

ساخت محرک مغناطیسی رئولوژیکی بر پایه لاستیک سیلیکون

Manufacture of Magneto-rheological Actuator Based on Silicon Rubber

سیدعلی معتضدی، مهرداد کویبی^{*}، محمدحسین نوید فامیلی

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۴۳

دریافت: ۸۲/۶/۲۵، پذیرش: ۸۳/۹/۲۳

چکیده

محرکها در کنار حسگرها، از اجزای اصلی تشکیل دهنده ربات هستند. ساخت محرکهای مغناطیسی رئولوژیکی بر پایه سیالات نیوتنی اگرچه کاربرد تجاری یافته ولی با مشکل رسوب ذرات مغناطیسی در اثر سکون و گذشت زمان مواجه بوده است. در این میان، ژلهای نرم پلیمری ضعف یاد شده را تا حدودی مرتفع کرده اند ولی در کاربردهایی که مقاومت مکانیکی مناسب مد نظر است، استفاده از آنها با محدودیت همراه است.

کاربرد الاستومرهای پلیمری هر دو مشکل را مرتفع و ساخت محرکی با مقاومت مکانیکی مطلوب بدون ته نشین شدن ذرات مغناطیسی را امکان پذیر کرده است که هم اکنون از موضوعات مورد توجه است. در این پژوهش، محرک مغناطیسی رئولوژیکی بر پایه لاستیک سیلیکون با استفاده از ذرات مغناطیسی NdFeB ساخته و اثر عواملی مثل درصد ترکیب ذرات مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی بر رفتار محرک با هندسه ثابت مطالعه شد. نتایج نشان می دهد نمونه دارای ۲۵ درصد ذرات مغناطیسی (HTV-۲۵) از تطابق بسیار خوبی با روابط نظری مربوط برخوردار است.

واژه های کلیدی

محرک، الاستومر مغناطیسی رئولوژیکی،
لاستیک سیلیکون، NdFeB،
مواد هوشمند

مقدمه

علوم رباتیکی است، کوچک کردن ربات در عین پیچیدگی عملکرد آن است که با طرح کلی حشره های مصنوعی در دنیا مطرح شده است [۱]. استفاده از فناوریهای قدیمی در ساختن این نوع رباتها ممکن نیست زیرا از یک سو ساختار متداول رباتها (ترکیب الکتروموتورها، جکها،

پیشرفت علوم و فناوریهای مربوط به صنعت رباتیک و استفاده رو به گسترش آنها موجب شده است تا هر روز نیازهای جدیدی در این صنعت مطرح شود و پژوهشگران را به سمت برآورده کردن این نیازها پیش ببرد. در این میان یکی از نیازهای اساسی که بحث روز محافل

Key Words

actuator, magneto-rheological elastomer,
silicon rubber, NdFeB,
smart materials

الاستومری مغناطیسی رئولوژیکی ارائه نشده است، در این پژوهش، آزمایشی شبیه به آزمون Zriny و همکارانش در دانشگاه بوداپست طراحی شده است [۷] (شکل ۱).

در این آزمون با اعمال میدان مغناطیسی، نیرویی متناسب با میدان مغناطیسی، بر تیر وارد می شود. مطابق شکل ۲ این نیرو (q) که نیرویی پخشی است بر تیر از نقطه C تا انتهای تیر (L) وارد و موجب خمش (جابه جایی) انتهای تیر به اندازه Y می شود. نیروی لازم برای ایجاد جابه جایی در تیر به اندازه Y، مطابق روابط حاکم بر تیر یک سر گیردار اولری از معادله (۱) قابل دستیابی است [۸]:

$$y(x) = \frac{1}{EI_z} \cdot \frac{q}{2} \int_c^x (x - x_1)(L - x_1)^2 dx_1 \quad (1)$$

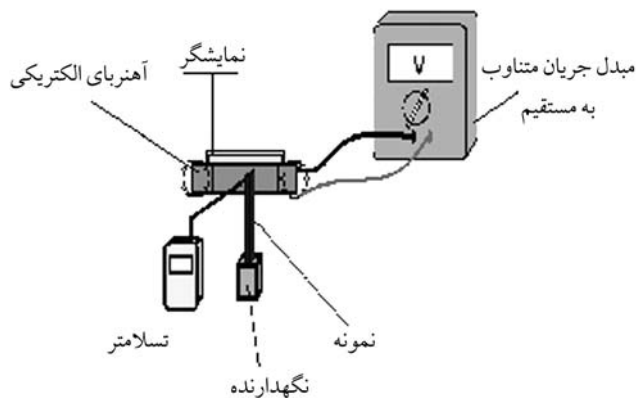
که در این معادله E مدول، I_z ممان اینرسی، q شدت نیروی اعمال شده بر واحد طول مؤثر یعنی (L-C) و $y(x)$ جابه جایی نقطه x از تیر است. بنابراین x حدبالایی انتگرال، موقعیت جابه جایی هر نقطه از تیر را بیان می کند. در معادله یاد شده $I_z = wh^3/12$ است که w عرض و h ضخامت تیر است.

با انتگرال گیری از معادله (۱) میزان جابه جایی کلی نوک تیر (معادله (۲)) بدست می آید:

$$y(L) = \frac{q}{2EI_z} (L^4/4 - L^3C/2 + LC^3/3 - C^4/12) \quad (2)$$

بدین ترتیب نیروی لازم برای ایجاد این جابه جایی از معادله (۳) بدست می آید:

$$q = 2EI_z y / (L^4/4 - L^3C/2 + LC^3/3 - C^4/12) \quad (3)$$



شکل ۱ آزمون خمشی در برابر میدان.

چرخ دنده ها، تسمه ها) در اندازه های بسیار کوچک قابل اجرا نیست و از سوی دیگر رفتار پیچیده این قبیل رباتها به محرکها و حسگرهایی بسیار پیشرفته تر و ظریفتر از آنچه تاکنون بوده است، احتیاج دارد که این مهم سرآغازی بر استفاده از مواد هوشمند در صنایع رباتیک بوده است. این مواد در برابر تحریکهای خارجی مستقیماً و بدون هیچ واسطه ای پاسخ مناسب از خود نشان می دهند. سیالات مغناطیسی رئولوژیکی یکی از انواع مواد هوشمندند که تاکنون به عنوان محرک در ساخت رباتهای مختلف بکار رفته اند [۲]. تکرارپذیری و سرعت پاسخگویی این مواد باعث شده است تا استفاده از آنها در صنایع مختلف، روز به روز افزایش یابد [۳]. اما ضعف عمده این مواد ته نشینی ذرات مغناطیسی موجود در آنها در اثر سکون با گذشت زمان است که باعث می شود رفتار این سیالات پایدار و یکنواخت نباشد. برای رفع این نقص تاکنون اقدامات زیادی [۴] مانند افزودن مواد فعال کننده سطح برای جلوگیری از رسوب ذرات در سیال انجام گرفته است. ولی این روش نتوانسته است بطور کامل مشکل رسوب ذرات را برطرف کند.

استفاده از ژلهای پلیمری به جای سیال با توجه به این امر که گرانیوی زیاد آنها از رسوب ذرات جلوگیری می کند، موجب حل نسبی مشکل شده است [۵]. به تازگی فرضیه استفاده از الاستومر به جای سیال یا ژل پلیمری برای حل کامل این مشکل پیشنهاد شده است [۶]. قرار دادن ذرات مغناطیسی به شکل مطلوب در زمینه الاستومری و سپس پخت الاستومر می تواند ضمن دستیابی به خواص مکانیکی مناسب در ماده مغناطیسی رئولوژیکی، مشکل رسوب ذرات را به کلی از بین ببرد، علاوه بر این شکل دهی الاستومر مغناطیسی رئولوژیکی بسیار ساده است و امکان استفاده از آن را در ساخت محرکهای مختلف آسان می کند. در این پژوهش، محرک مغناطیسی رئولوژیکی بر پایه لاستیک سیلیکون با کاربرد پزشکی و ذرات مغناطیسی NdFeB، به عنوان نسل جدید مواد مغناطیسی با قدرت بیشتر نسبت به ترکیبات آهن ساخته شده، رفتار آن در برابر تحریکات خارجی بررسی و اهمیت عواملی مانند درصد ذرات مغناطیسی و شدت میدان بر پاسخ محرک با هندسه ثابت مطالعه شده است. همچنین، خواص مکانیکی محرک مانند مدول، استحکام کششی، درصد ازدیاد طول که بطور غیرمستقیم بر رفتار آن در شرایط کاری مؤثر است، ارزیابی شده است.

اصول نظری

برای بررسی محرکهای ساخته شده و تبیین رفتار آنها در برابر میدان مغناطیسی، سامانه ای در نظر گرفته می شود تا براساس آن پاسخ محرکها در برابر شدت میدانهای مغناطیسی مختلف، بررسی شود. از آنجا که تاکنون استانداردهای بین المللی در زمینه بررسی پاسخ محرکهای

است.

در این پژوهش، با ایجاد شدت میدانهای مغناطیسی مختلف، میزان جابه جایی نوک تیر یک سرگردار اندازه گیری و نمودار Y برحسب H^2 برای هر نمونه محرک رسم شده است. دور از انتظار نیست که با افزایش H ، میزان جابه جایی سر تیر (Y) زیاد شود و به منظور سهولت در ارزیابی رفتار محرک در برابر میدان مغناطیسی، هندسه تیر ثابت فرض می شود.

تجربی

مواد

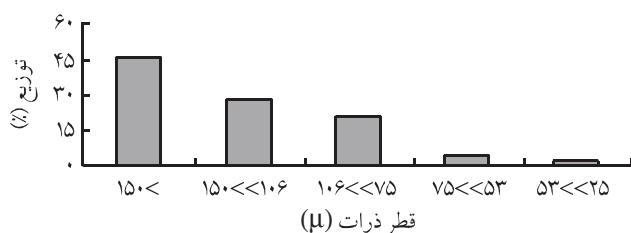
برای ساخت نمونه ها از لاستیک سیلیکون ساخت شرکت جنرال الکتریک و ذرات مغناطیسی NdFeB با کد NQP-B محصول شرکت چینی Xiamen Yuxiang Magnetic Materials با سه ترکیب مختلف ۲۵،۱۵ و ۴۰ phr استفاده شده است. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به لاستیک سیلیکون و در شکل ۳ توزیع اندازه ذرات NdFeB پس از دانه بندی نشان داده شده است. قطر متوسط این ذرات $115 \mu m$ است. CA6 عامل پخت پروکسیدی لاستیک سیلیکونی تهیه شده از شرکت جنرال الکتریک است.

دستگاهها

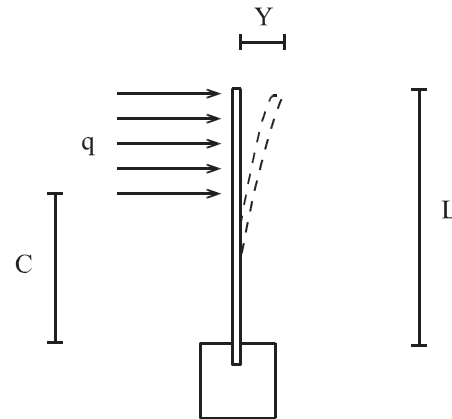
در این پژوهش، از دستگاه رئومتر با حدیده نوسانی (Oscillating Die Rheometer) مدل ۷۰۷۰S₄ ساخت شرکت Gotech ساخت تایوان، دستگاه کشش Niyoshakar مدل T-300 مطابق استاندارد ASTM D 412، دستگاه تسلاتر Phywe-Type 27، دستگاه تولیدکننده میدان مغناطیسی ساخت شرکت Electrogen با قدرت ۷W اسب بخار و تبدیل کننده جریان AC به DC ساخت شرکت Adak مدل PS-302 استفاده شده است.

روشها

ابتدا لاستیک با ذرات مغناطیسی (در ترکیب درصدی معین) به کمک



شکل ۳ توزیع اندازه ذرات مغناطیسی.



شکل ۲ نمایشی از شیوه اعمال میدان.

شرایط انجام آزمون طوری فرض شده است که مقدار جریانی الکتریسیته عبوری از سیم پیچ با حرکت نمونه تغییر نکند. در این شرایط نیروی وارد شده بر محرک از معادله (۴) محاسبه می شود [۹]:

$$F = \frac{1}{2}(\mu_r - 1)\mu_0 H^2 A \quad (4)$$

که در آن H شدت میدان مغناطیسی، μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا، μ_r ضریب نفوذپذیری نسبی جسم و $A = (L-C)W$ سطح مؤثر مقابل میدان است. معادله (۴) برای این آزمون را می توان به شکل معادله شدت نیروی وارده بر واحد طول مؤثر تیر (معادله (۵)) نوشت:

$$q = 1/2(\mu_r - 1)\mu_0 H^2 W \quad (5)$$

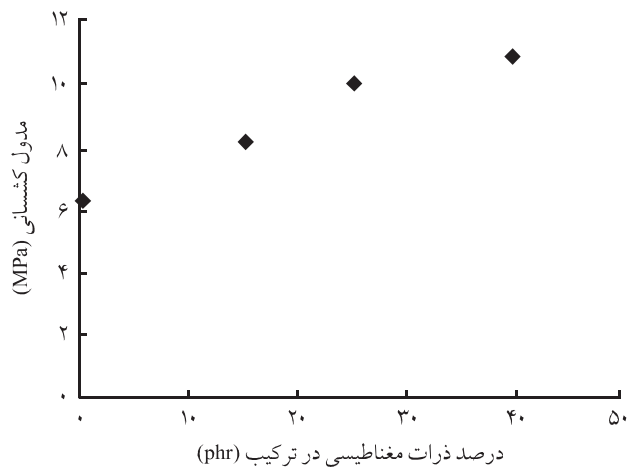
در این معادله ارتباط نیروی پخشی q وارد شده بر محرک با شدت میدان مغناطیسی H بیان شده است. از تساوی دو معادله (۳) و (۵) معادله کلی جابه جایی نوک تیر یک سرگردار ساخته شده از ماده ای مغناطیسی با ضریب نفوذپذیری نسبی، برحسب شدت میدان مغناطیسی H (معادله (۶)) بدست می آید:

$$y(L) = (\mu_r - 1)\mu_0 H^2 \left(\frac{L^4}{4} - L^2 C^2 / 2 + LC^3 / 3 - C^4 / 12 \right) \left(\frac{W}{4EI_z} \right) \quad (6)$$

که با قرار دادن $I_z = wh^3/12$ در این معادله، معادله (۷) حاصل می شود:

$$y(L) = (\mu_r - 1)\mu_0 H^2 \left(\frac{L^4}{4} - L^2 C^2 / 2 + LC^3 / 3 - C^4 / 12 \right) \left(\frac{3}{Eh^3} \right) \quad (7)$$

معادله اخیر نشان می دهد که میزان جابه جایی با H^2 نسبت مستقیم دارد و به هندسه تیر، مدول ماده و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آن وابسته



شکل ۴ تغییرات مدول در ترکیب درصدهای مختلف.

۹۰ درصد برای لاستیک سیلیکون، با افزایش درصد ذرات مغناطیسی افزایش یافته است، یعنی وجود ذرات NdFeB بین زنجیرهای لاستیک سیلیکون، باعث کاهش سرعت پخت الاستومر شده است، البته همان طور که مشاهده می شود کاهش سرعت، وابستگی چشمگیری به درصد ترکیب ذرات ندارد. دلیل این امر خاصیت اسیدی کم بور (B) است که باعث جذب فعال کننده ها و کندی سرعت واکنش پخت می شود [۱۰]. همچنین، گشتاور ناشی از حرکت نمونه در دستگاه رئومتر، با افزایش درصد ترکیب ذرات مغناطیسی زیاد شده است. دلیل افزایش گشتاور قبل از پخت، افزایش گرانشی الاستومر در اثر افزایش ذرات مغناطیسی است که مشابه همین نتیجه در پژوهشهای لوکاندر [۱۱] نیز دیده شده است. دلیل افزایش گشتاور نهایی بعد از پخت هم در نمونه هایی که درصد NdFeB بیشتری دارند، افزایش مدول کشسانی در اثر افزایش درصد ترکیب ذرات مغناطیسی است که نتایج آزمون کشش این امر را تأیید می کند.

همان طور که انتظار می رود با افزایش درصد ترکیب ذرات آهن، مدول کشسانی ماده افزایش و درصد ازدیاد طول کاهش می یابد [۱۲] که به ترتیب در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱ خواص و مشخصه های لاستیک سیلیکون.

مقدار	مشخصه HTV
۷۰	سختی (شور A)
۱۲۲	چگالی (g/cm ³)
۱۲۰۰	مقاومت کششی بعد از پخت (Psi)
۲۰۰	ازدیاد طول بعد از پخت (%)

آسیاب دوغلتکی در دمای ۲۵°C به مدت ۱۰min مخلوط و بعد از کامل شدن اختلاط این دو جزء، عامل پخت به میزان ۰/۵ phr به مخلوط اضافه شد. سپس، نمونه خام داخل قالبی به ابعاد ۱۳۵×۷×۱۵ cm³ با دمای ۱۸۰°C گذاشته شد. چون زمانهای پخت بدست آمده از نمودارهای رئومتری برای همه نمونه ها همان طور که بعداً ذکر خواهد شد، در محدوده ای نزدیک به هم قرار دارد، برای حصول اطمینان قطعی از پخت نمونه ها، زمان پخت ۸ min انتخاب شد. این زمان در حدی نیست که باعث تخریب لاستیک شود. همچنین، هنگام پخت هیچ گونه میدان مغناطیسی بر الاستومر اعمال نشد.

برای بررسی میزان خمش محرک در اثر اعمال میدان مغناطیسی اصول کلی آزمون بدین ترتیب است که ابتدا نمونه ای با ابعاد L، h و w به ترتیب ۳۵، ۷۳۵ و ۵ در مقیاس mm تهیه شد. سپس، میدان مغناطیسی به وسیله آهنربایی الکتریکی مطابق سامانه شکل ۱ بر نمونه اعمال و میزان جابه جایی (خمش) محرک مشاهده شده به کمک نمایشگر اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

خواص فیزیکی و مکانیکی

نتایج مربوط به آزمون رئومتری در جدول ۲، نشان می دهد که زمان پخت

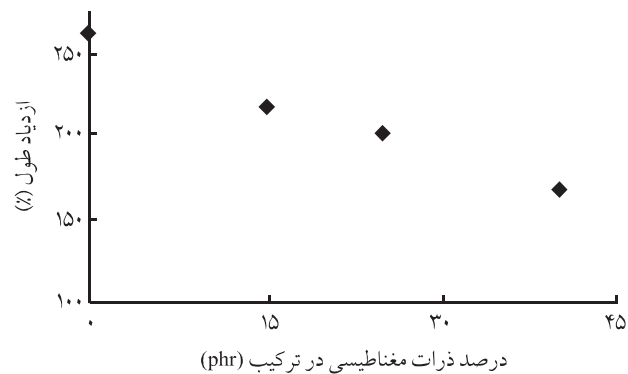
جدول ۲ نتایج آزمون رئومتری.

نمونه	ذرات مغناطیسی (%)	زمان گشتاور ۹۰ درصد (s)	حداقل گشتاور (lb.in)	حداکثر گشتاور (lb.in)
HTV خالص	۰	۳۶۶	۹/۵۶۴	۸۵/۰۲۳
HTV-۱۵	۱۵	۴۲۵	۱۰/۱۱۲	۹۰/۷۵۴
HTV-۲۵	۲۵	۴۳۷	۱۰/۳۷۵	۹۲/۶۱۴
HTV-۴۰	۴۰	۴۵۱	۱۰/۹۲۸	۹۳/۱۴۳

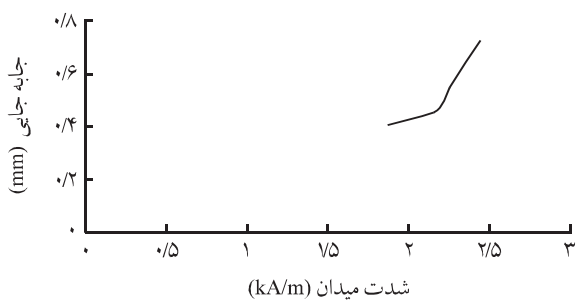
قابل توجه است. با توجه به این معادله در میدان مغناطیسی ثابت و برای دو نمونه با ابعاد ثابت ولی با ترکیب درصدی ذرات متفاوت، نسبت جابه جایی نوک تیر برابر است با:

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{(\mu_{r1} - 1) E_r}{(\mu_{r2} - 1) E_r} \quad (8)$$

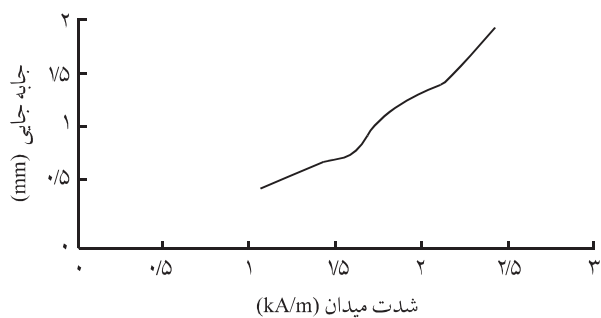
معادله (8) نشان می دهد که نسبت جابه جایی نوک تیر، با ضریب نفوذپذیری مواد رابطه مستقیم و با مدول آنها نسبت عکس دارد. در اثر



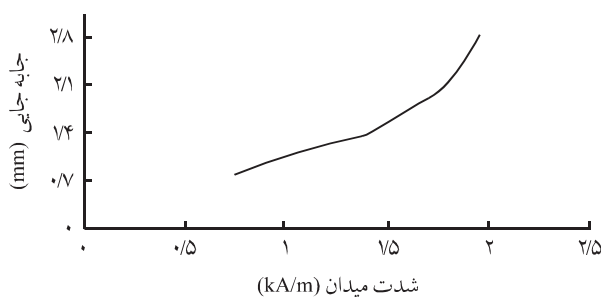
شکل 5 تغییرات ازدیاد طول در ترکیب درصدی مختلف.



(الف)



(ب)



(ج)

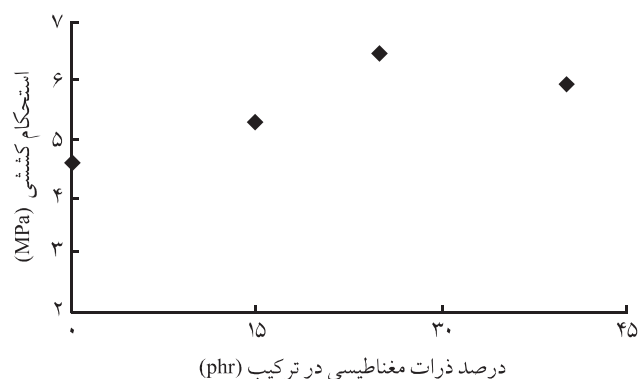
شکل 7 تغییرات جابه جایی نوک تیر در شدت میدانهای مختلف برای سه محرک ساخته شده: (الف) 15-HTV، (ب) 25-HTV و (ج) 40-HTV.

شکل 6 نمودار افزایش استحکام کششی با تغییرات درصد ترکیب ذرات مغناطیسی را نشان می دهد.

علت وجود روند تغییرات افزایشی - کاهش استحکام کششی، این است که ابتدا با افزایش ترکیب درصد ذرات NdFeB به علت وجود اختلاف ذاتی استحکام آلیاژهای آهن نسبت به لاستیک سیلیکون، وجود این ذرات باعث افزایش استحکام کششی می شود، اما با افزایش بیش از 25 phr، ترشدگی ذرات (کلوخه های) مغناطیسی به وسیله زنجیرهای پلیمری کم می شود که باعث کاهش پیوند بین کلوخه ها و زنجیرهای پلیمری شده، در نتیجه استحکام کششی کاهش می یابد.

بررسی رفتار محرک در برابر میدان مغناطیسی

مطابق آنچه که در بخش تجربی راجع به آزمون خمشی محرک در برابر میدان اشاره شد، محرکهای لاستیک سیلیکون دارای 15، 25 و 40 درصد ذرات NdFeB آزمایش شدند که نمودارهای سه گانه شکل 7 نتایج بدست آمده از این آزمونها را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش ترکیب درصد ذرات مغناطیسی، در میدان مغناطیسی ثابت، مقدار جابه جایی نوک تیر بیشتر شده است که این امر بر مبنای معادله (7)



شکل 6 تغییرات استحکام کششی در ترکیب درصدی مختلف.

افزایش درصد ذرات NdFeB، ضریب نفوذپذیری ماده زیاد می شود و مدول ماده نیز افزایش می یابد ولی اثر افزایش ضریب نفوذپذیری به دلیل فعالیت مغناطیسی زیاد ذرات NdFeB، بسیار بیشتر از اثر افزایش مدول است. بنابراین، با افزایش درصد ذرات مغناطیسی NdFeB، میزان پاسخ ماده در برابر میدان مغناطیسی ثابت بیشتر می شود (شکل ۸). باید توجه داشت این نتیجه درخصوص سایر ذرات مغناطیسی با قدرت کمتر صادق نیست.

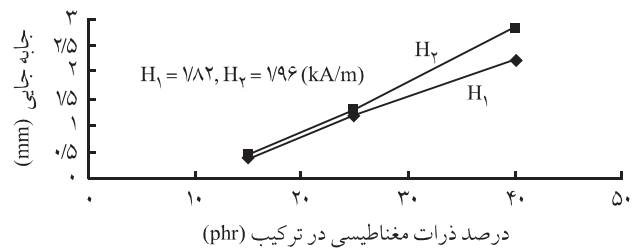
در این پژوهش، تلاش برای کنترل عملی رفتار محرک به گونه ای که بیشترین مطابقت را با معادله (۷) داشته باشد، متمرکز شده است. در شکل ۹ نتایج عملی در مقایسه با داده های نظری نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود برای هر محرک با هندسه و ضریب نفوذپذیری ثابت (درصد ثابت ذرات مغناطیسی) رابطه $Y \propto H^2$ ، نسبتاً تأمین شده است. این نتایج نشان می دهد که محرک ۲۵-HTV نسبت به دو محرک دیگر بیشترین مطابقت را با روابط نظری دارد.

نتیجه گیری

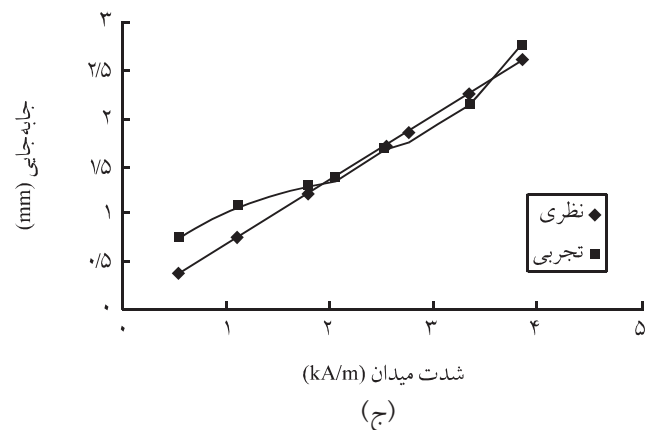
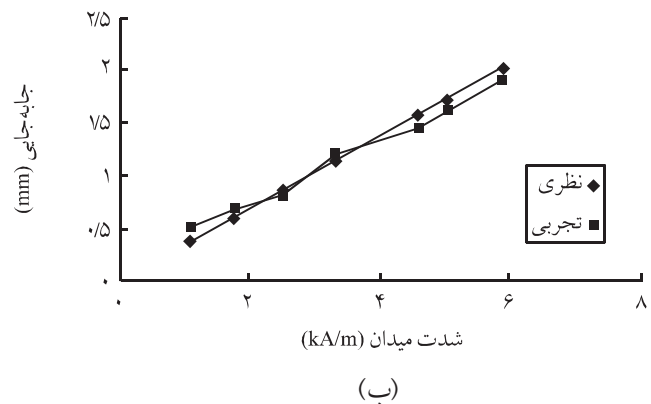
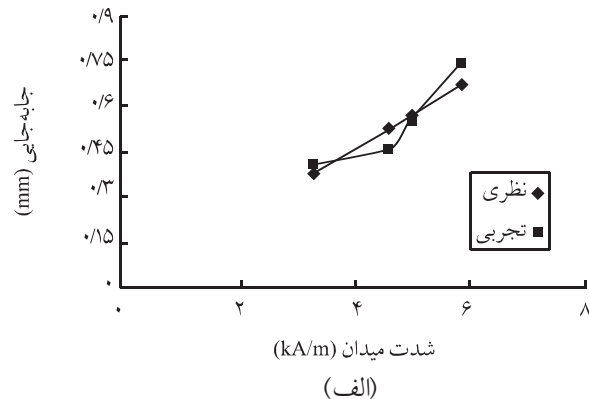
- امکان ساخت محرک الاستومری بر پایه لاستیک سیلیکون با استفاده از ذرات مغناطیسی NdFeB با قدرت زیاد و خواص مکانیکی مطلوب به منظور استفاده در ربات وجود دارد.

- مطلوبترین رفتار منطبق بر روابط نظری، متعلق به محرک ۲۵-HTV است که ضمن تطابق با روابط نظری، دارای خواص مکانیکی مانند مدول، ازدیاد طول تا پارگی و استحکام کششی قابل قبول در شرایط کاری است.

- کاهش استحکام کششی در محرکهای دارای ذرات مغناطیسی بیشتر از ۲۵ phr ناشی از کاهش پیوند بین ذرات مغناطیسی و زنجیرهای پلیمری در اثر کاهش ترشدگی ذرات مغناطیسی در زمینه پلیمری است. - استفاده از ذرات مغناطیسی از یک طرف باعث افزایش خاصیت مکانیکی (نسبت مدولها) در نتیجه کاهش میزان جابه جایی محرک و از طرف دیگر موجب افزایش خاصیت مغناطیسی (نسبت ضرایب نفوذپذیری) و در نتیجه افزایش میزان جابه جایی محرک می شود. این دو اثر یکدیگر را خنثی می کنند و در صورتی که از ذرات مغناطیسی بسیار قوی مثل NdFeB استفاده شود (مانند این پژوهش)، اثر خاصیت مغناطیسی بر جابه جایی (پاسخگویی) محرک برتر است.



شکل ۸ تغییر میزان پاسخ در ترکیب درصدهای مختلف برای ۱۵-HTV.



شکل ۹ تطابق رفتار تجربی و نظری نمونه ها: (الف) ۱۵-HTV، (ب) ۲۵-HTV و (ج) ۴۰-HTV.

قدردانی

بدین وسیله از گروه مهندسی پلیمر دانشگاه تربیت مدرس به دلیل فراهم آوردن امکان این پژوهش، همچنین آقای حسن اسماعیلی پور مسئول

کارگاههای این گروه و شرکت شعاع کابل برای همکاری مؤثر در انجام آزمایشها قدردانی می شود.

مراجع

1. Costantini C., Badolo A. and Ilboudo-Sanogo E., Field Evaluation of the Efficacy and Persistence of Insect Repellents DEET, IR 3535, and KBR 3023 against Anopheles Gambiae Complex and other Afrotropical Vector Mosquitoes, *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, **98**, 644-652, 2004.
2. Rajamani R. and Larparisudthi S., On Invariant Points and their Influence on Active Vibration, *Mechatronics*, **44**, 175-198, 2003.
3. Jolly R. and Carlson D., Properties and Application of Commercial Magneto Rheological Fluids, *Technical Paper*, Lord Corp., 1-15, 2001.
4. Carlson D., What Makes a Good MRF, Presented in the 8th International Conference on ERF and MRF, *Technical Paper*, Lord Corp., 2001.
5. Wilson J., Development and Characterization of MR Polymer Gel, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 2733-2742, 2002.
6. Scholttter W.F., The Dynamic of MR Elastomers Studied by S.RSA, University of Michigan, *Technical Paper*, Lord Corp., 2001.
7. Zriny M., Bending Imports of Electroactive Polymer Gel, University of Boudapest, *Technical Paper*, Lord Corp., 2001.
8. Shigley J., *Applied Mechanics of Materials*, McGraw Hill, Hamburg, 126, 1976.
9. Oraizi H., *Electromagnetism*, **2**, Static Magnetism, Iran University of Science and Technology, Tehran, 238, 1997.
10. Rubber Industries Engineering and Research Co., *Fillers; Their Properties and Usages in Rubber Industry*, Sahar Nashr, Tehran, 120, 1998.
11. Lokander M., Improving the Magneto Rheological Effect in Isotropic Magneto Rheological Rubber Materials, *Polym. Test.*, **22**, 677-680, 2003.
12. Rubber Industries Engineering and Research Co., *Fillers; Their Properties and Usages in Rubber Industry*, Sahar Nashr, Tehran, 144, 1998.