

## مدل سازی دینامیکی حرکت ربات خودمختار برای بازرسی خطوط لوله در شرایط مختلف هندسی

در پژوهش حاضر، به کمک نرم افزارهای آدامز و متلب، یک ربات خودمختار هفت درجه آزادی چرخدار با مکانیزم انطباق با قطر لوله غیرفعال و بهره مند از کنترلر فازی جهت هدایت مسیر حرکتی، طراحی و شبیه سازی شد. سیستم کنترلی این ربات مشتمل بر دو ورودی بوده است که عبارتند از اختلاف سرعت مطلوب و سرعت واقعی حرکت ربات (خطا) و آهنگ تغییر آن (شتاب) و نیز یک خروجی، که ولتاژ موتورهای جریان مستقیم است. در این پژوهش بواسطه طراحی کنترلر فازی، شبیه سازی دینامیکی حرکت ربات در شرایط هندسی مختلف نظیر، لوله های مستقیم و عمودی، زانویی، لوله دارای کاهنده، رسوبات و خوردگی بررسی گردید که نتایج بدست آمده نشان می دهد، ربات مدل سازی شده توانسته از درون لوله های استاندارد با قطر ۳۲-۲۰ اینچ و نیز لوله های دارای تغییر قطر و یا زانویی ۹۰ درجه با شعاع انحناء بین ۷۶۳-۴۰۸ میلی متر با موفقیت عبور نماید. بعلاوه استفاده از فنر به جای موتور در طراحی این ربات، به منظور انطباق پذیری با قطر لوله، راهکاری در جهت کاهش هزینه های تولید بوده است. لذا این ربات به جای بهره گیری از یک موتور و دو کنترلر مجزا (یکی برای تنظیم مکانیزم انطباق با قطر لوله و دیگری جهت تامین گشتاور چرخ های ربات)، توانسته تنها با استفاده از یک کنترلر نیز، حرکت خود را پیش براند و از این منظر پتانسیل های اقتصادی جهت ساخت نمونه واقعی، تجاری سازی محصول و پاسخگویی به نیاز برخی صنایع کشور را به نمایش گذارده است.

حسین مشجور<sup>۱</sup>  
مهندس ارشد/کارشناسی ارشد

کوروش  
حیدری شیرازی<sup>۳</sup>  
استاد

واژه های راهنما: شبیه سازی دینامیکی، ربات خودمختار، کنترلر فازی، آدامز، متلب

### ۱ - مقدمه

امروزه واحدهای صنعتی پالایشگاهی، فرآیندی و پتروشیمی در پیشبرد اقتصاد کشورها نقش مهمی را ایفا می کنند.

<sup>۱</sup> مهندس ارشد واحد نگهداری و تعمیرات خطوط لوله مارون، شرکت بهره برداری نفت و گاز مارون (MOGC)، اهواز، ایران  
[hosainmashjoor@gmail.com](mailto:hosainmashjoor@gmail.com)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

<sup>۳</sup> نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران [k.shirazi@scu.ac.ir](mailto:k.shirazi@scu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

در این صنایع بحث شناسایی خوردگی داخلی خطوط لوله برای جلوگیری از خرابی‌های احتمالی، یکی از مشکلات مرسوم می‌باشد. برخلاف خطوط لوله روزمینی که دارای روش‌های متعدد بازرسی غیرمخرب و تشخیص عیوب هستند، خطوط زیرزمینی به دلیل مدفون بودن در خاک و نبود امکان دسترسی مستقیم به آنها، دارای روش‌های محدودتری برای بازرسی هستند. اگرچه بعد از انجام خاک‌برداری و پوشش برداری از این خطوط امکان انجام روش‌های بازرسی غیرمخرب مشابه با خطوط لوله روزمینی وجود دارد، اما این مسئله مستلزم صرف هزینه و زمان بسیار زیاد می‌باشد و وجود خطرات حین انجام خاک‌برداری با ماشین‌آلاتی نظیر بیل مکانیکی به چالش‌های این امر می‌افزاید.

یکی از روش‌های نوین بررسی عیوب داخلی خطوط لوله استفاده از ربات‌های بازرسی خطوط لوله است که روشی مطمئن و کارآمد بوده و می‌تواند امکان بازرسی داخلی طیف گسترده‌ای از خطوط لوله را فراهم نماید. زیرا همانطور که خطوط لوله هر ساله افزایش می‌یابند تشخیص عیوب و حفاظت از آنها نیز لازم الاجرا است. لذا ربات‌های درون لوله‌ای به عنوان یک راه حل مؤثر برای حل این مسئله شناخته شده‌اند [۱، ۲].

در صنعت، ربات‌های خودمختار (آتونوماس)، ماشین‌های هوشمندی هستند که می‌توانند وظایف خود را به تنهایی و بدون کنترل آشکار انسان انجام دهند [۳]. به‌طور کلی یک سیستم خودمختار دارای چهار بخش مجزا و در عین حال مرتبط با هم می‌باشد که عبارتند از: حسگرها، مدل‌سازی و کنترل، نقشه‌ساخت و طراحی مسیر و تصمیم‌گیری و استقلال [۴، ۵]. لذا ربات‌های خودمختار به دلیل داشتن سیستم‌های کنترلی که خود شامل سنسورها و عملگرهای مختلف است و همچنین توانایی هدایت و حرکت بین دو نقطه (ناوبری<sup>۱</sup>) در محیط مورد نظر بسیار مورد توجه محققین قرار دارند.

ربات‌های درون لوله‌ای به چندین روش مختلف دسته‌بندی می‌شوند آنها ممکن است بر اساس مکانیزم حرکتشان به صورت چرخ‌دار [۶، ۷]، ردیاب [۸]، مار مانند [۹]، راه رونده [۱۰]، خوک (توپک) مانند [۱۱]، تقسیم‌بندی شوند. آنها همچنین می‌توانند بر اساس ساختارشان به صورت یک صفحه‌ای [۱۱] با بازوهای ۱۸۰ درجه‌ای و انواع سه صفحه‌ای [۱۲] و چهار صفحه‌ای [۱۳]، با بازوهای مجزای ۱۲۰ یا ۹۰ درجه‌ای تقسیم‌بندی شوند. معیار دیگر دسته‌بندی ربات‌های درون لوله‌ای روش انطباق با سطح داخلی لوله است که می‌توانند به صورت انطباق فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی شوند [۱۲، ۱۳] که در نوع منفعل ربات عمدتاً با استفاده از فنرها با سطح داخلی لوله انطباق پیدا می‌کنند ولی در نوع انطباق فعال ربات می‌تواند به‌طور مؤثرتری نسبت به نوع منفعل در لوله حرکت کند؛ زیرا نیروی عمودی<sup>۲</sup> بین ربات و لوله می‌تواند توسط عملگرهای بیشتری کنترل شود [۱]. یکی از مشکلات رایج در طراحی ربات‌ها، تطابق ربات با هندسه متغیر لوله‌هاست به گونه‌ای که ربات برای تطبیق با تغییر قطر لوله، زانویی، خم‌ها و غیره غالباً دچار مشکل می‌شود. از این رو لازم است در ساختار مکانیکی ربات تمهیدات لازم جهت غلبه بر مشکلات مذکور پیش‌بینی شده باشد. همچنین ربات باید علاوه بر قابلیت سینماتیکی از قابلیت‌های کنترلی لازم نیز برخوردار باشد. لذا در شبیه‌سازی دینامیکی حرکت ربات، شرایط هندسی مختلف لوله‌ها نظیر لوله‌های مستقیم و عمودی، زانویی، خم

<sup>1</sup> Navigation

<sup>2</sup> Normal force

<sup>3</sup> Actuators

لوله، لوله دارای ردیوسر (کاهنده)، لوله دارای رسوبات و خوردگی مورد توجه است. کاهنده‌ها از جمله اتصالات خطوط لوله هستند که جهت اتصال مستقیم دو لوله با قطرهای متفاوت و با هدف تغییر قطر لوله در مسیر خطوط لوله استفاده می‌شوند [۱۴]. کاهنده‌ها دارای دو فرم هم مرکز و غیر هم مرکز<sup>۱</sup> هستند [۱۴]. در لوله‌ها جهت چرخش جریان به اندازه ۹۰ یا ۴۵ درجه از زانویی‌ها استفاده می‌گردد. زانویی‌ها در دو نوع شعاع بزرگ<sup>۲</sup> و شعاع کوچک<sup>۳</sup> تولید می‌شوند که در نوع شعاع بزرگ، شعاع انحنای خط میانه زانویی ۱/۵ برابر قطر اسمی خط لوله (برای قطرهای بالاتر از ۳/۴ اینچ) می‌باشد؛ اما در نوع شعاع کوچک، شعاع انحنای خط میانه زانویی برابر قطر اسمی است [۱۴]. توپک وسیله‌ای برای تخلیه و تمیزکاری درون خطوط لوله می‌باشد که با جریان و فشار سیال (هوای فشرده، گاز یا آب) در خط مستقیم به جلو رانده و حرکت داده می‌شود. توپکرانی عمدتاً برای تخلیه و پاکسازی مواد زائد درون خطوط و نیز اندازه‌گیری میزان صحت دستگاه‌های سنجش جریان خطوط کاربرد دارد [۱۵].

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه طراحی ربات‌های درون لوله‌ای برای کاربردهای مختلف انجام شده است که می‌توان به برخی از نمونه‌های آنها اشاره نمود.

دانگ وولی و همکاران [۱] در سال (۲۰۱۲) به طراحی یک مکانیزم جدید برای حرکت ربات‌ها درون لوله‌های عمودی و دارای انشعاب و زانویی پرداختند. آنها یک نمونه اولیه از این ربات را ساختند. نتایج کار آنها بیانگر عبور ربات از درون ساختارهای هندسی اشاره شده بوده است. کویی و همکاران [۱۶] در سال (۲۰۰۹) به طراحی یک سیستم ردیابی و موقعیت‌یابی برای رباتی ماری شکل بدون کابل افساری جهت بازرسی خطوط لوله نفت زیرزمینی پرداختند. نتایج کار آنها بیانگر رسیدن به ارتباطی قابل اطمینان بین درون و بیرون لوله‌های فلزی بوده است. زونگ و همکاران [۱۲] در سال (۲۰۰۷) به طراحی یک ربات با قابلیت تنظیم خودکار نیروی کشش و تنظیم فعال قطر متناسب با لوله و طراحی سیستم کنترلی آن پرداختند. مدل فیزیکی به کار گرفته شده در کار آنها مکانیزم سه پای چرخ‌دار با زاویه ۱۲۰ درجه می‌باشد. نتایج آزمایشات میدانی آنها نشان داده که این ربات توانسته به خوبی درون خطوط لوله گاز زیرزمینی واقعی کار کند. در پژوهش کوه و همکاران [۱۷] در سال (۲۰۲۱) نیز طراحی یک سیستم رباتیک خدماتی جهت زدودن زنگ زدگی‌های سطحی و حفاظت از خطوط لوله گازی که در محل‌های مرتفع نظیر ساختمان‌های بلند قرار دارند ارائه شده است. نتایج آزمایشات استقرار میدانی آنها اثربخشی این مفهوم را تأیید می‌کند که سیستم پیشنهادی آنها در زمان صرفه‌جویی کرده و آماده‌سازی و نصب داربست را حذف می‌کند و هدر رفت مواد مصرفی را کاهش می‌دهد.

در این تحقیق تمرکز بر روی مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیکی رباتی بوده است که قابلیت‌های لازم را برای حرکت در مسیرهای لوله‌ای دارای کاهنده، زانو و انجام مانورهای دینامیکی درون لوله را داشته باشد.

## ۲- مدل‌سازی

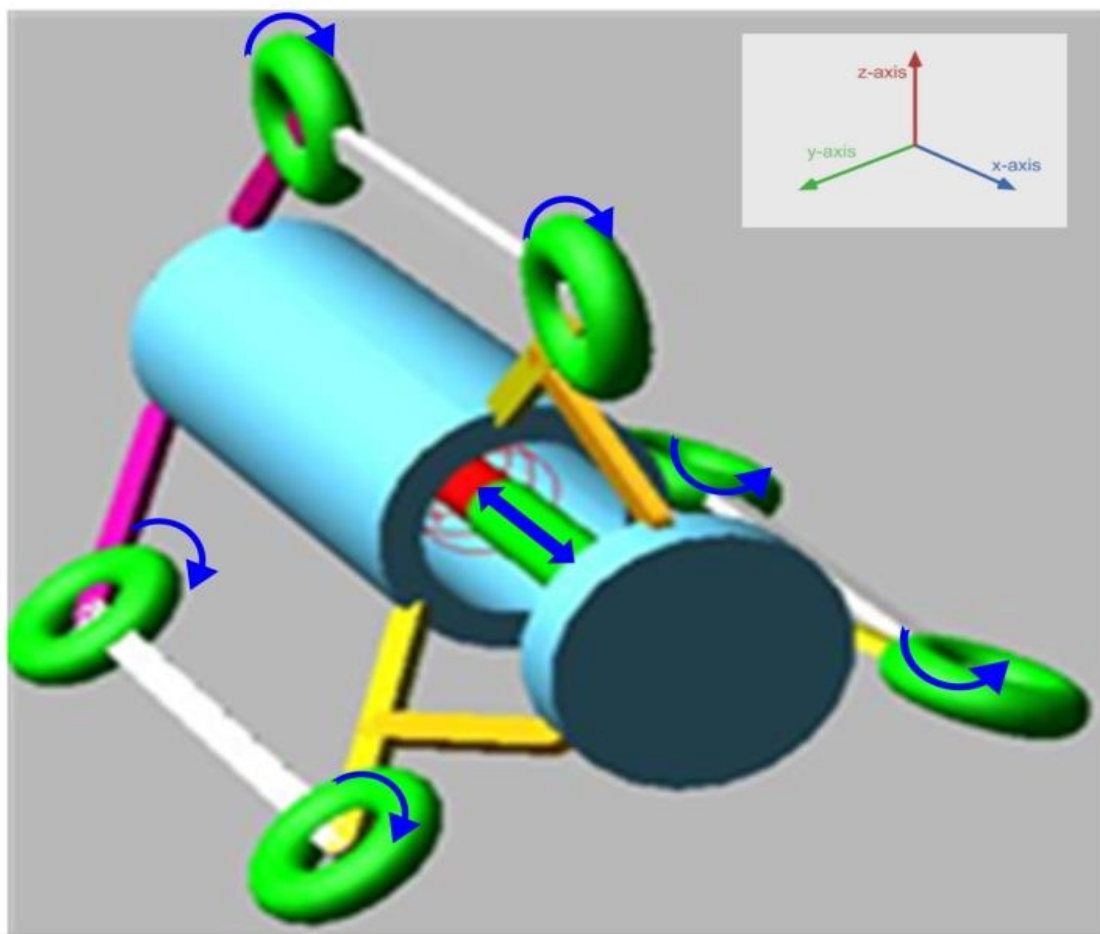
<sup>1</sup> Concentric & eccentric

<sup>2</sup> Long radius

<sup>3</sup> Short radius

مدل طراحی شده در این پژوهش، جزو ربات‌های درون لوله‌ای چرخ‌دار با مکانیزم انطباق با قطر لوله غیر فعال و با ساختار طراحی سه صفحه‌ای و دارای هفت درجه آزادی می‌باشد. این ربات از سه مجموعه متقارن با زاویه ۱۲۰ درجه از یکدیگر تشکیل شده است. هر مجموعه متقارن از یک جفت چرخ و چهار لینک تشکیل شده که ارتباط چرخ‌ها را با یکدیگر و با بدنه ربات و بوش انتهایی آن را میسر می‌کنند. به منظور مدل‌سازی ربات از نرم‌افزار آدامز استفاده شده است. طراحی ربات در سیستم آحاد میلی‌متر-کیلوگرم-ثانیه صورت گرفته است. همانطور که در شکل زیر مشاهده می‌شود در هر بازو، چرخ‌های جلویی و عقبی ربات از طریق مکانیزم چهار میله‌ای به شاسی متصل شده‌اند. همچنین هر یک از چرخ‌های عقب ربات از طریق یک لینک به مجموعه فنر متصل به بوش انتهایی متصل شده است.

به منظور مدل‌سازی چرخ‌های ربات در نرم‌افزار آدامز از ابزار Torus استفاده شده است که سبب می‌شود، چرخ بهتر با دیواره لوله در تماس قرار بگیرد و همچنین به شرایط واقعی نزدیکتر شود. به منظور مدل‌سازی مفاصل ربات در محل اتصال چرخ‌ها به لینک‌ها و همچنین لینک‌ها به یکدیگر، از مفاصل چرخشی استفاده شده است. این مفصل امکان چرخش اجزای ربات نسبت به یکدیگر حول محور مشترکشان را فراهم می‌کند. همچنین جهت اتصال میله فنر به شاسی از مفصل انتقالی و جهت اتصال میله فنر به بوش انتهایی ربات از مفصل ثابت استفاده شد. تصویری از ربات طراحی شده در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ربات طراحی شده در پژوهش حاضر

## جدول ۱- ابعاد و اندازه‌های لینک‌های ربات

| ابعاد     | لینک AB | لینک BC | لینک DC | لینک MN |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| نوع المان | LINK    | LINK    | LINK    | LINK    |
| طول (mm)  | ۲۵۰     | ۵۰۰     | ۲۵۰     | ۱۷۶/۶   |
| عرض (mm)  | ۲۵      | ۲۵      | ۲۵      | ۲۵      |
| عمق (mm)  | ۱۲/۵    | ۱۲/۵    | ۱۲/۵    | ۱۲/۵    |

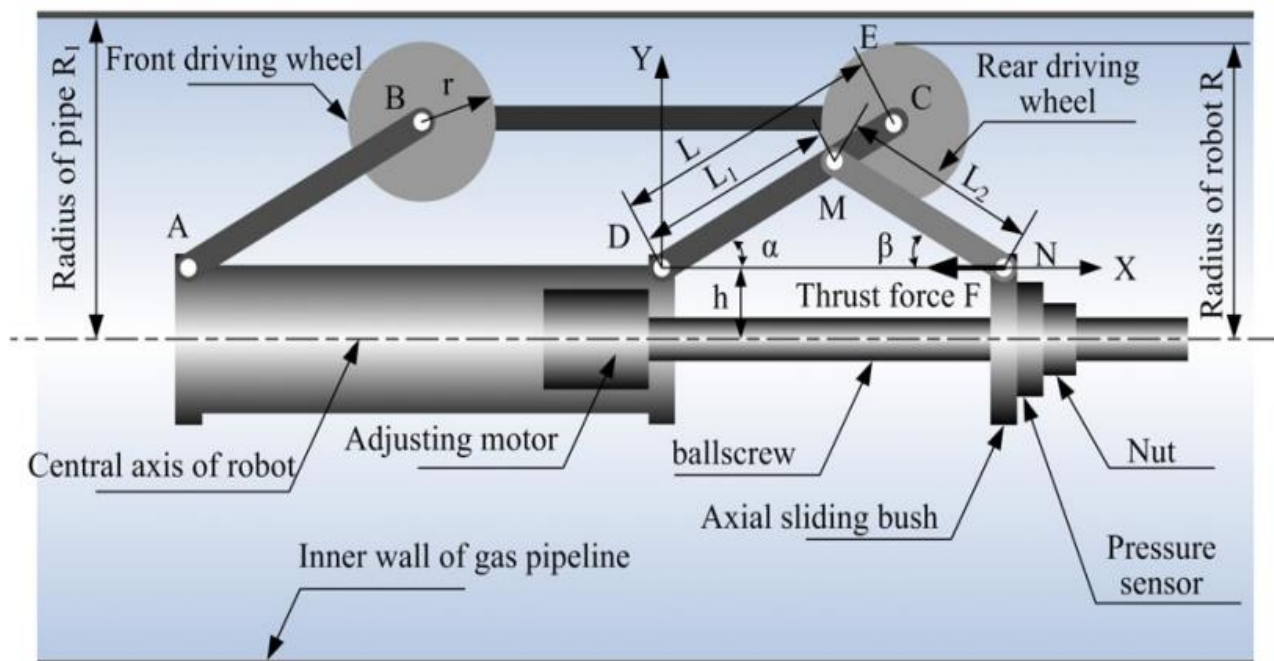
## جدول ۲- ابعاد و اندازه‌های سایر اجزای ربات

| چرخ‌ها          |       | شاسی (بدنه ربات) |          | بوش (عقب ربات) |          | فنر - دمپر               |        |
|-----------------|-------|------------------|----------|----------------|----------|--------------------------|--------|
| نوع المان       | TORUS | نوع المان        | Cylinder | نوع المان      | Cylinder | نوع المان                | SPRING |
| شعاع خارجی (mm) | ۷۰    | طول (mm)         | ۵۰۰      | طول (mm)       | ۵۰       | (k) ثابت فنر (N/mm)      | 200    |
| شعاع داخلی (mm) | ۲۰    | شعاع (mm)        | ۱۰۰      | شعاع (mm)      | ۱۰۰      | (C) ضریب دمپینگ (N.s/mm) | ۰/۳    |

در جداول بالا ابعاد و اندازه‌های در نظر گرفته شده جهت مدل‌سازی کامپیوتری ربات ذکر شده است. به دلیل غیر فعال بودن مکانیزم انطباق چرخ‌ها با قطر لوله، نیاز است که مقداری پیش بار در فنر در نظر گرفته شود تا براساس آن مکانیزم، ربات بتواند خودش را با قطر لوله و سایر شرایط هندسی محیطی انطباق دهد. این مقدار در طراحی اولیه ۱۳۰۰- نیوتن در نظر گرفته شده است. در اینجا باید توجه داشت که اگرچه ربات از لحاظ هندسی توانایی باز کردن بیشتر چرخ‌های خود را دارا است به گونه‌ای که لینک‌های متصل به چرخ‌ها در حالت کاملاً عمودی قرار گیرند، اما این تغییر زاویه و پیش بار فنر، اهرم بندی‌های تغییر قطر را به سمت جلو بر می‌گرداند و سبب واژگونی ربات می‌گردد. لذا از این مسئله در تنظیم پیش بار فنر در شرایط هندسی مختلف حرکت این ربات استفاده شد؛ به نحوی که مطابق بر این میزان پیش فرض یادشده برای پیش بار در فنر، قبل از رسیدن لینک‌ها به حالت عمودی نیروی فنر صفر گردد و از تغییر زاویه بیشتر اهرم‌ها به سمت جلوی ربات ممانعت به عمل آید.

## ۱-۲- محدودیت‌های طراحی

نقشه مورد نیاز برای مدل‌سازی ربات در نرم‌افزار آدامز، با الگوبذیری از نقشه پیشنهادی توسط Zhang و همکاران [۱۲] در شکل (۲) طراحی و مدل‌سازی شده است؛ اما در مدل طراحی شده در نرم‌افزار آدامز از مجموعه فنر- دمپر به جای موتور استفاده شده است.



شکل ۲- طراحی نقشه ربات با الگوپذیری از مدل پیشنهادی توسط Zhang و همکاران [۱۲]

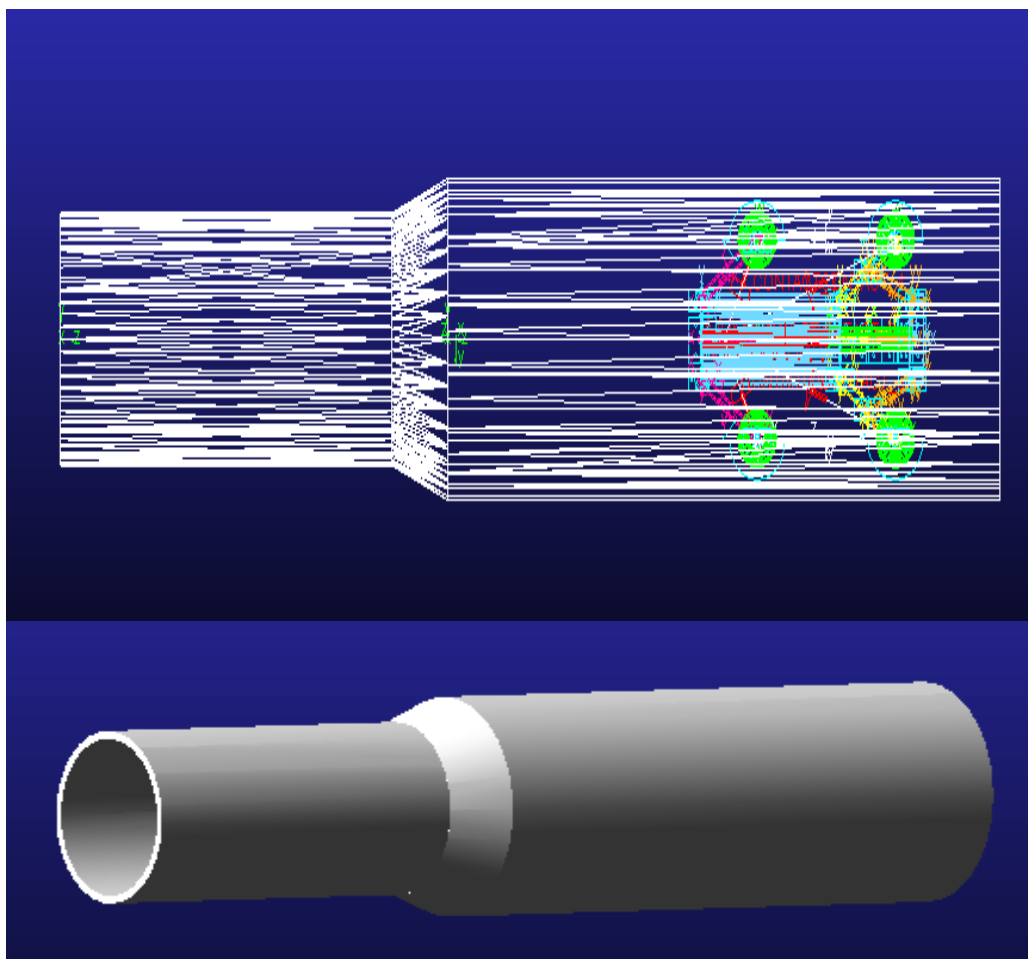
با توجه به این طراحی مشخص می‌شود که حداکثر قطر لوله برای این ربات مذکور زمانی است که لینک AB و یا سایر لینک‌های مشابه عمود بر راستای شاسی ربات قرار گیرد و حداقل قطر لوله برای عبور این ربات زمانی است که چرخ‌های ربات در تماس با شاسی قرار بگیرند. اگر قطر شاسی ربات D و قطر چرخ‌های ربات r باشد داریم:

$$D_{max,pipe} = 2 * AB + D + 2 * r \quad (1)$$

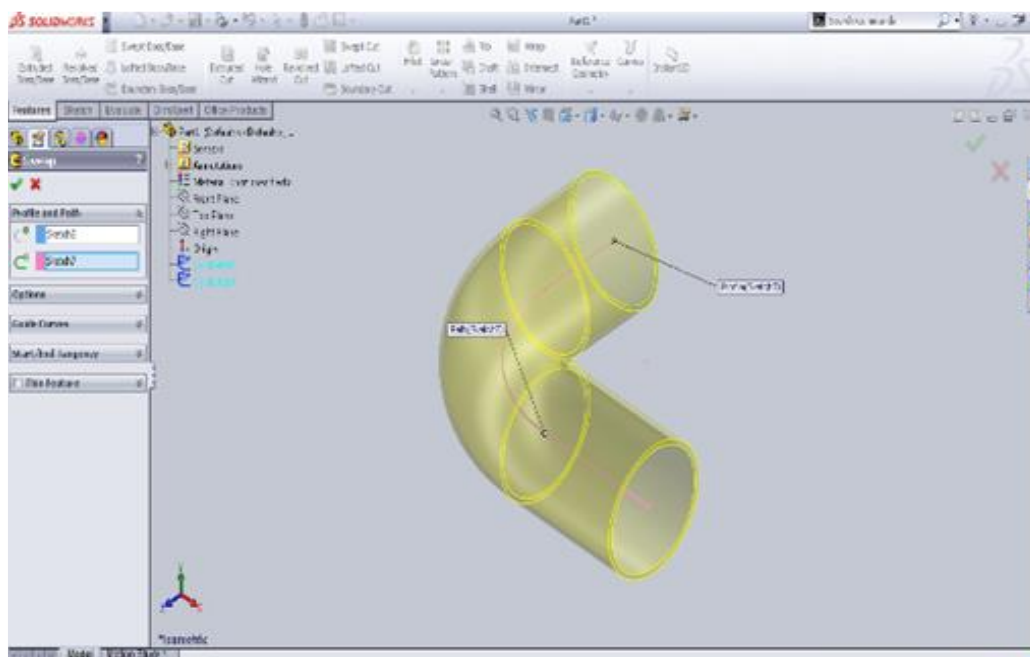
$$D_{min,pipe} = D + 4 * r \quad (2)$$

با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده در هنگام مدل‌سازی ( $AB=250$ ,  $D=200$ ,  $r=50$ ) این ربات قادر است حداقل از لوله‌هایی با قطر ۴۰ سانتی‌متر (۱۶") و حداکثر از لوله‌هایی با قطر ۸۰ سانتی‌متر (۳۰") عبور کند. بدیهی است که در کاربردهای عملی می‌توان بسته به شرایط لوله‌ای که قرار است ربات از آن عبور کند، ابعاد ربات را تغییر داد. از آنجا که ربات طراحی شده برای حرکت و بازرسی درون لوله باید توانایی غلبه بر نیروی وزن و اصطکاک ناشی از تماس چرخ‌ها با دیواره لوله و نیروهای ناشی از مکانیزم انطباق ربات با قطر لوله را داشته باشد، در ادامه، تحلیل نیروی کششی ربات برای حرکت درون لوله ارائه می‌گردد (پیوست ۱). همانطور که در شکل (۲) مشاهده شد، شعاع ربات،  $R_1$  شعاع لوله،  $h$  ارتفاع محور مرکزی ربات بازرسی تا نقطه تکیه گاهی D و شعاع چرخ‌های متحرک، L طول لینک CD و  $L_1$  فاصله بین نقطه D و نقطه M،  $L_2$  طول لینک MN،  $\alpha$  زاویه بین لینک CD و محور xها و  $\beta$  زاویه بین لینک MN و محور xها و  $F_T$  بیانگر نیروی پیشرانه مکانیزم حرکت می‌باشد. جزئیات و روابط هندسی تحلیل نیرویی حرکت در مقاله حاضر، در بخش پیوست ارائه شده است.

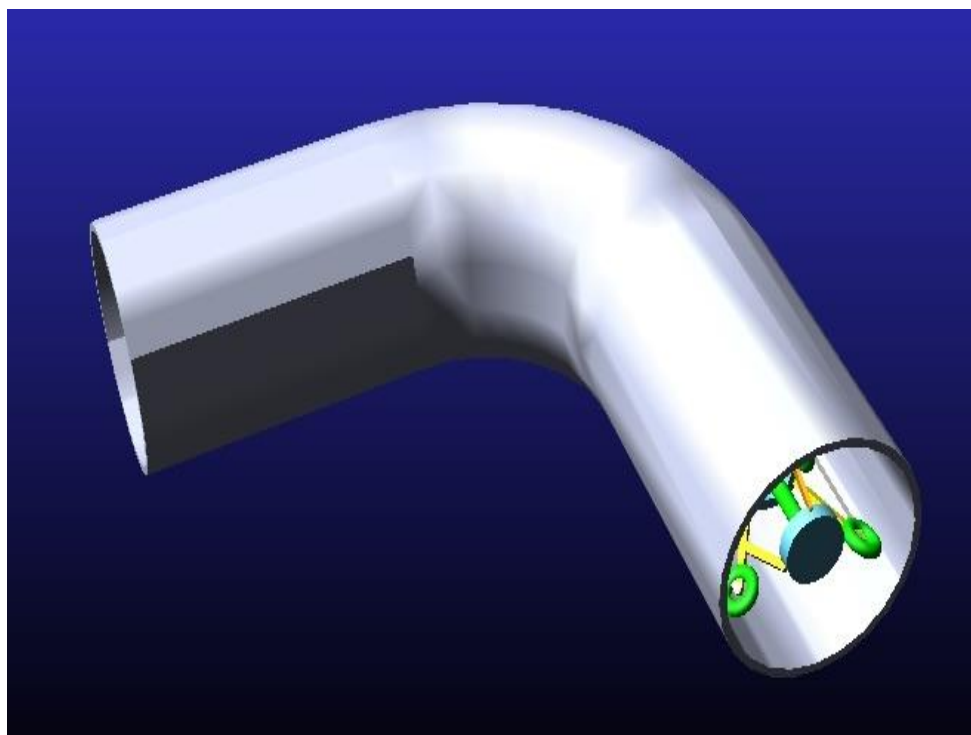
## ۲-۲- مدل سازی موانع هندسی در مسیر حرکت ربات



شکل ۳- طراحی کاهنده در مسیر حرکت ربات



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) طراحی زانویی در نرم‌افزار سالیدورکز، ب) تصویری از ربات درون لوله دارای خم یا زانویی ۹۰ درجه

به منظور بررسی حرکت ربات در لوله‌هایی که دچار تغییر قطر می‌شوند در نرم‌افزار آدامز با به‌کارگیری ابزار دوران<sup>۱</sup> و چرخش پروفیل حول محور دوران یک کاهنده طراحی شده است که در شکل (۳) ارائه شده است. همچنین جهت بررسی حرکت ربات درون لوله دارای خم یا زانویی ۹۰ درجه از نرم‌افزار سالید ورکز<sup>۲</sup> برای مدل‌سازی این عضو استفاده شده است که در شکل (۴) ارائه شده است.

### ۲-۳- مدل‌سازی سایر بخش‌های ربات

جهت مدل‌سازی نحوه تماس چرخ‌های ربات با جداره لوله از نیروهای تماسی<sup>۳</sup> استفاده شده است. با توجه به خاصیت ارتجاعی لاستیک چرخ‌ها، نحوه برخورد چرخ و جداره لوله از نوع ضربه‌ای<sup>۴</sup> در نظر گرفته شده است. همچنین اصطکاک بین چرخ و جداره لوله از نوع اصطکاک خشک (کولمب) مدل‌سازی شده است. به منظور اعمال گشتاور خارجی به چرخ‌های ربات برای هر یک از آنها یک موتور جریان مستقیم<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده است. این موتورها ولتاژ خروجی از کنترلر را دریافت و گشتاور را ایجاد می‌کنند. همچنین جهت ایجاد ارتباط داخلی بین دو نرم‌افزار آدامز و متلب تعداد (۹) متغیر حالت شامل هفت متغیر حالت ورودی (که گشتاورهای چرخ‌های ربات و نیروی درگ ناشی از سیال) و دو متغیر حالت خروجی (سرعت و شتاب مرکز جرم ربات) تعریف شده‌اند.

<sup>۱</sup> Revolution

<sup>۲</sup> Solid Works

<sup>۳</sup> Contact force

<sup>۴</sup> Impact

<sup>۵</sup> Direct current

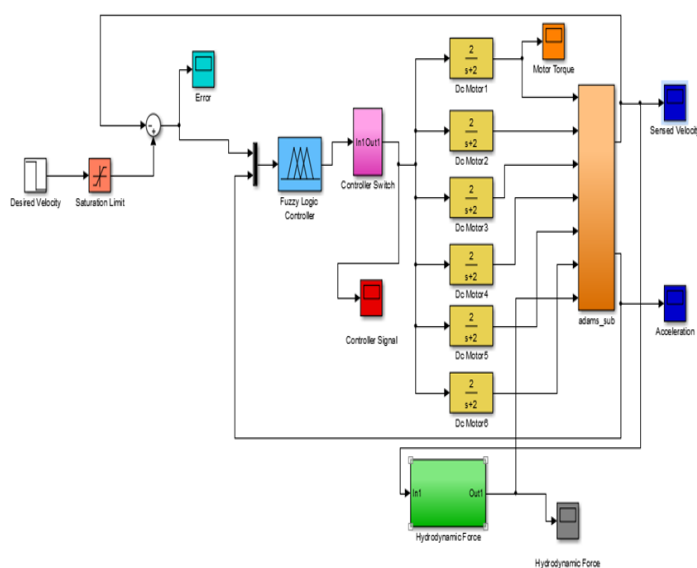
## ۲-۴- مدل‌سازی سیستم کنترلی

به منظور طراحی سیستم کنترلی ربات، ابتدا در بخش سیمولینک از نرم‌افزار متلب یک بلوک دیاگرام حلقه بسته مطابق شکل (۵) ترسیم شد.

بخش‌های مختلف این بلوک دیاگرام عبارتند از: (۱) ورودی مطلوب: در این قسمت سرعت مورد نظر برای ربات را در قالب یک تابع استپ تعریف می‌شود. (۲) بلوک محدوده اشباع: این بلوک یک محدوده مشخص برای سرعت ربات را تعیین می‌کند. در صورت درخواست سرعت‌های بالاتر از محدوده تعیین شده از ربات، این بلوک قادر است مقادیر بالاتر و پایین‌تر از حداکثر و حداقل حد تعریف شده را فیلتر نموده و مقادیر اشباع را برگزیند. (۳) بلوک کنترلر سوییچ: این بلوک سبب می‌شود سیگنال خروجی از کنترلر با ایجاد یک وقفه کوتاه به موتور چرخ‌ها برسد و پس از میرا شدن نوسانات ربات در انطباق قطرش با قطر لوله، موتورها روشن شده و ربات شروع به حرکت کند. (۴) بلوک تابع تبدیل موتور جریان مستقیم: با توجه به اینکه موتورهای جریان مستقیم کنترل میدان، برای چرخ‌ها در نظر گرفته شده، در این بلوک بایست ثوابت زمانی الکتریکی و مکانیکی تنظیم گردد. (۵) بلوک نیروی ناشی از سیال: این بلوک اثر جریان سیال درون لوله را بر حرکت ربات بررسی و تنظیم می‌کند، با توجه به رابطه (۳)، نیروی درگ ( $F_{drag}$ ) ارتباط مستقیمی با مجذور سرعت ( $V^2$ ) دارد. در این رابطه  $A_r$  سطح مقطع ربات بوده که می‌توان آن را استوانه در نظر گرفت و با توجه به ابعاد هندسی بدنه ربات قابل محاسبه است و  $\rho$  چگالی سیال و  $C_d$  نیز ضریب درگ است.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 A_r \quad (3)$$

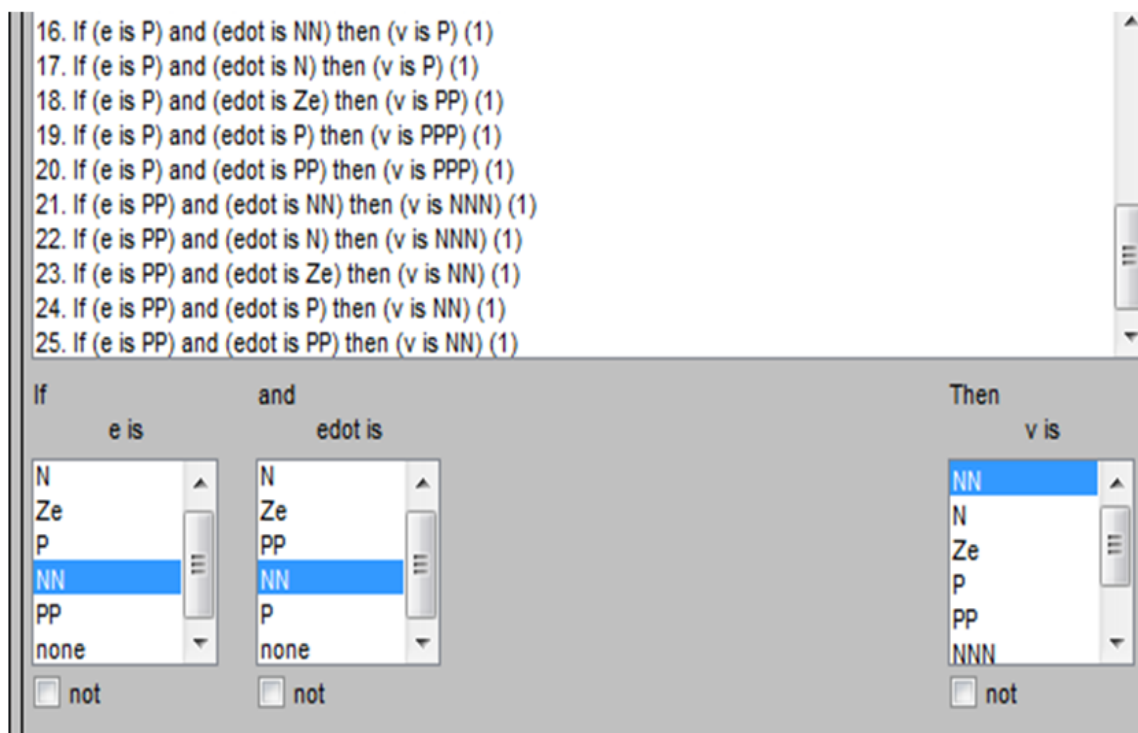
از این‌رو با فیدبک گرفتن از سرعت لحظه‌ای ربات، این نیرو از طریق توابع استپ و در قالب یک اغتشاش در یک بازه زمانی مشخص اعمال می‌گردد. (۶) بلوک کنترلر فازی: در این بلوک از منطق فازی برای طراحی کنترلر کمک گرفته شده است تا ربات بتواند سرعت خواسته شده را برآورده نماید. جهت طراحی کنترلر فازی از جعبه ابزار فازی نرم‌افزار متلب استفاده شد. این کنترلر دارای دو ورودی و یک خروجی می‌باشد.



شکل ۵- طراحی سیستم کنترلی ربات

جدول ۳- مفهوم عبارات خلاصه ذکر شده در قوانین فازی

| عبارت خلاصه | مفاهیم مربوطه          |
|-------------|------------------------|
| NNN         | Negative Very Very Big |
| NN          | Negative Very Big      |
| N           | Negative Big           |
| Ze          | Zero                   |
| P           | Positive Big           |
| PP          | Positive Very Big      |
| PPP         | Positive Very Very Big |



شکل ۶- قوانین فازی سیستم کنترلی ربات

اختلاف سرعت مطلوب و سرعت واقعی حرکت ربات (خطا) (e) و آهنگ تغییر آن (شتاب) (ė) به عنوان ورودی و ولتاژ موتورهای جریان مستقیم به عنوان خروجی سیستم می‌باشند. در این سیستم از استنتاج ممدانی استفاده شده است. در تعریف سیستم کنترل فازی باید توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم مشخص شود. لذا در طراحی سیستم کنترل فازی برای توابع عضویت ورودی هر یک از ۵ فازی ساز مثلثی و جهت توابع عضویت خروجی نیز از ۵ فازی ساز مثلثی دیگر استفاده شده است.

در جدول (۳) عبارات مختصر ذکر شده برای تعریف متغیرهای زبانی آورده شده است. قوانین فازی تهیه شده براساس متغیرهای زبانی تعریف شده در جدول (۳) و به صورت ۲۵ قانونه نوشته شده است. نمونه‌ای از این قوانین در شکل (۶) بیان شده است.

مبنای تهیه قوانین فازی نوشته به این صورت می‌باشد که اگر مثلاً مقدار خطا ( $e = v_d - v_{act}$ ) منفی خیلی زیاد باشد (PPP) (یعنی سرعت ربات از سرعت مطلوب به مقدار زیادی بیشتر است) و مقدار شتاب هم منفی خیلی زیاد باشد (NNN) (آهنگ تغییر سرعت هم خیلی زیاد می‌باشد و مدام سرعت واقعی ربات در حال بیشتر شدن می‌باشد) کنترلر باید ولتاژ موتورها را خیلی کم کند تا گشتاور چرخ‌ها کم شود و سرعت ربات بتواند به سرعت مطلوب خواسته شده برسد. سایر قوانین به‌طریق مشابه قابل تفسیر هستند.

به منظور اجرای فرآیند شبیه‌سازی حرکت ربات درون لوله‌ها در شرایط مختلف مدل‌سازی و با استفاده از کنترلر فازی، باید نوع حلگر و روش حل در سیستم کنترلی تعریف شده در بخش سیمولینک نرم‌افزار متلب مشخص شود. در این راستا نخست حلگرهای پیوسته مدنظر قرار گرفتند. زیرا مراحل و حالت‌های حرکت ربات درون لوله پیوسته بوده و سیستم دارای گسستگی زمانی نمی‌باشد. ثانیاً حلگرهایی با گام زمانی متغیر مدنظر بودند؛ زیرا این موضوع سبب می‌شود در مواقعی که ربات با شرایط هندسی جدید درون لوله (نظیر وجود ردیوسر، زانویی، سطح ناهموار و غیره) مواجه می‌شود، گام‌های زمانی حل برای افزایش دقت محاسبات کاهش یابند و نیز هنگامی که شرایط حرکت ربات درون لوله عادی است، برای اجتناب از محاسبات غیرضروری گام‌های زمانی افزایش و زمان انجام شبیه‌سازی کاهش یابد.

با انجام سعی و خطا از بین حلگرهای پیوسته دارای گام زمانی متغیر، حلگر ode15s انتخاب گردید که نتایج آن در شبیه‌سازی‌ها مطلوب بود. در ادامه به منظور مدل‌سازی سیستم کنترلی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی ربات، سیستم کنترلی برای ربات به‌گونه‌ای تغییر داده شده تا در صورت قطع شدن تماس هر یک از چرخ‌ها با جداره لوله، گشتاور آن چرخ صفر شده و کنترلر ولتاژ این چرخ را به چرخ‌های دیگر بدهد و از هدر رفتن انرژی جلوگیری کرده و انرژی مصرفی کل ربات را بهینه نماید.

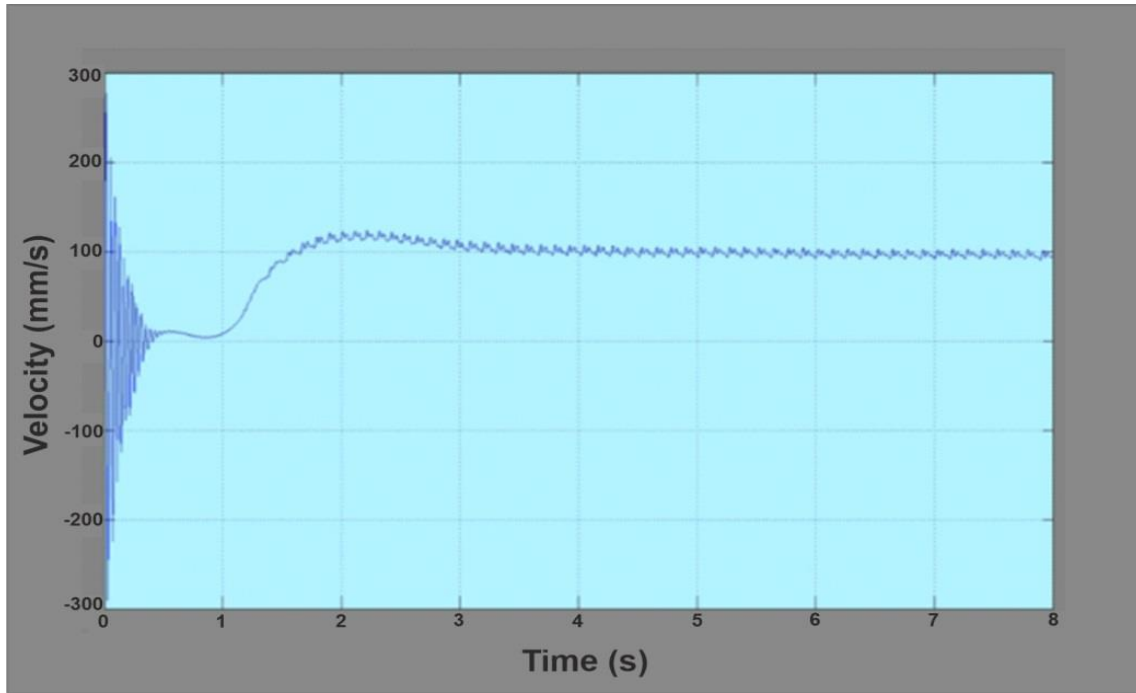
### ۳- شبیه‌سازی ربات و نتایج تحقیق

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بیان شده است. در ابتدا برای لوله مستقیم و فاقد تغییر شکل هندسی شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب صورت گرفته است. نتایج کار از حرکت ربات درون لوله و انطباق آن بر سرعت خواسته شده حکایت دارد. همانطور که در نمودار سرعت ارائه شده در شکل (۷) مشاهده می‌شود وجود پرش و نوسان در بازه ابتدایی به علت وجود فنر در سیستم است و از زمانی که ربات رها می‌شود تا موقعی که خودش را با قطر لوله منطبق کند و چرخ‌ها با دیوارها تماس پیدا کنند این نوسان وجود دارد.

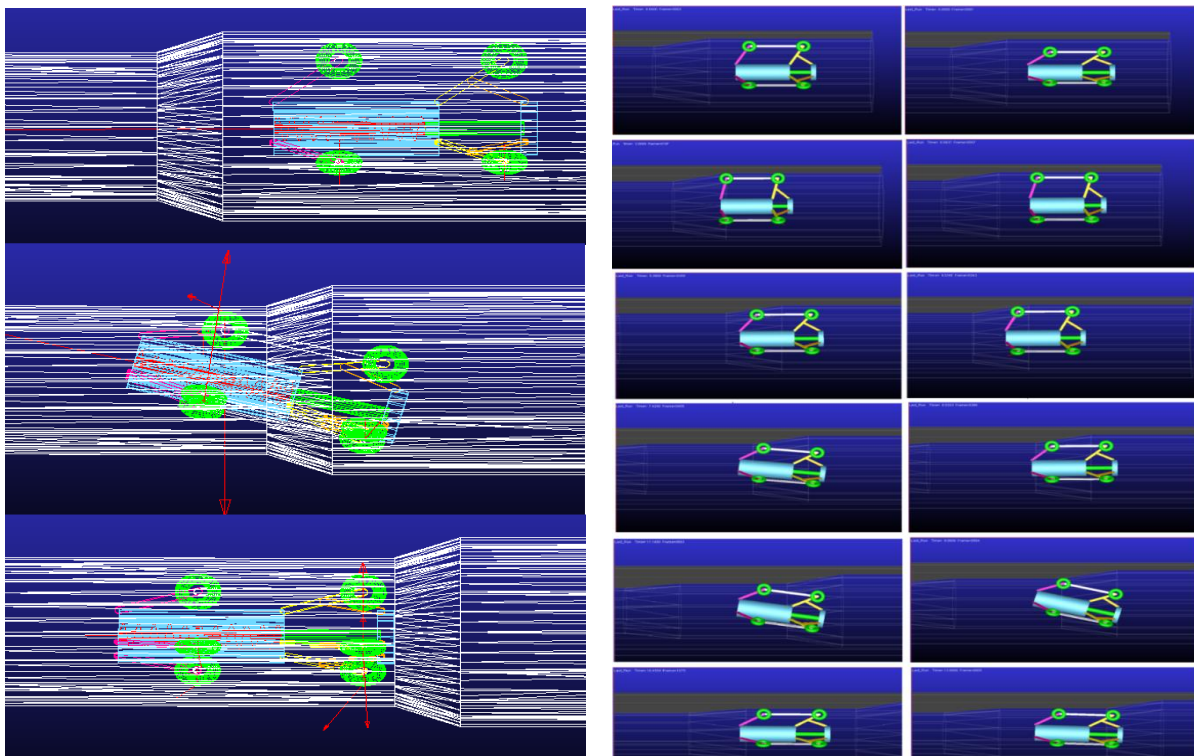
#### ۳-۱- عبور از کاهنده

برای حالتی که ربات باید از لوله دارای کاهنده عبور کند نیز شبیه‌سازی انجام شده است در کاهنده مورد آزمایش، ابتدا لوله با دو اتصال کاهنده به حداقل قطر می‌رسد و پس از آن با دو اتصال دیگر کاهنده-افزاینده، قطر آن به حداکثر مقدار افزایش می‌یابد. سرعت ربات در این مرحله، به صورت ثابت و برابر با ۹۰

درجه بر ثانیه قرار داده شده است، با این تفاوت که این سرعت از زمان  $t=0.5$  ثانیه به بعد اعمال می‌شود تا در طی این مدت ربات با افزایش قطر، خود را با اندازه لوله منطبق کرده باشد و پس از میرا شدن نوسانات شروع به حرکت نماید. با این احتساب، زمان لازم برای عبور از کاهنده ۶۰ ثانیه بوده و تعداد گام‌های شبیه‌سازی برابر با ۶۰۰۰ قرار داده شد (۰/۰۱ ثانیه). نحوه حرکت این ربات از لوله دارای کاهنده در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود ربات بعد از انطباق با کاهنده مجدداً توانسته تعادل خود را حفظ کند و در مسیر پیش‌بینی شده حرکت خود را انجام دهد.



شکل ۷- نمودار سرعت ربات



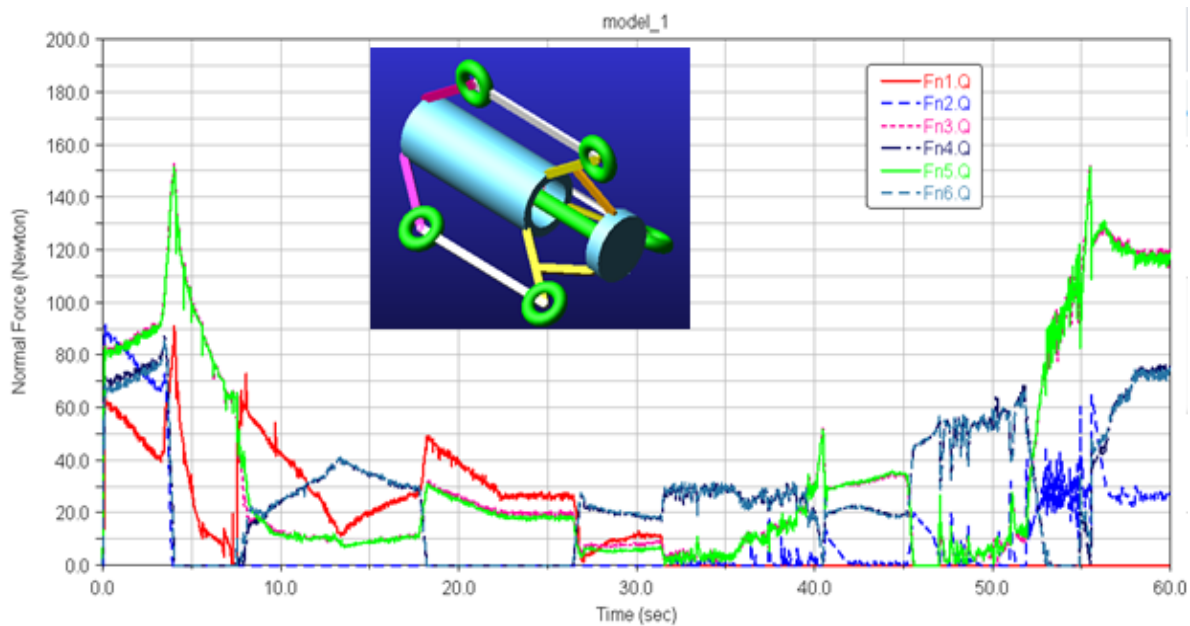
(الف)

(ب)

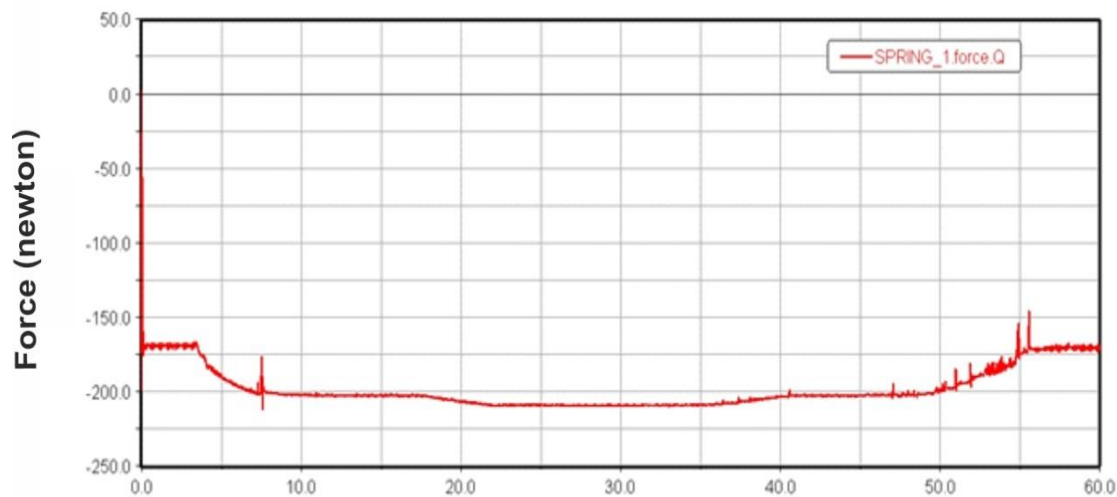
**شکل ۸- الف)** عبور ربات از درون لوله دارای کاهنده (ب) مراحل رد شدن ربات از کاهنده از نمای روبرو شکل (۹) نیروی عمودی وارد بر چرخ‌ها را نشان می‌دهد. چرخ‌های (۱) و (۲) به ترتیب چرخ‌های جلو و عقب بالا، چرخ‌های (۳) و (۴) چرخ‌های جلو و عقب سمت راست و چرخ‌های (۵) و (۶) چرخ‌های جلو و عقب سمت چپ هستند. بر این اساس مشاهده می‌شود که چرخ‌های پایین نسبت به چرخ‌های بالا نیروی عمودی بیشتری را بخاطر وزن اجزا ربات متحمل می‌شوند. همچنین چرخ‌های جلو در مقایسه با چرخ‌های عقب نیز بار بیشتری را متحمل می‌شوند زیرا چرخ‌های جلو ابتدا وارد کاهنده شده و پس از اینکه اهرم‌بندی مکانیزم ربات را با قطر جدید منطبق کرد، بار بیشتری بر روی چرخ‌های جلو می‌افتد. از طرفی، بیشترین مشارکت در حرکت ربات را چرخ‌های جلوی سمت چپ و راست دارند با نیروی عمودی تقریباً مساوی دارند. پیش بار فنر چرخ‌های ربات نیز ۲۰۰ نیوتن و سفتی فنر ۰/۳ نیوتن بر میلی‌متر قرار داده شده است.

مطابق نمودارهای رسم شده در شکل (۱۰)، در ابتدا فنر مکانیزم را جمع می‌کند و نیروی آن به ۱۶۶ نیوتن کاهش می‌یابد اما با عبور از دو کاهنده اول مقدار نیروی فنر بیشتر شده و به ۲۰۸ نیوتن می‌رسد. با عبور ربات از دو کاهنده اول که قطر لوله را از ۳۲" به ۲۴" و سپس ۲۰" می‌رسانند، فنر برای جمع کردن مکانیزم کشیده می‌شود و طول آن مدام افزایش می‌یابد. اما پس از وارد شدن به دو کاهنده دوم که قطر لوله را مجدداً از ۲۰" به ۲۴" و سپس ۳۲" می‌رسانند، فنر طبق نمودار فشرده می‌شود و طول آن مدام کاهش می‌یابد. افزایش سختی فنر می‌تواند باعث شود حرکت ربات در تغییر قطرها با دشواری بیشتری انجام گیرد و طبیعتاً نیروی فنر نیز بیشتر می‌شود. این موضوع در نمودار ارائه شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

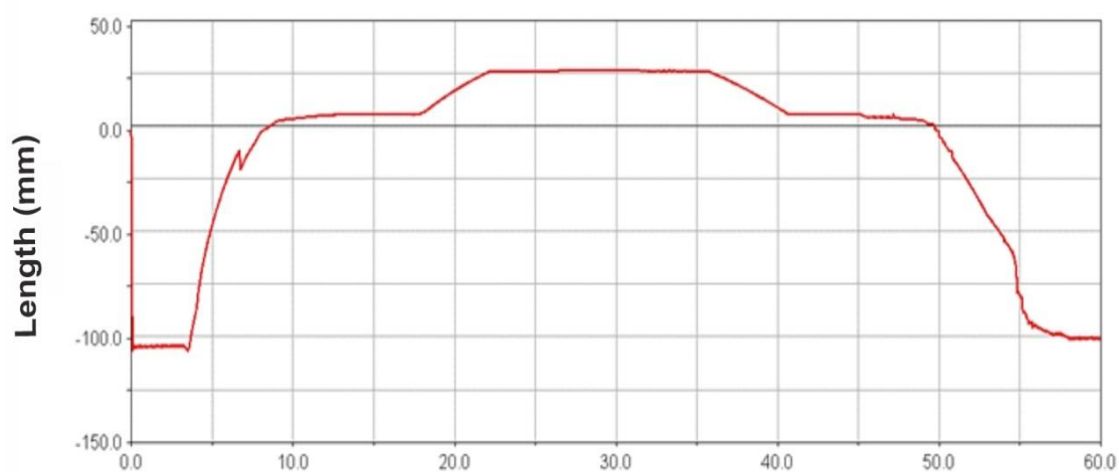
نمودار سرعت حرکت ربات در شکل (۱۱- الف) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود به هنگام عبور لوله از کاهنده سرعت ربات دچار نوساناتی شده که ناشی از جمع شدن و باز شدن فنربندی سیستم ربات جهت انطباق با تغییر قطر است. اما پس از عبور از آن مجدداً توانسته سرعت مطلوب خواسته شده را دنبال کند. شکل (۱۱- ب) نیز مقدار میانگین سرعت و مقدار درصد خطای کنترلر را در تعقیب ورودی در حالت پایدار نشان می‌دهد که بر اساس آن عملکرد کنترلر در سرعت‌های بالاتر در حالت پایدار و مناسب می‌باشد در این شرایط علی‌رغم نوسانی‌تر شدن سرعت ربات، میانگین سرعت و مقدار خطا در مقایسه با لوله مستقیم تقریباً بدون تغییر می‌باشد.



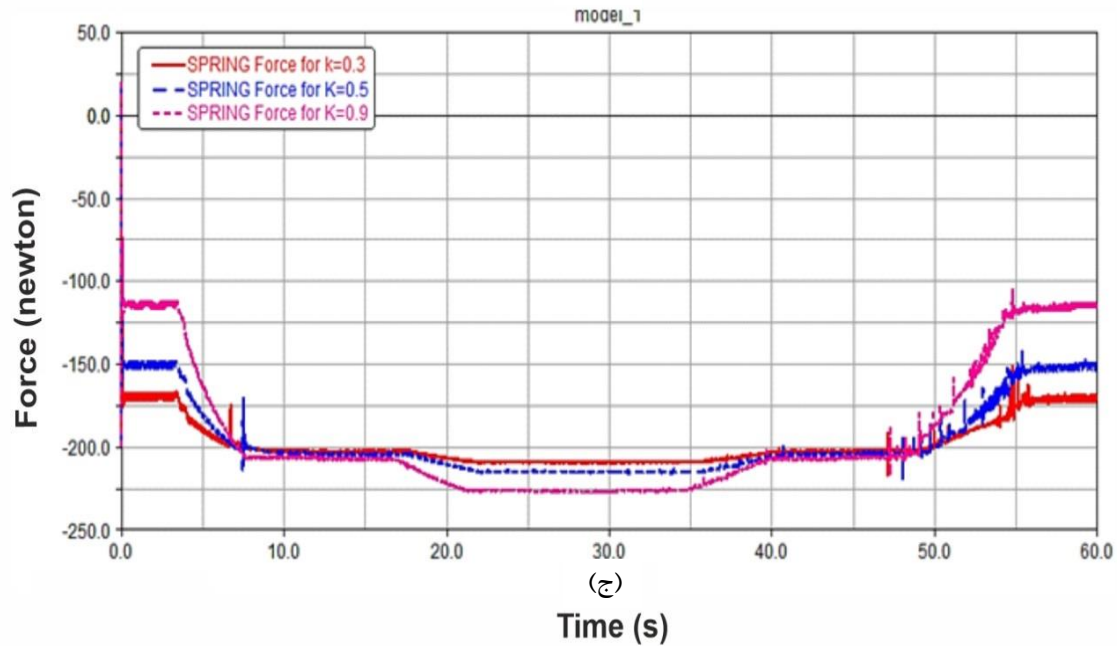
شکل ۹- نیروی عمودی وارد بر چرخها در عبور از کاهنده



(الف)



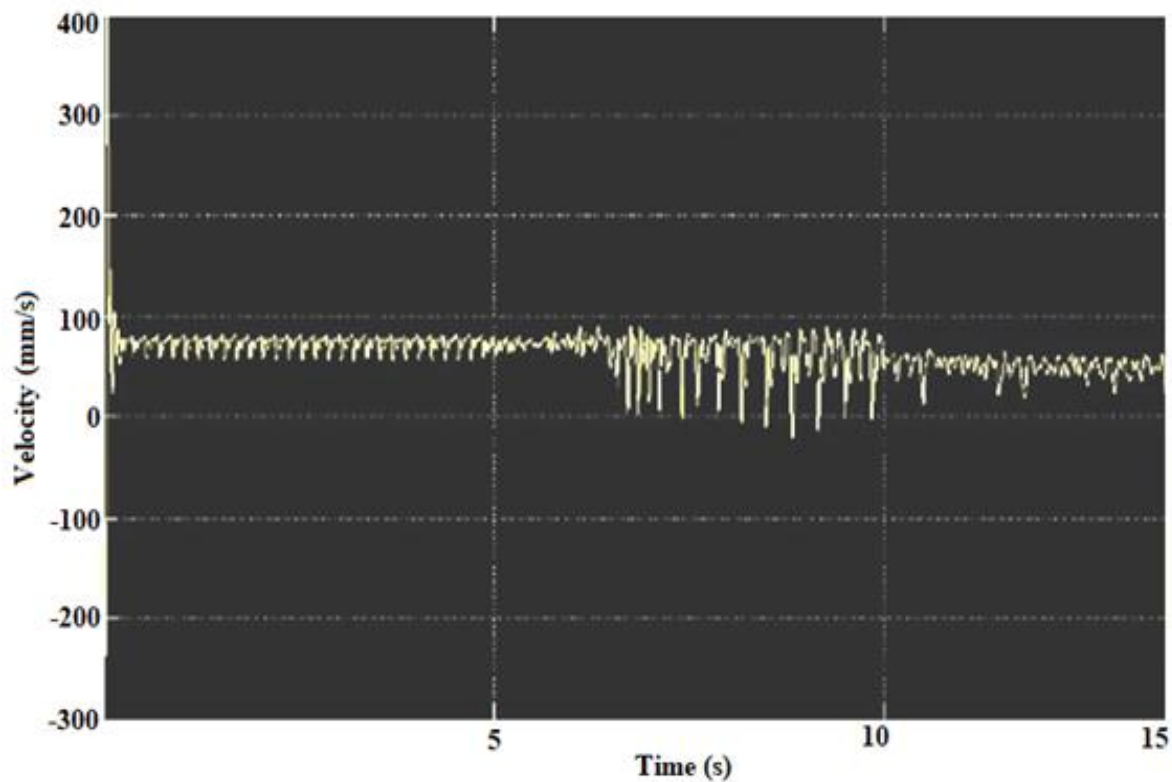
(ب)



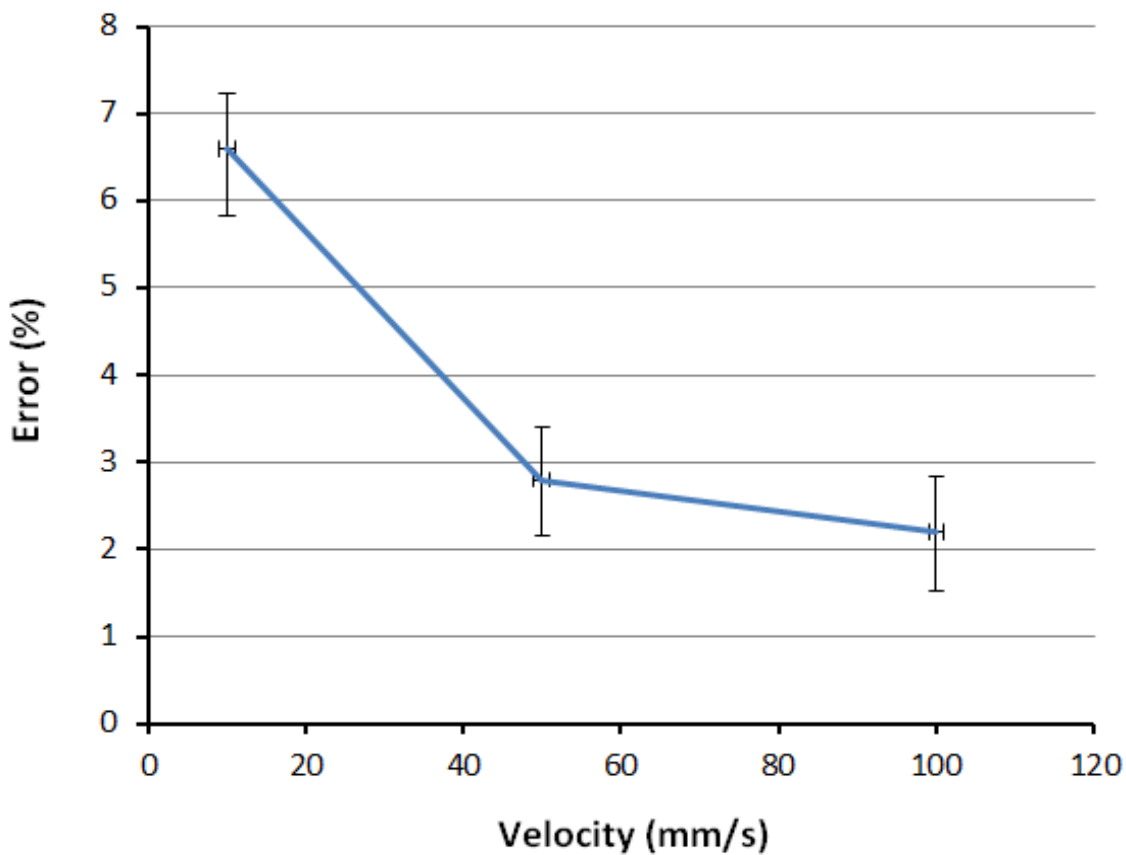
(ج)

Time (s)

**شکل ۱۰- الف)** تغییرات نیروی فنر در عبور از کاهنده، **ب)** تغییرات جایجایی فنر در عبور از کاهنده، **ج)** تغییرات نیروی فنر در عبور از کاهنده به ازای سختی‌های مختلف فنر



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- الف) نمودار سرعت ربات هنگام عبور از کاهنده، ب) میانگین سرعت و مقدار خطا در عبور از کاهنده

### ۳-۲- عبور از زانویی

در پژوهش حاضر عبور ربات از زانویی ۹۰ درجه نیز شبیه‌سازی شد. بین ابعاد هندسی ربات ( $h, w$ )، قطر لوله ( $D$ ) و شعاع انحنای لوله ( $R$ ) در یک خم ۹۰ درجه رابطه زیر برقرار است. برای اینکه ربات در بحرانی‌ترین نقطه عبور از خم (زاویه ۴۵ درجه) گیر نیفتد باید شعاع انحنای لوله حداقل برابر با مقدار زیر باشد:

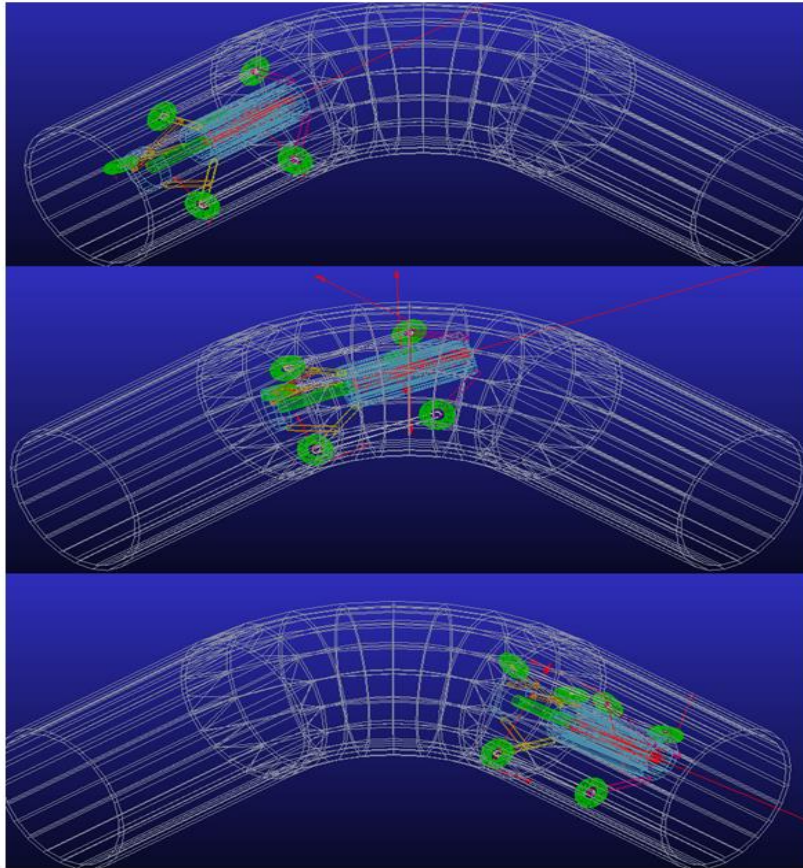
$$R_{\min} = \frac{\frac{h}{2\sqrt{2}} - \frac{D}{2}(1 + \cos(45)) + w \cos(45)}{1 - \cos(45)} \quad (۴)$$

در صورتی که ربات طراحی شده را بصورت یک استوانه در نظر بگیریم، زمانیکه مکانیزم تغییر قطر ربات کاملاً جمع شده باشد ابعاد ربات برابر با  $w=480$  و  $h=823$  بود. در نتیجه برای اینکه ربات در بحرانی‌ترین نقطه عبور از خم (زاویه ۴۵ درجه) گیر نیفتد، شعاع انحنای لوله حداقل برابر با  $R_{\min} = 763\text{mm}$  برآورد شد و در شرایطی که مکانیزم تغییر قطر کاملاً باز بود و ربات به حداکثر قطر خود رسید، ابعاد ربات برابر با  $h=663$  و  $w=800$  بود. در این حالت مقدار حداقل شعاع انحنای لوله برابر با مقدار  $R_{\min} = 408\text{mm}$  بدست آمد. برای مقادیر مختلف قطر لوله مورد آزمایش مقدار حداقل شعاع انحنای بین این دو مقدار حدی بود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت ربات طراحی شده قابلیت عبور از خم‌ها و زانویی‌هایی با شعاع انحنای بین ۴۰۸ میلی‌متر تا ۷۶۳ میلی‌متر را دارا می‌باشد و تا زمانیکه شعاع انحنای بین این دو مقدار حدی باشد ربات به راحتی امکان عبور از خم‌ها و زانویی‌های در طول مسیرش را خواهد داشت.

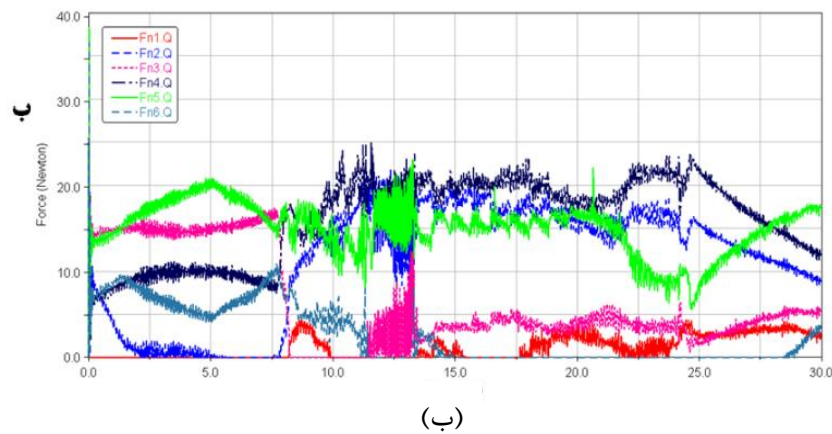
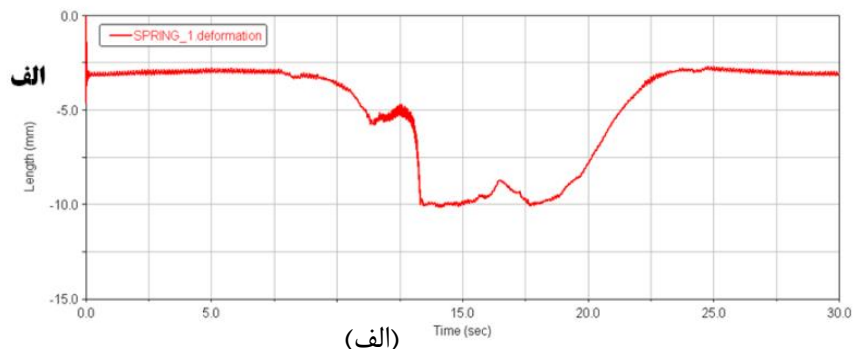
در لوله مورد آزمایش، قطر لوله و ربات برابر با  $w=D=650$  میلی‌متر است و طول ربات  $h=796$  میلی‌متر است. در نتیجه از رابطه فوق حداقل شعاع انحنای مسیر  $R_{\min} = 645\text{mm}$  بدست آمد که بین دو مقدار حدی ذکر شده بود. با در نظر گرفتن سرعت ۹۰ درجه بر ثانیه، زمان لازم برای عبور از کاهنده ۳۰ ثانیه برآورد شد و تعداد گام‌های شبیه‌سازی برابر با ۳۰۰۰ قرار داده شد (اندازه گام‌ها ۰/۰۱ ثانیه). همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود ربات مذکور توانسته با صحت کامل و بدون گیر افتادن و با حفظ تعادل از درون زانویی ۹۰ درجه نیز عبور کند.

طبق نمودار ارائه شده در شکل (۱۳-الف)، حداکثر مقدار تغییر جابجایی فنر در حدود ۱۰ میلی‌متر است. این نشان می‌دهد که ربات تقریباً بدون تغییر اهرم بندی خود قادر به عبور از زانویی بوده است و نتایج بدست آمده از رابطه حداقل شعاع انحنای چرخش قابل قبول می‌باشد. در نمودار ارائه شده در شکل (۱۳-ب) نیز ملاحظه می‌شود که برخی از چرخ‌ها در بخش‌هایی از مسیر حرکت، تماسشان را با جداره لوله از دست داده و مشارکت کمتری در حرکت رو به جلوی ربات دارند.

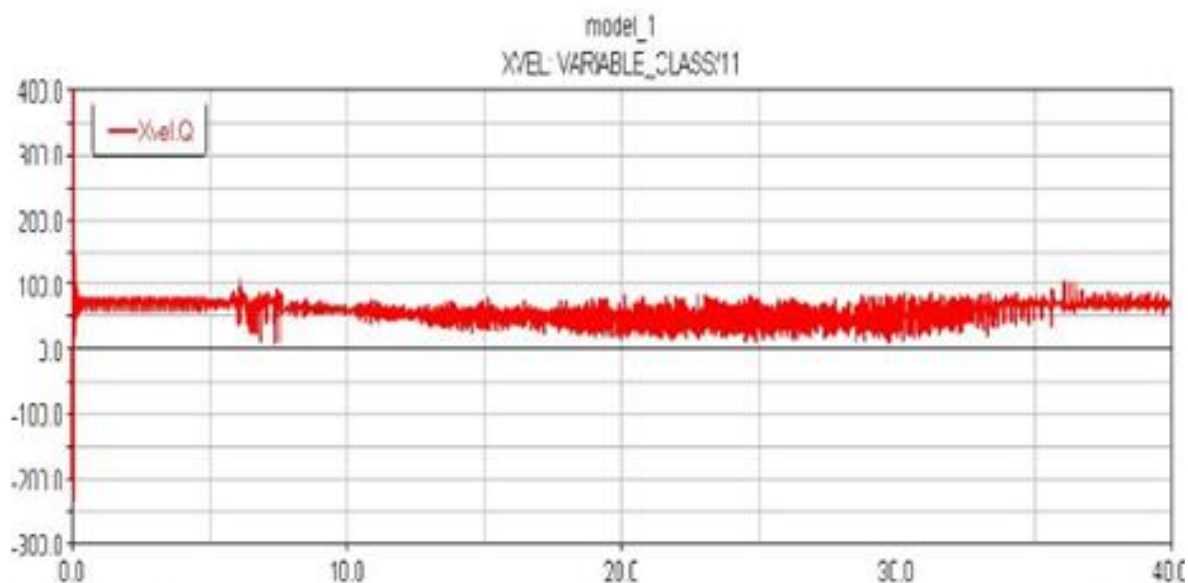
نمودار سرعت حرکت ربات هنگام عبور از زانویی ۹۰ درجه نیز در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود برای شبیه‌سازی حرکت ربات در این حالت به زمان بیشتری نیاز است. مشابه کاهنده هنگام عبور ربات از درون زانویی نیز سرعت ربات با نوساناتی روبه رو بوده که بیانگر تلاش ربات برای انطباق با تغییر شرایط هندسی مسیر حرکتش می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود سرعت ربات با دقت خوبی بر مقدار سرعت خواسته شده منطبق شده است.



شکل ۱۲- عبور ربات از زانویی ۹۰ درجه



شکل ۱۳- الف) تغییرات جابجایی فنر در عبور از زانویی ۹۰ درجه، ب) تغییرات نیروی عمودی وارد بر چرخها در عبور از زانویی



شکل ۱۴- نمودار سرعت حرکت ربات در عبور از رانویی ۹۰ درجه

### ۳-۳- عبور از لوله عمودی

در این بخش توانایی ربات در عبور از لوله عمودی بررسی شد. شکل لوله مورد آزمایش یک خم نود درجه در صفحه x-y بود که لوله افقی را به لوله عمودی در جهت y متصل کرده بود. همانگونه که در شکل (۱۵) مشخص است، ربات پس از گذر از خم با استفاده از مکانیزم انطباق با لوله، چرخ‌ها را به دیواره لوله فشرده می‌کند و باعث می‌شود نیروی عمودی روی چرخ‌ها، نیروی کشش لازم برای عبور ربات از لوله عمودی را تأمین کند. در حرکت عمودی نیروی فشاری بیشتری روی فنر لازم است. بر اساس مدل بدست آمده در تحلیل نیرویی مکانیزم ربات، بین نیروی فنر و نیروی کشش مورد نیاز برای حرکت ربات رابطه زیر برقرار می‌باشد:

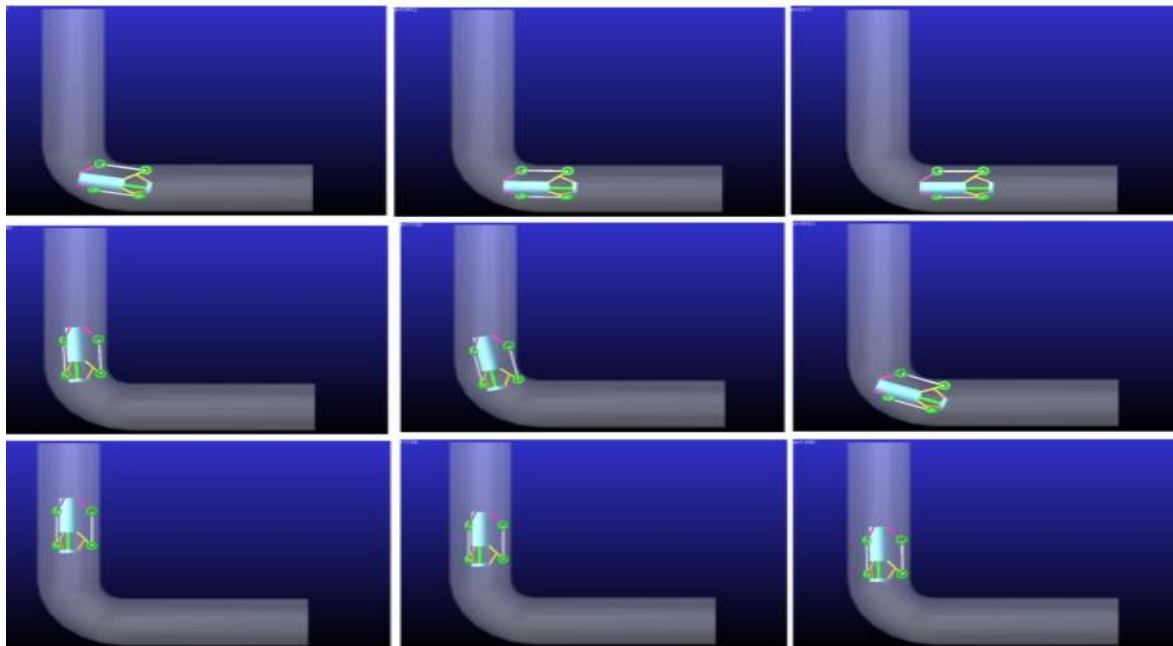
$$k_1 = \frac{L_1(R-r-h)}{L} \left( \frac{1}{\sqrt{L^2 - (R-r-h)^2}} + \frac{L_1}{\sqrt{L^2 L_2^2 - L_1^2 (R-r-h)^2}} \right) F = \frac{1}{k_1} (\Sigma N + \Sigma P) = \frac{1}{k_1 \mu} F_T \quad (5)$$

که رابطه بین نیروی فنر  $F$ ، نیروی کشش مورد نیاز  $F_T$ ، ضریب اصطکاک  $\mu$  و پارامترهای هندسی ربات را بیان می‌کند. در حالت لوله عمودی، نیروی کشش مورد نیاز ربات برابر با وزن ربات بود. در نتیجه رابطه بدست آمده، نیروی فنر مورد نیاز برای تأمین کشش لازم جهت بالا رفتن ربات را به اینصورت پیش‌بینی می‌کند (وزن ربات طراحی شده ۸۳۰ گرم می‌باشد).

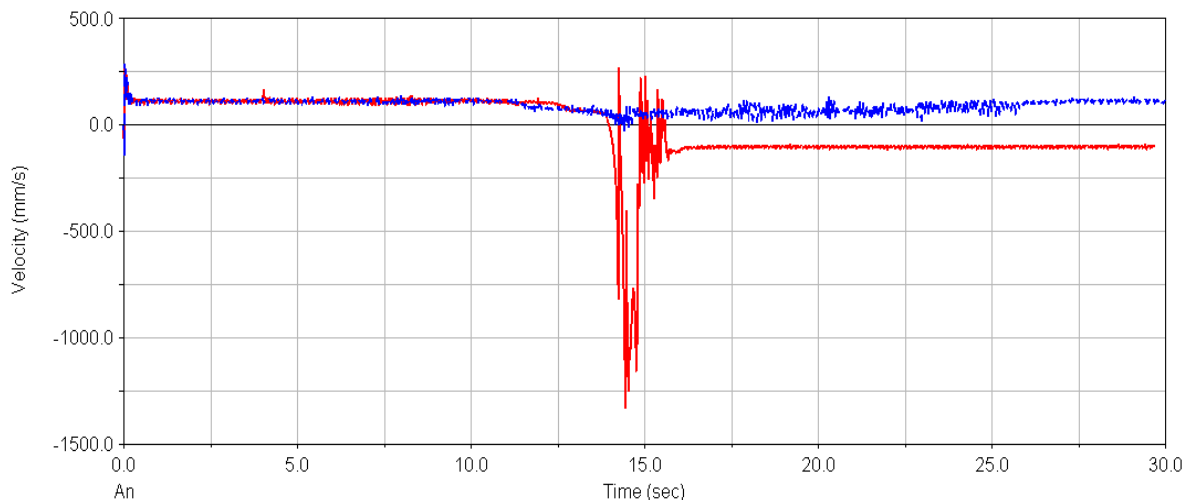
$$F_T = 0.83 * 9.81 = 8.1(N) \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{0.63 * 0.6} * 8.1 = 21.4(N) \quad (7)$$

بر این اساس، حداقل نیروی پیش بار فنر برای بالا رفتن ربات طراحی شده در لوله عمودی، به میزان  $21/4$  می‌باشد و در صورتی که مقدار پیش بار فنر، کمتر از این مقدار باشد، ربات قادر به بالا رفتن از لوله عمودی نخواهد بود. برای بررسی صحت این نتیجه دو شبیه‌سازی مختلف یکی با نیروی پیش بار فنر  $22$  نیوتن و دیگری با نیروی پیش بار فنر  $20$  نیوتن انجام شد. به ازای پیش بار  $22$  نیوتنی ربات به راحتی توانسته از لوله عمودی عبور کند، اما به ازای پیش بار  $20$  نیوتنی، ربات در نیمه راه خم برگشته و قادر به بالا رفتن از لوله عمودی نبود. شکل (۱۶) تغییرات سرعت به ازای دو مقدار پیش بار  $20$  نیوتن (نمودار قرمز رنگ) و  $22$  نیوتن (نمودار آبی رنگ) را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است سرعت ربات در حالت  $20$  نیوتن پس از رسیدن به نیمه راه منفی شده و ربات به عقب برمی‌گردد در حالی که به ازای نیروی  $22$  نیوتن بصورت موفقیت آمیز از لوله عمودی بالا می‌رود.



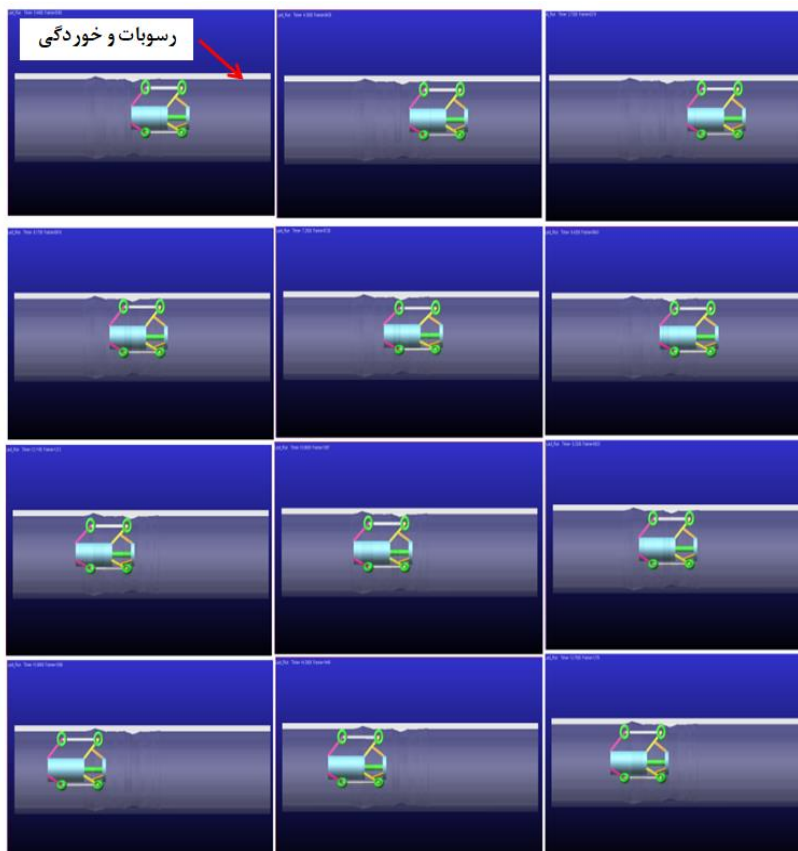
شکل ۱۵- مراحل رد شدن از لوله عمودی از نمای روبرو



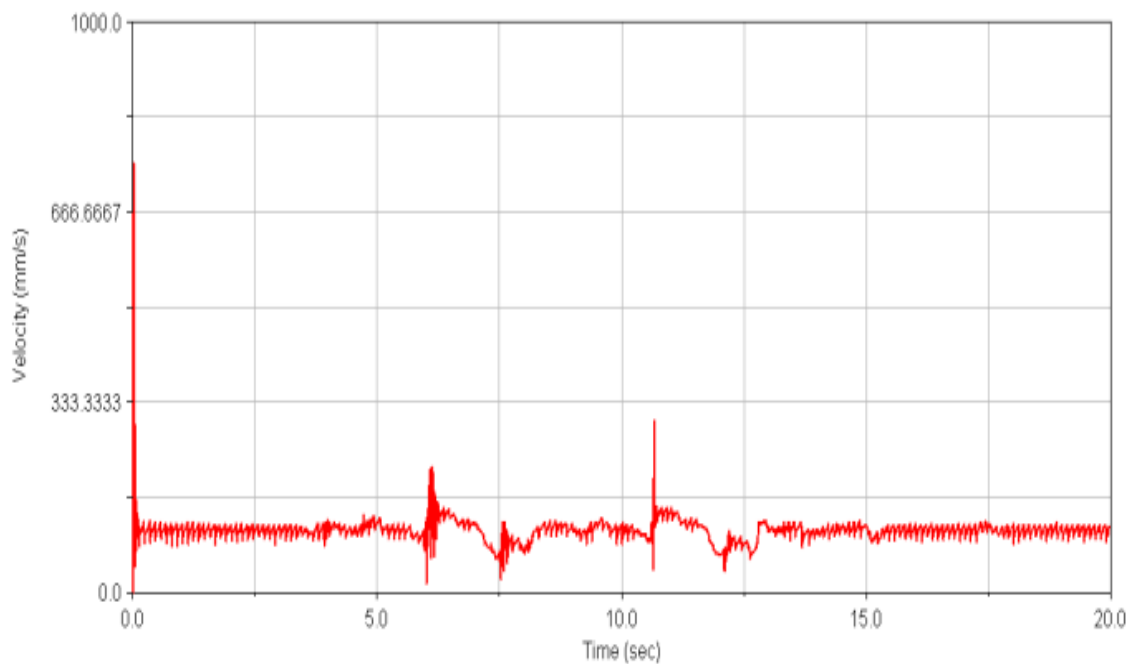
شکل ۱۶- سرعت ربات در لوله عمودی به ازای پیش بار  $22$  و  $20$  نیوتنی

### ۳-۴- عبور از لوله با سطح ناصاف داخلی

در این بخش حرکت ربات درون لوله با سطح ناصاف داخلی بررسی شد.



شکل ۱۷- مراحل حرکت ربات در لوله دارای رسوبات و خوردگی



شکل ۱۸- نمودار سرعت ربات در لوله ناصاف

لوله مورد آزمایش دارای قطر ۶۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و فرض شده در مقطعی، سطح داخلی لوله بصورت توزیع تصادفی دارای خوردگی و یا رسوبات باشد. حداکثر عمق خوردگی و ضخامت رسوبات لوله برابر با ۵۰٪ ضخامت لوله در نظر گرفته شده است. پروفایل لوله و مراحل عبور ربات از لوله دارای رسوبات و خوردگی و نمودار سرعت ربات در طی حرکت درون لوله در شکل‌های (۱۷) نشان داده شده است.

همان‌گونه که از شکل (۱۸) تغییرات سرعت ربات مشخص است، ربات با توجه به داشتن مکانیزم تغییر قطر غیرفعال و به کمک پیش بار فنر، توانسته بدون گیر افتادن در ناهمواری‌های سطح لوله با سرعت تقریباً پایایی به حرکت خود تا پایان ادامه می‌دهد. در طول حرکت و حتی در شرایط اولیه که سطح لوله صاف است نوسانات سرعت مشاهده می‌شود که علت عمده آن محرک بودن تمامی چرخ‌ها با سرعت زاویه‌ای یکسان است.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از ربات‌ها به منظور بازرسی خطوط لوله زیر زمینی و بعضاً شناسایی محل نشتی‌ها، از نیازهای حال حاضر صنایع پتروشیمی، نفت و گاز، آب و فاضلاب و صنایع دریایی کشور می‌باشد، زیرا با توجه به مدفون بودن لوله‌ها توسعه ربات‌هایی که قادر به کاوش در فضای داخلی آنها باشند، به‌عنوان روشی مطمئن، سریع و کم هزینه ضروری است [۲، ۱۸-۲۰]. در این پژوهش یک ربات هفت درجه آزادی چرخ‌دار با مکانیزم انطباق با قطر لوله غیرفعال، طراحی شده و شبیه‌سازی دینامیکی حرکت آن در شرایط هندسی مختلف نظیر لوله مستقیم، لوله دارای کاهنده، زانویی، رسوبات و خوردگی و نیز لوله عمودی انجام شد. هدف از این پژوهش مدلسازی دینامیکی حرکت ربات درون لوله‌های دارای شرایط هندسی متغیر و تأمین سرعت خواسته شده از ربات بود که همانطور که در بخش نتایج دیده شد ربات طراحی شده توانست از درون لوله‌های معمولی و همچنین لوله‌های دارای تغییر قطر و دارای زانویی ۹۰ درجه عبور کند. وجود نوسان در سرعت ربات در هنگام عبور از تغییر شرایط هندسی مسیر حرکت آن طبیعی بنظر می‌رسد و نشانه صحت عملکرد ربات و بیانگر انطباق با هندسه مسئله است. با این حال، نتایج بدست آمده مؤید عملکرد بهتر کنترلر فازی در تعقیب سرعت‌های بالا و پاسخ‌گذاری بهتر در این سرعت‌ها بوده است، هرچند عملکرد بهینه آن هنگام به‌کارگیری در لوله مستقیم نسبت به لوله دارای ردیوسر مشهود است. از سویی دیگر، با توجه به غیر فعال بودن مکانیزم و استفاده از فنر، اهمیت تنظیم پیش بار فنر به گونه‌ای که ربات در لوله واژگون نشود و توانایی عبور از لوله عمودی را داشته باشد به صورت مجزا در این تحقیق بررسی شده است. همچنین به محدودیت ربات در عبور از لوله‌های استاندارد با قطر لوله ۲۰ اینچ تا ۳۲ اینچ و همچنین محدودیت ربات در عبور از خم‌ها و زانویی‌ها با شعاع انحناء بین ۴۰۸ میلی‌متر تا ۷۶۳ میلی‌متر اشاره شده است که این موضوع متناسب با ابعاد ربات در هنگام طراحی می‌باشد. همانطور که در نتایج شبیه‌سازی‌ها ذکر شد یک بحث مهم قطع شدن تماس برخی از چرخ‌های ربات با بدنه لوله در هنگام تغییر شرایط هندسی لوله بوده است که با توجه به غیرفعال بودن مکانیزم امری طبیعی به نظر می‌رسد چرا که بعد از تعیین پیش بار فنر و انتخاب جنس فنر و دمپر با سختی و ضریب دمپینگ مشخص، عملاً کنترلی بر روی انطباق ربات با قطر لوله وجود ندارد. اما استفاده از فنر به

جای موتور برای انطباق با قطر لوله هزینه‌ها را در طراحی ربات کاهش داده و به جای خرید یک موتور مجزا و دو کنترلر مجزا یکی برای کنترل مکانیزم انطباق ربات با قطر داخلی لوله و یکی جهت تأمین گشتاور چرخ-های ربات، می‌تواند از یک کنترلر استفاده کند. بعلاوه سیستم کنترلی طراحی شده برای ربات، قادر است سیگنال خروجی کنترلر فازی را به نحوی هدفمند به چرخ‌های ربات ارسال نماید. لذا چرخ‌هایی که در حین حرکت، تماسشان با جداره لوله قطع شده باشد، عملاً سیگنالی دریافت نمی‌کنند و موتورشان خاموش می‌گردد و در مقابل، چرخ‌هایی که مشارکت بیشتری در حرکت ربات دارند، گشتاور بیشتری را دریافت نموده و در نهایت این رویکرد، سبب کاهش قابل توجهی در توان مصرفی ربات و در نتیجه بهینه‌سازی انرژی مصرفی آن می‌گردد و از این منظر دارای پتانسیل‌هایی برای صرفه اقتصادی و ساخت نمونه واقعی خواهد بود. ضمن اینکه علی‌رغم قطع شدن تماس برخی چرخ‌های ربات با بدنه لوله، خلل جدی در حرکت روبه جلوی ربات ایجاد نشده و حرکت ربات در تمامی شرایط هندسی لوله‌ها تضمین شده و ایمن بوده است. اما همانطور که پیشتر اشاره شد، در کاربردهای میدانی، بهره‌گیری از کاهنده در خطوط زیرزمینی نفت و گاز معمولاً به ندرت رخ می‌دهد، لذا با توجه به کمی احتمال وجود تغییرات در قطر لوله‌ها در طول مسیر، به کارگیری رباتی با مکانیزم انطباق با قطر غیرفعال، به نظر منطقی و اقتصادی است. زیرا این ربات می‌تواند با بهره‌گیری از مکانیسم‌های تطبیق‌پذیری با فیزیک لوله، جهت اجرای ماموریت‌های ویژه تعمیراتی، یا تهیه فیلم و عکس در لوله‌های سمی و گاهاً بسیار باریک و پرپیچ و خم نیز کاربردی باشد [۲۰]. از جمله رویکردهای مشابه در جهت تأیید عملیاتی ایده و مدلسازی ربات ارائه شده در مطالعه حاضر، پژوهش پارک و همکاران در سال (۲۰۲۴) است که در زمینه توسعه ربات چرخ‌دار بازرسی درون لوله مجهز به مکانیسم انتقال متغیر پیوسته (CVT)<sup>۱</sup> برای هدایت در لوله‌های عمودی و زانویی در هر دو فاز شبیه‌سازی و میدانی بوده است. سیستم کنترلی این ربات شامل یک موتور هوا، سه مکانیسم CVT و شش چرخ در انتهای شش مکانیسم لغزنده میل‌لنگ (از جمله سه مکانیزم فعال و سه مکانیسم غیرفعال) بوده است. در این ربات میل لغزان و مکانیزم فتر توانسته‌اند نیروی فشار دیواری را از طریق چرخ ایجاد نموده و از لغزش داخل لوله جلوگیری نمایند. این قابلیت به ربات اجازه داده است تا از لوله‌های عمودی بالا برود و با قطر لوله‌های مختلف سازگار شود. بعلاوه با ترکیب مکانیسم‌های CVT، که نسبت سرعت آنها بین راننده و قرقره‌های راننده به صورت غیرفعال توسط موقعیت لغزنده تنظیم می‌شود، ربات به کنترل مستقل و پیوسته سرعت برای هر چرخ دست یافته است و امکان هدایت درون لوله‌ها را با هندسه‌های مختلف، مانند لوله‌های منحنی مستقیم، تنها با استفاده از یک موتور امکان‌پذیر ساخته است. از آنجایی که در این ربات کنترل فعال هر چرخ مورد نیاز نبوده، پیچیدگی-های کنترل‌کننده نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته بود. به نحوی که این ربات توانسته به‌طور مؤثر لوله‌های منحنی را با حداکثر سرعت ۱۷/۵ میلی‌متر بر ثانیه و حداکثر نیروی کشش ۵۶/۸۴ نیوتن هدایت و پیمایش نماید [۲۰]. در رویکردی متفاوت با تحقیق حاضر، کدخدایی و قاسمی (۱۳۹۵) نیز یک ربات زیر سطحی را برای بازرسی خطوط انتقال نفت و گاز در زیر دریا طراحی و شبیه‌سازی نموده‌اند که با داشتن چهار تراستر با بردار رانش دوار و متغیر توانسته به‌طور همزمان شش درجه آزادی را کنترل نموده و در تعقیب مسیر مطلوب از سیستم دو سرو موتور متعامد به منظور جهت‌گیری مستقل تراسترها بهره‌برد [۱۹].

<sup>۱</sup>Continuously Variable Transmission (CVT)

وندی و وهابی (۱۳۹۷) نیز در مدل‌سازی ربات راه رونده ۶ درجه آزادی و با ۷ رابط در سه قسمت پای ثابت، پای متحرک و پاندول بالاتنه، به کمک نرم‌افزارهای آدامز و متلب کنترلر تطبیقی غیرخطی ربات را مبتنی بر سینماتیک معکوس به روش مثلثاتی و دینامیک معکوس به روش الگوریتم تکراری نیوتن اولیبر محاسبه نمودند که نتایج محاسباتی آنها نشان داده است که کنترلر تطبیقی به خوبی پارامترهای ناخواسته نظیر خطای ساخت، تفرانس‌های طول و جرم رابط‌ها و شکل هندسی رابط‌های ربات را تخمین زده و ضمن ارائه سرعت و دقت بالای محاسباتی، حداکثر گشتاور مورد نیاز برای کنترل کلیه مفصل‌ها را با احتساب عوامل موثر ناخواسته محاسبه نموده است [۲۱].

از منظر چشم‌اندازهای آتی، تیم تحقیقاتی این پژوهش برآنند که از طریق بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های مربوطه دقت نتایج را ارتقاء بخشند و حرکت ربات را در سایر شرایط هندسی نظیر انشعابات نیز محاسبه و ارزیابی نمایند. بعلاوه بهره‌گیری از ارتباطات بی‌سیم [۲۲، ۲۳]، فرکانس‌های رادیویی [۲۴]، الگوپذیری از رویکرد مکان‌یابی و نقشه‌برداری به‌هنگام (SLAM) (که مبتنی بر استفاده از چندین حسگر PSD در هر ماژول ربات درون لوله برای تخمین میزان مسافت طی‌شده (کیلومتر شماری) و موقعیت‌یابی ربات متناسب با شکل لوله‌ها است) [۲۵، ۲۶]، مکان‌یابی اکوآکوستیک [۲۷، ۲۸] و بازرسی هوشمند از راه دور [۲۳، ۲۹]، از دیگر رویکردهای پیش‌روی، جهت توسعه و ارتقای این ربات خواهد بود.

## سپاسگزاری

از کلیه مسئولین و همکاران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز برای فراهم نمودن فضای آموزشی مناسب و امکانات پژوهشی جهت اجرای این تحقیق، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

## مراجع

- [1] D. Lee, J. Park, D. Hyun, G. Yook, and H.-S. Yang, "Novel Mechanisms and Simple Locomotion Strategies for an In-pipe Robot that Can Inspect Various Pipe Types," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 56, pp. 52-68, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2012.05.004>.
- [2] B. John, and M. Shafeek, "Pipe Inspection Robots: A Review," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Second Global Conference on Recent Developments in Computer and Communication Technologies (GC-RDCT 2022) 27/07/2022 - 29/07/2022, Mangalore, India, Vol. 1272, No. 1: IOP Publishing, p. 012016, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1272/1/012016>.
- [3] G. A. Bekey, "Autonomous Robots: from Biological Inspiration to Implementation and Control", MIT Press, Hardcover, 577 pages, 2005, ISBN 0262025787.
- [4] S. S. Ge, and F. L. Lewis, "Autonomous Mobile Robots: Sensing, Control, Decision Making and Applications," Automation and Control Engineering, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2006, <https://doi.org/10.1201/9781315221229>.

- [5] C. Rusu, and M. O. Tatar, "Adapting Mechanisms for In-pipe Inspection Robots: A Review," *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 12, p. 6191, 2022, <https://doi.org/10.3390/app12126191>.
- [6] T. Okada, and T. Sanemori, "MOGRER: A Vehicle Study and Realization for In-pipe Inspection Tasks," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 6, pp. 573-582, 1987, <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087149>.
- [7] Y. Kawaguchi, I. Yoshida, H. Kurumatani, T. Kikuta, and Y. Yamada, "Internal Pipe Inspection Robot," in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1: IEEE, pp. 857-862, 21-27 May, 1995, Nagoya, Japan, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1995.525390>.
- [8] J. Park, D. Hyun, W.-H. Cho, T.-H. Kim, and H.-S. Yang, "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, 2010, <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2095392>.
- [9] A. M. Bertetto, and M. Ruggiu, "In-pipe Inch-worm Pneumatic Flexible Robot," in *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Proceedings (Cat. No. 01TH8556)*, Vol. 2: IEEE, pp. 1226-1231, 08-12 July, 2001, Como, Italy, <https://doi.org/10.1109/AIM.2001.936886>.
- [10] W. Neubauer, "A Spider-like Robot That Climbs Vertically in Ducts or Pipes," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, Vol. 2: IEEE, pp. 1178-1185, 12-16 September, 1994, Munich, Germany, <https://doi.org/10.1109/IROS.1994.407465>.
- [11] Z. Hu, and E. Appleton, "Dynamic Characteristics of a Novel Self-drive Pipeline Pig," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 5, pp. 781-789, 2005, <https://doi.org/10.1109/TRO.2005.852258>.
- [12] Y. Zhang, and G. Yan, "In-pipe Inspection Robot with Active Pipe-diameter Adaptability and Automatic Tractive Force Adjusting," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 42, No. 12, pp. 1618-1631, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2006.12.004>.
- [13] T. Miyagawa, and N. Iwatsuki, "Characteristics of In-pipe Mobile Robot with Wheel Drive Mechanism using Planetary Gears," in *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, IEEE, pp. 3646-3651, 05-08 August, 2007, Harbin, China, <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4304152>.
- [14] J. Alizadeh Niaki, and M. Maghsodi Akbari, "*The Principles and Theory of Industrial Piping*," PIPING, 1<sup>st</sup> Ed., Positive Publications, Tehran, 2017.
- [15] F. Esmailzadeh, D. Mola, and M. Asemani, "Modeling of Ball-running Operations in Gas Pipelines," *The 10<sup>th</sup> National Congress of Chemical Engineering of Iran, Shiraz*, 2005.
- [16] H. Qi, X. Zhang, H. Chen, and J. Ye, "Tracing and Localization System for Pipeline Robot," *Mechatronics*, Vol. 19, No. 1, pp. 76-84, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.06.001>.

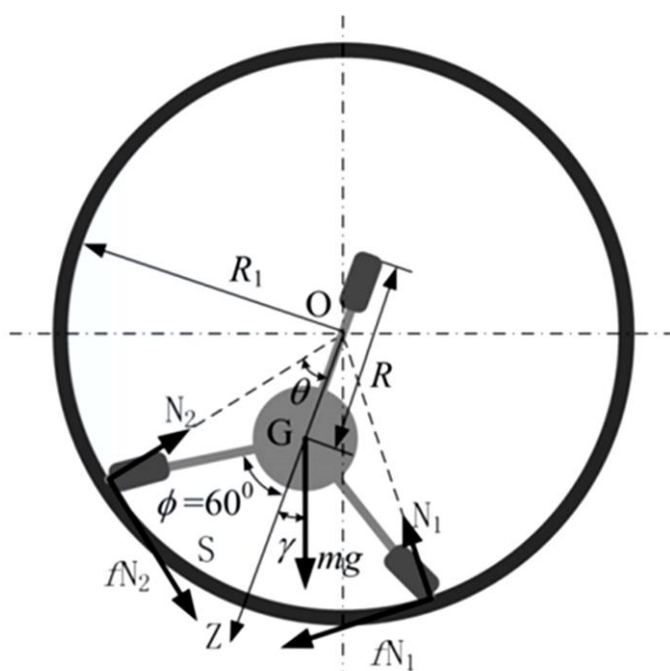
- [17] K. H. Koh, M. Farhan, K. P. C. Yeung, D. C. H. Tang, M. P. Y. Lau, P. K. Cheung, and K. W. C. Lai, "Teleoperated Service Robotic System for On-site Surface Rust Removal and Protection of High-rise Exterior Gas Pipes," *Automation in Construction*, Vol. 125, p. 103609, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103609>.
- [18] J. Liang, J. R. McCusker, G. G. Ma, L. Munson, and C. Chen, "Sewage Pipeline Inspection Tool & Robot," in *American Society for Engineering Education (ASEE-NE)*, Wentworth Institute of Technology, Massachusetts, April 22, 2022, pp. 36027, DOI: 10.18260/1-2--42200.
- [19] A. Kadkhodaei, and R. Hasanzadeh Ghasemi, "Inspection of Undersea Oil and Gas Pipelines by New Variable Thrust Vector Underwater Robotic Platform," *Journal Of Marine Engineering*, Vol. 12, No. 24, pp. 127-133, 2017, <http://marine-eng.ir/article-1-505-en.html>.
- [20] J. Park, T. Luong, and H. Moon, "Development of a Wheel-type In-pipe Robot using Continuously Variable Transmission Mechanisms for Pipeline Inspection," *Biomimetics*, Vol. 9, No. 2, p. 113, 2024, <https://doi.org/10.3390/biomimetics9020113>.
- [21] E. Khajevandi Rad, and M. Vahabi, "Nonlinear Adaptive Control of a 6 DOF Biped Robot," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 34, pp. 406-416, 2018, <http://mme.modares.ac.ir/article-15-3601-en.html>.
- [22] H. A. Yavasoglu, I. Unal, A. Koksoy, K. Gokce, and Y. E. Tetik, "Long-range Wireless Communication for In-line Inspection Robot: 2.4 km On-site Test," *Sustainability*, Vol. 15, No. 10, p. 8134, 2023, <https://doi.org/10.3390/su15108134>.
- [23] S. Kazeminasab, and M. K. Banks, "Smartcrawler: A Size-adaptable In-pipe Wireless Robotic System with Two-phase Motion Control Algorithm in Water Distribution Systems," *Sensors*, Vol. 22, No. 24, p. 9666, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22249666>.
- [24] C. Rizzo, T. Seco, J. Espelosín, F. Lera, and J. L. Villarroel, "An Alternative Approach for Robot Localization Inside Pipes using RF Spatial Fadings," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 136, p. 103702, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103702>.
- [25] D. Lu, Y. Zhang, Z. Gong, and T. Wu, "A SLAM Method Based on Multi-robot Cooperation for Pipeline Environments Underground," *Sustainability*, Vol. 14, No. 20, p. 12995, 2022, <https://doi.org/10.3390/su142012995>.
- [26] A. Gunatilake, S. Kodagoda, and K. Thiyagarajan, "Battery-free UHF-RFID Sensors-based SLAM for In-pipe Robot Perception," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 20, pp. 20019-20026, 2022, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3204682>.
- [27] R. Worley, K. Ma, G. Sailor, M. M. Schirru, R. Dwyer-Joyce, J. Boxall, T. Dodd, R. Collins, and S. Anderson, "Robot Localization in Water Pipes using Acoustic Signals and Pose Graph Optimization," *Sensors*, Vol. 20, No. 19, p. 5584, 2020, <https://doi.org/10.3390/s20195584>.
- [28] J. Zhang, X. Niu, A. J. Croxford, and B. W. Drinkwater, "Pipe Inspection using Guided Acoustic Wave Sensors Integrated with Mobile Robots," *NDT & E International*, Vol. 139, p. 102929, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102929>.

[29] S. Kazeminasab, and M. K. Banks, "Towards Long-distance Inspection for In-pipe Robots in Water Distribution Systems with Smart Motion Facilitated by Particle Filter and Multi-phase Motion Controller," *Intelligent Service Robotics*, Vol. 15, No. 3, pp. 259-273, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11370-022-00410-0>.

## پیوست (۱)

## تحلیل نیرویی حرکت ربات

از آنجا که ربات طراحی شده برای حرکت و بازرسی درون لوله باید توانایی غلبه بر نیروی وزن و اصطکاک ناشی از تماس چرخ‌ها با دیواره لوله و نیروهای ناشی از مکانیزم انطباق ربات با قطر لوله را داشته باشد، در ادامه، تحلیل نیروی کششی ربات برای حرکت درون لوله ارائه می‌گردد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده شد، شعاع ربات،  $R$  شعاع لوله،  $R_1$  شعاع لوله،  $h$  ارتفاع محور مرکزی ربات تا نقطه تکیه گاهی  $D$  و شعاع چرخ-های متحرک،  $L$  طول لینک  $CD$  و  $L_1$  فاصله بین نقطه  $D$  و نقطه  $M$ ،  $L_2$  طول لینک  $MN$ ،  $\alpha$  زاویه بین لینک  $CD$  و محور  $x$  ها و  $\beta$  زاویه بین لینک  $MN$  و محور  $x$  ها و  $F_T$  بیانگر نیروی پیشرانه مکانیزم حرکت می‌باشد.



شکل ۱- نمای شماتیکی از آنالیز نیرویی ربات

جهت طراحی مدل مکانیکی ربات، ابتدا بایست آنالیز نیرویی آن محاسبه گردد و با توجه به متقارن بودن مکانیزم، مرکز جرم آن  $G$  بر محور مرکزی آن منطبق فرض می‌شود (شکل ۱). از آنجا که محور مرکزی ربات با محور مرکزی لوله همپوشانی ندارد اگر  $\gamma$  بیانگر زاویه وضعیت ربات درون لوله و چرخش آن نسبت به محور مرکزی،  $N_1$  و  $N_2$  به ترتیب بیانگر نیروی عکس العمل تکیه‌گاه روی دو مجموعه از چرخ‌های متحرک در اثر نیروی وزن ربات،  $\theta$  زاویه بین محور  $OZ$  و خط بین مرکز لوله تا نقطه تماس چرخ‌های متحرک با لوله و  $S$  طول کمان  $\theta$  و  $Z$  مختصات  $G$  روی محور  $OZ$  و  $f$  بیانگر ضریب اصطکاک عرضی بین چرخ‌های متحرک و جداره لوله باشد، روابط هندسی زیر برقرار است:

$$R = r + h + L \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$x = L_1 \cos(\alpha) + L_2 \cos(\beta) \quad (2)$$

$$L_1 \sin(\alpha) = L_2 \sin(\beta) \quad (3)$$

$$s = R_1 \theta \quad (4)$$

$$R \sin(\phi) = R_1 \sin(\theta) \quad (5)$$

$$z \sin(\phi) = R_1 \sin(\phi - \theta) \quad (6)$$

که در آن X مختصات نقطه N روی محور X هاست. با دیفرانسیل گیری از دو طرف روابط (۱) تا (۶) خواهیم داشت:

$$dx = -\frac{L_1(R-r-h)}{L} \left( \frac{1}{\sqrt{L^2-(R-r-h)^2}} + \frac{L_1}{\sqrt{L^2 L_2^2 - L_1^2 (R-r-h)^2}} \right) dR \quad (7)$$

$$ds = \frac{R_1 \sin \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} dR \quad (8)$$

$$dz = -\left( \cos \phi + \frac{R \sin^2 \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \right) dR \quad (9)$$

با صرف نظر از اصطکاک حرارتی و با توجه به زاویه شیب  $\phi$  و بر اساس رابطه تعادل نیروها و بقای انرژی خواهیم داشت:

$$\sum N = N_1 + N_2 = \frac{mg \cos \phi \cos \gamma}{\cos \theta} = \frac{mg \cos \phi \cos \gamma R_1}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \quad (10)$$

$$F_T dx + f \sum N ds = mg dz \cos \phi \cos \gamma \quad (11)$$

که در آن  $\sum N$  مجموع نیروهای تکیه گاهی می باشد. با تعریف پارامترهای زیر:

$$K_1 = \frac{L_1(R-r-h)}{L} \left( \frac{1}{\sqrt{L^2-(R-r-h)^2}} + \frac{L_1}{\sqrt{L^2 L_2^2 - L_1^2 (R-r-h)^2}} \right) \quad (12)$$

$$K_2 = \frac{R_1 \sin \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \quad (13)$$

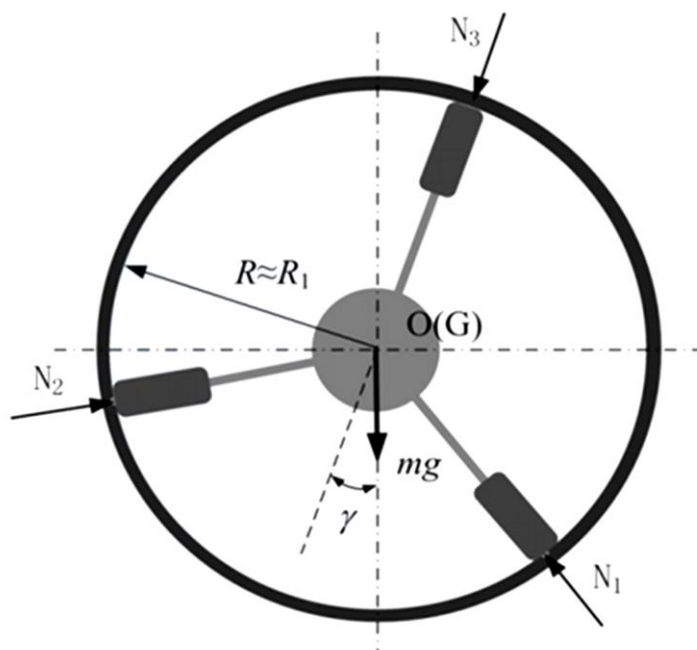
$$K_3 = \cos \phi + \frac{R \sin^2 \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \quad (14)$$

$$K_4 = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \quad (15)$$

و قرار دادن روابط ۷-۹ در روابط (۱۰) و (۱۱) خواهیم داشت:

$$F_T = \frac{mg \cos \phi \cos \gamma}{K_1} (K_2 K_4 f + K_4) \quad (16)$$

رابطه اخیر نیروی کششی لازم برای غلبه بر وزن و اصطکاک ناشی از تماس چرخها با دیواره لوله و نیروهای ناشی از مکانیزم انطباق ربات با قطر لوله را نشان می‌دهد. برای یافتن حداقل  $K$  (ثابت فنر) به گونه‌ای که چرخ‌های ربات بتواند در تماس با دیواره لوله قرار بگیرند، کافی است رابطه اخیر در  $F = kx$  جایگذاری گردد. همانطور که در شکل (۲) ملاحظه می‌گردد، در هنگام تنظیم نیروی کشش، محور مرکزی ربات تقریباً با محور مرکزی لوله همپوشانی دارد. از آنجایی که سه مجموعه پای چرخ‌دار متوازی الاضلاع بصورت پیرامونی با زاویه متقارن  $120^\circ$  درجه از هم فاصله دارند، هر تغییر زاویه‌ای ربات سبب می‌شود که تنها یک یا دو مجموعه از چرخ‌های متحرک در تحمل وزن ربات مشارکت داشته باشند.



شکل ۲- نمای شماتیکی از نیروهای عکس العمل تکیه‌گاهی چرخ‌های ربات

اگر  $N_1$ ،  $N_2$  و  $N_3$  به ترتیب عکس العمل تکیه گاهی دو مجموعه از چرخ های متحرک در بالا، راست و چپ ربات باشند و جهت پادساعتگرد مثبت تعریف گردد، خواهیم داشت:

$$\begin{cases} N_3 = 0 & -60^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ \\ N_1 = 0 & +60^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \\ N_2 = 0 & 180^\circ \leq \gamma \leq 300^\circ \end{cases} \quad (17)$$

بر اساس تعادل نیروها داریم:

$$\begin{cases} N_1 \cos(\gamma + 60^\circ) + N_2 \cos(60^\circ - \gamma) = mg \\ N_1 \sin(\gamma + 60^\circ) - N_2 \sin(60^\circ - \gamma) = 0 \end{cases} \quad -60^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ \quad (18)$$

$$\begin{cases} N_2 \cos(\gamma - 60^\circ) - N_3 \cos \gamma = mg \\ N_2 \sin(\gamma - 60^\circ) - N_3 \sin \gamma = 0 \end{cases} \quad +60^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \quad (19)$$

$$\begin{cases} -N_3 \cos \gamma + N_1 \cos(\gamma + 60^\circ) = mg \\ -N_3 \sin \gamma + N_1 \sin(\gamma + 60^\circ) = 0 \end{cases} \quad 180^\circ \leq \gamma \leq 300^\circ \quad (20)$$

با حل معادلات اخیر و با توجه به زاویه انحراف (شیب)  $\phi$  داریم:

$$\sum N = \begin{cases} 2mg \cos \gamma \cos \phi & -60^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ \\ 2mg \cos(\gamma - 120^\circ) \cos \phi & +60^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \\ 2mg \cos(\gamma - 240^\circ) \cos \phi & 180^\circ \leq \gamma \leq 300^\circ \end{cases} \quad (21)$$

اگر مجموع فشارهای وارده به چرخ های متحرک در اثر وزن ربات را به عنوان نیروی عکس العمل تکیه گاه کل و با  $\sum N$  و مجموع نیروهای فشاری ایجاد شده توسط مکانیزم انطباق قطر را به عنوان فشار اضافی تعریف و با  $\sum P$  نمایش داده شود و ضریب اصطکاک سطح نیز برابر  $\mu$  باشد، نیروی کششی ربات می تواند به صورت زیر تعریف گردد:

$$F_T = (\sum N + \sum P)\mu \quad (22)$$

مطابق شکل (۲) اگر  $y$  مختصات نقطه  $E$  روی محور  $Y$ ها باشد رابطه هندسی زیر وجود خواهد داشت:

$$y = R - h \quad (23)$$

با دیفرانسیل گیری از طرفین روابط هندسی (۱) تا (۳) و (۲۳) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \delta y = \delta R \\ \delta x = -K_1 \delta R \end{cases} \quad (24)$$

با به کارگیری اصل کار مجازی داریم:

$$\left( \sum N + \sum P \right) \delta y + F \delta x = 0 \quad (25)$$

با قراردادن روابط (24) در رابطه (25) خواهیم داشت:

$$F = \frac{1}{K_1} \left( \sum N + \sum P \right) = \frac{1}{K_1 \mu} F_T \quad (26)$$

رابطه اخیر بیانگر رابطه نیروی فنر ( $F$ ) با نیروی کششی ربات ( $F_T$ ) و ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) و پارامترهای هندسی ربات ( $K_1$  طبق معادله (12)) خواهد بود.

## Dynamic Modeling of Autonomous Robot Movement for Inspection of Pipelines in Different Geometric Conditions

**Hosain Mashjoor**

Chief Engineer of the Maintenance and Repair Unit of Maron Pipelines, Maron Oil and Gas Exploitation Company (MOGC), Ahvaz, Iran  
MSc, Department of Mechanical Engineering (Applied Design), Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Ahvaz, Iran  
hosainmashjoor@gmail.com

\*Corresponding author: **Kourosh Heidari Shirazi**

Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran  
k.shirazi@scu.ac.ir

### Abstract

In the current study, with the help of Adams and MATLAB software, a seven-degree-of-freedom wheeled autonomous robot with a mechanism of adaptation to the passive pipe diameter and benefiting from a fuzzy controller to guide the movement path was designed and simulated. The control system of this robot consists of two inputs, which are the difference between the desired speed and the actual speed of the robot (error) and its rate of change (acceleration) and an output, which is the voltage of direct current motors. In this research, the dynamic simulation of robot movement in different geometrical conditions such as straight and vertical pipes, elbows, pipes with reducer, sediments and corrosion was investigated through the design of the fuzzy controller, and the obtained results show that the modeled robot was able to Standard pipes with a diameter of 20-32 inches, as well as pipes with a diameter change or a 90-degree bend with a radius of curvature between 408-763 mm can pass successfully. In addition, the use of a spring instead of a motor in the design of this robot, in order to adapt to the diameter of the pipe, has been a solution to reduce production costs. Therefore, instead of using a motor and two separate controllers (one to adjust the adaptation mechanism to the diameter of the pipe and the other to supply the torque of the robot's wheels), this robot was able to advance its movement using only one controller and from this point of view, it has shown the economic potentials for making real samples, product commercialization and responding to the needs of some industries in the country.

*Keywords:* Dynamic simulation, Autonomous robot, Fuzzy controller, Adams, MATLAB