

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

علیرضا هادی<sup>۱\*</sup>، مرتضی عبدالahi<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی سیستم و مکاترونیک، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم و مکاترونیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، hrhadi@ut.ac.ir، 143951374

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۱ مهر ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۵ آذر ۱۳۹۴

ارائه در سایت: ۰۳ بهمن ۱۳۹۴

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 مجاوری محدود و ویژه می‌باشد. وجود محیط پیش‌بینی 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 می‌توانند 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 صحه گذاری شده است.

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

Alireza Hadi<sup>\*</sup>, 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 می‌گردد. 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 تحقیق 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،

### ۱- مقدمه

ربات‌های متحرک بازرسی<sup>۱</sup> 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:

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 مارپیچی 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 رسوپ 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 مرکز شده است. گرانوسیک ربات‌های مختلف بخصوص انواع مژول‌های برای طی مسیرهای ناهموار را بررسی نمود [14]. سوو و همکاران رباتی به نام *فلیبوت*<sup>6</sup> توسعه دادند که می‌توان از طریق بازوها و 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 مژول 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 مژول جانبی قابل نصب بر روی ربات طراحی گردیده است. این مژول 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 مژول جانبی مورد

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 چرخ<sup>1</sup> یا شنی<sup>2</sup> هستند. ربات‌های چرخدار ساختار ساده‌تری در مقایسه با انواع داری 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 محرک<sup>3</sup> ارائه می‌دهند [1].

تحقیقات گوناگونی توسط محققان در زمینه توسعه بسترهای رباتیکی برای طی لوله‌ها و اتصالات آن‌ها نظیر خم، زانویی، اتصال تی<sup>4</sup> 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 موافق درون لوله و اتصالات آن مدنظر قرار دادند. جانک‌هون و همکاران [4] توسعه یک مژول 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 دورزن در زانویی و اتصال تی را محقق نمودند. اگرچه مشکل تکینگی ربات هنگام عبور از اتصال تی و واي<sup>5</sup> 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 مژول‌های متشکل از چندین مژول که منجر به ایجاد رباتی با طول زیاد می‌گردد را ارائه نموده‌اند. درین و همکاران [7] رباتی مژول‌های شبیه مار با توانایی زیاد در عبور از انواع اتصالات درون لوله را بررسی نمودند. مژول‌ها 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 مژول‌های مشابهی را با همین هدف توسعه دادند ولی مژول

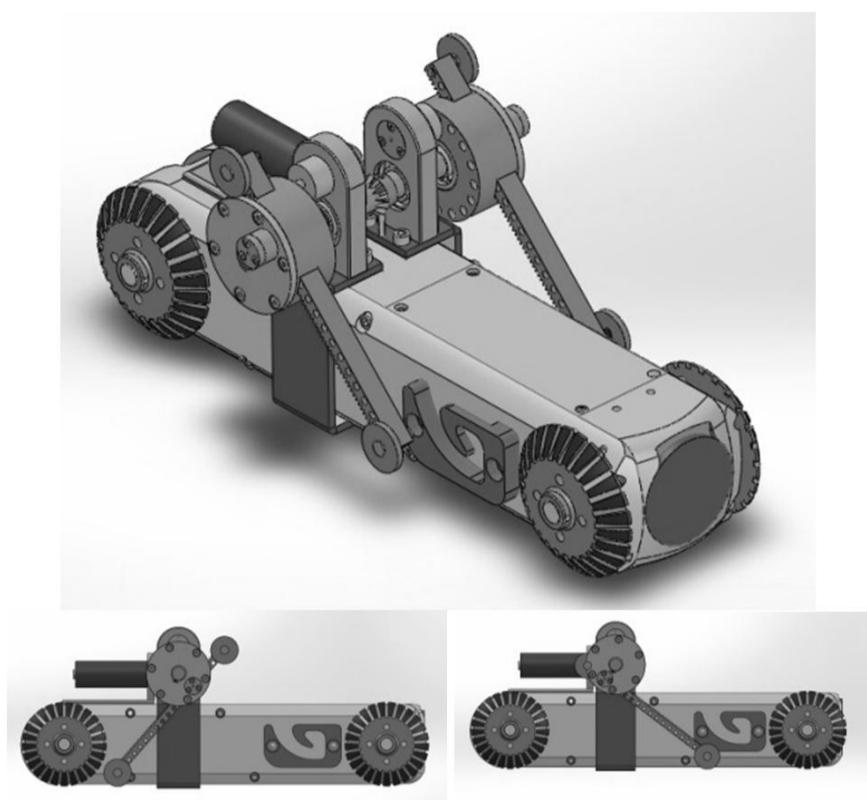
1- wheel

2- Track

3- Four wheel drive

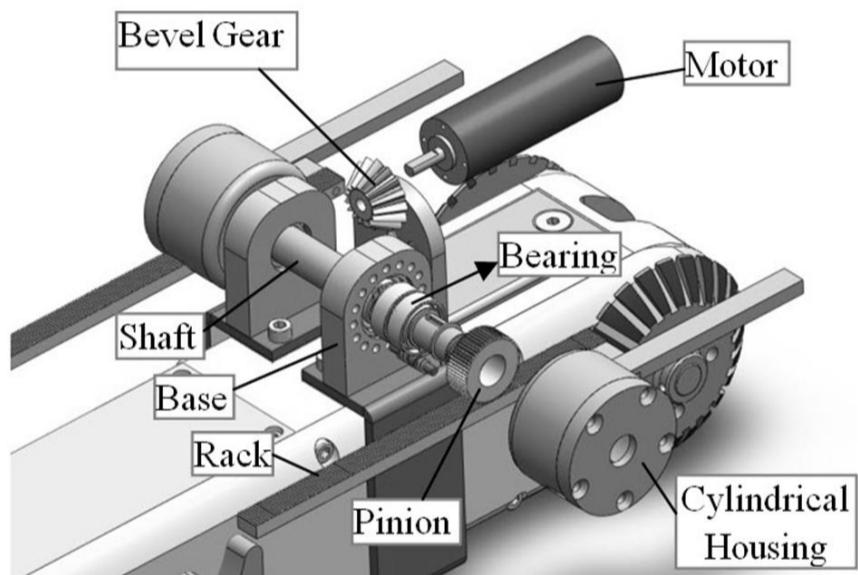
4- T

5- Y



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

شکل ۱ طرح مازول توسعه یافته که بر روی یک بستر رباتیکی نوعی نصب شده است



**Fig. 2** Main elements of developed module

شکل ۲ المان‌های اصلی مازول توسعه یافته

در مکانیزم مازول، حرکت چرخشی بازوهای کناری فعال شدن مود ۱ و تغییر طول بازوهای جانبی فعال شدن مود ۲ نامگذاری شده است. با توجه به وجود یک موتور در مازول، در هر لحظه یکی از مودهای حرکتی می‌تواند فعال باشد. به منظور تعیین مود حرکتی فعال در مازول بایستی از یک مکانیزم سوئیچ کننده استفاده نمود. این مکانیزم که خود بصورت یک مازول 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 چرخدنده شانه‌ای را به قطعه استوانه‌ای قفل می‌نماید. مکانیزم مازول قفل کننده از محرك آلياً حافظه‌دار برای به حرکت در آوردن یک پین متوجه بهره می‌گیرد. آلياً 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 فرن آلياً 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 محرك در

استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر مازول 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 قلوه سنگ بزرگ در مسیر، حفره بدليل گشودگی شاخه‌های متواالی 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 مازول جانبی ارائه گردیده است. در بخش دوم مقاله طرح و مکانیزم مازول جانبی ارائه می‌شود. در بخش سوم مشکلات رایج در خطوط لوله برای پیشروی بیشتر ربات مطرح و استرثی عمل مازول برای عبور از آن ها مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش چهارم تحلیل مکانیزم مازول و نحوه عمل آن برای چندین مأموریت رایج مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش پنجم شبیه‌سازی مازول در محیط نرم افزار تحلیل دینامیکی آدامز<sup>۱</sup> در اجرای مأموریت‌های خود بررسی می‌گردد. در بخش ششم نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد مازول جمع‌بندی و در بخش هفتم نتیجه‌گیری مقاله بیان می‌شود.

## 2- طرح مازول

طراحی مازول برای استفاده بر روی ربات‌های صنعتی بازرسی که هم‌اکنون در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد صورت پذیرفته است. بخصوص این مازول برای اضافه شدن روی بستر رباتیکی سوبوت ۵ که هم‌اکنون به عنوان یک محصول جدید در صنعت ارائه و استفاده می‌شود طراحی می‌گردد. این بستر رباتیکی وزنی حدود ۵۰ کیلوگرم دارد. اغلب ربات‌های این خانواده نیز وزنی در این حدود دارند.

مبناً طراحی مازول در این مقاله آنالیز سینماتیکی و ارضای قیود هندسی در عملکرد مازول بوده تا بتوان مؤثر بودن مازول 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 آنجاییکه این تحلیل روی کارکرد مفهومی مازول و ابعاد آن تأثیر جدی نمی‌گذارد در این مقاله به آن پرداخته نشده است. لیکن المان‌های اصلی و مهمی نظیر محرك و المان‌های انتقال قدرت نیز تحلیل و انتخاب شده است.

مازول ارائه شده مطابق شکل‌های ۱ و ۲ شامل یک محور چرخان می‌باشد که توسط یک موتور گیربکس و سیستم انتقال قدرت چرخدنده مخروطی واسطه به چرخش در می‌آید. در هر دو انتهای این محور یک قطعه استوانه‌ای نصب شده که در داخل آن یک چرخدنده ساده (پینیون) واقع شده است. با چرخدنده پینیون یک چرخدنده شانه‌ای در گیر می‌باشد که توسط قطعه استوانه‌ای ثابت باشد، این چرخدنده می‌تواند با چرخش خود چرخدنده شانه‌ای را به حرکت درآورد. ولی در صورتیکه قطعه استوانه‌ای ثابت نگردد، با چرخش محور، قطعه استوانه‌ای به همراه هر دو چرخدنده پینیون و شانه‌ای به چرخش در می‌آیند. چرخدنده شانه‌ای به عنوان لینک متوجه مازول معرفی و در نظر گرفته می‌شود. ایده به کار گرفته شده در طراحی مکانیزم مازول استفاده از فقط یک موتور محرك برای تنظیم میزان بازدگی 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.

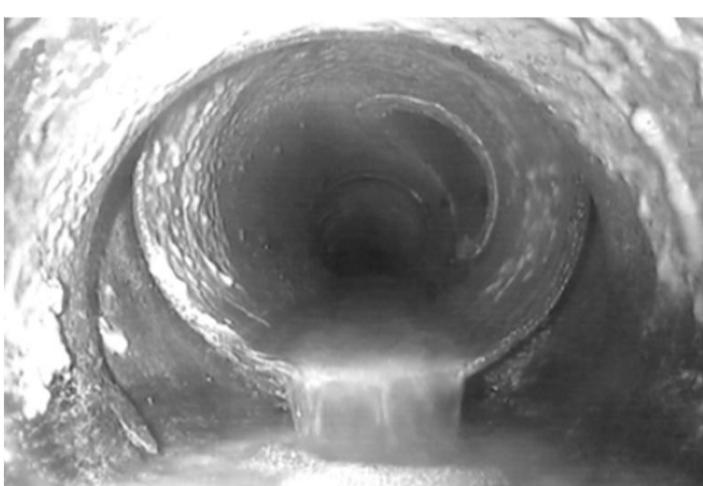
1- ADAMS

ارتفاع مانع و یا عمق حفره به میزانی در نظر گرفته شده است که بدون استفاده از مازول 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 مازول بر وزن ربات هنگام جدا کردن چرخ‌های جلو یا عقب، این ارتفاع تا قطر چرخ‌ها قابل افزایش می‌باشد.

### 3-1- استراتژی عبور از حفره

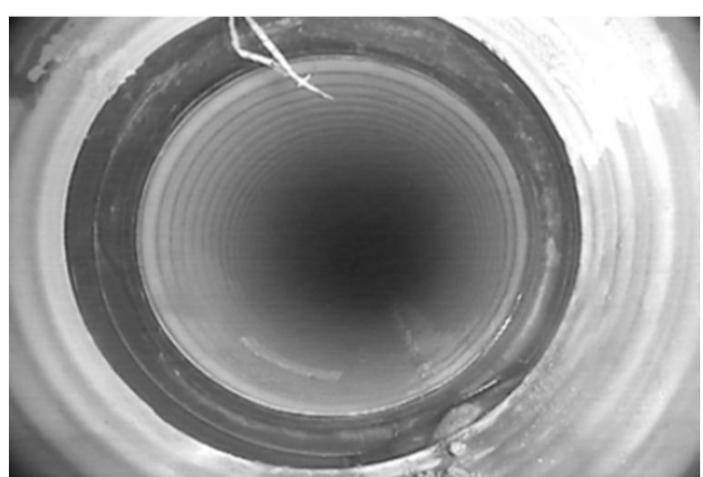
ایجاد حفره یا گودال در داخل شبکه‌های فاضلاب یکی از آسیب‌های رایج می‌باشد. با توجه به جنس و سازه این لوله‌ها که در انواع سنتی از جنس بتن یا سفال می‌باشد ممکن است بدلیل فرسودگی یا رانش‌های زمین مطابق شکل 4 دچار شکستگی شده و حفره‌هایی در آن ایجاد گردیده باشد. همچنین در انواع سنتی این لوله‌ها که از جنس پلی 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 باز<sup>1</sup> 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 علی رغم چرخش چرخ‌های عقب و ایجاد نیروی جلو برندۀ 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

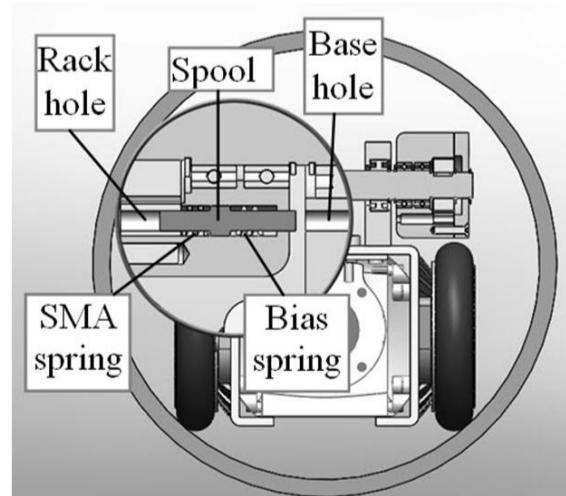
سیستم‌های مکاترونیکی را توجیه می‌نماید. از طرفی گرم کردن این مواد به سادگی با تحریک الکتریکی آن‌ها صورت می‌گیرد. عبور جریان الکتریکی از این مواد بواسطه وجود مقاومت الکتریکی در آن‌ها باعث گرم شدن، تغییر فاز کریستالی و در نتیجه تغییر شکل و اعمال نیرو به سبب آن می‌گردد.

آلیاژ حافظه‌دار مورد نظر برای استفاده در مازول قفل کننده قیمتی حدود ۵۰ دلار دارد. اگر چه می‌توان از مکانیزم‌های الکترومکانیکی نظری سولونوئیدها 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 سولونوئیدها 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 تعییه 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 چرخدنده 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 چرخدنده شانه‌ای آزاد بوده به راحتی امکان حرکت دارد.

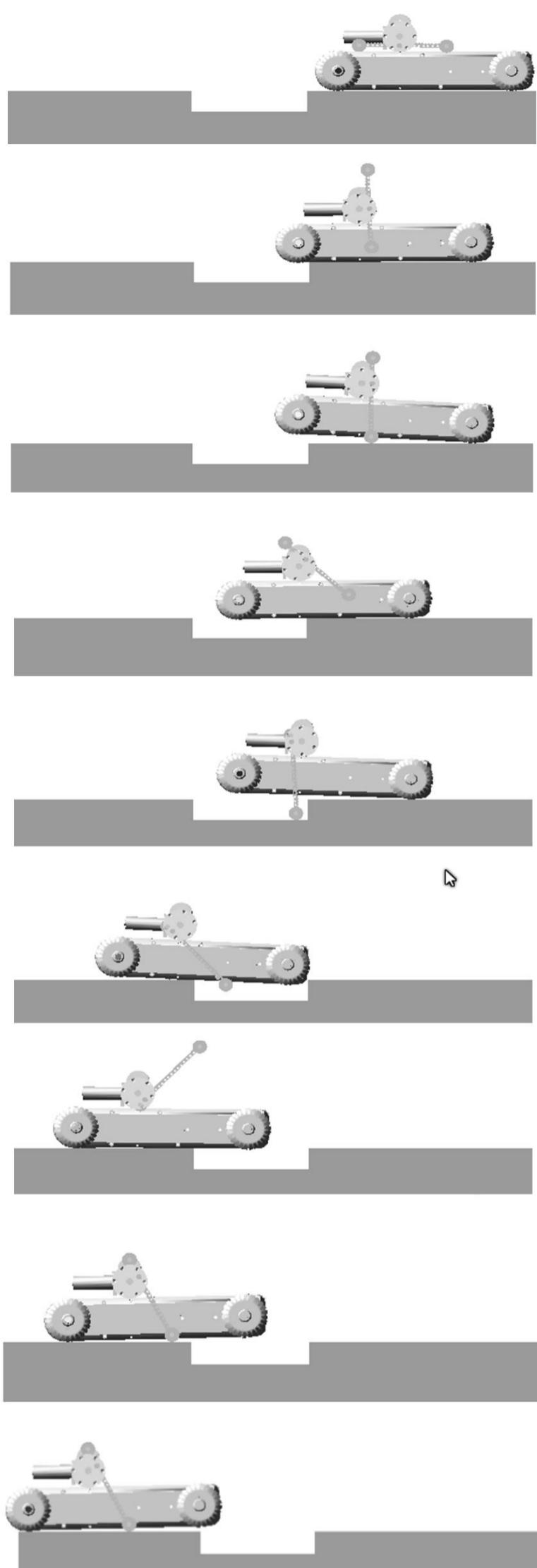
### 3- استراتژی‌های افزایش قابلیت حرکت با فعال نمودن مازول جانبی

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 پیش‌بینی 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 درجهات آزادی مازول با به کارگیری محرک آلیاژ حافظه‌دار



**شکل ۸** عملکرد مازول جانبی برای ادامه حرکت رو به جلو ربات متوقف شده بدليل ورود چرخ‌های جلو به حفره

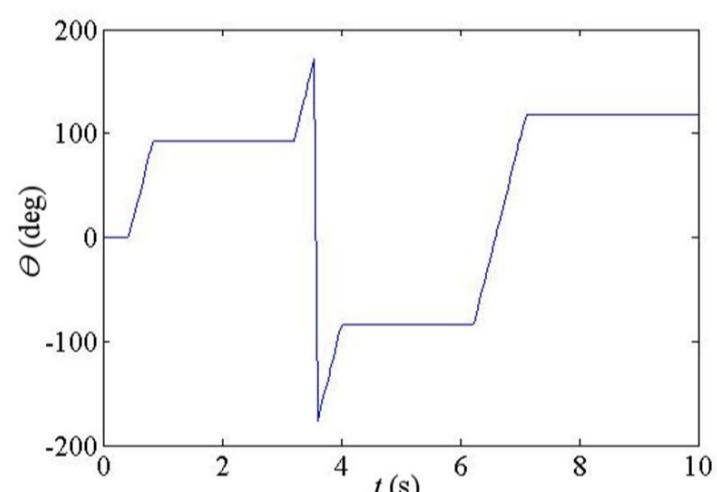
نحوه عملکرد ربات در عبور از حفره در نرم افزار آدامز شبیه سازی شده است که وضعیت ربات در قسمت‌های مختلف عملیات با استخراج از محیط این نرم افزار در شکل ۸ نمایش داده شده است. نحوه تحریک مازول بصورت قیود سینماتیکی بوده است. در شکل‌های ۶ و ۷ قیود سینماتیکی اعمال شده ملاحظه می‌شود.

تأثیر مازول 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 مازول جانبی به طرقی 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 مازول جانبی تغییر کرده اقدام به خروج ربات از حفره و ادامه مسیر نماید.

### 3-2- استراتژی عبور از مانع

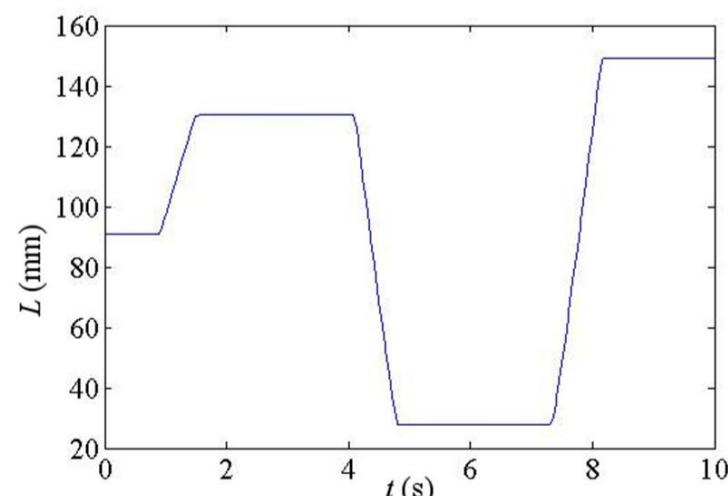
یکی دیگر از مشکلات رایج در ادامه مأموریت ربات بازرسی مواجهه با موانعی نظیر قطعات نسبتاً بزرگ سنگ یا توده منسجم مواد می‌باشد. نمونه‌ای از این مشکل در شبکه‌های فاضلاب در شکل ۹ ملاحظه می‌شود.

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** موقعیت زاویه‌ای اعمال شده به شانه‌های ها در عبور از حفره

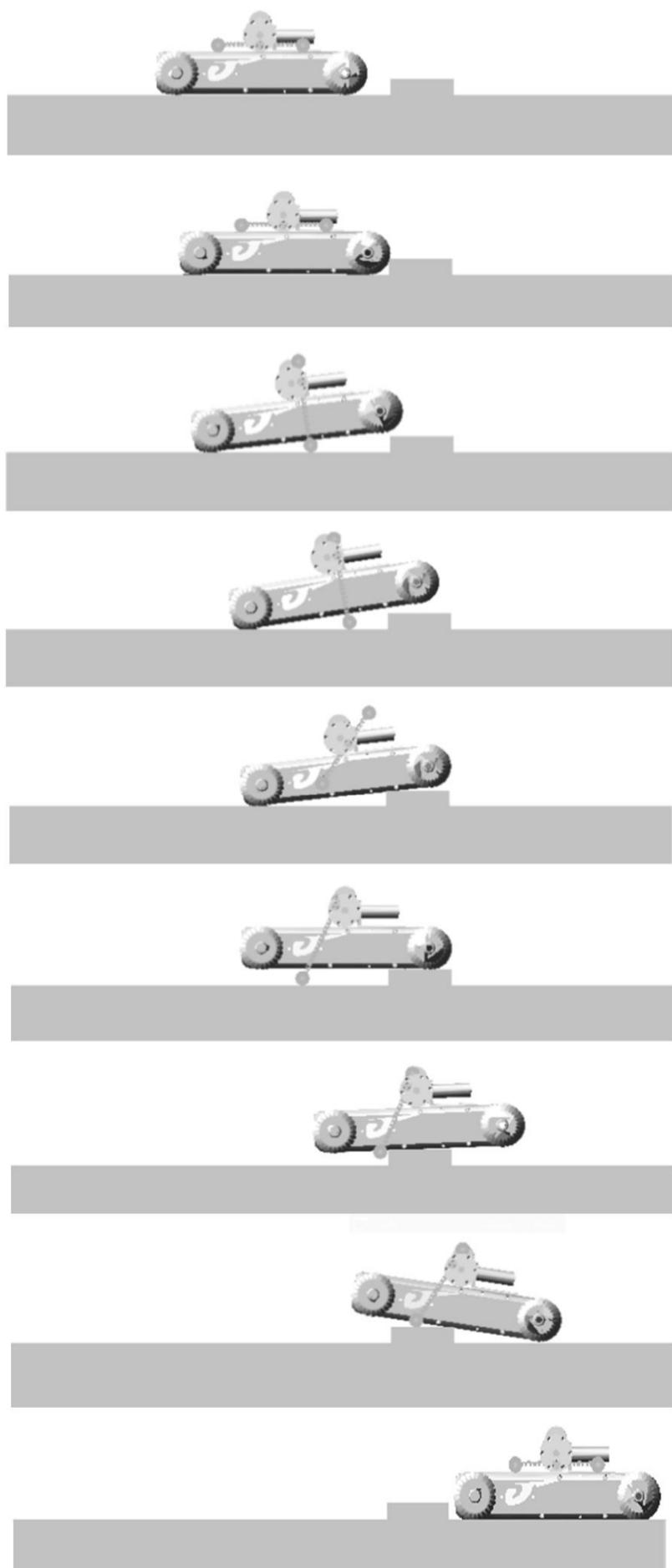
شکل ۶ موقعیت زاویه‌ای اعمال شده به شانه‌های ها در عبور از حفره



**Fig. 7** تغییر طول شانه‌های ها در عبور از حفره

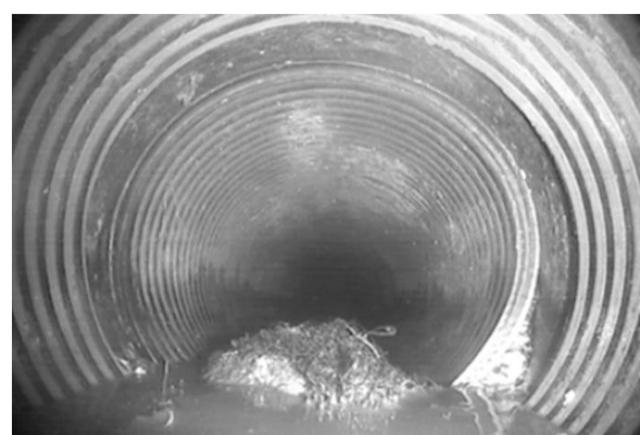
شکل ۷ تغییر طول شانه‌های ها در عبور از حفره

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 مژول 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 مژول 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 مژول جانبی هنگام مواجهه با این مشکل به حداقل رساندن نیروی مقاوم مانع در برابر حرکت می‌باشد. در این راستا مژول 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.

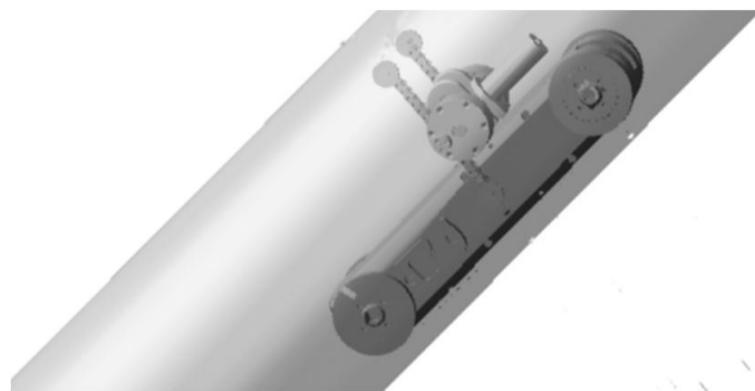
نحوه عملکرد ربات در عبور از مانع در نرم افزار آدامز شبیه‌سازی شده است. وضعیت ربات در قسمتهای مختلف عملیات با استخراج از محیط این نرم افزار در شکل 10 نمایش داده شده است. نحوه تحریک مژول بصورت قیود سینماتیکی بوده است. در شکل‌های 11 و 12 قیود سینماتیکی اعمال شده ملاحظه می‌شود.

### 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 لزjet 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 مژول 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 استاتیک دارد. دلیل این موضوع آنست که حرکت مازول سریع و چاپک 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 مازول می‌باشد. در عمل با در نظر گرفتن ضریب اینمنی مناسب در انتخاب موتور مازول، مقدار نیروهای اینرسی و سایر افت‌های صرفنظر شده پوشش داده می‌شود.



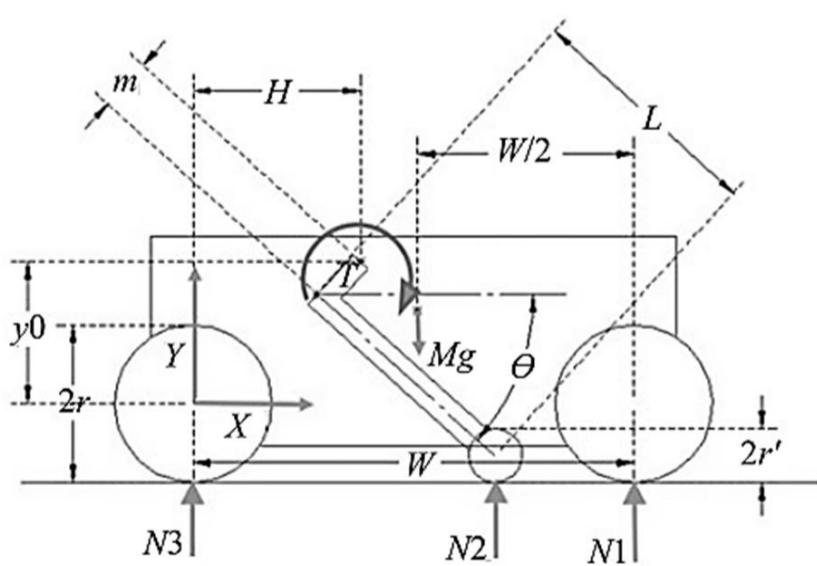
**Fig. 14** Module functionality in forward movement in high inclination pipes

شکل ۱۴ عملکرد مازول جانبی برای ادامه حرکت رو به جلو ربات در لوله‌های شیبدار



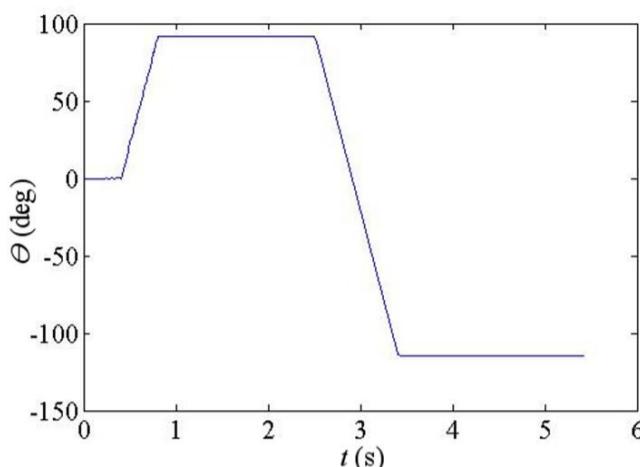
**Fig. 15** Module functionality in robot movement in high inclination pipes

شکل ۱۵ عملکرد مازول جانبی برای ادامه حرکت ربات در لوله‌های با شیب زیاد



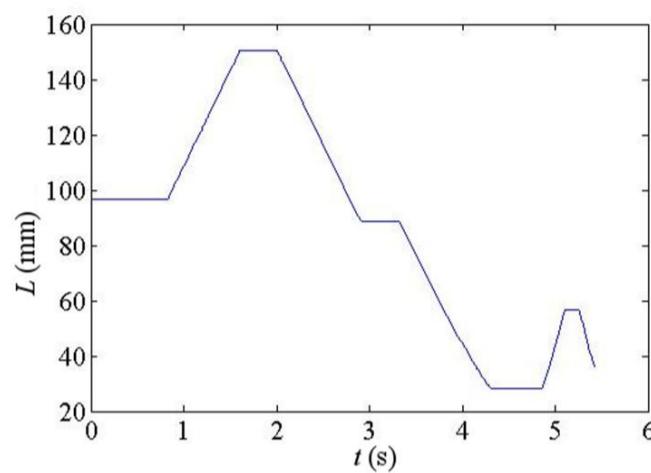
**Fig. 16** Free body diagram of robot when module contacts the pipe surface

شکل ۱۶ دیاگرام آزاد نیرویی ربات هنگام درگیر شدن مازول جانبی با کف لوله



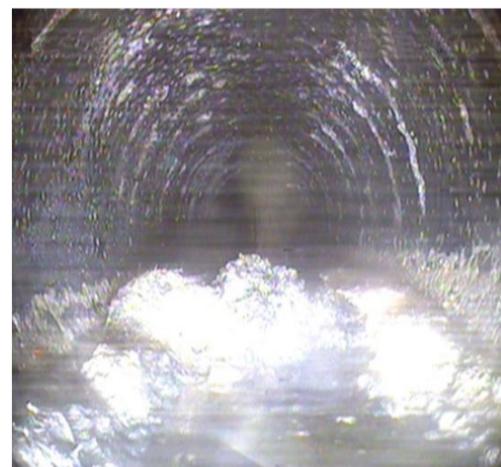
**Fig. 11** Angular position applied to racks in passing an obstacle

شکل ۱۱ موقعیت زاویه‌ای اعمال شده به شانه‌ای‌ها در عبور از مانع



**Fig. 12** Variation of racks length in passing an obstacle

شکل ۱۲ تغییرات طول شانه‌ای‌ها در عبور از مانع



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

شکل ۱۳ برخورد ربات با توده رسوبات هنگام بازرسی شبکه فاضلاب

#### ۴- تحلیل عملکرد مکانیزم

دیاگرام آزاد نیرویی ربات هنگام درگیر شدن مازول جانبی با کف لوله در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود. با افزایش گشتاور اعمالی به بازوی مازول مقدار نیروی  $N_3$  افزایش و با توجه به موقعیت تماس چرخ هرزگرد بازو با لوله، که توسط طول آن تعیین می‌گردد، یکی از نیروهای  $N_1$  یا  $N_2$  شروع به کاهش می‌کند تا جایی که به صفر رسیده و بجای چرخ مربوطه چرخ هرزگرد بازوی مازول با لوله در تماس می‌ماند.

آنچه باعث اثرگذاری مازول جانبی هنگام تماس با سطح لوله می‌گردد تغییر موازن نیروهای عمودی  $N_1$  و  $N_2$  می‌باشد. هنگام تماس چرخ هرزگرد مازول جانبی، رابطه تعادل نیرو و گشتاور بازو را در صورت فعل بودن مود ۱ و اعمال گشتاور برای چرخش بازو را می‌توان مطابق رابطه (1) بیان نمود:

$$T_1 = N_3 \times (l \times \cos(\theta) - m \times \sin(\theta)) \quad (1)$$

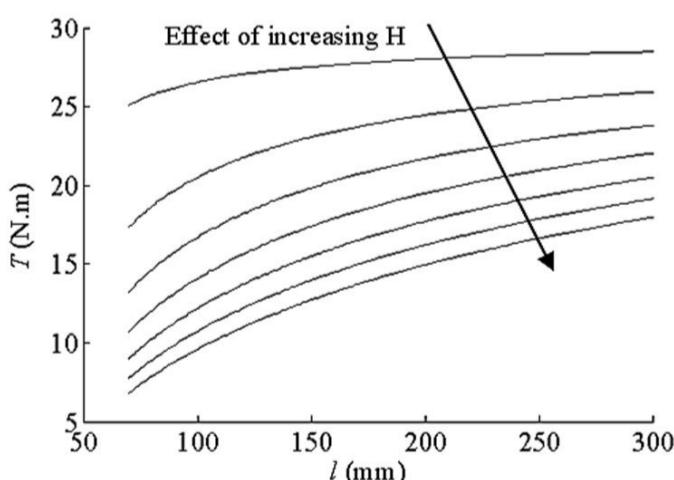
ربات به همراه مازول معادل 58 کیلوگرم درنظر گرفته شده است. در صورت تغییر وزن ربات شکل کلی نمودارها حفظ ولی موقعیت آن‌ها جابجا می‌گردد. با توجه به تصمیم انتخاب  $H$  بطوریکه تقارن ربات حفظ گردد، نمودارهای شکل 17 بر حسب وزن بی بعد نشده است.

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

تنها پارامتر متغیر مازول طول لینک  $L$  و زاویه  $\theta$  می‌باشد. هنگام فعال بودن مود اول، پارامتر  $\theta$  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 زوایه 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 مازول 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 مازول و ربات در شبیه‌سازی و تحلیل

**Table 1** Robot and module parameters in simulation and analysis

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

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 مازول می‌باشد. در عمل با در نظر گرفتن ضریب ایمنی مناسب در انتخاب موتور مازول، مقدار نیروهای اینرسی و سایر افت‌های صرف‌نظر شده پوشش داده می‌شود.

در روابط ارائه شده پارامترهای متغیر  $\theta$  و  $l$  را می‌توان بر حسب 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 درنظر 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:

$$T_2 = N3 \times \sin(\theta) \times m \quad (3)$$

در روابط (1) و (3) مقادیر  $N1$  و  $N2$  بصورت صریح ذکر نشده است.

در حقیقت با درگیر شدن مازول 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 درنظر گرفتن تعادل چرخشی ربات حول نقطه اثر نیروی  $N1$ ، مقدار  $N3$  را در هر لحظه استخراج نمود:

$$N3 \times (H + l \cos \theta - m \sin \theta) - T_1 - Mg \frac{w}{2} = 0 \quad (5)$$

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 اینحال:

$$T_2 + N3 \times (H + l \cos \theta - m \sin \theta) = Mg \frac{w}{2} \quad (6)$$

با جایگذاری مقدار  $T_2$  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 مازول 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  $\theta$  را استخراج نمود.

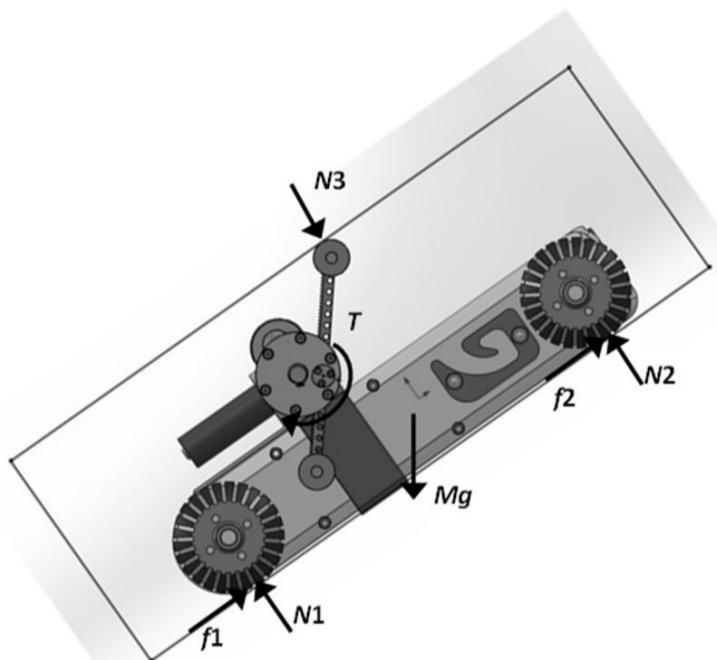
با توجه به شکل 16، پارامترهای  $H$ ،  $\theta$ ،  $y_0$ ،  $L$  و  $m$  جزء پارامترهای مازول طراحی شده می‌باشند. با استفاده از رابطه (5) می‌توان به ازای مقادیر مختلف  $H$  و تنظیم سایر پارامترهای هندسی با آن بطوریکه شرط تماس بازوی مازول با کف لوله حفظ گردد، تغییر گشتاور چرخش بازو بیان گردیده است. می‌توان 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 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 نیاز را ملاحظه نمود. 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 حرکت<sup>۱</sup> مژول بوده و نه کنترل آن، پیاده سازی سیستم کنترل به کارهای آتی سپرده شده است.

### ۵- شبیه‌سازی

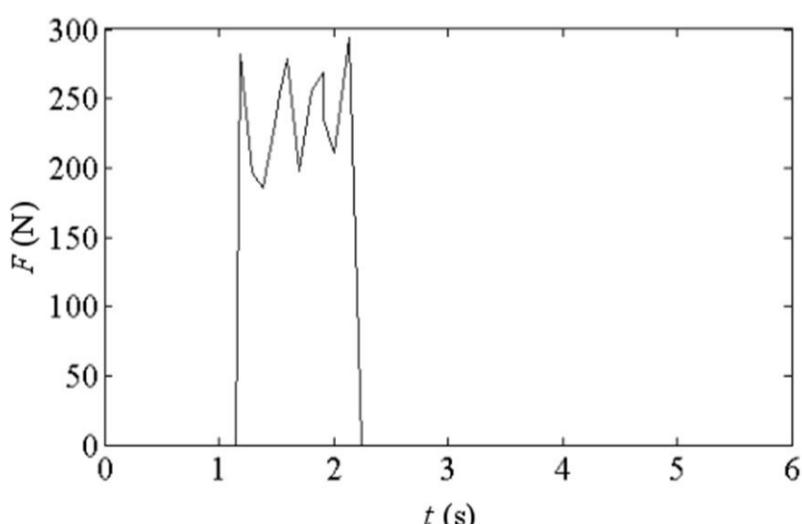
mekanizm مژول جانبی در عبور از انواع عوارض معرفی شده در شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. ربات عبور ربات از یک مانع توسط مژول جانبی در شکل ۱۰ ارائه گردید. ربات هنگام مواجهه با مانع شروع به کار در جا نموده است، ولی با فعال شدن مژول جانبی طی مراحل نشان داده شده عبور از مانع محقق گردیده است.

برای عارضه عبور از مانع نمودار تغییرات نیروی ایجاد شده در شانه ای هنگام عبور از عارضه در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ آورده شده است. هنگام اجرای این استراتژی در یک مرحله یک سمت بازوی مژول 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 مژول جانبی مطابق شکل ۲۲ می‌باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود افزایش نیروی بازو مقابله با افزایش سرعت ربات می‌باشد.



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

شکل ۱۹ دیاگرام آزاد نیروی ربات هنگام درگیر شدن مژول جانبی با تاج لوله های شیب دار



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

شکل ۲۰ تغییرات نیرو در امتداد بازوی مژول در مرحله اول عبور از مانع

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ استراتژی چرخش بازو برای افزایش قابلیت ربات در عبور از حفره یا مانع نیازمند گشتاور بزرگی برای موتور محرك بازو می‌باشد. تأمین این گشتاور توسط موتور گیربکس‌های مورد استفاده در این ربات‌ها به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد و سایز مژول را به شدت افزایش می‌دهد. لذا ایده‌ای که برای حل این معطل 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 شبیه‌سازی‌ها 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 ۱۹ می‌باشد.

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

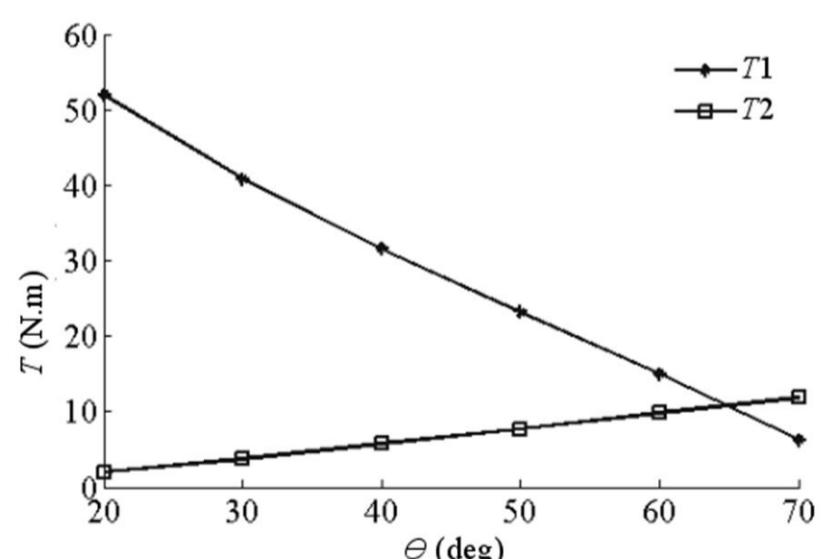
$$\mu(N1 + N2) > Mg \times \sin(\theta) \quad (9)$$

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 صرف‌نظر شده و چون فقط تحقق عملکرد مکانیزم و تأمین گشتاور مورد نیاز توسط موتور حرکتی مدنظر بوده است، بالاحاظ یک ضریب ایمنی در گشتاور محاسبه شده می‌توان موتور حرکتی مناسب را انتخاب نمود. همچنین با توجه به اینکه

جدول ۲ میزان گشتاور برای فعال شدن مود اول یا دوم مژول در زوایای مختلف  $\theta$

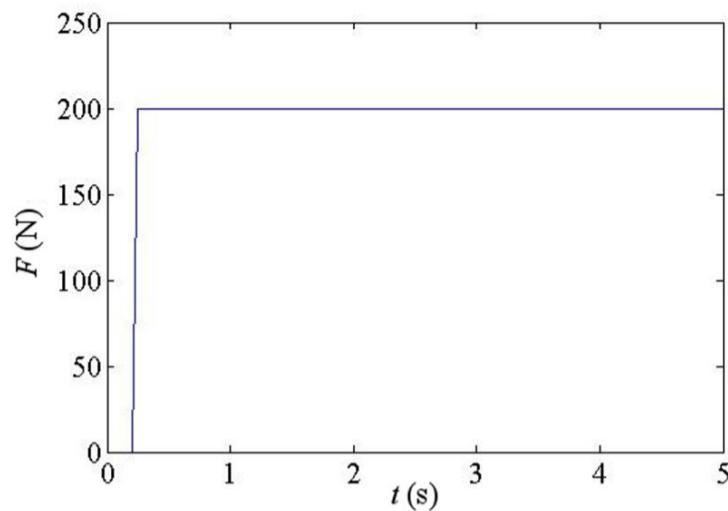
**Table 2** Torque of activating first or second mode of module in different angles

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



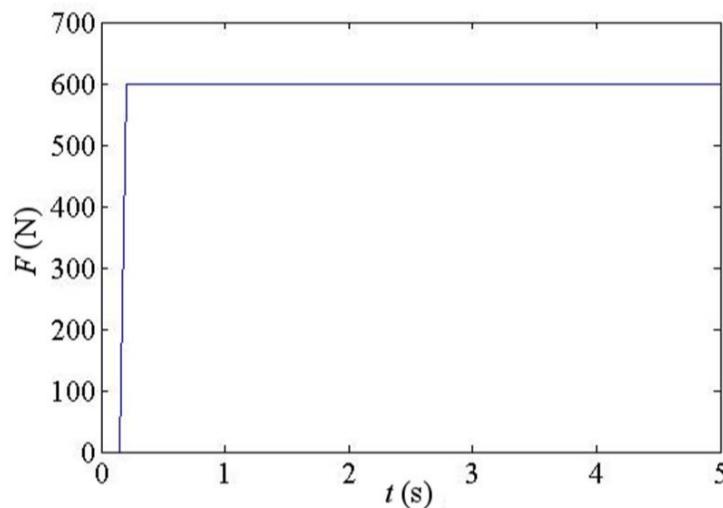
**Fig. 18** Effect of normal force  $N3$  on required torque of activating first mode ( $T1$ ) and second mode ( $T2$ ) in different angles of module arm

شکل ۱۸ تأثیرگذاری نیروی عمودی  $N3$  در زوایای مختلف بازوی مژول 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 مازول 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 مازول هنگام حرکت ربات در لوله عمودی

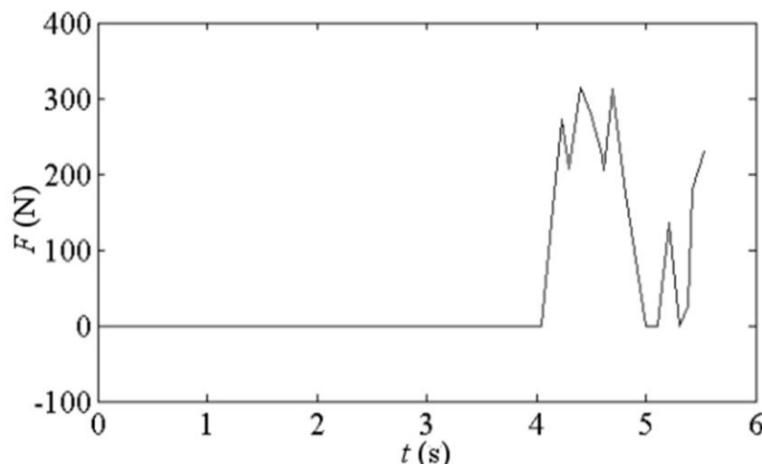
لازم به ذکر است نیروهای ارائه شده در شکل‌های 20 تا 23 از ربات در حال حرکت هنگام تحریک مازول در عبور از عوارض استخراج شده است، لذا نوسانات نمودار بدلیل نیروهای دینامیکی ضربه‌ای می‌باشد.

نتایج ارائه شده در شکل‌های 20 تا 25 مقدار نیروی موجود در شانه‌ای مازول 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 برآورده 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 مسقیم یا معکوس که برای برخی حالات صحه‌گذاری گردید، برای حالات در نظر گرفته نشده نیز به درستی انجام پذیرد.

## 6- بحث و بررسی نتایج

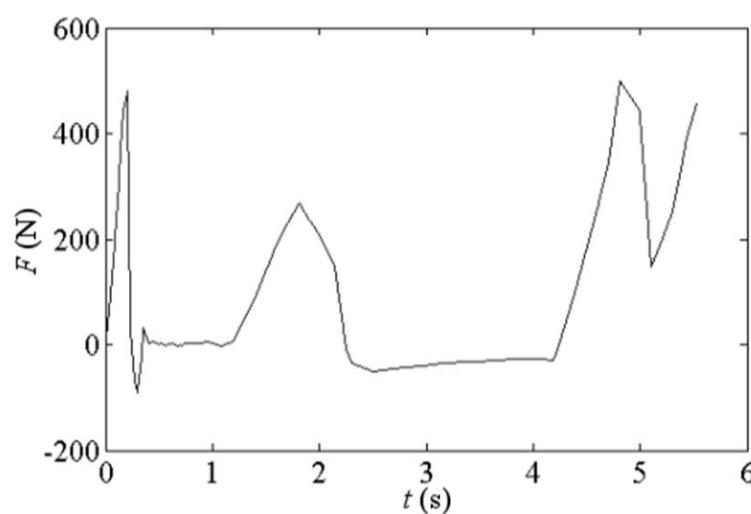
با توجه به نتایج شبیه‌سازی حرکت ربات در عبور از حفره و مانع می‌توان مشاهده نمود که عملکرد مکانیزم در این زمینه موفق می‌باشد. ربات علاوه بر داشتن چرخهای آجادار در مقابله با این موانع امکان عبور نداشته ولی به کارگیری مازول جانبی کمک فراوانی به ربات برای حل مشکل می‌کند.

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

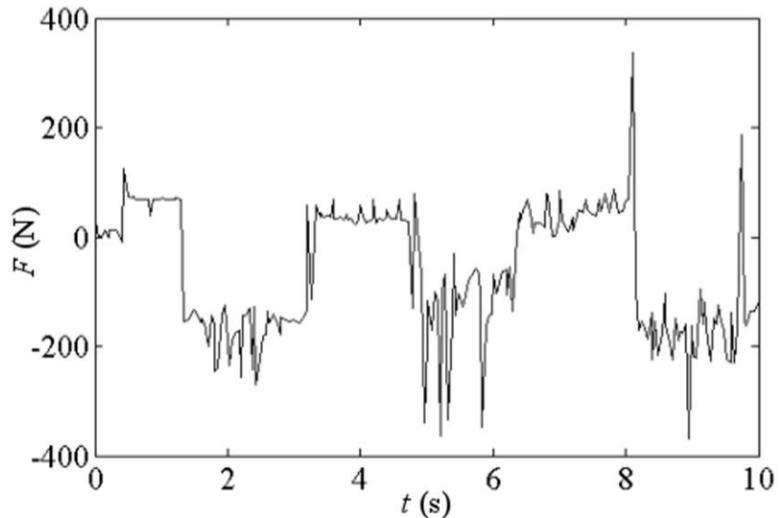
شکل 21 تغییرات نیرو در امتداد بازوی مازول در مرحله دوم عبور از مانع



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

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

مراحل عبور ربات از یک حفره توسط مازول جانبی در شکل 8 نشان داده شد. ربات هنگام مواجهه با حفره شروع به کار در جا نموده است، ولی با فعال شدن مازول 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 مازول 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 مازول 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 مازول در عبور از حفره

جدول ۵ مقدار نیروی شانه‌ای و گشتاور مورد نیاز با استفاده از روابط استخراج و بیان شده است. گشتاور شافت محرک پینیون از طریق نسبت تبدیل چرخدنده مخروطی بین خروجی گیربکس و شافت پینیون قابل تنظیم می‌باشد. با انتخاب نسبت تبدیل خروجی گیربکس با شافت محرک به میزان ۲، حداکثر گشتاور مورد نیاز در خروجی گیربکس برای مأموریت‌های مختلف استخراج و در جدول ۵ بیان گردیده است. با توجه به نتایج این جدول انتخاب موتور گیربکسی در مژول با گشتاور خروجی  $10 \text{ N.m}$ ، ربات در نظر گرفته شده با حداکثر وزن  $50 \text{ kg}$  کیلوگرم را در مأموریت‌های مختلف موفق می‌نماید.

### 7- نتیجه گیری

در این مقاله یک مژول جانبی بدین معنی برای توانمند سازی ربات‌های بازرسی داخل لوله در مقابل مشکلات ربات در عبور از موانع چون گودال، برجستگی‌های بیش از حد، شیب‌های تند و رسوبات زیاد داخل لوله ارائه گردید. موتور محرکه پرقدرت ربات به همراه چرخ‌های آجدار توانایی عبور از این موانع را در عمل نداشته است. این مژول بصورت یک سیستم جانبی مستقل بر روی بسترها 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 شنبی و یا مکانیزم‌های پیچیده وجود ندارد.

دو استراتژی برای انجام مأموریت مژول 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 می‌باشد. البته این رفتار در نواحی کاری مختلف مژول متفاوت می‌باشد. پس بایستی در عمل مصالحه‌ای بین میزان سرعت و قدرت مکانیزم برقرار نمود. حتی می‌توان سوئیچ کردن بین دو حالت

**جدول ۴** 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

نیروی شانه‌ای (آدامز)	نیروی شانه‌ای (تحلیلی)	مأموریت
250	290	عبور از حفره
300	290	عبور از مانع
210	205	عبور از شیب ۴۵ درجه
600	500	طی لوله قائم

**جدول ۵** حداکثر نیروها و گشتاورهای مژول جانبی در مأموریت‌های مختلف

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

حداکثر گشتاور خروجی گیربکس (N.m)	حداکثر گشتاور پینیون شانه ای (N.m)	حداکثر نیروی ایجاد شده در شانه ای (N)	مأموریت
6	12	400	عبور از حفره
6	12	400	عبور از مانع
3.9	7.8	260	طی شیب ۴۵ درجه
9.75	19.5	650	طی لوله عمودی

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

موقعیت هندسی مژول در چهار مأموریت عبور از مانع، حفره، شیب ۴۵ درجه و لوله قائم هنگام درگیری با سطح لوله در نرمافزار آدامز در جدول ۳ ارائه شده است. پارامتر  $\varphi_{\max}$  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  $290 \text{ N}$  نیوتن گزارش شده باشد. با ملاحظه نمودارهای ۱۹ و ۲۲ می‌توان مشاهده نمود که مقدار نیروی ایجاد شده روی شانه ای در عبور از مانع و حفره به ترتیب حدود  $300 \text{ N}$  و  $250 \text{ N}$  نیوتن می‌باشد. لذا نتیجه آدامز با نتایج تحلیلی همخوانی نسبی دارد.

در صورتی که گشتاور وارد بر مژول هنگام مأموریت امکان جدا شدن چرخ جلو و بالا آمدن قسمت جلو ربات را فراهم کند، با توجه به نتایج جدول ۳ 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 ۱۳ و ۱۴ 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 ۱۸، 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 ۴۵ درجه و لوله قائم در جدول ۴ ارائه شده است.

همانطور که از نتایج جدول ۴ 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 مژول بایستی به حداکثر گشتاور مورد نیاز مژول طی مأموریت‌های در نظر گرفته شده توجه نمود. این گشتاور از حداکثر نیروی ایجاد شده در امتداد بازوی مژول قابل استخراج است. در

**جدول ۳** پارامترهای مژول هنگام درگیر شدن با سطح لوله در مأموریتها

**Table 3** Module parameters when contact pipe in different missions

$\varphi_{\max}$	1	$\theta$	مأموریت
3	130	92.8	عبور از حفره
6	130	91.6	عبور از مانع
0	130	96	طی شیب ۴۵ درجه
0	130	96	طی لوله عمودی

## علائم یونانی

$\theta$  زاویه بازوی مژول با کف لوله  
 $\mu$  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.

را بطور هوشمند انتخاب نمود. موتور گیربکسی با گشتاور  $10 \text{ N.m}$  در مأموریت‌های مختلف ربات بازرسی با وزن  $50 \text{ Kg}$  توسط مژول معرفی شده موفق عمل می‌نماید.

معضلات پیش روی ربات در این مقاله جدی ترین مشکلاتی می‌باشد که ربات بازرسی در عمل با آن‌ها مواجه می‌شود. از آنجا که در بسیاری از موارد بسترها 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 مژول جانبی معرفی شده از ربات‌های بر پایه شنی نیز بیشتر می‌باشد. عملکرد مژول در محیط شبیه‌سازی موقیت مطلوبی را در برداشت. از طرفی نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی دارد. نتایج طرح نشان می‌دهد به کارگیری مژول در عمل کمک فراوانی به ربات‌های بازرسی متحرک در انجام موفق عملیات عملیات می‌نماید.

## 8- تقدیم و تشکر

نویسنده‌گان مقاله از شرکت دانش بنیان کاوش مکانیزه فن‌آور بواسطه فرار 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 مژول از مبدأ
$l$	طول بازوی مژول
$m$	فاصله شانه‌ای از مرکز شافت اصلی مژول
$M$	جرم ربات
$N1$	نیروی عمودی چرخهای عقب
$N2$	نیروی عمودی چرخهای جلو
$N3$	نیروی عمودی چرخهای مژول
$r$	شعاع چرخهای ربات
$r_p$	شعاع چرخ هرزگرد بازوی مژول
$T$	گشتاور بازوی مژول
$T1$	گشتاور بازوی مژول هنگام فعال بودن مود اول
$T2$	گشتاور بازوی مژول هنگام فعال بودن مود دوم
$t$	زمان
$y_0$	فاصله عرضی شافت اصلی مژول از مبدأ