اثر ابعاد ريل در توزيع ميدان مغناطيسی و گراديان اندوکتانس تفنگ ريلي

اصغر کشتکار
استاديار دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپيوتر، دانشگاه تبريز

چکيده

توزيع ميدان مغناطيسی در تفنگ ريلي[1] مؤثرترين عامل در تعيين بازده آن است. اين توزيع تابع عوامل مختلفي مثل هندسه و ابعاد ريل و آرميچر ميباشد. در اين مقاله اثر ابعاد ريلها و فاصله بين آنها در توزيع ميدان مغناطيسي توليد شده مورد بررسي قرار ميگيرد. گراديان اندوکتانس[2] (L') نيز از کميتهاي بسيار مورد توجه در بحث پرتاب کنندههاي الکترومغناطيسي بوده و مستقيماً نيروي وارد بر پرتابه را تحت تأثير قرار ميدهد. در اين مقاله L' براي ابعاد مختلف ريل محاسبه و باهم مقايسه ميشود. براي شبيهسازي و آناليز پرتاب کننده الکترومغناطيسي از روش المان محدود دو بعدي استفاده شده است.

کلمات کليدی: گراديان اندوکتانس، تفنگ ريلي، روش المان محدود، ميدان مغناطيسی.

Effect of Rail Dimensions on Railgun magnetic field distribution and Inductance Gradient

A. Keshtkar
Faculty of Electrical and computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Magnetic field distribution in railgun structure is the effective factor that determines its efficiency. This field distribution is affected by rails and armature geometry and dimensions. This paper investigates how the rails dimensions and spaces affect the magnetic field distribution, magnetic flow density and inductance gradient (L'). L' plays an important role in the performance of an Electromagnetic Launcher (EML), and it determines directly the force that accelerate projectile. A finite element method is discussed to simulate two dimensional railgun in this study. Finally L' for various dimensions are tabulated and compared with values obtained from other methods.

Key words: Inductance gradient, Railgun, FEM, Magnetic flow.

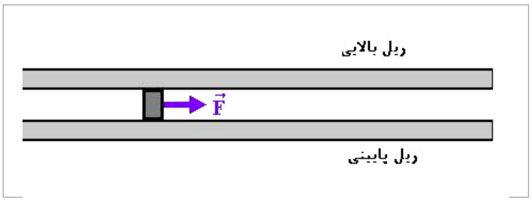
1- Railgun
2- Inductance Gradient

۱- مقدمه

تفنگ ريلي يكي از پرتاب كنندههاي مهم و متداول الكترومغناطيسي است كه براي پرتابها با سرعتهاي بسيار زياد مورد استفاده قرار ميگيرد. بازده اين پرتاب كنندهها كه به صورت نسبت انرژي جنبشي پرتابه به انرژي الكتريكي اعمال شده تعريف ميشود، عاملي است كه به صورت جدي مورد توجه محققين ميباشد. براي افزايش بازده از شكلهاي هندسي متفاوتي براي ريل و آرميچر استفاده ميشود. براي بررسي بازده، عامل مهم جايگزين نيروي وارد بر آرميچر و در نتيجه گراديان اندوكتانس است كه از رابطه زير تبعيت ميكند [۱]:

$$F = \tfrac{1}{2} L' I^2 \qquad (۱)$$

كه در آن L' گراديان اندوكتانس (برحسب هانري بر متر H/m) و I جريان گذرنده از ريل و F نيروي وارد بر آرميچر مطابق شكل (۱) است.



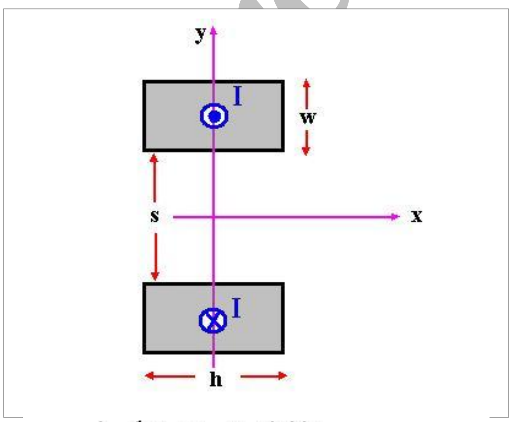
شکل ۱- ساختمان یک تفنگ ریلی

گراديان اندوكتانس L' تابعي از كاليبر [۲]، عرض و ضخامت ريل است. تاكنون تلاشهاي زيادي براي محاسبه L' صورت گرفته است [۳و۴]. اين عمل بهروشهاي مختلفي نيز اندازهگيري شده است [۵]. در حال حاضر تحقيقات زيادي براي تعيين عوامل مؤثر در L' و نيز مشخص نمودن مقادير بهينه اين عوامل صورت ميگيرد. در اين مقاله اثر سه عامل ضخامت w، عرض h و فاصله ريلها s در بازهاي كه در عمل به كار ميرود بررسي شده و نتايج حاصل تبيين ميگردد كه براي طراحي ميتواند بسيار مفيد باشد.

۲- بیان مسئله

در مواردي كه دو هادي طويل به موازات هم قرار گرفته و يك جريان مستقيم dc در آنها در خلاف جهت هم جريان دارد محاسبه گراديان اندوكتانس بسيار ساده بوده و از روشهاي تحليلي قابل انجام است. اما در پرتاب كنندهها به دليل دشارژ سريع انرژي منبع تغذيه در لحظه كليدزني، با جريان لحظهاي گذرا سروكار داريم كه باعث ميشود جريان فقط از لايه سطحي هادي عبور كرده (اثر پوسته) و با گذشت زمان در آن نفوذ كند. براي محاسبه L' در اين حالت نياز به تحليل حالت گذرا وجود دارد. اما در عمل ميتوان يك فركانس ac پيدا كرد كه درآن هارمونيك اصلي جريان فوق عمل كرده و محاسبات آن با تقريب بسيار خوبي انجام مىگيرد. اين روشها از محاسبات بسيار سادهتري نسبت بهحالت گذرا برخوردار هستند و اندازهگيري را نيز ممكن ميسازند.

براي شبيهسازي چنين مسألهاى، به دليل طويل بودن ريلهاي پرتاب كننده، ميتوان تغييرات در جهت طول ريل را صرفنظر نموده و مطابق شكل (۲) از يك ساختمان دو بعدي استفاده كرد. براي آناليز دوبعدي اين سازه جنس ريلها مس با ضريب هدايت $\sigma = 5.7 \times 10^{8}\ \mathrm{S/m}$ در نظر گرفته شده و اطراف آنها هوا فرض ميشود. سپس با توجه بهتقارن ساختماني پرتاب كننده نسبت به دو صفحه x-z و y-z با گذاشتن شرايط مرزي مناسب فقط يك چهارم ساختمان مسئله، مشبندي وحل ميشود. به دليل اينكه ميدان مغناطيسي ايجاد شده توسط دو ريل عمود بر صفحه y-z و مماس بر صفحه x-z است، به جاي صفحه y-z، ديواره مغناطيسي $H_t = 0$ و به جاي صفحه x-z ديواره الكتريكي $H_n = 0$ قرار ميگيرد.



شکل ۲- سطح مقطع تفنگ ریلی

براي حل مسئله فوق در حالت گذرا بايد از روابط زير استفاده كرد [۶]:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \qquad (۲)$$

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J} \qquad (۳)$$

که در آن $\vec{B}$ چگالي شار مغناطيسي، $\vec{A}$ پتانسيل برداري مغناطيسي، μ گذردهي مغناطيسي، σ ضريب هدايت و $\vec{J}$ چگالي جريان توليد کننده $\vec{A}$ و در نتيجه $\vec{B}$ ميباشد.

در رابطة فوق جريان ادي[1] القائي به صورت زير ظاهر شده است:

$$\vec{J}_e = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \qquad (۴)$$

رابطه (۳) در حالت دو بعدي که در آن $\vec{J}$ فقط در جهت طولي جريان داشته و $\vec{A}$ نيز هم جهت با آن خواهد بود، به صورت زير در ميآيد:

$$\nabla \bullet (\frac{1}{\mu} \nabla A) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -J \qquad (۵)$$

در حالت هارمونيك زماني (ac) که جريان J با فرکانس ω بهريل اعمال ميشود با تبديل $\frac{\partial}{\partial t}$ به $j\omega$ رابطه فوق به صورت زير در ميآيد :

$$\nabla \bullet (\frac{1}{\mu} \nabla A) - j\omega\sigma A = -J \qquad (۶)$$

از حل اين رابطه ميتوان A را بهدست آورده با قرار دادن در رابطه (۲) چگالي شار مغناطيسي $\vec{B}$ را محاسبه کرد. در اينصورت انرژي ذخيره شده مغناطيسي در واحد طول از رابطه زير به دست ميآيد:

$$E_m = \tfrac{1}{2} \iint \frac{|\vec{B}|^2}{\mu} ds \qquad (۷)$$

که اين همان نيروي وارد بر آرميچر بوده و برابر است با:

$$F = E_m = \tfrac{1}{2} \sum_i \frac{1}{\mu_i} |\vec{B}_i|^2 S_i \qquad (۸)$$

که در آن i نشان دهنده المان i ام و S_i نشان دهنده سطح آن است. با توجه به اینکه L' نسبت انرژي مغناطيسي ذخیره شده در واحد طول به مربع جریان است، از تلفیق دو رابطه اخیر با رابطه (۱)، رابطه نهایی برای محاسبه L' به دست میآید:

$$L' = \frac{2F}{I^2} \qquad (۹)$$

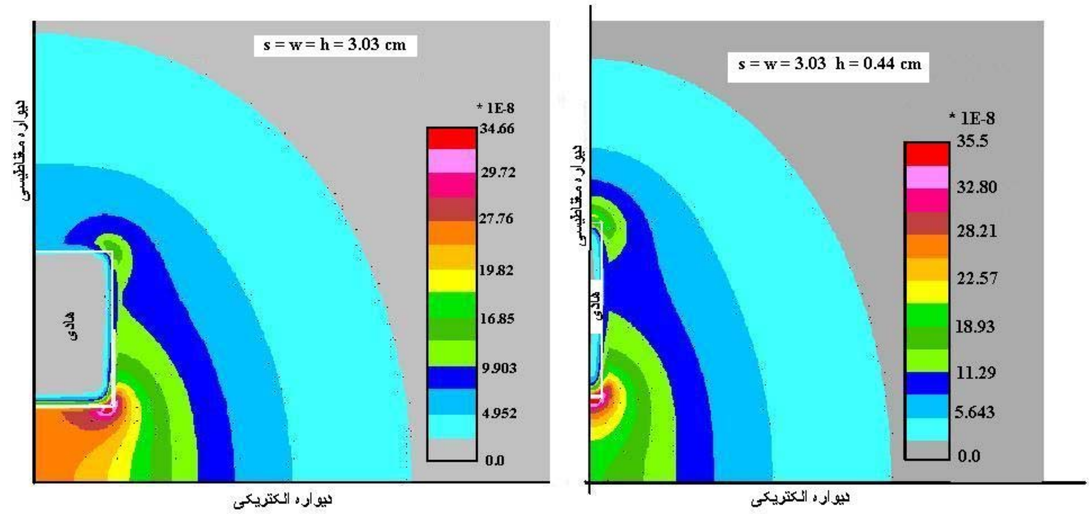
۳- نتايج عددي

روابط فوق به روش المان محدود براي ربع شکل (۲) حل شده و توزيع جريان، چگالي شار مغناطيسي و گراديان اندوکتانس براي مقادير مختلف w، h و s به دست آمده است. شکل (۳) توزيع چگالي شار مغناطيسي را براي s=w= ۳/۰۳ cm با مقادير مختلف h نشان ميدهد. ملاحظه میشود که با کاهش عرض ریل، علاوه بر اینکه دامنه چگالی شار افزایش میيابد، تراکم آن نیز در کنارههای بخش داخلی ریل بالا میرود. نتیجه طبیعی چنین رفتاری، افزایش L' است. در شکل (۴) این کمیت براي h=s=۳/۰۳ سانتيمتر و براي مقادير مختلف w و در شکل (۵) براي h=w=۳/۰۳ سانتيمتر و براي مقادير مختلف s نشان داده شده است. این شکلها نشان میدهند که اثر کاهش w نیز مشابه تأثیر کاهش h بوده و افزایش دامنه چگالی شار (خصوصاً در لبه داخلی ریلها) و L' را در بر دارد. در حالیکه کاهش s با اینکه چگالی شار را افزایش میدهد کاهش L' را نیز به همراه دارد. دلیل این امر در انرژی ذخیره شده نهفته است که از رابطه (۷) نیز مشهود است.

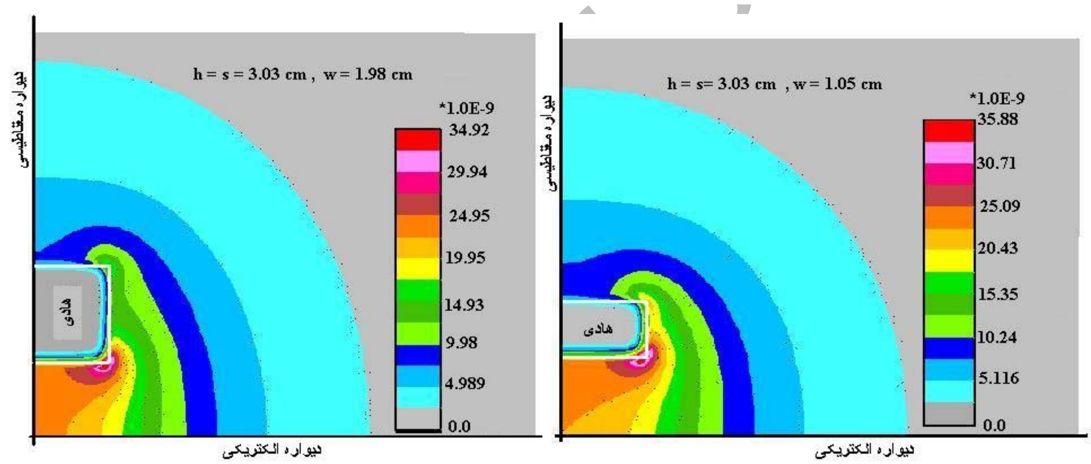
جدول (۱) مقادير مختلف L' محاسبه شده بهازاي w ، h و s هاي مختلف را نشان ميدهد. با توجه به مقادير اين جدول میتوان دريافت که بهطور کلی تفنگ ریلی با ریلهای باریک و فاصله ریلهای (کالیبر) زیاد دارای گرادیان اندوکتانس بیشتری است.

براي اطمينان از صحت مقادير محاسبه شده آن را با مقادير محاسبه شده يا اندازهگيري شده معتبر مقايسه ميکنيم.

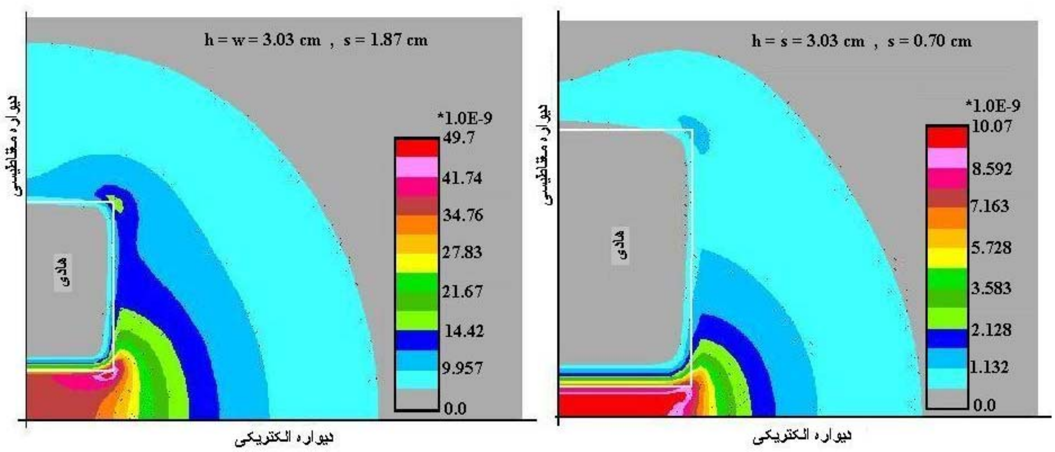
1- Eddy Current



شکل۳- توزیع چگالي شار مغناطیسي براي مقادیر مختلف h



شکل۴- توزیع چگالي شار مغناطیسي براي مقادیر مختلف w



شکل ۵- توزیع چگالی شار مغناطیسی برای مقادیر مختلف S

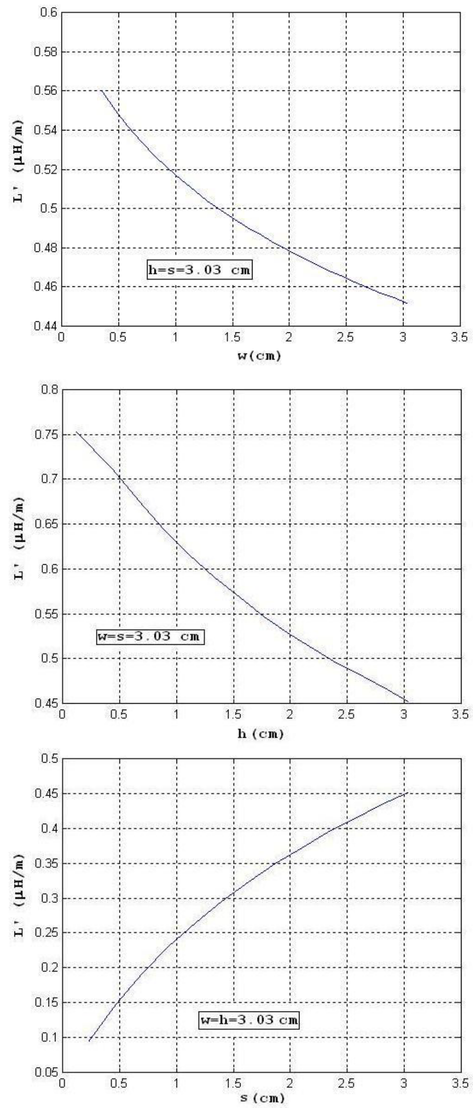
جدول ۱- مقادیر مختلف L' محاسبه شده به ازاي ابعاد متفاوت

h=s=۳/۰۳ cm		w=s=۳/۰۳ cm		w=h=۳/۰۳ cm	
w (cm)	L' (μH/m)	h (cm)	L' (μH/m)	s (cm)	L' (μH/m)
۳/۰۳	۰/۴۵۱۷۴	۳/۰۳	۰/۴۵۱۷۴	۳/۰۳	۰/۵۴۱۷۴
۲/۹۲	۰/۴۵۴۳۷	۲/۸۵	۰/۴۶۵۲۷	۲/۸۰	۰/۴۳۳۷۴
۲/۸۰	۰/۴۵۷۰۳	۲/۶۴	۰/۴۷۹۵۰	۲/۵۷	۰/۴۱۴۵۹
۲/۶۸	۰/۴۵۹۸	۲/۴۲	۰/۴۹۴۵۷	۲/۳۳	۰/۳۹۴۲۰
۲/۵۷	۰/۴۶۲۶	۲/۲۱	۰/۵۱۰۵۸	۲/۱۰	۰/۳۷۲۳۸
۲/۴۵	۰/۴۶۵۶	۲/۰۰	۰/۵۲۷۴۷	۱/۸۷	۰/۳۴۸۹۳
۲/۳۳	۰/۴۶۸۷	۱/۷۷	۰/۵۴۶۷۶	۱/۶۳	۰/۳۲۳۵۶
۲/۲۲	۰/۴۷۱۹	۱/۵۶	۰/۵۶۷۷۰	۱/۴۰	۰/۲۹۵۸۹
۲/۱۰	۰/۴۷۵۳	۱/۳۳	۰/۵۹۰۶۰	۱/۱۷	۰/۲۶۵۴۲
۱/۹۸	۰/۴۷۸۹	۱/۱۱	۰/۶۱۵۷۹	۰/۹۳	۰/۲۳۱۴۴
۱/۸۷	۰/۴۸۲۴	۰/۸۹	۰/۶۴۳۸۱	۰/۷۰	۰/۱۹۲۸۹
۱/۷۵	۰/۴۸۶۳	۰/۶۷	۰/۶۷۵۴۲	۰/۴۷	۰/۱۴۸۱۰
۱/۶۳	۰/۴۹۰۳	۰/۴۴	۰/۷۱۲۱۲	۰/۲۳	۰/۰۹۴۰۷
۱/۵۲	۰/۴۹۴۶	۰/۱۱	۰/۷۵۴۲۹		
۱/۴۰	۰/۴۹۹۱				
۱/۲۸	۰/۵۰۳۹				
۱/۱۷	۰/۵۰۹۱				
۱/۰۵	۰/۵۱۴۶				
۰/۹۳	۰/۵۲۰۵				
۰/۸۲	۰/۵۲۶۹				
۰/۷۰	۰/۵۳۳۹				
۰/۵۸	۰/۵۴۱۶				
۰/۴۷	۰/۵۵۰۴				
۰/۳۵	۰/۵۶۰۸				

براي ابعاد s=h=۲cm و w=0.5 cm مقدار L' در مرجع [۴] برابر ۰/۵۲۴۸ $\mu H/m$ محاسبه شده كه از جدول ارائه شده در مرجع [۳] نيز مقدار ۰/۵۲۷۸ $\mu H/m$ براي آن به دست مي‌آيد مقداري كه از روش ارئه شده در اين مقاله براي ابعاد فوق محاسبه شده ۰/۵۲۶۳ است كه از دقت خوبي در مقايسه با دو مقدار داده شده فوق برخوردار است. اين مقادير با مقادير L'=۰/۵۲ محاسبه شده و با L'=۰/۵۲۲ اندازه‌گيري شده در مرجع [۵] بخوبي مطابقت دارد. براي نسبت $\frac{s}{h}=\frac{w}{h}=1$ مقداري كه با اين روش محاسبه گرديده و در جدول (۱) نيز براي s=h=w=۳/۰۳ cm نشان داده شده است L'=۰/۴۵۱۷۴ $\mu H/m$ است كه دقيقاً همان مقداري است كه در مرجع [۳] ارائه شده است.

مقادير ارايه شده در جدول (۱) نشان ميدهند كه با افزايش w و h، مقدار L' كاهش يافته و با افزايش s مقدار L' افزايش مييابد. بنابراين از اين ديدگاه، ريل نازك (با عرض و ضخامت كم) و با فاصله زياد، بهتر است. البته اين فقط از نقطه نظر L' است ولي در تصميمگيري در انتخاب مقادير آنها علاوه بر L' بايد بهمقدار جريان قابل تحمل، حجم وجرم پرتابه، كاليبر و مشخصات مكانيكي نيز توجه شود.

شکل (۶) تغییرات L´ را برحسب w ،h و s به طور جداگانه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که ضخامت ریل (w یا h) باعث کاهش L' شده و افزایش فاصله دو ریل، افزایش L´ را در پی دارد.



شکل۶- تغییرات L' برحسب s، w و h

۴- نتیجهگیری

با توجه به اینکه L' عامل مهمي در تعيين نيروي وارد بر پرتابه در پرتاب کنندههاي الکترومغناطيسي است. در اين مقاله سعي شد تا اثر ابعاد ريلها و فاصله آنها در چگالي شار مغناطيسي و گراديان اندوکتانس محاسبه مورد مطالعه و محاسبه قرار گيرد. براي اطمينان از صحت نتايج، نمونهاي از مقادير محاسبه شده، با مقاديرگزارش شده معتبر مقايسه شد و دقت آنها مورد تأييد قرار گرفت. با استفاده از نتايج عددي ارائه شده، ميتوان گفت که از نقطهنظرL' ، ريلهاي با ضخامت و عرض کم و با فاصله زياد بهتر است. اگرچه بايد بهپارامترهاي ديگر نيز در طراحي توجه نمود.

مراجع

[1] J. Gallant, "parametric study of an Augmented railgun," IEEE transaction on Magnetic, vol. 39, No.1, January 2003, pp. 451-456.
[2] J. F. Kerrisk, "Electrical and Thermal Modeling of Railgun," IEEE transaction on Magnetic, vol. Mag-20, 1984, pp. 339-402.
[3] J. F. Kerrisk, "Current distribution and inductance calculations for rail-gun conductors," Report No. LA – 9092-Ms, Los Alamos National laboratory, November 1981.
[4] Bok-ki kim and Kuo-Ta Hsieh, "Effect of Rail/Armature Geometry on Current Density Distribution and Inductance Gradient," IEEE transactions on Magnetic, vol.35, No.1, January 1999.
[5] Ira Kohlberg and William O.Coburn, "Solution for the Three Dimensional Railgun Current Distribution and Electromagnetic Fields of a Rail Launcher," IEEE Transactions on Magnetic, vol.31, No.1, January 1995.
[6] Hsieh K. T., "A Lagrangian formulation for mechanically, Thermally coupled electromagnetic diffusive processes with moving conductors," IEEE transaction on Magnetic, vol.33, No.1, January1995, pp. 604-609.