



طراحی مفهومی و مدل سازی یک مکانیزم رباطیکی تطبیق پذیر با محرک آلیاژ حافظه دار به منظور بازرسی لوله ها و مجاری باریک

علیرضا هادی^{1*}، آزاده حسنی²، خلیل عالی پور¹، جواد کوهسورکی¹

1- استادیار، مهندسی مکترونیک، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 143951561، hrhadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 آبان 1395
پذیرش: 02 دی 1395
ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:
ربات متحرک
تطبیق پذیری
آلیاژ حافظه دار
مجاری باریک
کنترل

چکیده

در این مقاله طراحی و تحلیل یک مکانیزم رباطیکی برای عبور از لوله های باریک به منظور بازدید از داخل لوله ها و یا انجام عملیات خاص مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از مکانیزمی که بتواند در طول لوله های با اقطار متفاوت آزادانه حرکت کرده و تطبیق پذیری مناسبی هنگام عبور از مسیرهای پیچیده و دارای خم لوله را داشته باشد، حائز اهمیت می باشد. لذا با به کارگیری یک مکانیزم ساده بر پایه استفاده از محرک آلیاژ حافظه دار، یک میکرو ربات جهت بازرسی از مجاری باریک طراحی گردیده که ضمن انعطاف پذیری خوب، تطبیق پذیری مناسبی در هنگام عبور از مسیرهای پیچیده را دارد. در این پژوهش سینماتیک و دینامیک ربات مورد تحلیل قرار گرفته و معادلات دینامیکی حرکت استخراج و در ادامه حل گردیده است. عملکرد ربات در محیط شبیه سازی توسط نرم افزارهای آدامز و متلب صحت گذاری گردیده است. در نهایت با استفاده از یک کنترلر مناسب مقدار نیروی رانشی مناسب به همراه نیروی عمودی بین چرخ های ربات و دیواره لوله کنترل شده است. نتایج شبیه سازی، موفقیت کارائی مکانیزم رباطیکی ارائه شده در بازرسی لوله های واقعی دارای تغییر قطر در حالت افقی، عمودی و یا شیبدار را نشان می دهد.

Conceptual design and modeling of an adaptable robotic mechanism actuated by shape memory alloy for inspection of low diameter pipes

Alireza Hadi*, Azadeh Hassani, Khalil Alipour, Javad Koohsorkhi

Department of Mechatronics Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 143951561, Tehran, Iran, hrhadi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 November 2016
Accepted 22 December 2016
Available Online 18 January 2017

Keywords:

Mobile Robot
Adaptability
Shape memory alloy (SMA)
Low diameter pipe
Control

ABSTRACT

In this study, design and analysis of a robotic mechanism, able to traverse low diameter pipes for inspection, maintenance or doing special tasks, has been addressed. Using a mechanism able to move properly along pipes with different diameters while having appropriate adaptability when passing complex routes or bends is extremely important. So, in this study, considering a simple mechanism based on utilizing shape memory alloy actuator, a micro-robot is designed for inspection of narrow pipes or channels. The robot has suitable flexibility in addition to appropriate adaptability for passing complex routes. The robot kinematics and dynamics are analyzed and dynamic equations of the robot are extracted and solved. The robot functionality in the simulation is verified through Adams and Matlab software. Finally, using a suitable controller the amount of robot traction force in addition to normal force between robot wheels and the inner surface of pipe has been measured and controlled. The simulation results predict the appropriate functionality and success of the robot in the inspection of pipes with varying diameter in horizontal, vertical or any other inclination state.

1- مقدمه

برش موضعی در لوله های با قطر بزرگ است که البته روشی پر هزینه می باشد. از طرفی با توجه به اینکه با بازدید از یک مقطع نمی توان عیوب موجود را به تمام لوله تعمیم داد این روش، رویکرد کارآمدی به حساب نخواهد آمد. در صنایع مختلف از روش های متفاوتی مانند پیگ رانی، استفاده از روش هایی مثل تست های غیرمخرب و غیره جهت بازرسی خطوط لوله استفاده می شود ولی با توجه به فرآیند زمان بر و گران بودن این روش ها لزوم استفاده از رباتی که بتواند با سرعت و دقت بیشتری کار بازرسی لوله ها را انجام دهد اهمیت پیدا می کند [1,2]. با توجه به گستردگی کاربرد خطوط لوله در صنایع

یکی از نیازهای مهم در فرآیند تعمیر و نگهداری خطوط لوله بازدید از داخل لوله ها می باشد. با توجه به موارد مختلف استفاده از لوله ها در صنعت و مشکلات ایجاد شده در زمان بهره برداری نظیر ترک برداشتن دیواره، اکسید شدن دیواره لوله و مسدود شدن مسیر جریان در داخل لوله، لزوم بازرسی این مجاری همواره مورد توجه و حائز اهمیت بوده است. جهت بررسی مشکلات اشاره شده در لوله ها از روش های مختلفی استفاده می شود که ساده ترین آن - با بازدید از داخل لوله از طریق برش مقطعی در لوله های با قطر کوچک و

Please cite this article using:

A. Hadi, A. Hassani, Kh. Alipour, J. Koohsorkhi, Conceptual design and modeling of an adaptable robotic mechanism actuated by shape memory alloy for inspection of low diameter pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 394-402, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

یک محرک مغناطیسی با نیروی محوری بسیار بالا که قابلیت حرکت رفت و برگشتی در یک لوله پیچیده را داشت، طراحی کردند.

در مورد استفاده از این ربات ها می توان به این نکته اشاره کرد که با توجه به مشکلاتی که در صنایع مختلف وجود دارد و با توجه به محیط های مختلف و عیوب گوناگونی که وجود دارند امکان ساخت یک ربات که قابلیت استفاده در تمامی موارد و موقعیت ها را داشته باشد، وجود ندارد. به همین دلیل به ناچار باید از مکانیزم های مختلفی با توجه به کاربری مورد نظر استفاده نمود که این کار مستلزم استفاده از روش های مختلف طراحی و ساخت و مواد مختلف بوده که به نوبه خود دارای هزینه می باشد. در کارهای گذشته ابتدا ربات های چرخ دار بدون مکانیزم تطبیق برای این منظور مورد استفاده قرار می گرفته است که در سطوح شیب دار و لوله های دارای رسوبات و همچنین در لوله های با اقطار مختلف دچار مشکل در عملکرد می شدند. برای رفع این مشکلات برای ربات های چرخ دار، مکانیزم تطبیق و اعمال نیرو به دیواره طراحی شده است. ولی افزودن مکانیزم تطبیق به ربات سبب پیچیده شدن آن شده است. یک ایده برای ساده سازی و کوچک سازی مکانیزم تطبیق، روش های الهام از طبیعت می باشد که ربات های کرم مانند یکی از انواع آن می باشند. مشکل این ربات ها کند بودن ذاتی آن هاست که باعث می شود در صنعت کاربرد نداشته باشند. در نتیجه نیاز به رباتی وجود دارد که دارای مکانیزم تطبیق بوده و در عین کوچکی سریع هم باشد. جهت نیل به این هدف در این مقاله رباتی ارائه می شود که چرخ دار بوده و از یک مکانیزم تطبیق با به کارگیری آلیاژ حافظه دار بهره می برد.

در اکثر کارهای گذشته، ربات های طراحی شده برای لوله های با قطر مشخص طراحی شده اند که با توجه به تنوع لوله های استفاده شده در صنعت از انعطاف پذیری کمی برخوردار هستند. ضمناً بسیاری از مکانیزم های ارائه شده برای به کارگیری در اقطار متنوع تر دارای ساختار پیچیده ای بوده که فرایند ساخت و کنترل آن ها را دشوار می کند. بخصوص برای بازرسی مجاری باریک تدبیر مؤثری ارائه نشده است. در این مقاله سعی گردیده تا مکانیزمی با ساختار ساده و بر اساس استفاده از محرک آلیاژ حافظه دار جهت بازرسی از مجاری باریک طراحی گردد. ضمناً تلاش گردیده تا مکانیزم پیشنهادی، ضمن بهره مندی از یک سیستم کنترل ساده، تطبیق پذیری قابل قبولی برای حرکت در مسیرهای پیچیده شامل لوله های با قطرهای متفاوت را دارا باشد.

در ادامه در بخش 2 طراحی مفهومی ربات ارائه می گردد. در بخش 3 ربات مدل سازی و معادلات حاکم بر حرکت ربات استخراج می گردد. در بخش 4 معادلات مستخرج با استفاده از مدل ربات در محیط نرم افزارهای ادمز و متلب شبیه سازی شده و کنترلر مناسب برای آن طراحی می گردد. در بخش 5 نتیجه گیری و جمع بندی مقاله ارائه می گردد.

2- طراحی مفهومی ربات

هدف طراحی در این مقاله، ارائه رباتی چرخ دار می باشد که برخلاف ربات های چرخ دار معمول، نیروی عمودی بین چرخ های آن و دیواره لوله قابل تنظیم باشد. دلیل ایجاد این ویژگی آنست که هنگام حرکت در لوله های شیب دار و یا در رسوبات، علیرغم چرخش چرخ ها، ربات متوقف نشود. از طرفی اضافه شدن این قابلیت نباید حجم ربات را به صورت محسوس افزایش دهد.

مکانیزم مورد نظر مطابق شکل 1 طراحی مفهومی و مدل سازی شده است. لازم به ذکر است که ربات طراحی شده قابلیت حرکت در لوله های افقی و عمودی را دارا می باشد.

گوناگون و معضل بازرسی این خطوط در صنعت، حجم گسترده ای از تحقیقات صورت گرفته بر روی ربات های بازرسی لوله متمرکز شده است. تحقیقات بسیاری از گذشته تا کنون در مورد استفاده از ربات های با مکانیزم های متفاوت جهت انجام عمل بازرسی در لوله ها صورت گرفته است که هر کدام از آن ها با توجه به شرایط خاص بهره برداری از ربات و با ویژگی های کنترلی متفاوت ساخته شده اند. روه و همکاران مکانیزم های مختلف ربات های بازرسی را مورد بحث و بررسی قرار داده اند [3]. اخیراً نیز توسط اسماعیل و همکارانش مکانیزم هایی به صورت ترکیبی از چرخ و فنر طراحی شده است [4]. میرانس و همکارانش مروری بر طرح های رباتیکی به منظور بازرسی لوله ها انجام دادند و با بررسی مشکلات موجود، طرح های مختلفی جهت افزایش قابلیت و کارایی ربات های جستجوگر لوله را توسعه دادند. [5]. تحقیقاتی نیز بر روی طراحی ربات و اجزاء آن با هدف ساخت یک ربات بسیار کوچک برای بازرسی لوله های با قطر کم صورت گرفته است [6]. برخی از کارها بر روی ایجاد یک ربات با قابلیت تحرک بالا، دسترسی مناسب به محیط و توانایی استفاده از سنسورهای متفاوت برای تعیین وضعیت خطوط لوله، انجام شده است [7].

گامبو و همکاران [8] رباتی جهت بازرسی کانال های با قطر کم طراحی نمودند که قادر بود در لوله های با قطر 35 میلی متر حرکت کند. این ربات با توجه به دوربینی که در ابتدای ربات نصب شده قابلیت عکس برداری از داخل لوله جهت تشخیص عیوب را دارا بود. چوی و همکاران [9] یک ربات فرمان پذیر برای حرکت در داخل لوله طراحی نمودند. این مکانیزم از پایه های چرخ دار مکانیکی ساخته شده که حرکت چرخ ها قابل کنترل بوده و امکان حرکت در مسیرهای زانویی و دارای خم را فراهم می کند.

کارهایی نیز بر روی هوشمندسازی عملیات بازرسی بوسیله ربات و استفاده از الگوریتم های فازی در بازرسی محیط صورت گرفته است [9]. سبزه میدانی و همکاران [10] به بررسی کنترل و مدل سازی یک ربات جهت بازرسی در داخل لوله پرداختند. آن ها در این تحقیق یک میکرو ربات کرم مانند هوشمند جهت استفاده در لوله ها با کنترل نیروی فعال، مدل سازی و شبیه سازی نمودند. یون کو کانگ و همکاران [11] با تعیین درجات آزادی یک ربات به بررسی حرکت و کنترل آن در داخل لوله های دارای انشعاب پرداختند.

دسته ای دیگر از مطالعات بر روی توسعه و تحلیل ربات های الهام گرفته از طبیعت انجام پذیرفته است. فانگ هی لیو و همکارانش [12] حرکت یک میکرو ربات با محرک آلیاژ حافظه دار را با حرکت یک زالوی درماتی در یک خط لوله شبیه سازی نمودند. بدین منظور برای حرکت در یک لوله به قطر 25 میلی متر، یک میکرو ربات بر پایه محرک آلیاژ حافظه دار و ترکیب پایه های الاستیک و فنرهای خطی طراحی نمود. دیکینسون [13] کنترل فیدبک با استفاده از محرک های آلیاژ حافظه دار را انجام داد. این محرک ها قابلیت تولید نیروی بزرگ و جابجایی مناسب را دارند. ایوان و برگالا و همکارانش [14] به بررسی حرکت یک ربات در داخل لوله با استفاده از محرک آلیاژ حافظه دار پرداختند. آن ها در این پژوهش با به دست آوردن معادلات دینامیک ربات و با استفاده از روش نیوتن حرکت ربات در داخل لوله ای با قطر 13 میلی متر را با به کارگیری محرک های آلیاژ حافظه دار محقق نمودند. کیم و همکاران [15] با استفاده از محرک آلیاژ حافظه دار یک میکرو ربات از نوع کپسولی و با کاربرد پزشکی طراحی نمودند. مارکو و همکاران [16] نیز مکانیزمی را با استفاده از پاهای انعطاف پذیر و سیستم محرکه یک موتور گیربکس برای کنترل و حرکت پاها در مجاری باریک طراحی نمودند. هیروویکی و همکارانش [17]

دارد که با تغییر پارامترهای آن بتوان سرعت پاسخ را افزایش داد. برای مثال هرچه قطر سیم محرک نازک تر باشد، سرعت پاسخ بیشتر خواهد بود. ولی برای کاربردی که آلیاژ حافظه دار در این ربات به عهده دارد با توجه به اینکه قطر لوله بصورت ناگهانی کم یا زیاد نمی شود، کندی پاسخ محرک مشکل جدی به همراه ندارد. نتایج شبیه سازی نیز این مطلب را تایید می کند.

ربات دارای چهار چرخ می باشد که دو چرخ در عقب بدنه اصلی و دو چرخ در جلو بدنه اصلی قرار داده شده اند. چرخ ها از جنسی با ضریب اصطکاک مناسب ساخته شده که ضمن حرکت در طول لوله وظیفه حفظ تعادل ربات را نیز به عهده دارند. جهت حرکت ربات از یک موتور-گیربکس الکتریکی استفاده می شود که با تولید گشتاور روی چرخ های عقب سبب حرکت چرخ ها شده و ربات با توجه به میزان سرعت دورانی چرخ ها و ضریب اصطکاک بین چرخ ها و دیواره لوله می تواند در لوله حرکت کند. ربات قابلیت حرکت در مسیرهای افقی و عمودی و همچنین خم های لوله را دارا است. همچنین بازوی متحرک مکانیزم به ربات این امکان را می دهد که به راحتی در داخل لوله های با قطرهای مختلف حرکت کند. لینک مکانیزم از یک طرف به بدنه اصلی با مفصل دورانی متصل شده و از طرف دیگر به محرک آلیاژ حافظه دار کوپل شده که در صورت تحریک امکان افزایش و کاهش ارتفاع را خواهد داشت. با توجه به مسیری که ربات طی می کند این محرک، موقعیت لینک را به گونه ای تنظیم می کند که دو چرخ کوچکی که در انتهای لینک قرار داده شده اند، در شرایط مختلف با دیواره لوله در تماس هستند. لذا با توجه به میزان نیروی اعمالی به دیواره لوله توسط این چرخ ها، افزایش تعادل و قابلیت حرکت ربات در داخل لوله فراهم می شود.

طراحی مفهومی ارائه شده جهت لوله ای با قطر مشخص می باشد. برای لوله های با قطر بیشتر کفایت طول لینک تطبیق پذیر و به تبع آن فاصله چرخ ها، برای حفظ پایداری، افزایش یابد که نیازمند طراحی ساختاری جدید می باشد. ایده ای که می توان در اینجا مطرح نمود تا ربات فعلی برای لوله های با قطر بیشتر نیز قابل استفاده باشد این است که طول لینک بوسیله یک ماژول جانبی تا مقدار مشخصی قابل افزایش باشد. در صورت افزایش بیش از حد طول لینک باید امکان اضافه نمودن ماژول جانبی دیگری شامل یک جفت چرخ هرزگرد برای افزایش طول ربات، به منظور پایداری آن وجود داشته باشد. این ویژگی در قسمت تحلیل بیشتر مورد بحث قرار می گیرد. در جدول 1 مشخصات مکانیکی ربات مشاهده می شود.

3- تحلیل حرکت ربات

در این بخش به منظور کنترل نیروی وارد بر سطح داخلی لوله با استفاده از دیگرام آزاد نشان داده شده در شکل 2، ابتدا مقادیر نیروی های وارد بر سطح

جدول 1 مشخصات مکانیکی ربات

Table 1 Robot mechanical properties

مشخصات	اندازه
طول ربات	87 (mm)
طول لینک تطبیق پذیر	62 (mm)
قطر چرخ های ربات	27 (mm)
قطر چرخ های لینک تطبیق پذیر	14 (mm)
فاصله چرخ های جلو و عقب ربات	60 (mm)
محدوده تغییرات زاویه لینک تطبیق پذیر	10-90 (deg)
وزن	300 (g)

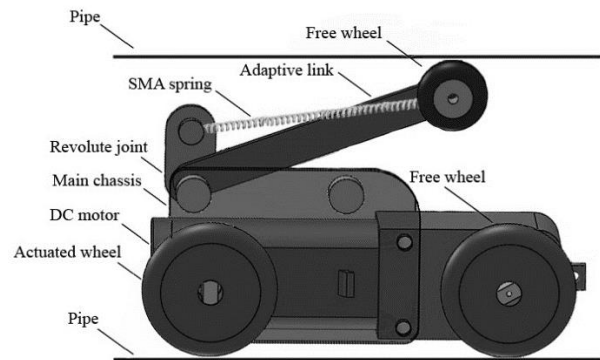


Fig. 1.a Conceptual design of the robot, Side view

شکل 1.الف طراحی مفهومی ربات، نمای جانبی



Fig. 1.b Conceptual design of the robot, Front view

شکل 1.ب طراحی مفهومی ربات، نمای جلویی

مطابق شکل 1، ربات از چندین قسمت اصلی تشکیل شده است. ربات دارای یک بدنه اصلی بوده که قابلیت نصب موتور جهت حرکت چرخ ها و ایجاد گشتاور مناسب برای حرکت روبه جلو ربات را فراهم می کند. لذا سیستم اصلی حرکت ربات بر پایه چرخ، که ساده ترین نوع مکانیزم حرکتی می باشد، در نظر گرفته شده است. ضمناً با توجه به کاربرد این ربات جستجوگر، امکان نصب دوربین و سایر سنسورهای مورد نیاز روی بدنه ربات وجود دارد. ربات دارای چهار چرخ بوده که ضمن ایجاد تعادل در حرکت ربات، با توجه به میزان نیروی اصطکاک ایجاد شده بین چرخ ها و دیواره داخلی لوله در اثر اعمال گشتاور توسط یک موتور الکتریکی روی چرخ های عقب، ربات به جلو حرکت می کند.

به منظور افزایش قابلیت حرکت ربات در لوله های شیب دار و حتی عمودی یک مکانیزم افزایش نیروی عمودی انتقالی بین ربات و دیواره لوله به ربات افزوده شده است. این مکانیزم شامل یک بازوی ثابت بوده که در انتهای آن یک چرخ هرزگرد قرار داده شده است. یک فنر آلیاژ حافظه دار جهت تغییر زاویه این بازو مورد استفاده قرار گرفته است که تحریک آن باعث افزایش نیروی عمودی بین چرخ ها و دیواره داخلی لوله و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک و نیروی محرکه ربات به سمت جلو شده است. مکانیزم به گونه ای طراحی شده است که زمانیکه ربات در لوله افقی در حرکت است فنر ذکر شده در حالت آزاد بوده و زاویه بازو را تغییر نمی دهد. از سوی دیگر وقتی ربات در مسیرهای دارای خم و لوله های عمودی حرکت می کند، با توجه به میزان ولتاژ اعمالی به محرک آلیاژ حافظه دار، نیروی ایجاد شده توسط آن افزایش یافته و همزمان نیروهای بین چرخ ها و دیواره افزایش خواهد یافت. آلیاژهای حافظه دار بصورت کلی پاسخ کندی دارند هر چند این امکان وجود

$$\tan(\alpha) = \frac{l_p \sin(\theta) - a}{h + l_p \cos(\theta)} \quad (1)$$

که پارامترهای h , l_p و a در شکل 2 تعریف گردیده اند. همچنین می توان پارامتر l_s را در هر لحظه از رابطه (2) محاسبه نمود:

$$l_s = \sqrt{(h + l_p \cos(\theta))^2 + (l_p \sin(\theta) - a)^2} \quad (2)$$

با استفاده از دیاگرام آزاد شکل 2، معادلات تعادل ربات به صورت روابط (3) تا (7) استخراج می گردد. با نوشتن معادله تعادل نیروی برای ربات در راستای عمودی داریم:

$$2N_1 + 2N_2 - N_3 = Mg \quad (3)$$

که پارامترهای N_1 ، N_2 و N_3 نیروهای عمودی وارد بر چرخ های ربات و Mg وزن ربات می باشد، که در شکل 2 نشان داده شده اند.

با نوشتن معادله تعادل گشتاور برای لینک ربات حول نقطه O ، محل اتصال لینک با بدنه ربات، داریم:

$$\frac{l}{l_p} N_3 \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta - \alpha)} = F_s = K(l_s - l_{s_0}) \quad (4)$$

که پارامتر l در شکل 2 تعریف گردیده است و پارامترهای F_s و l_{s_0} به ترتیب نیروی فنر و طول اولیه فنر می باشند.

با نوشتن معادله تعادل گشتاور برای ربات حول مرکز چرخ جلو داریم:

$$2F_1 r + 2bN_2 - (h + l \cos(\theta))N_3 = T + \frac{Mgb}{2} \quad (5)$$

که پارامترهای r ، F_1 ، b و T در شکل 2 تعریف گردیده اند و T برآیند گشتاور اعمال شده بر چرخ های عقب می باشد.

با نوشتن معادله تعادل گشتاور برای چرخ عقب حول مرکز آن داریم:

$$T = F_1 r \quad (6)$$

با نوشتن معادله تعادل نیرو برای ربات در راستای افقی داریم:

$$2F_1 - F_d = Ma_x \quad (7)$$

که پارامتر a_x شتاب ربات در راستای افقی می باشد.

با حل دستگاه معادلات شامل روابط (3) تا (7) و فرض $F_d = 0$ ، نیروهای وارد بر سطح هر یک از چرخ ها N_1 ، N_2 و N_3 علاوه بر F_1 و a_x به دست خواهد آمد. در شکل های 3 تا 5 نمودار نیروهای وارد بر سطح هر یک از چرخ های ربات به ازای تغییرات زاویه θ یا به عبارتی تغییرات قطر لوله رسم شده است. با افزایش زاویه θ مقدار نیروی N_3 نیز تغییر می کند. همین مسئله برای نیروهای وارد بر سطح چرخ های دیگر نیز وجود دارد و مقدار آن ها نیز با توجه به شکل 4 و 5 با تغییر زاویه θ تغییر خواهد کرد.

با توجه به اینکه ثابت نگه داشتن مقدار نیروی N_2 به منظور تثبیت نیروی حرکتی ربات به سمت جلو، مدنظر می باشد، باید مقدار نیروی فنر استفاده شده متناسب با تغییر زاویه تغییر کند.

برای ثابت نگه داشتن نیروی N_2 در معادلات مربوطه، با حل دستگاه معادلات حرکت مربوط به مکانیزم ربات در روابط (3) تا (7) و با در نظر گرفتن نیروی فنر به عنوان یک مجهول، مقدار نیروی وارد بر فنر، مطابق شکل 6 به دست می آید. از آنجا که مقدار نیروی فنر متناسب با ضریب سختی آن می باشد لذا برای ثابت نگه داشتن مقدار نیروی وارد بر چرخ عقب مکانیزم، امکان استفاده از فنر معمولی با سختی مشخص وجود ندارد.

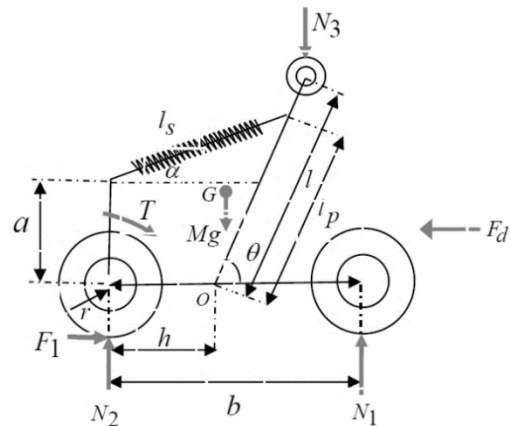


Fig. 2.a Force free body diagram of the robot, Side view

شکل 2الف دیاگرام آزاد نیرویی ربات، نمای جانبی

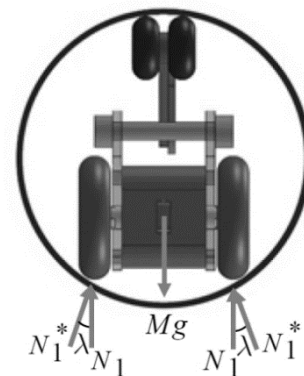


Fig. 2.b Force free body diagram of the robot, Front view

شکل 2ب دیاگرام آزاد نیرویی ربات، نمای جلویی

داخلی لوله توسط چرخ های میکرو ربات به دست می آید. سپس با شبیه سازی فنر آلیاژ حافظه دار مورد استفاده در مکانیزم به عنوان محرک، به بررسی و کنترل نیروی وارد بر سطح داخلی لوله پرداخته خواهد شد.

با توجه به هندسه لوله، می توان معادلات را در مختصات استوانه ای بیان نمود. اما از آنجا که مسأله در مختصات کارتزین نیز قابل بیان است و همچنین نوشتن معادلات در مختصات استوانه ای مسأله را پیچیده خواهد کرد، برای سادگی، مسأله بصورت صفحه ای حل شده است. نیروها به صفحه ای که ربات کاملاً نسبت به آن متقارن است، منتقل شده و بحث های مربوط به خم لوله در صفحه مذکور لحاظ شده است.

در شکل 2، F_d بعنوان نیروی اغتشاش در نظر گرفته شده است. این نیرو مبین نیروی سیال موجود در لوله بوده و هر چه دبی سیال موجود در لوله بیشتر باشد مقدار F_d بیشتر خواهد بود.

دیاگرام آزاد شکل 2 برای حالتی که ربات در وضعیت افقی قرار دارد، نشان داده شده است. زمانی که لوله شیبدار باشد، ترم وزن، مشابه نیروی سیال، به عنوان نیروی اغتشاش، F_d ، در نظر گرفته می شود.

همان گونه که در شکل 2 مشاهده می شود N_1^* نیروهای عمودی عکس-العمل سطح لوله وارد بر چرخ ها می باشند. از آنجا که $N_i = N_i^* \cos \lambda$ بوده و عرض ربات نسبت به قطر لوله کوچک در نظر گرفته شده است، زاویه λ کوچک می باشد، برای سادگی N_i^* با N_i تقریب زده شده است.

با توجه به شکل 2 می توان زاویه α را با به کارگیری روابط مثلثاتی با رابطه 1 بیان نمود:

که این کار منطقی به نظر نمی رسد. یکی از کاربردهای مناسب فنرهای آلیاژهای حافظه دار، به کارگیری به عنوان یک محرک با نیرو و سختی متغیر است. با کنترل تحریک آلیاژ حافظه دار می توان به این منظور دست یافت و در نتیجه برای کاربرد این تحقیق به عنوان محرک لینک تطبیق پذیر ربات، آلیاژ حافظه دار گزینه مناسبی می باشد. به منظور حفظ تعادل و تطبیق پذیری ربات، مقدار نیروی فنر در هر لحظه از حرکت ربات با توجه به قطر لحظه ای لوله، محاسبه می گردد. به عبارت دیگر در داخل لوله مقدار نیروی فنر آلیاژ حافظه دار برای زوایای مختلف بازوی محرک به دست آورده خواهد شد. حال می توان مقدار ولتاژ اعمالی مناسب را به دست آورد. در واقع با اعمال ولتاژ مناسب به فنر آلیاژ حافظه دار، مقدار نیروی فنر قابل تغییر می باشد.

بطور کلی نیروی فنر آلیاژ حافظه دار را می توان توسط یک رابطه ساختاری به حالت های تغییر شکل فنر و درصد فاز ماده طبق رابطه (8) مرتبط نمود [18]:

$$F = k_1 Y + k_2 \xi_s \quad (8)$$

که در این رابطه F نیروی فنر، Y تغییر طول، ξ_s درصد فاز مارتنزیتی غیردوقلویی¹ در ماده، k_1 ضریب جابجایی به نیرو و k_2 ضریب تبدیل فاز به نیرو می باشد.

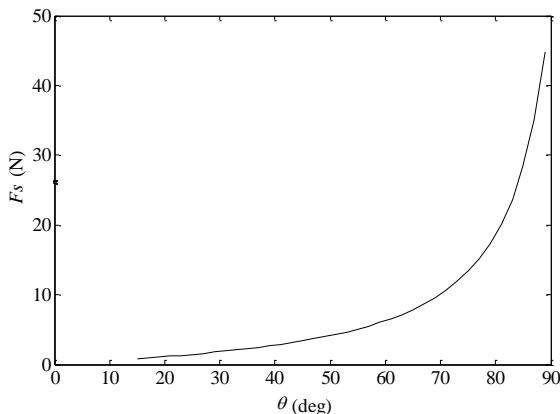


Fig. 6 Variation of spring force F_s versus angle of adaptable link for making the force N_2 constant

شکل 6 نمودار نیروی F_s در زوایای مختلف لینک تطبیق پذیر به منظور ثابت نگه داشتن نیروی N_2

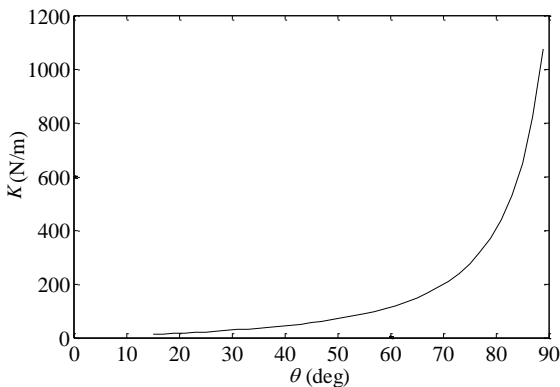


Fig. 7 Variation of stiffness coefficient K versus angle of adaptable link

شکل 7 نمودار سختی مطلوب K در زوایای مختلف لینک تطبیق پذیر

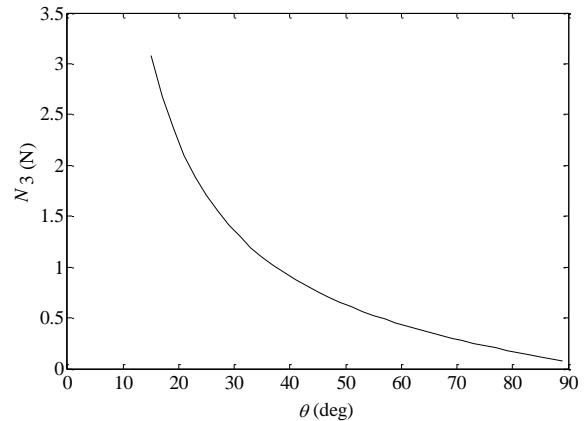


Fig. 3 Variation of N_3 versus angle of adaptable link

شکل 3 تغییرات نیروی N_3 بر حسب زوایای مختلف لینک تطبیق پذیر

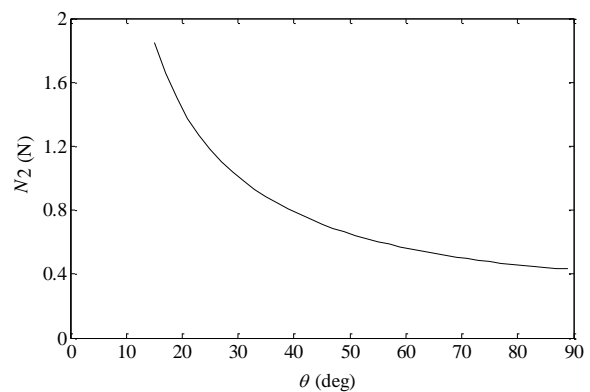


Fig. 4 Variation of N_2 versus angle of adaptable link

شکل 4 تغییرات نیروی N_2 بر حسب زوایای مختلف لینک تطبیق پذیر

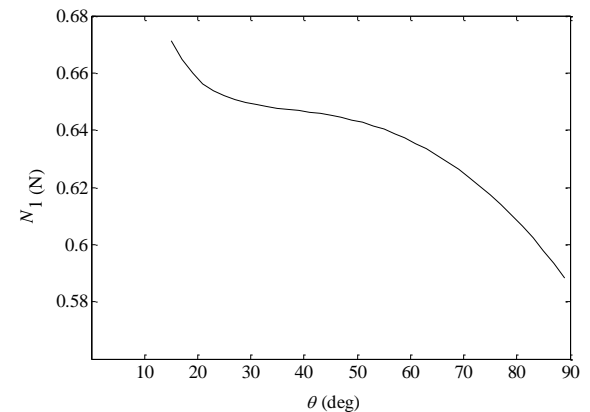


Fig. 5 Variation of N_1 versus angle of adaptable link

شکل 5 تغییرات نیروی N_1 بر حسب زوایای مختلف لینک تطبیق پذیر

با فرض استفاده از یک فنر خطی، مقدار سختی فنر را با توجه به رابطه $F_s = K(l_s - l_{s0})$ مطابق شکل 7 می توان محاسبه نمود. همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است با افزایش مقدار زاویه، سختی فنر نیز برای ثابت نگه داشتن مقدار نیروی فنر افزایش یافته است که این مطلب بیانگر این است که استفاده از یک فنر خطی با سختی مشخص برای ایجاد نیرویی به منظور ثابت نگه داشتن مقدار نیروی N_2 مناسب نمی باشد.

لازم به ذکر است که برای برخی حالات خاص می توان از یک فنر غیرخطی با سختی متغیر مطابق شکل 7 استفاده نمود. ولی در این شرایط، در صورت نیاز به افزایش مقدار نیروی رانشی ربات، بایستی فنر را تعویض کرد

¹ De-twinning

ایستایی و جنبشی مربوطه به ترتیب 0.6 و 0.4 انتخاب شده است. در نمونه‌ی واقعی ربات که در آینده ساخته می‌شود، گشتاور مورد نیاز جهت حرکت چرخ های عقب از طریق یک موتور DC تأمین خواهد شد. در واقع این موتور وظیفه به حرکت درآوردن چرخ‌های عقب که به عنوان محرک مکانیزم در نظر گرفته شده‌اند را به عهده دارد. جهت مدل‌سازی موتور ربات در نرم‌افزار ادمز، از اعمال گشتاور روی چرخ‌های عقب استفاده شده است.

شبیه‌سازی حرکت ربات در داخل لوله مطابق شکل 8 نشان می‌دهد که میکروروبات مورد نظر قابلیت حرکت در مسیرهای افقی، دارای خم و مسیره‌های عمودی را دارد. بدون استفاده از لینک تطبیق پذیر ربات فقط قادر به حرکت در لوله‌های افقی می‌باشد.

در ادامه روند و جزئیات شبیه‌سازی انجام شده در شکل 8 با تفصیل بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از معادلات دینامیکی بیان شده در روابط (1) تا (7) و همچنین معادله حرکت ربات در داخل لوله و با در نظر گرفتن مقادیر ضرایب اصطکاک بین چرخ‌ها و سطح دیواره لوله، میزان قدرت و گشتاور مناسب برای حرکت چرخ‌ها و در نتیجه موتور حرکتی انتخاب گردیده است. سایر پارامترهای مربوط به هندسه ربات نیز با در نظر گرفتن حرکت ربات در محدوده لوله‌های 2 تا 4 اینچ انتخاب گردیده‌اند. محرک آلیاژ حافظه‌دار مناسب نیز برای اعمال نیروی مورد نیاز تخمین زده شده از نوع فنر انتخاب گردیده است. شبیه‌سازی سیستم از طریق ارتباط بین نرم‌افزارهای ادمز و سیمولینک² در نرم‌افزار متلب³ صورت گرفته است. دلیل این کار استفاده از محیط محاسباتی مناسب در نرم افزار متلب برای مدل آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد. برای شبیه‌سازی دینامیکی سیستم نیز نرم افزار ادمز محیط مناسب و قابل قبولی را در اختیار می‌گذارد. با ایجاد این بستر مناسب برای شبیه‌سازی، کنترلر مناسب برای کنترل نیروی وارد بر سطح داخلی لوله از طریق چرخ کوچک متصل به انتهای لینک تطبیق پذیر، طراحی گردیده است.

جهت اعمال نیروی فنر آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار ادمز از یک متغیر ورودی استفاده شده است که پس از لینک شدن نرم‌افزار ادمز با سیمولینک متلب، مقدار آن از طریق نرم‌افزار متلب تعیین می‌گردد. سرعت ربات و همچنین طول فنر آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار ادمز اندازه‌گیری شده و به

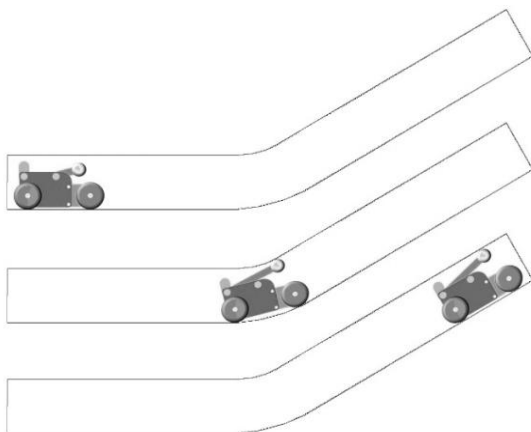


Fig. 8 Simulating the effect of adaptable mechanism in increasing the robot traction while passing bends and vertical pipes

شکل 8 شبیه‌سازی تأثیر لینک تطبیق پذیر در افزایش قابلیت حرکت ربات در عبور از خم‌ها و مسیره‌های عمودی

همچنین مقدار ثابت‌های k_1 و k_2 از روابط (9) و (10) محاسبه می‌گردد:

$$k_1 = \frac{Gd^4}{8D^3N} \tag{9}$$

$$k_2 = \frac{\pi\Omega d^3}{8\sqrt{3}D} \tag{10}$$

برای محاسبه درصد فاز ماده می‌توان از مدل تعمیم یافته برینسون [19] که برای فنر آلیاژ حافظه‌دار کاربری سازی شده است [21,20]، بهره گرفت. در مدل تعمیم یافته برینسون، درصد فاز ماده با استفاده از دیاگرام فازی قابل استخراج است. تابعی که برای استخراج درصد فاز ماده در تبدیل آستیتی و مارتنزیتی استفاده می‌شود به ترتیب، در روابط (11) و (12) بیان شده است.

$$\xi = F^A = \xi_j f^A(Z^A) \tag{11}$$

$$\xi = F^M = \xi_j + (1 - \xi_j) f^M(Z^M) \tag{12}$$

که در آن Z بیانگر فاصله از خطوط فازی در دیاگرام فازی و ξ_j درصد فاز در لحظه‌ی تبدیل فاز می‌باشد. f^M و f^A نیز از روابط (13) و (14) قابل محاسبه می‌باشد.

$$f^A(Z) = 1 - \frac{1}{2}[1 - \cos(\pi Z)] \tag{13}$$

$$f^M(Z) = \frac{1}{2}[1 - \cos(\pi Z)] \tag{14}$$

4- کنترل و شبیه سازی ربات

در این بخش، به شبیه‌سازی و کنترل ربات طراحی شده پرداخته خواهد شد. در ابتدا مدل اولیه ربات در نرم‌افزار سالیید ورکس طراحی گردیده است. به منظور ایجاد یک بستر مناسب برای ارزیابی عملکرد ربات، مدل طراحی شده به محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی دینامیکی ادمز¹ منتقل گردیده و با اعمال قید-های ثابت و چرخشی مورد نیاز، مدل دینامیکی مربوطه جهت شبیه‌سازی حرکت ربات در داخل لوله استفاده شده است. مسیر حرکت ربات در داخل لوله نیز با استفاده از نرم‌افزار ادمز طراحی و حرکت ربات در آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به طراحی مفهومی انجام شده، محل قراگیری لینک، فنر، موتور محرک روی چرخ‌ها و سایر قسمت‌های ربات مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای هندسی مکانیزم بصورت جزئی انتخاب شده است. با اعمال ولتاژ مناسب به محرک آلیاژ حافظه‌دار و کنترل نیروی ایجاد آن، تأثیر حرکت لینک متحرک روی حرکت ربات در داخل لوله شبیه‌سازی شده است. حرکت این لینک به منظور بررسی تطبیق پذیری ربات در داخل لوله بسیار حائز اهمیت است. در زمان حرکت ربات در داخل لوله، فنر باید به گونه‌ای تحت کشش یا فشار قرار گیرد تا لینک در وضعیت مناسب قرار گرفته و بتواند حرکت ربات در داخل لوله را با حفظ تعادل برقرار نماید.

پارامتر سرعت حرکت ربات در داخل لوله نیز باید به عنوان معیار سنجش تناسب تطبیق پذیری ربات توسط لینک انعطاف پذیر مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است منظور از انعطاف پذیری لینک در اینجا امکان تغییر زاویه آن بوده و تغییر شکل الاستیک آن در اثر بارگذاری مدنظر نمی‌باشد. اگرچه در صورت داشتن انعطاف پذیری ناشی از تغییر شکل الاستیک در لینک، مسأله قابل بررسی می‌باشد [22].

سرعت ربات وابسته به نیروی بین سطح چرخ‌ها و دیواره لوله و متناسب با ضریب اصطکاک موجود بین چرخ‌ها و دیواره لوله می‌باشد. نحوه برخورد چرخ‌های ربات با لوله، در نرم‌افزار ادمز از نوع صلب-صلب و ضریب اصطکاک

² Simulink
³ Matlab

¹ Adams

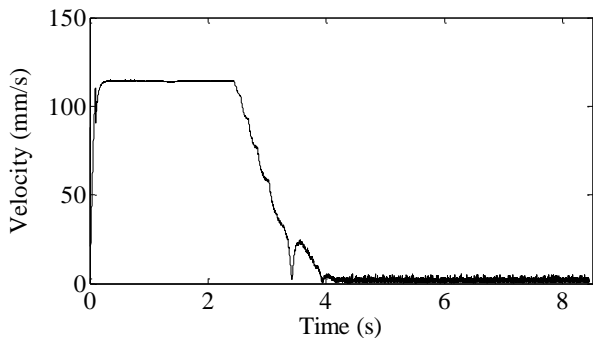


Fig. 10 Variation of the robot velocity in the path without applying the force of SMA

شکل 10 نمودار تغییرات سرعت ربات در داخل لوله بدون اعمال نیروی فنر آلیاژ حافظه دار

سرعت ربات در داخل لوله ای مطابق شکل 8، بدون اعمال نیروی فنر آلیاژ حافظه دار نشان داده شده است.

در شکل 11 منحنی تغییرات سرعت ربات در داخل همان لوله، نشان داده شده است. همانطور که در شکل 11 مشاهده می شود با توجه به مسیر حرکت ربات در داخل لوله، در ابتدای مسیر که افقی می باشد و لینک تطبیق پذیر تماسی با دیواره لوله ندارد، سرعت ربات بیشترین مقدار خود را دارد. هنگام رسیدن ربات به خم، نیروی اصطکاک بین چرخ ها و دیواره لوله نیروی رانش کافی برای حرکت ربات رو به جلو را فراهم نمی کند و لذا سرعت ربات کاهش می یابد. در ادامه با فعال شدن محرک آلیاژ حافظه دار، انتهای لینک تطبیق پذیر با جداره لوله تماس پیدا کرده و با افزایش نیروی محرک، نیروی رانش ربات به جلو افزایش یافته و باعث افزایش سرعت ربات می گردد و بعد از سپری شدن حدود 8 ثانیه، سرعت تا 90 درصد مقدار مطلوب افزایش می یابد. در شکل 12 نیز نمودار تغییرات طول فنر بر حسب زمان برای مسیر طی شده مطابق شکل 8 نشان داده شده است.

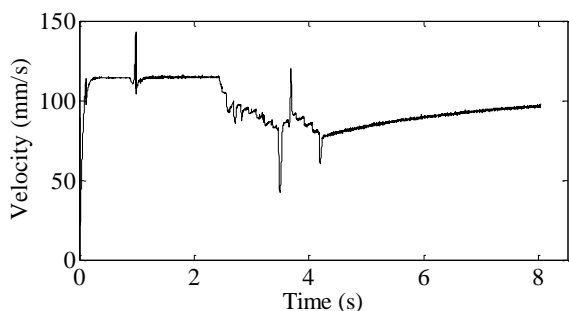


Fig. 11 Variation of the robot velocity in the path

شکل 11 نمودار تغییرات سرعت ربات در داخل لوله

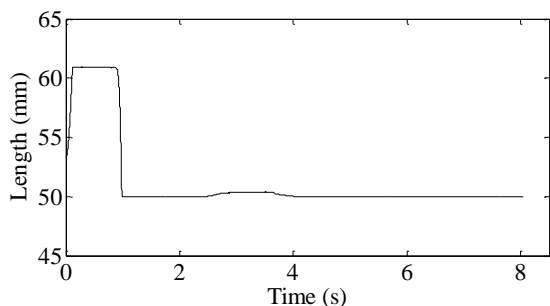


Fig. 12 Variation of SMA spring length

شکل 12 نمودار تغییر طول فنر

عنوان متغیر خروجی تعریف شده است که پس از لینک شدن نرم افزار ادمز با سیمولینک متلب، مقدار آن ها به نرم افزار متلب اعمال می شود. سپس جعبه ابزار کنترل پلنت مربوطه، با ورودی و خروجی های ذکر شده، در نرم افزار ادمز ساخته شده و به سیمولینک متلب وارد گردیده است.

شبیه سازی سیستم کنترل اعمال شده بر روی ربات نشان می دهد که ضمن تطبیق مکانیزم ربات در داخل لوله، ربات از پایداری مناسب برای حرکت در مسیر لوله نیز برخوردار می باشد. شاخص نیروی عمودی به صورت $min_i N_i$ یا گشتاور-ارتفاع MHS [23] می تواند به عنوان شاخص پایداری ربات در نظر گرفته شود. توجه داشته باشیم که چنانچه این مقدار صفر گردد به معنی آغاز واژگونی ربات خواهد بود. همچنین، هرچه این فاکتور، مقدار بیشتری داشته باشد ربات پایدارتر خواهد بود [23,24]. لینک تطبیق پذیر نیز در واقع یک عامل پایدارکننده برای ربات است و در شرایطی که تطبیق پذیری انجام می گیرد، شاخص پایداری افزایش می یابد. افزایش بیش از حد شاخص پایداری باعث افزایش مصرف انرژی خواهد بود. لذا حالت مطلوب، مصالحه ای بین پایداری و مصرف انرژی خواهد بود.

کنترل نیروی تطبیق با تنظیم ولتاژ اعمالی به فنر آلیاژ حافظه دار صورت گرفته است. لازم به ذکر است که میزان نیروی مورد نیاز در فنر آلیاژ حافظه دار، متناسب با زاویه θ تغییر کرده و لذا مقدار نیروی لازم برای ثابت نگه داشتن نیروی N_2 از روابط (3) تا (7) به دست آورده شده است. با توجه به مدل آلیاژ حافظه دار، نیروی محرک در هر لحظه به پارامتر تغییر شکل فنر و درصد فاز ماده وابسته است. تغییر شکل فنر از هندسه لوله در هر لحظه توسط نرم افزار ادمز استخراج گردیده و تغییر فاز ماده نیز که تابعی از متغیرهای دما، تنش و نرخ آن ها در ماده می باشد با استفاده از مدل آلیاژ حافظه دار در متلب استخراج می گردد. در حقیقت با کمک مدل انتقال حرارت در ماده، پارامتر تغییر فاز به ولتاژ اعمالی به ماده توسط کنترلر مرتبط می گردد. در شکل 9 بلوک دیاگرام سیستم شبیه سازی و کنترل به همراه مدل آلیاژ حافظه دار نشان داده شده است. همانطور که در شکل 9 ملاحظه می شود، پارامترهای ورودی در مدل آلیاژ حافظه دار، تغییر شکل آن و ولتاژ اعمالی بوده و خروجی آن نیروی محرک می باشد. با اعمال این نیرو به مدل موجود در ادمز، سرعت ربات تغییر نموده و از این پارامتر به عنوان پس خور برای تنظیم سرعت ربات در شرایط مختلف لوله بهره گرفته می شود.

با توجه به بلوک دیاگرام سیستم کنترل که در شکل 9 نشان داده شده است، از یک کنترلر PID برای تنظیم ولتاژ آلیاژ حافظه دار بهره گرفته شده است. سرعت ربات در داخل لوله به عنوان ورودی مرجع در نظر گرفته شده و ولتاژ اعمالی به آلیاژ حافظه دار توسط کنترلر تنظیم گردیده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که محرک در نظر گرفته شده به همراه سیستم کنترل توانسته است تطبیق پذیری مناسب برای حرکت ربات در داخل لوله با وجود تغییر در قطر و شیب لوله را فراهم سازد. در شکل 10 منحنی تغییرات

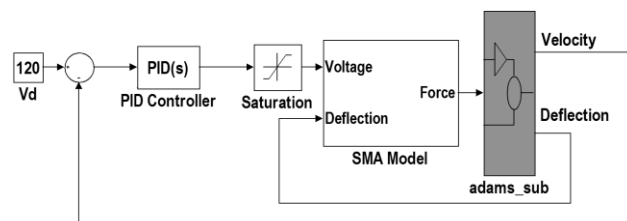


Fig. 9 Control system diagram

شکل 9 بلوک دیاگرام سیستم کنترل

مکانیزم تطبیق پذیر بوده است، با تلاش کمی که بر روی تنظیم پارامترهای PID صورت گرفت، این ادعا به خوبی بیان گردید. با توجه به راضی کننده بودن نتیجه تلاش بیشتری در این مقاله برای تغییر ضرایب صورت نگرفته است.

5- نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه به عیوب موجود در داخل لوله ها و با در نظر گرفتن معایب مکانیزم های مختلف بازرسی مجاری باریک از قبیل پیچیدگی در طراحی، مدل سازی و کنترل و همچنین حجیم بودن مکانیزم های پیچیده، طراحی و ساخت مکانیزمی که ضمن داشتن تطبیق پذیری مناسب در مسیرهای پیچیده لوله، از مکانیزم و سیستم کنترلی ساده برخوردار باشد حائز اهمیت است. در این تحقیق میکرو رباتی با ویژگی های ذکر شده بر پایه استفاده از ویژگی های مطلوب محرک های آلیاژ حافظه دار طراحی و شبیه سازی گردید. در جدول 2 مقایسه ای بین پارامترهای مختلف این ربات که پیرسما¹ نامگذاری شده و سایر ربات های پیشین مشاهده می شود. مکانیزم این ربات دارای وزن کمتری نسبت به سایر مکانیزم های طراحی شده قبلی بوده و می تواند به آسانی در مسیرهای عمودی و دارای خم در لوله حرکت کند. همچنین در صورت تغییر قطر مقطع لوله و یا تغییر در نیروی مقاوم سیال بدلیل تغییر سرعت یا دبی آن، این مکانیزم می تواند به خوبی وظیفه خود را انجام داده و سرعت حرکتی ربات را مدیریت نماید. انعطاف پذیری و قفل نبودن محرک مورد استفاده باعث می گردد هنگامی که ربات بدلیل تغییرات طبیعی هندسه لوله و یا رسوبات موجود در آن با تغییرات جزئی قطر مؤثر مواجه شود، به خوبی با تغییر قطر بتواند حرکت خود را در لوله با حفظ تماس کافی با دیواره ادامه دهد. علاوه بر این با به کارگیری یک سیستم کنترلی ساده، کنترل سرعت و یا موقعیت ربات در داخل لوله محقق گردید. با توجه به رفتار غیرخطی و پرچالش محرک های آلیاژ حافظه دار در کنترل، سعی شده تا با تخمین پارامترهای کنترلر PID به روش سعی و خطا، یک کنترلر ساده به صورتی طراحی گردد که مناسب بودن ساختار رباتیکی معرفی شده را بیشتر نشان دهد.

جدول 2 مقایسه ای بین پارامترهای مختلف چند ربات بازرسی لوله

Table 2 A comparison between various parameters of several pipe inspection robots

وزن (kg)	نحوه حرکت	قطر (mm)	طراحی	نویسنده، پلت فرم، یا نام تجاری
30	چرخ دار	300-600	ماژولار	مارکو
34-78	چرخ دار	150-600	یک پارچه	KA-TE
	چرخ دار	100-1200	یک پارچه	آپتیمس
9-50	چرخ دار	100-1200	یک پارچه	آبیک
400	چرخ دار	520-800	ماژولار	فوجی وارا
4.25	چرخ دار	150-600	یک پارچه	کواگوچی
16	چرخ دار	150-200	ماژولار	اکسپلورر
0.52	چرخ دار	85-120	ماژولار	موراماتسو
11	چرخ دار	85-110	ماژولار	ام-آر-اینسپکت
62	چرخ دار	195-296	یک پارچه	جون
6	چرخ دار		ماژولار	پیکو
2.1	چرخ دار	63-125	ماژولار	درتی بن
0.3	چرخ دار	60	یک پارچه	پیرسما

¹ PIRISMA

همچنین در شکل 13 نمودار تغییرات ولتاژ اعمالی به فنر توسط کنترلر نشان داده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می شود به منظور پاسخ مناسب محرک، ولتاژ حداکثری مناسبی برای محرک در نظر گرفته شده است. به منظور جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد محرک که منجر به از دست

رفتن خاصیت آن می شود، از یک اشباع در خروجی کنترلر استفاده شده است. کاهش ولتاژ اشباع منجر به کند شدن پاسخ شده ولی اطمینان از عدم آسیب

محرک را افزایش می دهد. لذا بایستی مصالحه ای بین سرعت پاسخ و میزان محافظت از محرک در نظر گرفت. با توجه به محرک استفاده شده در شبیه سازی، ضرایب کنترلر PID برابر با 1، 1.1، 1 و 0.9 و ولتاژ اشباع کنترلر 5 V در نظر گرفته شده است.

در شکل 14 نیز نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان برای مسیر طی شده، مطابق شکل 8 نشان داده شده است.

با توجه به اینکه در لوله های شیب دار و یا در صورت وجود سیال در لوله، ربات دچار مشکل در حرکت شده و یا سرعت آن افت می کند، هدف در حلقه کنترلی نشان دادن عملکرد مطلوب ربات و تنظیم و تثبیت سرعت آن می باشد. البته هدف حلقه کنترلی، تعقیب دقیق یک سرعت خاص نیست بلکه هدف این است که نشان داده شود امکان افزایش سرعت در شرایطی که حرکت ربات دچار مشکل می شود وجود دارد و ربات می تواند از وضعیت سکون خارج شده و به حرکت خود ادامه دهد. ولی این موضوع که چقدر می توان عملکرد کنترلر را بهبود بخشید هدف این مقاله نبوده است.

در خصوص تنظیم ضرایب PID در کنترلر، با توجه به نوع خاص مسئله در این تحقیق که شامل المان های غیرخطی می باشد و همچنین عدم تمرکز این مقاله بر روی راندمان کنترلر، در اینجا ضرایب با استفاده از سعی و خطا استخراج گردید. از آنجایی که هدف اصلی این مقاله نشان دادن عملکرد

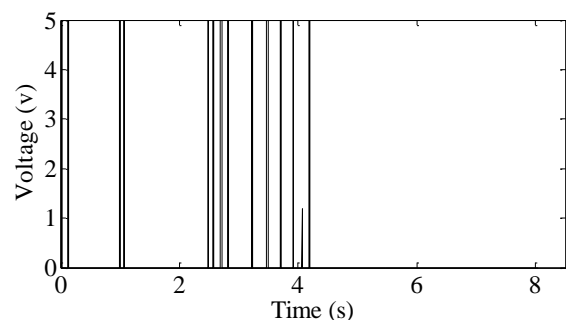


Fig. 13 Variation of SMA spring voltage

شکل 13 نمودار تغییرات ولتاژ اعمالی به فنر

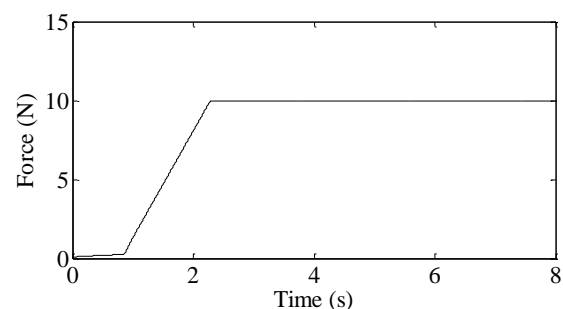


Fig. 14 Variation of SMA spring force

شکل 14 نمودار تغییرات نیروی فنر

6- مراجع

- Characteristics of an SMA-Actuated Micro Robot Simulating a Medicinal Leech in a Pipeline, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 19, No. 6, pp. 245-253, 2002.
- [13] C. A. Dickinson, J. T. Wen, Feedback Control Using Shape Memory Alloy Actuators, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 9, No. 1, pp. 242-250, 1998.
- [14] I. Virgala, A. Gmitterko, M. Kelemen, Motion Analysis of In-pipe Robot Based on SMA Spring Actuator, *Journal of Automation and Control*, Vol. 1, No. 1, 21-25, 2013.
- [15] B. Kim, S. Lee, Design, Fabrication of a Locomotive Mechanism for Capsule-Type Endoscopes Using Shape Memory Alloys (SMAs), *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 10, No. 1, pp. 77-86, 2005.
- [16] M. Quirini, S. Scapellato, Design and Fabrication of a Motor Legged Capsule for the Active Exploration of the Gastrointestinal Tract, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 13, No. 2, 2008.
- [17] H. Yaguchi, K. Kamata, In-piping Magnetic Actuator Capable of Inspection in a Thin Complex Pipe, *Mechanical Engineering Research*, Vol. 2, No. 2, 2012.
- [18] A. Hadi, H. Akbari, K. Alipour, Design, manufacturing and control of a continuum robotic module actuated by shape memory alloys, *Moadares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 253-263, 2016. (in Persian)
- [19] X. Gao, R. Qiao, L. C. Brinson, Phase diagram kinetics for shape memory alloys: a robust finite element implementation, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 6, pp. 2102-2115, 2007.
- [20] A. Hadi, A. Yousefi-Koma, M. Moghaddam, M. Elahinia, A. Ghazavi, Developing a novel SMA-actuated robotic module, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 162, No. 1, pp. 72-81, 2010.
- [21] A. Hadi, H. Akbari, B. Tarvirdizadeh, K. Alipour, Developing a novel continuum module actuated by shape memory alloys, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 243, No. 1, pp. 90-102, 2016.
- [22] B. Tarvirdizadeh, K. Alipour, A. Hadi, An algorithm for dynamic object manipulation by a flexible link robot: Numerical solution and robustness, *Engineering Computations*, Vol. 33, No. 5, pp. 1508-1529, 2016.
- [23] S. A. A. Moosavian, K. Alipour, On the dynamic tip-over stability of wheeled mobile manipulators, *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 22, No. 4, pp. 322-328, 2007.
- [24] K. Alipour, S. A. A. Moosavian, Dynamically stable motion planning of wheeled robots for heavy object manipulation, *Advanced Robotics*, Vol. 29, No. 8, pp. 545-560, 2015.
- [1] E. Dertien, S. Stramigioli, K. Pulles, Development of an inspection robot for small diameter gas distribution mains, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5044-5049, 2011.
- [2] E. Dertien, M. Mozaffari, K. Pulles, Design of a robot for in-pipe inspection using omnidirectional wheels and active stabilization, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5121-5126, 2014.
- [3] S. gonRoh, D. Kim, J. Lee, In-pipe robot based on selective drive mechanism, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol 7, No. 1, pp. 105-112, 2009.
- [4] I. N. Ismail, A. Anuar, K. S. M. Sahari, Development of in-pipe inspection robot, *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT)*, pp. 310-315, 2012.
- [5] M. MiratsTur, W. Garthwaite, Robotic devices for water main in-pipe inspection, *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 4, pp. 491-508, 2010.
- [6] W. Neubauer, A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes, *IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1178-1185, 1994.
- [7] J. Park, D. Hyun, W. Hee Cho, Normal-force control for an in-pipe robot according to the inclination of pipelines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 12, pp. 5304-5310, 2011.
- [8] E. Gambao, M. Hernando, A. Brunete, Multi configurable Inspection Robots for Low Diameter Canalizations, *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 11-14, 2005.
- [9] H. Choi, S. Roh, In-pipe Robot with Active Steering Capability for Moving Inside of Pipelines, *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*, pp. 375-402, Vienna: I-Tech Education and Publishing, 2007.
- [10] Y. Sabzehmeidani, M. Mailah, M. Hussein, Intelligent Control and Modelling of a Micro Robot for In-pipe Application, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 72, No. 1, pp. 449-454, 2010.
- [11] Y. Kang, J. Park, H. Yang, Analytical Approach of the In-Pipe Robot on Branched Pipe Navigation and Its Solution, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp. 907-911, 2013.
- [12] F. Liu, P. Ma, J. Chen, J. Zhu, Q. Yao, Locomotion