

دانشکده مهندسی برق

**رساله مقطع کارشناسی‌ارشد مهندسي مکاترونیک**

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

علیرضا امیری

**استاد راهنما:**

دکتر مهدی علیاری شوره‌دلی، دکتر اسماعیل نجفی

**خرداد ماه 1403**



**چکيده**

در صنایع تولیدی انعطاف‌پذیر، سیستم‌های شناوری مغناطیسی به دلیل عدم تماس فیزیکی بین سطوح، 6 درجه آزادی و سرعت و دقت بالا، جایگزینی مناسب برای نوارهای نقاله محسوب می‌شوند. این سیستم‌ها به طور فزاینده‌ای در موتورهای مسطح به کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش، روش‌های مختلف طراحی و ساخت سیستم‌های شناوری مغناطیسی برای موتورهای مسطح بررسی می‌شوند.

آرایش آهنربا، انتخاب جنس برای قسمت متحرک و ثابت سیستم، و روش‌های مدل‌سازی از جمله عوامل کلیدی در طراحی و ساخت این سیستم‌ها هستند. آرایه‌های هالباخ یک‌بعدی یا دو‌بعدی، آهنربای دیسکی، و ترکیب آهنربا در قسمت‌های متحرک و ثابت، از جمله گزینه‌های موجود برای آرایش آهنربا به شمار می‌روند.

مدل‌سازی سیستم‌های شناوری مغناطیسی با استفاده از روش‌های تحلیلی (معادلات نیروی لورنتز و ماکسول)، روش‌های عددی (روش المان محدود)، روش‌های تخمین مدل (هارمونیک، بار ذره‌ای، بار صفحه‌ای) و روش‌های مبتنی بر داده (یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی) امکان‌پذیر است. در این پژوهش، به بررسی و مقایسه این روش‌ها پرداخته می‌شود

کليد واژه: شناوری مغناطیسی، موتور مسطح، تولید انعطاف‌پذیر، آرایه هالباخ، contactless operation ،

###### فهرست مطالب

عنوان صفحه

[فهرست شکل‏ها ‌د](#_Toc168824461)

[فصل 1- مقدمه 5](#_Toc168824462)

[1-1- پيشگفتار 5](#_Toc168824463)

[1-2- مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر 5](#_Toc168824464)

[1-3- مقدمه‌ای بر شناوری مغناطیسی 7](#_Toc168824465)

[فصل 2- تاریخچه 10](#_Toc168824466)

[2-1- طراحی سیستم‌ها 10](#_Toc168824467)

[2-1-1- استفاده از آهنربای دیسکی در طراحی متحرک 10](#_Toc168824468)

[2-1-2- استفاده از آرایه هالباخ یک بعدی در طراحی متحرک 11](#_Toc168824469)

[2-1-3- استفاده از آرایه هالباخ دو بعدی در طراحی متحرک 12](#_Toc168824470)

[فهرست مرجع‏ها 13](#_Toc168824471)

فهرست شکل‏ها

عنوان صفحه

[شکل 1 Flex conveyor 6](file:///D:\University\KNTU\Semester%202\Seminar\Thesis\تمرین%20نوشتاری2.docx#_Toc168824472)

[شکل 2 omnidirectional wheels 6](#_Toc168824473)

[شکل 3 طراحی سیستم جابه‌جایی با شناوری مغناطیسی 7](#_Toc168824474)

[شکل 4 الف) ساختار نوع 1، استاتور ساخته شده از سیم‌پیچ ب) ساختار نوع 2، متحرک ساخته شده از سیم‌پیچ 8](#_Toc168824475)

[شکل 5 انواع سیستم های شناوری مغناطیسی با آهنربای دیسکی 11](#_Toc168824476)

[شکل 6 MLPM با 4 آرایه هالباخ یک بعدی 11](#_Toc168824477)

[شکل 7 MagPad 12](#_Toc168824478)

# فصل 1- مقدمه

در این فصل، ابتدا مقدمه‌ای درباره‌ی تولید انعطاف‌پذیر بیان شده و چرایی استفاده از این روش در صنایع مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، پس از معرفی فناوری‌های موجود برای پیاده‌سازی این شیوه‌ی تولید، ویژگی‌ها و مزایا و معایب هر یک از آنها ارزیابی می‌شوند. در نهایت در راستای هدف این پژوهش، ساختارهای مبتنی بر شناوری مغناطیسی در بخش نهایی معرفی شده و با توجه به ویژگی‌های انحصاری این فناوری، موارد استفاده‌ی آن در صنایع دیگر نیز ذکر می‌شوند.

## 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 انتقال 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 به‌طور کنترل‌شده قادر به پردازش مقدار متوسطی از محصولات به‌صورت هم‌زمان هستند. 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 انتقال است تا کنترل دقیق‌تری بر محصولات در جریان تولید اعمال شود. امکان جابه‌جایی محصولات در دو راستای طولی و عرضی، به‌عنوان 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 به‌طور مؤثری به افزایش انعطاف‌پذیری خطوط تولید کمک می‌کند. استفاده از ربات‌های چرخ‌دار که قادر به جابه‌جایی در محیط‌های مسطح هستند نیز به‌عنوان یک راهکار برای انتقال محصولات در برخی صنایع معرفی شده است. با این‌ حال، فناوری‌های مبتنی‌ بر چرخ به‌ دلیل تماس فیزیکی ناگزیر میان محصولات و ماشین‌آلات با محدودیت‌هایی روبه‌رو 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، به‌عنوان عاملی غیرقابل‌ پیش‌بینی در حرکت محصولات عمل کرده و دقت جابه‌جایی را به‌طور 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 چرخ‌دار، ساختار مکانیکی آن‌ها است که می‌تواند باعث ایجاد گرد و غبار در محیط شود و به همین دلیل در صنایعی که نیاز به فضای بدون آلودگی یا خلا دارند، نمی‌توان از این فناوری استفاده کرد.

در مقابل، موتورهای مسطح مبتنی‌ بر شناوری مغناطیسی 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.

## مقدمه‌ای 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 نگه‌دارند. این نیرو می‌تواند به دو شکل جاذبه یا دافعه اعمال شود. در حالت جاذبه‌ای، نیروی مغناطیسی از بالا به جسم وارد شده و نیروی جاذبه زمین را خنثی می‌کند، درحالی‌که در حالت دافعه، نیرو از پایین به جسم وارد شده و آن را به سمت بالا نگه می‌دارد. در صورتی‌که جسم فقط دارای خاصیت رسانایی باشد، تنها امکان جذب‌شدن 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: یا آهنرباهای الکتریکی در بخش استاتور قرار می‌گیرند و بخش متحرک از آهنرباهای دائمی ساخته می‌شود، یا برعکس، استاتور شامل آهنرباهای دائمی است و آهنرباهای 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" استفاده می‌شود. این آرایه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که میدان مغناطیسی را به‌طور متمرکز 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 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 به‌طور مستقیم بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند و باید به‌دقت مورد بررسی و تنظیم قرار گیرند.

درباره‌ی

# تاریخچه

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.

طراحی سیستم‌ها

### 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 (استاتور) و متحرک (Mover) تشکیل شده‌اند، امکان تغییر در طراحی و محل قرارگیری آهنرباهای الکتریکی و دائمی وجود دارد. نیروی مغناطیسی وارد بر بخش متحرک می‌تواند به‌صورت 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 به بررسی هر یک پرداخته خواهد شد.

#### سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت

در این معماری بخش استاتور دستگاه از مجموعه‌ای از آهنرباهای ثابت تشکیل می‌شود که بتوانند میدان مغناطیسی ثابتی را در فضای اطراف خود ایجاد کنند. اما بخش متحرک سیستم، از تعدادی سیم‌پیچ‌ تشکیل می‌شود که با عبور جریان از آنها‌، میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌شود که با تنظیم این جریان‌، نیروی وارد شده به آهنرباهای دائمی کنترل می‌شود. در نتیجه، به دلیل آنکه نیروهای وارد شده به سیم‌پیچ‌ها و آهنرباهای دائمی از جنس عمل و عکس‌العمل هستند، بنابراین طبق قانون سوم نیوتن مقدار آنها برابر بوده و در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند. بنابراین با وارد شدن نیرو به آهنرباها از طرف سیم‌پیچ، خود سیم‌پیچ نیز دفع می‌شوند.

در پژوهش انجام شده در RN49 از ساختاری متشکل از سیم‌پیچ‌های چند لایه‌ متعامد در بخش متحرک استفاده شده است به طوری که لایه‌ی اول از این سیم‌پیچ‌ها در راستای x و z نیرو وارد می‌کنند و سیم‌پیچ‌های لایه‌ی دوم این نیرو را در راستاهای y و z وارد می‌کنند. جداسازی نیروهای وارد شده در دو جسم می‌تواند به کنترل سیستم کمک کند. همچنین به دلیل تفاوت فاصله‌ی این لایه‌ها با استاتور، نیروهای ناشی از هر لایه با یکدیگر تفاوت دارند که راه‌حل پیشنهادی در این پژوهش، افزایش ضخامت لایه‌های با فاصله‌ بیشتر است. اما به دلیل تفاوت ضخامت‌های این دو لایه و مشکلاتی که در فرایند تولید ایجاد می‌شود، ساختاری متشکل از سه لایه ارائه شده است که می‌تواند نیروی تولیدشده را افزایش دهد و همزمان، ضخامت یکسانی از سیم‌پیچ‌ها در هر راستا داشته باشد. در شکل ساختار این دستگاه نمایش داده شده است.

در پژوهش RN38، بخش متحرک از یک لایه سیم‌پیچ با چینش متعامد تشکیل شده که قابلیت اعمال نیرو در سه راستا را فراهم می‌سازد. در ادامه، پژوهش RN14 روشی تحلیلی برای بهینه‌سازی ضخامت این سیم‌پیچ‌ها ارائه کرده است که با در نظر گرفتن معیارهای مختلف، به بهبود عملکرد سیستم می‌پردازد. شکل این ساختار را نمایش داده است.

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.

#### آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت

معماری دیگری که برای ساخت دستگاه‌های MLPM ارائه شده، قرار دادن سیم‌پیچ‌ها در استاتور دستگاه و طراحی متحرک با استفاده از آهنرباهای دائمی است. در این ساختار جدید که در پژوهش‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است، مشکلات پیشین مانند محدودیت در جابه‌جایی متحرک به دلیل اتصالات فیزیکی و یا خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها برطرف شده و عملکرد بهتری حاصل می‌شود. ساختار

در پژوهش RN7، استاتوری با استفاده از سیم‌پیچ‌ها طراحی و اجرا شده است که وارد کردن نیروی مغناطیسی به دو آهنربای دیسکی که در بخش متحرک تعبیه شده‌اند، می‌تواند خطایی به مقدار 1 در زوایای حرکت و 1 میلی‌متر در موقعیت متحرک دست یابد. همچنین در ادامه‌ی این پژوهش‌ با ارائه‌ی ساختار جدیدی برای بخش متحرک، با استفاده از 6 آهنربای دیسکی که در چینشی کروی شکل با فواصل ثابت قرار گرفته‌اند چرخش آزادانه‌ی متحرک حول سه محور به دست آمده است.RN39

استفاده از سیم‌پیچ‌های سه‌فاز به‌جای تغذیه با جریان مستقیم، رویکردی است که در پژوهش RN24 معرفی و اجرا شده است. در این ساختار، چهار آرایه از سیم‌پیچ‌های سه‌فاز، همان‌طور که در تصویر 1 نشان داده شده است، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که به‌طور هماهنگ نیروی مغناطیسی لازم را تولید کنند.

به ‌منظور کاهش هزینه‌ی محاسباتی در جابه‌جایی‌های طولانی، پژوهش RN32 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 بهره برده می‌شود.

استفاده از سیم‌پیچ‌های ماژولار در طراحی استاتورهایی با چینش دوبعدی، رویکردی است که در دستگاه‌های MagTable و MagFloor از دانشگاه واترلو پیاده‌سازی شده است (RN8, RN30, RN10). در این طراحی، ماژول‌هایی از سیم‌پیچ‌های با سطح مقطع مربع به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که با قرار گرفتن در کنار یکدیگر، فضای کاری نامحدودی برای جابه‌جایی متحرک فراهم می‌کنند. همچنین، پژوهش RN8 نشان داده است که آهنرباهای با سطح مقطع مربع، در مقایسه با سیم‌پیچ‌های دایروی با جریان الکتریکی مشابه، می‌توانند شدت میدان مغناطیسی بیشتری ایجاد کنند، که این مزیت عملکرد کلی سیستم را بهبود می‌بخشد.

### ساختار آهنرباهای دائمی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، میدان مغناطیسی کنترل‌شده 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.

#### آهنربای 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 RN7 از دو آهنربای دیسکی جهت تأمین میدان مغناطیسی ثابت استفاده شده است. همچنین در پژوهش RN39، با به‌کارگیری ۶ آهنربای دیسکی، امکان چرخش آزادانه حول سه محور فراهم شده است. در پژوهش RN8 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 RN62 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.

#### آرایه‌ی هالباخ یک بعدی

آرایه‌ی هالباخ به‌عنوان چینشی از آهنرباهای دائمی تعریف می‌شود که در آن جهت مغناطیس‌شوندگی هر آهنربا با آهنربای مجاور خود ۹۰ درجه تفاوت دارد. این آرایه به‌طور خاص قادر است میدان مغناطیسی در یک سوی آرایه را خنثی کرده و در سوی دیگر میدان را به میزان تقریبی ۱.۴ برابر افزایش دهد.

مزیت این ساختار در طراحی سیستم‌های MLPM، توانایی آن در تولید شدت میدان مغناطیسی بیشتر است. به‌همین‌دلیل، این چینش در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

با این حال، استفاده از تنها یک آرایه‌ی یک‌بعدی هالباخ به‌تنهایی نمی‌تواند نیرویی در دو راستای افقی ایجاد کند. لذا معمولاً از تعداد بیشتری از این آرایه‌ها در ساختار متحرک استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، در پژوهش‌های RN27 و RN24 از چهار آرایه‌ی هالباخ 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 RN39، مشابه آنچه که در بخش استاتور پیاده‌سازی شده بود، از ساختار دوگانه‌ای در بخش متحرک بهره‌برداری شده است، به‌گونه‌ای که دو مجموعه چهارگانه از آرایه‌های هالباخ در معماری این بخش به‌کار رفته‌اند.

#### آرایه هالباخ دوبعدی

برای رفع محدودیت‌های آرایه‌ی هالباخ یک‌بعدی که تنها در یک راستا نیرو ایجاد می‌کند، ساختار جدیدی از آرایه‌ی دوبعدی 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 دوبعدی در بسیاری از پژوهش‌ها برای بخش‌های متحرک یا استاتور سیستم‌های MLPM به کار گرفته شده است.

استفاده از آرایه‌ی هالباخ در پژوهش‌های مختلفی از جمله RN10، RN30، RN55 و RN26 نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهینه‌ی این معماری در بخش متحرک سیستم‌های MLPM است. همچنین در پژوهش RN14، از این آرایه به عنوان بخشی از استاتور دستگاه بهره‌گیری شده است. در RN61، ماژول‌هایی برای ساخت این آرایه استفاده شده و در RN49، برای تشکیل آرایه از قطعات آهنی در فضای خالی میان آن استفاده شده است؛ اما این رویکرد باعث ایجاد خطا در دقت میدان مغناطیسی شده است. علاوه بر این، در پژوهش RN28، طراحی جدیدی با آهنرباهایی با میزان مغناطیس‌شوندگی و ارتفاع متفاوت پیشنهاد شده است.

### طراحی کنترلر

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، سیستم‌های شناوری مغناطیسی ذاتاً ناپایدار هستند و برای دستیابی به پایداری، به کنترلری با عملکرد دقیق و خطای کم نیاز است. در پژوهش‌های مختلف، از کنترلرهای گوناگونی برای این سیستم‌ها بهره گرفته شده است؛ از جمله کنترلرهای کلاسیک نظیر PID، کنترلرهای مدرن مانند کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل (MPC) و همچنین مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نظیر شبکه‌های بازگشتی GRU. در این بخش، به بررسی این کنترلرها و مقایسه‌ عملکرد آنها خواهیم پرداخت.

#### کنترلر PID

کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) به عنوان یکی از پرکاربردترین و موثرترین کنترلرهای 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، به‌طور 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 RN39 و RN24 از کنترلرهای 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 RN32، 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 به‌صورت همزمان استفاده شده است تا نیروی متوازن و قابل‌اعتماد برای پایدارسازی موقعیت متحرک در چندین جهت فراهم شود (RN8). این نوع طراحی و استفاده از کنترلرهای PID نشان می‌دهد که علی‌رغم محدودیت‌های موجود در کنترلرهای کلاسیک، این روش همچنان در بسیاری از سیستم‌های مغناطیسی پیچیده مانند MLPM کارایی بالایی دارد.

#### 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 RN55 استفاده شده است و مدل کنترلی متشکل از بلوک‌های پس‌خور و پیش‌خور برای کنترل موقعیت آهنربا طراحی شده است. همچنین در RN62 از یک جدول جستجو برای تعیین رفتار سیستم در نقاط مختلف فضا 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 RN30 با تمرکز بر ارائه‌ی یک مدل پیش‌بین، با استفاده از معادلات دینامیکی سیستم و همچنین روش‌پیش‌بینی حالت بی‌تاخیر، رفتار آینده‌ی سیستم را محاسبه می‌کند.

#### کنترلر مبتنی بر هوش مصنوعی

یکی از روش‌های نوین برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده مانند MLPM، 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 RN61 از یک مدل بازگشتی GRU (Gated Recurrent Unit) استفاده کرده است. این مدل بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از عملکرد دستگاه MLPM 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.

### مدل‌سازی و تخمین سیستم

با توجه به آنچه که پیش از این ذکر شد، برای شبیه‌سازی رفتار سیستم و همچنین برای طراحی کنترلر های دقیق‌تر نظیر MPC، نیاز است تا مدل سیستم به دست آمده باشد. برای این کار می‌توان از روش‌های تحلیلی برای به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم استفاده کرد و همینطور می‌توان بدون لحاظ کردن معادلات دینامیکی و با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم‌، مدلی را برای سیستم موجود تخمین زد. در این بخش به بررسی روش‌های تحلیلی و عددی ارائه شده در پژوهش‌های پیشین برای شناسایی مدل سیستم‌های MLPM پرداخته می‌شود.

#### مدل بار مغناطیسی سطحی

در این مدل، فرض بر این است که بار مغناطیسی در یک المان حجم سه‌بعدی به‌صورت توزیعی از بارهای مغناطیسی با چگالی بار J بر روی دو صفحه‌ی موازی قرار گرفته است. با استفاده از این فرض، میدان مغناطیسی ایجادشده توسط این حجم به‌صورت 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 (FEM) در پژوهش RN44 نشان داده است که این روش مدل‌سازی برای سیستم‌های MLPM دقت و کارایی بالایی دارد.

#### مدل بار مغناطیسی نقطه‌ای

در روش بار نقطه‌ای برای تحلیل میدان مغناطیسی، فرض می‌شود که توزیع بار مغناطیسی در یک حجم به‌صورت متمرکز در هشت نقطه در گوشه‌های آن حجم قرار گرفته است. با این فرض، اثر مغناطیسی این جسم می‌تواند به‌صورت 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 به‌طور دقیق محاسبه می‌گردد. در ادامه، معادلات مربوط به محاسبه‌ی شدت میدان مغناطیسی ارائه شده‌اند.

#### روش‌های مبتنی بر داده

در این روش‌ها، به جای استفاده از مدل‌سازی ساختار فیزیکی دستگاه و به دست آوردن معادلات دینامیکی تقریبی آن، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و یا بررسی رفتار سیستم در شبیه‌سازی های المان محدود، روابطی برای محاسبه‌ی پارامترهای مورد نیاز مانند شدت میدان مغناطیسی تخمین زده می‌شود. استفاده از این روش نیاز به دسترسی به داده‌های سیستم واقعی و یا شبیه‌سازی دقیق دستگاه دارد تا بتوان اعتبار مقادیر به دست آمده توسط آن را سنجید. در RN10، تقریبی از شدت میدان حاصل از آرایه‌ی هالباخ دوبعدی با استفاده از معادلات هارمونیک و سری فوریه به دست آمده است. در این روش، تغییرات میدان مغناطیسی حاصب از این آرایه به صورت موجی سینوسی محاسبه شده است. اما این تخمین تنها در شرایطی کاملا صدق می‌کند که فرض شود سطح آرایه هالباخ تا بی‌نهایت ادامه دارد. در غیر این صورت، این مدل قادر نیست نقاط انتهایی آرایه را به درستی تخمین بزند. به منظور رفع این مشکل، نواحی زیر آرایه به سه قسمت مرکزی، کناری و گوشه تقسیم شده‌اند و برای هر یک، هارمونیک‌های مجزایی تخمین زده شده است. در این پژوهش نشان داده شده است که با استفاده از 3 هارمونیک اول می‌توان رفتار سیستم را در نواحی کناری و گوشه نیز با دقت مدل کرد.

# نتیجه‌گیری

این گزارش به‌صورت 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، به‌عنوان معماری بهینه و مناسب‌تر برای کاربردهای MLPM معرفی شد.

در طراحی آهنرباهای دائمی، مقایسه بین آهنرباهای دیسکی و آرایه‌های هالباخ نشان داد که آرایه‌های هالباخ به‌ویژه در چینش‌های یک‌بعدی و دوبعدی، 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 دوبعدی هالباخ، 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 کنترلرها، کنترلرهای کلاسیک نظیر PID به دلیل سادگی و کارایی اثبات‌شده، همچنان به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای سیستم‌های MLPM 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.

در بخش مدل‌سازی، دو رویکرد اصلی شامل مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش المان محدود (FEM) بررسی شدند. در حالی که مدل‌های تحلیلی قادر به ارائه روابط دینامیکی سیستم با استفاده از تقریب‌های ریاضی هستند، شبیه‌سازی‌های عددی و استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته همچون Ansys، امکان بررسی دقیق‌تر و اعتبارسنجی نتایج را فراهم می‌کنند. ترکیب این دو روش، امکان دستیابی به مدل‌های دقیق‌تر و معتبرتر را برای سیستم‌های MLPM فراهم می‌سازد.

همچنین، روش‌های جایگزین مدل‌سازی میدان مغناطیسی همچون مدل بار نقطه‌ای، مدل بار صفحه‌ای و مدل هارمونیک، در برخی پژوهش‌ها با دقت و کارایی مناسب برای تخمین میدان مغناطیسی معرفی شده‌اند. این روش‌ها با تکیه بر توزیع‌های مغناطیسی محاسبه‌شده و یا بر اساس داده‌های دریافت شده از سیستم قادر به ارائه تخمین‌های دقیقی از میدان مغناطیسی در بخش‌های مختلف سیستم هستند و به‌ویژه در طراحی آهنرباهای دائمی کارایی بالایی دارند.

به طور کلی، نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای بهبود عملکرد سیستم‌های MLPM، انتخاب صحیح معماری، طراحی بهینه آهنرباهای دائمی، استفاده از کنترلرهای پیشرفته و بهره‌گیری از روش‌های مدل‌سازی دقیق و شبیه‌سازی‌های عددی، از اهمیت اساسی برخوردار است. هر یک از این ویژگی‌ها باید با توجه به نیازهای سیستم و ویژگی‌های کاربرد نهایی مورد توجه قرار گیرد تا به بهترین کارایی ممکن دست یافت.

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 متحرک به دلیل حذف مشکلات مرتبط با اتصالات الکتریکی و خنک‌کاری، به عنوان گزینه‌ای مناسب معرفی شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که آرایه‌های هالباخ، با توانایی تولید میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر و امکان ایجاد نیرو در دو راستای عمود بر هم، برتری چشمگیری نسبت به آهنرباهای دیسکی دارند. هرچند هر دو آرایه هالباخ یک‌بعدی و دوبعدی عملکرد مناسبی دارند، انتخاب میان آن‌ها بستگی به نیازهای خاص سیستم دارد.

در حوزه کنترل، استفاده از کنترلرهای کلاسیک مانند PID برای سیستم‌های MLPM امکان‌پذیر است، اما نتایج بهتری از طریق کنترلرهای 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 به 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.

فهرست مرجع‏ها

[1] S. H. Mayer, *Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors*. KIT Scientific Publishing Karlsruhe, Germany, 2009.

[2] T. Sun, Y. Zhang, H. Zhang, P. Wang, Y. Zhao, and G. Liu, "Three-wheel driven omnidirectional reconfigurable conveyor belt design," in *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2019: IEEE, pp. 101-105.

[3] T. A. T. Dang, M. Bosch-Mauchand, N. Arora, C. Prelle, and J. Daaboul, "Electromagnetic modular Smart Surface architecture and control in a microfactory context," *Computers in Industry,* vol. 81, pp. 152-170, 2016.

[4] S. Zhang, X. Dang, K. Wang, J. Huang, J. Yang, and G. Zhang, "An Analytical Approach to Determine Coil Thickness for Magnetically Levitated Planar Motors," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* vol. 22, no. 1, pp. 572-580, 2017, doi: 10.1109/tmech.2016.2631571.

[5] S. Zhang, Y. Zhu, H. Mu, K. Yang, and W. Yin, "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,* vol. 226, no. 7, pp. 875-886, 2012.

[6] Z. Xu, C. Trakarnchaiyo, C. Stewart, and M. B. Khamesee, "Modular Maglev: Design and implementation of a modular magnetic levitation system to levitate a 2D Halbach array," *Mechatronics,* vol. 99, 2024, doi: 10.1016/j.mechatronics.2024.103148.

[7] X. Zhang, C. Trakarnchaiyo, H. Zhang, and M. B. Khamesee, "MagTable: A tabletop system for 6-DOF large range and completely contactless operation using magnetic levitation," *Mechatronics,* vol. 77, 2021, doi: 10.1016/j.mechatronics.2021.102600.

[8] P. Berkelman and M. Dzadovsky, "Magnetic Levitation Over Large Translation and Rotation Ranges in All Directions," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* vol. 18, no. 1, pp. 44-52, 2013, doi: 10.1109/tmech.2011.2161614.

[9] M. Miyasaka and P. Berkelman, "Magnetic levitation with unlimited omnidirectional rotation range," *Mechatronics,* vol. 24, no. 3, pp. 252-264, 2014.

[10] W.-j. Kim and D. L. Trumper, "High-precision magnetic levitation stage for photolithography," *Precision engineering,* vol. 22, no. 2, pp. 66-77, 1998.

[11] H. Zhu, T. J. Teo, and C. K. Pang, "Magnetically levitated parallel actuated dual-stage (Maglev-PAD) system for six-axis precision positioning," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* vol. 24, no. 4, pp. 1829-1838, 2019.