



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 Rajaei 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 a 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:

برای عدم آسیب به بافت ها استفاده شد. جان پیرس و همکارانش برای این که نوک آندوسکوپ چرخش 180 درجه داشته باشد دو مکانیزم ارائه داده اند [10]. در روش اول یک عملگر ماژولار ساخته شده که شامل چند مهره است و مهره ها نسبت به هم 90 درجه می چرخند. در روش دوم آنها یک عملگر با حرکت بزرگ و کنترل موقعیت پیوسته ساخته اند که از مکانیزم چرخ دنده خورشیدی برای این کار استفاده شده است. در هر دو روش از آلیاژ حافظه دار استفاده شده است. ابادی و همکارانش یک میکرو عملگر از آلیاژ حافظه دار برای آندوسکوپی ساختند که برای سرد کردن از اثر پلنتیه³ استفاده می شود [11]. در اینجا دو نوار حافظه دار با شکل خاص دو طرف ماژول را به هم وصل می کند. جریان از یک نوار وارد و از دیگری خارج می شود. با توجه به اثر پلنتیه فقط یک نوار تحریک شده و در نتیجه خم می شود و نوار دیگر تغییر شکل پیدا می کند. با معکوس کردن جریان عکس این حالت رخ می دهد. 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 حافظه دار 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 حافظه دار البته با شکل بهینه شده قرار دادند و سازه را حرکت دادند. فردریک چاپل یک سیستم مکانیکی ارائه داد که چیدمانی از ماژول های لوله ای شکل است که به وسیله مفصل های پین شکل به همدیگر متصل شده اند [13]. هر مفصل میان دو ماژول یک درجه آزادی محتمل دارد. تعداد و طول ماژول ها با توجه به نیازهای طراحی تنظیم می شود. مفصل ها دارای عملگرهای آلیاژ حافظه دار در شکل متضاد هم هستند. در طول آندوسکوپ و روی مفصل ها سنسورهای فشار برای تشخیص تماس با محیط توزیع شده اند. منسبایی 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 حافظه دار است که درون بالشتکی جاسازی شده است. دو راه حل برای حرکت که یکی طول ثابت و دیگری متغیر بود پیشنهاد شد. همچنین هادی حرکت یک جسم الاستیک در فضا را شبیه سازی کرد که توسط 3 سیم آلیاژ حافظه دار که به صورت 120 درجه اطراف جسم الاستیک جاسازی شده بودند، تحریک می شد [15].

در این مقاله یک ماژول فنری و انعطاف پذیر که با استفاده از سیم های آلیاژ حافظه دار تحریک می شود، در نظر گرفته شده است (شکل 1). مدل سازی دینامیکی / سینماتیکی بازو با رفتار دینامیکی آلیاژ حافظه دار ترکیب شد تا بتوان رفتار ماژول را در شرایط مختلف بارگذاری پیش بینی کرد. در کارهایی تاکنون انجام شده به طور کلی پیچیدگی طرح و مقرون به صرفه نبودن آن و یا غیر عملی بودن آن ملاحظه می شود. هرچند که به طور کلی مشکلات آلیاژ حافظه دار از قبیل رفتار غیرخطی، هیستریزس و پاسخ کند، فراگیر شدن آن را محدود کرده است، اما می توان 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 حافظه دار را ایفا می کند و هم انعطاف پذیری کافی برای این ماژول ایجاد می کند. درضمن 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 آندوسکوپ ها، سر توسط کابل کنترل و خم می شد که می توانست برای بیمار دردناک باشد چرا که کنترل آن به سختی انجام می گرفت [2].

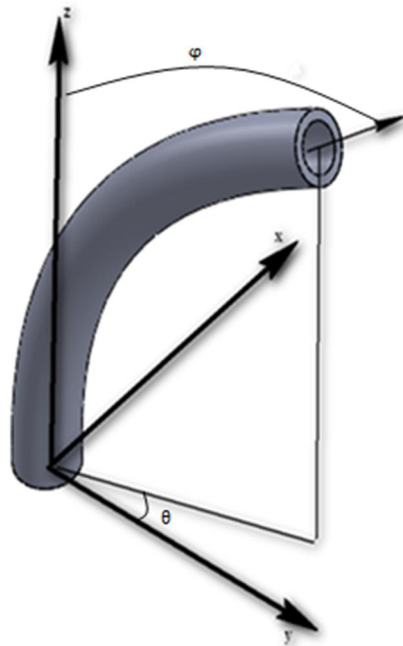
با ورود آلیاژهای حافظه دار² (SMA) به عنوان مواد هوشمندی که قابلیت بازیافت شکل اولیه خود را معمولاً با دریافت گرما دارند، صنعت ساخت آندوسکوپ ها وارد مرحله جدیدی شد. این مواد به دلیل تولید تغییر شکل بزرگ، نرخ توان به وزن بالا، ولتاژ راه اندازی پایین، قابلیت سازگاری زیستی بالا و عملکرد بی صدا و یکنواخت در ساخت عملگرها به خصوص در صنعت پزشکی مورد توجه قرار گرفته اند [1].

آلیاژهای حافظه دار 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 می کنند. 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 می پذیرد. این تغییر شکل در فاز مارتنزیت می تواند بزرگ باشد و از این خاصیت در ساخت عملگرها استفاده شده است. این آلیاژها دارای دو اثر مهم هستند: 1- اثر حافظه داری، 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 می شود. در اثر دوم آلیاژ در دماهای بالاتر از خاتمه آستنیتی مورد تنش قرار گرفته و با حذف بارگذاری به کرنش اولیه باز می شود. از این دو اثر با توجه به شرایط کاری و دمایی می توان استفاده کرد [3].

با توجه به شرایط ذکر شده در بالا انتظار می رود این آلیاژها در ساخت میکرو کاتترها جانشین مناسبی نسبت به عملگرهای دیگر باشند. تاکاشی مینیتا و همکارانش یک سیم راهنما ساختند که شامل آلیاژ حافظه دار با شکل خاص و یک کوئل فنری برای تأمین نیروی بایاس بود [4]. آنها با دادن جریان های 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 مستقلا نه سازه های سری شده کنترل می شد [5]. آنها در هر سازه سه عملگر آلیاژ حافظه دار 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 بی سیم ساخت [6]. ایده آنها برگرفته از حرکات کرم خاکی است که با قرار دادن کلمپ و فنر توانستند این رفتار را شبیه سازی کنند. هادی و همکارانش کنترل نیرو و موقعیت را در یک سیستم دیفرانسیلی تحریک شده با دو محرک آلیاژ حافظه دار بررسی کرده اند [7]. اتاویانو یک ماژول طراحی کرد که دارای سه پا بوده و هر پا سه مفصل دارد [8]. در مفصل میانی دو آلیاژ حافظه دار در دو طرف مفصل کار گذاشته شده و باعث خم شدن پا می شود. در این طرح هر ماژول 6 درجه آزادی دارد و با ترکیب این ماژول ها می توان یک سیستم پیوسته فراهم کرد. مینیتا و همکارانش [9] توانستند با روش اچ پالسی الکتروشیمیایی از ورق آلیاژ حافظه دار 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

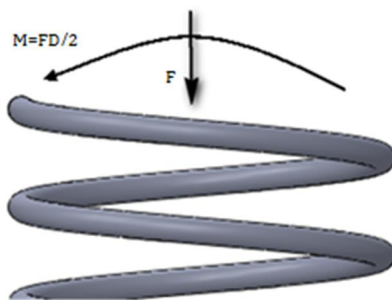
3- Peltier Effect
4- Bias

1- Microcatheter
2- Shape Memory Alloys

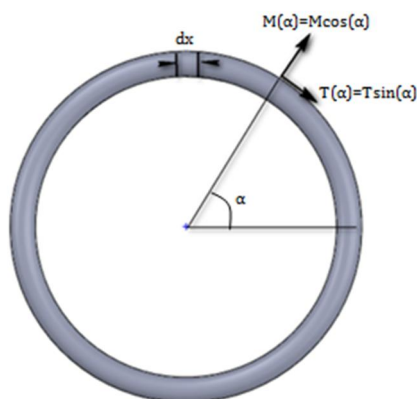


شکل 2 وضعیت زوایای ایجاد شده توسط بازوی مکانیکی

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 می کند که در شکل 4 نشان داده شده است. در ادامه از روابط کار و انرژی برای محاسبه میزان تغییر شکل ها 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 می توان اثرات آن ها را مجزا از همدیگر بررسی کرد.



شکل 3 اعمال بار محوری و گشتاور روی فنر



شکل 4 ایجاد گشتاور خمشی و پیچشی در کوئل های فنر

دوربین به راحتی می تواند به سر آندوسکوپ منتقل شود. و این مزیت دیگری از این طرح محسوب می شود.

در ادامه مقاله در بخش دوم، مدل سازی ماژول مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا تغییر شکل فنر فشاری الاستیک به عنوان پایه ماژول بحث شده و سپس این مدل با مدل آلیاژ حافظه دار برای بیان تغییر شکل کل ماژول کوئل شده است. در بخش سوم مدل در محیط سیمولینک متلب شبیه سازی شده است. در بخش چهارم آزمایش های تجربی مربوط به صحت گذاری نتایج شبیه سازی ارائه شده است. در بخش پنجم نتایج مورد بحث قرار گرفته و در بخش ششم نتیجه گیری مقاله ارائه شده است.

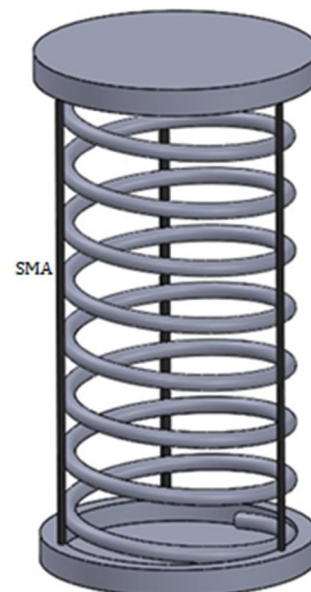
2- مدل سازی ماژول

ماژول در نظر گرفته شده در این مقاله از یک فنر انعطاف پذیر تشکیل شده است که سیم های SMA در اطراف آن بصورت متقارن در زوایای 120 درجه نسبت به هم در مقطع ماژول نصب شده است. انقباض این سیم ها وقتی گرما دریافت می کنند، کمک می کنند تا فنر بتواند در تمام جهات چرخش داشته باشد.

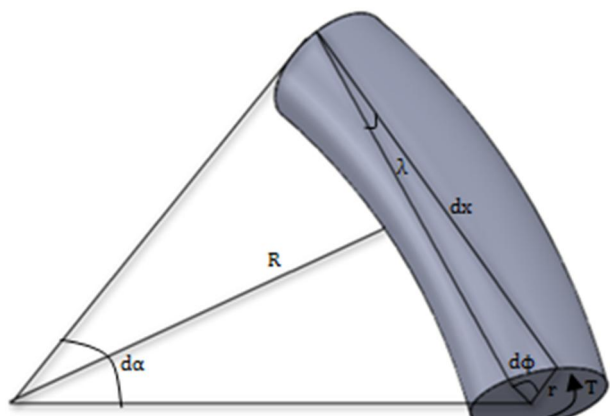
در یک وضعیت نوعی ماژول تحریک شده، با توجه به شکل 2، دو زاویه حاصل کار عملکرد بازو است که یکی چرخش سر فنر را نشان می دهد و آن را با θ نشان می دهند و دیگری گردش فنر را نشان می دهد که آن را با ϕ نشان می دهند. زاویه θ زمانی حاصل می شود که حداقل دو سیم آلیاژ حافظه دار همزمان عمل کنند. در این مطالعه برای تعیین بازه کاری تنها به عملکرد θ اکتفا شده است و زاویه ϕ بصورت کمی بررسی نمی شود و این بدان معناست که در شبیه سازی تحریک یک سیم آلیاژ حافظه دار بررسی می شود. پس برای داشتن زاویه θ باید محرک های آلیاژ حافظه دار بصورت گروهی تحریک شوند.

2-1- مدل فنر

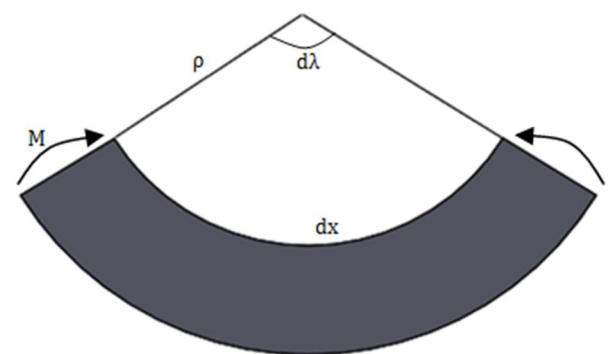
هدف از مدل سازی فنر استخراج میزان خم شدن فنر فشاری به ازای اعمال یک بار غیر محوری روی فنر است. همان طور که در شکل 2 ملاحظه می شود، وقتی که سیم آلیاژ حافظه دار تحریک می شود، فنر انحنا پیدا می کند. در ضمن فرض شده است که سیم آلیاژ حافظه دار به ابتدا و انتهای فنر متصل بوده و از درون فنر رد شده است تا فرم 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 حافظه دار

در این بخش به نحوه مدل سازی آلیاژ حافظه دار برای بررسی رفتار آن ارائه می شود. این مدل سازی در سه بخش روابط ساختاری، انتقال فاز و انتقال حرارت انجام می شود. در ادامه به توضیح هر کدام از این موارد پرداخته می شود.

2-2-1- مدل ساختاری¹

رفتار آلیاژ حافظه دار از سه متغیر دما، کرنش و تنش متأثر است. تلاش های صورت گرفته تاکنون در مدل سازی ساختاری آلیاژ حافظه دار ارائه معادلاتی است که با ترکیب ساده این متغیرها در شکل سه بعدی یا یک بعدی رفتار ماده را پیش بینی کند. معادلات سه بعدی به دلیل داشتن پارامترهای زیاد از پیچیدگی زیادی برخوردار هستند و البته در اشکال هندسی خاص مورد استفاده قرار می گیرد. اما معادلات یک بعدی که به طور مؤثر در فرم رایج سیم آلیاژ حافظه دار قابل استفاده هستند، به دلیل سادگی بیشتر و نتایج قابل قبول در کاربردهای مهندسی بیشتر استفاده می شوند. مدل تاناکا به عنوان اولین مدل رایج و قابل قبول در این زمینه مطرح شد [17]. وی کرنش، دما و کسر مارتنزیتی را به عنوان 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 (٢) را که سبب اثر حافظه داری در دمای 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 شکل های 2 و 8 ملاحظه می شود. در شکل 5 جزء کوچکی از فنر تحت پیچش با طول dx ملاحظه می شود که تغییر پارامترهای هندسی نیز در آن آورده شده است.

$$-M\phi - \int T \alpha \phi - \int M \alpha \gamma \quad (1)$$

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

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

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

$$\alpha \quad (3)$$

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

$$\lambda x r \phi \quad \lambda \quad \frac{\tau}{G} R \alpha \quad x \tau T \alpha r j \quad (4)$$

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

(1) رابطه (5) بدست می آید:

$$\int T \alpha \phi \quad \int FD \alpha \frac{\phi}{\alpha} \quad \int_0^{2\pi N} \alpha \frac{F^2 D^3}{Gj} da \quad \frac{\pi N F^2 D^3}{Gj} \quad (5)$$

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

$$\alpha \quad (6)$$

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

$$\frac{M}{\rho} \quad \frac{M}{EI} \quad \gamma \quad \frac{M}{EI} \quad \rho \gamma \quad R \alpha \quad (7)$$

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

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

α حال با جایگذاری روابط (5) و (8) در رابطه (1) تغییر شکل ϕ استخراج می شود (رابطه 9):

$$\phi \quad \frac{FD^2 \pi}{EI} \quad \frac{1}{Gj} \quad (9)$$

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

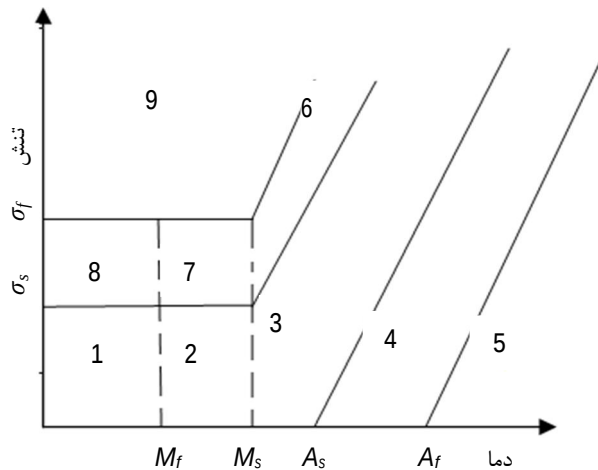
2-1-2- تغییر طول محوری فنر

وقتی فنری تحت بار محوری قرار می گیرد، تغییر طولی در آن ایجاد می شود که از رابطه (10) بدست می آید [16]:

$$\delta \quad \frac{f D^3}{G d^4} \quad (10)$$

در این رابطه قطر مفتول فنر و δ جابجایی محوری فنر است. در ابتدا و انتهای بازو یک ورقه نصب می شود تا سیم های آلیاژ حافظه دار 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 آلایژ 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 آلایژ حافظه دار عمل می کند و می توان با کنترل جریان رفتار آلایژ حافظه دار را کنترل کرد. بنابراین رابطه (15) به عنوان رابطه انتقال دما برای این روش گرم شدن سیم پیشنهاد شده است:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = RI^2 - h_c A_c (T - T_{\infty}) \quad (15)$$

در اینجا m جرم بر واحد طول، c_p ضریب گرمایی 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 آلایژ حافظه دار

برای بیان و درک بهتر معادله دینامیکی حاکم بر ماژول، یک ورقه نازک روی فنر در نظر گرفته شده و دیگرام 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 آلایژ حافظه دار روی ورقه گشتاور اعمال می کنند که به صورت رابطه (16) می توان آن را محاسبه کرد:

$$(16)$$

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 کد سیستم به دلیل تحریک با آلایژ حافظه دار و برای ساده سازی مسأله زاویه θ در هر لحظه عمود بر بردار برآیند گشتاورها یا همان M در نظر گرفته شده است. لذا قانون دوم نیوتن طبق معادله دینامیکی (17) بیان می شود:

$$M_b \ddot{\theta} = FD - M \quad (17)$$

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

$$M \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + \frac{1}{EI} \frac{1}{GJ} D \pi \varphi - I \ddot{\theta} = 0 \quad (18)$$

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 مارتنزیتی¹ (ξ) را به دو قسمت کسر مارتنزیتی دوقلویی² (ξ_s) و کسر مارتنزیتی 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 مارتنزیتی ارتقا داد [20]. این مدل مبنای کار این مقاله قرار گرفته است. طبق رابطه ساختاری یک بعدی برینسون، تنش، کرنش، کسر مارتنزیتی و دما به صورت رابطه (11) به هم مرتبط می شوند.

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi - \xi_0) + \Omega(\xi_s - \xi_{s0}) + \theta(T - T_0) \quad (11)$$

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A)$$

$$\Omega = -\xi E(\xi)$$

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

$$\sigma = \xi E_A + \xi_s E_M + \theta(T - T_0) \quad (12)$$

در این معادلات σ تنش، ξ کسر مارتنزیتی، E_A مدول الاستیسیته در فاز آستنیت، E_M مدول الاستیسیته در فاز مارتنزیت، Ω ضریب انتقال فاز، E_L ماکزیمم کرنش قابل بازیافت و θT ضریب پخش گرمایی هستند.

شکل 7 تقسیم بندی مناطق مختلف تغییر فاز بر حسب دما و تنش بحرانی برای محاسبه میزان کسر مارتنزیت طبق مدل برینسون را نشان می دهد. در منطقه یک، آلایژ حافظه دار کاملاً دوقلویی است. وقتی که آلایژ حافظه دار مورد تنش قرار می گیرد و سطح تنش از تنش شروع غیر دوقلویی (σ_0) بالاتر می رود مارتنزیت غیر دوقلویی شروع به تشکیل می کند که با رسیدن به تنش پایان غیر دوقلویی (σ) تمام مارتنزیت غیر دوقلویی می شود.

2-2-2- معادلات سینتیک انتقال فاز³:

وقتی تنش صفر است، انتقال فاز در دماهای شروع و پایان آستنیتی و شروع و پایان مارتنزیتی 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 مارتنزیت به آستنیت را انتقال مستقیم⁴ (A) گویند که در منطقه 4 اتفاق می افتد و انتقال از فاز آستنیت به مارتنزیت 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:

$$\dot{\xi} = \xi \quad (13)$$

$$\dot{\xi} = \xi \quad (14)$$

در این معادلات ξ 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 آلایژ حافظه دار می شود، تغییرات دما و تنش است. گرم شدن سیم آلایژ 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- شبیه سازی

شبیه سازی در محیط سیمولینک نرم افزار متلب^۱ انجام گرفته است. ارتباط زیر مدل های به کار گرفته شده در شبیه سازی در شکل ۹ بیان شده است. نوآوری این مقاله در مدل سازی و شبیه سازی، نحوه کوپل کردن مدل آلایژ حافظه دار با مدل سینماتیکی و دینامیکی فنر برای استخراج تغییر شکل لحظه ای و تعقیب مسیر تغییر شکل مازول است. این بیان جزئی و کامل به پیاده سازی کنترل پارامترهای موقعیتی مازول در کارهای آینده کمک شایانی می کند. در مدل آلایژ حافظه دار ورودی ها ولتاژ و تغییر طول یا کرنش سیم هستند و خروجی آن تنش تولید شده در آلایژ حافظه دار است. با محاسبه تنش های ایجاد شده در هر یک از سیم ها گشتاور برآیند آن ها از رابطه (۱۶) محاسبه می شود. گشتاور مقاوم فنر نیز با توجه به موقعیت سینماتیکی لحظه ای از رابطه (۹) محاسبه می شود. با استفاده و اعمال این مقادیر در رابطه (۱۸) پارامتر φ محاسبه می شود. این معادله بصورت کوپل حل شده و در هر لحظه با داشتن پارامتر φ می توان تغییر طول لحظه ای آلایژ حافظه دار را استخراج و به عنوان ورودی در مدل ساختاری آلایژ حافظه دار استفاده نمود. در شکل ۹ می توان نحوه این ارتباط را مشاهده کرد. بنابراین با استفاده از این بستر شبیه سازی می توان مقدار φ که بیانگر مختصات بازو است را به صورت لحظه ای محاسبه کرد. باید توجه کرد که برای محاسبه میزان تغییر شکل سیم های آلایژ حافظه دار در حین تحریک، باید تغییر شکل محوری فنر (δ) را نیز لحاظ کرد.

هادی [۱۵] روابط سینماتیک یک تیوپ انعطاف پذیر را وقتی توسط سه سیم آلایژ حافظه دار تحریک می شود را استخراج نمود که طبق رابطه (۱۹) با استفاده از شکل ۸ بیان شده است.

$$L_i = L - \delta$$

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

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

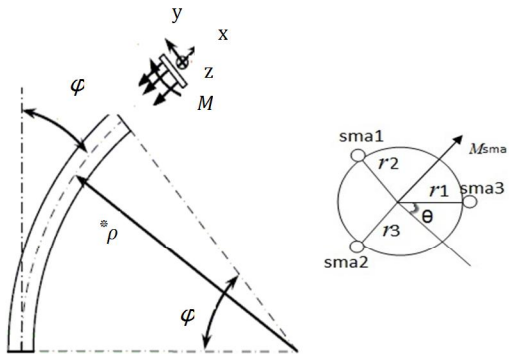
که در اینجا L_i ، طول نهایی فنر بعد از تغییر طول محوری، L_i طول سیم آلایژ حافظه دار پس از خم شدن فنر است، ρ^* شعاع خم تار خنثی وسط فنر و L طول اولیه فنر است.

۴- آزمایش تجربی

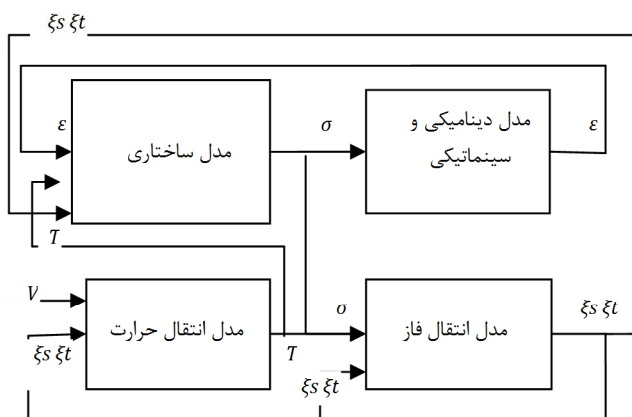
آزمایشی طراحی شده تا صحت کار شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شود. در این آزمایش سیم آلایژ حافظه دار به دیواره فنر متصل شد، تا کاملاً فرم دیواره فنر را هنگام خم شدن آن داشته باشد (شکل ۱۰). با توجه به این که باید از طرف سیم جریان عبور کند و از طرفی فنر، هادی جریان است، بنابراین ابتدا لازم است تا سطح فنر با پوششی عایق شود تا مانع اتصال کوتاه شود و همچنین این پوشش نباید مانع تحرک 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 اندازه گیری میزان چرخش سر فنر (ϕ) می توان از یک سنسور که موقعیت زاویه ای را می سنجد استفاده کرد. در اینجا برای سادگی کار و همچنین دقت قابل قبول از یک زاویه سنج دیجیتال از نوع LaAiSai با دقت یک درجه استفاده شده است. برای اعمال ولتاژ به دو سر سیم آلایژ حافظه دار از یک منبع تغذیه که ولتاژ و جریان مورد نیاز را فراهم می کند استفاده شده است. باید توجه کرد طبق مدل انتقال دما و نتایج تجربی، برای شروع فاز آستنیتی و در نتیجه خم شدن

فنر به حدود ۲ ولت، اختلاف پتانسیل نیاز است و حداکثر خم شدن فنر با ۴ ولت ایجاد می شود که در شکل ۱۱ حداکثر خم شدن فنر مشاهده می شود. ولتاژهای بیشتر صرف گرم تر شدن سیم آلایژ حافظه دار می شود 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 مازول و قابلیت های 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]



شکل ۹ نحوه اتصال مدل های مورد استفاده در طراحی مازول

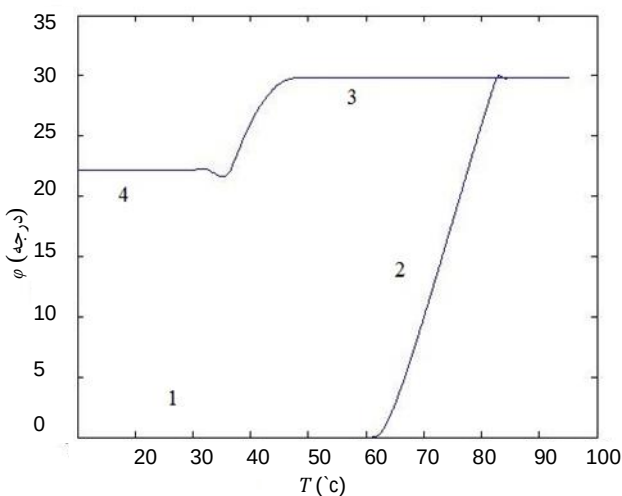
جدول ۱ مشخصات فنر مورد استفاده در آزمایش تجربی

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

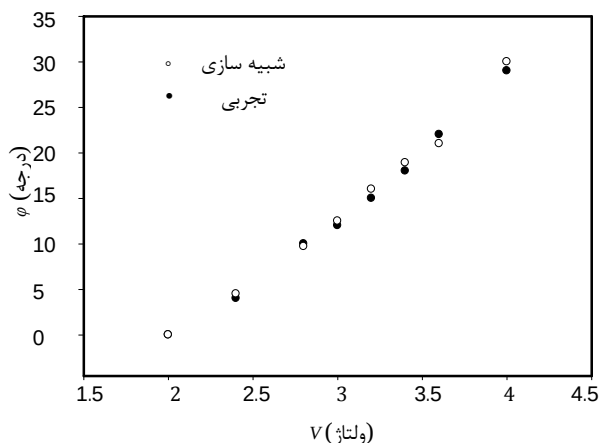


شکل ۱۰ مازول قبل و پس از تحریک

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 حلقه های فنر مورد توجه قرار گرفته است. طبیعی است که بیشمار آزمایش با این متغیرها می توان ترتیب داد ولی باید با توجه به نوع مساله و محیطی که از این بازو استفاده می شود تعداد این متغیرها را کاهش داد. با توجه به کاربرد هدف بازو که آندوسکوپ است، کوچک بودن ماژول در اولویت است. بنابراین بازه قطر بزرگ (D) از 10 میلی متر تا 15 میلی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نیروی تولیدی فنر که باید کمتر از نیروی تولیدی آلیاژ حافظه دار باشد، قطر مفتول (d) به میزان 1، 1/3، 1/5 و 2 میلی متر لحاظ شده است. جنس فنر نیز از جنس رایج در فنرها که سیم موسیقی است، انتخاب می شود که خواص آن در جدول 2 مشاهده می شود. تعداد حلقه ها از 7 تا 12 میلی متر در نظر گرفته می شود. شرایط بهینه زمانی حاصل می شود که بیشترین مقدار ϕ بدست آید.



شکل 12 نمودار شبیه سازی ϕ بر حسب دما



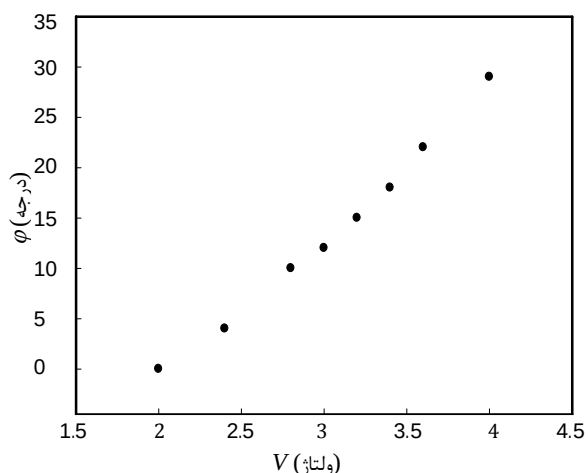
شکل 13 نمودار تغییر زاویه بر حسب ولتاژ در شبیه سازی و آزمایش تجربی

جدول 2 بعضی خواص سیم موسیقی			
جنس	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	مدول برشی (گیگا پاسکال)	شماره استاندارد
سیم موسیقی	207	79/3	ASTM A228

جهت ایجاد کرد، مدنظر قرار گرفت. اما به دلیل محدودیت های 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 صحت گذاری نتایج شبیه سازی مدل، شبیه سازی ها تنها با یک سیم بررسی شده است.

5- نتایج و بحث

همان طور که در شکل 12 مشاهده می شود، تا زمانی که سیم آلیاژ حافظه دار به نقطه شروع آستنیتی برسد فنر تغییر زاویه نمی دهد (مسیر 1). با رسیدن به نقطه شروع آستنیتی فنر شروع به تغییر زاویه می کند 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 حافظه دار بیشتر از نقطه پایان آستنیتی گرم شود، به دلیل آنکه کسر مارتنزیتی غیردوقلویی صفر می شود، سیم کرنش ندارد و در نتیجه تغییر زاویه هم وجود ندارد که در انتهای مسیر 2 این مساله دیده می شود. 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 می شود در شبیه سازی این اتفاق نمی افتد و زاویه بین 20 تا 25 درجه می ماند. برای توجیه این موضوع می توان گفت که سیم آلیاژ حافظه دار وقتی برای بار اول تحریک شده و سپس از تحریک رها شود، فنر به سیم نیرویی برای بازگشت اعمال می کند. ولی علت این اختلاف در آن است که در مدل برینسون در زیر دمای تکمیل استحاله مارتنزیتی در چرخه سرمایش، در ناحیه 1 و 2 از نمودار فازی تغییر فاز به درستی پیش بینی نشده و لذا تغییری در تنش ایجاد نمی شود. به همین دلیل در نتایج شبیه سازی مقدار زاویه پس از سرمایش برابر با صفر نمی شود. البته صیادی و ذاکر زاده [23] تلاش کردند تا این ایراد را برطرف کنند. مسیر 1 تا 4 در تحریک های بعدی با کمی اختلاف تکرار می شوند و هیستریزس رفتار سیم آلیاژ حافظه دار را ایجاد می کنند. نمودار ولتاژ بر حسب تغییر زاویه، در آزمایش تجربی و شبیه سازی در شکل 13 مشاهده می شود 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 آزمایش های تجربی این مقاله نیز بدین روش عمل شده است.

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

6- نتیجه گیری

در این مقاله یک ماژول انعطاف پذیر با به کارگیری محرک های آلیاژهای حافظه دار 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 حافظه دار، 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 آزمایش ها و شبیه سازی ها روی این محدوده ی 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 شبیه سازی و آزمایش تجربی می توان از آن در کاربرد به عنوان ماژول بازوی انعطاف پذیری مانند آندوسکوپ استفاده کرد. همین طور چون این ماژول از فنر ساخته شده است، علاوه بر داشتن وزن سبک و اندازه کوچک، یک بازوی منعطف را تشکیل می دهد و می توان 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 به عنوان 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 مزیت های دیگر آن است به طوریکه در مقایسه با کارهای قبلی هزینه ها و پیچیدگی های ساخت بسیار کمتر است.

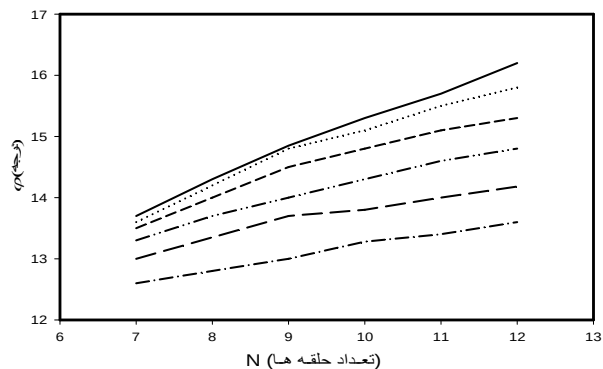
نکته حائز اهمیت دیگری که در کاربردی تر شدن ماژول مؤثر است، حداقل شعاع انحنای آن است. با توجه به نتایج استخراج شده در مقاله می توان با افزایش قطر سیم و نزدیک کردن آن به محور فنر تغییر زاویه بیشتری در ماژول ایجاد کرده و در ساختار ماژولار بازو از این نوع ماژول در مواردی که نیاز به شعاع انحنای کمی است، بهره 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 حافظه دار ارائه شد، ولی با قرار دادن یک سیم آلیاژ حافظه دار دیگر به صورت متقارن در طرف دیگر فنر، بازه کاری بین $+21^\circ$ تا -21° درجه گسترده می شود. همچنین با داشتن سه سیم در موقعیت 120° درجه نسبت به هم در اطراف فنر و تحریک آنها به صورت جداگانه و یا گروهی، امکان چرخش سر فنر بصورت فضایی فراهم می شود. 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 می یابد و طول مجموعه حدوداً 22 سانتی متر می شود که در مقایسه با کارهای قبلی از شرایط مناسبی برخوردار است.

انصاری [24] پارامترهای مختلف یک آلیاژ حافظه دار را بررسی کرد که از همین اطلاعات در این مقاله استفاده شده و نتایج در جدول 3 مشاهده می شود. پس از به کارگیری پارامترهای جدول 3 در شبیه سازی میزان چرخش سر فنر (ϕ) برای ورودی های در نظر گرفته شده بدست آمده که نتایج در شکل های 14 تا 18 مشاهده می شود. لازم به تذکر است که می توان آزمایش ها را با پارامترهای بیشتری انجام داد ولی اگر قطر فنر از 10 میلی متر کمتر باشد امکان ورود تجهیزات از بین فنر بسیار محدود شده و اگر قطر آن بیشتر از 15 میلی متر باشد امکان ورود فنر به داخل بدن نخواهد بود. لیکن از بستر شبیه سازی و نتایج ارائه شده در این مقاله می توان 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 می کند و این امکان به سیم آلیاژ حافظه دار داده نخواهد شد که بتواند فنر را خم کند. کوچک بودن آن هم نیروی فنر را کاهش می دهد و سیم آلیاژ حافظه دار پس از آزاد شدن از حالت تحریک در آستنیت نمی تواند به حالت مارتنزیت غیردوقلویی برگردد. انصاری [24] نشان داد که آلیاژ حافظه دار مورد استفاده در این مقاله، حداکثر 200 مگاپاسکال تنش و یا $6/28$ نیوتن، نیرو ایجاد می کند. بنابراین این نیرو باید بیشتر از نیروی تولیدی فنر باشد. اگر قطر مفتول بیشتر از 2 میلی متر و قطر خارجی فنر کمتر از 10 میلی متر باشد، با توجه به خواص فنر نیروی تولیدی فنر بیشتر از $6/5$ نیوتن می شود و امکان خم شدن آن فراهم نخواهد بود.

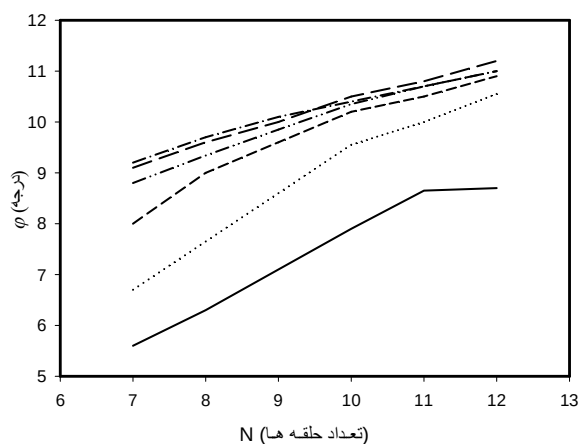
اما در شکل 14 تا 16 مشاهده می شود که به طور کلی با افزایش قطر خارجی مقدار ϕ کم می شود ولی در شکل 17 مشاهده می شود که رابطه ای عکس برقرار است. در واقع طبق رابطه 10 با افزایش D ، سختی فنر کم می شود. لذا نیروی مورد نیاز در آلیاژ حافظه دار برای خم کردن فنر کمتر می شود. لیکن بدلیل کرنش محدود سیم افزایش قطر 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 صلب تری به خود می گیرد و انعطاف پذیری آن کاهش می یابد. همچنین شکستگی ای که در شکل 17 با $D=10\text{mm}$ مشاهده می شود به صلب شدن فنر بر می خورد که با افزایش N ، فنر به قدری صلب شده است که نیروی سیم امکان غلبه بر سختی فنر را ندارد. به طور کلی بی نظمی با صلب تر شدن فنر بیشتر می شود، لذا این در اشکال 16 و 17 برجسته تر ملاحظه می شود. در شکل 18 ارتباط d با پارامترهای دیگر بیان شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش d ، ϕ کم می شود که این بدلیل افزایش سختی فنر است. همچنین مطابق همین شکل و به همین دلیل با افزایش N ، باز هم ϕ زیاد می شود.

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

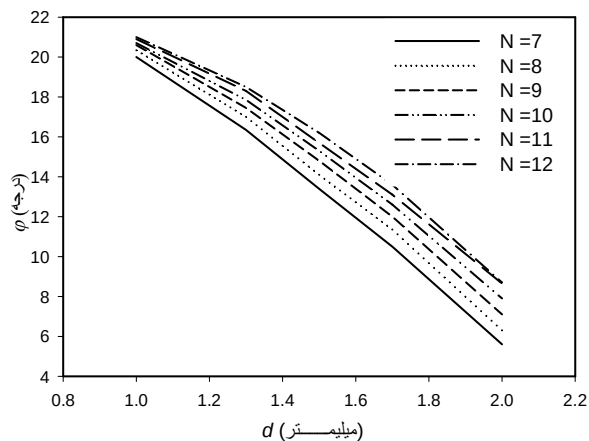
در عمل استفاده از ایجاد تغییر طول برای رسیدن به شرایط اولیه مدنظر برای کسر مارتنزیتی غیردوقلویی مشکل است. به جای این روش می توان آلیاژ را کاملاً در فاز مارتنزیت غیردوقلویی قرار داد و سپس با اعمال نیروی



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 $d=2\text{mm}$



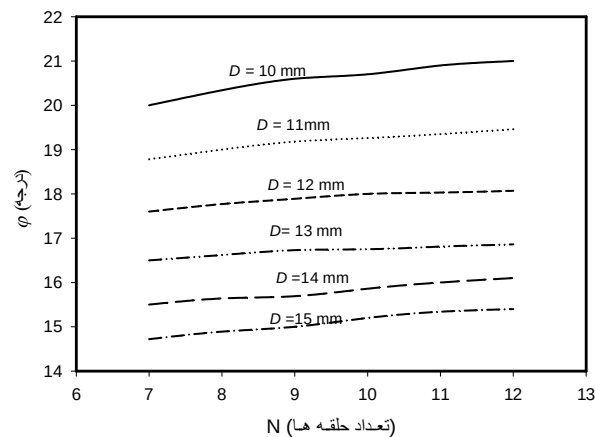
شکل 18 نمودار چرخش سر فنر بر حسب قطر مفتول d و تعداد حلقه ها N و با قطر فنر $D=10\text{mm}$

7- فهرست علائم

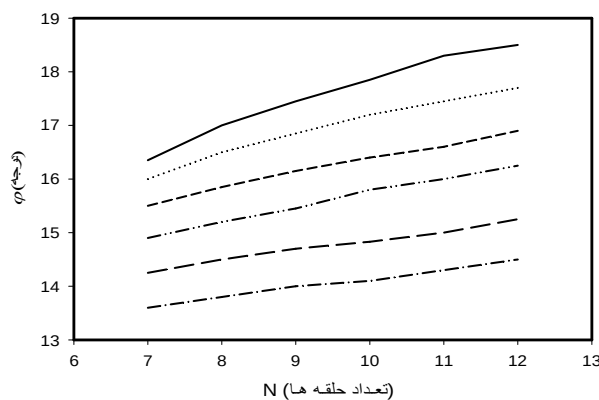
دمای شروع آستنیتی	A_s
دمای پایان آستنیتی	A_f
مدول ینگ در فاز آستنیت	E_A

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 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. LExcellent, 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 ینگ در فاز مارتنزیت	E_M
دمای پایان مارتنزیتی	M_f
دمای شروع مارتنزیتی	M_s
کسر مارتنزیتی غیر دوقلویی	ξ
کسر مارتنزیتی دوقلویی	ξ^*
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.