

طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی سیستم کوئل‌گان القایی سه‌طبقه به روش اجزاء محدود

مهدی بهاروند^۱، آرش دهستانی کلاگر^{۲*}، محمدرضا علیزاده پهلوانی^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸)

چکیده

این مقاله به طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی سیستم کوئل‌گان القایی سه‌طبقه می‌پردازد. در ابتدا، تئوری عملکرد سیستم کوئل‌گان چند طبقه به‌اختصار معرفی شده و سپس یک شبیه‌سازی گذرا از حرکت پرتابه، جهت تحلیل و محاسبه ولتاژ، جریان، نیرو، سرعت و شتاب سیستم کوئل‌گان با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود ANSYS Maxwell انجام می‌گیرد. جهت اعتبارسنجی پرتابگر الکترومغناطیسی طراحی شده، با استفاده از معادلات حالت آن، سیستم را در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی کرده و نتایج حاصل از تحلیل الکترومغناطیسی با نتایج به‌دست آمده از روابط تحلیلی، مقایسه شده است. سیستم طراحی شده دارای بازده حدود ۳۱ درصد است که قادر است یک جسم ۲۱/۶ کیلوگرمی را با سرعت دهانه خروجی 109 m/s پرتاب نماید. ویژگی‌های طراحی و نتایج تجزیه و تحلیل مربوط به کوئل‌گان می‌تواند به‌طور موثر برای توسعه یک سیستم کوئل‌گان با مقیاس بزرگ به‌کار گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: کوئل‌گان القایی، تحلیل الکترومغناطیسی، کوئل‌گان چندطبقه، منبع توان پالسی

۱- مقدمه

نیروی محوری ایجاد می‌نماید که پرتابه را در طول لوله به حرکت درمی‌آورد [۹]. اگرچه اصول عملکرد کوئل‌گان ساده است، اما تحلیل فرایند گذرای الکترومغناطیسی پرتاب در کوئل‌گان، شناخت تأثیر پارامترهای اصلی و بهینه‌سازی طراحی، دارای پیچیدگی‌هایی می‌باشند [۱۰]. پرتابگرهای الکترومغناطیسی با توان پالسی نسبت به پرتابگرهای شیمیایی برتری دارند و این توانایی را دارند که از نیروی الکترومغناطیسی جهت سرعت‌بخشیدن به آرمیچر استفاده کنند [۱۱-۱۳]. در این راستا، سیستم کوئل‌گان القایی چندطبقه، موضوعی است که در سالیان اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. به‌طور خاص، در کوئل‌گان القایی، تقریباً هیچ تماس فیزیکی بین لوله کوئل‌گان و پرتابه وجود ندارد. به همین جهت، این نوع کوئل‌گان دارای طول عمر طولانی‌تر و همچنین کارایی بالاتر در مقایسه با دیگر انواع پرتابگرهای الکترومغناطیسی می‌باشد [۱۴-۱۸]. جهت تحلیل الکترومغناطیسی سیستم فوق، روش تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی، یک ابزار دقیق و جزئی مناسب است؛ اما نمی‌تواند مسئله را به سرعت حل کند. زیرا زمان تحلیل به دلیل وجود ساختارهای هندسی پیچیده افزایش می‌یابد. بنابراین لازم است که از تحلیل دوبعدی جهت حصول اطمینان از صحت و اعتبار مسئله استفاده شود [۱۹-۲۰]. بازده متداول یک کوئل‌گان چندطبقه در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد است. بهبود بازده آن به دلیل سیستم کنترل پیچیده و زمان کوتاه موجود برای انتقال انرژی در هر طبقه، کار دشواری است [۲۱]. در این مقاله، طراحی

فناوری پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی یک راهکار مناسب جهت پرتاب اجسام با سرعت‌های بالا در مسافت‌های طولانی می‌باشد. پرتابگر کوئل‌گان یک نوع خاص از پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی است که از مدار تحریک توان متوسط استفاده می‌کند [۱]. پرتابگرهای الکترومغناطیسی نسبت به سلاح‌های شیمیایی مزایای قابل توجهی دارند چون آن‌ها از نیروی الکترومغناطیسی برای شتاب بخشیدن به پرتابه‌ها استفاده می‌کنند. یکی از کاربردهای رایج این پرتابگرها در حمل و نقل مسافر است که برای نمونه در متروی چین می‌توان مشاهده کرد. در آزمایشگاه ملی سندیا نیز بر روی خصوصیات کاری نمونه اولیه کوئل‌گان در آمریکا تحقیقاتی صورت پذیرفته است. یکی از اولین سیستم‌های کوئل‌گان، توسط همین آزمایشگاه ارائه شده است که توانست جسمی با جرمی بین ۵ گرم تا چند کیلوگرم را با سرعت 1 km/s پرتاب کند [۲-۸]. کوئل‌گان شامل سیم‌پیچی‌هایی جدا از هم است که به دور یک لوله دی‌الکتریک توخالی پیچیده شده‌اند. پرتابه به دلیل وجود کوپلینگ بین سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر (پرتابه)، در داخل این لوله به حرکت درمی‌آید. مدار بانک‌های خازنی، به سیم‌پیچی‌ها متصل بوده و به‌صورت هم‌تراز پالس‌های جریانی را وارد سیم‌پیچی‌های طبقات مختلف می‌کنند. وقتی که پالس جریان از سیم‌پیچی عبور می‌کند، اثر متقابل بین میدان مغناطیسی و جریان القا شده درون پرتابه (آرمیچر)، یک

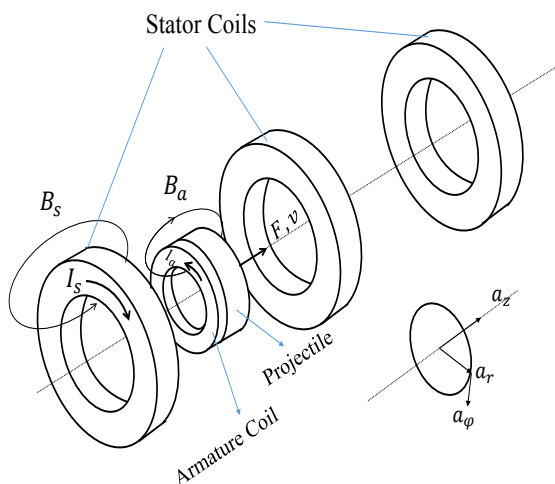
سیستم مذکور، سیم‌پیچی‌های استاتور نیروهای دافعه و انبساطی اعمال می‌کنند. در حالی که سیم‌پیچی آرمیچر، نیروی پرتاب-کننده و همچنین نیروی انقباضی وارد می‌سازد. شکل (۲) جریان استاتور و میدان مغناطیسی آن و همچنین جریان القا شده آرمیچر و میدان تولید شده توسط آن را نشان می‌دهد. شکل (۳) نیز نیروها را بر روی یک جفت سیم‌پیچی که در حال دفع کردن یکدیگر هستند نشان می‌دهد. از برهم‌کنش میدان مغناطیسی تولید شده توسط استاتور با جریان آرمیچر، نیروی وارد بر آرمیچر ایجاد و همچنین از برهم‌کنش میدان مغناطیسی آرمیچر و جریان استاتور، به استاتور نیرو وارد می‌شود. علاوه بر نیروی پیشران، هم در آرمیچر و هم در استاتور، نیروهای شعاعی نیز وجود دارند. به آرمیچر نیروهای شعاعی درونی اعمال می‌شود؛ در حالی که استاتور باید نیروهای شعاعی بیرونی را تحمل کند. این نیروهای شعاعی مخالف باعث قرارگیری سیم‌پیچ آرمیچر در مرکز استاتور و ایجاد پرتابی بدون تماس می‌شود. معادلات (۱-۳) توصیف‌کننده نیرو و سرعت سیستم کوئل‌گان القایی، برحسب گرادیان اندوکتانس متقابل و جریان استاتور و آرمیچر می‌باشند [۲۲].

$$i_s i_a \frac{dM}{dz} = F_z \quad (1)$$

$$m a_z = m \frac{dv}{dt} = F_z \quad (2)$$

$$v = \int_0^t a_z dt = \int_0^t \frac{1}{m} \frac{dM}{dz} i_s i_a dt \quad (3)$$

که در آن $\frac{dM}{dz}$ گرادیان اندوکتانس متقابل بوده، i_s جریان استاتور، i_a جریان آرمیچر می‌باشد، F_z نیروی پرتابه، m جرم پرتابه، v سرعت پرتابه، a_z شتاب جسم و t زمان پرتاب است.



شکل (۱). شمایی از کوئل‌گان القایی و عملکرد آن

و تحلیل الکترومغناطیسی مربوط به سیستم کوئل‌گان القایی چندطبقه ارائه می‌شود. نتایج متناظر، با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزا محدود ANSYS MAXWELL به دست آمده‌اند. در این پژوهش، از نرم‌افزار MATLAB نیز به منظور طراحی و حل معادله حالت سیستم کوئل‌گان القایی، با توجه به منبع توان پالسی استفاده شده است. برای افزایش اندوکتانس متقابل و نیرو، در پرتابه نیز از سیم‌پیچی استفاده شده است. ابتدا در قسمت ۲ اساس عملکردی کوئل‌گان توضیح داده شده است سپس مدل فیزیکی سیستم را استخراج و برای آن مدار تحریکی ارائه شده است. در قسمت ۳ نتایج شبیه‌سازی پارامترهای همچون ولتاژ، جریان، نیرو، سرعت، شتاب و بازده در سیستم کوئل‌گان چندمرحله‌ای، به کمک یک تحلیل الکترومغناطیسی بررسی شده‌اند. بر اساس نتایج تحلیل الکترومغناطیسی، ساختار سیستم کوئل‌گان، از جمله سیم‌پیچی استاتور، سیم‌پیچی آرمیچر و قطعات پشتیبان استخراج شده‌اند. نتایج تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی نیز با نتایج حاصل از روش تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در قسمت ۴ به نتیجه‌گیری مقاله پرداخته شده است.

۲- طراحی سیستم کوئل‌گان القایی

۲-۱-۲- اساس عملکرد سیستم کوئل‌گان القایی

پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی از نوع کوئل‌گان را می‌توان از لحاظ مکانیزم عملکرد، به دو دسته اساسی تقسیم‌بندی نمود. دسته اول، کوئل‌گان رلوکتانسی است که از ویژگی جاذبه فرومغناطیسی برای تولید شتاب استفاده می‌کند. در این پرتابگر نیروی وارد شده به جسم فرومغناطیسی باعث می‌شود که پرتابه به سمت مرکز سیم‌پیچی استاتور حرکت کند تا مقدار رلوکتانس بین سیم‌پیچی استاتور و پرتابه کمتر شود. دسته دوم نیز کوئل‌گان القایی است که در آن نیروی شتاب‌دهنده به صورت یک نیروی دفع‌کننده عمل می‌کند. این نیرو ناشی از جریان‌های گرادیانی است که در اثر عبور جریان از سیم‌پیچی استاتور، در پرتابه ایجاد می‌شود. قابل ذکر است که مقاله حاضر بر کوئل‌گان القایی تمرکز دارد. بنابراین پرتابه باید دارای ساختاری از جنس مواد هادی مانند مس یا آلومینیوم باشد. در این نوع کوئل‌گان، موقعیت شروع پرتابه باید کمی از مرکز سیم‌پیچی استاتور بالاتر باشد. در غیر این صورت، هنگامی که جریان از سیم‌پیچی استاتور عبور داده می‌شود، پرتابه یک نیروی خالص را تجربه نمی‌کند. شکل (۱) شمایی از ساختار اصلی و تئوری پرتاب پرتابه را نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین اصول طراحی، زمان‌بندی صحیح و شکل‌دهی جریان پالس است. نیروی لورنتز عامل رانش نیز به واسطه اندوکتانس متقابل و جریان سیم‌پیچی‌ها تولید می‌شود. در

مغناطیسی جهت و اندازه نیرو را تعیین می‌کند. جریان استاتور در سیم‌پیچی‌های استاتور طبقه دوم و سوم، جریانی القا نمی‌کند. زیرا دیود هرزگرد از عبور جریان مخالف جلوگیری می‌کند. بنابراین، آرمیچر تنها با نیروی دافعه شتاب می‌گیرد. پس از حرکت پرتابه هنگامی که مرکز سیم‌پیچی آرمیچر به نقطه مورد نظر جهت روشن کردن طبقه بعدی برسد، کلید مربوط به آن طبقه، وصل می‌شود تا جریان از سیم‌پیچی استاتور عبور نماید. این جریان در ابتدا نیرویی در خلاف جهت حرکت پرتابه به آن وارد می‌کند اما چون پرتابه دارای سرعت اولیه بوده و نیروی طبقه قبلی نیز به آن وارد می‌شود، تأثیر منفی کمی بر روی حرکت پرتابه می‌گذارد و وقتی که مرکز پرتابه از سیم‌پیچی استاتور عبور می‌کند جهت نیروی طبقه مربوطه، در جهت حرکت پرتابه قرار می‌گیرد و باعث افزایش سرعت پرتابه می‌شود. این استدلال برای هر طبقه و طبقه بعدی در کویل‌گان چندطبقه معتبر است. کل نیروی وارد شده به آرمیچر با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$F_z = \sum_{k=1}^n \frac{dM_{ak}}{dz} i_{sk} i_a \quad (4)$$

در رابطه فوق داریم:

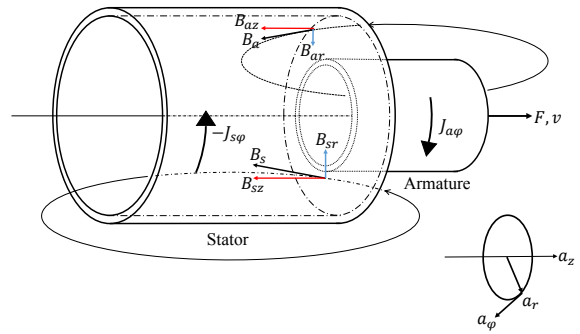
$$dM / dz = \sum_{i=1}^{N1-L1} \sum_{j=1}^{N2-L2} \frac{\mu_0 k_{ij} h_{ij}}{4(1-k_{ij}^2) \sqrt{r_{sij} r_{pij}}} \left[2(1-k_{ij}^2) K(k_{ij}) + (2-k_{ij}^2) E(k_{ij}) \right] \quad (5)$$

که عبارت بالا خود از مجموعه روابط (۶) حاصل می‌شود:

$$M = \sum_{i=1}^{N1-L1} \sum_{j=1}^{N2-L2} -\mu_0 \sqrt{r_{sij} r_{pij}} \left[\left(k_{ij} - \frac{2}{k_{ij}} \right) K(k_{ij}) + \frac{2}{k_{ij}} E(k_{ij}) \right], \quad (6)$$

$$k_{ij} = \frac{2\sqrt{r_{si} r_{pj}}}{\sqrt{(r_{si} + r_{pj})^2 + h_{ij}^2}}$$

که در آن، $K(k)$ و $E(k)$ انتگرال‌های بیضوی نوع اول و دوم هستند. به‌علاوه، i اندیس سیم در سیم‌پیچی استاتور و j اندیس i سیم در سیم‌پیچی آرمیچر بوده r_{sij} شعاع سیم در سیم‌پیچی استاتور، r_{pij} شعاع سیم در سیم‌پیچی آرمیچر، h_{ij} فاصله بین سیم i م در سیم‌پیچ استاتور و سیم j ام در سیم‌پیچ آرمیچر و k_{ij} فاصله بین i امین سیم در سیم‌پیچی استاتور و j امین سیم در سیم‌پیچی آرمیچر می‌باشد. پارامترهای L_1 و L_2 نیز به ترتیب تعداد لایه‌ی سیم‌پیچی‌های استاتور و آرمیچر بوده و



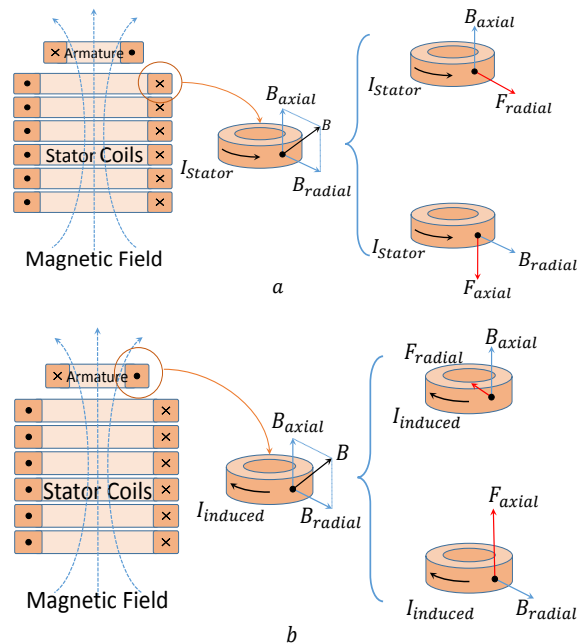
نیروی وارد بر آرمیچر بر اساس مولفه‌های چگالی جریان و میدان مغناطیسی

نیروی وارد بر آرمیچر بر اساس مولفه‌های چگالی جریان و میدان مغناطیسی

$$-J_{s\phi} \times -B_{az} = f_{sr} \quad J_{a\phi} \times -B_{sz} = -f_{ar}$$

$$-J_{s\phi} \times -B_{ar} = -f_{sz} \quad J_{a\phi} \times -B_{sr} = f_{az}$$

شکل (۲). ساختار اصلی کویل‌گان القایی و عملکرد آن



شکل (۳). جهت نیرو بر اساس جریان سیم‌پیچ و میدان مغناطیسی. (الف) جهت نیرو در سیم‌پیچ استاتور. (ب) جهت نیرو در سیم‌پیچ آرمیچر

۲-۲- مدل فیزیکی کویل‌گان القایی چندطبقه

نیروی دافعه بین اولین استاتور و آرمیچر وقتی ظاهر می‌شود که شبکه توان پالسی که به طبقه اول متصل است، جریان را به سیم‌پیچی استاتور انتقال دهد. جریان استاتور یک میدان مغناطیسی قوی تولید می‌کند که این میدان جریانی را در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌کند. در این لحظه، جهت جریان آرمیچر در خلاف جهت جریان استاتور اول است و در نتیجه یک میدان مغناطیسی در مقابل استاتور تولید می‌کند. این میدان

در روابط فوق، R ماتریس مقاومت سیستم، I_s و I_a به ترتیب جریان‌های استاتور و پرتابه، v_a سرعت آرمیچر، G ماتریس گرادیان اندوکتانس متقابل در جهت حرکت (z) ، L ماتریس اندوکتانس خودی، M ماتریس اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچی‌های سیستم و ولتاژ خازن می‌باشد. فرض می‌شود که بازده سیستم، نسبت بین منابع انرژی الکتریکی و انرژی جنبشی سیستم کوپل‌گان القایی است [۲۰].

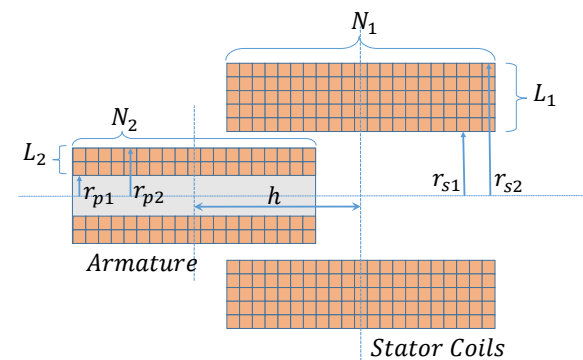
$$\mu = \frac{E_m}{E_e} \times 100 = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{2}C_k V_k^2} \times 100 [\%] \quad (9)$$

که در آن μ بازدهی سیستم کوپل‌گان، E_m انرژی جنبشی، E_e انرژی الکتریکی، m مجموع جرم آرمیچر و پرتابه، v حداکثر سرعت پرتابه، C_k خازن منبع توان پالسی و V_k نیز ولتاژ شارژ خازن است.

۲-۳- مدار تحریک

در این بخش، مدار تحریکی که جریان کافی برای تولید میدان مغناطیسی مورد نیاز جهت به جلو راندن پرتابه را فراهم کند، معرفی می‌شود. بدین منظور، همان‌طوریکه در شکل (۵) نشان داده شده است، یک مدار توان متوسط طراحی شده و برای ایجاد یک پالس جریانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولتاژ اولیه‌ی بانک خازنی، $10 kV$ بوده و یک دیود هرزگرد نیز به هر سیم‌پیچی جهت جلوگیری از نوسان پالس جریان متصل می‌شود. سیم‌پیچی استاتور متصل به مدار تحریک (ماژول توان پالسی) است درحالی‌که سیم‌پیچی آرمیچر در داخل سیم‌پیچی استاتور در حالت اتصال کوتاه قرار دارد. خازن توان پالسی با استفاده از منبع توان پالس شارژ می‌شود. همچنین، یک کلید پالسی نیز جهت تعیین زمان‌بندی دقیق روشن کردن طبقه دوم و سوم، پس از عبور پرتابه از طبقه اول سیم‌پیچی، اضافه شده است. این کلید نیمه هادی، یک تایریستور تحریک شونده توسط نور (Light-Triggered Thyristors) می‌باشد که به‌عنوان نمونه می‌توان از تایریستور با شماره قطعه LTT T2563NH استفاده نمود. از این تایریستور به‌عنوان کلید اصلی جهت تامین دقت زمان کلیدزنی استفاده می‌شود. این کلید دارای حداکثر ولتاژ قابل تحمل $8 kV$ و حداکثر جریان لحظه‌ای $93 kA$ می‌باشد. نرخ رشد بحرانی ولتاژ و جریان قابل تحمل توسط تایریستور فوق، به‌ترتیب برابر با $2 kV/\mu s$ و $5 kA/\mu s$ است که برای سیستم کوپل‌گان القایی مقادیر مناسبی هستند [۲۴]. جدول (۱) مشخصات دقیق طراحی سیم‌پیچی‌های استاتور و آرمیچر، از جمله تعداد دور، تعداد لایه‌ها و مقدار اندوکتانس را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که سه طبقه سیم‌پیچی استاتور نزدیک به هم قرار داده شده‌اند؛ زیرا نزدیک

N_1 و N_2 نیز تعداد دورهای سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر در هر لایه هستند. در حالت کلی، بین استاتورها گرادیان اندوکتانس متقابل وجود دارد. با این حال، دیود هرزگرد جریان القا شده را مسدود می‌کند و بنابراین، هیچ نیرویی بین سیم‌پیچی استاتور دارای انرژی و سیم‌پیچی استاتور بعدی وجود نخواهد داشت. گرادیان اندوکتانس متقابل نیز با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود. شکل (۴) موقعیت هندسی بین استاتور و سیم‌پیچی آرمیچر را نشان می‌دهد. جریان آرمیچر و استاتور توابعی از زمان و موقعیت آرمیچر هستند و باید با استفاده از دستگاه معادلات دیفرانسیلی که مدار معادل را برای یک سیم‌پیچی آرمیچر و استاتور توصیف می‌کند، تعیین شوند.



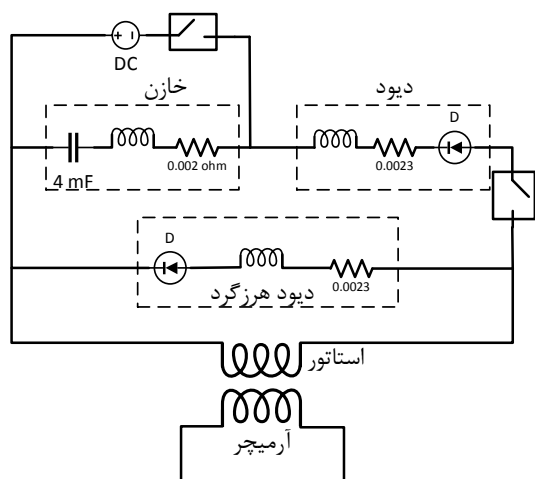
شکل (۴). ساختار هندسی بین سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر

معادلات باقی مانده که مربوط به ولتاژ منابع تغذیه U_c تابع جریان I_s هستند، به منبع توان انتخاب شده وابستگی دارند. در این راستا، طبق (۷) و (۸)، باید یک مجموعه مشابه از معادلات دیفرانسیل را برای هر دو سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر حل نمود [۲۳]. روش‌های رانگ-کوتا (Runge-Kutta) برای «گسسته‌سازی زمانی» جهت حصول پاسخ معادلات دیفرانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از معادلات حالت آورده شده و با بهره‌گیری از روش محاسبه عددی رانگ-کوتای مرتبه چهارم، سامانه کوپل‌گان در نرم‌افزار Matlab مدل شده است.

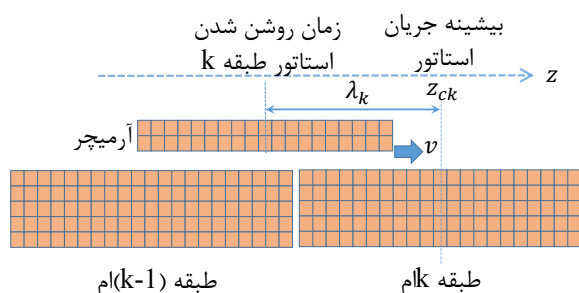
$$[R] \begin{bmatrix} I_s(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} + v_a [G] \begin{bmatrix} I_s(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} + ([L] + [M]) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_c(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

و

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{1}{C} I_s \quad (8)$$



شکل (۵). مدار تحریک برای طبقه اول کویل‌گان



شکل (۶). موقعیت آرمیچر در زمان روشن کردن طبقه k ام

جدول (۱). مشخصات طراحی سیم‌پیچ‌های سیستم

مقدار		
۱۰	تعداد لایه	سیم‌پیچ استاتور طبقه اول
۴	تعداد دور در هر لایه	
۲۴۰ uH	اندوکتانس	
۱۰	تعداد لایه	
۴	تعداد دور در هر لایه	سیم‌پیچ استاتور طبقه دوم
۲۴۰ uH	اندوکتانس	
۱۵	تعداد لایه	سیم‌پیچ استاتور طبقه سوم
۳	تعداد دور در هر لایه	
۲۴۴ uH	اندوکتانس	
۳۵	تعداد لایه	سیم‌پیچ آرمیچر
۴	تعداد دور در هر لایه	
۱/۵ mH	اندوکتانس	

بودن فاصله میان سیم‌پیچی‌های استاتور منجر به کارایی بالاتر سیستم پرتاب‌گر می‌شود. جدول (۲) مشخصات اساسی خازن‌ها و پرتابه سیستم کویل‌گان را نشان می‌دهد. ظرفیت‌های خازنی منابع توان پالسی به ترتیب برابر 4 mF ، 2 mF و 2 mF برای طبقه‌های ۱، ۲ و ۳ هستند. ظرفیت‌های خازنی طبقه‌های دوم و سوم کوچک‌تر از ظرفیت خازنی طبقه اول هستند، زیرا برای وارد کردن نیرو به پرتابه‌ی دارای سرعت، زمان کوتاه‌تری جهت تخلیه خازن وجود دارد. حداکثر ولتاژ شارژ برابر با 10 kV می‌باشد. پرتابه با قطری معادل 120 mm ، وزن 20 kg و سرعت m/s 100 در نظر گرفته شده است. زمان روشن کردن کلیدها تحت‌تأثیر هندسه و موقعیت سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر، با در نظر گرفتن گرادیان اندوکتانس متقابل و شکل موج جریان می‌باشد. هنگامی که مرکز آرمیچر به مرکز سیم‌پیچی استاتور طبقات بعدی می‌رسد، در صورت وجود تحریک در سیم‌پیچی این طبقات، نیروی وارد شده به پرتابه در جهت رو به جلو خواهد بود. بنابراین سیم‌پیچی طبقات دوم و سوم استاتور زمانی روشن می‌شوند که هنگام رسیدن مرکز آرمیچر به مرکز سیم‌پیچی استاتور، جریان استاتور بیشینه باشد. مدار معادل سیم‌پیچی استاتور در زمان روشن کردن طبقه مربوطه، به صورت یک مدار (R-L-C) است که جریان تخلیه‌ی درون آن دارای فرکانس زیر است:

$$f = (2\pi\sqrt{L_{eq}C})^{-1} \quad (10)$$

که در آن، L_{eq} اندوکتانس معادل و C ظرفیت خازنی طبقه استاتور است. با توجه به رابطه (۱۰)، زمان خیز جریان عبارت است از

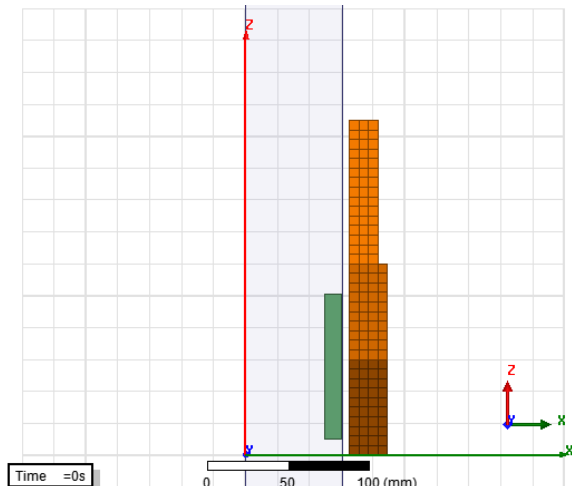
$$t_r = (\pi/2)\sqrt{L_{eq}C} \quad (11)$$

که مقدار L_{eq} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

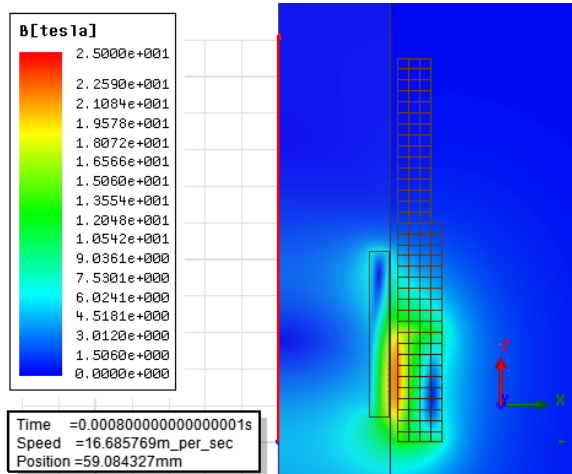
$$L_{eq} = L_s - M_{as} + \frac{(L_a - M_{as})M_{as}}{(L_a - M_{as}) + M_{as}} \\ = L_s - \frac{M_{as}^2}{L_a} = L_s \left(1 - \frac{M_{as}^2}{L_s L_a}\right) \quad (12)$$

در روابط فوق، L_s و L_a به ترتیب اندوکتانس سیم‌پیچی‌های آرمیچر و استاتور بوده و M_{as} نیز اندوکتانس متقابل این دو سیم‌پیچی می‌باشد. با محاسبه t_r و باتوجه به شکل (۶)، با فرض اینکه در مدت زمان t_r ، پرتابه با سرعت ثابتی حرکت می‌کند، می‌توان موقعیت مکانی پرتابه که براساس آن سیم‌پیچی استاتور طبقه مورد نظر باید در آن لحظه روشن شود را محاسبه کرد. پارامتر z_{ck} موقعیت مرکز طبقه k ام بوده و λ_k نیز حاصلضرب t_r در مقدار سرعت پرتابه است.

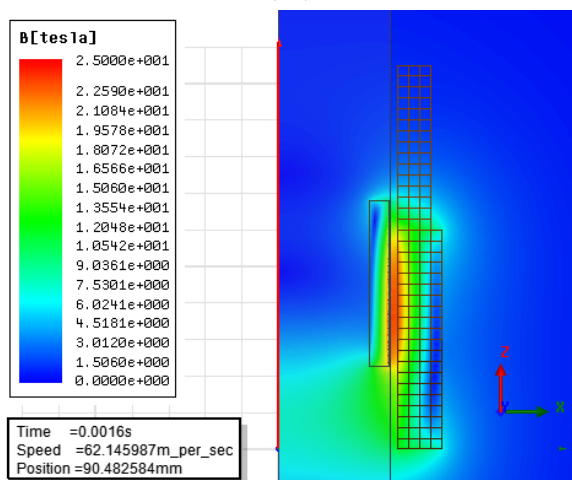
هستند را نشان می‌دهد که در حدود ۸۰٪ مقدار آن‌ها در بازه $mm(60, 60-)$ قرار گرفته که طول این بازه به عنوان حد طول سیم‌پیچی آرمیچر در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۷). مدل دوبعدی سیستم کوئل‌گان در نرم‌افزار اجزای محدود



(الف)



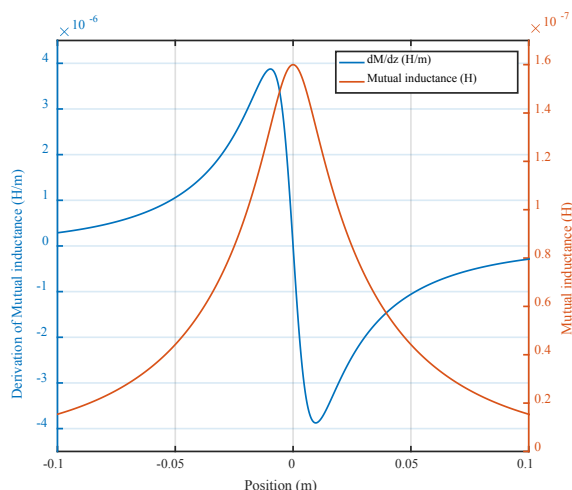
(ب)

جدول (۲). مشخصات خازن‌ها و پرتابه

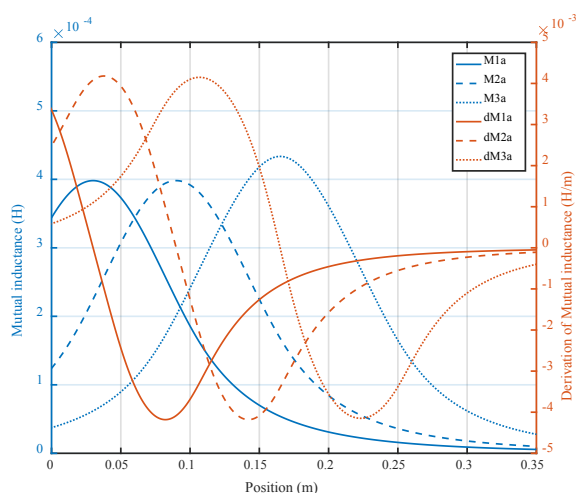
مقدار		
۴ mF	مقدار خازن	خازن طبقه اول
۱۰ kV	ولتاژ	
۲ mF	مقدار خازن	خازن طبقه دوم
۱۰ kV	ولتاژ	
۲ mF	مقدار خازن	خازن طبقه سوم
۱۰ kV	ولتاژ	
۱۲۰ mm	قطر	پرتابه
۲۱/۶ kg	وزن	
۱۰۰ m/s	سرعت	

۳- نتایج و شبیه‌سازی

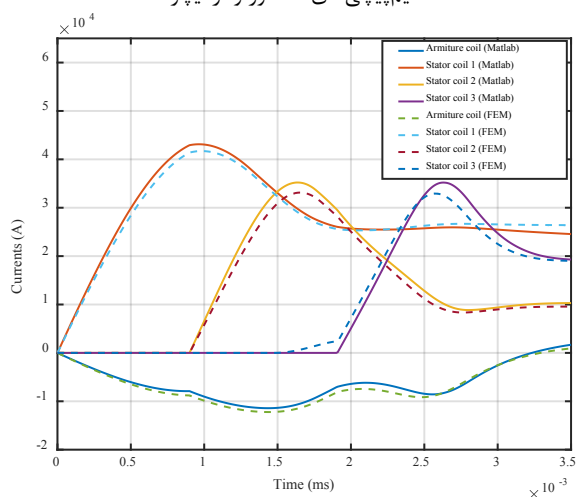
جهت تایید و اعتبارسنجی مدل تحلیلی استخراج شده، سیستم کوئل‌گان القایی مذکور به روش اجزای محدود، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS MAXWELL شبیه‌سازی شده است. تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی مستلزم حجم محاسباتی بالا و زمان شبیه‌سازی طولانی، ناشی از ساختارهای پیچیده بوده و نیازمند پردازش‌گر و سخت‌افزار با توان محاسباتی و حافظه بالا می‌باشد. بدین جهت، در این مقاله، تحلیل و شبیه‌سازی دو بعدی پرتاب‌گر کوئل‌گان فوق‌مدنظر قرار گرفته است. این تحلیل، هم‌صحت و هم‌محاسبه سریع را تضمین می‌کند. شکل (۷) مدل دو بعدی سیستم کوئل‌گان را جهت تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد. کوئل‌گان القایی دارای ساختاری کاملاً متقارن است. بنابراین، می‌توان از مدل تحلیل متقارن دو بعدی جهت شبیه‌سازی سیستم کوئل‌گان القایی، به روش اجزای محدود استفاده کرد. در این مدل تحلیل اجزای محدود، سطح مقطع، مشخصات سیم‌پیچی و مدار تحریک اعمال شده است. از نظر موقعیت اولیه سیم‌پیچی آرمیچر، این سیم‌پیچی اندکی بالاتر از مرکز سیم‌پیچی استاتور قرار می‌گیرد. برای رسیدن به بالاترین سرعت پرتابه، مرکز سیم‌پیچی آرمیچر با لبه انتهایی اولین سیم‌پیچی استاتور در جهت پرتاب هم‌تراز شده است. گرادیان اندوکتانس متقابل با توجه به حرکت سیم‌پیچی آرمیچر در جهت پرتاب تغییر می‌کند. در شکل (۸) توزیع میدان مغناطیسی را در سه موقعیت مختلف آرمیچر در نرم‌افزار اجزای محدود نشان داده شده که بیشترین چگالی میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچ‌های استاتور به T ۲۳ می‌رسد. شکل (۹) تغییرات اندوکتانس متقابل و گرادیان اندوکتانس متقابل میان دو حلقه که دارای قطر $mm(120)$



شکل (۹). اندوکتانس متقابل میان دو حلقه دارای قطر ۱۲۰ میلی‌متر

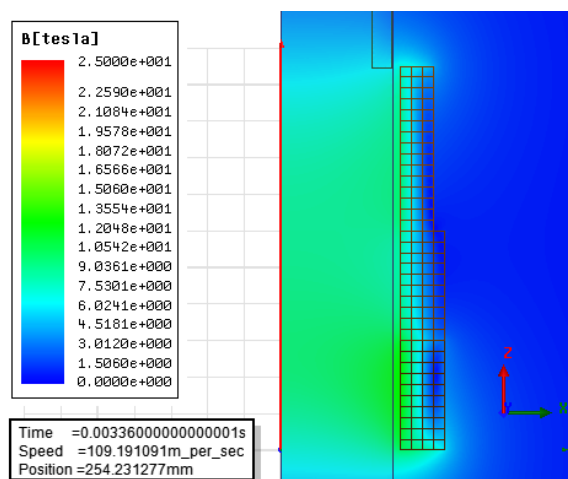


شکل (۱۰). اندوکتانس متقابل و گرادیان اندوکتانس متقابل میان سیم‌پیچی‌های استاتور و آرمیچر



شکل (۱۱). مقایسه نتایج تحلیلی و FEM جریان‌های استاتور و آرمیچر

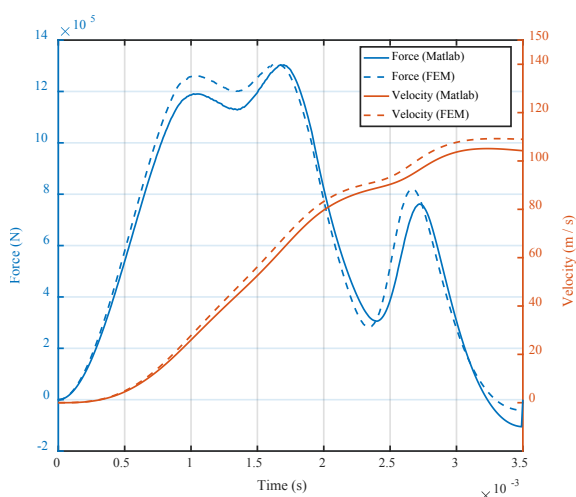
موقعیت پرتابه در شکل (۱۲) برحسب زمان نشان داده شده است. شکل (۱۳) نیز نیرو و سرعت پرتابه را نشان می‌دهد که حداکثر نیرو و سرعت پرتابه به ترتیب $1/3 MN$ و $10.9 m/s$ بوده



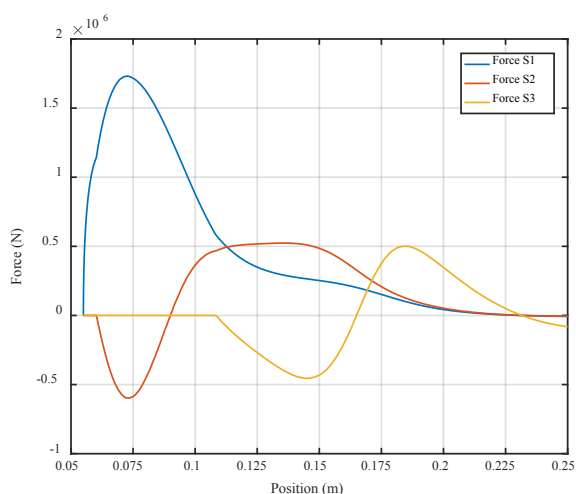
(ج)

شکل (۸). توزیع میدان مغناطیسی به ازای موقعیت‌های مختلف آرمیچر. الف) موقعیت $59 mm$. ب) موقعیت $90 mm$. ج) موقعیت $254 mm$

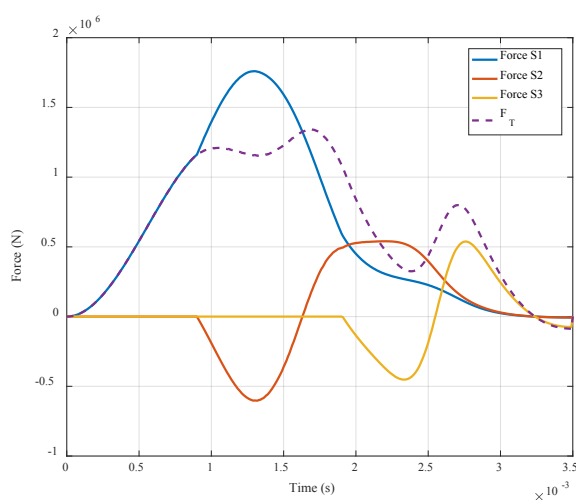
زمان‌های کلیدزنی سیم‌پیچی دوم و سوم براساس سرعت و موقعیت سیم‌پیچی آرمیچر و با در نظر گرفتن گرادیان اندوکتانس متقابل و جریان سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر برای ایجاد نیروی خالص انتخاب می‌شوند. طبقه دوم در موقعیت $60 mm$ سیم‌پیچی آرمیچر، راه‌اندازی می‌شود. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، نیروی پیش‌ران طبقه دوم به علت مقدار مثبت گرادیان اندوکتانس متقابل میان سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر، منفی است. با این حال، این موقعیت مناسبی برای راه‌اندازی طبقه دوم است زیرا در این موقعیت، نیروی پیش‌ران از اولین سیم‌پیچی استاتور در حال افزایش است و شتاب آن به‌طور قابل توجهی ازدیاد می‌یابد. به‌طور مشابه، موقعیت مناسب سیم‌پیچی آرمیچر جهت تحریک طبقه سوم استاتور، $110 mm$ تعیین می‌شود؛ که در آن نیروی پیش‌ران سیم‌پیچی استاتور دارای مقدار منفی است. بنابراین، قابل نتیجه‌گیری است که سیم‌پیچی آرمیچر تنها با طبقه فعلی شتاب نمی‌گیرد، بلکه شتاب آن در اثر طبقات قبلی نیز افزایش می‌یابد. هنگامیکه خازن توان پالسی تخلیه می‌شود، پالس جریان از سیم‌پیچی استاتور عبور می‌کند. لذا جریانی در سیم‌پیچی آرمیچر به سبب اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر، در جهت مخالف جریان استاتور ایجاد می‌شود. شکل (۱۱) جریان سیم‌پیچی‌های استاتور و آرمیچر را نشان می‌دهد. حداکثر جریان‌های سیم‌پیچی استاتور و سیم‌پیچی آرمیچر، به ترتیب $41 kA$ و $10 kA$ هستند. برهمکنش جریان القا شده و میدان مغناطیسی سیم‌پیچی استاتور، نیروهای لورنتز را تولید می‌نماید که در نتیجه آن، سیم‌پیچی آرمیچر را پرتاب می‌شود.



شکل (۱۳). مقایسه نتایج تحلیلی و FEM نیرو و سرعت پرتابه



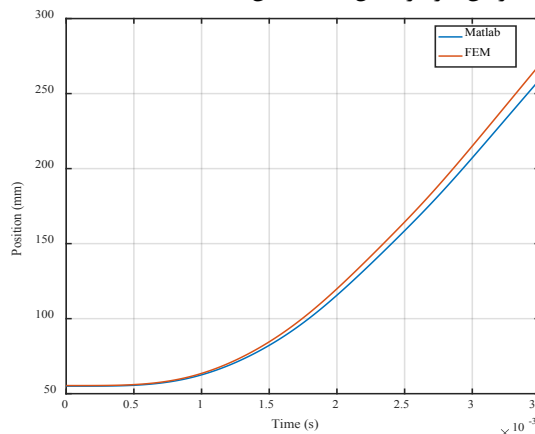
شکل (۱۴). نیروهای رانشی وارد بر پرتابه



شکل (۱۵). نیروهای رانشی وارد بر پرتابه بر حسب زمان

در بررسی‌های صورت‌گرفته در مراجع معتبر، در مورد مسافت طی شده توسط پرتابه اظهار نظری نشده است. چراکه مسافت طی شده به ابعاد پرتابه، ساختار هندسی، جرم آن، زاویه

و سیستم دارای بازده تقریبی ۳۱ درصد می‌باشد. شکل موج نیرو تحت‌تأثیر زمان کلیدزنی، اندوکتانس متقابل و جریان‌های سیم‌پیچی قرار می‌باشد. مقایسه بین نتایج تحلیلی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌روش اجزاء محدود نشان می‌دهد که مدل اجزاء محدود به‌خوبی با مدل تحلیلی تطابق دارد. یکی از دلایل وجود اختلاف در نیروی وارد شده به پرتابه، خطای محاسبات در نرم افزار Matlab است. این نرم‌افزار حل معادلات حالت را به‌روش عددی انجام می‌دهد که در آن، مقدار هر متغیر حالت در هر لحظه، وابسته به مقدار قبلی همان متغیر حالت می‌باشد. به این صورت که مقدار پارامتر محاسبه شده در لحظه k ام جهت محاسبه همان پارامتر در لحظه $(k+1)$ ام استفاده می‌شود. از اینرو، فاصله زمانی میان دو گام زمانی حتی‌الامکان باید کوچک در نظر گرفته شود تا میزان خطا کمتر شود. از دیگر دلایل این اختلاف می‌توان به تغییر مقاومت سیم‌پیچی‌ها به‌واسطه عبور جریان از آن‌ها، اشاره کرد. به این‌صورت که مقاومت با دما رابطه‌ی مستقیم دارد که این رابطه، در مدل تحلیلی لحاظ نشده است. همچنین، محاسبه اندوکتانس خودی و متقابل با استفاده از روش تحلیلی، خود دارای مقداری خطاست که در محاسبه نیروی وارد شده به پرتابه تأثیر دارد. در مجموع، موارد فوق را می‌توان به عنوان منشاء این اختلاف جزئی قلمداد کرد. در شکل (۱۴) نیروی رانشی وارده از طرف هر یک از طبقه‌ها به پرتابه بر حسب موقعیت آن آورده شده است. در زمانی که فقط سیم‌پیچی طبقه اول دارای جریان است، نیروی وارد بر آرمیچر از حاصلضرب جریان استاتور طبقه اول در جریان آرمیچر و گرادیان اندوکتانس متقابل میان دو سیم‌پیچ به‌دست می‌آید. با روشن شدن سیم‌پیچی طبقه دوم، جریان سیم‌پیچی آرمیچر شروع به افزایش می‌کند که این افزایش موجب ازدیاد نیرو با شیب بیشتری می‌شود. همین امر، دلیل تغییر شیب نمودار نیروی وارده از طرف استاتور طبقه اول بر سیم‌پیچی آرمیچر است. این دلیل برای سیم‌پیچی‌های طبقات دیگر نیز صادق است. که همین نمودار بر حسب زمان نیز در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۶). مقایسه نتایج تحلیلی و FEM موقعیت پرتابه

قرار گرفته است. به‌منظور تایید صحت و اعتبارسنجی خروجی‌ها، نتایج شبیه‌سازی به‌روش اجزاء محدود، با نتایج حاصل از روش تحلیلی مقایسه شده‌اند و هم‌خوانی قابل قبولی بین آنها برقرار بوده است. در این تحلیل، نیرو و سرعت پرتابه به‌ترتیب برابر با $1/3 MN$ و $109 m/s$ و همچنین سیستم دارای بازده تقریبی ۳۱ درصد می‌باشد که هدف طراحی را برآورده می‌سازد. بنابراین، ویژگی‌های طراحی و نتایج تحلیل اجزاء محدود می‌تواند به‌طور موثری برای ساخت یک سیستم کویل‌گان در مقیاس بزرگ استفاده شود.

۵- مراجع

- [1] O. Gurhan, "A methodology to measure the metal recovered armature", Naval postgrade schoole, Monterey, California, December 2001.
- [2] L. Gherman, M. Pearsica, C. Strimbu, and C.-G. Constantinescu, "Induction coilgun based on 'E-shaped' design," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no. 2, pp. 725-729, Feb. 2011.
- [3] K. A. Polzin, J. E. Adwar, and A. K. Hallock, "Optimization of electrodynamic energy transfer in coilguns with multiple, uncoupled stages," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 4, pp. 1453-1460, Apr. 2013.
- [4] H. D. Fair, "Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 225-230, Jan. 2009.
- [5] B. D. Skurdal and R. L. Gaigler, "Multimission electromagnetic launcher," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 458-461, Jan. 2009.
- [6] Xiaobo Niu, Kaipei Liu, Yadong Zhang, Zhenren Xiao, Gang Xiao, Yujia Gong, "Research on self-consistent control strategy of multistage synchronous induction coil launcher", Energy, Volume 144, 2018, Pages 1-9,
- [7] B. Zou, R. Li, M. Wang, D. Yang, and X. Chen, "Research on the Scaling Model of Electromagnetic Coil Launcher," Plasma Science, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 1094-1099, 2013.

[۸] حق مرام، رضا، قاسمی نژاد، مرتضی. (۱۳۹۶). طرح بهینه پرتابگر الکترومغناطیسی القایی کویلی چندمرحله ای با ساختار نوین نامتقارن. دوفصلنامه علمی الکترومغناطیس کاربردی، ۳(۴)، ۸-۱.

- [9] D. C. Lamppa, C. J. Garasi, A. C. Robinson, T. V. Russo, D. N. Shirley, and M. S. Aubuchon, USA Patent, Sandia National Labs, USA (2008).
- [10] Shoubao Liu, Jiangjun Ruan, Daochun Huang and Zilin Wan, "Analysis of inductive coil gun performance based on field coupling circuit method," 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, 2009, pp. 845-849.
- [11] H. D. Fair, "Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 225-230, Jan. 2009.
- [12] T. Zhang et al., "Design and testing of 15-stage synchronous induction coilgun," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no. 5, pp. 1089-1093, May 2013.
- [13] T. Zhang et al., "Experimental results from a 4-stage synchronous induction coilgun," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no. 5, pp. 1084-1088, May 2013.

پرتاب، شرایط محیطی و عوامل متعدد دیگری بستگی دارد. همچنین، کمیت سرعت به‌تنهایی جهت ارزیابی سیستم کویل‌گان، معیار مناسبی نمی‌باشد. معمولاً در اغلب موارد، پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی را با دو کمیت سرعت دهانه (سرعت خروج پرتابه از دهانه) و جرم پرتابه، مورد سنجش قرار می‌دهند. سرعت دهانه و جرم پرتابه، کاملاً به‌صورت تنگاتنگ مرتبط با هم، قابلیت تغییر در گستره وسیعی از مقادیر را دارند. بسته به نوع کاربرد این سامانه، جرم پرتابه و سرعت دهانه لازم تعیین می‌شوند. طبق گزارشات فنی موجود، به کمک این فناوری، با جرم پرتابه‌ای در حد چندین گرم، سرعت‌هایی در حد چندین ماخ نیز حاصل شده است. همچنین، در جرم‌های پرتابه بالا، در حد چندین کیلوگرم نیز از کویل‌گان استفاده شده است. حتی گزارشاتی وجود دارد که حاکی از توانایی پرتاب ماهواره توسط سامانه کویل‌گان می‌باشد. برد کویل‌گان با توجه به نوع ساختار آنها متفاوت است. هرچه کویل‌گان دارای تعداد طبقات بیشتری باشد، سرعت دهانه افزایش یافته و برد بیشتری نیز حاصل خواهد شد. در جدول (۳) مشخصات فنی مربوط به تعدادی از سامانه‌های کویل‌گان چندطبقه، برگرفته از مراجع معتبر، آورده شده است.

جدول (۳). نمونه‌های موجود در مقالات معتبر

سرعت خروجی دهانه (m/s)	تعداد طبقات	ظرفیت خازن (mF)	جرم پرتابه (kg)	جنس پرتابه	مرجع
۲۱۹	۱۵	۸-۴	۵	آلومینیوم	[۲۵]
۵۹۵	۲۵	۱	۰/۲	آلومینیوم	[۶]
۲۵۰	۳	۲۰-۵-۲	۱/۶۲	مس	[۲۶]
۳۷۴	۳	۲۰-۶-۴	---	آلومینیوم	[۲۷]
۵۰	۵	۰/۲۴	۰/۴۱۳	---	[۲۸]
۶۴	۳	۱	۰/۶	آلومینیوم	[۲۹]
۲۱۶	۴	۲	---	مس	[۳۰]

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله به بحث در مورد طراحی، تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی مربوط به سیستم کویل‌گان القایی چند طبقه با ماژول توان پالسی می‌پردازد. نتایج با استفاده از نرم افزار تحلیل اجزاء محدود ANSYS Maxwell به‌دست آمده است. در این راستا، ولتاژ، جریان، اندوکتانس متقابل، نیرو، سرعت، شتاب و بازده سیستم کویل‌گان القایی چند طبقه مورد تجزیه و تحلیل

Induction Coil Launcher," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 5, pp. 2419-2423, May 2019.

- [14] B. D. Skurdal and R. L. Gaigler, "Multimission electromagnetic launcher," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 458-461, Jan. 2009.
- [15] Y. S. Jin et al., "Fabrication and testing of a 600-kJ pulsed power system," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no. 10, pp. 2671-2673, Oct. 2013.
- [16] R. J. Kaye, "Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers," IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 1, pp. 194-199, Jan. 2005.
- [17] B. E. Fridman, "Transients in pulsed electrical circuits with massive conductors," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 34, no. 5, pp. 1938-1943, Oct. 2006.
- [18] Y. Zhang, J. Ruan, Y. Wang, Z. Du, S. Liu, and Y. Zhang, "Performance improvement of a coil launcher," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no. 1, pp. 210-214, Jan. 2011.
- [19] J. He, E. Levi, Z. Zabar, and L. Birenbaum, "Concerning the design of capacitively driven induction coil guns," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 17, no. 3, pp. 429-438, Jun. 1989.
- [20] Y. Cao, W. Liu, R. Li, and Y. Zhang, "Study of discharge position in multi-stage synchronous inductive coilgun," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 518-521, Jan. 2009.
- [21] M. Song, D. Le, B. Go, M. Park and I. Yu, "Design of an Attractive Force Circuit of Pulsed Power System for Multistage Synchronous Induction Coilgun," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 46, no. 10, pp. 3606-3611, Oct. 2018.
- [22] B. Go, D. Le, M. Song, M. Park and I. Yu, "Design and Electromagnetic Analysis of an Induction-Type Coilgun System With a Pulse Power Module," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 1, pp. 971-976, Jan. 2019.
- [23] M. Song et al., "Development and Experimental Results of a Three-Stage Induction Coilgun," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 5, pp. 2438-2444, May 2019.
- [24] D. Le, B. Go, M. Song, M. Park and I. Yu, "Development of a Capacitor Bank-Based Pulsed Power Supply Module for Electromagnetic Induction Coilguns," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 5, pp. 2458-2463, May 2019.
- [25] T. Zhang et al., "Investigation of Magnetic Field Arrangement on Launching Performance of Multistage Synchronous Induction Coilgun," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 7, pp. 1436-1442, July 2017.
- [26] Z. Du et al., "Performance Analysis of a Coil Launcher Based on Improved CFM and Nonoverlapping Mortar FEM," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 41, no. 5, pp. 1070-1076, May 2013.
- [27] X. Tao, S. Wang, Y. Huangfu, S. Wang and Y. Wang, "Geometry and Power Optimization of Coilgun Based on Adaptive Genetic Algorithms," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 43, no. 5, pp. 1208-1214, May 2015.
- [28] X. Niu, K. Liu, Y. Zhang, G. Xiao and Y. Gong, "Multiobjective Optimization of Multistage Synchronous Induction Coilgun Based on NSGA-II," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 7, pp. 1622-1628, July 2017.
- [29] W. Liu, C. Cao, Y. Zhang, J. Wang and D. Yang, "Parameters Optimization of Synchronous Induction Coilgun Based on Ant Colony Algorithm," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, no. 1, pp. 100-104, Jan. 2011.
- [30] X. Guan, S. Wang, S. Guan, D. Guo and B. Liu, "Study on the Best Trigger Position of Multistage