آناليز دوبعدي حرارتي و الكترومغناطيسي پرتابگر الكترومغناطيس بهروش حجم كنترل و با المانبندي متحرك بيسازمان

مجيد قاسمي	استاديار دانشكدة مكانيک دانشگاه صنعتي خواجهنصيرالدين طوسي، مركز تحقيقات عالي الكترونيك
رضا پسنده	محقق ارشد مركز تحقيقات عالي الكترونيك
اصغر كشتكار	استاديار گروه برق دانشكدة فنی دانشگاه تبريز، مركز تحقيقات عالي الكترونيك

چكيده

در تفنگ ريلي كه براي شتاب دادن اجسام بهكارميرود از انرژي الكتريكي براي تحريك سيستم استفاده ميشود. براي بهدست آوردن سرعتهاي زياد از منبع تغذيه با انرژي زياد استفاده ميشود كه باعث ايجاد جريان شديدي روي ريل و آرميچر ميگردد. اين جريان در اثرتلفات اهمي تبديل بهانرژي گرمايي شده باعث گرم شدن نقاط مختلف و در نتيجه تغيير مشخصات الكتريكي، حرارتي و مكانيكي سازه ميگردد. هدف اين مطالعه بهدست آوردن توزيع دما وچگالي شار مغناطيسي در ريل و آرميچر ميباشد. در مطالعات انجام شده تاكنون براي اين كار از روش تفاضل محدود با المانبندي مستطيلي شكل استفاده شده است. در اين مطالعه براي بهدست آوردن توزيع دما و چگالي شار مغناطيسي در ريل و آرميچر از روش حجم محدود استفاده شده است. المانبندي مورد استفاده از نوع بيسازمان و مثلثي شكل است. استفاده از اين نوع المانبندي امكان اعمال دقيق شرايط مرزي را فراهم ميسازد. همچنين المانبندي متحرك امكان تحليل دمايي و الكترومغناطيسي آرميچر متحرك در طول ريل را فراهم ميسازد. نتيجة تحليل، كانتورهاي دما و چگالي شار مغناطيسي در ريل و آرميچر ميباشد. با استفاده از اين كانتورها محل ماكزيمم دما و چگالي شار مغناطيسي و مقادير آنها بهدست خواهند آمد. همچنين رفتار دمايي و الكترومغناطيسي آرميچر در طول ريل مشخص خواهد شد.

كلمات كليدی: تفنگ ريلی، توزيع دما، روش حجم محدود

Thermal and Electromagnetic Analysis of 2D Inhomogeneous Railgun Using Control Volume Method With Unstractural and Moving Mesh Generation

M.Ghassemi	K.N.Toosi Univ., AERC
R.Pasandeh	Advanced Electronic Research Center (AERC)
A.Keshtkar	University of Tabriz, AERC

Abstract

In the railgun electrical energy is used to drive the system. In order to reach hypervelocity, a power supply with immense amount of energy must by used which causes an extra ordinary current on the rail and the armature. This current makes thermal energy by the ohmic attenuation and warms up various points and therefore changes the electrical, thermal and mechanical specifications of the structure. The purpose of this study is to obtain thermal and magnetic induction distribution in the rail and the armature. In before studies, finite difference method with structural mesh generation is used for this work, but in this study we use control volume method with unstructural and moving mesh generation in the rail and the armature. This type of mesh generation lets us the apply boundary condition carefully. Also, by moving mesh generation we can analyze system in every position of armature.

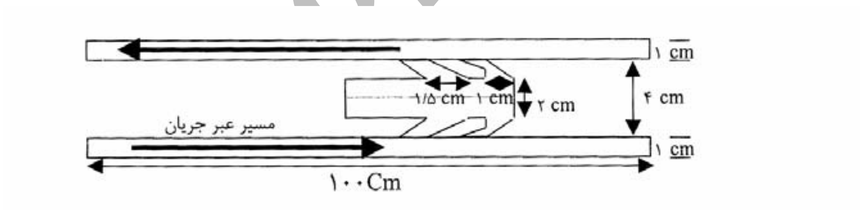
Key words: Railgun, Temperature distribution, Control volume method

۱- مقدمه

در سالهاي اخير، تلاشهاي زيادي در زمينة تحقيـق و توسـعة پرتابگرهاي الكترومغناطيس انجام شده اسـت. ايـن پرتابگرهـا بـا توجه بهاينكه از تنوع زياد مخـصوصاً در نـوع آرميچـر برخـوردار هـستند، داراي طيـف وسـيعي از كاربردهـاي مختلـف ميباشند.كاربردهاي نظامي (اساساً مـرتبط بـا بـهدسـت آوردن سرعت زياد و طراحي و ساخت تسليحات با بـرد بيـشتر)، پرتـاب هواپيما براي پرواز و پرتاب مستقيم مواد بهفضا و شتاب دادن تـا سرعتهاي خيلي زياد دستهاي از اين كاربردها مـيباشـند [۱]. در اين مقالـه تحليـل حرارتـي يـك مـدل دو بعـدي از پرتابگرهـاي الكترومغناطيسي (ريلگان) مورد بحث قرار ميگيرد. بهعلـت عبـور جريان بسيار زيـاد از ريـل و آرميچـر و سـرعت بـالاي آرميچـر، سيستم ريل و آرميچر بهشدت گرم مـيشـود و در نتيجـه محـل تماس ريل و آرميچر بهحالت ذوب مـيرسـد. در اثـر گرمـايش و ذوب شـدگي ريل و آرميچر پس از چند شليك، جريان بهصورت ناقص از محل تماس ريل و آرميچر عبور كرده وكـارآيي پرتـابگر پايين خواهد آمد. بنـابراين هـدف اينـست كـه نقـاط بحرانـي از نظرحرارتي را تشخيص دهـيم. بـراي پيـدا كـردن توزيـع دمـا و چگالي شار مغناطيسي نياز بهداشـتن اطلاعـات مقـدماتي نظيـر چگالي توزيع جريان ريل و آرميچر، جنس، هندسه، ابعاد وخواص ترموفيزيكي والكترومغناطيسي ريل و آرميچر داريم.

۲- معادلات حاکم

طرحوارهاي از ريلگان مورد مطالعـه را كـه شـامل هندسـه و ابعاد مدل است، در شكل (۱) ملاحظه ميكنيـد. جريـان توسـط يك منبع توليد توان به يكي از ريلها فرستاده ميشود، سـپس از آرميچر عبور ميكند و از ريل ديگر بر ميگـردد و بـدين ترتيـب مـدار بسته مـيشود. تقابل جريان عبوري از آرميچـر بـا ميـدان مغناطيسـي، نيروي لورنتس (Lorentz) را ايجـاد مـيكنـد كـه

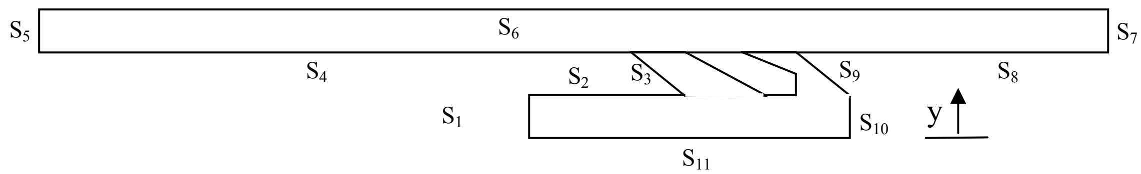


شکل ۱- طرحواره (هندسه و ابعاد) مدل مورد نیاز

سبب شتاب گرفتن پرتابه ميشود [2]. چون مدل متقارن اسـت، تحليل نيمي از سازه كافي اسـت (محـور تقـارن محـور x اسـت. شكل(۲)). ريل و پرتابه در جهـت z نامحـدود فـرض مـيشـوند. جنس ريلها از مس و پرتابه از آلومينيوم بوده كه مشخصات آنهـا در جدول(۱) آمده است. طول ريل و آرميچـر بـهترتيـب ۱۰۰و۷ سانتيمتر ميباشد.

جدول ۱- خواص مواد مورد استفاده در تحلیل [3,4]

	مس	آلومینیوم
σ	۴/۴۱*۱۰^۷ / [۱+۰/۰۰۳۹*(T- ۳۰۰)] mho/m	۳/۲۱*۰^۷ / [۱+۰/۰۰۳۹*(T- ۳۰۰)]mho/m
C	۰/۰۹۸۷*T+۳۵۵ J/kg.K	۰/۴۸۶*T+۷۶۶ J/kg.K
ρ	۸۹۰۰ kg/m^۳	۲۷۰۰ kg/m^۳
K	۴۰۰ W/m.K	۲۰۵ W/m.K



شكل ۲- مدل متقارن مورد تحليل

معادلات حاكم در اين مسئله معادلات ماكسول و معادله انتقال حرارت در ريلها و پرتابه مي‌باشند كه معادلات ماكسول با فرض نداشتن جريان جابجايي بهصورت زير هستند:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \qquad (۱)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (۲)$$

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \qquad (۳)$$

$\vec{E},\vec{B},\vec{J}$ بهترتيب چگالي جريان، چگالي شار مغناطيسي و شدت ميدان الكتريكي هستند. همچنين c,σ,K,μ و V بهترتيب قابليت نفوذ مغناطيسي، ضريب هدايت حرارتي، ضريب هدايت الكتريكي ، گرماي ويژه و سرعت آرميچر هستند. ريل و آرميچر را در راستاي z بينهايت فرض مي‌كنيم بنابراين E_Z و J_Z از معادلات حذف مي‌شوند و معادلات (۱) و (۳) تزويج نشده[1] خواهند شد و يك معادله ديفرانسيل پاره‌اي مرتبه دوم بهدست خواهد آمد كه جابجايي و پخش ميدان مغناطيسي را پيشبيني مي‌كند. اين معادله پس ازساده شدن بهصورت زير نوشته مي‌شود [1]:

$$\mu\sigma\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} - \mu\,\sigma\,V\frac{\partial B}{\partial x} - \frac{1}{\sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial B}{\partial x} - \frac{1}{\sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial y}\frac{\partial B}{\partial y} \qquad (۴)$$

در بهدست آوردن معادلة (۴) فرض كرده‌ايم كه σ بهزمان و مكان وابسته است. بهعبارت بهتر σ تابعي از دما و دما تابعي از زمان و مكان است.

معادلة انتقال حرارت در حالت كلي بهصورت زير است:

$$\nabla.(k\nabla T) + S = \rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۵)$$

كه در آن k ، ρ ، c و S بهترتيب ضريب هدايت حرارتي، چگالي، گرماي ويژه و عبارت چشمه[2] مي‌باشند. عبارت چشمه شامل سه قسمت اهمي، اصطكاكي و گرماي نهان ناشي از ذوب شدگي ميباشدكه فقط اثرترم اهمي در معادلات اعمال شده و از دو ترم ديگر صرفنظر شده است. عبارت گرمايش اهمي بهصورت زير است [7,8]:

$$S_{ohm} = \frac{\vec{J}.\vec{J}}{\sigma} \qquad (۶)$$

با جاگذاري معادلات ماكسول در رابطة (۶) و سادهسازي آن بهمعادلة زير مي‌رسيم:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} + \rho c V\frac{\partial T}{\partial x} = k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu^2\sigma}[(\frac{\partial B}{\partial x})^2 + (\frac{\partial B}{\partial y})^2] + \frac{\partial k}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial y} \qquad (۷)$$

در رابطة (۷) c تابعي از دما و k و ρ مستقل از دما هستند. در جدول (۱) وابستگي يا عدم وابستگي پارامترهاي ذكر شده بهدما و روابط مربوطه مشخص شده است.

1- un coupled

2- Source

۳- شرايط مرزي

معادلات (۴) و (۷) معادلات ديفرانسيلي هستند كه بايد تحت شرايط مرزي و اوليه حل شوند. از آنجا كه تقارن حول محور x هميشه برقرار است، بنابراين فقط معادلات را بايد براي $y \ge 0$ حل مي‌كنيم. شرايط مرزي و اوليه موجود، شرايط $B(y)=B(-y), T(y)=T(-y)$ را ارضا مي‌كند. طرحوارهاي از سيستم ريل–آرميچر را در شكل (۲) مشاهده ميكنيد. با اينكه تحليل براي يك شكل خاص انجام شده است، اما بهراحتي قابل تعميم بهساير هندسه‌ها نيز هست.

فرض كردهايم بين هاديها و محيط اطرافشان هيچ هدايت حرارتي وجود ندارد (سيستم آدياباتيك) [5] . پس در تمام سطوح هادي بهجز سطوح تماس بين ريل و آرميچر داريم:

$$\hat{n}.\nabla T=0 \qquad (۸)$$

كه در آن $\hat{n}$ بردار واحد عمود بر سطح (كه بهطرف هادي است) مي‌باشد. براي يك جريان ورودي مشخص، شرايط مرزي در ميدان القايي مغناطيسي بهراحتي در بيشتر سطوح از قانون آمپر قابل محاسبه است. اگر فرض كنيم كه J جريان بر واحد ارتفاع (عمق) ريل باشد، و با فرض استفاده از ريل كمكي [5] داريم:

$$\begin{aligned} &B=2\mu J && \text{for} \quad S_1,S_2,S_3,S_4 \\ &B=\mu J && \text{for} \quad S_8,S_9,S_{10} \\ &B=0 && \text{for} \quad S_6,S_7 \\ &\frac{\partial B}{\partial y}=0 && \text{for} \quad S_{11} \end{aligned} \qquad (۹)$$

در رابطة (۹) ، J از روابط زير بهدست مي‌آيد [5]:

$$\begin{aligned} &J=J_0\sin(\frac{\pi.t}{2t_0}) && \text{for} \;\; t\le t_0 \\ &J=J_0\exp[-2(t-t_0)/t_1] && \text{for} \;\; t\ge t_0 \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

كه در آن $J_0=17.8\,MA/m$ ، $t_0=260\mu s$ و $t_1=2029\mu s$ فرض ميشوند. انتخاب فرم سينوسي-نمايي جريان، بهدليل شباهت آن با جريان حقيقي بهدست آمده از منبع انرژي موجود ميباشد.

در ابتداي ريل نيزكه جريان وارد شده و بهصورت موازي با محور x خارج مي‌شود، داريم [5].

$$\frac{\partial B}{\partial x}=0 \qquad for \;\; S_5 \qquad (۱۱)$$

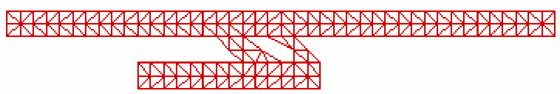
در ناحيه بين پرههاي آرميچر و ريل چگالي شار مغناطيسي فقط تابع زمان خواهد بود. بنابراين شرط مرزي در اين ناحيه بهصورت زير ميباشد [6]:

$$A_H\frac{dB}{dt}=-\int\frac{\vec{J}}{\sigma}\cdot d\vec{l} \qquad (۱۲)$$

در رابطه بالا A_H مساحت ناحيه مذكور و $d\vec{l}$ الماني از محيط آن ميباشد. از آنجاكه ريل و آرميچر از جنسهاي متفاوتي تشكيل شده‌اند، در تحليل مسئله خواص در ناحيه تماس برابر ميانگين خواص ريل و آرميچر فرض شده است.

۴- روش عددي

براي حل معادلات (۴) و (۷) از روش حجم كنترل استفاده كرده‌ايم. در اينجا از شبكه‌بندي يكنواخت و بي‌سازمان متحرك مثلثي بهره برده‌ايم. استفاده از المان مثلثي شكل بهخاطر اعمال دقيق شرايط مرزي ميباشد، زيرا هميشه رئوس مثلثها كه در واقع نقاط كنترل هستند روي مرزهاي فيزيكي جسم قراردارند. درشكل (۳) يك نمونه از المانبندي سازه موردنظر نشان داده شده است.



شكل (۳): مدل مش‌بندي شده

برنامه كامپيوتري بهنحوي تهيه شده كه با دريافت مكان موردنظر براي تحليل، آرميچر را به آن نقطه منتقل كرده و المانبندي را انجام ميدهد. بعد از آن، معادلات را روي المانها گسسته ميسازد.

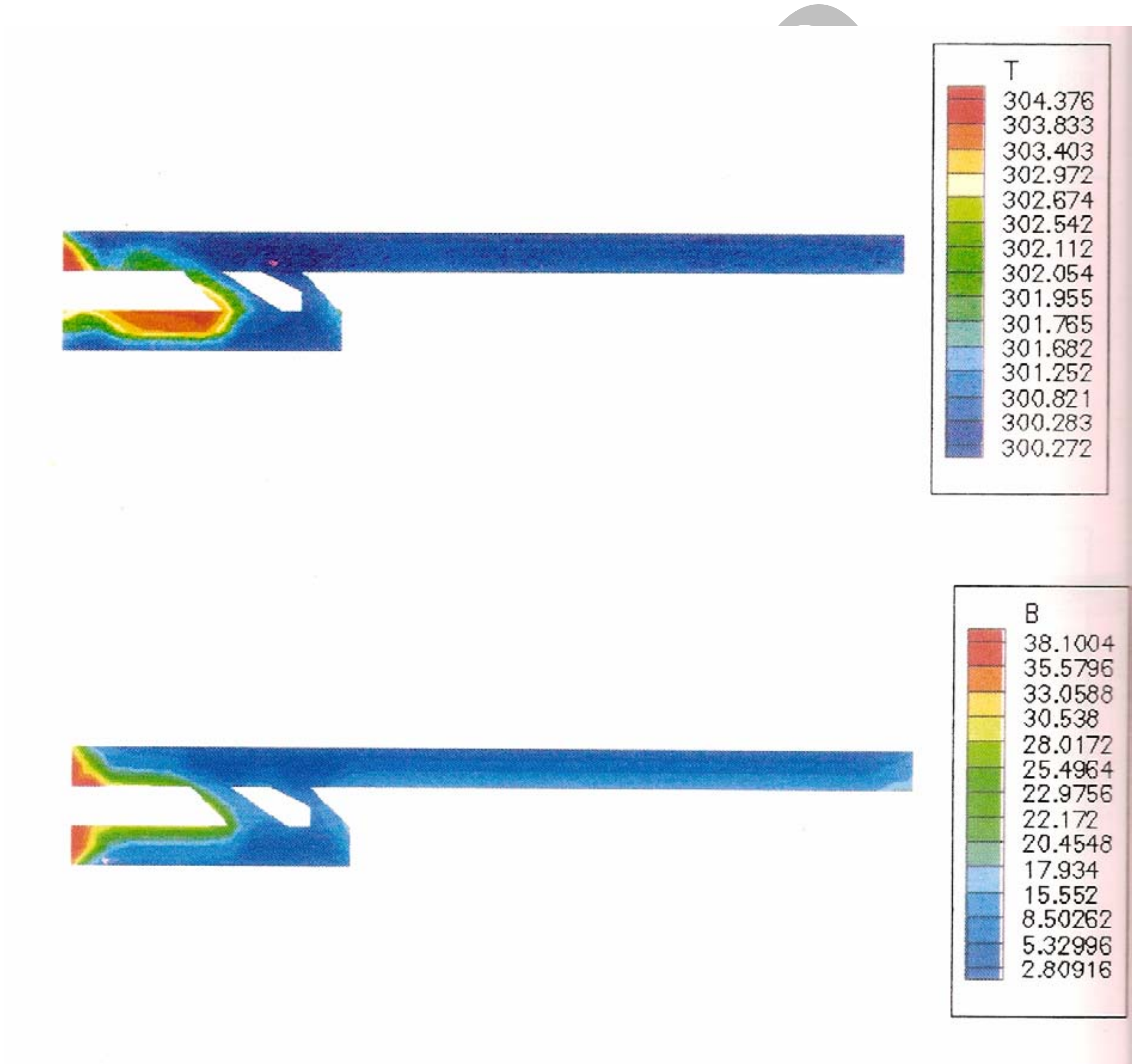
از آنجا كه بازة زماني بسيار كوچك و در حد نانو و ميكروثانيه مي‌باشد، روش حل صريح[1] استفاده شده است. چون روش

1- Explicit

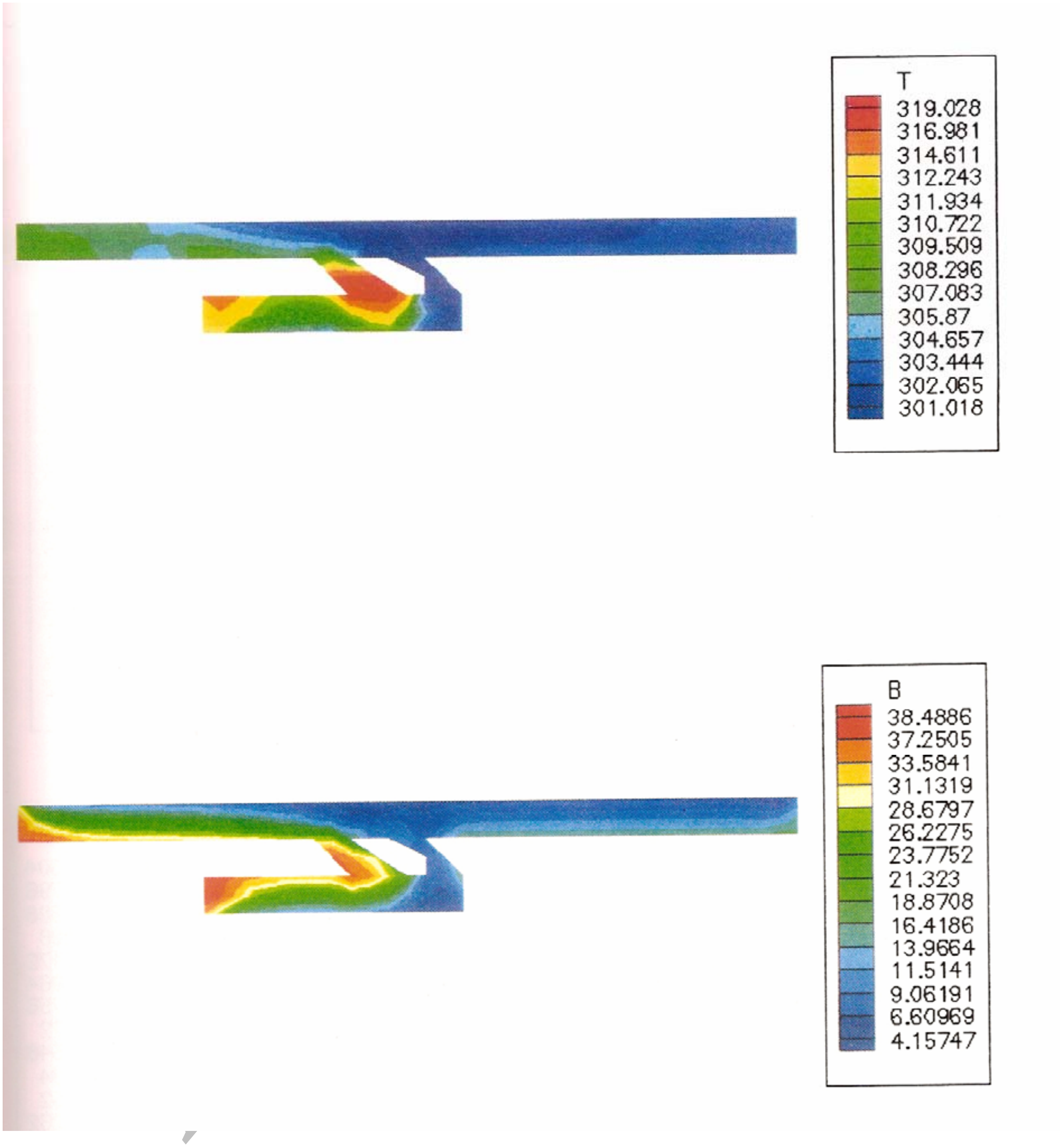
غيرصريح بهحل دستگاه ماتريسي مجهولات ميانجامـد و خطـاي محاسبات ناشي ازحل دستگاه و تعداد تكـرار زيـاد باعـث ايجـاد خطا در پاسخ نهايي خواهد شد. لازم بهذكر است كه زمـان كـل حركت آرميچر در ريل يك متري برابر ۱/۴ ميلي ثانيه مـيباشـد. شيوهٔ حل بهاين گونه است كه از معادلات (۴) و (۷) روي سـطح انتگرالگيري ميشود، سپس با استفاده از قـضية گـرين، انتگـرال سطح بهانتگرال خط تبديل ميشود. براي استفاده از قضية گرين، در بعضي از ترمهاي معادلات مذكور بايد خطيسازي صورت گيرد. در اين حالت از روش خطيسازي نيوتن استفاده شده است. بعد از خطيسازي، معادلات براي المان مثلثـي شـكل، گسـسته شـده و حل ميشوند.

۵- نتيجهگيري

در شكلهــاي(۴) تا (۷) توزيع دما وچگالي شار مغناطيسي از

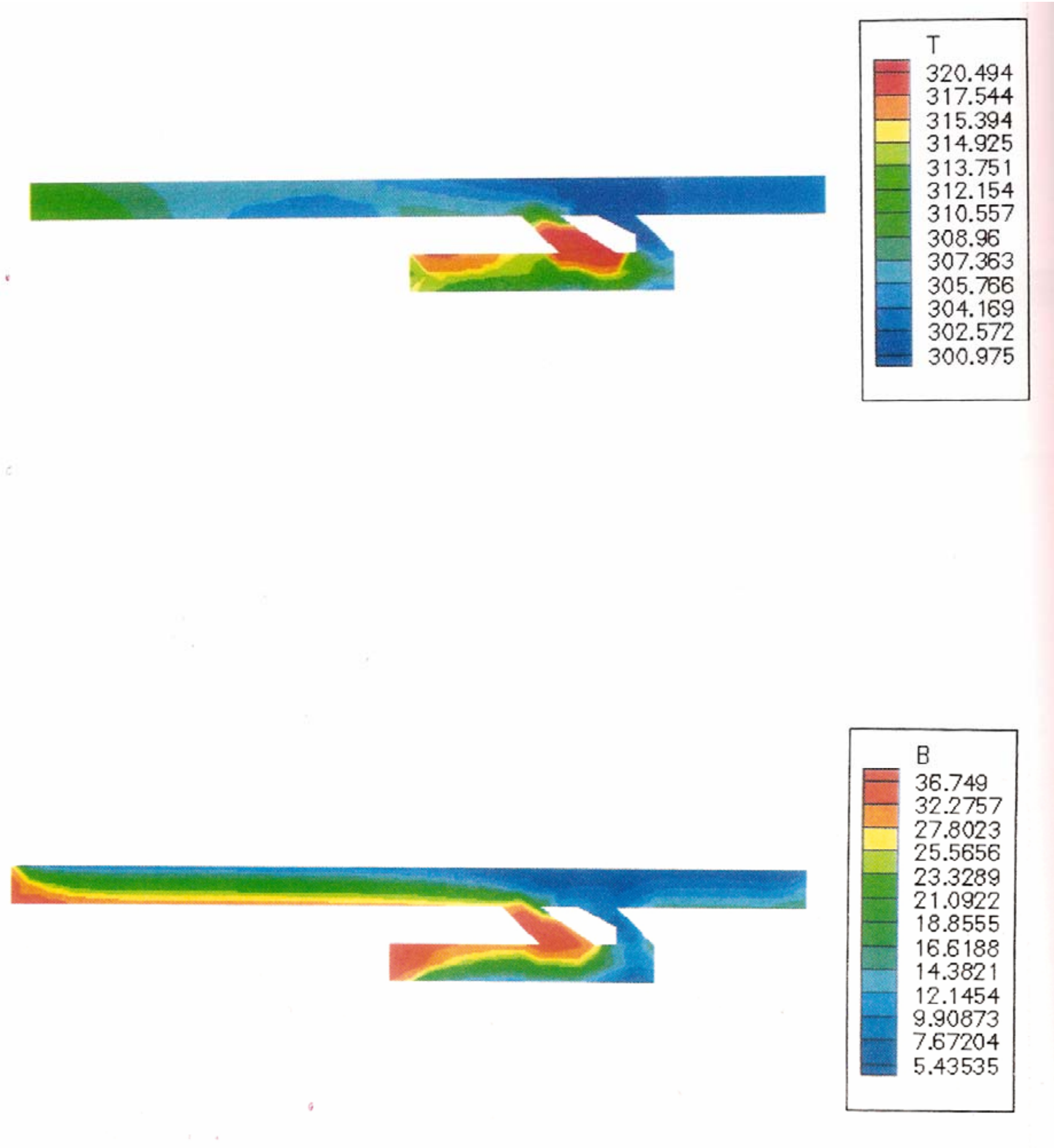


شكل ۴-توزيع دما و چگالی شار مغناطيسی در X=0



شکل ۵- توزیع دما و چگالی شار مغناطیسی در X=5

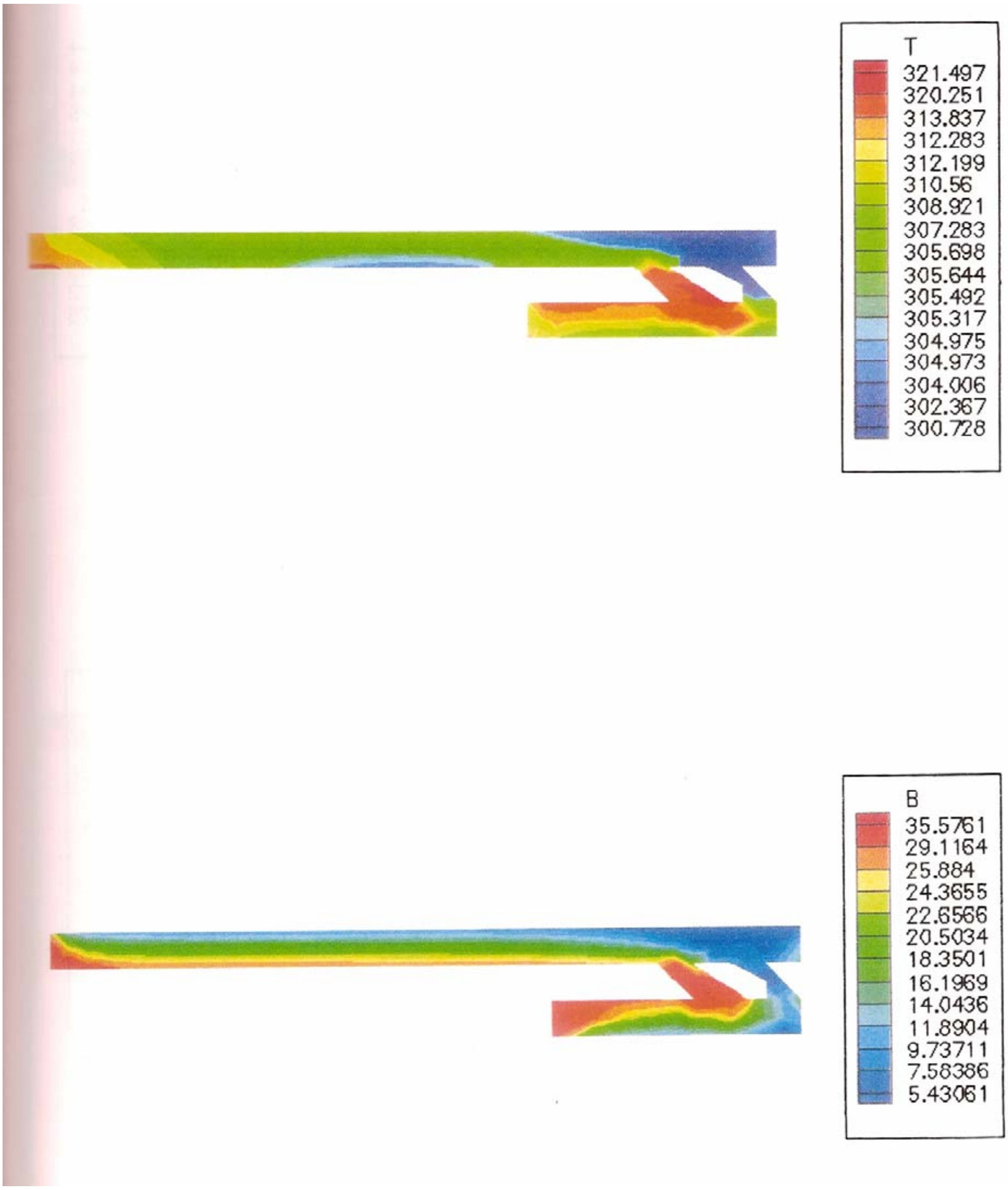
ابتداي حركت تا لحظه خروج در چهار مكان مختلف نشان داده شده است. همانطور كه ملاحظه ميشود دما در سيستم روند صعودي دارد، ضمن اينكه ماكزيمم دما درون آرميچر واقع ميشود.



شکل ۶- توزیع دما و چگالی شار مغناطیسی در X=10

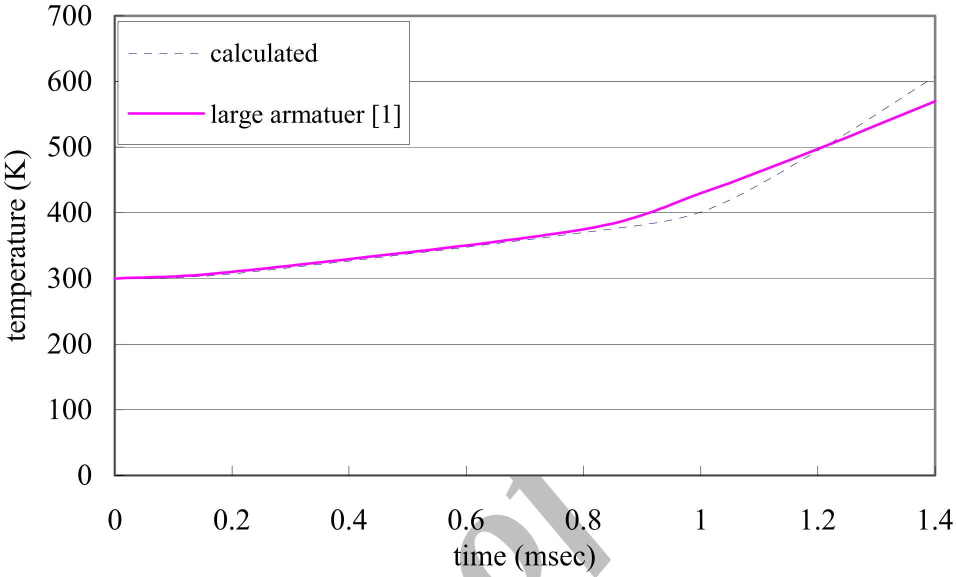
ولی چگالي شار مغناطيسي ابتدا روند صعودي و سپس روند نزولي دارد که ایـن رفتار بهعلت تغيير تابع منبع تغذيه ميباشد (معادلة (۱۰)). با مقایسه نتایج تحقیق با کارهاي انجام شده موجود [9 و ۱] مشخص میشود که رفتار سیستم و رشد دما و

چگالي شار مغناطيسي با وجود اختلاف در شكل آرميچر تقريبا يكسان ميباشد (نمودار(۱)) .



شکل ۷- توزیع دما و چگالی شار مغناطیسی در X=14

پس در این روش میتوان در هر مکان و با اعمال شرایط مرزي کاملاً صحیح بهتحلیل همزمان حرارتي و الکترومغناطیسي سیستم پرداخت، بدون اینکه احتیاج بهانجام کارهاي دیگر نظیر المانبندي، وارد کردن مشخصات فیزیکي جدید در میدانهاي دمايي والکترومغناطیسي بهدست آمده و مشخص نمودن موقعیت ریل و پرتابه نسبت بهیکدیگر باشد.



نمودار۱- نمودار مقایسه دماي ماکزیمم برحسب زمان

مراجع

[۱] اصغر کشتکار. "شبیهسازي سه بعدي موتورهاي جریان مستقیم DCLM (محیط غیر همگن با زمان)" پایاننامه براي دریافت درجه دکترا در رشته مهندسي برق. دانشگاه علم و صنعت. بهمن ۷۷.

[2] Chapman.] .S "Electric Machinery Fundamentals." Mc Grow – hill , (1985).

[3] Keshtkar, A. Soleimani, M "Inhomogeneous Effects on Temperature Change on the velocity of Railgun in 3-D Condition", International Journal of Engineering , Vol 14. No 1 , February 2001.

[4] Decker. J "Electrical Engineering Materials". Prentice Hall, (1983).

[5] Powell, J. D. and Walbert, D. J. "2D Model for Current and Heat Transport in Solid Armature Railguns". Army Research Laboratory ARL–TR–74 (Feb , 1993).

[6] Powell, J. D. and Zielinski, A. E. "Current and Heat Transport in the Solid–Armature Railguns". IEEE Trans. on Magnetic, Vol. 31, No.1, (Junuary 1995), 640-650.

[7] Hsieh, K.T and Kim, B, k, "3D Modeling of Sliding Electrical Contact". IEEE Trans. on Magnetic, Vol. 33, No. 1, (January 1997).

[8] Powell, J. D. and Zielinski, A. E. "Observation and Simulation of Solid Armature Railguns Performance". IEEE Trans. on Magnetic, Vol. 33, No. 1, (January 1997).

[9] Hsieh , K .T , "A Lagrangian Formulation for Mechanically, Thermally Coupled Electromagnetic Diffusive Processes With Moving Conductors", IEEE Trans. on Magnetic , Vol. 33, No. 1 , (January 1995), 604-609.