



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده برق - گروه مکترونیک

گزارش سمینار دوره کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکترونیک

عنوان

بررسی روش های طراحی و ساخت موتورهای
مسطح با استفاده از شناوری مغناطیسی

نگارش

علیرضا امیری

اساتید راهنما

دکتر مهدی علیاری شوره دلی و دکتر اسماعیل نجفی

شهریور ۱۴۰۳



چکیده

تدوین گزارشی مناسب برای ارائه‌ی دستاوردهای هر پروژه و مراحل رسیدن به آن‌ها لازم است. اگر چه باید تمامی کارهای صورت گرفته در پروژه 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 راهنما، علاوه بر ارائه‌ی یک قالب نمونه برای تدوین گزارش پروژه، پایان‌نامه و رساله‌ی دکتری که بر اساس دستورالعمل دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ایجاد شده است، راهنمایی‌هایی نیز برای تدوین یک گزارش مناسب ارائه می‌دهد. برای تهیه‌ی 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 پروژه وجود داشته است بیان گردد و در نهایت نیز دستاوردهای حاصل شده از پروژه 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 تنهایی گویا و کامل باشد و از ذکر منابع و ارجاع به بخش‌های دیگر گزارش اجتناب شود. همچنین نداشتن غلط‌املائی 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 حداکثر ۵ کلمه یا عبارت، متناسب با عنوان، قالب پایان‌نامه، لاتک

فهرست مطالب

| | | |
|----|--|--------|
| ۱ | مقدمه | فصل ۱: |
| ۱ | مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر | ۱.۱ |
| ۳ | مقدمه‌ای بر موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی | ۲.۱ |
| ۵ | مروری بر مطالعات انجام شده | فصل ۲: |
| ۵ | مقدمه | ۱.۲ |
| ۶ | معماری دستگاه‌های MLPM | ۲.۲ |
| ۶ | سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت | ۱.۲.۲ |
| ۸ | آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت | ۲.۲.۲ |
| ۱۰ | ساختار آهنرباهای دائمی | ۳.۲ |
| ۱۰ | استفاده از آهنرباهای دیسکی | ۱.۳.۲ |
| ۱۱ | آرایه‌ی هالباخ یک بعدی | ۲.۳.۲ |
| ۱۳ | 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 فناوری مغناطیسی معرفی شده و با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد این فناوری، کاربردهای آن در سایر صنایع نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

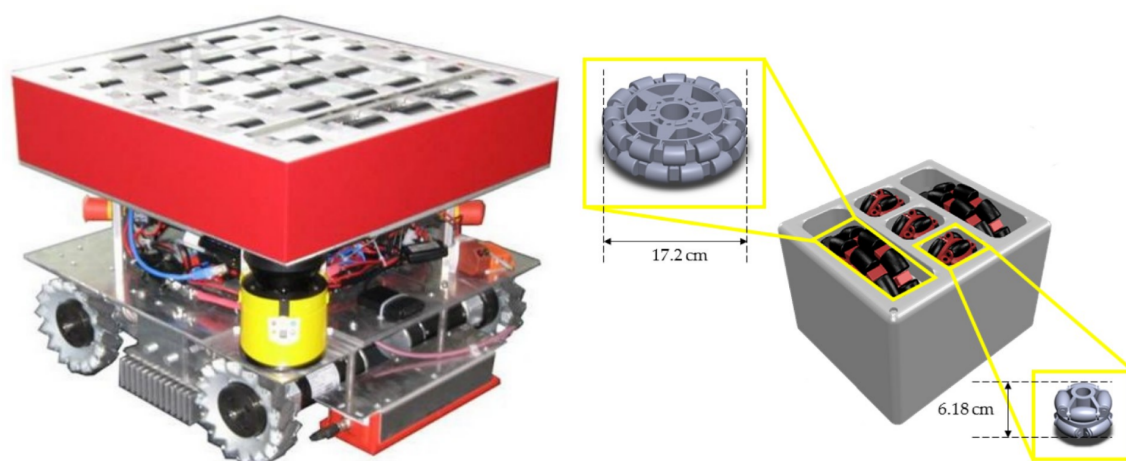
۱.۱ مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر

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 زمان‌بر بودن و هزینه‌های بالا، اغلب عملی نیست. تولید انعطاف‌پذیر به سامانه‌ای از ماشین‌آلات صنعتی اشاره دارد که به طور کنترل‌شده 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 دوراستای طولی و

عرضی، به عنوان نخستین گام در ارتقای خطوط تولید و افزایش انعطاف پذیری مطرح است و برای دستیابی به این هدف، روش های متعددی ارائه شده است.

یکی از این روش ها که در پژوهش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته، استفاده از چرخ های چندجهته است که می تواند راهکاری مناسب برای کنترل موقعیت محصولات باشد. در این سازوکار، با تغییر وضعیت چرخ های مختلف و تنظیم جهت چرخش آنها، امکان جابه جایی محصولات در راستاهای طولی و عرضی، و همچنین چرخش حول محور عمودی فراهم می شود که به طور مؤثری به افزایش انعطاف پذیری خطوط تولید کمک می کند. شکل ۱.۱.آ. استفاده از ربات های چرخ دار که قادر به جابه جایی در محیط های مسطح هستند نیز به عنوان یک راهکار برای انتقال محصولات در برخی صنایع معرفی شده است. شکل ۱.۱.ب. با این حال، فناوری های مبتنی بر چرخ به دلیل تماس فیزیکی ناگزیر میان محصولات و ماشین آلات با محدودیت هایی روبه رو هستند که استفاده از آنها را در صنایع خاص دشوار می کند. یکی از چالش های اصلی این روش، وجود اصطکاک میان چرخ ها و محصولات است که در گام اول، به عنوان عاملی غیرقابل پیش بینی در حرکت محصولات عمل کرده و دقت جابه جایی را به طور چشمگیری کاهش می دهد. علاوه بر این، اصطکاک موجود، سرعت و شتاب حرکت محصولات را محدود کرده و از عملکرد بهینه جلوگیری می کند. یکی دیگر از محدودیت های سیستم های چرخ دار، ساختار مکانیکی آنها است که می تواند باعث ایجاد گرد و غبار در محیط شود و به همین دلیل در صناعی که نیاز به فضای بدون آلودگی یا خلاء دارند، نمی توان از این فناوری استفاده کرد.



(ب) استفاده از ربات های چرخ دار

(آ) استفاده از چرخ های چند جهته

شکل ۱.۱: طراحی های تولید انعطاف پذیر مبتنی بر چرخ

در مقابل، موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی^۱ توانسته‌اند بسیاری از این محدودیت‌ها را برطرف 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 اعمال‌شده به جسم متحرک از طریق میدان‌های مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در سیم‌پیچ‌ها تولید می‌شود و به همین دلیل، می‌توان با دقت بالایی میزان نیروی واردشده 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 متحرک 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 به‌صورت 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، درحالی‌که در حالت دافعه، نیرو از پایین به جسم وارد شده و آن را به سمت بالا دفع می‌کند. در صورتی‌که 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، به‌طوری‌که عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچ‌ها میدان مغناطیسی ایجاد کرده و تنظیم این جریان‌ها باعث تغییر در شدت میدان و نیروی وارده 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 متحرک 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، به دلیل 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 به گونه‌ای طراحی شده‌اند که میدان مغناطیسی را به طور متمرکز در یک سمت تقویت کنند و در نتیجه، نیروی مغناطیسی بیشتری به جسم وارد شود. ساختارهای آرایه هالباخ یک بعدی و دوبعدی در تحقیقات پیشین به طور گسترده 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 به طور مستقیم بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند و باید به دقت مورد بررسی و تنظیم قرار گیرند.

¹Halbach array

فصل ۲

مروری 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 آهنرباهای دائمی و الکتریکی: مرور انواع آهنرباهای الکتریکی و چینش‌های مختلف آهنرباهای 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 MLPM

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 با شدت کنترل شده استفاده می‌شود. 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 MLPM ارائه می‌شود که در ادامه بررسی می‌شوند.

۱.۲.۲ سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت

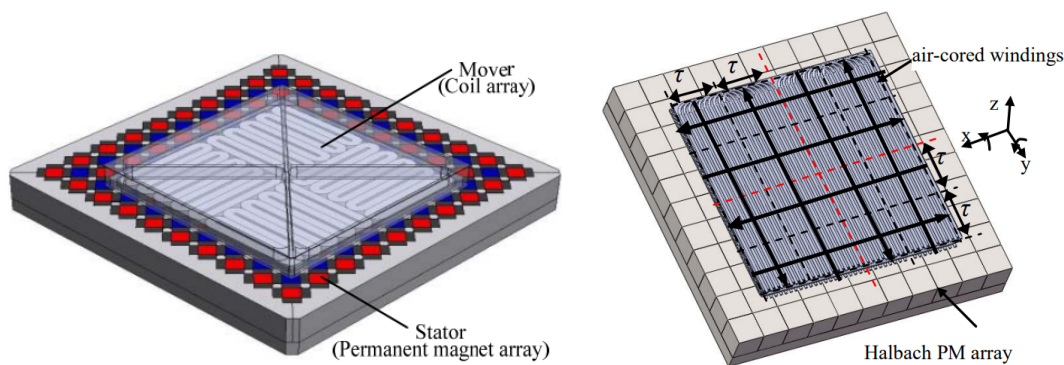
در این معماری، بخش استاتور از مجموعه‌ای آهنربای ثابت تشکیل شده که میدان مغناطیسی پایدار در محیط اطراف خود ایجاد می‌کنند. بخش متحرک دستگاه شامل سیم‌پیچ‌هایی است که با عبور جریان الکتریکی از آن‌ها، میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌گردد. این جریان به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نیروی وارد بر آهنرباهای دائمی به دقت کنترل شود. طبق قانون سوم نیوتن، نیروهای وارد بر سیم‌پیچ‌ها و آهنرباهای دائمی به عنوان عمل و عکس‌العمل رفتار می‌کنند؛ به این ترتیب، نیرویی که به آهنرباها 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 ارائه‌شده 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 راستاها فراهم می‌نماید. در شکل ۱.۲.آ ساختار 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.



(آ) استفاده از سیم‌پیچ‌های چندلایه [۲]

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

شکل ۱.۲: ساختار سیستم‌های MLPM 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 به‌طور 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 متحرک 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 متحرک می‌باشد. این ساختار نوین که در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته، مشکلات معماری‌های پیشین مانند محدودیت جابه‌جایی متحرک 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 تعبیه‌شده در بخش متحرک را فراهم کرده است که دقتی در حدود ۱ درجه در زوایای حرکت و ۱ میلی‌متر در موقعیت متحرک به دست آورده است [۵]. در ادامه این پژوهش، ساختاری جدید برای بخش متحرک ارائه شده که شامل ۶ آهنربای دیسکی با چینش کروی و فواصل ثابت می‌باشد. این طراحی توانسته است چرخش آزادانه متحرک 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.

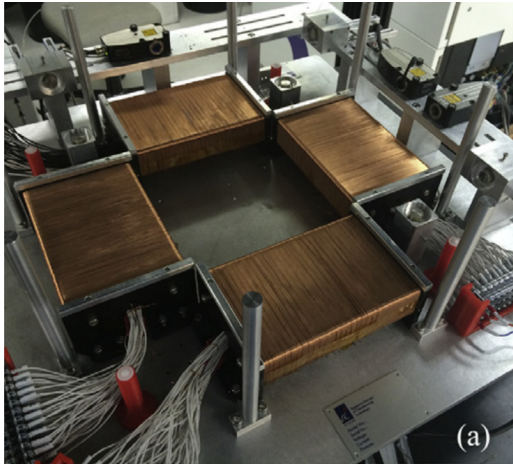
استفاده از سیم‌پیچ‌های سه‌فاز به جای تغذیه با جریان مستقیم، رویکردی است که در پژوهش [۸] معرفی و اجرا شده است. در این ساختار، چهار آرایه از سیم‌پیچ‌های سه‌فاز، همان‌طور که در شکل (۲.۲.۲ ب) نشان داده شده است، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که نیروی مغناطیسی لازم را تولید کنند.

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 متحرک در صفحه، از سیم‌پیچ‌های تک‌فاز بهره‌برده می‌شود. شکل (۲.۲.۲ ج)

استفاده از سیم‌پیچ‌های ماژولار در طراحی استاتورهایی با چینش دوبعدی، رویکردی است که در دستگاه‌های MagTable و MagFloor از دانشگاه واترلو پیاده‌سازی شده است [۱۰، ۱۱، ۱۲] در این طراحی، ماژول‌هایی از سیم‌پیچ‌های با سطح مقطع مربع به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با قرار گرفتن در کنار یکدیگر، فضای کاری نامحدودی برای جابه‌جایی متحرک 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

¹Herringbone pattern

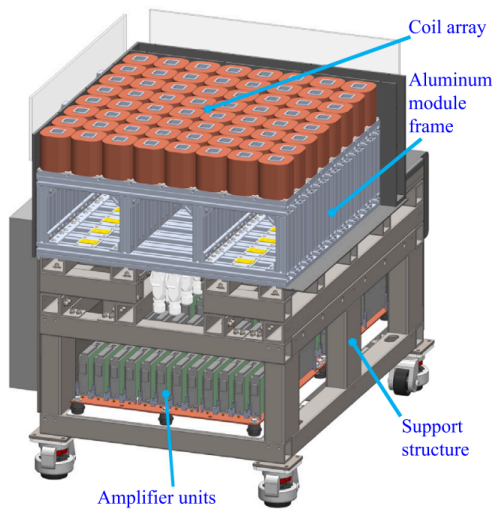
میدان مغناطیسی بیشتری ایجاد کنند، که این مزیت عملکرد کلی سیستم را بهبود می بخشد.



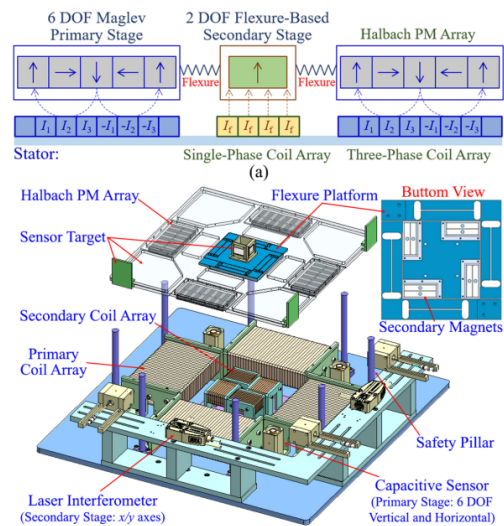
(ب) سیم پیچ های سه فاز [۸]



(ā) الگوی شاه ماهی سیم پیچ ها [۶]



(د) ساختار ماژولار سیم پیچ ها [۱۲]



(ج) ساختار دوگانه سیم پیچ ها [۹]

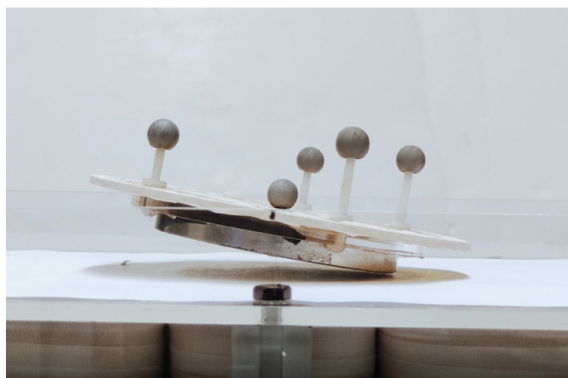
شکل ۲.۲: ساختارهای آهنرباهای متحرک و سیم پیچ های ثابت

۳.۲ ساختار آهنرباهای دائمی

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، میدان مغناطیسی کنترل شده توسط آهنرباهای الکتریکی ایجاد می شود و بر اثر تعامل این میدان متغیر با میدان ثابت آهنرباهای دائمی، نیرویی بر بخش متحرک دستگاه وارد می شود که حرکت آن را در راستاهای مختلف ممکن می سازد. بنابراین، طراحی بهینه آهنرباهای دائمی، به ویژه برای تولید میدان مغناطیسی قوی تر با کمترین وزن، در بهبود کارایی دستگاه نقش کلیدی دارد. در این بخش، طراحی های مختلف آهنرباهای دائمی که در پژوهش های پیشین ارائه شده اند، با تمرکز بر بهینه سازی این ویژگی ها بررسی می شوند.

۱.۳.۲ استفاده از آهنرباهای دیسکی

استفاده از آهنرباهای دیسکی رویکردی ساده و مؤثر برای ایجاد میدان مغناطیسی دائمی محسوب می شود. با انتخاب موادی با خاصیت مغناطیسی بالا، مانند آهنرباهای نئودیمیومی، می توان 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 به کارگیری ۶ آهنربای دیسکی، امکان چرخش آزادانه حول سه محور فراهم شده است. (شکل ۱.۳.۲) در پژوهش [۱۰] نیز از ترکیب های متفاوتی از آهنرباهای دیسکی برای بخش متحرک دستگاه استفاده شده است، که این ترکیب ها شامل تغییر اندازه ی 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 نمونه ای موفق از این رویکرد معرفی شده است. این طراحی، با وجود سادگی معماری، توانسته نتایج رضایت بخشی را از نظر عملکرد ارائه دهد و نشان می دهد که استفاده از آهنربای دیسکی، علاوه بر سادگی، می تواند در کاربردهای مختلف به ویژه در سیستم های با نیاز به دقت بالا و چند درجه آزادی، کارآمد باشد. (شکل (۱.۳.۲ ب))



(ب) یک آهنربای دیسکی [۷]



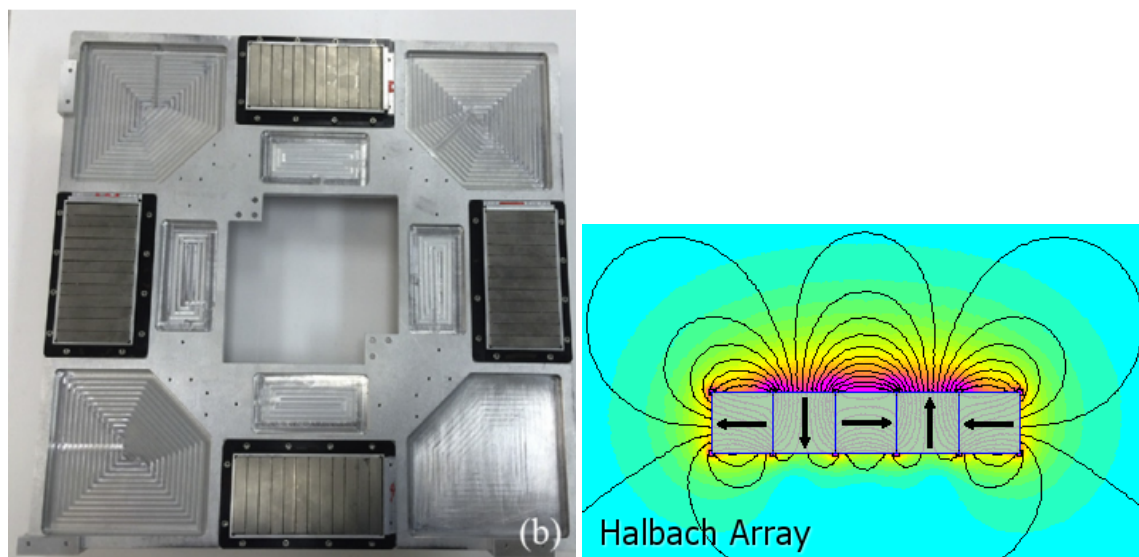
(ا) دو آهنربای دیسکی [۵]

شکل ۳.۲: استفاده از آهنربای دیسکی در طراحی متحرک

۲.۳.۲ آرایه‌ی هالباخ یک بعدی

آرایه‌ی هالباخ^۱ به عنوان چپشی 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 MLPM توانایی آن در تولید شدت میدان مغناطیسی بیشتر است. به همین دلیل، این چپش در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، استفاده از تنها یک آرایه‌ی یک بعدی هالباخ 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 هالباخ یک بعدی 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 هالباخ در معماری این بخش به کار رفته‌اند.

¹Halbach Array



(ب) آرایه‌ی یک بعدی هالباخ [۶]

(آ) آرایه‌ی هالباخ [۱۴]

شکل ۴.۲: آرایه هالباخ یک بعدی

کتاب نامه

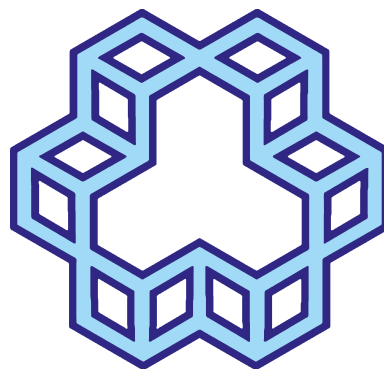
- [1] Browne, Jim J, Dubois, Didier, Rathmill, Keith, Sethi, Suresh, and Steck, Kathrin. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine*, 2(2):114–117, 1984.
- [2] Guo, Liang, Zhang, He, Galea, Michael, Li, Jing, Lu, Wenqi, and Gerada, Chris. Analysis and design of a magnetically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

Abstract

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

Keywords Writing Thesis, Template, \LaTeX , \XeTeX 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