

مروری بر سیستم‌های معلق مغناطیسی با تاکید بر تعلیق الکترودینامیکی

عباس نجارخدابخش^(۱) - محمدرضا مرادیان^(۱) - بیژن معاونی^(۲)

(۱) دانشجوی دکترا - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۸

تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۸۹

خلاصه: امروزه استفاده از سیستم‌های ریلی معلق مغناطیسی در حوزه حمل و نقل بسیار مورد توجه قرار گرفته است. معلق بودن وسیله در سیستم‌های ریلی معلق مغناطیسی به خاطر ایجاد دو میدان مغناطیسی در فاصله نزدیک به هم و در نتیجه دافعه و یا جاذبه بین آنها می‌باشد. در ایران بررسی انواع سیستم‌های مغناطیسی موجود و کاربرد آنها بویژه در سیستم‌های حمل و نقل چندان مورد توجه قرار نگرفته و ویژگی‌ها و مشخصات هر یک از این سیستم‌ها با جزئیات بیشتر در جایی مطرح نشده است. این مقاله به مرور تحقیقات و مطالعات گذشته در خصوص کاربردها، مشخصات و ویژگی‌های این سیستم‌ها پرداخته و مقایسه‌ای بین آنها ارائه می‌نماید. همچنین تجهیزات و وسائلی که به عنوان تجهیزات آزمایشگاهی برای بررسی رفتار سیستم‌های تعلیق مغناطیسی با تاکید بر تعلیق الکترودینامیکی ساخته شده است را معرفی می‌نماید.

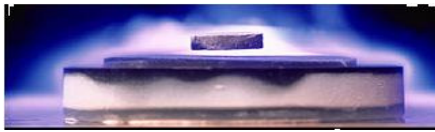
کلمات کلیدی: سیستم‌های ریلی معلق مغناطیسی، تعلیق الکترودینامیکی.

۱- مقدمه

در کشورمان از جمله وجود مسیرهای پر تردد مانند تهران- مشهد و موقعیت استراتژیک ایران در منطقه نیاز به استفاده از سیستم‌های ریلی معلق مغناطیسی بسیار ضروری و اقتصادی به نظر می‌رسد. آشنایی بیشتر با انواع این سیستم‌ها می‌تواند بستر تحقیقات تئوری و عملی از جمله ساخت نمونه‌های واقعی و آزمایشگاهی جهت بررسی سیستم‌های ریلی معلق مغناطیسی را برای محققان و علاقه‌مندان این حوزه از جمله مهندسین برق در تمام گرایشها فراهم آورد. این مقاله با مرور مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در این حوزه قصد دارد گام نخست را برای انجام تحقیقات بعدی برداشته و فراخوانی برای محققان و علاقه‌مندان به تحقیق در این حوزه باشد. بر اساس مرور کلیه مطالعات صورت گرفته در خصوص سیستم‌های معلق مغناطیسی می‌توان تحقیقات صورت گرفته در این خصوص را به صورت نمودار شکل (۲) دسته‌بندی نمود که ادامه مقاله به شرح موردی آن خواهد پرداخت.

سیستم حمل و نقل معلق مغناطیسی^۱ از میدان‌های مغناطیسی جهت تولید نیروهای بالابرنده، پیشران و راهنما استفاده می‌کند. در این تکنولوژی چون نیروها بدون تماس فیزیکی تولید می‌شوند، سرعت‌های تا ۵۰۰ کیلومتر بر ساعت نیز قابل دستیابی است. با توجه به توانایی این سیستم در سرعت‌های زیاد، شتاب زیاد و گذر از شیب‌های تند، قابلیت رقابت با سیستم حمل و نقل با مسیر کوتاه و حتی سیستم حمل و نقل هوایی را دارد. عدم وجود تماس در این سیستم هزینه نگهداری مسیر را به حداقل می‌رساند. مصرف انرژی وسایل معلق مغناطیسی نسبتاً کم بوده و آلودگی کمتری در مقایسه با دیگر وسائل حمل و نقل دارند. به هر حال علیرغم مزایای بالقوه مزبور و تمایل عمومی صنعت حمل و نقل معلق مغناطیسی کاربرد محدودی داشته که دلیل اصلی این امر بدون شک هزینه بسیار زیاد آن می‌باشد. تکنولوژی سیستم معلق مغناطیسی ویژگی‌های منحصر به فرد زیادی دارد. به عنوان نمونه شکل (۱) میزان خروج گاز دی اکسیدکربن از وسیله نقلیه معلق مغناطیسی تجاری در مقایسه با روش‌های معمول حمل و نقل را ارائه می‌دهد [۱]. نیاز به توسعه هرچه بیشتر سیستم‌های حمل و نقل به ویژه سیستم‌های حمل و نقل ریلی به دلیل مزایای منحصر به فرد آن

مآیسنر در شکل (۳) آورده شده است که در آن یک آهنربای کوچک در بالای یک ابررسانا با دمای زیاد معلق مانده است. تعلیق با اثر مآیسنر در یاتاقان های مغناطیسی، چرخ لنگر ذخیره کننده انرژی و سیستم حمل و نقل معلق مغناطیسی استفاده شده است [۳]. در سیستم های حمل و نقل معلق آهنرباهای NdFeB با پسماند زیاد در طول مسیر راهنما در نزدیکی هم و به طور متراکم قرار گرفته و ابررسانای دمای زیاد روی وسیله نقلیه قرار دارد. این روش از تعلیق مفید است چون تلفات تعلیق فقط به دلیل سرد کردن ابررسانا است اما قیمت تمام شده برای استفاده از آهنرباهای کمیاب در مسیر راهنما در کاربردهای حمل و نقل با مسافت طولانی، بسیار زیاد است.

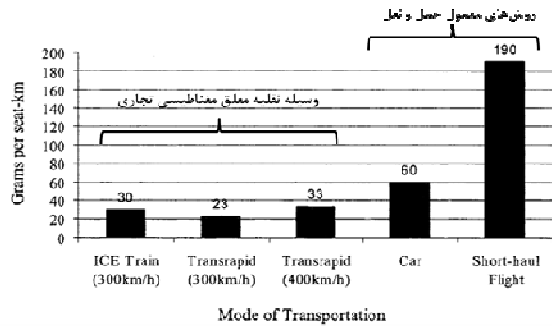


شکل (۳): تعلیق مغناطیسی ابررسانا با دمای بالا [۴]

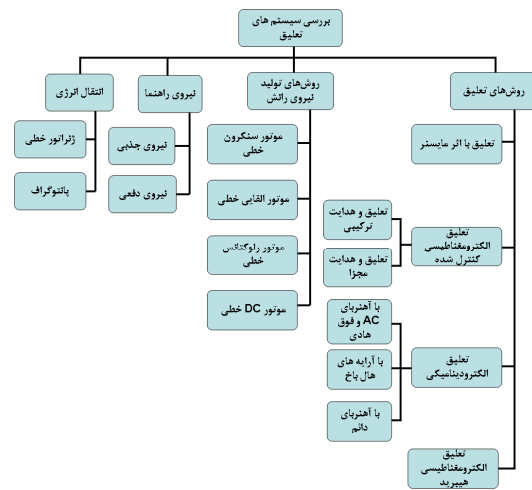
Fig. (3): The super conduction magnetic suspension systems at high temperature

ب- تعلیق الکترو دینامیکی

تعلیق الکترو دینامیکی^۲ موقعی ایجاد می شود که میدان مغناطیسی متغیر با زمان در یک ماده رسانا وجود داشته باشد. میدان مغناطیسی متغیر با زمان در هادی، جریان تولید می کند و در نتیجه یک میدان مخالف ایجاد کرده و باعث تولید نیروی دافعه بین منبع مغناطیسی و جسم هادی می شود. جریان القایی می تواند به وسیله یک میدان متغیر یا یک میدان با حرکت خطی یا ترکیب این دو ایجاد شود. تعلیق الکترو دینامیکی به طور مغناطیسی پایدار است به گونه ای که به کنترل فاصله هوایی نیاز ندارد. فاصله هوایی در این روش حدود 100 میلیمتر می باشد که برای بارهای متغیر بسیار قابل اعتماد می باشد. بنابراین تعلیق الکترو دینامیکی برای عملکرد در سرعت های زیاد بسیار مناسب است. به هر حال این سیستم برای تولید جریانهای القا شده کافی به سرعت مشخصی نیاز دارد و به همین دلیل در پایین تر از یک سرعت خاصی (حدود 100 کیلومتر بر ساعت) از یک چرخ شیشه تایلر لاستیکی استفاده می کند [۵]. اولین بار در ۱۹۱۲ سیستم تعلیق الکترو دینامیکی پیشنهادی از میدان متغیر ناشی از سولنوئیدی که بر مسیر راهنما واقع شده بود توسط باچلت ساخته شد [۶]. جریان متغیر سیم پیچ در وسیله نقلیه آلومینیومی جریان القا می کرد که باعث ایجاد نیروی تعلیق می شد. ایجاد تعلیق با استفاده از میدان متغیر توان کمتری را نسبت به تعلیق الکترومغناطیسی یا اثر مآیسنر مصرف می کند و تعلیق الکترو دینامیکی با حرکت خطی برای سیستم حمل و نقل مفیدتر می باشد. حرکت خطی سریع منبع میدان مغناطیسی از روی یک مسیر هادی غیر مغناطیس، در آن جریان القا می کند که یک تصویر مغناطیسی از آهنرباها می سازد و بنابراین نیروی تعلیق مخالف تولید می کند. برای درک بیشتر ویژگیهای نیروی تعلیق الکترو دینامیکی شکل (۴) را در نظر بگیرید.



شکل (۱): خروجی گاز دی اکسید کربن از سیستم های حمل و نقل مختلف [۱]
Fig. (1): The Carbon dioxide output from different travelling system



شکل (۲): دسته بندی سیستم های معلق مغناطیسی

Fig. (2): The classification of magnetic suspension systems

۲- روش های تعلیق

به طور کلی با چهار روش مشروح زیر سیستم های تعلیق پیاده سازی می شوند:

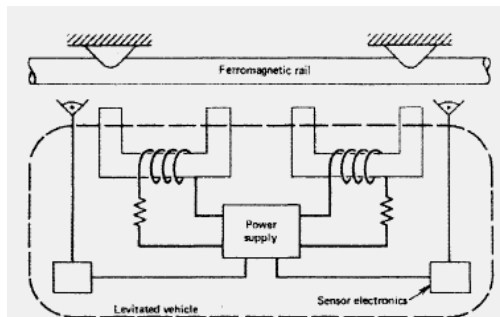
الف - تعلیق با اثر مآیسنر

ابررساناها تقریباً بدون مقاومت هستند و توانایی دارند که شار مغناطیسی را به داخل خود راه ندهند. پس زدن شار مغناطیسی در یک ابررسانا اثر مآیسنر نام دارد [۲]. ابررسانا با تشکیل جریان سطحی میدان مغناطیسی را به بیرون می راند. پس زدن کامل میدان مغناطیسی در یک ابررسانا به این معنی می باشد که همانند یک ماده دیامغناطیس کامل عمل می کند ($\mu_r = 0$). بنابراین هنگامیکه یک آهنربا به یک ابررسانا نزدیک می شود اثر مآیسنر باعث ایجاد نیروی دافعه بین آنها می شود. با کشف ابررسانا با دمای زیاد در سال ۱۹۸۶ میلادی، تعلیق پایدار بین یک آهنربا و یک ابررسانا با سطح تخت امکان پذیر شد. این پایداری به وسیله پدیده لوله شدن شار ایجاد می شود که یک پدیده منحصر به فرد می باشد [۳]. ابررسانا با دمای زیاد به کمک مایع نیتروژن خنک می شود که نسبت به مایع هلیوم ارزان تر بوده و دسترسی به آن آسان تر است. شکل نمایشی تعلیق با اثر

ساختار آهنربای ابرسانا پیچیده است. سرد و تبخیر کردن مایع هلیوم که ناشی از گرمای تولید شده از جریانهای القایی است ممکن است در حین عمل مشکلاتی را ایجاد کند. همچنین سرد کردن هلیوم برای داشتن عملکرد خوب در آهنربای ابرسانا ضروری است. این درحالیست که استفاده از آهنربای ابرسانا در سیستم حمل و نقل رکورد جهانی 581 کیلومتر بر ساعت را در سال ۲۰۰۳ در ژاپن ثبت کرده است [۵]. ساختارهای مختلفی برای مسیر راهنمای ورقه هادی پیشنهاد شد و وسیله‌های معلق مغناطیسی زیادی با ابعاد کامل و با استفاده از ساختار مسیر راهنمای ورقه هادی ساخته شد. مسیر راهنمای تعلیق الکترودینامیکی معمولاً با تمرکز بر روی کم کردن نیروی مقاوم رانش و ارتباط آن با نیروی تعلیق طراحی می‌شود. نسبت نیروی تعلیق به نیروی مقاوم رانش به عنوان مشخص کننده کارایی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور مطالعات زیادی بر روی ساختار شکلی مسیر راهنما برای بهتر کردن بازده تعلیق و توانایی هدایت انجام شده است [۶].

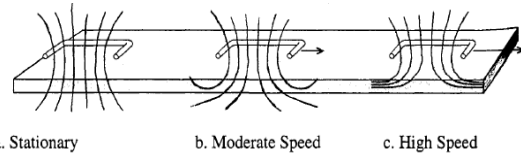
ج- تعلیق الکترودینامیکی کنترل شده

تعلیق الکترودینامیکی بر اساس نیروی جاذبه بین یک ریل فرومغناطیس ثابت و یک آهنربای الکتریکی ایجاد می‌شود. اساس این نوع تعلیق در شکل (۷) نشان داده شده است. یک ریل فلزی در یک مسیر راهنما قرار داده شده و آهنرباهای الکتریکی بر روی وسیله نقلیه سوار است. این سیستم ذاتاً ناپایدار می‌باشد، اما با کنترل دینامیکی جریان و در نتیجه شار، وسیله به طور پایدار می‌تواند معلق شود. بنابراین برای ایجاد فاصله هوایی بکنواخت لازم است فاصله هوایی کنترل شود. چون تعلیق الکترودینامیکی معمولاً در فاصله هوایی کوچک (10 میلیمتر) استفاده می‌شود، هنگامیکه سرعت افزایش می‌یابد کنترل مشکل تر می‌شود. به هر حال تعلیق الکترودینامیکی به طور تکنیکی ساده تر از تعلیق الکترودینامیکی می‌باشد و قادر است که در سرعت‌های کم یا صفر تعلیق ایجاد کند که در نوع تعلیق الکترودینامیکی غیر ممکن می‌باشد.



شکل (۷): تعلیق الکترودینامیکی کنترل شده با فیدبک [۸]

Fig. (7): Electro magnetic suspension system controlled by feedback [8]

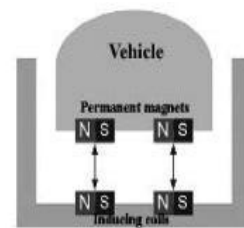


شکل (۴): تاثیر سرعت بر میدان مغناطیسی سیستم تعلیق الکترودینامیکی [۷]

Fig. (4): The effect of speed on magnetic field of electrodynamic magnetic suspension systems [7]

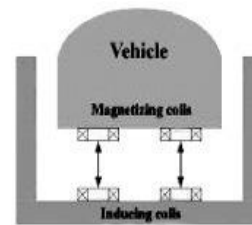
شکل تقریبی میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیم پیچ برای سه سرعت مختلف نشان داده شده است. در سرعت های کم، جریان القاء شده در مسیر، نیروی تعلیق و مقاوم کوچکی تولید می‌کند که ناشی از مولفه های عمودی و افقی میدان می‌باشد. اما در سرعت های زیادتر جریان القایی یک تصویر میدان مغناطیسی مخالف بزرگ می‌سازد و این باعث کاهش نیروی مقاوم حرکت با افزایش سرعت می‌شود. بنابراین می‌توان با استفاده از مسیر راهنمای ساخته شده از مواد رسانای خوب مثل آلومینیوم و مس رفتار تعلیقی مشابه اثر مایسنر به دست آورد. تعلیق الکترودینامیکی اولین پیشنهاد پاول و داننی^۳ در سال ۱۹۶۶ به عنوان یک روش برای تعلیق وسیله نقلیه بود [۵]. تحقیقات تسوری و عملی قابل توجهی در اوایل ۱۹۷۰ بر روی روش‌هایی برای محاسبه نیروی تعلیق و مقاوم حرکت ارائه شد. با توجه به آهنرباهای مورد استفاده، تعلیق الکترودینامیکی به دو نوع تقسیم می‌شود:

- ۱- نوع آهنربای دائم^۴ شکل (۵).
 - ۲- نوع آهنربای ابرسانا^۵ شکل (۶).
- نوع آهنربای دائم برای سیستم‌های کوچک استفاده می‌شود چون آهنربای دائم با قدرت مغناطیسی بسیار زیاد وجود ندارد.



شکل (۵): نوع آهنربای دائم [۵]

Fig. (5): Permanent magnet type [5]



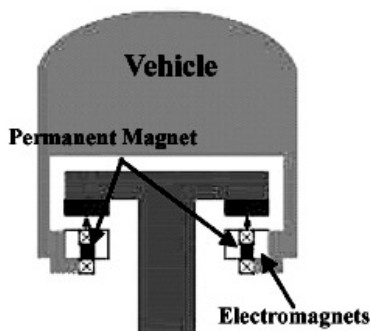
شکل (۶): نوع آهنربای ابرسانا [۵]

Fig. (6): super conductor type [5]

معمولی به وجود آمده است که در سرعت‌های کم تعلیق الکترومغناطیسی انرژی کمی نیاز دارد. در سرعت‌های زیاد جریان چرخشی بسیار بزرگی در خط مسیر راهنما ایجاد می‌شود. این جریان چرخشی مشابه روشی که در تعلیق الکترومغناطیسی بود یک نیروی مقاوم رانش مماسی مخالف ایجاد می‌نماید [۱۱]. افزایش نیروی مخالف، افزایش جریان آهنربای الکتریکی را برای مقابله با کاهش نیروی جذبی لازم می‌دارد. در حالیکه نیروی مقاوم رانش نیاز انرژی سیستم رانش را افزایش می‌دهد هنگامی که سرعت خطی به حدود 200 کیلومتر بر ساعت برسد این کاهش نیرو تاثیر مهمی بر عملکرد موتور می‌گذارد [۱۲]. نیروی مقاوم رانش با استفاده از آهنرباهای هال باخ کاهش می‌یابد [۱۱]. به هر حال برای کار در سرعت زیاد بایستی از آهن ورقه شده استفاده شود که این کار هزینه تمام شده مسیر راهنما را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد.

د- تعلیق الکترومغناطیسی مرکب

در تعلیق الکترومغناطیسی مرکب^۸ برای کاهش مصرف توان الکتریکی، آهنرباهای دائم همراه با آهنرباهای الکتریکی استفاده شده‌اند که در شکل (۱۰) نشان داده شده است [۱۳] - [۱۵].



شکل (۱۰): تعلیق الکترومغناطیسی هیبرید [۵]
Fig. (10): The hybrid electromagnetic suspension [5]

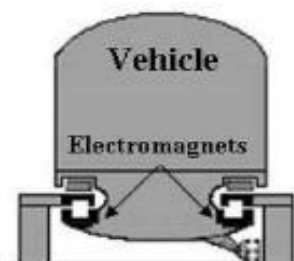
در این روش در حالت دائمی و فاصله هوایی مشخص، میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباهای دائم توانایی لازم برای نگهداری وسیله را دارا است و قدرت الکتریکی آهنربای الکتریکی که فاصله هوایی را کنترل می‌کند می‌تواند همواره صفر باشد. تعلیق الکترومغناطیسی هیبرید به تغییرات بزرگتری در اندازه جریان در مقایسه با تعلیق الکترومغناطیسی برای ایجاد آهنربای الکتریکی نیاز دارند چون آهنرباهای دائم نفوذپذیری (قابلیت هدایت مغناطیسی) یکسانی با هوا دارند.

۳- روش‌های تولید نیروی پیش ران

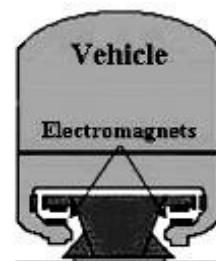
در حالیکه قطارهای معمولی از موتورهای دوار برای رانش استفاده می‌کنند و به ریل برای هدایت و نگهداری نیاز دارند، قطارهای معلق مغناطیسی نیروی رانش را از یک موتور خطی می‌گیرند و از ویژگی‌های آهنربای الکتریکی برای هدایت و نگهداری استفاده می‌کنند که متفاوت

ایده استفاده از تعلیق الکترومغناطیسی برای حمل و نقل به قبل از سال ۱۹۱۱ برمی‌گردد، هنگامیکه گامینگر^۷ معلق کردن یک وسیله نقلیه در زیر یک ریل آهنی به وسیله آهنربای الکتریکی را پیشنهاد داد. وی فاصله هوایی را به وسیله یک سنسور فشاری مایع یا مکانیکی برقراری ساخت [۹]. در تعلیق الکترومغناطیسی دو نوع تکنولوژی تعلیق وجود دارد [۵]:

(۱) نوعی که تعلیق و هدایت با هم ترکیب شده‌اند مثل UTM کره و HSST ژاپن که ساختار آن در شکل (۸) نشان داده شده است.
(۲) نوعی که تعلیق و هدایت از هم جدا هستند مثل Transrapid ژاپن که برای عملکرد در سرعت‌های زیاد مطلوب‌تر است چون تعلیق و هدایت با همدیگر تداخل ندارند. اما تعداد کنترل کننده‌ها در این حالت افزایش می‌یابد. ساختار آن در شکل (۹) نشان داده شده است.



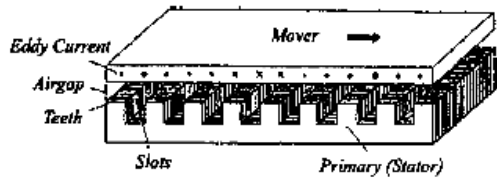
شکل (۸): تعلیق و هدایت با هم ترکیب شده‌اند [۵].
Fig. (8): Suspension and guidance are combined [5]



شکل (۹): تعلیق و هدایت مجزا شده‌اند [۵].
Fig. (9): Suspension and guidance are separated [5]

نوع اول برای سرعت کم و هزینه کمتر مطلوب‌تر است چون تعداد آهنربای الکتریکی و کنترل کننده‌ها کاهش می‌یابد و نیروی راهنما به وسیله اختلاف رلوکتانس به طور اتوماتیک تولید می‌شود. دامنه ولتاژ منبع تغذیه الکتریکی در نوع ترکیبی کمتر از نوع مجزا می‌باشد. اما هنگامیکه سرعت افزایش می‌یابد تداخل بین نیروی تعلیق و هدایت افزایش می‌یابد و کنترل نیروی تعلیق و راهنما به طور همزمان در نوع ترکیبی مشکل است.

به طور کلی فناوری تعلیق الکترومغناطیسی از آهنرباهای الکتریکی استفاده می‌کند اما امروزه فناوری تعلیق الکترومغناطیسی با استفاده از ابررسانا که معمولاً در فناوری تعلیق الکترومغناطیسی استفاده می‌شود مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. با پیشرفت ابررسانا با دمای زیاد امکان ایجاد یک میدان مغناطیسی قوی و اقتصادی در مقایسه با آهنربای



شکل (۱۴): موتور القایی خطی (نوع اولیه بلند) [۵]

Fig. (14): The linear induction motor (the long proto type) [5]

۴- موتورهای سنکرون خطی

در موتورهای سنکرون خطی، حرکت مکانیکی هماهنگ با میدان مغناطیسی است. میدان مغناطیسی متحرک آن توسط سیم پیچی توزیع شده سینوسی چند فاز، یا سیم پیچی های با برق DC سوئیچ شونده به طور الکتریکی تولید می شود. برای تعلیق مغناطیسی یک سیم پیچ توزیع شده سینوسی سه فاز که بر روی مسیر راهنما ثابت شده استفاده می شود و روی وسیله نقلیه نیز میدان مغناطیسی برای تولید تحریک DC استفاده شده اند. برای اطمینان از اینکه وسیله با امواج مغناطیسی متحرک ایجاد شده به وسیله سیم پیچ های استاتور مسیر راهنما سنکرون باشد، یک سنسور سرعت و موقعیت بسیار دقیق و مطمئن لازم است [۱۸]. اطلاعات مربوط به سرعت و موقعیت وسیله به طور دائم به ایستگاه مبدل اطراف مسیر فرستاده می شود تا آنها فرکانس و اندازه میدان مورد نیاز مسیر راهنما را تولید کنند. اگرچه لغزش موتور سنکرون صفر است، یک اختلاف زاویه ای بین موقعیت آهنرباهای وسیله نقلیه و امواج الکترومغناطیس متحرک وجود دارد. هنگامیکه این زاویه ۹۰ درجه است نیروی پیشران در بیشترین مقدار خود قرار دارد و در این نقطه نیروی بالابرنده صفر است [۱۹]. با کنترل زاویه لغزش، فرکانس و جریان، سرعت مطلوب و شتاب مورد نظر به دست خواهد آمد. شار مغناطیسی فاصله هوایی یک موتور سنکرون خطی با آهنرباهای الکتریکی یا مغناطیسی روی وسیله ایجاد می شود، بنابراین ضریب قدرت با افزایش فاصله هوایی کاهش نمی یابد. اگر آهنرباهای ابررسانا در روی وسایط نقلیه استفاده شوند، مسیر راهنما با استفاده از سیم پیچ ها با هسته هوایی ساخته می شود [۲۰].

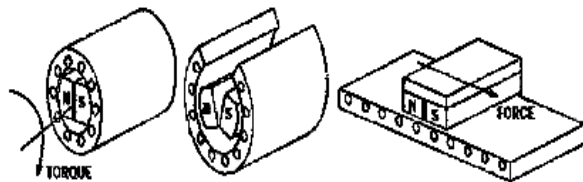
بازده موتور سنکرون خطی به شدت به نسبت طول وسیله متحرک به طول مسیر راهنمایی که برق دار می شود وابسته است. به طور معمول ۱ تا ۲ کیلومتر از مسیر در یک لحظه برق دار می شود و در نتیجه برای داشتن بازده زیاد در موتور سنکرون خطی، سرعت خطی زیادی لازم است. در شکل (۱۵) تغییرات بازده را در سرعت های متفاوت برای چند سیستم مختلف مشاهده می کنید. در سیستم فوستر-میلر فقط قسمت های زیر وسیله نقلیه در طول مسیر برق دار می شود که این کار بسیار هزینه بر خواهد بود. خلاصه ای از طرح های گذشته و حال موتور سنکرون خطی برای حمل و نقل در جدول (۱) نشان داده شده است:



شکل (۱۱): نمایش تفاوت: (a) قطار معمولی با (b) قطار معلق مغناطیسی [۵]

Fig. (11): Illustration of the difference between: (a) Ordinary train, (b) magnetically suspended train [5]

بنابراین، این ساختار در مقایسه با موتور چرخشی بسیار ساده و قوی است. شکل (۱۲) چگونگی پیاده سازی موتورهای خطی را از روی موتور چرخشی نشان می دهد.



شکل (۱۲): مفهوم موتور خطی [۵]

Fig. (12): The concept of a linear motor [5]

موتورهای خطی طول اولیه و ثانویه محدود دارند و این امر باعث ایجاد اثر انتهایی می شود و به خاطر فاصله هوایی زیاد بازده کمتری دارند.

موتورهای خطی چهار نوع اصلی دارند:

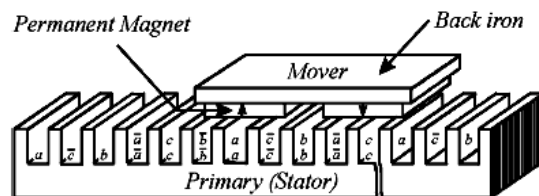
۱- موتور سنکرون خطی (شکل (۱۳))

۲- موتور القایی خطی (شکل (۱۴))

۳- موتور رلوکتانس خطی

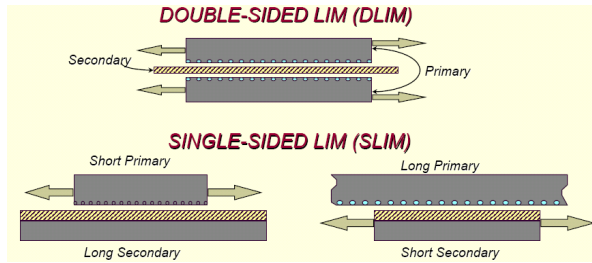
۴- موتور DC خطی

در ادامه به اختصار در مورد هر کدام از این موتورها توضیحاتی ارائه خواهد شد.



شکل (۱۳): موتور سنکرون خطی (نوع اولیه بلند) [۵]

Fig. (13): The linear synchronous motor (the long proto type) [5]

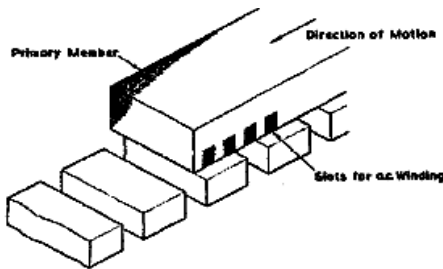


شکل (۱۶): موتور القایی خطی یکبر و دوبر

Fig. (16): The single side and double side linear induction motor

۶- موتور رلوکتانس خطی

موتور رلوکتانس خطی^{۱۲} دارای استاتور یا اولیه با سیم‌پیچی توزیع شده سینوسی سه فاز همانند موتور القایی خطی می‌باشد در حالی که ثانویه آن از قطب‌های برجسته تشکیل شده است [شکل (۱۷)]. حرکت میدان مغناطیسی استاتور که به وسیله سیم‌پیچ سه فاز ایجاد می‌شود بایستی به کمک اینورتر با بسامد قطب مسیر راهنما سنکرون شده باشد. موتور رلوکتانس خطی خود راه‌انداز نمی‌باشد اگرچه از جریان القا شده در ثانویه برای ایجاد نیروی راه‌انداز استفاده می‌کند [۲۴]. بازده موتور رلوکتانس خطی در مقایسه با موتور القایی خطی در سرعت‌های کم به دلیل مقدار تلفات کم در ثانویه می‌تواند بیشتر باشد. اما در سرعت‌های خطی بیشتر تلفات جریان چرخشی به دلیل تغییرات سریع میدان در مسیر راهنما بیشتر شده و به همین دلیل برای کم کردن این تلفات بایستی ثانویه آن ورقه‌ای باشد. نیروی رلوکتانس مغناطیسی زیادی بین اولیه و ثانویه موتور رلوکتانس خطی وجود دارد و یک نیروی مقاوم رانش تولید می‌کند.

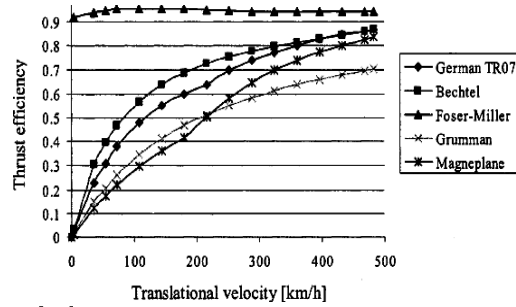


شکل (۱۷): ساختمان موتور رلوکتانس خطی [۲۳]

Fig. (17): The structure of a linear reluctance motor [23]

۷- موتور DC خطی

در تعلیق مغناطیسی موتور DC خطی را می‌توان به عنوان مولد نیروی رانش طراحی کرد. برای تغذیه این موتور جریان AC سه فاز به کمک تریستور به DC تبدیل می‌شود. یک موتور DC خطی که توسط موریس^{۱۴} و داوی^{۱۵} ارائه شده در شکل (۱۸) نشان داده شده است [۲۵]. این نوع موتور بسیار گران قیمت خواهد بود.



شکل (۱۵): بازده نیروی رانش در سرعت‌های مختلف [۲۱]

Fig. (15): The propellant efficiency force at different speed [21]

Table (1): The characteristics of a linear synchronous motor in different traveling systems [22]

جدول (۱): مشخصات موتورهای سنکرون خطی در چند سیستم

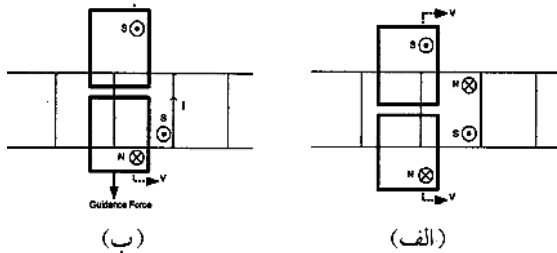
حمل و نقل [۲۲]

LSM Design	Efficiency	Power Factor, pf	Efficiency *pf	Active Guideway Length [m]	Train Length [m]	Design Speed [Km/h]
Present Operational Designs						
Japanese Rail Maglev MLX01 2004	0.91	0.91	0.82	1000	400	500
Transrapid 2002	0.87	0.73	0.63	300	45	480
Past Proposed Designs						
Canadian Electrodynamic Maglev LSM 1984	0.75	0.90	0.675	5000	56	450
Grumman LSM 1998	0.78	0.98	0.76	500	18	480
Magneplane LSM 1998	0.84	0.26, 0.97	0.22, 0.82	2000	18	480
Bechtel LSM 1998	0.85	0.98	0.83	2000		480
Foster-Miller Locally Commuted LSM 1998	0.91	0.97	0.88	-	-	480

۵- موتور القایی خطی

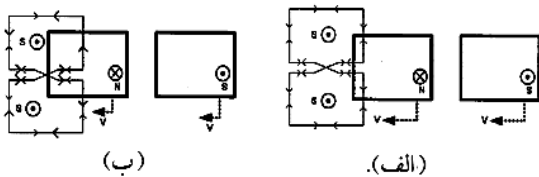
موتور القایی خطی^{۱۰} از بسیاری جهات مشابه نوع دوار است. موتور القایی خطی به صورت یک موتور القایی دوار فرض می‌شود که رتور و استاتور آن از یال آن بریده شده و به صورت تخت درآید. استاتور و رتور موتور دوار به ترتیب به عنوان اولیه و ثانویه موتور خطی در نظر گرفته می‌شوند. اولیه اصولاً به مسیر راهنما ثابت شده و ثانویه متحرک روی وسیله قرار می‌گیرد. بنابراین ثانویه موتور القایی خطی بسیار کوتاه‌تر از اولیه آن می‌باشد و تاثیر الکترومغناطیسی جدیدی را به وجود می‌آورد. دو نوع اصلی موتور القایی خطی یک بر^{۱۱} و دو بر^{۱۲} وجود دارد [۱۵]. این دو نوع در شکل (۱۶) نشان داده شده است:

اگرچه موتور القایی خطی یک بر ویژگی‌های الکتریکی بهتری دارد، طراحی مسیر راهنما با استفاده از موتور القایی خطی دو بر با ثانویه افقی بسیار ساده‌تر بوده و مسیر راهنما را ساده‌تر می‌کند. جذابیت موتور القایی خطی در مقابل موتور سنکرون خطی این است که مسیر راهنما کاملاً بدون برق بوده و بنابراین ساختمان مسیر راهنما و هزینه تعمیرات و نگهداری آن بسیار کمتر می‌باشد. اگرچه موتور القایی خطی مزایای زیادی به دلیل استفاده در مسیر راهنمای بدون برق دارد، اما دارای وزن بسیار زیادی بوده، و ذاتاً ضریب قدرت کمی دارد که به دلیل فاصله هوایی زیاد آن می‌باشد و برای اینکه اثر انتهای را در سرعت‌های زیاد بی‌اثر کند باید طول اولیه آن بسیار طویل باشد.



شکل (۱۹): مسیر نردبانی حذف کننده شار: (الف) آهنرباهای وسیله در موقعیت شار خنثی بدون جریان القایی، (ب) آهنرباهای وسیله در بیرون موقعیت شار خنثی که جریان القایی داریم و نیروی بازگرداننده تولید می شود.

Fig. (19): The ladder trajectory to eliminate flux: (a) The magnet in the position of neutralized flux without induction current, (b) The magnet in the outside position of neutralized flux with induction current



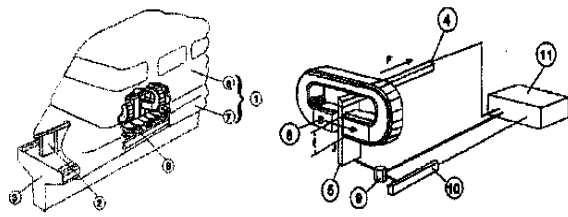
شکل (۲۰): مسیر با سیم پیچ شار خنثی: (الف) آهنرباهای وسیله در موقعیت شار خنثی بدون جریان القایی، (ب) آهنرباهای وسیله در بیرون موقعیت شار خنثی که جریان القایی داریم و نیروی بازگرداننده تولید می شود.

Fig. (20): The trajectory with neutralized flux coil: (a) The magnet in the position of neutred flux with induction current, (b) The magnet in the outside of neutral charge and induction current

اشکال دو مسیر راهنمای ارائه شده در قبل این است که به خاطر استفاده از آنها برای تولید نیروی راهنما و تعلیق، ساختار مسیر راهنما بایستی به صورت عمودی در کناره ها چیده شود. قطار معلق مغناطیسی ژاپنی ها (MLX01) برای تولید همزمان نیروی تعلیق و راهنما از سیم پیچ شار خنثی با ساختار عمودی استفاده می کند [۳۱]. استفاده از چنین چینشی در سیم پیچ مسیر راهنما، نسبت نیروی تعلیق به مقاوم رانش نزدیک به 60/1 در مقایسه با ماکزیمم نسبت 20/1 استفاده شده در مسیر راهنما با ساختار ورقه هادی ایجاد می کند [۲۷]. نیروی راهنمای تولید شده به وسیله چینش سیم پیچ ها در شکل (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده می تواند بسیار بزرگ باشد. بنابراین روش کنترل اکتیو که در آن روش های الکتریکی یا مکانیکی برای امنیت در سطوح بالا و راحتی مسافر لازم است استفاده می شود.

استفاده از نیروی جاذبه مغناطیسی برای کاهش رلوکتانس و افزایش اندوکتانس است که به هنگام وجود جابجایی جانبی تولید می شود این سیستم در شکل (۲۱) نشان داده شده است [۵].

نیروی راهنمای جذبی برای عملکرد در سرعت های کم و متوسط مناسب است. چون در این سیستم با افزایش سرعت بین نیروهای راهنما و تعلیق کننده تداخل به وجود می آید و کنترل سیستم بسیار مشکل می شود.



شکل (۱۸): موتور DC خطی [۲۵]
Fig. (18): The linear DC motor [25]

۸- نیروی راهنما

سیستم های تعلیق برای جلوگیری از جابجایی جانبی به نیروی راهنما نیاز دارند که به وسیله نیروی دافعه یا جاذبه ایجاد می شود. مثال هایی از ساختمان مسیر راهنمای پیشنهادی شامل سیم پیچ های منحصر به فرد (مسیر بسته) [۲۶]، سیم پیچ مسیر راهنمای شار خنثی به شکل عدد ۸ [۲۷]، سیم پیچی مسیر راهنمای نردبانی [۲۸]، سیم پیچ های حلقه ای دو ردیفه [۲۹] و مسیر راهنما با ورقه های هادی تکه تکه [۳۰] ارائه شده است. مسیر راهنمای نردبانی و مسیر راهنما با سیم پیچ شار خنثی به شکل عدد ۸ در شکل های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. هر دوی این ترکیبات با اساس تئوری یکسان کار می کنند. ساختار مسیر راهنمای نردبانی شکل (۱۹) را در نظر بگیرید. هنگامیکه آهنرباهای وسیله، که به صورت خطی حرکت می کنند، در مرکز مسیر راهنمای نردبانی قرار دارند (شکل (۱۹) الف) شار شبکه در داخل حلقه مسیر راهنما صفر خواهد بود و بنابراین جریان در شبکه وجود ندارد و نیرویی تولید نمی شود. اما وقتی که آهنرباها از مرکز به کناره ها منحرف می شود (شکل (۱۹) ب) شار شبکه در داخل حلقه مسیر راهنما غیر صفر است و بنابراین جریان مولد نیروی راهنما تولید می کند.

در ساختار شار خنثی که به طور ضربدری متصل شده است و در شکل (۲۰) نشان داده شده است جریان در سیم پیچ بالایی موافق عقربه های ساعت و در سیم پیچ پایینی مخالف عقربه های ساعت جاری می شود. بنابراین هنگامیکه آهنرباهای وسیله نقلیه در وسط سیم پیچ های متصل شده به صورت ضربدری قرار دارد، جریان حذف می شود و نیروی خالصی تولید نمی شود (شکل (۲۰) الف). در حالیکه وقتی از مرکز خارج می شوند (شکل (۲۰) ب) نیروی راهنمای باز گرداننده، مقاوم رانش و تعلیق تولید می شود. اما هنگامیکه جریان در جهت مخالف در هر حلقه انتشار یابد نیروی مقاوم رانش حذف می شود.



شکل (۲۳): پانتوگراف [۳۳]
Fig. (23): The pantograph [33]

۱۰- مزایای قطارهای معلق مغناطیسی

برخی از مزایای قطارهای معلق مغناطیسی در برابر قطارهای معمولی عبارتند از:

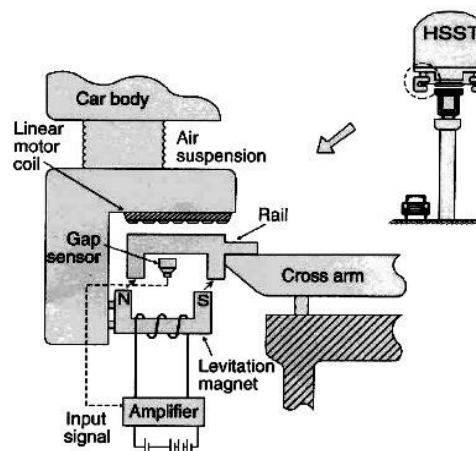
- حذف چرخ و ساییدگی مسیر، هزینه نگهداری را کاهش می‌دهد.
- وزن-بار توزیع شده، هزینه مسیر ریل را کاهش می‌دهد.
- با توجه به مسیر راهنما، هیچگاه از ریل خارج نمی‌شود.
- نبود چرخ، لرزش و نویز بیشتر را حذف می‌کند.
- سیستم غیر تماسی از لغزش و سر خوردن حین کار جلوگیری می‌کند.
- امکان انحنای زاویه بیشتری در شعاع کوچک را دارد.
- در این سیستم امکان شتاب و ترمز سریع وجود دارد.
- حذف جعبه دنده و کوپل شدن محورها و بلبرینگ‌ها و غیره را ممکن می‌سازد.

وابستگی کمتری به شرایط آب و هوایی دارد.
مزایای سیستم تعلیق برای استفاده در یاتاقان‌های مغناطیسی
عدم وجود تماس مکانیکی.

- عدم نیاز به روغنکاری.
- عدم نیاز به نگهداری و تعمیرات زیاد.
- مقاوم در برابر گرما، سرما، خلاء.
- تلفات کم.

اما در قطارهای معلق مغناطیسی به خاطر عدم تماس بین ریل‌ها و چرخ‌ها، موتور کشنده علاوه بر تولید نیروی رانش بایستی به وسیله تقابل الکترومغناطیسی با ریل نیروی ترمزی بیشتری تولید کند. به علاوه افزایش وزن، قدرت الکتریکی بیشتری برای ایجاد نیروی تعلیق نیاز دارد و این برای تعلیق کننده مناسب نیست. همچنین با توجه به ساختار مسیر، سوئیچینگ یا قطع دائم انشعاب‌ها مشکل است و توجه به این نکته نیز ضروری می‌باشد که میدان مغناطیسی تولید شده توسط آهنرباهای قوی برای ایجاد تعلیق و رانش، بر روی قسمت مسافری تأثیر می‌گذارد.

بدون شیلد مخصوص مغناطیسی، میدان مغناطیسی در قسمت مسافری به 0/90 تسلا در کف و 0/04 تسلا در قسمتی که مسافری نشسته‌اند می‌رسد. چنین میدان‌هایی شاید برای بشر مضر نباشد اما ممکن است تا حدی ناراحتی ایجاد کند. شیلد حفاظتی سرنشینان

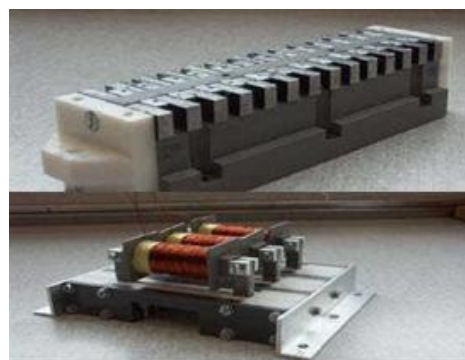


شکل (۲۱): ساختار سیستم (HSST) جهت تولید نیروی راهنمای جذبی [۵]

Fig. (21): The structure of (HSST) system to generate the attractive guidance force

۹- انتقال انرژی

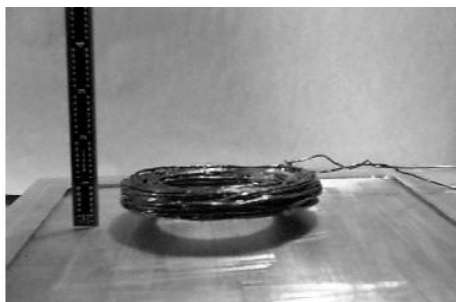
در همه قطارهای معلق مغناطیسی باتری وجود دارد. در این سیستم منبع تغذیه الکتریکی برای ایجاد نیروی تعلیق و رانش لازم است. انتقال انرژی در طول مسیر نیازمند استفاده از ژنراتورهای خطی و یا یک تماس مکانیکی است که براساس سرعت عملکردشان مشخص می‌شوند. در سرعت‌های کم تا 100 کیلومتر بر ساعت از تماس مکانیکی مانند پانتوگراف 16 و در سرعت‌های زیاد از ژنراتور خطی استفاده می‌شود.
[شکل‌های (۲۲) و (۲۳)].



شکل (۲۲): ژنراتور خطی [۳۲]
Fig. (22): The linear generator [32]

الکترو دینامیکی شار خنثی دیگر نیازی به سیستم کنترلی مجزا نخواهد داشت. همچنین در این سیستم با استفاده از جریان متناوب با فرکانس های مختلف امکان تعلیق در سرعت صفر وجود دارد [۳۵] و [۳۶].

شکل (۲۴) تعلیق یک سیم پیچ حلقوی در بالای یک صفحه آلومینیومی را نشان داده شده است. در این سیستم هنگام تغذیه سیم پیچ با برق متناوب جریان القایی در صفحه آلومینیومی ایجاد می شود. معلق سازی سیم پیچ به جریان و فرکانس خاصی نیاز دارد که مقدار آن با استفاده از مدار معادل الکتریکی محاسبه شده است [۳۷]. برای حذف چرخ در سیستم تعلیق الکترو دینامیکی می توان از آهنربای AC با میدان متغیر استفاده کرد [۳۸]. جریان چرخشی ایجاد شده در سطح هادی با حرکت سریع میدان آهنربای دائم، سیستم تعلیق القایی را تشکیل می دهد (شکل (۲۵)).



شکل (۲۴): سیم پیچ معلق شده در فاصله ۱۰ میلیمتری از صفحه آلومینیومی [۳۷]

Fig. (24): The suspended coil in 10 mm from an aluminium plate [37]

به عبارت دیگر، عامل تولید نیروی تعلیق در این سیستم تغییرات شار پیوندی در سطح هادی می باشد. مطالعات اولیه روی آهنرباهای ابررسانا با دمای زیاد^{۱۷} برای توسعه سیستم تعلیق مغناطیسی با سرعت زیاد در کشور کره در حال انجام می باشد که در آن از جریان AC برای ثابت کردن آهنربای ابررسانا استفاده شده است.

سیستم آزمایشگاهی تعلیق HTSC شامل آهنربای ابررسانا با دمای زیاد، صفحه عکس العمل و اجزای اندازه گیری نیروها می باشد. آهنربای مذکور از سیم پیچ کیکی شکلی تشکیل شده که توسط سیم B-2223 پیچیده شده است. جریان AC با فرکانس های مختلف در این آهنربا استفاده شده و نیروی تعلیق محاسبه و اندازه گیری شده که نتایج مربوطه در [۳۹] نشان داده شده است.

جریان های القایی و نیروهای تولیدی برای سیستم تعلیق الکترو دینامیکی با ریل شکاف دار که در شکل (۲۶) نشان داده شده، در [۴۰] مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر برخی پارامترها مثل فاصله هوایی، سرعت و جابجایی جانبی بر روی سیستم ارائه شده است.

می تواند به چند روش انجام شود. مثل قرار دادن فلز بین محل مسافری و آهنرباها و یا استفاده از آرایه های هال باخ که خصوصیت خود شیلدکنندگی دارند [۳۴].

امروزه با پیشرفت مواد ابررسانا و آهنربای دائم و کاهش قیمت آن ها استفاده از سیستم تعلیق الکترو دینامیکی رو به گسترش است. ویژگی های این سیستم عبارتند از ساختار بسیار ساده و عدم نیاز به منبع تغذیه الکتریکی و سیستم خنک کننده که در تعلیق الکترو دینامیکی با ابررسانا لازم است. در این سیستم میدان های مغناطیسی متغیر برای ایجاد جریان در سیم پیچ ها یا صفحه هادی لازم است و محرک اصلی آهنربای دائم است از این رو بایستی در سیستم حرکت وجود داشته باشد. مهمترین وسیله حمل و نقل به روش تعلیق الکترو دینامیکی با آهنربای دائم، INDUCTRACK است که در آمریکا ساخته شده است. در جدول (۲) مشخصات کامل سیستم های قطار مغناطیسی که هم اکنون در حال بهره برداری می باشند آورده شده است. از بین سیستم های ارائه شده در این جدول HSST و Transrapid تجاری شده است.

Table (2): The complete specifications of the magnetic trains [5]
جدول (۲): مشخصات کامل قطارهای مغناطیسی [۵]

SYSTEM	LEVITATION	PROPULSION	AIRGAP	MAXIMUM SPEED	SERVICE	CHARACTERISTIC
HSST (Japan)	EMS	SP-LIM	8-12[mm]	100[Km/h]	Low-Med Speed Short distance Nagoya, Japan	Levitation And guide integrated
Transrapid (Germany)	EMS	LP-LSM	8-12[mm]	500[Km/h]	High Speed Long distance Shanghai, china	Levitation and guide integrated
MLU, MLX (Japan)	EDS	LP-LSM	80-150[mm]	581[Km/h]	High Speed Long distance	Cooling for SCM
UTM (Korea)	EMS	SP-LIM	8-12[mm]	110[Km/h]	Low-Med Speed Short distance	Levitation and guide integrated
Swissmetro (Swiss)	EMS	LP or SP-LSM	8-12[mm]	500[Km/h]	High Speed Long distance	Partial vacuum in tunnel
Inductrack (USA)	PM EDS	LP-LSM	80-150[mm]	500[Km/h]	High Speed Long distance	Halbach Magnet Array

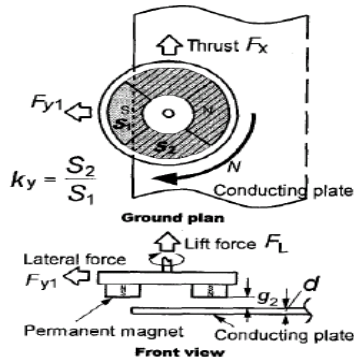
در ادامه انواع سیستم های تعلیق الکترو دینامیکی که در مقالات مختلف آمده مورد بررسی قرار می گیرد.

۱۱- سیستم های آزمایشگاهی برای بررسی تعلیق الکترو دینامیکی

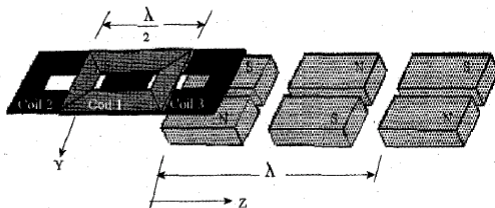
انواع سیستم های آزمایشگاهی که به بررسی تعلیق و رسیدن به رفتار بهتر در آن منجر می شود با توجه به نحوه ایجاد و نوع میدان مغناطیسی اصلی آن و محاسبه نیروها دسته بندی شده به شرح زیر می باشد:

الف- تعلیق الکترو دینامیکی با آهنربای AC و ابررسانا

سیستم تعلیق الکترو دینامیکی میرایی اندکی دارد و به سیستم کنترلی دیگری برای حذف نوسانات احتیاج دارد که به کمک تعلیق



شکل (۲۸): چرخ مغناطیسی با نمایش ضریب همپوشانی [۴۲]
 Fig. (28): The magnetic wheel demonstrating the overlapping coefficient [42]

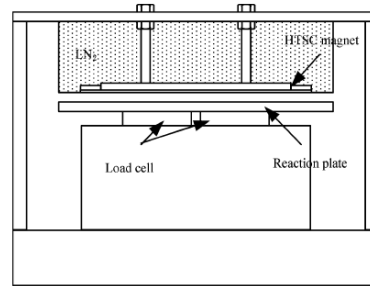


شکل (۲۹): سیم‌پیچ‌های در حال عبور بر فراز آهنرباهای دائم [۴۳]
 Fig. (29): Discovering coils passes over the permanent magnets

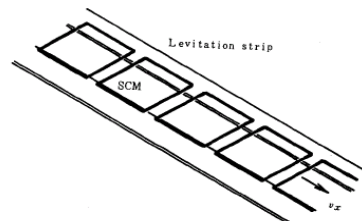
مدل مدار معادل الکتریکی با محاسبه اندوکتانس های خودی و متقابل و با استفاده از تبدیل لاپلاس برای محاسبه نیروهای وارد بر آهنربای دائم در حال حرکت بر فراز سیم پیچ های اتصال کوتاه در شکل (۲۹)، در [۴۳] ارائه شده است.

برای طراحی بهینه مسیر راهنما، ابعاد سیم پیچی برای مسیر با حلقه های هم پوشانی شده، مسیر نردبانی و مسیر با حلقه های مجزای نشان داده شده در شکل (۳۰) مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۴].

بعد از بررسی چندین مورد از هر کدام از مسیرهای نشان داده شده در شکل (۳۰) مشخص می شود که مسیر نردبانی می تواند انتخاب خوبی باشد [۴۴]. در بررسی حالات فوق از عاملی به نام ضریب شایستگی^{۱۸} استفاده شده است که این ضریب تاثیر حجم ماده استفاده شده در مسیر راهنما را مورد بررسی قرار می دهد. در این رابطه تاثیر نیروی تعلیق، نسبت نیروها، هزینه انرژی با توجه به اتلاف ناشی از نیروی مقاوم رانش، حجم مورد نیاز مواد و فاصله موثر بین آهنرباهای وسیله و مسیر راهنما لحاظ شده است. برای اولین بار با استفاده از روش اجزای محدود دوبعدی حالت گذرای گام زمانی، رفتار سیستم تعلیق الکترونیکی با مسیر پیوسته و غیر پیوسته توسط نویسندگان همین مقاله بررسی شده است. مسیر راهنما در حالت اول به صورت یک ورقه آلومینیومی پیوسته و در حالت دوم از تکه های آلومینیومی که طول هر یک با پهنای آهنربای دائم مورد استفاده برابر می باشد تشکیل شده است. تاثیر تغییر فاصله بین تکه های مسیر بر روی نیروی تعلیق و نیروی مقاوم رانش تولیدی با استفاده از ضریب شایستگی بررسی شده و برتری سیستم با مسیر پیوسته نشان داده شده است [۴۵].



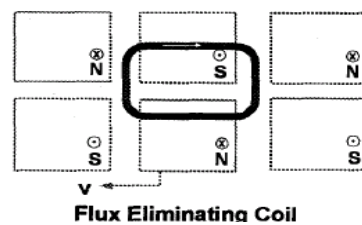
شکل (۲۵): سیستم آزمایشگاهی تعلیق با استفاده از ابررسانا با دمای بالا [۳۹]
 Fig. (25): The laboratory suspension system using hot superconductor [39]



شکل (۲۶): ساختمان تعلیق الکترونیکی با ریل شکاف دار [۴۰]
 Fig. (26): The structure of an electrodynamic suspension system with slotted rail [40]

ب- تعلیق الکترونیکی با آهنربای دائم

در تعلیق الکترونیکی برای طراحی و تحلیل سیم پیچ های حذف کننده شار از روش مدار معادل الکتریکی استفاده شده است که ساختار آن در شکل (۲۷) آمده است. به خاطر وجود حرکت در سیستم اندوکتانس متقابل به صورت متغیر و وابسته به مکان محاسبه شده و به کمک روابط مداری موجود، جریان های القایی در سیم پیچ ها به دست آمده و در نتیجه نیروهای تولیدی محاسبه شده اند [۴۱].



شکل (۲۷): ساختمان تعلیق الکترونیکی با سیم پیچ حذف کننده شار [۴۱]

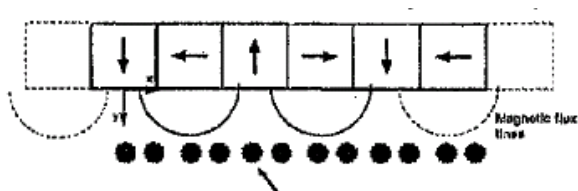
Fig. (27): The structure of an electrodynamic suspension system using the flux eliminating coil [41]

ساختمان چرخ مغناطیسی در شکل (۲۸) شامل آهنربای دائم با چرخش دورانی در بالای یک صفحه هادی می باشد. تاثیر همپوشانی به دلیل فاصله بین هادی و چرخ آهنربای دائم با یک ضریب لحاظ شده و تاثیر تغییر برخی از پارامترها بر نیروهای تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است [۴۲].

در این سیستم برای نمایش نیروهای تعلیق، مقاوم رانش و شعاعی حاصل از آهنربای دائم واقع شده در بالای یک دیسک در حال چرخش از رابطه ریاضی ساده شده‌ای استفاده کرده است. همچنین مقادیر آزمایشگاهی بر حسب فرکانس چرخش دیسک ارائه شده است. این سیستم یک مدل بسیار ساده برای درک تعلیق الکترو دینامیکی است که آخرین تحقیقات ارائه شده در سال ۲۰۰۸ میلادی می‌باشد.

ج- تعلیق الکترو دینامیکی با آرایه‌های هال باخ

نوع جدیدی از سیستم تعلیق که در شکل (۳۲) نمایش داده شده به کمک آرایه‌های آهنربای دائم هال باخ^{۱۹} به نام سیستم Inductrack در [۴۹] ارائه شده و تحلیل آن به کمک مدل مداری انجام شده است. در این مدل با کنار هم قرار دادن آهنرباهای دائمی که جهت میدان آنها به طور منظمی چرخیده، آهنربای هال باخ تشکیل شده است. امکان تعلیق در سرعت‌های کم به خاطر وجود آرایه‌های هال باخ از ویژگی‌های این سیستم می‌باشد.



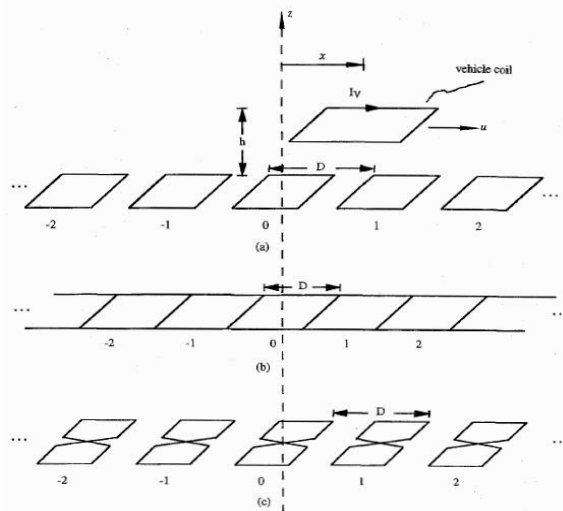
سیم پیچ‌های مسیر راهنما که با مقاومت و اندوکتانس مدل شده است.



شکل (۳۲): نمایی از سیستم Inductrack و مدل مداری آن [۴۹]
Fig. (32): A schematic of Inductrack system and its circuit model [49]

در این سیستم برای ایجاد تعلیق در سرعت‌های کم از آرایه‌های هال باخ و از آهنرباهای دائم نوع NdFeBe استفاده شده است. آرایه‌های هال باخ به وسیله کلاس هال باخ^{۲۰} در سال ۱۹۸۰ برای استفاده در شتاب دهنده ذرات اختراع شده که یک روش بسیار موثر برای منظم کردن مواد مغناطیسی پر یودیک قوی به حساب می‌آید. تاثیر میله‌های آهنربایی که در آرایه به طور عرضی مغناطیس شده‌اند باعث افزایش میدان مغناطیسی پر یودیک شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در یک آرایه بزرگ، تغییرات فضایی مولفه‌های افقی و عمودی با صرف نظر از هارمونیک‌های فضایی بزرگ تقریباً سینوسی خالص هستند.

اگر آرایه‌های هال باخ از مواد مغناطیسی با میدان قوی مثل NdFeB ساخته شوند، حد بالای میدان‌های پیشرو روی آنها ممکن است تا حد یک تسلا هم برسد. استفاده از آرایه‌های هال باخ در سیستم‌های Inductrack در سرعت‌های کم (یک دهم سرعت قطارهای پر سرعت مغناطیسی) عملکرد مطلوبی را نسبت به سیستم‌های قدیمی نشان می‌دهد ولی مشکلی که در این حالت وجود دارد این است که با کاهش

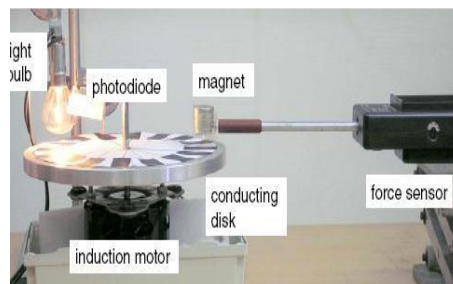


شکل (۳۰): مدل وسیله مغناطیسی با ساختار مختلف مسیر راهنما: (a) حلقه‌های منفصل، (b) نردبانی و (c) شار خنثی [۴۴]

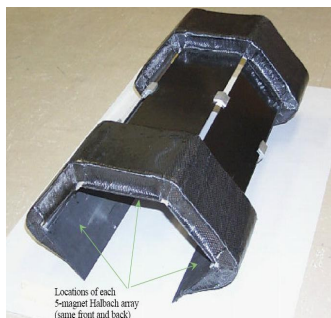
Fig. (30): The magnetic device model with different guidance trajectories: (a) non-connected coils, (b) ladder, (c) neutral flux [44]

در [۴۶] مدلی برای توصیف یک سیستم معلق مغناطیسی الکترو دینامیکی پسیو با پنج درجه آزادی دینامیکی ارائه شده است. این مدل بر اساس تقابل نیرو-جریان-شار و ارتباط هندسی بین سیم پیچ معلق و آهنربای دائم روی تسمه بوده و در یک فرمول بندی فضای حالت پارامتری ارائه شده است که برای استخراج پارامترهای مربوطه از اندازه‌گیری‌های ورودی-خروجی در مینیمم میانگین مربع خطا استفاده شده است. ساختار پیشنهادی برای تخمین پارامتر و کنترل فیدبک قوی دینامیک تسمه مناسب است. این مدل نسبت به مدل‌های موجود مانند تحلیل FEM و تئوری مدار دینامیکی از نظر محاسباتی بسیار کارآمد بوده و برای استفاده در کنترل زمان واقعی دینامیک وسیله معلق مغناطیسی با چند درجه آزادی به اندازه کافی سریع می‌باشد. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته انطباق خوبی را نشان می‌دهد [۴۶] و [۴۷].

در [۴۸] یک سیستم تعلیق الکترو دینامیکی آزمایشگاهی ساده ارائه شده است (شکل (۳۱)).

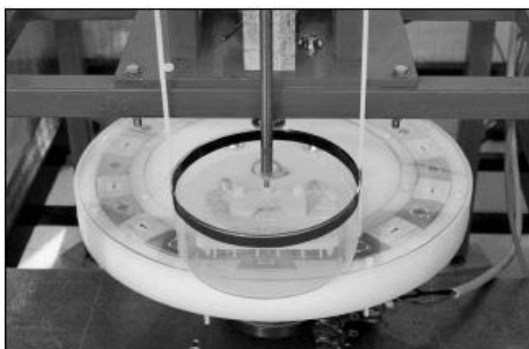


شکل (۳۱): سیستم آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری نیروی شعاعی [۴۸]
Fig. (31): The laboratory system for measuring the radial force [48]



شکل (۳۴): مدل آزمایشگاهی پرتاب کننده موشک و ماهواره به فضا ساخته شده توسط ناسا [۵۳].

Fig. (34): A laboratory model for projecting rocket and satellite made by NASA [53]



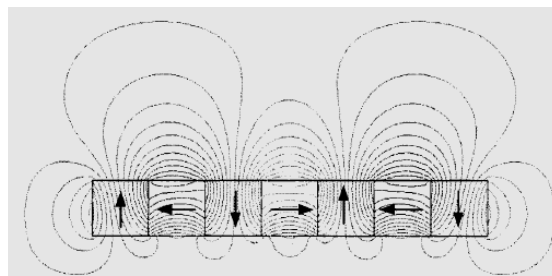
شکل (۳۵): چرخ مغناطیسی با آهنرباهای هال باخ [۵۴].

Fig. (35): The magnetic wheel with Hall-Buch magnets [54]

تاثیر میدان مغناطیسی حاصل از این آرایه‌ها و مقدار آن در قسمت‌های مختلف سیستم معلق ویژه حمل مسافر و سیستم آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده و مورد بررسی واقع شده است [۵۵] و [۵۶]. مدل حالت دائم چرخ الکترودینامیکی از نوع آهنربای دائم هال باخ که در بالای یک صفحه هادی غیرمغناطیسی در حال دوران بوده و به صورت انتقالی نیز حرکت می‌کند جهت بررسی سیستم تعلیق الکترودینامیکی ارائه شده است (شکل ۳۶). این سیستم می‌تواند به‌طور همزمان نیروی تعلیق و رانش تولید کند. دقت مدل حالت دائم با مقایسه با شبیه‌سازی‌های اجزای محدود گذرا و نتایج آزمایشگاهی تایید شده است. اگرچه طراحی و کنترل چرخ‌های الکترودینامیکی برای سیستم حمل و نقل معلق مغناطیسی مشکل است، اما هزینه‌های مسیر معلق مغناطیسی را بسیار کاهش می‌دهد [۵۷]. پارامترهایی که عملکرد این چرخ الکترودینامیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند را می‌توان به کمک روش اجزای محدود حالت دائم دوبعدی مورد بررسی قرار داد. تقابل بین نیروی رانش و نیروی تعلیق و روش‌هایی برای بهتر کردن بازده نیروی رانش نیز ارائه شده است [۵۸]. استفاده از روش حالت گذرا برای بررسی رفتار این سیستم مشکل و بسیار زمان‌بر است. اما استفاده از روش حالت دائم خصوصاً هنگامیکه تاثیر تغییر پارامترهای مختلف ارزیابی می‌شود بسیار مفید است [۵۹].

سرعت، نیروی مقاوم رانش افزایش و با افزایش سرعت نیروی مقاوم رانش کاهش می‌یابد [۵۰] و [۵۱].

با آرایه‌های آهنربایی هال باخ، بردار مغناطیس‌کنندگی به عنوان تابعی از فاصله در طول آرایه می‌چرخد و میدان را در یک طرف آرایه به مقدار ماکزیمم خود می‌رساند. در ساده‌ترین ساختار بردار مغناطیس‌کنندگی 90 درجه می‌چرخد. یک نمایش از چینش هال باخ در شکل (۳۳) نشان داده شده است.



شکل (۳۳): آرایه‌های هال باخ خطی [۵۲]

Fig. (33): The linear Hall-Bach array [52]

میدان اصلی آرایه‌های هال باخ $\sqrt{2}$ برابر بزرگتر از آرایه‌های معمولی است و آرایه‌ها به آهن زیرین نیاز ندارند. به علاوه میدان مغناطیسی سینوسی خالص‌تری نسبت به آرایه‌های آهنربای معمولی دارد و میدان در طرف دیگر بسیار ضعیف‌تر است [۵۲].

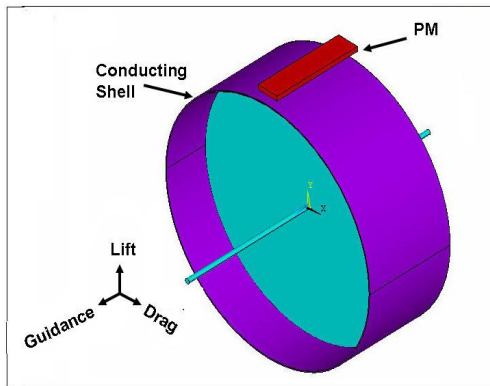
هم‌اکنون مدل آزمایشگاهی این سیستم (شکل ۳۴) برای استفاده در سکوهای پرتاب موشک توسط ناسا^{۲۱} ساخته شده است. در این صورت وزن وسیله هنگام پرتاب 20 درصد کمتر از راکت معمولی خواهد شد که در این حالت می‌توان موشک را با شتاب اولیه بسیار زیاد و با هزینه کمتری پرتاب کرد. این سیستم امکان شتاب و سرعت اولیه زیادی را به وسیله می‌دهد که تا سرعت 965 کیلومتر بر ساعت هم می‌رسد بدون اینکه برای ایجاد این سرعت نیاز به استفاده از سوخت در خود وسیله باشد. هنگامیکه فضاپیما^{۲۲} به انتهای مسیر می‌رسد می‌تواند برای ادامه حرکت موتور راکت خود را روشن کند و برای پرتاب با استفاده از مسیر معلق مغناطیسی فقط 75 دلار هزینه بابت برق مصرف کند [۵۳].

تقابل الکترودینامیکی بین یک مسیر دوار از نوع آهنربای دائم هال باخ و ابررسانا به کمک شبیه‌سازی سه‌بعدی بررسی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که ساختمان این سیستم در شکل (۳۵) نشان داده شده است [۵۴].

ساختمان آهنرباهای هال باخ به گونه‌ای است که باعث تقویت میدان مغناطیسی در یک طرف آرایه‌ها و تضعیف آن در طرف دیگر می‌شود.

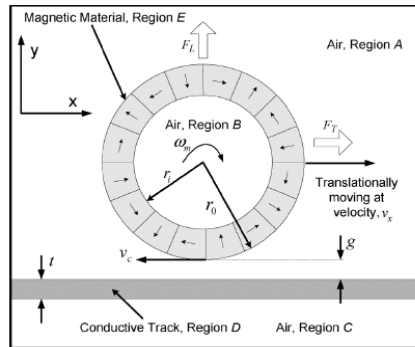
نتایج بیان شده در این مقاله در طراحی بهینه یک چنین سیستم تعلیقی قابل استفاده می‌باشد [۶۰].

سیستم ارائه شده در قسمت قبل به صورت آزمایشگاهی مطابق با شکل‌های (۳۸) و (۳۹) پیاده سازی شده است و نتایج حاصل از آن در [۶۱] ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی، نتایج حاصل از شبیه سازیها را تایید می‌کند.



شکل (۳۷): سیستم تعلیق الکترواینامیکی پسیو شامل یک بلوک آهنربای دائم معلق شده در بالای یک پوسته هادی [۶۰]

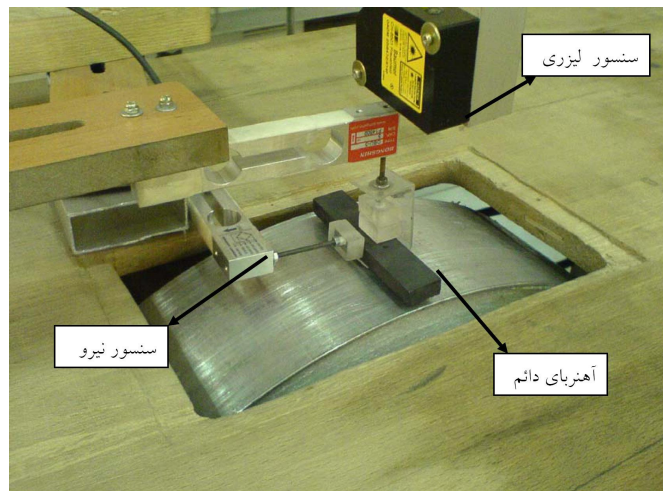
Fig. (37): The passive electrodynamic suspension system with a block of permanent magnets above a conductive sheet [60]



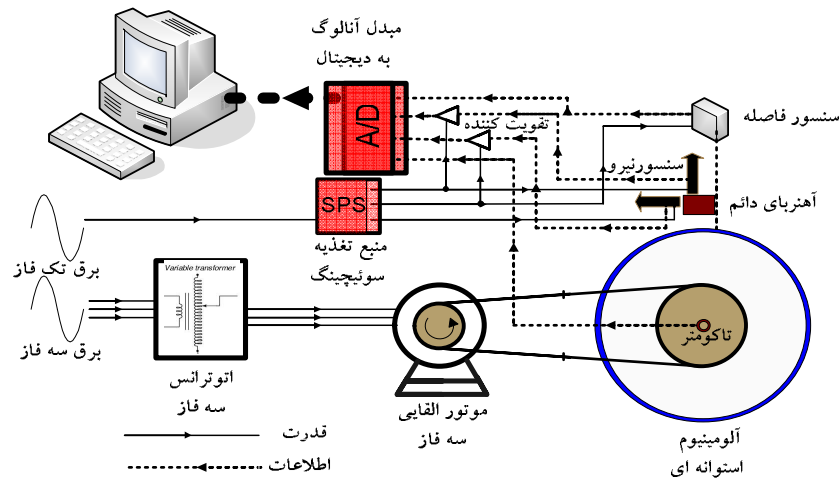
شکل (۳۶): چرخ الکترواینامیکی دوار با حرکت انتقالی در بالای یک مسیر هادی غیر مغناطیس [۵۷].

Fig. (36): The rotating electrodynamic wheel with transitional movement above a non-magnetic conductive trajectory [57]

نیروهای تعلیق و مقاوم رانش سیستم تعلیق الکترواینامیکی پسیو شامل یک بلوک آهنربای دائم معلق شده در بالای یک پوسته هادی در حال حرکت شکل (۳۷)، به طور کامل و بدون در نظر گرفتن ساختار تقریبی مورد بررسی قرار گرفته است. اجرای شبیه‌سازیها با در نظر گرفتن تاثیر شرایط و ویژگیهای مختلف سیستم بر روی رفتار آن انجام گرفته و تاثیر سرعت، ضخامت پوسته و مقاومت رسانایی آن، ابعاد آهنربا و طول فاصله هوایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل (۳۸): نحوه قرار گیری سنسورهای نیرو و فاصله هوایی [۶۰]
Fig. (38): The positions of force sensors and spacing [60]



شکل (۳۹): شماتیک کلی سیستم تعلیق الکترودینامیکی با آهنربای دائم [۵۶].

Fig. (39): A general schematic of an electrodynamic suspension system with permanent magnet [56]

مختصر بررسی شود ولی نکته قابل توجه این است که هر یک از موارد ارائه شده در این مقاله خود دنیایی از اطلاعات می باشد.

پی نوشت:

- 1- MAGLEV
- 2- Electrodynamic Suspension (EDS)
- 3- Powell and Danby
- 4- Permanent Magnet (PM)
- 5- Superconductivity Magnet (SCM)
- 6- Electromagnetic Suspension (EMS)
- 7- Gaeminger
- 8- Hybrid Electromagnetic Suspension (HEMS)
- 9- Linear Synchronous Motor (LSM)
- 10- Linear Induction Motor (LIM)
- 11- Single Sided Linear Induction Motor (SLIM)
- 12- Double Sided Linear Induction Motor (DSLIM)
- 13- Linear Reluctance Motor
- 14- Morris
- 15- Davey
- 16- Pantograph
- 17- HTSC
- 18- Figure of Merit
- 19- Halbach Array
- 20- Klaus Halbach
- 21- NASA
- 22- Space Craft

بررسی اجمالی تعلیق الکترودینامیکی

اغلب برای بررسی رفتار سیستم تعلیق الکترودینامیکی از مدل مداری استفاده شده است [۴۰، ۳۶، ۴۱، ۴۲ و ۴۸]. در این بررسی ها مسیر راهنما توسط سلف و مقاومت مدل می شود و تاثیر حرکت نیز با لحاظ کردن اندوکتانس متقابل بین منبع میدان مغناطیسی و مسیر راهنما مدل می شود. سپس به کمک تبدیل لاپلاس یا روش های معمول، معادلات مداری حل شده و نتایج مورد نیاز از آنها استخراج می گردد. برای بررسی رفتار سیستم در اثر تغییر پارامترها، مقادیر المان های مدل مداری تغییر می کنند.

در مواردی که از آرایه های هال باخ استفاده می شود میدان های مغناطیسی را با توابع سینوسی تخمین می زنند و در این صورت محاسبه نیروها در این موارد آسان تر می شود [۴۲، ۵۶ و ۵۷]. با استفاده از روش اجزای محدود نیز امکان بررسی رفتار سیستم وجود دارد [۴۹، ۵۶، ۵۷ و ۶۰].

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت و ارزشی که سیستم های معلق مغناطیسی در جهان امروز پیدا کرده فقدان یک مرجع جامع فارسی در این زمینه باعث عدم انجام تحقیقات مناسب در کشورمان گردیده است. در این مقاله بر آن بودیم تا بررسی جامعی در مورد انواع سیستم های تعلیق مغناطیسی ارائه کنیم. لذا سعی شد تا حد امکان انواع آنها به طور

مراجع

- [1] High-Tech for flying on the ground Transrapid International, Technical Brochure, 2003.
- [2] J.R. Rits, F.J. Milford, R.W. Christy, "Foundation of electromagnetic theory", 4th edition, Addison-Wesley, 1993.
- [3] F.C. Moon, "Superconducting levitation", New York: Jhon Wiley and Sons, 1994.
- [4] Online available: www.systech-gmbh.ch/hauptStirling.html
- [5] H.W. Lee, K. Kim, J. Lee, "Review of Maglev train technologies", IEEE Trans. Magn., Vol.42, No.7, pp.1917-1925, July 2006.

- [6] S. Ramtin, "The analysis and optimization of floating dynamic system behaviour using permanent magnet", Msc. Thesis, Faculty of Elec. Engi., Tehran University, 2005.
- [7] H.H. Kolm, R.D. Thronton, "Electromagnetic flight", Scientific American, Vol.229, No.4, pp.17-25, Oct. 1973.
- [8] F.C. Moon, "Magneto-solid mechanics", New York: Jhon Wiley and Sons, 1984.
- [9] B.V. Jayawant, "Electromagnetic suspension and levitation", IEE Proc. Part A, Vol.129. No.8, pp.549-581, 1992.
- [10] W. Jiasu, W. Suyu, R. Zhongyou, D. Xiaogang, L. Guobin, L. Jisan, Z. Cuifang, H. Haiyu, D. Changyan, Z. Dequi, "A scheme of Maglev vehicle using high Tc bulk superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.9, No.2, pp.904-907, Jun. 1999.
- [11] G.H. Bohn, "The influence of eddy current on an electromagnetic levitation system", In Conf. on Adva. in Magn. Mater. and their Appli., IEE Conf. Publ. No.142, pp 104-107, 1976.
- [12] H. Ohsaki, J. Du, "Influence of eddy current induced in steel rail on electromagnetic force characteristics of EMS maglev system", In The 18th Inter. Conf. on Magn. Levi. Sys. and Line. Driv., pp.960-965, Oct. 2004.
- [13] T.C. Wang, Y.K. Tzeng, "A new electromagnetic levitation system for rapid transit and high speed transportation", IEEE Trans. Magn., Vol.30, No.6, pp.4734-4736, Nov. 1994.
- [14] A. Senba, et al, "Characteristics of an electromagnetic levitation system using a bulk superconductor", IEEE Trans. Magn., Vol.32, No.5, pp.5049-5051, Sept. 1996.
- [15] T. Onuki, Y. Toda, "Optimal design of hybrid magnet in maglev system with both permanent and electromagnets", IEEE Trans. Magn., Vol.29, No.2, pp.1783-1786, Mar. 1993.
- [16] P.K. Sinha, "Electromagnetic suspension dynamics and control", Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1987.
- [17] F.T. Barwell, "Advanced in transport without wheels", In transport without wheels, E.R.Lathwaite, Editor, Elek books Ltd: London, 1977.
- [18] R.J. Kaye, E. Masada, "Comparison of linear synchronous and induction motors", Urban Maglev Tech. Devel. Prog., Colorado Maglev project, Rep. FTA-DC-26-7002, 2004.
- [19] T. Saijo, "Thrust and levitation force characteristics of linear synchronous motor", Inter. Conf. on Maglev and Line. Dri., Vancouver, Canada, pp.157-164, May 1986.
- [20] A. Hasanpour Esfahani, "The modeling, design and optimization of LPM sycron motor", Msc Thesis, Tehran University, Faculty of Elec. Engi., 2005.
- [21] H.J. Lever, "Technical assessment of Maglev system concept", Final Rep. By the Gover. Maglev Sys. Asses. team, CRREL-SR-98-12, 1998.
- [22] J. Bird, "An investigation into the use of electrodynamic wheels for high-speed ground transportation", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madi-son, 2007.
- [23] J.F. Eastham, M.J. Balchin, D. Roger, "A comparison of some propulsion method for magnetically-levitated vehicles", Inter. Conf. on Maglev Trans.: Now and for the Future, Solihull England, 1984.
- [24] I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear motion electrical machine", New York, Wiley, 1976.
- [25] T.J. Morris, K.R. Davey, "Propulsion system for a magnetically movable vehicle", Amer. Maglev Tech. of Florida, Inc: USA, 1997.
- [26] T. Iwahana, "Study of superconducting magnetic suspension and guidance characteristics on loop tracks", IEEE Trans. Magn., Vol.11, No.6, pp.1704-1711, Nov. 1975.
- [27] K.R. Davey, "Designing with null flux coils", IEEE Trans. Magn., Vol.33, No.5, pp.4327-4334, Sep. 1997.
- [28] P.E. Burke, T. Akinbiyi, "The design of flat lader and coil guideway systems for high speed train", IEEE Trans. Magn., Vol.12, No.6, pp.882-884, Nov. 1976.
- [29] P.L. Ribani, "Study on figure-eight-shaped coil electrodynamic suspension magnetic levitation system without cross-connection", IEEE Trans. Magn., Vol.36, No.1, pp.358-365, Jan. 2000.
- [30] J. Fang, A. Radovinsky, "Montgomery, dynamic modeling and control of the magplane vehicle", In The 18th Inter. Conf. on Magne. Levit. Syst. and Line. Dri., Shanghai china, pp.935-941, 2004.
- [31] K. Sawada, "Development of magnetically levitated high speed transport system in Japan", IEEE Trans. Magn., Vol.32, No.4, pp.2230-2235, Jul. 1996.
- [32] Online available: www.systech-gmbh.ch/hauptStirling.html
- [33] Online available: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Pantograaf>
- [34] J.F. Hoburg, "Modeling Maglev passenger compartment static magnetic fields from linear Halbach permanent-magnet arrays", IEEE Trans. Magn., Vol.40, No.1, pp.59-64, Jan. 2004.
- [35] M.T. Thompson, R.D. Thornton, A.Kondoleon, "Flux-canceling electrodynamic Maglev suspension: Part 1 test fixture design and modeling", IEEE Trans. Magn., Vol.35, No.3, pp.1956-1963, May 1999.
- [36] M.T. Thompson, R.D. Thornton, "Flux-canceling electrodynamic Maglev suspension: Part 2 test results and scaling laws", IEEE Trans. Magn., Vol.35, No.3, pp.1964-1975, May 1999.
- [37] M.T. Thompson, "Electrodynamic magnetic suspension-models, scaling laws, and experimental results", IEEE Trans. Edu., Vol.43, No.3, pp.336-342, Aug. 2000.
- [38] D. Kim, J. Lee, S. Hahn, G. Cha, "New levitation scheme with AC superconducting magnet for EDS Maglev system", IEEE Trans. Magn., Vol.32, No.5, pp.5151-5153, Sep. 1996.

- [39] H. Cho, D.K. Bae, B.C. Shin, "HTSC levitation experiment with AC current modeling after EDS Maglev", IEEE Trans. Appl. Sup., Vol.17, No.2, pp.2095-2098, June 2007.
- [40] T. Sakamoto, A.R. Eastham, G.E. Dawson, "Induced currents and forces for the split-guideway electrodynamic levitation system", IEEE Trans. Magn., Vol.27, No.6, pp.5004-5006, Nov. 1991.
- [41] K.R. Davey, "Electrodynamic Maglevcoil design and analysis", IEEE Trans. Magn., Vol.33, No.5, pp.4227-4229, Sep. 1997.
- [42] N. Fujii, M. Chida, K. Ogawa, "Three dimensional force of magnet wheel with revolving permanent magnet", IEEE Trans. Magn., Vol.33, No.5, pp.4221-4223, Sep. 1997.
- [43] K. Davey, "Analysis of an electrodynamic Maglev system", IEEE Trans. Magn., Vol.35, No.5, pp.4259-4267, Sep. 1999.
- [44] Y.J. Chen, J. Feng, "Optimization of guideway coil dimensions for a magnetic levitation system", IEEE Trans. Magn., Vol.33, No.5, Sep. 1997.
- [45] A. N.Khodabakhsh, S. Vaez-Zadeh, "Investigating on a floating electrodynamic system with discontinuous path with finite difference method", 17th Conf. of Iran. Elec. Engi., Vol.3, Pow., Elec. Mach. and Pow. Elec., pp.7-13, May 2009.
- [46] J.d. Boeij, M. Steinbuch, "Mathematical model of the 5-DOF sled dynamics of an electrodynamic Maglev system with a passive sled", IEEE Trans. Magn., Vol.41, No.1, pp.460-465, Jan. 2005.
- [47] J.d. Boeij, M. Steinbuch, "Modeling the electromechanical interactions in a Null-Flux electrodynamic Maglev system", IEEE Trans. Magn., Vol.41, No.1, pp.466-470, Jan. 2005.
- [48] Y. Kraftmakher, "Maglev for student", Euro. J. of Phy., Vol.29, No.4, pp.663-669, 2008.
- [49] R.F. Post, D. Ryutov, "The Inductrack: A simpler approach to magnetic levitation", IEEE Trans. Appl. Supe., Vol.10, No.1, pp.901-904, Mar. 2000.
- [50] R.F. Post, "Inductrack configuration", Patent, No.US7096794B2, Aug. 2006.
- [51] S. Gurol, R. Baldi, D. Bever, R. Post, "Status of the general atomics low speed urban Maglev technology development program", In Proc. 18th Inter. Conf. on Magn. Levit. Syst. and Line. Driv. Shanghai, China, June 2004.
- [52] D.L. Trumper, M.E. Williams, T.H. Nguyen, "Magnetic arrays for synchronous machines", IEEE Indus. Appl. Soci. Annu. Meet., p.9, 1993.
- [53] L.S. Tung, R.F. Post, J. Martinez-Frias, "Final progress report for the NASA inductrack model rocket launcher at the lawrence livermore national laboratory", June 2001.
- [54] G. D'Ovidio, F. Crisi, A. Navarra, G. Lanzara, "Electrodynamic interaction between HT superconducting plate short secondary and track with permanent magnet in halbach array: Experimental and numerical analyses", Inter. Sympo. on Line. Dri. for Indus. Appli., pp.145-148, UK, Sep. 2003,.
- [55] J.F. Hoburg, "Modeling Maglev passenger compartment static magnetic field from linear halbach permanent-magnet array", IEEE Trans. Magn., Vol.40, No.1, pp.59-64, Jan. 2004.
- [56] H. Wang, Y. Ye, Q. Wang, Y. Dai, Y. Yu, P. Weng, "Analysis for ring arranged axial field halbach permanent magnet", IEEE Trans. Appl. Supe., Vol.16, No.2, pp.1562-1565, June 2006.
- [57] J. Bird, T.A. Lipo, "A 3-D magnetic charge finite-element model of an electrodynamic wheel", IEEE Trans. Magn., Vol.44, No.2, pp.253-264, Feb. 2008.
- [58] J. Bird, T.A. Lipo, "Characteristics of an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state model", IEEE Trans. Magn., Vol.43, No.8, pp.3395-3405, Aug. 2007.
- [59] J. Bird, T.A. Lipo, "Calculating the forces created by an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state finite-element method", IEEE Trans. Magn., Vol.44, No.3, pp.365-372, Mar. 2008.
- [60] A. Najjar-Khodabakhsh, S. Vaez-Zadeh, A. Hassanpour Isfahani, "Analysis of a cylindrical passive suspension system using finite element method", Inter. Revi. of Elect. Engi. (IREE), Vol.3, No.1, pp.123-128, Feb. 2008.
- [61] A. Najjar-Khodabakhsh, S. Vaez-Zadeh, A. Hassanpour Isfahani, "Finite element analysis and experimental implementation of the cylindrical permanent-magnet electrodynamic suspension system", Electromagnetics, Vol.29, No.7, pp.563-574, July 2009.