

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

تدوین گزارشی مناسب برای ارائه‌ی دستاوردهای هر پژوهه و مراحل رسیدن به آن‌ها لازم است. اگر چه باید تمامی کارهای صورت گرفته در پژوهه به شکل مناسب در گزارش بیان گردد اما باید به این نکته نیز توجه شود که از بیان مسائل اضافی که ذهن خواننده را از هدف اصلی دور می‌کند اجتناب شود. این راهنمای، علاوه بر ارائه‌ی یک قالب نمونه برای تدوین گزارش پژوهه، پایان‌نامه و رساله دکتری که بر اساس دستور العمال دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ایجاد شده است، راهنمایی‌هایی نیز برای تدوین یک گزارش مناسب ارائه می‌دهد. برای تهییه‌ی این قالب از کلاس kntu-thesis و بسته‌ی زیپرشین استفاده شده است.

چکیده بخش بسیار مهمی از گزارش است که نمایی کلی از آنچه در گزارش بیان خواهد شد را به خواننده نشان می‌دهد. به طور کلی چکیده باید شامل سه بخش شود: اول از همه باید صورت مسئله به اختصار بیان گردد و سپس مشکلات اصلی که در مسیر پژوهه وجود داشته است بیان گردد و در نهایت نیز دستاوردهای حاصل شده از پژوهه بیان گردد که تمرکز اصلی نیز بر روی بخش سوم می‌باشد. توضیحات باید بیانگر نکات اصلی باشند اما اگر در گزارش روش نوینی برای بار اول ارائه گردیده، بهتر است جزئیات بیشتری از آن بیان گردد. چکیده ترجیحاً یک پاراگراف باشد که شامل حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ کلمه می‌شود. متن چکیده باید روان و سلیس باشد و از جملاتی با معنی و روشن استفاده گردد که خواننده را به خواندن ادامه‌ی گزارش ترغیب کند. چکیده متنی جدای از سایر بخش‌ها است و باید به تنها‌ی گویا و کامل باشد و از ذکر منابع و ارجاع به بخش‌های دیگر گزارش اجتناب شود. همچنین نداشتن غلط املایی و دستور زبانی در چکیده از اهمیت بالاتری نسبت به سایر بخش‌های گزارش برخوردار است. کلمات کلیدی که در انتهای چکیده فارسی و انگلیسی آورده می‌شود مبنایی برای طبقه‌بندی گزارش در مراکز اطلاعاتی هستند بنابراین باید کلمه‌ها یا عباراتی برای آن انتخاب شوند که ماهیت، محتوا و گرایش کار را به وضوح نشان دهند.

واژگان کلیدی ۵ کلمه یا عبارت، متناسب با عنوان، قالب پایان‌نامه، لاتک

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۱	۱ مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر
۳	۲.۱ مقدمه‌ای بر موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی
۵	فصل ۲: مروری بر مطالعات انجام شده
۵	۱.۲ مقدمه
۶	۲.۲ معما ری دستگاه های MLPМ
۶	۱.۲.۲ سیم پیچ های متحرک و آهنرباهای ثابت
۸	۲.۲.۲ آهنرباهای متحرک و سیم پیچ های ثابت
۱۰	۳.۲ ساختار آهنرباهای دائمی
۱۰	۱.۳.۲ استفاده از آهنرباهای دیسکی
۱۱	۲.۳.۲ آرایه‌ی هالباخ یک بعدی
۱۲	۳.۳.۲ آرایه هالباخ دو بعدی
۱۵	کتاب نامه

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.

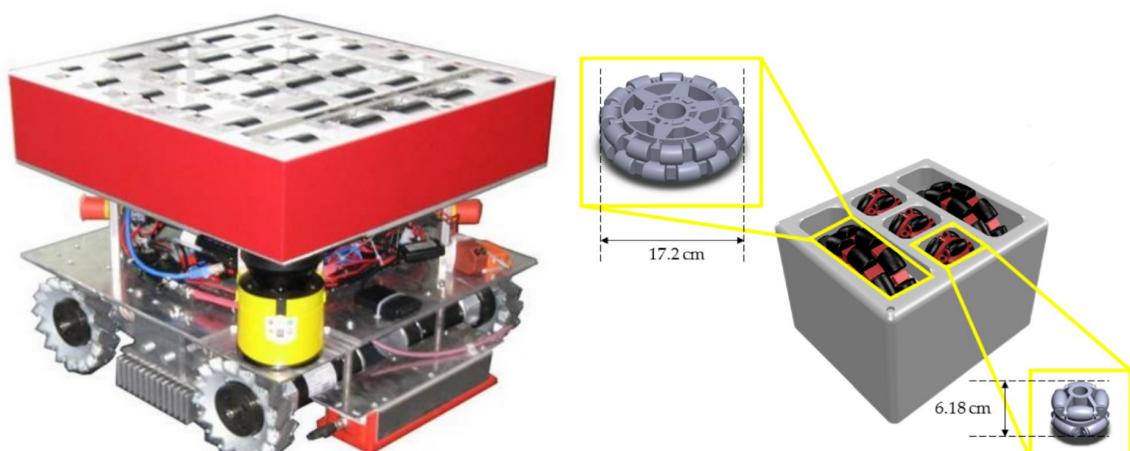
۱.۱ مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر

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

(آ) 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

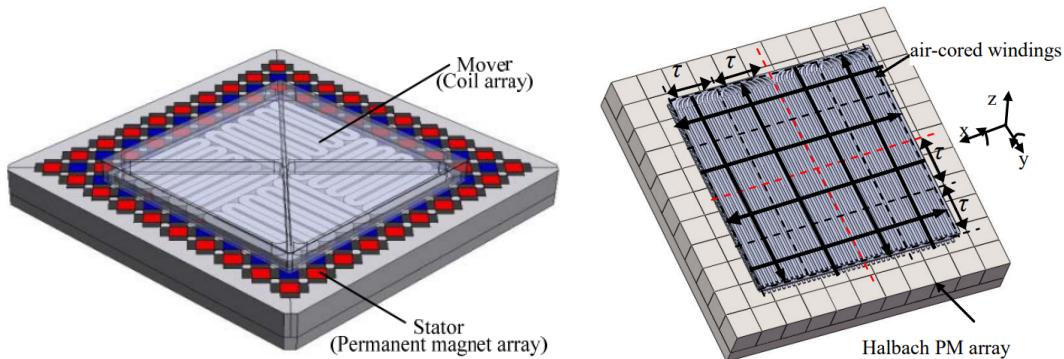
در این معماری، بخش استاتور از مجموعه‌ای آهنربای ثابت تشکیل شده که میدان مغناطیسی پایدار در محیط اطراف خود ایجاد می‌کند. بخش متحرک دستگاه شامل سیم‌پیچ‌هایی است که با عبور جریان الکتریکی از آن‌ها، میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌گردد. این جریان به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نیروی وارد بر آهنرباهای دائمی به‌دقت 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.

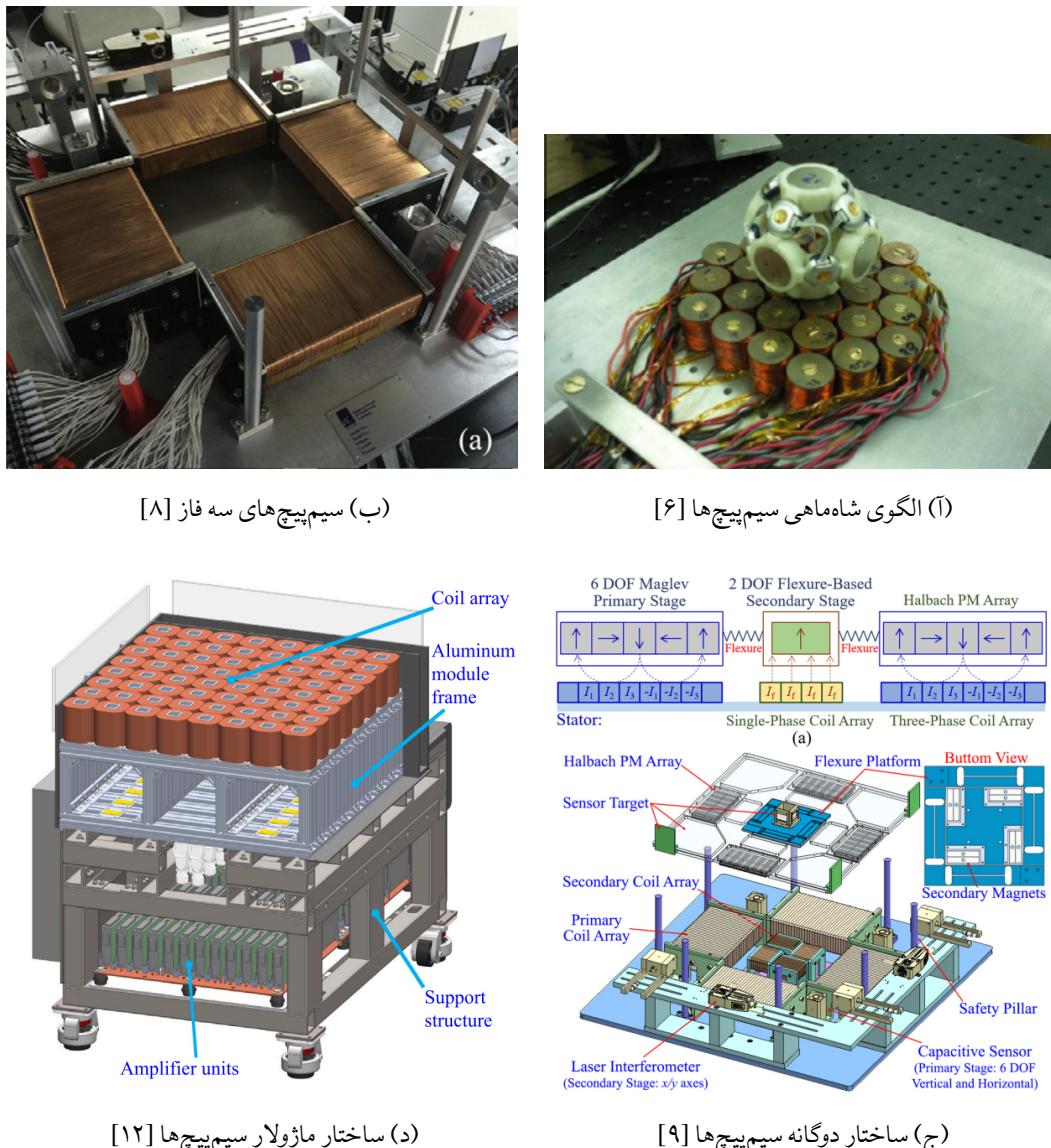
استفاده از سیمپیچ‌های سه‌فاز به جای تغذیه با جریان مستقیم، رویکردنی است که در پژوهش [۸] معرفی و اجرا شده است. در این ساختار، چهار آرایه از سیمپیچ‌های سه‌فاز، همان‌طور که در شکل (۲.۲.۲.ب) نشان داده شده است، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که نیروی مغناطیسی لازم را تولید کنند.

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.



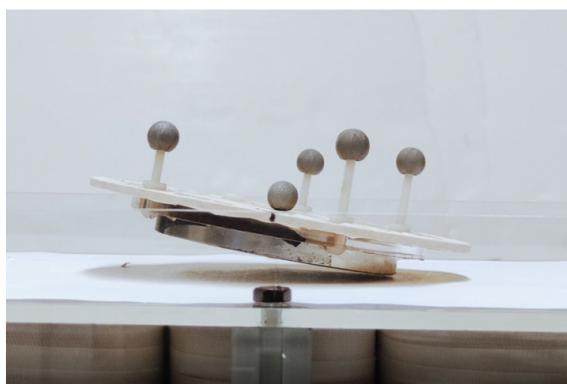
شکل ۲.۲: ساختارهای آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت

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]



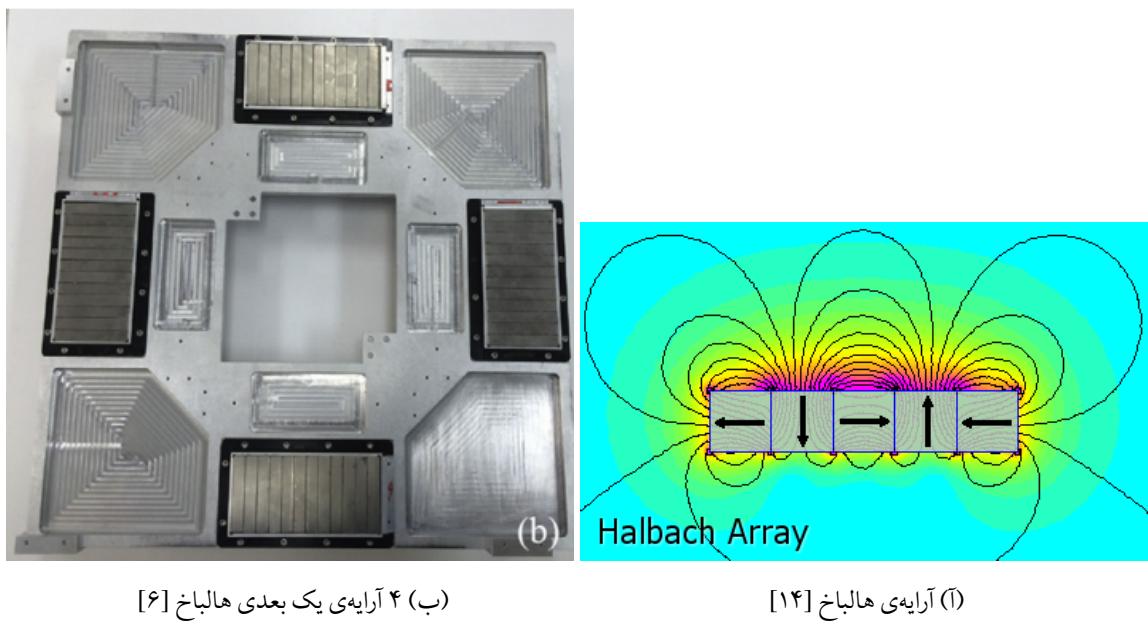
(ا) دو آهنربای دیسکی [۵]

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 MLPMS 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 هالبخ [۶]

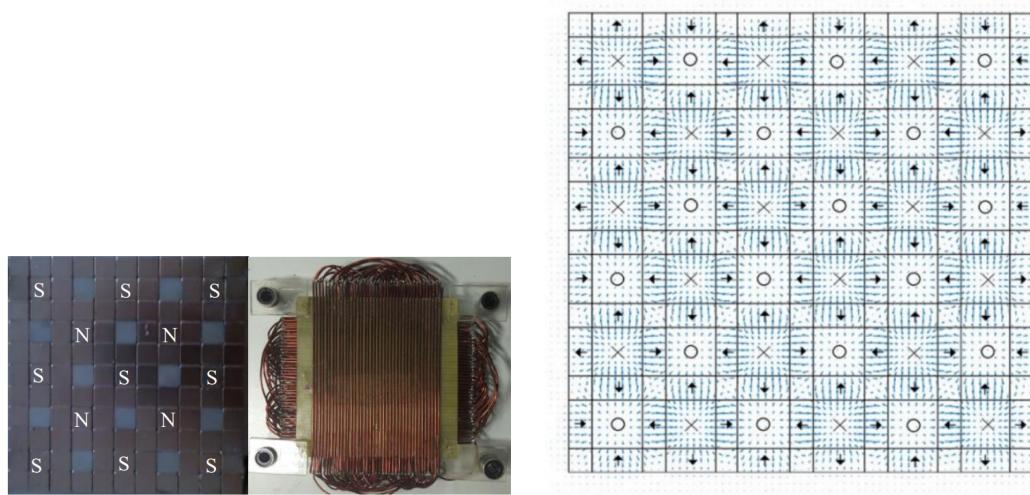
(ا) آرایه‌ی هالبخ [۱۴]

شکل ۴.۲: آرایه هالبخ یکبعدی

۳.۳.۲ آرایه هالبخ دو بعدی

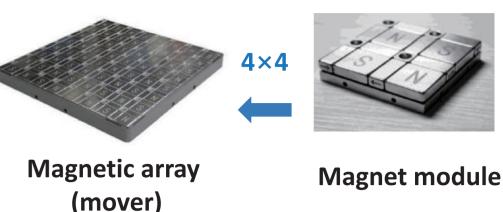
برای رفع محدودیت‌های آرایه‌ی هالبخ یک بعدی که تنها در یک راستا نیرو ایجاد می‌کند، ساختار جدیدی از آرایه‌ی دو بعدی ارائه شده است. این آرایه قادر است میدان مغناطیسی را در یک طرف صفحه حذف و در طرف دیگر تقویت کند. با این ویژگی، استفاده از چندین آرایه برای تأمین میدان مغناطیسی ثابت ضروری نخواهد بود. طراحی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

استفاده از آرایه‌ی هالبخ در پژوهش‌های مختلفی از جمله [۱۱، ۱۲] و [۱۵، ۱۶] نشان‌دهندهی عملکردی بهینه‌ی این معماری در بخش متحرک سیستم‌های MLP است. (شکل ۴.۵.۲) همچنین در پژوهش [۴] از این آرایه به عنوان بخشی از استاتور دستگاه بهره‌گیری شده است. در [۱۷] مأذول‌هایی 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.



(ج) آرایه هالباخ دو بعدی مازولار [۱۷]

[۲]



Magnetic array (mover) Magnet module

(ج) آرایه هالباخ دو بعدی مازولار [۱۷]

شکل ۵.۲: آرایه هالباخ دو بعدی

كتاب نامه

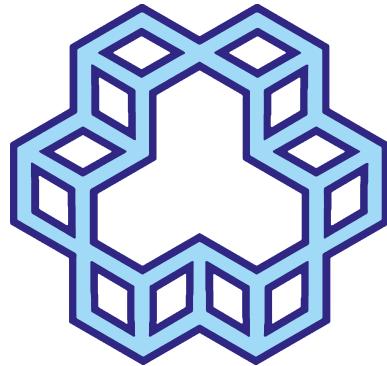
- [1] Browne, Jim J, Dubois, Didier, Rathmill, Keith, Sethi, Suresh, and Stecke, Kathrin. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine*, 2(2):114–117, 1984.
- [2] Guo, Liang, Zhang, He, Galea, Michael, Li, Jing, Lu, Wenqi, and Gerada, Chris. Analysis and design of a magnetically 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.

Abstract

This thesis studies on writing projects, theses and dissertations using kntu-thesis class.
It ...

Keywords Writing Thesis, Template, L^AT_EX, X_{\P}Persian



K. N. Toosi University of Technology
Faculty of ...- ... Group

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

Prepared template for writing projects, theses, and dissertations of K. N. Toosi university of technology

By:
Mohammad Sina Allahkaram

Supervisors:
First Supervisor and Second Supervisor

Advisors:
First Advisor and Second Advisor

Winter 2023