
3D Simulation of the Armature Motion in Electromagnetic Rail Launchers Using the Finite Element Method

I. Rahber Aysk, A. Dehestani Kalagar^{*}, M. R. Alizadeh Pahlavani

^{*} Assistant Professor, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 03/10/2020; Accepted: 05/02/2022)

Abstract

In the vast majority of earlier researches on electromagnetic rail launchers, either a two-dimensional analysis has been performed by finite element simulation, or in the case of a three-dimensional study, the armature and projectile motions have not been considered simultaneously. Due to the importance of the subject and the need to carefully study the behavior of this type of electromagnetic launchers, in this research, the simulations and analysis are performed in a completely three-dimensional manner, taking into account the armature motion. In this paper, two solid armature electromagnetic rail launchers, which have different geometry and dimensions, are simulated and analyzed in a completely three-dimensional manner, taking into account the armature motion, and comparisons are made in terms of different physical quantities. The main quantities in electromagnetic rail launchers include electric current density distribution, magnetic flux density distribution, inductance gradient, force and pressure on armature and rails, muzzle velocity and heat distribution, which are also changed by changing the geometry of the armature. In the simulations, the powerful COMSOL Multiphysics software is utilized, which has the ability to solve the problems involving several different physical phenomena, using the finite element analysis (FEM) method. Finally, according to the results of the simulations, the necessary analysis and comparisons are made and the relative superiority of each of the structures under study in terms of the above quantities is demonstrated.

Keywords: Electromagnetic Launcher (EML), Railgun, Finite Element Method (FEM), Inductance Gradient.

^{*} Corresponding author E-mail: A_dehestani@mut.ac.ir

شبیه‌سازی سه بعدی حرکت آرمیچر در پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی ریلی به روش اجزاء

محدود

ایمان رهبر آیسک^۱، آرش دهستانی کلاگر^{۲*}، محمدرضا علیزاده پهلوانی^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

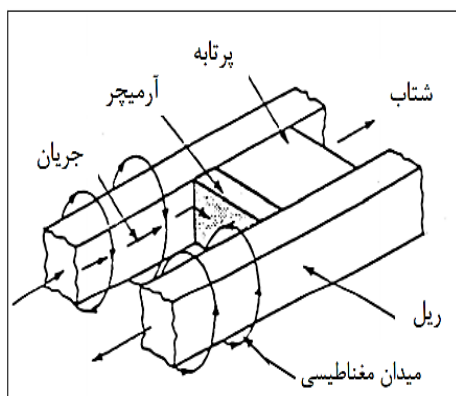
(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۷)

چکیده

در اکثر قریب به اتفاق تحقیقات پیشین انجام شده بر روی پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی ریلی، یا مطالعه دو بعدی از طریق شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود صورت گرفته است؛ و یا در صورت مطالعه سه بعدی، حرکت آرمیچر و پرتابه به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته نشده است. با توجه به اهمیت موضوع و لزوم مطالعه دقیق رفتار این نوع از پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی، در این مقاله شبیه‌سازی‌ها و مطالعات به‌صورت کاملاً سه بعدی و همراه با در نظرگیری حرکت آرمیچر انجام شده است. در این مقاله، دو پرتابگر الکترومغناطیسی ریلی با آرمیچر جامد، که دارای هندسه و ابعاد مختلف می‌باشند، به‌صورت کاملاً سه بعدی و همراه با حرکت آرمیچر، شبیه‌سازی و تحلیل شده و از منظر کمیت‌های فیزیکی مختلف با یکدیگر مقایسه می‌گردند. کمیت‌های اساسی در پرتابگرهای الکترومغناطیسی ریلی شامل توزیع چگالی جریان الکتریکی، توزیع چگالی شار مغناطیسی، گرادیان اندوکتانس، نیرو و فشار وارد بر آرمیچر و ریل‌ها، سرعت دهانه و توزیع حرارت می‌باشند که با تغییر هندسه و ابعاد ریلگان این کمیت‌ها نیز دستخوش تغییر می‌شوند. در شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار قدرتمند COMSOL Multiphysics استفاده شده است که دارای توانایی حل مسائل درگیر با چند پدیده فیزیکی مختلف، به روش تحلیل اجزاء محدود (FEM) می‌باشد. در نهایت، با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، تحلیل و مقایسه‌های لازم صورت گرفته و برتری نسبی هر یک از ساختارهای تحت مطالعه، از منظر کمیت‌های یاد شده در بالا ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: پرتاب کننده الکترومغناطیسی (EML)، ریلگان، روش اجزاء محدود (FEM)، گرادیان اندوکتانس

تغذیه باز می‌گردد و سبب ایجاد میدان مغناطیسی قوی در اطراف ریل‌ها می‌شود. با عبور جریان از آرمیچر، این قسمت به یک هادی حامل جریان در میدان مغناطیسی تبدیل شده و نیروی رانش حاصل از برهم‌کنش میدان مغناطیسی و هادی حامل جریان، سبب به جلو راندن آرمیچر می‌شود.



شکل (۱): دیاگرام شماتیکی یک ریلگان ساده

در سال ۱۹۸۰ اهمیت ریلگان و نقاط ضعف آن توسط هنری کولم مورد بحث و بررسی قرار گرفت. او دریافت که ابتدایی‌ترین

پرتاب کننده‌های الکترومغناطیسی چندین و چند سال است که مورد مطالعه و پژوهش بوده و کماکان نیز روی انواع مختلف آن و بخش‌های مختلف هر یک از آن‌ها ادامه دارد. یکی از مهم‌ترین این پرتابگرها که در عین حال ساختار کلی نسبتاً ساده‌ای دارد، پرتابگر الکترومغناطیسی ریلی یا به اصطلاح ریلگان می‌باشد که نمونه‌های عملیاتی با عملکرد مناسب از این سامانه در بعضی کشورها ساخته و بهره برداری نیز شده است. شکل (۱) دیاگرام شماتیکی یک ریلگان ساده را نشان می‌دهد. قسمت‌های اصلی یک ریلگان شامل ریل‌های اصلی و کمکی، آرمیچر و پرتابه، عایق‌ها، پوسته، منبع تغذیه، سوئیچ‌ها و نگهدارنده‌ها می‌باشد. سازوکار عملکرد یک ریلگان ساده بدین صورت است که با اتصال ریل‌های هادی به یک منبع تغذیه پالسی ولتاژ بالا، شدت جریانی با آمپر بالا وارد یکی از ریل‌ها شده و پس از عبور از آرمیچر، از طریق ریل دیگر به طرف منبع

آن می باشد. همچنین او دریافت که مقدار گرادیان اندوکتانس با مقدار پیک جریان تغییر می کند [۷]. بوک کی کیم در سال ۱۹۹۹ بر روی اثر هندسه ریل و آرمیچر، روی توزیع چگالی جریان و گرادیان اندوکتانس تحقیقاتی انجام داد. او ثابت کرد که لبه های کنتاکت بین ریل و آرمیچر از مهم ترین پارامترهای هندسی برای رسیدن به مسیر با پایین ترین اندوکتانس می باشد [۸]. جی گالانت در سال ۲۰۰۳ تحقیقات زیادی در مورد محاسبه نیرو و فشار وارد بر ریل ها انجام داد. در مقاله ارائه شده توسط ایشان، سه نوع ساختار با ریل کمکی (استوانه ای با یک جفت ریل اضافی، مستطیلی با یک جفت ریل اضافی و مستطیلی با دو جفت ریل اضافی)، با استفاده از روش اجزای محدود مورد مطالعه و شبیه سازی قرار گرفت [۹]. اصغر کشتکار در سال ۲۰۰۵ با استفاده از روش المان محدود بررسی نمود که چگونه ابعاد ریل ها و فاصله بین آن ها روی توزیع چگالی جریان، چگالی فلوئی مغناطیسی و گرادیان اندوکتانس ریل ها تأثیر می گذارد. او با تغییر دادن طول و عرض و فاصله بین ریل ها، گرادیان اندوکتانس ریل ها را به دست آورد. وی پیشنهاد داد که برای افزایش گرادیان اندوکتانس، ضخامت و عرض ریل ها باید کاهش پیدا کند؛ در حالی که فاصله بین ریل ها باید افزایش پیدا نماید [۱۰]. برایان ام سی دانیل در سال ۲۰۰۶ انواع مختلف ریلگان، با قابلیت سرعت پرتاب بالا را مورد بررسی قرار داد. او نشان داد که جهت بهبود توزیع میدان مغناطیسی بین ریل ها، یک ریل اضافی می تواند به صورت موازی با ریل اول قرار گیرد. او همچنین مقایسه ای بین ریلگان ها با سامانه های تغذیه مختلف انجام داد. در تحقیق فوق، پیشنهاد شده است که ریلگان با تغذیه توزیع شده، به دلیل داشتن تلفات سلفی پایین تر، کاراتر از ریلگان با تغذیه از دهانه می باشد. وی این موضوع را به روش شبیه سازی توسط نرم افزار Pspice اثبات نمود و نتایج تحقیق را با نتایج حاصل از یک آزمایش مورد اثبات قرار داد [۱۱]. در سال ۲۰۰۸ آقایان ینگ وان و جیانگ زانگ مفهوم جدید ریلگان چند دور را با چند زوج ریل و چند آرمیچر و یک منبع تغذیه واحد ارائه نمودند [۱۲]. یوجی ژانگ و ران در سال ۲۰۱۱ نوع دیگری از ریلگان چند دور را که توانمندی پرتاب هم زمان دو پرتابه مستقل را داشت، مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. در سال ۲۰۱۶ یوتاو لو و گنگ ون و سه تن دیگر، مدلی محاسبه ای را با در نظر گرفتن مقاومت تماس بین آرمیچر و ریل ها، اثر پوستی و نیروی اصطکاک برای ریلگان و به منظور تحلیل مشخصات توزیع تلفات انرژی ارائه کردند. ایشان در ابتدا جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مقایسه ای بین نتایج حاصل از محاسبات و نتایج آزمایشگاهی انجام داده و سپس تلفات انرژی سامانه ریلگان را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و

محدودیت ریلگان تلف شدن انرژی ذخیره شده، به شکل قوس الکتریکی در دهانه، در حین پرتاب می باشد. محدودیت دیگر نیز تخریب ریل ها و سایر تجهیزات در حین اعمال جریان بالا است. به علاوه، او دریافت که طول ریلگان توسط تلفات مقاومتی و سلفی محدود می گردد. در این تحقیق پیشنهاد شده است که جهت غلبه بر این محدودیت ها ریلگان ها می توانند به صورت سری وصل شوند [۱]. جیمز و جنی در سال ۱۹۸۴ آزمایشی را برای مقایسه گرادیان اندوکتانس یک ریلگان ساده با یک ریلگان دو دور، با پرتابه و منبع تغذیه یکسان انجام دادند و به نتایج بسیار جالبی رسیدند. آنان دریافتند زمانی که نسبت ارتفاع به طول ریل ها حدود ۱/۳۳ باشد، گرادیان اندوکتانس ریلگان دو دور حدود بیش از سه برابر گرادیان اندوکتانس ریلگان ساده خواهد بود و زمانی که نسبت ارتفاع به طول ریل ها حدود ۳/۳۳ باشد، گرادیان اندوکتانس ریلگان دو دور، حدود بیش از دو برابر گرادیان اندوکتانس ریلگان ساده خواهد بود [۲]. در همین راستا، جری کریسک در سال ۱۹۸۴ چند پارامتر کلیدی ریلگان نظیر گرادیان اندوکتانس و توزیع دما در ریل ها را با استفاده از روش اختلاف محدود به دست آورد. همچنین، روش الکتریکی فشرده را جهت حصول جریان ریل ها و موقعیت پرتابه بر حسب زمان، به کار گرفت. در این پژوهش نشان داده شده است که مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه گیری شده با هم به خوبی مطابقت دارند [۳]. آتکینسون در سال ۱۹۸۹ با استفاده از نرم افزار المان محدود MEGA توزیع چگالی جریان را در ریل و آرمیچر مکعبی و C شکل به صورت دو بعدی و سه بعدی به دست آورد. او دریافت که در لبه های داخلی بین ریل و آرمیچر دما بسیار بالا می رود [۴]. آنتونی و برایان در سال ۱۹۹۳ بررسی کردند که برای پرتاب پرتابه های با نسبت طول به قطر بالاتر از ۲۰، بازده پرتاب کننده معمولی پایین می آید و برای توزیع بهتر نیروی شتاب دهنده روی پرتابه، طرح استفاده از ریلگان با ریل های چند دور و استفاده از پرتابه های چند تایی را مورد بررسی قرار دادند [۵]. فرد چارلز در سال ۱۹۹۶ بین روش های قدیمی پرتاب و ریلگان مقایسه ای انجام داد. او پیشنهاد داد که ریلگان می تواند یک انتخاب مناسب برای سرعت پرتاب بالا، آسیب پذیری پایین سامانه، علامت های شلیک شدن کم، میزان تخریب قابل انتخاب، سهولت نگهداری، راه اندازی، تغذیه و همچنین کوچک بودن حجم باشد [۶]. مویاما در سال ۱۹۹۷ مقدار گرادیان اندوکتانس ریل ها را با غیر خطی در نظر گرفتن رسانایی الکتریکی ریل ها و با در نظر گرفتن مشخصات مغناطیسی اجزای فرو مغناطیسی، با استفاده از روش المان محدود محاسبه نمود. او دریافت که مقدار گرادیان اندوکتانس محاسبه شده اندکی کمتر از مقدار اندازه گیری شده

نزدیک ریلگان، نیز مطالعه گردید [۱۹]. در همین سال لیو و میائو بازدهی تماس بین آرمیچر و ریل‌ها را در ریلگان بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که بازده تماس در یک آرمیچر منحنی شکل، مانند شکل حرف C، بسیار بیشتر از آرمیچر راست قامت می‌باشد [۲۰]. با مروری که بر مطالعات انجام شده توسط محققین، صورت پذیرفت، می‌توان تا حدودی با پارامترها و کمیت‌های مهم ریلگان آشنا شد. همچنین با توجه به مطالب مطرح شده، می‌توان متوجه شد که کمیت‌های اصلی ریلگان مانند چگالی شار مغناطیسی بین ریل‌ها، گرادیان اندوکتانس ریل‌ها، چگالی جریان سطح مقطع ریل، نیروی دافعه وارد بر ریل‌ها و توزیع حرارت در ریل‌ها تحت تأثیر چند پارامتر و کمیت، از جمله سرعت آرمیچر متحرک، هندسه آرمیچر و ریل، ابعاد ریل و مواد آرمیچر و ریل قرار دارند. به عبارتی، در عملکرد یک EML چند پدیده که به هم وابستگی شدید دارند، دخیل هستند. از این رو، محاسبه پارامترهای اصلی ریلگان تا حدود زیادی دشوار است. در اکثر مراجع و تحقیقات مشابه، به منظور ساده‌سازی محاسبات، چند فرض ساده کننده در نظر گرفته شده است. نخست اینکه ریلگان یک دستگاه سه بعدی است؛ اما با فرض اینکه لوله ریلگان بی‌نهایت طولانی است، می‌توان رفتار الکترومغناطیسی آن را با مدل‌های امان محدود دو بعدی برای سطح مقطع لوله، عمود بر راستای طولی، تحلیل کرد. دوم اینکه محاسبه پارامترهای اصلی ریلگان برای توزیع جریان یکنواخت آسان است. اما در یک ریلگان واقعی، یک پالس جریانی بسیار بزرگ در زمانی کوتاه به آن اعمال می‌شود. در این شرایط، جریان اعمالی در سطح مقطع ریل‌ها توزیع یکنواخت ندارد. بلکه روی یک لایه نازک نزدیک سطوح هادی‌ها توزیع می‌شود؛ که این امر تحلیل الکترومغناطیسی یک ریلگان مشخص را به شدت پیچیده می‌کند. همچنین، برای محاسبه گرادیان اندوکتانس حرکت آرمیچر در نظر گرفته نمی‌شود. در صورتی که مویا در سال ۱۹۹۷ نشان داده است که نیروی واقعی اعمال شده به پرتابه از نیروی به دست آمده از رابطه $\bar{F} = 0.5LI^2$ کوچک‌تر است. اما یکی از نوآوری‌های مقاله حاضر این است که هیچ یک از این فرضیات منظور نشده است و یک شبیه‌سازی کاملاً سه بعدی همراه با حرکت آرمیچر به انجام رسیده است. قابل ذکر است که در مطالعه حاضر، تنها از اثر اصطکاک صرف نظر شده است؛ که چون برای حالات مختلف شبیه‌سازی تقریباً مشابه است، خللی در مقایسه نتایج و نتیجه‌گیری‌ها به وجود نمی‌آورد. نکته دیگری که در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله قابل ذکر می‌باشد، این است که چون تجزیه و تحلیل منبع تغذیه سامانه ریلگان مدنظر نبوده است، لذا یک منبع تغذیه یکسان، به صورت منبع تغذیه خازنی، برای هر دو شبیه‌سازی منظور شده است.

همچنین نشان دادند که این مدل به منظور طراحی بهینه سامانه ریلگان می‌تواند مفید و کمک کننده باشد [۱۴]. آقای کشتکار و گروه محققان در سال ۲۰۱۷ ساختار جدیدی از ریلگان دو پرتابه‌ای، با نام ریلگان ارتقاء یافته را معرفی کردند. در واقع ریلگان ارتقاء یافته، یک لوله پرتاب بین دو جفت ریل و دو آرمیچر جدا دارد که در مکان اولیه متفاوت قرار می‌گیرند و همچنین، دو جفت ریل توسط یک منبع تغذیه پالسی به طور هم‌زمان تغذیه می‌شوند. در این تحقیق، پارامترهای مختلف ساختار مذکور با ریلگان دو دور که آن هم دو پرتابه و دو جفت ریل دارد، اما ساختار آن متفاوت است، مقایسه شده است [۱۵]. در همین سال، آقای چن به همراه جونجیا هی با در نظر گرفتن ضرایبی مانند نسبت ضخامت آرمیچر به عرض آن، نسبت ارتفاع آرمیچر به عرض آن و چند ضریب دیگر، معادلاتی را برای پارامترهای کلیدی سامانه ریلگان با کالیبر مستطیلی ارائه نمودند و سپس به مطالعه پارامترهای کلیدی سامانه ریلگان با کالیبرهای مختلف پرداختند. در این پژوهش، تمرکز بیشتر بر روی سامانه ریلگان با آرمیچر جامد و پارامترهای کلیدی مرتبط با چگالی جریان خطی بوده است [۱۶]. در سال ۲۰۱۸، آقای ربیعی و گروه پژوهشگران، جهت بهینه‌سازی نیروهای الکترومغناطیسی در ریلگان، مطالعاتی بر روی شکل پالس جریان اعمالی انجام دادند. در تحقیق مذکور، سه حالت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، اثر پالس‌های جریان با ارتفاع یکسان و عرض پالس متفاوت، روی نیروی الکترومغناطیسی وارد بر ریل‌ها و سرعت آرمیچر مورد بررسی قرار گرفت. در حالت دوم، هم عرض پالس و هم ارتفاع آن متفاوت، اما مساحت زیر نمودار یکسان بوده و در حالت آخر هم، عرض پالس و ارتفاع پالس برابر بوده، ولی زمان خیز و افت آن‌ها تفاوت داشت [۱۷]. همچنین در این سال آقای شینگ و همکاران به منظور بهبود گرادیان اندوکتانس ریلگان، بهبود ظرفیت تحمل جریان آرمیچر و افزایش توانایی پرتاب پرتابه‌های سنگین‌تر، با تحلیل و شبیه‌سازی سامانه و انجام آزمایش‌های مقدماتی تأیید کننده، تحقیقاتی را بر روی پرتابگر ریلی سری موزی چند دور (MSPRL) انجام دادند [۱۸]. خانم غریب و آقای کشتکار در ادامه تحقیقات خود بر روی ریلگان، در سال ۲۰۱۹ تداخل الکترومغناطیسی و اثرات آن بر روی تجهیزات الکترونیکی اطراف ریلگان را مطالعه نمودند. به بیان دقیق‌تر، در پژوهش فوق، با در نظر گرفتن تغییر مکان آرمیچر، میدان مغناطیسی اطراف ریلگان، ناشی از پالس جریان، مورد بررسی قرار گرفت و بحثی راجع به بهترین موقعیت و مکان، جهت استقرار تجهیزات الکترونیکی درون سامانه ریلگان صورت پذیرفت. به علاوه، اثر زمین بر میدان‌های الکترومغناطیسی، به عنوان یک هادی خوب

نفوذپذیری مغناطیسی می‌باشند. چگالی شار مغناطیسی \vec{B} را می‌توان توسط بردار پتانسیل مغناطیسی \vec{A} به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

با ترکیب روابط (۱ و ۷) دارید:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{A}) \quad (8)$$

یا به فرم دیگر می‌توان نوشت:

$$\nabla \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (9)$$

همان‌طور که می‌دانید یکی از دو اتحاد صفر در آنالیز برداری بیان می‌دارد که، کرل گرادیان هر میدان عددی متحد با صفر است. به عبارت دیگر:

$$\nabla \times (\nabla V) \equiv 0 \quad (10)$$

بنابراین عبارت داخل پرانتز در رابطه (۹) را می‌توان به صورت گرادیان یک میدان عددی در نظر گرفت که در الکترومغناطیس این میدان عددی همان پتانسیل الکتریکی است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (11)$$

یا

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (12)$$

جریان جاری در ساختمان ریلگان را می‌توان متشکل از دو بخش دانست که یک بخش آن جریان اعمال شده توسط منبع تغذیه بوده و بخش دیگر ناشی از میدان الکتریکی است:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (13)$$

به طوری که σ ضریب رسانندگی است. در رابطه (۲) مربوط به معادلات ماکسول، با توجه به اینکه ساختمان ریلگان یک هادی نسبتاً خوب است، بنابراین می‌توان از جریان جابه‌جایی $\partial \vec{D} / \partial t$ صرف نظر نمود و با ترکیب رابطه (۲) با روابط (۶ و ۷)، نوشت:

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (14)$$

همچنین با توجه به اینکه تفنگ ریلی بدون بار الکتریکی است، بنابراین در رابطه (۳) از معادلات ماکسول مقدار ρ برابر با صفر می‌باشد. با ترکیب این رابطه با رابطه (۵) دارید:

در بخش دوم این مقاله، ابتدا معادلات ماکسول توصیف کننده عملکرد ریلگان که روش اجزای محدود بر اساس آن‌ها مسئله ریلگان را حل می‌کند، بیان می‌شوند. سپس در بخش سوم، مراحل طراحی و تعیین ابعاد یک نمونه ریلگان واقعی بیان می‌شود. در بخش چهارم بحث مختصری در خصوص منابع تغذیه سامانه ریلگان و امکان‌سنجی آن صورت گرفته و در ادامه، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در بخش پنجم ارائه می‌گردد. همچنین، در این بخش به بررسی و مقایسه کمیت‌های تأثیرگذار در عملکرد ریلگان پرداخته می‌شود. قابل ذکر است که در ابتدا، جهت اعتبارسنجی نتایج و تأیید صحت شبیه‌سازی‌ها، نمودارهای مربوط به کمیت‌های اساسی ریلگان تحت مطالعه، با نمودارهای متناظر در مراجع معتبر [۲۱ و ۲۲] مقایسه می‌گردد. از آنجایی که برخی از پارامترهای شبیه‌سازی متفاوت است، بنابراین تطبیق در کلیت رفتاری و روند تغییرات نمودارها مورد نظر می‌باشد. در نهایت، بخش پنجم به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص داده شده است.

۲- معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر ریلگان

همان‌طور که می‌دانید معادلات اساسی حاکم بر فیزیک الکترومغناطیس، به معادلات ماکسول مشهورند. این معادلات را می‌توان به دو شکل انتگرالی و دیفرانسیلی نمایش داد که در روابط (۱ الی ۴) شکل دیفرانسیلی آن‌ها آورده شده است:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

در روابط فوق، \vec{E} شدت میدان الکتریکی، \vec{D} چگالی شار الکتریکی و ρ چگالی بار می‌باشد. همچنین در این روابط، \vec{B} معرف چگالی شار مغناطیسی و \vec{J} نیز معرف چگالی جریان است. در ادامه معادلات ماکسول مورد بررسی قرار گرفته، و سعی شده است تا روابط حاکم بر ریلگان با استفاده از این معادلات به دست آورده شوند. روابط زیر بیانگر ارتباط بین بردارهای \vec{E} و \vec{D} و همچنین \vec{H} و \vec{B} با یکدیگر می‌باشند.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (6)$$

به طوری که ϵ و μ به ترتیب ضرایب گذردهی الکتریکی و

نیز به کمک محاسبات فیزیکی نسبتاً ساده، برآورد کرد. در ادامه این شیوه طراحی تشریح می‌شود.

همان‌طور که می‌دانید، انرژی کل دهانه (کار کل انجام شده) ریلگان با استفاده از رابطه زیر قابل حصول می‌باشد:

$$E_{muzzle} = Fl \quad (19)$$

در رابطه فوق، F نیروی متوسط اعمال شده به آرمیچر در طول پرتاب و l طول ریل‌ها (طول لوله ریلگان) می‌باشد. به علاوه، نیروی F بر حسب فشار در سطح مقطع لوله ریلگان برابر است با:

$$F = PA \quad (20)$$

که در آن، P همان فشار لوله و A سطح مقطع کالیبر ریلگان می‌باشد. از طرفی برای یک ریلگان ساده نیروی شتاب‌دهی F_{EM} بر حسب گرادیان اندوکتانس L' و جریان الکتریکی متوسط در طول پرتاب \bar{I} ، عبارت است از:

$$F_{EM} = \frac{1}{2} L' \bar{I}^2 \quad (21)$$

از مساوی قرار دادن روابط (۲۰) و (۲۱) دارید:

$$\frac{1}{2} L' \bar{I}^2 = PA \Rightarrow P = \frac{1}{2} L' \frac{\bar{I}^2}{A} \quad (22)$$

با فرض سطح مقطع مربعی برای یک ریلگان نمونه که ارتفاع ریل‌های آن h باشد ($A = h^2$)، رابطه (۲۲) به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$P_{sq} = \frac{1}{2} L' \frac{\bar{I}^2}{A} = \frac{1}{2} L' \frac{\bar{I}^2}{h^2} = \frac{1}{2} L' \left(\frac{\bar{I}}{h}\right)^2 = \frac{1}{2} L' I'^2 \quad (23)$$

در رابطه فوق، $I' = \bar{I}/h$ به‌عنوان چگالی جریان خطی روی ارتفاع ریل تعریف می‌شود. همچنین، گرادیان اندوکتانس L' تابعی از هندسه کالیبر می‌باشد و با توجه به مطالعات انجام شده، مقدار معمول برای آن $0.5 \mu H/m$ است. قابل ذکر است که چگالی جریان خطی I' تنها تابعی از مشخصات ریل بوده و برای مس که رایج‌ترین ماده برای ریل است، بیشینه مقدار حدود 43 kA/mm می‌باشد. اگر مقدار $I' = 40 \text{ kA/mm}$ برای چگالی جریان خطی در نظر گرفته شود، با جایگزین نمودن این مقدار و مقدار $L' \approx 0.5 \mu H/m$ در رابطه (۲۳)، به‌طور تقریبی بالاترین فشار شتاب‌دهی قابل قبول به‌دست می‌آید:

$$P = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 10^{-6} \times (40 \times \frac{10^3}{10^{-3}})^2 = 400 \text{ MPa}$$

از طرف دیگر، از معادلات حرکت در یک بعد (با شتاب ثابت) دارید:

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \xrightarrow{v_0=0} \Delta x = \frac{v^2}{2a} \quad (24)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (15)$$

در انتها، با ترکیب روابط (۱۲، ۱۳ و ۱۴) با یکدیگر، رابطه (۱۶) و همچنین با ترکیب روابط (۱۲ و ۱۵)، رابطه (۱۷) حاصل می‌گردد. به‌طوری که دارید:

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) + \sigma \nabla V + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (16)$$

$$\nabla \cdot (-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = 0 \quad (17)$$

روابط (۱۶) و (۱۷) معادلات اساسی حاکم بر ریلگان است. در واقع این معادلات یک دستگاه با دو معادله برداری و با دو مجهول \vec{A} و V می‌باشد. بردار چگالی جریان \vec{J}_s نیز از معلومات مسئله است. بنابراین با حل هم‌زمان معادلات فوق، پتانسیل‌های مغناطیسی \vec{A} و الکتریکی V به‌دست خواهند آمد. پس از محاسبه این پتانسیل‌ها، می‌توان بر اساس رابطه (۷) چگالی شار مغناطیسی \vec{B} را تعیین نمود. همچنین با استفاده از روابط (۱۲ و ۱۳) چگالی جریان \vec{I} قابل حصول می‌باشد. بنابراین با استفاده از این دو کمیت نیروی لورنتز وارد بر آرمیچر را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$\vec{F} = \iiint_{V_a} (\vec{J} \times \vec{B}) dv \quad (18)$$

به‌طوری که V_a حجم آرمیچر می‌باشد. جهت حل دستگاه معادلات (۱۶ و ۱۷)، علاوه بر \vec{J}_s باید شرایط مرزی را نیز معین نمود. با توجه به ساختاری که تفنگ ریلی دارد حل این معادلات به راحتی امکان‌پذیر نبوده و لازم است که از روش‌های عددی استفاده شود. یکی از پرکاربردترین روش‌های عددی جهت حل اینگونه از معادلات، روش اجزای محدود است. در قسمت‌های بعدی پس از بیان کلیات نحوه طراحی و تعیین ابعاد یک نمونه ریلگان، دو تفنگ ریلی با هندسه و ابعاد متفاوت بر اساس روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics شبیه‌سازی و مقایسه می‌شوند.

۳- طراحی و تعیین ابعاد یک نمونه ریلگان واقعی

با توجه به مورد استفاده و کاربرد ریلگان، برد، سرعت دهانه، جرم پرتابه و نرخ پرتاب مختلفی از آن انتظار می‌رود. به‌عنوان یک نمونه عملی، می‌توان به ریلگانی با برد بیش از ۳۰۰ کیلومتر، سرعت دهانه ۲۵۰۰ متر بر ثانیه و جرم پرتابه ۱۶ کیلوگرم اشاره کرد [۲۱-۲۳]. محاسبات جزئی و تعیین دقیق پارامترهای ریلگان نیاز به اطلاعات کامل از عملکرد ریلگان و شناسایی دقیق پارامترهای فنی آن دارد اما پارامترهای کلی آن مثل هندسه و ابعاد تقریبی و همچنین مقادیر کلی مربوط به منبع تغذیه پالسی را می‌توان با استفاده از دانش تجربی حاصل از تحقیقات پیشین و

m_T به علاوه جرم آرمیچر m_A .

$$m_T = m_T + m_A \quad (28)$$

با توجه به مطالعات انجام گرفته، یک تخمین مهندسی برای جرم آرمیچر می‌تواند حدود ۲۰٪ جرم کل باشد و در این مثال که جرم پرتابه $m_T = 16\text{ kg}$ می‌باشد، جرم کل و جرم آرمیچر به راحتی محاسبه شده و عبارتند از:

$$m_T = 20\text{ kg}$$

$$m_A = 5\text{ kg}$$

حال با مقداردهی $v_m = 2500\text{ m/s}$ و $m_T = 20\text{ kg}$ در رابطه (۲۷) دارید:

$$E_{muzzle} = 0.5 \times 20 \times 2500^2 = 62500000\text{ J} \approx 63\text{ MJ}$$

همچنین، با مساوی قرار دادن روابط (۲۶) و (۲۷)، مقدار حدودی ارتفاع ریل (h) که به نوعی تعیین کننده ابعاد کالیبر ریلگان می‌باشد، قابل محاسبه است:

$$A = h^2 = \frac{E_{muzzle}}{P_{sq} l} = \frac{63}{400 \times 10} = 0.0158\text{ m}^2$$

$$\Rightarrow h = \sqrt{0.0158} = 0.1257\text{ m} \approx 126\text{ mm}$$

این مقدار به دست آمده برای h یک مقدار قابل قبول برای کالیبر ریلگان می‌باشد.

بر اساس مطالب فوق‌الذکر، الگوریتم کلی طراحی یک نمونه ریلگان عملی، طبق فلوجارت شکل (۲) قابل ارائه می‌باشد.

با توجه به رابطه فوق و اینکه در این سامانه، جابه‌جایی به اندازه طول لوله ریلگان (طول ریل‌ها) می‌باشد، طول ریل‌ها (l) بر حسب سرعت دهانه و شتاب متوسط به صورت زیر قابل نوشتن است:

$$l = \frac{v_m^2}{2\bar{a}} \quad (25)$$

همچنین به عنوان یک مصالحه بین محدودیت‌های عملی و کنترلی مربوط به طول لوله ریلگان روی سکوی مربوطه و نیز مناسب بودن شتاب متوسط پرتابه، از روی مقادیر مذکور در مراجع و مقالات بررسی شده، شتاب متوسط پرتاب برای ریلگان در حدود $31\text{ kilogeess} \approx 300000\text{ m/s}^2$ در نظر گرفته شده است. بنابراین با استفاده از رابطه (۲۵) و مدنظر قرار دادن سرعت دهانه $v_m = 2500\text{ m/s}$ ، طول ریل‌ها برابر می‌شود با:

$$l = \frac{2500^2}{2 \times 300000} = 10.4\text{ m}$$

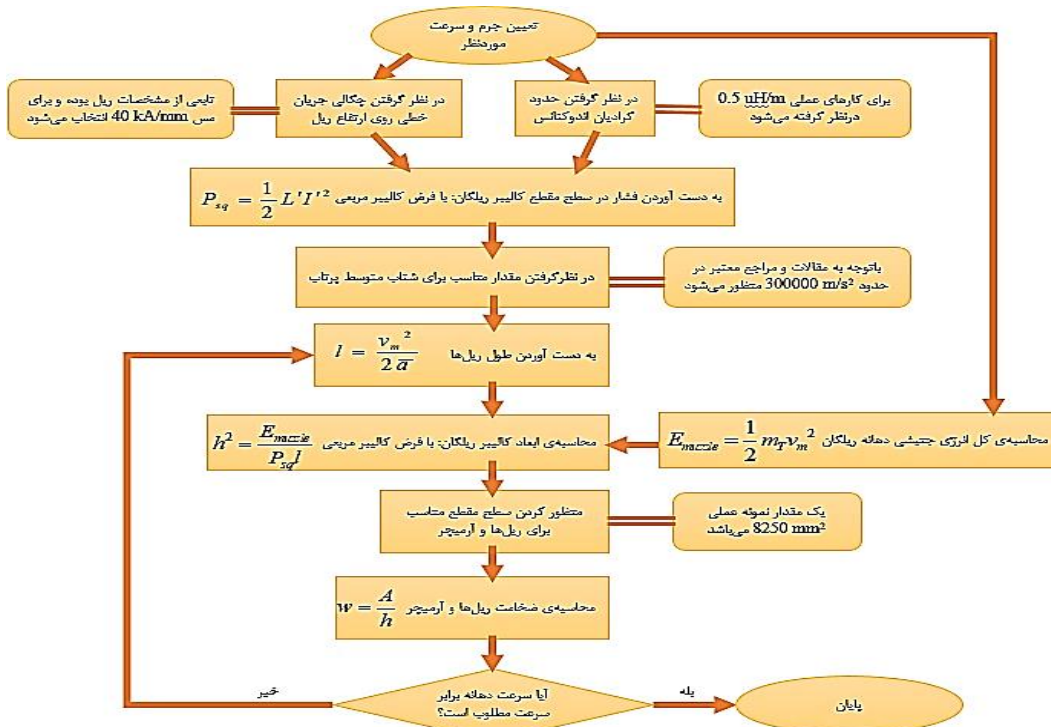
با ترکیب روابط (۱۹) و (۲۰) و با همان فرض سطح مقطع مربعی ($A = h^2$) دارید:

$$E_{muzzle} = Fl = PAI = P_{sq} h^2 l \quad (26)$$

از طرف دیگر، انرژی دهانه برابر است با انرژی جنبشی کل جرم پرتاب شده در دهانه ریلگان؛ یعنی:

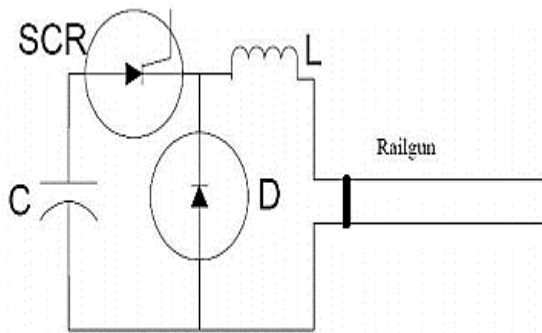
$$E_{muzzle} = \frac{1}{2} m_T v_m^2 \quad (27)$$

که کل جرم پرتابی m_T برابر است با مجموع جرم پرتابه

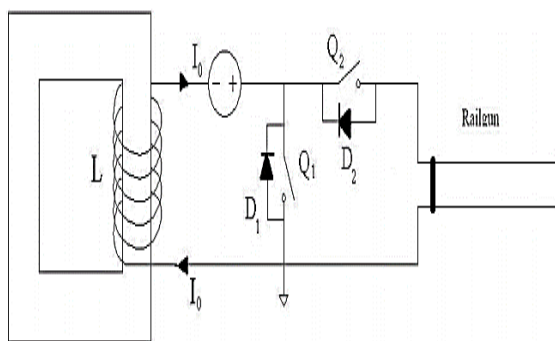


شکل (۲): فلوجارت کلی طراحی یک نمونه ریلگان عملی

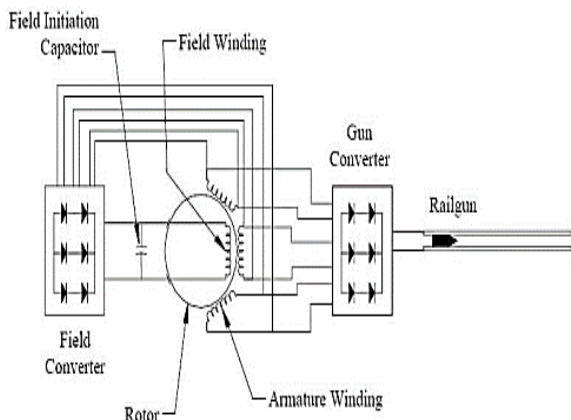
۴- منابع تغذیه سامانه ریلگان



شکل (۳): بانک خازنی به‌عنوان منبع تغذیه سامانه ریلگان



شکل (۴): سلف با اندوکتانس زیاد به‌عنوان منبع تغذیه سامانه ریلگان



شکل (۵): تناوب‌ساز پالسی به‌عنوان منبع تغذیه سامانه ریلگان

به‌طوری که اشاره شد، منبع تغذیه ریلگان باید توانایی تولید جریان الکتریکی در حدود چند مگا آمپر را داشته باشد. در خصوص امکان‌سنجی منابع تغذیه جهت سامانه ریلگان، با این محدوده جریانی، می‌توان به منابع و مراجع معتبر و مقادیر عملی و آزمایش‌های صورت گرفته توسط آن‌ها استناد کرد. بدین منظور، جدول (۱) مشخصات کلی نمونه‌هایی از سامانه‌های ریلگان و منابع تغذیه آن‌ها را، برگرفته از مراجع معتبر، به‌طور خلاصه در اختیار می‌گذارد.

منبع تغذیه یکی از قسمت‌های مهم در سامانه ریلگان بوده و اهمیت آن از این جهت می‌باشد که لازم است توسط آن جریانی در حد چند مگا آمپر تولید گردد. تولید این مقدار جریان زیاد به این علت است که در ریلگان می‌باید جسمی به جرم چندین کیلوگرم، تا سرعت چند هزار متر بر ثانیه شتاب گیرد. بر این اساس، منبع تغذیه باید توانایی تولید مقدار زیادی از انرژی را در مدت زمان کوتاهی داشته باشد. ژنراتورهای الکتریکی، معمولاً توانایی تغذیه چنین باری را ندارند. بنابراین لازم است از روش‌هایی که انرژی ذخیره شده را در مدت زمان کوتاهی انتقال می‌دهند، استفاده نمود. برای این منظور، سه روش وجود دارد که عبارتند از: بانک خازنی، سلف‌های با اندوکتانس زیاد، و تناوب‌ساز یا آلترناتور پالسی. از میان روش‌های مذکور، مرسوم‌ترین روش استفاده از بانک خازنی می‌باشد که در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده است. روش بعدی، استفاده از سلف‌های با اندوکتانس زیاد است که توانایی ذخیره‌سازی جریان‌های بزرگ را به‌صورت حلقه‌ای در خود دارند. آخرین روش استفاده از تناوب‌ساز پالسی است که در واقع یک نوع ژنراتور است. ساختار این ژنراتورها به نحوی است که روتور آن‌ها دارای ممان اینرسی زیادی (شبیه به چرخ طیار) می‌باشد. از این رو، می‌تواند انرژی جنبشی هنگفتی را در خود ذخیره نموده در هنگام نیاز به‌صورت پالس‌های جریانی تحویل دهد. در این ژنراتورها جهت تولید پالس‌های جریانی نیاز به مدارات کنترلی مبتنی بر کلیدزنی می‌باشد. شکل‌های (۳ تا ۵) دی‌گرام مداری انواع منابع تغذیه فوق را نشان می‌دهند. البته قابل ذکر است که در گذشته برخی از انواع ژنراتورهای شار فشرده (FCGs) نیز به‌عنوان منبع تغذیه برای ریلگان استفاده می‌شدند. این ژنراتورها در واقع دستگاه‌های تک شلیکی هستند که بخشی از انرژی مواد منفجره قوی را به انرژی الکترومغناطیسی تبدیل می‌کنند. با توجه به پیشرفت تکنولوژی در زمینه منابع تغذیه پالسی و معایب این نوع از ژنراتورها، امروزه این ژنراتورها کمتر به‌کار می‌روند. مهم‌ترین عیب آن‌ها استفاده از مواد منفجره می‌باشد که خطرات زیادی به همراه دارد و باعث تخریب برخی از اجزای ژنراتور می‌شود.

جدول (۱): مشخصات کلی نمونه‌هایی از ریلگان و منبع تغذیه آن از مراجع معتبر

شماره مرجع	مشخصات کلی ریلگان	نوع منبع تغذیه	محدوده جریان	ولتاژ
[۲۲]	سرعت دهانه: ۲۵۰۰ متر بر ثانیه طول ریل: ۸ متر کالیبر: حدود ۱۵۰ میلی‌متر جرم پرتابی: ۲۳/۴ کیلوگرم	ژنراتور پالسی	۶/۱۲ مگا آمپر	۱۱/۴ کیلو ولت
[۲۳]	سرعت دهانه: ۲۰۰۰ متر بر ثانیه طول ریل: ۸/۷ متر کالیبر: حدود ۱۴۶ میلی‌متر جرم پرتابی: ۲۱/۹ کیلوگرم	ژنراتور پالسی	۶/۴۰ تا ۴/۴۷ مگا آمپر	۷/۵ کیلو ولت
[۲۴]	سرعت دهانه: ۲۵۰۰ متر بر ثانیه طول ریل: ۷ متر کالیبر: حدود ۱۲۰ میلی‌متر	ژنراتور پالسی	۵ مگا آمپر	۶/۷ کیلو ولت
[۲۵]	سرعت دهانه: ۲۵۰۰ متر بر ثانیه طول ریل: ۸ متر کالیبر: حدود ۲۰۰ میلی‌متر جرم پرتابی: ۲۰ کیلوگرم	بانک خازنی	۴ تا ۷ مگا آمپر	۱۰ کیلو ولت
[۲۶]	سرعت دهانه: ۲۵۰۰ متر بر ثانیه طول ریل: ۱۲ متر کالیبر: حدود ۱۳۵ در ۵۰۰ میلی‌متر جرم پرتابی: ۲۰ کیلوگرم	بانک خازنی	۴ تا ۵/۵ مگا آمپر	۷ کیلو ولت
[۲۷]	سرعت دهانه: ۲۵۰۰ متر بر ثانیه طول ریل: ۶/۴ متر کالیبر: حدود ۹۰ میلی‌متر جرم پرتابی: ۸ کیلوگرم	منبع تغذیه سلفی و منبع تغذیه خازنی	۴ تا ۵ مگا آمپر	کمتر از ۲۲ کیلو ولت

۵- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

ریلگان دربر گیرنده فیزیک‌های مختلفی می‌باشد که در نظر گرفتن هم‌زمان همه آن‌ها با هم، حل مسئله را بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌کند. در این حالت، باید شرایط خاصی را اعمال کرد که گاه این شرایط خاص، مطلوب نیست. از آنجایی که تحلیل‌های مورد نظر، تحلیل‌های الکتریکی و مغناطیسی (الکترومغناطیسی)، حرکت و سرعت می‌باشد، بنابراین فیزیک‌های *Magnetic fields*، *Electrical Circuit* و *Multibody Dynamics* جهت شبیه‌سازی سامانه در نظر گرفته می‌شود و به منظور ساده‌سازی تحلیل‌ها، از فیزیک‌های مکانیکی و ترمودینامیکی صرف نظر می‌گردد؛ چرا که موارد فوق در این مسئله هدف مطالعه نمی‌باشند. از میان مطالعات مختلف موجود در نرم‌افزار نیز با توجه به مسئله مورد نظر که یک مسئله متغیر با زمان است، مطالعه وابسته به زمان^۱ انتخاب می‌شود. البته بنا به نیاز می‌توان مطالعات دیگر را نیز در کنار این مطالعه به شبیه‌سازی اضافه نمود.

در این قسمت با توجه به طراحی انجام گرفته در بخش قبل، پارامترهای سامانه‌های ریلگان تحت مطالعه و شبیه‌سازی، یعنی ریلگان با کالیبر مربعی و ریلگان با کالیبر مستطیلی در جدول (۲) آورده شده است. شایان ذکر است که این پارامترها بر اساس مراجع معتبر [۲۳-۲۶، ۲۸]، و نزدیک به مقادیر آن‌ها انتخاب شده‌اند. بنابراین این مقادیر کاملاً عملی و قابل استناد می‌باشند. در این مقاله شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار قدرتمند *COMSOL Mutiphysics* صورت گرفته است. این نرم‌افزار قدرتمند می‌تواند به طور هم‌زمان چند فیزیک مختلف از قبیل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، حرارت و ترمودینامیک، مباحث مکانیکی و فیزیک‌های دیگر را هم‌زمان با هم در نظر گرفته و معادلات مربوطه را به روش المان محدود (FEM) حل نماید. علاوه بر این، مطالعات مختلفی از جمله مطالعه حالت ماندگار، مطالعه وابسته به زمان، مطالعه حوزه فرکانس را می‌توان به کمک این نرم‌افزار انجام داد. چنانکه قبلاً هم اشاره شد، سامانه

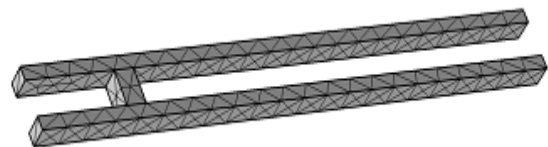
^۱ Time Dependent

در نرم‌افزار المان محدود کامسول به‌منظور ایجاد حرکت‌های خطی و ساده می‌توان از واسط Moving Mesh استفاده کرد که یک بخشی، جدای از خود گره Mesh (که برای مش‌بندی سامانه به کار می‌رود)، می‌باشد و هم‌رده و درکنار سایر فیزیک‌ها و واسط‌های اصلی موجود در پروژه قرار می‌گیرد. بر این مبنای با تنظیم صحیح آن می‌توان برای سامانه مورد نظر حرکت تعریف نمود. بنابراین اگر حرکت خطی در یک جهت و بدون جزئیات مکانیکی که در ادامه اشاره خواهد شد، مد نظر باشد، این روش می‌تواند یک گزینه و انتخاب مناسب به حساب آید. با این حال، روش جامع‌تر و کامل‌تر شبیه‌سازی حرکت اجسام، استفاده از فیزیک Multibody Dynamics می‌باشد. این روش علاوه بر اینکه قابلیت شبیه‌سازی حرکت‌های پیچیده‌تر نظیر حرکت‌های کشویی (که حرکت خطی در یک جهت زیر مجموعه این گروه قرار می‌گیرد)، حرکات لولایی، حرکت پیستون در داخل سیلندر استوانه‌ای که علاوه بر حرکت رفت و برگشتی چرخش هم دارد، و حرکات پیچشی را برای چند قطعه متحرک به‌طور هم‌زمان فراهم می‌کند، می‌تواند با در نظر گرفتن شرایط و جزئیات مکانیکی، مانند دخیل کردن اصطکاک و مقاومت هوا، اعمال نیروی از پیش تعیین شده و سرعت اولیه به اجسام، تعیین جرم و ممان اینرسی برای هر قطعه و بسیاری موارد دیگر، برای تحلیل‌های دقیق مربوط به مکانیک و حرکت شناسی نیز به کار رود و نتایجی به‌مراتب نزدیک‌تر به واقعیت ارائه دهد. البته شایان ذکر است که در سامانه‌هایی که حرکتی وجود دارد و یک ناحیه از فضا تغییر شکل داده یا در اصطلاح دفرمه (Deformation) می‌شود، ناگزیر باید از Moving Mesh هم استفاده کرد؛ ولی این حالت Moving Mesh با حالت قبل که در بالا بیان شد، متفاوت است. در واقع در این حالت، Moving Mesh به‌عنوان یک زیرگره در زیربخش Definitions به پروژه اضافه می‌گردد و تنظیمات کمتری را می‌طلبد. به دلیل مزایای مطرح شده و به‌منظور قابلیت توسعه در آینده، در این تحقیق، از روش دوم یعنی فیزیک Multibody Dynamics، به‌همراه Moving Mesh لازم استفاده شده است که انعطاف‌پذیری بالایی را به پروژه می‌بخشد. در ادامه، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، در ابتدا، کمیت‌های اساسی حاصل از شبیه‌سازی سه بعدی به روش اجزاء محدود، با کمیت‌های متناظر در دو مرجع معتبر (مراجع [۲۵ و ۲۶]) مقایسه می‌شوند. سپس، مقایسه عملکرد و کمیت‌های اصلی دو ریلگان با کالیبر مربعی و مستطیلی ارائه می‌شود. قابل ذکر است که به دلیل عدم اشاره به کلیه پارامترهای سامانه ریلگان در مراجع اشاره شده در بالا و وجود تفاوت‌های جزئی در برخی از پارامترهای شبیه‌سازی نسبت به مراجع، کلیت رفتاری و روند تغییرات نمودارها در صحت‌سنجی نتایج مدنظر می‌باشد و با این دیدگاه مقایسه نتایج انجام خواهد گرفت. همچنین، لازم به اشاره است که جهت اعتبارسنجی اولیه شبیه‌سازی‌ها، تنها نتایج مربوط به ریلگان با

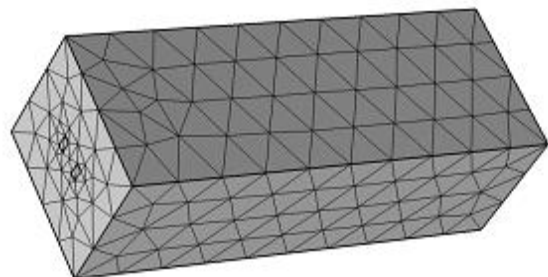
جدول (۲): ابعاد و پارامترهای ریلگان‌های تحت مطالعه

پارامترهای مشترک	
جنس ریل‌ها	مس
طول ریل‌ها	۱۲ متر
ارتفاع ریل‌ها	۱۲۰ میلی‌متر
ضخامت ریل‌ها	۶۸/۷۵ میلی‌متر
مکان اولیه آرمیچر	۱ متر از ابتدای ریل‌ها
ظرفیت بانک خازنی منبع تغذیه	۱۲ فاراد
ولتاژ اولیه خازن	۹ کیلوولت
مقاومت مدار تحریک	۰/۱ میلی‌اوم
جنس آرمیچر	آلومینیم
مشخصات خاص ریلگان با کالیبر مربعی	
فاصله دو ریل از یکدیگر	۱۲۰ میلی‌متر
عرض آرمیچر	۱۲۰ میلی‌متر
ارتفاع آرمیچر	۱۲۰ میلی‌متر
ضخامت آرمیچر	۱۰۸/۶۳ میلی‌متر
مشخصات خاص ریلگان با کالیبر مستطیلی	
فاصله دو ریل از یکدیگر	۲۴۰ میلی‌متر
عرض آرمیچر	۲۴۰ میلی‌متر
ارتفاع آرمیچر	۱۲۰ میلی‌متر
ضخامت آرمیچر	۱۰۸/۶۳ میلی‌متر

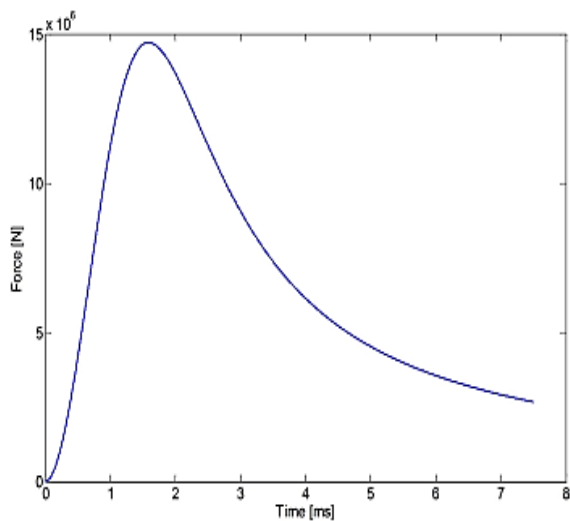
جهت اجتناب از اطناب توضیحات، از ذکر پیکربندی کامل پروژه و جزئیات آن پرهیز می‌شود و در ادامه تنها به توضیح چگونگی مدل‌سازی حرکت در نرم‌افزار کامسول بسنده می‌شود. شایان ذکر است که شبیه‌سازی کامل هر یک از دو ریلگان مختلف توسط یک سامانه رایانه‌ای نسبتاً قوی و با یک مش‌بندی نرمال با المان‌های مثلثی که در شکل‌های (۶ و ۷) نشان داده شده‌اند، نزدیک به چهار ساعت به طول انجامید.



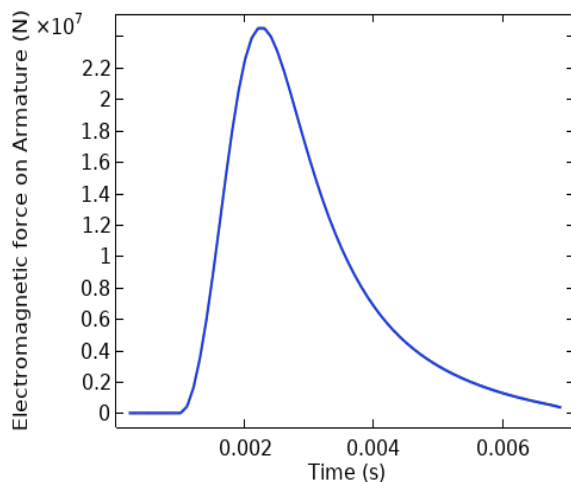
شکل (۶): نحوه مش‌بندی اجزای سامانه ریلگان



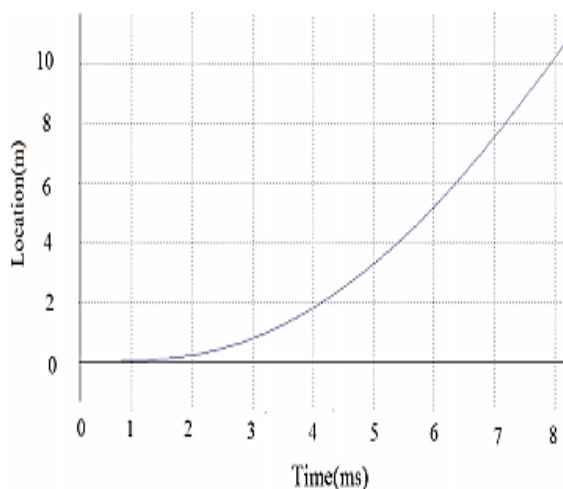
شکل (۷): مش‌بندی هوای اطراف سامانه ریلگان



شکل (۱۰): نمودار نیروی وارد بر آرمیچر بر حسب زمان از مرجع [۲۶]

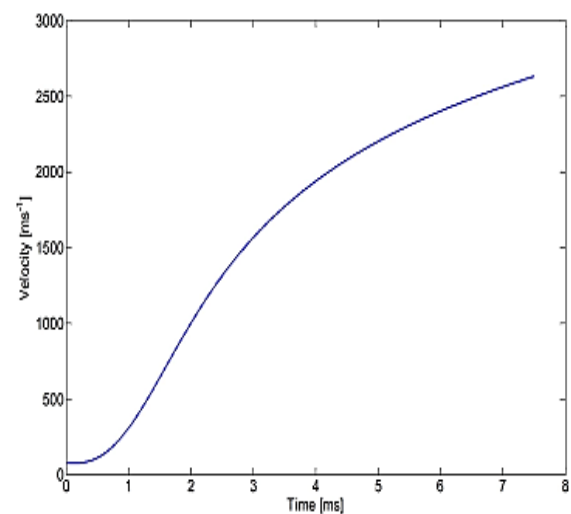


شکل (۱۱): نمودار نیروی وارد بر آرمیچر بر حسب زمان ریلگان کالیبر مربعی

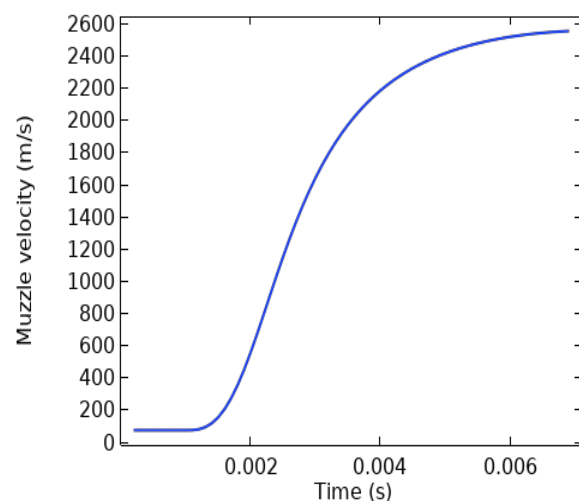


شکل (۱۲): نمودار جابه‌جایی بر حسب زمان از مرجع [۲۵]

کالیبر مربعی جهت مقایسه با مراجع آورده شده است. یکی از مهم‌ترین کمیت‌ها در ارزیابی سامانه‌های ریلگان، سرعت دهانه می‌باشد. به طوری که در شکل‌های (۸ و ۹) دیده می‌شود، نمودارهای سرعت دهانه بر حسب زمان در این مطالعه، مشابه نتایج گزارش شده در مرجع [۲۶] می‌باشد و بعد از گذشت زمان ۷ms، سرعت دهانه به حدود ۲۵۰۰m/s رسیده است. کمیت دیگری که در عملکرد ریلگان حائز اهمیت می‌باشد، میزان نیروی وارد بر آرمیچر در گذر زمان است. با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، وجود همخوانی مطلوب بین نتایج قابل درک است که این خود مؤید صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌باشد.

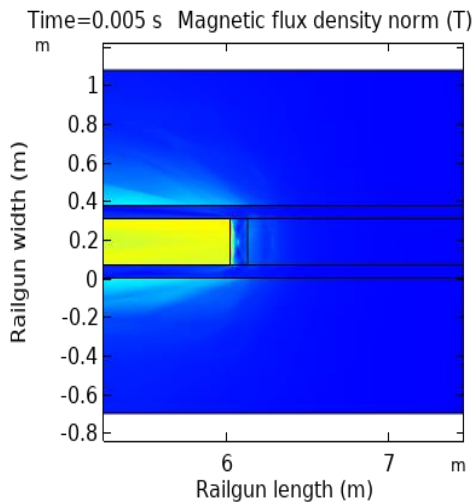


شکل (۸): نمودار سرعت دهانه بر حسب زمان از مرجع [۲۶]



شکل (۹): نمودار سرعت دهانه بر حسب زمان ریلگان کالیبر مربعی

کمیت قابل مقایسه دیگر، مقدار جابه‌جایی آرمیچر بر حسب زمان می‌باشد. شکل‌های (۱۲ و ۱۳)، بیانگر همخوانی قابل قبول نتایج حاصل از مطالعه حاضر و نتایج آورده شده در مرجع [۲۵] هستند.



شکل (۱۵): چگالی شار مغناطیسی در ریلگان کالیبر مستطیلی

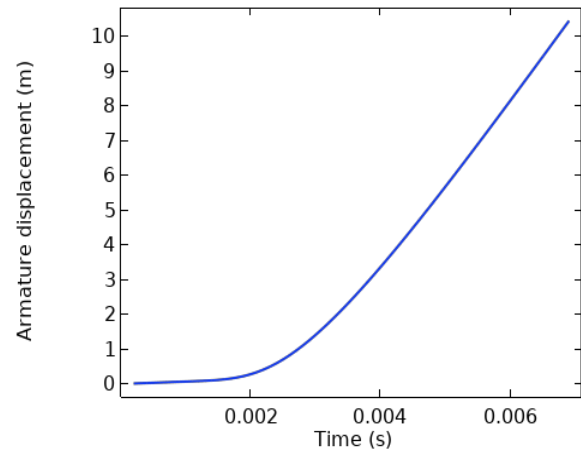
با توجه به شکل‌های فوق مشاهده می‌شود که چگالی شار مغناطیسی در ریلگان با کالیبر مربعی بیشتر از ریلگان با کالیبر مستطیلی است. از طرفی می‌دانید که هر چه میدان مغناطیسی بزرگ‌تر باشد، طبق رابطه (۲۹)، نیروی لورنتز بیشتری به آرمیچر وارد خواهد شد (v_a حجم آرمیچر می‌باشد). در نتیجه، سرعت دهانه بالاتری به دست خواهد آمد. بنابراین از دیدگاه میدان مغناطیسی، ریلگان با کالیبر مربعی نسبت به ریلگان با کالیبر مستطیلی برتری دارد.

$$\vec{F}_{EM} = \iiint_{V_a} (\vec{J} \times \vec{B}) dv \quad (29)$$

۲-۵- گرادیان اندوکتانس

در این بخش ابتدا بحث محاسبه گرادیان اندوکتانس و وابستگی آن به هندسه ریلگان بیان می‌شود. سپس نمودار گرادیان اندوکتانس بر حسب زمان، در هر دو حالت کالیبر مربعی و کالیبر مستطیلی رسم شده و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، یکی از پارامترهای مؤثر ریلگان که به هندسه و ابعاد ریلگان وابسته است، گرادیان اندوکتانس می‌باشد. تاکنون مطالعات فراوانی جهت محاسبه گرادیان اندوکتانس انجام شده است. یکی از روش‌های محاسبه گرادیان اندوکتانس، استفاده از روش تخمین هوشمند است که بر اساس آن، یک رابطه تحلیلی جهت محاسبه گرادیان اندوکتانس بر حسب ابعاد ساختمانی ریلگان ارائه گردید [۲۹]. بر این مبنای، اگر ابعاد فیزیکی و سطح مقطع یک ریلگان به صورت کلی، مطابق شکل (۱۶) در نظر گرفته شود، رابطه مذکور جهت محاسبه گرادیان اندوکتانس به صورت زیر قابل ارائه است:

$$L' = \frac{10^{-6}}{0.5986 \frac{h}{s} + 0.9683 \frac{h}{s+2w} + 4.3157 \frac{1}{\ln\left(\frac{4(s+w)}{w}\right)} - 0.7831} \quad (30)$$

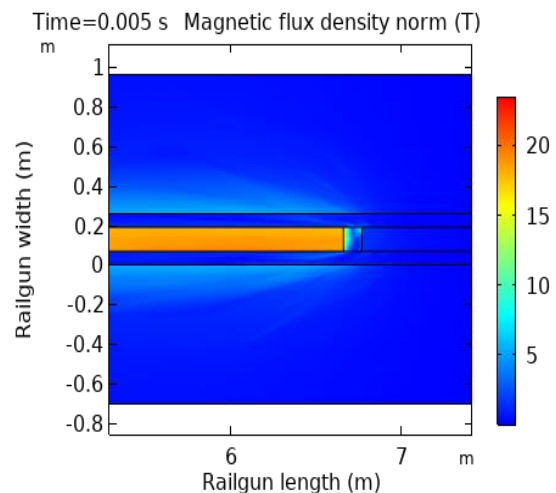


شکل (۱۳): نمودار جابه‌جایی بر حسب زمان ریلگان کالیبر مربعی

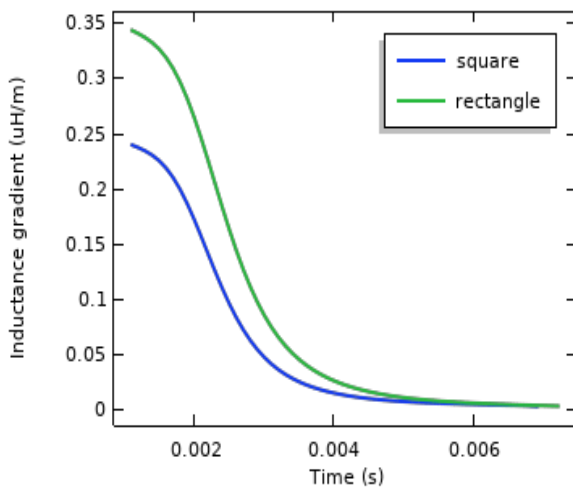
در مجموع، از همخوانی مطلوب و قابل قبول بین نتایج اخذ شده در مطالعه حاضر و نتایج مراجع معتبر، می‌توان اعتبار و صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده را نتیجه گرفت. در ادامه، مقایسه بین عملکرد و کمیت‌های مختلف مربوط به دو ریلگان با کالیبرهای مربعی و مستطیلی ارائه می‌شود.

۵-۱- مقایسه چگالی شار مغناطیسی

اولین کمیتی که می‌توان مورد مقایسه قرار داد وضعیت میدان مغناطیسی اطراف آرمیچر و ریل‌ها می‌باشد. چگالی شار مغناطیسی دو ریلگان شبیه‌سازی شده در شکل‌های (۱۴ و ۱۵) نشان داده شده است. در هر دو شکل، میدان مغناطیسی بین دو ریل و سمت عقب آرمیچر بسیار بیشتر از قسمت بیرونی ریل‌ها و سمت جلوی آرمیچر می‌باشد. دلیل این امر این است که میدان مغناطیسی در این ناحیه داخلی، حاصل از سه جریان ریل اول، آرمیچر و ریل دوم است در صورتی که در نواحی دیگر این شرایط برقرار نیست.



شکل (۱۴): چگالی شار مغناطیسی در ریلگان کالیبر مربعی



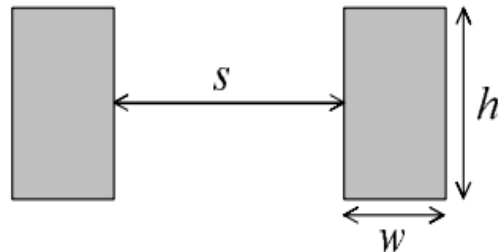
شکل (۱۷): نمودار گرادیان اندوکتانس بر حسب زمان

همان طوری که بیان شد، گرادیان اندوکتانس با فاصله ریل‌ها از یکدیگر رابطه مستقیم و با سطح مقطع ریل‌ها یعنی ارتفاع و ضخامت ریل‌ها رابطه معکوس دارد. از طرفی به منظور انجام یک مقایسه منصفانه، ارتفاع و ضخامت ریل‌ها در هر دو حالت یکسان در نظر گرفته شده است. بنابراین گرادیان اندوکتانس در ریلگان با کالیبر مستطیلی که فاصله ریل‌های آن بیشتر از حالت مربعی است، بزرگ‌تر می‌باشد. این موضوع کاملاً از شکل (۱۷) هویدا است. پس با توجه به رابطه (۳۱) که طبق آن نیروی الکترومغناطیسی متناسب با مقدار گرادیان اندوکتانس است، در حالت مستطیلی این انتظار وجود دارد که نیروی بیشتری به آرمیچر اعمال شود. اما واضح است که نیرو علاوه بر گرادیان اندوکتانس با مجذور جریان الکتریکی نیز رابطه مستقیم دارد و تنها از روی پارامتر گرادیان اندوکتانس نمی‌توان در مورد نیرو و در نتیجه سرعت دهانه اظهار نظر قطعی کرد. جریان الکتریکی ریلگان، نیرو و سرعت دهانه در بخش‌های بعد مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به شکل (۱۷) می‌توان مشاهده کرد که گرادیان اندوکتانس ثابت نیست و با گذشت زمان تغییر می‌کند. این پارامتر در بعضی از مطالعات با توجه به هندسه‌ی ریلگان محاسبه و بر خلاف واقعیت ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۵-۳- مقایسه جریان و چگالی جریان الکتریکی

در بخش قبل ملاحظه گردید که طبق رابطه (۳۱)، نیروی وارده بر آرمیچر با مجذور جریان نسبت مستقیم دارد. بنابراین جریان الکتریکی عبوری از ریلگان یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سرعت دهانه می‌باشد. شکل موج جریان الکتریکی هر یک از ریلگان‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۱۸) آورده شده است.

در این رابطه، w عرض ریل، h ارتفاع ریل و s فاصله دو ریل از یکدیگر است.

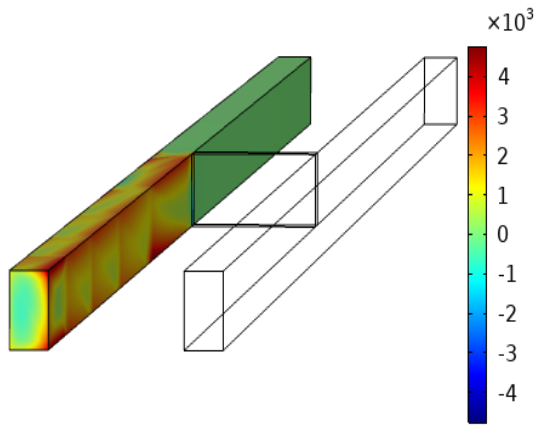


شکل (۱۶): ابعاد ساختمانی و سطح مقطع یک ریلگان به‌طور کلی

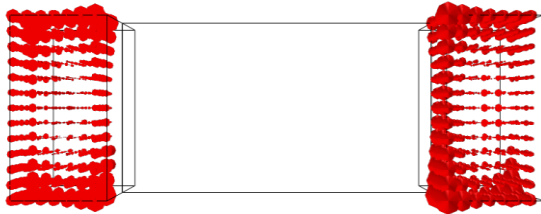
در این نوع روش‌های محاسبه مبتنی بر هندسه ریلگان چند نکته قابل توجه مطرح است. اول اینکه فرض‌های ساده‌کننده‌ای در نظر گرفته می‌شود مثل بی‌نهایت بودن طول ریل‌ها و یا عبور جریان فقط از سطح هادی‌ها. مسئله دوم این است که یک مقدار ثابت برای گرادیان اندوکتانس به دست می‌آید که در واقع برای یک مسئله متغیر با زمان این‌طور نیست. نکته دیگر اینکه گرادیان اندوکتانس بر اساس نسبت ابعاد محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، هر یک از ابعاد به‌طور مستقل تأثیرگذار نمی‌باشد بلکه نسبت آن‌ها به یکدیگر تعیین‌کننده مقدار گرادیان اندوکتانس است. بنابراین، اگر تمام ابعاد به‌طور مثال دو برابر شود، گرادیان اندوکتانس ثابت باقی خواهد ماند. با توجه به این موضوع و همچنین در نظر گرفتن نسبتی معقول برای ابعاد ریلگان، می‌توان پیش‌بینی نمود که گرادیان اندوکتانس برای تمامی تفنگ‌های ریلی در حدود ۰/۱ تا ۳ میکروهانری بر متر می‌باشد. در نهایت، مهم‌ترین نکته این است که با مشتق‌گیری از رابطه اخیر نسبت به هر یک از ابعاد، می‌توان اثبات نمود که با افزایش s گرادیان اندوکتانس افزایش و با کاهش آن، کاهش پیدا می‌کند. ولی در مورد h و w عکس این موضوع صادق است. از این رو نتیجه می‌شود که هر چه سطح مقطع ریل‌ها کوچک‌تر و فاصله آن‌ها از یکدیگر بیشتر باشد، گرادیان اندوکتانس بزرگ‌تری حاصل می‌گردد. روش دقیق‌تر محاسبه گرادیان اندوکتانس استفاده از رابطه (۳۱) می‌باشد.

$$F = \frac{1}{2} LI^2 \quad (31)$$

در این رابطه با مشخص بودن نیروی الکترومغناطیسی (F) و جریان ریلگان (I)، به‌صورت لحظه‌ای گرادیان اندوکتانس L' قابل محاسبه است. با استفاده از همین رابطه، نمودارهای گرادیان اندوکتانس بر حسب زمان برای هر دو حالت کالیبر مربعی و مستطیلی، در شکل (۱۷) رسم شده‌اند.



شکل (۲۰): چگالی جریان الکتریکی (A/mm^2) از نمای سه بعدی

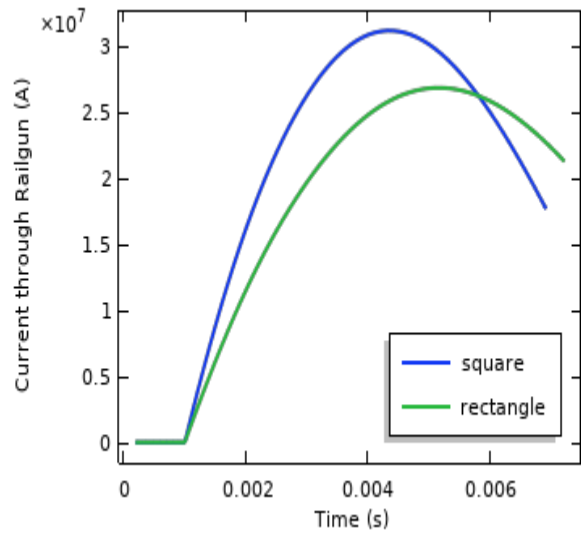


شکل (۲۱): چگالی جریان الکتریکی به صورت پیکان از نمای روبه‌رو

موضوع فوق باعث می‌شود که در لبه‌ها و سطوح داخلی نسبت به نقاط دیگر، حرارت و گرمای بیشتری ایجاد شود که بر حرارت ناشی از اصطکاک ریل‌ها و آرمیچر می‌افزاید. بنابراین، منجر به تشدید آسیب دیدن و خوردگی سریع‌تر نواحی مذکور می‌شود که در بهره‌برداری از ریلگان باید مد نظر قرار گیرد.

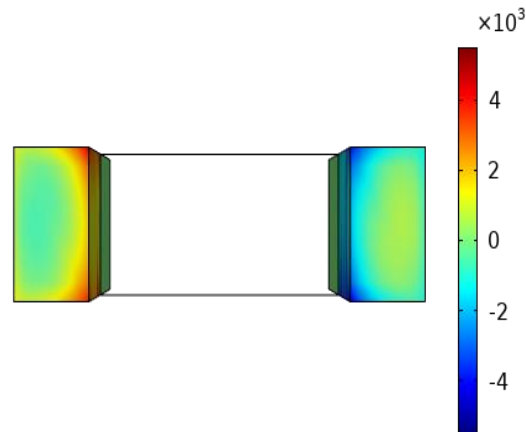
۴-۵- بررسی تلفات اهمی

یکی دیگر از مقایسه‌هایی که می‌توان بین دو ریلگان تحت مطالعه انجام داد، بررسی و مقایسه تلفات اهمی ناشی از عبور جریان الکتریکی از ریل‌ها و آرمیچر می‌باشد. البته باید خاطر نشان کرد که در این بررسی، اثر حرارت روی مقاومت الکتریکی منظور نشده است. با توجه به بخش قبل که در آن جریان و چگالی جریان الکتریکی مورد بحث و بررسی قرار گرفت، انتظار می‌رود که در حالت کالیبر مربعی تلفات اهمی بیشتری ایجاد شود؛ زیرا جریان الکتریکی آن از حالت کالیبر مستطیلی بیشتر بوده و از طرفی نیز می‌دانید که سطح مقطع ریل‌ها و آرمیچر در هر دو حالت یکسان می‌باشد. همچنین، این انتظار نیز وجود دارد که تلفات در گوشه‌ها و لبه‌ها به ویژه در گوشه‌ها و لبه‌های داخلی بسیار بیشتر از سایر نقاط باشد؛ زیرا چگالی جریان الکتریکی در این نقاط بسیار بالاتر از نقاط دیگر می‌باشد. شکل‌های (۲۲) و (۲۳) چگالی حجمی تلفات اهمی را در دو حالت کالیبر مربعی و کالیبر مستطیلی، بر حسب (W/mm^3) نشان می‌دهند.



شکل (۱۸): نمودار جریان الکتریکی

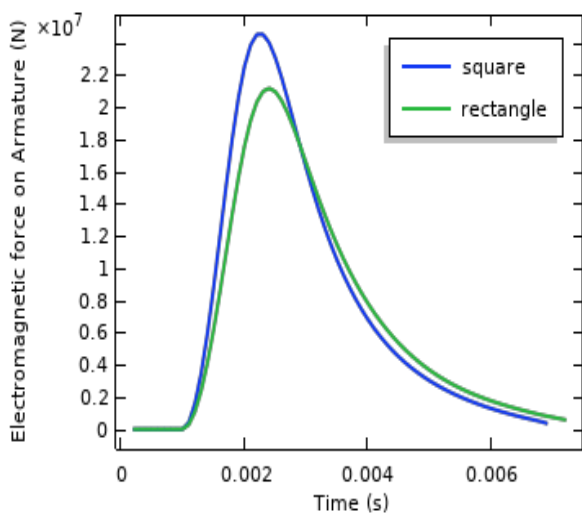
از شکل (۱۸) نمایان است که در حالت کالیبر مربعی، جریان الکتریکی مقدار بسیار بالاتری دارد. از آنجایی که پارامتر مؤثرتر جریان الکتریکی می‌باشد، علی‌رغم گرادیان اندوکتانس بزرگ‌تر در ریلگان مستطیلی، ریلگان مربعی نیروی بیشتری ایجاد خواهد نمود که در بخش بعدی به آن پرداخته خواهد شد. بحث دیگری که در این قسمت قابل بیان است، بحث چگالی جریان الکتریکی می‌باشد. شکل‌های (۱۹) الی (۲۱)، نحوه توزیع چگالی جریان الکتریکی را در سطح مقطع ریل‌ها نشان می‌دهند. قابل ذکر است به دلیل شباهت، این شکل‌ها فقط برای یک ریلگان (ریلگان مستطیل شکل) ارائه شده‌اند. از آنجایی که جریان بسیار زیادی در حد چندین مگا آمپر در زمان بسیار کوتاهی در حد چند میلی ثانیه از ریلگان عبور می‌کند، حالت گذرای شدیدی ایجاد شده و باعث می‌شود که به جای توزیع یکنواخت، جریان از نزدیک لبه‌ها و سطوح ریل‌ها و آرمیچر، به ویژه از لبه‌ها و سطوح داخلی عبور کند. این واقعیت در شکل‌های (۱۹) الی (۲۱) قابل مشاهده است.



شکل (۱۹): چگالی جریان الکتریکی (A/mm^2) از نمای روبه‌رو

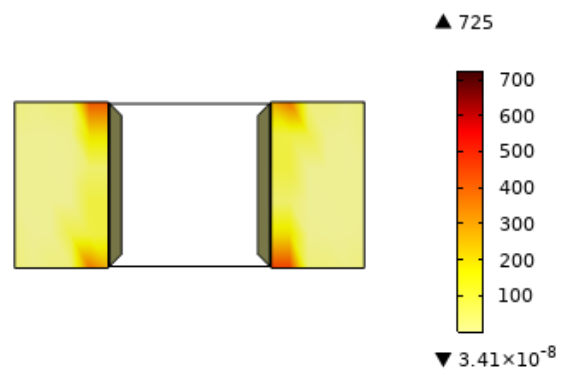
۵-۵- نیروی وارد بر آرمیچر و بر ریل‌ها

طبق رابطه (۳۱) معلوم گردید که نیرو با مجذور جریان و مقدار گرادیان اندوکتانس متناسب است. از طرفی در قسمت‌های قبل، گرادیان اندوکتانس برای هر دو حالت کالیبر مربعی و مستطیلی محاسبه شده و نتایج و شکل موج‌های جریان الکتریکی نیز ارائه گردید. از آنجایی که تأثیر جریان به صورت توان دوم می‌باشد، بنابراین پارامتر تعیین کننده غالب جریان الکتریکی خواهد بود و انتظار می‌رود که ریلگان مربعی که جریان بالاتری دارد، نیروی بیشتری ایجاد کند. این نتیجه در نمودارهای نیرو بر حسب زمان در شکل (۲۴) نشان داده شده است.

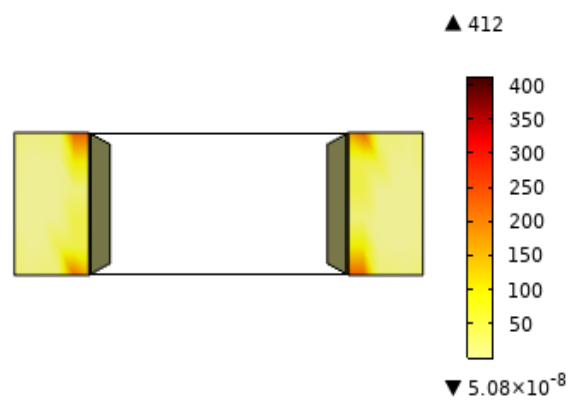


شکل (۲۴) نیروی وارد بر آرمیچر

نکته دیگری که در این قسمت باید مد نظر قرار داد، نیروی وارد بر ریل‌ها می‌باشد. چنانکه در شکل (۲۵) دیده می‌شود، نیروی وارد بر ریل‌ها به صورت دافعه و بسیار بیشتر از نیروی وارد بر آرمیچر می‌باشد. دلیل این امر این است که طول ریل‌ها که از آن جریان الکتریکی عبور می‌کند و در معرض میدان مغناطیسی قرار گرفته است، بسیار بزرگ‌تر از طول آرمیچر می‌باشد و لذا در طراحی نگهدارنده ریل‌ها باید این موضوع را در نظر گرفت تا نگهدارنده‌ها توانایی تحمل این نیروی بسیار زیاد را داشته باشند. به علاوه، چنانکه از شکل نیز پیدا است، نیروی وارد بر ریل‌ها در حالت مربعی بسیار بیشتر از حالت مستطیلی است؛ که این مسئله دو علت دارد. دلیل اول عبور جریان بیشتر در حالت کالیبر مربعی نسبت به حالت مستطیلی بوده و دلیل دوم نیز فاصله کمتر ریل‌ها، یعنی نزدیک‌تر بودن ریل‌ها به یکدیگر، در حالت کالیبر مربعی می‌باشد. بنابراین، ریلگان با کالیبر مربعی به نگهدارنده‌های محکم‌تری نیاز دارد که به نوبه خود، علی‌رغم ایجاد سرعت دهانه بیشتر، محدودیت بیشتری در طراحی و ساخت ریلگان به وجود می‌آورد و باعث افزایش هزینه و قیمت تمام شده پامانه می‌شود.



شکل (۲۲): چگالی حجمی تلفات اهمی در ریلگان با کالیبر مربعی (W/mm^3)



شکل (۲۳): چگالی حجمی تلفات اهمی در ریلگان با کالیبر مستطیلی (W/mm^3)

چنانکه از شکل‌های بالا نیز مشخص است، همان‌طوری که انتظار می‌رفت تلفات اهمی در حالت کالیبر مربعی بیشتر از حالت مستطیلی بوده و همچنین تلفات در گوشه‌ها و لبه‌های داخلی بسیار بیشتر از سایر نقاط می‌باشد. این همان پدیده‌ای است که موجب افزایش بیش از حد دمای این نقاط شده و در بخش قبل نیز به آن اشاره گردید. بنابراین در طراحی‌های دقیق ریلگان این نکته می‌بایست کاملاً مورد توجه قرار گیرد. نکته دیگر اینکه اگر چه البته انجام تحلیل‌های دقیق حرارتی نیازمند افزودن فیزیک‌های شاخه Electromagnetic Heating به پروژه اخیر و کوپل کردن آن‌ها با فیزیک‌های موجود در پروژه می‌باشد. با این حال، با عنایت به این موضوع که جنس مواد منظور شده و همچنین سطح تماس ریل‌ها و آرمیچر برای هر دو حالت کالیبر مربعی و کالیبر مستطیلی یکسان است، می‌توان اظهار داشت که اصطکاک در هر دو حالت تقریباً مشابه بوده و پارامتر متمایز کننده، همین تلفات اهمی می‌باشد. بنابراین با توجه به تلفات اهمی به وجود آمده، می‌توان تا حدود زیادی پی برد که در حالت کالیبر مربعی گرما و حرارت بیشتری نسبت به حالت کالیبر مستطیلی ایجاد خواهد شد.

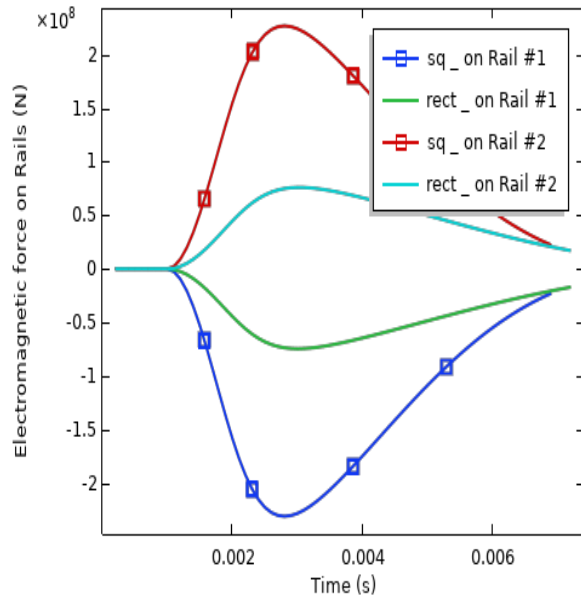
۶- نتیجه‌گیری

از مقایسه این دو ریلگان در شرایط شبیه‌سازی یکسان می‌توان نتیجه گرفت که از نقطه نظر سرعت خروجی پرتابه، ریلگان با کالیبر مربعی نسبت به کالیبر مستطیلی، برتری دارد. به علاوه ریلگان با کالیبر مربعی حجم کمتری اشغال خواهد کرد. اما ریلگان با کالیبر مربعی معایبی نیز دارد. از آنجایی که در این ریلگان جریان بیشتری جاری می‌شود و از طرفی سطح مقطع برای هر دو حالت نیز یکسان در نظر گرفته شده است، چگالی جریان الکتریکی ریل‌ها و آرمیچر، در حالت کالیبر مربعی بالاتر است که خود می‌تواند باعث تلفات بیشتر و در نتیجه حرارت بالاتر در ریل‌ها و آرمیچر شود و این امر یک محدودیت جدی به حساب می‌آید. همچنین، در بخش (۵-۵) نیروی وارد بر آرمیچر و ریل‌ها بررسی گردید و مشاهده شد که نیروی وارد بر ریل‌ها در حالت کالیبر مربعی بیشتر از حالت کالیبر مستطیلی است. در نتیجه، جهت تحمل این نیرو توسط ریل‌ها، باید نگهدارنده‌های ریل محکم‌تری به کار رود. بنابراین با توجه به محدودیت‌های ذکر شده برای حالت کالیبر مربعی و از آنجایی که ریلگان با کالیبر مستطیلی نیز سرعت دهانه قابل قبولی ایجاد می‌کند و از لحاظ سرعت دهانه، اختلاف زیادی با حالت کالیبر مربعی ندارد، (اختلاف سرعت دهانه حدود ۸٪ می‌باشد)، در مواردی که این اختلاف در سرعت دهانه پذیرفتنی است و نیز محدودیت فضا وجود ندارد، ریلگان با کالیبر مستطیلی انتخاب مناسبی است. زیرا ضمن تأمین سرعت دهانه بالا، محدودیت‌های مربوط به چگالی جریان الکتریکی و حرارت ناشی از آن و نیز نیروهای دافعه وارد بر ریل‌ها و لزوم وجود نگهدارنده‌های قوی‌تر در آن، بسیار کمتر است. جدول (۳) خلاصه نتایج حاصل از مقایسه پارامترهای مختلف را در دو ریلگان تحت مطالعه ارائه می‌دهد.

جدول (۳): جمع‌بندی و خلاصه مقایسه‌های صورت گرفته در دو

سامانه ریلگان تحت مطالعه

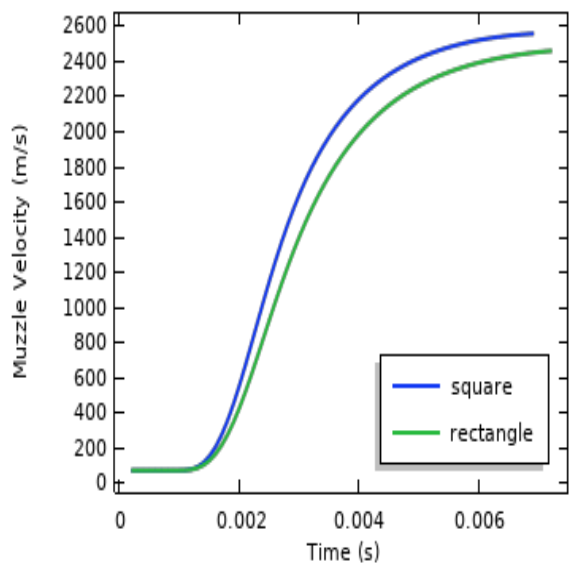
حالت مطلوب‌تر	پارامتر مورد مقایسه
کالیبر مربعی	حجم فضای اشغال شده
کالیبر مربعی	چگالی شار مغناطیسی
کالیبر مستطیلی	گرادیان اندوکتانس
کالیبر مستطیلی	جریان و چگالی جریان الکتریکی
کالیبر مستطیلی	تلفات اهمی
کالیبر مستطیلی	حرارت و دما
کالیبر مربعی	نیروی وارد بر آرمیچر
کالیبر مستطیلی	نیروی وارد بر ریل‌ها
کالیبر مربعی	سرعت دهانه



شکل (۲۵): نیروی وارد بر ریل‌ها در حالت کالیبر مربعی و مستطیلی

۵-۶- شتاب و سرعت دهانه

طبق نتایج حاصل از بخش‌های قبل، مشخص است که در کدام حالت شتاب و در نهایت سرعت دهانه بالاتری به وجود خواهد آمد. بدیهی است حالتی که نیروی بیشتری ایجاد نموده، طبق روابط سینماتیک و حرکت شناسی، شتاب بیشتری نیز ایجاد خواهد کرد و شتاب بیشتر نیز در نهایت منجر به سرعت دهانه بالاتری خواهد شد. پس طبق نمودارهای نیرو بر حسب زمان در قسمت قبل، حالت کالیبر مربعی که نیروی بزرگ‌تری به آرمیچر وارد می‌کند، دارای شتاب و در نتیجه سرعت دهانه بالاتری خواهد بود. شکل (۲۶) که حاوی نمودارهای سرعت بر حسب زمان است نیز همین نتیجه را نشان می‌دهد.



شکل (۲۶): نمودارهای سرعت بر حسب زمان

۷- مراجع

- Linear Current Density," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, pp. 1134-1138, 2017.
- [17] A. Rabiei, A. Keshtkar, and L. Gharib, "Study of Current Pulse Form for Optimization of Railguns Forces," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 46, pp. 1047-1053, 2018.
- [18] Y. Xing, B. Lei, Qing-A. Lv, H. Xiang, J. Chen, and R. Zhu, "Simulations, Experiments, and Launch Characteristics of a Multiturn Series-Parallel Rail Launcher," IEEE Transactions On Plasma Science vol. 47, pp. 603-610, 2018.
- [19] L. Gharib, A. Keshtkar, "Electromagnetic Interference of Railgun and Its Effect on Surrounding Electronics," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, pp. 4196-4200, August 2019.
- [20] S. Liu, H. Miao, and M. Liu, "Investigation of the Armature Contact Efficiency in a Railgun," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, pp. 3315-3318, July 2019.
- [21] R. L. Ellis, J. C. Poynor, B. T. McGlasson, and A. N. Smith, "Influence of Bore and Rail Geometry on an Electromagnetic Naval Railgun System," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, pp. 1416-1419, January 2005.
- [22] I. R. McNab, S. Fish, and F. Stefani, "Parameters for an Electromagnetic Naval Railgun," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, pp. 1733-1740, January 2001.
- [23] J. McFarland and I. R. McNab, "A Long-Range Naval Railgun," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, pp. 182-187, January 2003.
- [24] D. Eccleshall and S. B. Pratap, "Comparison of a Single Pulsed Alternator with Two or More in Parallel for Driving a Railgun," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, pp. 223-227, January 2001.
- [25] Z. Su, W. Guo, T. Zhang, H. Zhang, Z. Dong, J. Yang, and B. Cao, "Design and Simulation of a Large Muzzle Kinetic Energy Railgun," Ieee Transactions on Plasma Science, vol. 41, pp. 289-294, May 2013.
- [26] S. A. Taher, M. Jafari, and M. Pakdel, "A New Approach for Modeling Electromagnetic Railguns," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 43, pp. 473-474, May 2015.
- [27] S. Hundertmark, O. Liebfried, "Power Supply Options for a Naval Railgun," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 46, pp. 3599-3605, 2018.
- [28] C. G. Hodge, J. O. Flower, and A. Macalindin, "A Comparison of Co-Energy and Lorenz Force Based Simulations of Rail Guns," In Proceedings IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 157-164, April 2009.
- [29] A. Keshtkar, S. Bayati, and A. Keshtkar, "Derivation of a Formula for Inductance Gradient Using Intelligent Estimation Method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, pp. 305-308, January 2009.
- [30] A. Keshtkar, A. Rabiei, and L. Gharib, "Effect of Armature and Rails Resistivity Profile on Rail's Electromagnetic Force and Armature Velocity," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 43, pp. 1541-1543, 2015.
- [31] A. Keshtkar, S. Mozaffari, and A. Keshtkar, "Inductance Gradient Variation with Time and Armature Sliding along the Rails," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, pp. 75-77, January 2011.
- [1] H. Kolm, P. Mongeau, and F. Williams, "Electromagnetic Launchers," IEEE Transactions on Magnetics, vol. Mag-16, pp. 719-720, September 1980.
- [2] J. G. Moldenhauer and G. E. Hauze, "Experimental Demonstration of an N-Turn EML," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-20, pp. 283-285, March 1984.
- [3] J. F. Kerrisk, "Electrical and Thermal Modeling of Railgun," IEEE Transactions on Magnetics, vol. Mag-20, pp. 399-401, March 1984.
- [4] S. P. Atkinson, "The Use of Finite Element Analysis Techniques for Solving Railgun Problems," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 25, pp. 52-54, January 1989.
- [5] Antonios Challita, Brian L. Maas, and David P. Bauer, "A Multiple Armature Railgun Launcher," IEEE Transactionson Magnetics, Vol. 29, pp. 763-768, January 1993.
- [6] F. C. Beach, "Design And Construction of A One Meter Electromagnetic Railgun," MSc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, pp. 1-5, June 1996.
- [7] K. Moyama and H. Fukumoto, "Evaluation of Railgun Inductance by 2-D Transient FE Analysis," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, pp. 260-264, January 1997.
- [8] B. Kim and K. Hsieh, "Effect of Rail and Armature Geometry on Current Density Distribution and Inductance Gradient," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, pp. 413-416, January 1999.
- [9] J. Gallant "Parametric Study of an Augmented Railgun," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, pp. 451-454, January 2003.
- [10] A. Keshtkar, "Effect of Rail Dimension on Current Distribution and Inductance Gradient," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, pp. 383-385, January 2005.
- [11] B. McDaniel, "A Multistage Distributed Energy Bench-Top Electromagnetic Launcher," MSc. Thesis, Texas Technology University, December, 2006.
- [12] Y. Wang and J. Zhang, "New Concepts of Electromagnetic Railgun: Synchronous Multi-barrel-Launch Powered by Single Power Supply," 978-1-4244-1833-6/08/\$25.00 ©2008 IEEE, 2008.
- [13] [13] Y. Zhang, J. Ruan, S. Liu, X. Yang, Y. Zhang, and D. Wang, "Salvo Performance Analysis of Double-Projectile Railgun," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, pp. 203-205, January 2011.
- [14] Y. Lou, G. Wan, Y. Jin, B. Tang, and B. Li, "Research on Energy Loss Distribution of an Augmented Railgun," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 44, pp. 857-861, 2016.
- [15] A. Keshtkar, Z. J. Khorrami, and L. Gharib, "Comparison of Inductance Gradient and Electromagnetic Force in Two Types of Railguns with Two Projectiles by Finite-Element Method," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, pp. 2387-2390, 2017.
- [16] L. Chen and J. He, "Some Key Parameters of Different Caliber Solid-Armature Railgun Related to