

# طراحی و ساخت دستگاهی برای جابجایی بدون تماس اشیاء با استفاده از تعلیق مغناطیسی و کنترل کننده PID

امین صفاری

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

مهدی مدبری فر\*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

## چکیده

سیستم‌های تعلیق مغناطیسی در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف پیدا کرده‌اند. سیستم‌های جابجایی با تعلیق مغناطیسی دارای شرایط دینامیکی خاصی هستند که به شدت تابع فیزیک سیستم از جمله سرعت قسمت متحرک، فاصله قسمت معلق با هسته مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی و هم‌چنین نویزهای ورودی می‌باشند. شرایط دینامیکی خاص این سیستم‌ها همراه با نویزهای موجود در محیط باعث ایجاد ناپایداری سیستم می‌شوند. در این پژوهش یک سیستم جابجایی بدون تماسی و با استفاده از تعلیق مغناطیسی برای جابجایی در راستای عمودی یک گوی فلزی به عنوان یک نمونه مینیولاتور بدون تماسی مغناطیسی طراحی و ساخته شد. جهت پایداری جسم معلق حین جابجایی از کنترل گر PID استفاده شده و عملکرد آن در سرعت‌های مختلف جابجایی عمودی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان دهنده که روش پیشنهادی می‌تواند با دقت بسیار بالایی سیستم تعلیق مغناطیسی را حتی به ازای حرکت‌های ناگهانی هد مغناطیسی کنترل کند. سیستم تعلیق مغناطیسی توانست حداکثر سرعت رو به بالای عمودی  $0.453 \text{ (m/s)}$  را برای پایداری شی معلق حفظ کند.

واژه‌های کلیدی: کنترل کننده، سیستم تعلیق مغناطیسی، پایداری، فاصله هوایی.

## Design and Fabrication of a Non-contact Manipulator for Object Handling using Magnetic Levitation and PID Controller

A. Saffari

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

M. Modabberifar

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

### Abstract

Magnetic levitation systems are recently used for contactless transportation of objects. In magnetic levitation, the object can be levitated by actively controlling the magnetic field based on the measured air gap between the object and the levitator. These systems are affected from the velocity of moving objects, the distance of suspended object from magnetic core and intensity of magnetic field as well as dynamic loads. Environmental noises cause instability in these systems. In this paper, a contactless transportation system has been proposed for vertical transportation of a metal sphere. PID controller was used to stabilize the transportation. The performance of this transportation system at different vertical speeds was analyzed. Results show that the suggested method could precisely monitor sudden moves. The proposed magnetic suspension system can maintain the stability of suspended object at the maximum velocity of 4.53m/s in upward movement.

**Keywords:** Controller, magnetic suspension system, stability, air gap.

است که می‌بایستی از هر تماس مکانیکی به دور باشند.

جابجایی بدون تماسی راه حلی برای غلبه بر این مشکلات است. برای جابجایی بدون تماسی یک شی، روش‌هایی مانند تعلیق مغناطیسی و الکترواستاتیکی قابل استفاده است [۱-۳]. بعضی از پژوهشگران امکان‌پذیری استفاده از تعلیق مغناطیسی برای جابجایی اشیاء کوچک را مطرح کرده‌اند [۴-۶]. آنها بدین منظور میکرو مینیولاتورهایی برای جابجایی اشیاء کوچک طراحی کرده و تمرکزشان عمدتاً بر جابجایی سریع و دقیق میکرو مینیولاتور بوده است. از آنجا که نیروی مستقیم تماسی در سیستم تعلیق وجود ندارد، اشیاء رفتار متفاوتی در مقایسه با جابجایی تماسی خواهند داشت. در این حالت سفتی نگهداری بسیار کمتر از نگهداری بصورت تماس فیزیکی خواهد بود. علاوه بر این محدوده کوچکی از نیرو-موقعیت در تعلیق وجود دارد و این بدان معناست که سیستم‌های تعلیق در مقایسه با

### ۱- مقدمه

در بسیاری از زمینه‌های مهندسی مانند صنایع ساخت و تولید جابجایی و انتقال اشیاء وظایفی ضروری هستند. یافتن روشی بهینه جهت جابجایی اشیاء در کاربری‌های مختلف از جمله موضوعات مورد علاقه پژوهشگران بوده است. با پیشرفت تکنولوژی تنوع در سایز و نوع اشیاء افزایش یافته و چالش‌های جدیدی در این حوزه پدید آمده است. بعنوان مثال در حوزه مونتاژ میکرو سیستم‌ها، اجزا و قطعات آنقدر کوچک هستند که به سختی جابجا میشوند. مشکل دیگر نیروهای الکترواستاتیکی، واندرالس و کشش سطحی هستند که در ابعاد ماکرو قابل صرف نظر کردن هستند ولی در ابعاد میکرو غالب هستند. این نیروها باعث چسبندگی قطعات به یکدیگر یا به وسایل جابجا کننده مانند گیرپهرا میشوند. مشکل دیگر حساسیت بالای بعضی از قطعات

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m-modabberifar@araku.ac.ir

## ۲- اصول عملکرد و معادلات حاکم بر تعلیق مغناطیسی

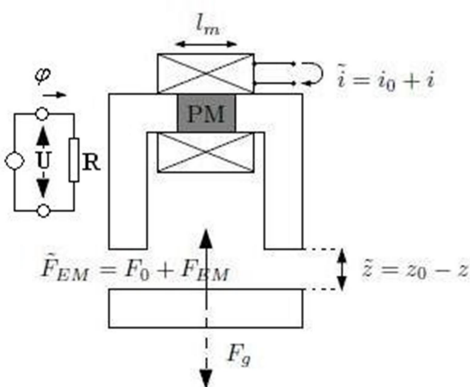
### مغناطیسی

موضوع تعلیق مغناطیسی در سالهای اخیر توسط پژوهشگران زیادی مورد بررسی قرار گرفته و اصول عملکرد و معادلات آن استخراج شده است. در این بخش معادلات کلی حاکم بر تعلیق مغناطیسی مختصراً بیان شده و به کاربرد آنها در جابجایی بدون تماسی یک گوی فلزی پرداخته میشود.

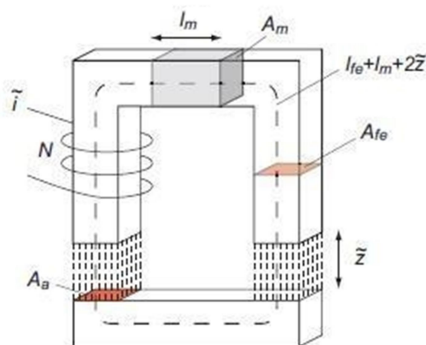
شکل ۲ سیستم تعلیق مغناطیسی یک شی، که در این مقاله یک ساچمه فولادی است، را بصورت طرحواره نشان میدهد. در این سیستم یک هسته مغناطیسی با اعمال نیروی جاذبه مغناطیسی به یک ساچمه فرومغناطیس و بر اساس پس‌خورده دریافتی از حسگرهای موقعیت، آن را در فضایی مشخص معلق نگه میدارد. در تحلیل این سیستم میتوان از مدار معادل الکتریکی که در واقع مدل آن بحساب می‌آید استفاده کرد. مطابق شکل ۲ هسته به عنوان یک المان با مقاومت  $R$ ، اختلاف ولتاژ با پتانسیل الکتریکی و جریان با شار مغناطیسی معادل شده است.

میدان مغناطیسی حاصل، باعث شار  $\phi$  برای گردش حلقه مغناطیسی می‌گردد. جهت ساده سازی محاسبات فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند: (الف) نشی شار وجود ندارد. (ب) مقاومت مغناطیسی هسته در مقایسه با مقاومت مغناطیسی هوا ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. (ج) اتلاف گرمایی نادیده گرفته می‌شود.

(الف)



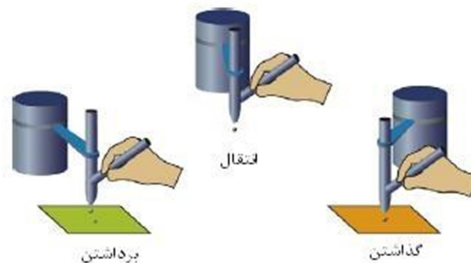
(ب)



شکل ۲- (الف) سیستم تعلیق مغناطیسی و مدار مغناطیسی معادل آن (ب) پارامترهای مدار مغناطیسی

منیپولاتورهای معمولی به اغتشاشات خارجی حساس تر هستند. جابجایی بعضی از اشیاء ظریف و حساس کاملاً خودکار بوده و سرعت عمل و دقت در آنها بالاست؛ در حالیکه در بعضی از محیط‌ها کار جابجایی همچنان بوسیله کاربرهای انسانی انجام می‌گیرد و مهارت کاربر برای غلبه بر مشکل ناپایداری لازم است. با ترکیب یک ماشین و کاربر انسانی در سیستم‌هایی با عنوان ماشین-انسان همکاری کننده<sup>۱</sup> (HMCS) که با یکدیگر کار نکنند میتوان عملکرد بهتری را به خصوص در مواردی که اپراتور مهارت زیادی ندارد شاهد بود. این سیستم‌ها بصورت گسترده در سالهای اخیر گسترش یافته‌اند. این سیستم‌ها قدرت تصمیم‌گیری، خلاقیت و مهارت انسان را با دوام، دقت و استحکام ربات ترکیب میکنند. با پیشرفت‌های علم هیتیک، HMCS‌ها در تعامل با انسان فعال تر شده بطوریکه به عنوان مثال در جراحی نیرو را احساس کرده و بصورت فعال نیرو را کاهش یا افزایش میدهند [۷-۸]. در واقع در این سیستم‌ها احساس واقعیت با کمک حس لامسه تقویت میشود. علاوه بر این، با استفاده از فیکسچرهای مجازی، حرکات عملگرها میتواند محدود یا هدایت شده و راندمان جابجایی و اقدامات لازم پزشکی را در جراحی افزایش دهد [۹-۱۱].

در این مقاله ابزاری برای جابجایی بدون تماسی اشیاء کوچک، شکننده و حساس به تماس مکانیکی با استفاده از تعلیق مغناطیسی توسعه داده شده است. در این ابزار، که عملکردی مانند انبرک دارد، اشیاء کوچک در حالت معلق برداشته شده و در مکانی دیگر قرار می‌گیرند. این ابزار قابلیت ترکیبی بصورت یک HMCS را داشته و بعنوان یک پلتفرم مشترک میتواند با یک واسطه هیتیکی دیگر عمل کند. این مفهوم در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن یک شیء کوچک بصورت غیر تماسی برداشته، منتقل و در مکانی دیگر قرارداده میشود. در این سیستم واسطه هیتیکی میتواند مانع از ناپایداری ناخواسته در تعلیق شود. در این مقاله با استفاده از کنترلر PID طراحی شده تعادلی شیء مورد نظر، که در اینجا یک گوی فلزی است، در حرکت انتقالی عمودی حفظ میشود. عملکرد این سیستم در سرعت‌های مختلف برداشتن/گذاشتن گوی ارزیابی شده و سرعت حدی آن بدست می‌آید.



شکل ۱- مفهوم انبر هیتیکی

<sup>1</sup> Human-machine collaborative systems

$$R_a = \frac{2\bar{z}}{\mu_0 A} \quad (13)$$

و مقاومت آهنربای ثابت از رابطه زیر بدست می آید

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 A} \quad (14)$$

با جایگذاری (۹) و (۱۲) در (۱) شار به صورت زیر خواهد بود

$$\Phi = \frac{A\mu_0 \left( \frac{B_r l_m}{\mu_0} + N\bar{i} \right)}{l_m + 2\bar{z}} \quad (15)$$

و در نهایت، نیروی الکترومغناطیسی را می توان با جایگذاری (۱۵) در ۸ به دست آورد.

$$\bar{F}_{EM} = \frac{A\mu_0 \left( \frac{B_r l_m}{\mu_0} + N\bar{i} \right)^2}{(l_m + 2\bar{z})^2} \quad (16)$$

این معادله نشان میدهد که نیروی الکترومغناطیسی به معکوس مجذور فاصله هوایی وابستگی داشته که این خود رفتار ناپایدار این سیستم الکترومغناطیسی را توضیح می دهد. برای کنترل تعلیق مغناطیسی، روابط خطی ترجیح داده می شوند و معادله (۱۶) را می توان حول یک نقطه کاری (یعنی  $z_0, F_0, i_0$ ) با انحراف از نقطه شناور ایجاد شده به صورت  $i, F_{EM}$  و  $Z$  خطی کرد. رابطه زیر از روش خطی کردن به دست می آید

$$\bar{F}_{EM} = F_0 + k_i i + k_z z \quad (17)$$

در این رابطه  $k_i$  فاکتور نیرو-جریان بوده و از رابطه زیر بدست می آید

$$k_i = \frac{2A\mu_0 N \left( \frac{B_r l_m}{\mu_0} + Ni_0 \right)}{(l_m + 2z_0)^2} \quad (18)$$

و ضریب  $k_z$  که فاکتور نیرو-جابجایی است برابر است با

$$k_z = \frac{4A\mu_0 \left( \frac{B_r l_m}{\mu_0} + Ni_0 \right)^2}{(l_m + 2z_0)^3} \quad (19)$$

همچنین نیروی بایاس در نقطه کاری برابر است با

$$F_0 = \frac{A\mu_0 \left( \frac{B_r l_m}{\mu_0} + Ni_0 \right)^2}{(l_m + 2z_0)^2} \quad (20)$$

انتخاب طبیعی برای نقطه کاری در یک سیستم ترکیبی الکترومکانیکی تعلیق موقعیتی است که در آن نیروی گرانش  $F_g$  با نیروی بایاسی که فقط توسط نیروی آهنربای ثابت تولید میشود خنثی می شود. وقتی شی معلق در این موقعیت قرار دارد، شدت جریان می تواند صفر باشد. از این رو نیروی دینامیک را می توان به صورت زیر ساده کرد.

$$m\ddot{z} = k_i i + k_z z \quad (21)$$

### ۳- کنترل سیستم تعلیق حین جابجایی شی

سیستم تعلیق مغناطیسی به کار رفته در این پژوهش بر اساس اصول یاتاقان های مغناطیسی کلاسیک است. در یاتاقانهای مغناطیسی فاصله هوایی بین استاتور و روتور با حسگر جابجایی سنجیده می شود. با این سیگنال موقعیت، کنترل کننده جریان مناسب را برای ایجاد نیرو در سیم پیچی مغناطیسی ایجاد می نماید. تعلیق پایدار را می توان در این صورت به دست آورد. تابع تبدیل سیستم را می توان از معادله (۲۱) به

حال، با تحلیل مدار، شار با معادله زیر به دست می آید

$$\Phi = \frac{U}{R} \quad (1)$$

که در آن  $U$  پتانسیل منبع مغناطیسی و  $R$  مقاومت مغناطیسی است. دو معادله اساسی وجود دارد که می توان برای محاسبات مدار مغناطیسی از آن ها بهره جست. معادله اول با پایستگی شار در مدار به دست می آید.

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad (2)$$

در این معادله  $B$  چگالی شار و  $A$  مقطعی است که شار از آن عبور می کند. معادله اساسی دوم بر اساس قانون آمپر است و انتگرال نیروی مغناطیسی حول یک حلقه بسته را می دهد.

$$\oint H \cdot dl = i \quad (3)$$

که در آن  $H$  نیروی مغناطیسی،  $l$  طول و  $i$  شدت جریان است. با فرض اینکه همه مقاطع با هم برابر هستند، این فرض خود دلیلی برای برابر بودن چگالی شار در همه مقاطع خواهد بود.

$$A = A_a = A_m = A_{fe}, B = B_a = B_m = B_{fe} \quad (4)$$

و چگالی شار برابر است با

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (5)$$

چگالی شار به وسیله ضریب نفوذ مغناطیسی با قدرت میدان مغناطیسی مرتبط می شود

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (6)$$

که در آن  $\mu_0$  برابر  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs} / \text{Am}$  و  $\mu_r$  ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی بسته به ماده ای است که میدان مغناطیسی به آن اعمال می گردد. در هوا، این پارامتر تقریباً برابر یک است.

نیروی جاذبه را می توان با میدان انرژی محاسبه کرد. در مورد میدان همگن در فاصله هوایی، انرژی ذخیره شده در فاصله هوایی برابر است با

$$E_a = \frac{1}{2} B_a H_a A_a 2\bar{z} \quad (7)$$

نیروی مغناطیسی را می توان از این انرژی با مشتق جزئی نسبت به فاصله هوایی و با به کارگیری رابطه (۵) و (۶) بدست آورد.

$$F_{EM} = \frac{dE_a}{d\bar{z}} = \frac{B_a^2 A_a}{\mu_0} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 A_a} \quad (8)$$

در یک سیستم الکترومغناطیسی ترکیبی، هر دو آهنربای مغناطیسی ثابت و الکتریکی را می توان به صورت پتانسیل مغناطیسی در نظر گرفت که از رابطه (۳) پیروی می کنند

$$U = U_{em} + U_{pm} \quad (9)$$

که در آن  $U_{em}$  پتانسیل آهنربای الکتریکی از رابطه زیر بدست می آید

$$U_{em} = N\bar{i} \quad (10)$$

و برای آهنربای ثابت این رابطه برابر است با

$$U_{pm} = \frac{B_r l_m}{\mu_0} \quad (11)$$

برای مقاومت مغناطیسی رابطه زیر را میتوان نوشت

$$R = R_a + R_m + R_{fe} \approx R_a + R_m \quad (12)$$

که در آن مقاومت فاصله هوایی برابر است با

دست آورد.

$$H_{SYS} = \frac{z}{i} = \frac{k_i}{ms^2 - k_s} \quad (22)$$

این تابع تبدیل مانند سیستم جرم - فنر خالص است که در آن سختی منفی  $K_s$  وجود دارد. این سختی منفی به این معنی است که سیستم ذاتا ناپایدار است و نیاز به کنترل فعال برای پایداری دارد. بهترین راه برای ارزیابی این که کنترل کننده C پایداری را تشخیص می دهد یا نه، استفاده از معیار پایداری نایکویست است. این معیار را می توان در تابع تبدیل حلقه باز ( $H_{OL}$ ) به کار گرفت.

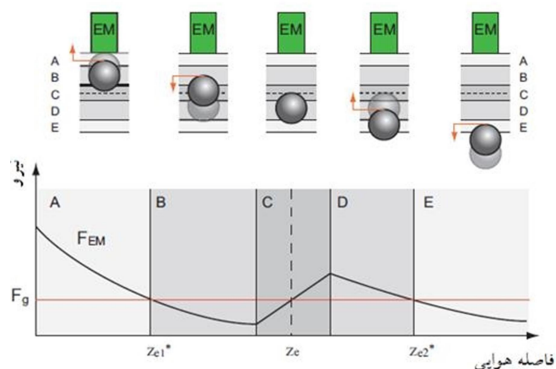
$$H_{OL} = CH_{SYS} \quad (23)$$

کل قطب های ناپایدار  $H_{OL}$  باید با تعداد مشابیه دوایر حول نقطه  $(-1, 0)$  در نمودار نایکویست برابر باشد. برای کنترل این سیستم، کنترل کننده PID مورد استفاده قرار گرفته است. با کنترلر PID، فاصله هوایی کنترل شده و کنترلر تلاش می کند که ورودی مرجع را دنبال کرده و خطای ردیابی را کمینه نماید.

استفاده از تعلیق مغناطیسی برای حمل بدون تماس شی محدود به موادی با ضریب نفوذ مغناطیسی بالا و کاربردهای دمای پایین است. همچنین، هندسه شی به دلیل اثرگذاری بر میدان مغناطیسی و خطوط شار دارای اهمیت بسیار است. این ممکن است نیازمند طراحی خاص سیستم تعلیق مغناطیسی برای رسیدن به تعلیق پایدار برای اشیای گوناگون باشد. مهم ترین کار در جابجایی بدون تماسی اشیا برداشتن و گذاشتن شی است که در این مقاله بدان پرداخته شده است. برای فهم نحوه برداشتن و گذاشتن شی، نیروهای وارده به شی باید مورد تحلیل قرار گیرند. از این تحلیل، نحوه برداشتن و قرار دادن اشیا با کنترل کننده PID مشخص خواهد شد.

شکل ۳ جزئیات نحوه کنترل شی را با استفاده از کنترلر نشان میدهد. در این شکل نقطه تعادل نقطه ای است که نیروی الکترومغناطیسی با نیروی جاذبه برابر میشود. به دلیل کنترل فعال، تعداد نقاط تعادل از یک نقطه به سه نقطه ( $Z_{e1}, Z_{e2}, Z_{e1}$ ) افزایش یافته است. نقاط تعادل ناپایدارند چرا که خط مماس (سفتی) در این نقاط شیب منفی دارد.

با توجه به شکل ۳ پنج ناحیه را می توان تعیین کرد. مشخصه های این نواحی عبارتند از:



شکل ۳- جزئیات دیاگرام نیرو-گپ هوایی کنترل شده توسط کنترلر PID

الف) A: در این ناحیه، نیروی جاذبه بزرگ تر از وزن شی معلق است و از این رو شی به بوبین می چسبد.

ب) B: در این ناحیه، نیروی جاذبه کمتر از وزن شی معلق است. این نیرو شی را به ناحیه C می فرستد که در آن تعلیق پایدار امکان پذیر است. باین حال، در این ناحیه شی را نمی توان کنترل کرد.

ج) C: به دلیل این که سفتی مثبت در این ناحیه وجود دارد، این ناحیه پایدار و قابل کنترل خواهد بود. فاصله هوایی شی معلق را می توان در این ناحیه تعیین کرد.

د) D: این ناحیه شبیه B است در حالی که اکنون نیروی جاذبه بیشتر از وزن شی معلق می باشد. شی به ناحیه C رانده می شود و در این ناحیه قابل کنترل نیست.

ه) E: این ناحیه نیروی جاذبه مغناطیسی کوچک تر از آن است که شی را معلق نماید. شی از این رو از بوبین دور خواهد شد.

در برداشتن شی، هدف رساندن شی به موقعیت تعادل است و این برای کنترل کننده بدان معناست که ورودی مرجع برابر موقعیت تعادل ( $Z_{ref} = Z_e$ ) می باشد. به محض رسیدن شی از ناحیه E به D معلق خواهد شد.

در جایگذاری شی، هدف آوردن شی به موقعیت تعادل در مکانی خارج از محدوده حسگر مثلا در سکوی قرارگیری است. وقتی شی با سکوی قرارگیری در تماس قرار می گیرد، فاصله هوایی کمتر خواهد شد. در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی حاصل کمتر می شود و به صفر میل می کند. وقتی سیستم تعلیق دوباره به بالا حرکت داده می شود، افزایش نیرو الکترومغناطیسی زمان خواهد برد. این بدان معناست که کل نیروی الکترومغناطیسی جاذبه کمتر از نیروی گرانش در ناحیه D خواهد بود. اگر این با رسیدن شی به فاصله هوایی بحرانی برقرار باشد، شی رها خواهد شد. گزینه دیگر برای قرارگیری، غیرفعال کردن کنترل فعال در صورت تشخیص تماس است. در لحظه تماس یک آشفنگی بالا در سیستم تعلیق مغناطیسی به وجود خواهد آمد که می توان آن را تشخیص داد. این سیگنال می تواند دستوری را صادر نماید که در آن ابتدا کنترل کننده باید تلاش کند تا فاصله هوایی را افزایش دهد و کنترل فعال را در صورتی که فاصله هوایی از فاصله هوایی تعادل بیشتر است غیرفعال نماید.

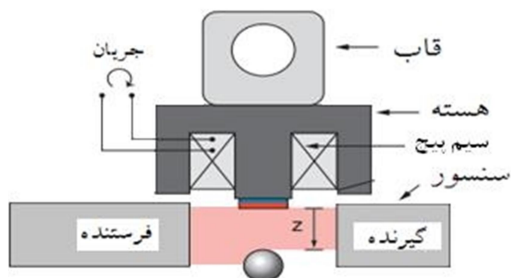
برای تعیین معیارهای قرارگیری با تعلیق مغناطیسی، رابطه نیرو - جابجایی بسیار اهمیت دارد. می توان دید که خروجی کنترل کننده عامل سیگنال جریان فرستاده شده به آمپلی فایر توان مانند جریان حقیقی محدود نیست. این شامل کل سابقه کنترل کننده است و بدان معناست که اگر جریان حقیقی به دلیل بودن در مقدار بیشینه تغییر نکند، خروجی کنترل کننده ثابت نخواهد بود. حال، خروجی

کنترل کننده برای قرار گیری در لحظه ای که شی به تعادل  $Z_{e2}^*$  می رسد دارای اهمیت است. برای همه مواردی که در آنها خروجی کنترل کننده نمی تواند جریان بیشینه را تولید نماید، نیروی الکترومغناطیسی همیشه کمتر از نیروی گرانشی بوده و رهاسازی شی انجام خواهد شد. برای مورد دیگر، که در آن جریان مقدار بیشینه خود را دارد، شی را همچنان می توان به موقعیت تعادل برگرداند. از اینرو خروجی کنترل کننده برای  $Z_{e2}^*$  معیار اصلی قرارگیری است. این معیار حاصل حرکت قرار گیری است و خطای موقعیت را در کنترل کننده

#### ۴- ساخت سیستم آزمایشگاهی

شکل ۵ طرحواره سیستم تعلیق مغناطیسی ساخته شده را نشان میدهد. برای طراحی سیستم کنترلی از زبان برنامه نویسی C و نرم افزار LABVIEW و برای پیاده سازی آن از برد AURDUINO استفاده شده است. به طور کلی سیستم تعلیق مغناطیسی مورد بحث شامل دو قسمت نرم افزاری و سخت افزاری است. بخش نرم افزاری سیستم تعلیق با کمک نرم افزار LABVIEW و AURDUINO طراحی و شبیه سازی میگردد. بخش سخت افزاری سیستم مورد مطالعه شامل سیستم تعلیق مغناطیسی، کامپیوتر به منظور وارد کردن پارامترهای کنترلگر، کارت AURDUINO که دارای میکرو Atmega328 با قابلیت برنامه نویسی به زبان C است، میباشد. از یک دوربین نیز برای ثبت جابجایی گوی و تغییرات گپ هوایی استفاده شده است. در این پژوهش از یک حسگر مادون قرمز IR با محدوده اندازه گیری ۵ میلیمتر استفاده شده است. مزیت استفاده از حسگر نور مادون قرمز این است که نورهای دیگر نمی توانند بصورت نویز در کار آن اختلال ایجاد کنند. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در سیستم تعلیق مغناطیسی حسگر فرستنده مادون قرمز یک حجم نوری به قطر ۵ میلیمتر تولید می کند که گیرنده مادون قرمز بر اساس مقدار نور دریافتی ولتاژ خروجی را تولید می کند. البته باید توجه داشت که رفتار حسگر در سرتاسر این بازه خطی نیست و به همین دلیل تعلیق مغناطیسی گوی فلزی فقط در ناحیه خطی انجام شد. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود گوی فلزی بین حسگر فرستنده و گیرنده در حال تعلیق است و نیروی لازم جهت تعلیق توسط بوبین تامین می شود.

وقتی که موقعیت گوی فلزی به عنوان پسخورد کنترلگر وارد کنترلگر PID سیستم تعلیق میشود، خروجی کنترلگر که در واقع همان جریان بوبین است به صورت pwm وارد بوبین می شود. در مرکز بوبین یک هسته آهنی با هدف تمرکز شار مغناطیسی استفاده شده است. آهن جزء مواد فریت یا مواد مغناطیسی نرم محسوب میشود. مواد فریت تبدیل به آهن ربای ثابت نمی شود و به تغییرات آنی سیمولوله واکنش نشان می دهد. یعنی با افزایش یا کاهش آنی جریان در مدار که باعث افزایش یا کاهش آنی میدان مغناطیسی در سیمولوله می شود، افزایش یا کاهش آنی میدان مغناطیسی در هسته به وجود می آید و هسته آهنی در برابر تغییرات میدان مغناطیسی مقاومت نخواهد کرد. هسته آهنی به شکل مخروط ناقص با قطر کوچک به اندازه ۳ میلیمتر و قطر بزرگ به اندازه ۲۴ میلیمتر تراشیده شده است. این کار به دو دلیل انجام شده است :



شکل ۵- طرحواره جزئیات سیستم تعلیق

اعمال می کند. این پروفایل حرکت به صورت طرحواره ساده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. سیستم تعلیق مغناطیسی با سرعت  $V_D$  به پایین حرکت می کند و این بدان معناست که پس از ایجاد تماس، فاصله هوایی با همین سرعت کاهش می یابد. سپس، این فاصله کاهش یافته هوایی در مدت  $T$  حفظ می گردد و منجر به خطای موقعیت  $d$  می شود. در نهایت، سیستم تعلیق مغناطیسی دوباره با سرعت  $V_U$  به بالا حرکت می کند تا فاصله هوایی بحرانی به دست آید.

این تقریبی از پروفایل حرکت است زیرا در واقعیت این حرکتی هموار است و پارامترها ثابت نخواهند بود. با این فرض که این پروفایل حرکت تنها منبع خروجی کنترل کننده است، خروجی کنترل کننده برای فاصله هوایی  $Z=Z_{e2}^*$  را می توان با استفاده از معادلات دیفرانسیل کنترل کننده محاسبه کرد. این معادله از تابع تبدیل کنترل کننده پیروی می کند و با نادیده گرفتن عملیات مشتق گیری داریم.

$$\frac{K_{ps}}{s - K_I K_p} \quad (24)$$

در مدت حرکت قرارگیری، پارامترهای زیر بر خروجی کنترل کننده اثر می گذارند:

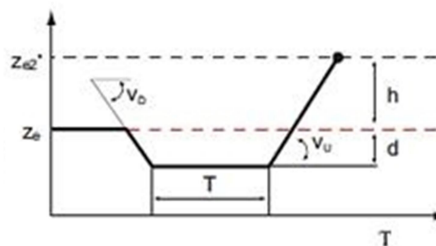
$V_D$  سرعت رو به پایین،  $V_U$  سرعت رو به بالا،  $d$  خطای ناشی از فاصله هوایی کوچک تر،  $h$  خطا وقتی  $Z=Z_{e2}^*$  و  $K_p$  بهره تناسبی کنترل کننده،  $K_I$  بهره انتگرالی کنترل کننده و  $K_D$  بهره تناسبی کنترل کننده مشتق گیر می باشد. بنابراین خروجی کنترل کننده در  $Z_{e2}^*$  برابر است با:

$$C_{OUT}(h, d, T, K_I, K_p, K_D) = \frac{-K_{pd}e^{-(K_I K_p K_D T)} + (h+d)K_p}{K_p T} \quad (25)$$

از این معادله می توان دید که اهمیت پارامترهای مختلف برای خروجی کنترل کننده چقدر است. بهره پسخورد انتگرالی دارای اهمیت ویژه ای است. این بهره بر نرخ رشد خروجی کنترل کننده اثر می گذارد و لازم است بدانیم که برای کدام مقدار  $K_I$  قرار گیری انجام می شود. معادله ۲۵ را می توان برای این منظور بازنویسی کرد.

$$K_I(h, d, T, K_p, C_{OUT}^*) = \frac{\ln\left(\frac{C_{OUT}^* - (h+d)K_p}{-K_{pd}}\right)}{K_p T} \quad (26)$$

که در آن  $C_{OUT}^*$  خروجی کنترل کننده در  $Z_{e2}^*$  است که برای آن جریان در مقدار بیشینه خود است. مقدار محاسبه شده  $K_I$  می تواند شاخص خوبی را برای تنظیم بهره پسخورد انتگرالی کنترل کننده به دست دهد.



شکل ۴- پروفایل حرکت قرار گیری سیستم تعلیق

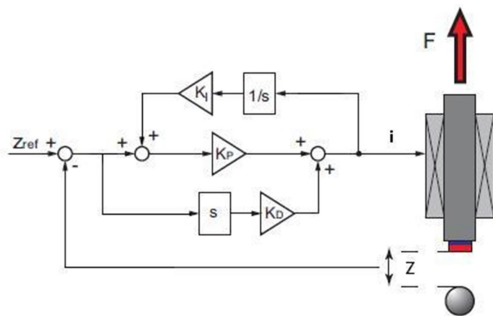
جدول ۲- پارامترهای کنترل کننده سیستم

اندازه	پارامتر
۴۰۱	$Z_{ref}$ (mm)
۲	$k_p$
۵۵	$k_D$
۵	$k_I$
۰/۵۱	$I$ (A)

طرح کلی سیستم کنترل کننده در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل های (۸-الف)، (۸-ب) و (۸-ج) به ترتیب نمودارهای بود، ناپکوئیست و پاسخ پله سیستم کنترلی حلقه بسته مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد. از روی نمودار بود می توان دید که حد فاز و حد بهره سیستم حلقه بسته به مراتب بهتر از سیستم حلقه باز هستند و بنابراین سیستم پایدار است. این موضوع در شکل (۸-ج) توسط پاسخ پله سیستم حلقه بسته نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود سیستم در نهایت توانسته به حد مطلوب خود برسد و پایدار شود. با توجه به نتایج بدست آمده در شبیه سازی ها و بررسی تاثیر کنترلر، در آزمایشات نیز از کنترلر PID جهت افزایش دقت و کاهش خطا استفاده شده است.

### ۵- نتایج آزمایشات

برای ارزیابی کارایی سیستم تعلیق مغناطیسی و کنترلر PID طراحی شده حین برداشتن و گذاشتن شی آزمایش هایی انجام گرفت. در این آزمایشات سیستم تعلیق مغناطیسی در مسیری برداشتن و گذاشتن شی در راستای عمودی با سرعت های مختلف حرکت داده شد. روند انجام آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق با این اشکال، ابتدا سیستم تعلیق مغناطیسی گوی فلزی را برداشته و به سمت بالا حرکت داده می شود؛ سپس چند ثانیه در موقعیت بالا ثابت نگه داشته می شود نگاه به موقعیت اولیه باز گردانده می شود.



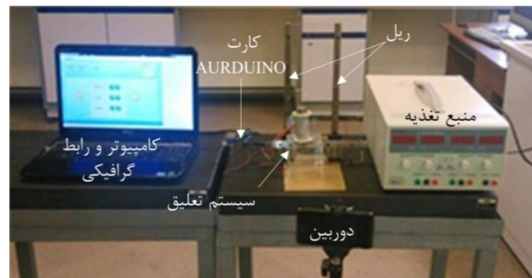
شکل ۷- طرحواره سیستم کنترل کننده

الف) افزایش برد بوبین یعنی بوبین می تواند گوی فلزی را در فاصله دورتری در حالت تعادل نگه دارد.

ب) تمرکز شار مغناطیسی در مرکز هسته بیشتر خواهد شد در نتیجه گوی فلزی در مرکز هسته به حالت تعادل در خواهد آمد و گوی فلزی همیشه در راستای حسگر خواهد بود. همچنین در صورت حرکت افقی آهسته دستگاه نیاز به سیستم کنترلی نخواهد بود زیرا گوی فلزی بصورت غیر فعال به سمت مرکز تجمع شار حرکت خواهد کرد.

سیمی از جنس مس با روکش به قطر ۰/۴ میلیمتر و تعداد دور ۴۰۰ حول این هسته پیچیده شده است که می تواند تا ۱/۵ آمپر جریان را تحمل کند. شکل ۶ مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده و جدول ۱ پارامترهای تعلیق را نشان میدهند. به جهت حفظ حرکت سیستم تعلیق در راستای عمودی از دو ریل استاندارد استفاده شده است که سیستم تعلیق بصورت یک لغزند بین این دو ریل حرکت میکند. برای حفظ قابلیت ثبت تصاویر از پشت سیستم تعلیق از یک صفحه شفاف از جنس پلکسی گلاس بین دو ریل استفاده گردید. انجام حرکات و بالا و پایین بردن سیستم تعلیق بصورت دستی انجام پذیرفت.

برای کنترل گوی فلزی حین جابجایی در راستای عمودی تنظیم ضرایب کنترلر PID تاثیر بسیار بالایی بر عملکرد نهایی کنترلر دارند. در عمل، راه حل مشخص و سیستماتیکی جهت تعیین این ضرایب وجود ندارد. به همین دلیل در روش پیشنهادی، این ضرایب با سعی و خطا و براساس شبیه سازی های گسترده انتخاب شده اند. مقادیر نهایی انتخاب شده برای این ضرایب در جدول ۲ لیست شده است. به دلیل اینکه سیستم ماهیت غیرخطی دارد و دارای نامعینی ها و عدم قطعیت های فراوانی است، ممکن است در آزمایشات مختلف جواب های مختلفی حاصل شود.



شکل ۶- مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده

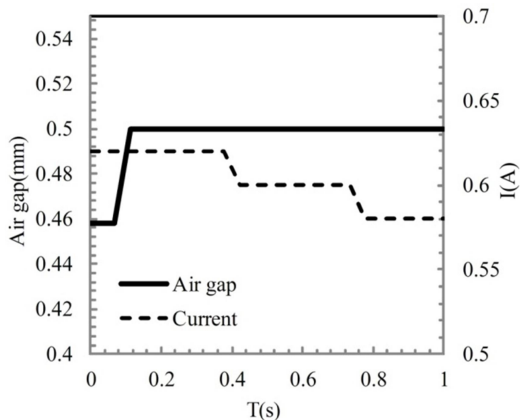
جدول ۱- پارامترهای سیستم تعلیق

اندازه	پارامتر
۴۰۰	تعداد دور سیم پیچ
۱۷	جرم گوی فلزی (گرم)
۱۶	قطر گوی فلزی (میلیمتر)

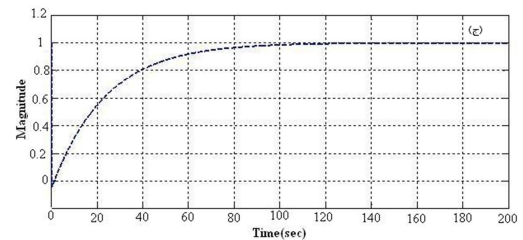
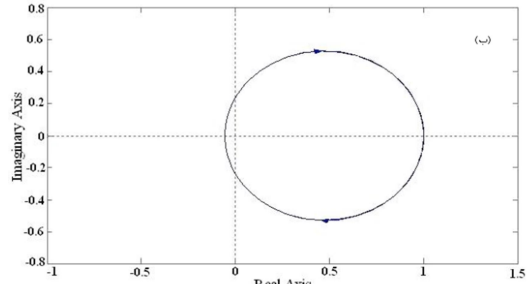
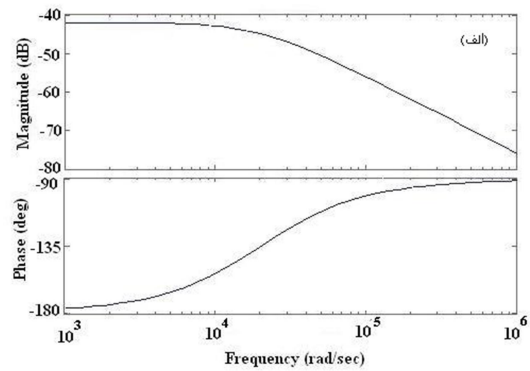
است حرکات برداشتن، بالا بردن و گذاشتن گوی فلزی بصورت دستی انجام گرفت و حین انجام آزمایشات شدت جریان و فاصله هوایی ثابت شد. جهت جلوگیری از انعکاس نور، گوی فلزی بوسیله رنگ پوشش داده شد. از یک برگه کاغذی بر روی سیستم تعلیق جهت کاهش نورهای منشا نویز استفاده شد. آزمایشات به دفعات انجام گرفت و چهار حالت از نتایج آزمایشات انتخاب شده که به شرح زیر میباشد:

(الف) در حالت اول سیستم تعلیق در موقعیت مکانی ثابت قرار می گیرد و آزمایش تعلیق مغناطیسی گوی فلزی انجام می شود و بنابراین تغییرات فاصله هوایی و جریان بوبین وجود ندارد. حسگرها به طور دائم موقعیت گوی را بررسی کرده و به عنوان پسخورد به سیستم کنترلی انتقال می دهند. پسخورد ارسالی با نقطه مرجع مقایسه شده و خروجی سیستم کنترلی که همان جریان بوبین می باشد را تغییر می دهد تا سیستم به حالت پایدار خود برسد. در واقع روند گفته شده تکرار شده تا خطای حالت ماندگار سیستم مقدار کمینه خود را داشته باشد. شکل ۱۰ تغییرات فاصله هوایی و شدت جریان را نسبت به زمان نشان میدهد. همان طور که دیده می شود کنترلر PID توانسته گوی فلزی را در نقطه تعادل بصورت ثابت نگه دارد.

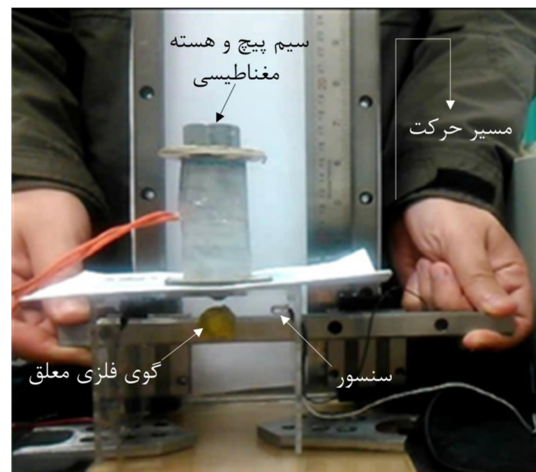
(ب) در این حالت پس از اینکه گوی فلزی معلق شد، سیستم تعلیق با سرعت ۰/۱۲ متر بر ثانیه (سرعت کم) به طرف بالا حرکت داده میشود و به مدت ۰/۷ ثانیه در بالاترین موقعیت باقی می ماند سپس با سرعت ۰/۱۱ متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت داده میشود. سرعت محاسبه شده در این قسمت متوسط میباشد. در این حالت کنترلر سیستم تعلیق مغناطیسی، جریان بوبین را به نحوی تغییر میدهد که فاصله هوایی ثابت باقی بماند. در شکل ۱۱ تغییرات فاصله هوایی، جریان و مکان گوی نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات فاصله هوایی و شدت جریان در حالت سکون سیستم تعلیق

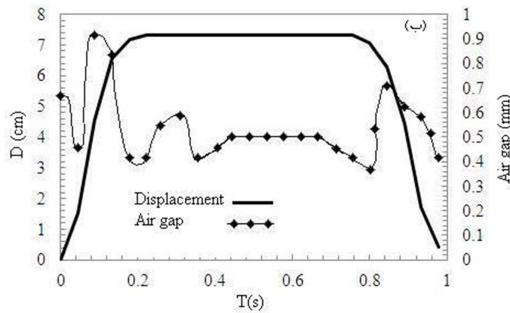


شکل ۸- (الف) نمودار بود (ب) نمودار نایکوئیست و (ج) پاسخ پله سیستم کنترلی حلقه بسته



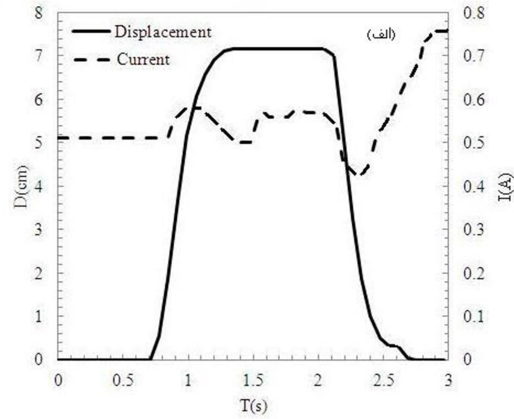
شکل ۹- نحوه انجام آزمایشات و مسیر حرکتی سیستم تعلیق

آزمایشات ابتدا با موقعیت بدون حرکت سیستم تعلیق انجام گرفت سپس حرکت برداشتن و گذاشتن شی از سرعت پایین تا حداکثر سرعتی که گوی فلزی در آن معلق بماند انجام پذیرفت. با توجه به اینکه هدف از طراحی این سیستم استفاده آن در سیستم های هپتیکی

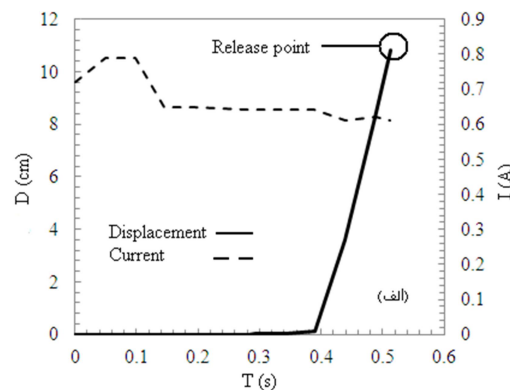
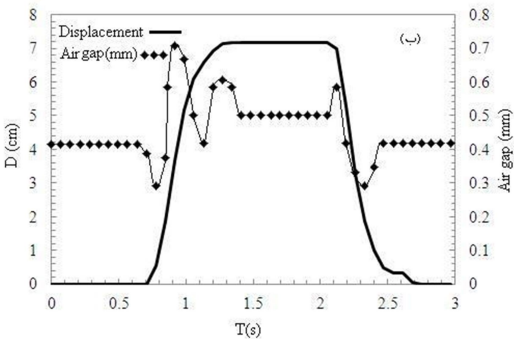


شکل ۱۲- نمودار تغییرات الف) شدت جریان و ب) فاصله هوایی در حالت سرعت متوسط

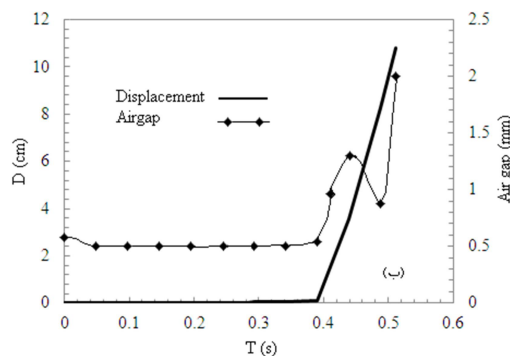
د) در این حالت حداکثر سرعتی که سیستم کنترلگر دستگاه تعلیق مغناطیسی می تواند گوی فلزی را معلق نگه دارد به دست می آید. مطابق شکل ۱۳ کنترلگر می تواند حداکثر سرعت ۰/۴۵۳ متر بر ثانیه را برای بالا رفتن سیستم تعلیق تحمل کند. در این حالت با حرکت عمودی دستگاه تعلیق مغناطیسی به سمت بالا ابتدا گوی فلزی موقعیت خود را برای چند لحظه حفظ میکند و سپس از محدوده حسگر خارج می شود و به محض خارج شدن از محدوده حسگر با توجه به نوع برنامه کنترلگری نوشته شده جریان منبع قدرت صفر خواهد شد و گوی فلزی خواهد افتاد.



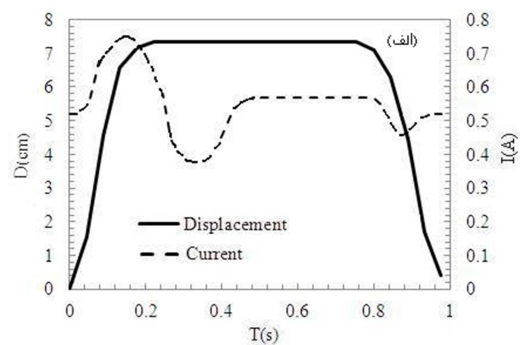
شکل ۱۱- نمودار تغییرات الف) شدت جریان و ب) فاصله در حالت سرعت کم



ج) به منظور بررسی بیشتر و ارزیابی قابلیت کنترلگر، در این آزمایش سرعت سیستم تعلیق مغناطیسی نسبت به حالت قبلی افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۲ سرعت بالا رفتن سیستم تعلیق ۰/۴۱ متر بر ثانیه بوده و به مدت ۰/۶ ثانیه در بالاترین موقعیت ثابت نگه داشته میشود سپس با سرعت ۰/۲۹ متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت داده میشود. نتایج نشان داده شده در شکل ۱۲ مبین آن است که افزایش سرعت حرکت باعث تغییرات شدیدتر جریان خروجی منبع تغذیه و در نتیجه شدت میدان مغناطیسی سیستم شده است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات الف) شدت جریان و ب) فاصله در حالت حداکثر سرعت و نقطه رهایی گوی فلزی





- augmentation, *International Journal of Robotic Researches*, Vol.18, No.12, pp. 1201-10, 1999.
- [8] Kragic D., Marayong P., Li M., Okamura A., Hager G., Human machine collaborative systems for microsurgical applications, *International Journal of Robotic Researches*, Vol.24, No.9, pp.731-41, 2005.
- [9] Rosenberg LB., Virtual fixtures: perceptual tools for tele robotic manipulation, In: *Proceeding IEEE Virtual Real Annual International Symposium*, Seattle, pp.76-82, 1993.
- [10] Bettini A., Marayong P., Lang S., Okamura AM., Hager GD., Vision assisted control for manipulation using virtual fixtures, *IEEE Transaction Robotic*, Vol.20, No.6, pp.953-66, 2004.
- [11] Lin HC., Mills K., Kazanzides P., Hager GD., Marayong P., AM. Okamura, Portability and applicability of virtual fixtures across medical and manufacturing tasks, In: *Proceeding IEEE International Conference Robotic Automation*, Orlando, 2006.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش جدید جهت حمل بدون تماس اشیا با استفاده از تعلیق مغناطیسی و کنترلگر PID ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. در واقع این سیستم در برگیرنده مفهوم انبرک بدون تماسی در سیستم های هپتیک است. در طراحی کنترل گر PID، ضرایب کنترل گر تاثیر بالایی بر عملکرد سیستم دارند. به همین منظور ابتدا سیستم مورد نظر شبیه سازی شد و کنترل گر PID با بهترین ضرایب برای آن طراحی شد. مقادیر ضرایب با سعی و خطا و براساس شبیه سازی های گسترده انتخاب شد. با توجه به نتایج شبیه سازی، پایداری سیستم بررسی شده و سیستم واقعی ساخته شد. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، چهار سناریوی مختلف اجرا شد. در سناریوی اول، هدف معلق نگاه داشتن گوی فلزی در هوا بود و نتایج آزمایشات نشان داد که سیستم پیشنهادی می تواند به راحتی و با دقت بسیار خوبی جسم معلق را در مکان دلخواه ثابت نگه دارد. در حالت دوم، معلق نگاه داشتن گوی فلزی در هوا و حرکت با سرعت پایین بررسی شد. نتایج آزمایشات نشان داد که روش پیشنهادی با دقت خوب و نوسانات کمی جسم را در مسیر دلخواه جایجا کند. هم چنین مشاهده شد که با تغییر فاصله هوایی، مقدار جریان نیز تغییر می کند تا اختلاف بین مسیر دلخواه و مسیر واقعی جسم معلق را به صفر برساند. در حالت سوم و چهارم، معلق نگاه داشتن گوی فلزی در هوا و حرکت با سرعت متوسط و بالا بررسی شد. در این آزمایشات مشاهده شد که در ابتدا و انتهای مسیر که تغییر ناگهانی مسیر وجود دارد، کنترل گر مجبور شده مقدار جریان را بطور ناگهانی تغییر دهد. در مجموع کنترل گر توانست به خوبی گوی را تا حداکثر سرعت  $0.453$  متر بر ثانیه معلق نگه دارد. با استفاده از یک حسگر نیرو مانند یک موتور بوبین صدا میتوان از نیروی مورد نیاز برای برداشتن و گذاشتن اشیا بازخورد گرفتن و این دستگاه را به یک سیستم هپتیک تبدیل کرد. در ادامه این کار پژوهشی استفاده از کنترلگرهای دیگری مانند کنترل فازی و مقایسه نتایج آن با کنترلگر PID این مقاله پیشنهاد می شود.

## ۷- مراجع

- [1] Fearing R., Survey of sticking effects for micro parts handling. In *Proceeding Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 212-217. 1995.
- [۲] حجت ی، موسوی ح و علی محمدی ر، طراحی و ساخت سیستم تعلیق مغناطیسی فعال. مجله مهندسی مکانیک مدرس، د. ۹، ش. ۳۷، ص ۱۵۳-۱۶۰، ۱۳۸۸.
- [3] Busch-Vishniac I. J., Applications of magnetic levitation-based micro-automation in semiconductor manufacturing, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 3, No.3, pp.109-115, 1990.
- [4] Nakamura T., Khamesee M. B., A prototype mechanism for three dimensional levitated movement of a small magnet, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.2, No.1, pp.41-50, 1997.
- [5] Tsuda N., Kato N., Nomura Y., Matsui H., Development of master-slave system for magnetic levitation, In *Proceedings of the Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 69-74, 2000.
- [6] Knoebel H.W., The electric vacuum gyro, *Control Engineering*, Vol. 11, pp. 70-73, 1964.
- [7] Taylor R., Jensen P., Whitcomb L., Barnes A., Kumar R., Stoianovici D., Steady-hand robotic system for microsurgical