اثر ابعاد شكاف پشت آرميچر بر عملكرد تفنگ ريلي

اصغر كشتكار — استاديار دانشكدة مهندسی برق و كامپيوتر، دانشگاه تبريز
حجت بهروزخانيكي — كارشناس مركز تحقيقات عالي الكترونيك، تهران

چكيده

ايده ايجاد شكاف در پشت آرميچر براي بهبود عملكرد تفنگ ريلي از مدتها پيش در ذهن پژوهشگران شكل گرفته و طي آزمايشاتي نيز اثر آنها را مشاهده كرده‌اند. در اين مقاله ضمن شبيه‌سازي سه بعدي تفنگ ريلي با استفاده از روش المان محدود اثر شكاف در توزيع جريان، توزيع ميدان و نيروي جلو برنده آرميچر مورد بررسي قرار گرفته است. اثر عرض شكاف و عمق آن در حالتهاي مختلف بهدست آمده و ضمن مقايسه آنها، مقدار بهينه اين ابعاد پيشنهاد شده است. بهطوريكه با ايجاد شكافي با اين ابعاد مي‌توان نيروي جلو برنده وارد بر آرميچر و پرتابه را ماكزيمم كرده و بازده سيستم را بهينه كرد.

كلمات كليدی: تفنگ ريلي، المان محدود، توزيع نيرو، آرميچر شكافدار.

Effect of Notch Dimensions in the Backside of Armature on Railgun Performance

A. Keshtkar — Faculty of Electrical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
H. B. Khaniki — Advanced Electronic Research Center, Tehran, Iran

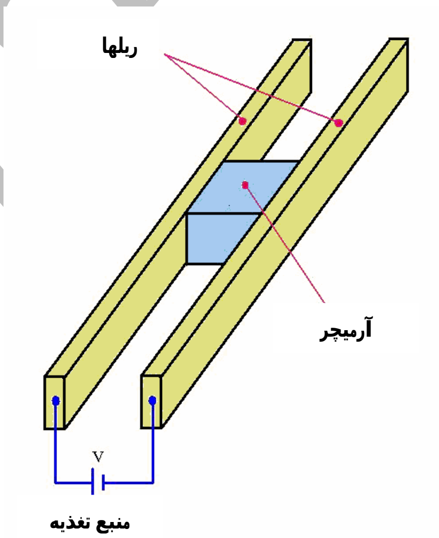
Abstract

Idea of notching the armature trailing, in order to improve the railgun performance, is minded by researchers from erstwhile. These improvements are observed by some experimentation. In this paper, railgun is simulated by a FEM code. Then the effects of slit dimensions on current density, field and armature accelerating force are investigated. Finally, Normalized accelerating force is plotted versus slit depth and width. Then optimized slit depth and width are obtained. Using the optimum dimensions, we can increase accelerating force and system efficiency. The variation of maximum current density versus slit depth and width, the armature accelerating force versus slit dimensions will be presented in this paper.

Key words: Railgun, FEM, Force, Notched armature.

۱- مقدمه

با استفاده از پرتاب كنندههاي الكترومغناطيسي كه از انرژي الكتريكي براي پرتاب استفاده می‌كنند ميتوان بهسرعتهاي بسيار بالائي دست يافت كه پرتاب كنندههاي شيميايي (يا معمولي) قادر بهرسيدن بهآن نيستند. بهدليل اينكه پرتاب در سرعتهاي زياد بهويژه در سرعت بهينه باعث دقت هدفگيري، عمق نفوذ، قدرت تخريب و احتمال برخورد بيشتري ميشود، تفنگهاي الكتريكي بسيار مورد توجه قرار گرفته است. از ميان انواع مختلف اين پرتابكنندهها، نوع تفنگ ريلي(1) بهدليل قابليتهاي بسيار بالايي كه دارد از اهميت خاصي برخوردار است. شكل (۱) ساختمان سادهاي از تفنگ ريلي را نشان ميدهد.



شكل ۱- ساختمان ساده يك تفنگ ريلي [۱]

انرژي الكتريكي بسيار زيادي در مدت زماني بسيار اندك از طريق سوئيچ، كليدزني شده و از مسير ريل گذشته و جريان بسيار بالايي را در آرميچر جاري ميسازد. اين جريان در مقابل ميدان مغناطيسي كه در اثر جريان ريلها و آرميچر ايجاد شده است توليد نيروي لورنتز(2) ميكند. اين نيرو باعث پرتاب پرتابه ميشود. مقدار اين نيرو علاوه بر اينكه تابع انرژي الكتريكي اعمال شده است، تابع ساختمان ريل و آرميچر نيز ميباشد. بهاين جهت است كه بررسي اثر شكل و جنس ريلها و آرميچر ميتواند در بهبود عملكرد و بالا بردن بازده اهميت بسياري داشته باشد. براي بررسي اثرات هندسه تفنگ ريلي در عملكرد آن لازم است ابتدا توزيع جريان، توزيع ميدان مغناطيسي و توزيع نيرو از تحليل الكترومغناطيسي ـ مكانيكي سيستم بهدست آيد. تاكنون تحليلهاي مختلفي از رفتارهاي الكترومغناطيسي تفنگ ريلي بهعمل آمده است.

اتكينسون در سال ۱۹۸۹ با استفاده از روش المان محدود(3) توانست توزيع جريان و توزيع نيرو را در تفنگ ريلي دو بعدي محاسبه كند [۲]. در سال ۱۹۹۱ راجر و همكارانش اين كميتها را در حالت سه بعدي با همان روش FEM بهدست آوردند [۳]. در سال ۱۹۹۳ پاول و همكارانش در گزارش مفصلي كه براي ارتش آمريكا تهيه كردند توزيع جريان و ميدان دو بعدي را با در نظر گرفتن اثر غير همگني ناشي از توزيع دما ارائه كردند [۴]. هسيه در سال ۱۹۹۵ در مقالهاي توزيع جريان و ميدان را در حالت سه بعدي با حل معادلات الكترومغناطيس و انتقال حرارت بهصورت تزويج شده و از روش FEM ارائه نمودند [۵]. در ايران نيز كارهاي پژوهشي متعددي در اين زمينه انجام گرفته كه بهعنوان نمونه مراجع [۶،۱ و ۷] ذكر ميشوند كه در آنها تحليل الكترومغناطيسي و حرارتي در هر دو حالت دو بعدي و سه بعدي انجام گرفته است.

از بررسي توزيع جريان و ميدانهاي بهدست آمده ميتوان بهاين ايده رسيد كه ايجاد شكاف در پشت آرميچر ميتواند مسير جريان را طوري عوض كند كه نيروي لورنتز بيشتري در آرميچر بهدست آيد. بهطور كلي نيروي وارد بر آرميچر در اثر اختلاف تراكم توزيع جريان در قسمت پشت و جلوي آرميچر يا پرتابه بهوجود ميآيد. هر چه اين اختلاف تراكم يا حجمي كه اين تراكم در آن گسترده است بيشتر باشد نيروي لورنتز بيشتر خواهد بود. با ايجاد شكاف در پشت آرميچر ميتوان ناحيهاي را كه در آن جريان از تراكم بيشتري برخوردار است گستردهتر كرده كه باعث افزايش نيرو میشود. اما اثر ابعاد اين شكاف در ميزان بهبود عملكرد بسيار مهم است كه موضوع بحث اين مقاله ميباشد.

1- Railgun
2- Lorentz
3- Finite Element Method

۲- روابط حاكم

براي به دست آوردن معادلات حاكم بر مسئله از معادلات ماكسول و روابط پايه الكترومغناطيس بهصورت زير شروع ميكنيم:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (۱)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad (۲)$$

با توجه بهاينكه در ساختمان تفنگ ريلي كه يك هادي خوب است از جريان جابهجائي $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ صرفنظر ميشود و با استفاده از رابطه بردار پتانسيل مغناطيسي زير:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \qquad (۳)$$

ميتوان بهدست آورد:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\nabla \times \vec{A}\right) \qquad (۴)$$

يا

$$\nabla \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \qquad (۵)$$

كه چون كرل تابع داخل پرانتز صفر است، در الكترومغناطيس آنرا با گراديان پتانسيل الكتريكي نشان ميدهيم:

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla V \qquad (۶)$$

يا

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \qquad (۷)$$

جريان جاري در ساختمان تفنگ ريلي را ميتوان متشكل از دو بخش ناشي از ميدان الكتريكي و جريان اعمال شده توسط منبع $\vec{J}_s$ بهصورت زير دانست:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \qquad (۸)$$

كه در آن σ ضريب هدايت هاديهاي بهكار رفته است. با توجه بهاينكه ضريب نفوذ مغناطيسي اين مواد μ_0 است با تركيب روابط (۸)، (۷) و (۲) و صرفنظر كردن از جريان جابهجائي $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ميتوان بهدست آورد:

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \left(\nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \nabla V = \vec{J}_s \qquad (۹)$$

لازم بهتوضيح است كه با توجه به زياد بودن ضريب هدايت σ ريلها و آرميچر، جريان داخل آن از نوع جريان هدايتي (و نه از نوع جريان جابهجائي) است بهعبارت ديگر جريان جابهجائي $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ در داخل هاديهاي تفنگ ريلي در مقابل جريان هدايتي $\sigma \vec{E}$ قابل صرفنظر ميباشد. اين يكي از تقريبهاي متداول در تحليل اين سازهها بوده و بهحالت شبه استاتيك موسوم است.
از طرف ديگر با توجه بهرابطه ديگر ماكسول يعني:

$$\nabla . \vec{E} = 0 \qquad (۱۰)$$

و جايگذاري رابطه (۷) در آن بهدست ميآوريم:

$$\nabla . \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \right) = 0 \qquad (۱۱)$$

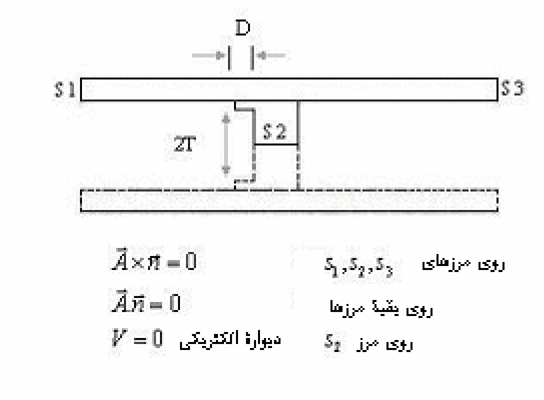
معادلات (۹) و (۱۱) معادلات اساسي براي حل مسئله تفنگ ريلي بوده كه از حل آنها پتانسيلهاي $\vec{A}$ و V بهدست آيد. از اين پتانسيلها نيز با استفاده از روابط (۳)، (۷) و (۸) توزيع ميدان مغناطيسي و جريان بهدست ميآيد. با استفاده از اين دو كميت ميتوان نيروي وارد بر آميچر را از رابطه زير كه نشان دهنده نيروي لورنتز است بهدست آورد:

$$\vec{F} = \iiint_{v_a} \vec{J} \times \vec{B}\, dv \qquad (۱۲)$$

که در آن v_a حجم آرميچر است.

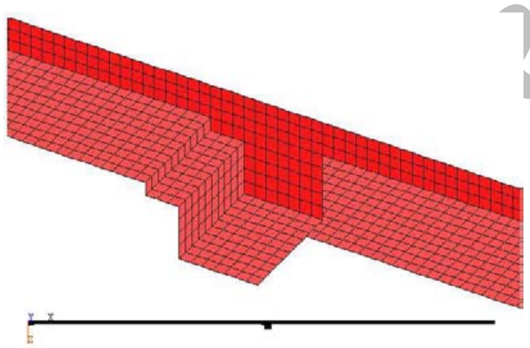
۳- شبيهسازي و نتايج عددي

براي حل معادلات (۹) و (۱۱) علاوه بر جريـان تحريـك $\vec{J}_s$ شرايط مرزي نيز لازم است. مطابق شكل (۲) براي سطوحي كـه جريان بهآن وارد يا خارج ميشود (مثل ابتداي ريل يعني سـطح s_1) مؤلفههاي مماسي بردار $\vec{A}$ صـفر هـستند. بـا بـهكـارگيري تقريب هادي كامل براي مواد بهكار رفته مؤلفـه عمـودي $\vec{A}$ نيـز در تمام سطوح مرزي ريل و آرميچر با محيط بيرون صفر ميشود. براي صرفهجوئي در زمان و حافظه نيز از تقارن ساختماني مسئله ميتوان استفاده كرده و نصف مـسئله را حـل كـرد. در ايـنصورت مطابق شكل (۲) در سطح تقارن سيـستم كـه از وسـط آرميچـر ميگذرد (سطح تقارن s_2) ديواره الكتريكي قرار ميگيرد.



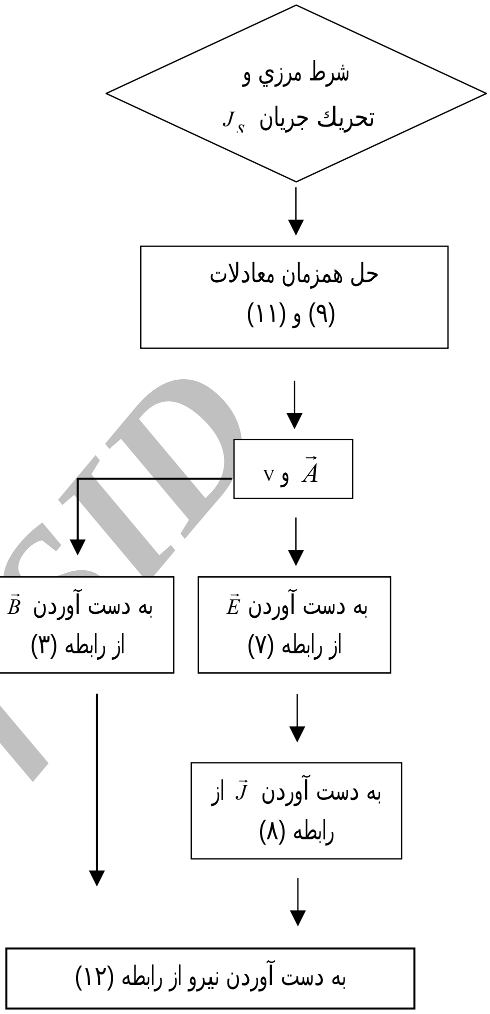
شكل ۲- شرايط مرزي حاكم بر نصف ساختمان تفنگ ريلي

با استفاده از معادلات (۹) و (۱۱) و شرايط مرزي فوقالذكر ميتوان مسائل مربوط به تفنگ ريلي را حل نمود. بهعنوان نمونه ريل مسي به ابعاد ۱۰۰ * ۲ * ۰/۵ سانتيمتر مكعب با آرميچري آلومينيومي مكعب مستطيلي به ابعاد ۲ * ۲ * ۲ سانتيمتر مكعب مورد تحليل قرار گرفت و شكافي به ابعاد مختلف در پشت آرميچر ايجاد شده و با حلهاي متوالي اثر آن روي نيروي جلو برنده بررسي گرديده است. در اين تحليل از المانهاي مكعب مستطيلي مرتبه اول (۸ گرهي) به ابعاد ۲ * ۲ * ۲ ميليمتر مكعب مطابق شكل (۳) استفاده ميشود. ريل به ۱۵۰۰۰ المان و آرميچر به ۳۸۰ المان تقسيم بندي شده است. اين مسئله با استفاده از آلگوريتم نشان داده شده در شكل (۴) حل ميشود. چنانچه از اين شكل پيدا است ابتدا شرايط مرزي شرح داده شده را بههمراه جريان منبع (كه به سطح S1 وارد ميشود) اعمال ميكنيم. برنامه طوري نوشته شده است كه با وروديهاي فوق معادلات ديفرانسيل (۹) و (۱۱) بهروش FEM حل گشته و پتـانسيلهاي $\vec{A}$ و V بهدست ميآيند. سپس از معادلات (۷) و (۳) ميدانهاي $\vec{B}, \vec{E}$ از روي $\vec{A}$ و V محاسبه ميگردند. با مشخص شدن $\vec{E}$ ميتوان $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ را روي تمام نقاط سازه و $\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma\vec{E}$ را در سطح ورودي S1 بهدست آورد. در اينصورت با مشخص شدن $\vec{B}, \vec{J}$ نيروي لورنتز از رابطه (۱۲) بهدست خواهد آمد.

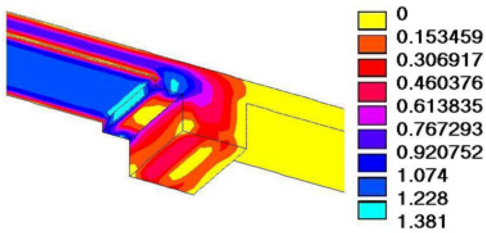


شكل ۳- تفنگ ريلي مشبندي شده (نصف ساختمان)

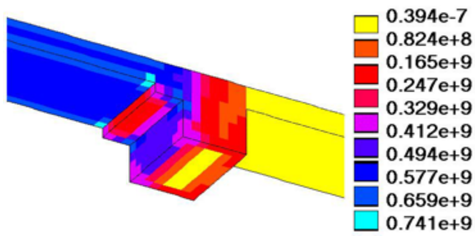
توزيع جريان $\vec{J}$ و چگالي شار مغناطيسي $\vec{B}$ بهدست آمـده در شكلهاي (۵) و (۶) نشان داده شده است در شكل (۶) عـلاوه بـر توزيع دامنه جريان، توزيع بردار جريان نيز نشان داده شده است. مقايسه توزيع مؤلفه J_z جريان در فصل مشترك ريل ـ آرميچر در شكل (۷) نشان داده شده است.



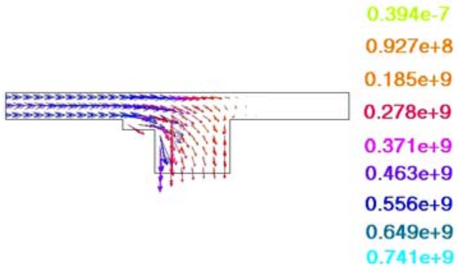
شکل ۴- فلو چارت حل مسئله تفنگ ريلي



شکل ۵- توزيع ميدان مغناطيسي براي شكاف بهينه



شکل ۶- توزيع جريان براي شكاف بهينه

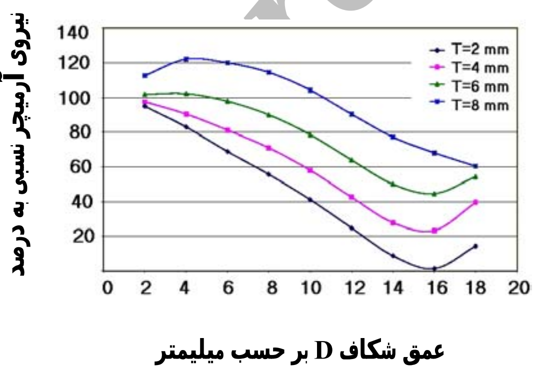


شکل ۷- توزيع بردار جريان J_z ريل - آرميچر

مدل فوق براي شكافهاي مختلف با مقادير مختلف عرض شكاف (T) و عمق شكاف (D) مطابق شكل (۲) حل شده است. نمودار نيروي جلوبرنده آرميچر برحسب تغييرات T و D در شكل (۸) نشان داده شده است. چنانچه از اين شكل پيدا است افزايش عرض شكاف T باعث بهبود عملكرد تفنگ ريلي يا افزايش نيروي جلوبرنده مي‌شود. در حاليكه افزايش عمق شكاف (D) اگرچه در مراحل ابتدائي ممكن است باعث بهبود عملكرد شود ولي در كل باعث كاهش نيرو مي‌شود. از طرف ديگر افزايش بيش از حد عرض شكاف بهدليل كم شدن ضخامت لايه‌هاي كناري آن كه بايد قابليت تحمل جريان را داشته باشد امكان ندارد. براي داشتن ديدي بهتر از ماكزيمم جريان شكل (۹) اين كميت را به ازاي ابعاد مختلف شكاف نشان ميدهد. با استفاده از شكل (۸) ميتوان ابعاد شكاف بهينه را بهصورت زير بهدست آورد:

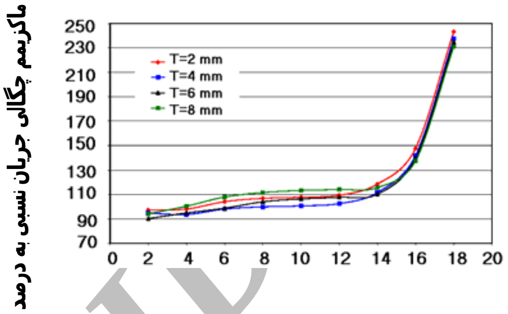
$$T = 8mm$$

$$D = 4mm$$



شکل ۸- درصد نيروي جلوبرنده نسبت به حالت بدون شكاف براي ابعاد مختلف شكاف

مي‌توان در حالت كلي به اين نتيجه رسيد كه عـرض شـكاف بـه پهناي آرميچر ۰/۸ و عمق شكاف به طول آرميچـر۰/۴ مـي‌توانـد بهبيشترين نيروي جلوبرنده يا بهترين عملكرد تفنگ ريلي منجـر شود كه با ثابت بودن ديگر شرايط، بازده آنرا افزايش خواهد داد.



شكل ۹- درصد ماكزيمم مقدار چگالي جريان آرميچرنسبت بهحالت بدون شكاف در ابعاد مختلف شكاف

۴- نتيجه‌گيري

در اين مقاله، براي بررسي اثر ابعاد شـكاف پـشت آرميچـر در عملكرد تفنگ ريلي، آلگوريتمي براي حل مسئله تفنگ ريلـي در حالت سه بعدي با استفاده از روش المان محدود پيـشنهاد شـده، روابط لازم استخراج گرديده است. سپس با اسـتفاده از آلگـوريتم فوق مسئله در حالت بدون شـكاف و بـا شـكافهاي مختلـف حـل گشته، توزيع ميدانها، توزيع جريانهـا و نيـروي جلوبرنـده در هـر حالت بهدست آمده است. بـا مقايـسه نيـروي فـوق در حالتهـاي مختلف ابعاد بهينه شكاف مشخص شده است. لازم به تذكر است كه محاسبه توزيع دما حالتهـاي مختلـف شـكاف، بـراي بررسـي تنشهاي حرارتـي و ذوب شـدگي بـسيار مهـم بـوده و در دسـت بررسي است كه اميدواريم در آيندة نزديـك نتـايج آن را منتـشر كنيم.

مراجع

[۱] اصغر كشت‌كار، محمد سليماني، "تحليـل حرارتـي تفنـگ ريلي سه بعدي و غير همگن با روش المان محدود" مجلـه دانشكده فني دانشگاه تبريز، بهار و تابستان ۱۳۷۹، شماره ۲۴، صفحات ۵۷ تا ۶۲.

[2] S. P. ATKINSON, "The Use of Finite Element Analysis Techniques For Solving Railgun Problems", IEEE Transaction on Magnetic, Vol.25, No.1, January 1989, pp.52-56.

[3] D. Rodger, P. J. Leonard and J. F. Eastham, "Modeling Electromagnetic Rail Launchers at Speed Using 3D Finite Element", IEEE Transaction on Magnetic, Vol.25, No.1, January 1991, pp. 314-317.

[4] J. D. Powell, D. J. Walbert, and A.E. Zielinski, "Two Dimensional Model for Current and Heat transport in solid Armature Railguns", US Army Research laboratory Report Number ARL-TR-74, February 1993.

[5] Kuo-Ta Hsieh, "A Lagrangian Formulation for Mechanically Thermally Coupled Electromagnetic Diffusive Processes with Modeling Conductors", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.31, No.1, January 1995, pp. 604-609.

[6] A. Keshtkar, M. Soleimani, "Inhomogeneous Effects of Temperature Changes on the Velocity of Railgun in Three Dimensional condition", International Journal of Engineering, Vol.14, No.1, February 2001, Page 41.

[۷] مجيد قاسـمي، رضا پسـنده، اصغر كشـت‌كار "آناليز دو بعـدي حرارتـي و الكترومغناطيـسي پرتـابگر الكترومغناطيس به روش حجـم كنتـرل و بـا المـان‌بنـدي متحرك بي سازمان"، مجله دانشكده فني دانـشگاه تبريـز، بهار و تابستان ۱۳۸۰، شماره ۲۶، صفحات ۶۷ تا۷۸.

[8] B. K. Kim, K. T. Hsieh, "Effect of Rail/Armature Geometry on Current Density Distribution and Inductance Gradient", IEEE Transactions on Magnetic, Vol.35, No.1, January 1999, pp. 413-416.