



طراحی و ساخت گریپر مینیاتوری دو انگشتی انعطاف پذیر بر پایه نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل و بررسی عملکرد آن

عارف نعیم زاد¹، یوسف حجت^{2*}

1- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 143-14115-14115@modares.ac.ir، تهران

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 آبان 1393

پذیرش: 18 آذر 1393

ارائه در سایت: 06 دی 1393

کلید واژگان:

گریپر، مینیاتوری

انعطاف پذیر

نانوکامپوزیت

مغناطیسی رئولوژیکال

در این مقاله، یک گریپر مینیاتوری دو انگشتی انعطاف پذیر بر پایه نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل با قابلیت تنظیم پیش بازشوندگی نوک فک طراحی و ساخته شده و چگونگی عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل با حساسیت بالا در مقابل تحریک مغناطیسی ساخته شد و سپس این ماده در طراحی و ساخت گریپر به کار گرفته شد. گریپر ساخته شده با اعمال جریان الکتریکی، اشیاء و اجسام کوچک و ظریف را برداشته و در هنگام رسیدن به موقعیت هدف، با کاهش جریان الکتریکی، آن را رها می‌کند. برای بررسی مغناطیسی، گریپر توسط نرم افزار ویزی مگ شبیه سازی گردید. در آزمایش ها اشیاء و اجسامی از جنس سرب، فوم، مقوا و قطعات ویفر سیلیکون استفاده شده است. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که گریپر قادر است برای اجسامی که سطح نامنظم و ناصاف دارند، به طور مؤثری عمل برداشتن، نگه داشتن و رها کردن را انجام دهد. برای اجسام با ابعاد متفاوت، می توان با تنظیم فضای بین نوک فکها عمل برداشت و رهاسازی را بطور مطلوب انجام داد. نتایج بررسی ها روی نمونه های اولیه ساخته شده نشان می دهند که مزیت این گریپر، ساخت راحت تر، هزینه ی کمتر، وزن کمتر، حجم کوچکتر، مونتاژ ساده تر بوده و نیاز به استفاده از قید و بند های مرسوم مکانیکی ندارد. استفاده از این گریپر در سیستم های میکرو الکترومکانیکی به ویژه برای جایابی کردن قطعات حساس به خراش، اثر انگشت و فشار پیشنهاد می شود

Design and fabrication of two fingers flexible miniature gripper based on porous magnetorheological nanocomposites and its operational study

Aref Naimzad, Yousef Hojjat*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, yhojjat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 November 2014
Accepted 09 December 2014
Available Online 27 December 2014

Keywords:
Gripper
Miniature
Flexible
Nanocomposites
Magnetorheological

ABSTRACT

This paper deals with the design and fabrication of an adjustable, two finger flexible miniature gripper based on porous magnetorheological nanocomposites having the adjustability of pre-opening of the jaw's tips and its operational study according to performance. The fabricated gripper holds the small size and lightweight objects, maintains them and releases them as required upon reducing the electrical current. The magnetic analysis has been done and magnetic simulation was conducted using Vizimag software. Lead, condensed paper, foam and silicon wafer sheets were used as under experiment materials and it was observed that the device is working properly to grip the things which have rough surfaces. For greater objects, it can be adjusted through its tips as well. In this scheme, the magnetic actuation has been used because the magnetorheological nanocomposite is the most sensitive material against the magnetic field. This type of gripper includes the simple montage, lower fabrication prices and its own lower volume as well as weight, and there is no need to apply the classic mechanical linkage inside. These types of grippers are recommended for applications in the fields of the micro electromechanical systems, especially in the holding and transporting of sensitive work pieces against scratches, fingerprints and pressure.

1- مقدمه

بر می‌گردد. از گریپرهای مینیاتوری در عرصه پزشکی، اندازه گیری دقیق، مکترونیک و رباتیک استفاده می‌شود. تحقیقات متعددی در این رابطه انجام شده و پژوهش‌های آزمایشگاهی به ثبت رسیده است. اولین گزارش پژوهشی قابل دسترس در خصوص طراحی گریپر مینیاتوری در زمینه عمل

گریپر¹ انعطاف پذیر به آن دسته از گریپرها گفته می‌شود که قابلیت برداشت و انتقال اجسام و اشیاء نامنظم هندسی را دارا باشد. گریپرهای مینیاتوری دارای قدمت کمتری بوده و شروع طراحی این نوع از گریپرها به دو دهه قبل

1- Gripper

Please cite this article using:

A. Naimzad, Y. Hojjat, Design and fabrication of two fingers flexible miniature gripper based on porous magnetorheological nanocomposites and its operational study, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 179-186, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

متخلخل بر پایه‌ی لاستیک سیلیکون با ذرات نانویی آهن کربونیل، روغن سیلیکون و پودر آمونیوم بی‌کربنات ساخته شده و برای ساخت فک‌های گریپر مینیاتوری استفاده شده است. چگونگی و تفصیل ساخت این نانوکامپوزیت و بررسی خواص مکانیکی و مغناطیسی آن در پژوهش دیگری از مؤلفان در مرجع [13] گزارش شده است.

در مقاله حاضر، گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر بر پایه عملگر ساخته شده از نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل، با ابعاد کلی $30 \times 48 \times 25$ میلی‌متر، وزن خالص (بدون کوپل تحریک) 7 گرم و وزن کل (با کوپل تحریک و مغناطیس دائم) 26 گرم، نیروی برداشت مؤثر از 0/5 تا 200 میلی نیوتون، با حداکثر 9 میلی‌متر بازشوندگی دهانه گریپر؛ طراحی و ساخته شده و عملکرد آن بررسی می‌گردد.

گریپر مورد نظر از نظر سینماتیک حرکت به دسته گریپرهای فک متحرک، از نظر هندسه عملکرد به گریپر شعاعی، از نظر نوع عملگر به گریپر پلیمری هوشمند و پاسخگو در مقابل میدان، از نظر سطح تماس به گریپر های دارای سطح تماس بیرونی، از نظر اصول کاری به دسته گریپرهای مکانیکی انعطاف‌پذیر و از نظر مقیاس اندازه به گریپرهای در مقیاس مینیاتوری تعلق می‌گیرد.

مهمترین نوآوری‌های این گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر، مواردی به شرح زیر است:

- 1) برای اولین بار از نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل به عنوان فک در طراحی گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر استفاده شده است.
- 2) از آنجایی که فک گریپر انعطاف پذیر بوده، نقاط تماس آن با جسم بیشتر است، و این امکان به وجود می‌آید که فک های دو انگشتی خود را با شکل‌های نامنظم جسم مطابقت داده و اجسامی که شکل منظم هندسی نداشته و دارای شکل های پیچیده هستند، را به راحتی بردارد.
- 3) به لولا های مکانیکی نیاز نبوده و در نبود لولا های مکانیکی، اصطکاک لولا و لقی در کارکرد گریپر اختلالی ایجاد نمی‌کند.
- 4) با توجه به استفاده از مواد غیرسمی، در کاربردهای پزشکی قابل به کارگیری است.
- 5) امکان استفاده در محیط های متصل به جریان برق و مرطوب را دارد.

2- مواد و روش ها

2-1- ساخت نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل

در این پژوهش نمونه های دیسک مانند نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل مشتمل بر ذرات نانویی (23-35 نانومتر) پودر آهن کربونیل، روغن سیلیکون⁸، پودر آمونیوم بی‌کربنات $(\text{NH}_4\text{HCO}_3)$ ⁹ و لاستیک سیلیکون¹⁰؛ با ضخامت 0/8 میلی‌متر و قطر 50 میلی‌متر در کوره خلاء تهیه شد. نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل در سه مرحله زیر ساخته شد:

- 1) پودر آمونیوم بی‌کربنات در روغن سیلیکون حل، سپس با لاستیک سیلیکون کاملاً مخلوط شده و بعد با ذرات آهن کربونیل نانویی مخلوط گردیده و در یک بشر حدود 20 دقیقه در دمای معمولی اتاق به هم زده شد.
- 2) مخلوط حاصل شده در کوره خلاء قرار داده شد تا حباب های هوا حذف گردد و سپس به منظور شکل‌دهی در قالب آلومینیومی دیسک مانند، قرار

اندوسکوپی¹ انتشار یافته است [1]. این گریپر با استفاده از یک جرم نوسان کننده و مکانیزم ضربه، تحریک می‌گردد. حداکثر نیرویی که این گریپر می‌تواند برای گرفتن اجسام ایجاد کند حدود 3 نیوتن، ولتاژ موردنیاز آن برابر با 0/9 ولت و حداکثر بازشوندگی دهانه گریپر 10 میلی‌متر است. با توجه به محدودیت فضا، اجزای گریپر به شکلی طراحی شده اند که حداقل فضا را اشغال کنند.

طراحی بعدی در زمینه ساخت گریپر های مینیاتوری مناسب برای عمل لاپاروسکوپی² گزارش شده است [2]. این گریپر دارای ویژگی چون نیروی حدود 40 نیوتن برای گرفتن اجسام است. در این طرح، سه نوع عملگر: موتور برقی، پیستون هیدرولیکی و آلیاژ حافظه دار³ پیشنهاد شده است. با آن که عملکرد گریپر با استفاده از آلیاژ حافظه دار مورد تأیید قرار گرفته اما، این طرح هنوز کاربرد صنعتی پیدا نکرده است.

شرکت مهندسی گاسمن⁴ [3] گریپر مینیاتوری مدل WPT/6 را ساخته که با استفاده از آلیاژهای حافظه دار کار می‌کند. این گریپر برای مدارهای میکرو الکترونیکی، قطعات الکترونیکی، الیاف و غیره آزمایش شده است. نوک فک‌های این نوع گریپر از تنگستن کاربید ساخته شده و نیروی برداشت آن از 0/2 تا 0/4 نیوتن قابل تنظیم است. مشکل کار با این نوع گریپر، وزن زیاد آن است که در بسیاری از مواقع کار با این نوع گریپر را به چالش می‌کشد.

نمونه‌های صنعتی گریپر های مینیاتوری دو انگشتی و چند انگشتی با حمایت شرکت شانگ⁵ [4] نیز به بازار عرضه شده است. مشکل این طرح ها نیز وزن زیاد ناشی از وجود اتصال ها، منبع تامین انرژی و موتورها است. بعضی طرح های این شرکت در دست ریات ها نیز استفاده شده است.

بررسی هایی هم روی طرح گریپر مینیاتوری برای برداشتن سلول های بیولوژیکی انجام شده است [5]. برای ساخت آن از فنر فولادی و پلی دی میتیل سیلوکسان استفاده شده است. در این پژوهش، حساسیت، دقت و هزینه ای که نوک دهانه این گریپر نیاز دارد، تاکنون این طرح را در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی نگه داشته است.

گریپرهای مینیاتوری دارای منبع تحریک برقی حرارتی [6]، مراحل ساخت ساده تر اما نیاز به ولتاژ تحریک بیشتری دارند، بطوریکه برای 18 میکرومتر جابجایی نوک گریپر به 5/1 ولت نیاز دارد.

گریپرهای مینیاتوری بر مبنای الاستومرهای مغناطیسی رئولوژیکال حاوی ذرات میکرونی آهن کربونیل [7]، به دلیل دارا بودن ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی پایین تر، به کوپل تحریک بزرگتر نیاز دارد. فک های این نوع گریپر، انعطاف پذیری کمتری داشته و با اعمال میدان مغناطیسی انعطاف پذیری فک ها دو تا سه برابر کاهش یافته و نقاط تماس نوک فک با جسم کمتر می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون، از نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل⁷ در گریپر ها استفاده نشده و ایده ای نیز در این زمینه ارائه نشده است. نانو کامپوزیت های مغناطیسی رئولوژیکال گروه جدیدی از مواد هوشمند هستند که در برابر میدان های مغناطیسی از حساسیت بالایی برخوردار بوده، و در عین حال انعطاف پذیر و سبک وزن می‌باشد [8-12].

در پژوهش حاضر، نمونه‌هایی از نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال

1- Endoscopic Surgery
2- Laparoscopic Operations
3- Shape memory alloys
4- Gassmann
5- Schunk
6- Polydimethyl Siloxane (PDMS)
7- Porous magnetorheological nanocomposites

8- Silicone oil
9- Ammonium bicarbonate
10- Silicone rubber

فک‌های این گریپر از نمونه‌های دیسکی شکل نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال، به شکل تیرهایی به ضخامت 0/8، عرض 3 و طول 50 میلی‌متر به کمک دستگاه برش لیزری⁵ ساخته شده است.

بر روی دو شاخه چپ و راست هسته دو کوپل تحریک هرکدام دارای 120 حلقه سیم پیچ در دو لایه پیچیده شده است. کوپل‌ها به شکلی تحریک می‌شوند که دو نوک هسته کوپل‌ها یا N-N باشند یا S-S.

ساخت گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر با توجه به طرح واره شکل 2، شامل چهار مرحله اساسی زیر می‌شود:

- (1) طراحی، ساخت و آزمایش کوپل تحریک و جاسازی آن در پایه.
- (2) انتخاب و طراحی موقعیت هندسی تکیه‌گاه مغناطیسی و فک و اتصال آن به پایه.
- (3) تهیه تیرها به عنوان فک گریپر و جاسازی آن در تکیه‌گاه مغناطیسی فک.
- (4) تعیین و انتخاب شعاع کمان فضای تنظیم فک با توجه به بازشوندگی مورد نیاز فک.

نکات مهم در فرآیند طراحی و ساخت این نوع گریپر ها، کوچک بودن وزن و اندازه، ایجاد نیروی مناسب و مکانیزم تحریک است. کوچک بودن وزن و اندازه به انتخاب مواد با توجه به خاصیت مغناطیسی آن ها، بستگی دارد. وجود نیروی مناسب برای برداشت نیز به ساختار فیزیکی گریپر و مکانیزم تحریک بستگی دارد. مکانیزم تحریک شامل یک کوپل دو قطبی الکترومغناطیسی است که با اعمال نیروی مغناطیسی به فک‌های گریپر، فک‌ها را وادار به جدایی نسبی و فاصله گرفتن از مغناطیس پایه کرده و باعث باز شدن فک گریپر می‌شود. با کاهش جریان اعمالی، نوک فک‌ها بسته می‌شود. متغیرهای طراحی نشان داده شده در شکل‌های 2 و 3، نقش کلیدی در عملکرد بهینه‌ی گریپر دارد. باز شونده‌ی نوک و زاویه انحناء با تنظیم شعاع کمان در فضای تنظیم فک، کالیبره می‌شود و تغییرات قابل ملاحظه‌ای را ایجاد می‌کند. فضای تنظیم فک می‌تواند شعاع کمان را در محدوده 800 میکرومتر تا 6 میلی‌متر تنظیم کند. کوپل تحریک باعث تغییرات نیروی مغناطیسی نوک فک گریپر می‌شود. محدوده مؤثر طول فک (از بالاترین نقطه



شکل 1 گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر

داده شد. (3 مخلوط حاصله در دمای 100 درجه سانتیگراد برای مدت سه ساعت پخته شد.

با پخت نمونه‌ها، NH_4HCO_3 می‌تواند به CO_2 و H_2O تجزیه شود و به این ترتیب نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال متخلخل تشکیل می‌گردد. چگونگی ترکیب نمونه‌ها در جدول 1 و مشخصات اندازه گیری شده پس از ساخت در جدول 2 فهرست شده است.

2-2- انتخاب سایر مواد

با توجه به اینکه عملکرد این گریپر بر اساس تغییر میدان مغناطیسی است، جنس مناسب برای تکیه‌گاه، باید علاوه بر استحکام لازم و وزن کمتر، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مناسبی داشته باشد. جنسی که برای ساخت تکیه‌گاه پایه و تکیه‌گاه مغناطیس استفاده شده، به ترتیب پی وی سی¹ و پروپیلن² می‌باشد. علت استفاده از این نوع پلاستیک‌ها در ساخت تکیه‌گاه‌ها؛ پایین بودن ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی آن‌ها و عدم تداخل خواص آن‌ها در جهت اتلاف چگالی شار مغناطیسی می‌باشد. مواد مورد نیاز برای طراحی کوپل تحریک شامل سیم مسی به قطر 0/43 میلی‌متر، هسته آهنی مدور با قطر خارجی 28 و قطر داخلی 23 میلی‌متر و فضای بازشوندگی دهانه به اندازه 9 میلی‌متر است. برای اتصال تکیه‌گاه‌ها به عملگر از چسب لاکتیت 3406³ از شرکت هنکل آلمان⁴ با غلظت 20 mPa-s استفاده شده است.

2-3- طراحی، ساخت و مونتاژ گریپر

گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر ساخته شده در شکل 1 نشان داده شده است.

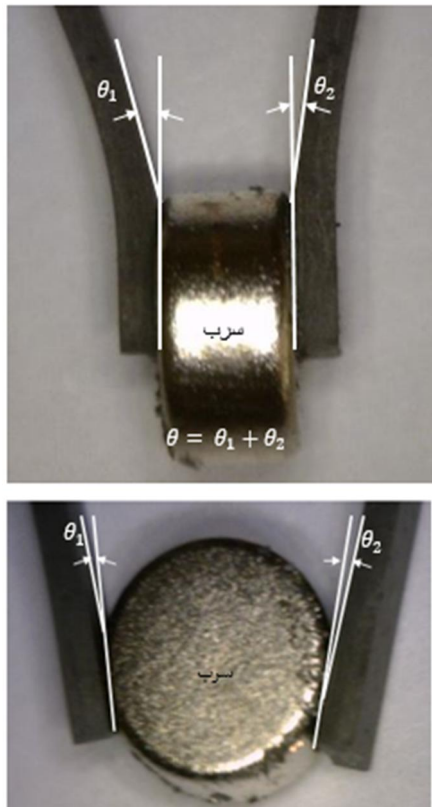
جدول 1 ترکیب نمونه‌های نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال متخلخل [6]

نمونه‌ها	(بر حسب درصد وزنی)		
	امونیوم بی کربنات	آهن کربونیل	لاستیک سیلیکون
1	0	10	89/75
2	1	20	78/50
3	2	30	67/25
4	3	40	56/00
5	4	50	44/75

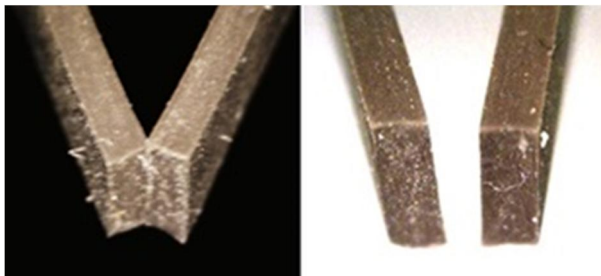
جدول 2 مشخصات اندازه گیری شده نمونه‌های نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال متخلخل [6]

نمونه‌ها	درصد تخلخل	مدول یانگ (گیگابایت)	تراوایی نسبی مغناطیسی
1	24/25	0/022	2
2	23/02	0/033	2/48
3	22/14	0/042	3/59
4	20/01	0/053	4/57
5	18/08	0/071	5/58

1- polyvinyl chloride(PVC)
2- Polypropylene
3- Loctite 406
4- Henkel



شکل 3 تصویر میکروسکوپی زاویه انحناء فک ناشی از خم شدن هر کدام از تیرها در اثر فشار بر جسم



شکل 4 تصویر میکروسکوپی پروفیل مقطع نوک فک های گریپر مینیاتوری



شکل 5 آموزش رفتار مغناطیسی روی فک های گریپر

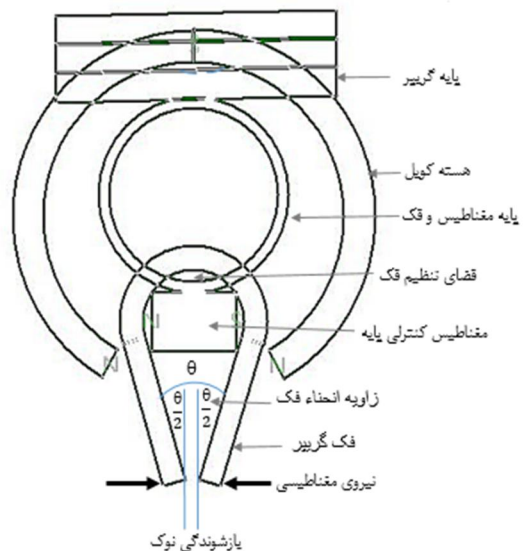
تماس فک با مغناطیس تا نوک فک) و بازشوندگی نوک فک با توجه به میزان میدان مغناطیسی اعمال شده به ترتیب بین 12 تا 16 میلی متر و 0/3 تا 6 میلی متر است.

شکل فک و به ویژه نوک آن، نقش اساسی در تعیین نیروی گریپر دارد. در این طرح به دلیل انعطاف پذیری ماده عملگر (نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال) از نوع فک اصطکاکی¹ استفاده گردیده است. در فک های اصطکاکی [14]، عامل نگهدارنده قطعه کار اصطکاک نیروی عمودی اعمال شده از طرف فک ها به قطعه کار است.

با توجه به نوع فک انتخاب شده و بمنظور عملکرد بهتر فک ها، ساختار فیزیکی فک ها طوری طراحی گردید که ویژگی های خاص هندسی² و عملکردی را دارا باشد. با بررسی ساختار فیزیکی فک ها از نظر پروفیل مقطع نوک فک، مشخص شد که پروفیل مقطع نوک فک روی مقدار نیروی برداشت مورد نیاز و چگونگی سطح تماس با اشیاء و اجسام اثرگذار بوده و از لغزش³ (سر خوردن) اشیاء و اجسام تا حدودی جلوگیری می کند. نوع پروفیل مقطع نوک فک به کار برده شده در پژوهش حاضر در شکل 4 نشان داده شده است.

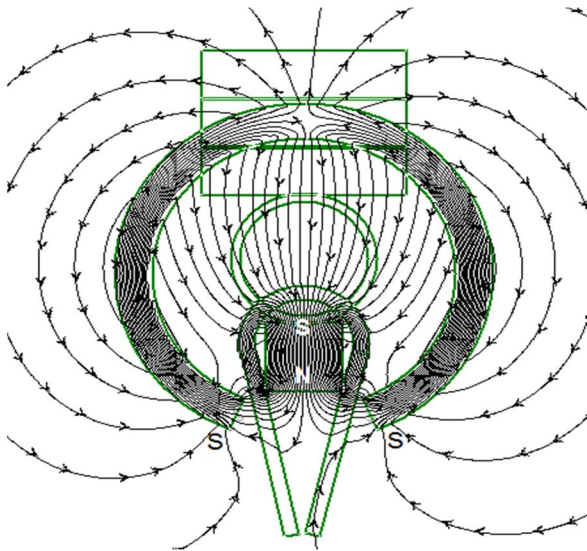
4-2- آموزش رفتار مغناطیسی فک ها

برای عملکرد بهینه فک ها و جلوگیری از تغییر شکل ناخواسته آن ها حین اعمال میدان مغناطیسی، آموزش رفتار⁴ مغناطیسی نمونه های تیر مانند تهیه شده از نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال ضروری است. آموزش می تواند به صورت مکانیکی انجام شود، اما آموزش مکانیکی نیاز به زمان زیاد داشته و پایداری حالت ایجاد شده گذراست. اما با استفاده از مغناطیس، آموزش به شکل پایداری انجام می شود. در این پژوهش، آموزش رفتار مغناطیسی فک ها در محدوده ی زمانی 24 تا 72 ساعت متوالی به منظور تامین سازگاری و عملکرد مؤثر تیرها به عنوان فک گریپر قبل از جاسازی آن ها در پایه مغناطیسی فک انجام شد (شکل های 5 و 6). پایداری شکل تیرها با افزایش زمان آموزش و افزایش شدت میدان مغناطیسی، بیشتر می شود.



شکل 2 طرح وارده کلی گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر

- 1- Frictional Jaw
- 2- Geometrical indicators
- 3- Slippage
- 4- Behavior training



شکل 8 خطوط میدان مغناطیسی حالت S-S (بسته شده فک)

4- بررسی تحلیلی

جهت مقایسه شبیه سازی با نتایج تحلیلی، مقدار نیرو به ازاء هر واحد از زاویه انحناء فک (زاویه θ در شکل 3) از رابطه (1) حساب شده:

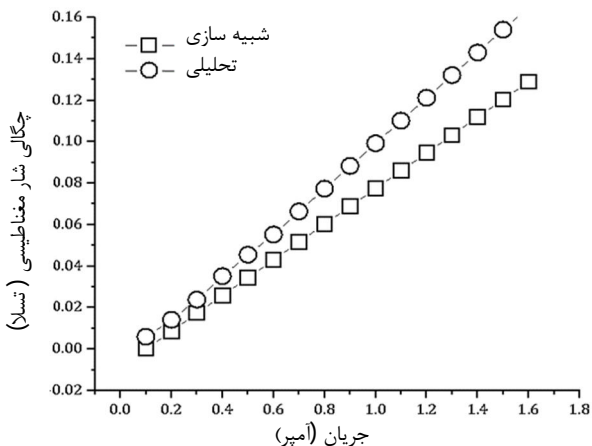
$$F = \frac{2E\theta}{L^2} \tag{1}$$

که در آن $L=0.022\text{ m}$ ، $t=1.28\text{e-}13\text{m}^4$ و $E=0.054\text{GPa}$ است.

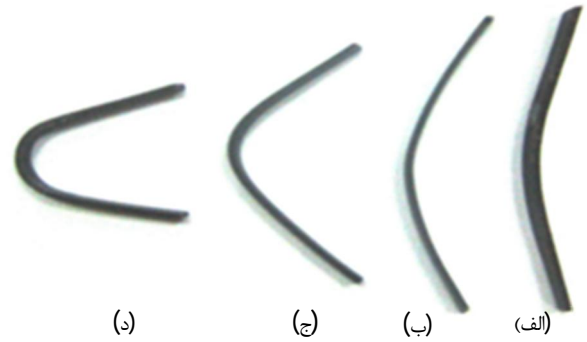
مقدار چگالی شار مغناطیسی از رابطه (2) بدست آمده است:

$$B = \mu \frac{NI}{l} \tag{2}$$

که در آن $N=238$ دور و $l=20\text{ mm}$ است. با استفاده از آزمون مغناطیس سنج نمونه مرتعش³ برای نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال منحنی چگالی شار (B) - شدت میدان (H)⁴ نمونه وصول و بر اساس آن، تراوانی مغناطیسی برابر $\mu=5.745\text{e-}06\text{H/m}$ بدست می آید [6]. نمودارهای شکل های 9 و 10 مقایسه داده های حاصل از شبیه سازی را با تجربی نشان می دهد.



شکل 9 مقایسه چگالی شار مغناطیسی برای گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر



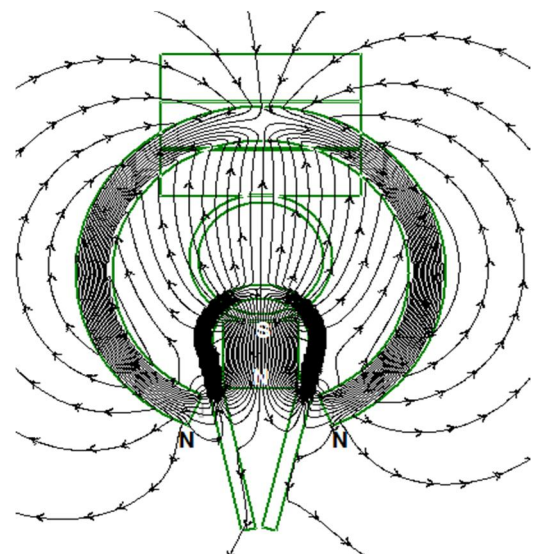
شکل 6 نتایج آموزش رفتار مغناطیسی روی فک گریپر پس از (الف) 24 ساعت (ب) 36 ساعت (ج) 48 ساعت و (د) 72 ساعت

خمیدگی های حاصل شده در فک های تحت آموزش پایداری، دائمی نبوده و با اعمال میدان مغناطیسی در جهت عکس، تیرها دوباره به حالت اولیه بر می گردند. حالت آموزش داده شده نمونه های تیر مانند، در نصف مدت آموزش داده شده، دوباره به حالت اولیه بر می گردد.

3- شبیه سازی مغناطیسی

گریپر طراحی شده مینیاتوری انعطاف پذیر با استفاده از نرم افزار ویزی مگ¹ نسخه 3/17 تحلیل شد. اندازه مش ها 200×200 ، نرخ نفوذ پذیری نسبی مغناطیسی هسته کویل، نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکیال و پایه ها، به ترتیب برابر 1000 ، $4/57$ و $0/8$ انتخاب شد. توزیع جریان روی کویل تحریک در محدوده ی $0/1$ تا $1/6$ آمپر متناسب با میزان جریان اعمالی واقعی، در نظر گرفته شد. شکل 7 خطوط میدان مغناطیسی² کویل تحریک را در حالت N-N و شکل 8 خطوط میدان مغناطیسی را در حالت S-S نشان می دهد. در حالت N-N فک گریپر تمایل به باز شدن دارد و در حالت S-S فک تمایل به بسته شدن دارد.

لذا باز و بسته شدن فک توسط تغییر قطب نوک های فک صورت می گیرد.



شکل 7 خطوط میدان مغناطیسی در حالت N-N (باز شدن فک)

3- Vibrating Sample Magnetometry
4- B-H curves

1- Vizimag
2- Magnetic field lines

5- آزمون‌های عملکردی

موقعیت هدف، با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال سطوح و ظاهر کلی اشیاء و اجسام بررسی گردید و هیچ نوع آثار و علائم تغییر شکل، اندازه و خراش دیده نشد.

3-5 - باز شونده‌ی نوک فک‌ها متناسب با جریان الکتریکی اعمالی در این آزمون بازشدگی اولیه نوک فک‌ها در سه اندازه متفاوت (282، 632 و 902 میکرومتر)، تنظیم و مقدار باز شونده‌ی فک‌ها در ازاء هر واحد از جریان اعمالی، در محدوده کاری جریان اعمالی، توسط میکروسکوپ اندازه گیری شد که نتایج بررسی در نمودار شکل 14 نشان داده شده است.

در این آزمون مشخص شد که بازشدگی اولیه روی اندازه باز شونده‌ی نوک فک‌ها نقش اساسی دارد و هرچه اندازه بازشدگی اولیه بزرگتر انتخاب شود، بازشونده‌ی نوک فک‌ها به اندازه بزرگتر حاصل شده و گریپر می‌تواند اشیاء و اجسام دارای اندازه بزرگتر را بردارد.

4-5 - ایجاد زاویه انحناء فک‌ها متناسب با جریان الکتریکی اعمالی در این آزمون پارامتر قابل اندازه‌گیری، زاویه انحناء تیرهای دو طرف فک در

آزمون‌های متعددی در سطوح مختلف عملکردی بمنظور تعیین شاخص‌ها روی گریپر انجام شد. در همه آزمون‌ها از گریپر نشان داده شده در شکل 1، منبع تغذیه جریان مستقیم، میکروسکوپ دیجیتالی¹ با بزرگنمایی 4 تا 140 برابر، و اجسام در محدوده ی وزنی 0/5 تا 16 گرم، استفاده شده است. داده های خروجی این میکروسکوپ توسط نرم افزار داینوکیچر² روی رایانه‌ای با پردازنده 4 گیگاهرتز³ ثبت و تحلیل شد. آزمون‌های انجام شده به شرح زیر است:

1-5 - برداشتن و نگه داشتن قطعات کوچک و ظریف

در این آزمون عملکردی، به منظور مشاهده توانایی برداشت اشیاء با شکل‌ها و سطوح ظاهری مختلف، قطعات کوچک و ظریفی توسط نوک گریپر برداشته شده، نگه داشته شده و انتقال داده شده است.

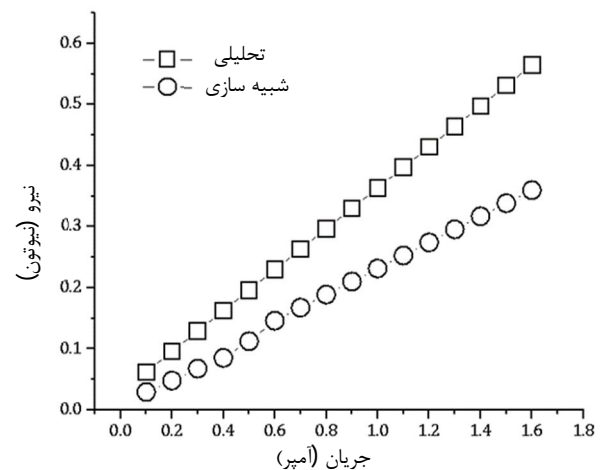
یافته‌های مبتنی بر مشاهده عملکرد در این آزمون نشان می‌دهد که برداشت اشیاء غیرصیقلی بدون لغزش از نوک فک امکان‌پذیر، تداوم نگه داشت جسم در نوک گریپر تا لحظه‌ی قطع جریان پایدار بوده و زمان آن قابل تنظیم است.

بر مبنای این آزمون، اشیاء دارای سطوح کاملاً صاف و صیقلی به نیروی نگه داشت بیشتری نیاز دارد تا از لغزش اجسام جلوگیری به عمل آید. زبری سطح تماس نوک گریپر با اشیاء هدف نیز در پایداری زمان نگه داشت اجسام صیقلی کمک می‌کند. مسئله‌ی پایداری نگه داشت جسم دارای سطوح کاملاً صاف و صیقلی در نوک گریپر تا لحظه‌ی قطع جریان، یک چالش عملکردی است.

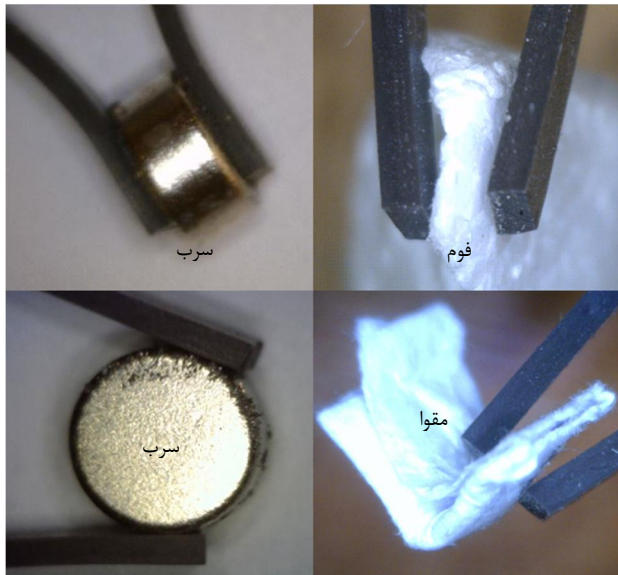
تصویر میکروسکوپی فک‌های گریپر حین عمل برداشت و نگه داشت برای تعدادی از اجسام هدف در شکل 11 نشان داده شده است.

2-5 - عدم آسیب رسانی به سطح و بافت قطعه

در این آزمون از اشیاء و اجسامی مثل موم مصنوعی⁴، فیلم نقره⁵ و قطعه ویفر سیلیکون استفاده گردید (شکل 12). بمنظور مشاهده عملکرد گریپر، اشیاء هدف توسط نوک گریپر برداشته و نگه داشته شد. پس از رهاکردن اشیاء در



شکل 10 مقایسه نیرو برای برداشت سرب دایره ای با قطر 2/78 میلیمتر



شکل 11 تصویر میکروسکوپی فک‌های گریپر حین برداشت و نگه داشت



شکل 12 تصویر میکروسکوپی فک‌های گریپر حین برداشت و نگه داشت ویفر سیلیکون و فیلم نقره

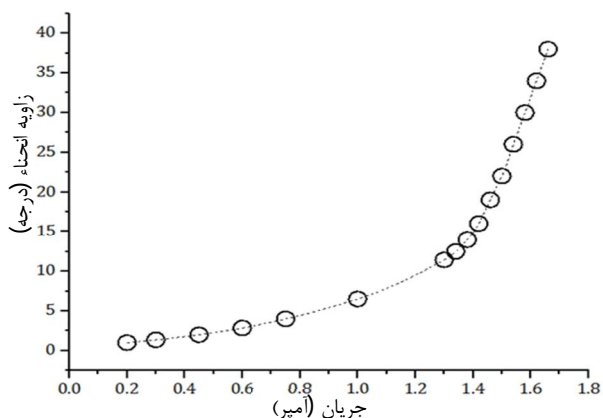
1- میکروسکوپ Dino Lite ساخت شرکت AnMo Electronics Corporation، تایوان، مدل TTL4515AM

2- Dino Capture
3- Core(TM) 2 Duo CPU, 4.0 GHz
4- Synthetic wax
5- Silver film

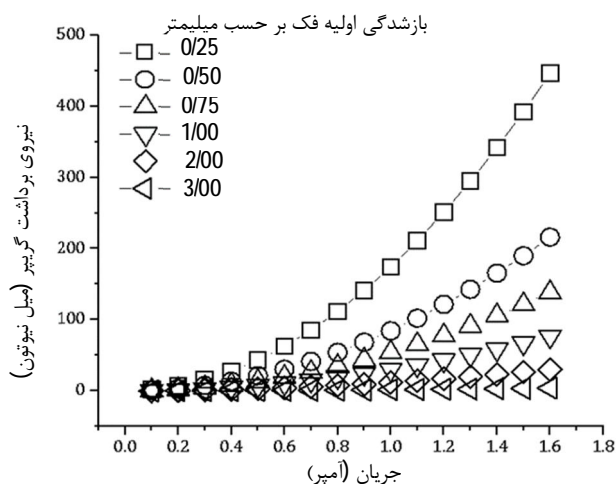
شکل 16 تغییرات نیروی برداشت گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر را به ازاء بازشدگی اولیه نوک فک ها برای سرب به وزن 6 گرم نشان می دهد. بررسی داده های حاصل از این آزمون نشان می دهد که بازشدگی اولیه بیشتر باعث ایجاد نیروی خروجی کمتری می شود و بهترین گزینه برای ایجاد نیروی بیشینه، بازشدگی اولیه کمتر است. دقت مقدار نیروی حاصله با روابط و مفاهیم گزارش شده در مراجع [15] و [16] بررسی شده است.

6- بررسی نتایج

گریپر مینیاتوری انعطاف پذیری ساخته شده در این پژوهش، قادر به برداشت و انتقال قطعات کوچک و ظریف با اشکال نامنظم هندسی از نقطه ای به نقطه ای دیگر می باشد. این گریپر عمل برداشتن، نگه داشتن و رها کردن اجسام هدف را به خوبی انجام می دهد. با آزمایش های عملکردی بر روی اجسامی چون قطره مذاب لحیم، مقوا، فوم، موم، فیلم نقره و ورقه سیلیکون ویفر مشخص شد با آنکه گریپر قادر است اجسام مورد نظر را بدون ایجاد خراش و صدمه در سطوح آن ها بردارد، ولی هنوز در برداشت، نگهداشت و انتقال قطعات دارای سطوح صیقلی و صاف مانند سیلیکون ویفر مشکل لغزش و عدم پایداری وجود دارد. پیش بینی می شود که با اعمال تغییراتی در شعاع



شکل 15 نتایج تجربی تغییرات زاویه انحنا تیرهای فک بر حسب جریان



شکل 16 نمودار تغییرات نیروی برداشت گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر به ازاء بازشدگی اولیه نوک فک ها برای سرب .

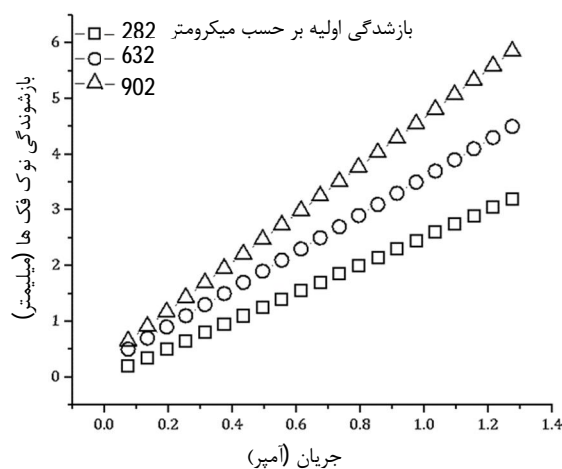
هنگام برداشت اجسام است (زاویه θ در شکل 3) که به ازاء هر واحد از جریان اعمال شده، توسط نرم افزار متصل به میکروسکوپ ثبت می شود. مقدار زاویه انحنای تیرهای دو طرف فک توسط نرم افزار داینو کپچر روی تصویرهای خروجی حین اندازه گیری زاویه انحنای فک ها توسط میکروسکوپ، بصورت خودکار ثبت می شود و بازه انحنای تیرهای دو طرف فک را از نوک فک ها در حالت بسته (زاویه انحناء بیشینه) و حالت باز (زاویه انحناء کمینه)؛ نشان می دهد.

بررسی داده های خروجی از این آزمون نشان می دهد که بین جریان اعمالی و زاویه انحناء فک ها یک رابطه غیرخطی وجود دارد و زاویه انحناء با افزایش مقدار جریان اعمالی، بیشتر شده که نشان دهنده اعمال نیروی بیشتر است.

شکل 14 تصویر سامانه اندازه گیری زاویه انحناء و شکل 15 نمودار تغییرات زاویه انحناء بر حسب جریان اعمالی را نشان می دهد.

5-5- ایجاد نیروی برداشت نسبت به بازشدگی اولیه نوک فک ها

در نهایت، بمنظور بررسی چگونگی تغییرات نیروی برداشت با توجه به بازشدگی اولیه نوک فک های گریپر، آزمایش برداشت بر روی اشیاء هدف انجام شد. در این آزمون، محدوده ی جریان اعمال شده بین 0/1 تا 1/6 آمپر تنظیم و بازشدگی اولیه نوک فک ها بین 0/25 تا 3 میلی متر تعیین شد تا میزان نیروی برداشت نسبت به اندازه های متفاوت بازشدگی اولیه نوک فک بررسی گردد.



شکل 13 نتایج تجربی میزان بازشدگی نوک فک ها بر حسب جریان



شکل 14 اندازه گیری میکروسکوپی زاویه انحنای تیرهای فک گریپر مینیاتوری

- I جریان عامل (A)
 I ممان اینرسی سطح (m^4)
 I طول متوسط کویل تحریک (m)
 L طول فک (m)
 N تعداد دور حلقه کویل تحریک

علایم یونانی

- μ ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی (N/A^2)
 μ_0 ضریب نفوذ پذیری هوا (N/A^2)
 μ_r ضریب نفوذ پذیری نسبی
 θ زاویه انحنای فک ها ($^\circ$)

9- مراجع

- [1] C. Stefanini, M.R. Cutkosky, P. Dario, A high force miniature gripper fabricated via shape deposition manufacturing, in *Proceeding of IEEE International conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, Vol. 2, pp. 1836-1841, 2003.
- [2] F. Morra, R. Molfino, F. Cepolina, Miniature gripping device, in *proceeding of IEEE International conference on Intelligent Manipulation and Grasping*, Genova, Italy, 2004.
- [3] Gassmann Engineering, *Miniature Grippers*, accessed 12 April 2014; www.memorygreifer.de.
- [4] M. Haq, *Miniature Gripper and Handling Kit Leadoff Applications*, SCHUNK Product presentation, pp.8-11, 2007.
- [5] N. Maheshwari, G.K. Ananthasuresh, N. Reddy, D. Sahu, Fabrication of spring steel and PDMS grippers for the Micromanipulation of biological cells, *Micro-fluidics and Micro-fabrication*, pp.333-354, 2010.
- [6] W.L. Chen, S.C. Huang, Design and Fabrication of Topologically Optimal Miniature Micro gripper Integrated with an Electro- Thermal Micro-actuator, *Engineering Technology and Education*, Vol. 6. No. 2, pp. 166-181, 2009.
- [7] A. Naimzad, M. Ghodsi, Y. Hojjat, A. Maddah, MREs development and its application on miniature gripper, in *Proceeding of International Conference on Advanced Materials Engineering*, Singapore, IPCSIT, Vol. 15, pp. 75-80, 2011.
- [8] R. Li, L.Z. Sun, Dynamic mechanical Behavior of Magnetorheological Nanocomposites filled with carbon nanotubes, *Applied Physics Letter*, Vol. 99, 131912-1-3, 2011.
- [9] M.Zaborski, M.Maslowski, Magnetorheological Elastomer Composites, *Colloid Polymer Science*, 138, pp 21-26, 2011.
- [10] A. Naimzad, Y. Hojjat, M. Ghodsi, Study on MR Nanocomposites to Develop a Miniature Gripper Using Laser Ablated CIPs, in *The 1st International Conference on New and Advanced Materials (NAMIC)*, Isfahan, Iran, 2012.
- [11] A. Naimzad, Y.Hojjat, M. Ghodsi, Study on MR Nanocomposites to Develop a Miniature Gripper, in *Proceeding of International Conference on Actuator*, Bermen, Germany, pp. 616-619, 2012.
- [12] A. Naimzad, Y. Hojjat, M. Ghodsi, Attempts to design a miniature gripper using magnetorheological nanocomposites (MRNCs), in *The International Congress on Nanoscience & Nanotechnology*, Kashan, Iran, 2012.
- [13] A. Naimzad, Y.Hojjat, M. Ghodsi, Comparative Study on Mechanical and Magnetic Properties of Porous and Nonporous Film-shaped Magnetorheological Nanocomposites Based on Silicone Rubber, *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering*, Vol. 2, No. 8, pp 11-20, 2014.
- [14] A. Wolf, R. Steinmann, H. Schunk, *Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks*, Italy: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.112-121, 2005.
- [15] M. Kokabi, S.A. Moutazedi, M.H.N. Family, Manufacture of magnetorheological actuator based on silicone rubber, *Iranian Polymer Science and Technology*, Vol. 1, pp. 37-43, 2005. [In Persian].
- [16] F. Fahrni, M.W.J. Prins, L.I. Jzendoorn, Magnetization and actuation of polymeric microstructures with magnetic nanoparticles for application in microfluidics, *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 3, No. 21, pp. 1843-1850, 2009.

کمان فضای تنظیم فک که به کوتاه تر کردن طول فک و افزایش دور سیم پیچ کویل تحریک منجر خواهد شد؛ مشکل مذکور مرتفع گردد.

بازشدگی تنظیم شده اولیه در بازشدگی نوک فک مؤثر بوده و افزایش بازشدگی نوک فک برای برداشت اجسام و اشیاء هدف را امکان پذیر میکند. البته، افزایش جریان نیز در ازدیاد مقدار بازشدگی نوک فک ها تاثیر دارد. تغییرات زاویه ی انحنای فک ها (θ) در محدوده ی 1 تا 38 درجه ناشی از اثر اعمال میدان مغناطیسی؛ قابل اندازه گیری است و به ازاء اعمال جریان الکتریکی، تغییر در زاویه انحنای توسط میکروسکوپ دیجیتال اندازه گیری می شود.

شبیه سازی مغناطیسی و داده های حاصل از آن نشان می دهد که در گریپر ساخته شده، با اعمال جریان 0/1 آمپر تا 1/6 آمپر، چگالی شار مغناطیسی بین صفر تا 1/4 تسلا و نیرو بین صفر تا 0/55 نیوتن تغییر می کند. نتایج شبیه سازی با نتایج به دست آمده از بررسی تحلیلی بر مبنای اندازه گیری میکروسکوپی، نزدیکی نسبتاً خوبی دارد.

بررسی های مشخص ساخت که توان مصرفی برای جا به جایی فک ها به منظور برداشت و نگه داشت جسم هدف برابر 3 وات می باشد. آزمایش های انجام شده نشان می دهد که مشکلاتی از قبیل برهم خوردن تعادل، لغزش و سقوط حین عملکرد گریپر در محدوده ی وزنی اجسام هدف (0/5 تا 16 گرم) اتفاق نمی افتد.

بررسی در خصوص نیروی برداشت گریپر نشان می دهد که هرچه بازشدگی اولیه بیشتر باشد، نیروی خروجی کمتری حاصل خواهد شد و بیشترین نیرو در شرایطی اتفاق می افتد که بازشدگی اولیه حداقل ممکن را داشته باشد. بازشدگی بزرگتر، به علت افزایش فاصله هوایی، باعث افزایش مقاومت مغناطیسی شده و نیروی مغناطیسی را تضعیف کرده و زمان باز شدن فک ها را به تأخیر می اندازد.

7- نتیجه گیری و بحث

در این مقاله، یک گریپر مینیاتوری انعطاف پذیر بر پایه نانوکامپوزیت مغناطیسی رئولوژیکال متخلخل ساخته و عملکرد آن بررسی شد. در بررسی ها، اثر بازشدگی اولیه نوک گریپر روی بازشدگی، اثر اعمال جریان روی زاویه انحنای فک، نیروی برداشت و پایداری نگه داشت؛ مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز اصلی بررسی ها، روی تأثیر فضای تنظیم، طول فک، جریان اعمالی و موقعیت کویل تحریک بر چگونگی برداشت اجسام بوده است. نتایج نشان می دهد که در صورت انتخاب مناسب پارامترهایی مثل میدان مغناطیسی و هندسه گریپر می توان عملکرد گریپر را برای کاربردهای مورد نظر استفاده کرد.

8- فهرست علائم

- A مساحت سطح فضا در مسیر شار (m^2)
 B چگالی شار مغناطیسی (T)
 E مدول یانگ (N/m^2)
 F نیرو (N)
 H شدت میدان مغناطیسی (A/m)