ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحي و مدلسازي ديناميكي يك ماژول متشكل از فنر فشاري تحريك شده با سيم آلياژ حافظهدار

محمد مراد شيخي¹، علير ضيا هادي²، مهدي قاسمي³

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار گروه مکاترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستى hrhadi@ut.ac.ir ،14395-1561

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در سالهای اخیر مطالعات زیادی در زمینه طراحی و ساخت بازوهای مکانیکی در مقیاس کوچک انجام گرفته است. این بازوها کاربردهای زیادی در صنعت و بهخصوص 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	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 29 فروردین 1393 پذیرش: 17 اردیبهشت 1393 ارائه در سایت: 19 مهر 1393
در مقایسه با نمونههای قدیمی فراهم شود. در این مقاله توسعه یک ماژول پایهای انعطاف پذیر برای استفاده در این ساختار مدنظر قرار گرفته است. با اتصال سه سیم آلیاژ حافظهدار 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 حافظهدار فراهم میشود. در این مقاله مدلی برای تغییر شکل فنر توسعه یافته که با مدل برینسون برای رفتار سیم آلیاژ حافظهدار ترکیب و برای بیان رفتار ماژول استفاده شده است. مدلسازی دینامیکی و شبیهسازی در محیط سیمولینک نرمافزار متاب پیادهسازی و عملکرد ماژول و ابعاد بهینه آن برای کاربرد مورد نظر پیشنهاد شده است. با استفاده از نتایج شبیهسازی و تجربی،	کلید <i>واژگان:</i> فنر فشاری سیم آلیاژ حافظهدار مدل سازی دینامیکی

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 ABSTRACT In recent years many investigations have been performed on design and fabrication of micro Original Research Paper Received 18 April 2014 Accepted 07 May 2014 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 Available Online 11 October 2014 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 Keywords: module is developed for use in this structure. Connecting three wires of shape memory alloy Compressive Spring Shape Memory Alloy Wire Dynamic Modeling 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.

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 بافتهای بدن جلوگیری شود باید مورد توجه قرار بگیرد [1]. در این راستا تکنولوژی

مقدمه -1

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

Please cite this article using:

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)

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 می گرفت [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 بی صدا و یکنواخت در ساخت عملگرها به خصوص 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 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 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 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 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 حافظهدا, با شکل خاص و یک کویل 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 مستقلانه سازههای سری شده کنترل می شد [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 می شود. در این طرح هر ماژول 6 درجه آزادی دارد و با ترکیب این ماژول ها 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 أن را در تمام جهات تضمين كنند [1]. همچنين از الگوريتم كنترل نيرو

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 دادهاند [10]. در روش اول یک عملگر ماژولار ساخته شده که شامل چند مهره است و مهرهها نسبت به هم 90 درجه می چرخند. 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 پلتیه³ استفاده می شود [11]. در اینجا دو نوار حافظهدار 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 پلتیه فقط یک نوار تحریک شده و در نتیجه خم می شود و نوار دیگر تغییر شکل پيدا مىكند. با معكوس كردن جريان عكس اين حالت رخ مىدهد. وينسنت 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 آندوسكوپ بود. مكانيزم هدايت نوک آندوسكوپ شامل 3 تا فنر آلياژ 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، تحريک مي شد [15].

در این مقاله یک ماژول فنری و انعطاف پذیر که با استفاده از سیمهای آلیاژ حافظهدار تحریک می شود، 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 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 حافظهدار از قبیل رفتار غیر خطی، هیسترزیس 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 حافظهدار را ایفا میکند و هم انعطافپذیری کافی برای این ماژول ایجاد میکند. درضمن به دلیل تو خالی بودن فنر، تجهیزات پزشکی مثل انبر یا

¹⁻ Microcatheter

²⁻ Shape Memory Alloys

³⁻ Peltier Effect 4- Bias

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14

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 می گیرد. 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 کوپل شده است. در بخش سوم مدل در محیط سیمولینک متلب شبیهسازی شده است. در بخش چهارم آزمایشهای تجربی مربوط به صحه گذاری نتایج شبیهسازی ارائه شده است. در بخش پنجم نتایج مورد بحث قرار گرفته و در بخش ششم نتیجه گیری مقاله ارائه شده است.

2- مدلسازى ماژول

ماژول در نظر گرفته شده در این مقاله از یک فنر انعطاف پذیر 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. همان طور که در شکل 2 ملاحظه می شود، وقتی که سیم آلیاژ حافظهدار تحریک می شود، فنر انحنا پیدا می کند. 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 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 کویل 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 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 می توان 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 کویلهای فنر

2-1-1- تغيير زاويه 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 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.

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

گشتاور اعمالی توسط نیروی خارج از مرکز از رابطه (2) بدست میآید: $M = \frac{FD}{2}$ (2)

میزان گشتاور پیچشی در هر موقعیت کویل فنر از رابطه (3) بدست میآید: (3) (۲(ه) میزان گشتاور (۲) میزان گشتاور (۲) میزان گشتاور (۲)

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

 $\lambda dx = r d\phi, \quad \lambda = \frac{\tau}{c}, \ R d\alpha = dx, \ \tau = T(\alpha) r I j$ (4) c, is the initial of the initi

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

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

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

از روابط هندسی و مقاومت مصالح رابطه (7) نیز می وان بهره گرفت:
$$\frac{1}{2} = \frac{M}{EI}$$
, $d\gamma = \frac{M}{EI} dx$, $ho d\gamma = dx$, $Rd\alpha = dx$ (7)

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

$$\int M(\alpha) \, \mathrm{d}\gamma = \int FD \cos\alpha \, \frac{\mathrm{d}\gamma}{2} \stackrel{(Y)}{\longrightarrow} = \int_{0}^{2\pi \mathrm{N}} \cos 2\alpha \frac{F^2 D^3}{8EI}$$
$$= \frac{\pi \mathrm{N}F^2 D^3}{8EI} \tag{8}$$

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

$$\varphi = \frac{\mathsf{N}FD^2\pi}{4} \left(\frac{1}{EI} + \frac{1}{GJ} \right)$$
(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 I گشتاورهای سطح هستند.

2-1-2- تغيير طول محورى فنر

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

$$\delta = \frac{8fND^3}{Gd^4} \tag{10}$$

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





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

2-2- مدل آلياژ 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.

¹-2-2 مدل ساختاری

رفتار آلیاژ حافظهدار از سه متغییر 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 می گیرد. اما معادلات یک بعدی که به طور مؤثر در فرم رایج سیم آلیاژ حافظهدار اقابل استفاده هستند، به دلیل سادگی بیشتر و نتایج قابل استفاده قرار می گیرد. اما معادلات یک بعدی که به طور مؤثر در فرم رایج سیم آلیاژ حافظهدار قابل استفاده هستند، به دلیل سادگی بیشتر و نتایج قابل استفاده می شوند. مدل تاناکا به عنوان 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 کسر مارتنزیتی را بهعنوان متغیر در نظر گرفت و تنش را به صورت تابعی از تفاوت که آنها تابعی کسینوسی را به جای تابع نمایی برای محاسبه کسر مارتنزیتی در نظر گرفتند. [10]. اما آنها کسر مارتنزیتی غیردوقلویی² (_یگ) را مارتنزیتی در نظر گرفتند. برینسون با

(6)

¹⁻ Constitutive Model 2- Detwinned Martensite

استفاده از کارهای تاناکا و لیانگ یک مدل ارائه داد **[19]** که کسر مارتنزیتی¹ (ξ) را به دو قسمت کسر مارتنزیتی دوقلویی²(ξ₁) و کسر مارتنزیتی غیر دوقلویی تقسیم کرد. اما در شرایط مختلف بار گذاری ترمودینامیکی با توجه به پیچیدگیهای مسیر این مدل نارساییهایی 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 بهصورت رابطه (11) بههم مرتبط میشوند.

$$\sigma - \sigma_{0} = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_{0}) + \Omega(\xi - \xi_{s0}) + \theta_{T}(T - T_{0})$$

$$E(\xi) = E_{A} + \xi (E_{M} - E_{A})$$

$$\Omega = -\varepsilon_{L}E(\xi)$$
(11)

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

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

در این معادلات σ تنش، ξ کسر مارتنزیتی، E_A مدول الاستیسیته در فاز آستنیت، Ε۸ مدول الاستیسیته در فاز مارتنزیت، Ω ضریب انتقال فاز، ٤ ماکزیمم کرنش قابل بازیافت و heta heta ضریب پخش گرمایی هستند.

شکل 7 تقسیم بندی مناطق مختلف تغییر فاز برحسب دما و تنش بحرانی برای محاسبه میزان کسر مارتنزیت طبق مدل برینسون را نشان میدهد. در منطقه یک، آلیاژ حافظهدار کاملاً دوقلویی است. وقتی که آلیاژ حافظهدار مورد تنش قرار می گیرد و سطح تنش از تنش شروع غیر دوقلویی (so) بالاتر می رود مارتنزیت غیر دوقلویی شروع به تشکیل می کند که با رسيدن به تنش پايان غير دوقلويي (σ) تمام مارتنزيت غيردوقلويي ميشود.

2-2-2- معادلات سينيتيک انتقال فاز

وقتی تنش صفر است، انتقال فاز در دماهای شروع و پایان آستنیتی و شروع و پایان مارتنزیتی رخ میدهد. این دماها به ترتیب با As و Ms و Ms و Mi 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 معکوس^o (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:

 $F_A = \xi_i f_A(Z_A)$ (13) $F_{M} = \xi_{i} + (1 - \xi_{i})f_{M}(Z_{M})$ (14)

j , is a state of the set of t نشاندهنده نقطه تغییر مسیر⁶در مناطق است و f_A و f_M توابع انتقال با مقادیری بین 0 و 1 بهترتیب 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 حافظهدار می شود، تغییرات دما و تنش است. گرم شدن سیم آلیاژ حافظهدار ممکن است به هر طریقی انجام شود. ولی در کاربردهای مهندسی معمولاً از طریق گرمایش مقاومتی اقدام به گرم کردن



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

$$mc_p \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = RI^2 - h_c A_c (T - T_\infty)$$
(15)

R در اینجا m جرم بر واحد طول، c_p ضریب گرمای ویژه، I جریان، mمقاومت الكتريكي، hc ضريب انتقال حرارت پخش و Ac سطح مقطع سيم است.

2-3- مدل ديناميكي كوپل فنر و آلياژ حافظهدار

برای بیان و درک بهتر معادله دینامیکی حاکم بر ماژول، یک ورقه⁸ نازک روی فنر درنظر 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. همانطور که در شکل 8 ملاحظه می شود، سیمهای آلیاژ حافظهدار روی ورقه گشتاور اعمال میکنند که بهصورت رابطه (16) میتوان آن را محاسبه کرد:

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

بردار r در اینجا بیان کننده موقعیت سیمها 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 حافظهدار و برای سادهسازی مسأله زاویه heta در هر لحظه عمود بر بردار برآیند گشتاورها یا همان Msma در نظر hetaگرفته شده است. لذا قانون دوم نيوتن طبق معادله ديناميكي (17) بيان می شود:

$M_{SMA} - M_b = I\ddot{\varphi}$

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

$$MSMA - \frac{2}{\left(\frac{1}{EI} + \frac{1}{Gj}\right)ND\pi} \varphi - c \dot{\varphi} = I \ddot{\varphi}$$
(18)

در این معادله c در اینجا نرخ دمپینگ است. این رابطه دینامیکی در شبيهسازي ماژول استفاده مي شود.

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.11.6

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-03

(16)

(17)

8- Plate

^{1.} Martensitic Volume 2- Twinned Martensite

³⁻ Phase Transformation Kinetic

⁴⁻ Forward Transformation

⁵⁻ Reverse Transformation

⁶⁻ Switching Point 7- Heat Transfer

۳- شبیهسازی

شبیهسازی در محیط سیمولینک نرمافزار متالب 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 مىكند. در مدل آلياژ حافظهدار ورودىها ولتاژ و تغيير طول يا كرنش سيم 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 می شود. گشتاور مقاوم فنر نیز با توجه به موقعیت سینماتیکی لحظهای 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 مىتوان تغيير طول لحظهاى آلياژ حافظهدار را استخراج و بهعنوان ورودی در مدل ساختاری آلیاژ حافظهدار 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 لحظهای محاسبه کرد. باید توجه کرد که برای محاسبه میزان تغییر شکل سیمهای آلیاژ حافظهدار در حین تحریک، باید تغییر شکل محوری فنر(ه) را نيز لحاظ كرد.

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

$$L_{\rm f} = L - \delta$$

$$\rho *= \frac{L_{\rm f}}{\varphi}$$

$$L_{\rm i} = (\rho^* - r \cos \theta_{\rm i}) \times \varphi$$

(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، ho* 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 آلیاژ 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 دو 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 پرخش سر فنر (ϕ) میتوان 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 LAISAI با دقت یک درجه استفاده شده است. برای اعمال ولتاژ به دو سر سیم آلیاژ حافظه دار از یک منبع تغذیه که ولتاژ و جریان مورد نیاز را فراهم می کند استفاده شده است. باید توجه کرد طبق

1- MATLAB

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]



شکل ۹ نحوه اتصال مدلهای مورد استفاده در طراحی ماژول

در آزمایش تحرین	مورد استفاده	مشخصات فن	حدول
- ('(<u></u>	. 0,

تعداد حلقه	قطر مفتول	قطر خارجي	جنس
19	۰/۹ میلیمتر	۱۰ میلیمتر	Ck60



شکل ۱۰ ماژول قبل و پس از تحریک

جهات ایجاد کرد، مدنظر قرار گرفت. اما به دلیل محدودیتهای آزمایش تجربی، این مسأله 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 صحه گذاری نتایج شبیهسازی مدل، شبیهسازیها تنها با یک سیم بررسی شده است.

5- نتايج وبحث

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 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 حافظهدار 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 مسأله 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 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 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 پیشبینی نشده و لذا تغییری در تنش ایجاد نمی شود. به همین دلیل در نتایج شبیه سازی 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 تكرار مى شوند و هيسترزيس رفتار سيم آلياژ حافظهدار را ايجاد می کنند. نمودار ولتاژ برحسب تغییر زاویه، در آزمایش تجربی و شبیهسازی 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



خواص آن بحث کرد و شرایط بهینه را بدست آورد. بنابراین متغیرهای تأثیرگذار در مساله مانند جنس فنر، قطرخارجی فنر، قطر مفتول فنر و تعداد حلقههای 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 آندوسکوپی است، کوچک بودن ماژول در اولویت است. بنابراین بازه قطر بزرگ (D) از 10 میلی متر تا 15 میلی متر در نظر گرفته شده حافظهدار باشد، قطر مفتول (b) به میزان 1، 13/1 و 2 میلی متر لحاظ شده است. جنس فنر نیز از جنس رایچ در فنرها که سیم موسیقی است، انتخاب می شود که خواص آن در جدول 2 مشاهده می شود. تعداد حلقهها از که بیشترین مقدار φ بدست آید.



شماره استاندارد	مدول برشی (گیگاپاسکال)	مدول الاستيسيته (گيگا پاسكال)	جنس
ASTM A228	79/3	207	سيم موسيقي

23

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 می شود. پس از به کارگیری پارامترهای جدول 3 در شبیه سازی میزان چرخش سر فنر ($_{\varphi}$) برای ورودی های در نظر گرفته شده بدست آمده که نتایج در شکلهای 14 تا 18 مشاهده می شود. لازم به تذکر است که می توان 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 آستنیت نمی تواند 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 می کند. 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 می شود 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 رابطهای عکس برقرار است. در واقع طبق رابطه 10 با افزایش 0، 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 B و کاهش 0، ماژول حالت صلبتری به خود می گیرد و انعطافپذیری آن کاهش میابد. همچنین شکستگیای که در شکل 17 با فنر به قدری صلب شده است که نیروی سیم امکان غلبه بر سختی فنر را اشکال 16 و 17 برجستهتر مالحظه میشود. در شکل 18 این در پارامترهای دیگر بیان شده است. همان طور که مشاهده میشود با افزایش B, شکل و به همین دلیل با افزایش سختی فنر را مشاهده میشود با افزایش D، اشکال میشود میشود با افزایش D،

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 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 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

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- نتيجه گيرى

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=10mm و d=1mm و N=12 بود، بیشترین بازه کاری و تغییر زاویه P=21° 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 آندوسکوپی 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 امپدانس آن در تعامل با محیط را تحت کنترل قرار داد. ضمن این که بهدلیل 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 به طوریکه در مقایسه با کارهای قبلی هزینه ها و پیچیدگی های ساخت بسيار كمتر 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.

جدول 3 مشخصات سیم آلیاژ حافظهدار مورد استفاده			
واحد	مقدار	تعريف	
-	0/055	ماکزیمم کرنش برشی	
MPa/°C	0/55	فاكتور پخش گرمايي آلياژ حافظهدار	
°C	20	دمای محیط	
Ω	45	مقاومت آلياژ حافظهدار در آستنيت	
Ω	45	مقاومت آلیاژ حافظهدار در مارتنزیت	
J/m ² ×°C×sec	150	ضریب پخش گرمایی	
m ²	0/000000314	مساحت سطح مقطع سيم	
°C	71	دمای شروع آستنیتی	
°C	76/2	دمای پایان آستنیتی	
°C	47/6	دمای شروع مارتنزیتی	
°C	33/6	دماي پايان مارتنزيتي	
mm	72	طول اوليه آلياژ حافظهدار	
GPa	31/5	مدول یانگ در آستنیت	
GPa	20	مدول یانگ در مارتنزیت	
1/°C	6/73	ضریب استحاله در آستنیت	
1/°C	6/32	ضریب استحاله در مارتنزیت	



شکل14 نمودار چرخش سر فنر برحسب قطرهای مختلف فنر و تعداد کویل به ازای *d*=1mm



d=1.3mm











شکل 18 نمودار چرخش سر فنر بر حسب قطر مفتول *d* و تعداد حلقهها N و با قطر فنر *D*=10mm

7- فهرست علايم

دمای شروع استنیتی	A_s
دمای پایان آستنیتی	A_f

E_A مدول یانگ در فاز آستنیت

- [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 microactuator 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. Menciassi, 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: Onedimensional 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. Behravesh, Experimental studies of training stress effect on NiTi SMA performance in higher and lower stress than training stress, Modares Mechanical Engineeering, Vol. 13, No. 10, pp. 14-24, 2013. (In Persian)

- در فاز مارتنزیت *E*M
- مای پایان مارتنزیتی *M*f
 - دمای شروع مارتنزیتی Ms
- ςξ کسر مارتنزیتی غیر دوقلویی
- كسر مارتنزيتي دوقلويي
 - Ω ضریب انتقال فاز
- εL ماکزیمم کرنش قابل بازیافت
 - θ ضريب پخش گرمايي

8- مراجع

tξ

- 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. Mitsoui, 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. Lanteigne, 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.