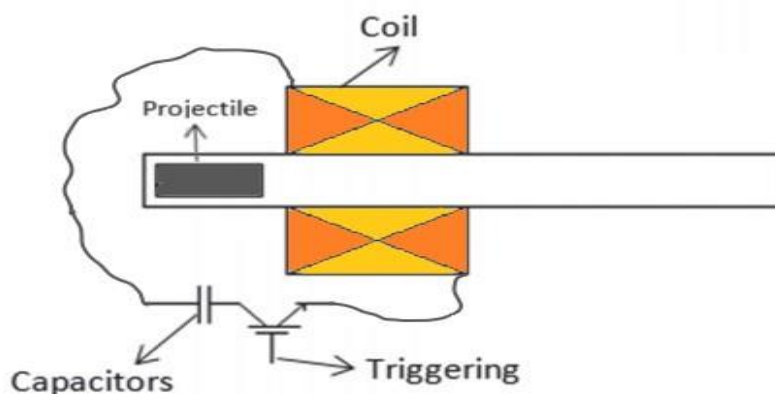
1. Induction Coilgun  
2. Reluctance Coilgun



پژوهش‌ها و کتب، گونه‌های دیگری از تفنگ‌های کویلی نیز معرفی شده است. هرچند به طور کلی می‌توان آن‌ها را زیر مجموعه‌ای از دو مدل مشهور تفنگ‌های کویلی القایی و تفنگ‌های کویلی رلوکتانسی دانست، اما به لحاظ وجود تفاوت در ساختار بخش ساکن و متحرک (پرتابه)، می‌توان آن‌ها را به دسته‌های اتصال مجدد<sup>۱</sup> و تامسون<sup>۲</sup> نیز تقسیم نمود. در ادامه، به تفصیل، به توضیح هریک خواهیم پرداخت.

## ۲-۳-۱) تفنگ‌های کویلی رلوکتانسی

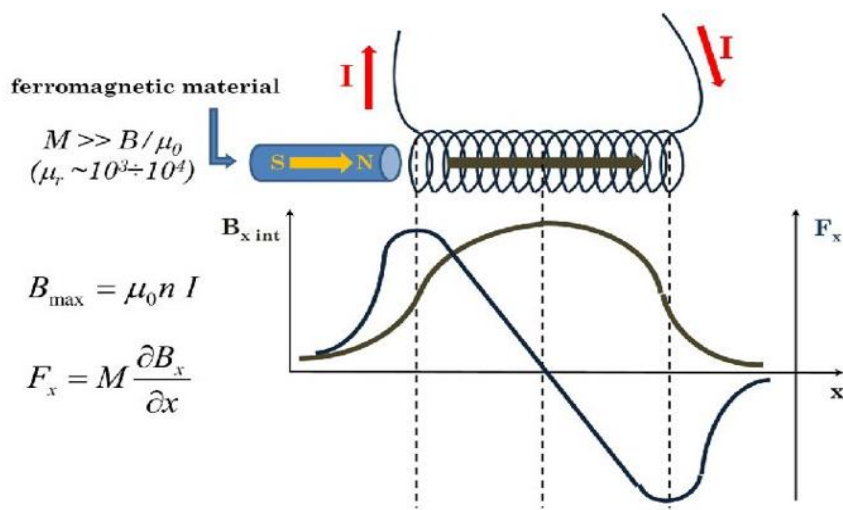
همانگونه که در شکل (۷-۲) نشان داده شده است، یک پرتاب کننده رلوکتانسی ساده شامل لوله، کوئل و یک هسته ساده استوانه‌ای شکل از جنس ماده فرومغناطیس می‌باشد. هنگامی که جریان وارد کوئل می‌شود، یک میدان مغناطیسی در اطراف هسته شکل می‌گیرد. اگر یک هسته از جنس ماده فرومغناطیس درون لوله و نزدیک کوئل وجود داشته باشد، به دلیل اینکه نفوذ پذیری هسته خیلی بیشتر از هوای اطراف آن است، شار مغناطیسی تلاش می‌کند مسیر خود را از طریق هسته ببندد. برای کاهش رلوکتانس مسیر، شار مغناطیسی نیرویی به هسته وارد می‌کند، بطوریکه هسته را به سمت کوئل و تا مرکز کوئل جذب می‌کند [۲۰].



1. Reconnection Coilgun
2. Thomson Coilgun

شکل (۷-۲): نمایی شماتیک از یک پرتاب‌کننده رلوکتانسی ساده

اصول کار پرتاب‌کننده‌های رلوکتانسی به این صورت است که هسته فرومغناطیس درون لوله، به سمت مرکز کوئل که به دور لوله پیچیده شده است، جذب می‌شود. دقت شود که هسته دفع نمی‌شود. وقتی مرکز هسته به مرکز کوئل برسد، انرژی کوئل باید قطع شود و انرژی درون آن باید در کوتاهترین زمان ممکن میرا شود. شکل (۸-۲) نمودار چگالی شار مغناطیسی و نیروی وارد شده به پرتابه در طول مسیر عبور از کوئل را نشان می‌دهد. طبق نمودار شکل (۸-۲) کاملاً مشخص است که مقدار چگالی شار مغناطیسی در وسط کوئل، بیشترین مقدار خود را دارد ولی مقدار نیروی وارد شده بر پرتابه صفر است. با در نظر گرفتن این موضوع می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت ثابت ماندن و قطع نشدن جریان کوئل، پرتابه دچار نوسان سرعت و شتاب شده و در وسط سیم‌پیچی متوقف خواهد شد. و یا می‌توان گفت در صورت عدم قطع به موقع جریان سیم‌پیچی، از سرعت پرتابه کاسته خواهد شد. در نتیجه برای جلوگیری از کاهش سرعت گلوله و حتی توقف آن، باید درست در لحظه رسیدن مرکز گلوله به مرکز سیم‌پیچی، جریان قطع شود. بنابراین وجود سنسوری که زمان رسیدن هسته به مرکز کوئل را مشاهده کند، ضروری است [۲۱].



شکل (۲-۸): نمودار چگالی شار مغناطیسی و نیروی وارد شده به پرتابه در طول مسیر عبور از کویل [۲۲]

اگر پرتاب کننده رلوکتانسی بیشتر از یک کویل داشته باشد و به اصطلاح چند مرحله‌ای باشد، هر کدام از کویل‌ها مطابق اصولی که ذکر شد، هسته را به سمت خود جذب می‌کنند. در اینجا ذکر یک نکته از اهمیت خاصی برخوردار است: هنگامی که هسته به سمت کویل بعدی حرکت می‌کند، به آن کویل باید انرژی داده شود و هنگامی که مرکز هسته به مرکز کویل رسید، باید انرژی آن قطع شود و در کوتاهترین زمان ممکن میرا شود. راندمان پرتاب کننده‌های رلوکتانسی به زمان بندی قطع و وصل جریان در کویل‌ها و زمان میرا شدن انرژی در آن‌ها بستگی دارد. زمان بندی اعمال و قطع انرژی را می‌توان به وسیله قراردادن یک جفت دریافت کننده - فرستنده نوری در ابتدای هر کویل، محاسبه کرد [۲۱].

برای سویچ زنی انرژی اعمال شده به کویل‌ها، می‌توان از ادوات نیمه هادی‌های قدرتی که توانایی تحمل ولتاژ و یا جریان‌های بالا را دارند، استفاده کرد. این ادوات باید از المان‌های مداری مانند تریتورها، ترانزیستورهای قدرت، IGBTها و MOSFETها انتخاب گردند. همه این المان‌های مداری دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. پرکاربردترین و بهترین گزینه برای عمل سویچ زنی در پرتاب کننده‌های رلوکتانسی IGBTها و MOSFETها هستند. همچنین سویچ‌های قدرت باید به هنگام هدایت و قطع، در برابر آسیب دیدن محافظت شوند. برای این منظور از مدار اسنابر استفاده می‌شود.

می‌توان به صورت کلی موتورهای الکتریکی، بخصوص موتورهای الکتریکی خطی را با راندمان بالا ساخت. اما هنگامی که به عنوان یک موتور شتاب دهنده استفاده شوند، دستیابی به راندمان بالا سخت‌تر می‌شود. دلیل این موضوع این است که تلفات انرژی در کویل‌ها با مدت زمان شارش جریان در کویل‌ها متناسب است [۲۰]. سطح مقطع پرتاب کننده‌های رلوکتانسی باید به اندازه کافی بزرگ باشد که مانع از افزایش بیش از حد دما در کویل‌ها بطوریکه فراتر از محدوده عایق سیم‌ها باشد، و در نتیجه تلفات اهمی شود. پس اینطور می‌توان نتیجه گرفت که سطح مقطع بزرگتر تلفات اهمی را کاهش می‌دهد [۲۰].

اگرچه سطح مقطع بزرگتر سیم، به نوبه خود مشکلاتی را در عملکرد تفنگ ایجاد می‌کند که در فصل بعدی مفصلاً به آن خواهیم پرداخت. بنابراین تعاملی باید برقرار شود که با استفاده از بهینه‌ترین سائز سیم، به عملکرد دلخواه برسیم.

در سال‌های اخیر مطالعات و پژوهش‌های فراوانی در زمینه تفنگ‌های کوپلی رلوکتانسی صورت پذیرفته است. آقای بوفنگ ژو<sup>۱</sup> و همکاران خود ضمن ارائه روابط تحلیلی جهت محاسبه نیروی وارد بر پرتابه و اندوکتانس کوپل، در زمینه امکان سنجی عملکرد تفنگ کوپلی رلوکتانسی با استفاده از ژنراتورهای جبران شار فعالیت‌هایی داشتند [۲۳]. همانگونه که پیشتر بیان شد، ژنراتورهای جبران شار، ژنراتورهایی در ابعاد کوچک و فشرده هستند که به دلیل چگالی ذخیره انرژی بسیار زیاد و همچنین چگالی توان خروجی بسیار بالا، جهت کاربرد در تفنگ‌های کوپلی رلوکتانسی بسیار مناسب می‌باشند [۲۳]. توپولوژی ژنراتورهای جبران شار استفاده شده در این مقاله شامل دو جفت قطب مغناطیسی اصلی و سیم‌پیچ آرمیچر توزیع شده متعامد دو فاز می‌باشد. در نتیجه سیکل الکتریکی دو برابر سیکل مکانیکی بوده و سیگنال‌های ولتاژ دو فاز دارای ۹۰ درجه اختلاف می‌باشند. کل مجموعه منبع تغذیه این سیستم به پنج زیر مجموعه نسبتاً مستقل سیستم‌های بلبرینگ مغناطیسی، آلترناتور پالس (بدنه اصلی)، سیستم درایو موتور و سیستم کنترل دشارژ تقسیم می‌شود. پس از ارائه روابط تحلیلی در این مقاله، آقای بوفنگ ژو و همکاران خود به شبیه‌سازی مدل طراحی شده خود با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود پرداخته و در نهایت در یک آزمایش عملی موفق توانستند پرتابه‌ای به جرم ۳۰۰ گرم را تا سرعت بالایی شتاب دهند [۲۳].

آقای جورج ل. و همکاران خود در زمینه تأثیر مکان اولیه پرتابه بر سرعت خروجی، مطالعاتی انجام داده و با جابجایی مکان اولیه پرتابه نقطه بهینه را بدست آوردند [۲۴]. گلوله فولادی ۴۴ گرمی مورد استفاده در این مقاله تحت پنج شرایط مختلف ولتاژی ۶۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ ولت جهت یافتن مکان اولیه بهینه مورد آزمایش واقع شد. همچنین در این مقاله ضمن ارائه رابطه‌ای جهت بدست آوردن سرعت خروجی سیستم، عنوان شد که استفاده گلوله‌های تو خالی به دلیل کمتر شدن مقاومت هوا در طول مسیر حرکت، دارای راندمان بالاتری نسبت به گلوله‌های توپر می‌باشند. با قرار دادن گلوله در مکان‌های اولیه متفاوت و ثبت نتایج، این حقیقت دریافت شد که هرچه گلوله به لبه کوئل نزدیک‌تر باشد، سرعت خروجی بیشتر خواهد بود. هرچه مکان اولیه در نقاطی دورتر از لبه کوئل به سمت خارج کوئل و یا نقاطی درون کوئل به سمت مرکز کوئل قرار داشته باشند، از سرعت پرتابه کاسته خواهد شد. همچنین از دیگر نتایج قابل پیش‌بینی بدست آمده در نتایج عملی این تست‌ها، افزایش سرعت خروجی پرتابه با افزایش ولتاژ سیستم و بالعکس می‌باشد. اما افزایش ولتاژ از مقداری به بعد به دلیل افزایش تلفات مقاومتی ( $V^2 / R$ ) سبب کاهش راندمان سیستم خواهد شد [۲۴].

هانگجون ژیانگ<sup>۲</sup> به همراه همکاران خود پس از طراحی یک تفنگ کوئلی رلوکتانسی، به بررسی تأثیر ساختارهای مختلف پرتابه بر راندمان و سرعت خروجی سیستم پرداختند و نتایج عملی کار خود را در [۲۵] منتشر نمودند. در این مقاله پس معرفی تفنگ کوئلی رلوکتانسی و بررسی تئوری‌ها و روابط حاکم بر این تفنگ، با استفاده از یک تفنگ کوئلی رلوکتانسی ۵ مرحله‌ای، به بررسی تأثیر سه گلوله با سه ساختار متفاوت بر سرعت خروجی سیستم پرداخت. گلوله‌ها به سه صورت استوانه‌ای شکل، استوانه‌ای شکل به همراه شکاف‌هایی در سطح جانبی و استوانه‌ای شکل به همراه پره طراحی شدند. جرم هر گلوله به طور میانگین برابر ۸ گرم بوده است. نتایج حاصل از آزمایش نمونه عملی تفنگ طراحی شده بیانگر این

---

2. Jorge Luis Rivas-Camacho

1. Hongjun Xiang

واقعیت بود که بیشترین راندمان را گلوله استوانه‌ای شکل به همراه شکاف با ۲/۸۷٪ داشت. وجود شکاف بر روی سطح جانبی گلوله، می‌تواند باعث تضعیف و یا حتی از بین رفتن جریان گردابی شود و همین مسئله موجب افزایش راندمان تفنگ کویلی رلوکتانسی شده است [۲۵].



شکل (۹-۲): گلوله استوانه‌ای به همراه شکاف در سطح جانبی [۲۵]

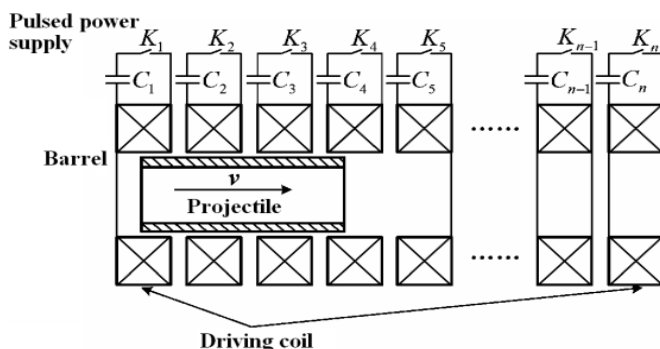
نمونه‌ای از یک تفنگ کویلی سه مرحله‌ای در [۲۱] طراحی و تأثیر طول و جنس پرتابه بر عملکرد تفنگ بررسی شد. در این مقاله، پس از معرفی ابعاد کامل تمامی اجزای تفنگ به همراه مشخصات منابع تغذیه و بانک خازنی و همچنین جنس و مدل قطعات به کار برده شده، با استفاده از سه گلوله با طول‌های ۵، ۷ و ۹ سانتی‌متر، هریک در دو مدل جنس ماده متفاوت، تأثیر طول و جنس پرتابه بر سرعت خروجی سیستم را بررسی نمود. لازم به ذکر است طول کوئل تفنگ مورد استفاده در این مقاله برابر ۷ سانتی‌متر بوده است. نتایج حاصل از تست عملی تفنگ بیانگر این موضوع بود که گلوله با طول ۷ سانتی‌متر با سرعت ۱۶/۲۷ متر بر ثانیه با ماده‌ای که دارای ضریب نفوذپذیری بالاتری بود، بیشترین سرعت خروجی را داشت [۲۱]. زمانی که از یک ماده با نفوذپذیری مغناطیسی بالاتر استفاده شود، مقاومت در برابر میدان مغناطیسی پایین‌تر است و شار راحت‌تر به حرکت درمی‌آید. همچنین، نیروی وارد بر گلوله افزایش خواهد

یافت. همچنین در این مقاله از افزایش راندمان تفنگ کویلی چند مرحله‌ای نسبت به تک مرحله‌ای صحبت شد.

جامع‌ترین و در حال حاضر کامل‌ترین مدل تحلیلی تفنگ کویلی رلوکتانسی توسط آقای و. اسلید<sup>[۲۶]</sup> به همراه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج عملی ارائه گردید. در این مقاله با ارائه یک سری فرضیات جهت ساده سازی، روابط ریاضی حاکم بر تفنگ کویلی را با استفاده از روابط مرسوم، ارائه شد. جزئیات این مدل و فرضیات در نظر گرفته شده، در فصل سوم به طور کامل توضیح داده می‌شود.

## ۲-۳-۲) تفنگ‌های کویلی القایی

تفنگ‌های کویلی القایی شامل منبع تغذیه، سیستم کنترل تغذیه کویل‌ها و پرتابه‌ای که توسط پوششی رسانا احاطه شده است، می‌باشد. کویل‌درایوها طبق توالی زمانی مشخص انرژی دهی شده، بنابراین موج رونده الکترومغناطیسی تولید می‌شود که با مجموعه جریان‌های القا شده بر روی پرتابه، دارای برهم کنش است [۲۷]. نمایی از شماتیک تفنگ کویلی القایی سنکرون چند مرحله‌ای در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است. در طراحی تفنگ‌های کویلی القایی، طراحی کویل درایوها مهم‌ترین قسمت است زیرا مستقیماً بر بازده تبدیل انرژی تأثیرگذار است [۲۸].



شکل (۱۰-۲): شماتیک تفنگ کویلی القایی (سنکرون) چند مرحله‌ای [۲۸]

قاعده عملکرد تفنگ کوپلی القایی (سنکرون) تا حدودی مشابه موتورهای خطی است. زمانی که آرمیچر (پرتابه) به موقعیت مکانی مناسب می‌رسد، کوپل‌درايوها به وسیله جریان انرژی دهی شده، و یک حلقه جریان بر روی آرمیچر القا می‌شود. نیروی مغناطیسی میان کوپل‌درايوها و آرمیچر، آرمیچر را به سمت دهانه لوله دفع می‌کند. نیروی وارد شده به پرتابه را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$F = i_d i_p \frac{dM}{dz} \quad (1-2)$$

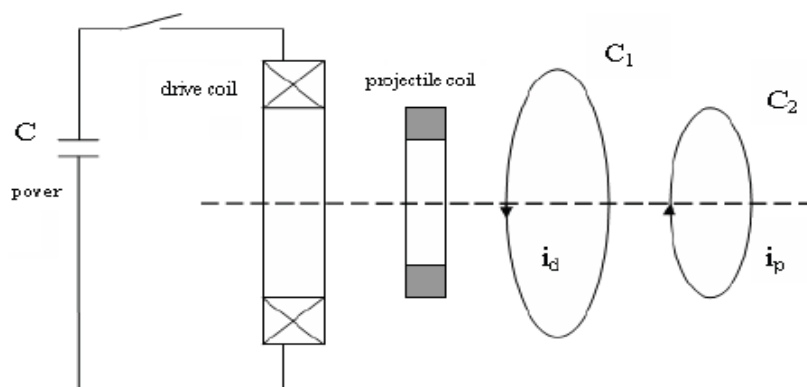
$i_d$  جریان کوپل،  $i_p$  جریان آرمیچر،  $M$  اندوکتانس متقابل بین کوپل و آرمیچر و  $z$  جابجایی بین کوپل و آرمیچر می‌باشد. معادله (۱-۲) نشان می‌دهد که نیرو با جریان کوپل، جریان آرمیچر و گرادیان اندوکتانس متقابل بین این دو متناسب است. شکل (۱-۱۲) نمایی ساده از نحوه عملکرد یک تفنگ کوپلی القایی را نشان می‌دهد. جریان کوپل می‌تواند با توجه به توپولوژی مدار مثبت باشد. گرادیان اندوکتانس زمانی مثبت است که مرکز آرمیچر از مرکز کوپل عبور کرده باشد. بنابراین جهت شارش جریان القایی، جهت نیرو را تعیین می‌نماید [۲۹].

تفنگ کوپلی القایی را می‌توان به دو دسته آسنکرون<sup>۱</sup> و سنکرون<sup>۲</sup> تقسیم نمود. در دسته اول، کوپل درايوها به صورت سری یا موازی به یکدیگر متصل شده و همانند ماشین‌های معمولی، چند فاز محدود به وجود می‌آورند و با توالی زمانی مشخصی انرژی دهی می‌شوند. حرکت نسبی بین پرتابه و موج رونده بر روی پرتابه، جریان القا می‌کند و سرعت پرتابه کمتر از موج رونده می‌باشد. موج رونده یک بسته موج با طول محدود و میرایی در طول زمان است که هارمونیک‌های فضایی و زمانی تولید می‌کند. میرایی کاملاً وابسته به کوپل بین لوله و پرتابه و ثابت زمانی آنهاست [۲۷].

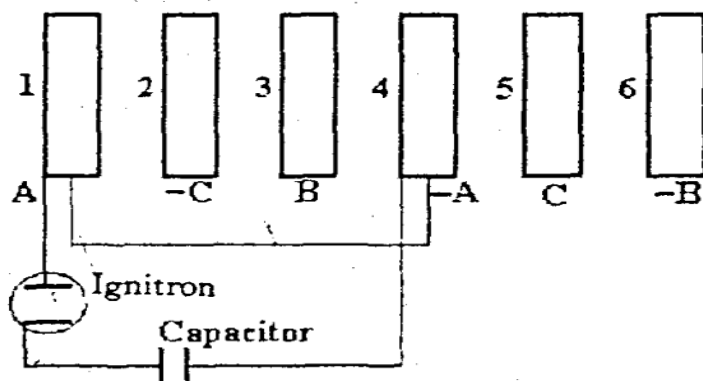
---

1. Asynchronous  
2. Synchronous





شکل (۲-۱۱): نمایی ساده از نحوه عملکرد یک تفنگ کویلی القایی [۲۹]



شکل (۲-۱۲): دیاگرام تفنگ کویلی القایی (آسنکرون) چند مرحله‌ای [۳۰]

در دسته دوم، کویل درایوها به صورت مجزا و هریک به نوبت انرژی‌دهی می‌شوند تا نیروی ضربه‌ای برای شتاب دادن به پرتابه فراهم شود (شکل ۲-۱۰). زمان‌بندی قطع و وصل سوییچ‌ها باید با مکان پرتابه در لوله پرتاب، هماهنگ شود. در این نوع تفنگ کویلی القایی، سرعت پرتابه دقیقاً برابر با موج رونده مغناطیسی است [۲۸].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تفاوت‌ها و شباهت‌های بسیاری در کارایی و عملکرد میان این دو نوع وجود دارد. نوسانات شتاب در هر دو بزرگ است. در تفنگ کویلی القایی آسنکرون، زمان گذر بین مراحل

متوالی، طولانی‌تر از عرض پیک موج تخلیه خازن می‌باشد. بنابراین، انتقال بین دو مرحله به درستی صورت نمی‌پذیرد. در حالی که در یک تفنگ کوپلی القایی سنکرون، فقط یک پیک شتاب در هر مرحله وجود دارد و می‌توان آن را در مواردی که تعداد زیادی کوپل با فاصله‌های بسیار نزدیک هم وجود دارند، استفاده کرد. بطوری که موج‌های شتاب هم‌پوشانی خواهند داشت [۲۴]. توزیع جریان القایی در آرمیچر (پرتابه) یک تفنگ کوپلی القایی آسنکرون بهتر از نوع سنکرون می‌باشد. در یک تفنگ کوپلی القایی آسنکرون، نسبت ماکزیمم به مینیمم پیک جریان حلقه آرمیچر بسیار کمتر از نوع سنکرون آن می‌باشد. این واقعیت بنا به دلایل ساختاری حائز اهمیت می‌باشد. نیروی شعاعی بر روی آرمیچر با جریان القایی روی آن متناسب است. در تفنگ‌های سنکرون، جریان در قسمت انتهایی آرمیچر متمرکز می‌شود. به همین خاطر، نیروی شعاعی در آن قسمت بسیار زیاد می‌باشد که برای استقامت مکانیکی تفنگ یک تهدید به شمار می‌آید [۲۸]. همچنین نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که راندمان (نسبت انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی ورودی)، در مدل سنکرون بیشتر از مدل آسنکرون می‌باشد [۲۸].

یک کوپل ایده‌آل باید ضخامت شعاعی کم و طول محوری کوتاه داشته باشد. شعاع کم موجب ماکزیمم شدن کوپل مغناطیسی بین کوپل و گلوله می‌شود. طول محوری کوتاه نیز موجب مینیمم شدن نیروی شعاعی روی آرمیچر می‌شود [۳۰]. همچنین باید توجه نمود که پرتابه تاثیر بسزایی بر روی عملکرد تفنگ کوپلی القایی دارد. معمولاً گلوله برنجی به دلیل سادگی آن در طراحی و تجزیه تحلیل، در بیشتر موارد، برای آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. گلوله فقط تحت تاثیر نیروی محوری شتاب نمی‌گیرد بلکه باید نیروی شعاعی را نیز بر روی آن برای محاسبه شتاب اعمال نمود. بنابراین از مواد پرکننده عایقی برای ساپورت مواد رسانا استفاده می‌گردد. گلوله سلنوییدی از پیچیدن سیم به دور یک لوله PVC ساخته می‌شود. انتهای این سیم‌ها را نیز در وسط خط به یکدیگر اتصال کوتاه می‌کنند. با مقایسه این دو نوع از گلوله برای یک تفنگ کوپلی القایی می‌توان گفت که گلوله سلنوییدی عملکرد بهتری در مقایسه با گلوله

برنجی دارد. توزیع جریان گردابی در گلوله برنجی یکدست نبوده، اثر پوستی نیز منجر به تولید گرمای بیش از حد شده و کاهش راندمان را نتیجه می‌دهد. گلوله سلنوییدی تا حد زیادی پیک چگالی جریان را کاهش می‌دهد، که می‌تواند موجب کاهش گرمایی اهمیت و در نتیجه عملکرد بهتر آن گردد. اما از طرفی ساخت گلوله سلنوییدی سخت‌تر از گلوله برنجی می‌باشد [۳۰].

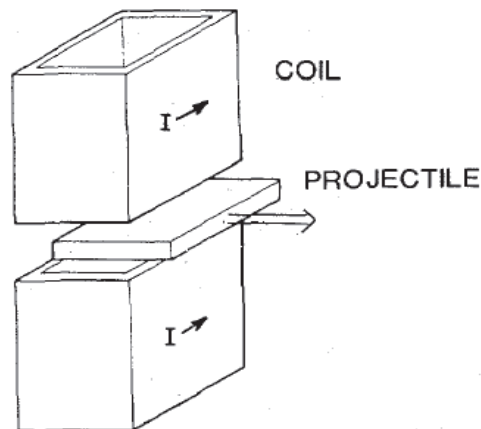
پس از جنگ جهانی دوم و بخصوص در سال‌های اخیر، لابرتوار بین المللی سانیدا<sup>۱</sup> آزمایش‌های عملی بسیاری بر روی تفنگ‌های کویلی القایی انجام داد و موفقیت‌های بسیاری در این زمینه کسب نمود که از میان آن‌ها می‌توان به یک نمونه تفنگ کویلی اشاره نمود که پرتابه تا جرم ۵ کیلوگرم را می‌توانست تا سرعت ۱ کیلومتر بر ثانیه شتاب دهد [۳۰]. سایر فعالیت‌های این کمپانی در مرجع [۳۱] نیز آورده شده است. آقای تائو ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران خود در مرجع [۳۰] موفق به ساخت یک نمونه تفنگ کویلی ۴ مرحله‌ای شدند که قادر بود پرتابه‌ای به جرم ۰٫۶۵ کیلوگرم را از حالت سکون تا سرعت ۱۲۵ متر بر ثانیه شتاب دهد. همچنین فعالیت دیگری از ایشان در ساخت یک نمونه تفنگ کویلی ۱۵ مرحله‌ای در مرجع [۳۲] بیان شده است. کار بر روی ساختار نامتقارن سیم‌پیچی تفنگ کویلی به منظور دستیابی به راندمان و سرعت بالاتر در مرجع [۳۳] آورده شده است. در مرجع [۲۷] معادلات سیستم و روش‌های طراحی و تحلیل تفنگ کویلی بیان شده است.

## **۲-۲-۳-۳) تفنگ‌های کویلی اتصال مجدد**

یکی دیگر از انواع تفنگ‌های کویلی، تفنگ کویلی اتصال مجدد می‌باشد. نمایی از یک تفنگ کویلی تک مرحله‌ای در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است.

---

1. Sanida National Laboratories  
2. Tao Zhang

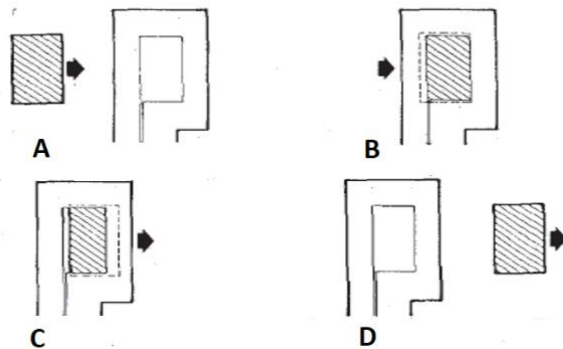


شکل (۲-۱۳): نمایی از یک کوپل‌گان تک مرحله‌ای اتصال مجدد [۳۴]

همانطور که در شکل (۲-۱۳) ملاحظه می‌گردد، این تفنگ کوپلی شامل دو کوپل موازی مستطیلی شکل می‌باشد که توسط یک فاصله هوایی نسبتاً کوچک از یکدیگر جدا شده‌اند. پرتابه نیز یک صفحه مستطیلی شکل است که مسیر عبور آن عمود بر محور کوپل‌ها می‌باشد. روند شتاب‌گیری نتیجه اتصال مجدد میدان مغناطیسی در زمان عبور پرتابه از فاصله هوایی است که در پشت پرتابه اتفاق می‌افتد [۳۴].

مراحل عملکرد این نوع از تفنگ کوپلی را می‌توان با استفاده از شکل (۲-۱۴) توضیح داد. به هیچ‌کدام از کوپل‌ها تا زمانی که گلوله به آن نزدیک نشود، جریان داده نمی‌شود (حالت A). زمانی که لبه جلویی پرتابه از سمت پایین سیم‌پیچ عبور نماید، کوپلینگ بین کوپل‌ها ماکزیمم شده و جریان در کوپل‌ها شروع به افزایش می‌کند (حالت B). از آنجا که طول پرتابه درازتر از قطر داخلی کوپل‌ها می‌باشد، کوپلینگ ماکزیمم برای چند دوره حفظ می‌شود. در طول مدت کوپلینگ ماکزیمم و ثابت، جریان به بیشترین مقدار خود می‌رسد. زمانی که لبه پشتی پرتابه، به تدریج از فاصله هوایی عبور می‌کند (حالت C)، خطوط شار

مغناطیسی دو کویل در پشت گلوله به هم متصل می‌شوند [۳۴]. خطوط شاری که مجدداً متصل شده‌اند، با آزاد سازی نیروی خود، باعث به جلو رانده شدن گلوله می‌شوند.



شکل (۲-۱۴): مراحل عملکرد یک تفنگ کویلی اتصال مجدد [۳۴]

## ۲-۳-۲-۴) تفنگ‌های کویلی تامسون

تفنگ‌های کویلی تامسون نوع دیگری از تفنگ‌های کویلی بر پایه طرحی قدیمی و اختراعی از آقای تامسون در زمینه جریان‌های متناوب و فرکانس بالا است که به حلقه جهنده تامسون معروف است. معمولاً این وسیله برای نشان دادن شناوری مغناطیسی در حالت ماندگار استفاده می‌شد. اگرچه در حالت گذرا، این وسیله قادر به پرتاب حلقه‌های آلومینیومی در بازه چند متر است [۳۵].

تئوری این وسیله بر پایه دو قانون اساسی است: ۱- قانون القای فارادی. ۲- قانون نیروی لورنتز [۳۵].

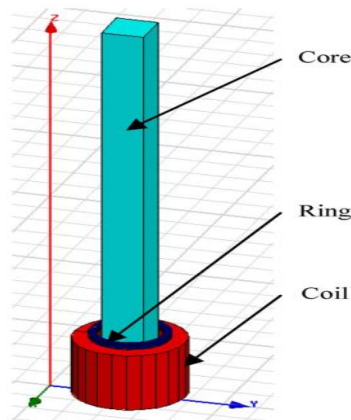
قانون القای فارادی بیان می‌کند که نیروی محرکه القایی (EMF) در یک حلقه بسته جریان، با منفی نرخ تغییرات شار مغناطیسی در طول مسیر حلقه متناسب است:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-2)$$

نیروی مؤثر برای شتابدهی حلقه، نیروی لورنتز می‌باشد:

$$F = I \int d\vec{l} \times \vec{B} \quad (۳-۲)$$

به طوریکه  $I$  جریان القا شده در حلقه و  $B$  چگالی شار میدان مغناطیسی که توسط کویل تولید شده است، می‌باشد. در مقاله‌ای که توسط آقای لورین ژرمن در مرجع [۳۵] ارائه شد، با معرفی ساختار جدید تحت عنوان E شکل، موفق به بهبود عملکرد و سرعت خروجی این مدل از پرتاب‌کننده‌ها شد.



شکل (۲-۱۵): نمای شبیه‌سازی شده تفنگ کوپلی تامسون [۳۵]

## ۲-۳) مشخصات برخی از سلاح‌های معمول امروزی

جهت درک بیشتر و انجام مقایسه راحت‌تر اعداد و ارقام داده شده در بخش‌های گذشته با سلاح‌های

متداول امروزی، مشخصات برخی از شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین سلاح‌های امروزی در جدول ۲-۱

به طور خلاصه گردآوری شده است:

جدول (۱-۲): مشخصات برخی از سلاح‌های معمول امروزی

| توپ ۳۵ میلیمتری سواوت | توپ ۲۰ میلیمتری دریایی | کلت کمری<br>SIG Sauer P226 | مسلح برتا | یوزی | مسلح MP 5   | G 3       | M 16      | AK 47 (کلاشنیکف) | نام اسلحه<br>مشخصات اسلحه |
|-----------------------|------------------------|----------------------------|-----------|------|-------------|-----------|-----------|------------------|---------------------------|
| ۱۱۷۵                  | ۸۵۰                    | ۳۵۰                        | ۳۸۰       | ۴۲۰  | ۴۰۰         | ۷۸۰       | ۹۹۰       | ۷۱۰              | سرعت دهانه لوله<br>m/s    |
| ۲۲۸×۳۵                | *                      | ۹×۱۹                       | ۹×۱۹      | ۹×۱۹ | ۹×۱۹        | ۷/۶۲×۵۱   | ۵/۵۶×۴۵   | ۷/۶۲×۳۹          | ابعاد فشنگ mm             |
| ۱۵۶۵                  | *                      | ۱۳۵                        | ۱۳۵       | ۱۳۵  | ۱۳۵         | ۲۲۰       | ۵۵        | ۱۲۲              | وزن فشنگ gr               |
| ۶۸۰۰                  | *                      | ۰/۸۷ - ۱/۱                 | ۳/۸       | ۳/۵  | ۲ - ۳/۱     | ۴/۵       | ۳/۲۶      | ۳/۱              | وزن اسلحه Kg              |
| ۷۸۰                   | *                      | ۱۹/۶                       | ۶۶        | ۶۴   | ۳۲/۵ - ۷۲   | ۱۲۴       | ۱۰۰       | ۸۷               | طول اسلحه cm              |
| *                     | *                      | ۱۱/۲                       | ۲۰        | ۲۶   | ۱۱/۵ - ۲۲/۵ | ۴۵        | ۵۱        | ۴۱               | طول لوله cm               |
| ۴                     | ۲                      | ۰/۱                        | ۰/۱ - ۰/۲ | ۰/۲  | ۰/۱ - ۰/۲   | ۰/۴ - ۰/۶ | ۰/۵ - ۰/۸ | ۰/۸ - ۱          | برد مفید km               |
| *                     | ۴۵۰                    | *                          | ۵۵۰       | ۶۰۰  | ۸۰۰         | ۵۰۰-۶۰۰   | ۷۰۰-۹۵۰   | ۶۰۰              | شلیک / دقیقه              |
| *                     | *                      | ۹۰۰                        | ۲۵۰۰      | ۳۰۰  | ۱۹۰۰        | ۵۵۰       | ۶۵۰       | ۷۰۰              | قیمت (دلار)               |





(فصل سوم)

## **روند طراحی و مدلسازی تحلیلی**

جهت طراحی تفنگ کویلی رلوکتانسی باید معیارهایی همچون در دسترس بودن مواد مورد استفاده، هزینه اقتصادی، امکانات موجود آزمایشگاهی همچون تجهیزات سخت‌افزاری، نصب و جداسازی ساده قطعات مورد استفاده در طراحی به علاوه قابلیت یکپارچه‌سازی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد.

جنس، ابعاد، شکل و موقعیت اولیه پرتابه، جنس و ابعاد لوله، پارامترهای طراحی کوئل شامل قطر سیم، تعداد دور و تعداد طبقات کوئل، و همچنین در تفنگ‌های رلوکتانسی چند مرحله‌ای، فاصله بین دو کوئل و فاصله زمانی بین دو آتش متوالی از جمله متغیرهایی هستند که برای طراحی این نوع از تفنگ‌های کویلی باید مورد بررسی قرار گیرند. در ادامه این فصل به بررسی هریک از موارد ذکر شده پرداخته و در آخر فصل مدلسازی و روابط تحلیلی حاکم بر تفنگ کویلی رلوکتانسی بیان خواهد شد.

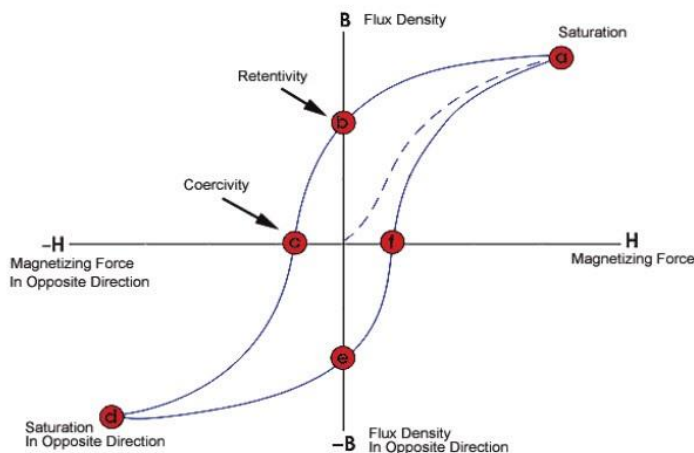
### **۳-۱) طراحی پرتابه**

اولین مرحله طراحی پرتابه تفنگ کویلی رلوکتانسی، انتخاب ماده‌ای مناسب برای پرتابه می‌باشد. همچنین بهترین حالت طراحی یک پرتابه از نظر طولی، نزدیک بودن طول پرتابه به طول کوئل است که راجع به آن صحبت خواهد شد. در ادامه به بررسی برخی از نکات قابل توجه در روند طراحی یک پرتابه تفنگ کویلی رلوکتانسی پرداخته خواهد شد.

### **۳-۱-۱) جنس و خاصیت مغناطیسی پرتابه**

در شکل (۳-۱)، منحنی هیستریزیس یک ماده فرومغناطیس ملاحظه می‌شود. آنچه که برای پرتابه تفنگ کویلی رلوکتانسی مطلوب است، استفاده از ماده‌ای با منحنی هیستریزیس لاغر می‌باشد. بدین معنی که ماده قادر باشد که تحت میدان مغناطیسی اعمالی، به سرعت مغناطیسی و غیرمغناطیسی شود. به عبارتی مواد فرومغناطیس نرم بهترین گزینه برای استفاده در پرتابه می‌باشند. از موادی که چنین

خاصیتی را نداشته باشند، به عنوان مواد مغناطیس دائم استفاده می‌کنند. استفاده از اینگونه مواد در طراحی پرتابه تفنگ کویلی رلوکتانسی مناسب نیست.



شکل (۳-۱): منحنی هیستریزیس یک ماده [۳۶]

مغناطیس زدایی یک شیء، مستلزم میدانی (گاهاً بزرگ) اعمال شده در خلاف جهت است تا حوزه‌های مغناطیسی داخل ماده را مجدداً مرتب سازد. دلایل ذکر شده حاکی از این موضوع است که از هر ماده‌ای با خاصیت مغناطیسی نمی‌توان برای طراحی پرتابه تفنگ کویلی رلوکتانسی استفاده نمود. زیرا ممکن است خاصیت ماده، در روند شتاب‌گیری پرتابه خللی وارد نماید. بنابراین، هیچ شک و بحثی در این مقوله وجود ندارد که در تفنگ کویلی رلوکتانسی، جنس پرتابه باید فرومغناطیس نرم باشد. نیروی اعمال شده بر یک ماده با نفوذپذیری مغناطیسی خود متناسب است. با در نظر گرفتن این مطلب، این حقیقت دریافت می‌شود که نفوذپذیری مغناطیسی نیز یک فاکتور مهم برای انتخاب جنس ماده سازنده پرتابه می‌باشد. آهن و فولاد هر دو دارای نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالایی هستند. بنابراین برای استفاده در تفنگ کویلی رلوکتانسی بسیار مناسب خواهند بود. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود، خاصیت اشباع

مغناطیسی جنس ماده پرتابه است. باید در نظر داشت جنس ماده پرتابه بگونه‌ای باشد که به سرعت وارد ناحیه اشباع نشود. جهت درک بهتر این موضوع، به بخش ۴-۴ رجوع کنید.

### **۳-۱-۲) جرم و چگالی پرتابه**

بر اساس رابطه انرژی جنبشی، هرچه جرم پرتابه کمتر باشد، انرژی کمتری مورد نیاز است تا پرتابه تا سرعت‌های بالاتر، شتاب بگیرد. اما اگر جرم پرتابه و همچنین ابعاد پرتابه خیلی کوچک باشد، به سرعت اشباع می‌شود. اگر جرم پرتابه خیلی زیاد باشد و گلوله سنگین، این امکان وجود دارد که قسمتی از پرتابه مغناطیسی نشود و یا حتی اصلاً پرتابه خاصیت مغناطیسی پیدا نکند. بنابراین پرتابه بگونه‌ای عمل می‌کند که انگار وزن اضافی را با خود حمل می‌کند. آن قسمتی که مغناطیسی شده، قسمت غیرمغناطیسی را با خود می‌کشد تا از حرکت بایستد.

### **۳-۱-۳) ابعاد پرتابه**

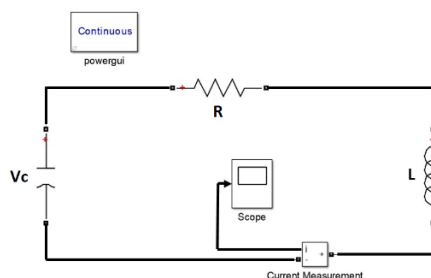
برای بیشینه شدن شار پیوندی، ابعاد پرتابه باید خیلی نزدیک به کوئل باشد. در غیر این صورت انرژی میدان به جای ذخیره شدن در خود پرتابه، در هوای اطراف پرتابه ذخیره می‌شود. همچنین قطر پرتابه باید تا جای ممکن نزدیک به قطر کوئل باشد. نزدیکی زیاد قطرها هم موجب افزایش نیروی اصطکاک می‌شود که منجر به کاهش سرعت پرتابه خواهد شد. با در نظر داشتن یک مورد پایه‌ای جهت حفظ آیرودینامیک پرتابه هنگام شلیک، پرتابه ترجیحاً باید طولی حداقل ۳ برابر قطر آن داشته باشد [۳۶]. باید در نظر داشت، طول پرتابه نباید خیلی بلندتر از طول کوئل باشد. اگر طول پرتابه خیلی بلندتر از طول کوئل باشد، قسمتی از پرتابه هرگز مغناطیسی نمی‌شود و یا پرتابه به سمت کوئل کشیده می‌شود، در حالی که قسمت بزرگی از پرتابه در حال عبور از آن است که در ابتدای این بحث به آن اشاره شد.

### ۳-۱-۴) رسانایی پرتابه

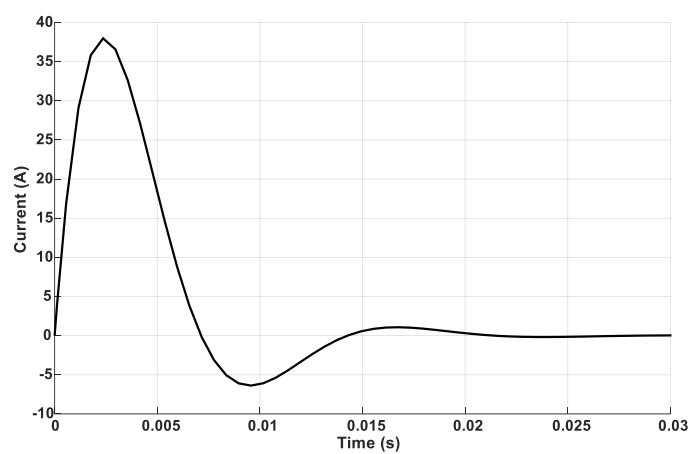
جنس ماده پرتابه نباید رسانا باشد و یا اگر رسانا بود لازم است که تا حد امکان رسانایی بسیار کمی داشته باشد. در مواد رسانا جریان گردابی به وجود می‌آید. این جریان گردابی به وجود آمده، در هنگام شلیک پرتابه، به شکل مقاومت رفتار می‌کند. به بیان دیگر، جریان القا شده بر روی سطح پرتابه میدانی مغناطیسی تولید می‌کند که بنا بر قانون لنز اقدام به مخالفت با میدان مغناطیسی که توسط کویل تولید می‌شود، می‌کند. در نتیجه، قسمتی از انرژی جنبشی صرف تلفات انرژی به صورت گرمایی می‌شود. در پایان به طور خلاصه برخی مواد مناسب تحت ملاحظات فوق به شرح ذیل می‌باشد: آهن نرم، فولاد سیلیکون ورقه ورقه شده، آهن کربنیل، فريت و يا فلز شیشه‌ای.

### ۳-۲) انتخاب خازن

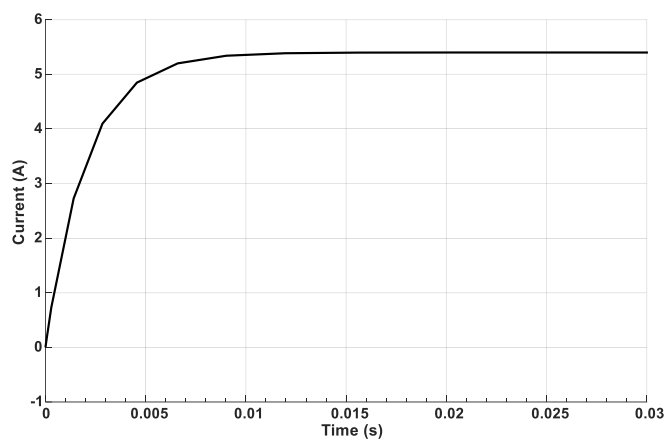
مدار مورد استفاده در سیمولینک و نمودار جریان - زمان چهار مدل خازن متفاوت در شکل‌های (۲-۲) - (۳-۶) به نمایش درآمده است. منطقی است به دلیل رابطه انرژی ( $W = 0.5CV^2$ )، خازنی با ولتاژ بالاتر انتخاب شود. اگرچه ابرخازن شکل (۳-۴) دارای ظرفیت بسیار بالا و مقاومت بسیار پایینی است (سیکل شارژ سریع و ذخیره انرژی طولانی)، اما به دلیل ولتاژ پایین که منجر به محدود شدن جریان خروجی می‌شود، برای این کار مناسب نمی‌باشد.



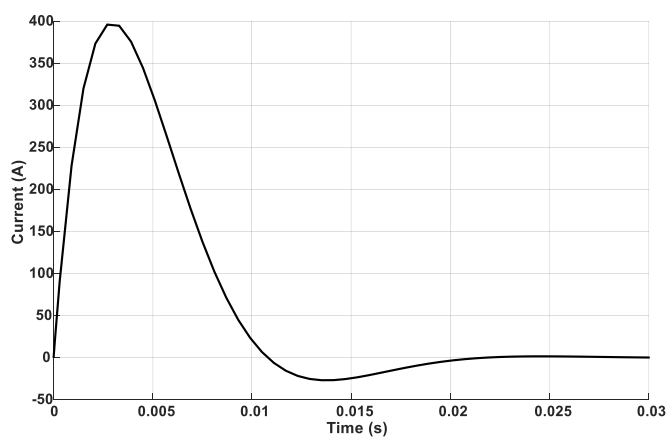
شکل (۳-۲): مدار RLC ساده مورد استفاده در سیمولینک در شرایط  $R = 0.5\Omega$  و  $I(0) = 0$  و  $V_c = V_0$



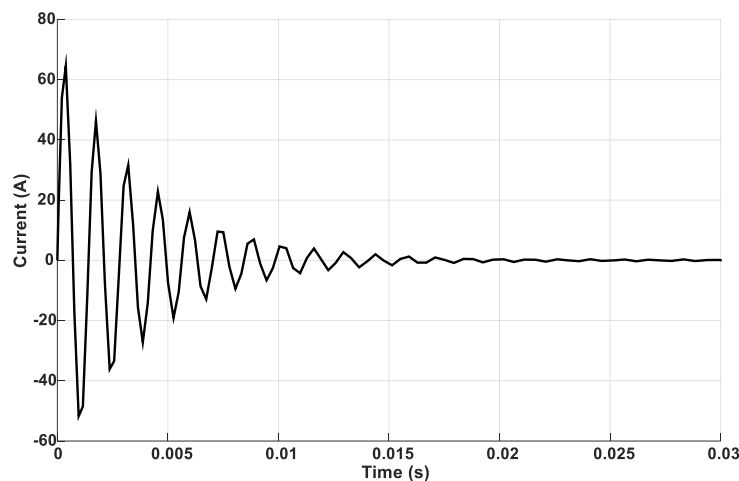
شکل (۳-۳): پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۳۵ ولت و ۳۹۰۰ میکروفاراد



شکل (۴-۳): پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۲/۷ ولت و ۳۰۰۰ فاراد



شکل (۵-۳): پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۳۲۰ ولت و ۶۸۰۰ میکروفاراد



شکل (۳-۶): پاسخ گذرای مدار RLC با خازن ۳۲۰ ولت و ۵۰ میکروفاراد

جریان خازن در شکل (۳-۴) در ۱۰۰۰۰ ثانیه میرا می‌شود. لازم به ذکر است، جریان خروجی ثابت باعث بروز مشکل پدیده مکش<sup>۱</sup> در هر مقداری می‌شود. بنابراین هدف انتخاب منبع، حداکثر بودن جریان با ولتاژ داده شده است. ثابت زمانی  $RC$  و پیک جریان، از طریق تغییرات مؤلفه‌های گسسته و مجزا، قابل اصلاح و تعدیل است. بنابراین مناسب‌تر است که برای این کار در ابتدا اولویت را بر انتخاب خازن‌هایی با ولتاژ بالا بنا نهاده و سپس از خازنی با ظرفیت بالا استفاده شود. همچنین، شارژ و دشارژ سریع خازن بسیار حائز اهمیت است. بنابراین مقاومت درونی پایین خازن برای ولتاژ و ظرفیت خازنی بالا، یکی دیگر از مواردی که باید به آن توجه کرد. خازن‌های الکترولیتی آلومینیمی برای استفاده در تفنگ‌های کوپلی مناسب می‌باشند.

## ۳-۳) انتخاب پارامترهای مختلف کویل

پارامترهای مختلفی جهت طراحی مناسب یک کویل الکترومغناطیسی در تفنگ‌های کویلی دخیل می‌باشند. طول کویل، قطر سیم و تعداد طبقات سیم‌پیچی از جمله پارامترهایی هستند که نقش بسزایی در سرعت خروجی پرتابه و در نتیجه راندمان سیستم دارند. در این قسمت به بیان قواعد کلی انتخاب طول کویل، قطر سیم و تعداد طبقات سیم‌پیچی خواهیم پرداخت. در مورد نحوه تأثیر هریک از پارامترهای ذکر شده در فصل بعدی به تفصیل صحبت خواهد شد.

## ۳-۳-۱) مصالحه در طراحی

همانگونه که قبلاً بیان شد بهتر است طول کویل و طول پرتابه نزدیک به هم باشند. میدان مغناطیسی کویل به طور مستقیم با تعداد دور سیم‌پیچ و جریان متناسب است. استفاده از سیم‌های نازک‌تر این اجازه را خواهد داد تا از تعداد دورهای بیشتری استفاده کنیم که موجب تولید میدان مغناطیسی بیشتر خواهد شد. اما از سوی دیگر، با افزایش تعداد دور سیم‌پیچی، مقاومت آن نیز افزایش می‌یابد که کاهش جریان خروجی را در پی خواهد داشت. علاوه بر آن، با افزایش تعداد دور، اندوکتانس سیم‌پیچی به نسبت مقاومت آن افزایش بیشتری خواهد داشت. بنابراین یک مصالحه در طراحی در این قسمت وجود خواهد داشت. اندوکتانس بزرگ باعث می‌شود هنگامی که سلف نمی‌تواند انرژی ذخیره شده در خود را نگه دارد، یک دامنه ولتاژ پرنوسان و ناخوشایند داشته باشیم [۳۶]. اما از جهتی دیگر، اندوکتانس بزرگ می‌تواند یک میدان مغناطیسی بزرگ را نتیجه دهد. مسئله دیگری که باید به آن توجه کرد این است که سیم باید توانایی تحمل مقدار بسیار زیادی جریان و یا اتلاف نیرو که به صورت گرما ظاهر می‌شود را داشته باشد. به بیان دیگر، سیم باید قادر به تحمل دمای بالایی که در حین عملکرد سیستم در ولتاژ و جریان بالا ظاهر می‌شود، باشد.



### ۳-۳-۲) معادله آندردانک

آقای آی.م. آندردانک<sup>۱</sup> با ارائه معادله‌ای توانست زمانی را که طول می‌کشد تا سیم تحت یک جریان معین ذوب شود، پیش‌بینی کند. رابطه (۳-۱) بیانگر معادله آندردانک می‌باشد [۳۷]:

$$33\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = \log_{10}\left(\frac{\Delta T}{234+T_a}+1\right) \quad (۳-۱)$$

بطوریکه  $\Delta T$  تغییرات دما از دمای محیط یا دمای حالت اولیه،  $I$  جریان ذوب بر حسب آمپر و  $A$  سطح مقطع سیم بر حسب میل دایره‌ای<sup>۲</sup>،  $t$  زمان برحسب ثانیه جریان اعمالی و  $T_a$  دمای مرجع بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشد.

واضح است، هنگامی که جریانی به سیم اعمال شود، دمای سیم افزایش پیدا می‌کند که این امر معلول تلفات اهمی  $RI^2$  می‌باشد. هنگامی که دمای سیم به حد کافی بالا برود، سیم شروع به ذوب شدن خواهد نمود. در اینجا دو زمان متفاوت در نظر گرفته می‌شود: زمان  $t_1$ ، زمانی است که سیم از دمای محیط به دمای ذوب خود می‌رسد و زمان  $t_2$ ، مدت زمانی است که سیم به طور کامل تغییر فاز داده و تبدیل به مایع می‌شود. لازم به ذکر است، معادله آندردانک دمای  $t_1$  را مد نظر خود قرار داده بود [۳۸]. از سویی دیگر، هنگام افزایش دما ناشی از  $RI^2$ ، از طریق رسانش، همرفت و یا تابش مقداری از دمای سیم کاسته شده و سیم خنک می‌شود. حالت پایدار دما دقیقاً برابر با زمانی خواهد بود که افزایش دمای ناشی از  $RI^2$ ، با کاهش دمای ناشی از رسانش، همرفت و یا تابش برابر باشد. در معادله آندردانک به طور کامل از پدیده خنک‌سازی سیم چشم‌پوشی شده است. بنابراین معادله آندردانک تنها برای چند ثانیه معتبر است. برخی از منابع بیان نمودند که معادله آندردانک پس از ۱۰ ثانیه دیگر معتبر نخواهد بود [۳۸].

1. I.M Onderdonk

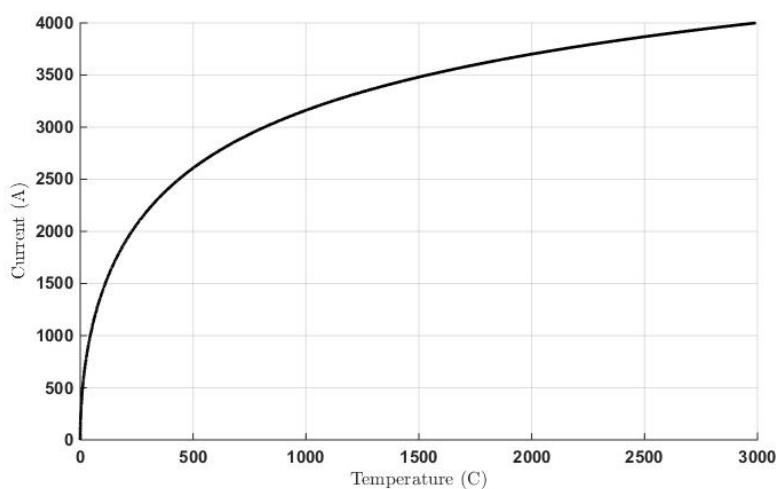
2. Circular mil =  $5.067 \times 10^{-10} \text{ m}^2 = 5.067 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$

در اینجا نیز منظور از زمان، همان زمان  $t_1$  خواهد بود. به دلیل اینکه در سیستم تفنگ‌های کویلی زمان قطع و وصل جریان بسیار کوتاه است و همچنین از آنجاییکه مقدار جریان در زمان اتصال ثابت نیست، بنابراین مشکلی از جهت ذوب شدن سیم وجود ندارد. اما با این وجود، برای بدترین حالت ممکن، برای قطر سیم‌های متفاوت، محاسبات بر اساس معادلات آندردانک انجام شده است. در این حالت، زمان برقراری جریان در کویل  $t = 0.005s$ ، دمای ذوب مس  $1083^\circ C$  و دمای محیط  $T_a = 25^\circ C$  در نظر گرفته شده است. معادله آندردانک بصورت معادله (۲-۳) بازنویسی می‌شود:

$$8.36 \times 10^{-5} \times J^2 = \log_{10} \left( \frac{\Delta T}{259} + 1 \right) \quad (2-3)$$

بطوریکه  $J$  چگالی جریان بر حسب  $\frac{A}{mm^2}$  می‌باشد.

با انجام محاسبات برای سیم با قطر ۱ میلی‌متر مشخص شد که حداکثر جریان قابل تحمل در این سیم و در مدت ۵ میلی‌ثانیه برابر با ۳۲۰۷ آمپر می‌باشد. همچنین با استفاده از رابطه چگالی جریان (  $J = \frac{I}{A}$  )، مقدار ماکزیمم چگالی جریان برابر با  $4083/2 \frac{A}{mm^2}$  خواهد بود. نمودار  $I - \Delta T$  سیم با قطر ۱ میلی‌متر در شکل (۷-۳) به نمایش درآمده است. با انجام محاسبات بر روی سیم با قطرهای ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌متر، نتایج حاصل از حداکثر جریان قابل تحمل در این سیم‌ها در مدت ۵ میلی‌ثانیه و همچنین مقدار ماکزیمم چگالی جریان، در جدول (۱-۳) آورده شده است.



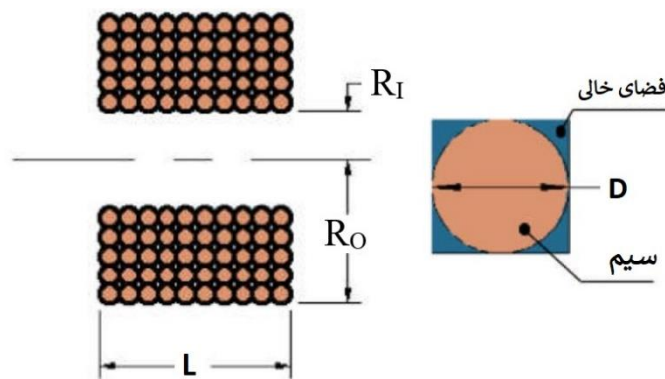
شکل (۷-۳): نمودار جریان بر حسب افزایش دما ( $I - \Delta T$ ) در سیم ۱ میلی‌متر

جدول (۱-۳): نتایج حاصل از محاسبات بر اساس معادله آندردانک

| قطر سیم (mm) | ماکزیمم جریان قابل تحمل (A) | ماکزیمم چگالی جریان ( $A/mm^2$ ) |
|--------------|-----------------------------|----------------------------------|
| ۱            | ۳۲۰۷                        | ۴۰۸۳/۲                           |
| ۱/۵          | ۷۲۱۵/۷۳                     | ۴۰۸۳/۲                           |
| ۲            | ۱۲۸۲۷/۹۵                    | ۴۰۸۳/۲                           |
| ۲/۵          | ۲۰۰۴۳/۶۸                    | ۴۰۸۳/۲                           |

### ۳-۳-۳ محاسبه مقاومت سیم‌پیچ

محاسبه مقاومت سیم‌پیچ کوئل یک تفنگ کوئلی رلوکتانسی با استفاده از رابطه معروف و استاندارد و با دقت  $\pm 10\%$  به راحتی قابل انجام است. همانگونه که در شکل (۸-۳) مشاهده می‌شود، پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه مقاومت سیم‌پیچ شامل شعاع بیرونی  $R_O$ ، شعاع داخلی  $R_I$ ، طول سیم  $L_w$  و قطر سیم  $D$  می‌باشد.



شکل (۳-۸): پارامترهای محاسبه مقاومت یک کویل [۱۴]

مقدار فضای بین دو سیم مجاور بستگی به این موضوع دارد که چقدر عملیات سیم‌پیچی بطور منظم و دقیق صورت پذیرفته است. اگر سیم‌پیچی بطور بسیار منظم و دقیق در نظر گرفته شود، بنابراین هر سیم فضایی به اندازه  $D^2$  را اشغال می‌نماید. نسبت فضای مؤثر اشغال شده توسط سیم به سطح مقطع واقعی سیم از طریق روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$A_T = D^2 \Rightarrow \frac{A_C}{A_T} = \frac{\pi}{4} \quad (۳-۳)$$

$$A_C = \frac{1}{4} \pi D^2$$

بطور کلی و در همه حالات می‌توان ضریب  $F$  را تحت عنوان ضریب پرشوندگی<sup>۱</sup> تعریف کرد. این مقدار در اینجا با تقریب قابل قبول و با استناد به رابطه (۳-۳) برابر با  $\frac{\pi}{4} = 0.79$  در نظر گرفته خواهد شد. اگر چنانچه فرض شود این نسبت در سرتاسر حجم کویل برقرار باشد، می‌توان حجم سیم مسی  $V_C$  را بر اساس حجم کل کویل  $V_T$  بصورت زیر بیان نمود:

$$V_T = \pi(R_O^2 - R_I^2)L \Rightarrow V_C = \pi F(R_O^2 - R_I^2)L$$

$$V_C = F V_T \quad (۴-۳)$$

1. Filling Factor

اکنون با داشتن مقدار حجم سیم درون کویل، می‌توان به سادگی مقدار طول سیم  $L_w$  را بصورت زیر

محاسبه نمود:

$$L_w = V_c / A_w \quad (5-3)$$

$$L_w = \pi F (R_o^2 - R_i^2) L \cdot (4 / \pi D^2) \Rightarrow L_w = 4F (R_o^2 - R_i^2) L / D^2$$

حال، با داشتن روابط کامل پارامترهای کویل جهت محاسبه مقاومت کویل، با جایگزینی آن‌ها در رابطه

استاندارد محاسبه مقاومت، مقاومت سیم‌پیچی به سادگی قابل محاسبه خواهد بود [۱۴]:

$$R_c = \rho \frac{L_w}{A_w} \Rightarrow R_c = \frac{16F \rho (R_o^2 - R_i^2) L}{\pi D^4} \quad (6-3)$$

$$R_c = \rho \cdot \frac{4F (R_o^2 - R_i^2) L}{D^2} \cdot \frac{4}{\pi D^2}$$

### ۳-۳-۴ محاسبه اندوکتانس سیم‌پیچ

اندوکتانس سیم‌پیچی در یک تفنگ کویلی رلوکتانسی یک مقدار متغیر و وابسته به مکان پرتابه درون

آن است. همچنین، نفوذپذیری مغناطیسی غیرخطی ماده پرتابه، کار محاسبات اندوکتانس به روش

تحلیلی را بسیار سخت و پیچیده و عملاً غیرممکن می‌کند. تقریباً می‌توان گفت راه صرفاً تحلیلی برای

محاسبه دقیق مقدار اندوکتانس وجود ندارد. با این وجود می‌توان یک رابطه تقریبی و با فرض خطی در

نظر گرفتن سیستم و ساده‌سازی، با استفاده از روابط اصلی انرژی مغناطیسی تعریف کرد [۲۳]:

$$\omega_m = \frac{1}{2} B \cdot H = \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad (7-3)$$

بطوریکه  $\omega_m$  انرژی مغناطیسی در واحد حجم یا چگالی انرژی مغناطیسی،  $B$  چگالی شار مغناطیسی،

$H$  شدت میدان مغناطیسی و  $\mu$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی می‌باشد.

با فرض اینکه طول کویل بزرگتر از شعاع آن و هادی کویل بسیار نازک باشد، کویل همانند یک

سلنئوئید رفتار خواهد کرد. بنابراین شدت میدان مغناطیسی بر روی محور طولی برابر است با:

$$H = \frac{1}{2} Ni \left( \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + R^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right) \quad (۸-۳)$$

بطوریکه  $N$  تعداد دور سیم‌پیچی،  $l$  طول کویل،  $i$  جریان،  $x$  مکان پرتابه و  $R$  شعاع کویل می‌باشد.

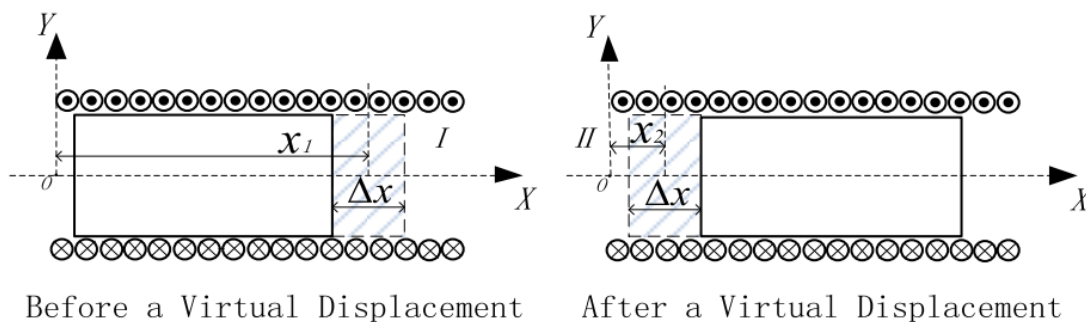
محاسبه انرژی مغناطیسی کل نیازمند انتگرال‌گیری حجم در سرتاسر فضای میدان مغناطیسی است.

معادله (۸-۳) به تنهایی برای محاسبه انرژی مغناطیسی کافی نیست. خوشبختانه، تغییرات انرژی

مغناطیسی پس از یک جابجایی کافی است تا بتوان نیروی الکترومغناطیسی را محاسبه کرد. با در نظر

داشتن شکل (۹-۳)، در حالت اول، هسته داخل سلنئوئید از هوا به ماده مغناطیسی و در حالت دوم، عکس

حالت اول رخ می‌دهد.



شکل (۹-۳): نحوه جابجایی پرتابه [۲۳]

$$\Delta W_m = \iiint_{\Delta V} [(\mu - \mu_0)(H_1^2 - H_2^2)] dV \quad (9-3)$$

$$F_m = \frac{d\Delta W_m}{dx} = \frac{1}{2}(\mu - \mu_0)(H_1^2 - H_2^2)A \quad (10-3)$$

لازم به ذکر است، میدان مغناطیسی در نزدیکی دو انتهای کویل به تدریج کوچکتر خواهد شد. رابطه (۱۰-۳) تنها برای زمانی مناسب خواهد بود که مکان پرتابه، جایی که شدت میدان مغناطیسی باید محاسبه شود، درون کویل قرار داشته باشد. عبارت نهایی بصورت زیر خواهد بود [۲۳]:

$$F_m = ci^2 \left( \frac{l-x_1}{\sqrt{(l-x_1)^2 + R^2}} + \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + R^2}} \right)^2 - ci^2 \left( \frac{l-x_2}{\sqrt{(l-x_2)^2 + R^2}} + \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + R^2}} \right)^2 \quad (11-3)$$

$$c = \frac{1}{8}(\mu - \mu_0)(H_1^2 - H_2^2)A$$

در ادامه، رابطه شار مغناطیسی بر حسب رلوکتانس برابر خواهد بود با:

$$Ni = R\Phi \quad (12-3)$$

بطوریکه  $\Phi$  برابر با شار مغناطیسی کل است. بنابراین، اندوکتانس استاتیک از طریق محاسبه انرژی میدان مغناطیسی محاسبه خواهد شد:

$$L_s = 2/i^2 \cdot \int_0^\Phi Nid\Phi \quad (13-3)$$

رابطه (۱۳-۳) تنها در حالت سکون پرتابه فرومغناطیس قابل استفاده خواهد بود. برای حالت دینامیک

داریم:

$$L_d = \frac{d\Psi}{di} = \frac{2i\Delta W_m - 2W_m\Delta i}{i^2\Delta i} \quad (14-3)$$

به عنوان یک مشکل عملی، نتایج روابط (۳-۱۳) و (۳-۱۴) به واسطه شار نشتی و ساده سازی‌های صورت گرفته نظیر خطی در نظر گرفتن سیستم، دارای دقت کافی نخواهند بود [۲۳]. محققان و پژوهشگران همواره جهت محاسبه دقیق اندوکتانس، به روش اجزاء محدود مراجعه می‌نمایند [۲۰]. در فصل بعدی به کمک نرم افزار اجزاء محدود JMAG Designer 16، اندوکتانس مدل طراحی شده و روش محاسبه آن بیان خواهد شد.

## ۳-۴) مدلسازی

در این قسمت به مدلسازی تبادل انرژی بین پرتابه (آرمیچر) و کوئل در مراحل مختلف شتابگیری پرداخته می‌شود. به همین منظور، از مدل دینامیکی با استفاده از روش لاگرانژین استفاده می‌شود. در این روش طول کوئل بلند در نظر گرفته می‌شود، که این خود یک مزیت برای ساده تر شدن مسئله است. کوئلهایی که طول آنها کوتاهتر یا برابر با قطر خود کوئل است، نیازمند بحث عمیق‌تر و دقیق‌تری از میدان مغناطیسی با استفاده از روش المان محدود و یا المان مرزی است. همچنین، با استفاده از پرتابه‌ای از جنس فولاد یا فریت، از جریان گردابی می‌توان چشم پوشید. به جای مدلسازی رفتاراً رلوکتانسی، از مدل مغناطیسی ساده نیز برای شبیه سازی اثر اشباع استفاده می‌شود [۲۶]. برای مدلسازی، از پرتاب کننده رلوکتانسی تک مرحله‌ای که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است، استفاده شده است. جهت ساده سازی مسئله، فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۶]:

- ۱) فرض می‌شود که چگالی شار میدان در راستای محور طولی  $z$  غالب (از میدان شعاعی چشم پوشی می‌شود) و ثابت است (نسبت به مکان در هسته نه به زمان).
- ۲) در آرمیچر (پرتابه)، چگالی شار  $B$  مستقیماً به شدت میدان مغناطیسی  $H$  (و همچنین مغناطیس شوندگی آرمیچر  $M$ ) به وسیله روابط اشباع جبری وابسته است.



(۳) در آرمیچر از موادی با خاصیت همسان گردی استفاده شده است.

(۴) از تلفات هیترزیس چشم پوشی می شود (تلفاتی از این قبیل به عنوان خطای کوچک در نتایج در نظر گرفته خواهند شد).

(۵) پوشش کویل غیر قابل اشباع و دارای ضریب نفوذ پذیری نامحدود فرض می شود (از اشباع در پوشش کویل صرف نظر می شود. مسیر انتگرالی قانون آمپر فقط در ناحیه هسته و فاصله هوایی غیر صفر است).

(۶) پرتابه از طول کویل بلندتر است.

علاوه بر فرضیات فوق، پرتابه در سه حالت حرکتی مجزا مورد بررسی قرار می گیرد:

(۱) پرتابه وارد کویل می شود. (۲) پرتابه کاملاً درون کویل قرار دارد. (۳) پرتابه از کویل خارج می شود.

### ۳-۴-۱ روابط تحلیلی

لاگرانژین سیستم الکترومکانیکی به صورت زیر می باشد [۲۶]:

$$\ell = T_m + T_e - U_e - U_m \quad (۳-۱۵)$$

به طوریکه  $T_m$  انرژی جنبشی مکانیکی،  $T_e$  انرژی جنبشی الکترومغناطیسی،  $U_e$  انرژی پتانسیل الکتریکی و  $U_m$  انرژی پتانسیل مغناطیسی می باشند. انرژی پتانسیل مغناطیسی شامل مجموع نواحی پوشش داده شده توسط هسته و نواحی پوشش داده شده توسط هوا می باشد. اگر پرتابه ای با جرم  $m$ ، با سرعت  $u = \dot{z}$  حرکت کند، انرژی جنبشی مکانیکی به صورت زیر می باشد:

$$T_m = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 \quad (۳-۱۶)$$

انرژی جنبشی الکترومغناطیسی (که تحت تأثیر انرژی برهم کنش میان جریان کویل و میدان مغناطیسی است) به صورت زیر می‌باشد:

$$T_e = \int_{V_c} J_\Phi A_\Phi dV \quad (۱۷-۳)$$

بطوریکه  $J_\Phi$  چگالی جریان در کویل و  $A_\Phi$  پتانسیل برداری می‌باشد.  $V_c$  حجم ناحیه‌ای را نشان می‌دهد که جریان در آن ناحیه غیر صفر است (به عنوان مثال سیم‌پیچی‌های کویل). پتانسیل برداری  $A_\Phi$  همچنین می‌تواند در صورت برقراری رابطه زیر و با فرض اینکه جریان کویل در لایه نازکی به طول  $l$  و در  $r=a$  متمرکز شده باشد و  $J_\Phi \approx \delta(r-a)N\dot{Q}/l$  حذف شود:

$$B = \frac{2A_\Phi}{r} \quad (۱۸-۳)$$

با محاسبه انتگرال (۱۷-۳) داریم:

$$\int_{V_c} J_\Phi A_\Phi dV \approx \pi a^2 N \dot{Q} B \quad (۱۹-۳)$$

$N$  تعداد دورهای کویل و  $a$  شعاع کویل می‌باشد.

همچنین، انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

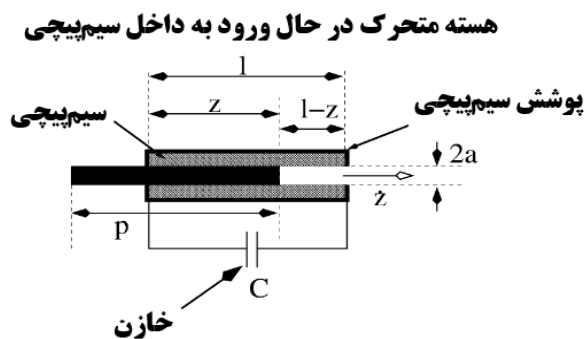
$$U_e = \frac{Q^2}{2C} \quad (۲۰-۳)$$

بطوریکه  $C$  ظرفیت خازن (فاراد) و  $Q$  ظرفیت بار الکتریکی (کولن) است.

انرژی پتانسیل مغناطیسی  $U_m$  شامل مجموع انرژی مغناطیس کنندگی هسته  $U_{core}$  و هوا  $U_{air}$  می‌باشد:

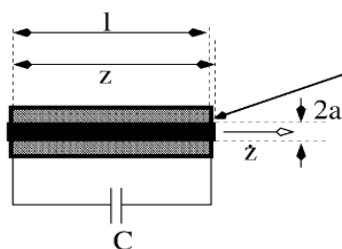
$$U_m = U_{core} + U_{air} \quad (۲۱-۳)$$

درون هسته قابل اشباع، انرژی پتانسیل مغناطیسی به صورت زیر می باشد:

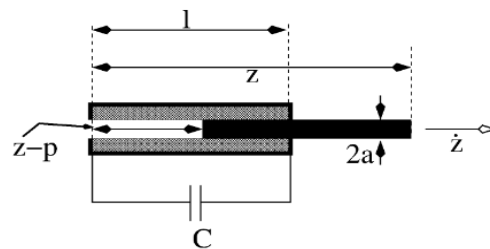


فاصله هوایی جنبی  $\beta$  از طول مؤثر در دو سمت

**هسته متحرک درون سیم پیچی**



**هسته متحرک در حال خروج از سیم پیچی**



شکل (۳-۱۰): سه حالت حرکتی در پرتاب کننده رلوکتانسی [۲۶]

$$U_{core} = \int_{V_{core}} \left( \int_0^B Hdb \right) dV \quad (۲۲-۳)$$

بطوریکه  $b$  متغیر انتگرال گیری چگالی شار مغناطیسی،  $V_{core}$  حجم پرتابه درون کویل (هسته) است.

همچنین داریم:

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (23-3)$$

برای ناحیه هوا:

$$U_{air} = \int_{V_{air}} \frac{B^2}{2\mu_0} dV \quad (24-3)$$

دقت شود که  $B$ ،  $H$  و  $M$  اسکالر هستند، زیرا بنا به فرض و ساده سازی، مؤلفه طولی میدان غالب است و تنها این مؤلفه وجود دارد. برای تخمین اثر اشباع در پرتابه،  $M$  بر حسب عبارتی از چگالی شار تخمین زده شده است:

$$M(B) = M_0 \tanh\left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0}\right) \quad (25-3)$$

در (۲۲-۳)، انتگرال داخلی  $M$  نسبت به  $b$  (انرژی برهم کنش پلاریزاسیون هسته) به صورت تحلیلی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S = \int_0^B M(b) db = \frac{\mu_0 \mu_r}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh\left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \frac{B}{\mu_0 M_0}\right) \quad (26-3)$$

به طوریکه  $S$  بیانگر چگالی انرژی میدان در قسمتی از پرتابه که درون کوئل قرار دارد، می باشد.  $S$  همچنین بیانگر فشار اعمالی بر روی پرتابه نیز می باشد. با جایگذاری (۳-۲۳) در (۲۲-۳)، با استفاده از (۲۶-۳) و اضافه کردن انرژی نواحی پوشش داده شده توسط هوا که از (۳-۲۴) بدست آمد، انرژی پتانسیل پتانسیل کلی بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$U_m \approx \pi a^2 \frac{1+2\beta}{2\mu_0} B^2 - \pi a^2 \frac{\mu_0 \mu_r}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh\left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \frac{B}{\mu_0 M_0}\right) \times \begin{cases} z & \text{entering coil} \\ l & \text{fills coil} \\ l + p - z & \text{exiting coil} \end{cases} \quad (27-3)$$

با جایگذاری تمامی روابط به دست آمده در (۳-۱۵)، تابع لاگرانژین سیستم به طور کلی به صورت زیر

به دست می آید:

$$\ell = \frac{1}{2}m\dot{z}^2 - \frac{Q^2}{2C} + \pi a^2 N \dot{Q} B - \pi a^2 \frac{1+2\beta}{2\mu_0} B^2 - \pi a^2 S \begin{cases} z & \text{entering coil} \\ l & \text{fills coil} \\ l+p-z & \text{exiting coil} \end{cases} \quad (28-3)$$

اکنون به وسیله (۳-۲۸) می توان به سادگی معادلات دیفرانسیلی که دینامیک های سیستم را توصیف

می کند، بیان کرد. حالت مکانیکی لاگرانژین کلاسیک [۳۹] که مینیمم کردن انتگرال:

$$P = \int_{t_0}^{t_1} \ell dt \quad (29-3)$$

است، نیازمند این است که اولین اختلاف (پراکندگی)  $\delta P$  برای همه متغیرهای اختیاری در سیستم به

صفر برسد (قاعده همیلتون). این اتفاق تنها در صورت برقراری رابطه زیر رخ خواهد داد و برای هر متغیر

دینامیک  $x_i$  داریم:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \ell}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial \ell}{\partial x_i} = f_i \quad (30-3)$$

بطوریکه  $x_i$  بیانگر یکی از متغیرهای سیستم ( $B$ ،  $z$  یا  $Q$ ) و  $f_i$  بیانگر هرگونه نیروی خارجی است

(به عنوان مثال اصطکاک مکانیکی، تلفات مقاومتی، منابع). در نتیجه برای پرتابه در حال ورود به کویل،

معادله حرکت برابر است با:

$$N\dot{Q} = (l + 2\beta) \frac{B}{\mu_0} - z M_0 \tanh \left( \frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \quad (31-3)$$

$$-R_c \dot{Q} = \pi a^2 N \dot{B} + \frac{Q}{C} \quad (32-3)$$

$$m\ddot{z} = \pi a^2 S \quad (3-33)$$

معادله (۳-۳۱) به عنوان قانون آمپر شناخته می‌شود. در سمت چپ جریان کویل و سمت راست برابر انتگرال خطی (ساده شده) میدان مغناطیسی  $H$  است. معادله (۳-۳۲) بیانگر معادلات مداری است (قانون ولتاژ کیرشهف برای مدار مقاومتی - سلفی - خازنی). تلفات سیم‌پیچی کویلها را به وسیله مدلسازی آنها به عنوان یک مقاومت سری، با استفاده از دستورالعمل لاگرانژین و با نیروی  $f_Q = -R_c I$  بر روی متغیر دینامیک  $Q$ ، محاسبه می‌کنیم. معادله (۳-۳۳) قانون دوم نیوتن می‌باشد. اثر اشباع بر روی نیروی پرتابه با استفاده از (۳-۳۳)، به سهولت قابل محاسبه است. این نیرو متناسب است با سطح مقطع عرضی پرتابه و همچنین چگالی انرژی مغناطیسی در طول پرتابه (که همچون عبارت فشار رفتار می‌کند، تنش ماکسول).

برای حالتی که پرتابه کاملاً در مرکز کویل قرار گرفته است، معادلات زیر معتبر است:

$$N\dot{Q} = (l + 2\beta) \frac{B}{\mu_0} - l M_0 \tanh\left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0}\right) \quad (3-34)$$

$$-R_c \dot{Q} = \pi a^2 N \dot{B} + \frac{Q}{C} \quad (3-35)$$

$$m\ddot{z} = 0 \quad (3-36)$$

در این حالت، نیرویی به پرتابه اعمال نمی‌شود و در این حالت پرتابه شتاب نمی‌گیرد. و برای زمانی که پرتابه از کویل خارج می‌شود، معادلات زیر را خواهیم داشت:

$$N\dot{Q} = (l + 2\beta) \frac{B}{\mu_0} - (l + p - z) M_0 \tanh\left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0}\right) \quad (3-37)$$

$$-R_c \dot{Q} = \pi a^2 N \dot{B} + \frac{Q}{C} \quad (3-38)$$

$$m\ddot{z} = -\pi a^2 S \quad (39-3)$$

در این حالت، نیرو منفی است (سرعت پرتابه کاهش می‌یابد). به دلیل اینکه جریان کویل در مدت زمان کوتاهی افزایش می‌یابد، انرژی از پرتابه به سمت میدان مغناطیسی منتقل می‌شود.

به منظور حل معادلات حرکت، زمانی که سوییچ بسته است، روابط (3-32) تا (3-39) بصورت عباراتی از ولتاژ خازن  $V$ ، جریان کویل  $I$ ، سرعت پرتابه  $u$ ، چگالی شار  $B$  و موقیت مکانی پرتابه  $z$  ظاهر می‌شود. متغیر  $Q$  (ظرفیت بار الکتریکی) به راحتی به وسیله رابطه  $V = Q/C$  قابل تبدیل است. با در نظر داشتن نکات ذکر شده و روابط مطرح شده، بسیار واضح و روشن است که به معادلات جبری زیر برای حالت بسته (وصل) بودن سوییچ برسیم:

$$NI = (l + 2\beta) \frac{B}{\mu_0} - z M_0 \tanh\left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0}\right) \quad (40-3)$$

$$\dot{B} = \frac{-R_c}{\pi a^2 N} I - \frac{V}{\pi a^2 N} \quad (41-3)$$

$$\dot{u} = \frac{\pi a^2}{m} S \quad (42-3)$$

$$\dot{V} = \frac{I}{C} \quad (43-3)$$

$$\dot{z} = u \quad (44-3)$$

این معادلات بگونه‌ای نوشته شده‌اند که تأثیر فیزیکی مؤلفه‌ها را به وضوح شرح می‌دهد. دقت شود که می‌توان با جایگذاری رابطه (3-40) در جایی که  $I$  ظاهر می‌شود، معادله اول را حذف کرد.

در هنگام باز (قطع) بودن سوییچ، جریان کویل به وسیله مقاومت سری کویل و مقاومت خارجی به سرعت به سمت صفر میل می‌کند. از این رو معادلات (3-41) و (3-43) بصورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\dot{B} = -\frac{R + R_c}{\pi a^2 N} I, \quad \dot{V} = 0 \quad (۴۵-۳)$$

بطوریکه  $R$  مقاومت خارجی جهت صفر نمودن جریان است [۲۶].

### ۳-۴-۲) راندمان

برای ارزیابی عملکرد یک پرتاب کننده الکترومغناطیسی، رایج‌ترین شیوه، محاسبه راندمان تبدیل انرژی است که به صورت نسبت انرژی جنبشی تبدیل شده در پرتابه هنگام خروج از کوئل در طول پرتاب، به انرژی پتانسیل الکتریکی گرفته شده از منبع ذخیره تعریف می‌شود [۲۶]. این نسبت به صورت رابطه (۴۶-۳) بیان می‌شود:

$$\eta = \frac{m v_{exit}^2}{C (V_i - V_f)^2} \times 100\% \quad (۴۶-۳)$$

بطوریکه  $m$  جرم پرتابه،  $C$  ظرفیت خازن،  $V_i$  ولتاژ اولیه بانک خازنی،  $V_f$  ولتاژ نهایی بانک خازنی و  $v_{exit}$  سرعت خروجی می‌باشد. معمولاً تفنگ‌های کوئیلی رلوکتانسی دارای راندمان بسیار پایینی هستند.



(فصل چهارم)

# **طراحی، مدلسازی و شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود**

## ۴-۱) مدلسازی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود

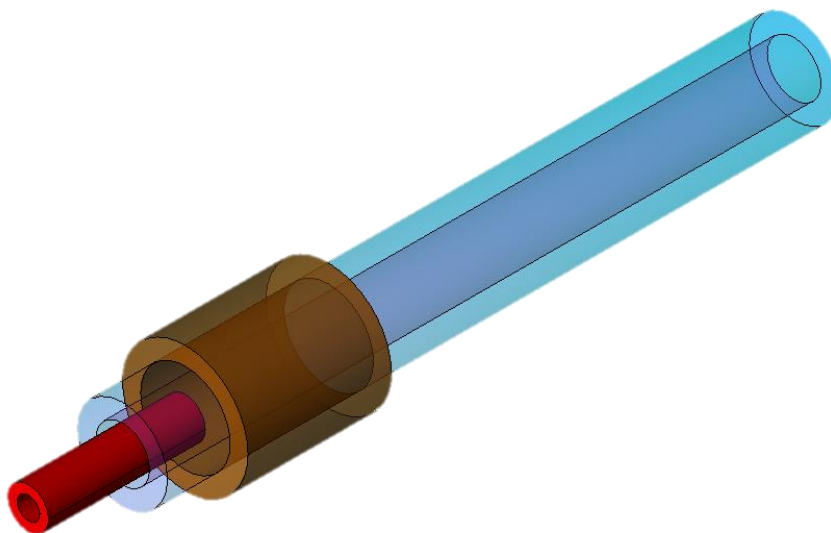
### ۴-۱-۱) مسئله طراحی و پارامترهای طراحی

با برخی محاسبات اولیه صورت گرفته، امکانات و محدودیت‌های موجود آزمایشگاهی و اقتصادی، مشخصات ابعادی تفنگ رلوکتانسی تک مرحله‌ای و همچنین مشخصات منابع تغذیه و بانک خازنی به عنوان داده‌های مسئله، در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول (۴-۱): مشخصات ابعادی تفنگ کوپلی رلوکتانسی

| نوع پارامتر           | مقدار پارامتر | واحد پارامتر           |
|-----------------------|---------------|------------------------|
| طول پرتابه            | ۳۵            | میلی‌متر (mm)          |
| قطر داخلی پرتابه      | ۵             | میلی‌متر (mm)          |
| قطر خارجی پرتابه      | ۹             | میلی‌متر (mm)          |
| طول لوله              | ۱۵۰           | میلی‌متر (mm)          |
| قطر داخلی لوله        | ۱۲            | میلی‌متر (mm)          |
| قطر خارجی لوله        | ۲۰            | میلی‌متر (mm)          |
| ولتاژ اولیه شارژ خازن | ۳۲۰           | ولت (V)                |
| ظرفیت خازن            | ۶۸۰۰          | میکروفاراد ( $\mu F$ ) |

جنس پرتابه بکار گرفته شده در این طراحی فولاد و جنس لوله پلاستیک می‌باشد. هدف، طراحی کوپل تفنگ کوپلی رلوکتانسی است که بتواند با استفاده از مشخصات جدول (۴-۱) و با رعایت سقف جریان مجاز، پرتابه را با بیشترین سرعت ممکن شتاب دهد. محدودیت جریان ۱۵ کیلوآمپر برای خازن، ۱ کیلوآمپر برای کلید به کار رفته در ساخت نمونه نهایی و محدودیت‌های سیم که در بخش ۳-۳-۲ بیان شد، از جمله نکاتی است که باید برای طراحی و ساخت نمونه عملی مد نظر قرار داد.



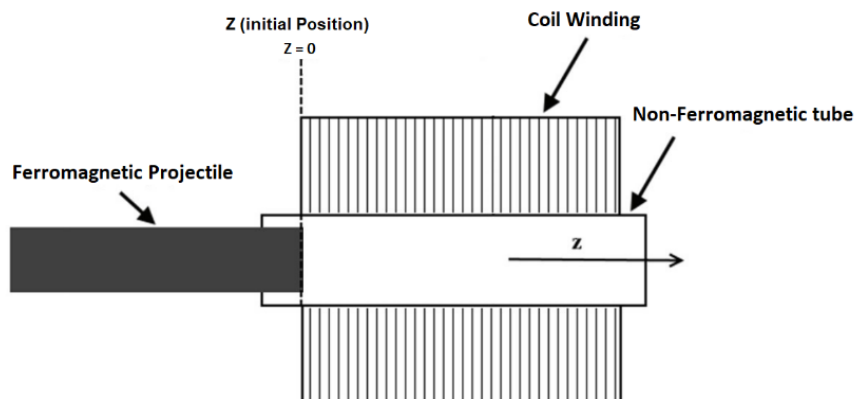
شکل (۴-۱): نمایی از تفنگ کویلی رلوکتانسی شبیه‌سازی شده

از آنجاییکه بعد از خروج پرتابه از دهانه لوله تفنگ، هیچگونه کنترلی بر روی سرعت و مسیر حرکت پرتابه نمی‌توان اعمال نمود، هدف مطلوب برای تفنگ طراحی شده در این پایان‌نامه، دستیابی به حداکثر سرعت پرتابه در هنگام خروج از دهانه لوله تفنگ تعریف شده است. همچنین جهت آسیب نرسیدن به عایق خازن، سیم کویل و سیستم سویچینگ (کلید)، سقف جریان مجاز و قابل تحمل برای ادوات ذکر شده در این طراحی باید رعایت شود. از سویی دیگر نیز باید نیم نگاهی به محدودیت‌های آزمایشگاهی، امکانات و بطور کلی سادگی ساخت داشت. در پروسه طراحی پیش رو، پارامترهای جدول (۴-۱) و زمان قطع و وصل پالس انرژی مشخص، و همچنین مکان اولیه پرتابه ثابت و معین است. متغیرها جهت رسیدن به یک طراحی مطلوب که خواسته مسئله را برآورده نماید عبارتند از: قطر سیم، طول کویل و تعداد طبقات کویل.

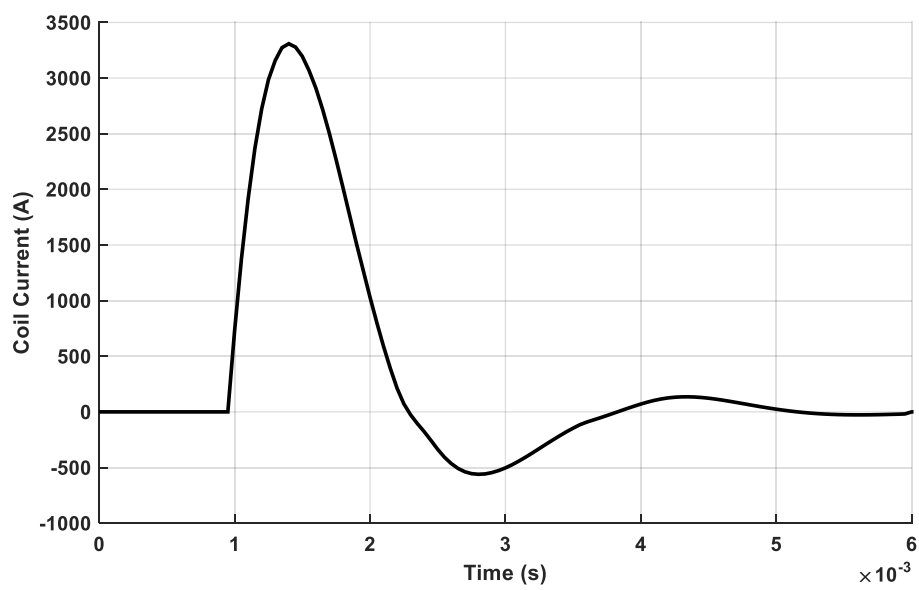
## ۱-۲-۴) طراحی کویل تفنگ به روش سعی و خطای پیشنهادی

با استفاده از مشخصات جدول (۱-۴)، تفنگ کویلی رلوکتانسی در محیط FE<sup>۱</sup> با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود JMag Designer 16 شبیه سازی شده است (شکل (۱-۴)). لازم به ذکر است همانگونه که پیشتر گفته شد، یک کویل ایده آل باید قادر باشد تا شتابی نرم و هموار به پرتابه بدهد.

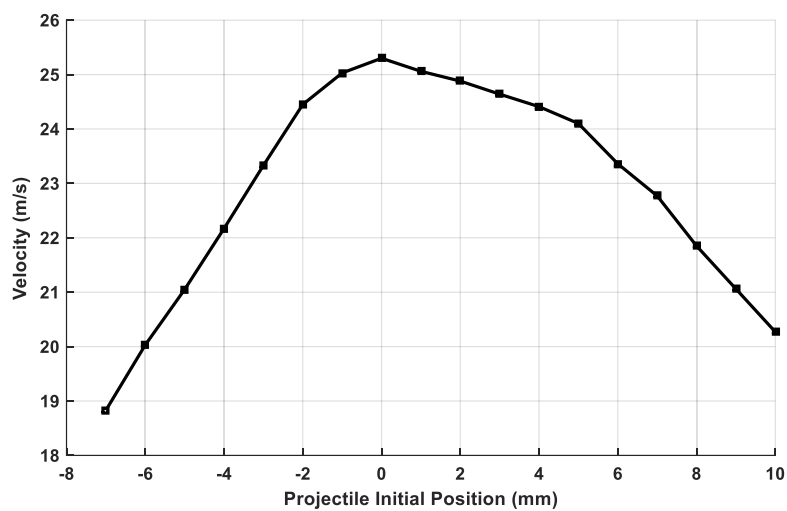
روش های مختلفی برای طراحی سیم پیچ کویل وجود دارد و پارامترهایی همچون قطر سیم، طول کویل و تعداد طبقات کویل، هریک بر نحوه عملکرد، راندمان و سرعت نهایی پرتابه تأثیرگذار خواهند بود. هرچند تعداد متغیرهای طراحی کم هستند، اما تعداد حالت هایی که باید مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند آنقدر زیاد است که بدون وجود مسیری مشخص در روش سعی و خطا، عملاً رسیدن به هدف مطلوب امکان پذیر نیست. در این بخش ضمن معرفی مسیری مشخص، به طراحی کویل تفنگ رلوکتانسی به تفکیک قطرهای ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی متر و سپس بررسی تأثیر هریک از پارامترهای ذکر شده بر سرعت خروجی پرتابه در دهانه لوله و ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی، خواهیم پرداخت. همچنین، مکان اولیه پرتابه ثابت و در نقطه  $z = 0$  میلی متر در نظر گرفته شده است. زیرا در شبیه سازی های صورت گرفته، بهترین مکان از نقطه نظر سرعت خروجی بیشتر در این طراحی، قرار گیری پرتابه در لبه کویل مشاهده شد. نمونه ای از بررسی تأثیر مکان اولیه پرتابه در کویل با قطر سیم ۱ میلی متر و ۱ طبقه بر سرعت خروجی در شکل (۴-۴) مشاهده می گردد. لازم به ذکر است در طول پروسه شبیه سازی، از اثر نیروی اصطکاک صرف نظر شده است. همچنین زمان قطع جریان اعمال شده به کویل با توجه به زمان رسیدن مرکز گلوله به مرکز کویل متغیر است.



شکل (۴-۲): نحوه قرارگیری پرتابه در مکان اولیه

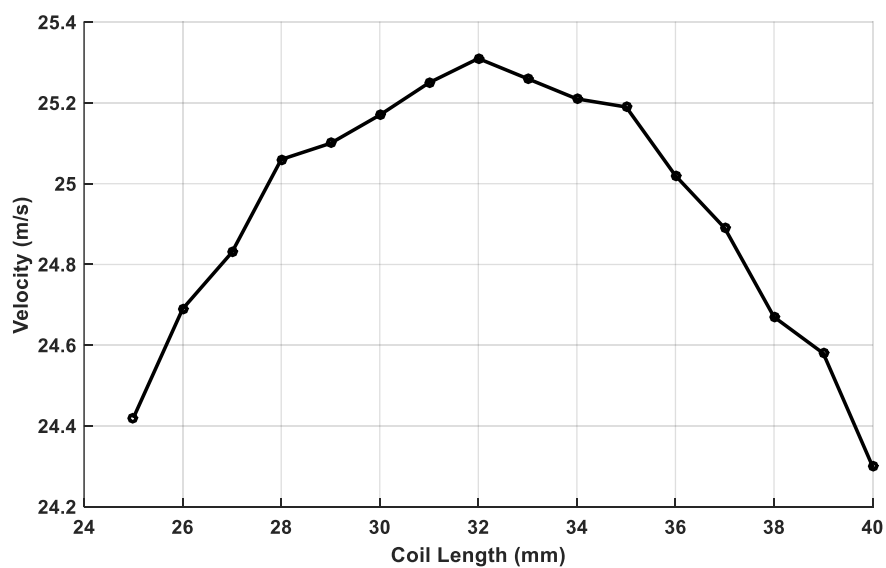


شکل (۴-۳): جریان اعمال شده به کویل



شکل (۴-۴): تأثیر مکان اولیه پرتابه بر سرعت خروجی در سیم ۱ میلی‌متر

در اولین قدم طراحی سیم‌پیچی کوئل سیستم، اثر طول کوئل بر سرعت خروجی پرتابه به تفکیک قطر سیم، در بازه ۲۵-۴۵ میلی‌متر بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سیم با قطر ۱ میلی در شکل (۵-۴) و برای سایر سیم‌ها در جدول (۲-۴) آورده شده است.

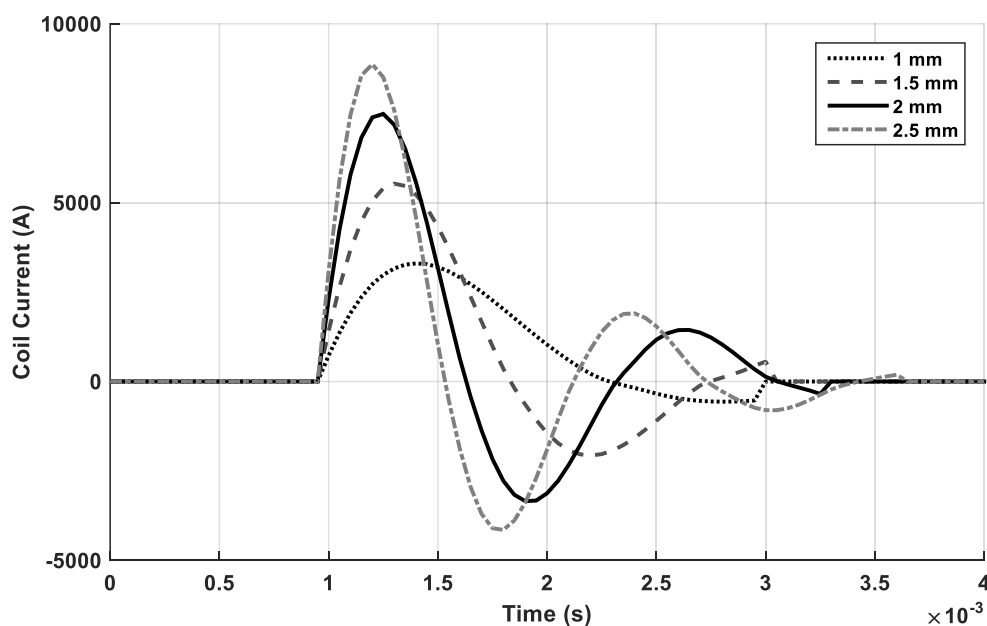


شکل (۵-۴): نمودار اثر طول کوئل بر سرعت خروجی پرتابه در سیم ۱ میلی‌متر

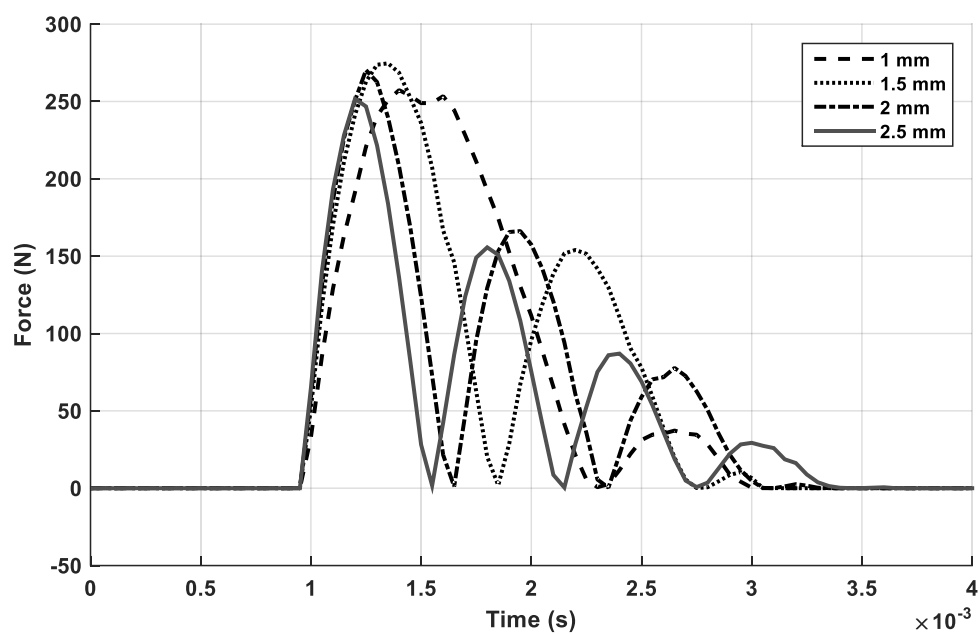
جدول (۴-۲): طول بهینه کویل در قطرهای مختلف سیم

| قطر سیم (mm)  | ۱  | ۱.۵ | ۲  | ۲.۵ |
|---------------|----|-----|----|-----|
| طول کویل (mm) | ۳۲ | ۳۶  | ۳۸ | ۴۰  |

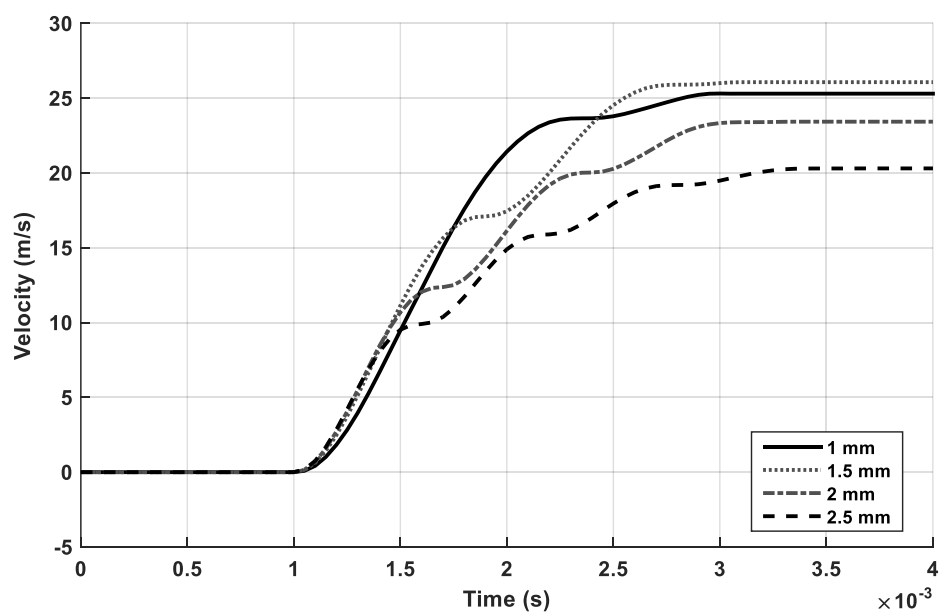
با در نظر داشتن شکل (۴-۵) و جدول (۴-۲) و آنچه که پیشتر بیان شد، مطابق با انتظارات، مشاهده می‌شود که در طول کویل نزدیک به طول پرتابه شاهد سرعت‌های خروجی بیشتری هستیم. و هرچه طول کویل بلندتر و یا کوتاه‌تر شود از سرعت خروجی پرتابه کاسته خواهد شد. همچنین نمودارهای جریان، نیرو و سرعت، بر حسب زمان، در قطرهای مختلف سیم، در طول بهینه هر قطر سیم و در یک طبقه، در شکل‌های (۴-۶) - (۴-۸) به نمایش درآمده است.



شکل (۴-۶): نمودار جریانی الکتریکی کویل در قطرهای مختلف سیم



شکل (۷-۴): نمودار نیروی وارد بر پرتابه در قطرهای مختلف سیم



شکل (۸-۴): نمودار سرعت پرتابه در قطرهای مختلف سیم



با توجه به رابطه (۳-۶)، افزایش قطر سیم باعث کاهش مقاومت سیم و در نتیجه افزایش جریان می‌شود. شکل (۴-۶) نیز گواه صحت محاسبات می‌باشد. اما از طرفی، با توجه به رابطه نیرو  $F = 0.5i^2 (dL(z)/dz)$  در این سیستم شاهدیم که افزایش جریان الزاماً منجر به افزایش نیرو و در نتیجه سرعت خروجی پرتابه نخواهد شد. علت این امر کاهش تعداد دور سیم‌پیچی، اندوکتانس و در نتیجه مقدار  $dL(z)/dz$  می‌باشد.

همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر عدم وجود یک شتاب نرم و هموار است که معلول نوسانات جریان، نوسانات نیرو و در نتیجه آن شتاب، در طول مدتی است که جریان از سرتاسر کوئل می‌گذرد. این حقیقت، از تعریف یک کوئل ایده‌آل فاصله دارد. زیرا یک کوئل ایده‌آل باید قادر به شتاب‌دهی نرم و هموار پرتابه باشد. همانگونه که بیان شد، زمان صحیح قطع جریان، درست هنگامی است که مرکز پرتابه به مرکز کوئل برسد. پس از آن زمان، با توجه اینکه  $dL(z)/dz < 0$  می‌شود، نیرو نیز منفی شده، موجب یک شتاب منفی و یا کشیده شدن پرتابه به سمت درون کوئل خواهد شد. اما در حالت استفاده از سیم‌پیچی یک طبقه در این طراحی و در تمامی قطرها، به دلیل تغییرات و نوسانات جریان که ناشی از کوچک بودن ثابت زمانی سیستم است، نیرو قبل از اینکه پرتابه به مرکز کوئل برسد، و قبل از قطع کلید، روند نزولی در پیش می‌گیرد، در لحظه‌ای بسیار کوتاه منفی می‌شود و مجدداً روند صعودی در پیش می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود، هرچقدر قطر سیم افزایش یابد، نظر به اینکه مقاومت سیم‌پیچی کاهش می‌یابد، اما به دلیل کاهش بسیار زیاد اندوکتانس سیم‌پیچی، ثابت زمانی سیستم کوچکتر خواهد شد و در نتیجه تعداد نوسانات افزایش می‌یابد. بنابراین نمی‌توان از سیم‌پیچی یک طبقه استفاده کرد.

برای حل این مشکل، دو راه حل وجود دارد: راه اول این است که زمان رسیدن پرتابه به مرکز کوئل بگونه‌ای تنظیم شود که قبل از صفر شدن جریان، پرتابه به مرکز کوئل رسیده و کلید قطع شده باشد. و این ممکن نیست مگر به وسیله جابجایی گلوله به سمت درون کوئل. یعنی مکان اولیه گلوله درون کوئل

در نظر گرفته شود ( $z > 0$ ). نتایج حاصل از این روش از نقطه نظر سرعت خروجی مطلوب ارزیابی نشد اما توانست شتابی نرم و هموار به پرتابه بدهد. همچنین لازم به ذکر است در سیم‌پیچی یک طبقه سیم‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر، مقدار جریان فراتر از محدوده مجاز قابل تحمل سیم شده است. در سیم‌پیچی یک طبقه سیم‌های ۲ و ۲/۵ میلی‌متر نیز پیک جریان لحظه‌ای آنقدر بالا هست که فراتر از تحمل کلید مورد استفاده در این طراحی است.

اما در راه حل دوم، از آنجاییکه طول کوئل ثابت در نظر گرفته می‌شود، برای افزایش ثابت زمانی سیستم، باید تعداد دور سیم‌پیچی را در طبقات بعدی افزایش داد. با استفاده از این روش، علاوه بر افزایش ثابت زمانی، نیروی تولید شده نیز ابتدا افزایش و پس از مقداری مشخص برای هر قطر سیم، مجدداً کاهش خواهد یافت. علت این امر کاهش شدید جریان به سبب افزایش مقاومت سیم‌پیچی است.

افزایش نیروی تولیدی توسط کوئل موجب افزایش شتاب، سرعت و در نتیجه کاهش زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کوئل و در واقع زمان قطع سویچ است. از سویی دیگر با افزایش تعداد دور سیم‌پیچی، ثابت زمانی سیستم افزایش یافته، و زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود، افزایش خواهد یافت. بنابراین جهت یافتن تعداد دور سیم‌پیچی و در نتیجه تعداد طبقات مطلوب، باید شرایط بگونه‌ای رقم بخورد که زمان قطع سویچ هنگامی باشد که جریان به مقدار ماکزیمم خود رسیده، کمی از آن عبور کرده و روندی نزولی در پیش بگیرد. باید در نظر داشت چنانچه زمان قطع سویچ، درست در زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم و یا خیلی نزدیک به آن باشد و همچنین از زمان رسیدن به مقدار ماکزیمم جریان اگر خیلی فاصله پیدا کند و جریان شدیداً روند نزولی داشته باشد، به مقدار ماکزیمم سرعت نخواهیم رسید.

پس بطور خلاصه می‌توان گفت اگر چنانچه پرتابه قبل از صفر شدن جریان و نیرو به مرکز کوئل برسد، کوئل می‌تواند شتابی هموار به پرتابه بدهد. اما دستیابی به سرعت ماکزیمم مستلزم رعایت نکات ذکر شده

در بالا است. نتایج حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی تفنگ کوپلی رلوکتانسی با کوپل‌های مختلف از نظر قطر سیم و تعداد طبقات مختلف (طبقات اول تا پنجم)، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود JMAG Designer 16 در جداول (۳-۴) - (۵-۴) آورده شده است. لازم به ذکر است در طول شبیه‌سازی و در ابتدای آن، خازن به مدت ۰/۰۰۱ ثانیه شارژ شده است که این زمان منظور شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و محاسبات، مطابق با انتظارات، گواه این است که در حالتی که زمان قطع جریان در محدوده مطلوب قرار داشته باشد، نتایج راضی‌کننده است و کوپل مورد نظر می‌تواند شتاب هموار و نرمی به پرتابه بدهد. همچنین عدم وجود نوسانات متعدد در نمودارهای جریان، نیرو و در نتیجه سرعت، از دیگر ویژگی‌های این حالت می‌باشد.

پس از آن شبیه‌سازی در طبقات بعدی نیز ادامه می‌یابد تا ایده‌آل‌ترین زمان قطع که برابر اختلاف آن با زمان رسیدن به مقدار ماکزیمم جریان است پیدا و در نتیجه بیشترین سرعت خروجی مشاهده شود. با بررسی‌های صورت گرفته مشاهده شد، کوپل ۳ طبقه در سیم‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر، کوپل ۴ طبقه در سیم ۲ میلی‌متر و کوپل ۵ طبقه در سیم ۲/۵ میلی‌متر دارای بیشترین سرعت خروجی بوده و پس از آن با افزایش تعداد طبقات، سرعت روند نزولی در پیش خواهد گرفت.

نمودارهای جریان، نیرو و سرعت حاصل از شبیه‌سازی در قطرهای مختلف سیم و در طبقات بهینه خود در شکل‌های (۹-۴) - (۱۱-۴) به نمایش درآمده است. نکته حائز اهمیت در یک کوپل ایده‌آل، وجود تنها یک پیک در نمودارهای جریان و نیرو است. یعنی نباید قبل از اینکه مرکز پرتابه به مرکز کوپل برسد، نمودارهای فوق صفر شوند یا تغییر علامت بدهند. تنها در این صورت است که کوپل می‌تواند به پرتابه یک شتاب هموار و نرم بدهد. این موضوع کاملاً مطابق با انتظارات و پیش‌بینی‌های ما بوده است.

جدول (۳-۴): نتایج حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی سیم ۱ میلی‌متر

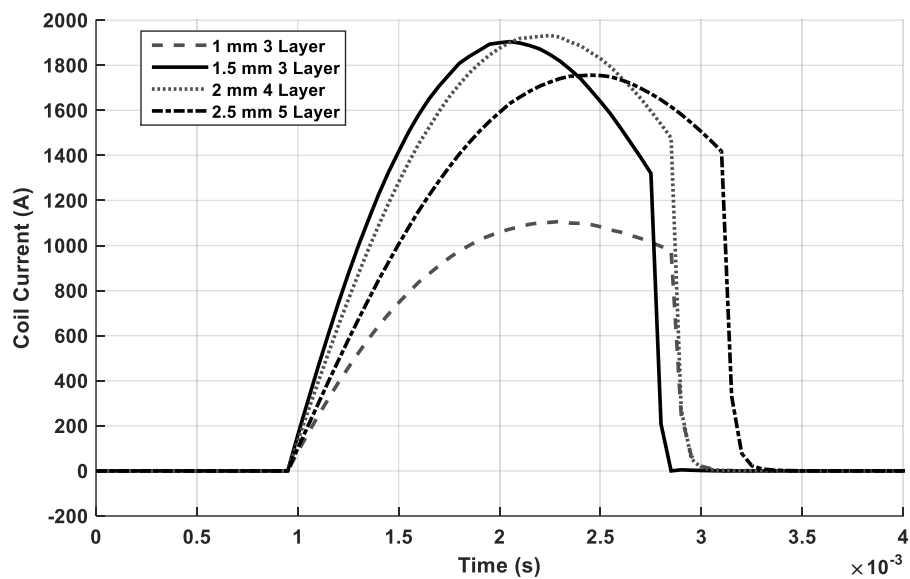
| قطر سیم (mm) |                                                          | ۱       |
|--------------|----------------------------------------------------------|---------|
| طبقه اول     | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۱۳۵ |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۲۲۸ |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۳   |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۲۵/۳۰   |
| طبقه دوم     | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۱۸۵ |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۳۴  |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۲۸  |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۴۲/۳۵   |
| طبقه سوم     | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۲۳  |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۴۷۵ |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۲۹  |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۴۵/۰۱   |
| طبقه چهارم   | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۲۷  |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۶۲۵ |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۳۰۵ |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۴۳/۲۳   |
| طبقه پنجم    | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۳۲  |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۷۱  |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۳۲  |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۴۱/۴۲   |

جدول (۴-۴): نتایج حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی سیم ۱/۵ میلی‌متر

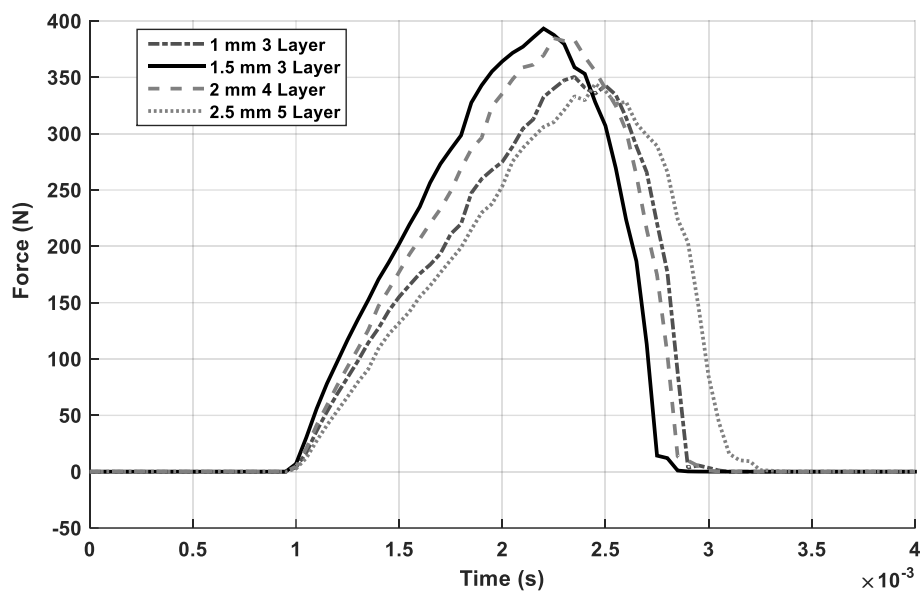
| ۱/۵     | قطر سیم (mm)                                             |            |
|---------|----------------------------------------------------------|------------|
| ۰/۰۰۱۳  | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (S)                | طبقه اول   |
| ۰/۰۰۱۸۳ | زمان صفر شدن جریان (S)                                   |            |
| ۰/۰۰۳۰۵ | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (S) |            |
| ✗       | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     |            |
| ۲۶/۰۷   | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  |            |
| ۰/۰۰۱۶۵ | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (S)                | طبقه دوم   |
| ۰/۰۰۲۷  | زمان صفر شدن جریان (S)                                   |            |
| ۰/۰۰۲۸  | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (S) |            |
| ✗       | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     |            |
| ۳۹/۶۳   | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  |            |
| ۰/۰۰۲۰۵ | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (S)                | طبقه سوم   |
| ۰/۰۰۳۷۵ | زمان صفر شدن جریان (S)                                   |            |
| ۰/۰۰۲۷۵ | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (S) |            |
| ✓       | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     |            |
| ۴۸/۰۹   | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  |            |
| ۰/۰۰۲۴۵ | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (S)                | طبقه چهارم |
| ۰/۰۰۵۱  | زمان صفر شدن جریان (S)                                   |            |
| ۰/۰۰۲۹۵ | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (S) |            |
| ✓       | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     |            |
| ۴۷/۷۹   | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  |            |
| ۰/۰۰۲۷۵ | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (S)                | طبقه پنجم  |
| ۰/۰۰۶۲  | زمان صفر شدن جریان (S)                                   |            |
| ۰/۰۰۳۱۵ | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (S) |            |
| ✓       | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     |            |
| ۴۱/۱۱   | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  |            |

جدول (۴-۵): نتایج حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی سیم ۲ میلی‌متر

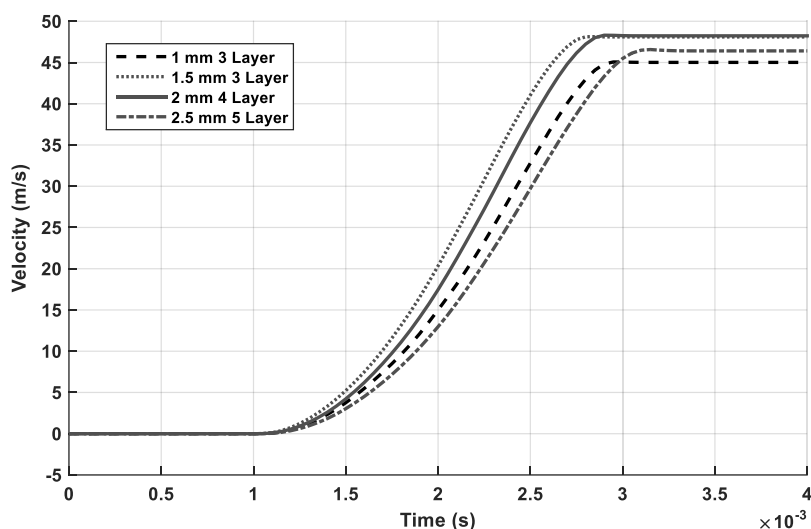
| قطر سیم (mm) |                                                          | ۲       |
|--------------|----------------------------------------------------------|---------|
| طبقه اول     | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۱۲۵ |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۱۶۲ |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۳۳  |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✗       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۲۳/۴۳   |
| طبقه دوم     | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۱۵۵ |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۲۲۹ |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۲۸۵ |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✗       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۳۴/۶۷   |
| طبقه سوم     | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۱۸۵ |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۳۰۵ |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۲۷۵ |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۴۵/۷۳   |
| طبقه چهارم   | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۲۲۵ |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۴۱  |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۲۸۶ |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۴۸/۲۳   |
| طبقه پنجم    | زمان رسیدن جریان به مقدار ماکزیمم خود (s)                | ۰/۰۰۲۶  |
|              | زمان صفر شدن جریان (s)                                   | ۰/۰۰۵   |
|              | زمان رسیدن مرکز پرتابه به مرکز کویل (زمان قطع سوییچ) (s) | ۰/۰۰۳۰۵ |
|              | قرار داشتن در محدوده مطلوب قطع جریان                     | ✓       |
|              | سرعت خروجی پرتابه (m/s)                                  | ۴۶/۷۵   |



شکل (۹-۴): نمودار جریان الکتریکی کوئل در قطرهای مختلف سیم



شکل (۱۰-۴): نمودار نیروی وارد بر پرتابه در قطرهای مختلف سیم



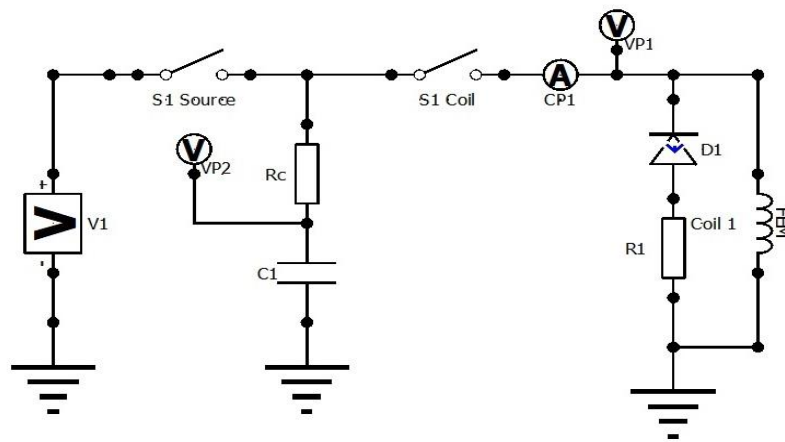
شکل (۴-۱۱): نمودار سرعت پرتابه در قطرهای مختلف سیم

### ۴-۱-۳ انتخاب مدل نهایی

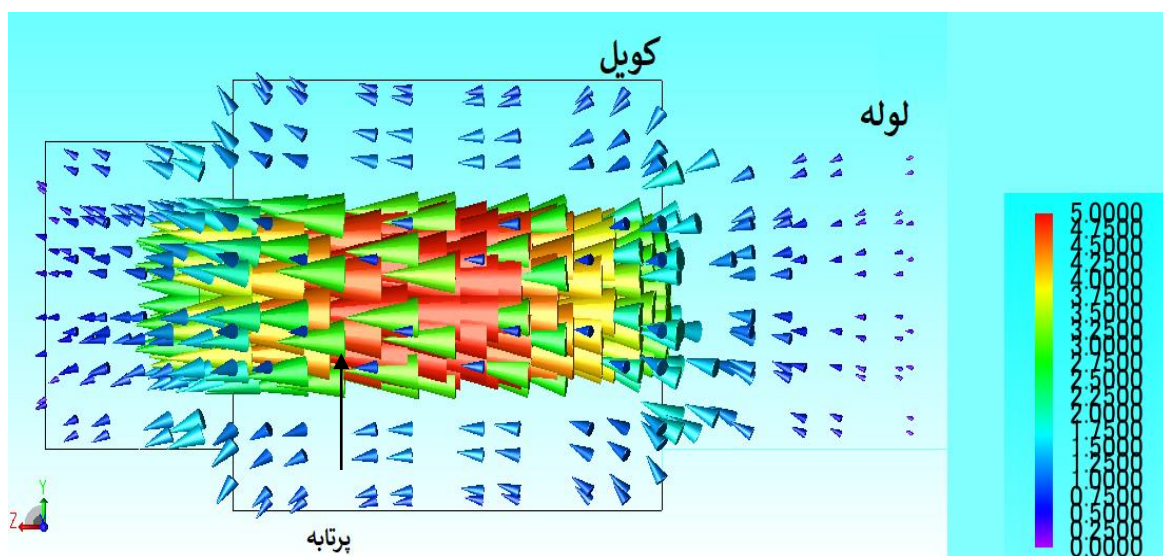
با توجه به جداول (۴-۳) - (۴-۵) و شکل (۴-۱۱) اینگونه دریافت می‌شود که کوئل ۴ طبقه با سیم به قطر ۲ میلی‌متر و به طول ۳۸ میلی‌متر، با سرعت ۴۸/۲۳ متر بر ثانیه دارای بیشترین سرعت خروجی است. اما باید این نکته را در نظر داشت که با توجه به قطر کم لوله، عملیات سیم‌پیچی با سیم ۲ میلی‌متر آن هم در ۴ طبقه کمی دشوار است. همچنین پیک جریان در این حالت فراتر از تحمل کلید خواهد بود. از آنجایی که بین حالت‌های بهینه از نقطه نظر سرعت خروجی، با در نظر داشتن خطای احتمالی شبیه‌سازی، تفاوت چشمگیری مشاهده نمی‌شود، جهت آسوگی خاطر چه از نظر سادگی ساخت و چه از نظر تحمل جریان عبوری توسط کلید و مسائل ایمنی، جریان هرچه کمتر باشد مطلوب‌تر است. به همین خاطر، برای ساخت نمونه عملی، کوئل ۴ طبقه با قطر سیم ۱ میلی‌متر و به طول ۳۲ میلی‌متر را انتخاب می‌کنیم.



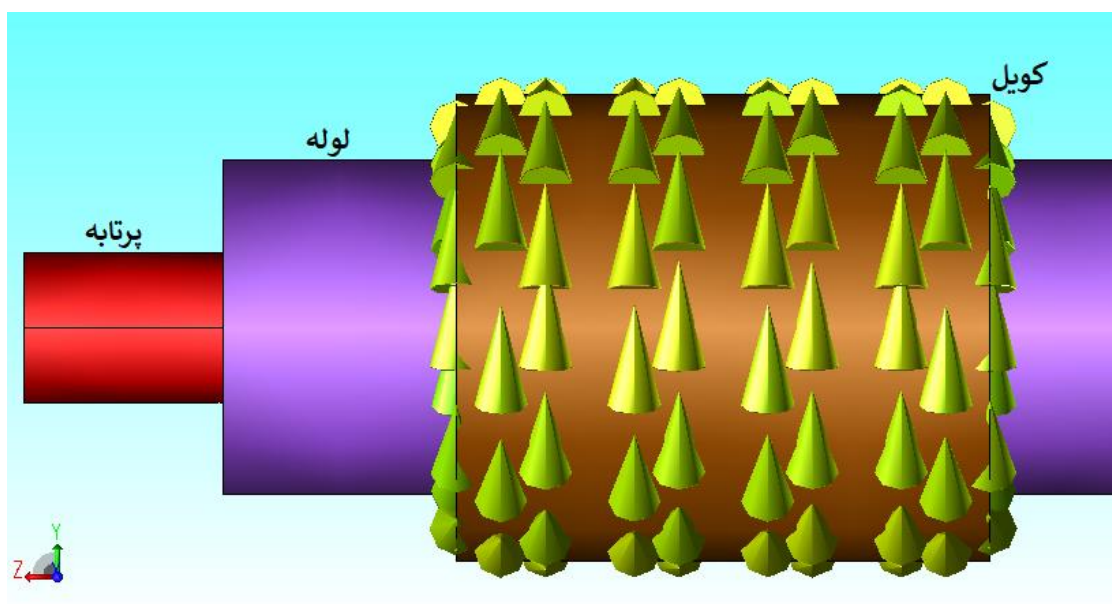
در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تفنگ کوپلی رلوکتانسی با کوپل انتخابی توسط نرم افزار اجزاء محدود JMAG Deigner 16 ارائه و سپس در بخش بعدی، به اعتبار سنجی نتایج بدست آمده با استفاده از معادلات دینامیکی حاکم بر تفنگ رلوکتانسی به فرم فضای حالت، به وسیله نرم افزار MATLAB 2014b پرداخته می‌شود.



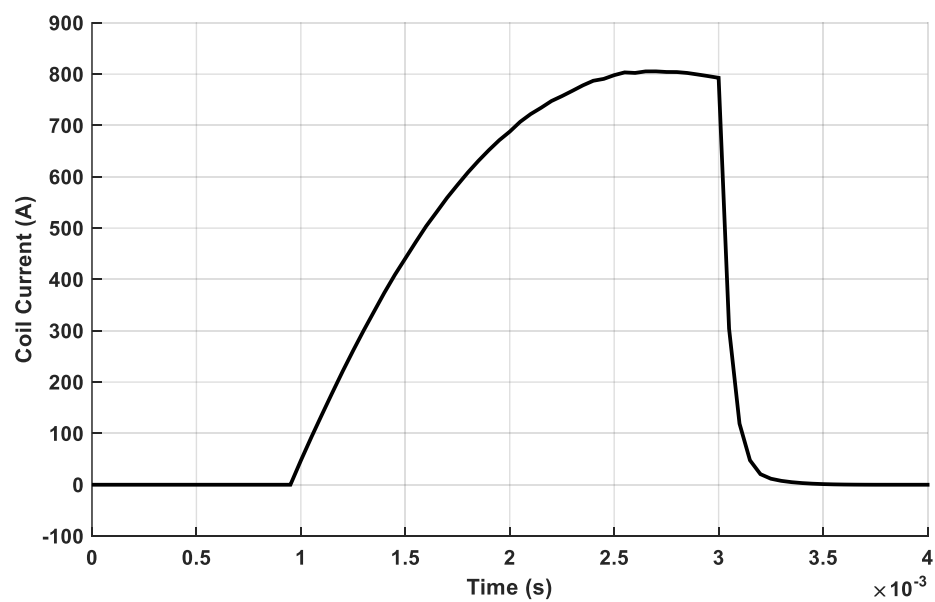
شکل (۴-۱۲): مدار معادل استفاده شده در مدلسازی و طراحی تفنگ رلوکتانسی



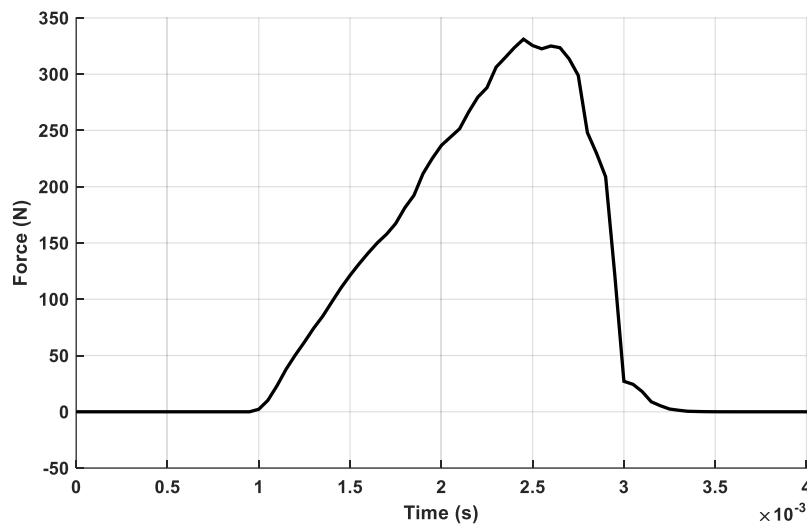
شکل (۴-۱۳): بردار چگالی شار مغناطیسی و نحوه توزیع شار هنگامی که پرتابه درون کوپل قرار دارد



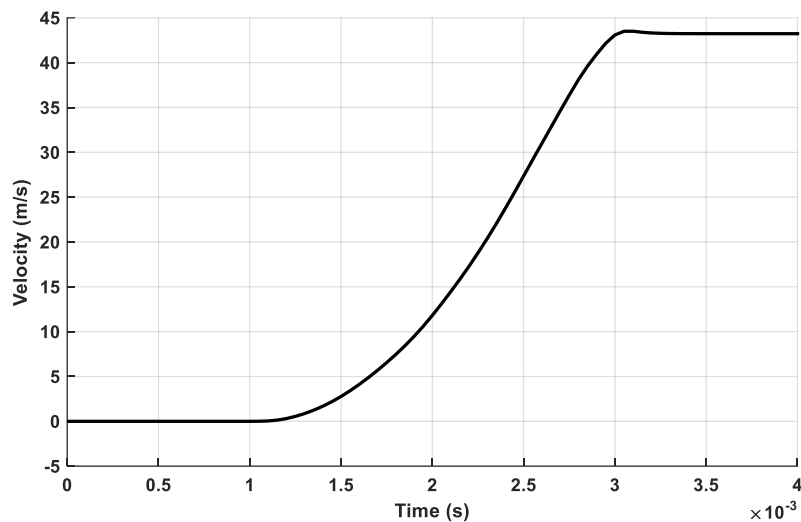
شکل (۴-۱۴): بردار توزیع چگالی جریان



شکل (۴-۱۵): نمودار جریان الکتریکی کوئل



شکل (۴-۱۶): نمودار نیروی وارد بر پرتابه



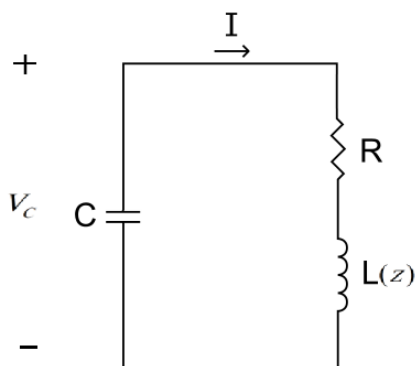
شکل (۴-۱۷): نمودار سرعت پرتابه

## ۴-۲) اعتبار سنجی نتایج

پس از مدلسازی، طراحی کویل، شبیه سازی و مشاهده نتایج حاصل از عملکرد تفنگ رلوکتانسی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود JMag Designer 16، در این قسمت بنا داریم تا با استفاده از روابطی آشنا و ساده تر، به مدلسازی، بررسی و تحلیل رفتار دینامیکی تفنگ کویلی رلوکتانسی طراحی شده و

مشاهده پاسخ‌های دینامیکی سیستم با استفاده از نرم افزار سیمولینک MATLAB بپردازیم. در ضمن، نتایج حاصل از آن هم با نتایج بدست آمده از نرم افزار اجزاء محدود مقایسه و اعتبارسنجی خواهد شد.

ساده‌ترین شکل ممکن مدار معادل سیستم تفنگ کویلی رلوکتانسی در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مدار معادل سیستم تفنگ کویلی رلوکتانسی یک مدار  $RLC$  بسیار ساده است، با این تفاوت که اندوکتانس آن تابعی از مکان و به صورت  $L(z)$  می‌باشد. با استفاده از این شکل، معادلات حاکم بر سیستم به فرم فضای حالت، به صورت زیر نوشته می‌شود:



شکل (۴-۱۸): نمایی بسیار ساده از مدار معادل حاکم بر سیستم تفنگ کویلی رلوکتانسی

$$i = \frac{\lambda}{L(z)} \quad (۴-۱)$$

$$V_C = R \frac{\lambda}{L(z)} + \frac{d\lambda}{dt} \Rightarrow \frac{d\lambda}{dt} = -R \frac{\lambda}{L(z)} + V_C \quad (۴-۲)$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{dL(z)}{dz} \left( \frac{\lambda}{L(z)} \right)^2 = M \frac{dv}{dt} \Rightarrow \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2M} \frac{dL(z)}{dz} \left( \frac{\lambda}{L(z)} \right)^2 \quad (۴-۳)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = -i = -\frac{\lambda}{L(z)} \Rightarrow \frac{dV_C}{dt} = -\frac{\lambda}{C L(z)} \quad (۴-۴)$$

$$\frac{dz}{dt} = v \quad (5-4)$$

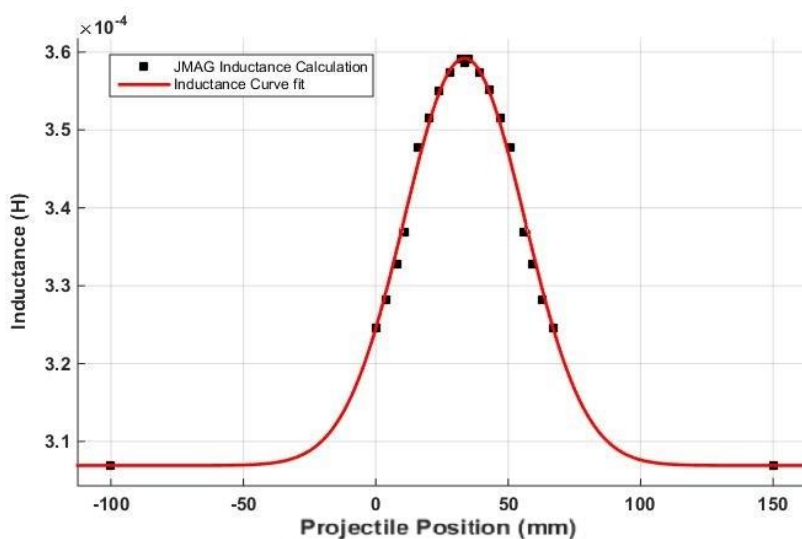
$$i(0) = 0, \lambda(0) = 0, V_c(0) = 320, v(0) = 0, z(0) = 0$$

پیش از حل معادلات فوق، نیازمند داشتن معادله‌ای برای  $L(z)$  می‌باشیم. همانگونه که در فصل گذشته و در بخش ۳-۳-۵ گفته شد، بدست آوردن اندوکتانس به روش تحلیلی کاری بسیار دشوار و پیچیده می‌باشد که با فرض ساده‌سازی مسئله، هرگز جواب دقیق و مطمئنی نخواهد داد. بهترین و مطمئن‌ترین راه محاسبه اندوکتانس، استفاده از روش اجزاء محدود خواهد بود.

به وسیله نرم افزار اجزاء محدود JMAG Designer 16، اندوکتانس هر نقطه با استفاده از رابطه

$$L(z) = \frac{\lambda}{i} \text{ بدست می‌آید. پس از محاسبه اندوکتانس در نقاط مختلف در طول مسیر حرکت پرتابه، با}$$

استفاده از نرم افزار MATLAB، معادله منحنی منطبق بر نقاط  $L$  بدست می‌آید. شکل (۴-۱۹) نشان‌دهنده نحوه برازش منحنی بر روی نقاط بدست آمده می‌باشد.



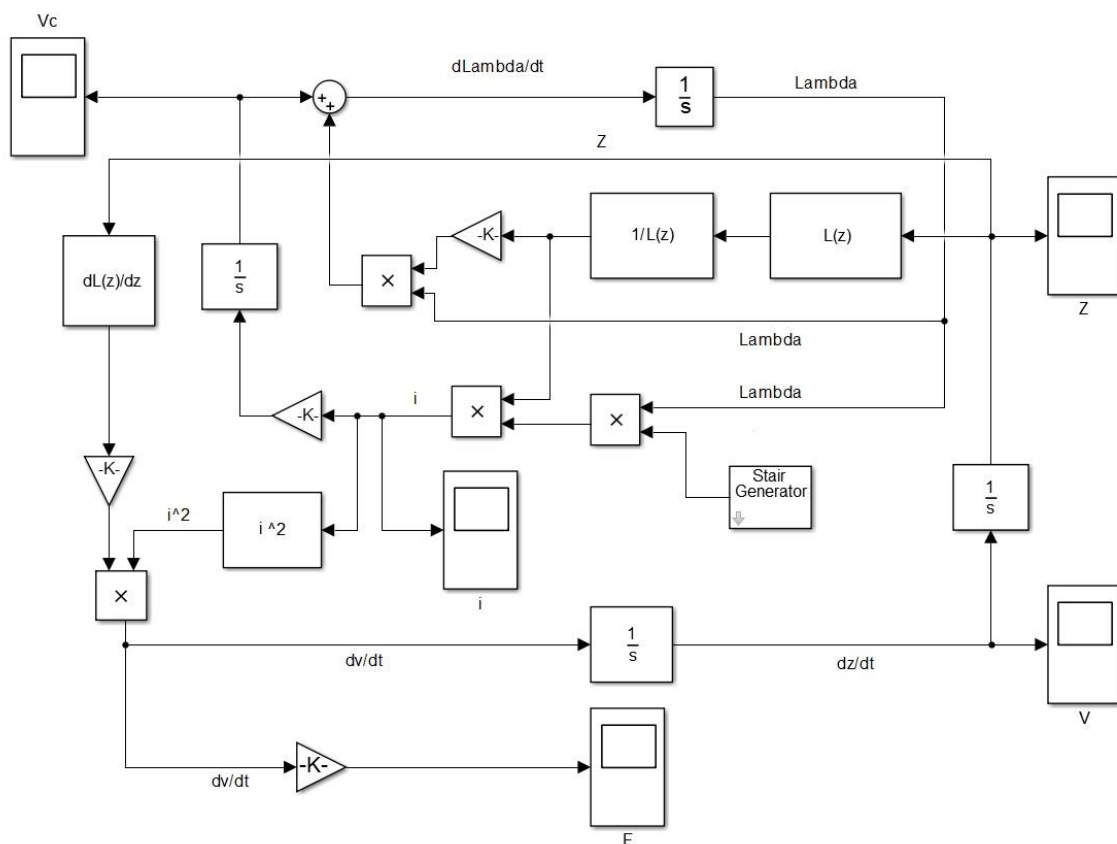
شکل (۴-۱۹): منحنی منطبق بر نقاط بدست آمده با استفاده از نرم افزار MATLAB

معادله منحنی بدست آمده در نرم افزار MATLAB به صورت زیر است:

$$L(z) = k_1 e^{-k_2(z-b)^2} + c$$

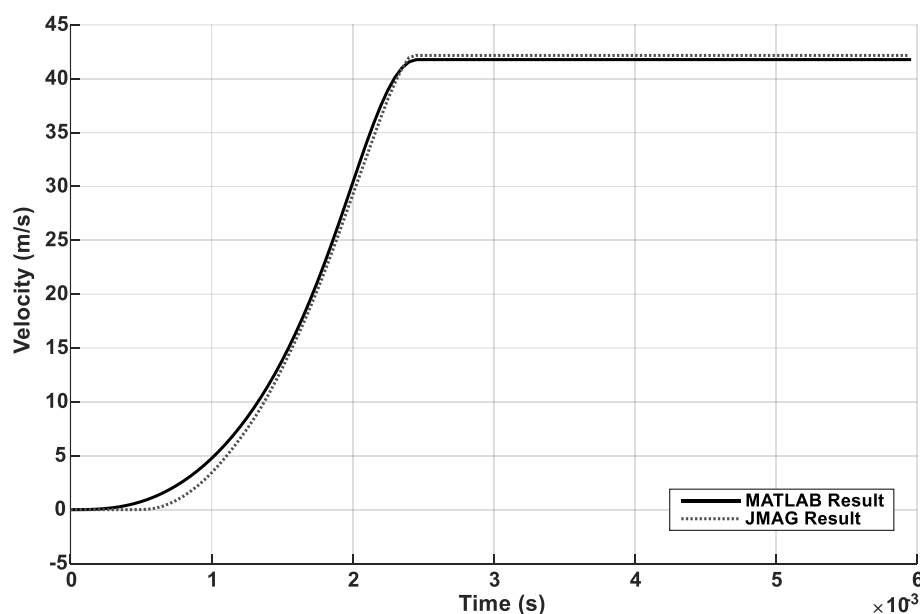
بطوریکه  $k_1 = 5.22 \times 10^{-5}$ ،  $k_2 = 970$ ،  $b = 33.5$  و  $c = 3.06 \times 10^{-4}$  می باشد.

جهت حل معادلات فوق و بدست آوردن پاسخهای دینامیکی سیستم، بلوک دیاگرام معادلات فضای حالت و همچنین معادله  $L(z)$  بدست آمده، با در نظر گرفتن شرایط اولیه، در سیمولینک نرم افزار MATLAB پیاده سازی شده است که در شکل (۴-۲۰) قابل مشاهده است.

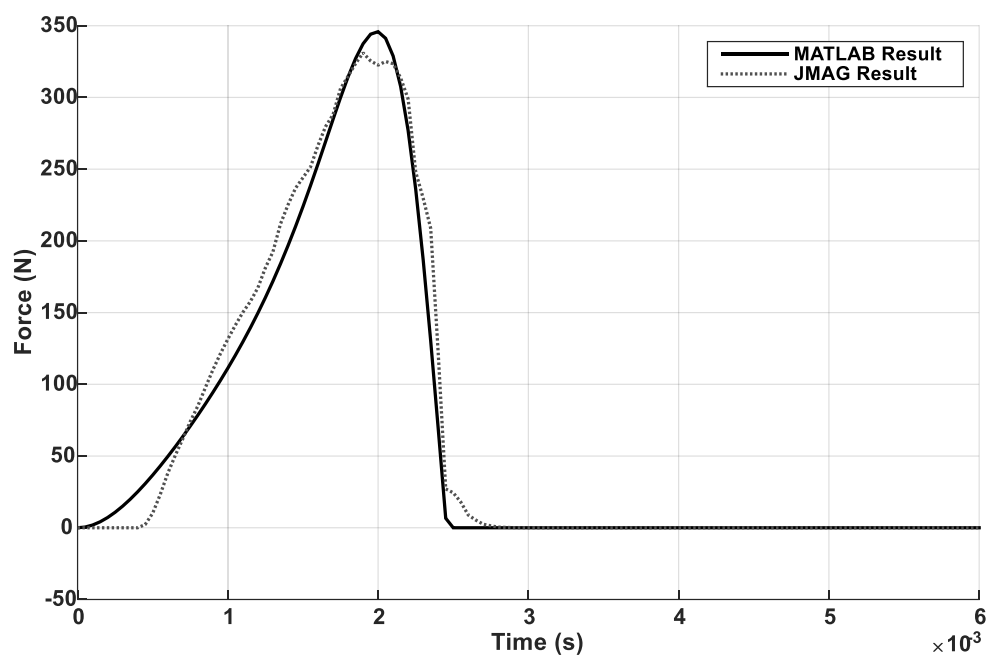


شکل (۴-۲۰): نمایی از بلوک دیاگرامهای سیمولینک نرم افزار MATLAB

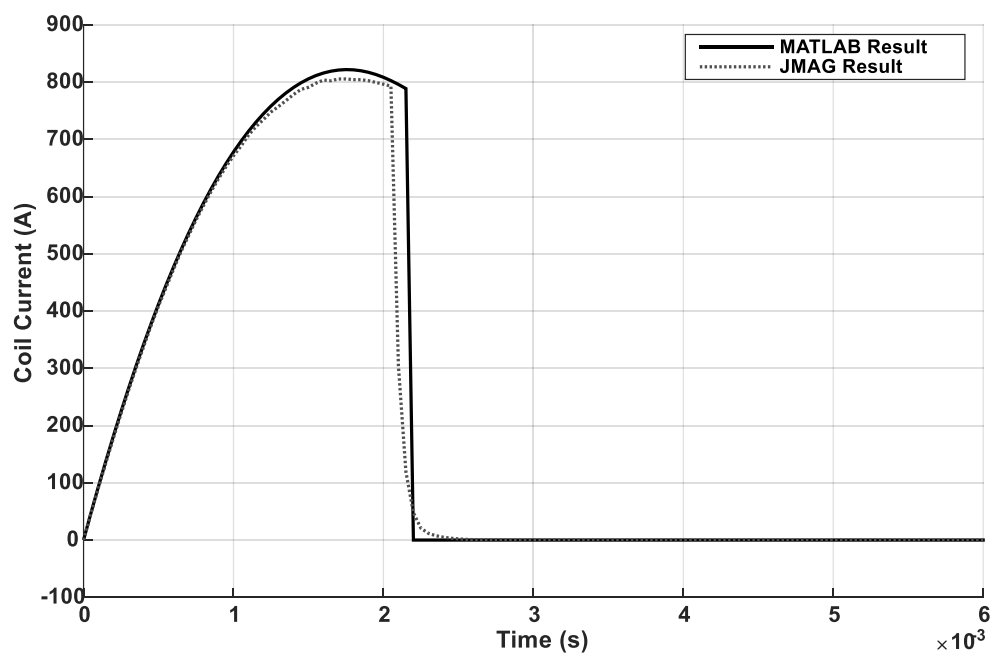
پاسخ‌های دینامیکی سیستم که بصورت نمودارهای سرعت، نیرو و جریان برحسب زمان می‌باشد، بصورت مقایسه‌ای با نتایج JMAG، در شکل‌های (۲۱-۴) - (۲۳-۴) نشان داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به وسیله نرم افزار MATLAB حاکی از مطابقت با دقت نسبتاً راضی کننده‌ای با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی به وسیله نرم افزار اجزاء محدود JMAG می‌باشد. بطوریکه شاهد  $1/8\%$  تفاوت در جریان کویل،  $1/8\%$  تفاوت در سرعت خروجی و  $2/6\%$  تفاوت در نیروی وارد بر پرتابه بوده‌ایم. بنابراین می‌توان از صحت محاسبات و نتایج در نرم افزار اجزاء محدود اطمینان حاصل نمود. علت تفاوت و بیشتر بودن مقدار سرعت و نیرو در MATLAB را می‌توان در چشم‌پوشی از جریان گردابی اندک بر روی پرتابه که در بخش ۳-۱-۴ توضیح داده شد، تلفات اهمی سیم‌پیچی و... دانست.



شکل (۲۱-۴): نمودار سرعت پرتابه بر حسب زمان در JMAG و MATLAB



شکل (۴-۲۲): نمودار نیروی وارد بر پرتابه بر حسب زمان در MATLAB و JMAG



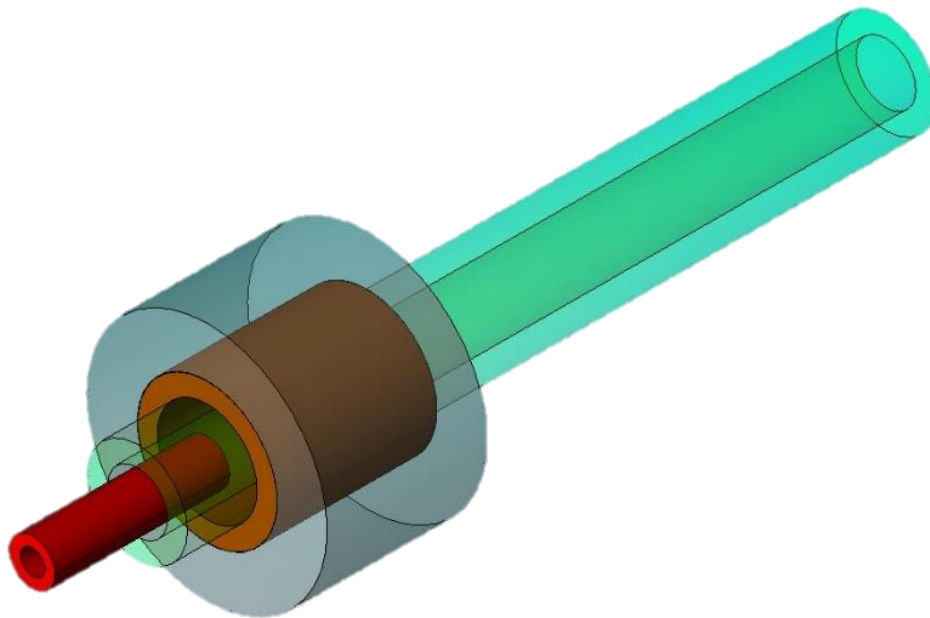
شکل (۴-۲۳): نمودار جریان بر حسب زمان در MATLAB و JMAG



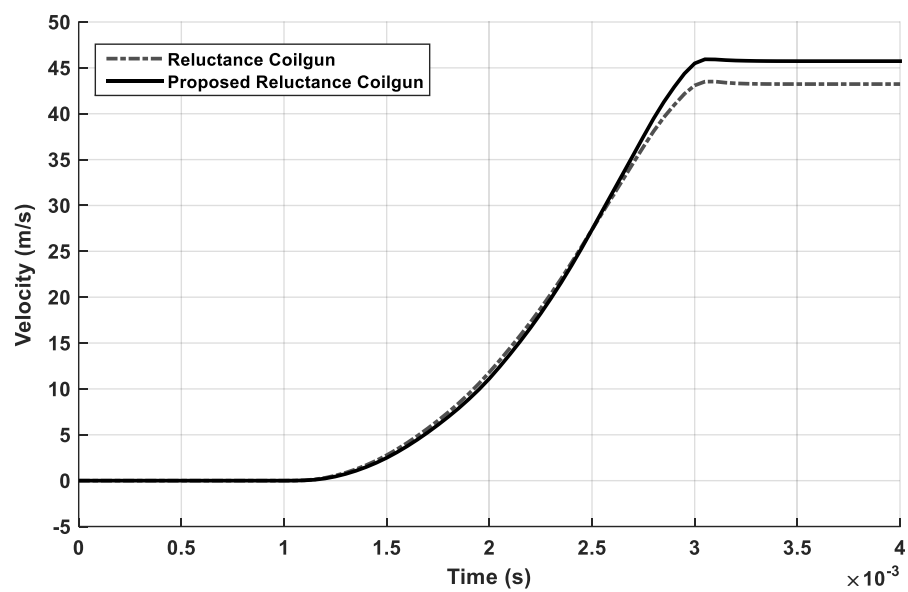
## ۴-۳) بهبود عملکرد

پس از حصول اطمینان از نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نهایی، بر آن شدیم تا با پیاده‌سازی ایده‌ای جدید، عملکرد تفنگ کوپلی رلوکتانسی را ارتقاء بخشیم. از آنجائیکه مسیر شار برگشتی در تفنگ کوپلی رلوکتانسی در هوای اطراف بسته می‌شود، و از آنجائیکه رلوکتانس مسیر در هوا بسیار بیشتر از هسته فرومغناطیس می‌باشد، تصمیم گرفتیم با تعبیه کردن یک پوشش فرومغناطیس به دور هسته، رلوکتانس مسیر را کاهش، اندوکتانس را افزایش و در نتیجه آن نیرو و سرعت خروجی را افزایش دهیم.

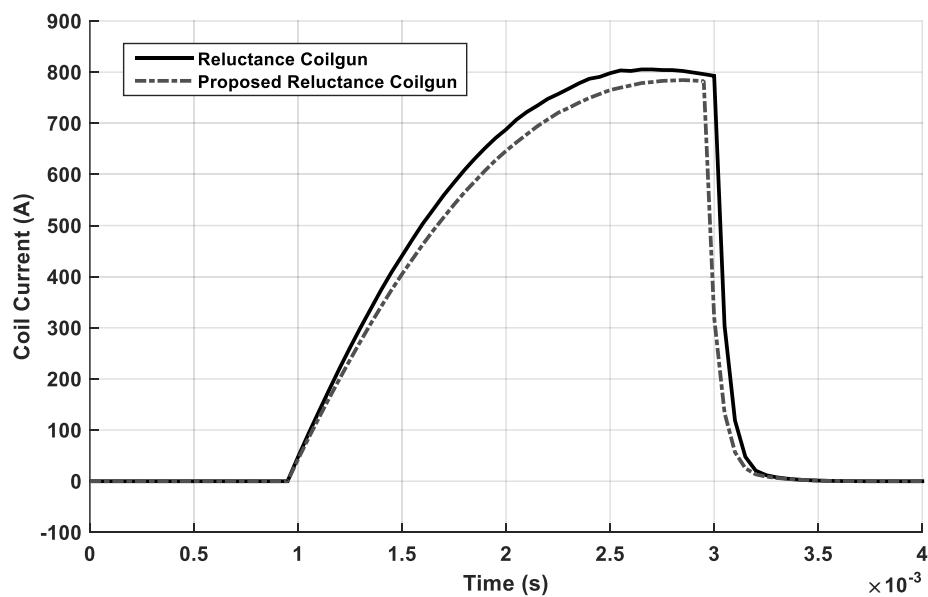
نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و همچنین نتایج مقایسه‌ای با مدل معمولی، در شکل‌های (۴-۲۴) - (۴-۲۷) قابل مشاهده می‌باشد.



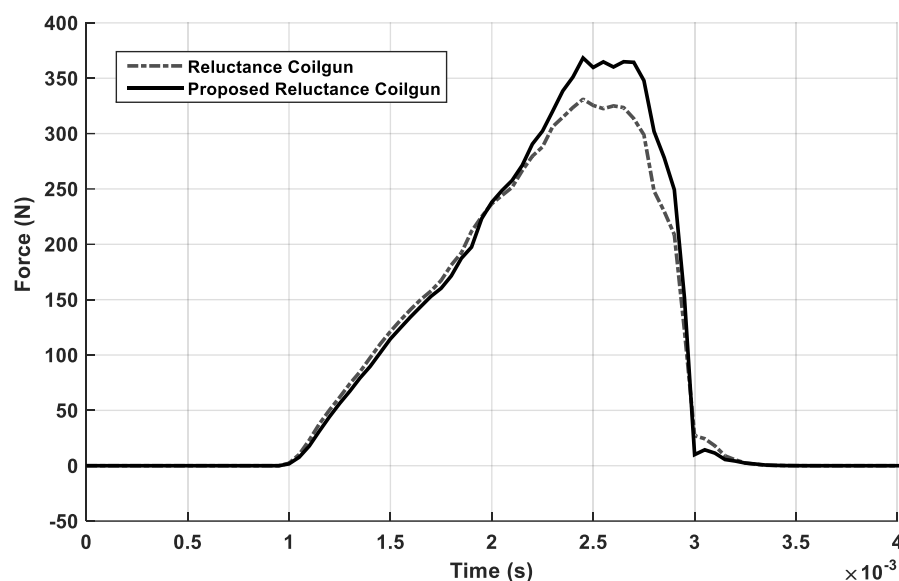
شکل (۴-۲۴): نمایی از تفنگ رلوکتانسی پیشنهادی



شکل (۴-۲۵): نمودار مقایسه‌ای سرعت دو مدل پیشنهادی و معمولی



شکل (۴-۲۶): نمودار مقایسه‌ای جریان دو مدل پیشنهادی و معمولی



شکل (۴-۲۷): نمودار مقایسه‌ای نیرو دو مدل پیشنهادی و معمولی

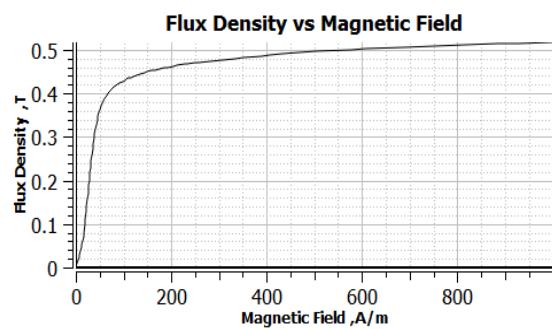
نتایج به وضوح بیانگر بهبود عملکرد سیستم می‌باشد. بطوریکه در مدل پیشنهادی شاهد افزایش ۵/۰۶٪ در سرعت خروجی، ۱۲/۴٪ نیرو و کاهش ۳/۴٪ جریان می‌باشیم. همچنین با توجه به رابطه (۳-۴۶)، راندمان تفنگ از ۹/۱۶٪ به ۱۰/۲۵٪ افزایش خواهد یافت. جهت بررسی تأثیر ضخامت پوشش فرومغناطیس کویل بر عملکرد و سرعت خروجی سیستم، شبیه‌سازی در بازه ۱-۱۰ میلی‌متر ضخامت پوشش کویل انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که جدول (۴-۶) قابل مشاهده است، بیانگر روند نزولی جریان با افزایش ضخامت پوشش کویل، افزایش نیرو و سرعت تا مقدار ۶ میلی‌متر و سپس کاهش آن است.

جدول (۴-۶): تأثیر ضخامت پوشش فرومغناطیس کوپل بر عملکرد سیستم

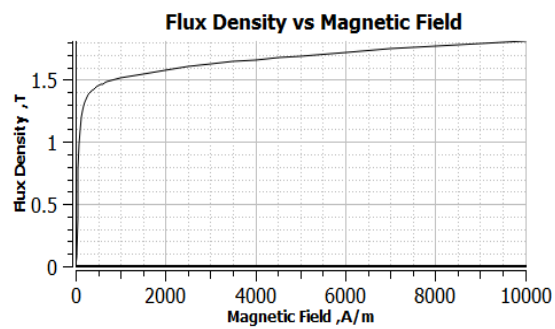
| ضخامت (mm) | سرعت خروجی (m/s) | ماکزیمم نیرو (N) | ماکزیمم جریان کوپل (A) |
|------------|------------------|------------------|------------------------|
| ۱          | ۴۴/۰۸            | ۳۳۷/۳            | ۷۹۸/۸                  |
| ۲          | ۴۴/۴۱            | ۳۳۸/۴            | ۷۹۲/۰۱                 |
| ۳          | ۴۴/۷۲            | ۳۴۱/۰            | ۷۸۲/۶                  |
| ۴          | ۴۵/۰۶            | ۳۴۸/۶            | ۷۷۵/۳                  |
| ۵          | ۴۵/۴۴            | ۳۵۴/۳            | ۷۶۹/۳                  |
| ۶          | ۴۵/۴۷            | ۳۵۵/۶            | ۷۶۲/۵                  |
| ۷          | ۴۵/۴۲            | ۳۵۴/۹            | ۷۶۱/۳                  |
| ۸          | ۴۵/۳۸            | ۳۵۳/۷            | ۷۶۰/۵                  |
| ۹          | ۴۵/۳۵            | ۳۵۳/۱            | ۷۶۰/۰۱                 |
| ۱۰         | ۴۵/۳۳            | ۳۵۲/۴            | ۷۵۹/۸                  |

#### ۴-۴) تأثیر جنس پرتابه بر عملکرد تفنگ

به عنوان مقایسه و بررسی آنچه در بخش ۳-۱-۱ گفته شد، یک پرتابه از جنس فریت و یک پرتابه از جنس فولاد را انتخاب و از آن‌ها به عنوان پرتابه یک تفنگ کوپلی استفاده می‌شود. تمامی پارامترها در دو مدل اعم از ابعاد و جرم یکسان در نظر گرفته می‌شود و تنها تفاوت در جنس دو پرتابه می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر برتری مطلق فولاد است. همانطور که ملاحظه می‌شود تفاوت محسوسی در سرعت خروجی بین دو پرتابه وجود دارد. همانگونه که در شکل (۴-۲۸) ملاحظه می‌گردد، فولاد ضریب نفوذپذیری بالاتری نسبت به فریت دارد، دیرتر به اشباع می‌رود و جهت استفاده در تفنگ کوپلی به عنوان پرتابه بسیار مناسب می‌باشد.

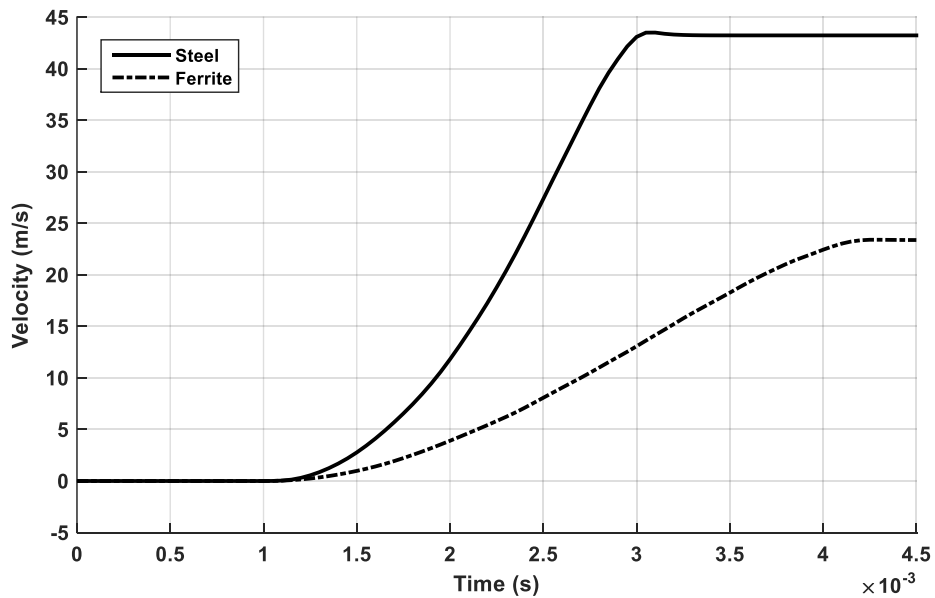


**Ferrite**



**Steel**

شکل (۴-۲۸): نمودار B-H فریت و فولاد



شکل (۴-۲۹): مقایسه سرعت خروجی پرتابه فولاد و فریت



(فصل پنجم)

## **ساخت و آزمایش نمونه عملی**

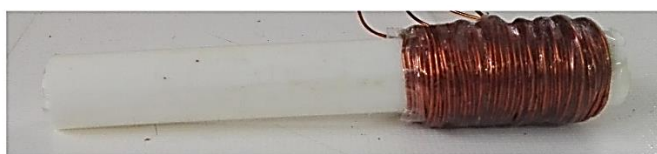
## (۱-۵) نحوه ساخت نمونه عملی

با استفاده از مشخصات جدول (۱-۴) و کویل انتخاب شده در بخش (۳-۱-۴)، نمونه‌ای از یک تفنگ کویلی رلوکتانسی ساخته شده است. با توجه به جریان نسبتاً بالای سیستم، و اینکه تفنگ مورد نظر تک مرحله‌ای می‌باشد، پس از بررسی‌ها و تست‌های صورت گرفته از بین مدل‌های مختلف سوییچ و با توجه به محدودیت اقتصادی، یک کلید مکانیکی جهت قطع و وصل انرژی انتخاب شد. طی تست‌ها و بررسی‌های صورت گرفته در حالت‌های مختلف بر روی کلید، پیک جریان لحظه‌ای قابل تحمل برای کلید، ۱ کیلوآمپر ارزیابی شد. نمونه آزمایشگاهی اجزای تشکیل دهنده این تفنگ در شکل‌های (۱-۵) - (۳-۵) ملاحظه می‌شود.

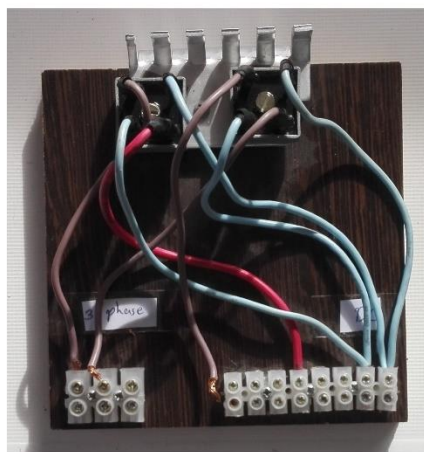


شکل (۱-۵): نمایی از گلوله فولادی تفنگ کویلی رلوکتانسی





شکل (۵-۲): نمایی از خازن، کلید، کوئل و لوله تفنگ کویلی رلوکتانسی



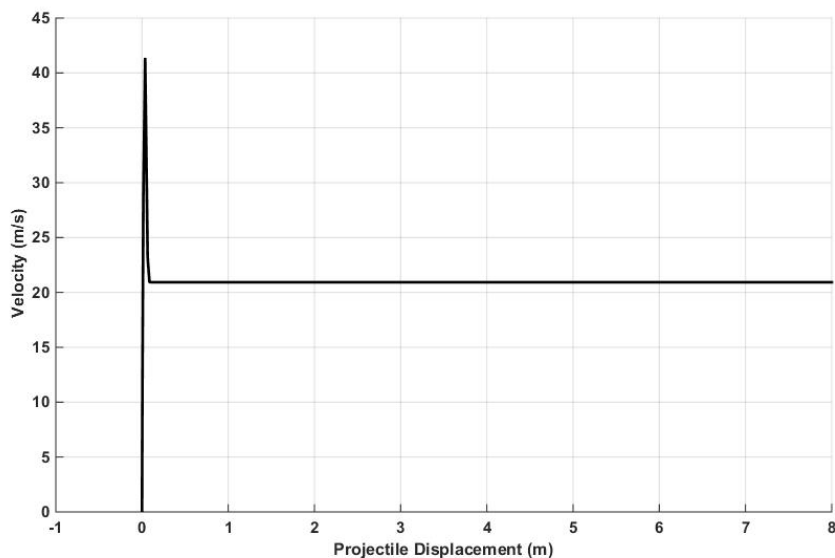
شکل (۵-۳): نمایی از پل دیودی و اتوترانس جهت شارژ خازن تفنگ کویلی رلوکتانسی

همانگونه که در شکل (۱-۵) مشاهده می‌گردد، مطابق با جدول (۱-۴) گلوله‌ای از جنس فولاد در همان ابعاد تراشکاری و ساخته شده است. به عنوان منبع تغذیه سیستم، از یک خازن ۶۸۰۰ میکروفارادی ۴۰۰ ولت کندیل ایتالیا استفاده شده است. همچنین تصاویر مربوط به کلید چدنی قوی که توانایی تحمل جریان بالاتری نسبت به کلیدهای معمولی در بازار دارد و کوئل به همراه لوله در شکل (۲-۵) قابل ملاحظه است. جهت شارژ خازن، از یک اتوترانس استفاده می‌شود. به دلیل اینکه خازن مربوطه باید بصورت DC شارژ شود، میان اتوترانس و خازن یک پل دیودی که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است، قرار می‌گیرد. جهت رعایت نکات ایمنی، در مسیر پل دیودی و خازن یک فیوز قرار داده تا بعد از شارژ، اتوترانس و پل دیودی از مدار خارج شود.

## ۵-۲) نتایج نمونه عملی

مطابق با جدول (۱-۴)، خازن با ولتاژ ۳۲۰ ولت شارژ می‌شود. همچنین لازم به ذکر است کوئل، مقاومتی در حدود ۰,۱۹۶ اهم دارد. با انجام تست‌های مختلف از عملکرد تفنگ و اندازه‌گیری‌های انجام شده، گلوله تفنگ ساخته شده توانست در مدت زمان ۰/۳۵ ثانیه به هدفی که در فاصله ۶/۵ متری خود قرار داشت، با شدت برخورد نماید. با انجام محاسبات ساده و از طریق رابطه  $v = x / t$ ، اینگونه می‌توان دریافت که سرعت متوسط پرتابه چیزی در حدود ۱۸/۵ متر بر ثانیه بوده است.

همانطور که گفته شد در این سیستم از یک کلید مکانیکی استفاده شده است که به واسطه یک اهرم که در بیرون کلید تعبیه شده، قادر است در زمان ۰/۱ ثانیه مدار را قطع و وصل کند. با در نظر داشتن زمان سوییچینگ ۰/۱ ثانیه، شبیه‌سازی تفنگ کوئلی مورد نظر مجدداً انجام شده، نمودار سرعت خروجی سیستم بر حسب مکان گلوله در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): نمودار سرعت - مکان گلوله در شرایط سویچینگ ۰/۱ ثانیه

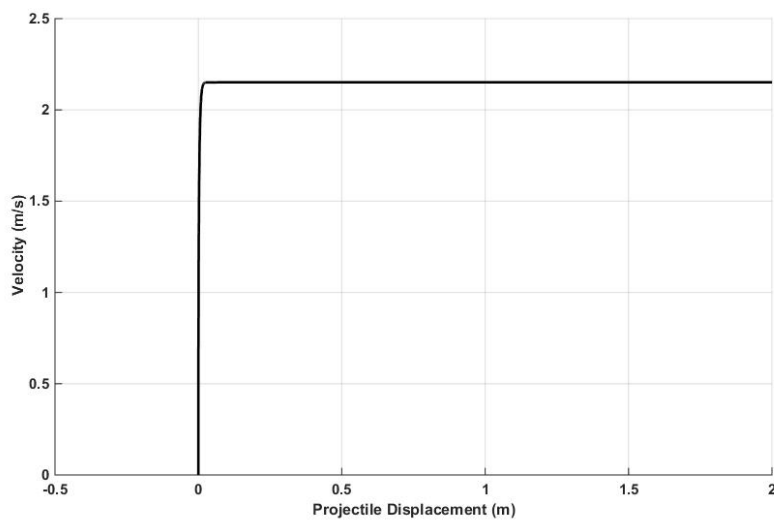
همانگونه که در شکل (۴-۵) مشخص است، در شرایط سویچینگ ۰/۱ ثانیه مطابق با شرایط تست عملی و همچنین در شرایط بدون اصطکاک، ابتدا پیک سرعت برابر ۴۲ متر بر ثانیه (مشابه با حالت سویچینگ بسیار دقیق) داشته و سپس سرعت نهایی گلوله در ۲۰/۹۲ متر بر ثانیه به حالت پایدار خود می‌رسد. با در نظر گرفتن مواردی از قبیل نیروی اصطکاک بین لوله - گلوله و هوا - گلوله و تلفات که در شبیه‌سازی‌ها کاملاً از آن صرف نظر شده است، اختلاف اندک بدست آمده در نتایج میان حالت عملی با حالت شبیه‌سازی، قابل توجیه است.

در مرحله بعدی تست، جهت بررسی تأثیر ظرفیت خازن بر سرعت خروجی سیستم، از یک بانک خازنی متشکل از ۶ خازن ۵۰ میکروفارادی با ولتاژ ۳۲۰ ولت که به صورت موازی مطابق با شکل (۵-۵) بسته شده است، استفاده می‌شود. در این تست، گلوله تفنگ توانست در مدت زمان ۰/۶ ثانیه، به هدفی که در فاصله ۱ متری خود قرار داشت، برخورد نماید. در این حالت، سرعت متوسط پرتابه چیزی در حدود ۱/۶ متر بر ثانیه محاسبه شده است.



شکل (۵-۵): بانک خازنی ۳۰۰ میکروفارادی

با در نظر داشتن زمان سوییچینگ ۰/۱ ثانیه، شبیه‌سازی تفنگ کوپلی مورد نظر با خازن جدید انجام شد. نمودار سرعت خروجی سیستم بر حسب مکان گلوله در شکل (۶-۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که سرعت نهایی گلوله ۲/۱ متر بر ثانیه می‌باشد که با توجه به شرایط ذکر شده، اختلاف سرعت قابل توجیه می‌باشد.



شکل (۶-۵): نمودار سرعت - مکان گلوله در شرایط سوییچینگ ۰/۱ ثانیه با بانک خازنی جدید

همانگونه که در بخش ۲-۳ توضیح داده شد، کاملاً گویا است که در شرایط برابر، بهترین گزینه برای انتخاب خازن، علاوه بر خازنی با ولتاژ بالا، انتخاب خازنی با ظرفیت بالا می‌باشد. نتایج عملی هم گواه بر صحت نکات ذکر شده می‌باشد.



(فصل ششم)

**جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها**

## ۶-۱) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، پس از معرفی نسل جدید پرتاب‌کننده‌ها تحت عنوان پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی، به معرفی انواع، مزایا و معایب آن‌ها نسبت به پرتاب‌کننده‌های مرسوم شیمیایی و... پرداخته شد. سپس دو مدل مشهور و مهم پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی یعنی تفنگ ریلی و تفنگ کوپلی بررسی گردید. در ادامه وارد بحث اصلی پایان‌نامه شده و به بررسی دقیق و جامع تفنگ کوپلی رلوکتانسی اعم از ساختار، تئوری عملکرد، کاربردها، مزایا و... پرداخته شد.

پس از توضیحات و بررسی ملزومات طراحی شامل نحوه انتخاب قطعات و جنس ماده آن‌ها، الگوریتم طراحی اینگونه تفنگ‌ها شامل محاسبات پارامترها و مدلسازی به روش تحلیلی تفنگ رلوکتانسی بیان شد. با در اختیار داشتن یک سری پارامترهای ابعادی تفنگ، به طراحی کوپل یک تفنگ کوپلی رلوکتانسی تک مرحله‌ای پرداخته شد که توانست پرتابه‌ای به جرم ۹ گرم را از حالت سکون، با رعایت سقف جریان مجاز قابل تحمل سیم، کلید و عایق‌های خازن، تا بیشترین سرعت ممکن شتاب دهد. برای این منظور، با استفاده از مشخصات داده شده، توسط نرم افزار اجزاء محدود JMAG Designer 16 و با ارائه یک روش مبتنی بر سعی و خطا، به طراحی کوپل الکترومغناطیسی تفنگ مربوطه پرداخته که ما را به هدف مطلوب برساند. در روش ارائه شده، ابتدا به تفکیک قطر سیم، پس از انتخاب مکان اولیه مناسب پرتابه، شبیه‌سازی در یک طبقه و در طول‌های مختلف انجام شده و طول بهینه هر قطر سیم که دارای بیشترین سرعت خروجی ممکن بود، انتخاب شد. به دلیل عدم وجود یک شتاب هموار ناشی از کوچک بودن ثابت زمانی سیستم و رعایت نشدن حد مجاز جریان، استفاده از یک طبقه سیم‌پیچی نامطلوب ارزیابی شد. پس از بررسی دو روش ممکن جهت رفع مشکل، این نتیجه دریافت شد که باید تعداد دور سیم‌پیچی در طبقات بعدی افزایش یابد. پس از بررسی‌های لازم مشخص شد، با افزایش تعداد طبقات، نیرو و پیرو آن سرعت،



ابتدا تا تعداد طبقه‌ای مشخص افزایش و سپس به دلیل افزایش زیاد مقاومت و کاهش جریان، کاهش می‌یابند. بنابراین در هر قطر سیم تنها یک طبقه وجود خواهد داشت که دارای بیشترین سرعت خروجی ممکن بود.

از میان مدل‌های مطلوب نهایی از جهت سرعت خروجی پرتابه، با در نظر گرفتن تمامی جوانب و محدودیت‌ها، یک مدل به عنوان مدل نهایی انتخاب و نتایج جامع حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ارائه شد. سپس با استفاده از روابط معمول و معروف دینامیکی، معادلات دینامیکی حاکم بر تفنگ رلوکتانسی به فرم فضای حالت نوشته و در نرم افزار سیمولینک MATLAB شبیه‌سازی شد تا از این طریق بتوان نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود را اعتبار سنجی کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به وسیله نرم افزار MATLAB حاکی از مطابقت با دقت نسبتاً راضی کننده‌ای با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با نرم افزار اجزاء محدود می‌باشد. بطوریکه شاهد  $1/8\%$  تفاوت در جریان کوئل،  $1/8\%$  تفاوت در سرعت خروجی و  $2/6\%$  تفاوت در نیروی وارد بر پرتابه بوده‌ایم. بنابراین می‌توان از صحت محاسبات و نتایج در نرم افزار اجزاء محدود اطمینان حاصل نمود. علت تفاوت و بیشتر بودن مقدار سرعت و نیرو در MATLAB را می‌توان در چشم‌پوشی از جریان گردابی اندک بر روی پرتابه، تلفات اهمی سیم‌پیچی و... دانست.

پس از آن، با ارائه ایده‌ای جدید که شامل تعبیه کردن یک پوسته فرومغناطیس به دور کوئل بوده است، مسیر بسته شدن شار بهبود یافته و این مسئله منجر به کاهش رلوکتانس مسیر و در نتیجه افزایش شار، نیروی وارد بر پرتابه و سرعت خروجی می‌شود. نتایج به وضوح بیانگر بهبود عملکرد سیستم می‌باشد. بطوریکه در مدل پیشنهادی شاهد افزایش  $5/06\%$  سرعت خروجی،  $12/4\%$  نیرو و کاهش  $3/4\%$  جریان می‌باشیم.

در پایان نمونه عملی تفنگ رلوکتانسی طراحی شده با استفاده از یک کلید مکانیکی که قادر به تحمل جریان تا سقف ۱ کیلوآمپر و قطع و وصل انرژی در مدت ۰/۱ ثانیه است، ساخته شد. با شبیه‌سازی مجدد تفنگ در حالت قطع و وصل جریان در ۰/۱ ثانیه و مقایسه با نتایج عملی بدست آمده از عملکرد تفنگ، شاهد سرعت خروجی ۱۸/۵ متر بر ثانیه در نمونه عملی و ۲۰/۹ متر بر ثانیه در نمونه شبیه‌سازی شده بوده‌ایم. پس از آن با تغییر ظرفیت بانک خازنی از ۶۸۰۰ میکروفاراد به ۳۰۰ میکروفاراد، در پی بررسی تأثیر ظرفیت خازنی بر عملکرد و راندمان سیستم شدیم. در این حالت شاهد سرعت خروجی ۱/۶ متر بر ثانیه در نمونه عملی و ۲/۱ متر بر ثانیه در نمونه شبیه‌سازی شده بوده‌ایم. با در نظر گرفتن مواردی از قبیل نیروی اصطکاک بین لوله - گلوله و هوا - گلوله و تلفات که در شبیه‌سازی‌ها کاملاً از آن صرف نظر شده است، اختلاف اندک بدست آمده در نتایج میان حالت عملی با حالت شبیه‌سازی، قابل توجیه است. نکته جالب توجه کاهش شدید سرعت خروجی با کاهش ظرفیت خازنی سیستم می‌باشد که نشان‌دهنده ضرورت استفاده از خازنی با ظرفیت بالا در کنار ولتاژ بالا می‌باشد.

## ۶-۲) پیشنهادهایی برای مطالعات آینده

در این پایان‌نامه، هدف طراحی بر افزایش سرعت خروجی سیستم از طریق طراحی کوئل مناسب بنا نهاده شد. می‌توان در پژوهش‌های بعدی بطور ویژه‌تر بر روی جنس ماده پرتابه، ابعاد و شکل خاص آن در طراحی تفنگ و تأثیر آن بر روی راندمان سیستم و سرعت خروجی و همچنین مطالعات حرارتی پرتابه فعالیت نمود. همچنین ابعاد لوله تفنگ و تأثیرات فاصله هوایی، مطالعات ویژه بر روی منبع تغذیه قوی و قابل حمل، سوییچینگ سیستم، پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت یافتن یک طراحی بهینه و... از جمله مواردیست که می‌توان در طرح‌های پژوهشی آینده بر روی آن‌ها فعالیت نمود.

(فصل هفتم)

**مراجع**

- [1] Hoyle A., (1999), PhD. thesis, "Investigation of flat capacitor discharge electromagnetic launchers", Department of Electronic and Electrical Engineering, Loughborough University.
- [2] S. W. Kim, H. K. Jung, and S. Y. Hahn, (1994), "An optimal design of capacitor-driven coilgun," IEEE Trans. Magn., vol. 30, no. 2, pp. 207–211.
- [3] "ORBITAL VECTOR HOME PAGE." [Online]. Available: <http://www.orbitalvector.com/>. [Accessed: 31-Dec-2017].
- [4] I. R. McNab, (1999), "Early electric gun research," IEEE Trans. Magn., vol. 35, no. 1, pp. 250–261.
- [5] K. Birkeland. (1902), " On a new electric current breaker: Preliminary notice (Videnskabselskabets Skrifter. M.-N. Kl)," J. Dybwad, A. W. BrÄgger, ASIN: B0008D3GGO, no. 11.
- [6] A. Egeland, (1989), "Birkeland's electromagnetic gun: a historical review," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 17, no. 2, pp. 73–82.
- [7] H. D. Fair, (1982), "Electromagnetic Propulsion: A New Initiative," IEEE Trans. Magn., vol. 18, no. 1, pp. 4–6.
- [8] F. Young , and W. Hughes, (1982), "Rail and armature current distributions in electromagnetic launchers," IEEE Trans. Magn., vol. 18, no. 1, pp. 33–41.
- [9] R. Marshall, (1982), "The TAERF scientific railgun theoretical performance," IEEE Trans. Magn., vol. 18, no. 1, pp. 11–15.
- [10] J. Kotas, C. Guderjahn, and F. Littman, (1986), "A parametric evaluation of railgun augmentation," IEEE Trans. Magn., vol. 22, no. 6, pp. 1573–1577.
- [11] J. Kotas, C. Guderjahn, and F. Littman, (1986), "A parametric evaluation of railgun augmentation," IEEE Trans. Magn., vol. 22, no. 6, pp. 1573–1577.
- [12] J. H. Beno and W. F. Weldon, (1989), "An investigation into the potential for multiple rail railguns," IEEE Trans. Magn., vol. 25, no. 1, pp. 92–96.

[۱۳] احترام م. نجفی نوکاشتی م. باقری فرد ا. و باقری فرد م، (۱۳۹۴)، "تحلیل و بررسی پرتابه های مغناطیسی و طراحی سلاح مغناطیسی"، چهارمین همایش سراسری علوم و مهندسی دفاعی در سپاه، تهران، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین، دانشکده علوم و مهندسی دفاعی

- [14] "Coilgun Systems." [Online]. Available: <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/index.html>. [Accessed: 31-Dec-2017].
- [15] Y. Ko, J. Dagdagan, and S. Nanavati, (2013), ECE445 - Senior Design Project Lab, "Multistage Coil Gun," Department of Electrical and Computer Engineering, University of ILLINOIS at URBANA.
- [16] M. Spann, S. Pratap, W. Brinkman, D. Perkins, and R. Thelen, (1986), "A rapid fire, compulsator-driven railgun system," IEEE Trans. Magn., vol. 22, no. 6, pp. 1753–1756.
- [17] M. Werst, W. Brinkman, and M. Spann, (1986), "Fabrication of a compensated pulsed alternator for a rapid fire railgun system," IEEE Trans. Magn., vol. 22, no. 6, pp. 1812–1816.
- [18] M. Werst, W. Brinkman, and M. Spann, (1986) "Fabrication of a compensated pulsed alternator for a rapid fire railgun system," IEEE Trans. Magn., vol. 22, no. 6, pp. 1812–1816.
- [19] "ORBITAL VECTOR HOME PAGE." [Online]. Available: <http://www.orbitalvector.com/>. [Accessed: 31-Dec-2017].
- [20] D. A. Bresie and J. A. Andrews, (1991), "Design of a reluctance accelerator," IEEE Trans. Magn., vol. 27, no. 1, pp. 623–627.
- [21] F. Daldaban and V. Sari, (2014), "Design and implementation of a three-coil linear reluctance launcher," 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, pp. 1084–1088, Antalya, Turkey.
- [22] "ResearchGate | Share and discover research." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/>. [Accessed: 31-Dec-2017].

- [23] B. Zhu, J. Lu, J. Wang, and S. Xiong, (2017), “A Compulsator Driven Reluctance Coilgun-Type Electromagnetic Launcher,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 9, pp. 2511–2518.
- [24] J. L. Rivas-Camacho, M. Ponce-Silva, and V. H. Olivares-Peregrino, (2016) “Experimental results concerning to the effects of the initial position of the projectile on the conversion efficiency of a reluctance accelerator,” 13th International Conference on Power Electronics (CIEP), pp. 92–97, Guanajuato, Mexico.
- [25] H. Xiang, B. Lei, Z. Li, and K. Zhao, (2013), “Design and Experiment of Reluctance Electromagnetic Launcher With New-Style Armature,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 1066–1069.
- [26] G. W. Slade, (2005), “A simple unified physical model for a reluctance accelerator,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 11, pp. 4270–4276.
- [27] J. He, E. Levi, Z. Zabar, and L. Birenbaum, (1989), “Concerning the design of capacitively driven induction coil guns,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 17, no. 3, pp. 429–438.
- [28] D. M. Wang, P. Liu, H. Q. Liu, J. J. Cheng, and Y. M. Zhu, (1999), “The design and structural analysis of a coilgun for low acceleration of heavy loads,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 1, pp. 160–165.
- [29] Z. Su et al., (2015), “Investigation of Armature Capture Effect on Synchronous Induction Coilgun,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 5, pp. 1215–1219.
- [30] T. Zhang et al., (2013), “Experimental Results From a 4-Stage Synchronous Induction Coilgun,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 1084–1088.
- [31] M. Aubuchon et al., (2005), “Results from Sandia National Laboratories / Lockheed Martin Electromagnetic Missile Launcher (EMML),” *IEEE Pulsed Power Conference*, pp. 75–78, Monterey, CA, USA.
- [32] T. Zhang et al., (2013), “Design and Testing of 15-Stage Synchronous Induction Coilgun,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 1089–1093.

- [33] M. A. Abdalla, and H. M. Mohamed, (2016), "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.
- [34] M. Cowan, E. Cnare, B. Duggin, R. Kaye, and T. Tucker, (1986), "The reconnection gun," IEEE Trans. Magn., vol. 22, no. 6, pp. 1429–1434.
- [35] L. Gherman, M. Pearsica, C. Strimbu, and C. G. Constantinescu, (2011), "Induction Coilgun Based on 'E-Shaped' Design," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no. 2, pp. 725–729.
- [36] K. Chan, G. Clark, D. Helmlinger, and D. Ng, (2013), "Electromagnetic Coil Gun," Department of Electrical and Computer Engineering, Rutgers School of Engineering.
- [37] E. R. Stauffacher, (1928), "Short-time Current Carrying Capacity of Copper Wire," General Electric Review, vol. 31, No 6.
- [38] D. Brooks, and J. Adam, (2015), "PCB Trace and Via Currents and Temperatures:: The Complete Analysis", vol. 1, no. 1, ISBN-10: 1530389437.
- [39] C. Lanczos, (1970), "The Variational Principles of Mechanics", vol. 1, no. 4, ISBN-10: 9780486650678, Dover, New York.

## Abstract

In this thesis, while presenting a design process and analytical relationships to investigate the behavior of the Reluctance Coilgun in the transient state, a coil design of a single-stage sample of this gun is being dealt with. This gun will be able to accelerate a 9 *gr* projectile, from stasis mode to maximum possible velocity, in compliance with maximum current limit and toleearable for the components of the gun. Also, the effect of changing the coil parameters of the gun using finite element software JMAG-Designer 16 has been analyzed and then the results by MATLAB software has been validated. The design process is based on the proposed trial and error method, which will be described in details and the results of its simulations will be presented. Afterward, with the introduction of a new idea, the performance of the Reluctance Coilgun is improved. Finally, a practical gun is designed and constructed, and the results of practical experiments and its comparison with the results of simulations will be evaluated and analyzed.

Keywords: Electromagnetic Launchers, Reluctance Coilguns, Electromagnetic Coil, Design, Finite Element Method.





**Faculty Electrical Engineering and Robotic**

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Design, Manufacturing and Performance testing of a Reluctance Coilgun**

**By: Vahid Mansouri Fard**

**Supervisor:**

Dr. Ahmad Darabi

**Advisor:**

Dr. Amir Hasannia Kheibari

**January 2018**