

بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد یک موتور حرارتی ساخته شده با محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار

الهام سلیمانیان

کارشناسی ارشد، گروه طراحی کاربردی و ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، elhamsoleimanyan@yahoo.com

محمدرضا کارآموز راوری*

استادیار، گروه طراحی کاربردی و ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، mrkaramoozravari@gmail.com

رضا دهقانی

دانشیار، گروه طراحی کاربردی و ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، r.dehghani@kgut.ac.ir

چکیده

موتورهای حرارتی جهت تولید انرژی مکانیکی، از گرمای ایجاد شده توسط تاسیسات مختلف، بدون ایجاد آلاینده‌های زیست‌محیطی، بکار می‌روند. در این مقاله ابتدا، با استفاده از سیم‌هایی از جنس نایتینول، یک موتور حرارتی طراحی و ساخته می‌شود. سپس، تاثیر پارامترهای مختلف بر سرعت زاویه‌ای، گشتاور و مدت زمان دوران موتور بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دمای آب گرم یا کاهش دمای آب سرد سبب افزایش سرعت زاویه‌ای می‌شوند؛ ولی این تغییرات، مادامی که استحاله‌ها کامل صورت پذیرند، تاثیر چندانی بر گشتاور ندارد. بعلاوه افزایش قطر و تعداد سیم‌های نایتینول و وجود مهره‌های کاهنده اصطکاک، افزایش سرعت زاویه‌ای و گشتاور را نتیجه می‌دهند. همچنین مشاهده شد که کاهش دمای استحاله، به افزایش مدت زمان چرخش و سرعت زاویه‌ای موتور منجر می‌شود و نیز بیش‌ترین سرعت دورانی در فاصله معینی از تکیه‌گاه ثابت ایجاد می‌شود. برای موتور حاضر، گشتاور و سرعت زاویه‌ای بیشینه به ترتیب ۲۰/۶۰۱ نیوتن میلی‌متر و ۵۸ دور بر دقیقه محاسبه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار، نایتینول، مبدل انرژی، موتورهای SMA، انرژی گرمایی، انرژی مکانیکی.

Investigation of the effects of different parameters on the performance of a thermal motor fabricated using shape memory alloy actuators

E. Soleimanian

Design and Manufacturing Group, Faculty of Mechanical and Materials Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

M. R. Karamooz-Ravari

Design and Manufacturing Group, Faculty of Mechanical and Materials Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

R. Dehghani

Design and Manufacturing Group, Faculty of Mechanical and Materials Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract

Thermal motors are used to generate mechanical energy using heated water produced by different equipment, without environmental pollutions. In this paper, a thermal engine is first designed and manufactured using Nitinol wires. Then, the effects of different parameters on angular velocity, output torque and engine rotation time are investigated. The results show that increasing hot-water temperature and decreasing cold-water temperature increase the angular velocity. However, as long as transformations get completed, these parameters have a neglectable effect on the torque. In addition, increasing the wires' diameter and number and using the friction-reducer beads, increase the output torque and angular velocity. It is also observed that decreasing the transformation temperature increases the duration of rotation and angular velocity of the engine. The maximum angular velocity is related to a certain position of the fixed constraints. The maximum torque and angular velocity are calculated to be about 20.601 N.mm and 58 rpm respectively.

Keywords: Shape memory alloy, NITINOL, energy converter, SMA motors, Thermal energy, Mechanical energy.

۱- مقدمه

آلیاژ حافظه‌دار، یک موتور چرخشی پیوسته، با توانایی چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد، ساخته و مقدار گشتاور آن را ۲۲۶ نیوتن میلی‌متر ارزیابی کرد [۳]. شارما و همکارانش یک موتور چرخشی دو-جهته، با زاویه دوران ۳۶۰ درجه و سرعت زاویه‌ای بین ۷ تا ۱۰ دور بر دقیقه ساختند [۴]. دیلتی و میبیر با استفاده از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و مکانیزم چرخ‌دنده، موتوری با گشتاور بیشینه ۲۵۰۰ نیوتن میلی‌متر و

آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل خواص ویژه‌ای همچون سوپرالاستیسیته و حافظه شکل، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند [۱]. یکی از این کاربردها، ساخت موتورهای گرمایی است. اکثر موتورهای آلیاژ حافظه‌دار می‌توانند به چرخش دوجهته ساعتگرد و پادساعتگرد دست یابند [۲]. کوریپایاشی با استفاده از ۷ عدد صفحه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: karamooz@kgut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۹

سرعت دورانی ماکزیمم ۰/۱۷ دور بر دقیقه طراحی کردند [۵]. ژانگ و یان با استفاده از پنج محرک، یک موتور دورانی پیوسته، با سرعت دورانی ۰/۲۸ دور بر دقیقه و گشتاور ۱۰۰۸ نیوتن میلی‌متر ساختند [۶]. با استفاده از سه میل‌لنگ یکسان و سیم آلیاژ حافظه‌دار، هوانگ و هیگوچی یک موتور دورانی با مکانیزم لنگی ساخته و مقادیر گشتاور و سرعت دورانی بیشینه آن را به ترتیب ۲/۶ نیوتن میلی‌متر و ۱۱ دور بر دقیقه گزارش کردند [۷]. بنکر با استفاده از یک مکانیزم لنگ و تعدادی سیم نایتینولی U شکل موفق به ساخت یک موتور حرارتی پیوسته شد. در این مکانیزم نیروی ایجاد شده بواسطه اختلاف مدول الاستیک آستنیت و مارتزیت باعث ایجاد گشتاور حول محور دوران موتور شده و آن را به حرکت در می‌آورد [۸].

در مقاله حاضر موتور ارائه شده در [۸]، با استفاده از قطعات استاندارد موجود در بازار، جهت ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف بر مقدار گشتاور و سرعت زاویه‌ای ساخته می‌شود. این موتور دارای گشتاور بیشینه ۲۰/۶۰۱ نیوتن میلی‌متر، سرعت زاویه‌ای بیشینه ۵۸ دور بر دقیقه و حداکثر بازدهی ۳/۰۲ درصد است.

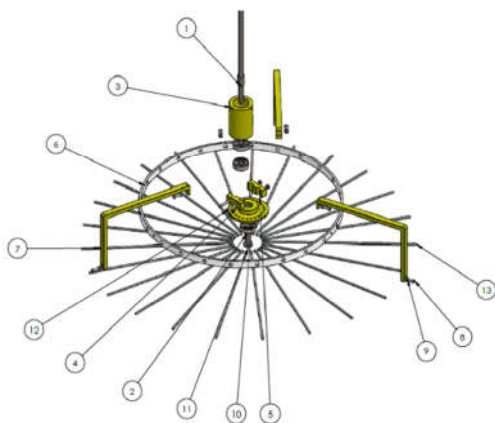
۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- طراحی و ساخت

به منظور ساخت موتور حرارتی، ابتدا مدل کلی موتور در نرم‌افزار Solid works ایجاد و مکانیزم‌های مورد نیاز ارزیابی می‌شوند. اندازه قطعات مورد نیاز بر مبنای اندازه قطعات استاندارد موجود در بازار انتخاب می‌گردد. سپس با بررسی مدل ایجاد شده در فرآیند مدل‌سازی و حصول ابعاد دقیق برای هر کدام از قطعات مورد نیاز، ساخت آنها انجام می‌شود.

شکل ۱ نقشه انفجاری موتور گرمایی و لیست قطعات مورد استفاده را نشان می‌دهد. در ساخت این موتور از دو عدد شفت فولادی ۱ و ۱۱ استفاده می‌شود. شافت اصلی، به طول ۱۳۲ و قطر ۵ میلی‌متر، در مرکز و شافت دیگر، به طول ۲۱ و قطر ۵ میلی‌متر، خارج از مرکز قرار گرفته و از طریق قطعات مکعبی ۴ و ۵، از جنس PLA و به ابعاد ۲۰*۱۲*۸ میلی‌متر، بهم متصل می‌شوند. شفت مرکزی به وسیله بلبرینگ ۲ با قطر داخلی ۵، قطر خارجی ۱۶ و ضخامت ۵ میلی‌متر به پوسته استوانه‌ای ۳، با قطر داخلی ۱۶، ضخامت ۴ و ارتفاع ۳۵ میلی‌متر و شفت خارج از مرکز از طریق بلبرینگ مشابه به قطعه فلانچ مانند ۱۰، با قطر داخلی ۱۶، قطر خارجی ۴۰ و ارتفاع ۷ میلی‌متر متصل می‌شوند. تعدادی سیم نایتینول با طول ۱۵۰ میلی‌متر، که توسط شرکت Baoji Seabird Metal Material Co., Ltd تولید شده‌اند، به عنوان محرک، در ساخت موتور استفاده می‌شوند. در اینجا، دمای پایان آستنیت شدن به اختصار دمای استحاله آستنیتی نامیده می‌شود. ۱۲ عدد میله راهنمای ۱۳، به قطر ۲ و طول ۱۵۰ میلی‌متر، که از اسپک‌های^۱ استاندارد دوچرخه تهیه شده‌اند، به عنوان حمل‌کننده سیم‌های نایتینول استفاده می‌شوند. عضو حلقوی ۶، از جنس PVC، که توسط فرآیند اره‌کاری از یک لوله استاندارد به قطر ۲۰۰، ضخامت ۲ و ارتفاع ۸ میلی‌متر ساخته شده‌است، وظیفه هدایت میله‌های راهنما را بر عهده دارد. ۲۴ عدد ترمینال شاخه‌ای، جهت قرار گرفتن سیم‌های نایتینول U شکل روی

میله‌های راهنما استفاده می‌شوند. این ترمینال‌ها جهت قرارگیری روی میله‌های راهنما در راستای عمود بر محور ترمینال سوراخکاری شده‌اند (شکل ۲). ۱۲ عدد ترمینال دیگر نیز جهت ایجاد تکیه‌گاه ثابت روی میله‌های راهنما استفاده می‌شود. سه عدد میله پشتیبان ۷، به ارتفاع ۶۰ و ضخامت ۴ میلی‌متر، از جنس پلیمر PLA، نیز برای اتصال پوسته استوانه‌ای به عضو حلقوی به کار رفته‌است. کلیه قطعاتی که از جنس PLA هستند با استفاده از روش تولید افزودنی رسوب مذاب^۲ و استفاده از دستگاه پرینتر سه‌بعدی QUANTUM 2025، محصول شرکت پرینتر سه‌بعدی پرشیا، ساخته شده‌اند. شکل ۳ موتور گرمایی مدل انرژی ساخته شده را نشان می‌دهد.



شماره قطعه	نام قطعه	شماره قطعه	نام قطعه
۱	شافت مرکزی (اصلی)	۸	بیج
۲	بلبرینگ	۹	مهره
۳	پوسته استوانه‌ای	۱۰	قطعه فلنجی شکل
۴ و ۵	رابط بین شافت‌ها	۱۱	شافت خارج از مرکز
۶	عضو حلقوی	۱۲	بیج مهره
۷	میله‌های پشتیبان	۱۳	میله‌های راهنما

شکل ۱- نقشه انفجاری موتور گرمایی مدل انرژی



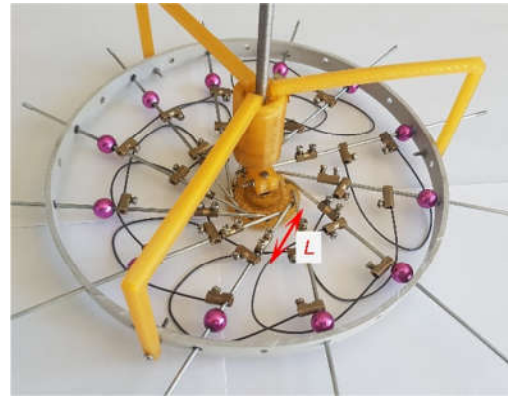
شکل ۲- ترمینال‌های سوراخکاری شده بعنوان بست سیم‌ها

برای تامین منابع دما بالا و پایین موتور، مخزن به قطر ۲۴۵ و ارتفاع ۸۵ میلی‌متر طراحی و ساخته می‌شود. با استفاده از یک عایق گرمایی از جنس تفلون، این مخزن به دو قسمت، جهت نگهداری آب گرم و سرد، تقسیم شده‌است. برای نگهداشتن موتور روی مخزن، از یک پایه فلزی با قابلیت تنظیم ارتفاع، استفاده می‌شود. شکل ۴ موتور

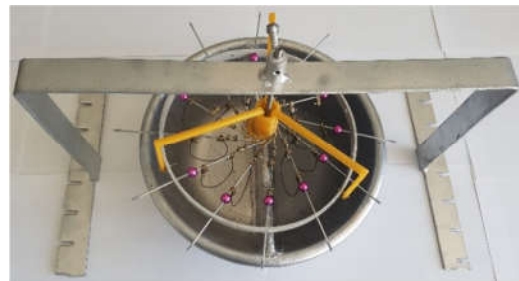
² Fused deposition Modeling (FDM)

¹ Spokes

حرارتی، مخزن و پایه فلزی آن را نشان می‌دهد.



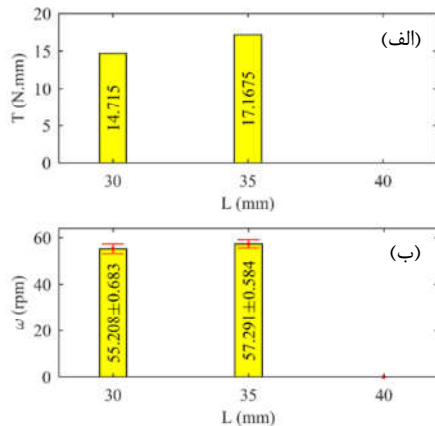
شکل ۳- موتور حرارتی ساخته شده و نحوه اندازه‌گیری L روی آن



شکل ۴- موتور حرارتی سوار شده روی پایه فلزی و مخزن آن

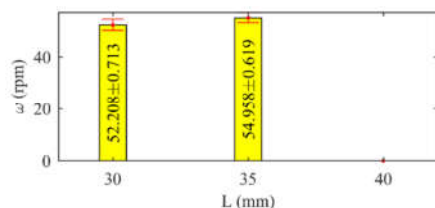
۳-۱- بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ موتور

به منظور بررسی تأثیر فاصله L بر مقدار گشتاور و سرعت زاویه‌ای، مقادیر پارامترهای $D = 1 \text{ mm}$ ، $A_f = 54^\circ\text{C}$ ، $N = 12$ ، $T_h = 100^\circ\text{C}$ و $T_c = 0^\circ\text{C}$ و $M = 12$ ثابت و سه مقدار متفاوت ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلی‌متر به پارامتر L اختصاص می‌یابد. همانطور که از شکل ۵ (الف) و (ب) پیداست، به ازای مقدار معینی از L ، مقدار گشتاور و سرعت زاویه‌ای بیشینه است. اما در فواصل کمتر یا بیشتر از این فاصله مقدار گشتاور و سرعت زاویه‌ای کمتر می‌شود تا اینکه نهایتاً در فواصل بسیار کم و بسیار زیاد (فاصله $L=40 \text{ mm}$) به صفر می‌رسد؛ چرا که در این فواصل نیرو به صورت زاویه‌دار به ترمینال‌ها وارد شده و موجب می‌شود که مولفه‌ای از نیرو که ایجاد گشتاور می‌کند کاهش یابد.



شکل ۵- تأثیر فاصله L بر (الف) گشتاور خروجی (ب) سرعت زاویه‌ای

برای بررسی تأثیر مهره‌های کاهنده اصطکاک بر مقدار سرعت زاویه‌ای، آزمایش قبل با در نظر گرفتن $M = 0$ تکرار می‌شود. مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که مهره‌های کاهنده اصطکاک، اصطکاک ایجاد شده روی ترمینال‌ها را کاهش داده و بدین طریق سبب افزایش سرعت موتور می‌شوند. اگر فاصله محل قرار گرفتن ترمینال‌های ثابت از مرکز موتور، ایده‌آل‌ترین فاصله، یعنی ۳۵ میلی‌متر باشد، سرعت زاویه‌ای موتور با حذف مهره‌های کاهنده اصطکاک از ۵۷/۳ به ۵۵ دور بر دقیقه کاهش می‌یابد، که معادل اختلافی ۴ درصدی است.



۳-۲- آزمایشات تجربی

سرعت دروانی موتور با شمارش تعداد دور موتور در هر دقیقه و مقدار گشتاور، با اتصال نیروسنج به یکی از میله‌های راهنما و ضرب بازوی گشتاور در مقدار نیرو محاسبه می‌شوند. برای اندازه‌گیری نیرو از نیروسنج دیجیتالی مدل 50Kg محصول شرکت WeiHeng، که دارای دقت ۱۰ گرم است، استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری دما، از دامسنج دیجیتالی مدل TFA 30.1048 محصول شرکت TFA DOSTMANN، با دامنه اندازه‌گیری ۵۰- تا ۳۰۰ درجه سلسیوس و دقت ± 1 درجه سلسیوس، استفاده می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

با نصب موتور بر روی پایه، در هر لحظه نیمی از سیم‌ها در آب گرم و نیمی در آب سرد قرار می‌گیرند. با تنظیم ارتفاع موتور سعی می‌شود که بیش از نصف طول سیم‌ها در آب غوطه‌ور گردد. سیم‌هایی که در آب گرم قرار دارند تمایل به بازگشت به شکل اولیه خود دارند. این سیم‌ها، که در فاز آستنیت هستند، مدول الاستیکی به مراتب بالاتر از سیم‌های موجود در آب سرد، که در فاز مارتنزیت هستند، دارند. لذا برآیند این نیروها به سمت ناحیه دما پایین خواهد بود. این نیرو به دو مؤلفه نرمال و مماسی تجزیه شده و باعث ایجاد گشتاور حول مرکز موتور می‌شود.

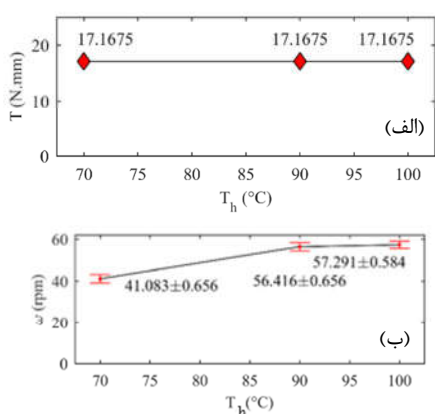
در این بخش تأثیر پارامترهای مختلف شامل قطر، D ، دمای استحاله آستنیتی، A_f ، و تعداد سیم‌های نایتینول، N ، دمای آب گرم، T_h ، و سرد مخزن موتور، T_c ، تعداد مهره‌های کاهنده اصطکاک، M ، و

شکل ۶- تاثیر فاصله L بر سرعت زاویه‌ای در حالت $M = 0$

برای بررسی تاثیر دمای مخزن آب سرد بر مقادیر گشتاور و سرعت زاویه‌ای، مقادیر پارامترهای $D = 1\text{ mm}$ ، $A_f = 54^\circ\text{C}$ ، $N = 12$ ، $T_c = 0^\circ\text{C}$ ، $T_h = 100^\circ\text{C}$ و چهار مقدار متفاوت ۰، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درجه سلسیوس به پارامتر T_c اختصاص می‌یابد. با توجه به شکل ۷ (الف) و (ب)، افزایش دمای آب سرد تا ۲۰ درجه سلسیوس، تاثیر چندانی بر مقدار گشتاور ندارد. با افزایش بیشتر این دما سیم‌های موجود در ناحیه دما پایین، استحاله مارتنزیتی کاملی را تجربه نکرده و نیروی برآیند و گشتاور ایجاد شده ناچیز خواهد بود. همچنین به دلیل آنکه با افزایش دما سرعت پاسخگویی آلیاژهای حافظه‌دار کاهش می‌یابد، سرعت دورانی کاهش یافته و در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مقدار صفر می‌رسد.

است که توسط نیروسنج موجود اندازه‌گیری آن و ارائه منحنی امکان‌پذیر نیست.

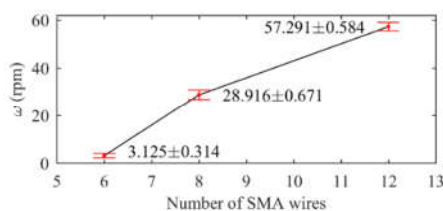
به منظور بررسی تاثیر دمای A_f بر مقادیر گشتاور و سرعت زاویه‌ای، مقادیر پارامترهای $D = 1\text{ mm}$ ، $T_c = 0^\circ\text{C}$ ، $T_h = 100^\circ\text{C}$ ، $L = 35\text{ mm}$ ، $N = 12$ و $M = 12$ ثابت و دو مقدار ۵۴ و ۸۰ درجه سلسیوس به پارامتر A_f اختصاص داده می‌شود. با توجه به شکل ۱۰، افزایش A_f تاثیر قابل توجهی بر مقدار گشتاور خروجی ندارد؛ چرا که هر چند دمای استحاله آستنیتی سیم‌ها کاهش داده می‌شود، ولی دمای آب گرم هنوز بالاتر از این دما بوده و سیم‌ها استحاله کامل را تجربه کرده و نیروی ایجاد شده تغییر چندانی نمی‌کند. با این وجود با افزایش دمای استحاله، سرعت زاویه‌ای موتور کاهش می‌یابد؛ زیرا اختلاف دمای آب گرم و دمای استحاله کاهش یافته و سرعت پاسخ آلیاژ حافظه‌دار کاهش می‌یابد.



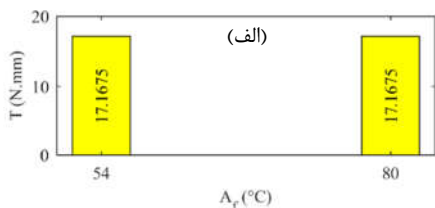
شکل ۷- تاثیر دمای T_c بر (الف) گشتاور خروجی (ب) سرعت زاویه‌ای

برای بررسی تاثیر دمای مخزن آب گرم بر مقادیر گشتاور و سرعت زاویه‌ای، مقادیر پارامترهای $D = 1\text{ mm}$ ، $A_f = 54^\circ\text{C}$ ، $N = 12$ ، $T_c = 0^\circ\text{C}$ و سه مقدار متفاوت ۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به پارامتر T_h اختصاص می‌یابد. با مراجعه به شکل ۸ (الف) و (ب) می‌توان دریافت که کاهش دمای آب گرم، تاثیر چندانی بر مقدار گشتاور خروجی ندارد. چرا که، هر چند دمای آب گرم کاهش داده می‌شود ولی این دما کماکان بالاتر از دمای استحاله آستنیتی سیم‌ها بوده و با گذشت مدت زمانی اندک سیم‌ها کاملا وارد فاز آستنیت می‌شوند و نیروی لازم جهت دوران مجموعه را فراهم می‌کنند. از آنجا که با کاهش دمای آب گرم، سرعت پاسخگویی آلیاژ حافظه‌دار کاهش یافته و مجموعه با سرعت کمتری نیروی تحریک مورد نیاز را تامین می‌کند، سرعت زاویه‌ای موتور، تقریبا بصورت خطی، کاهش می‌یابد.

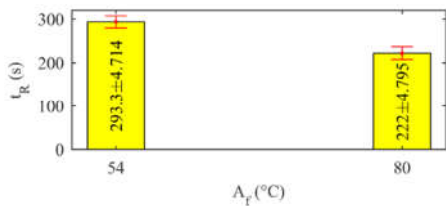
شکل ۸- تاثیر دمای T_h بر (الف) گشتاور (ب) سرعت زاویه‌ای



شکل ۹- تاثیر تعداد سیم‌های نایتینول بر سرعت زاویه‌ای موتور



برای بررسی تاثیر تعداد سیم‌های نایتینول بر مقادیر گشتاور و سرعت زاویه‌ای، مقادیر پارامترهای $D = 1\text{ mm}$ ، $A_f = 54^\circ\text{C}$ ، $T_c = 0^\circ\text{C}$ ، $T_h = 100^\circ\text{C}$ ، $L = 35\text{ mm}$ و $M = 12$ ثابت و سه مقدار متفاوت ۰، ۱۲، ۸ و ۶ برای پارامتر N در نظر گرفته می‌شود. همانطور که شکل ۹ نشان می‌دهد، با کاهش N ، سرعت زاویه‌ای کاهش می‌یابد؛ چرا که با این کاهش، از تعداد عامل‌های وارد کننده نیرو کاسته می‌شود. لازم به ذکر است که گشتاور ایجاد شده در این حالت به قدری اندک



شکل ۱۲- تأثیر دمای A_f بر مدت زمان موتور حرارتی

۲-۳- محاسبه میزان بازده موتور حرارتی

اگر Q مقدار گرمای داده شده و W مقدار کار انجام شده باشد، آنگاه بازده موتور، η ، از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (1)$$

اگر در هر لحظه طولی معادل $L_0 = 8 \text{ cm}$ از $N_0 = 8$ سیم در آب گرم قرار داشته و پس از گذشت زمان $t = 60 \text{ s}$ دمای آن از مقدار $T_0 = 100^\circ\text{C}$ به مقدار $T_1 = 80^\circ\text{C}$ کاهش یابد، مقدار گرمای داده شده به سیم‌ها و کار انجام شده به ترتیب عبارت است از:

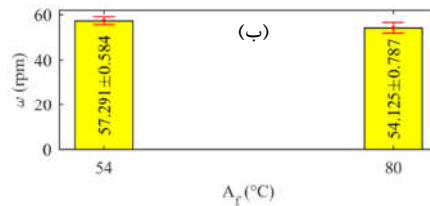
$$Q = \frac{\pi}{4} \rho D^2 N_0 L_0 C (T_1 - T_0) \quad (2)$$

$$W = T \omega t \quad (3)$$

که در آن قطر سیم و $C = 3200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ و $\rho = 6450 \text{ kg/m}^3$ به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی نایتینول هستند. با جایگذاری حداکثر مقدار T و ω در روابط فوق، مقدار بازده موتور به میزان ۳/۰۲ درصد محاسبه می‌گردد. دقت شود که آب مخزن علاوه بر انتقال گرما با سیم مقدار زیادی از گرما خود را به محیط منتقل می‌کند. لذا چنانچه بتوان محفظه را در مقابل انتقال گرما به محیط عایق نمود بازدهی موتور به میزان قابل توجهی افزایش پیدا خواهد نمود.

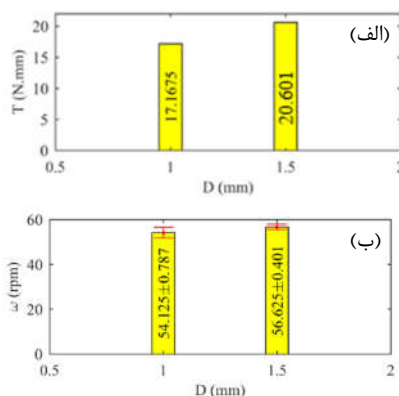
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف بر سرعت زاویه‌ای، گشتاور و مدت زمان دوران یک موتور حرارتی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش دمای آب گرم و یا کاهش دمای آب سرد مخزن موتور، مقدار سرعت زاویه‌ای افزایش پیدا می‌کند. با این وجود افزایش یا کاهش این دماها، مادامی که استحاله‌ها بصورت کامل صورت پذیرند، تأثیر چندانی بر مقدار گشتاور خروجی موتور ندارد. از سوی دیگر با افزایش قطر و تعداد سیم‌های نایتینول، گشتاور و سرعت زاویه‌ای موتور افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزایش دمای استحاله آستنیتی سیم‌های نایتینول و استفاده از مهره‌های کاهنده اصطکاک، سبب کاهش سرعت زاویه‌ای می‌شود. علاوه حداکثر سرعت زاویه‌ای و گشتاور به ازای یک فاصله معین برای تکیه‌گاه سیم‌های نایتینول بدست می‌آید. هر چه دمای استحاله سیم نایتینول پایین‌تر باشد، موتور مدت زمان طولانی‌تری به چرخش خود ادامه می‌دهد. این امر زمانی صادق است که مخازن آب گرم و سرد به تدریج دچار تغییر دما شوند. چنانچه دمای این منابع آب ثابت باشد چرخش موتور دائمی خواهد بود.



شکل ۱۰- تأثیر دمای A_f بر (الف) گشتاور (ب) سرعت زاویه‌ای

به منظور بررسی تأثیر قطر سیم‌ها بر مقادیر گشتاور و سرعت زاویه‌ای، مقادیر پارامترهای $A_f = 74^\circ\text{C}$ ، $T_c = 0^\circ\text{C}$ ، $T_h = 100$ ، $M = 12$ و $N = 12$ ، $L = 35 \text{ mm}$ و دو مقدار متفاوت ۱ و ۱/۵ میلی‌متر برای پارامتر D در نظر گرفته می‌شود. به دلیل در اختیار نداشتن سیم با قطر ۱/۵ میلی‌متر و $A_f = 80^\circ\text{C}$ ، از سیمی با $A_f = 74^\circ\text{C}$ استفاده شده است. با توجه به بخش قبل، این امر تأثیر چندانی بر نتایج به دست آمده نخواهد داشت چرا که T_h بالاتر از A_f است و سیم‌ها استحاله کامل را تجربه خواهند نمود. با نگاهی به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که افزایش قطر سیم سبب افزایش گشتاور و سرعت زاویه‌ای می‌شود. چرا که با افزایش قطر، نیروی محرک ایجاد شده توسط سیم‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- تأثیر قطر D بر (الف) گشتاور (ب) سرعت زاویه‌ای

به منظور بررسی تأثیر دمای استحاله آستنیتی سیم‌ها بر مدت زمان دوران موتور، مقادیر پارامترهای $D = 1 \text{ mm}$ ، $T_c = 0^\circ\text{C}$ ، $T_h = 100$ ، $M = 12$ و $N = 12$ ، $L = 35 \text{ mm}$ و دو مقدار ۵۴ و ۸۰ درجه سانتیگراد به پارامتر A_f اختصاص می‌یابد. با توجه به شکل ۱۲، افزایش A_f سبب کاهش مدت زمان دوران موتور می‌شود. چرا که هر چه A_f بالاتر باشد، دمای آب گرم مخزن موتور در اثر تبادل گرمایی، سریع‌تر به این دما می‌رسد و در نتیجه سیم‌ها با ورود به آب گرم، وارد استحاله آستنیتی نمی‌شوند و همین عامل، چرخش موتور را متوقف می‌کند.

۵- مراجع

- [1] Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, Vol 56: pp. 1078-1113, 2014.
- [2] Yuan H., Fauroux J.C., Chapelle F., Balandraud X., A review of rotary actuators based on shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 28, No. 14, pp. 1863-1885, 2017.
- [3] Kuribayashi K., A new servo motor using shape memory alloy. In *15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 1989.
- [4] Sharma S.V., Nayak M.M., Dinesh N.S., Umanand L., Micro stepping of shape memory alloy based poly phase motor. In *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, IEEE, 2008.
- [5] Dilthey S., Meier H., Simulation-based design of a rotatory SMA drive. *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 686-690, 2009.
- [6] Zhang X.Y., Yan, X.J., Continuous rotary motor actuated by multiple segments of shape memory alloy wires. *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 21, No. 12, pp. 2643-2649, 2012.
- [7] Hwang D., Higuchi T., A rotary actuator using shape memory alloy (SMA) wires. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1625-1635, 2013.
- [8] Banks, Ridgway M., Energy conversion system. U.S. Patent 3,913,326, issued October 21, 1975.