



طراحی یک ماژول جانبی جدید برای افزایش قابلیت حرکت ربات‌های متحرک بازرسی در خطوط لوله

علیرضا هادی^{1*}، مرتضی عبدالهی²

1- استادیار، مهندسی سیستم و مکترونیک، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم و مکترونیک، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، 143951374، hrhadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 مهر 1394
پذیرش: 25 آذر 1394
ارائه در سایت: 03 بهمن 1394
کلید واژگان:
ربات بازرسی لوله
ماژول
مکانیزم
قابلیت حرکت

ربات‌های متحرک چرخ دار با قابلیت بازرسی محیط‌های خاص نظیر لوله کاربرد گسترده‌ای در صنعت دارند. یکی از ویژگی‌های مهم این ربات‌ها قابلیت حرکت در مجاری محدود و ویژه می‌باشد. وجود محیط پیش بینی نشده و موانع موجود در مسیر حرکت یکی از معضلات جدی در موفقیت مأموریت ربات‌ها محسوب می‌شود. در این مقاله یک مکانیزم نوین برای افزایش قابلیت حرکت ربات هنگام مواجهه با موانع کوچک، گودال و یا رسوب زیاد ارائه گردیده است. همچنین این مکانیزم قابلیت حرکت ربات در مسیرهای شیب‌دار را نیز افزایش می‌دهد. مکانیزم از دو لینک متحرک تشکیل شده که در کناره‌های ربات مستقر شده‌اند. این دو لینک که در دو سمت ربات متحرک چهار چرخ قرار می‌گیرد هنگام مواجهه با مانع یا حفره ضمن تماس با جلو یا عقب ربات تعادل نیروهای عمودی وارد بر چرخ‌ها را تغییر داده و باعث افزایش توان حرکتی ربات می‌گردد. همچنین لینک‌ها می‌تواند با تماس با تاج لوله باعث افزایش نیروی عمودی چرخ‌ها و در نتیجه افزایش قابلیت حرکت ربات شود. طول لینک‌ها علاوه بر چرخش آن‌ها قابل تغییر می‌باشد. لذا یک مکانیزم دو درجه آزادی ایجاد شده که یک موتور حرکتی برای تحریک آن استفاده شده است. لذا برای تغییر درجه آزادی فعال از یک مکانیزم قفل کننده مبتنی بر محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است. تحلیل صورت گرفته و شبیه‌سازی‌های انجام شده بیانگر قابلیت مکانیزم در افزایش قابلیت حرکت ربات می‌باشد. عملکرد مکانیزم در محیط نرم‌افزار تحلیل دینامیکی آدامز صحت‌گذاری شده است.

Design of a new modular accessory for increasing traction of mobile inspection robots in pipelines

Alireza Hadi*, Morteza Abdollahi

Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.
* P.O.B. 143951374, Tehran, Iran, hrhadi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 October 2015
Accepted 16 December 2015
Available Online 23 January 2016

Keywords:

Pipe inspection robot
Module
Mechanism
Traction

ABSTRACT

Wheeled mobile robots able to inspect pipe interior are typically used in industry. One of the major evaluations of these robots performance is mobility in limited spaces and special environments. Unanticipated area and obstacles along the robot path is one of the major challenges of robot success in missions. In this paper a novel module for increasing the robot traction when encountering small obstacles, paddle or large deposit is introduced. In addition, the mechanism increases the robot traction when moving in high inclination pipes. The mechanism consists of two links mounted beside the four wheel drive robot. When the robot is faced with an obstacle or a paddle and cannot move further, although the robot wheels rotate, contacting the module's links to pipe surface changes the balance of normal forces applied between the pipe and wheels. Further, when the links are extended to contact the upper part of pipe, the wheels normal forces are increased, providing a higher traction force consequently. Length of links may change in addition to its rotation. So, a two DOFs mechanism is provided in which one motor is used as actuator. For switching active DOF, a locking mechanism is utilized using shape memory alloys actuators. The analysis and simulations show the capability of mechanism in increasing the robot traction. The mechanism performance is validated through ADAMS dynamic modeling software.

شده در سازه به محیط ارسال می‌گردند. بر روی ربات سنسورهای متنوعی بسته به نیاز نصب تا آگاهی کاملی از محیط کسب گردد. یکی از المان‌های مهم روی ربات‌ها دوربین می‌باشد که علاوه بر تحقق بازرسی دیداری، کمک فراوانی به اپراتور هدایت کننده ربات به درون محیط می‌نماید. موانع موجود در مسیر حرکت ربات‌ها نظیر رسوبات ته نشین شده یا چسبیده به کف لوله،

1- مقدمه

ربات‌های متحرک بازرسی¹ در صنایع متنوعی چون آب و فاضلاب، نفت، گاز و پتروشیمی کاربرد گسترده‌ای دارند. این ربات‌ها برای شناسایی عیوب ایجاد

1- Inspection

Please cite this article using:

A. Hadi, M. Abdollahi, Design of a new modular accessory for increasing traction of mobile inspection robots in pipelines, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 333-344, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گودال یا حفره ایجاد شده در اثر آسیب دیدگی و موانعی نظیر قلوه سنگ و اجسام نظیر آن مانع بزرگی برای تحقق یا ادامه عملیات می‌باشد.

بسترهای رباتیکی متحرک با این کاربری معمولاً مبتنی بر چرخ¹ یا شنی² هستند. ربات‌های چرخدار ساختار ساده‌تری در مقایسه با انواع دارای شنی هستند ولی قابلیت حرکت آن‌ها محدودتر می‌باشد. بواسطه سادگی، ارزانی و راندمان کافی برای بسیاری از عملیات‌ها این ربات‌ها در صنعت رایجتر می‌باشند. همچنین همواره آن‌ها را بصورت چهار چرخ محرک³ ارائه می‌دهند [1].

تحقیقات گوناگونی توسط محققان در زمینه توسعه بسترهای رباتیکی برای طی لوله‌ها و اتصالات آن‌ها نظیر خم، زانویی، اتصال تی⁴ و غیره ارائه شده است. روسلین و همکاران [1] ساختارهای مختلف ربات‌های بازرسی لوله را بررسی نمودند. یک دسته از این تحقیقات بسترهای رباتیکی تطبیق پذیر با داخل لوله به منظور تنظیم فشار میان ربات و دیواره لوله می‌باشد. یانگ سیک و همکاران [2] توسعه یک بستر رباتیکی با دو شنی برای بازرسی داخل لوله‌ها از طریق یک مکانیزم تطبیق پذیر را بررسی نمودند. ویژگی خاص آن استفاده از فقط دو شنی تطبیق پذیر می‌باشد که باعث سادگی کنترل در مقایسه با ربات‌های دارای سه شنی می‌شود. در مقابل عبور از موانع موجود در داخل لوله توسط این سیستم کاملاً موفقیت آمیز نبوده است. همچنین یانگ سیک و بیونگ جو [3] بررسی الگوریتم‌های تعیین مسیر این ربات را برای بازرسی موفقتر درون لوله و اتصالات آن مدنظر قرار دادند. جانک‌هون و همکاران [4] توسعه یک ماژول ربات متشکل از چهار شنی در زوایای 45 درجه را برای دسترسی و بازرسی لوله‌های قطر 150 میلیمتر و بالاتر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با تنظیم سرعت هر یک از شنی‌ها عبور و دورزدن در زانویی و اتصال تی را محقق نمودند. اگرچه مشکل تکینگی ربات هنگام عبور از اتصال تی و وای⁵ حل شده است، لیکن پیچیدگی بسیار زیاد ربات مانع صنعتی شدن آن شده است. جونگ‌وان و همکاران [5] کنترل نیروی عمودی در یک مکانیزم مبتنی بر شنی تطبیق پذیر را برای عبور از اتصالات لوله مورد بررسی قرار دادند. شنی آن دارای دو بخش است که جلویی از یک شنی و عقبی شامل دو شنی به منظور تنظیم چرخش شنی در سطح ناهموار می‌باشد. مشکل بزرگ این تحقیق وجود تکینگی در هنگام عبور از اتصال تی است. همچنین مقدم و همکاران توسعه یک بستر رباتیکی تطبیق پذیر برای عبور از خم، لوله‌های عمودی و موانع موجود در مسیر توسط یک استراتژی تنظیم قطر ربات را مورد توجه قرار دادند [6]. ربات اگرچه امکان عبور از مانع و لوله عمودی را داراست ولی با مشکلاتی هنگام عبور از مانع در لوله‌های عمودی روبرو می‌باشد.

برخی از تحقیقات ربات‌های ماژولار متشکل از چندین ماژول که منجر به ایجاد رباتی با طول زیاد می‌گردد را ارائه نموده‌اند. درتین و همکاران [7] رباتی ماژولار شبیه مار با توانایی زیاد در عبور از انواع اتصالات درون لوله را بررسی نمودند. ماژول‌ها از طریق چرخ‌هایی با لوله در تماس قرار می‌گیرد. ویژگی منحصر به فرد آن عبور از گوشه‌های تیز بدون خم است. لیکن در موقعیت‌هایی که تنها یک موتور برای ایجاد حرکت رو به جلو استفاده می‌شود (مانند خم و اتصال)، ممکن است مقدار گشتاور کافی نباشد. همچنین ساتو و همکاران [8] ربات ماژولار مشابهی را با همین هدف توسعه دادند ولی ماژول-

های این ربات با شنی با لوله تماس پیدا می‌کند. از طرفی برخی از محققین توسعه بسترهای رباتیکی کوچک و جدید را برای دسترسی به داخل لوله‌های با قطر کم هدفگذاری نموده‌اند. ژانگ و همکارانش [9] یک مکانیزم ساده با به کارگیری یک موتور با الهام از حرکت کرم توسعه دادند. اگرچه ربات قادر به بازرسی لوله‌های دارای جریان می‌باشد، ولی قادر به بازرسی لوله‌های عمودی و دارای مانع نمی‌باشد. همچنین کاکوگاوا و شوگن توسعه یک ربات کوچک که با چرخش یک پیچ دو قسمت آن نسبت به هم تغییر فاصله داده و ایجاد حرکتی شبیه کرم می‌نمود را مدنظر قرار دادند [10]. سرعت بالا و نوآوری در استفاده از تنها یک موتور برای حرکت ماریچی از ویژگی‌های مثبت آن طرح است. اگرچه عدم توانایی حرکت در لوله‌های عمودی از معایب آن محسوب می‌شود. زین و همکاران یک ربات کوچک با چرخ‌های مغناطیسی را برای بازرسی لوله‌های فلزی توسعه دادند [11]. امکان بازرسی لوله‌های عمودی از مزایای آن و عدم بازرسی لوله‌های غیرآهنی و لغزش در لوله‌های آهنی با افزایش وزن ربات، از عیوب آن محسوب می‌شود. یوم و همکاران نیز یک ربات کوچک با ترکیب تنظیم نیروی مغناطیسی ربات با لوله و حرکت شبیه کرم توسعه دادند. به دلیل وجود یک بخش انعطاف پذیر به عنوان بخش تماسی، ربات توانایی بالایی در حرکت در لوله‌های پر رسوب و دارای انحراف هندسی دارد. البته وجود انحراف هندسی در لوله باعث عملکرد ناپایدار در بعضی مکان‌ها می‌شود. تطبیق ناپذیری با قطر داخلی لوله از دیگر معایب آن می‌باشد [12]. لی و همکاران یک مکانیزم تطبیق پذیر کوچک و خاص با قابلیت تغییر شکل و جهت برای عبور از انواع اتصالات لوله را توسعه دادند. عبور از اتصال کاهنده و خم با شعاع صفر از ویژگی‌های آن است. ولی گشتاور بالا هنگام چرخش دست‌های ربات به طور همزمان از معایب آن می‌باشد [13].

برخی دیگر از تحقیقات در زمینه ربات‌های متحرک روی زمین با قابلیت عبور از مسیرهای ناهموار متمرکز شده است. گرانوسیک ربات‌های مختلف بخصوص انواع ماژولار برای طی مسیرهای ناهموار را بررسی نمود [14]. سوو و همکاران رباتی به نام فلیبوت⁶ توسعه دادند که می‌توان از طریق بازوهای کناری خود و تغییر در بارگذاری ربات برای حفظ تعادل، مسیرهای ناهموار و پله‌ها را به خوبی طی نماید. این ربات اگرچه سرعت بالایی در بالا رفتن از پله دارد ولی در عبور از پله‌های بزرگ ناتوان است [15].

اگرچه تاکنون بسترهای رباتیکی مختلفی برای طی مسیر لوله‌ها با اتصالات خاص توسعه داده شده است، ولی در هیچ یک از این مسائل لوله‌های آسیب دیده پس از اجرا و توانمندی ربات در عبور از آن‌ها بطور جدی بحث نشده است. همچنین هیچ یک از بسترهای رباتیکی معرفی شده بصورت یک ماژول جانبی و مستقل ارائه نشده است. بسترهای رباتیکی چهارچرخ متحرک در صنعت بسیار رایج بوده و درصد بالایی از خطوط شبکه فاضلاب توسط آن‌ها بازرسی می‌گردد. اگر بستر رباتیکی آن‌ها پیچیده شود، سرعت عمل کاهش، قیمت محصول افزایش و نیروی متخصص‌تری برای کاربری و تعمیرات ربات نیاز می‌باشد.

در این مقاله یک بستر رباتیکی رایج در بازرسی شبکه‌های فاضلاب مدنظر قرار گرفته است. یک مکانیزم نوین بصورت یک ماژول جانبی قابل نصب بر روی ربات طراحی گردیده است. این ماژول جانبی قابلیت حرکت ربات در مأموریت را افزایش می‌دهد. ایده به کار گرفته در این مقاله این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند تا در صورت نیاز ماژول جانبی مورد

1- wheel
2- Track
3- Four wheel drive
4- T
5- Y

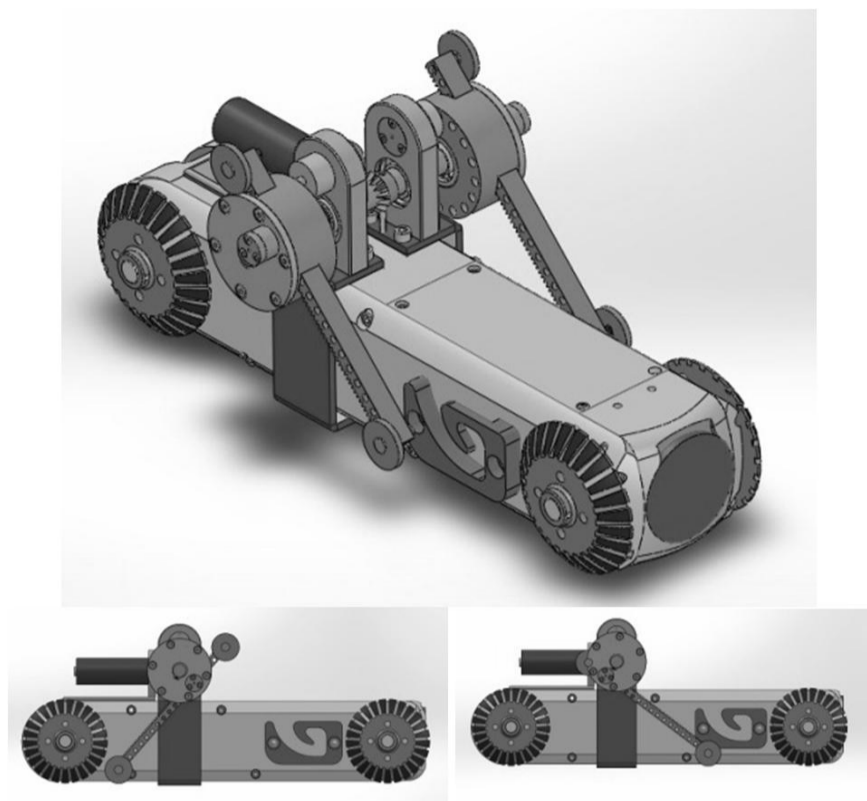


Fig. 1 Design of developed module mounted on a common robotic platform

شکل 1 طرح ماژول توسعه یافته که بر روی یک بستر رباتیکی نوعی نصب شده است

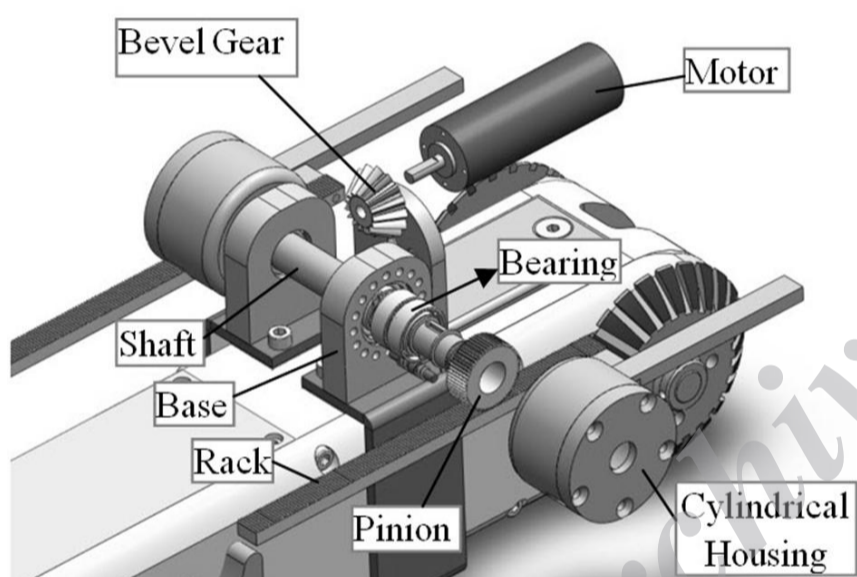


Fig. 2 Main elements of developed module

شکل 2 المان‌های اصلی ماژول توسعه یافته

در مکانیزم ماژول، حرکت چرخشی بازوهای کناری فعال شدن مود 1 و تغییر طول بازوهای جانبی فعال شدن مود 2 نامگذاری شده است. با توجه به وجود یک موتور در ماژول، در هر لحظه یکی از مودهای حرکتی می‌تواند فعال باشد. به منظور تعیین مود حرکتی فعال در ماژول بایستی از یک مکانیزم سوئیچ کننده استفاده نمود. این مکانیزم که خود بصورت یک ماژول مستقل در نظر گرفته شده است، بصورت یک ضامن قفل شو می‌باشد که وقتی قصد خارج کردن لینک‌ها از غلاف استوانه‌ای وجود دارد، قطعه استوانه‌ای را به بدن ربات قفل می‌نماید. وقتی قصد حرکت لینک به منظور تغییر طول آن وجود دارد، این ضامن چرخنده شانه‌ای را به قطعه استوانه‌ای قفل می‌نماید. مکانیزم ماژول قفل کننده از محرک آلیاژ حافظه‌دار برای به حرکت در آوردن یک پین متحرک بهره می‌گیرد. آلیاژ حافظه‌دار نوعی از مواد هستند که پس از تغییر شکل، در صورت تغییر دما توان بازیابی یک فرم خاص که به حافظه سپرده‌اند را دارا می‌باشند. به عنوان مثال یک فنر آلیاژ حافظه‌دار در صورت تغییر طول، در صورتی که گرم شود طول اولیه خود را بازیابی می‌کند. بروز این خاصیت در این مواد به کارگیری آن‌ها به عنوان یک محرک در

استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر ماژول می‌تواند همواره روی ربات نصب باشد و در صورت لزوم فعال شده و عملیات خود را به انجام برساند. با توجه به مشکلات دیده شده در شبکه‌های فاضلاب کشور می‌توان عوارض وجود مانع مانند قله سنگ بزرگ در مسیر، حفره بدلیل گشودگی شاخه‌های متوالی لوله، توده رسوبات جمع شده در یک محل و شیب‌های تند در برخی از لوله‌های خاص را از چالش‌های پیش رو در ربات‌های رایج مورد استفاده در صنعت دانست. در این مقاله به منظور توانمند سازی ربات‌های فعلی در صورت برخورد با این عوارض و عدم نیاز به جایگزینی و یا استفاده از ربات پیچیده‌تر یک ماژول جانبی ارائه گردیده است. در بخش دوم مقاله طرح و مکانیزم ماژول جانبی ارائه می‌شود. در بخش سوم مشکلات رایج در خطوط لوله برای پیشروی بیشتر ربات مطرح و استرژژی عمل ماژول برای عبور از آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش چهارم تحلیل مکانیزم ماژول و نحوه عمل آن برای چندین مأموریت رایج مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش پنجم شبیه‌سازی ماژول در محیط نرم افزار تحلیل دینامیکی آدامز¹ در اجرای مأموریت‌های خود بررسی می‌گردد. در بخش ششم نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد ماژول جمع‌بندی و در بخش هفتم نتیجه‌گیری مقاله بیان می‌شود.

2- طرح ماژول

طراحی ماژول برای استفاده بر روی ربات‌های صنعتی بازرسی که هم‌اکنون در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد صورت پذیرفته است. بخصوص این ماژول برای اضافه شدن روی بستر رباتیکی سوپوت 5 که هم‌اکنون به عنوان یک محصول جدید در صنعت ارائه و استفاده می‌شود طراحی می‌گردد. این بستر رباتیکی وزنی حدود 50 کیلوگرم دارد. اغلب ربات‌های این خانواده نیز وزنی در این حدود دارند.

مبنای طراحی ماژول در این مقاله آنالیز سینماتیکی و ارضای قیود هندسی در عملکرد ماژول بوده تا بتوان مؤثر بودن ماژول در عمل را نشان داد. البته در مرحله ساخت و هنگام طراحی جزئی تحلیل تنش و استحکام قطعات نیز در طراحی اعمال می‌شود و جنس قطعات انتخاب می‌گردد. از آنجائیکه این تحلیل روی کارکرد مفهومی ماژول و ابعاد آن تأثیر جدی نمی‌گذارد در این مقاله به آن پرداخته نشده است. لیکن المان‌های اصلی و مهمی نظیر محرک و المان‌های انتقال قدرت نیز تحلیل و انتخاب شده است.

ماژول ارائه شده مطابق شکل‌های 1 و 2 شامل یک محور چرخان می‌باشد که توسط یک موتور گیربکس و سیستم انتقال قدرت چرخنده مخروطی واسط به چرخش در می‌آید. در هر دو انتهای این محور یک قطعه استوانه‌ای نصب شده که در داخل آن یک چرخنده ساده (پینیون) واقع شده است. با چرخنده پینیون یک چرخنده شانه‌ای درگیر می‌باشد که توسط قطعه استوانه‌ای تثبیت و در یک مسیر خطی هدایت می‌شود. در صورتی که قطعه استوانه‌ای ثابت باشد، این چرخنده می‌تواند با چرخش خود چرخنده شانه‌ای را به حرکت درآورد. ولی در صورتیکه قطعه استوانه‌ای تثبیت نگردد، با چرخش محور، قطعه استوانه‌ای به همراه هر دو چرخنده پینیون و شانه‌ای به چرخش در می‌آیند. چرخنده شانه‌ای به عنوان لینک متحرک ماژول معرفی و در نظر گرفته می‌شود. ایده به کار گرفته شده در طراحی مکانیزم ماژول استفاده از فقط یک موتور محرک برای تنظیم میزان بازشدگی لینک‌های کناری و یا چرخش آن‌ها می‌باشد. لذا اگرچه یک مکانیزم دو درجه آزادی فراهم شده است ولی در هر لحظه یکی از درجات آزادی فعال می‌باشد.

1- ADAMS

ارتفاع مانع و یا عمق حفره به میزانی در نظر گرفته شده است که بدون استفاده از ماژول طراحی شده، ربات با چرخ‌های معمولی قادر به عبور از آن نبوده است. ارتفاع مانع معادل شعاع چرخ‌های حرکتی ربات می‌باشد. البته با توجه به غلبه ماژول بر وزن ربات هنگام جدا کردن چرخ‌های جلو یا عقب، این ارتفاع تا قطر چرخ‌ها قابل افزایش می‌باشد.

3-1- استراتژی عبور از حفره

ایجاد حفره یا گودال در داخل شبکه‌های فاضلاب یکی از آسیب‌های رایج می‌باشد. با توجه به جنس و سازه این لوله‌ها که در انواع سنتی از جنس بتن یا سفال می‌باشد ممکن است بدلیل فرسودگی یا رانش‌های زمین مطابق شکل 4 دچار شکستگی شده و حفره‌هایی در آن ایجاد گردیده باشد. همچنین در انواع سنتی این لوله‌ها که از جنس پلی اتیلن ساخته می‌شود، ممکن است هنگام اجرای خط لوله، دو قطعه لوله مجاور هنگام نصب مانند شکل 5 به خوبی در کنار هم قرار نگرفته باشند و اصطلاحاً شبکه دارای آسیب بند باز¹ شده باشد. در صورت مواجهه ربات با این آسیب همانطور که در شکل 8 بیان گردیده است، چرخ‌های جلو در داخل حفره افتاده و سطح کف ربات با قسمتی از لوله در تماس قرار می‌گیرد. در این وضعیت علی‌رغم چرخش چرخ‌های عقب و ایجاد نیروی جلو برنده توسط آن، نیروی اصطکاک کف ربات با سطح لوله از آن بزرگتر بوده و ربات امکان حرکت رو به جلو را ندارد. در این وضعیت اصطلاحاً ربات در جا کار می‌کند و با چرخش چرخ‌ها حرکت رو به جلو ندارد.

نحوه عملکرد ربات در خروج از حفره در نرم افزار آدامز شبیه سازی شده است که وضعیت ربات در قسمت‌های مختلف عملیات با استخراج از محیط این نرم افزار در شکل 8 نمایش داده شده است.

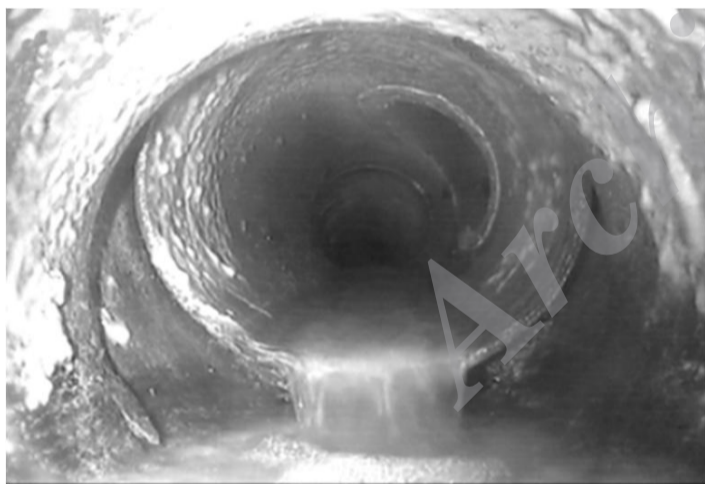


Fig. 4 Pipe breakage fault

شکل 4 آسیب شکستگی لوله

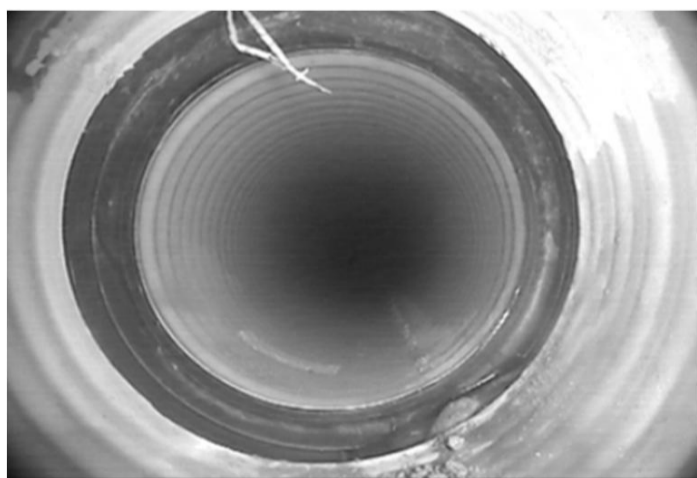


Fig. 5 Open joint pipe fault

شکل 5 آسیب بند باز در لوله

1- Open joint

سیستم‌های میکاترونیکی را توجیه می‌نماید. از طرفی گرم کردن این مواد به سادگی با تحریک الکتریکی آن‌ها صورت می‌گیرد. عبور جریان الکتریکی از این مواد بواسطه وجود مقاومت الکتریکی در آن‌ها باعث گرم شدن، تغییر فاز کریستالی و در نتیجه تغییر شکل و اعمال نیرو به سبب آن می‌گردد.

آلیاژ حافظه‌دار مورد نظر برای استفاده در ماژول قفل کننده قیمتی حدود ده دلار دارد. اگر چه می‌توان از مکانیزم‌های الکترومکانیکی نظیر سولنوئیدها نیز برای ایجاد حرکت خطی استفاده نمود، لیکن سادگی مکانیزم طراحی شده از یک سو و امکان کارکرد در محیط خیس و مرطوب درون لوله باعث شد تا در این طرح از آلیاژ حافظه‌دار به عنوان محرک خطی سیستم قفل کننده استفاده شود. همچنین در سولنوئیدها وجود قطعه آهنی برای بهره‌گیری از خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی ماده ضروری می‌باشد در حالیکه در این سیستم‌ها بدلیل کارکرد در محیط خیس از استفاده از آلیاژهای آهنی پرهیز می‌شود.

مطابق شکل 3 یک محرک فنر آلیاژ حافظه‌دار و یک فنر معمولی فشاری در دو طرف یک ضامن تعبیه شده در قطعه استوانه‌ای مستقر شده‌اند. وقتی فنر آلیاژ حافظه‌دار تحریک نباشد، نیروی فنر معمولی که به عنوان فنر بایاس در سیستم عمل می‌کند ضامن را به سمت چپ حرکت داده و با ورود ضامن به چرخنده شانه‌ای آنرا قفل می‌نماید. در این حالت ضامن از قطعه سمت راست که پایه می‌باشد خارج گردیده است و لذا قطعه استوانه‌ای امکان چرخش دارد. وقتی آلیاژ حافظه‌دار تحریک می‌شود، از دیاد طول داده و ضمن اعمال نیرو ضامن را به سمت راست حرکت داده و موجب قفل شدن قطعه استوانه‌ای به پایه می‌گردد. در این وضعیت چرخنده شانه‌ای آزاد بوده به راحتی امکان حرکت دارد.

3- استراتژی‌های افزایش قابلیت حرکت با فعال نمودن ماژول جانبی

یک ربات بازرسی در انجام عملیات خود با موانع مختلفی مواجه می‌شود. این موانع بسته به کاربری خط لوله متفاوت می‌باشد. یکی از خطوط لوله پر چالش که پیش بینی دقیق از وضعیت آن مشکل می‌باشد، شبکه‌های انتقال فاضلاب شهری است. در این محیط انواع مواد امکان حضور در شبکه را داشته و آسیب‌های متنوعی نیز ممکن است در لوله ایجاد شده باشد. در این مقاله سه آسیب مهم حفره، مانع و توده رسوبات یا شیب زیاد در لوله به عنوان چالش در حرکت ربات مدنظر قرار گرفته است.

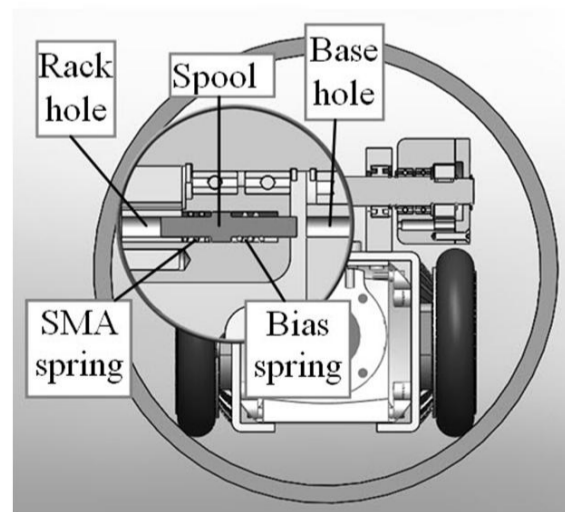


Fig. 3 Mechanism of switching module degrees of freedom actuated by shape memory alloys

شکل 3 مکانیزم سوئیچ کننده درجات آزادی ماژول با به کارگیری محرک آلیاژ حافظه‌دار

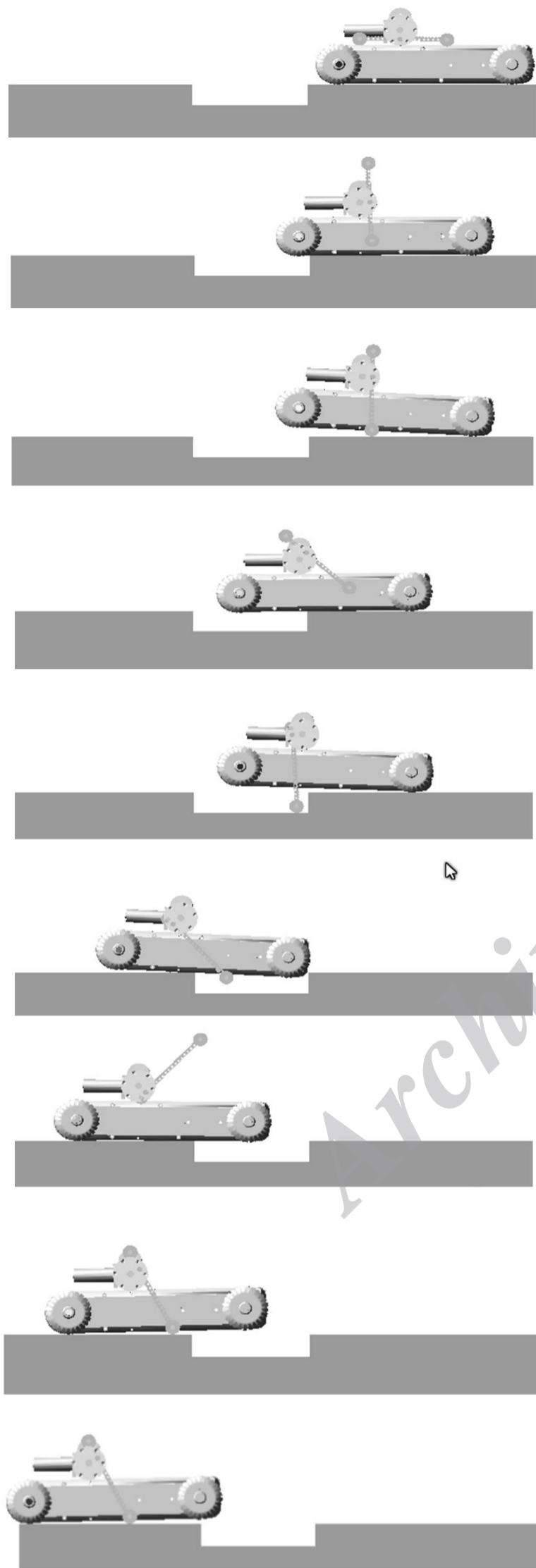


Fig. 8 Functionality of module accessory in forward movement of blocked robot because of front wheel entrance into a paddle

شکل 8 عملکرد ماژول جانبی برای ادامه حرکت رو به جلو ربات متوقف شده بدلیل ورود چرخ‌های جلو به حفره

نحوه عملکرد ربات در عبور از حفره در نرم افزار آدامز شبیه سازی شده است که وضعیت ربات در قسمت‌های مختلف عملیات با استخراج از محیط این نرم افزار در شکل 8 نمایش داده شده است. نحوه تحریک ماژول بصورت قیود سینماتیکی بوده است. در شکل‌های 6 و 7 قیود سینماتیکی اعمال شده ملاحظه می‌شود.

تأثیر ماژول جانبی در کمک به ربات برای ادامه حرکت خود خارج نمودن چرخ‌های جلو از گودال، حذف تماس کف ربات با سطح لوله و در نتیجه حذف نیروی اصطکاک مقاوم در مقابل حرکت است. بدین واسطه نیروی محرکه چرخ‌های عقب توان به جلو راندن ربات را داشته و ربات قادر به ادامه مسیر می‌گردد. اگر این مشکل برای چرخ‌های عقب هنگام حرکت رو به عقب ربات به منظور خارج شدن از لوله ایجاد شود ماژول جانبی به طریقی مشابه ربات را از حفره خارج می‌نماید. از طرفی اگر چرخ‌های عقب هنگام یک مأموریت و حرکت رو به جلو ربات در داخل یک حفره گرفتار و ربات شروع به کار درجا کند، و یا هنگام حرکت رو به عقب چرخ‌های جلو در حفره قرار گیرند، آنگاه بایستی نقطه اثر چرخ هرزگرد ماژول جانبی تغییر کرده اقدام به خروج ربات از حفره و ادامه مسیر نماید.

3-2- استراتژی عبور از مانع

یکی دیگر از مشکلات رایج در ادامه مأموریت ربات بازرسی مواجهه با موانعی نظیر قطعات نسبتاً بزرگ سنگ یا توده منسجم مواد می‌باشد. نمونه‌ای از این مشکل در شبکه‌های فاضلاب در شکل 9 ملاحظه می‌شود. هنگام مواجهه ربات با این مشکل که از عوارض ایجاد شده هنگام بهره برداری از لوله می‌باشد، قسمت جلو ربات در تماس با مانع قرار می‌گیرد. اگر ربات بخواهد رو به جلو حرکت کند بایستی علاوه بر خود، مانع مقابل را نیز

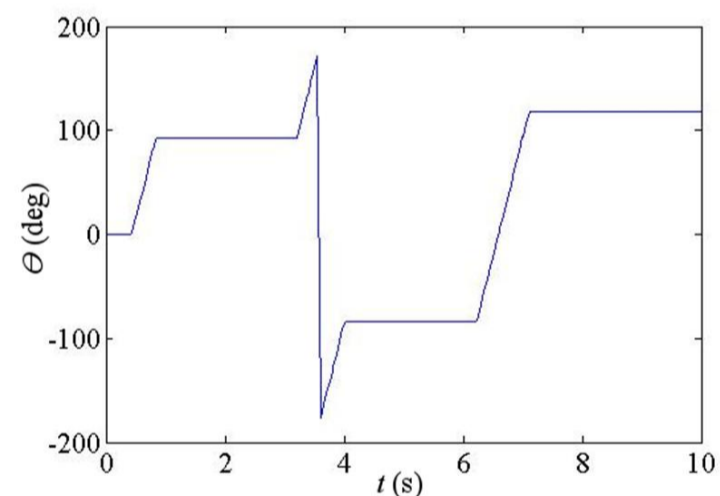


Fig. 6 Angular position applied to racks in passing a paddle

شکل 6 موقعیت زاویه‌ای اعمال شده به شانه‌های ها در عبور از حفره

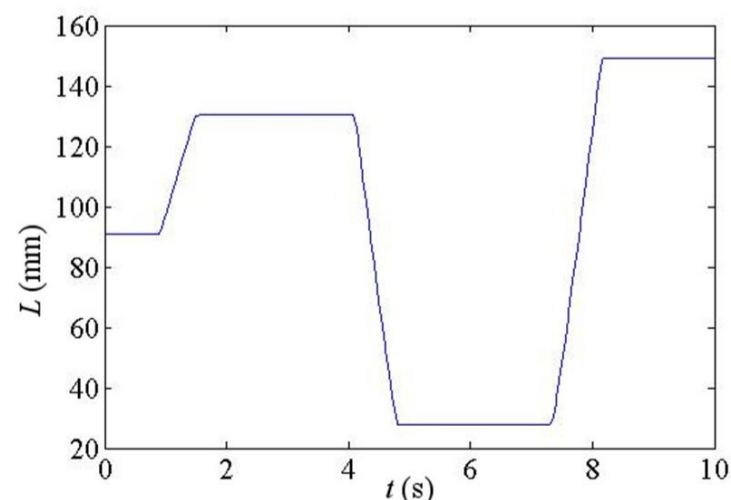


Fig. 7 Variation of racks length in passing a paddle

شکل 7 تغییر طول شانه‌ای ها در عبور از حفره

نیروی عمودی جدید، نیروهای عمودی موجود بین چرخ‌های محرک و سطح لوله افزایش یافته و لذا قابلیت حرکت ربات افزایش می‌یابد.

نکته حائز توجه دیگر امکان استفاده از این ایده برای افزایش نیروی عمودی چرخ‌های با سطح لوله در لوله‌هایی با شیب زیاد و حتی عمودی می‌باشد. در این موارد نیروهای عمودی کاهش یافته و نیروی محرک بایستی افزایش یابد. این در حالی است که نیروی وزن ربات نیز با حرکت رو به جلو مقاومت می‌نماید. در این وضعیت ماژول جانبی کمک مؤثری به افزایش قابلیت حرکت ربات می‌کند. البته توان موتور حرکتی ربات نیز در این مورد باید برای ایجاد حرکت کافی باشد. این راه حل در شکل‌های 14 و 15 بیان گردیده است.

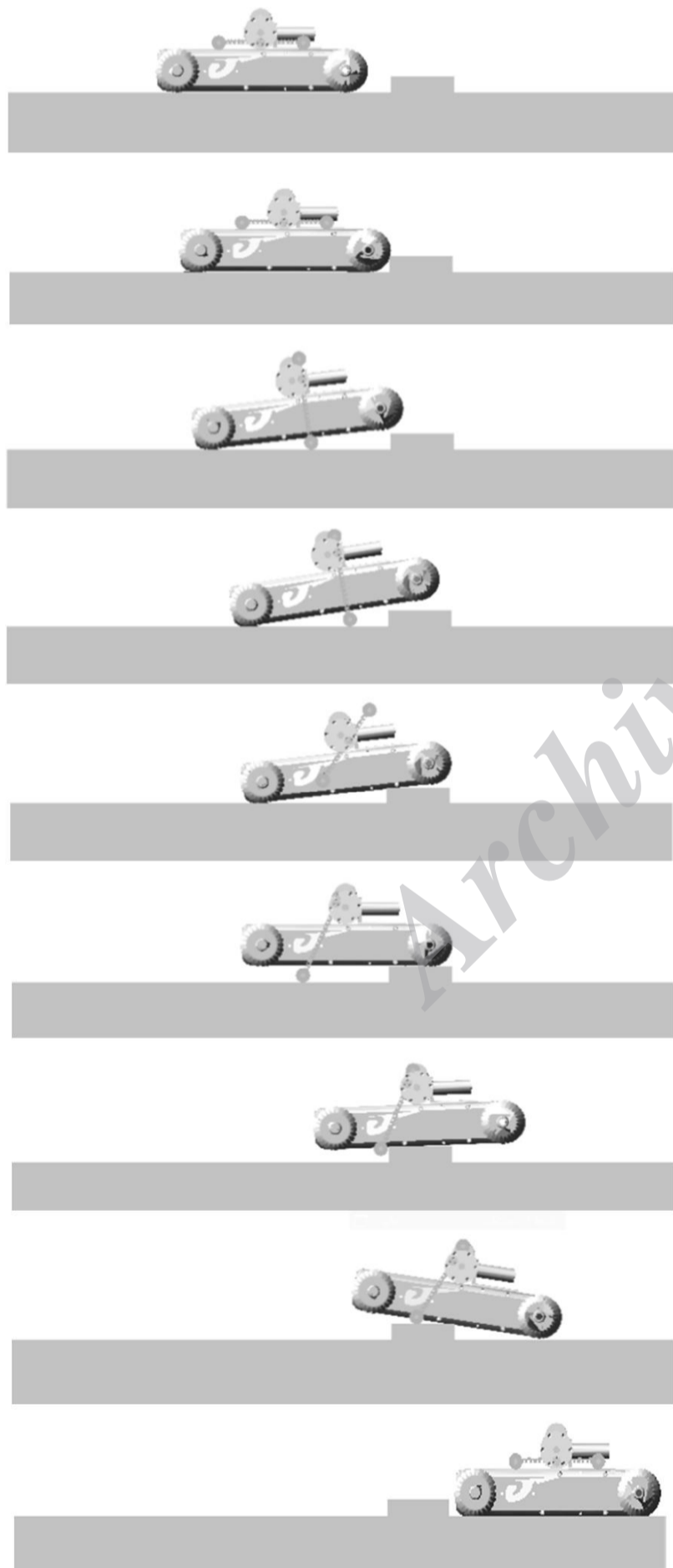


Fig. 10 Action strategy of module accessory in passing through obstacles during inspection

شکل 10 استراتژی عمل ماژول جانبی برای عبور ربات از مانع در مسیر

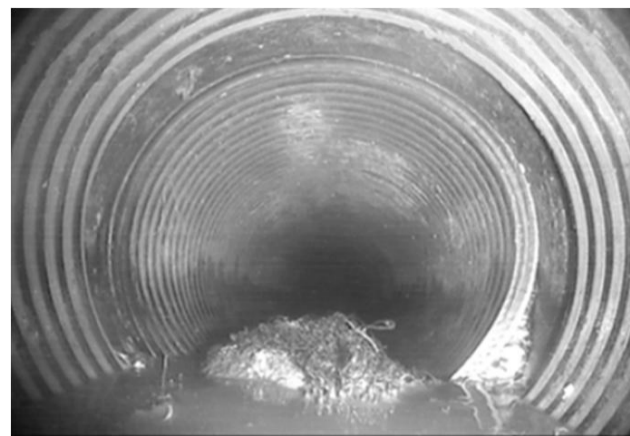


Fig. 9 Robot blockage by deposits during inspection of sewer pipe

شکل 9 برخورد ربات با مانع هنگام بازرسی شبکه فاضلاب

با خود حرکت دهد. در مواردی که مانع کوچک و ضعیف باشد این امکان برای ربات وجود دارد. ولی اگر مانع بزرگ و سنگین باشد حرکت آن رو به جلو با توجه به زیاد بودن نیروی اصطکاک یا نیروی چسبندگی بین مانع و سطح لوله میسر نمی‌باشد و ربات شروع به کار درجا کرده و چرخش چرخ‌ها باعث پیشروی آن نمی‌شود.

استراتژی مؤثر برای اجرا توسط ماژول جانبی هنگام مواجهه با این مشکل به حداقل رساندن نیروی مقاوم مانع در برابر حرکت می‌باشد. در این راستا ماژول با تماس چرخ هرزگرد خود در نقطه مناسب اقدام به افزایش ارتفاع جلوی ربات می‌نماید. همانطور که در شکل 10 ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع قسمت جلو، ربات از مانع عبور کرده و چرخ‌های جلو ربات با مانع تماس پیدا می‌کند. لذا حرکت چرخ‌ها باعث فراهم شدن نیروی محرکه رو به جلو گردیده و امکان ادامه مسیر فراهم می‌گردد. لازم به ذکر است برای ادامه حرکت ممکن است ربات با عارضه گرفتار شدن در توده رسوبات مواجه شود که در بخش بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد.

نحوه عملکرد ربات در عبور از مانع در نرم افزار آدامز شبیه‌سازی شده است. وضعیت ربات در قسمتهای مختلف عملیات با استخراج از محیط این نرم افزار در شکل 10 نمایش داده شده است. نحوه تحریک ماژول بصورت قیود سینماتیکی بوده است. در شکل‌های 11 و 12 قیود سینماتیکی اعمال شده ملاحظه می‌شود.

3-3- استراتژی عبور از توده رسوبات و یا شیب زیاد

مشکل دیگری که هنگام حرکت ربات درون لوله امکان مواجهه با آن وجود دارد گرفتار شدن ربات درون توده رسوبات موجود در لوله و حرکت درجای ربات بواسطه آن می‌باشد. در این وضعیت که در شبکه‌های فاضلاب بواسطه لجن یا گل و لای مسیر ایجاد می‌گردد، پرشدگی زیر کف ربات باعث کاهش نیروی عمودی مؤثر در محل چرخ‌های ربات گردیده و لذا نیروی راننده به سوی جلو کاهش می‌یابد. لذا ربات در حرکت به جلو دچار مشکل می‌گردد. همچنین در برخی موارد مانند لوله‌های انتقال سیالات نفتی با لزجت زیاد، بواسطه عدم خروج همه مواد از لوله، در هنگام حرکت چسبندگی مواد در کف لوله و کف ربات باعث ایجاد نیروی مقاوم و عدم حرکت می‌گردد. ایجاد چنین مشکلاتی در لوله در شکل 13 بیان گردیده است.

راه حل پیشنهادی برای حل این مشکل افزایش نیروی عمودی مؤثر بین چرخ‌ها و سطح لوله می‌باشد تا بواسطه آن نیروی راننده به سمت جلو افزایش و ربات قابلیت حرکت پیدا کند. کمک ماژول جانبی در این راستا تماس چرخ هرزگرد با تاج لوله به منظور ایجاد یک نیروی عمودی می‌باشد. با ایجاد این

لازم به ذکر است در رابطه (1) و سایر روابط ارائه شده از دینامیک ربات صرفنظر شده و فرض گردیده ربات یک حرکت شبه استاتیکی دارد. دلیل این موضوع آنست که حرکت ماژول سریع و چابک در نظر گرفته نشده است. لذا مقدار نیروهای اینرسی در مقایسه با نیروهای استاتیکی ترم‌های بزرگی نیستند. از طرفی در این مقاله هدف نشان دادن عملیاتی بودن ایده و تخمین گشتاور موتور حرکتی ماژول می‌باشد. در عمل با در نظر گرفتن ضریب ایمنی مناسب در انتخاب موتور ماژول، مقدار نیروهای اینرسی و سایر افت‌های صرفنظر شده پوشش داده می‌شود.

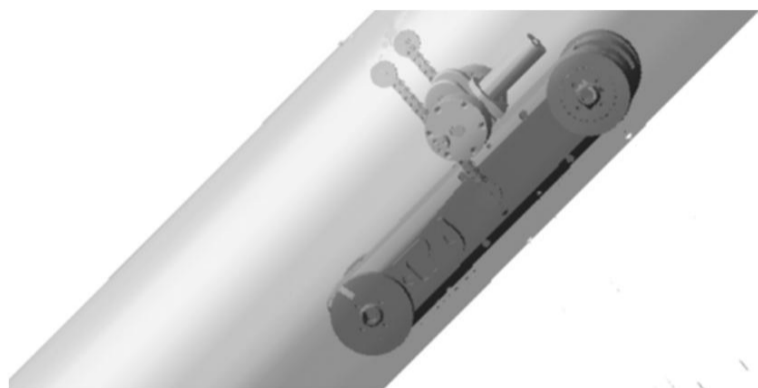


Fig. 14 Module functionality in forward movement in high inclination pipes

شکل 14 عملکرد ماژول جانبی برای ادامه حرکت رو به جلو ربات در لوله‌های شیب‌دار



Fig. 15 Module functionality in robot movement in high inclination pipes

شکل 15 عملکرد ماژول جانبی برای ادامه حرکت ربات در لوله‌های با شیب زیاد

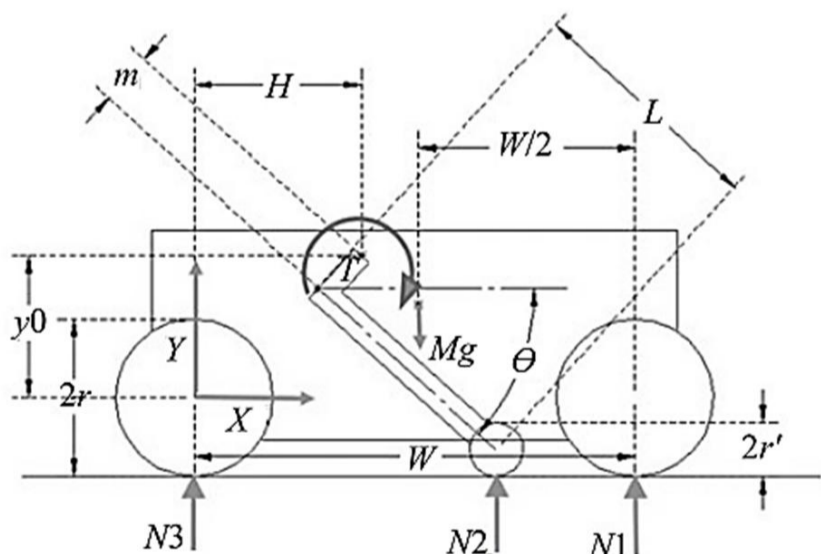


Fig. 16 Free body diagram of robot when module contacts the pipe surface

شکل 16 دیاگرام آزاد نیرویی ربات هنگام درگیر شدن ماژول جانبی با کف لوله

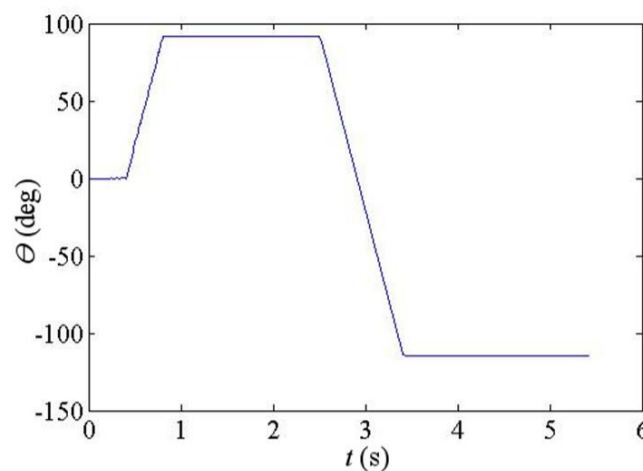


Fig. 11 Angular position applied to racks in passing an obstacle

شکل 11 موقعیت زاویه‌ای اعمال شده به شانه‌های ها در عبور از مانع

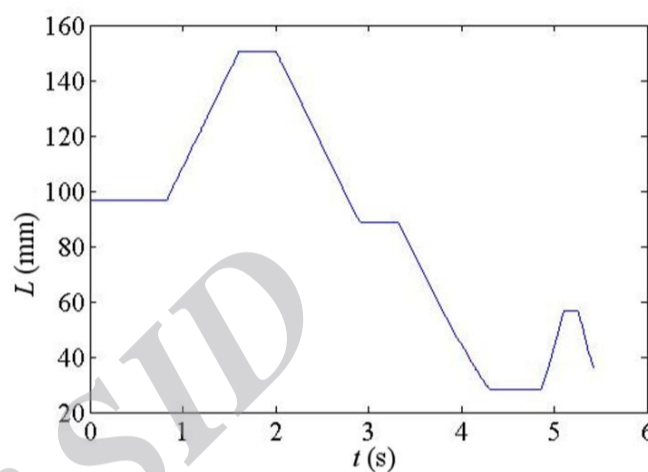


Fig. 12 Variation of racks length in passing an obstacle

شکل 12 تغییرات طول شانه‌های ها در عبور از مانع

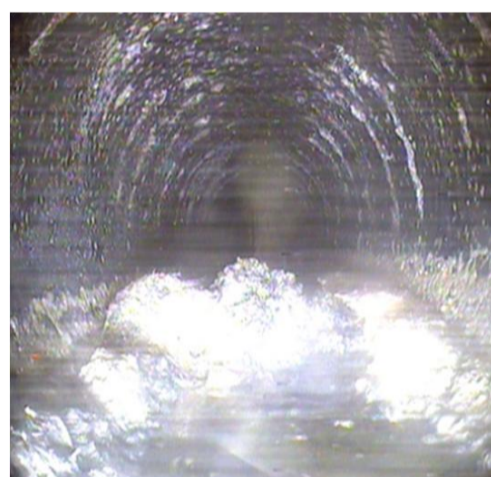


Fig. 13 Facing robot with large deposit during sewer pipe inspection

شکل 13 برخورد ربات با توده رسوبات هنگام بازرسی شبکه فاضلاب

4- تحلیل عملکرد مکانیزم

دیاگرام آزاد نیرویی ربات هنگام درگیر شدن ماژول جانبی با کف لوله در شکل 16 ملاحظه می‌شود. با افزایش گشتاور اعمالی به بازوی ماژول مقدار نیروی $N3$ افزایش و با توجه به موقعیت تماس چرخ هرزگرد بازو با لوله، که توسط طول آن تعیین می‌گردد، یکی از نیروهای $N1$ یا $N2$ شروع به کاهش می‌کند تا جایی که به صفر رسیده و بجای چرخ مربوطه چرخ هرزگرد بازوی ماژول با لوله در تماس می‌ماند.

آنچه باعث اثرگذاری ماژول جانبی هنگام تماس با سطح لوله می‌گردد تغییر موازنه نیروهای عمودی $N1$ و $N2$ می‌باشد. هنگام تماس چرخ هرزگرد ماژول جانبی، رابطه تعادل نیرو و گشتاور بازو را در صورت فعال بودن مود 1 و اعمال گشتاور برای چرخش بازو را می‌توان مطابق رابطه (1) بیان نمود:

$$T1 = N3 \times (l \times \cos(\theta)) - m \times \sin(\theta) \quad (1)$$

ربات به همراه ماژول معادل 58 کیلوگرم در نظر گرفته شده است. در صورت تغییر وزن ربات شکل کلی نمودارها حفظ ولی موقعیت آن‌ها جابجا می‌گردد. با توجه به تصمیم انتخاب H بطوریکه تقارن ربات حفظ گردد، نمودارهای شکل 17 برحسب وزن بی بعد نشده است.

پارامتر m که بواسطه قطر چرخنده شانه‌ای ایجاد شده است بایستی در حدامکان کوچک در نظر گرفته شود تا گشتاور مورد نیاز حداقل شود. با توجه به استاندارد، چرخنده انتخاب شده که دارای مدول 2 و تعداد 30 دندانه و قطر 60 میلی‌متر می‌باشد، این پارامتر 30 mm در نظر گرفته شده است. در جدول 1 پارامترهای هندسی ثابت انتخاب شده ملاحظه می‌شود.

تنها پارامتر متغیر ماژول طول لینک L و زاویه θ می‌باشد. هنگام فعال بودن مود اول، پارامتر θ و هنگام فعال بودن مود دوم حرکتی، پارامتر L می‌تواند تغییر کند. لذا پارامترهای طراحی مؤثر بر مانورپذیری ربات، انتخاب مود حرکتی فعال و نحوه تغییر پارامتر مربوط به آن مود می‌باشد.

با توجه به داده‌های جدول 2 که در شکل 18 برای مود اول و مود دوم بصورت نمودار آورده شده است، مشاهده می‌شود که تأثیرگذاری نیروی عمودی $N3$ در زوایای مختلف روی گشتاور بازو متفاوت است. لیکن در زوایای کم این تأثیر در مود یک بسیار زیاد بوده و با افزایش زاویه کمتر می‌شود. در زاویه 65 درجه اثر فعال بودن مود 1 و 2 تقریباً برابر می‌شود. در زوایای کمتر از 65 درجه استفاده از مود دوم پیشنهاد می‌شود و برای زوایای بیشتر از 65 درجه استفاده از مود اول مناسبتر است. البته باید توجه نمود که برای زوایای بزرگتر از 75 درجه اعتبار معادلات برقرار نیست و این به دلیل جابجایی محل تأثیر نیروی $N3$ نسبت به مرکز جرم ربات است. با توجه به تقارن ماژول جانبی این نتایج برای اثرگذاری مکانیزم روی چرخ عقب و جداکردن ربات روی چرخ‌های عقب نیز معتبر می‌باشد.

با توجه به رابطه 1 با افزایش l در بازو مقدار گشتاور مورد نیاز برای چرخش آن طبق شکل 18 افزایش می‌یابد. لذا در صورتی که در استراتژی قصد چرخش بازو برای تغییر بالانس نیروهای عمودی و خارج نمودن ربات از وضعیت موجود مورد نظر باشد، هر چه طول بازو کوچکتر باشد موتور حرکتی آن به گشتاور کمتری نیاز دارد.

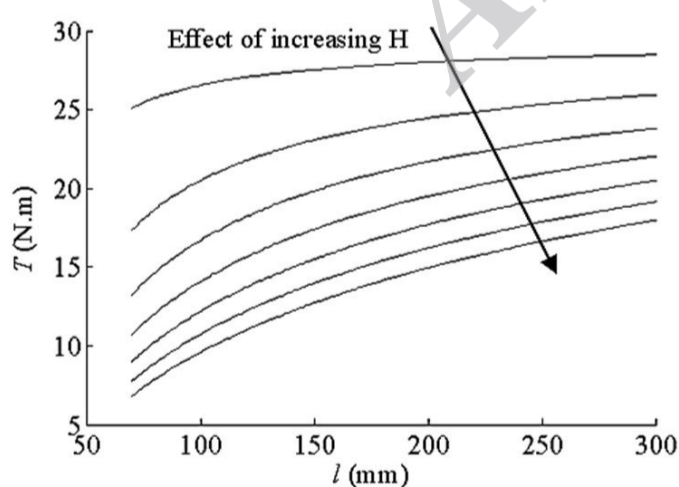


Fig. 17 Effect of increasing H on required torque for rotation of module arm

شکل 17 تأثیر افزایش H در میزان گشتاور چرخش بازو

جدول 1 پارامترهای ماژول و ربات در شبیه‌سازی و تحلیل

Table 1 Robot and module parameters in simulation and analysis

پارامتر	w	M	r_p	y_0	m	r	H
مقدار	367	50	16	82	30	50	183.5

لذا مقدار نیروهای اینرسی در مقایسه با نیروهای استاتیکی ترم‌های بزرگی نیستند. از طرفی در این مقاله هدف نشان دادن عملیاتی بودن ایده و تخمین گشتاور موتور حرکتی ماژول می‌باشد. در عمل با در نظر گرفتن ضریب ایمنی مناسب در انتخاب موتور ماژول، مقدار نیروهای اینرسی و سایر افت‌های صرفنظر شده پوشش داده می‌شود.

در روابط ارائه شده پارامترهای متغیر θ و l را می‌توان برحسب سایر پارامترهای هندسی ثابت طبق رابطه (2) مرتبط نمود:

$$\sin(\theta) = (r + y_0 - r_p - m \times \cos(\theta)) / l \quad (2)$$

از طرفی با در نظر گرفتن تعادل بازو هنگامی که مود 2 فعال شده (گشتاور تمایل به افزایش طول بازو را دارد)، در هر لحظه می‌توان مقدار گشتاور اعمالی به بازو را با استفاده از رابطه (3) بدست آورد:

$$T2 = N3 \times \sin(\theta) \times m \quad (3)$$

در روابط (1) و (3) مقادیر $N1$ و $N2$ بصورت صریح ذکر نشده است. درحقیقت با درگیر شدن ماژول با سطح لوله و اثرگذاری آن، چرخ جلو ربات درگیری خود را با سطح لوله از دست می‌دهد و لذا در دیاگرام آزاد نیرویی ربات فقط نیروهای $N1$ ، $N3$ و W و گشتاور T عمل می‌نماید. در این حالت با در نظر گرفتن تعادل استاتیکی ربات در راستای y می‌توان نیروهای $N1$ و $N3$ را با رابطه (4) مرتبط نمود:

$$N1 = Mg - N3 \quad (4)$$

هنگامی که مود اول فعال است، با در نظر گرفتن تعادل چرخشی ربات حول نقطه اثر نیروی $N1$ ، مقدار $N3$ را در هر لحظه استخراج نمود:

$$N3 \times (H + l \cos \theta - m \sin \theta) - T1 - Mg \frac{w}{2} = 0 \quad (5)$$

از طرفی هنگامی که مود دوم فعال است، گشتاور وارد بر پینیون در جهت عکس مود اول عمل نموده و تبدیل به نیرویی خطی در امتداد شانه‌ای می‌گردد. با در نظر گرفتن تعادل ربات در اینحالت:

$$T2 + N3 \times (H + l \cos \theta - m \sin \theta) = Mg \frac{w}{2} \quad (6)$$

با جایگذاری مقدار $T2$ از رابطه (3) در رابطه (6) می‌توان مقدار نیروی $N3$ را استخراج نمود:

$$N3 = Mg \frac{w}{2} / (H + l \cos \theta) \quad (7)$$

در شبیه‌سازی‌ها در این مقاله همواره از مود دوم برای اثرگذاری ماژول استفاده شده است. لذا از رابطه (7) برای استخراج نیروی $N3$ استفاده شده است. بدیهی است در این حالت مقدار نیروی شانه‌ای در هر لحظه برابر است با:

$$F = N3 \times \sin \theta \quad (8)$$

با استفاده از روابط استخراج شده می‌توان میزان گشتاور مورد نیاز برای فعال شدن مود اول یا دوم برای زوایای مختلف θ را استخراج نمود.

با توجه به شکل 16، پارامترهای H ، L ، y_0 ، θ و m جزء پارامترهای ماژول طراحی شده می‌باشند. با استفاده از رابطه (5) می‌توان به ازای مقادیر مختلف H و تنظیم سایر پارامترهای هندسی با آن بطوریکه شرط تماس بازوی ماژول با کف لوله حفظ گردد، تغییر گشتاور مورد نیاز را ملاحظه نمود. در شکل 17 تأثیر افزایش پارامتر H در میزان گشتاور چرخش بازو بیان گردیده است. می‌توان مشاهده نمود با افزایش پارامتر H این گشتاور کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه نمود که در حرکت ممکن است مشکلی که برای چرخ جلو ایجاد شده در برگشت برای چرخ عقب ایجاد شود و لذا کم شدن گشتاور با تغییر H می‌تواند برای چرخ دیگر مضر باشد. لذا بهترین انتخاب برای H قرار دادن مفصل در نقطه میانی ربات است. در تحلیل‌ها وزن

هدف مقاله ارائه برنامه حرکت¹ ماژول بوده و نه کنترل آن، پیاده سازی سیستم کنترل به کارهای آتی سپرده شده است.

5- شبیه سازی

مکانیزم ماژول جانبی در عبور از انواع عوارض معرفی شده در شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. مراحل عبور ربات از یک مانع توسط ماژول جانبی در شکل 10 ارائه گردید. ربات هنگام مواجهه با مانع شروع به کار در جا نموده است، ولی با فعال شدن ماژول جانبی طی مراحل نشان داده شده عبور از مانع محقق گردیده است.

برای عارضه عبور از مانع نمودار تغییرات نیروی ایجاد شده در شانه ای هنگام عبور از عارضه در شکل‌های 20 و 21 آورده شده است. هنگام اجرای این استراتژی در یک مرحله یک سمت بازوی ماژول با لوله درگیر و در مرحله دوم سمت دیگر بازو با سطح لوله درگیر می‌شود. همچنین سرعت ربات هنگام عبور از مانع با فعال شدن ماژول جانبی مطابق شکل 22 می‌باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود افزایش نیروی بازو مقارن با افزایش سرعت ربات می‌باشد.

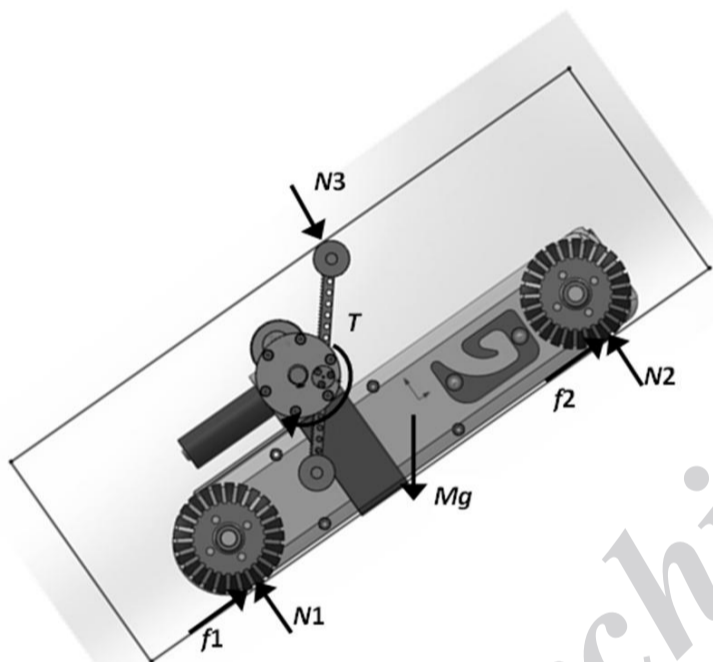


Fig. 19 Free body diagram of robot when module contacts the pipe top in high inclination pipes

شکل 19 دیاگرام آزاد نیروی ربات هنگام درگیر شدن ماژول جانبی با تاج لوله های شیب دار

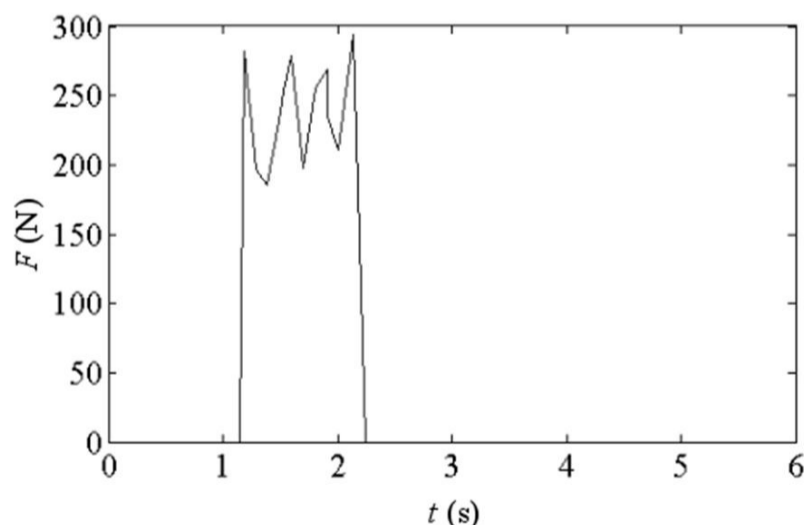


Fig. 20 Variation of force along module arm in the first step of passing through obstacle

شکل 20 تغییرات نیرو در امتداد بازوی ماژول در مرحله اول عبور از مانع

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول 2 استراتژی چرخش بازو برای افزایش قابلیت ربات در عبور از حفره یا مانع نیازمند گشتاور بزرگی برای موتور محرک بازو می‌باشد. تأمین این گشتاور توسط موتور گیربکس‌های مورد استفاده در این ربات‌ها به سادگی امکان پذیر نمی‌باشد و سایز ماژول را به شدت افزایش می‌دهد. لذا ایده‌ای که برای حل این معضل وجود دارد افزایش طول بازو هنگام عملیات بجای چرخش آن می‌باشد.

همانطور که ملاحظه می‌شود برای یک وضعیت مشابه مقدار گشتاور مورد نیاز برای انجام عملیات با تغییر طول بازو بسیار کمتر از گشتاور مورد نیاز برای چرخش آن می‌باشد. لذا استفاده از استراتژی‌هایی که از تغییر طول بازو بهره گیرد در شبیه سازی‌ها مد نظر قرار گرفته است.

به منظور افزایش نیروی رانش ربات در عبور از رسوبات و یا لوله‌های با شیب زیاد نیز می‌توان به همین ترتیب از تمهید ازدیاد طول بازو استفاده نمود. در این وضعیت دیاگرام آزاد نیروی مطابق شکل 19 می‌باشد.

برای امکان حرکت ربات در لوله بایستی نیروی جلوبرنده بر مؤلفه نیروی وزن ربات در امتداد محور لوله غلبه کند. لذا باید:

$$\mu(N1 + N2) > Mg \times \sin(\theta) \quad (9)$$

در این مقاله عملکرد سینماتیکی مکانیزم معرفی شده مورد بحث قرار گرفت و به استخراج برنامه حرکتی آن اکتفا شد. با توجه به اینکه شتاب‌های حرکتی کوچک در نظر گرفته شده از نیروهای دینامیکی در این مقاله صرف نظر شده و چون فقط تحقق عملکرد مکانیزم و تأمین گشتاور مورد نیاز توسط موتور حرکتی مدنظر بوده است، با لحاظ یک ضریب ایمنی در گشتاور محاسبه شده می‌توان موتور حرکتی مناسب را انتخاب نمود. همچنین با توجه به اینکه

جدول 2 میزان گشتاور برای فعال شدن مود اول یا دوم ماژول در زوایای مختلف θ

Table 2 Torque of activating first or second mode of module in different angles

زاویه (°)	طول بازو (m)	گشتاور $T1$ (N.m)	گشتاور $T2$ (N.m)	نیروی $N3$ (N)
20	265.1	52.0	2.0	216.7
30	185.3	40.8	3.7	277.6
40	148.3	31.6	5.7	327.9
50	128.8	23.2	7.7	373.5
60	118.4	15.0	9.8	418.2
70	113.6	6.3	11.8	465.6

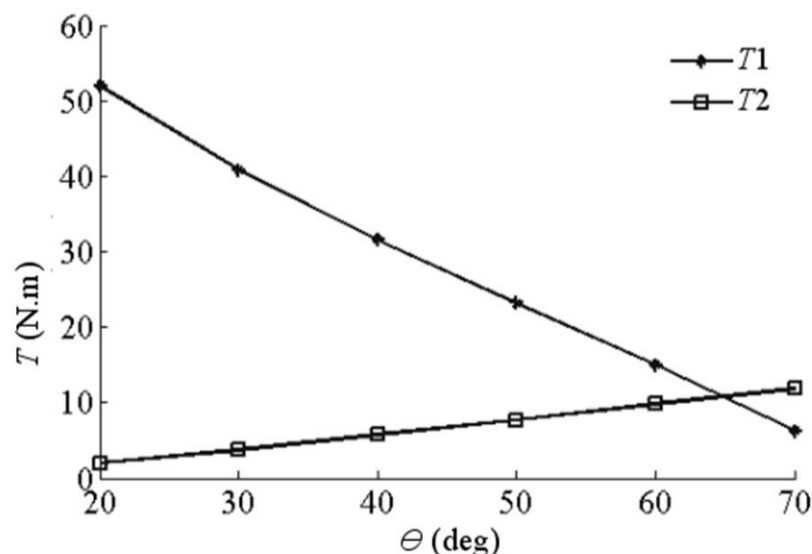


Fig. 18 Effect of normal force $N3$ on required torque of activating first mode ($T1$) and second mode ($T2$) in different angles of module arm

شکل 18 تأثیرگذاری نیروی عمودی $N3$ در زوایای مختلف بازوی ماژول روی گشتاور بازو برای فعال شدن مود اول ($T1$) و مود دوم ($T2$)

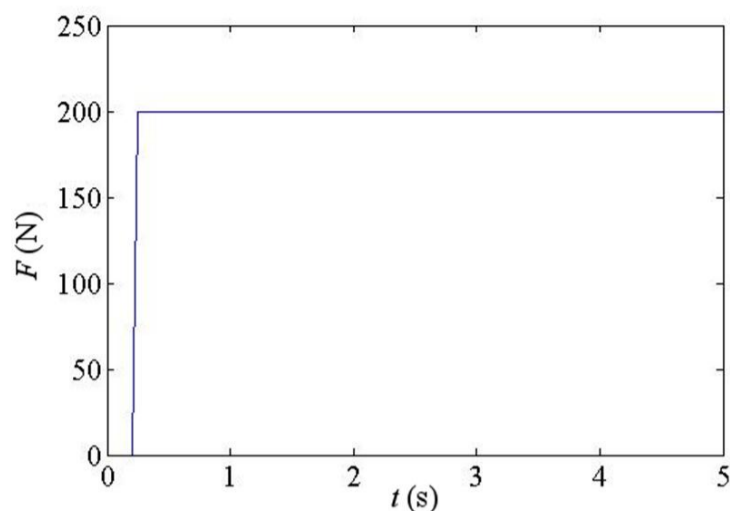


Fig. 24 Variation of force along module arm when robot passes a 45 degree inclination

شکل 24 تغییرات نیرو در امتداد بازوی ماژول هنگام حرکت ربات در شیب 45

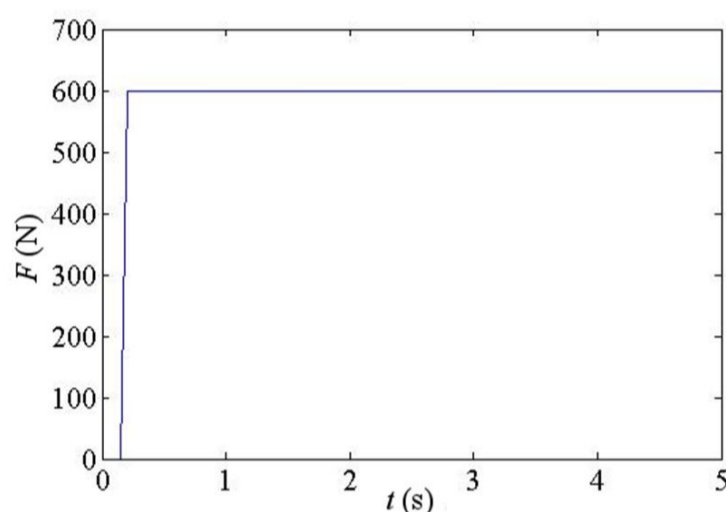


Fig. 25 Variation of force along module arm when robot passes a vertical pipe

شکل 25 تغییرات نیرو در امتداد بازوی ماژول هنگام حرکت ربات در لوله عمودی

لازم به ذکر است نیروهای ارائه شده در شکل‌های 20 تا 23 از ربات در حال حرکت هنگام تحریک ماژول در عبور از عوارض استخراج شده است، لذا نوسانات نمودار بدلیل نیروهای دینامیکی ضربه‌ای می‌باشد.

نتایج ارائه شده در شکل‌های 20 تا 25 مقدار نیروی موجود در شانه‌ای ماژول در اثر حرکت برنامه ریزی شده را نشان می‌دهد. در خصوص عملیات عبور از حفره و مانع می‌توان این نتایج را حل دینامیک معکوس این سیستم توسط نرم‌افزار آدامز در نظر گرفت. زیرا قیود سینماتیکی به مسئله اعمال و نیروها اندازه‌گیری شده است. ولی در عبور از شیب 45 درجه و لوله قائم نیروی برآوردی از تحلیل روی شانه‌ای اعمال و حرکت ربات مشاهده شده است. به عبارتی مسئله دینامیک مستقیم در این حالت حل شده است. لذا می‌توان انتظار داشت حل مسئله دینامیک مستقیم یا معکوس که برای برخی حالات صحت‌گذاری گردید، برای حالات در نظر گرفته نشده نیز به درستی انجام پذیرد.

6- بحث و بررسی نتایج

با توجه به نتایج شبیه‌سازی حرکت ربات در عبور از حفره و مانع می‌توان مشاهده نمود که عملکرد مکانیزم در این زمینه موفق می‌باشد. ربات علاوه بر داشتن چرخ‌های آجدار در مقابله با این موانع امکان عبور نداشته ولی به کارگیری ماژول جانبی کمک فراوانی به ربات برای حل مشکل می‌کند.

با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده در مقاله می‌توان مقادیر نیروهای استخراج شده را بصورت استاتیکی و با صرفنظر از نیروهای دینامیکی

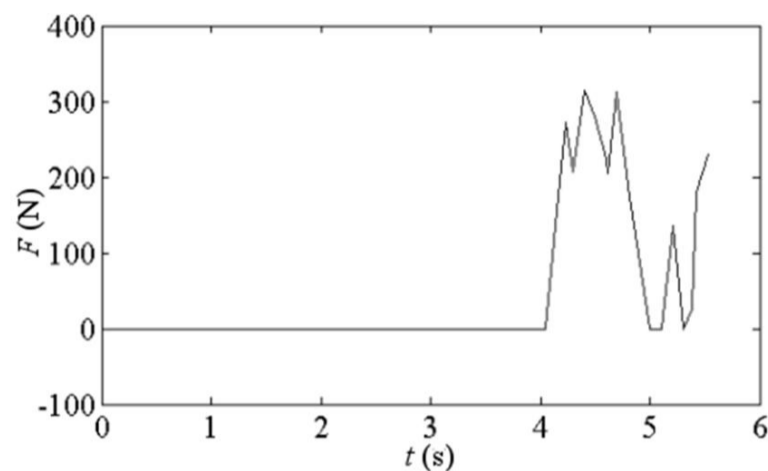


Fig. 21 Variation of force along module arm in the second step of passing through obstacle

شکل 21 تغییرات نیرو در امتداد بازوی ماژول در مرحله دوم عبور از مانع

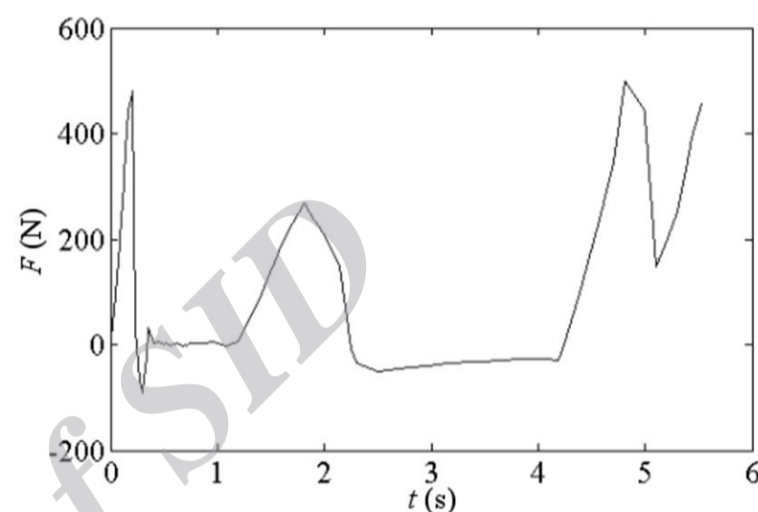


Fig. 22 Variation of robot velocity when passing through obstacle using module accessory

شکل 22 تغییرات سرعت ربات هنگام عبور از مانع به کمک ماژول جانبی

مراحل عبور ربات از یک حفره توسط ماژول جانبی در شکل 8 نشان داده شد. ربات هنگام مواجهه با حفره شروع به کار در جا نموده است، ولی با فعال شدن ماژول جانبی طی مراحل نشان داده شده در شکل 7 عبور از حفره محقق گردیده است. برای عارضه عبور از حفره نمودار تغییرات نیروی ایجاد شده در امتداد بازوی ماژول هنگام عبور از عارضه در شکل 23 آورده شده است. همچنین هنگام حرکت ربات در شیب 45 درجه نمودار تغییرات نیروی ایجاد شده در امتداد بازوی در شکل 24 آورده شده است. همچنین هنگام حرکت ربات در لوله عمودی نمودار تغییرات نیروی ایجاد شده در امتداد بازوی ماژول در شکل 25 آورده شده است.

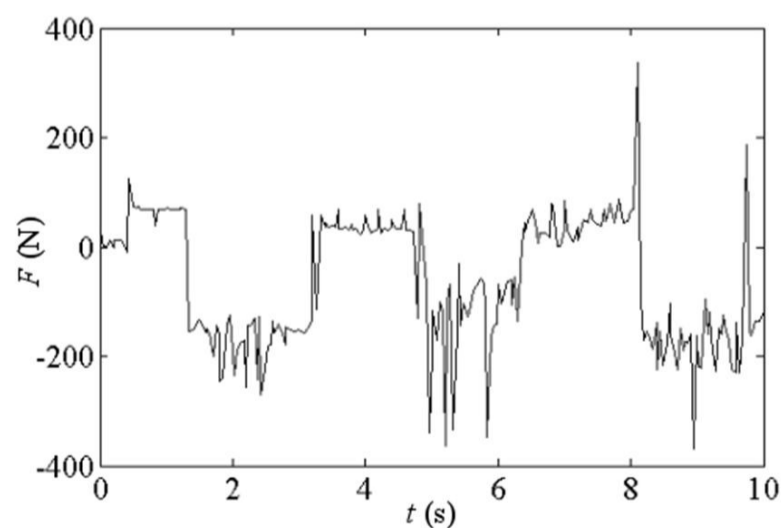


Fig. 23 Variation of force along module arm when passing through paddle

شکل 23 تغییرات نیرو در امتداد بازوی ماژول در عبور از حفره

جدول 5 مقدار نیروی شانه‌ای و گشتاور مورد نیاز با استفاده از روابط استخراج و بیان شده است. گشتاور شافت محرک پینیون از طریق نسبت تبدیل چرخنده مخروطی بین خروجی گیربکس و شافت پینیون قابل تنظیم می‌باشد. با انتخاب نسبت تبدیل خروجی گیربکس با شافت محرک به میزان 2، حداکثر گشتاور مورد نیاز در خروجی گیربکس برای مأموریت‌های مختلف استخراج و در جدول 5 بیان گردیده است. با توجه به نتایج این جدول انتخاب موتور گیربکسی در ماژول با گشتاور خروجی 10 N.m، ربات در نظر گرفته شده با حداکثر وزن 50kg کیلوگرم را در مأموریت‌های مختلف موفق می‌نماید.

7- نتیجه گیری

در این مقاله یک ماژول جانبی بدیع برای توانمند سازی ربات‌های بازرسی داخل لوله در مقابل مشکلات ربات در عبور از موانعی چون گودال، برجستگی‌های بیش از حد، شیب‌های تند و رسوبات زیاد داخل لوله ارائه گردید. موتور محرکه پر قدرت ربات به همراه چرخ‌های آجدار توانایی عبور از این موانع را در عمل نداشته است. این ماژول بصورت یک سیستم جانبی مستقل بر روی بسترهای رباتیکی متحرک موجود در صنعت نصب شده و در صورت عدم نیاز به راحتی قابل جداسازی از ربات می‌باشد. لذا برای افزایش قابلیت حرکتی ربات نیازی به استفاده از شنی و یا مکانیزم‌های پیچیده وجود ندارد.

دو استراتژی برای انجام مأموریت ماژول جانبی بیان گردید: یکی چرخش بازو و دیگری ازدیاد طول بازو. عملکرد این دو استراتژی را می‌توان شبیه عمل یک گیربکس تصور نمود؛ بطوریکه چرخش بازو سرعت عملکرد بالاتری داشته ولی در عین حال نیازمند گشتاور بزرگتری در موتور حرکتی می‌باشد. در عین حال ازدیاد طول بازو نیازمند گشتاور کمتری در موتور حرکتی بوده ولی عمل آن با سرعت کمتری میسر می‌باشد. البته این رفتار در نواحی کاری مختلف ماژول متفاوت می‌باشد. پس بایستی در عمل مصالحه‌ای بین میزان سرعت و قدرت مکانیزم برقرار نمود. حتی می‌توان سوئیچ کردن بین دو حالت

جدول 4 مقایسه نیروی شانه‌ای محاسبه شده در مأموریت‌های مختلف در تحلیل و شبیه‌سازی آدامز

Table 5 Comparison of rack force calculated in different missions in analysis and simulation by Adams

مأموریت	نیروی شانه‌ای (تحلیلی)	نیروی شانه‌ای (آدامز)
عبور از حفره	290	250
عبور از مانع	290	300
عبور از شیب 45 درجه	205	210
طی لوله قائم	500	600

جدول 5 حداکثر نیروها و گشتاورهای ماژول جانبی در مأموریت‌های مختلف

Table 5 The maximum force and torque of module accessory in different missions

مأموریت	حداکثر نیروی ایجاد شده در شانه ای (N)	حداکثر گشتاور پینیون شانه ای (N.m)	حداکثر گشتاور خروجی گیربکس (N.m)
عبور از حفره	400	12	6
عبور از مانع	400	12	6
طی شیب 45 درجه	260	7.8	3.9
طی لوله عمودی	650	19.5	9.75

استخراج نمود. همچنین استخراج دینامیکی نیروها از طریق آدامز صورت گرفته است. همچنین چون هدف از حل دینامیک مسئله صرفاً محاسبه گشتاور مورد نیاز برای موتور ماژول می‌باشد، می‌توان با لحاظ ضریب ایمنی مناسب، از گشتاور استاتیکی محاسبه شده بهره گرفت.

موقعیت هندسی ماژول در چهار مأموریت عبور از مانع، حفره، شیب 45 درجه و لوله قائم هنگام درگیری با سطح لوله در نرم‌افزار آدامز در جدول 3 ارائه شده است. پارامتر ϕ_{max} در این جدول بیان کننده میزان انحراف ربات از افق حین عملکرد ربات در مأموریت خود می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان انحراف ناچیز بوده و می‌توان از تغییر مختصات هندسی در دیاگرام آزاد به منظور محاسبه نیروها صرف‌نظر نمود.

در عبور از مانع و حفره با توجه به روابط (7) و (8) مقدار نیروی شانه‌ای برابر است با:

$$N3=580 \text{ N} \rightarrow N3 \times \sin(\theta) = 580 \text{ N} \quad (10)$$

این مقدار توسط دو بازوی کناری ایجاد شده است. لذا بایستی در نمودار نصف این مقدار یعنی 290N نیوتن گزارش شده باشد. با ملاحظه نمودارهای 19 و 22 می‌توان مشاهده نمود که مقدار نیروی ایجاد شده روی شانه ای در عبور از مانع و حفره به ترتیب حدود 300N و 250N نیوتن می‌باشد. لذا نتیجه آدامز با نتایج تحلیلی همخوانی نسبی دارد.

در صورتی که گشتاور وارد بر ماژول هنگام مأموریت امکان جدا شدن چرخ جلو و بالا آمدن قسمت جلو ربات را فراهم کند، با توجه به نتایج جدول 3 زاویه ربات با زمین و در نتیجه دیاگرام آزاد نیرویی تغییر زیادی پیدا نمی‌کند. لذا گشتاوری معادل همان مقدار اولیه ادامه مأموریت را میسر می‌نماید. در رابطه با طی مسیرهای شیبدار یا لوله عمودی با توجه به شکل-های 13 و 14 بخصوص اگر سایز لوله بزرگ باشد، رابط شانه‌ای تقریباً بطور عمود بر سطح با تاج لوله تماس پیدا می‌کند. در این حالت می‌توان نیرویی که بایستی در شانه‌ای برای محقق نمودن حرکت ایجاد شود را برآورد نمود. با توجه به دیاگرام آزاد شکل 18، نیرویی که باعث حرکت رو به جلو ربات می‌گردد طبق رابطه (9) محاسبه می‌گردد.

نتیجه مقایسه نیروهای استاتیکی استخراج شده بصورت تحلیلی و نیروهای دینامیکی مستخرج از آدامز برای چهار مأموریت عبور از مانع، حفره، شیب 45 درجه و لوله قائم در جدول 4 ارائه شده است.

همانطور که از نتایج جدول 4 برداشت می‌شود، نتایج تحلیلی و نتایج آدامز تطابق خوبی با یکدیگر دارند. البته همانطور که انتظار می‌رود نتایج آدامز مقداری بیشتر از مقادیر محاسبه شده از روابط تحلیلی است؛ زیرا هنگام راه‌اندازی و برای ادامه حرکت بایستی مقدار نیروی رانشی از مقادیر استاتیکی محاسبه شده بزرگتر باشد.

در انتخاب موتور گیربکس حرکتی ماژول بایستی به حداکثر گشتاور مورد نیاز ماژول طی مأموریت‌های در نظر گرفته شده توجه نمود. این گشتاور از حداکثر نیروی ایجاد شده در امتداد بازوی ماژول قابل استخراج است. در

جدول 3 پارامترهای ماژول هنگام درگیری شدن با سطح لوله در مأموریت‌ها

Table 3 Module parameters when contact pipe in different missions

مأموریت	θ	l	ϕ_{max}
عبور از حفره	92.8	130	3
عبور از مانع	91.6	130	6
طی شیب 45 درجه	96	130	0
طی لوله عمودی	96	130	0

را بطور هوشمند انتخاب نمود. موتور گیربکسی با گشتاور 10 N.m در مأموریت‌های مختلف ربات بازرسی با وزن 50 Kg توسط ماژول معرفی شده موفق عمل می‌نماید.

معضلات پیش روی ربات در این مقاله جدی‌ترین مشکلاتی می‌باشد که ربات بازرسی در عمل با آن‌ها مواجه می‌شود. از آنجا که در بسیاری از موارد بسترهای رباتیکی موجود پاسخگوی نیاز بازرسی دیداری می‌باشند، پیچیده نمودن ساختار ربات‌ها که باعث افزایش قیمت و استهلاک آن‌ها می‌گردد لزومی ندارد. در عوض می‌توان در مواردی که مأموریت ربات ایجاب می‌کند از مکانیزم جانبی ارائه شده در این مقاله بهره گرفت. قابلیت حرکت ربات با ماژول جانبی معرفی شده از ربات‌های بر پایه شنی نیز بیشتر می‌باشد. عملکرد ماژول در محیط شبیه‌سازی موفقیت مطلوبی را در برداشت. از طرفی نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی دارد. نتایج طرح نشان می‌دهد به کارگیری ماژول در عمل کمک فراوانی به ربات‌های بازرسی متحرک در انجام موفق عملیات عملیات می‌نماید.

8- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از شرکت دانش بنیان کاوش مکانیزه فن‌آور بواسطه قرار دادن اطلاعات تجربی از انجام عملیات بازرسی شبکه‌های فاضلاب توسط سیستم‌های رباتیک خود کمال تشکر را دارد.

9- فهرست علائم

F	نیروی شانه‌ای
f	نیروی اصطکاک
g	گرانش زمین
H	فاصله طولی شافت اصلی ماژول از مبدأ
l	طول بازوی ماژول
m	فاصله شانه ای از مرکز شافت اصلی ماژول
M	جرم ربات
$N1$	نیروی عمودی چرخهای عقب
$N2$	نیروی عمودی چرخهای جلو
$N3$	نیروی عمودی چرخهای ماژول
r	شعاع چرخهای ربات
r_p	شعاع چرخ هرزگرد بازوی ماژول
T	گشتاور بازوی ماژول
$T1$	گشتاور بازوی ماژول هنگام فعال بودن مود اول
$T2$	گشتاور بازوی ماژول هنگام فعال بودن مود دوم
t	زمان
y_0	فاصله عرضی شافت اصلی ماژول از مبدأ

علائم یونانی

θ زاویه بازوی ماژول با کف لوله

μ ضریب اصطکاک

10- مراجع

- [1] N. S. Roslin, A. Anuar, M. F. A. Jalal, K. S. M. Sahari, A review: Hybrid locomotion of in-pipe inspection robot, *Procedia Engineering*, Vol. 41, No.1, pp. 1456-1462, 2012.
- [2] K. Y. Sik, L. Bae, W. In. Cheol, K. W. Kuk, Y. B. Ju, A flat pipeline inspection robot with two wheel chains, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, May 9-13, 2011.
- [3] K. Y. Sik, Y. B. Ju, Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 28, No. 3, pp. 681-696, 2012.
- [4] K. J. Hoon, G. Sharma, S. S. Iyengar, Famper: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration, *Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Technology*, Vina del Mar, Chile, March 14-17, 2010.
- [5] P. Jungwan, H. Dongjun, C. W. Hee, K. T. Hyun, Y. H. Seok, 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.
- [6] M. M. Moghaddam, M. Arbabtafti, A. Hadi, In-pipe inspection crawler adaptable to the pipe interior diameter, *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 26, No. 2, pp. 135-145, 2011.
- [7] E. Dertien, S. Stramigioli, K. Pulles, Development of an inspection robot for small diameter gas distribution mains, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, May 9-13, 2011.
- [8] K. Sato, T. Ohki, L. H. Ok, Development of in-pipe robot capable of coping with various diameters, *Proceeding of International Conference on Control, Automation and Systems*, Gyeonggi-do, South Korea, October 26-29, 2011.
- [9] Y. Zhang, M. Zhang, H. Sun, Q. Jia, Design and motion analysis of a flexible squirm pipe robot, *Proceeding of International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, Changsha, China, October 13-14, 2010.
- [10] A. Kakogawa, M. Shugen, Mobility of an in-pipe robot with screw drive mechanism inside curved pipes, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Tianjin, China, December 14-18, 2010.
- [11] M. R. A. M. Zin, K. S. M. Sahari, J. M. Saad, A. Anuar, A. T. Zulkarnain, Development of a low cost small sized in-pipe robot, *Procedia Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 1469-1475, 2012.
- [12] Y. J. Yum, H. Hwang, M. Kelemen, V. Maxim, P. Frankovský, In-pipe micromachine locomotion via the inertial stepping principle, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 8, pp. 3237-3247, 2014.
- [13] D. Lee, J. Park, D. Hyun, G. Yook, 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, No. 1, pp. 52-68, 2012.
- [14] G. Granosik, Hypermobile robots – the survey, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 75, No. 1, pp. 147-169, 2014.
- [15] B. Seo, H. Kim, M. Kim, K. Jeong, T. Seo, Flipbot: a new field robotic platform for fast stair climbing, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 11, pp. 1909-1914, 2013.