



طراحی و مدل سازی دینامیکی یک ماژول متشکل از فنر فشاری تحریک شده با سیم آلیاژ حافظه دار

محمد مراد شیخی¹، علیرضا هادی^{2*}، مهدی قاسمی³

- 1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
 2- استادیار گروه مکترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
 * صندوق پستی 14395-1561، hrhadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 29 فروردین 1393
 پذیرش: 17 اردیبهشت 1393
 ارائه در سایت: 19 مهر 1393
 کلید واژگان:
 فنر فشاری
 سیم آلیاژ حافظه دار
 مدل سازی دینامیکی

چکیده

در سال های اخیر مطالعات زیادی در زمینه طراحی و ساخت بازوهای مکانیکی در مقیاس کوچک انجام گرفته است. این بازوها کاربردهای زیادی در صنعت و به خصوص در پزشکی دارند. یک کاربرد عملی این بازوها آندوسکوپی است. در آندوسکوپی علاوه بر کوچک بودن بازو، به قابلیت مانور بالا و چرخش مناسب سر بازو و همچنین انعطاف پذیری بدنه بازو نیاز است تا امکان حرکت آسان آندوسکوپ در محیط پر پیچ و خم روده در مقایسه با نمونه های قدیمی فراهم شود. در این مقاله توسعه یک ماژول پایه ای انعطاف پذیر برای استفاده در این ساختار مدنظر قرار گرفته است. با اتصال سه سیم آلیاژ حافظه دار در زوایای 120 درجه نسبت به هم در اطراف یک فنر فشاری، امکان تغییر زاویه نسبتاً بزرگ صفحات ابتدایی و انتهایی فنر با کرنش کم سیم آلیاژ حافظه دار فراهم می شود. در این مقاله مدلی برای تغییر شکل فنر توسعه یافته که با مدل برینسون برای رفتار سیم آلیاژ حافظه دار ترکیب و برای بیان رفتار ماژول استفاده شده است. مدل سازی دینامیکی و شبیه سازی در محیط سیمولینک نرم افزار متلب پیاده سازی و عملکرد ماژول و ابعاد بهینه آن برای کاربرد مورد نظر پیشنهاد شده است. با استفاده از نتایج شبیه سازی و تجربی، ابعاد مناسب ماژول برای ایجاد بیشترین چرخش تحت تأثیر سیم آلیاژ حافظه دار پیشنهاد شده است.

Design and dynamic modeling of a module included a compressive spring and actuated by shape memory alloy wire

Mohammad Morad Sheikhi¹, Alireza Hadi^{2*}, Mahdi Qasemi¹

- 1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran
 2- Mechatronics Group, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
 * P.O.B. 14395-1561 Tehran, Iran, hrhadi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 18 April 2014
 Accepted 07 May 2014
 Available Online 11 October 2014

Keywords:
 Compressive Spring
 Shape Memory Alloy Wire
 Dynamic Modeling

ABSTRACT

In recent years many investigations have been performed on design and fabrication of micro mechanical manipulators. These manipulators have a wide application in industry, specifically medical applications. A practical usage of this manipulator is endoscopy system. In the endoscopy system, a small manipulator with high maneuverability and flexible body is needed to make the probe's movement into the colon easier than classic manipulators. In this paper a basic flexible module is developed for use in this structure. Connecting three wires of shape memory alloy uniformly distributed in circumference of a compressive spring with angle of 120 degrees, it is possible to make an sufficiently large displacement in the end planes with small strain of wires. In this paper, a model is developed to define the spring deformation which in the following is coupled with the model of SMA wire presented by Brinson to describe the module behavior definitely. Dynamic modeling and simulation is implemented in MATLAB-Simulink and module performance in addition to proper geometry for the considered application is extracted. Through the results of simulation verified by experiment, proper parameters of module for providing more deflection and rotation when activated by SMA are extracted.

1- مقدمه

وخم به راحتی حرکت کنند. اما علاوه بر این موارد، داشتن دقت بالا، قابلیت اطمینان بالا و همچنین مکانیزم کنترل نیرو که از آسیب رسیدن به بافت های بدن جلوگیری شود باید مورد توجه قرار بگیرد [1]. در این راستا تکنولوژی

در آندوسکوپی، محققان در پی ساخت وسایلی هستند که در عین کوچک بودن، چالاکي لازم را داشته باشند و بتوانند در محیط های تنگ و پر پیچ

Please cite this article using:

M. M. Sheikhi, A. Hadi, M. Qasemi, Design and dynamic modeling of a module included a compressive spring and actuated by shape memory alloy wire, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 17-26, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. M. Sheikhi, A. Hadi, M. Qasemi, Design and dynamic modeling of a module included a compressive spring and actuated by shape memory alloy wire, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 17-26, 2015 (In Persian)

برای عدم آسیب به بافت‌ها استفاده شد. جان پیرس و همکارانش برای این که نوک آندوسکوپ چرخش 180 درجه داشته باشد دو مکانیزم ارائه داده‌اند [10]. در روش اول یک عملگر ماژولار ساخته شده که شامل چند مهره است و مهره‌ها نسبت به هم 90 درجه می‌چرخند. در روش دوم آنها یک عملگر با حرکت بزرگ و کنترل موقعیت پیوسته ساخته‌اند که از مکانیزم چرخ‌دنده خورشیدی برای این کار استفاده شده است. در هر دو روش از آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است. ابادی و همکارانش یک میکرو عملگر از آلیاژ حافظه‌دار برای آندوسکوپی ساختند که برای سرد کردن از اثر پلنتیه³ استفاده می‌شود [11]. در اینجا دو نوار حافظه‌دار با شکل خاص دو طرف ماژول را به هم وصل می‌کند. جریان از یک نوار وارد و از دیگری خارج می‌شود. با توجه به اثر پلنتیه فقط یک نوار تحریک شده و در نتیجه خم می‌شود و نوار دیگر تغییر شکل پیدا می‌کند. با معکوس کردن جریان عکس این حالت رخ می‌دهد. وینسنت دی سارس و همکارانش دو روش عملی برای تحریک آندوسکوپ ارائه دادند [12]. در روش اول، آنها یک آندوسکوپ با دو درجه آزادی ساختند که از چهار سیم حافظه‌دار به صورت دو به دو و متضاد هم استفاده کردند و در روش دوم، آنها به صورت ماژولار چند سازه را متصل کردند و در هر مفصل آلیاژ حافظه‌دار البته با شکل بهینه شده قرار دادند و سازه را حرکت دادند. فردریک چاپل یک سیستم مکانیکی ارائه داد که چیدمانی از ماژول‌های لوله‌ای شکل است که به‌وسیله مفصل‌های پین شکل به همدیگر متصل شده‌اند [13]. هر مفصل میان دو ماژول یک درجه آزادی محتمل دارد. تعداد و طول ماژول‌ها با توجه به نیازهای طراحی تنظیم می‌شود. مفصل‌ها دارای عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار در شکل متضاد هم هستند. در طول آندوسکوپ و روی مفصل‌ها سنسورهای فشار برای تشخیص تماس با محیط توزیع شده‌اند. منسیاسی یک روبات نیمه خودکار برای حرکت در روده ارائه داد [14]. هدف اصلی او استفاده از نیروی خود روبات برای حرکت به جای استفاده از نیروهای خارجی در حرکت دادن آندوسکوپ بود. مکانیزم هدایت نوک آندوسکوپ شامل 3 تا فنر آلیاژ حافظه‌دار است که درون بالشتکی جاسازی شده است. دو راه‌حل برای حرکت که یکی طول ثابت و دیگری متغییر بود پیشنهاد شد. همچنین هادی حرکت یک جسم الاستیک در فضا را شبیه‌سازی کرد که توسط 3 سیم آلیاژ حافظه‌دار که به صورت 120 درجه اطراف جسم الاستیک جاسازی شده بودند، تحریک می‌شد [15].

در این مقاله یک ماژول فنری و انعطاف‌پذیر که با استفاده از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تحریک می‌شود، در نظر گرفته شده است (شکل 1). مدل‌سازی دینامیکی / سینماتیکی بازو با رفتار دینامیکی آلیاژ حافظه‌دار ترکیب شد تا بتوان رفتار ماژول را در شرایط مختلف بارگذاری پیش‌بینی کرد. در کارهایی تاکنون انجام شده به‌طور کلی پیچیدگی طرح و مقرون به صرفه نبودن آن و یا غیر عملی بودن آن ملاحظه می‌شود. هرچند که به‌طور کلی مشکلات آلیاژ حافظه‌دار از قبیل رفتار غیرخطی، هیستریزس و پاسخ کند، فراگیر شدن آن را محدود کرده است، اما می‌توان با تغییرات مؤثر در نوع مکانیزم از حداکثر ظرفیت این آلیاژها استفاده کرد. در این مقاله طرحی جدید با ساختاری ساده و در عین حال توانمند برای به کارگیری در کاربرد مورد نظر ارائه شده است.

از طرفی در طرح در نظر گرفته شده فنر هم نقش نیروی بایاس⁴ برای آلیاژ حافظه‌دار را ایفا می‌کند و هم انعطاف‌پذیری کافی برای این ماژول ایجاد می‌کند. در ضمن به دلیل تو خالی بودن فنر، تجهیزات پزشکی مثل انبر یا

میکرومکاترونیک توسعه یافته تا با ساخت میکروکاتترهای¹ باریک، امکان وارد شدن آندوسکوپ به اندام داخلی بدن فراهم شود. در نوع سنتی آندوسکوپ‌ها، سر توسط کابل کنترل و خم می‌شد که می‌توانست برای بیمار دردناک باشد چرا که کنترل آن به سختی انجام می‌گرفت [2].

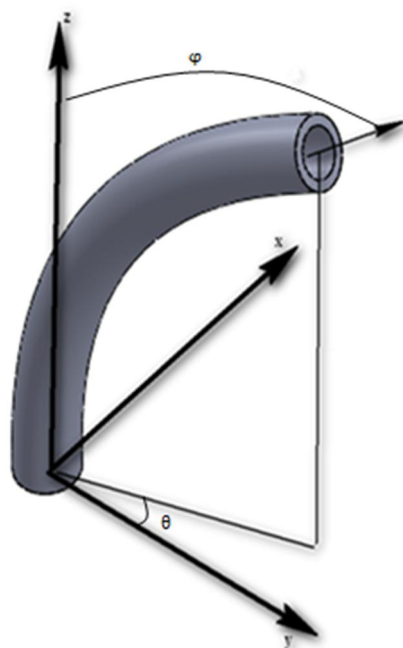
با ورود آلیاژهای حافظه‌دار² (SMA) به عنوان مواد هوشمندی که قابلیت بازیافت شکل اولیه خود را معمولاً با دریافت گرما دارند، صنعت ساخت آندوسکوپ‌ها وارد مرحله جدیدی شد. این مواد به دلیل تولید تغییر شکل بزرگ، نرخ توان به وزن بالا، ولتاژ راه‌اندازی پایین، قابلیت سازگاری زیستی بالا و عملکرد بی‌صدا و یکنواخت در ساخت عملگرها به‌خصوص در صنعت پزشکی مورد توجه قرار گرفته‌اند [1].

آلیاژهای حافظه‌دار پس از آن که در فاز مارتنزیت که فاز پایدار در دمای پایین است، مورد تغییر شکل قرار گرفتند، با حرارت دیدن و وارد منطقه آستنیتی شدن، دوباره شکل اولیه خود را بازیابی می‌کنند. البته این توصیف در مورد نوع گرمایشی این ماده صادق است در حالی که در انواع دیگری از این ماده تحریک توسط میدان مغناطیسی صورت می‌پذیرد. این تغییر شکل در فاز مارتنزیت می‌تواند بزرگ باشد و از این خاصیت در ساخت عملگرها استفاده شده است. این آلیاژها دارای دو اثر مهم هستند: 1- اثر حافظه‌داری، 2- اثر فوق الاستیک. در اثر اول آلیاژ پس از آن که در فاز مارتنزیت مورد تغییر شکل قرار گرفت، با حرارت دادن به شکل اولیه بازگردانده می‌شود. در اثر دوم آلیاژ در دماهای بالاتر از خاتمه آستنیتی مورد تنش قرار گرفته و با حذف بارگذاری به کرنش اولیه باز می‌شود. از این دو اثر با توجه به شرایط کاری و دمایی می‌توان استفاده کرد [3].

با توجه به شرایط ذکر شده در بالا انتظار می‌رود این آلیاژها در ساخت میکرو کاتترها جانشین مناسبی نسبت به عملگرهای دیگر باشند. تاکاشی مینیتا و همکارانش یک سیم راهنما ساختند که شامل آلیاژ حافظه‌دار با شکل خاص و یک کوئل فنری برای تأمین نیروی بایاس بود [4]. آنها با دادن جریان‌های مختلف توانستند زوایای متفاوتی را ایجاد کنند که بیشترین آن 60 درجه بود. همچنین با چرخش کاتتر این زاویه در تمام جهات قابل دست‌یابی است. اریک لانتیجینه و همکارانش یک بازوی مکانیکی ساختند که معماری آن شبیه یک کرم بود و به وسیله تکرار مستقلانه سازه‌های سری شده کنترل می‌شد [5]. آنها در هر سازه سه عملگر آلیاژ حافظه‌دار به صورت 120 درجه کار گذاشتند. نیروی مقاوم در این سیستم هوای فشرده و نیروی تحریک هوای گرم و سرد بود. بیونج کیو یک میکرو روبات با کنترل بی‌سیم ساخت [6]. ایده آنها برگرفته از حرکات کرم خاکی است که با قرار دادن کلمپ و فنر توانستند این رفتار را شبیه‌سازی کنند. هادی و همکارانش کنترل نیرو و موقعیت را در یک سیستم دیفرانسیلی تحریک شده با دو محرک آلیاژ حافظه‌دار بررسی کرده‌اند [7]. اتاویانو یک ماژول طراحی کرد که دارای سه پا بوده و هر پا سه مفصل دارد [8]. در مفصل میانی دو آلیاژ حافظه‌دار در دو طرف مفصل کار گذاشته شده و باعث خم شدن پا می‌شود. در این طرح هر ماژول 6 درجه آزادی دارد و با ترکیب این ماژول‌ها می‌توان یک سیستم پیوسته فراهم کرد. مینیتا و همکارانش [9] توانستند با روش اچ پالسی الکتروشیمیایی از ورق آلیاژ حافظه‌دار عملگر و فنر بایاس با شکل خاص تولید کنند و از آن برای انقباض و خم کردن نوک کاتتر استفاده کنند. جایندر و همکارانش سه سیم به صورت 120 درجه در اطراف کاتتر نصب کردند تا خم شدن آن را در تمام جهات تضمین کنند [1]. همچنین از الگوریتم کنترل نیرو

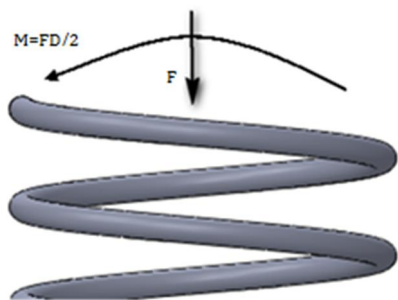
3- Peltier Effect
4- Bias

1- Microcatheter
2- Shape Memory Alloys

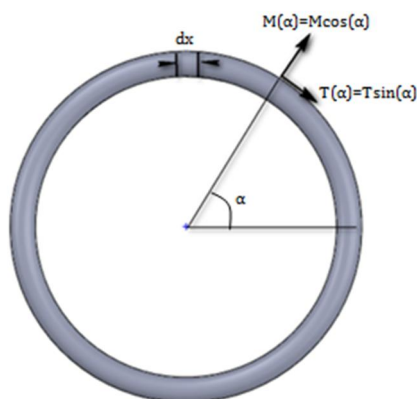


شکل 2 وضعیت زوایای ایجاد شده توسط بازوی مکانیکی

بار غیر محوری روی فنر، ایجاد یک نیروی محوری و یک لنگر خمشی روی فنر است که در شکل 3 ارائه شده است. لنگر خمشی نشان داده شده در شکل 3 در سطح مقطع کوئل فنر هم لنگر خمشی و هم لنگر پیچشی ایجاد می‌کند که در شکل 4 نشان داده شده است. در ادامه از روابط کار و انرژی برای محاسبه میزان تغییر شکل‌ها استفاده شده است. در ضمن باید توجه نمود که چون لنگر خمشی در تغییر زاویه فنر و نیروی محوری در تغییر طول محوری دخالت دارند با توجه به فرض رفتار خطی در فنر الاستیک می‌توان اثرات آن‌ها را مجزا از همدیگر بررسی کرد.



شکل 3 اعمال بار محوری و گشتاور روی فنر



شکل 4 ایجاد گشتاور خمشی و پیچشی در کوئل‌های فنر

دوربین به راحتی می‌تواند به سر آندوسکوپ منتقل شود، و این مزیت دیگری از این طرح محسوب می‌شود.

در ادامه مقاله در بخش دوم، مدل‌سازی ماژول مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا تغییر شکل فنر فشاری الاستیک به عنوان پایه ماژول بحث شده و سپس این مدل با مدل آلیاژ حافظه‌دار برای بیان تغییر شکل کل ماژول کوئل شده است. در بخش سوم مدل در محیط سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده است. در بخش چهارم آزمایش‌های تجربی مربوط به صحنه گذاری نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. در بخش پنجم نتایج مورد بحث قرار گرفته و در بخش ششم نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

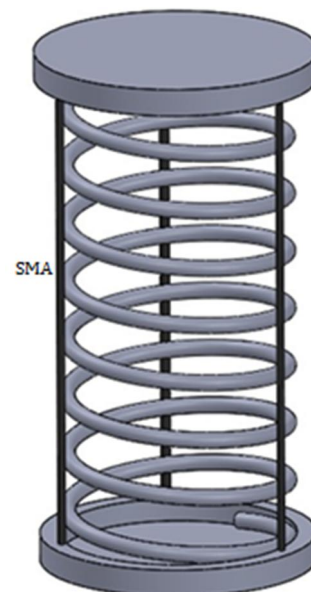
2- مدل‌سازی ماژول

ماژول در نظر گرفته شده در این مقاله از یک فنر انعطاف‌پذیر تشکیل شده است که سیم‌های SMA در اطراف آن بصورت متقارن در زوایای 120 درجه نسبت به هم در مقطع ماژول نصب شده است. انقباض این سیم‌ها وقتی گرما دریافت می‌کنند، کمک می‌کنند تا فنر بتواند در تمام جهات چرخش داشته باشد.

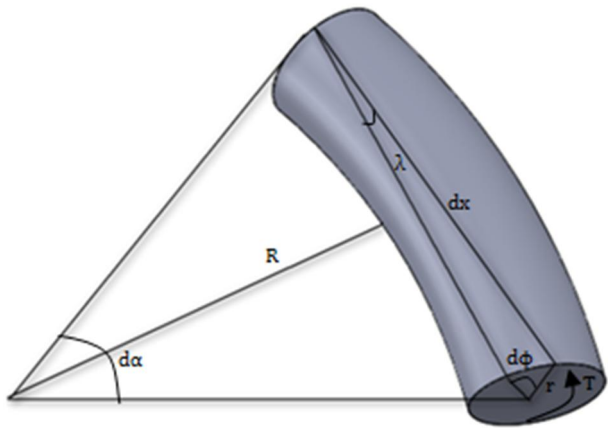
در یک وضعیت نوعی ماژول تحریک شده، با توجه به شکل 2، دو زاویه حاصل کار عملکرد بازو است که یکی چرخش سر فنر را نشان می‌دهد و آن را با ϕ نشان می‌دهند و دیگری گردش فنر را نشان می‌دهد که آن را با θ نشان می‌دهند. زاویه θ زمانی حاصل می‌شود که حداقل دو سیم آلیاژ حافظه‌دار همزمان عمل کنند. در این مطالعه برای تعیین بازه کاری تنها به عملکرد ϕ اکتفا شده است و زاویه θ بصورت کمی بررسی نمی‌شود و این بدان معناست که در شبیه‌سازی تحریک یک سیم آلیاژ حافظه‌دار بررسی می‌شود. پس برای داشتن زاویه θ باید محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار بصورت گروهی تحریک شوند.

2-1- مدل فنر

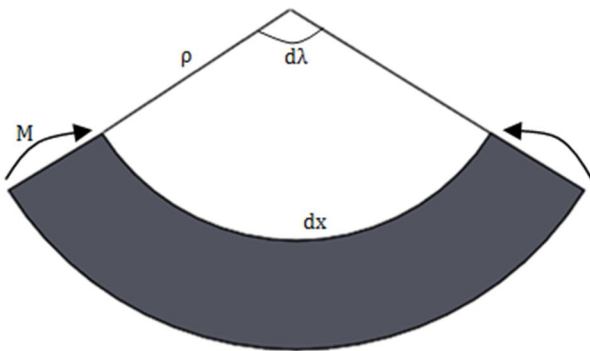
هدف از مدل‌سازی فنر استخراج میزان خم شدن فنر فشاری به ازای اعمال یک بار غیرمحوری روی فنر است. همان‌طور که در شکل 2 ملاحظه می‌شود، وقتی که سیم آلیاژ حافظه‌دار تحریک می‌شود، فنر انحنای پیدا می‌کند. در ضمن فرض شده است که سیم آلیاژ حافظه‌دار به ابتدا و انتهای فنر متصل بوده و از درون فنر رد شده است تا فرم انحنای فنر را داشته باشد. نتیجه این



شکل 1 طرح کلی بازوی مکانیکی



شکل 5 جزء کوچکی از فنر تحت پیچش و به طول dx



شکل 6 جزء کوچکی از فنر تحت خمش و به طول dx

2-2- مدل آلیاژ حافظه‌دار

در این بخش به نحوه مدل‌سازی آلیاژ حافظه‌دار برای بررسی رفتار آن ارائه می‌شود. این مدل‌سازی در سه بخش روابط ساختاری، انتقال فاز و انتقال حرارت انجام می‌شود. در ادامه به توضیح هر کدام از این موارد پرداخته می‌شود.

2-2-1- مدل ساختاری¹

رفتار آلیاژ حافظه‌دار از سه متغیر دما، کرنش و تنش متأثر است. تلاش‌های صورت گرفته تاکنون در مدل‌سازی ساختاری آلیاژ حافظه‌دار ارائه معادلاتی است که با ترکیب ساده این متغیرها در شکل سه بعدی یا یک بعدی رفتار ماده را پیش‌بینی کند. معادلات سه بعدی به دلیل داشتن پارامترهای زیاد از پیچیدگی زیادی برخوردار هستند و البته در اشکال هندسی خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما معادلات یک بعدی که به طور مؤثر در فرم رایج سیم آلیاژ حافظه‌دار قابل استفاده هستند، به دلیل سادگی بیشتر و نتایج قابل قبول در کاربردهای مهندسی بیشتر استفاده می‌شوند. مدل تاناکا به عنوان اولین مدل رایج و قابل قبول در این زمینه مطرح شد [17]. وی کرنش، دما و کسر مارتنزیتی را به‌عنوان متغیر در نظر گرفت و تنش را به صورت تابعی از این متغیرها بیان نمود. لیانگ و راجرز روند کاری تاناکا را پذیرفتند با این تفاوت که آنها تابعی کسینوسی را به جای تابع نمایی برای محاسبه کسر مارتنزیتی در نظر گرفتند [18]. اما آنها کسر مارتنزیتی غیردوقلویی² (β) را که سبب اثر حافظه‌داری در دمایی پایین است را در نظر نگرفتند. برینسون با

2-1-1- تغییر زاویه در فنر

کار انجام شده توسط گشتاور اعمالی باید با مجموع کار گشتاور پیچشی و خمشی برابر شود که این رابطه در معادله (1) بیان شده است. گشتاور اعمالی روی فنر با تغییر زاویه φ همراه است. این تغییر شکل در شکل‌های 2 و 8 ملاحظه می‌شود. در شکل 5 جزء کوچکی از فنر تحت پیچش با طول dx ملاحظه می‌شود که تغییر پارامترهای هندسی نیز در آن آورده شده است.

$$\frac{1}{2}M\phi = \frac{1}{2} \int T(\alpha) d\phi + \frac{1}{2} \int M(\alpha) d\gamma \quad (1)$$

گشتاور اعمالی توسط نیروی خارج از مرکز از رابطه (2) بدست می‌آید:

$$M = \frac{FD}{2} \quad (2)$$

میزان گشتاور پیچشی در هر موقعیت کوئل فنر از رابطه (3) بدست می‌آید:

$$T(\alpha) = M \sin \alpha \quad (3)$$

از شکل هندسی مسأله و روابط مقاومت مصالح زیر می‌توان برای توسعه معادلات استفاده کرد (رابطه 4):

$$\lambda dx = r d\phi, \quad \lambda = \frac{r}{G}, \quad R d\alpha = dx, \quad \tau = T(\alpha) r / j \quad (4)$$

در نهایت با جایگذاری روابط بالا در ترم کار گشتاور پیچشی در رابطه

(1) رابطه (5) بدست می‌آید:

$$\int T(\alpha) d\phi = \int F D \sin \alpha \frac{d\phi}{2} = \int_0^{2\pi N} \sin 2\alpha \frac{F^2 D^3}{8Gj} d\alpha = \frac{\pi N F^2 D^3}{8Gj} \quad (5)$$

از وقتی فنر تحت خمش است، می‌توان جزء کوچکی از آن را مطابق شکل 6 در نظر گرفت. مقدار گشتاور خمشی در هر نقطه از کوئل فنر از رابطه (6) بدست می‌آید:

$$M(\alpha) = M \cos \alpha \quad (6)$$

از روابط هندسی و مقاومت مصالح رابطه (7) نیز می‌توان بهره گرفت:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}, \quad d\gamma = \frac{M}{EI} dx, \quad \rho d\gamma = dx, \quad R d\alpha = dx \quad (7)$$

در نهایت با جایگذاری روابط (7) در ترم کار گشتاور خمشی در معادله (1) رابطه (8) بدست می‌آید

$$\int M(\alpha) d\gamma = \int F D \cos \alpha \frac{d\gamma}{2} = \int_0^{2\pi N} \cos 2\alpha \frac{F^2 D^3}{8EI} d\alpha = \frac{\pi N F^2 D^3}{8EI} \quad (8)$$

2α== حال با جایگذاری روابط (5) و (8) در رابطه (1) تغییر شکل φ استخراج می‌شود (رابطه 9):

$$\phi = \frac{N F D^2 \pi}{4} \left(\frac{1}{EI} + \frac{1}{Gj} \right) \quad (9)$$

در این معادلات N تعداد حلقه‌های فعال فنر، F نیروی آلیاژ حافظه‌دار، D قطر خارجی فنر، E و G مدول الاستیسیته و برشی و I و J گشتاورهای سطح هستند.

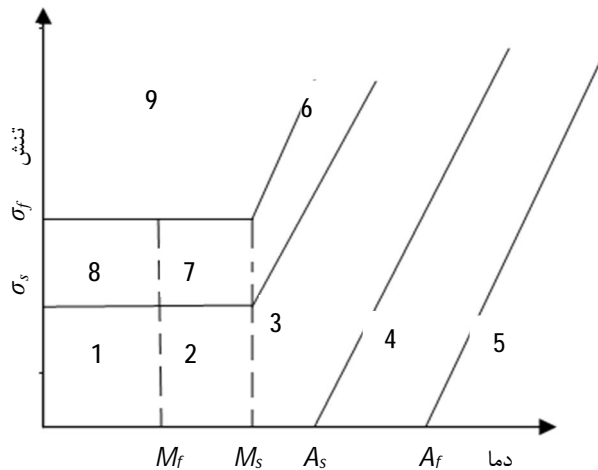
2-1-2- تغییر طول محوری فنر

وقتی فنری تحت بار محوری قرار می‌گیرد، تغییر طولی در آن ایجاد می‌شود که از رابطه (10) بدست می‌آید [16]:

$$\delta = \frac{8fND^3}{Gd^4} \quad (10)$$

در این رابطه d قطر مفتول فنر و δ جابجایی محوری فنر است. در ابتدا و انتهای بازو یک ورقه نصب می‌شود تا سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار به آن وصل شوند و همچنین بتوان نیروها و لنگرها را از طریق آن منتقل کرد.

1- Constitutive Model
2- Detwinned Martensite



شکل 7 نمودار فازی آلیاژ حافظه دار و بخش های مختلف آن

سیم می کنند. برای این کار از عبور جریان الکتریکی از سیم استفاده می شود. در واقع جریان به عنوان ورودی به مدل آلیاژ حافظه دار عمل می کند و می توان با کنترل جریان رفتار آلیاژ حافظه دار را کنترل کرد. بنابراین رابطه (15) به عنوان رابطه انتقال دما برای این روش گرم شدن سیم پیشنهاد شده است:

$$m c_p \frac{dT}{dt} = R I^2 - h_c A_c (T - T_\infty) \quad (15)$$

در اینجا m جرم بر واحد طول، C_p ضریب گرمای ویژه، I جریان، R مقاومت الکتریکی، h_c ضریب انتقال حرارت پخش و A_c سطح مقطع سیم است.

2-3- مدل دینامیکی کوپل فنر و آلیاژ حافظه دار

برای بیان و درک بهتر معادله دینامیکی حاکم بر ماژول، یک ورقه نازک روی فنر در نظر گرفته شده و دیاگرام آزاد نیرویی آن با انتقال نیروها و گشتاورها به این ورقه بیان شده است. سپس معادله دینامیکی آن استخراج شده است. همان طور که در شکل 8 ملاحظه می شود، سیم های آلیاژ حافظه دار روی ورقه گشتاور اعمال می کنند که به صورت رابطه (16) می توان آن را محاسبه کرد:

$$M_{SMA} = r_1 \times F_{SMA1} + r_2 \times F_{SMA2} + r_3 \times F_{SMA3} \quad (16)$$

بردار r در اینجا بیان کننده موقعیت سیم ها هست. باید دقت کرد که با توجه به شکل 8، انحنای فنر منجر به تغییر در طول سیم خواهد شد. با توجه به پاسخ کند سیستم به دلیل تحریک با آلیاژ حافظه دار و برای ساده سازی مسأله زاویه θ در هر لحظه عمود بر بردار برآیند گشتاورها یا همان M_{SMA} در نظر گرفته شده است. لذا قانون دوم نیوتن طبق معادله دینامیکی (17) بیان می شود:

$$M_{SMA} - M_b = I \ddot{\varphi} \quad (17)$$

M_b گشتاور مقاوم از طرف فنر است. با در نظر گرفتن $M = FD/2$ در رابطه (9) می توان رابطه (18) را استخراج کرد:

$$M_{SMA} - \frac{2}{\left(\frac{1}{EI} + \frac{1}{GJ}\right)ND\pi} \varphi - c \dot{\varphi} = I \ddot{\varphi} \quad (18)$$

در این معادله c در اینجا نرخ دمپینگ است. این رابطه دینامیکی در شبیه سازی ماژول استفاده می شود.

استفاده از کارهای تاناکا و لیانگ یک مدل ارائه داد [19] که کسر مارتزیتی¹ (ξ) را به دو قسمت کسر مارتزیتی دوقلویی² (ξ_i) و کسر مارتزیتی غیر دوقلویی تقسیم کرد. اما در شرایط مختلف بارگذاری ترمودینامیکی با توجه به پیچیدگی های مسیر این مدل نارسایی هایی داشت که در سال 2007 وی مدل را برای محاسبه کسر مارتزیتی ارتقا داد [20]. این مدل مبنای کار این مقاله قرار گرفته است. طبق رابطه ساختاری یک بعدی برینسون، تنش، کرنش، کسر مارتزیتی و دما به صورت رابطه (11) به هم مرتبط می شوند.

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Omega(\xi_s - \xi_s^0) + \theta_T(T - T_0) \\ E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \\ \Omega = -\varepsilon_L E(\xi) \quad (11)$$

برینسون نشان داد که رابطه ساختاری می تواند بصورت (12) ساده شود [21]:

$$\sigma = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_L \xi_s) + \theta_T(T - T_0) \quad (12)$$

در این معادلات σ تنش، ξ کسر مارتزیتی، E_A مدول الاستیسیته در فاز آستنیت، E_M مدول الاستیسیته در فاز مارتزیت، Ω ضریب انتقال فاز، ε_L ماکزیمم کرنش قابل بازیافت و θ_T ضریب پخش گرمایی هستند.

شکل 7 تقسیم بندی مناطق مختلف تغییر فاز برحسب دما و تنش بحرانی برای محاسبه میزان کسر مارتزیت طبق مدل برینسون را نشان می دهد. در منطقه یک، آلیاژ حافظه دار کاملاً دوقلویی است. وقتی که آلیاژ حافظه دار مورد تنش قرار می گیرد و سطح تنش از تنش شروع غیر دوقلویی (σ) بالاتر می رود مارتزیت غیر دوقلویی شروع به تشکیل می کند که با رسیدن به تنش پایان غیر دوقلویی (σ) تمام مارتزیت غیر دوقلویی می شود.

2-2-2- معادلات سینتیکی انتقال فاز³:

وقتی تنش صفر است، انتقال فاز در دماهای شروع و پایان آستنیتی و شروع و پایان مارتزیتی رخ می دهد. این دماها به ترتیب با A_s و A_f و M_s و M_f نشان داده می شوند. مناطق 3، 5 و 9 در انتقال فاز نقشی ندارند. انتقال از فاز مارتزیت به آستنیت را انتقال مستقیم⁴ (A) گویند که در منطقه 4 اتفاق می افتد و انتقال از فاز آستنیت به مارتزیت را انتقال معکوس⁵ (M) گویند که از منطقه 6 شروع می شود. برینسون معادلات تغییر فاز را برای تبدیل مستقیم و تبدیل معکوس با روابط (13، 14) بیان نمود:

$$F_A = \xi_f f_A(Z_A) \quad (13)$$

$$F_M = \xi_r + (1 - \xi_r) f_M(Z_M) \quad (14)$$

در این معادلات ξ_f مقدار فاز ماده در لحظه شروع تبدیل فاز، Z نشان دهنده نقطه تغییر مسیر⁶ در مناطق است و f_A و f_M توابع انتقال با مقادیری بین 0 و 1 به ترتیب برای انتقال مستقیم و معکوس است و Z بیان کننده موقعیت ماده در نمودار فازی نسبت به سطوح آغاز تغییر فاز است [20].

2-2-3- معادله انتقال دما⁷:

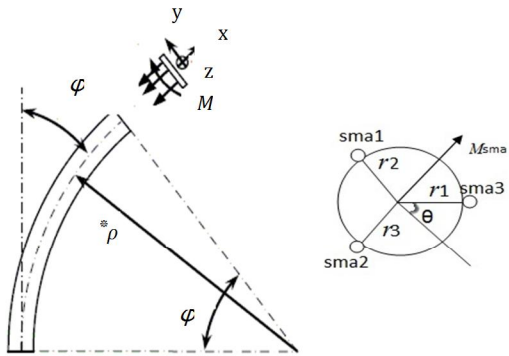
آنچه که باعث تغییر فاز در آلیاژ حافظه دار می شود، تغییرات دما و تنش است. گرم شدن سیم آلیاژ حافظه دار ممکن است به هر طریقی انجام شود. ولی در کاربردهای مهندسی معمولاً از طریق گرمایش مقاومتی اقدام به گرم کردن

1- Martensitic Volume
2- Twinned Martensite
3- Phase Transformation Kinetic
4- Forward Transformation
5- Reverse Transformation
6- Switching Point
7- Heat Transfer

۳- شبیه‌سازی

فنر به حدود ۲ ولت، اختلاف پتانسیل نیاز است و حداکثر خم شدن فنر با ۴ ولت ایجاد می‌شود که در شکل ۱۱ حداکثر خم شدن فنر مشاهده می‌شود. ولتاژهای بیشتر صرف گرم‌تر شدن سیم آلیاژ حافظه‌دار می‌شود و در خم شدن فنر تأثیری ندارد. در مابین این دو ولتاژ مقادیر تغییر شکل به صورت تجربی استخراج و ارائه شده است.

لازم به ذکر است در بخش طراحی که ارائه کارکرد ماژول و قابلیت‌های آن مد نظر بود، نصب سه سیم در اطراف فنر که بتوان چرخش فنر را در تمام



شکل ۸ اعمال شدن نیروها و گشتاور روی ورقه و تغییر شکل بازو [۱۵]

حفظه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب^۱ انجام گرفته است. ارتباط زیر مدل‌های به کار گرفته شده در شبیه‌سازی در شکل ۹ بیان شده است. نوآوری این مقاله در مدل‌سازی و شبیه‌سازی، نحوه کوپل کردن مدل آلیاژ حافظه‌دار با مدل سینماتیکی و دینامیکی فنر برای استخراج تغییر شکل لحظه‌ای و تعقیب مسیر تغییر شکل ماژول است. این بیان جزئی و کامل به پیاده‌سازی کنترل پارامترهای موقعیتی ماژول در کارهای آینده کمک شایانی می‌کند. در مدل آلیاژ حافظه‌دار ورودی‌ها ولتاژ و تغییر طول یا کرنش سیم هستند و خروجی آن تنش تولید شده در آلیاژ حافظه‌دار است. با محاسبه تنش‌های ایجاد شده در هر یک از سیم‌ها گشتاور برآیند آن‌ها از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود. گشتاور مقاوم فنر نیز با توجه به موقعیت سینماتیکی لحظه‌ای از رابطه (۹) محاسبه می‌شود. با استفاده و اعمال این مقادیر در رابطه (۱۸) پارامتر φ محاسبه می‌شود. این معادله بصورت کوپل حل شده و در هر لحظه با داشتن پارامتر φ می‌توان تغییر طول لحظه‌ای آلیاژ حافظه‌دار را استخراج و به‌عنوان ورودی در مدل ساختاری آلیاژ حافظه‌دار استفاده نمود. در شکل ۹ می‌توان نحوه این ارتباط را مشاهده کرد. بنابراین با استفاده از این بستر شبیه‌سازی می‌توان مقدار φ که بیانگر مختصات بازو است را به صورت لحظه‌ای محاسبه کرد. باید توجه کرد که برای محاسبه میزان تغییر شکل سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در حین تحریک، باید تغییر شکل محوری فنر (δ) را نیز لحاظ کرد.

هادی [۱۵] روابط سینماتیک یک تیوپ انعطاف‌پذیر را وقتی توسط سه سیم آلیاژ حافظه‌دار تحریک می‌شود را استخراج نمود که طبق رابطه (۱۹) با استفاده از شکل ۸ بیان شده است.

$$L_i = L - \delta$$

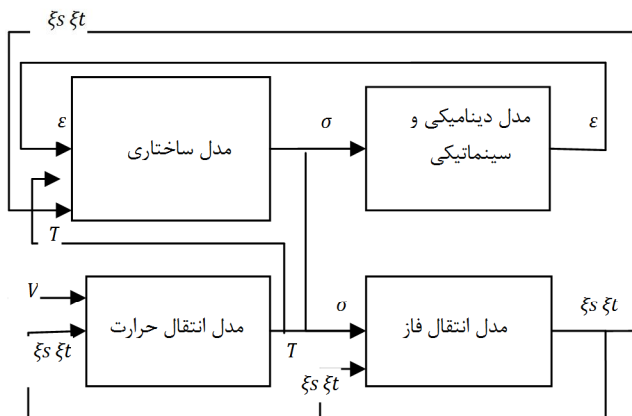
$$\rho^* = \frac{L_i}{\varphi}$$

$$L_i = (\rho^* \cdot r \cos \theta_i) \times \varphi \quad (19)$$

که در اینجا L_i ، طول نهایی فنر بعد از تغییر طول محوری، L_i طول سیم آلیاژ حافظه‌دار پس از خم شدن فنر است، ρ^* شعاع خم تار خنثی وسط فنر و L طول اولیه فنر است.

۴- آزمایش تجربی

آزمایشی طراحی شده تا صحت کار شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شود. در این آزمایش سیم آلیاژ حافظه‌دار به دیواره فنر متصل شد، تا کاملاً فرم دیواره فنر را هنگام خم شدن آن داشته باشد (شکل ۱۰). با توجه به این که باید از طرف سیم جریان عبور کند و از طرفی فنر، هادی جریان است، بنابراین ابتدا لازم است تا سطح فنر با پوششی عایق شود تا مانع اتصال کوتاه شود و همچنین این پوشش نباید مانع حرکت فنر شود. از نوعی چسب کاغذی برای این منظور استفاده شد تا این شرایط را فراهم کند. مشخصات فنر مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. برای اندازه‌گیری میزان چرخش سر فنر (ϕ) می‌توان از یک سنسور که موقعیت زاویه‌ای را می‌سنجد استفاده کرد. در اینجا برای سادگی کار و همچنین دقت قابل قبول از یک زاویه‌سنج دیجیتال از نوع LAiSai با دقت یک درجه استفاده شده است. برای اعمال ولتاژ به دو سر سیم آلیاژ حافظه‌دار از یک منبع تغذیه که ولتاژ و جریان مورد نیاز را فراهم می‌کند استفاده شده است. باید توجه کرد طبق مدل انتقال دما و نتایج تجربی، برای شروع فاز آستنیتی و در نتیجه خم شدن



شکل ۹ نحوه اتصال مدل‌های مورد استفاده در طراحی ماژول

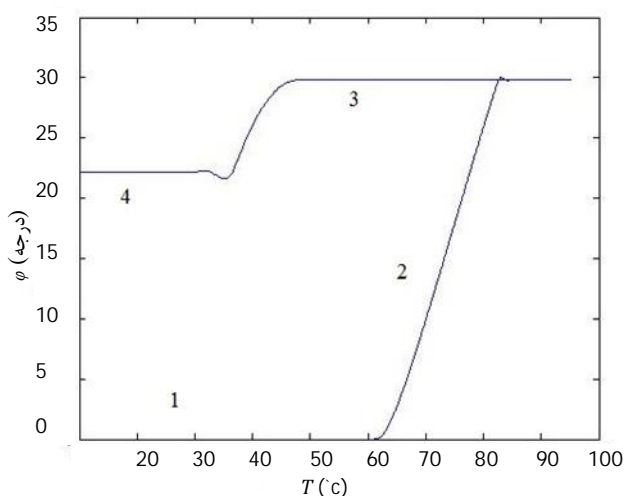
جدول ۱ مشخصات فنر مورد استفاده در آزمایش تجربی

جنس	قطر خارجی	قطر مفتول	تعداد حلقه
Clk60	۱۰ میلی‌متر	۰/۹ میلی‌متر	۱۹

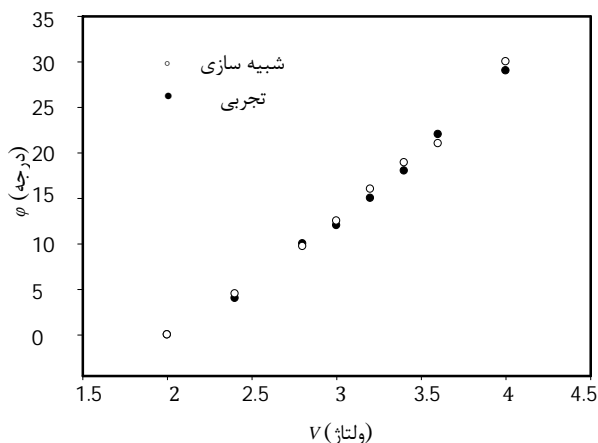


شکل ۱۰ ماژول قبل و پس از تحریک

خواص آن بحث کرد و شرایط بهینه را بدست آورد. بنابراین متغیرهای تأثیرگذار در مساله مانند جنس فنر، قطر خارجی فنر، قطر مفتول فنر و تعداد حلقه‌های فنر مورد توجه قرار گرفته است. طبیعی است که بیشمار آزمایش با این متغیرها می‌توان ترتیب داد ولی باید با توجه به نوع مساله و محیطی که از این بازو استفاده می‌شود تعداد این متغیرها را کاهش داد. با توجه به کاربرد هدف بازو که آندوسکوپی است، کوچک بودن ماژول در اولویت است. بنابراین بازه قطر بزرگ (D) از 10 میلی‌متر تا 15 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نیروی تولیدی فنر که باید کمتر از نیروی تولیدی آلیاژ حافظه‌دار باشد، قطر مفتول (d) به میزان 1، 1/3، 1/5 و 2 میلی‌متر لحاظ شده است. جنس فنر نیز از جنس رایج در فنرها که سیم موسیقی است، انتخاب می‌شود که خواص آن در جدول 2 مشاهده می‌شود. تعداد حلقه‌ها از 7 تا 12 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. شرایط بهینه زمانی حاصل می‌شود که بیشترین مقدار ϕ بدست آید.



شکل 12 نمودار شبیه‌سازی ϕ بر حسب دما



شکل 13 نمودار تغییر زاویه بر حسب ولتاژ در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

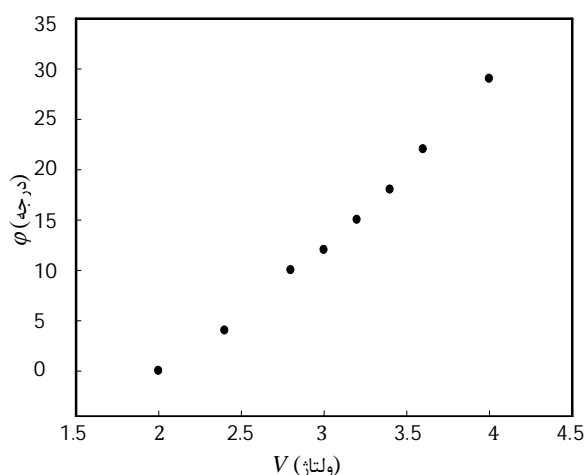
جدول 2 بعضی خواص سیم موسیقی

شماره استاندارد	مدول برشی (گیگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	جنس
ASTM A228	79/3	207	سیم موسیقی

جهت ایجاد کرد، مدنظر قرار گرفت. اما به دلیل محدودیت‌های آزمایش تجربی، این مساله در عمل با یک سیم مطالعه تجربی شده است. البته کارکرد اصلی ایده و ماژول توسعه داده شده، در مقاله با یک سیم نیز نشان داده شده است. با توجه به محدودیت تجربی و لزوم صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی مدل، شبیه‌سازی‌ها تنها با یک سیم بررسی شده است.

5- نتایج و بحث

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، تا زمانی که سیم آلیاژ حافظه‌دار به نقطه شروع آستنیتی برسد فنر تغییر زاویه نمی‌دهد (مسیر 1). با رسیدن به نقطه شروع آستنیتی فنر شروع به تغییر زاویه می‌کند و این تغییر زاویه تا زمانی که به نقطه پایان آستنیتی برسد ادامه دارد. حداکثر زاویه قابل دست‌یابی حدود 30 درجه است که با نتایج تجربی در توافق است (مسیر 2). لازم به ذکر است اگر سیم آلیاژ حافظه‌دار بیشتر از نقطه پایان آستنیتی گرم شود، به دلیل آنکه کسر مارتنزیتی غیردوقلویی صفر می‌شود، سیم کرنش ندارد و در نتیجه تغییر زاویه هم وجود ندارد که در انتهای مسیر 2 این مساله دیده می‌شود. در مسیر 3، سیم در حال سرد شدن است و با رسیدن به نقطه شروع مارتنزیتی و افزایش کسر مارتنزیتی، زاویه فنر در حال کم شدن است (مسیر 4). اما باید توجه شود بر خلاف شکل 11 که پس از سرد شدن سیم، زاویه صفر می‌شود در شبیه‌سازی این اتفاق نمی‌افتد و زاویه بین 20 تا 25 درجه می‌ماند. برای توجیه این موضوع می‌توان گفت که سیم آلیاژ حافظه‌دار وقتی برای بار اول تحریک شده و سپس از تحریک رها شود، فنر به سیم نیرویی برای بازگشت اعمال می‌کند. ولی علت این اختلاف در آن است که در مدل برینسون در زیر دمای تکمیل مارتنزیتی در چرخه سرمایش، در ناحیه 1 و 2 از نمودار فازی تغییر فاز به درستی پیش‌بینی نشده و لذا تغییری در تنش ایجاد نمی‌شود. به همین دلیل در نتایج شبیه‌سازی مقدار زاویه پس از سرمایش برابر با صفر نمی‌شود. البته صیادی و ذاکر زاده [23] تلاش کردند تا این ایراد را برطرف کنند. مسیر 1 تا 4 در تحریک‌های بعدی با کمی اختلاف تکرار می‌شوند و هیستریزس رفتار سیم آلیاژ حافظه‌دار را ایجاد می‌کنند. نمودار ولتاژ بر حسب تغییر زاویه، در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در شکل 13 مشاهده می‌شود که توافق خوبی بین آنها برقرار است. با توجه به اینکه هدف، طراحی یک بازو با استفاده از ماژول است و بدنه اصلی این بازو از فنر فشاری تشکیل شده است، بنابراین باید روی ابعاد و پارامترهای فنر و



شکل 11 نمودار تجربی ϕ بر حسب ولتاژ

محاسبه شده آن را به کسر مارتنزیت مورد نظر نزدیک کرد. در آزمایش‌های تجربی این مقاله نیز بدین روش عمل شده است.

از پارامترهای دیگر که در میزان فضای کاری و مقدار ϕ تأثیرگذارند، باید به جنس فنر اشاره کرد که هر چه میزان مدول الاستیسیته و مدول برشی آن کم شود، مقدار ϕ بیشتر می‌شود روابط (10.9). همچنین اگر قطر سیم آلیاژ حافظه‌دار زیاد شود، سطح مقطع آن بیشتر و نیروی تولیدی سیم بیشتر و در نتیجه ϕ بیشتر می‌شود.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ماژول انعطاف پذیر با به کارگیری محرک‌های آلیاژهای حافظه‌دار بر روی یک فنر فشاری طرح شد. با بررسی رفتار دینامیکی فنر تحت تأثیر یک نیروی خارج از مرکز و کوپل کردن آن با مدل برینسون برای رفتار آلیاژ حافظه‌دار، تأثیر پارامترهای فنر روی بازه کاری و مقدار چرخش فنر بررسی شد. با توجه به شرایط و محیط کاری محدوده مورد نظر برای پارامترها در نظر گرفته شد و آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها روی این محدوده‌ی مشخص از پارامترهای انتخابی متمرکز شد. در حالتی که $D=10\text{mm}$ و $d=1\text{mm}$ و $N=12$ بود، بیشترین بازه کاری و تغییر زاویه $\phi=21^\circ$ بدست آمد.

با توجه به عملکرد و بازه کاری استخراج شده از ماژول در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی می‌توان از آن در کاربرد به عنوان ماژول بازوی انعطاف پذیری مانند آندوسکوپ استفاده کرد. همین‌طور چون این ماژول از فنر ساخته شده است، علاوه بر داشتن وزن سبک و اندازه کوچک، یک بازوی منعطف را تشکیل می‌دهد و می‌توان علاوه بر موقعیت آن، سختی یا امیداندن آن در تعامل با محیط را تحت کنترل قرار داد. ضمن این که به دلیل توخالی بودن محل مناسبی برای عبور تجهیزات پزشکی در ماژول وجود دارد. در واقع در کارهایی که تاکنون انجام شده از فنر تنها به‌عنوان نیروی بایاس استفاده شده است اما در این مقاله علاوه بر آن در سایر موارد ذکر شده از فنر بهره گرفته شده است. همچنین طراحی و ساخت آسان ماژول از مزیت‌های دیگر آن است به‌طوری‌که در مقایسه با کارهای قبلی هزینه‌ها و پیچیدگی‌های ساخت بسیار کمتر است.

نکته حائز اهمیت دیگری که در کاربردی‌تر شدن ماژول مؤثر است، حداقل شعاع انحنای آن است. با توجه به نتایج استخراج شده در مقاله می‌توان با افزایش قطر سیم و نزدیک کردن آن به محور فنر تغییر زاویه بیشتری در ماژول ایجاد کرده و در ساختار ماژولار بازو از این نوع ماژول در مواردی که نیاز به شعاع انحنای کمی است، بهره گرفت. البته در این حالت ماژول از پایداری کمتری برخوردار است و باید با دقت بیشتری تحریک شود.

اگر چه نتایج این مقاله با استفاده از یک محرک آلیاژ حافظه‌دار ارائه شد، ولی با قرار دادن یک سیم آلیاژ حافظه‌دار دیگر به‌صورت متقارن در طرف دیگر فنر، بازه کاری بین $+21$ تا -21 درجه گسترده می‌شود. همچنین با داشتن سه سیم در موقعیت 120 درجه نسبت به هم در اطراف فنر و تحریک آنها به‌صورت جداگانه و یا گروهی، امکان چرخش سر فنر بصورت فضایی فراهم می‌شود. با ساخت چند ماژول و نصب آنها در امتداد همدیگر بصورت ماژولار، ضمن ایجاد انعطاف و قابلیت مانور در بازو، بازه کاری تا 63 درجه افزایش می‌یابد و طول مجموعه حدوداً 22 سانتی‌متر می‌شود که در مقایسه با کارهای قبلی از شرایط مناسبی برخوردار است.

انصاری [24] پارامترهای مختلف یک آلیاژ حافظه‌دار را بررسی کرد که از همین اطلاعات در این مقاله استفاده شده و نتایج در جدول 3 مشاهده می‌شود. پس از به‌کارگیری پارامترهای جدول 3 در شبیه‌سازی میزان چرخش سر فنر (ϕ) برای ورودی‌های در نظر گرفته شده بدست آمده که نتایج در شکل‌های 14 تا 18 مشاهده می‌شود. لازم به تذکر است که می‌توان آزمایش‌ها را با پارامترهای بیشتری انجام داد ولی اگر قطر فنر از 10 میلی‌متر کمتر باشد امکان ورود تجهیزات از بین فنر بسیار محدود شده و اگر قطر آن بیشتر از 15 میلی‌متر باشد امکان ورود فنر به داخل بدن نخواهد بود. لیکن از بستر شبیه‌سازی و نتایج ارائه شده در این مقاله می‌توان برای سایر کاربردها با ابعاد کوچکتر یا بزرگتر ماژول بهره گرفت. در مورد قطر مفتول هم این شرایط حاکم است؛ به علاوه اینکه بزرگ شدن آن نیروی فنر را اضافه می‌کند و این امکان به سیم آلیاژ حافظه‌دار داده نخواهد شد که بتواند فنر را خم کند. کوچک بودن آن هم نیروی فنر را کاهش می‌دهد و سیم آلیاژ حافظه‌دار پس از آزاد شدن از حالت تحریک در استنیت نمی‌تواند به حالت مارتنزیت غیردوقلویی برگردد. انصاری [24] نشان داد که آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده در این مقاله، حداکثر 200 مگاپاسکال تنش و یا $6/28$ نیوتن، نیرو ایجاد می‌کند. بنابراین این نیرو باید بیشتر از نیروی تولیدی فنر باشد. اگر قطر مفتول بیشتر از 2 میلی‌متر و قطر خارجی فنر کمتر از 10 میلی‌متر باشد، با توجه به خواص فنر نیروی تولیدی فنر بیشتر از $6/5$ نیوتن می‌شود و امکان خم شدن آن فراهم نخواهد بود.

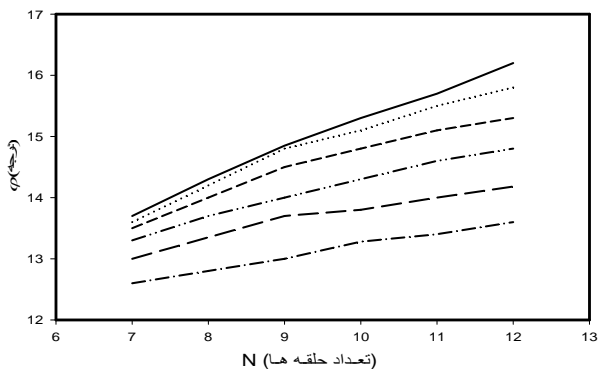
اما در شکل 14 تا 16 مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش قطر خارجی مقدار ϕ کم می‌شود ولی در شکل 17 مشاهده می‌شود که رابطه‌ی عکس برقرار است. در واقع طبق رابطه 10 با افزایش D ، سختی فنر کم می‌شود. لذا نیروی مورد نیاز در آلیاژ حافظه‌دار برای خم کردن فنر کمتر می‌شود. لیکن بدلیل کرنش محدود سیم افزایش قطر اگرچه نیروی مورد نیاز کمتری برای تغییر شکل دارد، باعث تغییر زاویه کمتری شده است. در واقع با افزایش d و کاهش D ، ماژول حالت صلب‌تری به خود می‌گیرد و انعطاف‌پذیری آن کاهش می‌یابد. همچنین شکستگی‌ای که در شکل 17 با $D=10\text{mm}$ مشاهده می‌شود به صلب شدن فنر بر می‌شود که با افزایش N ، فنر به قدری صلب شده است که نیروی سیم امکان غلبه بر سختی فنر را ندارد. به طور کلی بی‌نظمی با صلب‌تر شدن فنر بیشتر می‌شود، لذا این در اشکال 16 و 17 برجسته‌تر ملاحظه می‌شود. در شکل 18 ارتباط d با پارامترهای دیگر بیان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش d ، ϕ کم می‌شود که این بدلیل افزایش سختی فنر است. همچنین مطابق همین شکل و به همین دلیل با افزایش N ، باز هم ϕ زیاد می‌شود.

نکته دیگری که بر روی میزان ماکزیمم کرنش سیم تأثیر دارد، میزان کسر مارتنزیت غیردوقلویی است که تابعی از تغییر طول اولیه سیم آلیاژ حافظه‌دار نسبت به حالت فاز کاملاً مارتنزیت غیردوقلویی است. برای حساب کردن کسر مارتنزیت غیر دو قلوبی از سه پارامتر حداکثر کرنش آلیاژ [24] که $5/5$ درصد بوده، طول حداقل سیم در حالت کاملاً مارتنزیت غیر دوقلویی شده از فاز استنیت (بدون بار) که 70 میلی‌متر است و طول حداکثر سیم با اعمال بار که حالت کاملاً مارتنزیت دوقلویی بوده و $73/85$ میلی‌متر است، محاسبه می‌شود.

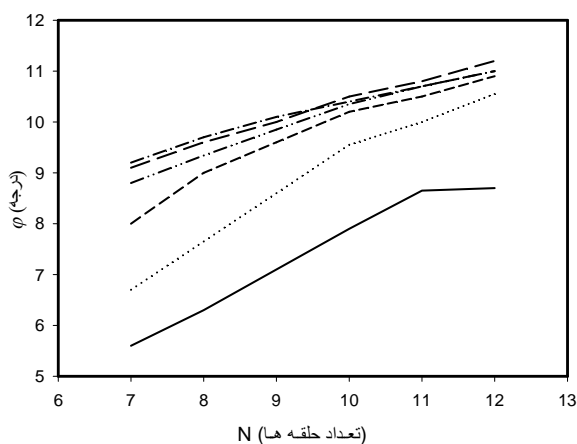
در عمل استفاده از ایجاد تغییر طول برای رسیدن به شرایط اولیه مدنظر برای کسر مارتنزیتی غیردوقلویی مشکل است. به جای این روش می‌توان آلیاژ را کاملاً در فاز مارتنزیت غیردوقلویی قرار داد و سپس با اعمال نیروی

جدول 3 مشخصات سیم آلیاژ حافظه دار مورد استفاده

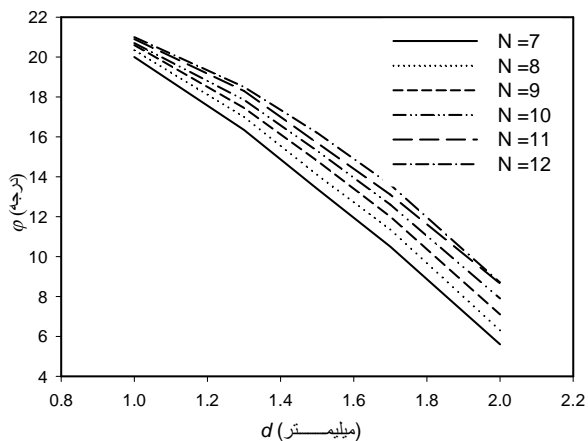
تعریف	مقدار	واحد
ماکزیمم کرنش برشی	0/055	-
فاکتور پخش گرمایی آلیاژ حافظه دار	0/55	MPa/°C
دمای محیط	20	°C
مقاومت آلیاژ حافظه دار در آستنیت	45	Ω
مقاومت آلیاژ حافظه دار در مارتنزیت	45	Ω
ضریب پخش گرمایی	150	J/m ² ×°C×sec
مساحت سطح مقطع سیم	0/0000000314	m ²
دمای شروع آستنیتی	71	°C
دمای پایان آستنیتی	76/2	°C
دمای شروع مارتنزیتی	47/6	°C
دمای پایان مارتنزیتی	33/6	°C
طول اولیه آلیاژ حافظه دار	72	mm
مدول ینگ در آستنیت	31/5	GPa
مدول ینگ در مارتنزیت	20	GPa
ضریب استحاله در آستنیت	6/73	1/°C
ضریب استحاله در مارتنزیت	6/32	1/°C



شکل 16 نمودار چرخش سر فنر برحسب مختلف فنر و تعداد کویل به ازای $d=1.5\text{mm}$



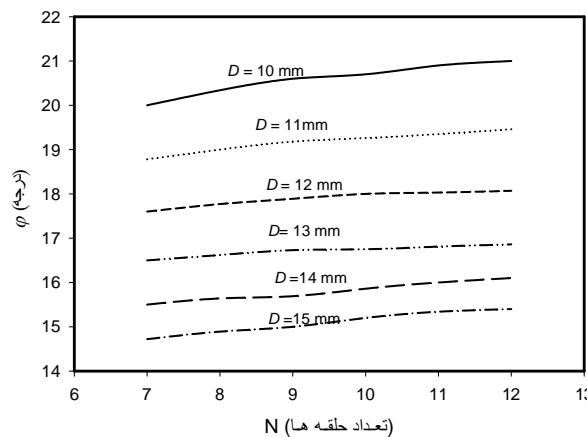
شکل 17 نمودار چرخش سر فنر برحسب قطرهای مختلف فنر و تعداد کویل به ازای $d=2\text{mm}$



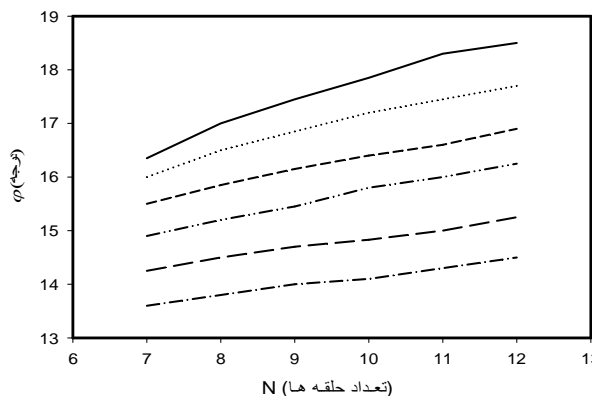
شکل 18 نمودار چرخش سر فنر بر حسب قطر مفتول d و تعداد حلقه ها N و با قطر فنر $D=10\text{mm}$

7- فهرست علائم

A_s	دمای شروع آستنیتی
A_f	دمای پایان آستنیتی
E_A	مدول ینگ در فاز آستنیت



شکل 14 نمودار چرخش سر فنر برحسب قطرهای مختلف فنر و تعداد کویل به ازای $d=1\text{mm}$



شکل 15 نمودار چرخش سر فنر برحسب مختلف فنر و تعداد کویل به ازای $d=1.3\text{mm}$

- [10] J. Peirs, D. Reynaerts, Design of a shape memory actuated endoscopic tip, *Sensors and Actuators A*, Vol. 70, pp. 135-140, 1998.
- [11] J. Abadie, N. Chaillet, C. Lexcelent, Modeling of a new SMA micro-actuator for active endoscopy application, *Mechatronics*, Vol. 19, pp. 437-442, 2009.
- [12] V. Sars, S. Haliyo, J. Szewczyk, A practical approach to the design and control of active endoscopes, *Mechatronics*, Vol. 20, pp. 251-264, 2010.
- [13] F. Chapelle, P. Bidaud, Evaluation functions synthesis for optimal design of hyper-redundant robotic systems, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, pp. 1196-1212, 2006.
- [14] A. Mencias, J. H. Park, S. Lee, Robotic solutions and mechanisms for a semi-autonomous endoscope, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 1379-1384, 2002.
- [15] A. Hadi, Modeling a flexible miniatur module actuated by shape memory alloys, *International Conference on Automation, Mechatronics and Robotics (ICAMR'2012)*, Thailand, 2012.
- [16] R. G. Budynas, J. E. Shigley, J. K. Nisbett, *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill, 2012.
- [17] K. Tanaka, A thermo-mechanical sketch of shape memory effect: One-dimensional tensile behavior, *The International Journal of Structural Mechanics and Materials Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 251-263, 1986.
- [18] C. Liang, Mechanical constitutive relations for shape memory materials, *Journal of Intelligent Material System and Structure*, Vol. 1, pp. 207-234, 1990.
- [19] L. C. Brinson, One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermo-mechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, pp. 229-242, 1993.
- [20] X. Gao, R. Qiao, and L. C. Brinson, Phase diagram kinetics for shape memory alloys: A robust finite element implementation, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, pp. 2102-2115, 2007.
- [21] L. C. Brinson, and M. S. Huang, Simplification and comparisons of shape memory alloy constitutive models, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, pp. 108-114, 1996.
- [22] L. C. Brinson, M. S. Huang, Analysis of controlled beam deflection using SMA wires, *Journal of Intelligent Materials and Structures*, Vol. 8, No. 1, pp. 12-25, 1997.
- [23] H. Sayyaadi, M. R. Zakerzadeh, Nonlinear analysis of a flexible beam actuated by a couple of active SMA wire actuators, *IJE Transactions A: Basics* Vol. 25, No. 3, pp. 249-264, 2012.
- [24] M. Ansari, M. Golzar, A.H. Behraves, 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. (In Persian)

مدول یانگ در فاز مارتنزیت	E_M
دمای پایان مارتنزیتی	M_f
دمای شروع مارتنزیتی	M_s
کسر مارتنزیتی غیر دوقلویی	ξ
کسر مارتنزیتی دوقلویی	ξ_c
ضریب انتقال فاز	Ω
ماکزیمم کرنش قابل بازیافت	ϵ_L
ضریب پخش گرمایی	θ

8- مراجع

- [1] J. Jayender, R. V. Patel, S. Nikumb, Robot- assisted Active catheter insertion: Algorithms and Experiments, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, no. 9, pp. 1101-1117, 2009.
- [2] M. C. Carrozza, P. Dario, Micromechatronics in surgery, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 25, No.4, pp. 309-327, 2003.
- [3] D. C. Lagoudas, *Shape memory alloys modeling and engineering application*, Springer, 2008.
- [4] T. Mineta, T. Mitsui, An active guide with shape memory alloys bending actuator fabricated by room temperature process, *Sensors And Actuators A*, Vol. 97-98, pp. 632-637, 2002.
- [5] E. Lantaigne, A. Jnifene, An experimental study on a SMA driven pressurized hyper-redundant manipulator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 19, No. 9, pp. 1067-1076, 2008.
- [6] B. Kim, M. G. Lee, Y. P. Lee, An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator, *Sensors And Actuators A*, Vol. 125, pp. 429-437, 2006.
- [7] A. Hadi, M. Elahinia, A. Yosefi-Koma, M. Moghadam, C. Chapman, Position and Force Control of a SMA Spring Based Differential Actuator, *SMASIS10 ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, September 2010.
- [8] E. Ottaviano, G. Carbone, M. Ceccarelli, Workspace analysis and performance of a binary actuated parallel manipulator with exural joints, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 217, pp. 313-330, 2003.
- [9] T. Mineta, T. Mitsui, Y. Watanabe, Batch fabricated at meandering shape memory alloy actuator for active catheter, *Sensors an Actuators A*, Vol. 88, pp. 112-120, 2001.