



شبیه‌سازی سیستم کنترلی ربات آتونوماس در شرایط مختلف هندسی لوله و تاثیر توزیع کننده بهینه گشتاور در انرژی مصرفی ربات

حسین مشجور^{۱*}، کوروش حیدری شیرازی^۲

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

* نویسنده مسئول: hosainmashjoor@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

چکیده

در پژوهش حاضر، یک ربات آتونوماس هفت درجه آزادی چرخدار با مکانیزم انطباق با قطر لوله غیرفعال، به کمک نرم‌افزار آدامز طراحی گردید و پس از بررسی صحت حرکت آن، با طراحی کنترلر فازی در بخش سیمولینک نرم‌افزار متلب، شبیه‌سازی دینامیکی حرکت آن در شرایط هندسی مختلف نظیر، لوله‌های مستقیم و عمودی، زانویی، لوله دارای ردیوسر، رسوبات و خوردگی بررسی گردید. برای هدایت درون لوله‌ای این ربات، کنترلر فازی طراحی شد و سیستم کنترلی آن با به کارگیری موتورهای جریان مستقیم برای هر یک از چرخ‌های ربات اجرا گردید. توانایی کنترلر فازی ربات در تعقیب سرعت ورودی مطلوب و خصوصیات پاسخ‌دهی آن در حالت پایدار، بررسی شد که نتایج ارائه شده بیانگر عملکرد بهتر کنترلر فازی در تعقیب سرعت‌های بالا و داشتن پاسخ گذرای بهتر در این سرعت‌ها بوده است. با به کارگیری سیستم توزیع کننده بهینه گشتاور، سیستم کنترلی ربات، بهبود یافته و سیگنال خروجی کنترلر فازی می‌تواند به نحوی هدفمند به چرخ‌های ربات ارسال گردد. لذا به کارگیری این روش، سبب کاهش قابل توجهی در توان مصرفی ربات و بهینه‌سازی انرژی مصرفی آن گردید. این ربات طراحی شده به دلیل داشتن مکانیزم کم هزینه‌تر در مقایسه با موارد مشابه، پتانسیل بالایی برای ساخت نمونه واقعی، تجاری سازی و پاسخگویی به نیاز حال حاضر صنعت نفت و گاز کشور را دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی دینامیکی، ربات آتونوماس، کنترلر فازی، نرم‌افزار آدامز، نرم‌افزار متلب.

مقدمه

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. یکی از روش‌های رایج بررسی عیوب داخلی خطوط لوله استفاده از توپک‌های هوشمند می‌باشد، که امروزه به طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شود اما استفاده از این تجهیزات نیز دارای مشکلاتی نظیر نیازمندی به تجهیزات مرتبط با توپک‌رانی نظیر کمپرسورهای هوا، و همچنین وجود ارسال کننده توپک (توپک‌ران^۱) و دریافت کننده توپک (توپک‌گیر^۲) در ابتدا و انتهای خط می‌باشد که تنها برخی از خطوط زیرزمینی دارای توپک‌ران و توپک‌گیر هستند. از جمله روش‌های جدیدتر برای انجام بازرسی خطوط لوله استفاده از ربات‌ها می‌باشد، که روشی مطمئن و کارآمد بوده و می‌تواند امکان بازرسی داخلی طیف گسترده‌ای از خطوط لوله را فراهم نماید. زیرا همانطور

¹ Pig Launcher

² Pig Receiver



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 موثر برای حل این مسئله شناخته شده‌اند.

مسئله شبیه‌سازی حرکت ربات درون لوله‌ها دارای اهمیت فراوانی در صنایع وابسته به خطوط لوله اعم از نفت، گاز، پتروشیمی و حتی آب می‌باشد چرا که استفاده از چنین وسیله‌ای نه تنها در بخش بازرسی درون خطوط لوله می‌تواند به شناسایی عیوب داخلی درون لوله کمک شایانی نماید بلکه در بحث مدیریت پیش‌گیرانه نیز می‌تواند از هدررفت سرمایه‌هایی جلوگیری کند که در اثر هرگونه آسیب ناشی از عیوب داخلی می‌توانند، ایجاد شوند. در صنعت، بازوهای ربات به راحتی می‌توانند اعمالی نظیر بسته‌بندی، جوشکاری نقطه‌ای، نقاشی، لحیم‌کاری و غیره را با دقت و سرعت بالایی انجام دهند اما ضعف عمده آن‌ها ثابت بودن محدوده حرکتی آن‌ها است. در مقابل این بازوهای رباتی، ربات‌های متحرک وجود دارند که می‌توانند در خارج از محیط تولیدی نیز حرکت نموده و مهارت‌های خود را در جایی موثرتر نشان دهند. در این میان، ربات‌های آتونوماس یا خودمختار ماشین‌های هوشمندی هستند که می‌توانند وظایف خود را به تنهایی و بدون کنترل آشکار انسان انجام دهند [۱]. به طور کلی یک سیستم خودمختار دارای چهار بخش مجزا و در عین حال مرتبط با هم می‌باشد که عبارتند از: حسگرها، مدلسازی و کنترل، نقشه ساخت و طراحی مسیر و تصمیم‌گیری و استقلال [۲]. لذا ربات‌های آتونوماس به دلیل داشتن سیستم‌های کنترلی که خود شامل سنسورها و عملگرهای مختلف است و همچنین توانایی هدایت و حرکت بین دو نقطه (ناوبری^۱) در محیط مورد نظر، بسیار مورد توجه محققین قرار دارند. ربات‌های درون لوله‌ای به چندین روش مختلف دسته‌بندی می‌شوند، آن‌ها ممکن است براساس مکانیزم حرکت به صورت چرخدار [۳ و ۴]، ردیاب [۵] صفحه‌ای [۶] و چهار صفحه‌ای [۸]، 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 [۷ و ۸]. در نوع منفعل ربات عمدتاً با استفاده از فنرها با سطح داخلی لوله انطباق پیدا می‌کنند ولی در نوع انطباق فعال ربات می‌تواند به‌طور موثرتری نسبت به نوع منفعل در لوله حرکت کند زیرا نیروی عمودی بین ربات و لوله می‌تواند توسط عملگرهای^۲ بیشتری کنترل شود [۱]. یکی از مشکلات رایج در طراحی ربات‌ها، تطابق ربات با هندسه متغیر لوله‌ها است 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 شود. 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 لوله، لوله دارای ردیوسر (کاهنده)، توپک‌رانی جهت شناسایی رسوبات و خوردگی و بازرسی با آزمایش‌های غیر مخرب مورد توجه است. تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه طراحی ربات‌های درون لوله‌ای برای کاربردهای مختلف انجام شده است که می‌توان به برخی از این پژوهش‌ها اشاره نمود. لی و همکاران [۹] معرفی دو مکانیزم ابداعی برای حرکت ربات‌های درون لوله‌ای پرداختند که بتوانند، علاوه بر لوله‌های مستقیم از درون لوله‌های عمودی، انشعابات و زانویی‌ها نیز عبور کنند. مکانیزم بازوهای چهارگانه قابل انعطاف به ربات اجازه عبور از انشعاب‌های کوچکتر از لوله اصلی و انشعابات با شعاع انحناء صفر را می‌دهد و مکانیزم دسته چرخان ربات را قادر می‌سازد تا جهت‌گیری را تغییر داده و به طور خاص بتواند از برآمدگی‌های درون لوله عبور کند. آن‌ها همچنین یک نمونه اولیه از این ربات را ساخته و با تجهیز آن به ۴ موتور جریان مستقیم برای بازوها و یک موتور جریان مستقیم برای دسته چرخان آن را آزمایش نمودند. نتایج کار آن‌ها حاکی از عبور موفقیت آمیز ربات از درون لوله عمودی، زانویی و انشعابات با شعاع انحناء صفر بوده است. ربات طراحی شده، فاقد یک سیستم کنترلی برای تشخیص موانع در مسیر حرکت ربات و محل انشعابات بوده و به گفته این محققین هنگام رسیدن به انشعابات

¹ Navigation

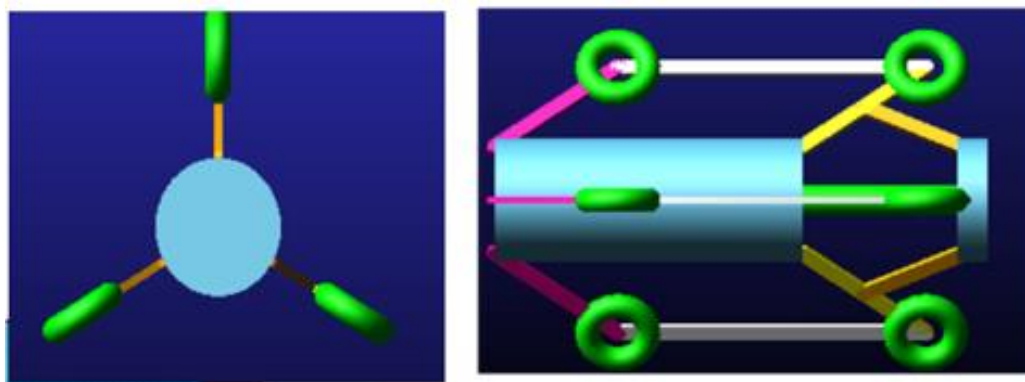
² Actuators



کاهنده و انشعابات با شعاع انحنای صفر دچار مشکلاتی بوده است. یه و همکاران [۱۰] توانستند یک رده از ربات‌های نرم را ارائه دهند که می‌توانند به صورت خودسازگار با یک مقطع دلخواه به جلو و عقب در امتداد یک لوله حرکت کنند. این ربات نرم از یک محرک خطی، یک موتور و مجموعه‌ای از نوارهای الاستیک نرم متصل به هم تشکیل شده است که به صورت طولی در حاشیه ربات چیده شده‌اند. این نوارها، با چینش‌ها و پیوندهای طراحی شده استراتژیک، می‌توانند از طریق کماتش مکانیکی غیرخطی به پیکربندی‌های سه بعدی مختلف خم شده و پیچ خورده و در نتیجه به سادگی با استفاده از توالی‌های متفاوت از انواع تحریکات دو محرک، حرکات رو به جلو و عقب را به اجرا گذارند. رویکرد این ربات مبتنی بر مکانیک کماتش چند منظوره و استراتژی توالی بارگذاری بوده است، طراحی این ربات می‌تواند توسعه حرکات جدید را تحت تاثیر قرار داده و به عنوان گزینه‌ای برای طراحی ربات‌های نرم در بازرسی، تعمیر و سایر کاربردهای لوله مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش کوه و همکاران [۱۱] نیز طراحی یک سیستم رباتیک خدماتی جهت زدودن زنگ‌زدگی‌های 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 تایید 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 پژوهش حاضر، یک ربات چرخدار طراحی شده از نوع سه‌صفحه‌ای با بازوهای متقارن ۱۲۰ درجه‌ای و از نوع انطباق فعال می‌باشد یعنی بازوهای آن می‌تواند متناسب با قطر لوله عبوری جمع‌تر یا بازتر شوند. این ربات از نوع آتوموماس می‌باشد و می‌تواند براساس سیستم کنترلی طراحی شده برای آن با تغییر گشتاور چرخ‌هایش از موانع هندسی موجود در مسیر حرکت عبور کند. تمرکز بر روی مدل‌سازی سیستم کنترلی ربات آتوموماس جهت بهینه‌سازی گشتاور در شرایط هندسی مختلف نظیر، لوله‌های مستقیم و عمودی، زانویی، لوله دارای ردیوسر، رسوبات و خوردگی می‌باشد.

مدل‌سازی

به‌منظور مدل‌سازی ربات از نرم افزار آدامز استفاده شده است. طراحی ربات در سیستم آحاد میلی‌متر-کیلوگرم-ثانیه صورت گرفته است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد 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 نرم افزار 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.

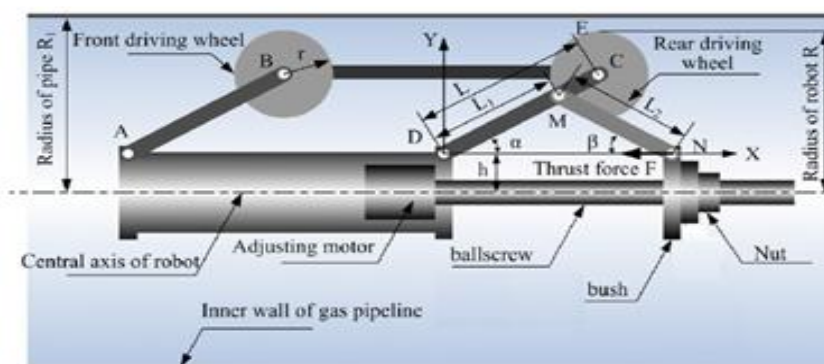


شکل ۱: تصویری از ربات طراحی شده در دو نما



محدودیت‌های طراحی

ربات طراحی شده مطابق با مشخصات ذکر شده در شکل (۲) مدل‌سازی شده است. با توجه به آن 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.



شکل ۲: نقشه ربات طراحی شده [۷]

اگر قطر شاسی ربات D و قطر چرخ‌های ربات r باشد داریم:

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

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

$$AB=250, D=200, r=50 \quad (3)$$

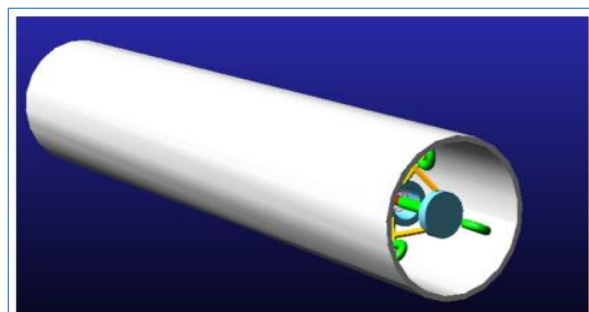
با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده در هنگام مدل‌سازی رابطه (۳) این ربات قادر است حداقل از لوله‌هایی با قطر ۴۰ سانتی‌متر (۱۶ اینچ) و حداکثر از لوله‌هایی با قطر ۸۰ سانتی‌متر (۳۰ اینچ) عبور کند. بدیهی است که در کاربردهای عملی می‌توان بسته به شرایط لوله‌ای که قرار است ربات از آن عبور کند، ابعاد ربات را تغییر داد. به منظور مدل‌سازی مفاصل ربات در محل اتصال چرخ‌ها به لینک‌ها و همچنین لینک‌ها به یکدیگر، از مفاصل چرخشی^۱ استفاده شده است. این مفصل امکان چرخش اجزای ربات نسبت به یکدیگر حول محور مشترک‌شان را فراهم می‌کند. همچنین جهت اتصال میله فتر به شاسی از مفصل انتقالی^۲ و جهت اتصال میله فتر به بوش انتهایی ربات از مفصل ثابت استفاده شده است. مطابق شکل (۳) این ربات برای حرکت درون سیستم‌های لوله‌ای طراحی شده است و عضو در تماس با آن ابتدا به صورت یک لوله مستقیم که در نرم افزار آدامز بصورت یک استوانه توخالی می‌باشد طراحی شده است.

مدل‌سازی موانع هندسی در مسیر حرکت ربات

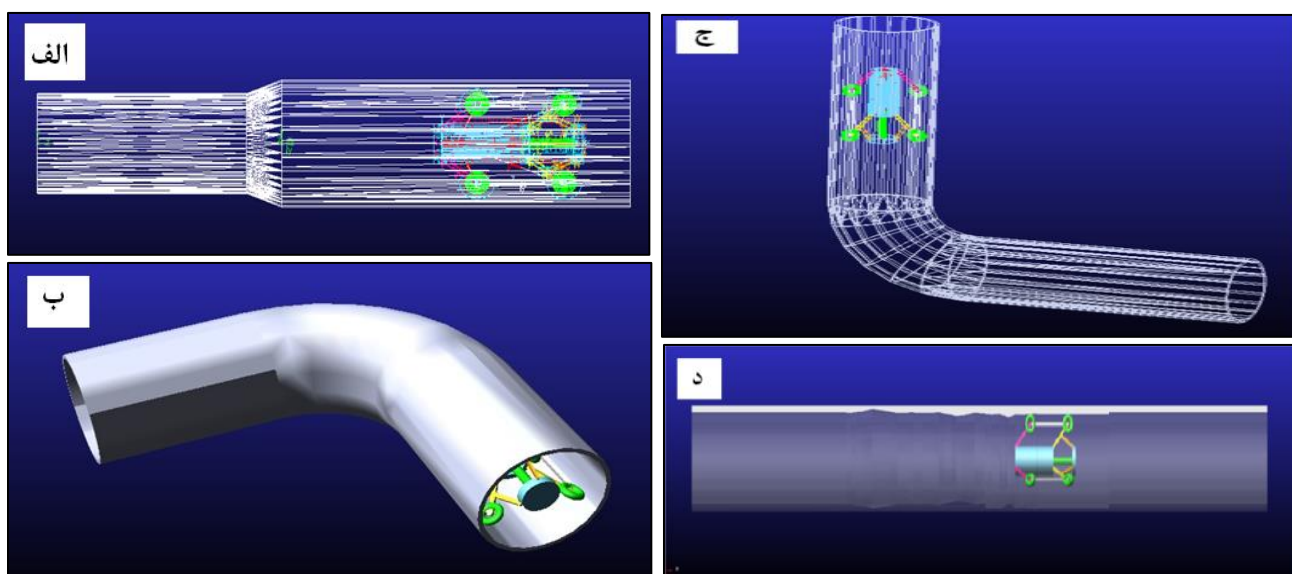
به منظور بررسی حرکت ربات در لوله‌هایی که دچار تغییر قطر می‌گردند در نرم‌افزار آدامز با به‌کارگیری ابزار دوران و چرخش پروفیل حول محور دوران یک ردیوسر طراحی شده است (شکل ۴). همچنین جهت بررسی حرکت ربات درون لوله دارای خم یا زانویی ۹۰ درجه از نرم‌افزار سالیدورکز برای مدل‌سازی این عضو استفاده شده است.

¹ Revolute

² Translational



شکل ۳: نمایی از ربات طراحی شده درون لوله



شکل ۴: طراحی ردیوسر (الف)، زانویی (ب)، لوله عمودی (ج) و پروفایل ناهموار (د) در مسیر حرکت ربات

مدل‌سازی سایر بخش‌های ربات

جهت مدل‌سازی نحوه تماس چرخ‌های ربات با جداره لوله از نیروهای تماسی^۱ استفاده شده است. با توجه به خاصیت ارتجاعی لاستیک چرخ‌ها، نحوه برخورد چرخ و جداره لوله از نوع ضربه‌ای 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 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.

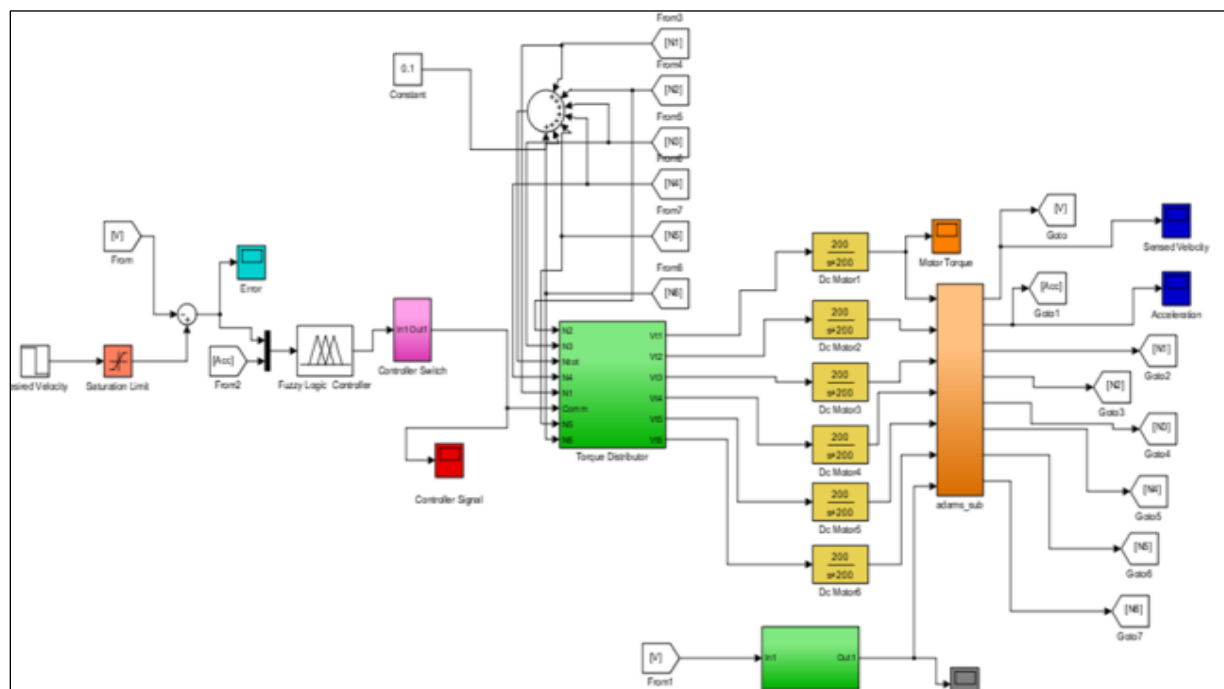
مدل‌سازی سیستم کنترلی

به منظور طراحی سیستم کنترلی ربات ابتدا در بخش سیمولینک از نرم‌افزار متلب یک بلوک دیاگرام حلقه بسته مطابق شکل (۵) ترسیم شده است. سپس از منطق فازی برای طراحی کنترلر کمک گرفته شده است تا ربات بتواند سرعت خواسته شده را برآورده

^۱Contact Force

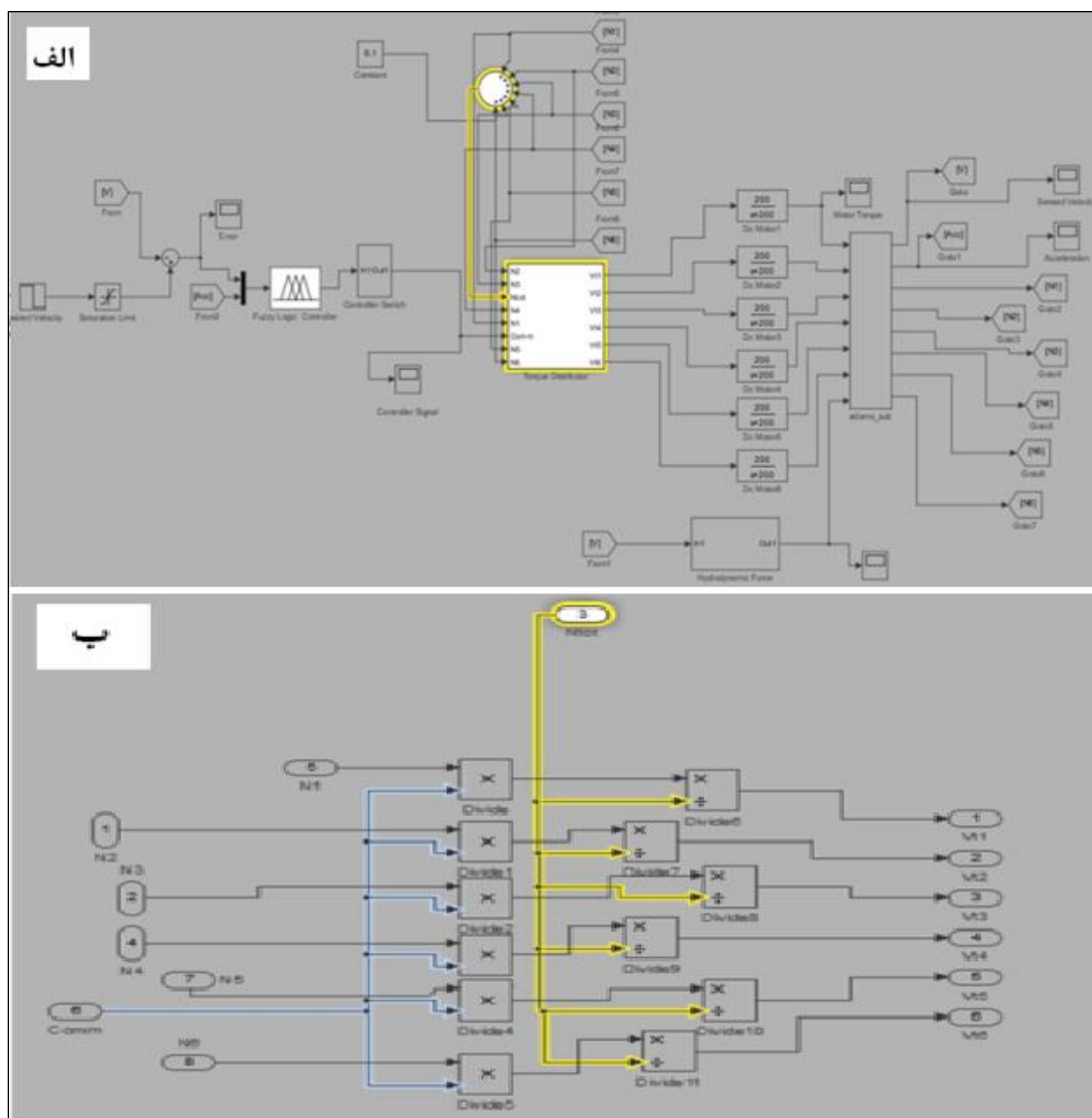


نماید. جهت طراحی کنترل فازی از جعبه‌ابزار فازی نرم‌افزار متلب کمک گرفته شده است. اختلاف سرعت مطلوب و سرعت واقعی حرکت ربات (خطا) و آهنگ تغییر آن (شتاب) به عنوان ورودی و ولتاژ موتورهای جریان مستقیم به عنوان خروجی سیستم می‌باشند. در این سیستم از استنتاج ممدانی استفاده شده است. در طراحی سیستم کنترل فازی برای توابع عضویت ورودی هر یک از ۵ فازی‌ساز مثلثی و جهت توابع عضویت خروجی نیز از ۵ فازی‌ساز مثلثی دیگر استفاده شده است. با توجه به توابع عضویت ورودی و خروجی و متغیرهای زبانی تعریف شده تعداد ۴۹ قانون فازی تعریف شد. مبنای تهیه قوانین فازی نوشته به این صورت می‌باشد که اگر مثلاً مقدار خطا منفی خیلی زیاد باشد (یعنی سرعت ربات از سرعت مطلوب به مقدار زیادی بیشتر است) و مقدار شتاب هم منفی خیلی زیاد باشد (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 به طریق مشابه قابل تفسیر هستند. در ادامه به منظور مدل‌سازی سیستم کنترلی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی ربات، سیستم کنترلی برای ربات بگونه‌ای 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.



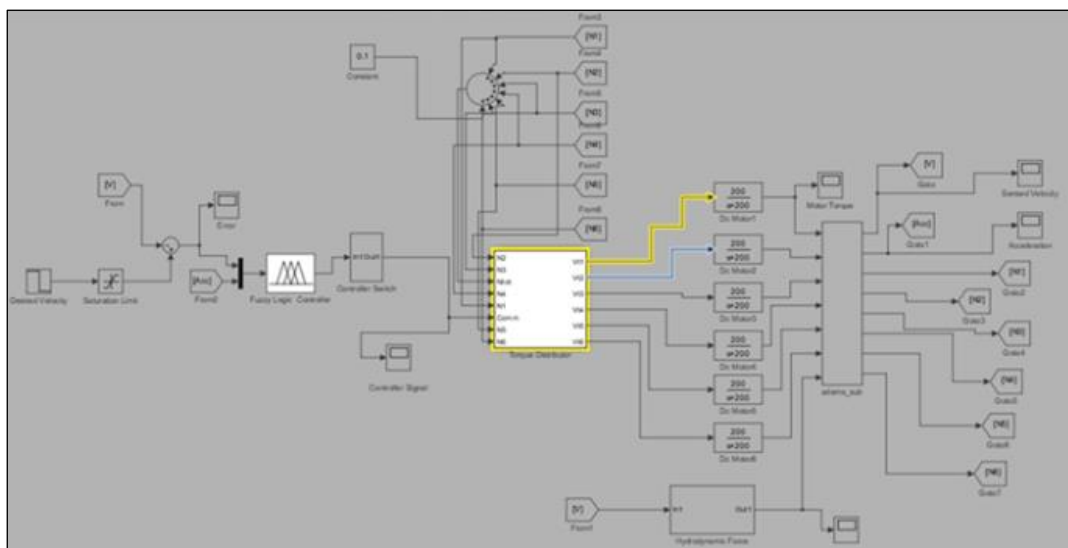
شکل ۵: طراحی سیستم کنترلی بهینه شده برای ربات

در بلوک دیاگرام بهینه شده، نیروی عمودی چرخ‌ها از طریق ورود به یک نقطه جمع، با یکدیگر جمع می‌شوند و مقدار تجمع شده وارد یک بلوک جدید جهت توزیع بهینه گشتاور می‌شود. در این بلوک سیگنال خروجی کنترلر فازی به همراه نیروی عمودی هر یک از چرخ‌ها به همراه نیروی عمودی کل، وارد می‌شود و هر چرخ به تناسب میزان نیروی عمودی‌اش، سیگنال خروجی کنترلر را دریافت می‌کند. این موضوع سبب می‌شود تا چرخ‌هایی که تماس آنها با جداره لوله قطع شده است عملاً سیگنالی از کنترلر دریافت نکنند و موتور آنها خاموش گردد. همچنین این سیستم کنترلی جدید سبب می‌شود تا چرخ‌هایی که نیروی عمودی بیشتری دارند و مشارکت بیشتری در حرکت ربات دارند سیگنال بیشتری را دریافت کنند (شکل ۶).



شکل ۶: نحوه ایجاد نیروی عمودی کل چرخ‌های ربات و جزئیات مربوط به بلوک توزیع کننده بهینه گشتاور

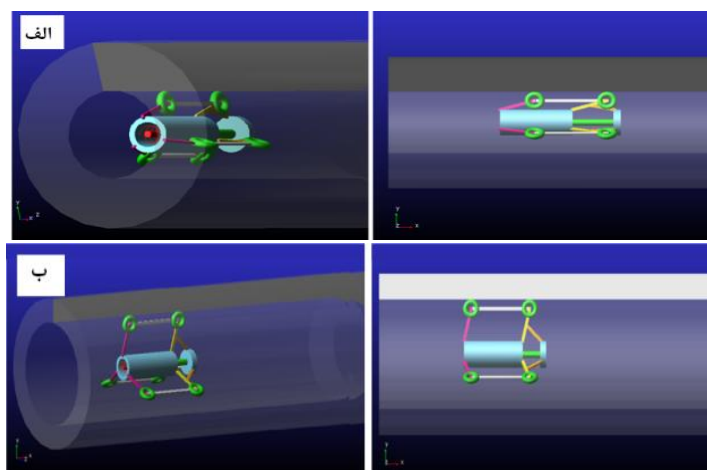
همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود موتور مربوط به هر یک از چرخ‌های ربات سیگنال مجزایی را متناسب با شرایط حرکتی درون لوله دریافت می‌کند و این موضوع سبب می‌شود تا در صورت قطع تماس یک چرخ با جداره لوله موتور مربوط به آن چرخ خاموش گردد و انرژی را مصرف نکند و در نتیجه انرژی مصرفی ربات بهینه شود.



شکل ۷: دریافت سیگنال مجزا برای موتور چرخ‌های ربات

شبیه‌سازی ربات و نتایج پژوهش

در این بخش نتایج شبیه‌سازی 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. در شبیه‌سازی اول قطر لوله برابر با کمترین مقدار (۴۸۰ میلی‌متر) قرار داده شده و حرکت ربات بوسیله موتورهای تعریف شده بر روی چرخ‌ها تامین شد. در این حالت مکانیزم تغییر قطر ربات با جمع کردن بازوها و کشیده کردن فنر، طول ربات را افزایش داده و حرکت ربات را درون لوله میسر ساخته است. طول ربات در این حالت به ۸۲۳ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۸-الف). در شبیه‌سازی دوم قطر لوله برابر با بیشترین مقدار قابل دستیابی برای ربات (۸۲۰ میلی‌متر) قرار داده شده و همان‌گونه که در شکل (۸-ب) مشخص است، مکانیزم تغییر قطر با باز کردن چرخ‌ها و فشرده کردن فنر با قطر لوله منطبق می‌شود و طول ربات کاهش می‌دهد و ربات پس از تماس چرخ‌ها با دیواره قادر به حرکت درون لوله می‌شود. طول ربات در این حالت به ۶۶۳ میلی‌متر می‌رسد.



شکل ۸: حرکت ربات در لوله با قطر حداقل (الف) و حداکثر (ب)



این ربات از لحاظ هندسی توانایی بازکردن بیشتر چرخ‌های خود را دارا است به گونه‌ای که لینک‌های متصل به چرخ‌ها در حالت کاملاً عمودی قرار گیرند، اما این باعث می‌شود که با توجه به اینکه غیر فعال بودن مکانیزم، پیش بار فنر، اهرم بندی‌های تغییر قطر را به سمت جلو برگرداند و سبب واژگونی ربات شود. از این مسئله می‌توان در تنظیم پیش‌بار فنر هنگام طراحی ربات در شرایط هندسی مختلف استفاده کرد. به این صورت که مقدار آن به اندازه‌ای قرار داد که مقداری قبل از رسیدن لینک‌ها به حالت عمودی نیروی فنر صفر شود و از تغییر زاویه بیشتر اهرم‌ها به سمت جلوی ربات جلوگیری شود.

عبور از ردیوسر

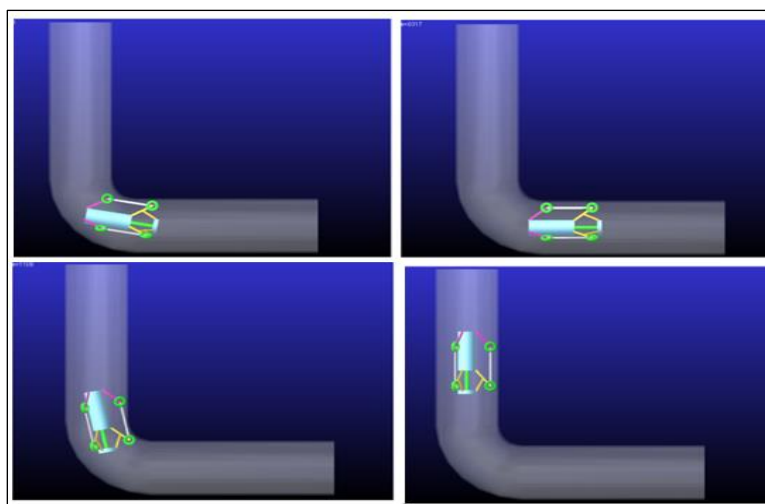
برای حالتی که ربات باید از لوله دارای ردیوسر عبور کند نیز شبیه‌سازی انجام شده است در ردیوسر مورد آزمایش، ابتدا لوله با دو اتصال ردیوسر کاهنده به حداقل قطر می‌رسد و پس از آن با دو اتصال دیگر ردیوسر افزایش‌دهنده، قطر آن به حداکثر مقدار افزایش می‌یابد. در شبیه‌سازی ربات بعد از انطباق با ردیوسر مجدداً توانسته تعادل خود را حفظ کند و در مسیر پیش‌بینی شده حرکت خود را انجام دهد.

عبور از زانویی

در پژوهش حاضر عبور ربات از زانویی ۹۰ درجه نیز مطابق شکل (۹) شبیه‌سازی شد. ربات طراحی شده قابلیت عبور از خم‌ها و زانویی‌هایی با شعاع انحنای بین ۴۰۸ میلی‌متر تا ۷۶۳ میلی‌متر را دارا می‌باشد و تا زمانی که شعاع انحنای بین این دو مقدار به حدی باشد که 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 ۶۵۰ میلی‌متر و طول روبات ۷۹۶ میلی‌متر است. در نتیجه حداقل شعاع انحنای مسیر ۶۴۵ میلی‌متر بدست آمد. این ربات می‌تواند با صحت کامل و بدون گیرافتادن و با حفظ تعادل از درون زانویی ۹۰ درجه نیز عبور کند.

عبور از لوله عمودی

در این بخش توانایی ربات در عبور از لوله عمودی بررسی می‌گردد. شکل لوله مورد آزمایش یک خم ۹۰ درجه در صفحه $x-y$ بوده که لوله افقی را به لوله عمودی در جهت y متصل کرده است. همان‌گونه که در شکل (۹) 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 تامین کند. در حرکت عمودی نیروی فشاری بیشتری روی فنر لازم است.



شکل ۹: نمایشی از عبور ربات از لوله عمودی



عبور از لوله با سطح ناصاف داخلی

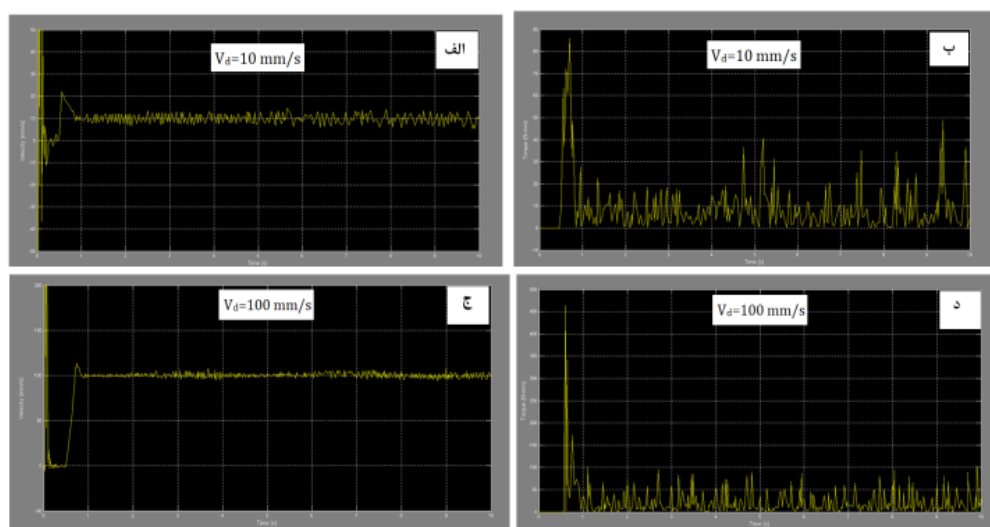
در این بخش حرکت ربات درون لوله با سطح ناصاف داخلی بررسی می‌گردد. لوله مورد آزمایش دارای قطر ۶۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و فرض گردید در مقطعی، سطح داخلی لوله به صورت توزیع تصادفی دارای خوردگی و یا رسوبات باشد. حداکثر عمق خوردگی و ضخامت رسوبات لوله برابر با پنجاه درصد ضخامت لوله در نظر گرفته شده است. پروفایل لوله و مراحل عبور ربات از لوله دارای رسوبات، خوردگی و نمودار سرعت در طی حرکت درون لوله در این بخش تعیین می‌گردد.

بررسی حرکت ربات با کنترلر فازی

در این بخش حرکت ربات با استفاده از کنترلر در عبور از پروفایل‌های مختلف لوله و در حضور اغتشاشات جریان درون لوله بررسی می‌گردد.

عبور از لوله مستقیم

در این قسمت عملکرد کنترلر فازی در عبور از لوله مستقیم و صاف و تنظیم سرعت ربات بررسی می‌گردد. قطر لوله مورد آزمایش ۶۵۰ میلی‌متر است و کنترلر مورد استفاده ۴۹ رول است. مقدار تاخیر زمانی که بعد از آن سوئیچ کنترلر فعال می‌شود ۰/۵ ثانیه قرار داده شده است تا پیش از حرکت، ارتعاشات ناشی از تغییر قطر مستهلک شده باشند. نمودارهای شکل (۱۰) تغییرات سرعت ربات و گشتاور تولید شده توسط کنترلر فازی را برای سرعت‌های ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهند.



شکل ۱۰: الف و ب- تغییرات سرعت ربات و گشتاور کنترلر در لوله مستقیم به ترتیب برای $V_d=10$ mm/s، ج و د: $V_d=100$ mm/s

جدول (۱) خصوصیات پاسخ کنترلر فازی ربات، برای سه سرعت شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از مقادیر مشخص است پاسخ کنترلر برای سرعت‌های بالاتر مطلوب است و بهترین پاسخ در سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه بدست آمده است. برای سرعت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه زمان برخاست ۰/۵ ثانیه است اما این پاسخ سریع باعث ایجاد یک فراجش ۱۱۰ درصدی شده است که نشان می‌دهد کنترلر فازی به ازای سرعت‌های بسیار پایین پاسخ‌گذرای مناسبی تولید نمی‌کند، اما در دنبال کردن فرمان



ورودی موفق عمل کرده است. در سرعت‌های بالا کنترلر هم پاسخ‌گذاری مناسبی دارد و هم قادر به دنبال کردن ورودی با دقت قابل قبولی است.

جدول ۱: خصوصیات پاسخ کنترلر

سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	زمان برخواست (ثانیه)	فراجهش
۱۰	۰/۰۵	٪۱۱۰
۵۰	۰/۲۵	٪۲۶
۱۰۰	۰/۲۲	٪۱۳

جدول (۲) 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 نیز مناسب‌تر می‌باشد.

جدول ۲: میانگین سرعت و مقدار خطا در عبور از لوله مستقیم

سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	سرعت میانگین (میلی‌متر بر ثانیه)	مقدار درصد خطا
۱۰	۱۰/۶۵	٪۶/۵
۵۰	۴۸/۵۹	٪۲/۸
۱۰۰	۹۷/۸	٪۲/۲

عبور از لوله دارای ردیوسر

در این بخش حرکت ربات در ردیوسر شبیه‌سازی و عملکرد کنترلر فازی در تنظیم سرعت ربات برای سرعت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه مورد مشاهده و بررسی قرار گرفت.

برای سرعت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه لحظه ورود چرخ‌های جلو و عقب ربات به ردیوسر در ثانیه‌های ۶/۲ و ۱۶/۳ و لحظه خروج چرخ‌های جلو و عقب در ثانیه‌های ۱۹/۸ و ۲۸ است. همچنین در لحظه ورود و خروج چرخ‌های جلو از ردیوسر، سرعت نوسانی می‌شود، زیرا در این لحظه یک تغییر ناگهانی در شیب تغییر قطر لوله باعث ایجاد یک شوک به ربات می‌شود. همین‌طور در حین عبور از درون ردیوسر نیز سرعت نوسانی‌تر و گشتاور مورد نیاز بیشتر است. در این فاصله موتورها علاوه بر تامین گشتاور مورد نیاز برای حرکت رو به جلوی ربات می‌بایست گشتاور لازم برای غلبه بر نیروی فنر و کوچک‌تر کردن مکانیزم جهت انطباق قطر ربات با لوله را نیز تامین کنند. برای سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه نیز مانند حالت قبل در لحظه ورود و خروج چرخ‌های جلو از ردیوسر، نوسان سرعت و افزایش گشتاور وجود دارد. در اینجا علی‌رغم نوسانی‌تر شدن سرعت ربات، میانگین سرعت و مقدار خطا در مقایسه با لوله مستقیم تقریباً بدون تغییر هستند. در جدول (۳) مقدار میانگین گشتاور مورد نیاز در عبور از لوله مستقیم و ردیوسر با قطر ابتدایی یکسان مقایسه شده است. به ازای سرعت‌های مساوی، گشتاور مورد نیاز در عبور از ردیوسر به شکل قابل ملاحظه‌ای بیشتر از لوله مستقیم است. این مسئله نوسان بیشتر موجود در سرعت عبور از ردیوسر در مقایسه با لوله مستقیم را توجیه می‌کند. با توجه به اینکه برای هر دو حالت از یک کنترلر فازی با توابع عضویت و قوانین یکسان استفاده شده است، این تغییر قابل توجه در گشتاور مورد نیاز بیانگر این مساله است که برای ردیوسر و به‌طور کلی برای کاربردهای خاص، به تنظیم بهینه پارامترهای کنترلر نیاز است.



جدول ۳: مقایسه گشتاور موردنیاز برای لوله مستقیم و ردیوسر

درصد تغییر	گشتاور میانگین ردیوسر	گشتاور میانگین لوله مستقیم	سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)
۱۰۰٪	۳۱/۵	۱۵/۷	۵۰
+۱۷۸٪	۶۰/۱	۲۱/۶	۱۰۰

اصولاً استفاده از ربات‌های درون لوله‌ای جهت بازرسی خطوط لوله زیرزمینی کاربرد دارد و خطوط روزمینی به دلیل در دسترس بودن خط، کمتر نیازمند استفاده از ربات برای بازرسی هستند. با این حال، در کاربردهای عملی جهت استفاده از ربات‌های درون لوله‌ای، برای خطوط لوله نفت و گاز، به ندرت از ردیوسر برای خطوط زیرزمینی استفاده می‌گردد. زیرا اکثر این خطوط جهت تعمیر، نیازمند انجام توپک‌رانی به منظور تمیزکاری خط و ایمن‌سازی شرایط لوله قبل از تعمیر هستند و استفاده از ردیوسر جهت این خطوط سبب گیرکردن توپک در لوله شده و به عنوان مانعی برای توپک‌رانی محسوب می‌شود. از این رو توانایی بهتر عملکرد کنترلر فازی، جهت هدایت و کنترل حرکت ربات درون لوله‌های مستقیم نسبت به لوله‌های دارای ردیوسر، ارزشی دوچندان پیدا می‌کند زیرا می‌تواند درصد بسیار بالایی از نیازها در کاربردهای عملی استفاده از ربات‌های درون لوله‌ای جهت بازرسی خطوط زیرزمینی نفت و گاز را برآورده سازد.

عبور از لوله مستقیم با اغتشاش جریان

در این بخش عملکرد کنترلر فازی در پاسخ به اغتشاشات محیطی بررسی می‌گردد. ربات در لوله مستقیم حرکت می‌کند و در لحظه بین ۲ تا ۴ ثانیه یک جریان در لوله با سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه در جهت خلاف حرکت به ربات اعمال می‌شود. با توجه به این که در آن بازه خود ربات نیز دارای سرعت می‌باشد سرعت جریان مقاوم در برابر حرکت ربات با جمع این دو سرعت و فیدبک گرفتن در هر لحظه از سرعت ربات به دست خواهد آمد. این نیرو به صورت یک نیروی متمرکز در مرکز بدنه ربات (با توجه به تقارن شکل هندسی ربات) در نرم‌افزار آدامز اعمال می‌شود. برای حالتی که ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه مدنظر می‌باشد نیروی ناشی از اغتشاش باعث افت ناگهانی سرعت به ۳۵ میلی‌متر بر ثانیه می‌گردد و پس از واکنش کنترلر در افزایش گشتاور موتورها با فراجاهش، سرعت به ۵۸ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد. در نهایت کنترلر پس از ۰/۴ ثانیه ربات را به سرعت قبلی خود بر می‌گرداند. پس از برداشته شدن نیروی اغتشاش نیز تغییرات مشابهی اتفاق می‌افتد و پس از جهش سرعت ربات به ۶۲ میلی‌متر بر ثانیه کنترلر گشتاور را کاهش داده و در زمان نشست ۰/۴ ثانیه ربات به وضعیت تعادل برمی‌گردد. در حالت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه نیز تغییرات سرعت و گشتاور مشابه با حالت قبل است و با وجود افزایش نیروی ناشی از اغتشاش نسبت به سرعت ۵۰، زمان نشست پاسخ‌گذاری کنترلر در واکنش به اغتشاش بیرونی ۰/۴ ثانیه است.

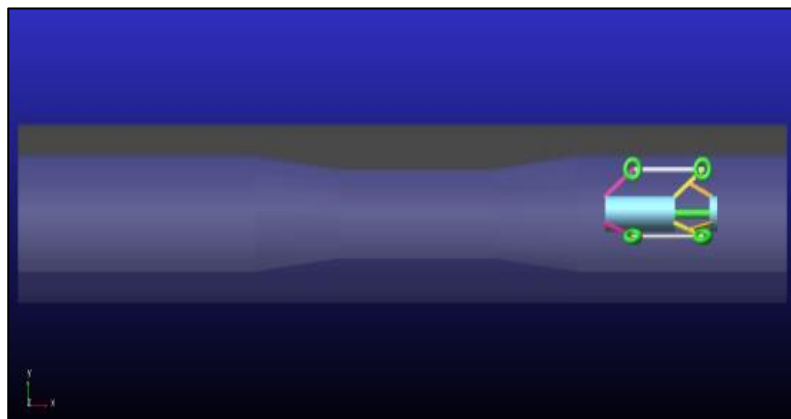
در کاربردهای عملی استفاده از ربات جهت خطوط زیرزمینی نفت و گاز، به دلیل اینکه اکثر لوله‌ها قبل از انجام بازرسی به وسیله ربات، امکان توپک‌رانی شدن را دارند به ندرت شاهد وجود سیال درون لوله در مسیر ربات برای بازرسی خطوط می‌باشیم، اما در موارد معدودی که خطوط امکان توپک‌رانی را نداشته باشند و تنها فشار خطوط تخلیه شود، خصوصاً در محل‌هایی با ارتفاع پایین، سیال تجمع خواهد نمود و نتایج این بخش نیز بیانگر توانایی ربات دارای کنترلر فازی برای حرکت در شرایط ذکر شده است.

بررسی تاثیر توزیع کننده بهینه گشتاور در انرژی مصرفی ربات

در این بخش شبیه‌سازی حرکت ربات با استفاده از توزیع کننده بهینه گشتاور مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر آن بر عملکرد ربات به خصوص در مصرف توان مشاهده شد. با توجه به این که اساس عملکرد بلوک توزیع کننده، توزیع گشتاور بر اساس نسبت بین

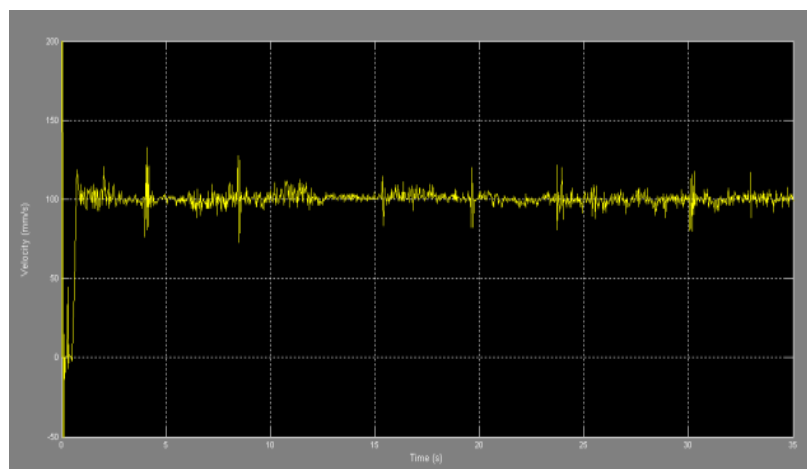


نیروی عمودی روی هر چرخ است تا چرخ‌هایی که نیروی عمودی صفر دارند و تأثیری بر حرکت ربات ندارند، موتور خاموش شده و مصرف توان کاهش یابد، محیط مورد آزمایش لوله‌ای با دو ردیوسر کاهنده و افزایشنده است تا تأثیر این سیستم بر عملکرد ربات بیشتر مشاهده شود. شکل (۱۱) لوله مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: لوله مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم توزیع‌کننده بهینه گشتاور

سرعت مطلوب ربات در سیستم کنترلی روی ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه قرار داده شده و شبیه‌سازی دینامیکی انجام شده است. نمودار شکل (۱۲) سرعت ربات با توزیع‌کننده بهینه گشتاور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: سرعت ربات با توزیع‌کننده بهینه گشتاور

در فرایند شبیه‌سازی مشاهده گردید، چرخ بالایی عقب در عبور از ردیوسر اول و چرخ بالایی جلو در عبور از ردیوسر دوم تماس آنها با دیواره لوله قطع شده است. چرخ‌های ۴ و ۶ یعنی چرخ‌های عقب سمت راست و چپ تغییرات مشابهی دارند و در لحظاتی از زمان عبور از ردیوسر اول، به دلیل جمع شدن مکانیزم، تماس آنها با لوله را از دست می‌دهند. مقدار میانگین نیروی عمودی اعمال شده به هر چرخ در جدول (۴) نشان داده شده است.



جدول ۴: میانگین نیروی عمودی چرخ‌های ربات

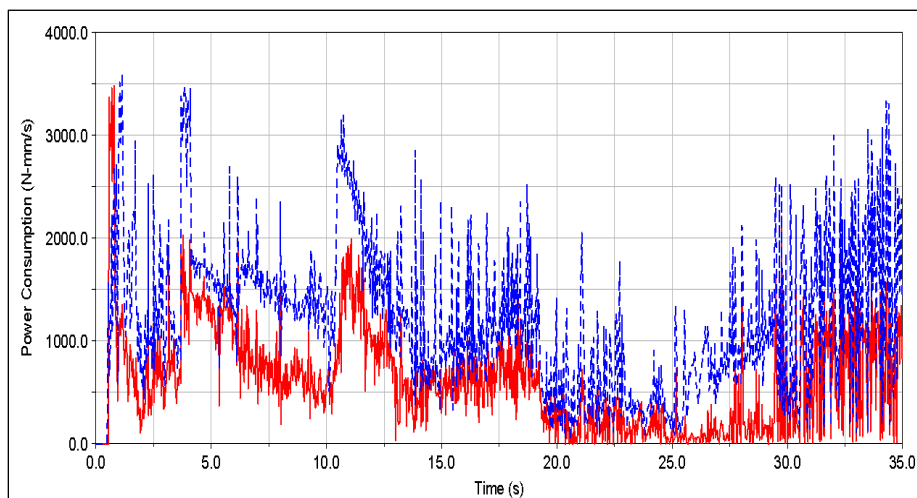
چرخ	میانگین نیروی عمودی (نیوتن)
۱	۹/۱
۲	۳/۳
۳	۲۰/۸
۴	۱۸/۸
۵	۱۹/۹
۶	۱۸/۹

سیستم توزیع‌کننده بهینه گشتاور با توجه به مقدار نیروی عمودی چرخ‌ها در هر لحظه، سیگنال دریافتی از کنترلر فازی را به موتور چرخ‌ها می‌رساند و از این مقادیر برای محاسبه گشتاور اعمالی به هر چرخ استفاده می‌کند. جدول (۵) مقدار میانگین گشتاور اعمال شده به چرخ‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین گشتاور به چرخ‌های ۳ و ۵ که بیشترین نیروی عمودی را متحمل می‌شوند، داده شده است و کمترین گشتاور به چرخ ۲ با کمترین نیروی عمودی داده شده است. در نمودارها نیز مشخص است که در جایی که نیروی عمودی روی چرخ صفر شده است، گشتاور اعمالی به آن چرخ نیز صفر شده است.

جدول ۵: میانگین گشتاور وارده به هر یک از چرخ‌های ربات

چرخ	میانگین گشتاور (نیوتن-میلی‌متر)
۱	۲۷/۴
۲	۹/۸
۳	۶۲/۵
۴	۵۶/۳
۵	۵۹/۶
۶	۵۶/۸

شکل (۱۳) نیز مقایسه مصرف توان بین دو حالت استفاده از سیستم توزیع‌کننده بهینه گشتاور و بدون آن را نشان می‌دهد که از جمع مصرف توان برای شش چرخ محاسبه شده است. میانگین مصرف توان در عبور از ردیوسر در حالت بدون توزیع‌کننده بهینه گشتاور به میزان 1234 N.mm/s است که این مقدار با استفاده از توزیع‌کننده بهینه گشتاور به 765 N.mm/s کاهش پیدا کرده است که کاهش ۳۸ درصدی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است این کاهش عمدتاً در زمان‌های ۴ تا ۱۴ ثانیه و ۱۹ تا ۳۰ ثانیه رخ داده است یعنی زمان‌هایی که ربات در حال رد شدن از ردیوسرها است که قابل انتظار است زیرا که در این مواقع یکی از چرخ‌های بالا تماس خود را از دست داده است و توان مصرفی آن صفر شده است. در سایر اوقات نیز مصرف توان به‌طور کلی کاهش پیدا کرده است، زیرا گشتاور بیشتر به چرخ‌هایی که قابلیت تامین نیروی کشش بیشتری دارند اعمال شده است و لغزش چرخ‌ها کاهش پیدا کرده و حرکت ربات بهینه‌تر شده است.



شکل ۱۳: گشتاور اعمال شده به چرخ‌های ربات

بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از ربات‌ها به منظور بازرسی خطوط لوله زیرزمینی از نیازهای حال حاضر صنعت نفت و گاز کشور است و می‌تواند به عنوان روشی مطمئن، سریع و با هزینه‌ای به مراتب کمتر از روش‌های جایگزین نظیر استفاده از توپک‌های هوشمند، به کار گرفته شود. در بخش اول 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 ردیوسر، زانویی، رسوبات و خوردگی و نیز لوله عمودی انجام شد. در بخش دوم این پژوهش، توانایی کنترلر فازی در تعقیب سرعت ورودی مطلوب و خصوصیات پاسخ آن در حالت پایدار بررسی شد که نتایج کار بیانگر عملکرد بهتر کنترلر فازی در تعقیب سرعت‌های بالاتر و داشتن پاسخ‌گذرای بهتر در این سرعت‌ها بوده و همچنین عملکرد بهتر آن هنگام به‌کارگیری در لوله مستقیم نسبت به لوله دارای ردیوسر می‌باشد که در این خصوص نیز متناسب با نیاز صنعت نفت و گاز کشور است. در بخش سوم نتایج در خصوص امکان بهینه‌کردن سیستم کنترلی طراحی شده برای ربات، با به‌کارگیری سیستم توزیع‌کننده بهینه گشتاور بحث گردید. این روش سبب شد تا سیگنال خروجی کنترلر فازی را به صورت هدفمند به چرخ‌های ربات برساند به گونه‌ای که چرخ‌هایی که در حین حرکت تماس خود با جداره لوله قطع می‌شود، عملاً سیگنالی دریافت نکنند و موتور آنها خاموش شود و در مقابل چرخ‌هایی که مشارکت بیشتری در حرکت ربات دارند گشتاور بیشتری دریافت کنند. به‌کارگیری این روش سبب کاهش ۳۸ درصدی توان مصرفی ربات و در نتیجه بهینه‌سازی مصرف انرژی ربات گردید که مقدار قابل توجهی به نظر می‌رسد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت ربات طراحی شده، علی‌رغم تمامی محدودیت ذکر شده در عبور از شرایط هندسی و خم‌ها و زانویی‌ها و با وجود ضعف‌هایی نظیر قطع تماس برخی چرخ‌ها با بدنه لوله در هنگام تغییر شرایط هندسی، به دلیل داشتن مکانیزم کم هزینه‌تر در مقایسه با موارد مشابه و به دلیل توانایی سیستم کنترلی آن در مصرف بهینه انرژی، پتانسیل بالایی برای ساخت نمونه واقعی و تجاری‌سازی و پاسخ‌گویی به نیاز حال حاضر صنعت نفت و گاز کشور دارد و در صورت بهبود طراحی و انجام گام‌های پیشرفته‌تر، اثربخشی آن در آینده بیشتر نیز خواهد شد.

تشکر و قدردانی

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



مراجع

- [1] Bekey, G.A., (2005). *Autonomous robots from biological inspiration to implementation and control*, 1nd ed., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, United States of America, 577.
- [2] Sam, G.S., Lewis, F.L., (2006). *Autonomous mobile robots: Sensing, control, decision making and applications*, Automation and Control Engineering, CRC Press, Boca Raton, Florida, United States of America, 736.
- [3] Okada, T., Sanemori, T., (1987). MOGRER. A vehicle study and realization for in-pipe inspection tasks, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3, pp 573–582.
- [4] Kawaguchi, Y., Yoshida, I., Kurumatani, H., Kikuta, T., Yamada, Y., (1995). Internal pipe inspection robot, *Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 857–862.
- [5] Park, J., Hyun, D., Cho, W., Kim, T., Yang, H., (2001). Normal-force control for an in-pipe robot according to the inclination of pipelines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58, pp 5304–5310.
- [6] Hu, Z., Appleton, E., (2005). Dynamic characteristics of a novel self-drive pipeline pig, *IEEE Transactions on Robotics*, 21 (5), pp 781–789.
- [7] Zhang, Y., Yan, G., (2007). In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting, *Mechanism and Machine Theory*, 42, pp 1618–1631.
- [8] Miyagawa, T., Iwatsuki, N., (2007). Characteristics of in-pipe mobile robot with wheel drive mechanism using planetary gears, *Proc. International Conference on Mechatronics and Automation*, pp 3646–3651.
- [9] Lee, D., Park, J., Hyun, D., Yook, G., Yang, H., (2012). Novel mechanisms and simple locomotion strategies for an in-pipe robot that can inspect various pipe types, *Mechanism and Machine Theory*, 56, pp 52–68.
- [10] Yeh, C.Y., Chou, S.C., Huang, H.W., Yu, H.C., Juang, J.Y., (2019). Tube-crawling soft robots driven by multistable buckling mechanics, *Extreme Mechanics Letters*. 26, pp 61–68.
- [11] Koh, K.H., Farhan M., Yeung K.P., Tang D.C., Lau M.P., Cheung P.K., Lai K.W., (2021). Teleoperated service robotic system for on-site surface rust removal and protection of high-rise exterior gas pipes, *Automation in Construction*, 125, pp103609.