

دانشگاه خواجہ ناصر الدین طوسی
دانشکده برق - کروه مکاترونیک

گزارش سمینار دوره کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکاترونیک

عنوان

بررسی روش های طراحی و ساخت موتور های
سطح با استفاده از شناوری مغناطیسی

نگارش

علیرضا امیری

اساتید راهنما

دکتر مهدی علیاری شوره دلی و دکتر اسماعیل نجفی

شهریور ۱۴۰۳

رَبِّ الْجَنَّاتِ وَالْجَمَارِ

چکیده

سیستم‌های موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی (MLPM) به دلیل توانایی در ارائه حرکت بدون تماس و دقت بالا، کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارند. این مطالعه به بررسی جنبه‌های کلیدی سیستم‌های MLPM، شامل معماری دستگاه، انواع آهنرباهای دائمی، کنترلرها و روش‌های مدل‌سازی پرداخته است. در معماری‌های بررسی شده، استفاده از سیم‌پیچ‌های ثابت و آهنرباهای دائمی متحرك به دلیل حذف مشکلات مرتبط با اتصالات الکتریکی و خنک‌کاری، به عنوان گزینه‌ای مناسب معرفی شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که آرایه‌های هالبخ، با توانایی تولید میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر و امکان ایجاد نیرو در دوراستای عمود بر هم، برتری چشمگیری نسبت به آهنرباهای دیسکی دارند. هرچند هر دو آرایه هالبخ یک‌بعدی و دو‌بعدی عملکرد مناسبی دارند، انتخاب میان آن‌ها بستگی به نیازهای خاص سیستم دارد. در حوزه کنترل، استفاده از کنترلرها کلاسیک مانند PID برای سیستم‌های MLPM امکان‌پذیر است، اما نتایج بهتری از طریق کنترلرها پیشرفته مبتنی بر مدل پیش‌بینی (MPC) و روش‌های هوش مصنوعی حاصل می‌شود. این کنترلرها به دلیل توانایی در پیش‌بینی و تنظیم دقیق‌تر، عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند. در بخش مدل‌سازی، روش‌های عددی و نرم‌افزارهای المان محدود، مانند Ansys به دلیل دقت بالا و توانایی در اعتبارسنجی روابط مدل‌سازی، بر مدل‌های تحلیلی برتری دارند. این روش‌ها به طور مؤثری رفتار سیستم را پیش‌بینی کرده و بهینه‌سازی طراحی‌ها کمک می‌کنند. این پژوهش‌ها نشان‌دهنده اهمیت انتخاب صحیح معماری، آهنربا، و استراتژی‌های کنترلی و مدل‌سازی در بهبود عملکرد و دقت سیستم‌های MLPM هستند.

واژگان کلیدی شناوری مغناطیسی، آرایه هالبخ، کنترلر مبتنی بر پیش‌بینی مدل

فهرست مطالب

۱	مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر	۱.۱
۳	مقدمه‌ای بر موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی	۲.۱
۵	فصل ۲: مروری بر مطالعات انجام شده	
۵	مقدمه	۱.۲
۶	معماری دستگاه‌های MLPIM	۲.۲
۶	۱.۲.۲ سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت	۱.۲.۲
۸	۲.۲.۲ آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت	۲.۲.۲
۱۰	۳.۲ ساختار آهنرباهای دائمی	۳.۲
۱۰	۱.۳.۲ استفاده از آهنرباهای دیسکی	۱.۳.۲
۱۱	۲.۳.۲ آرایه‌ی هالباخ یک بعدی	۲.۳.۲
۱۲	۳.۳.۲ آرایه هالباخ دو بعدی	۳.۳.۲
۱۳	۴.۲ طراحی کنترلر	۴.۲
۱۴	۱.۴.۲ کنترلر PID	۱.۴.۲
۱۵	۲.۴.۲ کنترلر مبتنی بر پیش‌بینی مدل MPC	۲.۴.۲
۱۶	۳.۴.۲ کنترلر مبتنی بر هوش مصنوعی	۳.۴.۲
۱۷	۵.۲ مدل‌سازی و تخمين سیستم	۵.۲
۱۷	۱.۵.۲ مدل بار مغناطیسی سطحی	۱.۵.۲
۱۸	۲.۵.۲ مدل بار مغناطیسی نقطه‌ای	۲.۵.۲
۱۹	۳.۵.۲ مدل‌های مبتنی بر داده	۳.۵.۲
۲۱	فصل ۳: بحث و نتیجه‌گیری	
۲۳	کتاب‌نامه	

فصل ۱

مقدمه

در این فصل، ابتدا مقدمه‌ای درباره‌ی تولید انعطاف‌پذیر ارائه شده و به بررسی دلایل استفاده از این روش در صنایع مختلف پرداخته می‌شود. سپس، پس از معرفی فناوری‌های موجود برای پیاده‌سازی این نوع تولید، ویژگی‌ها، مزایا و معایب هر یک به صورت جامع ارزیابی می‌گردد. در پایان، با توجه به اهداف این پژوهش، ساختارهای مبتنی بر شناوری مغناطیسی معرفی شده و با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این فناوری، کاربردهای آن در سایر صنایع نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

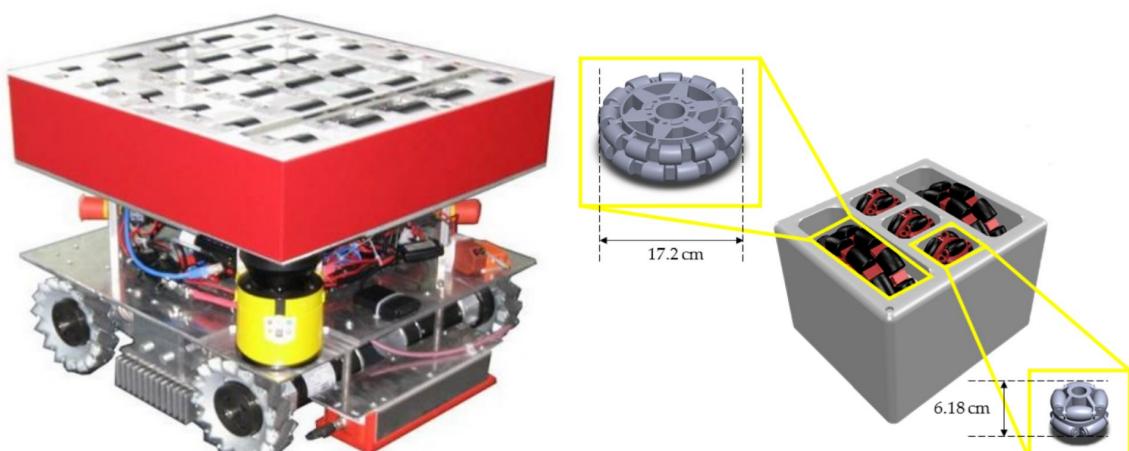
۱.۱ مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر

با رشد صنایع تولیدی مدرن و افزایش تنوع محصولات، خطوط تولید سنتی دیگر نمی‌توانند به سرعت به تغییرات پاسخ دهند. هرگونه تغییر در این خطوط نیازمند جابه‌جایی دستگاه‌ها یا تغییر مسیر نوارهای نقاله است که این کار هزینه‌های زیادی به همراه دارد و به دلیل زمان بر بودن و هزینه‌های بالا، اغلب عملی نیست. تولید انعطاف‌پذیر به سامانه‌ای از ماشین‌آلات صنعتی اشاره دارد که به طور کنترل شده قادر به پردازش مقدار متوسطی از محصولات به صورت همزمان هستند [۱]. این رویکرد با کنار گذاشتن روندهای خطی سنتی و بهره‌گیری از فرایندهای پیچیده‌تر، امکان تولید سریع‌تر را فراهم می‌کند.

یکی از الزامات اصلی برای پیاده‌سازی تولید انعطاف‌پذیر، طراحی جایگزین‌هایی برای نوارهای نقاله است تا کنترل دقیق‌تری بر محصولات در جریان تولید اعمال شود. امکان جابه‌جایی محصولات در دو راستای طولی و

عرضی، به عنوان نخستین گام در ارتقای خطوط تولید و افزایش انعطاف‌پذیری مطرح است و برای دستیابی به این هدف، روش‌های متعددی ارائه شده است.

یکی از این روش‌ها که در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته، استفاده از چرخ‌های چندجهته است که می‌تواند راهکاری مناسب برای کنترل موقعیت محصولات باشد. در این سازوکار، با تغییر وضعیت چرخ‌های مختلف و تنظیم جهت چرخش آنها، امکان جابه‌جایی محصولات در راستاهای طولی و عرضی، و همچنین چرخش حول محور عمودی فراهم می‌شود که به طور مؤثری به افزایش انعطاف‌پذیری خطوط تولید کمک می‌کند. شکل ۱.۱.آ. استفاده از ربات‌های چرخ دار که قادر به جابه‌جایی در محیط‌های مسطح هستند نیز به عنوان یک راهکار برای انتقال محصولات در برخی صنایع معروفی شده است. شکل ۱.۱.ب. با این حال، فناوری‌های مبتنی بر چرخ به دلیل تماس فیزیکی ناگزیر میان محصولات و ماشین‌آلات با محدودیت‌هایی رو به رو هستند که استفاده از آن‌ها را در صنایع خاص دشوار می‌کند. یکی از چالش‌های اصلی این روش، وجود اصطکاک میان چرخ‌ها و محصولات است که در گام اول، به عنوان عاملی غیرقابل پیش‌بینی در حرکت محصولات عمل کرده و دقت جابه‌جایی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. علاوه بر این، اصطکاک موجود، سرعت و شتاب حرکت محصولات را محدود کرده و از عملکرد بهینه جلوگیری می‌کند. یکی دیگر از محدودیت‌های سیستم‌های چرخ دار، ساختار مکانیکی آن‌ها است که می‌تواند باعث ایجاد گرد و غبار در محیط شود و به همین دلیل در صنایعی که نیاز به فضای بدن آسودگی یا خلاء دارند، نمی‌توان از این فناوری استفاده کرد.



(ب) استفاده از ربات‌های چرخ دار

(ج) استفاده از چرخ‌های چند‌جهته

شکل ۱.۱: طراحی‌های تولید انعطاف‌پذیر مبتنی بر چرخ

در مقابل، موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی^۱ توانسته‌اند بسیاری از این محدودیت‌ها را بطرف کنند. با حذف تماس فیزیکی بین محصولات و سطح، نیروی اصطکاک از معادلات حرکت به‌طور کامل حذف می‌شود و این امکان فراهم می‌آید که حرکت محصولات با دقت بسیار بالایی کنترل شود. در این فناوری، نیروی اعمال شده به جسم متوجه از طریق میدان‌های مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در سیم‌پیچ‌ها تولید می‌شود و به همین دلیل، می‌توان با دقت بالایی میزان نیروی وارد شده و جابه‌جایی محصول را محاسبه و تنظیم کرد. همچنین این روش برخلاف روش‌های مبتنی بر چرخ، امکان جابه‌جایی محصولات با سرعت و شتاب بالا و بدون ایجاد گرد و غبار را فراهم می‌کند. علاوه بر این، اجزای متوجه در این سامانه‌ها می‌توانند تا شش درجه آزادی داشته باشند و بدون هیچ محدودیتی روی سطح استاتور حرکت کنند.

۲.۱ مقدمه‌ای بر موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی

شناوری مغناطیسی به معنای اعمال نیروهای مغناطیسی به اجسام به‌گونه‌ای است که این نیروها بتوانند بر نیروی جاذبه غلبه کرده و جسم را بدون تماس فیزیکی و به صورت پایدار در هوا معلق نگه دارند. این نیرو می‌تواند به دو شکل جاذبه یا دافعه اعمال شود. در حالت جاذبه، نیروی مغناطیسی از بالا به جسم وارد شده و نیروی گرانش زمین را خنثی می‌کند، درحالی که در حالت دافعه، نیرو از پایین به جسم وارد شده و آن را به سمت بالا دفع می‌کند. در صورتی که جسم فقط دارای خاصیت رسانایی باشد، تنها امکان جذب شدن وجود دارد، اما اگر جسم از مواد مغناطیسی مانند آهنرباهای دائمی یا الکتریکی ساخته شود، می‌تواند هم جذب و هم دفع شود.

کنترل نیروهای مغناطیسی معمولاً با استفاده از آهنرباهای الکتریکی انجام می‌شود، به‌طوری که عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچ‌ها میدان مغناطیسی ایجاد کرده و تنظیم این جریان‌ها باعث تغییر در شدت میدان و نیروی وارد به جسم می‌شود. از این طریق، می‌توان با کنترل دقیق جریان، جسم را به‌طور پایدار در حالت معلق نگه داشت.

در موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی، نیروی مغناطیسی همواره از بخش زیرین به جسم وارد می‌شود. در این سیستم‌ها، دو نوع طراحی رایج است: (۱) آهنرباهای الکتریکی در بخش استاتور قرار می‌گیرند و بخش متوجه از آهنرباهای دائمی ساخته) می‌شود، و یا (۲) استاتور شامل آهنرباهای دائمی است و آهنرباهای

¹Magnetic Levitated Planar Motors (MLPM)

الکتریکی در بخش متحرک جای می‌گیرند. در هر دو حالت، با تنظیم جریان در سیم‌پیچ‌های بخش متحرک، نیروی اعمالی کنترل شده و حرکت جسم تنظیم می‌شود.

در کاربردهای صنعتی، بهدلیل نیاز به بازدهی بالاتر در تبدیل انرژی مغناطیسی به نیرو، از آرایه‌های خاصی از آهنرباهای دائمی به نام آرایه هالباخ^۱ استفاده می‌شود. این آرایه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که میدان مغناطیسی را به‌طور مرکزی در یک سمت تقویت کنند و در نتیجه، نیروی مغناطیسی بیشتری به جسم وارد شود. ساختارهای آرایه هالباخ یک‌بعدی و دو‌بعدی در تحقیقات پیشین به‌طور گستردگی بررسی و استفاده شده‌اند.

برای پیاده‌سازی موفق یک سیستم شناوری مغناطیسی، عوامل متعددی باید در نظر گرفته شوند که شامل طراحی و بهینه‌سازی ساختار مکانیکی سیستم، پیاده‌سازی کنترلرهای دقیق برای تنظیم نیروهای مغناطیسی، و همچنین مدل‌سازی دینامیکی یا شناسایی رفتار سیستم برای کنترل بهتر آن است. این عوامل به‌طور مستقیم بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند و باید بدقت مورد بررسی و تنظیم قرار گیرند.

¹Halbach array

فصل ۲

مروزی بر مطالعات انجام شده

۱.۲ مقدمه

در این فصل، پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی (MLPM) با تمرکز بر ویژگی‌های اساسی آنان که به طور کلی در بخش‌های زیر دسته‌بندی شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- **معماری دستگاه:** بررسی انواع معماری‌های موجود برای MLPM و تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلی سیستم.
- **ساختار آهنرباها و الکتریکی:** مرور انواع آهنرباها و چینش‌های مختلف آهنرباها دائمی و نقش آن‌ها در بهینه‌سازی عملکرد سیستم.
- **طراحی کنترلر:** معرفی روش‌های کنترل کلاسیک و مدرن برای این سیستم‌ها و چگونگی بهبود پایداری و دقت حرکت.
- **روش‌های شناسایی سیستم و مدل‌سازی دینامیکی:** تحلیل روش‌های شناسایی و تخمین مدل‌های دینامیکی سیستم برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد.

در بخش‌های بعد، پژوهش‌های انجام‌شده بر اساس این ویژگی‌ها ارزیابی شده و مزایا و معایب هر روش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲.۲ معماری دستگاه‌های MLP

سیستم‌های شناوری مغناطیسی به دلیل ماهیت ناپایدارشان بدون استفاده از حلقه‌های کنترلی نمی‌توانند پایداری لازم را فراهم کنند. به همین دلیل، در تمامی ساختارهای پیشنهادی، از سیم‌پیچ‌های الکتریکی برای تولید میدان مغناطیسی باشد که استفاده شده این سیم‌پیچ‌ها وظیفه دارند تا موقعیت جسم معلق را پایدار کرده و آن را در حالت مطلوب نگه دارند.

در طراحی موتورهای مسطح، که از دو بخش ثابت^۱ و متحرک^۲ تشکیل شده‌اند، امکان تغییر در طراحی و محل قرارگیری آهنرباهای الکتریکی و دائمی وجود دارد. نیروی مغناطیسی وارد بر بخش متحرک می‌تواند به صورت جاذبه‌ای از بالا یا دافعه‌ای از پایین اعمال شود. با این حال، در موتورهای مسطح به دلیل لزوم کم بودن فاصله میان سیم‌پیچ‌ها و اجسام معلق، اعمال نیروی جاذبه‌ای از بالا امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، در تمامی طراحی‌ها، نیروی مغناطیسی دافعه‌ای از سمت پایین به بخش متحرک وارد می‌شود که امکان جابه‌جایی اجسامی که بر روی آنها قرار می‌گیرند را فراهم می‌کند.

با توجه به این موارد، دو طراحی کلی برای ساخت دستگاه‌های MLP ارائه می‌شود که در ادامه بررسی می‌شوند.

۱.۲.۲ سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت

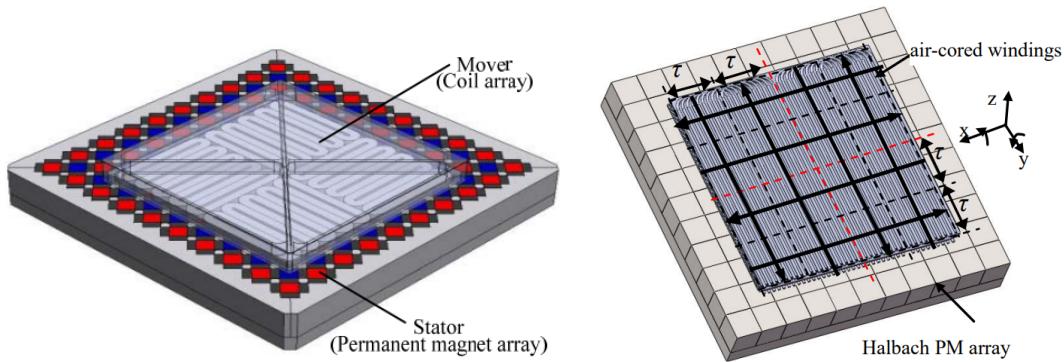
در این معماری، بخش استاتور از مجموعه‌ای آهنربای ثابت تشکیل شده که میدان مغناطیسی پایدار در محیط اطراف خود ایجاد می‌کند. بخش متحرک دستگاه شامل سیم‌پیچ‌هایی است که با عبور جریان الکتریکی از آن‌ها، میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌گردد. این جریان به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نیروی وارد بر آهنرباهای دائمی به‌دقت کنترل شود. طبق قانون سوم نیوتون، نیروهای وارد بر سیم‌پیچ‌ها و آهنرباهای دائمی به عنوان عمل و عکس العمل رفتار می‌کنند؛ به این ترتیب، نیرویی که به آهنرباهای اعمال می‌شود، باعث ایجاد نیرویی برابر و در جهت مخالف بر سیم‌پیچ‌ها خواهد شد.

در پژوهش [۲]، از ساختاری با سیم‌پیچ‌های چندلایه متعامد در بخش متحرک استفاده شده است. لایه اول سیم‌پیچ‌ها نیرویی را در راستاهای X و Z ایجاد می‌کند، در حالی که لایه دوم نیرو را در راستاهای y و z اعمال

¹Stator ²Mover

می‌کند. این جداسازی نیروها به بهبود کنترل سیستم کمک می‌کند. علاوه بر این، به دلیل تفاوت فاصله میان لایه‌ها و استاتور، نیروهای تولیدشده توسط هر لایه متفاوت خواهند بود. راهکار ارائه شده برای این چالش، افزایش ضخامت لایه‌های دورتر از استاتور است. با این حال، برای جلوگیری از مشکلات ناشی از تفاوت ضخامت لایه‌ها، ساختاری سه‌لایه طراحی شده که ضمن افزایش نیروی تولیدی، ضخامت یکنواختی را در تمامی راستها فراهم می‌نماید. در شکل ۱.۲ آساختار این دستگاه نمایش داده شده است.

در پژوهش [۳]، بخش متحرک از یک لایه سیم‌پیچ با چینش متعامد تشکیل شده که قابلیت اعمال نیرو در سه راستا را فراهم می‌سازد. در ادامه، پژوهش [۴] روشی تحلیلی برای بهینه‌سازی ضخامت این سیم‌پیچ‌ها ارائه کرده است که با در نظر گرفتن معیارهای مختلف، به بهبود عملکرد سیستم می‌پردازد. شکل ۱.۲ ب این ساختار را نمایش داده است.



(ب) استفاده از سیم‌پیچ‌های یک لایه متعامد [۴]

(آ) استفاده از سیم‌پیچ‌های چندلایه [۲]

شکل ۱.۲: ساختار سیستم‌های MLPMS با سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنربای ثابت

با وجود اینکه این معماری امکان دستیابی به شناوری پایدار و حرکت با شش درجه آزادی را فراهم می‌کند، اما در کاربردهای عملی با محدودیت‌هایی مواجه است که بر عملکرد نهایی سیستم تأثیرگذار هستند. نخستین محدودیت، نیاز به تأمین انرژی الکتریکی برای سیم‌پیچ‌ها از طریق سیم‌های فیزیکی است که این امر به طور اجتناب‌ناپذیری ارتباط فیزیکی میان جسم متحرک و محیط اطراف را برقرار می‌سازد، در نتیجه حرکت آزادانه کامل جسم متحرک محدود می‌شود. دومین محدودیت، چالش خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها است که به دلیل ماهیت متحرک و معلق بودن آن‌ها، اجرای یک سیستم خنک‌کننده کارآمد دشوار خواهد بود. این مشکلات، نیاز به ارائه معماری جدیدی را آشکار می‌کند که بتواند این چالش‌ها را برطرف سازد.

۲.۲.۲ آهنرباهای متحرك و سیمپیچ‌های ثابت

معماری دیگری که برای طراحی دستگاه‌های MLPM ارائه شده است، شامل قرار دادن سیمپیچ‌ها در بخش استاتور و استفاده از آهنرباهای دائمی در بخش متتحرك می‌باشد. این ساختار نوین که در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته، مشکلات معماري‌های پیشین مانند محدودیت جابه‌جایی متتحرك ناشی از اتصالات فیزیکی و چالش‌های خنک‌کاری سیمپیچ‌ها را برطرف کرده و منجر به بهبود عملکرد کلی سیستم شده است.

در پژوهش [۵] استاتوری با چینش سیمپیچ‌ها مطابق با الگوی شاه‌ماهی^۱ طراحی و پیاده‌سازی شده است. این طراحی امکان اعمال نیروی مغناطیسی به دو آهنربای دیسکی تعبیه شده در بخش متتحرك را فراهم کرده است که دقیقی در حدود ۱ درجه در زوایای حرکت و ۱ میلی‌متر در موقعیت متتحرك به دست آورده است [۵]. در ادامه این پژوهش، ساختاری جدید برای بخش متتحرك ارائه شده که شامل ۶ آهنربای دیسکی با چینش کروی و فواصل ثابت می‌باشد. این طراحی توانسته است چرخش آزادانه متتحرك را حول سه محور ممکن سازد [۶]. شکل (۲.۲.۲) همچنین در پژوهش [۷] نیز از این چینش سیمپیچ‌ها استفاده شده و مطابق با شبیه‌سازی‌های ارائه شده، مزیت آنان در ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت‌تر در نواحی کناری سیمپیچ‌ها نمایش داده شده است.

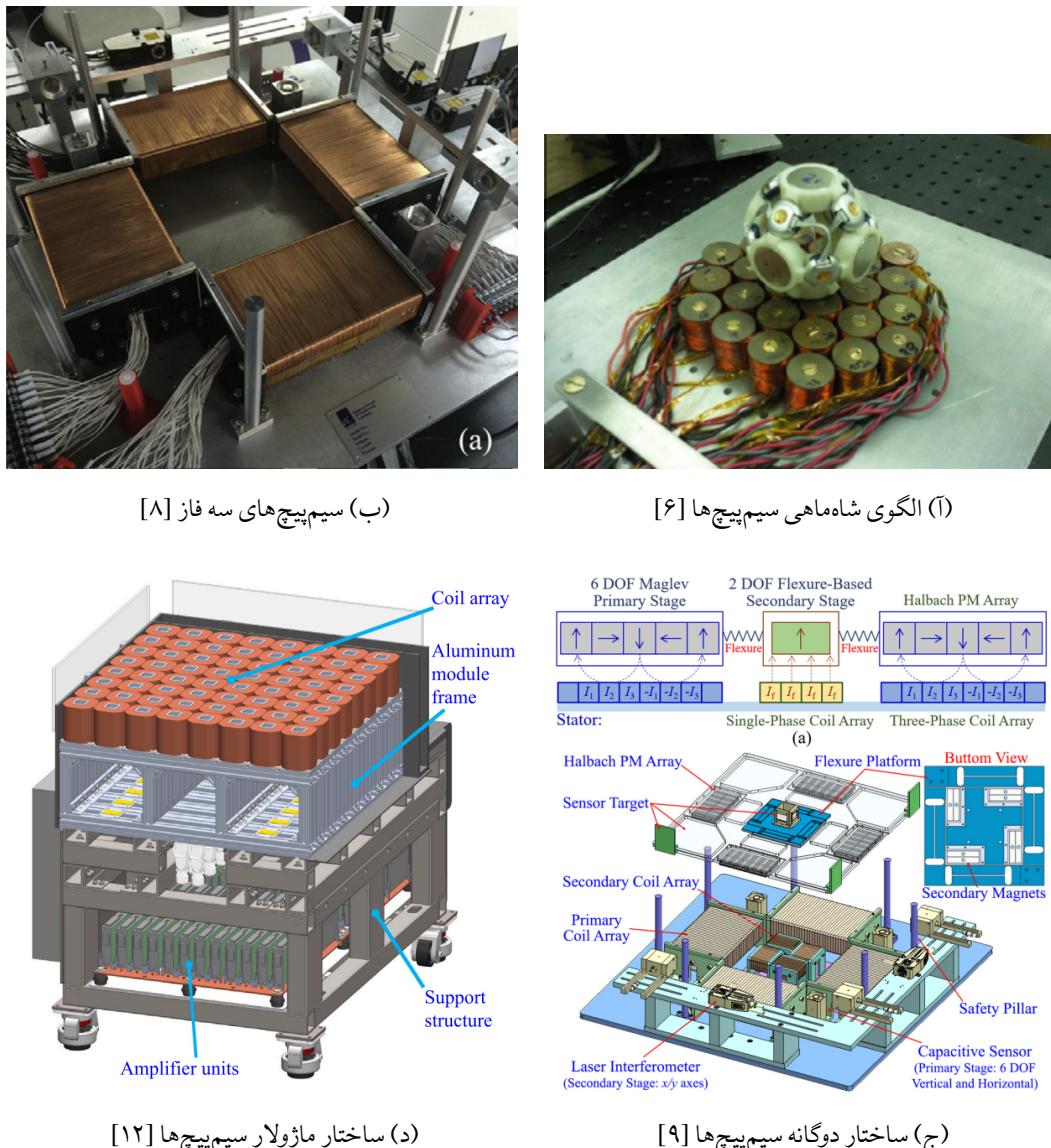
استفاده از سیمپیچ‌های سه‌فاز به جای تغذیه با جریان مستقیم، رویکردنی است که در پژوهش [۸] معرفی و اجرا شده است. در این ساختار، چهار آرایه از سیمپیچ‌های سه‌فاز، همان‌طور که در شکل (۲.۲.۲.ب) نشان داده شده است، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که نیروی مغناطیسی لازم را تولید کنند.

به منظور کاهش هزینه‌ی محاسباتی در جابه‌جایی‌های طولانی، پژوهش [۹] ساختاری را ارائه کرده است که از دو مجموعه سیمپیچ سه‌فاز و تک‌فاز تشکیل شده است. در این طراحی، کنترل حرکت در مسافت‌های طولانی توسط سیمپیچ‌های سه‌فاز انجام می‌پذیرد، در حالی که برای تنظیم دقیق موقعیت متتحرك در صفحه، از سیمپیچ‌های تک‌فاز بهره برده می‌شود. شکل (۲.۲.۲.ج)

استفاده از سیمپیچ‌های مازولار در طراحی استاتورهایی با چینش دو بعدی، رویکردنی است که در دستگاه‌های MagTable و MagFloor از دانشگاه واترلو پیاده‌سازی شده است [۱۰، ۱۱، ۱۲] در این طراحی، مازولهایی از سیمپیچ‌های با سطح مقطع مربع به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که با قرار گرفتن در کنار یکدیگر، فضای کاری نامحدودی برای جابه‌جایی متتحرك فراهم می‌کنند. (شکل ۲.۲.۲.د) همچنین، پژوهش [۱۰] نشان داده است که آهنرباهای با سطح مقطع مربع، در مقایسه با سیمپیچ‌های دایروی با جریان الکتریکی مشابه، می‌توانند شدت

^۱Herringbone pattern

میدان مغناطیسی بیشتری ایجاد کنند، که این مزیت عملکرد کلی سیستم را بهبود می‌بخشد.



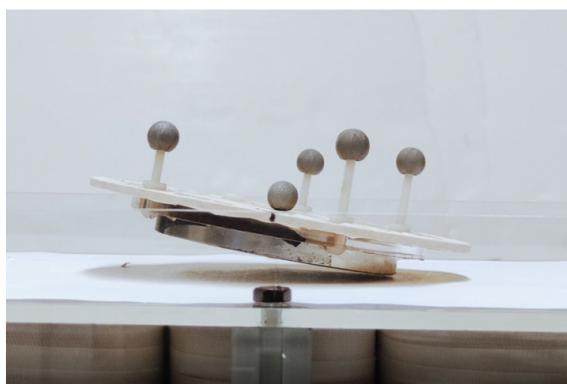
شکل ۲.۲: ساختارهای آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت

۳.۲ ساختار آهنرباهای دائمی

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، میدان مغناطیسی کنترل شده توسط آهنرباهای الکتریکی ایجاد می‌شود و بر اثر تعامل این میدان متغیر با میدان ثابت آهنرباهای دائمی، نیرویی بر بخش متحرک دستگاه وارد می‌شود که حرکت آن را در راستاهای مختلف ممکن می‌سازد. بنابراین، طراحی بهینه آهنرباهای دائمی، بهویژه برای تولید میدان مغناطیسی قوی‌تر با کمترین وزن، در بهبود کارایی دستگاه نقش کلیدی دارد. در این بخش، طراحی‌های مختلف آهنرباهای دائمی که در پژوهش‌های پیشین ارائه شده‌اند، با تمرکز بر بهینه‌سازی این ویژگی‌ها بررسی می‌شوند.

۱.۳.۲ استفاده از آهنرباهای دیسکی

استفاده از آهنرباهای دیسکی رویکردی ساده و مؤثر برای ایجاد میدان مغناطیسی دائمی محسوب می‌شود. با انتخاب موادی با خاصیت مغناطیسی بالا، مانند آهنرباهای نئودیمیومی، می‌توان به شدت میدان مغناطیسی مطلوب دست یافت. به عنوان نمونه، در پژوهش [۵] از دو آهنربای دیسکی جهت تأمین میدان مغناطیسی ثابت استفاده شده است. همچنین در پژوهش [۶] با بهکارگیری ۶ آهنربای دیسکی، امکان چرخش آزادانه حول سه محور فراهم شده است. (شکل ۱.۳.۲.آ) در پژوهش [۱۰] نیز از ترکیب‌های متفاوتی از آهنرباهای دیسکی برای بخش متحرک دستگاه استفاده شده است، که این ترکیب‌ها شامل تغییر اندازه‌ی یک آهنربا و استفاده از سه آهنربای دیسکی است. سیستم شناوری مغناطیسی با پنج درجه آزادی که تنها از یک آهنربای دیسکی تشکیل شده است، در پژوهش [۷] به عنوان نمونه‌ای موفق از این رویکرد معرفی شده است. این طراحی، با وجود سادگی معماری، توانسته نتایج رضایت‌بخشی را از نظر عملکرد ارائه دهد و نشان می‌دهد که استفاده از آهنربای دیسکی، علاوه بر سادگی، می‌تواند در کاربردهای مختلف بهویژه در سیستم‌های با نیاز به دقت بالا و چند درجه آزادی، کارآمد باشد. شکل ((۱.۳.۲.ب))



(ب) یک آهنربای دیسکی [۷]



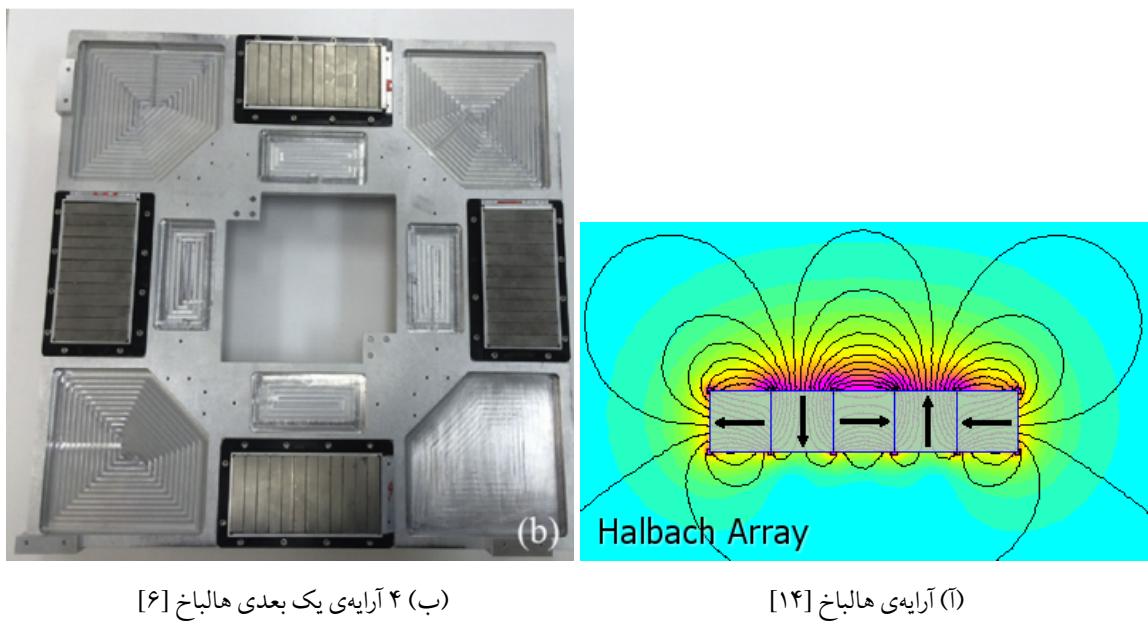
(ا) دو آهنربای دیسکی [۵]

شکل ۳.۲: استفاده از آهنربای دیسکی در طراحی متحرک

۲.۳.۲ آرایه‌ی هالبax یک بعدی

آرایه‌ی هالبax^۱ به عنوان چینشی از آهنرباهای دائمی تعریف می‌شود که در آن جهت مغناطیس‌شوندگی هر آهنربا با آهنربای مجاور خود ۹۰ درجه تفاوت دارد. این آرایه به طور خاص قادر است میدان مغناطیسی در یک سوی آرایه را خنثی کرده و در سوی دیگر میدان را به میزان تقریبی ۴.۱ برابر افزایش دهد. مزیت این ساختار در طراحی سیستم‌های MLPDM توانایی آن در تولید شدت میدان مغناطیسی بیشتر است. به همین دلیل، این چینش در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، استفاده از تنها یک آرایه‌ی یک‌بعدی هالبax به تنهایی نمی‌تواند نیرویی در دو راستای افقی ایجاد کند. لذا معمولاً از تعداد بیشتری از این آرایه‌ها در ساختار متحرک استفاده می‌شود. به عنوان مثال، در پژوهش‌های [۸، ۱۳] از چهار آرایه‌ی هالبax یک‌بعدی در بخش متحرک استفاده شده است که هر یک از این آرایه‌ها قادر به ایجاد نیرویی در یکی از راستاهای افقی و عمودی هستند. در پژوهش [۶]، مشابه آنچه که در بخش استاتور پیاده‌سازی شده بود، از ساختار دوگانه‌ای در بخش متحرک بهره‌برداری شده است، به گونه‌ای که دو مجموعه چهارگانه از آرایه‌های هالبax در معماری این بخش به کار رفته‌اند.

^۱Halbach Array



(ب) ۴ آرایه‌ی یک بعدی هالبالاخ [۶]

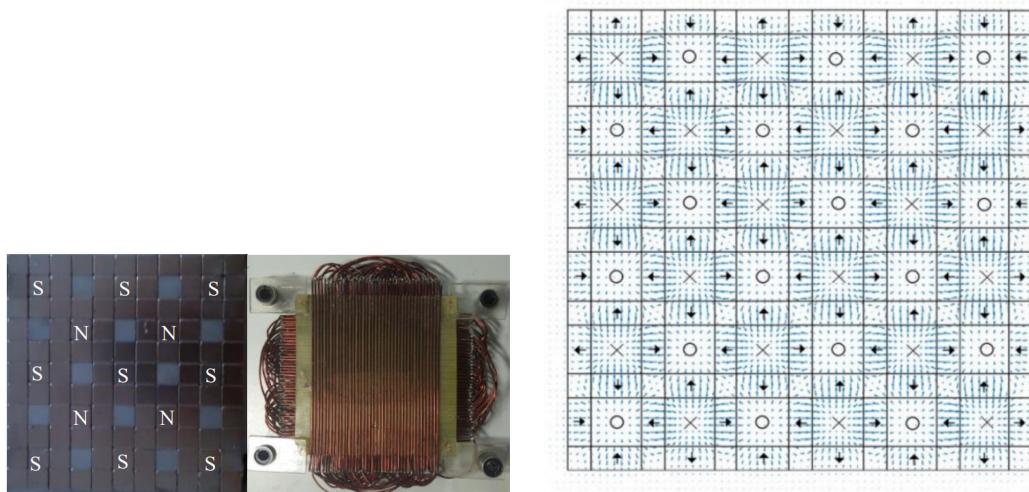
(ا) آرایه‌ی هالبالاخ [۱۴]

شکل ۴.۲: آرایه هالبالاخ یکبعدی

۳.۳.۲ آرایه هالبالاخ دو بعدی

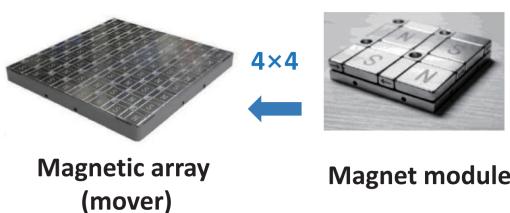
برای رفع محدودیت‌های آرایه‌ی هالبالاخ یک بعدی که تنها در یک راستا نیرو ایجاد می‌کند، ساختار جدیدی از آرایه‌ی دو بعدی ارائه شده است. این آرایه قادر است میدان مغناطیسی را در یک طرف صفحه حذف و در طرف دیگر تقویت کند. با این ویژگی، استفاده از چندین آرایه برای تأمین میدان مغناطیسی ثابت ضروری نخواهد بود. طراحی آرایه‌ی دو بعدی در بسیاری از پژوهش‌ها برای بخش‌های متحرک یا استاتور سیستم‌های MLP می‌باشد کار گرفته شده است.

استفاده از آرایه‌ی هالبالاخ در پژوهش‌های مختلفی از جمله [۱۱، ۱۲] و [۱۵، ۱۶] نشان‌دهندهی عملکرد بهینه‌ی این معماری در بخش متحرک سیستم‌های MLP است. (شکل ۴.۵.۲ آ) همچنین در پژوهش [۴] از این آرایه به عنوان بخشی از استاتور دستگاه بهره‌گیری شده است. در [۱۷] مازول‌هایی برای ساخت این آرایه استفاده شده (شکل ۴.۵.ج) و در [۲] برای تشکیل آرایه از قطعات آهنی در فضای خالی میان آن استفاده شده است؛ اما این رویکرد باعث ایجاد خطأ در دقت میدان مغناطیسی شده است. (شکل ۴.۵.ب) علاوه بر این، در پژوهش [۱۸]، طراحی جدیدی با آهنرباهایی با میزان مغناطیس‌شوندگی و ارتفاع متفاوت پیشنهاد شده است.



(ا) آرایه هالباخ دو بعدی و میدان مغناطیسی آن [۱۲]

[۲]



(ج) آرایه هالباخ دو بعدی ماژولار [۱۷]

شکل ۲: آرایه هالباخ دو بعدی

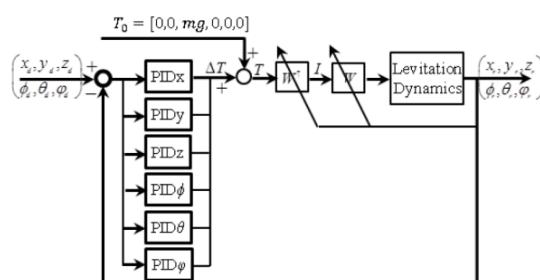
۴.۲ طراحی کنترلر

همان طور که پیش تر اشاره شد، سیستم های شناوری مغناطیسی ذاتاً ناپایدار هستند و برای دستیابی به پایداری، به کنترلری با عملکرد دقیق و خطای کم نیاز است. در پژوهش های مختلف، از کنترلرهای گوناگونی برای این سیستم ها بهره گرفته شده است؛ از جمله کنترلرهای کلاسیک نظیر PID، کنترلرهای مدرن مانند کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل (MPC) و همچنین مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی نظیر شبکه های بازگشتی GRU. در این بخش، به بررسی این کنترلرها و مقایسه عملکرد آنها خواهیم پرداخت.

۱.۴.۲ کنترل PID

کنترل تناسیی-انتگرالی-مشتقی (PID) به عنوان یکی از پرکاربردترین و موثرترین کنترلهای کلاسیک در سیستم‌های دینامیکی، گزینه‌ای مناسب برای کنترل سیستم‌های MLPM محسوب می‌شود. این کنترلر به دلیل سادگی در پیاده‌سازی، تنظیم دقیق و توانایی تنظیم خروجی سیستم بر اساس خطاهای ورودی، به طور گسترده در سیستم‌های مختلف استفاده شده است. برای کنترل سیستم‌های MLPM به ازای هر درجه آزادی یک کنترلر PID طراحی و پیاده‌سازی می‌شود تا بتواند جریان الکتریکی سیم‌پیچ‌ها را تنظیم کرده و میدان مغناطیسی لازم برای ایجاد و حفظ موقعیت متحرک را تأمین کند.

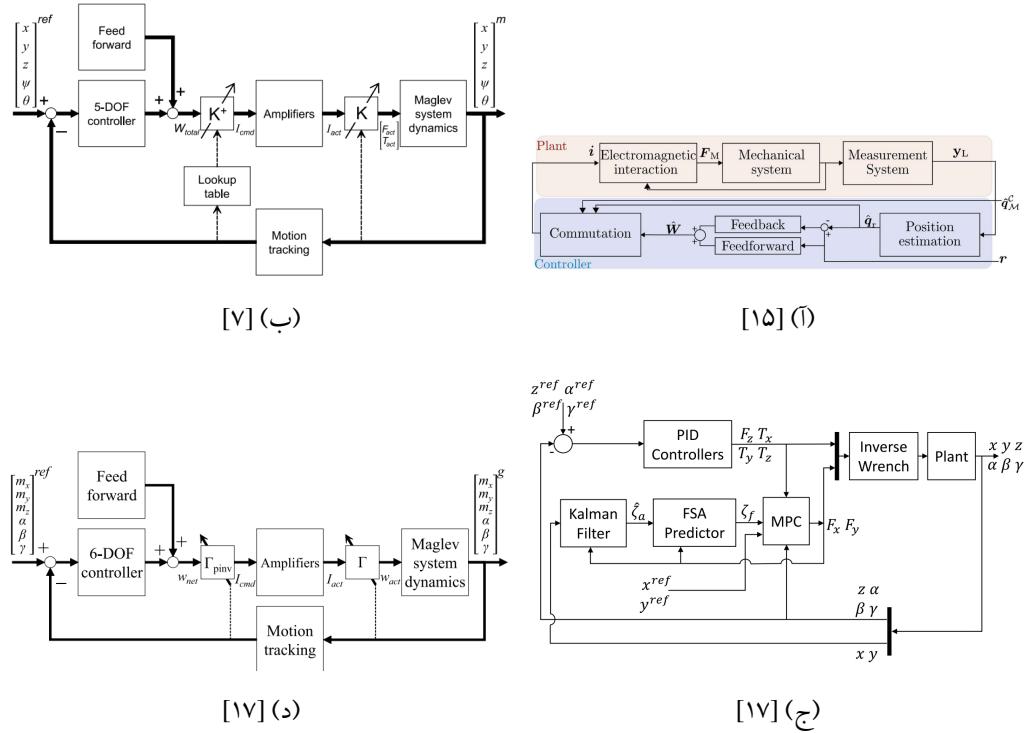
در پژوهش‌های متعددی از کنترلر PID برای سیستم‌های MLPM بهره گرفته شده است. به عنوان مثال، در [۶، ۸] از کنترلهای PID ساده برای کنترل جریان سیم‌پیچ‌ها استفاده شده که وظیفه تنظیم میدان مغناطیسی و در نتیجه، کنترل موقعیت جسم متحرک را بر عهده دارند. علاوه بر این، در پژوهش [۹]، از دو کنترلر PID در یک ساختار دوگانه استفاده شده است. کنترلر اول برای جابه‌جایی‌های بلند و در مسافت‌های طولانی به کار رفته و جریان سیم‌پیچ‌های اصلی را تنظیم می‌کند، در حالی که کنترلر دوم برای حرکات دقیق کوتاه‌برد طراحی شده و کنترل جریان سیم‌پیچ‌های ثانویه را بر عهده دارد. این روش باعث بهینه‌سازی کنترل دقیق و بهبود دقت در حرکات کوتاه‌برد و جابه‌جایی‌های سریع می‌شود. همچنین در سیستم MagTable، برای کنترل دقیق موقعیت آهنرباهای دائمی، از شش کنترلر PID به صورت همزمان استفاده شده است تا نیروی متوازن برای پایدارسازی موقعیت متحرک در چندین جهت فراهم شود [۱۰]. این نوع طراحی و استفاده از کنترلهای PID نشان می‌دهد که علی‌رغم محدودیت‌های موجود در کنترلهای کلاسیک، این روش همچنان در بسیاری از سیستم‌های مغناطیسی پیچیده مانند MLPM کارایی بالایی دارد.



شکل ۲: کنترل PID با ۶ درجه آزادی [۱۰]

۲.۴.۲ کنترلر مبتنی بر پیش‌بینی مدل MPC

برای کنترل سیستم‌های MLPM اگر مدل سیستم به روش‌های تحلیلی و یا عددی به دست آمده و تخمین زده شده باشد، می‌توان از این مدل‌ها برای طراحی کنترلرهای پیشرفته‌تر با هدف پیش‌بینی رفتار سیستم و استفاده از آن به صورت پیش‌خور در حلقه‌ی کنترلی استفاده کرد. روش‌های تخمین مدل این سیستم‌ها در بخش‌های بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش، کنترلرهای ارائه شده در پژوهش‌های دیگر ارائه می‌شود. به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم و استفاده از آنها در پیش‌بینی روشی تحلیلی است که در [۱۵] استفاده شده است و مدل کنترلی متشكل از بلوک‌های پس‌خور و پیش‌خور برای کنترل موقعیت آهنربا طراحی شده است. همچنین در [۷] از یک جدول جستجو برای تعیین رفتار سیستم در نقاط مختلف فضنا استفاده شده است که این جدول به عنوان پیش‌خور به مدل کنترلی داده می‌شود. در ادامه‌ی این پژوهش، با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم، مدلی تقریبی برای رفتار سیستم در نظر گرفته شده است و با استفاده از این مدل برای پیش‌بینی رفتار سیستم مدل MPC پیاده‌سازی شده است. پژوهش [۱۱] با تمرکز بر ارائه‌ی یک مدل پیش‌بین، با استفاده از معادلات دینامیکی سیستم و همچنین روش پیش‌بینی حالت بی‌تاخیر، رفتار آینده‌ی سیستم را محاسبه می‌کند.

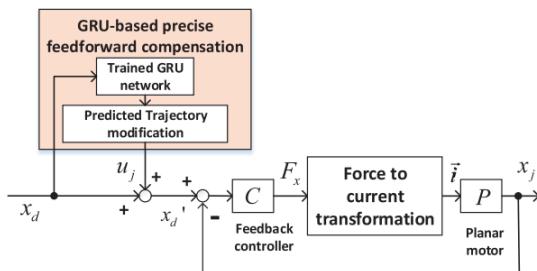


شکل ۷.۲: کنترل MPC

۳.۴.۲ کنترل مبتنی بر هوش مصنوعی

یکی از روش‌های نوین برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده مانند، MLP م استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی به‌ویژه شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) است. این مدل‌ها با یادگیری دینامیک سیستم و ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، می‌توانند به‌طور مؤثری رفتار سیستم را در شرایط مختلف پیش‌بینی کنند. در این راستا، پژوهش [۱۷] از یک مدل بازگشتی GRU^۱ استفاده کرده است. این مدل بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از عملکرد دستگاه MLP آموزش دیده و توانسته است با دقت بالا تغییرات دینامیکی سیستم و پاسخ آن به ورودی‌های گوناگون را پیش‌بینی کند. استفاده از GRU به دلیل توانایی آن در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی و در نظر گرفتن اطلاعات قبلی برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، رویکردی مناسب در این پژوهش بوده است. (شکل ۸.۲)

¹Gated Recurrent Unit



شکل ۸.۲: کنترلر پیش خور GRU [۱۷]

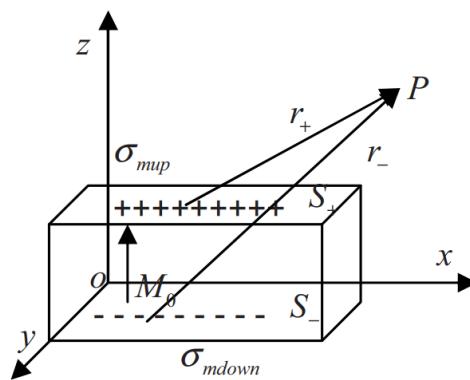
۵.۲ مدل سازی و تخمین سیستم

در روش بار نقطه‌ای برای تحلیل میدان مغناطیسی، فرض می‌شود که توزیع بار مغناطیسی در یک حجم به صورت متمرکز در هشت نقطه در گوشه‌های آن حجم قرار گرفته است. با این فرض، اثر مغناطیسی این جسم می‌تواند به صورت مجموع آثار هر یک از بارهای نقطه‌ای محاسبه شود. این رویکرد امکان محاسبه‌ی دقیق شدت میدان مغناطیسی و نیروی وارد بر یک جسم خارجی را فراهم می‌آورد. از طریق محاسبه‌ی میدان‌های ناشی از هر بار نقطه‌ای و جمع آنها، میدان مغناطیسی کل حاصل می‌شود و به این ترتیب، شدت میدان مغناطیسی ناشی از آهنربای دائمی به کمک این روش به طور دقیق محاسبه می‌گردد. در ادامه، معادلات مربوط به محاسبه‌ی شدت میدان مغناطیسی ارائه شده‌اند.

۱.۵.۲ مدل بار مغناطیسی سطحی

در این مدل، فرض بر این است که بار مغناطیسی در یک المان حجم سه‌بعدی به صورت توزیعی از بارهای مغناطیسی با چگالی بار J بر روی دو صفحه‌ی موازی قرار گرفته است. با استفاده از این فرض، میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط این حجم به صورت میدان حاصل از توزیع بارهای مغناطیسی محاسبه می‌شود. این مدل امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار میدان مغناطیسی را فراهم می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از این مدل با شبیه‌سازی المان محدود در پژوهش [۱۹] نشان داده است که این روش مدل‌سازی برای سیستم‌های MLP مدققت و کارایی بالایی دارد.

^۱Finite Element Method (FEM)



شکل ۹.۲: مدل بار مغناطیسی سطحی [۱۹]

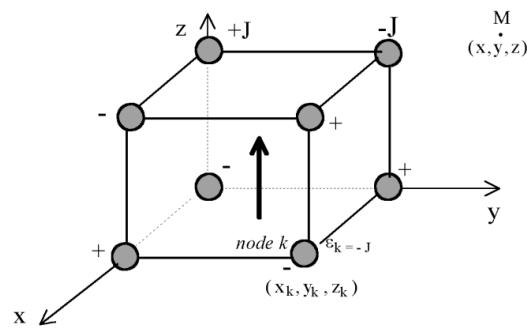
۲.۵.۲ مدل بار مغناطیسی نقطه‌ای

در روش بار نقطه‌ای برای تحلیل میدان مغناطیسی، فرض می‌شود که توزیع بار مغناطیسی در یک حجم به صورت متمرکز در هشت نقطه در گوشه‌های آن حجم قرار گرفته است. با این فرض، اثر مغناطیسی این جسم می‌تواند به صورت مجموع آثار هر یک از بارهای نقطه‌ای محاسبه شود. این رویکرد امکان محاسبه دقیق شدت میدان مغناطیسی و نیروی وارد بر یک جسم خارجی را فراهم می‌آورد. از طریق محاسبه میدان‌های ناشی از هر بار نقطه‌ای و جمع آنها، میدان مغناطیسی کل حاصل می‌شود و به این ترتیب، شدت میدان مغناطیسی ناشی از آهنربای دائمی به کمک این روش به طور دقیق محاسبه می‌گردد. در ادامه، معادلات مربوط به محاسبه شدت میدان مغناطیسی ناشی از هر بار نقطه‌ای ارائه شده است.

$$B_{xk} = \frac{\epsilon_k}{4\pi} \ln \left(-y_r + \sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2} \right), \quad (1.2)$$

$$B_{yk} = \frac{\epsilon_k}{4\pi} \ln \left(-x_r + \sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2} \right), \quad (2.2)$$

$$B_{zk} = \frac{\epsilon_k}{4\pi} \arctan \left(\frac{x_r y_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} \right), \quad (3.2)$$



شکل ۱۰.۲: مدل بار مغناطیسی نقطه‌ای [۱۹]

۳.۵.۲ مدل‌های مبتنی بر داده

در این روش‌ها، به جای مدل‌سازی دقیق ساختار فیزیکی دستگاه و استخراج معادلات دینامیکی آن، پارامترهای مورد نیاز مانند شدت میدان مغناطیسی از طریق داده‌های تجربی یا شبیه‌سازی المان محدود (FEM) تخمین زده می‌شوند. این رویکرد مبتنی بر داده نیازمند دسترسی به اطلاعات دقیق از سیستم واقعی یا شبیه‌سازی کامل آن است تا بتوان دقت و اعتبار تخمین‌ها را ارزیابی کرد. در پژوهش [۱۲]، برای تخمین شدت میدان مغناطیسی آرایه هالبخ دو بعدی از معادلات هارمونیک و سری فوریه استفاده شده است. تغییرات میدان مغناطیسی تولیدشده توسط این آرایه به صورت موجی سینوسی مدل‌سازی شده است، اما این روش تنها زمانی دقیق است که فرض شود سطح آرایه به صورت نامحدود ادامه دارد. برای حل این مشکل، آرایه به سه ناحیه مرکزی، کناری و گوشی‌ای تقسیم‌بندی شده و برای هر ناحیه هارمونیک‌های مجزا در نظر گرفته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که با استفاده از سه هارمونیک اول، می‌توان میدان مغناطیسی را در نواحی کناری و گوشی‌ای با دقت مناسبی تخمین زد.

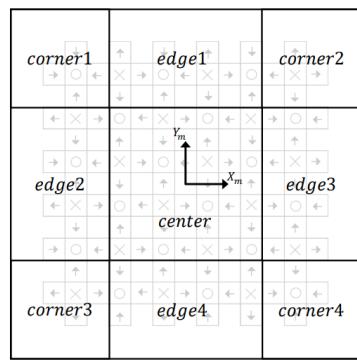


Figure 4.2: Regions under the 2D Halbach array, top view.

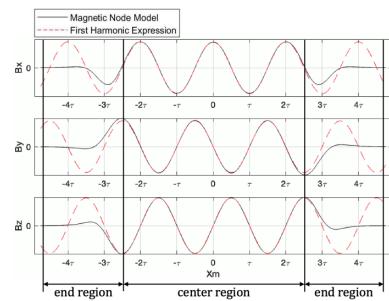


Figure 4.1: Magnetic flux density of the 2D Halbach array along $Y_m = \tau/2$.

[۱۲] (ب)

[۱۲] (ج)

شکل ۱۱.۲: مدل هارمونیک

فصل ۳

بحث و نتیجه‌گیری

این گزارش به صورت جامع به بررسی طراحی و ساخت موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی (MLPM) پرداخته و جنبه‌های مختلف این سیستم‌ها شامل معماری، طراحی آهنرباهای دائمی، سیستم‌های کنترلی و روش‌های مدل‌سازی را مورد تحلیل قرار داده است. هدف اصلی این تحلیل‌ها، شناسایی بهترین روش‌ها و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد این دستگاه‌ها بر اساس پژوهش‌های پیشین بوده است. در معماری دستگاه، بررسی‌ها نشان داد که استفاده از سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت به دلیل محدودیت‌های ذاتی مانند مشکلات مرتبط با اتصالات الکتریکی و خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها، راهکاری با کارایی کمتر محسوب می‌شود. در مقابل، استفاده از سیم‌پیچ‌های ثابت و آهنرباهای دائمی متحرک، به دلیل حذف محدودیت‌های فوق و بهبود عملکرد حرکتی بخش متحرک، به عنوان معماری بهینه و مناسب‌تر برای کاربردهای MLPM معرفی شد. در طراحی آهنرباهای دائمی، مقایسه بین آهنرباهای دیسکی و آرایه‌های هالبخ نشان داد که آرایه‌های هالبخ بهویژه در چینش‌های یک بعدی و دو بعدی، عملکرد بهتری از نظر تقویت میدان مغناطیسی دارند. این آرایه‌ها، از طریق خنثی کردن میدان در یک سمت و تقویت آن در سمت دیگر، قادر به تولید میدان مغناطیسی قوی‌تری هستند که امکان کنترل دقیق‌تر نیروها و جابه‌جایی‌ها را فراهم می‌آورد. آهنرباهای دیسکی هرچند از نظر طراحی ساده‌تر هستند، اما به دلیل ناپایداری و غیر یکنواختی میدان مغناطیسی، کارایی کمتری در سیستم‌های MLPM دارند. آرایه‌های دو بعدی هالبخ، هرچند مزیت‌های بسیاری در تقویت میدان مغناطیسی دارند، با چالش‌هایی همچون ایجاد نوسانات بیشتر در میدان همراه هستند که باید با استفاده از طراحی دقیق‌تر مدیریت شود. در حوزه کنترل‌ها، کنترل‌های کلاسیک نظیر PID به دلیل سادگی و کارایی اثبات‌شده، همچنان به عنوان گزینه‌ای

مناسب برای سیستم‌های MLP مطرح هستند. با این حال، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در صورتی که اطلاعات دینامیکی سیستم در دسترس باشد، کنترلرهای مبتنی بر مدل پیش‌بینی (MPC) و یا کنترلرهای مبتنی بر هوش مصنوعی همچون GRU به دلیل توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم و اعمال کنترل دقیق‌تر، از عملکرد بهتری برخوردارند. این روش‌های پیشرفته می‌توانند پایداری سیستم را افزایش داده و خطاهای ناشی از کنترل را کاهش دهند، بهویژه در کاربردهایی که نیاز به دقت بالا دارند.

كتاب نامه

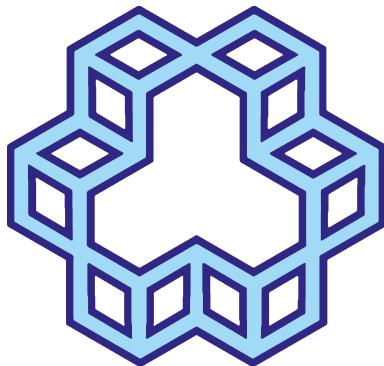
- [1] Browne, Jim J, Dubois, Didier, Rathmill, Keith, Sethi, Suresh, and Stecke, Kathrin. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine*, 2(2):114–117, 1984.
- [2] Guo, Liang, Zhang, He, Galea, Michael, Li, Jing, Lu, Wenqi, and Gerada, Chris. Analysis and design of a magnetically levitated planar motor with novel multilayer windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(8):1–9, 2015.
- [3] Zhang, Shengguo, Zhu, Yu, Mu, Haihua, Yang, Kaiming, and Yin, Wensheng. Decoupling and levitation control of a six-degree-of-freedom magnetically levitated stage with moving coils based on commutation of coil array. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 226(7):875–886, 2012.
- [4] Zhang, Shengguo, Dang, Xiaoping, Wang, Kai, Huang, Jingtao, Yang, Jingxian, and Zhang, Guoheng. An analytical approach to determine coil thickness for magnetically levitated planar motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(1):572–580, 2017.
- [5] Berkelman, Peter and Dzadovsky, Michael. Magnetic levitation over large translation and rotation ranges in all directions. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1):44–52, 2013.
- [6] Miyasaka, Muneaki and Berkelman, Peter. Magnetic levitation with unlimited omnidirectional rotation range. *Mechatronics*, 24(3):252–264, 2014.
- [7] Trakarnchaiyo, Chanuphon, Wang, Yang, and Khamesee, Mir Behrad. Design of a compact planar magnetic levitation system with wrench–current decoupling enhancement. *Applied Sciences*, 13(4):2370, 2023.
- [8] Zhu, Haiyue, Pang, Chee Khiang, and Teo, Tat Joo. Analysis and control of a 6 dof maglev positioning system with characteristics of end-effects and eddy current damping. *Mechatronics*, 47:183–194, 2017.

- [9] Zhu, Haiyue, Teo, Tat Joo, and Pang, Chee Khiang. Magnetically levitated parallel actuated dual-stage (maglev-pad) system for six-axis precision positioning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24(4):1829–1838, 2019.
- [10] Zhang, Xiaodong, Trakarnchaiyo, Chanuphon, Zhang, Heng, and Khamesee, Mir Behrad. Magtable: A tabletop system for 6-dof large range and completely contactless operation using magnetic levitation. *Mechatronics*, 77, 2021.
- [11] Xu, Zhenchuan, Wang, Yang, Wang, Jie, and Khamesee, Mir Behrad. Predictor-based model predictive control for maglev planar motor with a 2d halbach array mover. *Control Engineering Practice*, 141:105731, 2023.
- [12] Xu, Zhenchuan, Trakarnchaiyo, Chanuphon, Stewart, Curtis, and Khamesee, Mir Behrad. Modular maglev: Design and implementation of a modular magnetic levitation system to levitate a 2d halbach array. *Mechatronics*, 99, 2024.
- [13] Zhu, Haiyue, Teo, Tat Joo, and Pang, Chee Khiang. Design and modeling of a six-degree-of-freedom magnetically levitated positioner using square coils and 1-d halbach arrays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1):440–450, 2016.
- [14] Xu, Zhenchuan. *Design, Implementation, and Control of a Magnetic Levitated Planar Motor*. Thesis, 2024.
- [15] Proimadis, Ioannis, Custers, Coen HHM, Tóth, Roland, Jansen, JW, Butler, Hans, Lomonova, Elena, and Van den Hof, Paul MJ. Active deformation control for a magnetically levitated planar motor mover. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(1):242–249, 2021.
- [16] Rovers, JMM, Jansen, JW, and Lomonova, EA. Design and measurements of the double layer planar motor. in *2013 International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 204–211. IEEE.
- [17] Ou, Tiansheng, Hu, Chuxiong, Zhu, Yu, Zhang, Ming, and Zhu, Limin. Intelligent feedforward compensation motion control of maglev planar motor with precise reference modification prediction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(9):7768–7777, 2020.
- [18] Wang, Yang, Chen, Fuxiang, Zheng, Zhiyi, and Zeng, Lizhan. Magnet array of planar motor using permanent magnets with different magnetisation intensity and height. *IET Electric Power Applications*, 14(14):2772–2779, 2020.
- [19] Rui, Huang and Jian, Feng. Magnetic field analysis of permanent magnet array for planar motor based on equivalent magnetic charge method. in *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 3966–3970. IEEE.

Abstract

Magnetic levitation planar motors (MLPM) offer precise, contactless motion, making them ideal for applications requiring high-accuracy positioning, such as in manufacturing, automation, and robotics. However, designing and optimizing MLPM systems involves overcoming challenges related to system architecture, magnet configuration, control strategies, and modeling techniques, all of which significantly impact the performance and efficiency of these devices. This study examines four key aspects of MLPM systems. First, the architecture of the system is analyzed, with a focus on the choice between moving-coil and fixed-coil designs. The findings suggest that fixed-coil designs, where the magnets are placed on the moving component, reduce physical constraints such as electrical connections and improve cooling efficiency, making them more suitable for real-world applications. Second, the design of permanent magnets is explored, specifically comparing disc magnets with Halbach arrays. Halbach arrays, especially in two-dimensional configurations, are found to provide stronger, more concentrated magnetic fields with greater control precision, outperforming traditional magnet designs. In the third aspect, control strategies are evaluated, with classical PID controllers being compared to more advanced techniques like Model Predictive Control (MPC) and AI-based methods such as Gated Recurrent Units (GRU). While PID controllers are effective for basic applications, advanced control techniques leveraging system dynamics and machine learning demonstrate improved stability and reduced error in controlling MLPM systems. Finally, the study explores modeling approaches, contrasting analytical methods with numerical techniques like finite element modeling (FEM). The analysis reveals that while analytical models provide a foundational understanding, numerical simulations, particularly FEM, offer greater accuracy and flexibility in designing and validating complex MLPM systems. In conclusion, this research highlights the advantages of using fixed-coil architecture, Halbach magnet arrays, advanced control strategies, and numerical modeling techniques for optimizing MLPM performance, paving the way for their broader application in precision-driven industries.

Keywords Magnetic levitation, Planar motors, Halbach array, Model Predicting Control, Contactless operation



**K. N. Toosi University of Technology
Faculty of Electrical Engineering- Mechatronics Group**

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in Mechatronics Engineering

Analyzing Design and Implementation methods of Magnetically Levitated Planar Motors

By:

Alireza Amiri

Supervisors:

Mahdi Aliyari Shooredeli and Esmaeil Najafi

Summer 2024