

ارائه و بررسی یک روش برای کنترل فاصله شکاف هوایی قطارهای مغناطیسی با در نظر گرفتن دینامیک حرکت قطارها

مقاله علمی - پژوهشی

محمد علی صندیدزاده*، دانشیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
بهمن قربانی واقعی، استادیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حمیدرضا فلاح رضانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
فرزاد سلیمانی، پژوهشگر پسا دکتری، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sandidzadeh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۱۰-۱

چکیده

شناور مغناطیسی یک فناوری نوآورانه حمل و نقل است. قطار پرسرعت مغناطیسی (*Maglev*) از سیستم‌های شناور مغناطیسی، هدایت و نیروی محرکه غیر تماسی استفاده می‌کند و چرخ، محور یا گیربکس ندارد. جایگزینی قطعات مکانیکی با قطعات الکترونیکی بر محدودیت‌های فنی فناوری چرخ روی ریل غلبه میکند. مجموعه‌ای از مدل‌های تحلیلی، از جمله مدل وسیله نقلیه، مدل تعلیق مغناطیسی و مدل کنترل فعال برای پیش‌بینی اثرات وسایل نقلیه مغناطیسی بر روی راهنماها، تعریف شده‌اند. دینامیک یک مدل وسیله نقلیه تک قطار که روی یک پرتو انعطاف‌پذیر و خشن پیمایش می‌کند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌های عددی برای مطالعه رفتار دینامیکی وسیله نقلیه مغناطیسی و پرتو راهنما انجام می‌شود. در این مقاله کنترل‌کننده‌ای برای بررسی ولتاژ خروجی سنسور طراحی شده است، که برای تشخیص انحراف عرضی و طولی فاصله شکاف هوا قرار داده شده است. در صورت انحراف، فاصله شکاف هوا با تغییر در جریان عبوری از سیم‌پیچ دوباره به مقدار مورد نظر می‌رسد. در نهایت، قطار مغناطیسی ترانس سریع آلمانی با سیستم تعلیق آهنربایی الکترومغناطیسی با نرم افزار *MATLAB* برای عملکرد کنترلر طراحی شده مناسب، تجزیه و تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: قطار مغناطیسی (*Maglev*)، سیستم تعلیق الکترومغناطیسی، فاصله شکاف هوایی، دینامیک حرکت

۱- مقدمه

سیستم‌های مغناطیسی دارای ویژگی‌هایی هستند که می‌توانند یک جایگزین جذاب برای وسایل حمل و نقل فعلی (از نظر سرعت بالا، ایمنی بالا، ظرفیت بالا و آلودگی و مصرف انرژی کمتر) باشند. در ۳۰ سال گذشته، بسیاری از مدل‌های مغناطیسی پیشنهاد و تحلیل شده‌اند. کاتز و همکاران دو مدل ساده شده یک بعدی از مغناطیسی و سیستم تعلیق را پیشنهاد کردند. هر دو نوع تعلیق مغناطیسی (جاذبه و دافعه) مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات چندین عامل غالب، از جمله زبری و انعطاف‌پذیری راهنما، غیرخطی بودن نیروی تعلیق

شناورهای مغناطیسی یک فناوری نوآورانه حمل و نقل هستند. گاهی اوقات گفته می‌شود که این اولین نوآوری اساسی در زمینه فناوری راه آهن از زمان اختراع راه آهن است. قطار سریع‌السیر مغناطیسی، از سیستم‌های شناور مغناطیسی غیرتماسی، هدایت و رانش استفاده می‌کند و چرخ، محور و جعبه دنده ندارد. سه عملکرد اصلی در تکنولوژی مغناطیسی وجود دارد: شناور یا تعلیق، پیشران و هدایت. طراحی فعلی سیستم مغناطیسی از نیروهای مغناطیسی برای انجام هر سه عملکرد استفاده می‌کند. در مقایسه با راه آهن‌های سنتی،

اثرات سرعت بر عملکرد سیستم بررسی شد اما پاسخ‌های طراحی راهنما مورد مطالعه قرار نگرفت (Nagurka et al., 1997).

برای پیش‌بینی رفتار سیستم، یک مدل برای کل سیستم باید تعریف شود که شامل یک مدل دینامیکی، یک مدل تعلیق مغناطیسی، یک مدل ساختار راهنما و یک مدل زبری سطح راهنما است.

در این مقاله، یک طرح کنترل فعال شامل طراحی ناظر LQG و کنترلر طراحی شده است. برای فرمول‌بندی معادلات حالت، مدل دینامیکی با مدل تعلیق مغناطیسی همراه می‌شود. مدل ساختاری راهنما نیز با مدل تعلیق مغناطیسی همراه است. اهداف کلی این مقاله، تعریف معیارهای طراحی مناسب برای راهنما و ارزیابی عملکرد قطار مغناطیسی و نیز سیستم کنترل فعال است.

یک سیستم مغناطیسی EMS در مدل‌سازی و سیستم‌های کنترل در نظر گرفته شده است. این مطالعه به شناور مغناطیسی محدود شده است. فرض بر این است که هیچ جفتی بین سیستم شناور مغناطیسی و سیستم هدایت و همچنین بین سیستم شناور مغناطیسی و سیستم رانش وجود ندارد.

۲- تعلیق الکترومغناطیسی/الکترو دینامیکی

در این بخش دو طرح مختلف از سیستم‌های تعلیق ارائه شده است. یک طرح، تعلیق الکترومغناطیسی نام دارد که فن‌آوری آن مربوط به کشور آلمان و بر اساس طراحی EMS بوده و یک سیستم شناور نیرو است.

آهنرباهای پشتیبانی کنترل شده الکترونیکی در هر دو طرف در تمام طول قطار قرار دارند. بسته‌های استاتور فرومغناطیسی در زیر زهکشی راهنما نصب می‌شوند.

الکترومغناطیس‌های موجود در وسایل نقلیه با ریل‌های فرومغناطیسی روی راهنما تعامل دارند و جذب آن‌ها می‌شوند. الکترومغناطیس‌های متصل به پایین قطار به سمت هدایت جذب می‌شوند که قطار را در حدود ۱ سانتی‌متر بالاتر از راهنما هدایت می‌کند و قطار را حتی زمانی که حرکت نمی‌کند معلق نگه می‌دارد (Lv et al., 2021).

نیروی جاذبه ذاتاً یک تکیه‌گاه وسیله نقلیه ناپایدار ایجاد می‌کند، زیرا با کاهش فاصله قطار/راهنما، نیروی جاذبه افزایش می‌یابد. یک سیستم کنترل الکترونیکی برای حفظ شکاف

و عناصر کنترل تعلیق فعال، در یک مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، از یک سیستم ساده $2DOF$ با یک بدنه قطار و یک مدل آهنربا استفاده شده است. یک پارامتر زبری مناسب برای سیستم کنترل جاذبه تعریف و تأیید شد. خطای ردیابی RMS تقریباً $\frac{1}{4}$ شکاف هوای تعادلی برای جلوگیری از تماس راهنما آهنربا است (Ding et al., 2021).

در یک مطالعه دیگر، یک مدل وسیله نقلیه چند قطار که بر روی یک راهنمای منعطف تک دهانه یا دو دهانه حرکت می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته است و در آن، بارهای متمرکز و بارهای توزیع شده مقایسه شده‌اند. همچنین اثرات ترکیبی فعل و انفعالات راهنمای وسیله نقلیه در طیف وسیعی از سرعت‌های پارامترهای مختلف وسیله نقلیه و راهنما مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، فقط حرکت عمودی وسیله نقلیه در نظر گرفته شده و در آن از مدل برنولی-اویلر با مقطع همگن، همسانگرد و یکنواخت استفاده شده است. برای محاسبه جابه‌جایی از روش تحلیل مودال استفاده شده است. از نتایج این مطالعه می‌توان به این مورد اشاره کرد که مدل وسیله نقلیه بار توزیع شده بهتر از مدل وسیله نقلیه بار متمرکز است، که ممکن است منجر به انحرافات بزرگ راهنما و شتاب در شبیه‌سازی شود. همچنین در حالت چند قطار، شتاب بدنه کمتری نسبت به حالت تک قطار وجود دارد، که دلیل آن محدودیت‌های عمودی بین قطار است. با این حال، یک مدل کنترل و یک مدل تعلیق مغناطیسی در این مطالعه گنجانده نشده است. رابط بین وسیله نقلیه و تیر با فنر و داشپت الاستیک مدل‌سازی شده است که در یک سیستم مغناطیسی واقعی چنین نیست (Xiang et al., 2022).

یک مدل مغناطیسی پویا که شامل یک مدل وسیله نقلیه $5DOF$ ، یک مدل آهنربای ابررسانا و یک مدل راهنما انعطاف‌پذیر چند دهانه است، در یک مطالعه دیگر توسعه داده شده است. یک شکاف هوای وسیع (۴۰ میلی‌متر) از یک سیستم EMS پیشنهاد شده است، و فرض شده است که چنین تعلیق نرم‌تری نیاز به تعلیق ثانویه غیرفعال را از بین می‌برد. در این مطالعه، یک سیستم کنترل پیش‌نمایش بهینه با عملکرد یکپارچه برای مطالعات شبیه‌سازی طراحی شده است. بارگذاری راهنما به عنوان یک نیروی پویا و به طور پیوسته توزیع شده مدل شده، و وزش باد متقاطع نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده است. نتیجه این مطالعه این بود که طرح کنترل پیش‌نمایش می‌تواند عملکرد را افزایش دهد. همچنین

می‌کند، آهنرباهای بزرگ نصب شده بر روی زهکشی قطار را دفع کرده و به قطار اجازه می‌دهد، ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از راهنما حرکت کند. با این حال، برخی از انواع پشتیبانی برای حرکت مورد نیاز است، زیرا *EDS* را نمی‌توان در سرعت‌های زیر ۱۰۰ کیلومتر در ساعت معلق کرد (Zhao et al., 2005).

برخلاف قطارهای آلمانی، قطارهای ژاپنی از آهنربای الکتریکی ابرسانا و ابرسانا استفاده می‌کنند. در سیستم *EMS*، سیم‌پیچ‌ها تنها زمانی جریان الکتریکی را هدایت می‌کنند که منبع تغذیه وجود داشته باشد. اما الزامات فنی برای قطار مغناطیسی ژاپنی فراتر از نیروهای جذاب است، یک طرف سیستم باید مجهز به سیم‌های الکتریکی باشد تا وسیله نقلیه را شناور کند (Ni et al., 2021).

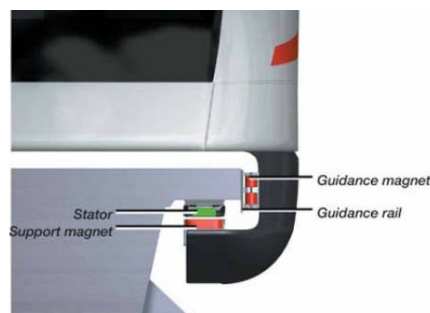
تفاوت دیگر این سیستم‌ها این است که قطارهای ژاپنی نزدیک به ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از راهنما شناور می‌شوند. در مقایسه با قطارهای آلمانی که تنها حدود ۱ سانتی‌متر شناور هستند، این شکاف بزرگ میدان‌های مغناطیسی سرگردان زیادی ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه شکاف در سیستم *EMS* کوچکتر است، چگالی توان به اندازه کافی زیاد است و مصرف برق حتی با آهنربای الکتریکی معمولی بسیار کم است و استفاده از سیم‌پیچ‌های ابرسانا ضروری نیست. در حالی که شناور شدن را می‌توان با سرعت کم و حتی در حالت استراحت برای یک سیستم *EMS* به دست آورد. قطارهای مغناطیسی که از سیستم *EDS* استفاده می‌کنند، باید با چرخ‌های لاستیکی حرکت کنند که بتوانند به سرعت حدود ۱۰۰ کیلومتر در ساعت برسند (Hoburg, 2004)، (Zhang et al., 2004)، (Yang et al., 2022)، (Hogan et al., 1975)، (Bo et al., 2021).

۳- مدل‌سازی قطار مغناطیسی

یک سیستم مغناطیسی *EMS* در مدل‌سازی قطار و سیستم‌های کنترل در نظر گرفته شده است. این مطالعه به شناور مغناطیسی محدود شده است. فرض بر این است که هیچ جفتی بین سیستم شناور مغناطیسی و سیستم هدایت و همچنین بین سیستم شناور مغناطیسی و سیستم رانش وجود ندارد. مدل وسیله نقلیه پویا در نظر گرفته شده در این مقاله به طور خاص بر اساس ساختار مکانیکی درک شده قطار سریع آلمانی است. بدنه‌ای یکنواخت را برای قطار در نظر بگیرید که

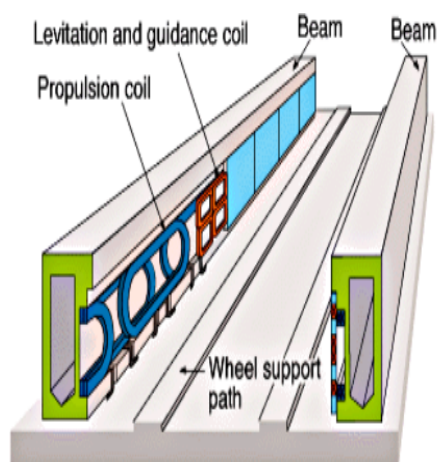
قطار/راهنما و جلوگیری از تماس مجهز شده است (Kusagawa et al., 2004).

بنابراین، در این مقاله، توجه ما به سیستم شناور الکترومغناطیسی برای طراحی کنترلر به منظور ثابت نگه‌داشتن شکاف هوا در مغناطیسی معطوف شده است (شکل (۱)).



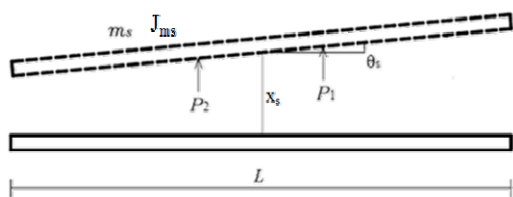
شکل ۱. سیستم شناور و هدایت

طرح دوم، سیستم تعلیق الکترومغناطیسی نام دارد. طراحی مغناطیسی سری *MLU* موسسه تحقیقات فنی راه‌آهن ژاپن یک سیستم *EDS* است (شکل (۲)).



شکل ۲. تصویر راهنمای *EDS*

یک *EDS* دارای آهنرباهایی است که در حین حرکت قطار، جریان را در دیواره‌های راهنما القا می‌کند. نیروهای دافعه حاصل، پشتیبانی و هدایت قطار ذاتاً پایدار را ایجاد می‌کنند، زیرا دافعه مغناطیسی با کاهش شکاف قطار/راهنما (هم عمودی و هم جانبی) افزایش می‌یابد (Cai et al., 1996)، (Chen et al., 1995). سیم‌پیچ مغناطیسی که در امتداد مسیر حرکت



شکل ۴. نیروهای وارده قطار و بوژی های آن

معادلات حرکت بدنه قطار به صورت (۳) به دست می آید.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{\psi}_s - P_1 - P_2 &= 0 \\ J_{ms} \ddot{\theta}_s - P_1 \frac{1}{4} L + P_2 \frac{1}{4} L &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

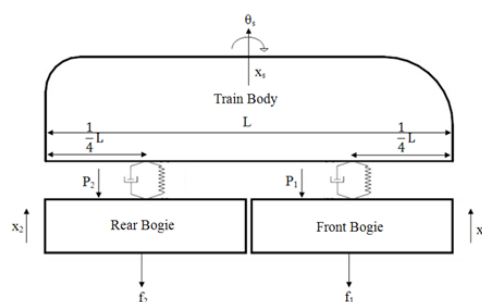
معادلات را می توان به صورت (۴) بازنویسی کرد.

$$\begin{aligned} M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) &= P(t) \\ X(t) &= [v_1, v_2, v_s, \theta_s]^T \\ M &= \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{ms} \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} c_s & 0 & -c_s & -\frac{1}{4} L c_s \\ 0 & c_s & -c_s & +\frac{1}{4} L c_s \\ -c_s & -c_s & 2c_s & 0 \\ -\frac{1}{4} L c_s & +\frac{1}{4} L c_s & 0 & \frac{1}{8} L^2 c_s \end{bmatrix} \\ K &= \begin{bmatrix} k_s & 0 & -k_s & -\frac{1}{4} L k_s \\ 0 & k_s & -k_s & +\frac{1}{4} L k_s \\ -k_s & -k_s & 2k_s & 0 \\ -\frac{1}{4} L k_s & +\frac{1}{4} L k_s & 0 & \frac{1}{8} L^2 k_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

۴- مدل تعلیق مغناطیسی

پیکربندی الکترومغناطیس و طراحی صفحه فرومغناطیسی در مدل سیستم قطارهای مغناطیسی در شکل (۵) نشان داده شده است و پارامترهای مربوط به آن مشخص شده اند. این پیکربندی شامل مجموعه ای از سیم پیچ های متصل به صورت سریال است که روی یک هسته آهنی پیچیده شده است، که می تواند به بسته های استاتور راهنما جذب شود.

توسط چهار فنر و یک داشپت پشتیبانی می شود، که تعلیق ثانویه را تشکیل می دهد، به طوری که چهار بوژی مغناطیسی سیستم تعلیق اولیه را تشکیل می دهند. الکترومغناطیس ها بر روی بوژی های صلب نصب می شوند و نیروی مغناطیسی جاذبه را، در حالی که با بسته های استاتور فرومغناطیسی تعامل دارند، ایجاد می کنند. اتصالات بین آهنرباها و بوژی ها صلب فرض می شوند. فرض کنید که نیروهای مغناطیسی به صورت بارهای متمرکز متعدد عمل می کنند. حرکات دو بعدی قطار شامل حرکت چرخشی بررسی شده است (شکل (۳)).



شکل ۳. مدل قطار مغناطیسی (نمای جانبی)

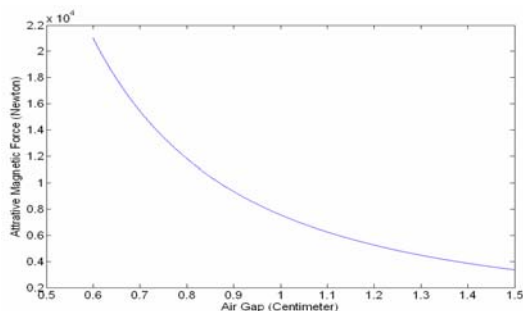
معادله حرکت بوژی جلو به صورت (۱) به دست می آید.

$$\begin{aligned} m\ddot{v}_1 + P_1 + f_1 &= 0 \\ P_1 &= k_s \left(v_1 - v_s - \frac{1}{4} L \theta_s \right) + c_s \left(\dot{v}_1 - \dot{v}_s - \frac{1}{4} L \dot{\theta}_s \right) \end{aligned} \quad (1)$$

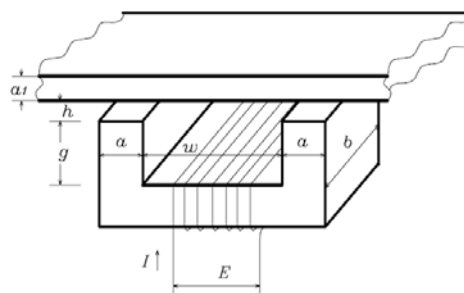
که در آن، \$P_1\$ نیروی برهم کنش بین بدنه قطار و بوژی جلو، \$v_1\$ جابه جایی عمودی بوژی جلو، \$f_1\$ نیروی تعلیق مغناطیسی دینامیکی روی بوژی جلو، \$k_s\$ سفتی فنر تعلیق بدنه قطار و \$c_s\$ میرایی قطار، \$v_s\$ تعلیق بدنه در مقابل جابه جایی عمودی بدنه قطار در مرکز نیروی جاذبه، \$\theta_s\$ جابه جایی زاویه ای بدنه قطار و \$L\$ طول بدنه قطار است. معادله حرکت بوژی عقب به صورت (۲) به دست می آید.

$$\begin{aligned} m\ddot{v}_2 + P_2 + f_2 &= 0 \\ P_2 &= k_s \left(v_2 - v_s + \frac{1}{4} L \theta_s \right) + c_s \left(\dot{v}_2 - \dot{v}_s + \frac{1}{4} L \dot{\theta}_s \right) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن، \$P_2\$ نیروی برهم کنش بین بدنه قطار و بوژی عقب، \$v_2\$ جابه جایی عمودی بوژی عقب و \$f_2\$ نیروی تعلیق مغناطیسی دینامیکی روی بوژی عقب است (شکل (۴)).



شکل ۶. نیروی مغناطیسی جاذبه به عنوان تابعی از شکاف هوا



شکل ۵. پیکربندی الکترومغناطیس و طراحی صفحه فرومغناطیسی

۴-۱- مدل تعلیق مغناطیسی غیرخطی

نیروی جاذبه بین سطح قطب و صفحه فرومغناطیسی به صورت (۵) محاسبه می‌شود (Li et al., 2021).

$$F = \frac{1}{2\mu_0} B_m^2 (2A_m) \quad (5)$$

جایی که B_m چگالی شار در طول شکاف هوا، A_m مساحت سطح وجه قطب و μ_0 نفوذپذیری هوا است. نیروی جاذبه مغناطیسی از طریق (۶) به دست می‌آید [Meisenholder, 1972].

$$F = \frac{(mmf)^2 \mu_0 ab}{4} \left[h + \frac{\mu_0}{\mu_t} (w + g + 2a) \right]^{-2} \quad (6)$$

که در آن، h شکاف هوای مغناطیسی، μ_t چگالی شار در آهن و mmf نیروی محرکه آهنربا است (معادله (۷)).

$$mmf = NI = f_s w g l_a \quad (7)$$

که در آن، N تعداد دور سیم‌پیچ، I جریان در سیم‌پیچ، f_s ضریب فضا (۰٫۲ ~ ۰٫۵)، wg ناحیه پنجره، و J_a چگالی جریان قابل قبول سیم‌پیچ میدان است. چگالی شار اشباع B_{sat} که اشباع را در مواد هسته ایجاد می‌کند، بین ۱٫۵ و ۲٫۰ $Websters/m^2$ است. حال اگر $h \gg \frac{\mu_0}{\mu_t} (w + g + 2a)$ برقرار باشد، معادله (۸) را می‌توان نوشت.

$$F = \frac{(mmf)^2 \mu_0 ab}{4h^2} \quad (8)$$

شکل (۶) رابطه غیرخطی بین شکاف هوا و نیروی جاذبه مغناطیسی را نشان می‌دهد. نیروی محرکه آهنربا می‌تواند از دو قسمت مجزا تشکیل شده باشد. یک قسمت ظرفیت بلند کردن را فراهم می‌کند و وزن و وسیله نقلیه را متعادل می‌کند و ثابت فرض می‌شود. قسمت دوم توسط یک جریان تریم ایجاد می‌شود که توسط یک ولتاژ کنترل‌شده برای حفظ شکاف هوا در مقدار اسمی خود هدایت می‌شود.

هر ماژول آهنربا، آهنرباهای نانومتری را در خود جای می‌دهد. منبع تغذیه آهنرباهای یک ماژول مشابه است. سپس نیروی مغناطیسی تولید شده توسط هر ماژول آهنربا به صورت معادله (۹) خواهد بود.

$$F_j = \frac{n_m \mu_0 a b}{4h_j^2} (N_c I_c + N_t I_t)^2 \quad (9)$$

که در آن، N_c تعداد دور سیم‌پیچ‌ها در هر آهنربا است که نیروی ثابتی را ارائه می‌کند، I_c جریان ثابت متناظر، N_t تعداد دور سیم‌پیچ‌ها در هر آهنربا است که جریان‌های تریم را فراهم می‌کند، I_t جریان برش مربوطه در ماژول تمام است.

رابطه بین نیروی مغناطیسی و جریان تریم نیز غیرخطی است. رابطه بین جریان تریم و ولتاژ کنترل‌شده را می‌توان با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهوف، از طریق معادله (۱۰) به دست آورد.

$$u - R_c I - N_t \frac{d(B_m a b)}{dt} = 0 \quad (10)$$

$$B_m = \frac{\mu_0 (mmf)}{2} \left[h + \frac{\mu_0}{\mu_t} (w + g + 2a) \right]^{-1}$$

در نهایت، معادله مربوط به جریان تریم را نیز می‌توان به صورت معادله (۱۱) تعیین کرد.

$$u_j = R_c I_j + \frac{\mu_0 a b N_c^2}{2h_j} \frac{dI_j}{dt} - \frac{\mu_0 a b N_c (N_c I_c + N_t I_t)}{2h_j^2} \frac{dI_j}{dt} \quad (11)$$

۴-۲- خطی‌سازی مدل تعلیق مغناطیسی

در این بخش، مدل سیستم تعلیق را با استفاده از خطی‌سازی ساده می‌کنیم. نیروی مغناطیسی در شکاف هوای اسمی به صورت معادله (۱۲) خطی می‌شود.

$$F_j = F_j(h_0, I_0) + \frac{\partial F_j}{\partial h} \Big|_{h=h_0, I_j=I_0} (h - h_0) + \frac{\partial F_j}{\partial I} \Big|_{h=h_0, I_j=I_0} (I_j - I_0) + O(h) \quad (12)$$

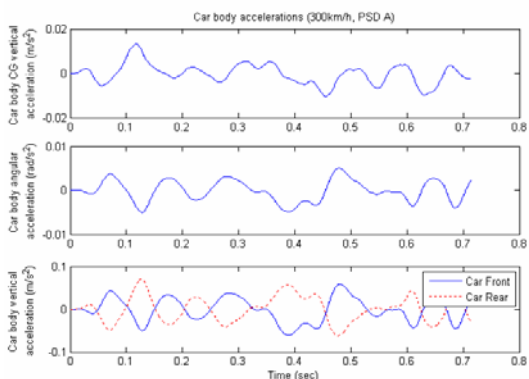
جدول ۱. پارامترهای مدل مغناطیسی تک قطار

Parameter	Symbol	Value	Units
Guideway mass per unit length	m_g	$3.50 \cdot 10^3$	Kg/m
Primary suspension (bogies-magnets) mass	m_p	$1.016 \cdot 10^3$	Kg
Secondary suspension (car body) mass	m_s	$32.0 \cdot 10^3$	Kg
Vehicle length	L	24	m
Span length	L_s	30	m
Guideway damping	ξ	0.03	
Secondary damping	c_s	$2.15 \cdot 10^4$	N-s/m
Vehicle vertical damping ratio	ξ_v	0.80	
Vehicle rotational damping ratio	ξ_θ	0.77	
Secondary stiffness	k_s	$2.26 \cdot 10^4$	N/m
Guideway bending rigidity	EI	$2.50 \cdot 10^{10}$	N-m ²
Nominal air gap	h_0	0.01	m
Number of magnets in each module	n_m	12	
Number of turns in trim coil	N_t	96	
Face area of each magnet pole	A_m	0.04	m ²
Resistance of trim coil	R_c	1.0	Ohm
Permeability of air	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Weber/A-m

جدول ۲. داده‌های آماری: سرعت‌های مختلف با PSD A

Vehicle Speed (km/h)		300	400	500
RMS Acceleration (m/s ²)	Max	0.031	0.035	0.049
	Min			
Air Gaps (mm)	Max	10.75	11.00	11.26
	Min	9.54	9.35	9.37
	Std	0.26	0.45	0.56
Controlled Current (A)	Max	2.76	3.36	4.36
	Min	-1.56	-2.41	-2.19
	Std	0.94	1.54	1.92
Controlled Voltage (V)	Max	3.06	6.73	4.30
	Min	-4.95	-3.07	-7.52
	Std	1.74	1.96	3.26
Total Magnetic Force (kN)	Max	90.11	90.56	90.21
	Min	86.75	86.38	85.66
	Std	0.75	0.97	1.07

شکل (۷) شتاب‌های عمودی و زاویه‌ای بدنه قطار را در سرعت ۳۰۰ کیلومتر در ساعت، برای PSD A نشان می‌دهد.



شکل ۷. شتاب قطار - ۳۰۰ کیلومتر در ساعت (PSD A)

شرایط مرتبه دوم و بالاتر نادیده گرفته شده است. کل نیروی مغناطیسی برابر با (۱۳) است.

$$F_j \approx \frac{M_1}{2} N_c I_c - \frac{M_1}{h_0} N_c I_c (h - h_0) + M_1 N_t I_j \quad (13)$$

$$M_1 = \frac{\mu_0 a b n_m}{2 h_0^2} N_c I_c$$

معادله مربوط به نیروی مغناطیسی دینامیکی را می‌توان به صورت معادله (۱۴) نوشت.

$$f_j \approx -\frac{M_1}{h_0} N_c I_c (h - h_0) + M_1 N_t I_j \quad (14)$$

ولتاژ در شکاف هوای اسمی را می‌توان با استفاده از معادله (۱۵) خطی سازی کرد.

$$u = u(h_0, t_0, \dot{h}_0, \dot{t}_0) + \frac{\partial u}{\partial h} \Big|_{\substack{h=h_0 \\ t=t_0 \\ \dot{h}=\dot{h}_0 \\ \dot{t}=\dot{t}_0}} (h - h_0) + \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{\substack{h=h_0 \\ t=t_0 \\ \dot{h}=\dot{h}_0 \\ \dot{t}=\dot{t}_0}} (t - t_0) + \frac{\partial u}{\partial \dot{h}} \Big|_{\substack{h=h_0 \\ t=t_0 \\ \dot{h}=\dot{h}_0 \\ \dot{t}=\dot{t}_0}} (\dot{h} - \dot{h}_0) + \frac{\partial u}{\partial \dot{t}} \Big|_{\substack{h=h_0 \\ t=t_0 \\ \dot{h}=\dot{h}_0 \\ \dot{t}=\dot{t}_0}} (\dot{t} - \dot{t}_0) + O(h) \quad (15)$$

$$I_j \approx M_2 u_j - M_3 I_j + M_4 \dot{h}_j$$

$$M_2 = \frac{2 h_0}{\mu_0 a b N_c^2}, M_3 = \frac{2 R_c h_0}{\mu_0 a b N_c^2}, M_4 = \frac{N_c I_c}{h_0 N_c}$$

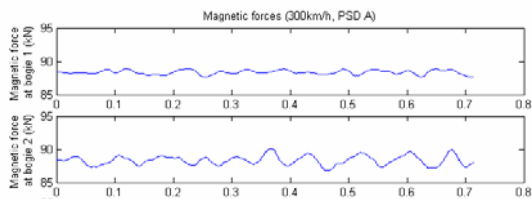
ارائه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله، مدل سیستم مغناطیسی که شامل مدل وسیله نقلیه قطار تک 9DOF، مدل شناور مغناطیسی، مدل زبری پرتو، مدل پرتو راهنمای انعطاف‌پذیر دو دهانه و مدل کنترل فعال است، بررسی می‌شود.

انحراف شکاف هوا برای جلوگیری از تماس وسیله نقلیه/راهنما کنترل می‌شود. راحتی قطارها با مقایسه شتاب بدنه با مشخصات ISO ارزیابی می‌شود. ولتاژ در محدوده ± 440 ولت تعیین شده است. اثرات سرعت و ناهمواری پرتو بر پاسخ دینامیکی بررسی می‌شود. انحراف تیر، لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در موقعیت‌های بحرانی محاسبه می‌شوند، که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۲) نشانگر PSD A و مدل زبری تیر راهنما است.

نیروهای مغناطیسی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نیروی اسمی مغناطیسی، معادل وزن وسیله نقلیه، و در هر بوژی، نیروی مغناطیسی اسمی معادل با $\frac{1}{4}$ وزن آن است.



شکل ۱۱. نیروی مغناطیسی - ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت (PSD A)

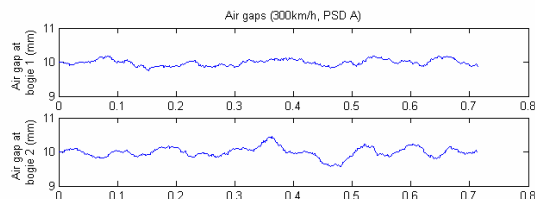
حداکثر مقدار ورودی ولتاژ سیستم کنترل در این شبیه سازی معادل با ۷,۵۲ ولت است. از آنجایی که انحرافات شکاف هوا با افزایش سرعت قطار مغناطیسی افزایش می‌یابد، در سرعت‌های بالاتر نسبت به سرعت پایین‌تر به قدرت بیشتری نیاز است تا مدل سیستم قطار مغناطیسی پایدار باقی بماند. جریان کنترل شده و نیروی تعلیق مغناطیسی همان تمایل ولتاژ را با تغییر سرعت قطار دارد، چرا که جریان نیروی مغناطیسی را کنترل می‌کند.

۵- نتیجه گیری

یک مدل سیستم مغناطیسی EMS جامع برای بررسی پویایی سیستم‌های قطار مغناطیسی ساخته شده است. یک مدل قطار مغناطیسی تک قطار سه بعدی 9DOF، شامل دو جابه‌جایی انتقالی (جهت حرکت و هدایت) و سه جابه‌جایی چرخشی (پیچ، انحراف و چرخش) است. مدل تعلیق مغناطیسی از پیکربندی فرضی الکترومغناطیسی و طراحی صفحه فرومغناطیسی در قطار مغناطیسی تشکیل شده است که معادلات آن با خطی‌سازی ساده می‌شود. این مدل تعلیق مغناطیسی نیروی برهم‌کنش بین بوژی و راهنما را می‌دهد.

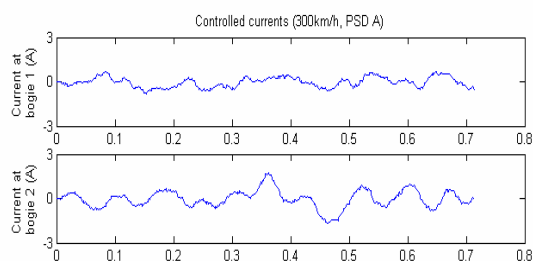
رابطه بین جریان ترمیم و ولتاژ کنترل‌شده، در حالت اسمی خطی شده و برهم‌کنش تعلیق مغناطیسی توزیع شده بین بوژی و پرتو به عنوان مجموعه‌ای از چهار نیروی متمرکز متحرک در هر قطار مغناطیسی ساده شده است. معادلات فضای حالت با تحریکات قطعی خارجی به یک مسئله کنترل استاندارد تبدیل می‌شوند. مطالعات شبیه‌سازی گسترده برای بررسی عملکرد سیستم‌های قطار مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عملکرد وسیله نقلیه مغناطیسی از نقطه نظر ایمنی و راحتی سواری، و همچنین پاسخ راهنما از دیدگاه طراحی سیستم قطارهای مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به

شتاب عمودی بدنه در محدوده $\pm 0,1$ متر بر مجذور ثانیه است. مطابق PSD A و با در نظر گرفتن سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، شتاب RMS، ۰,۳۱ متر بر مجذور ثانیه است.



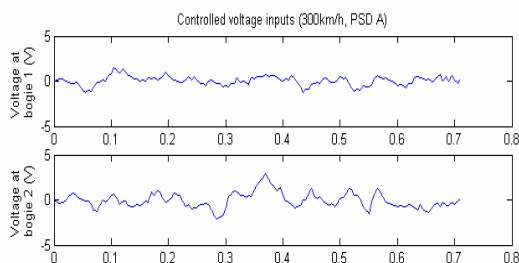
شکل ۸. شکاف هوایی - ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت (PSD A)

شکاف‌های هوا از طریق خروجی جابه‌جایی عمودی بین تیر و بوژی محاسبه می‌شود. شکاف اسمی هوا ۱۰ میلی‌متر، و انحرافات آن در سرعت ۳۰۰ است، که در شکل (۸) مشخص شده است. جریان کنترل بوژی‌ها در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت (PSD A) در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. جریان کنترل - ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت (PSD A)

ولتاژ کنترل بوژی‌ها در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت (PSD A) در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. ولتاژ کنترل - ۳۰۰ کیلومتر در ساعت (PSD A)

-Kusagawa, S., Baba, J., Shutoh, K., & Masada, E. (2004). Multipurpose design optimization of EMS-type magnetically levitated vehicle based on genetic algorithm. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(2), 1922-1925.

-Li, Y., Li, J., Song, X., Cui, L., Yu, H., & Ma, G., (2021). Research on Braking Characteristics of Rail Eddy Current Brake with AC Excitation. *In 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, 1-6.

-Lv, G., Zhang, Z., Liu, Y., & Zhou, T. (2021). Analysis of Forces in Linear Synchronous Motor with Propulsion, Levitation and Guidance for High-speed Maglev. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.

-Meisenholder, S.G., & Wang, T.C. (1972). Dynamic analysis of an electromagnetic suspension system for a suspended vehicle system. No. 06818-6052-RO-00 Final Rpt.

-Nagurka, M.L., & Wang, S.K. (1997). A superconducting maglev vehicle/guideway system with preview control, *Part I-Vehicle, guideway, and magnet modeling*.

-Ni, F., Mu, S., Kang, J., & Xu, J. (2021). Robust controller design for maglev suspension systems based on improved suspension force model. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(3), 1765-1779.

-Xiang, H., Tian, X., Li, Y., & Zeng, M. (2022). Dynamic Interaction Analysis of High-Speed Maglev Train and Guideway with a Control Loop Failure. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2241012.

-Yang, Q., Chi, Z., & Wang, L. (2022). Influence and Suppression Method of the Eddy Current Effect. *In the Suspension System of the EMS Maglev Train Machines*, 10(6), 476.

-Zhang, G., Fang, Y., Song, F., Zhu, G., & Wang, Z. (2004). Optimal design and FEM analysis of the superconducting magnets of EMS-MAGLEV models using Bi-2223 tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(2), 1850-1853.

-Zhao, C.F., Zhai, W.M., & Wang, Q.C. (2005). Simulation analysis of the dynamic response of low-speed maglev vehicle curve negotiation. *China Railway Science*, 26(3), 94-98.

توضیحات فوق، مراحل و نتایج کلیدی این مقاله، بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده در زمینه قطارهای مغناطیسی، شامل موارد زیر است.

-نوسانات شکاف هوا و شتاب قطارهای مغناطیسی برای سرعت‌های وسیله نقلیه از ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت تا ۵۰۰ کیلومتر در ساعت محاسبه شده است.

-سرعت قطارهای مغناطیسی تأثیر قابل توجهی بر انحراف فاصله هوا و شتاب قطار ندارد.

-نوسانات شکاف هوا و شتاب قطار نیز برای سه ناهمواری سطح پرتو محاسبه شده است که نشان می‌دهد با افزایش زبری پرتو افزایش می‌یابند.

-شتاب قطار همچنان برای زبری پرتو بالاتر قابل قبول است، اما برای سیستم کنترلی مورد استفاده، با افزایش زبری، انحراف شکاف هوا بسیار زیاد می‌شود.

۶- مراجع

-Bo, K., Xiong, Y., Yu, X., Wu, J., & Wang, Y. (2021). Study on transient electromagnetic characteristics based on typical soft magnetic material for EMS Maglev train. *In 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, IEEE, 1-4.

-Cai, Y., Chen, S.S., Rote, D.M., & Coffey, H.T. (1996). Vehicle/guideway dynamic interaction in maglev systems.

-Chen, S.S., Zhu, S., & Cai, Y. (1995). on unsteady-motion theory of magnetic forces for maglev systems. *Journal of sound and vibration*, 188(4), 529-543.

-Ding, S., Han, W., Sun, J., Jiang, F., Deng, G., & Shi, Y. (2021). Modeling and analysis of a linear generator for high-speed maglev train. *IEEE Access*, 9, 24637-24645.

-Hoburg, J.F. (2004). Modeling maglev passenger compartment static magnetic fields from linear Halbach permanent-magnet arrays. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(1), 59-64.

-Hogan, J., & Fink, H. (1975). Comparison and optimization of lift and drag forces on vehicles levitated by eddy current repulsion for various null and normal flux magnets with one or two tracks. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(2), 604-607.

Proposing and Analyzing an Air Gap Distance Control Method in the Maglev Trains Considering Motion Dynamic

Mohammad Ali Sandidzadeh, Associate Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Bahman Ghorbani Vaghei, Assistant Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Hamidreza Fallah Ramezani, M.Sc., Grad., School of Computer Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Farzaad Soleymani, Postdoctoral Researcher, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: sandidzadeh@iust.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Magnetic levitation (Maglev) is an innovative transportation technology. A high-speed maglev train uses non-contact magnetic levitation, guidance, and propulsion systems and has no wheels, axles, or transmission. Replacing mechanical parts with electronic parts overcomes the technical limitations of wheel-on-rail technology. A series of analytical models are defined, including a vehicle model, a magnetic suspension model, and an active control model to predict the effects of maglev vehicles on guide ways. The dynamics of a single-train vehicle model traversing on a flexible, rough beam are studied. Numerical simulations are carried out to study the dynamic behavior of the maglev vehicle and the guide beam. In this paper, the controller is designed for checking the output voltage of the sensor that is placed for detection of transverse and longitudinal deviation of air gap distance. In case of deviation, air gap distance again brings to the desired value with a change in the current through the coil. Finally, the German trans rapid maglev train with electromagnet suspension is analyzed with MATLAB software for properly designed controller performance.

Keywords: Maglev Train, Electromagnetic Suspension, Air Gap Distance, Dynamics of Motion