

افزایش گرادیان اندوکتانس تفنگ ریلی با استفاده از مواد فرومغناطیس

اصغر کشتکار ، دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز
علی کلانترنیا ، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه تبریز

چکیده

یکی از روش‌های افزایش نیروی وارد بر پرتابه تفنگ ریلی افزایش گرادیان اندوکتانس می‌باشد. از جمله روش‌های افزایش گرادیان اندوکتانس استفاده از ریل‌های اضافی است در این مقاله در قسمت اول بعد از توضیح مسئله و ارائه معادلات حاکم تاثیر تغییرات ابعاد ریلها و فاصله بین آنها بر گرادیان اندوکتانس موثر، اندوکتانس خودی، اندوکتانس متقابل برای ریل‌های با سطح مقطع مستطیلی و دایروی بررسی می‌شود. در قسمت دوم به ارائه روشی برای افزایش گرادیان اندوکتانس در تفنگ ریلی ساده و دارای ریل اضافی با استفاده از کاهش رلوکتانس مسیر شار اطراف ریل می‌پردازیم نشان داده خواهد شد که استفاده از این روش افزایش چشمگیری را در گرادیان اندوکتانس به همراه دارد.
کلمات کلیدی: تفنگ ریلی، گرادیان اندوکتانس، ریل اضافی، رلوکتانس.

Improvement of Inductance Gradient in Railgun Using Ferromagnetic Materials

A. Keshtkar and A. Kalantarnia

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz

Abstract

Increase of inductance gradient is one of the most common methods to increase applied force to projectile. Increase of inductance gradient is reachable by using augmented rails. In the first section of this paper, after definition of problem and electromagnetic equations, effect of variation of rails dimension and distance between rails on inductance gradient, self inductance and mutual inductance for circular and rectangular rails are explored. In the second part, a new method for increase of inductance gradient in simple railgun and augmented railgun is suggested. This method uses technique that decreases reluctance of flux path and makes a noticeable increase in the gradient inductance.[1]

Key words: Railgun, Inductance gradient, Augmented rail, Reluctance.

۱- مقدمه

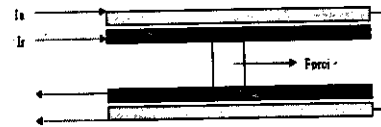
نیروی که بر پرتابه ریلگان وارد می‌شود در رابطه زیر صدق می‌کند:

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

که F_{Proj} نیروی وارد بر پرتابه و I جریان گذرنده از ریل‌ها و L' گرادیان اندوکتانس می‌باشد.

همان‌طوری که از معادله (۱) پیداست نیروی وارد بر پرتابه تابعی از گرادیان اندوکتانس و مربع جریان است بنابراین افزایش نیرو با افزایش این دو پارامتر امکان‌پذیر است ولی چون افزایش جریان باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل آرک پلاسما، افزایش تلفات گرمایی و تغییر شکل پرتابه می‌شود بخشی از تحقیقات بر روی روشهای افزایش L' متمرکز است [۱].

از جمله روشهای افزایش L' روش استفاده از ریل‌های اضافی می‌باشد. این نوع ساختار در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ریلگان با ریل‌های اضافی

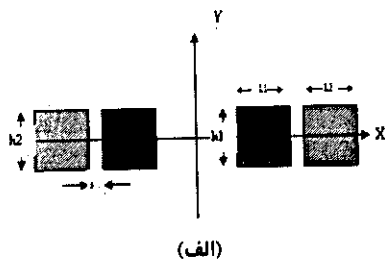
نیروی وارد بر پرتابه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{Proj} = \frac{1}{2} L_r I_r^2 + M I_r I_a \quad (2)$$

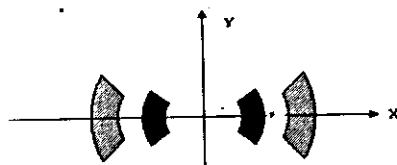
که در این رابطه L_r گرادیان اندوکتانس خودی ریل‌های داخلی- M' گرادیان اندوکتانس متقابل بین ریل‌های داخلی و خارجی- I_r جریان مدار داخلی و I_a جریان در مدار خارجی است [۲]. ریلگان با ریل‌های اضافی دارای ریل‌هایی با مقطع دایروی مستطیلی می‌باشد که هر دو در شکل (۲) نشان داده شده است. در تمام قسمتهای این تحقیق نتایج به وسیله 2D-FEM محاسبه و شبیه‌سازی شده است.

۲- معادلات حاکم

ساختاری که برای این مسئله در نظر گرفته شده به صورت دو بعدی در صفحه X-Y در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به تقارن این ساختار نسبت به محور Y می‌توان این مسئله را با کمک مفهوم دیوار الکتریکی برای نیمی از ساختار حل کرد. در این حالت بر روی محور Y داریم: $B_n = 0$ [۲].



(الف)



(ب)

شکل ۲- سطح مقطع ریلگان با ریل اضافی (الف): ساختار مستطیلی (ب): ساختار دایروی

انرژی مغناطیسی در واحد طول از رابطه زیر به دست می‌آید:

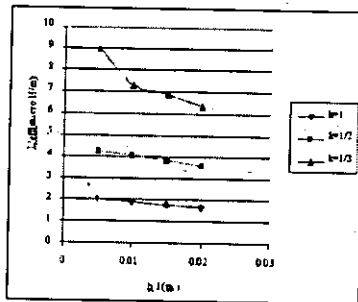
$$W_e = \iint \frac{|\vec{B}|^2}{2\mu} ds \quad (3)$$

از آنجایی که انرژی مغناطیسی در واحد طول برابر نیروی وارد بر پرتابه است، بنابراین:

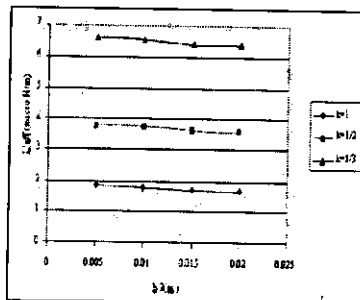
$$F_{proj} = W_e = \iint \frac{|\vec{B}|^2}{2\mu} ds \quad (4)$$

از (۱) و (۴) داریم:

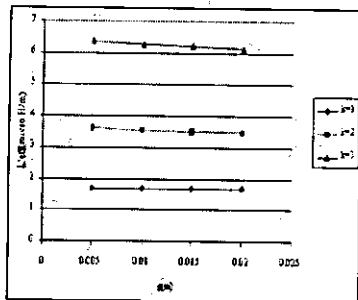
$$L' = \frac{2F}{I^2} \quad (5)$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- تغییرات L_{eff} در ساختار مستطیلی

همان طوری که از نمودارهای فوق پیداست با افزایش هر یک از مقادیر h_1, h_2, s برای یک K ثابت L_{eff} کاهش می‌یابد. این کاهش همان طوری که از شکل (3-a) پیداست برای افزایش h_1 مشهودتر است.

در شکل (۴) نیز نمودار تغییرات L_{eff} بر حسب s (فاصله بین ریلها) برای ریلگان با مقطع دایروی دیده می‌شود در این نوع ریلگان نیز با افزایش s برای یک k ثابت مقدار L_{eff} کاهش می‌یابد.

شکل (۴) چگالی شار اطراف ریلها را برای $h_1 = 0.01m$ و $h_1 = 0.015m$ نمایش می‌دهد. همان طوری که دیده می‌شود با کاهش h_1 مقدار چگالی شار افزایش می‌یابد.

مقایسه معادله نیرو در ساختار با ریل اضافی و معادله نیرو در ساختار ساده به ما امکان تعریف گرادیان اندوکتانس موثر را به صورت زیر می‌دهد:

$$F_{Proj} = \frac{1}{2} L_{eff} I_r^2 = \frac{1}{2} (L' + 2 \frac{I_a}{I_r} M') I_r^2 \quad (6)$$

$$L_{eff} = (L' + 2 \frac{I_a}{I_r} M') = L' + 2M'K \quad (7)$$

که $K = \frac{I_a}{I_r}$ در نظر گرفته شده است.

در عمل یک پالس جریان با دامنه بزرگ و در بازه زمانی بسیار کوچک به تفنگ ریلی اعمال می‌شود. این جریان در سطح مقطع ریل دارای توزیع یکنواخت نمی‌باشد و در یک لایه نازک نزدیک به سطح هادی تحت عنوان عمق پوستی متمرکز می‌شود. بنابراین ما می‌توانیم از یک جریان هارمونیک (سینوسی) با فرکانس بالا برای تحلیل استفاده کنیم [۳].

در حالت دو بعدی انرژی از رابطه زیر به دست می‌آید:

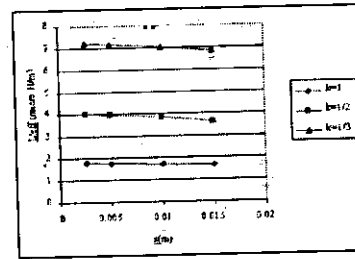
$$W_E = \frac{1}{2} L_r I_r^2 + M I_r I_a + \frac{1}{2} L_a I_a^2 \quad (8)$$

که در آن L_a اندوکتانس خودی ریل خارجی، L_r اندوکتانس خودی ریل اصلی (داخلی) و M اندوکتانس متقابل مدار داخلی و خارجی می‌باشد. با اعمال سه جریان متفاوت به ریلها می‌توان سه معادله خطی با ضرایب L_r, M و L_a به دست می‌آورد که با حل این دستگاه معادلات مقدار L_r, M و L_a در فرکانس مذکور به دست می‌آید که L_r و M در واحد طول همان L_r و M' می‌باشد [۳].

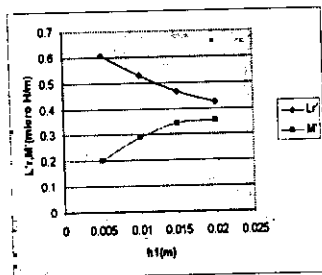
۳- نتایج عددی

در این شبیه‌سازی ما از ریلهایی از جنس مس استفاده کرده‌ایم که در ساختار با سطح مقطع مستطیلی با در نظر گرفتن $L_1 = L_2 = 2cm$ مقادیر h_1, h_2, s تغییر داده می‌شود و مقادیر L_{eff} برای مقادیر K که در معادله (۷) به دست آمده و در شکل (۳) دیده می‌شود.

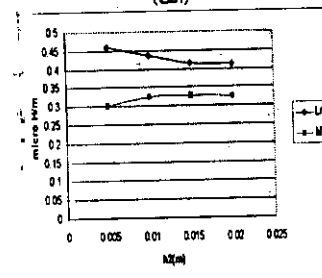
می‌شود که منجر به یک دستگاه معادلات خطی ۳×۳ با ضرایب L_r و M و L_o در واحد طول می‌شود که از این مقادیر L_o در حالت سه بعدی برابر صفر است. آنچه در نمودارهای شکل‌های زیر می‌آید روند تغییرات پارامترهای مذکور برحسب h_1, h_2, S برای ساختار مستطیلی و برحسب S برای ساختار دایروی می‌باشد.



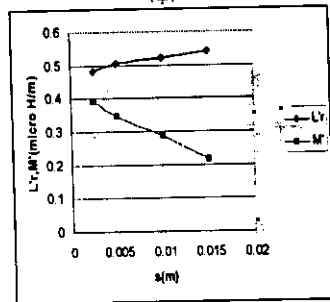
شکل ۴- تغییرات L_{eff} در ساختار دایروی



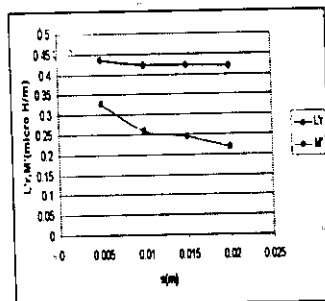
(الف)



(ب)

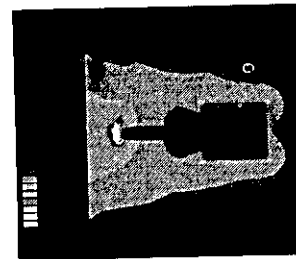


(ج)

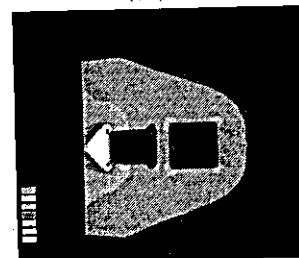


(د)

شکل ۶- تغییرات L_r و M - (الف) و (ب) و (ج): ساختار مستطیلی (د): ساختار دایروی



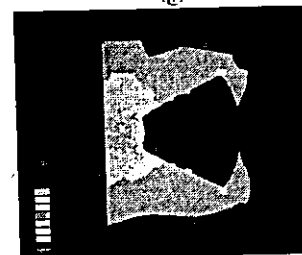
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

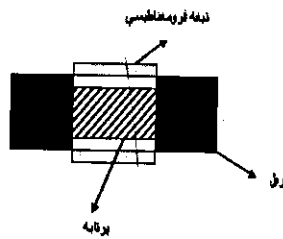
شکل ۵- چگالی شمار (الف): $h_1=0/005m$: (ب): $h_2=0/015m$: (ج): $S=0/01m$: (د): $S=0/050m$

همان طور که در فوق بیان شد برای دست آوردن L_r و M در روش دو بعدی به ریلها سه جریان متفاوت اعمال

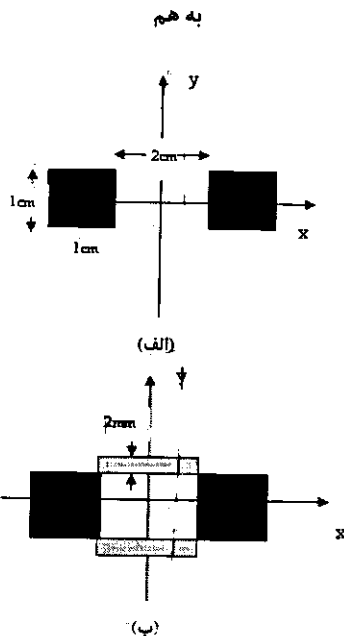
$$NI = R\phi \quad (9)$$

در این رابطه ϕ شار و NI نیروی محرکه مغناطیسی می‌باشد. همان طوری که از رابطه فوق پیداست با کاهش R و ثابت بودن I مقدار ϕ افزایش می‌یابد و بنابراین B چگالی شار نیز افزایش می‌یابد. از این ایده می‌توان برای افزایش ϕ و B و در نتیجه نیروی وارد بر پرتابه تفنگ ریلی استفاده کرد. ما در این تحقیق از این تکنیک استفاده کرده‌ایم و ماده فرو مغناطیسی با μ_r های (ضریب نفوذپذیری نسبی) متفاوت را به عنوان نگهدارنده به کار برده‌ایم. تیغه‌های بکار برده شده دارای ضخامت 2cm می‌باشد.

ساختار دو بعدی تفنگ ریلی ساده و تفنگ ریلی با نگهدارنده فرومغناطیس در مقایسه با هم در شکل (۸) نشان داده شده‌اند.



شکل ۷- موقعیت ریل‌ها، تیغه‌های فرومغناطیس و پرتابه نسبت به هم



شکل ۸- سطح مقطع تفنگ ریلی (الف): ساده (ب): با تیغه فرومغناطیس

همان طوری که از منحنی‌های فوق پیداست در ساختار مستطیلی با افزایش S, h_2, h_1 مقدار L_r کاهش می‌یابد در صورتی که در مورد M' روند برعکس می‌باشد؛ یعنی با افزایش h_1, h_2 افزایش می‌یابد. در ساختار دایروی با افزایش S مقدار L_r افزایش می‌یابد. در هر دو ساختار با افزایش S مقدار M' کاهش می‌یابد.

از رابطه (۷) پیداست که برای یک K ثابت مقدار L_{eff} به مقادیر M' و L' بستگی دارد. یعنی دلیل افزایش یا کاهش L_{eff} را باید در تغییرات M' و L' جستجو کرد.

برای تغییرات فاصله بین ریلها (افزایش S) کاملاً واضح است که با افزایش فاصله بین دو مدار که دارای القای متقابل هستند ضریب القای متقابل کاهش می‌یابد؛ پس طبیعی است که با افزایش S مقدار M' کاهش می‌یابد.

در مورد L' از آنجایی که جریان ریل‌های خارجی یک میدان مغناطیسی را به وجود می‌آورد که بر مدار داخلی تاثیر می‌گذارد و در آن یک جریان القایی در جهت خلاف جریان اصلی مدار داخلی ایجاد می‌کند و باعث کاهش چگالی جریان در مدار داخلی می‌شود. حال هر چه فاصله بیشتر شود، تاثیر مغناطیسی مدار خارجی بر مدار داخلی کمتر می‌شود. بنابراین چگالی جریان در مدار داخلی به میزان کمتری کاهش می‌یابد بنابراین افزایش فاصله باعث افزایش گرادیان اندوکتانس خودی L' می‌شود.

میزان کاهش M' بر حسب S از میزان افزایش L' بر حسب S بیشتر است و این موضوع از نمودارهای C و d شکل (۶) قابل مشاهده است؛ بنابراین افزایش S باعث کاهش L_{eff} می‌شود.

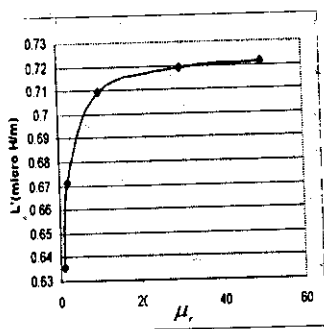
از آنجایی که با افزایش h_1 و h_2 سطح مقطع هریک از ریلها افزایش می‌یابد، جریان القایی ناشی از هریک از ریلها اعم از داخلی و خارجی افزایش می‌یابد. این جریان القایی باعث تغییر توزیع جریان هریک از ریلها و کاهش چگالی جریان می‌شود. نرخ کاهش L' بیشتر از افزایش M' می‌باشد. این موضوع از نمودارهای (الف) و (ب) شکل (۶) قابل مشاهده است.

۴- افزایش گرادیان اندوکتانس با کاهش رلوکتانس مسیر شار

مواد فرومغناطیس به دلیل اینکه دارای نفوذپذیری مغناطیسی بالایی می‌باشند در مسیرهای عبور شار رلوکتانس کمی ایجاد می‌کنند. در یک مدار مغناطیسی با رلوکتانس R رابطه زیر برقرار است:

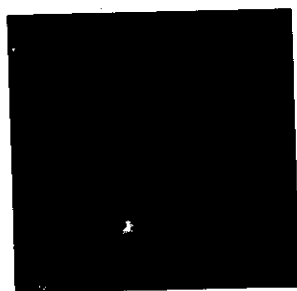
شکل (۹) برای مقایسه تمرکز شار در ناحیه‌ای است که پرتابه قرار دارد. در تفنگ ریلی با تیغه‌های فرومغناطیس مقدار B (چگالی شار) در این ناحیه در مقایسه با تفنگ ریلی نوع ساده بیشتر است. در شکل‌های زیر $\mu_r = 4000$ در نظر گرفته شده است.

برای تفنگ ریلی بدون تیغه‌های فرومغناطیس برای ابعاد فوق $L' = 0.6354 \mu H / m$ در حالی که با تیغه‌هایی با $\mu_r = 4000$ مقدار $L' = 0.725136 \mu H / m$ می‌رسد. شکل زیر تغییرات L' برحسب μ_r تیغه‌ها را نشان می‌دهد. در این نمودار دیده می‌شود که با زیاد شدن μ_r به بیش از 50 مقدار L' تغییرات چندانی ندارد و تقریباً ثابت است.

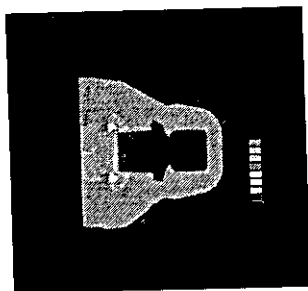


شکل ۱۰- تغییرات L' در تفنگ ریلی با تیغه فرومغناطیس بر حسب ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی

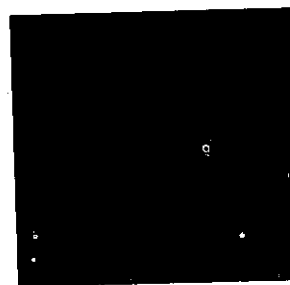
در ادامه این تکنیک برای تفنگ ریلی با ریل اضافی بررسی شده است در این ساختار مطابق شکل (۴)، $h_1 = h_2 = L_1 = L_2 = 0.01cm$, $s = 0.005m$ و ضخامت تیغه برابر $2mm$ در نظر گرفته شده است.



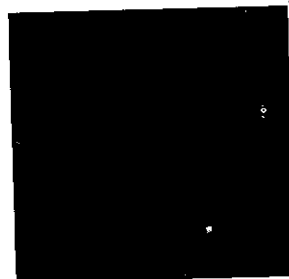
(الف)



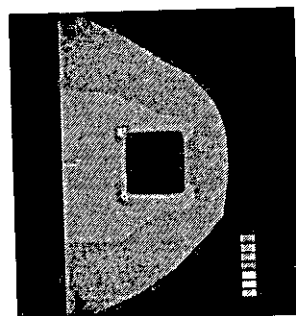
(ب)



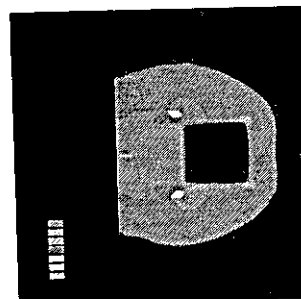
(الف)



(ب)



(ج)



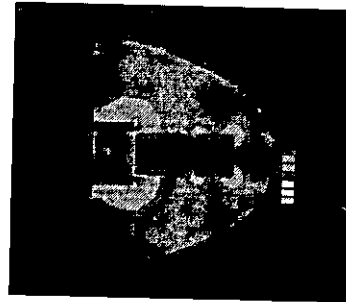
(د)

شکل ۹- (الف) و (ب): خطوط شار در اطراف ریل (ج): چگالی شار در تفنگ ریلی ساده (د): چگالی شار در تفنگ ریلی با تیغه فرومغناطیس

نتایج به دست آمده در قسمت دوم حاکی از این است که با قرار دادن یک ماده فرومغناطیس به عنوان تیغه‌های نگهدارنده می‌توان گرادیان اندوکتانس را به مقدار قابل توجهی افزایش داد.

مراجع

- [1] A. kalantarnia and A. keshtkar, "Increasing of Railgun Inductance Gradient by Using Tapered I Shaped Rail", 13th EML Symposium, May 2006.
- [2] J. Gallant, "Parametric Study of Augmented Railgun", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 39, no. 1, Jan. 2003.
- [3] A. Keshtkar, "Effect of Rail Dimension on Current Distribution and Inductance Gradient", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 41, no. 1, Jan. 2005.
- [4] J. Gallant and P. Lehmann, "Experiments with Brush Projectiles in a Parallel Augmented Railgun", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 41, no. 1, Jan. 2005.



(ج)

شکل ۱۱- (الف): خطوط شار در اطراف ریلها (ب): چگالی شار B (ج): شدت میدان مغناطیسی H

جدول زیر مقایسه گرادیان اندوکتانس خودی و متقابل برای دو حالت با تیغه فرومغناطیس و بدون تیغه فرومغناطیس می‌باشد:

جدول ۱- مقایسه گرادیان اندوکتانس خودی و متقابل برای ریلگان با ریل اضافی با تیغه و بدون تیغه فرومغناطیس

	$L_s (\mu H/m)$	$M' (\mu H/m)$
تفنگ ریلی با ریل اضافی بدون تیغه فرومغناطیس	۰/۶۰۱۵	۰/۴۱۰۸
تفنگ ریلی با ریل اضافی و تیغه فرومغناطیس	۰/۶۹۵۳	۰/۴۶۵۰

همان طوری که از جدول بالا پیداست استفاده از تیغه‌های فرومغناطیس در تفنگ ریلی با ریل اضافی باعث افزایش ۱۵ درصدی و ۱۰ درصدی به ترتیب در گرادیان اندوکتانس خودی و در گرادیان اندوکتانس متقابل می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

ما در این تحقیق از 2D - FEM برای تحلیل تفنگ ریلی استفاده کرده‌ایم. آنچه که در این مقاله بررسی شد تاثیر تغییر ابعاد ریل‌ها و فاصله بین آنها بر گرادیان اندوکتانس موثر، خودی و متقابل در تفنگ ریلی با ریل اضافی با مقطع مستطیلی و دایروی می‌باشد. آنچه که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد این است که در نوع مستطیلی با افزایش پارامترهای مذکور، گرادیان اندوکتانس موثر روند کاهشی دارد.