مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1396، دوره 17، شماره 6، ص‌ص 401-412

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تئوری،عددی و تجربی عملکرد یک موتور لنگ صفحه‌ای با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

محمد عباسی گواری[1]، مهدی مدبری‌فر[2*]، بهمن میرزاخانی[3]، یوسف پاینده[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

3- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه اراک، اراک

* اراک، صندوق‌پستی 38156-8-8349، m-modabberifar@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 اسفند 1395

پذیرش: 08 خرداد 1396

ارائه در سایت: 08 تیر 1396

کلید واژگان:

موتور غلتشی

موتور لنگ

محرکهٔ حافظه‌دار دورانی

مکانیزم انعطاف‌پذیر صفحه‌ای

چکیده

امروزه موتورهای لنگ به‌عنوان محرکه‌هایی با قابلیت تولید حرکت دورانی با گشتاور بالا بدون نیاز به گیربکس خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پژوهش شامل بررسی تئوری، عددی و تجربی عملکرد یک موتور لنگ صفحه‌ای با مکانیزم انعطاف‌پذیر است که توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار راه‌اندازی می‌شود. انبساط و انقباض ترتیبی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار توسط مکانیزم انعطاف‌پذیر و سیستم چرخ‌دنده‌ای موتور شامل یک چرخ‌دندهٔ داخلی و یک چرخ‌دندهٔ خارجی، به یک حرکت منحنی‌الخط صفحه‌ای با مسیر دایره‌ای و سپس به حرکت دورانی پیوسته و نامحدود تبدیل می‌شود. پس از طراحی سیستم چرخ‌دنده‌ای برمبنای محدودهٔ حرکت قابل دستیابی ناشی از تغییر طول سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، رابطهٔ بین گشتاور خروجی، پارامترهای هندسی موتور و تنش در سیم آلیاژ حافظه‌دار استخراج شده است. همچنین پارامترهای مکانیزم انعطاف‌پذیر، شامل طول، ارتفاع، ضخامت و تعداد تیغه‌های انعطاف‌پذیر به‌منظور تعیین سختی مکانیزم، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. سپس تحلیل فرکانسی با روش اجزای محدود انجام شده است تا میزان استحکام ساختاری و پایداری عملکردی مکانیزم طراحی شده، بررسی گردد. برای بررسی قابلیت اجرایی شدن و کارایی موتور طراحی شده، یک نمونهٔ آزمایشی ساخته شده است. نتایج تجربی نشان از توانایی موتور در تولید حرکت دورانی پیوسته و نامحدود و تکرارپذیری در ماکزیمم گشتاور خروجی موتور دارد. میانگین گشتاور خروجی موتور در ولتاژهای 1.6، 1.8و 2 ولت به ترتیب برابر با 29.9، 32.7 و 34.3 نیوتن-میلی‌متر، اندازه‌گیری شده است. با توجه به ویژگی‌های موتور، استفاده از آن در کاربری‌هایی که فضای محدودی داشته و نیاز به گشتاور بالا و سرعت پایین دارند، مناسب می‌باشد.

Theoretical, Numerical and Experimental Analysis of a Planar Wobble Motor Driven by Shape Memory Alloy (SMA) Wires

Mohammad Abbasi[1], Mehdi Modabberifar[1*], Bahman Mirzakhani[2], Yousef Payandeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- Department of Materials Science Engineering, Arak University, Arak, Iran

* P.O.B. 38156-8-8349, Arak, Iran, m-modabberifar@araku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 March 2017
Accepted 29 May 2017
Available Online 29 June 2017

Keywords:
Rotary motor
wobble motor
rotary shape memory alloy (SMA) actuator
planar compliant mechanism

ABSTRACT

Nowadays, wobble motors are widely used as actuators with high torque, generating rotary motion without the need for external gearbox. This study contains theoretical, numerical and experimental analysis of a planar wobble motor with compliant mechanism driven by shape memory alloy (SMA) wires. The cyclic expansion and contraction of SMA wires were converted to the plane curvilinear motion with circular path and then to the continuous unlimited rotary motion by means of a compliant mechanism and a gear system consisting an internal and an external gear. After gear system designing, based on achievable motion range by SMA wires length changes, the relation between output torque, geometrical properties of motor and stress in SMA wire were derived. Also, compliant mechanism parameters consisting of length, height, thickness and number of flexures were analyzed in order to mechanism stiffness calculating. Then the frequency analysis using finite element method was performed to investigate structural robustness and operational stability of designed mechanism. The designed motor was fabricated and its performance was evaluated. The experimental results demonstrate motor capability in generating unlimited continuous rotary motion and repeatable output torque. The Maximum output torque was measured as 29.9, 32.7 and 34. 3N.mm for 1.6, 1.8 and 2V applied voltages respectively. This motor is appropriate for high torque and low speed applications with limited workspace.

1 – مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار، ترکیبات بین فلزی هستند که می‌توانند شکل اولیهٔ خود را طی یک استحالهٔ حالت جامد[1] که با افزایش دما اتفاق می‌افتد، بازیابی کنند

[1] Solid-Phase Transformation

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Abbasi, M. Modabberifar, B. Mirzakhani, Y. Payandeh, Theoretical, Numerical and Experimental Analysis of a Planar Wobble Motor Driven by Shape Memory Alloy (SMA) Wires, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 401-412, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

[1]. براساس این خاصیت، امروزه انواع مختلف محرکه‌های حافظه‌دار، در شاخه‌های متنوع علمی و صنعتی مانند رباتیک، مهندسی هوا-فضا، اتومبیل‌سازی و مهندسی پزشکی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [2-5]. دلیل این اقبال گسترده، وجود مزایایی همچون نسبت نیرو به حجم و نسبت توان به وزن بالا، اشغال فضای کوچک، ساختار ساده و عملکرد پاک و بی سر و صدا در این نوع محرکه‌هاست. اگر چه وجود هیسترزیس، پاسخ زمانی کند و بازده انرژی بسیار کوچک از ضعف‌های اساسی محرکه‌های حافظه‌دار به شمار می‌رود، اما در برخی کاربردهای خاص، استفاده از آن‌ها از بهترین گزینه‌های ممکن است [6].

کلیدی‌ترین المان هر محرکهٔ حافظه‌دار دورانی، مکانیزمی است که تغییر شکل یا تغییر طول آلیاژهای حافظه‌دار را به حرکت دورانی تبدیل می‌کند. برخی از این مکانیزم‌ها می‌توانند حرکت نوسانی تولید کنند. مثلاً تحریک ترتیبی دو تکه سیم آلیاژ حافظه‌دار که در مقابل هم قرار گرفته‌اند و به یک پولی متصل هستند، موجب نوسان پولی خواهد شد [7]. برخی دیگر حرکت دورانی کامل اما محدود تولید می‌کنند. مثل یک استوانه که یک تکه سیم آلیاژ حافظه‌دار، به شکل فنر دور آن پیچانده شده و با تحریک سیم حافظه‌دار می‌تواند چندین دور بچرخد [8]. برای دستیابی به یک محرکهٔ دورانی حافظه‌دار که قابلیت تولید حرکت دورانی نامحدود داشته باشد، می‌توان از اصول راه‌اندازی موتورهای لنگ[1] بهره گرفت.

مکانیزم لنگ، یک واحد تقویت گشتاور است که به جهت بازده و گشتاور خروجی بالا در ساخت انواع محرکه‌های دورانی، مورد توجه قرار گرفته است. این مکانیزم، به‌طور معمول شامل یک روتور است که در مرکز مکانیزم واقع می‌شود و می‌تواند حرکت دورانی خالص انجام دهد. یک استاتور نیز به‌صورت خارج از مرکز، روتور را احاطه کرده است. با اعمال ترتیبی نیروهای خارجی در راستاهای مختلف، استاتور روی یک مسیر دایره‌ای به حرکت درآمده و به دلیل درگیر بودن با روتور، موجب دوران آن خواهد شد. بر این مبنا، انواع مختلف موتور لنگ مانند الکترواستاتیکی، الکترومغناطیسی، پیزو الکتریکی، پنوماتیکی و مغناطیسی، ساخته شده‌اند. نخستین بار، جاکبسن و همکارانش [9]، ایدهٔ موتور لنگ را مطرح کردند. آن‌ها یک موتور لنگ الکترواستاتیکی با استاتوری متشکل از 8 الکترود و یک روتور آلومینیومی، پیاده‌سازی کردند. قطر خارجی این موتور 1600 میکرون بود. هم‌زمان تریمر و جیبنز نیز به‌طور مستقل، موفق به ساخت موتور لنگ الکترواستاتیکی دیگری شدند [10]. روتور و استاتور این موتور لنگ، تیوب‌های اپوکسی بوده و الکترودهای آن را لایه‌های طلا با ضخامت 1000 آنگستروم، تشکیل می‌دهند. سوزوموری و هوری [11]، برای غلبه بر لغزش در موتورهای لنگ الکترواستاتیکی، موتوری با روتور و استاتور دندانه‌ای، با تمرکز بر اصلاح پروفیل دندانه‌ها، پیاده‌سازی کردند. ساروس و همکارانش [12]، یک موتور لنگ الکترواستاتیکی با روتور مخروطی ابداع کردند. ویژگی این موتور عدم نیاز به یاتاقان پاشنه‌ای بلند است که در طرح‌های قبل، استفاده از آن اجتناب‌ناپذیر بود. اولین موتور لنگ الکترومغناطیسی، توسط جانگریز و کلی [13] ، برای به‌کارگیری در کاتترهای اولتراسوند[2] ساخته شد. الکترودهای استاتور، شامل سیم‌لوله‌هایی هستند که خم شده و به شکل مثلث درآمده‌اند. ایزوکا و فوجیتا [14]، یک موتور لنگ الکترومغناطیسی رزوه شده ابداع کردند. هدف از این طرح، ایجاد جابجایی‌های خطی بزرگ با استفاده از تبدیل حرکت دورانی به خطی، از طریق ایجاد رزوه در روتور و استاتور بود. داریو و همکارانش [15]، به این نتیجه رسیدند که برای کاهش حجم یک میکروربات کوه‌نورد باید یکی از اجزای موتور، به‌عنوان چرخ عمل کند. راه حل مطرح شده، استفاده از دو موتور لنگ الکترومغناطیسی روتور خارجی بود. این موتور متشکل از یک استاتور ستاره‌ای شکل و یک روتور حلقه‌ای شکل است که به‌عنوان چرخ ربات عمل می‌کند. سپس دی‌کریستوفارو و همکارانش [16]، این موتور لنگ را برای به‌کارگیری در تجهیزات پزشکی که وارد بدن بیمار می‌شوند، بهینه‌سازی کردند. این بهینه‌سازی شامل دندانه‌ای کردن روتور و استاتور و اصلاح پروفیل دندانه‌ها برای حذف لغزش بود. سوزوموری و هوری [17]، پس از تجربهٔ موفق موتور لنگ الکترواستاتیکی، یک موتور لنگ پنوماتیکی، ابداع کردند. حرکت لنگ با تزریق ترتیبی هوا به یک محفظهٔ سیلیکونی، تولید شده و سپس با یک سیستم چرخ‌دنده‌ای به حرکت دورانی با گشتاور بالا تبدیل می‌شود. استویانوویک و همکارانش [18]، موتور لنگ دیگری با استفاده از محرکه‌های پنوماتیکی و یک مکانیزم متوازی‌الاضلاع سه‌گانه[3] پیاده‌سازی کردند. یک موتور لنگ پیزوالکتریک نیز توسط هایاشی و همکارانش [19]، طراحی و ساخته شد که با استفاده از 4 محرکهٔ پیزو راه‌اندازی می‌شود. کادوتا و همکارانش [20]، یک موتور لنگ مغناطیسی برای ایجاد حرکت دورانی و خطی، ابداع کردند. هدف از این ابداع، استفاده از آن در ترمیم استخوان فک پایین است. این وسیله به طور کامل در بدن بیمار جاسازی می‌شود. راه‌اندازی محرکه، غیرتماسی بوده و از خارج بدن بیمار انجام می‌شود. در سال‌های اخیر، موتور لنگ با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار نیز پیاده‌سازی شده است. هوآنگ و هیگوچی با استفاده از سه تکه سیم آلیاژ حافظه‌دار و یک مکانیزم متوازی‌الاضلاع سه‌گانه، دو موتور لنگ حافظه‌دار ابداع کردند. نوع اول [21]، شامل یک مجموعه چرخ‌دندهٔ اینولوت و نوع دوم [22]، شامل یک مجموعه چرخ‌دندهٔ سیکلوئیدی بود. آن‌ها سپس موتور لنگ حافظه‌دار دیگری شامل چهار تکه سیم حافظه‌دار و یک مکانیزم انعطاف‌پذیر[4]، طراحی و پیاده‌سازی کردند [23].

در این پژوهش، موتور لنگ حافظه‌دار پیشنهاد شده در [23]، باز طراحی و ساخته شده و عملکرد آن تحلیل می‌شود. یکی از جنبه‌های نوآورانهٔ طرح حاضر، مونتاژی بودن اجزای آن است. این ویژگی موجب می‌شود در صورت نیاز، عضو آسیب دیده به سهولت قابل تعویض باشد. در موتور پیشنهادی [23] به‌علت یکپارچه بودن مکانیزم انعطاف‌پذیر، این امکان فراهم نیست. همچنین نیاز به ماشین‌کاری‌های بسیار پیچیده نیز با این روش، مرتفع خواهد شد. استفاده از چرخ‌دنده‌های فلزی به جای چرخ‌دنده‌های پلیمری عامل دیگری برای حذف ماشین‌کاری‌های پیچیده است و کیفیت و استحکام دندانهٔ بهتری را باعث خواهد شد. همچنین در این پژوهش برای ارزیابی بهتر عملکرد و بازدهی موتور، بیشینهٔ گشتاور قابل دستیابی، با استفاده از روش انرژی محاسبه شده و با گشتاور اندازه‌گیری شده به روش تجربی مقایسه می‌شود.

2- اصول عملکرد موتور لنگ صفحه‌ای با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

سه بخش اساسی تشکیل دهندهٔ یک محرکهٔ حافظه‌دار دورانی شامل آلیاژ حافظه‌دار، المان‌هایی برای بایاس کردن آلیاژ حافظه‌دار و مکانیزم انتقال حرکت، هستند.. در میان سه عامل ذکر شده، مکانیزم انتقال حرکت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا تمام ویژگی‌های موتور، اعم از ساختاری

[1] Wobble Motors
[2] Ultrasound Catheters
[3] Triple Parallelogram Mechanism
[4] Compliant Mechanism

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

(ابعاد کلی، ساختار مکانیکی و ...) و عملکردی (محدودهٔ حرکت، سرعت دورانی و گشتاور خروجی) به شدت، تحت تأثیر این مکانیزم قرار دارند. وظیفهٔ این مکانیزم، تبدیل حرکت‌های گسسته و محدود ناشی از انبساط و انقباض آلیاژهای حافظه‌دار، به حرکت دورانی پیوسته است. هندسه و اجزای تشکیل دهندهٔ موتور پیشنهادی در "شکل 1" قابل مشاهده است. مکانیزم انتقال حرکت در این موتور، شامل دو بخش است. بخش اول از یک چرخ‌دندهٔ خارجی به‌عنوان روتور و یک چرخ‌دندهٔ داخلی به‌عنوان ووبلر[1] (عضوی که حرکت لنگ انجام می‌دهد)، تشکیل شده است. وظیفهٔ این بخش تبدیل حرکت لنگ به حرکت دورانی برمبنای اصول موتورهای لنگ می‌باشد. بخش دوم وظیفهٔ تبدیل حرکت‌های خطی ناشی از تحریک آلیاژ حافظه‌دار به حرکت لنگ را به عهده دارد. با توجه به این‌که حرکت لنگ، جابجایی روی مسیر دایره‌ای بوده و یک حرکت منحنی‌الخط صفحه‌ای است؛ بنابراین می‌توان این حرکت را با ترکیب حرکت در دو راستای عمود برهم تولید کرد. به این منظور از یک مکانیزم انعطاف‌پذیر استفاده شده است.

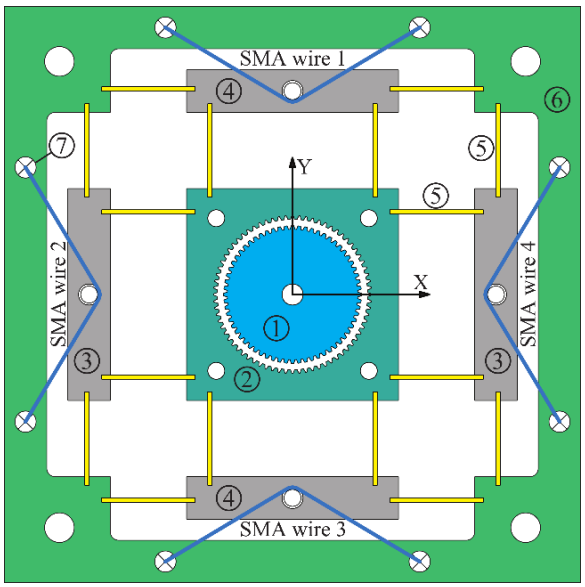
مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر، به مکانیزم‌هایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها اعضای صلب، به‌جای مفاصل لولایی، با استفاده از مفاصل انعطاف‌پذیر به یکدیگر متصل می‌شوند. مفصل انعطاف‌پذیر[2]، یک المان بسیار نازک است که دو عضو صلب مکانیزم را به یکدیگر متصل کرده و حرکت نسبی بین آن‌ها را از طریق خمش الاستیک خود فراهم می‌کند [24]. مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر به طور گسترده در سیستم‌های موقعیت‌دهی دقیق و فوق دقیق و نیز در محرکه‌های پیزوالکتریک، برای بزرگنمایی حرکت به‌کار می‌روند [25].

مطابق "شکل 1" مکانیزم انعطاف‌پذیر پیشنهادی از قاب ثابت، بلوک‌های متحرک، تیغه‌های انعطاف‌پذیر و ووبلر تشکیل شده است. تیغه‌های انعطاف‌پذیر در واقع بازوهای الاستیک هستند که اتصال بین ووبلر، بلوک‌های متحرک و قاب ثابت را برقرار می‌کنند. تعداد کل این تیغه‌ها 16 است. یک سر هر تیغه به بلوک‌های متحرک و سر دیگر آن یا به ووبلر و یا به قاب ثابت چسبانده شده است. برای آن‌که ووبلر در جهت محور X حرکت کند، باید تیغه‌هایی که به موازات محور Y قرار گرفته‌اند، دچار خمش شوند و بالعکس. نیروی برگشت فنری در تیغه‌های خم شده، سیم‌های حافظه‌دار را بایاس می‌کند. تعداد چهار بلوک متحرک نیز به صورت متقارن در چهار طرف ووبلر قرار گرفته‌اند. دو بلوک توانایی حرکت در راستای X و دو بلوک دیگر توانایی حرکت در راستای Y را دارند. نیروی ناشی از تحریک آلیاژهای حافظه‌دار، ابتدا به بلوک‌های متحرک و سپس از طریق تیغه‌های انعطاف‌پذیر به ووبلر منتقل می‌شود. بنابراین مکانیزم انعطاف‌پذیر پیشنهادی علاوه بر ایجاد حرکت لنگ، نقش المان بایاس کننده را نیز ایفا خواهد کرد. علاوه بر این، ساختار صفحه‌ای مجموعهٔ مکانیزم انتقال حرکت و تقارن موجود در آن، استحکام ساختاری و پایداری عملکردی موتور را تضمین می‌کند.

مطابق "شکل 1" چهار تکه سیم آلیاژ حافظه‌دار به شکل متقارن روی موتور قرارگرفته‌اند. دو سر هر سیم روی قاب ثابت به ترمینال‌های الکتریکی وصل می‌شود. برای کاهش هرچه بیشتر ابعاد موتور، سیم‌ها با عبور از یک پین که در مرکز بلوک‌های متحرک قرار می‌گیرد، به شکل منحنی درآمده‌اند.

اصول عملکرد منحصربه‌فرد موتور لنگ حافظه‌دار پیشنهادی در "شکل 2" به صورت شماتیک، نشان داده شده است. "شکل 2-a" موتور را در حالت استراحت نشان می‌دهد. در این وضعیت، ووبلر در مرکز موتور قرار گرفته و با روتور هیچ‌گونه درگیری ندارد. هنگامی که سیم S1 تحریک شود، انقباض

[1] Wobbler
[2] Flexures



1: Rotor
2: Wobbler
3: Moving blocks with translation capability in X direction
4: Moving blocks with translation capability in Y direction
5: Beam flexures
6: Frame fixed on ground
7: Electric terminals

Fig. 1 Geometry and components of the SMA wire drive wobble motor

شکل 1 هندسه و اجزای تشکیل دهندهٔ موتور لنگ با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

ناشی از آن، موجب خمش الاستیک تیغه‌های انعطاف‌پذیری که به موازات محور X قرار دارند، می‌گردد و در نتیجه دو بلوک متحرک (که توانایی حرکت در راستای محور Y را دارند) و ووبلر در جهت مثبت محور Y، جابجا خواهند شد و درگیری دندانه‌های روتور و ووبلر، اتفاق خواهد افتاد (شکل 2-b). وقتی سیمی تحریک می‌شود، به‌طور طبیعی، سیمی که در مقابل آن قرار گرفته، منبسط خواهد شد. بنابراین در این مرحله از تحریک، سیم S3، دچار افزایش طول شده است.

مکانیزم انعطاف‌پذیر پیشنهادی، طوری طراحی شده که حرکت‌ها در دو راستای عمود برهم X و Y، از یکدیگر مستقل هستند. بنابراین در این مرحله از حرکت، ووبلر هیچ حرکتی در راستای X نخواهد داشت. این اصل برای سایر مراحل تحریک نیز صادق است. ویژگی استقلال حرکتی، این امکان را به ووبلر خواهد داد که حرکت لنگ خود را بدون خطا و با ترکیب حرکت‌های دو راستای عمود برهم انجام دهد.

در مرحله بعدی برای راه‌اندازی روتور در جهت ساعت‌گرد، باید سیم S2 تحریک شود. اما برای آن‌که حرکت لنگ به درستی انجام شود، ضروری است که جابجایی ووبلر در جهت مثبت محور Y که در مرحله قبل اتفاق افتاده بود، تا زمانی که ووبلر به طور کامل در جهت منفی محور X جابجا نشده، حفظ گردد. بنابراین این مرحله از حرکت با تحریک دوگانهٔ سیم‌های S1 و S2 امکان‌پذیر خواهد بود. دوران روتور در اثر این تحریک دوگانه در "شکل 2-c" نمایش داده شده است. با غیرفعال شدن S1، جابجایی ووبلر در جهت مثبت محور Y حذف خواهد شد (شکل 2-d). به همین صورت، حرکت لنگ ووبلر و دوران روتور با تحریک ترتیبی منفرد و دوگانهٔ سیم‌های حافظه‌دار ادامه خواهد یافت (شکل 2-e و شکل 2-f).

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

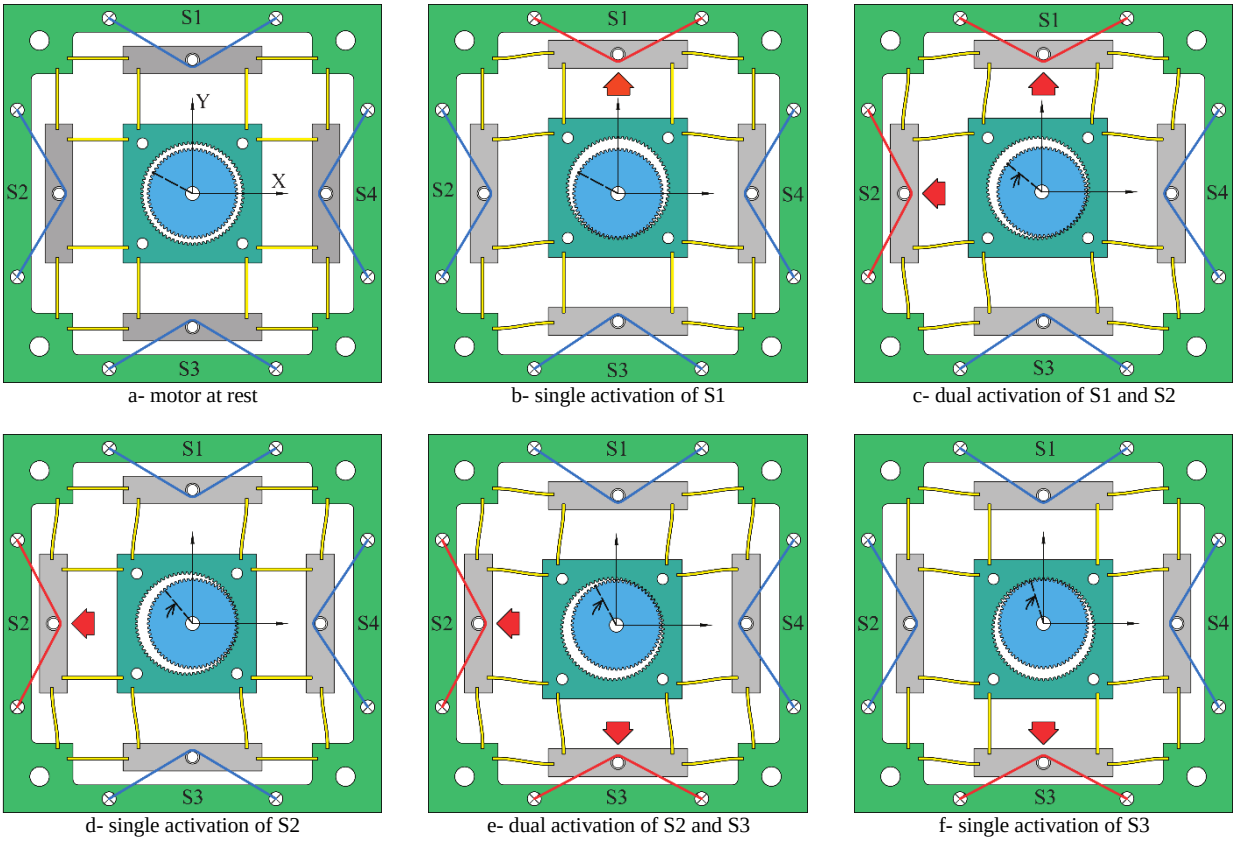


Fig. 2 Operating principle of SMA wire drive wobble motor

شکل 2 اصول عملکرد موتور لنگ با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

بنابر آنچه گفته شد، مکانیزم انعطاف‌پذیر قادر است انقباض و انبساط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار را به خوبی به حرکت لنگ صفحه‌ای تبدیل کند و در عین حال به ساده شدن ساختار موتور و استحکام و پایداری حرکت آن کمک کند.

برای دوران ساعت‌گرد و پاد-ساعت‌گرد روتور، ترتیب تحریک سیم‌های حافظه‌دار به شکل زیر خواهد بود:

دوران ساعت‌گرد: S1-S(1,2)-S2-S(2,3)-S3-S(3,4)-S4-S(4,1)

دوران پاد-ساعت‌گرد: S1-S(1,4)-S4-S(4,3)-S3-S(3,2)-S2-S(2,1)

3- طراحی مکانیکی موتور لنگ با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

3-1- سیستم چرخ‌دنده‌ای

سرعت خروجی موتور، تابعی از نسبت دنده[1] و فرکانس تحریک سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار است. اگر ω_r و ω_w به ترتیب سرعت دوران روتور و فرکانس حرکت لنگ ووبلر و Z_r و Z_w به ترتیب تعداد دندانه‌های روتور و ووبلر باشد، آن‌گاه می‌توان نوشت:

$$\omega_r = -\frac{Z_w - Z_r}{Z_r}\,\omega_w \qquad (1)$$

وجود علامت منفی در رابطهٔ (1)، بیان‌گر مخالفت در جهت حرکت ووبلر و جهت دوران روتور است. نسبت دنده یا نسبت کاهش[2] را در موتور لنگ، می‌توان از رابطهٔ (2) به دست آورد.

$$R = -\frac{Z_w - Z_r}{Z_r} \qquad (2)$$

اگر فرکانس تحریک سیم‌های حافظه‌دار بر حسب هرتز برابر با f باشد، آن‌گاه سرعت خروجی موتور برحسب دور بر دقیقه را می‌توان از رابطهٔ (3) به دست آورد.

$$\omega_r = 60\frac{Z_w - Z_r}{Z_r} f \qquad (3)$$

همچنین رابطهٔ بین گشتاور خروجی موتور (T_r) و گشتاور تولید شده توسط ووبلر (T_w) از رابطهٔ (4) قابل محاسبه خواهد بود.

$$T_r = -\eta\frac{Z_r}{Z_w - Z_r}\,T_w \qquad (4)$$

در رابطهٔ (4)، ضریب η بازده سیستم چرخ‌دنده‌ای و عددی کوچک‌تر از 1 است که به صورت تجربی به دست می‌آید.

موضوع مهم دیگر در مورد سیستم چرخ‌دنده‌ای، فاصلهٔ مرکزی روتور و ووبلر در حالت درگیری کامل است. این فاصله نباید از محدودهٔ حرکتی قابل دستیابی مکانیزم بیشتر باشد. اگر مدول دندانه‌ها برابر با m باشد، آن‌گاه فاصلهٔ مرکزی روتور و ووبلر در حالت درگیری کامل (a)، از رابطهٔ (5) قابل محاسبه است.

$$a = \frac{m}{2}(Z_w - Z_r) \qquad (5)$$

اگر تعداد دندانه‌های ووبلر برابر با 72 بوده و مدول دندانه‌های روتور و ووبلر برابر با 0.5 میلی‌متر باشد، آن‌گاه باتوجه به روابط (2) و (5)، نسبت دنده و فاصلهٔ مرکزی روتور و ووبلر (محدودهٔ حرکتی موردنیاز)، به ازای مقادیر مختلف تعداد دندانه‌های روتور، مطابق با جدول 1 خواهد بود. کاهش اختلاف بین تعداد دندانه‌های روتور و ووبلر، موجب کاهش محدودهٔ حرکتی و افزایش گشتاور خروجی خواهد شد. اما باید مشکلات ناشی از تداخل دندانه‌ها را نیز

[1] Gear Ratio
[2] Reduction Ratio

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

در نظر گرفت. برای پیشگیری از این تداخل باید ارتفاع سر دندانه‌ها کاهش یابد که این خود، احتمال لغزش را افزایش داده و راندمان سیستم چرخ‌دنده را به شدت کاهش خواهد داد. از طرف دیگر بزرگ شدن اختلاف تعداد دندانه‌ها به‌منظور افزایش سرعت خروجی، محدودهٔ حرکتی لازم را افزایش خواهد داد که با توجه به محدودیت در میزان کرنش و طول سیم حافظه‌دار، پدیدهٔ مطلوبی نیست.

3-2- محدودهٔ حرکتی مکانیزم

مقدار کرنش قابل بازیابی در آلیاژهای حافظه‌دار با افزایش تعداد چرخه‌های تحریک، کاهش پیدا خواهد کرد. برای آلیاژ نیکل-تیتانیوم مقدار این کرنش با افزایش تعداد چرخه‌ها از 8 تا 0.5 درصد متغیر خواهد بود. در جدول 2 مقدار کرنش قابل بازیابی در تنش کاری 100 مگاپاسکال به ازای تعداد چرخه برای آلیاژ نیکل-تیتانیوم، فهرست شده است [26].

همان‌گونه که از داده‌های جدول 2 نیز قابل دریافت است، آلیاژهای حافظه‌دار در تحریک‌های اولیه، رفتار منظمی از خود نشان نمی‌دهند و مقدار کرنش بازیابی آن‌ها منظم نیست. در صورتی که آلیاژ حافظه‌دار در معرض تعداد زیادی چرخهٔ ترمومکانیکی، تحت بار ثابت قرار گیرد، پاسخ عملکردی آلیاژ منظم می‌شود. این فرآیند، آموزش[1] نامیده می‌شود. قبل از استفاده، آموزش به منظور یکسان‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار، حائز اهمیت است. به همین علت قبل از به کار گرفتن آن در موتور، به تعداد 300 چرخه، تحت آموزش قرار خواهد گرفت تا رفتار آن یکنواخت شود. لذا بیشینه کرنش قابل بازیابی سیم در تنش 100 مگاپاسکال، پس از آموزش بین 2 الی 4 درصد خواهد بود.

"شکل 3" موقعیت بلوک متحرک را قبل و بعد از تحریک سیم حافظه‌دار مربوط به آن نمایش می‌دهد. در این شکل، a محدودهٔ حرکت بلوک را نشان می‌دهد و H فاصلهٔ بین اتصال‌های الکتریکی است. فاصلهٔ بین مرکز بلوک در حالت استراحت و اتصال الکتریکی با نماد A نمایش داده شده است. با دانستن طول سیم قبل و بعد از تحریک و نیز هندسهٔ قرارگیری آن و همچنین با توجه به مقدار کرنش قابل بازیابی، می‌توان محدودهٔ قابل حصول حرکتی مکانیزم را به دست آورد. محدودهٔ حرکتی قابل دستیابی، با فرض کرنش 2 الی 4 درصد و مقادیر مختلف H در جدول 3 فهرست شده است.

3-3- گشتاور

"شکل 4" روتور و ووبلر را در حالت درگیری نشان می‌دهد. در این حالت دایره‌های گام روتور و ووبلر در نقطهٔ P، بر یکدیگر مماس هستند. دوران نقطهٔ تماس به اندازه θ_w ، دوران روتور به اندازه θ_r را در جهت مخالف در پی خواهد داشت. فرض می‌شود نیروی F بر ووبلر اثر کرده و آن را به اندازهٔ dx در جهت خود حرکت دهد. هدف، به‌دست آوردن مقدار دوران روتور به ازای این حرکت دیفرانسیلی است. همچنین در "شکل 4" موقعیت نقطهٔ تماس روی دایرهٔ گام روتور را پس از حرکت ووبلر به اندازهٔ dx قابل مشاهده است. مرکز ووبلر روی دایره‌ای به شعاع a و هم مرکز با روتور حرکت می‌کند. مقدار a از رابطهٔ (5) قابل محاسبه است.

با توجه به "شکل 4" رابطهٔ بین دوران جزئی نقطه تماس و حرکت دیفرانسیلی ووبلر در اثر نیروی F از رابطهٔ (6) قابل محاسبه خواهد بود.

$$dx = a \times d\theta_w \times \sin\left(\frac{\pi - d\theta_w}{2}\right) \quad (6)$$

[1] Training

جدول 1 مشخصات سیستم چرخ‌دنده‌ای به ازای مقادیر مختلف تعداد دندانه‌های روتور

Table 1 Gear system characteristics for various numbers of rotor teeth

تعداد دندانه‌های روتور	فاصلهٔ مرکزی روتور و ووبلر (mm)	نسبت دنده
68	1	1:17
68	1.25	1:13.4
66	1.5	1:11
65	1.75	1:9.3
64	2	1:8

جدول 2 مقادیر کرنش قابل بازیابی به ازای تعداد چرخه تحریک در تنش 100 مگاپاسکال برای آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم [26]

Table 2 Recoverable strain values for number of excitation cycles at 100Mpa stress for Ni-Ti shape memory alloy [26]

تعداد چرخه‌های تحریک	بیشینه کرنش قابل بازیابی (٪)	تعداد چرخه‌های تحریک
1	6-8	1
کمتر از 10^2	6-8	کمتر از 10^2
بین 10^2 و 10^5	2-4(3)	بین 10^2 و 10^5
بین 10^5 و 10^7	0.5	بین 10^5 و 10^7

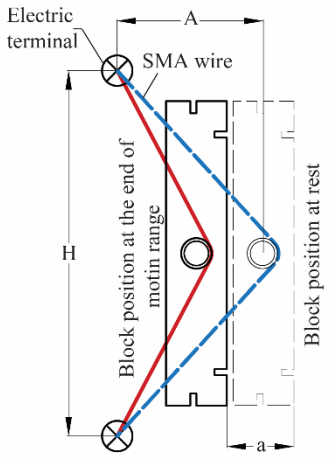


Fig. 3 Motion range of compliant mechanism with considering moving block position before and after of excitation

شکل 3 محدودهٔ حرکتی مکانیزم انعطاف‌پذیر با توجه به موقعیت بلوک متحرک، قبل و بعد از تحریک

جدول 3 محدودهٔ حرکتی قابل دستیابی در شرایط هندسی مختلف

Table 3 Achievable motion ranges in different geometrical conditions

H (mm)	A (mm)	طول اولیهٔ سیم (mm)	طول سیم پس از تحریک (mm)	a (mm)
80	15	87.4	83.9~85.6	2.3~4.9
60	15	69.6	66.8~68.2	1.4~2.9
40	15	53.5	51.3~52.4	0.8~1.7
20	15	41.3	39.6~40.5	0.5~1.0

با توجه به ناچیز بودن $d\theta_w$ ، رابطهٔ (6) به رابطهٔ (7) تقلیل خواهد یافت.

$$dx = a \times d\theta_w \quad (7)$$

از طرفی رابطهٔ بین دوران روتور و ووبلر براساس اصول موتور لنگ، طبق رابطهٔ (8) به دست می‌آید.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

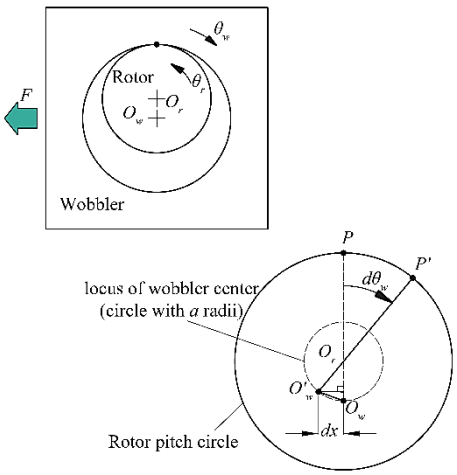


Fig. 4 Amount of contact point rotation due to differential motion of wobbler

شکل 4 مقدار دوران نقطهٔ تماس به ازای حرکت دیفرانسیلی ووبلر

$$dx = a \times \frac{Z_r}{Z_w - Z_r} \times d\theta_r \tag{8}$$

کار جزئی که نیروی F انجام می‌دهد برابر dU بوده و طبق رابطهٔ (9) محاسبه می‌شود.

$$dU = F \cdot dx \tag{9}$$

همچنین گشتاور خروجی موتور که از این نیرو ناشی می‌شود از رابطهٔ (10) به‌دست خواهد آمد.

$$T_r = \frac{dU}{d\theta_r} \tag{10}$$

در نهایت با ترکیب روابط (8)، (9) و (10) رابطهٔ تئوری گشتاور خروجی و نیروی وارد شونده به ووبلر به صورت رابطهٔ (11) خواهد بود.

$$T_r = a \times \frac{Z_r}{Z_w - Z_r} \times F \tag{11}$$

البته در عمل به دلیل اتلاف انرژی، گشتاور خروجی کمتر از این مقدار است و به ضریب بازده سیستم (η) بستگی دارد. بر این اساس گشتاور خروجی عملی موتور (τ) براساس رابطهٔ (12) به دست خواهد آمد.

$$\tau = a \times \eta \frac{Z_r}{Z_w - Z_r} \times F \tag{12}$$

ماکزیمم تنش قابل بازیابی در آلیاژهای حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم بین 500 و 900 مگاپاسکال است. اما کار کردن در این تنش‌ها، عمر خستگی سیم را به‌شدت کاهش خواهد داد. تنش امن کاری برای آلیاژهای نیکل-تیتانیوم بین 100 تا 130 مگاپاسکال توصیه می‌شود [26]. بنابراین علم به رابطهٔ بین تنش در سیم و بارگذاری روی شفت خروجی موتور ضروری است تا ماکزیمم گشتاور قابل اعمال به موتور بدون آن‌که به سیم آسیب برسد، مشخص گردد و سیم‌ها در تنش‌های امن کار کنند.

با توجه به "شکل 3" نیروی کششی اعمالی به سیم حافظه‌دار (R) را می‌توان برحسب نیروی موردنیاز برای غلبه بر گشتاور اعمالی به موتور (F) و پارامترهای هندسی A و H به دست آورد. چون محدوده حرکتی مکانیزم در مقایسه با پارامترهای هندسی ناچیز است، می‌توان از تغییرات A در حین حرکت صرف‌نظر کرد. بنابراین فرض می‌شود نیروی کششی اعمالی به سیم با حرکت مکانیزم تغییر نکند. در این صورت می‌توان نوشت:

$$F = \frac{2A}{\sqrt{\left(\frac{H^2}{4}\right) + A^2}} \times R \tag{13}$$

اگر سطح مقطع سیم حافظه‌دار S و تنش اعمالی به آن برابر با σ باشد، می‌توان نوشت:

$$R = S \times \sigma \tag{14}$$

و نهایتاً با ترکیب روابط (12)، (13) و (14)، رابطهٔ بین تنش در سیم حافظه‌دار و گشتاور اعمالی به موتور به‌صورت رابطهٔ (15) به‌دست خواهد آمد.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\left(\frac{H^2}{4}\right) + A^2}}{2A} \times \frac{Z_w - Z_r}{a\eta S Z_r}\tau \tag{15}$$

3-4- مکانیزم انعطاف‌پذیر

طراحی مکانیزم انعطاف‌پذیر، شامل تعیین هندسه، جنس و تعداد تیغه‌های انعطاف‌پذیر و همچنین نحوهٔ چینش آن‌هاست. طراحی باید به‌گونه‌ای انجام پذیرد که سختی سازه‌ای مکانیزم انعطاف‌پذیر و محدودهٔ جابجایی آن متناسب با سیم حافظه‌دار و سیستم چرخ‌دنده‌ای موتور باشد. همچنین فرکانس‌های طبیعی مکانیزم انعطاف‌پذیر باید فاصلهٔ کافی را با فرکانس کاری موتور داشته باشند.

"شکل 5" یک تیغهٔ انعطاف‌پذیر را همراه با مشخصات هندسی، تکیه‌گاه‌ها و بارهای وارد بر آن نمایش می‌دهد. طول، ضخامت و ارتفاع تیغه به ترتیب عبارتند از L، t و h. هر دو سر تیغه در تکیه‌گاه گیردار قرار دارد. یکی از این تکیه‌گاه‌ها ثابت است (روی قاب ثابت یا بلوک متحرک قرار دارد) و دیگری همراه با خمش تیغه حرکت می‌کند (روی ووبلر قرار دارد). با توجه به صفحه‌ای بودن تغییر شکل‌های تیغه، نیروی محوری F_x ، نیروی عرضی F_y و ممان خمشی M_z به تیغه وارد می‌شوند. این بارها می‌توانند موجب تغییر طول (Δx)، خیز (Δy) و یا تغییر شیب ($\Delta\gamma$) تیغه گردند

برای محاسبهٔ سختی تیغه می‌توان از روش انرژی استفاده کرد. انرژی کرنشی کل را می‌توان از جمع انرژی کرنشی محوری، خمشی و برشی طبق روابط (16- 1) تا (16- 4) به دست آورد.

$$U = U_{\text{axial}} + U_{\text{bending}} + U_{\text{Shear}} \tag{16-1}$$

$$U_{\text{axial}} = \frac{1}{2EA}\int_0^L P^2(x)dx \tag{16-2}$$

$$U_{\text{bending}} = \frac{1}{2EI}\int_0^L M^2(x)dx \tag{16-3}$$

$$U_{\text{shear}} = \frac{\alpha}{2GA}\int_0^L V^2(x)dx \tag{16-4}$$

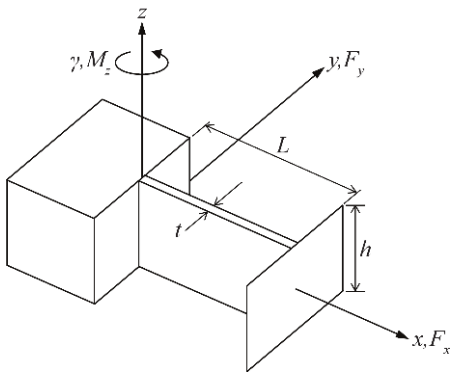


Fig. 5 Coordinate system of the flexure beam

شکل 5 دستگاه مختصات تیغهٔ انعطاف‌پذیر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

در روابط (16- 1) تا (16- 4)، U، U_{axial}، U_{bending} و U_{shear} به ترتیب انرژی کرنشی کل، محوری، خمشی و برشی ذخیره شده در تیغه، A و I ، به ترتیب مساحت و ممان دوم سطح مقطع تیغه، E و G، به ترتیب مدول یانگ و مدول برشی و α ضریب تصحیح تنش برشی[1] (برای مقاطع مستطیلی مقدار آن 1.2 است) هستند[27]. $P(x)$، $M(x)$ و $V(x)$ نیز به ترتیب نیروی محوری، ممان خمشی و نیروی برشی در هر مقطع از تیغه می‌باشند و از روابط (17- 1) تا (17- 3) قابل محاسبه‌اند.

$$P(x) = F_x \tag{17-1}$$

$$M(x) = xF_y - M_z \tag{17-2}$$

$$V(x) = F_y \tag{17-3}$$

با جای‌گذاری روابط (17- 1) تا (17- 3) در روابط (16- 2) تا (16- 4) خواهیم داشت:

$$U_{\text{axial}} = \frac{F_x^2 L}{2EA} \tag{18-1}$$

$$U_{\text{bending}} = \frac{1}{2EI}\left(\frac{1}{3}F_y^2 L^3 + M_z^2 L - F_y M_z L^2\right) \tag{18-2}$$

$$U_{\text{shear}} = \frac{\alpha F_y^2 L}{2GA} \tag{18-3}$$

به این ترتیب مقدار انرژی کرنشی کل با جای‌گذاری روابط (18- 1) تا (18- 3) در رابطهٔ (16- 1) مشخص خواهد شد و مقادیر تغییر شکل‌های تیغه با استفاده از قضیهٔ دوم کاستیگلیانو، از روابط (19- 1) تا (19- 3)، قابل محاسبه خواهد بود [27]:

$$\Delta x = \frac{\partial U}{\partial F_x} = \frac{F_x L}{2EA} \tag{19-1}$$

$$\Delta y = \frac{\partial U}{\partial F_y} = \frac{1}{2EI}\left(\frac{2}{3}F_y L^3 - M_z L^2\right) + \frac{\alpha F_y L}{GA} \tag{19-2}$$

$$\Delta \gamma = \frac{\partial U}{\partial M_z} = \frac{1}{2EI}\left(2M_z L - F_y L^2\right) \tag{19-3}$$

شیب تیغه در انتهای آن برابر با صفر است؛ لذا با قرار دادن $\Delta\gamma = 0$ در رابطهٔ (19- 3)، ممان خمشی M_z مطابق با رابطهٔ (20) به دست خواهد آمد.

$$M_z = \frac{F_y}{2}L \tag{20}$$

با قرار دادن رابطهٔ (20) در رابطهٔ (19- 2) خواهیم داشت:

$$\Delta y = \left(\frac{L^3}{12EI} + \frac{\alpha L}{GA}\right)F_y \tag{21}$$

بنابراین سختی تیغه در راستای y یا به طور کلی در راستای حرکت ووبلر، از رابطهٔ (22) قابل محاسبه خواهد بود.

$$k_y = \frac{F_y}{\Delta y} = \left(\frac{L^3}{12EI} + \frac{\alpha L}{GA}\right)^{-1} \tag{22}$$

رابطهٔ (22) را می‌توان با جای‌گذاری $A = ht$ و $I = \frac{1}{12}ht^3$ ، به شکل رابطهٔ (23) برحسب ابعاد تیغه بازنویسی کرد.

$$k_y = \left[\frac{1}{Eh}\left(\frac{L}{t}\right)^3 + \frac{\alpha}{Gh}\left(\frac{L}{t}\right)\right]^{-1} \tag{23}$$

نحوهٔ قرارگیری تیغه‌ها در مکانیزم انعطاف‌پذیر، در "شکل 6" نمایش داده شده است. مطابق "شکل 6"، این مکانیزم شامل 8 تیغهٔ موازی با محور X و 8 تیغهٔ موازی با محور Y می‌باشد. بنابرین سختی سازه در هر دو راستا از رابطهٔ (24) به دست خواهد آمد.

$$k_{\text{sys}} = 8 \times \left[\frac{1}{Eh}\left(\frac{L}{t}\right)^3 + \frac{\alpha}{Gh}\left(\frac{L}{t}\right)\right]^{-1} \tag{24}$$

با توجه به کوچک بودن مدول یانگ و بزرگ بودن نسبت استحکام تسلیم به مدول الاستیک در پلیمرها، این مواد، بهترین گزینه در ساخت تیغه‌های انعطاف‌پذیر هستند. همچنین با توجه به موجود بودن ورق‌های با ضخامت کم از جنس پلی‌آمید 6، تیغه‌های انعطاف‌پذیر از این جنس ساخته شده‌اند. برخی خواص فیزیکی و مکانیکی این ماده در جدول 4 فهرست شده است [28].

در "شکل 7" نحوهٔ تاثیر پارامترهای ابعادی تیغه بر سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر، با توجه به رابطهٔ (24) و داده‌های جدول 4 مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق "شکل‌های 7-a تا 7-c"، سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر با افزایش ضخامت و ارتفاع تیغه‌ها، افزایش خواهد یافت و افزایش طول تیغه‌ها موجب کاهش سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر خواهد شد. جهت کاهش هر چه بیشتر ابعاد موتور باید طول تیغه‌ها را کوتاه انتخاب کرد. اما کاهش طول تیغه موجب افزایش سختی مکانیزم و در نتیجه افزایش تنش در سیم حافظه‌دار خواهد شد. برای حل این مشکل می‌توان ضخامت تیغه‌ها را کاهش داد. برای ساخت تیغه‌های انعطاف‌پذیر از ورق پلی‌آمیدی به ضخامت 1 میلی‌متر استفاده شده است. استفاده از این ورق، نیاز به ماشین‌کاری تیغه‌ها را برطرف خواهد کرد. سایر پارامترهای مکانیزم انعطاف‌پذیر (معرفی شده در شکل 6)، در جدول 5 فهرست شده‌اند.

اکنون با توجه به رابطهٔ (24) و داده‌های جدول 4 و جدول 5، سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر برابر با 1.50 نیوتن بر میلی‌متر خواهد بود.

مقدار تنش در سیم آلیاژ حافظه‌دار، مستقیماً تحت تأثیر مقدار سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر، شرایط هندسی قرارگیری سیم و محدودهٔ حرکتی مکانیزم قرار دارد. مقدار تنش در سیم آلیاژ حافظه‌دار با توجه به شرایط هندسی، سطح مقطع سیم و محدودهٔ حرکتی از روابط (13) تا (14) قابل محاسبه است. مقدار این تنش طبق رابطهٔ (25) به دست خواهد آمد.

$$\sigma_{\text{SMA}} = \frac{\sqrt{A^2 + \frac{H^2}{4}}}{2SA} k_{\text{sys}} a \tag{25}$$

در جدول 6 مقادیر تنش در سیم آلیاژ حافظه‌دار به قطر 0.2 میلی‌متر در شرایط هندسی و محدوده‌های حرکتی مختلف، فهرست شده است.

بیشترین تنش اعمالی به تیغه‌ها را می‌توان از رابطهٔ (26) به دست آورد [29].

$$\sigma_{\max} = 3K_{\text{stress}} E \frac{t}{L^2} \delta_{\max} \tag{26}$$

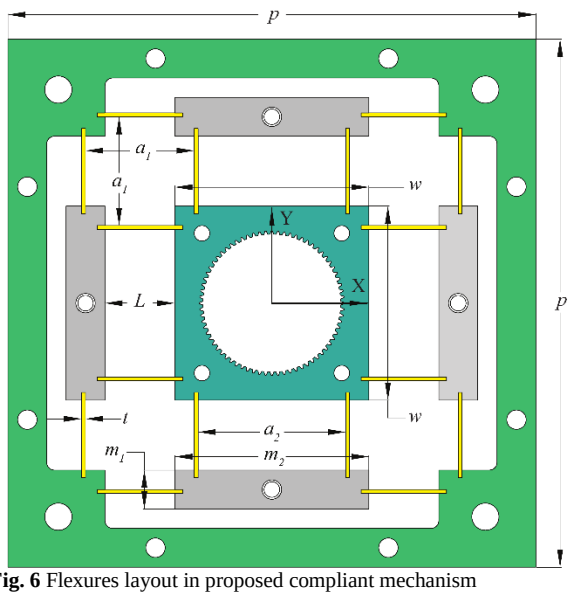


Fig. 6 Flexures layout in proposed compliant mechanism

شکل 6 آرایش تیغه‌ها در مکانیزم انعطاف‌پذیر پیشنهادی

[1] Shear Correction Factor

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

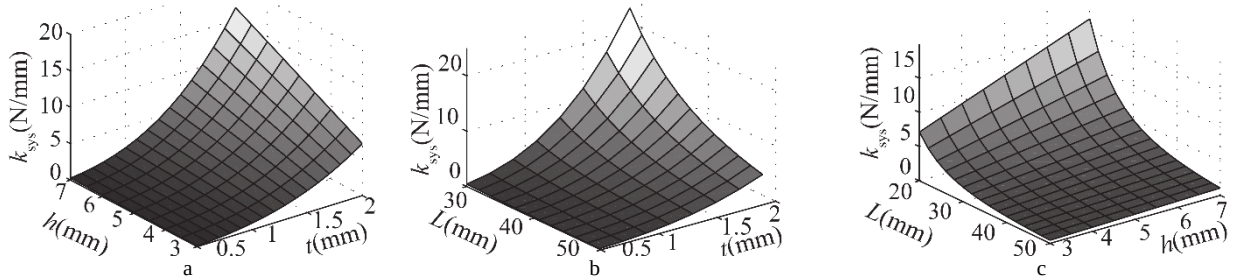


Fig. 7 Parametric effects of thickness, height and length of the beam flexures on the proposed compliant mechanism stiffness

شکل 7 تأثیرات پارامتریک ضخامت، ارتفاع و طول تیغه‌های انعطاف‌پذیر روی سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر پیشنهادی

جدول 4 برخی خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌آمید 6 [28]

Table 4 Some physical and mechanical properties of polyamide 6 [28]

خاصیت	نماد	اندازه	واحد
چگالی	ρ	1.14	gr/cm^3
مدول یانگ	E	2400	MPa
نسبت پواسن	v	0.39	-
مدول برشی	G	863	MPa
تنش تسلیم	S_y	37.5	MPa

جدول 5 ابعاد پارامترهای مکانیزم انعطاف‌پذیر پیشنهادی

Table 5 Dimensions of proposed compliant mechanism parameters

پارامتر	اندازه(mm)	پارامتر	اندازه(mm)
L	40	a_1	50
h	5	a_2	38
p	180	m_1	10
w	50	m_2	50

جدول 6 مقادیر تنش در سیم حافظه‌دار با قطر 0.2 میلی‌متر در شرایط هندسی و محدوده‌های حرکتی مختلف

Table 6 Stress values in 0.2mm diameter SMA wire at different geometrical and translational range conditions

شرایط هندسی (mm)		تنش (MPa) در محدوده‌های حرکت:			
H	A	1mm	2mm	3mm	4mm
20	15	29.5	-	-	-
40	15	41.6	-	-	-
60	15	56.6	122.2	-	-
80	15	73.3	154.5	245.0	369.0

در رابطهٔ (26) K_{stress} ضریب تمرکز تنش و δ_{max} مقدار خیز انتهای تیغه (محدودهٔ حرکتی مکانیزم) می‌باشد. اگر محدوده حرکتی مکانیزم را 4 میلی‌متر و ضریب تمرکز تنش را برابر با 1.1 در نظر بگیریم، آن‌گاه ماکزیمم تنش در تیغه‌های انعطاف‌پذیر برابر با 19.8 مگاپاسکال خواهد بود.

این مقدار بسیار کوچک‌تر از تنش تسلیم ماده است؛ بنابرین تیغه‌ها در حین کار دچار تسلیم نخواهند شد. اما برای آن‌که مکانیزم انعطاف‌پذیر، استحکام ساختاری و پایداری عملکردی خود را در حین کار حفظ کند؛ اولاً باید فرکانس‌های تشدید خطی آن، بزرگ‌تر از فرکانس کاری موتور باشد و ثانیاً فرکانس تشدید دورانی آن، بیش از دو برابر فرکانس تشدید خطی باشد [29]. به همین دلیل، شبیه‌سازی المان محدود، برای یافتن سه فرکانس طبیعی ابتدایی و شکل مدهای[1] متناظر با این فرکانس‌ها انجام شده است.

مدل‌سازی اجزای مکانیزم انعطاف‌پذیر در نرم‌افزار کتیا[2] انجام پذیرفت. سپس این اجزا برای انجام تحلیل فرکانسی وارد نرم‌افزار آباکوس[3] شده و با یکدیگر مونتاژ شدند. برای سهولت در مش‌بندی، دندانه‌های ووبلر مدل نشده‌اند. با توجه به این‌که تیغه‌های انعطاف‌پذیر از جنس پلی‌آمید هستند، خواص موجود در جدول 4 به آن‌ها اختصاص داده شد. ووبلر، بلوک‌های متحرک و قاب ثابت از جنس آلومینیوم (Al 1050) در نظر گرفته شدند و خواص اختصاص داده شده به آن‌ها در جدول 7 فهرست شده است [30].

برای قاب ثابت، شرط مرزی گیردار در نظر گرفته شد و سایر اجزا فقط مجاز به حرکت در صفحه XY شدند. اجزای مکانیزم با استفاده از المان 4-گرهی هرمی مش‌بندی شده‌اند. مدل مش‌بندی شدهٔ مکانیزم در "شکل 8" قابل مشاهده است. در "شکل 9" نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده برای سه فرکانس تشدید به ترتیب اعداد 41.708، 42.305 و 149.770 هرتز را نمایش می‌دهند. دو فرکانس تشدید ابتدایی، مربوط به شکل مدهای خطی در راستاهای Y و X و فرکانس تشدید سوم مربوط به شکل مد دورانی در صفحه XY می‌باشند. فرکانس‌های تشدید خطی، بسیار بزرگ‌تر از فرکانس کاری موتور (کمتر از 0.5 هرتز) بوده و فرکانس تشدید دورانی، حدوداً سه برابر فرکانس تشدید خطی می‌باشد.بنابراین مکانیزم انعطاف‌پذیر، استحکام و پایداری خود را حین عملکرد حفظ خواهد کرد.

4- ساخت نمونهٔ آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها

4-1- مشخصات نمونهٔ آزمایشگاهی

در "شکل 10" تصویری از موتور لنگ ساخته شده، نمایش داده شده است.

جدول 7 برخی خواص فیزیکی و مکانیکی آلومینیوم 1050 [30]

Table 7 Some physical and mechanical properties of Al 1050 [30]

خاصیت	نماد	اندازه	واحد
چگالی	ρ	2.71	gr/cm^3
مدول یانگ	E	71000	MPa
نسبت پواسن	v	0.33	-

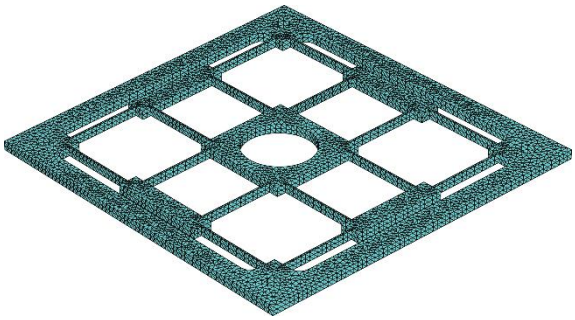


Fig. 8 Meshed model of proposed compliant mechanism for frequency analysis

شکل 8 مدل مش‌بندی شدهٔ مکانیزم انعطاف‌پذیر پیشنهادی برای تحلیل فرکانسی

[1] Mode Shapes
[2] CATIA V5-R18
[3] Abaqus/CAE 6.14-3

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

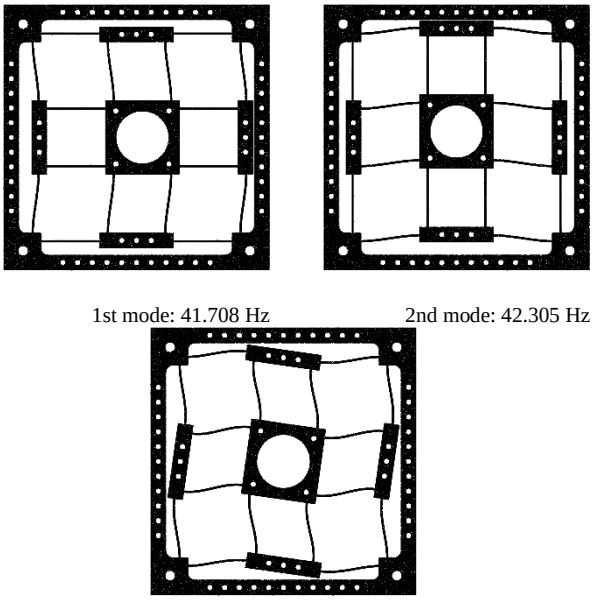


Fig. 9 Simulation results of frequency analysis

شکل 9 نتایج تحلیل فرکانسی

اجزای صلب موتور شامل قاب ثابت، بلوک‌های متحرک، ووبلر و روتور از جنس آلومینیوم هستند. این اجزا با استفاده از فرآیند وایرکات روی یک ورق آلومینیومی با ضخامت 5 میلی‌متر ساخته شده‌اند. همان‌گونه که در "شکل 10" نیز قابل مشاهده است، سوراخ‌هایی روی اضلاع قاب ثابت وجود دارند که محل بسته شدن ترمینال‌های الکتریکی هستند. چهار سوراخ نیز در چهار گوشهٔ قاب، برای ثابت کردن موتور، روی فیکسچر می‌باشند. همچنین شیارهایی روی قاب ثابت، بلوک‌های متحرک و ووبلر ایجاد شده که محل قرارگیری و چسباندن تیغه‌های انعطاف‌پذیر می‌باشند. در سوراخ مرکزی هر بلوک متحرک، یک پین قرار گرفته است که سیم آلیاژ حافظه‌دار از این پین عبور کرده و بدین وسیله ارتباط سیم با مکانیزم انعطاف‌پذیر برقرار می‌شود. برای بررسی اثر نسبت دنده از دو چرخ‌دنده با تعداد دندانه‌های متفاوت به‌عنوان روتور استفاده شده است. مشخصات سیستم چرخ‌دنده‌ای موتور در جدول 8 فهرست شده است. تیغه‌های انعطاف‌پذیر از یک ورق پلی‌آمیدی به ضخامت 1 میلی‌متر و با برش لیزر ساخته شده‌اند. برای آن‌که اجزای موتور در محل دقیق خود قرار گیرند، از یک فیکسچر استفاده شده است. این فیکسچر از جنس پلی‌متیل-متاکریلات با نام تجاری پلکسی‌گلس[1] بوده و روی آن سوراخ‌هایی تعبیه شده است. اجزای موتور به وسیلهٔ پین‌هایی در محل دقیق خود، روی فیکسچر مقید می‌شوند و پس از آن تیغه‌های پلی‌آمیدی در محل‌های تعبیه شده، با استفاده از چسب، به اجزای موتور متصل می‌شوند. یک یاتاقان غلتشی نیز در مرکز فیکسچر جاسازی شده است که شفت روتور، روی این یاتاقان سوار می‌شود.

4-2- سیم آلیاژ حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار با مبنای مس و آلیاژهای نیکل-تیتانیوم که اصطلاحاً نایتینول[2] نامیده می‌شوند، دو گروه اصلی آلیاژهای حافظه‌دار هستند. آلیاژهای نایتینول معمولاً بین 5 تا 10 برابر، گران‌تر از آلیاژهای با مبنای مس

[1] Plaxiglass
[2] Nitinol

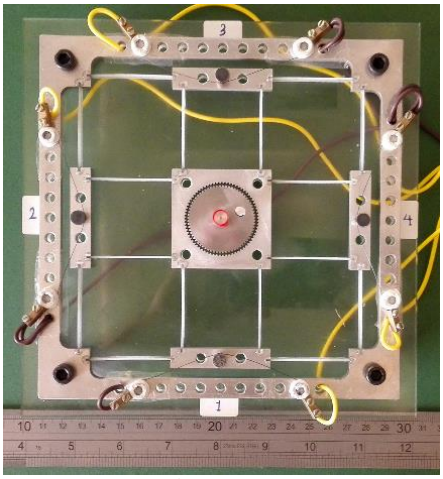


Fig. 10 Fabricated prototype of SMA wire drive wobble motor

شکل 10 نمونهٔ آزمایشگاهی ساخته شدهٔ موتور لنگ با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

جدول 8 مشخصات سیستم چرخ‌دنده‌ای موتور

Table 8 Gear system characteristics of motor

مشخصه	واحد	ووبلر	روتور 1	روتور 2
مدول	mm	0.5	0.5	0.5
زاویهٔ فشار	deg	20	20	20
تعداد دندانه	-	72	64	68
قطر دایرهٔ تاج	mm	35.4	32.6	34.6
قطر دایرهٔ ریشه	mm	37	31	33

هستند و هیسترزیس وسیع‌تری دارند. با این وجود، مزایایی هم‌چون مقاومت الکتریکی بالاتر، استحکام مکانیکی بیشتر، کرنش قابل بازیابی بزرگ‌تر و دماهای استحالهٔ کوچک‌تر آن‌ها نسبت به آلیاژهای با مبنای مس، سبب شده تا در ساخت محرکه‌های حافظه‌دار، نایتینول انتخاب اول باشد [31].

در بین اشکال مختلف آلیاژهای حافظه‌دار، استفاده از سیم بسیار کاربردی‌تر از سایر اشکال است. دلیل این امر، سرعت بالاتر خنک شدن سیم نسبت به سایر اشکال باتوجه به نسبت بالای سطح به حجم آن می‌باشد. هم‌چنین مناسب‌ترین روش برای تحریک سیم آلیاژ حافظه‌دار با قطر کوچک، استفاده از گرمایش ژولی[3] می‌باشد. در این روش با عبور جریان الکتریکی، سیم داغ شده و استحالهٔ آستنیتی در آن اتفاق می‌افتد و با قطع جریان، سیم خنک شده و به فاز مارتنزیت خود باز خواهد گشت [31].

در این پژوهش از سیم آلیاژ حافظه‌دار نایتینول به قطر 0.2 میلی‌متر با نام تجاری فلکسینول[4] استفاده شده است. دماهای شروع و پایان استحالهٔ آستنیتی سیم به ترتیب 71.1 و 76.2 درجهٔ سلسیوس و دماهای شروع و پایان استحالهٔ مارتنزیتی آن به ترتیب 47.6 و 33.6 درجهٔ سلسیوس است [32]. آزمایش‌ها در دمای اتاق (20±2 درجهٔ سلسیوس) انجام می‌گیرد؛ بنابرین سیم حافظه‌دار به هنگام خنک شدن به طور کامل به فاز مارتنزیت باز خواهد گشت. این سیم با استفاده از گرمایش ژولی به تعداد 300 چرخه در تنش ثابت 187 مگاپاسکال تحت آموزش قرار گرفته است. فرکانس قطع و وصل جریان الکتریکی 0.1 هرتز و سیکل کاری[5] آن 40 درصد می‌باشد.

[3] Joule Heating
[4] Flexinol
[5] Duty Cycle

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

اختلاف پتانسیل دو سر سیم هنگام آموزش به گونه‌ای تنظیم شده است که جریان عبوری از آن بین 0.6 تا 0.7 آمپر باشد.

4-3- تجهیزات آزمایش

در این پژوهش از یک منبع جریان مستقیم برای تغذیه مدار تولید کنندهٔ پالس و تحریک سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار استفاده شد. برای راه‌اندازی موتور، مداری ساخته شد که 4 پالس مربعی با اختلاف فاز 90 درجهٔ الکتریکی تولید می‌کند. هستهٔ مرکزی این مدار، یک میکروکنترلر ATMega8L است. برای تقویت جریان از 4 ماسفت[1] IRFZ44N استفاده شده است. مدار ساخته شده قابلیت تنظیم فرکانس بین 0.05 تا 2 هرتز و قابلیت تنظیم سیکل کاری بین 5 تا 50 درصد را داراست.

4-4- آزمایش سرعت

نخست عملکرد موتور با روتور شمارهٔ 1 مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به رابطهٔ 5 و داده‌های جدول 8 محدودهٔ حرکتی مکانیزم برابر با 2 میلی‌متر خواهد بود. با مراجعه به جدول 3 اگر سیم در شرایط هندسی‌ای بسته شود که فاصلهٔ مرکز تا مرکز سوراخ‌های اتصال 60 میلی‌متر باشد؛ امکان دستیابی به این محدودهٔ حرکت وجود دارد. به این منظور از 4 تکه سیم آلیاژ حافظه‌دار به طول 85 میلی‌متر استفاده شد. با اعمال جریان به سیم‌ها مشاهده شد که سیم‌ها فقط می‌توانند به مقداری بسیار ناچیز در بلوک‌های متحرک، جابجایی ایجاد کنند. دلیل این ناتوانی افزایش شدید سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر با بستن سیم‌ها می‌باشد. در واقع هر سیم برای حرکت دادن ووبلر باید در سیم مقابل خود تغییر شکل به وجود آورد که توانایی تولید نیروی لازم برای این تغییر شکل را ندارد. برای حل این مشکل، چاره در این دیده شد که سیم‌های حافظه‌دار طوری بسته شوند که در حالت استراحت موتور، با پین موجود روی بلوک‌های متحرک درگیر نبوده و بین آن‌ها فاصلهٔ آزاد وجود داشته باشد. اگر این فاصله آزاد به اندازهٔ محدودهٔ حرکتی مکانیزم باشد، آن‌گاه طی عملکرد یک سیم حافظه‌دار تا رسیدن به انتهای محدودهٔ حرکتی، سیم مقابل آن با پین مربوطه درگیر نبوده و بنابراین مانعی برای حرکت ایجاد نخواهد کرد. اما باید توجه داشت که مقدار کرنش مورد نیاز سیم‌ها در این حالت افزایش خواهد یافت. به این صورت که کرنش قابل بازیابی باید به حدی باشد که هم فاصلهٔ آزاد را حذف کند و هم بلوک متحرک را تا درگیری کامل روتور و ووبلر حرکت دهد. برای دستیابی به این شرایط سیم باید طوری بسته شود که فاصلهٔ مرکز تا مرکز سوراخ‌های اتصال 80 میلی‌متر باشد. به این منظور از 4 تکه سیم با طول 100 میلی‌متر استفاده شد. پس از بستن سیم‌ها، عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفت. تقریباً هیچ‌گونه تماس با کیفیتی بین روتور و ووبلر برقرار نشده و عملکرد قابل قبولی برای موتور به دست نیامد. حتی افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش فرکانس به منظور افزایش مدت زمان گرمایش، بهبودی در وضعیت موتور به وجود نیاورد.

پس از عدم حصول به نتیجهٔ مطلوب با استفاده از روتور 1، عملکرد موتور با روتور شمارهٔ 2 مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت محدودهٔ حرکتی مکانیزم، 1 میلی‌متر، طول سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده 100 میلی‌متر و فاصلهٔ دو سر آن‌ها 80 میلی‌متر خواهد بود. با راه‌اندازی موتور در فرکانس‌های 0.1 و 0.15 هرتز، دندانه‌های روتور و ووبلر به خوبی درگیر شده و روتور بدون لغزش شروع به دوران کرد. سرعت روتور را برحسب دور بر دقیقه می‌توان از رابطهٔ (3) به دست آورد. در جدول 9، پارامترهای آزمایش و سرعت خروجی روتور در دو فرکانس یاد شده، فهرست شده است.

4-5- آزمایش گشتاور

برای اندازه‌گیری گشتاور قابل دستیابی در موتور از یک مجموعه شامل وزنه، نخ و یک میلهٔ استوانه‌ای به عنوان تکیه‌گاه برای نخ استفاده شد. مطابق "شکل 11" یک سر نخ به شفت خروجی موتور و سر دیگر آن به وزنه متصل است. نیروی گرانشی وارد بر وزنه‌ها، از طریق نخ منتقل شده و گشتاوری را روی شفت خروجی موتور اعمال خواهد کرد. اگر از اصطکاک بین نخ و میله استوانه‌ای صرف‌نظر کنیم آن‌گاه گشتاور اعمالی به موتور را می‌توان از رابطهٔ 27 به دست آورد.

$$\tau = \frac{MgD}{2} \tag{27}$$

در رابطهٔ (27)، M جرم وزنه بر حسب کیلوگرم، g شتاب گرانش زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه، D قطر شفت خروجی موتور برحسب میلی‌متر و τ گشتاور اعمالی به موتور برحسب نیوتن-میلی‌متر است.

آزمایش گشتاور برای موتور در فرکانس 0.1 هرتز با سیکل کاری 45 درصد و ولتاژ 1.6، 1.8 و 2 ولت انجام شده است. در این آزمایش‌ها، موتور در حالت بدون بار به حرکت درآمده است. سپس وزنه به انتهای نخ متصل شده و به تدریج به جرم وزنه‌ها اضافه شده تا جایی که لغزش بین روتور و ووبلر رخ دهد و موتور از حرکت بازایستد. لازم به ذکر است که دقیقاً تا لحظه‌ای که لغزش رخ می‌دهد، حرکت لنگ به خوبی انجام شده و تغییری در سرعت خروجی موتور نسبت به حالت بدون بار اتفاق نمی‌افتد. نتایج 15 آزمایش در جدول 10 فهرست شده است. مقادیر گشتاور با استفاده از رابطهٔ (27) محاسبه شده‌اند. در نمودار "شکل 12"، میانگین گشتاورهای اندازه‌گیری شده در ولتاژهای 1.6، 1.8 و 2 ولت نمایش داده شده است. مطابق "شکل 12" با افزایش ولتاژ، ماکزیمم گشتاور قابل تحمل توسط موتور، افزایش یافته است.

5- بحث و نتیجه‌گیری

5-1- مزایای موتور لنگ صفحه‌ای با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژهای حافظه‌دار

استفاده از اصول موتور لنگ در تولید حرکت دورانی یکی از نقاط قوت موتور حاضر است. تقویت گشتاور تولیدی تا چند ده برابر، بدون استفاده از سیستم گیربکس خارجی و کاهش حجم موتور از این طریق، یک مزیت عالی برای موتور محسوب می‌شود. علاوه بر این، تبدیل انبساط و انقباض سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در محدوده‌های کوچک به حرکت دورانی پیوسته و نامحدود، تنها با استفاده از اصول موتور لنگ، ممکن شده است.

استفاده از مکانیزم انعطاف‌پذیر برای تولید و هدایت حرکت لنگ، از پیچیده شدن ساختار موتور جلوگیری کرده و در عین حال ثبات و پایداری موتور را تضمین کرده است. این موضوع هم در شبیه‌سازی‌ها و هم در عملکرد

جدول 9 پارامترهای آزمایش و سرعت خروجی روتور

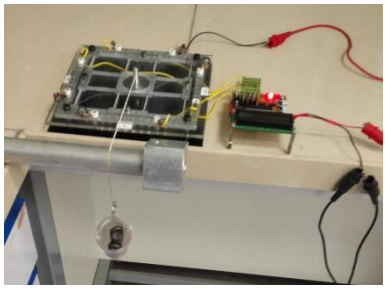
Table 9 Experiment parameters and output rotational speed

فرکانس (Hz)	سیکل کاری (%)	ولتاژ (v)	سرعت خروجی (rpm)
0.1	40	1.8	0.35
	45	1.6	
0.15	45	2.2	0.53
	40	2.0	

[1] MOSFET

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]



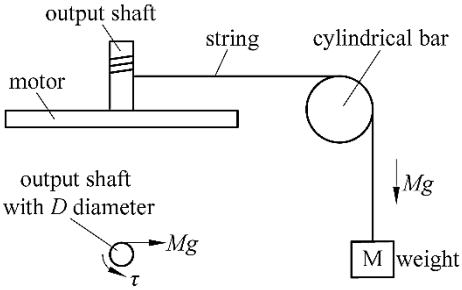


Fig. 11 Experimental setup for torque measurement

شکل 11 مجموعهٔ آزمایشی برای اندازه‌گیری گشتاور

جدول 10 نتایج آزمایش‌های گشتاور خروجی در ولتاژهای 1.6، 1.8 و 2.0 ولت

Table 10 Results of output torque experiments at 1.6, 1.8 and2.0 Volts applied voltage

شمارهٔ آزمایش		1	2	3	4	5
گشتاور خروجی (N.mm)، در ولتاژهای	1.6 V	30.4	29.1	29.3	30.2	30.4
	1.8 V	32.4	32.6	33.4	33.0	32.1
	2.0 V	34.6	34.3	34.4	34.5	33.8

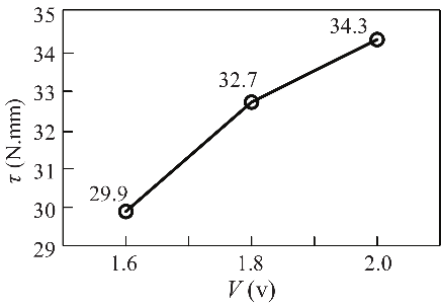


Fig. 12 Average of measured output torques vs. applied voltages

شکل 12 میانگین گشتاورهای اندازه‌گیری شده به‌ازای اختلاف پتانسیل اعمالی

تجربی موتور مشاهده شد.

علاوه بر این، سبکی، حجم کم و نسبت مساحت به ضخامت بزرگ (خاصیت صفحه‌ای موتور)، آن را برای به‌کارگیری در فضاهای محدود، مناسب می‌کند. هم‌چنین عملکرد تمیز و بدون آلودگی صوتی موتور قابل توجه است.

5-2- معایب موتور لنگ صفحه‌ای با نیروی محرکهٔ سیم‌های آلیاژهای حافظه‌دار

یکی از معایب موتور لنگ پیشنهادی، سرعت پایین آن است. عامل اصلی محدود کنندهٔ سرعت موتور، پاسخ زمانی کند سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار است. هم‌چنین اعمال فاصلهٔ آزاد باعث می‌شود تا زمان بیشتری برای درگیر شدن روتور و ووبلر صرف شود. علاوه بر این در روش گرمایش به‌وسیلهٔ انرژی الکتریکی، توزیع دما در سیم آلیاژ حافظه‌دار یکسان نیست و دما در وسط سیم بالاتر از طرفین است. در صورتی که راه‌اندازی موتور با استفاده از سیم‌های حافظه‌دار با تعداد فرد انجام شود، با توجه به این‌که راستای حرکت هیچ دو سیمی یکسان نیست؛ سیم‌ها در سختی مکانیزم انعطاف‌پذیر تأثیر نداشته و نیاز به اعمال فاصلهٔ آزاد برطرف خواهد شد. همچنین استفاده از روش‌های سرمایش اجباری به منظور کاهش مدت زمان خنک شدن سیم آلیاژ حافظه‌دار، موجب افزایش سرعت موتور خواهد شد.

عموماً یک محرکهٔ حافظه‌دار، هیچ‌گاه نمی‌تواند بازدهی بیش از چرخهٔ کارنو بین دماهای استحالهٔ پایانی خود (حدود 10 درصد)، داشته باشد و بازده عملی محرکه‌های حافظه‌دار بسیار کمتر از این مقدار تئوری و کمتر از 1 درصد است [31]. علاوه بر اتلاف‌های انرژی ناشی از گرمایش باید افت سیستم انتقال قدرت را نیز در نظر گرفت. با توجه به شرایط هندسی بسته شدن سیم (H=80mm) و محدودهٔ حرکتی موتور (a=1mm)، طبق داده‌های جدول 6، مقدار تنش در سیم حافظه دار برابر با 73.3 مگاپاسکال خواهد بود. با استفاده از رابطهٔ 15 مقدار گشتاور خروجی تئوری 119 نیوتن-میلی‌متر به دست می‌آید. اکنون با استفاده از نتایج تجربی گشتاور، می‌توان بازده سیستم چرخ‌دنده‌ای را تخمین زد. مقادیر این کمیت، در ولتاژهای تحریک مختلف در جدول 11 فهرست شده است.

معمولاً بازدهی سیستم‌های چرخ‌دنده‌ای بالاتر از 80 درصد است. افت شدید بازدهی سیستم چرخ‌دنده‌ای موتور حاضر را می‌توان ناشی از کوچک شدن ارتفاع تاج دندانه‌ها به منظور حذف تداخل و اتلاف ناشی از اصطکاک بین اجزای متحرک موتور و فیکسچر دانست. البته برای محاسبهٔ مقدار دقیق تنش در سیم باید از روش‌های عملی بهره گرفت.

با توجه به مقادیر سرعت و گشتاور خروجی موتور (0.35 دور بر دقیقه و 29.9 نیوتن-میلی‌متر)، توان خروجی موتور در حدود 1 میلی‌وات و بازده انرژی موتور (با توجه به کارکرد موتور در ولتاژ و جریان 1.6 ولت و 0.6 آمپر) حدود 0.1 درصد است. بنابرین استفاده از موتور، در شرایطی که بحث محدودیت فضا مطرح باشد، توجیه‌پذیر خواهد بود.

6- تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه اراک برای حمایت از این پژوهش طی قرارداد 94/91672 مورخ 1394/11/15 تشکر و قدردانی می‌شود.

7- مراجع

[1] K. Otsuka, C. M. Wayman, *Shape Memory Materials*, Cambridge university press, pp. 1-14, 1999.

[2] F. El Feninat, G. Laroche, M. Fiset, D. Mantovani, Shape memory materials for biomedical applications, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 4, No. 3, pp. 91-104, 2002.

[3] D. J. Hartl, D. C. Lagoudas, Aerospace applications of shape memory alloys, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 221, No. 4, pp. 535-552, 2007.

[4] M. M. Kheirikhah, S. Rabiee, M. E. Edalat, A review of shape memory alloy actuators in robotics, *RoboCup 2010: Robot Soccer World Cup XIV*, Vol. 6556, No. 1, pp. 206-217, Springer, 2011.

[5] D. Stoeckel, Shape memory actuators for automotive applications, *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, pp. 283-294, London, U. K.: Butterworth-Heinemann, 1990.

[6] D. Reynaerts, H. Van Brussel, Design aspects of shape memory actuators, *Mechatronics*, Vol. 8, No. 6, pp. 635-656, 1998.

[7] Y. Tanaka, A. Yamada, A rotary actuator using shape memory alloy for a robot-analysis of the response with load, *Intelligent Robots and Systems '91. 'Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS '91. IEEE/RSJ International Workshop on,*

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]

[18] D. Stoianovici, A. Patriciu, D. Petrisor, D. Mazilu, L. Kavoussi, A new type of motor: pneumatic step motor, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Vol. 12, No. 1, pp. 98-106, 2007.
[19] I. Hayashi, N. Iwatsuki, M. Kawai, J. Shibata, T. Kitagawa, Development of piezoelectric cycloid motor, *Mecatronics*, Vol. 2, No. 5, pp. 433-444, 1991.
[20] Y. Kadota, K. Inoue, K. Uzuka, H. Suenaga, T. Morita, Noncontact operation of a miniature cycloid motor by magnetic force, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 5, pp. 1563-1571, 2013.
[21] D. Hwang, T. Higuchi, A rotary actuator using shape memory alloy (SMA) wires, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1625-1635, 2014.
[22] D. Hwang, T. Higuchi, A cycloidal wobble motor driven by shape memory alloy wires, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 5, pp. 055023, 2014.
[23] D. Hwang, T. Higuchi, A planar wobble motor with a XY compliant mechanism driven by shape memory alloy, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 1, pp. 302-315, 2016.
[24] N. Lobontiu, *Compliant mechanisms: Design of Flexure Hinges*, *CRC press*, pp.1-15, 2002.
[25] B. J. Kenton, K. K. Leang, Design and control of a three-axis serial-kinematic high-bandwidth nanopositioner, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 356-369, 2012.
[26] W. Huang, On the selection of shape memory alloys for actuators, *Materials & design*, Vol. 23, No. 1, pp. 11-19, 2002.
[27] F. P. Beer, E. Johnston, J. T. Dewolf, *Mechanics of Materials*, 4th edition, New York, NY: McGraw-Hill, pp. 719-784, 2006.
[28] Supplier of materials for research and development, Goodfellow, http://www.goodfellow.com/
[29] K. B. Choi, D. H. Kim, Monolithic parallel linear compliant mechanism for two axes ultraprecision linear motion, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 77, No. 6, pp. 065106, 2006.
[30] Materials Information, AZoM.com, http://www.azom.com/
[31] D. Reynaerts, H. Van Brussel, Design aspects of shape memory actuators, *Mechatronics*, Vol. 8, No. 6, pp. 635-656, 1998.
[32] M. Ansari, M. Golzar, A. H. Behravesh, Experimental studies of training stress effect on NiTi SMA performance in higher and lower stress than training stress, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 14-24, 2013.

Osaka, Japan, pp. 1163-1168, 1991.
[8] G. S. Mammano, E. Dragoni, Modelling of wire-on-drum shape memory actuators for linear and rotary motion, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 1 pp. 1129-1140, 2011.
[9] S. Jacobsen, R. Price, J. Wood, T. Rytting, M. Rafaelof, A design overview of an eccentric-motion electrostatic microactuator (the wobble motor), *Sensors and Actuators*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-16, 1989.
[10] W. Trimmer, R. Jebens, Harmonic electrostatic motors, *Sensors and Actuators*, Vol. 20, No. 1, pp. 17-24, 1989.
[11] K. Suzumori, K. Hori, Micro electrostatic wobble motor with toothed electrodes, *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS'97*, Proceedings, IEEE, *Tenth Annual International Workshop on*, pp. 227-232, 1997.
[12] T. Sarros, E. C. Chew, S. Crase, B. K. Tay, W. L. Soong, Investigation of cylindrical and conical electrostatic wobble micromotors, *Microelectronics Journal*, Vol. 33, No. 1, pp. 129-140, 2002.
[13] A. M. Jungreis, A. W. Kelley, The axial air gap wobble motor-an appropriate topology for magnetic micromotors, *Industry Applications Conference*, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95., Conference Record of the 1995 IEEE, Vol. 1, No. 1, pp. 781-788, 1995.
[14] H. Fujita, T. Iizuka, A Threaded wobble motor a micro motor generating large linear displacement, *Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*, Transducers' 95 IEEE, The 8th International Conference on, Vol. 2, No. 1, pp. 408-411, 1995.
[15] P. Dario, M. C. Carrozza, C. Stefanini, and S. D'Attanasio, A mobile microrobot actuated by a new electromagnetic wobble micromotor, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-16, 1998.
[16] S. De Cristofaro, C. Stefanini, N. N. Pak, E. Susilo, M. Carrozza, P. Dario, Electromagnetic wobble micromotor for microrobots actuation, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 161, No. 1, pp. 234-244, 2010.
[17] K. Suzumori, K. Hori, Development of pneumatic wobble motors, *JSME International Journal, Series C, Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, Vol. 42, No. 2, pp. 392-397,1999.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.34.4]