

بررسی ترموالاستیک یک پرتابگر الکترومغناطیس به کمک روش

حجم محدود

مصطفی ورمزیار^۱ و سید رضا حمزه‌لو^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۸)

چکیده

پرتابگر الکترومغناطیسی از انرژی الکتریکی برای تحریک سامانه و اعمال نیروی الکترومغناطیسی به پرتابه استفاده می‌کند. جهت شبیه‌سازی حرکت این نوع پرتابگرها نیاز است تا معادلات ماکسول در ریل و آرمیچر حل شوند. با توجه به شتاب بالا و سرعت کم آرمیچر در شروع حرکت، لازم است تا از یک شبکه غیریکنواخت در ابتدای ریل استفاده شود. تغییرات خواص فیزیکی ریل و آرمیچر با دما لحاظ گردیده است. نتایج سرعت محاسبه شده در توافق خوبی با نتایج تجربی ارائه شده در مقالات می‌باشد. کانتورهای میدان حکایت از آن دارد که سهم بالایی از جریان از لبه داخلی ریل و آرمیچر عبور می‌کند. نتایج توزیع دما نشان می‌دهد که بیشترین حرارت در بال‌های آرمیچر و لبه داخلی ریل تولید می‌شود. اثر توزیع دما و نیروی مغناطیسی بر توزیع تنش حرارتی در ریل و آرمیچر مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که زمان وقوع بیشترین تنش حرارتی در ریل و آرمیچر متفاوت است.

واژه‌های کلیدی: پرتابگر الکترومغناطیسی، ریل و آرمیچر، میدان مغناطیسی، توزیع دما، تکیه‌گاه منعطف، آنالیز ترموالاستیک

Thermoelastic Analysis of an Electromagnetic Launcher Using Finite Volume Method

M. Varmazyar and S.R. Hamzeloo

Mechanical Engineering Department

Shahid Rajaee Teacher Training University

(Received: 15/February/2017 ; Accepted: 27/ February/2018)

ABSTRACT

Electromagnetic launcher uses electrical energy to launch an armature. In order to simulate the movement of this type of launchers, it is necessary to solve the Maxwell equations in rails and armature. Due to the high acceleration and low speed of the armature at the start of the movement, it is necessary to apply the non-uniform meshes at the beginning of the rails. Changes in the physical properties of the rail and armature must be considered versus the temperature. The calculated results are in the agreement with the experimental velocity results reported in the previous study. The magnetic contours indicate that the high share of electrical current passes through the interior of the rails and the armature. The results of the temperature distribution show that the highest temperature is produced in the armature wings and the inner edge of the rails. The effect of temperature and magnetic force distribution on the thermal stress in rails and armature has been investigated and it has been shown that the moment of occurrence of the highest thermal stress in rails and armature is different.

Keywords: Electromagnetic Launcher, Rail and Armature, Temperature Distribution, Flexible Support, Thermoelastic Analysis

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): varmazyar.mostafa@srttu.edu

۲- استادیار: rehamzeloo@srttu.edu

۱- مقدمه

همان‌طور که ملاحظه می‌شود جریان پس از عبور از ریل اول وارد آرمیچر شده و منجر به شکل‌گیری نیروی حجمی در آرمیچر می‌گردد. این نیرو به واسطه اعمال میدان اطراف ریل به وجود می‌آید. مقدار نیروی القایی بر پرتابگر طبق قاعده لورنتز^۱ قابل محاسبه است. جهت تامین انرژی الکتریکی، ریل‌ها به منبع تغذیه پالسی ولتاژ بالا متصل هستند که باعث ایجاد یک جریان پرامپر در ریل و آرمیچر می‌شود.

آرمیچر که قسمت متحرک سیستم را تشکیل می‌دهد می‌تواند خود به‌عنوان پرتابه عمل کند یا برای شتاب دادن به پرتابه در پشت یا کنار آن قرار گیرد. از لحاظ الکتریکی شکلی مطلوب است که ضمن حفظ اتصال الکتریکی با ریل، توزیع جریان آن ماکزیمم نیروی جلوبرنده را تولید نماید. از نقطه نظر مکانیکی علاوه بر کاهش اصطکاک، افزایش مقاومت مکانیکی، افزایش قدرت نفوذ پرتابه و حفظ پایداری مسیر حرکت پرتابه نیز مورد توجه می‌باشد. آرمیچر به‌صورت ساده و یا مرکب از نگهدارنده پرتابه ساخته می‌شود. شکل ۲ آرمیچر مورد مطالعه در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد که به‌عنوان پرتابه نیز استفاده شده است. این هندسه دارای دو بال است که به‌واسطه آن‌ها به ریل متصل می‌باشد.

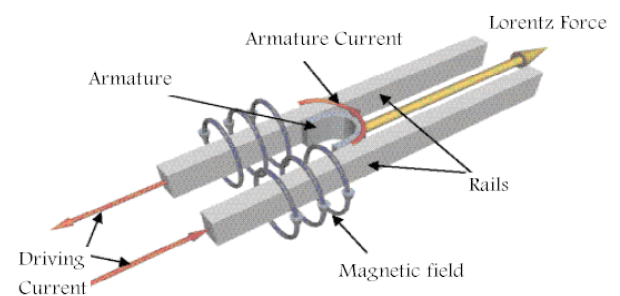
برای به‌دست آوردن سرعت‌های زیاد نیاز به منبع تغذیه و سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی وجود دارد که بتوانند در زمانی بسیار کوتاه، جریان خیلی بالایی را در سیستم جاری سازند. این سیستم می‌بایست دارای انرژی در حد مگاژول و ولتاژی تا چند صد کیلوولت و جریانی حدود چند صد کیلوآمپر و در بعضی مواقع تا مگاآمپر باشد. این انرژی در زمان چند میلی‌ثانیه در سیستم تخلیه می‌شود. ساخت چنین سیستمی در صدر توجه محققین کشورهای مختلف بوده و سعی در کم کردن وزن و حجم آن می‌شود [۷، ۸].

پاول و باته به یک شتاب‌دهنده الکترومغناطیس جامد اشاره کرده‌اند که یک پرتابه ۳۱۷ گرمی را تا سرعت $4/2 \text{ kg/s}$ شتاب داده است [۹]. دایس و رس یک سیستم پرتابگر ریلی موسوم به ELF-I را به‌طور کامل شرح داده‌اند و قسمت‌های مختلف آن اعم از منبع تغذیه، نگهدارنده‌ها و ریل‌ها توضیح داده شده است [۱۰].

از همان زمانی که موتورهای الکتریکی اختراع شدند، ایده پرتابگرهای الکترومغناطیس که می‌توان آنها را به نوعی دسته‌ای از موتورهای الکتریکی خطی نیز نامید، شکل گرفت. در موتورهای الکتریکی معمولی، گشتاور الکترومغناطیسی ناشی از میدان مغناطیسی استاتور، باعث حرکت چرخشی روتور می‌شود ولی در این پرتابگرها، نیروی خطی الکترومغناطیس ناشی از دو ریل که آرمیچر در بین آنها قرار دارد باعث حرکت خطی آرمیچر می‌گردد.

این نیروی مغناطیسی باعث سرعت گرفتن آرمیچر و پرتاب آن خواهد شد. مقدار این سرعت به عوامل مختلفی وابسته می‌باشد که از آن جمله مقدار انرژی الکتریکی و زمان اعمال آن، طول ریل‌ها، شکل هندسی سازه ریل و آرمیچر است [۱]. تاکنون طیف وسیعی از کاربردهای سیستم‌های الکترومغناطیسی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. این طیف شامل موارد زیادی مانند استفاده در سلاح‌های نظامی مثل تانک، زده‌وایی، اسلحه‌های سبک و غیره، پرتاب هواپیماهای کوچک برای پرواز، پرتاب مستقیم اجسام به فضا و تصحیح‌کننده مدار ماهواره‌ها می‌باشد [۲-۵]. راندمان این نوع پرتابگرها به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از راندمان پرتابگرهای معمولی است، علت این امر خروج محصولات احتراق و هدر رفتن انرژی در پرتابگرهای معمولی و جایگزینی نیروهای حجمی مستمر به‌جای نیروهای سطحی ضربه‌ای در پرتابگرهای الکترومغناطیسی است. هم‌چنین کنترل بر روی سرعت آرمیچر با تغییر ولتاژ امکان‌پذیر است. از طرف دیگر در این تکنولوژی دست‌یابی به شتاب‌های بالا برای اجسام نسبتاً سنگین ممکن است. از منظر محیط زیست، آلودگی زیست محیطی این نوع پرتابگرها به حداقل رسیده است.

شمای کلی جریان و میدان القایی در شکل ۱ نشان داده شده است.



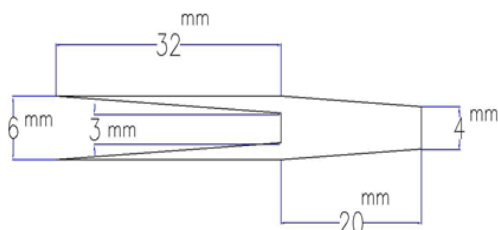
شکل (۱): ساختمان یک موتور خطی جریان مستقیم [۶].

ریل ها پرداخته‌اند [۱۷]. اخیراً تانگ و همکاران به بررسی تنش حرارتی در ریل و آرمیچر یک پرتابگر الکترومغناطیسی با کمک روش المان محدود پرداخته‌اند [۱۸]. آن‌ها اثر پوسته‌ای جریان را بر روی بیشینه تنش حرارتی بررسی کرده‌اند. قاسمی و ورمزیار در تحقیقی به بررسی تنش در ریل یک پرتابگر الکترومغناطیس سرعت بالا پرداخته‌اند [۱۹]. هم چنین ایشان در سال ۲۰۰۸ میلادی تنش حرارتی در یک پرتابگر سبک را با استفاده از شبکه یکنواخت محاسبه نمودند [۲۰]. در ادامه این تحقیقات، مطالعه حاضر به شبیه‌سازی دوبعدی تنش حرارتی یک پرتابگر الکترومغناطیس سبک بر روی یک شبکه غیریکنواخت می‌پردازد. حرارت در برخی از مسایل مهندسی می‌تواند نقش تاثیرگذاری بر روی تنش داشته باشد [۲۱]. بنابراین، یکی از اهداف این مطالعه محاسبه دقیق میدان دما در کنار توزیع میدان مغناطیسی و سرعت آرمیچر می‌باشد. در پایان نتایج مربوط به توزیع نیرو و دمای القا شده در ریل و آرمیچر به همراه تنش حرارتی ناشی از آنها ارائه می‌شود.

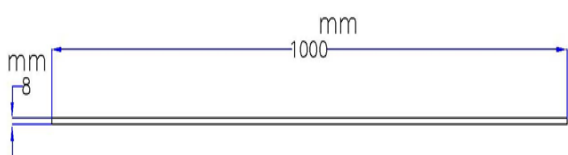
۲- هندسه و مواد

شمای دوبعدی و ابعاد پرتابگر (ریل و آرمیچر) مورد بحث، در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.

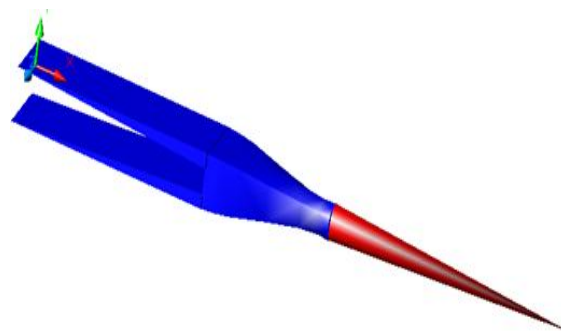
فاصله بین دو ریل برابر ۰/۶ cm و جرم آرمیچر برابر ۴/۲۷ gr می‌باشد. ماده استفاده شده برای ریل آلایژی از مس و آلومینیوم نیز برای آرمیچر در نظر گرفته شده است. خواص فیزیکی مورد نیاز مس و آلومینیوم متغیر با دما در جدول ۱ لحاظ گردیده است.



شکل (۳): اندازه‌های آرمیچر مورد مطالعه.



شکل (۴): اندازه‌های ریل مورد مطالعه.



شکل (۲): هندسه آرمیچر که همزمان به عنوان پرتابگر استفاده شده است.

ایشان از یک منبع ذخیره با ۲۴ خازن به ظرفیت μf ۱۲۰ به طور موازی استفاده کرده‌اند که از آن ۳۶ kJ انرژی با ولتاژ ۵ kV تامین می‌شود. ورست و کوک یک پرتابگر الکترومغناطیس سبک را بررسی نموده‌اند [۱۱]. این سیستم می‌تواند یک پرتابه ۱۸۵ gr را تا سرعت ۱۸۵۰ m/s شتاب دهد. این سیستم با تکرار پرتاب ۵ Hz کار می‌کند. شرودر و همکاران پرتاب کننده‌هایی را که برای کاربردهای فضایی طراحی شده اند معرفی می‌کنند [۱۲]. در این مقاله طراحی یک کویلگان توضیح داده شده است که می‌تواند پرتابه‌ای به وزن ۱۴ kg را تا سرعت ۶ km/s برساند. گیر و همکاران یک پرتابگر با سرعت فوق‌العاده زیاد که در آزمایشگاه کالهام ساخته شده است را شرح داده‌اند [۱۳]. این سیستم می‌تواند یک پرتابه یک گرمی را تا سرعت ۱۵ km/s برساند. منبع تغذیه این سیستم یک بانک خازنی ۱/۱ kJ و ۸ kV است. در این مطالعه در مورد آسیب‌های وارده به ریل و عایق‌های نگهدارنده آن نیز بحث شده است.

گروه‌های مختلفی رفتار دینامیکی ریل را با فرض تکیه‌گاه منعطف زمانی که آرمیچر به سرعت بحرانی می‌رسد مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۴-۱۶]. نیچیتایلو و لویز سرعت بحرانی را برای یک پرتابگر فوق سریع مورد محاسبه قرار داد [۱۶]. وی از رابطه تیموشینکو برای این محاسبات استفاده کرد. این مطالعه به کمک روش‌های عددی انجام شده است. دانشجو و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی ریل یک پرتابگر الکترومغناطیسی پرداخته‌اند [۱۴]. این مطالعه به کمک انتقال انتگرال لاپلاس کارسون و به صورت یک تحلیل دقیق صورت پذیرفته است. یکی از مولفه‌های تاثیرگذار در تکرار پرتاب، مقاومت عایق‌های ریل در برابر تنش‌های حرارتی است. لی و همکاران به تحلیل دما و تنش حرارتی در عایق‌های نگهدارنده

ریل که در جهت منفی در حال حرکت است (چون مبدا مختصات روی آرمیچر و متحرک با آن قرار گرفته است) و برای آرمیچر به صورت زیر است:

$$\mu_r \sigma_r \frac{\partial B_r}{\partial t} = \frac{\partial^2 B_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_r}{\partial y^2} - \mu_r \sigma_r V(t) \frac{\partial B_r}{\partial x} \quad (6)$$

$$\mu_a \sigma_a \frac{\partial B_a}{\partial t} = \frac{\partial^2 B_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_a}{\partial y^2}$$

که اندیس r بیانگر مشخصه در ریل و اندیس a بیانگر مشخصه در آرمیچر می باشد.

برای محاسبه دما نیاز است که معادله انرژی نیز حل شود. بر این اساس، معادله انرژی در ریل و آرمیچر به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho_r C_r \left(\frac{\partial T_r}{\partial t} + V \frac{\partial T_r}{\partial x} \right) = k_r \left(\frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_r}{\partial y^2} \right) + \frac{J^2}{\sigma_r} \quad (7)$$

$$\rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = k_a \left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} \right) + \frac{J^2}{\sigma_a}$$

که در آن، $\frac{J^2}{\sigma}$ منبع حرارتی ناشی از جریان الکتریسیته می باشد. جهت محاسبه تنش نیاز است معادلات ناویر به صورت زیر گسسته و حل شوند.

$$\mu_r \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial y^2} \right] + (\lambda_r + \mu_r) \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial x \partial y} \right] - (3\lambda_r + 2\mu_r) \alpha_r \frac{\partial T_r}{\partial x} + X_r = 0$$

$$\mu_r \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial y^2} \right] + (\lambda_r + \mu_r) \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial y^2} \right] - (3\lambda_r + 2\mu_r) \alpha_r \frac{\partial T_r}{\partial y} + Y_r = 0 \quad (8)$$

$$\mu_a \left[\frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_a}{\partial y^2} \right] + (\lambda_a + \mu_a) \left[\frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial x \partial y} \right] - (3\lambda_a + 2\mu_a) \alpha_a \frac{\partial T_a}{\partial x} + X_a = \rho \alpha_a$$

$$\mu_a \left[\frac{\partial^2 v_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial y^2} \right] + (\lambda_a + \mu_a) \left[\frac{\partial^2 u_a}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_a}{\partial y^2} \right] - (3\lambda_a + 2\mu_a) \alpha_a \frac{\partial T_a}{\partial y} + Y_a = 0$$

که در آن، u و v به ترتیب جابه جایی در راستای x و y می باشد. λ و μ ثابت های لامه، α ضریب انبساط خطی و X و Y نیروهای حجمی در راستای x و y می باشند. محاسبات مربوط به تنش با روش فون مایسز انجام گرفته است.

جدول (۱): مقادیر خواص فیزیکی متغیر با دما.

کمیت (واحد)	ریل (مس)	آرمیچر (آلومینیوم)
σ (mho/m)	$4.41 \times 10^7 / [1 + 0.0039 \times (T - 300)]$	$3.21 \times 10^7 / [1 + 0.0039 \times (T - 300)]$
μ (H/m)	$0.99999 \mu_0$	$1.000021 \mu_0$
ρ (kg/m ³)	۸۹۰۰	۲۷۰۰
k (W/mK)	۳۶۰	۲۳۰
C (J/kg.K)	$0.0987 \times T + 355$	$0.0486 \times T + 766$
مدول یانگ (GPa)	۱۲۶/۹	۷۰
ضریب انبساط خطی	$17e-5$	$1/15e-5$
نسبت پواسون	۰/۳۵	۰/۳۶

در جدول ۱، σ ضریب هدایت مغناطیسی و μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلا می باشد. هم چنین T دما، ρ چگالی، C ظرفیت ویژه حرارتی و k ضریب هدایت حرارتی می باشد. شکل و اندازه پالس جریان در سرعت و کارایی پرتابگر تاثیرگذار است. پالس جریان به صورت زیر لحاظ شده است:

$$I(t) = 3.0491 \times 10^6 e^{-1875t} \sin(956t) \quad (1)$$

۳- معادلات حاکم

برای تحلیل الکترومغناطیس و به دست آوردن توزیع میدان مغناطیسی (\vec{B}) و خطوط جریان، می بایست معادلات ماکسول در فضای جامد (ریل و آرمیچر) توسعه یابد. معادلات ماکسول به صورت زیر می باشند:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma \vec{V} \times \vec{B} \quad (4)$$

که در آن، \vec{J} چگالی جریان الکتریکی، \vec{E} شدت میدان الکتریکی و \vec{V} سرعت حرکت می باشد. با ترکیب معادلات فوق و حذف بردارهای \vec{E} و \vec{J} معادله ای برای \vec{B} به دست می آید:

$$\frac{1}{\mu \sigma} \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (5)$$

عبارت $\frac{1}{\mu \sigma}$ در معادله بالا همان نفوذ مغناطیسی را نشان خواهد داد که با D نمایش داده می شود. روابط مذکور برای

۴- شرایط مرزی و اولیه و الگوریتم حل

شرط اولیه برای میدان مغناطیسی به صورت زیر است:

$$B = 0 \quad (9)$$

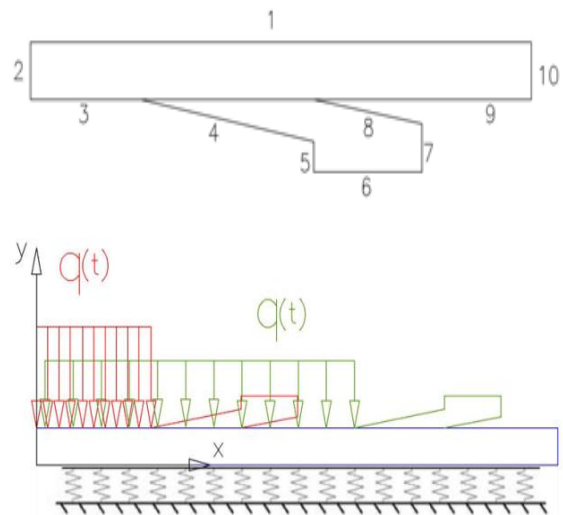
شماره گذاری مرزها در شکل ۵ مشخص گردیده است. شرایط مرزی نیز براساس شماره گذاری سطوح مرزی به صورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} S_2 & \frac{\partial B}{\partial x} = 0 \\ S_3, S_4, S_5 & B = \mu J_{int} \\ S_6 & \frac{\partial B}{\partial y} = 0 \\ S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_1 & B = 0 \end{cases} \quad (10)$$

و دو شرط مرزی روی سطح S_{11} (سطح روی ریل که با آرمیچر در تماس است) و S_{12} (سطح روی آرمیچر که با ریل در تماس است) عبارتند از:

$$\mu_a \frac{\partial B_a}{\partial y} = \mu_r \frac{\partial B_r}{\partial y} \quad (11)$$

$$B_r = B_a \quad (12)$$



شکل (۵): شماره گذاری مرزها بر روی هندسه ریل و آرمیچر (بالا) و شمای تکیه گاه (پایین).

$$at \ S_1 \quad F_y = K_f v, \sigma_{yx} = 0$$

$$at \ S_2 \quad u = 0, v = 0$$

$$at \ S_3, S_9 \quad \sigma_{yy} = 0, \sigma_{xy} = 0$$

$$at \ S_6 \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0$$

$$at \ S_4 \quad \sigma_{y'y'} = 0, \sigma_{x'y'} = 0$$

$$at \ S_8 \quad \sigma_{y''y''} = 0, \sigma_{x''y''} = 0$$

$$at \ S_5, S_7, S_{10} \quad \sigma_{xx} = 0, \sigma_{xy} = 0$$

که در آن، K_f ضریب سختی تکیه گاه می باشد. جنس تکیه گاه فایبرگلاس و مقدار ضریب سختی آن $5/15 \text{ GN/m}^2$ فرض می شود. شمای تکیه گاه در شکل ۵ نشان داده شده است.

معادلات مذکور شباهت زیادی به معادله انرژی دارد، از این رو از روش حجم محدود برای منفصل سازی معادلات استفاده شده است. روش های عددی استفاده شده در این مطالعه برگرفته از مرجع [۲۲] می باشد. این روش به کمک انتگرال بر روی حجم کنترل و اعمال قوانین بقا، معادلات حاکم بر مساله را گسسته می نماید. جهت گسسته سازی ترم پخش معادلات، از روش CDS و برای گسسته سازی ترم جابه جایی معادله میدان و دما از روش UDS مرتبه اول استفاده گردید. گسسته سازی بر روی زمان نیز بر اساس روش ADI انجام پذیرفته است. در این روش معادله در هر گام زمانی (مثلا گام زمان Δt) در دو مرحله حل می شود. بدین ترتیب که گام زمانی به دو نیمه تقسیم می شود یک قسمت از n تا $n+1/2$ و سپس از $n+1/2$ تا $n+1$ که در مرحله اول مجهولات در جهت x خواهند بود (در گام $n+1/2$) و معادلات در جهت x ضمنی و در جهت y صریح حل خواهند شد. بنابراین، حل در این مرحله را روبیدن در جهت x می گویند. جواب این دستگاه داده های مورد نیاز برای مرحله بعد (از $n+1/2$ تا $n+1$) را فراهم خواهند کرد. در مرحله بعد مجهولات در جهت y خواهند بود و معادلات در جهت y ضمنی و در جهت x صریح حل خواهند شد. این مرحله را روبیدن در جهت y می نامند.

۵- شبکه بندی

با توجه به شتاب بالا و سرعت کم آرمیچر در شروع حرکت، لازم است تا از یک شبکه غیریکنواخت استفاده شود. این

با توجه به زمان کم پرتاب تقریباً می توان فرض نمود که مرزها عایق هستند. در مورد تنش نیز شرایط زیر حاکم است:

راستای X دارد. (شکل ۶-ج) شبکه‌بندی آرمیچر را نیز نمایش می‌دهد. به دلیل ابعاد کوچک آرمیچر تراکم نقاط ایجاد شده در ریل به مراتب بیشتر از ریل است، اما این شبکه نیز از توزیع کاملاً یکنواخت بهره می‌برد.

۶- محاسبه سرعت حرکت پرتابه

با توجه به توزیع میدان محاسبه‌شده در قسمت قبل نیروی لورنتز افقی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

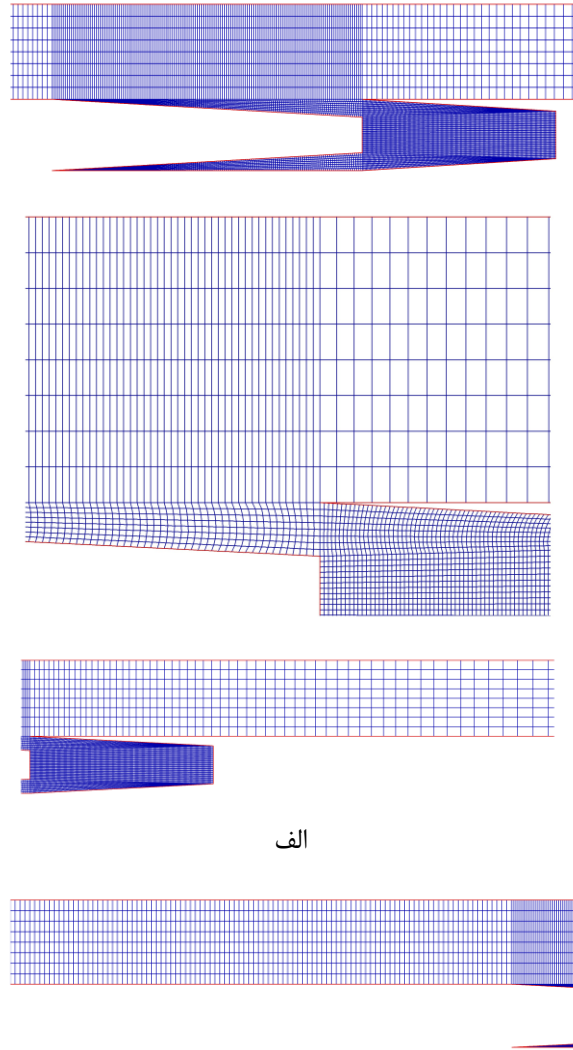
$$f_x = \left(\vec{J} \times \vec{B} \right)_x = -\frac{1}{\mu} B \frac{\partial B}{\partial x} \quad (۱۳)$$

که دیمانسون این نیرو بر اساس نیرو بر واحد حجم می‌باشد. از انتگرال این نیرو بر روی حجم آرمیچر می‌توان مقدار نیروی وارده بر آرمیچر را در هر لحظه به دست آورد. بر اساس نیروی لحظه ای، شتاب لحظه ای به دست خواهد آمد و با کمک انتگرال شتاب لحظه ای می‌توان مقدار سرعت را محاسبه نمود.

۷- نتایج

فرض می‌شود که منبع تولید توان توانایی ایجاد حدود $2/2 \text{ ms}$ ایجاد جریان موثر را دارد. بر این اساس بازه زمانی در نظر گرفته شده برای جریان اعمال شده و پرتاب آرمیچر حدود $2/2 \text{ ms}$ می‌باشد. نمودار جریان در این بازه به صورت شکل ۷ است. همانطور که ملاحظه می‌شود شیب جریان تا زمانی که آرمیچر $11/2 \text{ cm}$ را طی کند مثبت می‌باشد. شبکه در نظر گرفته شده تا حدی ریز شده است که خطای ناشی از شبکه در نتایج سرعت تاثیرگذار نباشد. جهت بررسی استقلال از شبکه، چهار شبکه با ابعاد مختلف در نظر گرفته شده است. این چهار شبکه، زمانی که آرمیچر در فاصله 2 cm از ابتدای ریل قرار دارد، دارای به ترتیب 5934 سلول (شبکه اول)، 12630 سلول (شبکه دوم)، 25186 سلول (شبکه سوم) و 53914 سلول (شبکه چهارم) می‌باشند. نتایج حاکی از آن است که تغییرات پروفیل سرعت برای شبکه‌های سوم و چهارم نسبت به شبکه دوم کمتر از یک درصد بوده و لذا شبکه دوم جهت ادامه محاسبات انتخاب گردیده است. شکل ۸ نمودار سرعت برحسب زمان حرکت آرمیچر را برای شبکه دوم نشان می‌دهد. گزارش ارایه شده در مرجع [۲۰] حکایت از آن دارد که نتایج شبکه یکنواخت دارای خطا مشهودی می‌باشد. این درحالی است که نتایج شبکه غیریکنواخت (شکل ۸) در تطابق خوبی با نتایج تجربی می‌باشد.

شبکه با سازمان به کمک بلوک‌بندی هندسه و بر اساس روش TTM [۲۲] و با توسعه یک برنامه تولید شبکه عددی در نرم-افزار MATLAB انجام پذیرفته است. شمای کلی شبکه‌بندی در شکل ۶ نشان داده شده است.



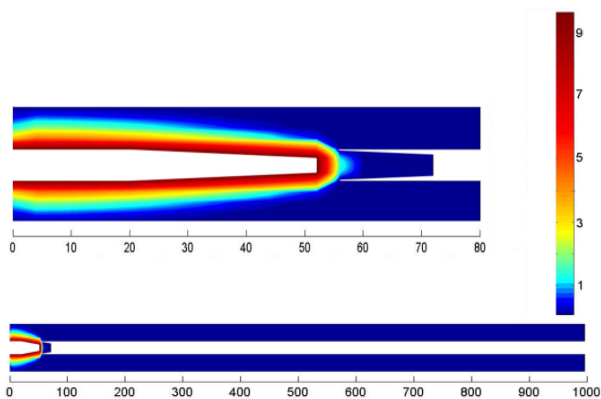
الف

ب

شکل (۶): شبکه‌بندی غیریکنواخت و با سازمان با روش TTM برای الف) آرمیچر و ناحیه مجاور آرمیچر بر روی ریل ب) ابتدای ریل قبل از آرمیچر.

در این شبکه ریل به سه قسمت قبل از آرمیچر (شکل ۶-ب)، در تماس با آرمیچر (شکل ۶-ج) و بعد از آرمیچر (شکل ۶-د) تقسیم‌بندی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه‌بندی ریل قبل از آرمیچر و در تماس با آرمیچر، دارای توزیع یکنواخت در هر دو راستا می‌باشد. شبکه‌بندی قسمت بعد از آرمیچر توزیع غیریکنواخت در

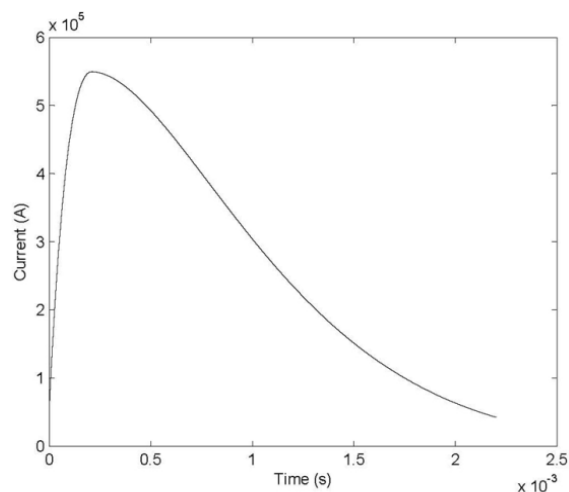
بالارفتن کارایی پرتابگر می‌شود. نشان داده شده است که پوشش‌های مقاوم (با مقاومت الکتریکی بیشتر) روی ریل می‌تواند بر روی این پدیده و میزان تمرکز جریان تاثیر بگذارد [۲۴]، ولی به دلیل تاثیر مستقیم مقاومت الکتریکی در توان تلف شده گرمایی اثر نامطلوبی از نظر گرمایش الکتریکی خواهد داشت.



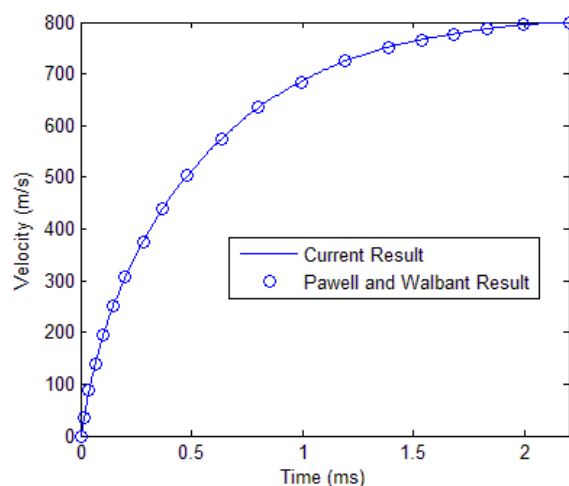
شکل (۹): توزیع میدان مغناطیسی، زمانی که انتهای آرمیچر در فاصله ۲ cm از ابتدای ریل است.

توزیع نیرو بر روی ریل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بخشی از انرژی الکتریکی صرف دور کردن ریل‌ها از یکدیگر می‌گردد لذا همان‌طور که اشاره شد تعبیه یک تکیه‌گاه سرتاسری ضروری به نظر می‌رسد. از روی محاسبات میدان می‌توان میزان توان حرارتی تولید شده در ریل و آرمیچر را محاسبه نمود. نتایج حاصل از حل این معادلات حکایت از آن دارد که در زمانی که آرمیچر به ۲ cm از ابتدای ریل می‌رسد، دما تا حدود 330 K در ریل و آرمیچر بالا می‌رود. توزیع دما در میدان حل در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

شکل ۱۲ بیشینه تنش حرارتی وارده بر ریل و آرمیچر را در طول زمان پرتاب نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که مقدار بیشینه تنش حرارتی در آرمیچر به مراتب کمتر از ریل می‌باشد. این موضوع در انتخاب جنس آرمیچر و ریل تاثیرگذار است. روند تغییرات بیشینه تنش حرارتی در ریل تا حدود 0.5 ms صعودی و سپس تا حدود 1 ms نزولی و مجدداً سیر صعودی به خود می‌گیرد. این درحالی است که تنش حرارتی در آرمیچر کاملاً روند صعودی را دنبال می‌کند. شیب تغییرات تنش حرارتی در ریل و آرمیچر در بازه 0.5 ms از ابتدای پرتاب به مراتب بیشتر از سایر لحظات می‌باشد.



شکل (۷): نمودار جریان بر اساس زمان.



شکل (۸): مقایسه نتایج سرعت برحسب زمان در مطالعه حاضر با مطالعه پاول و والبان [۲۳].

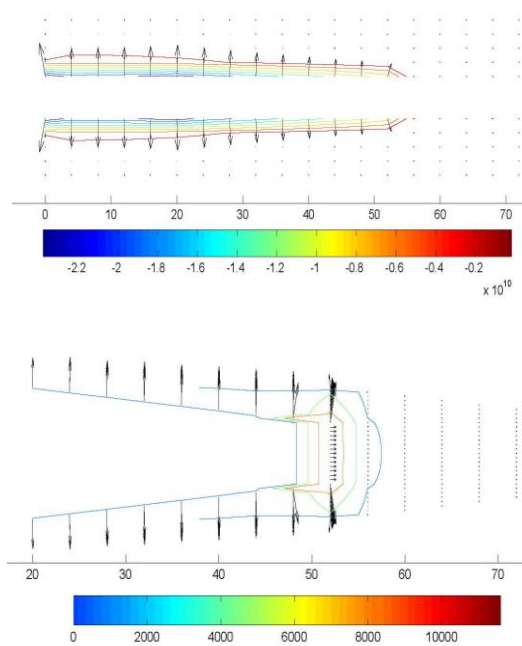
شکل ۹ نمایانگر توزیع میدان مغناطیسی در فاصله ۲ cm آرمیچر از ابتدای ریل می‌باشند. نتایج عددی حاکی از آن است که میدان چندان در داخل قسمت جلویی آرمیچر نفوذ نمی‌کند و بیشتر تاثیر جریان بر روی لبه انتهایی آرمیچر است. عملاً جریان همواره کوتاه‌ترین مسیر را جهت حرکت در هادی انتخاب می‌کند که منجر به تولید بیشینه میدان مغناطیسی می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ضخامت لایه مرزی میدان در ابتدای ریل بیشتر است. پدیده تجمع چگالی شار مغناطیسی در قسمت عقبی و داخلی ریل که در اثر سرعت آرمیچر صورت می‌گیرد و از توزیع یکنواخت آن جلوگیری می‌کند را اثر پوسته‌ای سرعت می‌نامند. این پدیده سبب تمرکز جریان الکتریکی و کاهش سطح مؤثر اتصال و گرمایش موضعی می‌شود. بنابراین، کاهش یا بهبود اثر آن باعث

۸- نتیجه‌گیری

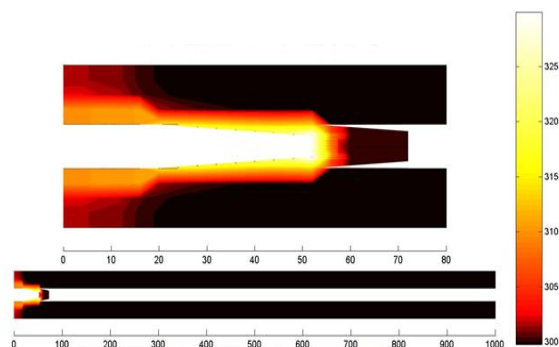
اخیراً رویکرد گسترده‌ای جهت استفاده از پرتابگرهای الکترومغناطیس در صنایع نظامی پدیدار گشته است. در این مطالعه به ارزیابی یک مدل ریاضی بر اساس معادلات ماکسول برای حل میدان در داخل یک پرتابگر الکترومغناطیس پرداخته شده است. جهت گسسته‌سازی و حل عددی معادله ماکسول از روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی بهره گرفته شده است. نتایج سرعت در توافق خوبی با نتایج محاسبه شده در مراجع پیشین می‌باشد. همچنین پدیده اثر پوسته‌ای سرعت در ریل مورد بررسی قرار گرفته است. این پدیده می‌تواند سبب تمرکز جریان الکتریکی و کاهش سطح مؤثر اتصال و گرمایش موضعی شود. در تحقیقات پیش‌رو می‌توان به ارزیابی پیشنهادهایی در جهت کاهش اثر پوسته‌ای سرعت پرداخت. توزیع نیروی وارده بر ریل و آرمیچر نیز محاسبه گردید. توزیع نیرو نشان می‌دهد بخشی از انرژی الکتریکی در ریل و بال‌های آرمیچر هدر می‌رود. شبیه‌سازی حرارتی نشان می‌دهد که در زمان مورد مطالعه دما تا حدود ۳۳۰ درجه کلوین در نقاط داخلی ریل و بال‌های آرمیچر افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار تنش حرارتی در ریل پس از گذشت ۰/۵ ms از ابتدای پرتاب اتفاق می‌افتد، این درحالی است که مقدار بیشینه تنش حرارتی در آرمیچر در تمام طول پرتاب روند صعودی داشته و در انتهای پرتاب به بالاترین مقدار خود می‌رسد.

۹- مراجع

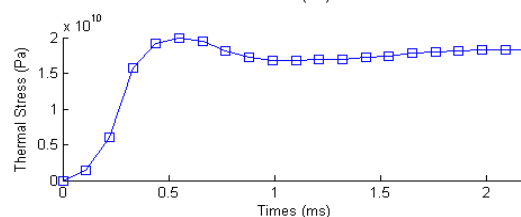
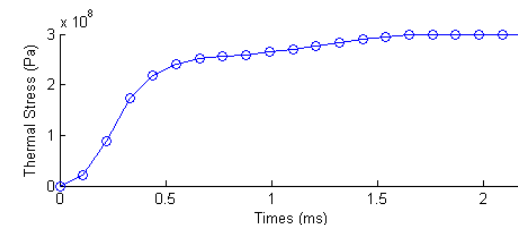
1. Long, GC. and Weldon, WF. "Limits to the Velocity of Solid Armatures in Railguns", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No.1, pp. 347-52, 1989.
2. Fair, H. "Advances in electromagnetic Launch Science and Technology and its Applications", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 1, pp. 225-30, 2009.
3. Haghmaram, R. and Shoulaie, A. "Literature review of theory and technology of air-core tubular linear induction motors [electromagnetic launcher applications]", Proc. Int. Conf. Power Eng., Bristol, UK, 2004.
4. Lockner, TR., Kaye, RJ., and Turman, BN. "Coilgun Technology, Status, applications and future directions at Sandia National Laboratories", Proc. Int. Conf. Power Modulator, San Francisco, CA, 2004.



شکل (۱۰): توزیع نیرو در ریل و آرمیچر زمانی که انتهای آرمیچر در فاصله ۲ cm از ابتدای ریل است.



شکل (۱۱): توزیع دما در ریل و آرمیچر زمانی که انتهای آرمیچر در فاصله ۲ cm از ابتدای ریل است.



شکل (۱۲): بیشینه تنش حرارتی وارده بر آرمیچر (بالا) و ریل (پایین) در طول زمان پرتاب.

16. Nechitailo, N. and Lewis, K. "Critical Velocity for Rails in Hypervelocity Launchers", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33, Vol. 1, pp. 485-95, 2006.
17. Li, D., Xu, R., Yan, P., Ren, C., and Lin, L. "Thermal Analysis of Insulators in Electromagnetic Launcher System. Properties and Applications of Dielectric Materials", *Proc. Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials*, Sydney, NSW, Australia, 2015.
18. Tang, B., Lin, Q., and Li, B. "Research on Thermal Stress by Current Skin Effect in a Railgun", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 45, No. 7, pp. 1689-94, 2017.
19. Ghassemi, M. and Varmazyar, M. "Stress Analysis of the Rails of A New High Velocity Armature Design in an Electromagnetic Launcher", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 12, pp. 1529-33, 2008.
20. Ghassemi, M., Varmazyar, M. "Thermal Stresses Analysis of the Rails and the Armature of an Electromagnetic Launcher", *Proc. 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, Victoria, BC, Canada, 2008.
21. Golmakani, ME., Rahimi, E. "Nonlinear Thermo-Elastic Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube Reinforced Composite Cylindrical Panel", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol.14, No. 1, 2017.
22. Thompson, JF., Soni, BK., Weatherill, NP. "Handbook of grid generation", CRC press, 1998.
23. Powell, J., Walbent, D. "2D Model for Current and Heat Transport in Solid Armature Railguns,". *Army Research Laboratory ARL-TR-74*, 1993.
24. Dreizin, YA. "Solid Armature Performance with Resistive Rails [railguns] ", *IEEE transactions on magnetics*, Vol. 29, No. 1, pp. 798-803, 1993.
5. Skurdal, BD. and Gaigler, RL. "Multimission electromagnetic Launcher", *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 45, No. 1, pp. 458-61, 2009.
6. Harry, H. "Electromagnetic Launcher, the Electromagnetic Launcher Technology Revolution", *Magn Business Technol*. 2003.
7. Fair, HD. "Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Era", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 1, pp. 158-64, 2005.
8. McNab, IR. "Early Electric Gun Research", *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 35, No. 1, pp. 250-61, 1999.
9. Powell, JD. and Batteh, JH. Two-Dimensional Plasma Model for the Arc-Driven Rail Gun. *J. Applied Physics*, Vol. 54, No. 5, pp. 2242-54, 1983.
10. Deis, D. and Ross, D. "Experimental launcher Facility-ELF-I: Design and Operation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 18, No. 1, pp. 23-8, 1982.
11. Werst, M., Cook, K., Kitzmiller, J., Liu, H., Price, J., and Yun, H. "Design and Testing of A Rapid Fire, Lightweight, Ultra Stiff Railgun for A Cannon Caliber Electromagnetic Launcher System", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 1, pp. 365-70, 1995.
12. Schroeder, J., Gully, J., and Driga, M. "Electromagnetic Launchers for Space Applications", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No. 1, pp. 504-7, 1989.
13. Kear, M., Oxley, C., and Burden, R. "The Culham Laboratory Hypervelocity Test Facility", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No. 1, pp. 290-4, 1989.
14. Daneshjoo, K., Rahimzadeh, M., Ahmadi, R., and Ghassemi, M. "Dynamic Response and Armature Critical Velocity Studies in an Electromagnetic Railgun", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 1, pp. 126-31, 2007.
15. Krylov, VV., Dawson, A., Heelis, M., and Collop, A. "Rail Movement and Ground Waves Caused by High-Speed Trains Approaching Track-Soil Critical Velocities", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 214, No. 2, pp. 107-16, 2000.

