



## مدل سازی، ساخت و ارزیابی یک میکرو ربات مجهز به عملگر ارتعاشی

مرضیه کرمی<sup>1</sup>، علیرضا توکل پور صالح<sup>2\*</sup>، اشکان نوروزی<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

\* شیراز، صندوق پستی 71555-515، tavakolpour@sutech.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 خرداد 1396

پذیرش: 11 مرداد 1396

ارائه در سایت: 03 شهریور 1396

کلید واژگان:

میکرو ربات

عملگر ارتعاشی

نیروی اصطکاک

## چکیده

هدف از این تحقیق مدل سازی، کنترل و ساخت یک میکرو ربات با استفاده از عملگرهای ارتعاشی و بررسی سختی پایه های میکرو ربات و ضریب اصطکاک بر روی حرکت می باشد. در این میکرو ربات از اصل حرکتی لغزش-چسبیدن، جهت حرکت و از دو عدد موتور ارتعاشی کوچک جهت راه اندازی آن، استفاده شده است. در ابتدا معادلات حاکم بر میکرو ربات استخراج و تحلیل شده اند. با مدل سازی آن، به صورت سیستم فشرده، شامل سه جرم که با فنرهای سخت به هم وصل شده اند، نیروهای اصطکاک محاسبه شده است. سپس به وسیله دو معادله کوپل مکانیکی و الکتریکی مدل مناسب عملگرها به دست آمد. در گام بعدی روند شبیه سازی با استفاده از محیط سیمولینک و متلب بیان شد و نتایج آن ارائه گردید. سپس به بررسی تاثیر ضریب فنریت پایه ها و ضریب اصطکاک بر روی حرکت میکرو ربات پرداخته شده است. پس از آن کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی یا همان PID برای این کار در نظر گرفته شد. در نهایت نیز فرآیند ساخت و ارزیابی تجربی میکرو ربات ارائه شده است. با توجه به شبیه سازی های انجام شده دقت حرکتی آن در حالت بیشترین سرعت مستقیم، حدود 17 میکرومتر می باشد و مطابق با ارزیابی تجربی، سرعت مستقیم میکرو ربات حدود 4mm/s، به ازای ولتاژ مرجع 1V، می باشد.

## Modeling, development, and evaluation of a micro-robot equipped with vibratory actuator

Marzieh Karami<sup>1</sup>, AliReza Tavakolpour Saleh<sup>2\*</sup>, Ashkan Norouzi<sup>3</sup>

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

\* P.O.B. 71555-515, Shiraz, Iran, tavakolpour@sutech.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 31 May 2017

Accepted 02 August 2017

Available Online 25 August 2017

## Keywords:

Micro-robot

Vibratory actuator

Friction force

## ABSTRACT

The aims of this research paper are modeling, control and development of a mobile micro-robot equipped with vibratory actuators and investigating the effect of stiffness of micro-robot's bases as well as friction coefficient on the robot dynamics. Accordingly, the motion principle of stick-slip is used and two small vibrating motors are utilized to run this micro-robot. First, the differential equations governing the micro-robotic platform are extracted and analyzed. Then, friction forces are calculated by modeling the micro-robot as a lumped system, consisting of three point masses connected together via stiff springs. Next, using mechanical and electrical coupled equations, an appropriate model for the vibratory actuators is obtained. In the next step, simulation process with SIMULINK and MATLAB is carried out and the simulation results are presented. Afterward, the influences of the stiffness of robot's bases as well as the friction coefficient on the motion of robot are investigated. A proportional-integral-derivative (PID) controller is applied to the micro-robot to precisely control its motion. Finally, the construction process and experimental evaluation of the micro-robot are presented. According to the simulation result, the positioning accuracy of the micro robot is about 17  $\mu\text{m}$  at its maximum translational velocity. Furthermore, a translational velocity of about 4mm/s corresponding to the reference voltage of 1 V is acquired using experiment.

## 1- مقدمه

میکرو ربات ها به علت حجم کم و دقت بالایی که دارند می توانند در صنایع نظامی و جاسوسی مورد استفاده قرار گیرند، همچنین می توان از آن ها برای دستیابی به فضاهایی که به دلایل مختلف قابل دسترسی نیستند استفاده کرد. به کارگیری در مکان هایی که در معرض اشعه های مضر قرار دارند یا استفاده درون لوله ها برای بازدید، تشخیص عیوب و حذف موانع نمونه هایی از کاربرد آن ها می باشد. در علم پزشکی نیز میکرو ربات ها کاربردهای بسیار مهمی دارند، برای مثال میکرو ربات هایی طراحی و ساخته شده اند که

از آن جایی که میکرو ربات های بزرگ نمی توانند به محیط های کوچک دسترسی پیدا کنند و از دقت و حساسیت لازم برخوردار نیستند، میکرو رباتیک به یک شاخه مهم در علم رباتیک و یک زمینه تحقیقاتی مورد توجه برای بسیاری از مهندسان تبدیل شده است.

کاربرد میکرو ربات ها نه تنها به یک صنعت خاص محدود نمی شود، بلکه به طور چشمگیری در صنایع و علوم مختلف در حال افزایش می باشد. این

## Please cite this article using:

M. Karami, A. Tavakolpour Saleh, A. Norouzi, Modeling, development, and evaluation of a micro-robot equipped with vibratory actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 413-422, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

لغزش-چسبیدن<sup>2</sup> استفاده شده است. اصل حرکتی لغزش-چسبیدن با استفاده از مکانیزم مرحله‌ای، حرکت میکرو ربات را فراهم می‌کند. در روش حرکت به وسیله لغزش-چسبیدن، تولید لغزش، ناشی از ارتعاش جانبی و تغییر لغزش، ناشی از تغییر نیروی تکیه‌گاهی است که منجر به تغییر نیروی اصطکاک می‌شود. ارتعاش جانبی موجب لغزش متقارن پایه‌های میکرو ربات به سمت عقب و جلو می‌شود و در نتیجه، حرکت خالص میکرو ربات صفر خواهد بود. اما اگر در حین این ارتعاش، نیروی تکیه‌گاهی و به تبع آن نیروی اصطکاک در یک جهت از لغزش کوچکتر و یا بزرگتر از جهت دیگر باشد، میزان لغزش نیز در دو جهت رو به جلو و رو به عقب متفاوت خواهد شد که باعث حرکت میکرو ربات خواهد شد.

وارتولوموس<sup>3</sup> و پاپادوپولوس<sup>4</sup> [10] در سال 2005 یک مینی ربات متحرک با سه درجه آزادی که براساس اصل حرکتی لغزش-چسبیدن عمل می‌کرد را تحلیل و طراحی کردند. سیستم عملگر آن، سه میکرو موتور ارتعاشی می‌باشد. نتایج تحلیل و شبیه‌سازی این مینی ربات پیش‌بینی می‌کند که میانگین حداکثر سرعت آن 1.5 mm/s و بزرگ‌ترین گام آن حدود 40µm است. همین مولفان در سال 2005 به تحلیل دینامیک و کنترل سرعت یک میکرو ربات مجهز به سه عملگر ارتعاشی پرداختند [11] و در سال 2006 دینامیک، طراحی و شبیه‌سازی این میکرو ربات همراه با تشریح مدل اصطکاک، مورد مطالعه قرار دادند [12]. آن‌ها در سال 2006 مدل مشابهی را با استفاده از دو عملگر ارتعاشی معرفی کردند. سرعت آن از 0.5 mm/s تا 1.5 mm/s گزارش شده است [13]. رابنستین<sup>5</sup> و همکاران در سال 2012 با طراحی مشابه، یک مینی ربات موسوم به کیلوبت<sup>6</sup> با استفاده از دو موتور ارتعاشی ساختند. آن‌ها تعداد 1024 عدد از آن را ساختند و مورد آزمایش و کنترل گروهی قرار دادند. از مزایای کیلوبت می‌توان به هزینه و مدت زمان کم، جهت ساخت اشاره کرد. جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز، بر روی هر مینی ربات یک باتری لیتیوم-یون با ولتاژ 3/4 V و ظرفیت 160 mAh نصب گردیده بود [14]. اسپارتالی و همکاران در سال 2013 به کنترل سرعت میکرو موتورهای ارتعاشی میکرو ربات پرداختند [15]. هدف از انجام این تحقیق، طراحی و ساخت و کنترل یک میکرو ربات مجهز به عملگر ارتعاشی که دارای سه درجه آزادی (دو درجه آزادی مربوط به حرکت انتقالی و یک درجه آزادی مربوط به حرکت دورانی حول محور عمودی) است، می‌باشد. در این میکرو ربات از اصل حرکت لغزش-چسبیدن، استفاده شده است. همچنین به بررسی پارامترهای سختی پایه‌ها و ضریب اصطکاک سطح روی حرکت این میکرو ربات پرداخته شده است.

## 2- بررسی دینامیک میکرو ربات سه درجه آزادی

شمتیک این میکرو ربات شامل یک پلت فرم با مقطع دایره‌ای می‌باشد که به وسیله سه پایه A، B و C واقع بر روی رئوس یک مثلث متساوی الاضلاع، با سطح حرکت در تماس است و توسط دو موتور ارتعاشی D و E راه‌اندازی می‌شود. در "شکل 1" شمتیک میکرو ربات و نیروهای وارد شده به آن نشان داده شده است.

دینامیک میکرو ربات شامل دو بخش زیر می‌باشد:

معادلات دینامیکی میکرو ربات که نیروهای ناشی از موتورهای ارتعاشی را به حرکت میکرو ربات مرتبط می‌کنند.

<sup>2</sup> Stick-Slip  
<sup>3</sup> Vartholomeos  
<sup>4</sup> Papadopoulos  
<sup>5</sup> Rubenstein  
<sup>6</sup> Kilobot

می‌توانند در رگ‌های بدن انسان حرکت کرده و دارو را به قسمت‌های مختلف بدن برسانند.

به طور کلی تعاریف متفاوتی از میکرو ربات در مراجع مختلف وجود دارد. میکرو ربات‌ها براساس وظایفی که به عهده دارند و همچنین ابعاد آن‌ها تعریف می‌شوند [1]. در حالتی که تعریف براساس وظیفه میکرو ربات صورت می‌گیرد، میکرو ربات به رباتی اطلاق می‌گردد که در ابعاد میکرو عمل می‌کند، به عنوان مثال می‌توان دقت حرکت در ابعاد میکرو را نام برد. ابعاد چنین میکرو ربات‌هایی از چند سانتی متر مکعب تا چند دسی متر مکعب می‌باشد. زمینه میکرو رباتیک تنها شامل طراحی این‌گونه میکرو ربات‌ها نمی‌شود، بلکه شامل کنترل، ابزار لازم و شیوه‌های خودکارسازی این میکرو ربات‌ها نیز می‌باشد.

ربات‌ها را می‌توان براساس ابعاد کلی نیز تعریف کرد. کاپاری آرگوس [2] با توجه به ابعاد ربات‌ها، آنها را به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌کند و برای هرکدام مرز مشخصی تعریف می‌نماید که در جدول 1 مشاهده می‌شود. مرز تعیین شده توسط کاپاری برای ربات‌ها همخوانی خوبی با مقالات مختلف ندارد. ربات‌هایی با ابعاد چند میلی‌متر [3,4] یا با ابعاد چند صد میکرومتر، [5-7] توسط محققان، میکروروبات شناخته می‌شوند و در یک تقسیم‌بندی کلی تر که مطابق با بسیاری از مقالات و تحقیقات می‌باشد، میکرو ربات به رباتی اطلاق می‌شود که ابعادی بین 100 میکرومتر مکعب و 1 اینچ مکعب داشته باشد [8].

تمام میکرو ربات‌ها در دسته میکرو ربات‌های متحرک<sup>1</sup> قرار نمی‌گیرند. برای ارائه یک تعریف کلی از میکرو ربات متحرک، پارامترهای مختلفی دخیل هستند. اما در یک تعریف جامع می‌توان گفت به رباتی کلمه متحرک نسبت داده می‌شود که دامنه حرکتی آن حداقل چندین برابر طول بدنه ربات باشد و یا به عبارتی میزان حرکت ربات تنها محدود به انرژی ذخیره شده در آن باشد. بنابراین می‌توان میکرو ربات متحرک را به‌طور خلاصه به‌صورت زیر تعریف کرد.

یک میکرو ربات متحرک میکرو رباتی است با ابعاد کوچکتر از 1 اینچ مکعب و بزرگتر از 100 میکرومتر مکعب، که دامنه حرکتی آن حداقل چندین برابر طول بدنه آن باشد.

ربات‌های متحرک نیز کاربردهای متنوعی در زندگی انسان دارند که از آن میان می‌توان به استفاده در صندلی‌های چرخ‌دار برای جابجایی افراد معلول و ناتوان، استفاده در تحقیقات فضایی به عنوان فضاپرو، شناسایی مناطق جنگی و استفاده در محیط‌هایی که دارای اشعه رادیواکتیو هستند و بسیاری از کاربردهای دیگر اشاره کرد [9].

یکی از تقسیم‌بندی‌هایی که برای ربات‌های متحرک وجود دارد، تقسیم‌بندی آن‌ها براساس روش حرکتی مورد استفاده در آن‌ها می‌باشد. در طراحی و ساخت میکرو ربات مورد نظر در این پژوهش از اصل حرکتی

جدول 1 دسته‌بندی ربات‌ها توسط کاپاری [2]

ابعاد(حجم میکرو ربات)	دسته‌بندی
1m <sup>3</sup>	ربات
10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> = 1dm <sup>3</sup>	مینی ربات
10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> = 1cm <sup>3</sup>	میکرو ربات
10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> = 1mm <sup>3</sup>	نانو ربات

<sup>1</sup> Mobile micro-robot

$$\omega_p = [0 \ 0 \ \dot{\varphi}]^T \Rightarrow \omega_p \times I \omega_p = 0 \quad (7)$$

در معادلات فوق  $n_j$  گشتاور عکس العمل ناشی از چرخش موتورهای D و E می باشد، که به علت ناچیز بودن از آن ها صرف نظر می کنیم. در نتیجه با توجه به معادلات (6) و (7)، معادله (4) به شکل زیر ساده می شود:

$$\hat{Z} = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (8)$$

$$I_{zz} \dot{\varphi} = \hat{Z} \sum_i (r_i \times F_i) \quad (9)$$

$r_i$  در معادلات فوق فاصله از مرکز جرم است. معادله (3) نیز برحسب مؤلفه ها به صورت زیر بیان می شود:

$$M \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum F_x \\ \sum F_y \\ \sum F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum F_x \cos \varphi - \sum F_y \sin \varphi \\ F_x \sin \varphi + \sum F_y \cos \varphi \\ \sum F_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

$r_i$  در معادلات فوق برای هر کدام از پایه ها و موتورها به صورت زیر به دست می آید. در "شکل 2" شماتیک نمای روبروی میکرو ربات و محل قرارگیری عملگرها و پایه ها و در "شکل 3" بردار موقعیت پایه ها و عملگرها نسبت به مرکز جرم نشان داده شده است. با توجه به "شکل 3" معادلات زیر به دست می آید.

$$(q + e)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 = l^2 \Rightarrow l^2 - \frac{l^2}{4} = (q + e)^2 \Rightarrow (q + e) = \frac{\sqrt{3}}{2} l \quad (11)$$

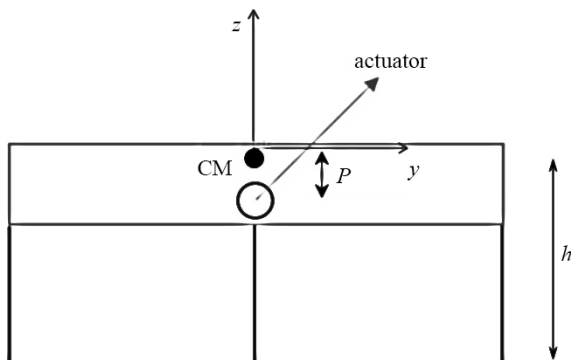


Fig.2 Front view of the micro-robot and the positions of actuators and bases

شکل 2 نمای روبروی میکرو ربات و محل قرارگیری عملگرها و پایه ها

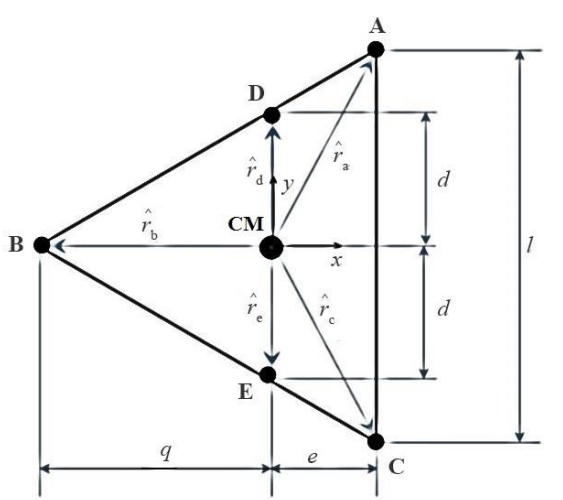


Fig.3 Position vector of bases and actuators towards the center of the mass

شکل 3 بردار موقعیت پایه ها و عملگرها نسبت به مرکز جرم

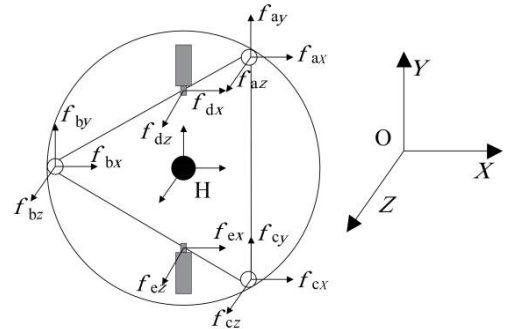


Fig.1 Micro-robot schematic and components of the applied forces on the platform

شکل 1 شماتیک میکرو ربات و مؤلفه های نیروهای وارد شده به پلت فرم

مدل دینامیکی عملگرها، که رفتار آن ها را نشان می دهد، و رابطه بین ولتاژ ورودی به آن ها و سرعت دورانی که منجر به تولید نیرو و عملکرد میکرو ربات می شود را بیان می کند.

در این پژوهش از روش نیوتن-اولیبر جهت استخراج معادلات استفاده شده است.

در بررسی رفتار میکرو ربات های متحرک، جهت درک بهتر حرکت آن، می بایست یک مرجع ثابت در نظر گرفت تا بتوان سرعت و جابجایی میکرو ربات را نسبت به آن توصیف کرد. برای حل معادلات دینامیکی این میکرو ربات نیز یک دستگاه مختصات مرجع ثابت (O) و یک دستگاه مختصات متصل به مرکز میکرو ربات (H)، مطابق "شکل 1" انتخاب شده اند.

از آن جایی که نیروهای وارد شده به میکرو ربات نسبت به دستگاه مختصات متحرک نصب شده بر روی آن می باشند، یک تبدیل کلی جهت بیان این نیروها در دستگاه مختصات مرجع نیاز است. روش های متفاوتی برای بیان یک بردار در دستگاه مختصات دیگر وجود دارد، که در این تحقیق از تبدیل RPY<sup>1</sup> استفاده شده است. در این روش با سه دوران حول محوره های X، Y و Z با زوایای  $\psi$ ،  $\theta$  و  $\varphi$ ، تبدیل از دستگاه مختصات اول به دستگاه مختصات دوم انجام می شود.

با توجه به این که میکرو ربات حرکت صفحه ای داشته و تنها حول محور Z به اندازه  $\varphi$  دوران می کند، بردار سرعت زاویه ای میکرو ربات به صورت زیر می باشد:

$$\omega_p = [0 \ 0 \ \dot{\varphi}]^T \quad (1)$$

بنابراین ماتریس دوران دستگاه مختصات متحرک نصب شده بر روی میکرو ربات، نسبت به دستگاه مختصات مرجع به صورت زیر به دست می آید:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

معادلات دینامیکی میکرو ربات با استفاده از روش نیوتن-اولیبر به صورت زیر به دست می آیند:

$$M \dot{V} = R \sum_i F_i \quad i = \{a, b, c, d, e\} \quad (3)$$

$$I \dot{\omega}_p + \omega_p \times I \omega_p = \sum_i (r_i \times F_i) + \sum_j n_j \quad i = \{a, b, c, d, e\} \quad j = \{d, e\} \quad (4)$$

$$V = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z}]^T \quad (5)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \Rightarrow I \omega_p = [0 \ 0 \ I_{zz} \dot{\varphi}]^T \quad (6)$$

<sup>1</sup> Roll - Pitch - Yaw

می باشند. با به دست آوردن مدل مناسب جهت عملگر نیز سرعت دورانی موتورها و زاویه محور آن‌ها مشخص می شوند. بنابراین جهت حل سه معادله کوپل فوق و مشخص کردن رفتار میکرو ربات در هر سه درجه آزادی، مجهولات این معادلات مقادیر نیروی اصطکاک می باشند. در ادامه نیروهای اصطکاک محاسبه خواهند شد.

حرکت میکرو ربات زمانی به صورت مستقیم خواهد بود که جهت قرارگیری دو عملگر، برخلاف جهت یکدیگر بوده و با سرعت دورانی یکسان عمل کنند. اگر هر دو عملگر با سرعت برابر در یک جهت دوران کنند، برآیند نیروهای ایجاد شده باعث چرخش میکرو ربات حول محور عمودی خواهد شد. همان طور که در معادلات (19) الی (24) نشان داده شد، میزان نیروی تولید شده توسط عملگرها وابسته به میزان سرعت دورانی آن‌ها است. بنابراین می توان یک سرعت دورانی  $\omega$  تعریف کرد، که با رسیدن به این سرعت دورانی، نیروی ایجاد شده بر نیروی اصطکاک غلبه خواهد کرد و موجب حرکت میکرو ربات می شود. بنابراین عملکرد عملگرها در سرعت‌های دورانی پایین تر از  $\omega$  موجب حرکت میکرو ربات نخواهد شد. برای به دست آوردن این سرعت دورانی فرض می کنیم در حالت حرکت رو به جلو موتورها در خلاف جهت یکدیگر و با سرعت دورانی یکسان  $\omega$  دوران می کنند. در این حالت با مساوی قرار دادن برآیند نیروها در جهت افقی با حد اصطکاک کولمب می توانیم  $\omega$  را بیابیم.

$$\sum F_x = -\mu \sum F_z \quad (33)$$

$$m_e r_e \omega_e^2 \sin \theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \sin \theta_d = \mu (Mg + m_e g + m_d g + m_e r_e \omega_e^2 \cos \theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \cos \theta_d) \quad (34)$$

در صورتی که هر دو عملگر یکسان باشند، معادله (34) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$2mr\omega_s^2 \sin \theta = \mu (Mg + 2mg + 2mr\omega^2 \cos \theta) \quad (35)$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{\mu g(M+m)}{2mr(\sin \theta - \mu \cos \theta)}} \quad (36)$$

همان طور که مشخص است  $\omega_s$  برای زوایای مختلف تغییر می کند. بنابراین برای به دست آوردن کمترین مقدار  $\omega_s$  از معادله (36) نسبت به  $\theta$  مشتق می گیریم و برابر صفر قرار می دهیم. سپس  $\theta$  به دست آمده را در معادله (36) قرار می دهیم.

$$\frac{d}{d\theta} \omega_s = \frac{d}{d\theta} \sqrt{\frac{\mu g(M+m)}{2mr(\sin \theta - \mu \cos \theta)}} = 0 \quad (37)$$

$$\frac{d}{d\theta} \omega_s = \frac{-2\mu g(M+2m)mr(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{(2mr(\sin \theta - \mu \cos \theta))^2} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{-2\mu g(M+2m)mr(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{(2mr(\sin \theta - \mu \cos \theta))^2} = 0 \quad (39)$$

$$-2\mu g(M+2m)mr(\cos \theta + \mu \sin \theta) = 0 \quad (40)$$

$$\cos \theta + \mu \sin \theta = 0 \quad (41)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{-1}{\mu} \right) \quad (42)$$

با جایگذاری مقدار به دست آمده از معادله (42) در معادله (36) خواهیم داشت:

$$\omega_s = \left( \frac{\mu g(M+2m)}{2mr\sqrt{1+\mu^2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

در مقابل این که اگر سرعت دورانی موتورها از یک حد مشخص کم تر باشد میکرو ربات حرکت نمی کند، این قضیه نیز وجود دارد که اگر سرعت دورانی از یک حد مشخص بیشتر باشد، نیروهای تولید شده بر وزن میکرو ربات غلبه می کنند و در حین حرکت باعث جدا شدن پایه‌ها از سطح حرکت می شوند. که این حالت در طراحی مناسب نبوده و باعث ایجاد ناپایداری در

$$q = \frac{2}{3}(q + e) = \frac{\sqrt{3}}{3}l \quad (12)$$

$$e = \frac{1}{3}(q + e) = \frac{\sqrt{3}}{6}l \quad (13)$$

$$\hat{r}_a = \left[ \frac{\sqrt{3}l}{6} \quad \frac{l}{2} \quad -h \right]^T \quad (14)$$

$$\hat{r}_b = \left[ -\frac{\sqrt{3}l}{3} \quad -\frac{l}{2} \quad -h \right]^T \quad (15)$$

$$\hat{r}_c = \left[ \frac{\sqrt{3}l}{6} \quad -\frac{l}{2} \quad -h \right]^T \quad (16)$$

$$\hat{r}_d = [0 \quad d \quad -p]^T \quad (17)$$

$$\hat{r}_e = [0 \quad -d \quad -p]^T \quad (18)$$

با توجه به جهت قرارگیری عملگرها، و انتخاب دستگاه مختصات مؤلفه‌های نیروی تولید شده توسط آن‌ها نسبت به دستگاه مختصات متحرک به صورت زیر به دست می آیند. قابل ذکر است که جهت نمایش مؤلفه نیروها از دو زیرنویس استفاده شده، که زیرنویس اول مربوط به پایه و یا عملگر مورد نظر و زیرنویس دوم مربوط به جهت اعمال نیرو است.

$$f_{ex} = -m_e r_e \omega_e^2 \sin \theta_e \quad (19)$$

$$f_{ey} = 0 \quad (20)$$

$$f_{ez} = -m_e g - m_e r_e \omega_e^2 \cos \theta_e \quad (21)$$

$$f_{dx} = m_d r_d \omega_d^2 \sin \theta_d \quad (22)$$

$$f_{dy} = 0 \quad (23)$$

$$f_{dz} = -m_d g - m_d r_d \omega_d^2 \cos \theta_d \quad (24)$$

مؤلفه‌های گشتاور هر نیرو در دستگاه مختصات نصب شده بر روی میکرو ربات نیز به صورت زیر به دست می آیند:

$$\hat{r}_a \times \hat{f}_a = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}l}{6} \\ \frac{l}{2} \\ -h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{ax} \\ f_{ay} \\ f_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l f_{az}}{2} + h f_{ay} \\ -h f_{ax} - \frac{\sqrt{3}l f_{az}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}l f_{ay}}{6} - \frac{l f_{ax}}{2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\hat{r}_b \times \hat{f}_b = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}l}{3} \\ 0 \\ -h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{bx} \\ f_{by} \\ f_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h f_{by} \\ -h f_{bx} - \frac{\sqrt{3}l f_{bz}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}l f_{by}}{3} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\hat{r}_c \times \hat{f}_c = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}l}{6} \\ -\frac{l}{2} \\ -h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{cx} \\ f_{cy} \\ f_{cz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{l f_{cz}}{2} + h f_{cy} \\ -h f_{cx} - \frac{\sqrt{3}l f_{cz}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}l f_{cy}}{6} + \frac{l f_{cx}}{2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\hat{r}_d \times \hat{f}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ d \\ -p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{dx} \\ f_{dy} \\ f_{dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d f_{dz} + p f_{dy} \\ -p f_{dx} \\ -d f_{dx} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\hat{r}_e \times \hat{f}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ -d \\ -p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{ex} \\ f_{ey} \\ f_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d f_{ez}}{2} + p f_{ey} \\ -p f_{ex} \\ d f_{ex} \end{bmatrix} \quad (29)$$

با جایگذاری معادلات (19) الی (24) در معادلات (9) و (10)، معادلات دینامیکی میکرو ربات به صورت زیر حاصل می گردند:

$$M\ddot{X} = (-m_e r_e \omega_e^2 \sin \theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \sin \theta_d + f_{ax} + f_{bx} + f_{cx}) \cos \varphi - (f_{ay} + f_{by} + f_{cy}) \sin \varphi \quad (30)$$

$$M\ddot{Y} = (-m_e r_e \omega_e^2 \sin \theta_e + m_d r_d \omega_d^2 \sin \theta_d + f_{ax} + f_{bx} + f_{cx}) \sin \varphi - (f_{ay} + f_{by} + f_{cy}) \cos \varphi \quad (31)$$

$$I_{zz} \ddot{\varphi} = \frac{\sqrt{3}l}{6} f_{ay} - \frac{l}{2} f_{ax} - \frac{\sqrt{3}l}{3} f_{by} + \frac{\sqrt{3}l}{6} f_{cy} + \frac{l}{2} f_{cx} - dm_e r_e \omega_e^2 \sin \theta_e + dm_d r_d \omega_d^2 \sin \theta_d \quad (32)$$

در معادلات به دست آمده تمامی پارامترهای جرم کل میکرو ربات، جرم وزنه‌های خارج از مرکز و فاصله آن‌ها از محور دوران پارامترهای معلوم

با حل معادله‌های تعادل استاتیکی، نیروهای عمودی در پایه‌های A و B و دست می‌آید و نظیر آن جرم‌های  $M_1$  و  $M_2$  و  $M_3$  محاسبه می‌شود.

$k_1$  و  $k_2$  نشان‌دهنده سختی فنر می‌باشد. در واقع پایه‌ها به صورت تیر یک سرگیردار فرض شده است که با توجه به مدول الاستیسیته و هندسه آن، ضریب فنریتش قابل محاسبه است. تغییر شکل‌های تولید شده به اندازه کافی کوچک هستند، بنابراین می‌توان از تغییر زاویه فنرها صرف نظر کرد. نیروهای  $f_{fij}$  و  $f_{aij}$  نیروهای عملگر و اصطکاک وارد شده به جرم  $M_i$  هستند.  $j = \{x, y\}$  نشان دهنده جهت این نیروها در راستای  $x$  و  $y$  می‌باشد. معادله دینامیک سیستم جرم و فنر به صورت زیر می‌باشد:

$$M_1 \ddot{x}_1 = -\frac{\sqrt{3}}{2} k_1 x_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} k_1 x_2 + f_{f1x} + f_{a1x} \quad (47)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} k_1 x_1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} k_2\right) x_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} k_2 x_3 + f_{f2x} + f_{a2x} \quad (48)$$

$$M_3 \ddot{x}_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} k_2 x_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} k_2 x_3 + f_{f3x} + f_{a3x} \quad (49)$$

$$M_1 \ddot{y}_1 = \left(-k_3 - \frac{k_1}{2}\right) y_1 + \left(\frac{k_1}{2}\right) y_2 + k_3 y_3 + f_{f1y} + f_{a1y} \quad (50)$$

$$M_2 \ddot{y}_2 = \left(\frac{k_1}{2}\right) y_1 + \left(-\frac{k_2}{2} - \frac{k_1}{2}\right) y_2 + \frac{k_2}{2} y_3 + f_{f2y} + f_{a2y} \quad (51)$$

$$M_3 \ddot{y}_3 = k_3 y_1 + \left(\frac{k_2}{2}\right) y_2 + \left(-k_3 - \frac{k_2}{2}\right) y_3 + f_{f3y} + f_{a3y} \quad (52)$$

$x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$  شامل جابجایی‌های سه جرم در جهت  $x$ - $y$  است. زمانی که جرم‌ها در حالت استاتیک هستند، مجهول‌های سیستم شش نیروی اصطکاک می‌باشد که با حل شش معادله تعادل استاتیکی به دست می‌آید. وقتی بعضی از جرم‌ها در حال حرکت هستند، در این حالت نیروی اصطکاک، برابر نیروی اصطکاک کولمب می‌شود که جهت نیروی اصطکاک، خلاف جهت سرعت جرم متناظر می‌باشد. زمانی که سرعت مرکز جرم مخالف صفر است، نیروهای عملگر در سه پایه به حد اصطکاک کولمب رسیده و حرکت شروع شده است. واضح است که در این حالت نیروی اصطکاک، برابر نیروی اصطکاک کولمب می‌باشد.

#### 4- مدل عملگر

همان‌طور که اشاره شد در این میکرو ربات از دو موتور ارتعاشی به عنوان عملگر استفاده شده است. موتور ارتعاشی یک موتور DC است، که بر روی محور آن یک جرم به صورت خارج از مرکز قرار داده شده است. موتورهای DC با اعمال اختلاف پتانسیل کار می‌کنند. دینامیک موتورهای ارتعاشی شامل دو بخش الکتریکی و مکانیکی است، که با ترکیب معادلات این دو بخش، مدل نهایی به دست می‌آید.

معادله بخش مکانیکی موتور به صورت زیر است. در این معادله  $T$  گشتاور موتور و  $\theta$  زاویه چرخش می‌باشند.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + mgr\theta = T \quad (53)$$

گشتاور ایجاد شده توسط موتور نیز برابر با حاصل ضرب جریان ورودی و ثابت گشتاوری موتور می‌باشد.

$$T = k_t i \quad (54)$$

رابطه بخش الکتریکی موتور نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - e_m \quad (55)$$

$$e_m = k_b \dot{\theta} \quad (56)$$

با ترکیب و حل معادلات (53) الی (56) مدل دینامیکی موتور به دست می‌آید. میزان پارامترهای موتورهای استفاده شده با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری مناسب به دست آمده‌اند.

حرکت می‌شود. بنابراین با برابر قرار دادن برآیند نیروی عملگرها در جهت عمودی و وزن میکرو ربات، حداکثر سرعت دورانی که جهت عملکرد موتورها مورد قبول می‌باشد را به دست می‌آوریم. در این حالت نیز سرعت دورانی عملگرها برابر در نظر گرفته شده است.

$$2mr\omega_{tip}^2 \cos\theta = Mg + 2mg \quad (44)$$

$$\omega_{tip} = \sqrt{\frac{Mg+2mg}{2mr \cos\theta}} \quad (45)$$

مشاهده می‌شود که در این حالت نیز سرعت دورانی به دست آمده تابعی از زاویه دوران می‌باشد. مانند حالت قبل با مشتق‌گیری و برابر صفر قرار دادن معادله (45)، زاویه برابر با صفر به دست می‌آید که با جایگذاری در این معادله حداکثر سرعت دورانی مجاز را به دست می‌آوریم.

$$\theta = 0 \Rightarrow \omega_{tip} = \sqrt{\frac{Mg+2mg}{2mr}} \quad (46)$$

#### 3- نیروهای اصطکاک

هنگامی که نیروهای وارد شده به میکرو ربات توسط عملگرها به میزان کافی نباشد، برآیند نیروها توانایی غلبه بر نیروی اصطکاک را نداشته و حرکت میکرو ربات اتفاق نمی‌افتد. بنابراین محاسبه دقیق نیروی اصطکاک در هر پایه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با افزایش نیروهای عملگر، نیروهای توزیع شده روی پایه‌های میکرو ربات به حد اصطکاک کولمب می‌رسند و حرکت شروع می‌شود. برای درک اینکه چگونه میکرو ربات پس از تعادل استاتیکی شروع به حرکت خواهد کرد، نیاز است که تعیین شود کدام پایه سریع‌تر تعادل استاتیکی‌اش را از دست می‌دهد. ممکن است ابتدا یک پایه یا دو پایه تعادل استاتیکی خود را از دست بدهند. در واقع برای محاسبه نیروی اصطکاک دو حالت وجود دارد. حالتی که سرعت مرکز جرم میکرو ربات برابر با صفر یا مخالف صفر باشد. زمانی که سرعت مرکز جرم برابر صفر است حداقل یک پایه در حالت تعادل استاتیکی قرار دارد و در این حالت برای به دست آوردن اصطکاک از مدل جرم و فنر که در ادامه توضیح داده خواهد شد کمک می‌گیریم. با توجه به این هدف نیاز است که اطلاعاتی راجع به توزیع نیرو روی سه پایه میکرو ربات داشته باشیم. با وجود 9 مجهول (سه نیروی مجهول در هر پایه در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$ ) و 6 معادله تعادل، مسئله در حالت نامعین استاتیکی قرار داشته و نمی‌توان از روش‌های معمول نیروی اصطکاک را محاسبه کرد. با فرض تغییر فرم کوچک در پایه‌های میکرو ربات، می‌توان نیروی اصطکاک را محاسبه نمود. برای این منظور، میکرو ربات را به صورت سیستم فشرده، شامل 3 جرم که با فنرهای سخت به هم وصل شده‌اند، همانند "شکل 4" مدل‌سازی می‌کنیم.

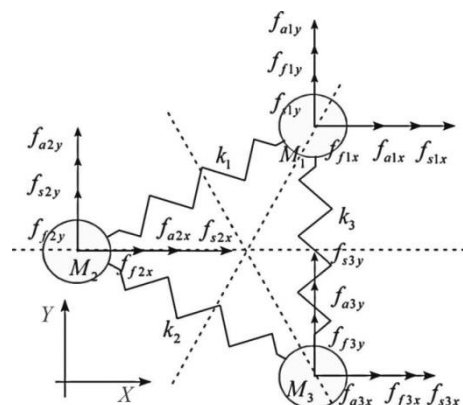


Fig.4 Actuation, friction and spring forces applied to the mass-spring model [12]

شکل 4 نیروهای عملگر، اصطکاک و فنر اعمال شده به مدل جرم و فنر [12]

5- شبیه سازی میکرو ربات

شبیه سازی این میکرو ربات در محیط سیمولینک نرم افزار متلب انجام شده است. این شبیه سازی شامل معادلات دینامیکی میکرو ربات، مدل اصطکاکی و مدل عملگرهای میکرو ربات می باشد. روند شبیه سازی در "شکل 5" قابل مشاهده است. ورودی سیستم سرعت موتور یا ولتاژ ورودی می باشد. با استفاده از مدل برگزیده شده برای عملگرها و دینامیک میکرو ربات، سرعت مرکز جرم و سرعت پایه ها به دست می آید. با توجه به سرعت مرکز جرم دو حالت برای محاسبه نیروی اصطکاک وجود دارد. اگر سرعت مرکز جرم صفر شود از مدل جرم و فنر استفاده می شود و اگر مخالف صفر شود میکرو ربات به صورت جسم صلب در نظر گرفته می شود. در جدول 2 مقادیر پارامترهای شبیه سازی آورده شده است.

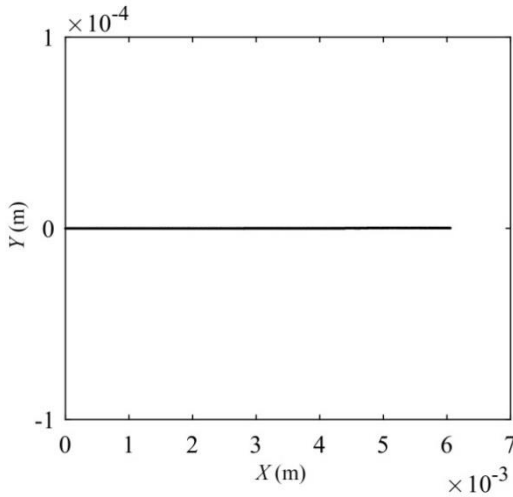


Fig.6 Plane motion of the micro-robot

شکل 6 حرکت صفحه ای میکرو ربات

1-5- شبیه سازی حلقه باز میکرو ربات در حرکت مستقیم

همان طور که بیان شد در صورتی که سرعت دورانی هر دو عملگر برابر و در خلاف جهت یکدیگر باشد، برآیند نیروهای ایجاد شده توسط آن ها در یک جهت بوده و حرکت میکرو ربات به صورت مستقیم خواهد بود. با توجه به فرمول های 43 و 46 اندازه حداقل و حداکثر سرعت دورانی عملگرها برابر با 701.2 rad/s و 1205 rad/s می باشد. "شکل 6" حرکت صفحه ای میکرو ربات را با اندازه سرعت دورانی حداکثر عملگرها یعنی 1205 rad/s نشان می دهد. محور افقی میزان جابجایی در راستای  $x$  و محور عمودی میزان جابجایی در راستای  $y$  را نشان می دهد.

"شکل 7" میزان حرکت میکرو ربات در جهت  $x$  را نسبت به زمان نشان می دهد.

در "شکل 8" قسمتی از "شکل 7" بزرگ نمایی شده تا حرکت مرحله ای میکرو ربات مشخص شود. با توجه به این شکل میزان حرکت میکرو ربات در

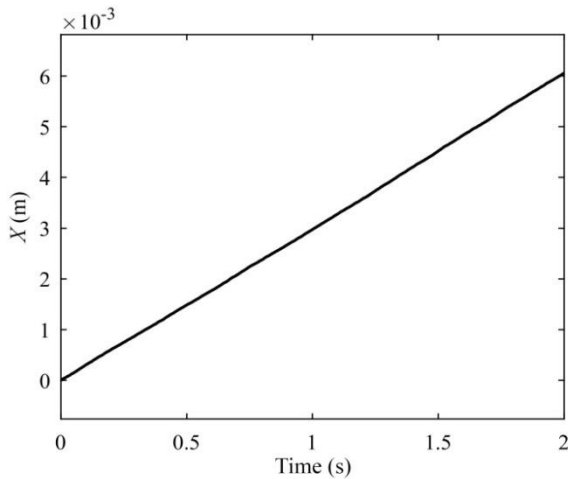


Fig.7 Position of the micro-robot along the x-axis as a function of time

شکل 7 موقعیت میکرو ربات در راستای محور  $x$  نسبت به زمان

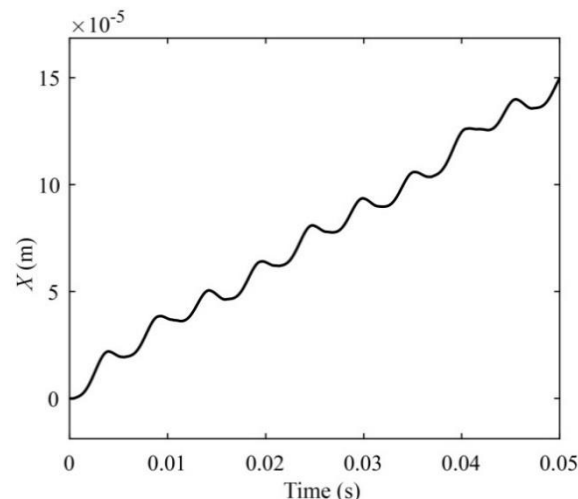


Fig.8 Position of the micro-robot along the x-axis as a function of time

شکل 8 موقعیت میکرو ربات در راستای محور  $x$  نسبت به زمان

هر مرحله که برابر با دقت حرکت میکرو ربات است، در حدود 17  $\mu\text{m}$  است.

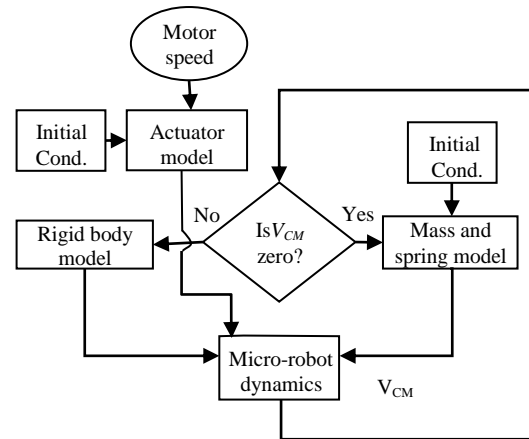


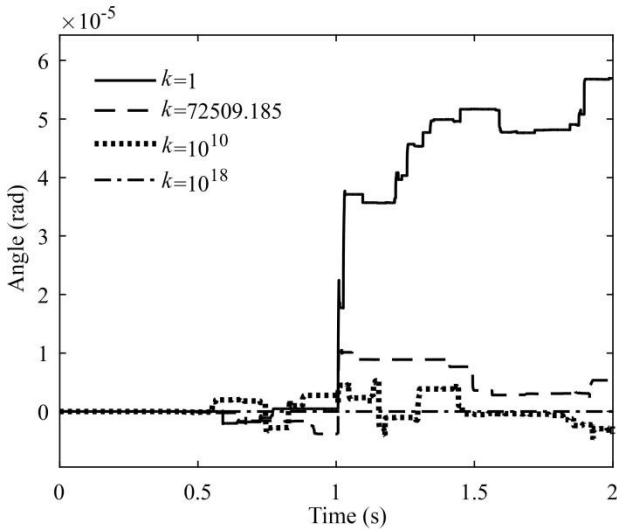
Fig.5 Simulation flowchart

شکل 5 فلوچارت شبیه سازی

جدول 2 مقادیر پارامترهای شبیه سازی

Table 2 Values of simulation parameters

مقادیر	پارامترها	مقادیر	پارامترها
72509.185(Nm <sup>-1</sup> )	$K$	$5 \times 10^{-4}(\text{kg})$	$m_d$
0.36	$\mu$	$5 \times 10^{-4}(\text{kg})$	$m_e$
$2.31 \times 10^{-3}(\text{kgm}^2)$	$I$	$5 \times 10^{-4}(\text{m})$	$r_d$
$7.4 \times 10(\text{kg})$	$M$	$5 \times 10^{-4}(\text{m})$	$r_e$
0.04(m)	$l$	11.2( $\Omega$ )	$R$
0.01(m)	$d$	0.102(mH)	$L$

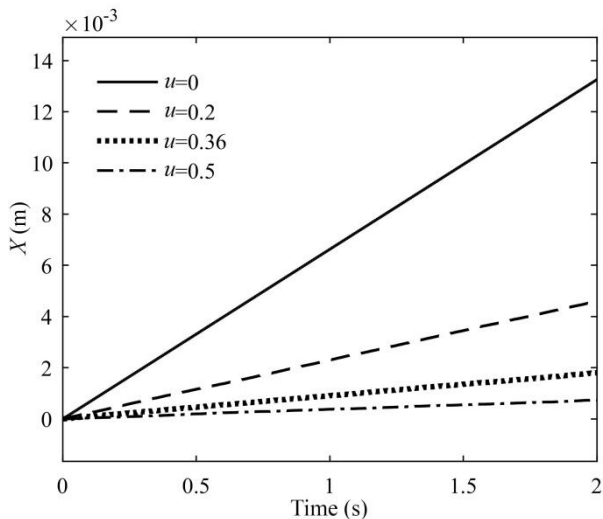


**Fig.11** Rotation angle of the micro-robot as a function of time for different stiffness coefficient of bases

شکل 11 زاویه چرخش میکرو ربات نسبت به زمان به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها

پایه‌ها، جابجایی در راستای  $y$  و چرخش حول محور عمود بر صفحه به حالت ایده‌آل خود یعنی مقدار صفر می‌رسد.

"شکل‌های 12 و 13" به ترتیب جابجایی میکرو ربات در راستای  $x$  و  $y$  و "شکل 14" تغییرات زاویه آن، نسبت به محور عمود بر صفحه را به ازای ضریب اصطکاک‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 12" دیده می‌شود با افزایش ضریب اصطکاک، جابجایی در راستای  $x$  کم‌تر می‌شود. با توجه به "شکل‌های 13 و 14" جابجایی در راستای  $y$  و چرخش حول محور عمود بر صفحه در حالت  $\mu=0$  برابر با صفر می‌باشد، زیرا وقتی سطح هیچ اصطکاکی ندارد فقط نیروی موتورها در راستای  $x$  به میکرو ربات وارد می‌شود که باعث جابجایی میکرو ربات در این راستا بدون هیچ انحرافی می‌شود.

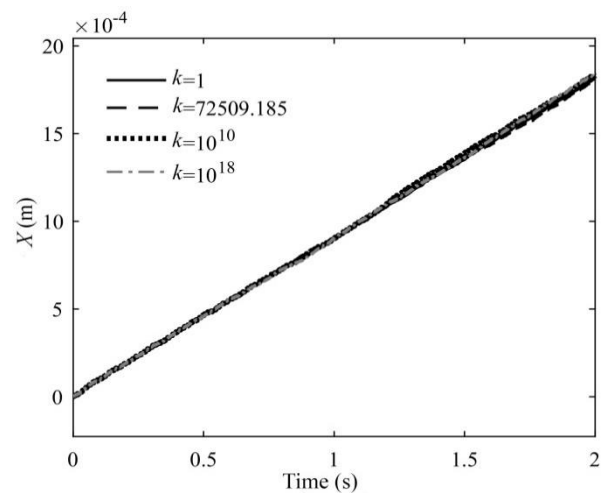


**Fig.12** Position of the micro-robot along the  $x$ -axis as a function of time for different friction coefficient

شکل 12 موقعیت میکرو ربات در راستای محور  $x$  نسبت به زمان به ازای ضریب اصطکاک مختلف

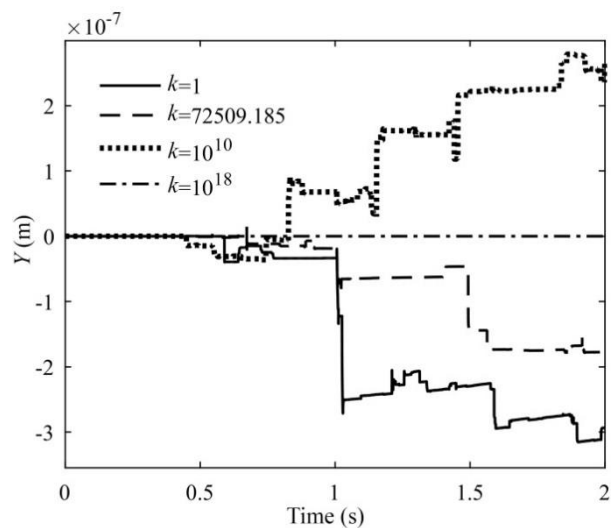
## 6- بررسی تاثیر ضریب فنریت پایه‌ها و ضریب اصطکاک بر روی حرکت میکرو ربات

در این قسمت تغییرات ضریب فنریت پایه‌ها و ضریب اصطکاک بر روی حرکت مستقیم میکرو ربات زمانی که اندازه سرعت زاویه‌ای عملگرها 981 rad/s است بررسی می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم در حرکت مستقیم میکرو ربات در راستای  $x$ ، جابجایی آن در راستای  $y$  و چرخش میکرو ربات حول محور عمود بر صفحه در دستگاه ثابت، در حالت ایده‌آل برابر با صفر می‌باشد. شکل‌های 9 و 10 به ترتیب جابجایی میکرو ربات در راستای  $x$  و  $y$  و شکل 11 تغییرات زاویه میکرو ربات نسبت به محور عمود بر صفحه را به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 9 دیده می‌شود جابجایی میکرو ربات در راستای  $x$  به ازای  $k$  های مختلف تقریباً ثابت است. با توجه به شکل 10 و 11 با زیاد شدن ضریب فنریت و سخت شدن



**Fig.9** Position of the micro-robot along the  $x$ -axis as a function of time for different stiffness coefficient of bases

شکل 9 موقعیت میکرو ربات در راستای محور  $x$  نسبت به زمان به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها



**Fig.10** Position of the micro-robot along the  $y$ -axis as a function of time for different stiffness coefficient of bases

شکل 10 موقعیت میکرو ربات در راستای محور  $y$  نسبت به زمان به ازای ضریب فنریت مختلف پایه‌ها

حرکت مستقیم کنترل شده میکرو ربات به ازای ورودی های زیر در اشکال 15 الی 17 نشان داده شده است.

$$X_d = 0.002 \text{ (m)}$$

$$\varphi_d = 0.0 \text{ (rad)}$$

"شکل 15" حرکت میکرو ربات در راستای X و مقایسه آن با حالت مرجع را نشان می دهد. "شکل 16" حرکت میکرو ربات در راستای Y و "شکل 17" زاویه چرخش آن می باشد، که این شکل ها نشان دهنده عملکرد خوب کنترلر می باشد.

## 8- ساخت و ارزیابی تجربی میکرو ربات

### 1-1 فرآیند ساخت میکرو ربات

در این قسمت در رابطه با زیر سیستم های این میکرو ربات متحرک توضیح داده خواهد شد. این میکرو ربات با استفاده از دو عدد عملگر ارتعاشی حرکت می کند و از طریق بلوتوث و به وسیله تلفن همراه کنترل می شود. ربات های متحرک شامل زیر سیستم های زیر هستند.

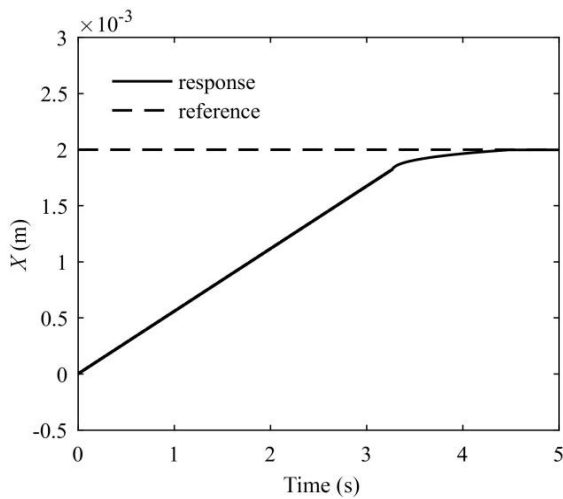


Fig.15 Comparison of the PID control system response with reference  
شکل 15 مقایسه پاسخ سیستم کنترل PID با مقدار مرجع

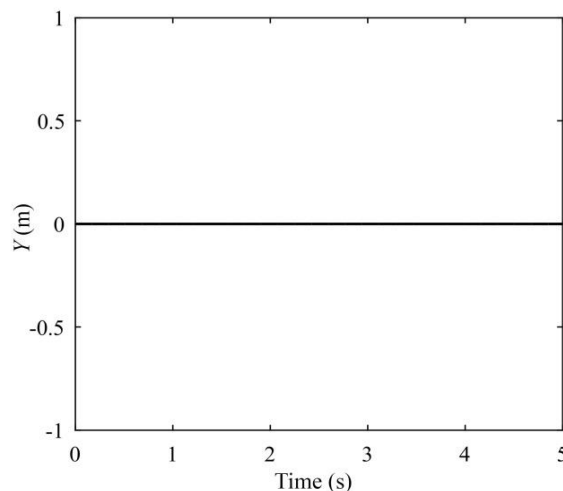


Fig.16 Displacement of the micro-robot along the x-axis as a function of time

شکل 16 میزان جابجایی میکرو ربات در راستای محور X نسبت به زمان

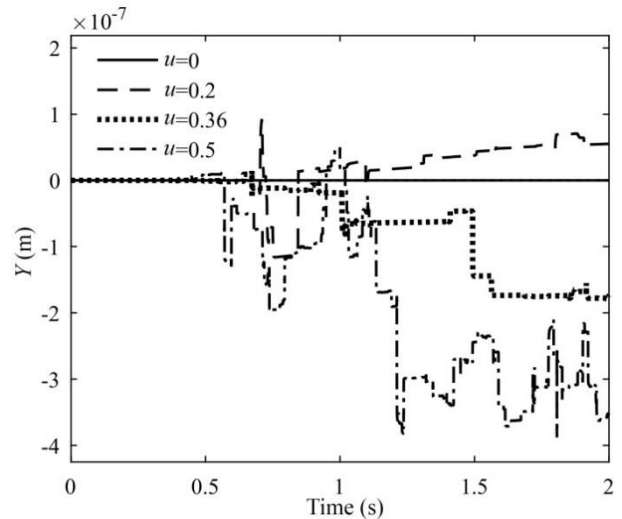


Fig.13 Position of the micro-robot along the y-axis as a function of time for different friction coefficient

شکل 13 موقعیت میکرو ربات در راستای محور Y نسبت به زمان به ازای ضریب اصطکاک مختلف

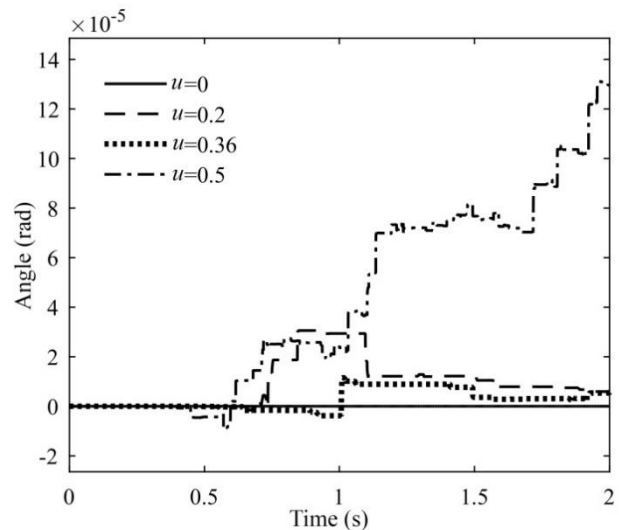


Fig.14 Rotation angle of the micro-robot as a function of time for different friction coefficient

شکل 14 زاویه چرخش میکرو ربات نسبت به زمان به ازای ضریب اصطکاک مختلف

## 7- کنترل حلقه بسته میکرو ربات با استفاده از روش PID

در این میکرو ربات از کنترلر PID استفاده شده است. روش به دست آوردن پارامترهای کنترلر به صورت آزمون و خطا می باشد. لازم به ذکر است که به دلیل خطی بودن اجزاء کنترلر PID، این روش یک روش کنترل خطی محسوب می شود. اما در برخی شرایط می توان در سیستم های غیرخطی در صورت ضعیف بودن عوامل غیرخطی، نیز از آن استفاده کرد. همچنین در کاربردهای عملی این کنترلر به علت سهولت در برنامه ریزی کنترلر نسبت به سایر روش ها، کاربرد بیشتری دارد. با توجه به این که در این میکرو ربات ورودی های سیستم ولتاژهای اعمال شده به دو موتور می باشند، از دو عدد کنترلر PID جهت تصحیح ولتاژ ورودی به هر موتور استفاده شده است. یک کنترلر جهت تصحیح میزان خطای ایجاد شده در حرکت در جهت مستقیم و یک کنترلر جهت تصحیح خطای ایجاد شده در چرخش میکرو ربات می باشد.



مدل پرو مینی<sup>3</sup> است. هسته مرکزی این برد یک میکروکنترلر ای تی مگا سیصد و بیست و هشت<sup>4</sup> می باشد.

این بخش وظیفه دریافت اطلاعات از سنسور و ارسال دستورات مناسب جهت عملکرد عملگرها، مطابق هدف مورد نظر را دارد.

#### 1-3-2-8- بخش تنظیم ولتاژ

از آن جایی که ولتاژ عملکرد ماژول استفاده شده جهت ارتباط با تلفن همراه 5V می باشد، از یک رگولاتور 5V جهت تنظیم ولتاژ ورودی استفاده شده است. رگولاتور استفاده شده مدل ال سی هفتاد و هشت صفر پنج سی وی<sup>5</sup> می باشد که قابلیت عملکرد از دمای 55- تا 150 درجه سانتی گراد و تنظیم ولتاژهای تا 24V را دارد.

#### 1-3-3-8- بخش فعال ساز عملگرها

این میکرو ربات از دو عدد موتور ارتعاشی جهت حرکت بهره می گیرد. موتورهای الکتریکی قابلیت چرخش در هر دو جهت و با سرعت های مختلف را دارند. ایجاد سرعت های مختلف گردش موتور، توسط ولتاژ ورودی به موتور از طریق میکروکنترلر امکان پذیر است. اما با توجه به این که جریان خروجی میکروکنترلرها ناچیز بوده و در صورت عبور جریان های بیشتر، آسیب می بینند؛ از یک مدار واسط که آمپلی فایر نامیده می شود، در راه اندازی موتورها استفاده می گردد. وظیفه این مدار جدا کردن منبع تغذیه موتورها و میکروکنترلر است. به این ترتیب بدون آسیب رساندن به میکروکنترلر می توانیم با جریان های بیشتری موتورهای الکتریکی را راه اندازی کنیم. امکان دیگری که این نوع آمپلی فایرها فراهم می کنند، تغییر جهت جریان و در نتیجه تغییر جهت گردش موتور است. این آمپلی فایرها از یک مدار به نام پل اچ<sup>6</sup> جهت تغییر جهت جریان استفاده می کنند. این مدار یک مدار الکتریکی است که اجازه عبور جریان در دو طرف را می دهد.

در این میکرو ربات از مدار مجتمع ال دوپست و سه دی<sup>7</sup> استفاده شده است. این مدار مجتمع شامل دو پل اچ درون خود می باشد. این مدار مجتمع قابلیت عملکرد در دماهای 40- تا 150 درجه سانتی گراد را دارد. حداکثر جریان خروجی مجاز نیز 1/5 A می باشد.

#### 1-3-4-8- حسگرها<sup>8</sup>

یکی دیگر از قسمت های مهم بخش الکترونیک هر میکرو ربات حسگرهای قرار گرفته بر روی آن می باشند. سنسور استفاده شده در این میکرو ربات مدل ام پی یو شصت پنجاه<sup>9</sup> است که توانایی محاسبه شتاب و تغییر زاویه در سه جهت را دارد. قطعات الکترونیکی و ارتباطی در این میکرو ربات بر روی یک برد لحیم کاری شده اند و بر روی بدنه اصلی میکرو ربات قرار می گیرند. سنسور مورد استفاده در قسمت زیرین آن، قرار می گیرد. "شکل 18" نحوه طراحی محل قرارگیری اجزاء الکترونیکی و ارتباطی را نشان می دهد.

#### 1-3-4-8- سیستم حرکتی

همان طور که مشخص است این قسمت، حرکت میکرو ربات را فراهم می کند و شامل بخش های مکانیکی میکرو ربات و عملگرهای آن می باشد. این میکرو ربات به وسیله سه پایه نازک فلزی با سطح حرکت در تماس است و شامل دو

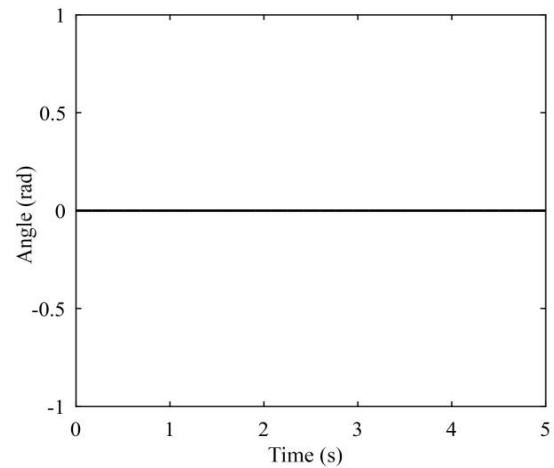


Fig.17 Rotation angle of the micro-robot as a function of time

شکل 17 زاویه چرخش میکرو ربات نسبت به زمان

- سیستم تأمین انرژی
- سیستم ارتباطات
- سیستم الکترونیک
- سیستم حرکتی

میکرو ربات ساخته شده در این پژوهش نیز شامل این چهار قسمت است که در ادامه، هر بخش توضیح داده خواهد شد.

#### 1-1-8- سیستم تأمین انرژی

در این پژوهش از دو عدد باتری لیتیوم-یون که بر روی خود میکرو ربات قرار می گیرند، استفاده شده است.

#### 1-2-8- سیستم ارتباطات

در این میکرو ربات از یک ماژول بلوتوث اچ سی صفر پنج<sup>1</sup> استفاده شده است که ارتباط بین میکروکنترلر و تلفن همراه را به وسیله یک نرم افزار رابط فراهم می کند. از این طریق می توانیم میکرو ربات را به وسیله تلفن همراه و به شیوه های مختلف کنترل کنیم. ماژول بلوتوث اچ سی صفر پنج در واقع یک مبدل بلوتوث به سریال است. این ماژول در اصل به صورت قطعات نصب شده روی سطح<sup>2</sup> می باشد که برای سهولت استفاده، بر روی برد مبدل لحیم شده است.

#### 1-3-8- سیستم الکترونیک

می توان گفت مهم ترین بخش در یک میکرو ربات سیستم الکترونیک آن است، چرا که عملکرد تمامی تجهیزات وابسته به این قسمت است. قسمت الکترونیکی میکرو ربات شامل کنترلی است که دستورات لازم را با توجه به هدف مورد نظر به عملگرها ارسال می کند. همچنین در این قسمت بسته به نوع میکرو ربات سنسورهایی قرار می گیرند تا با ارسال اطلاعات به بخش کنترل، حرکت میکرو ربات کاملاً تحت نظر باشد. اجزاء مختلف به کار رفته در بخش الکترونیکی در ادامه شرح داده خواهند شد.

#### 1-3-1-8- بخش کنترل

قسمت اصلی بخش الکترونیکی این میکرو ربات یک میکروکنترلر آردوینو

<sup>1</sup> HC05  
<sup>2</sup> smd

<sup>3</sup> Pro-min  
<sup>4</sup> Atmega328  
<sup>5</sup> LC7805CV  
<sup>6</sup> H-Bridge  
<sup>7</sup> L293d  
<sup>8</sup> Sensor  
<sup>9</sup> MPU6050

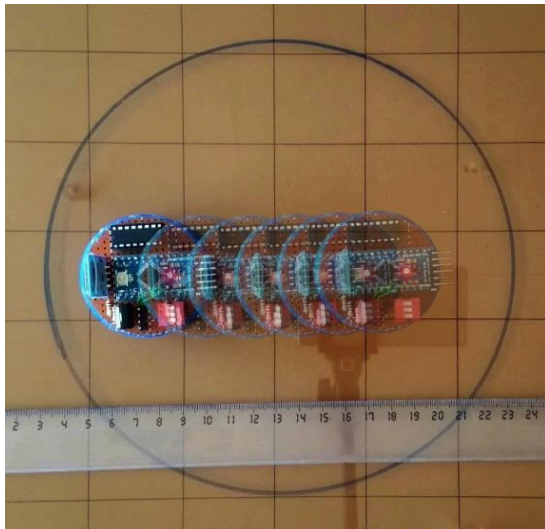


Fig.20 Pure translational motion of the micro-robot

شکل 20 حرکت مستقیم میکرو ربات

میکرومتر به ازای هر دور چرخش عملگر می‌باشد. کنترل‌کننده PID برای این کار در نظر گرفته شد. با توجه به اندازه‌گیری تجربی، سرعت مستقیم ربات حدود  $4\text{mm/s}$ ، به ازای ولتاژ مرجع  $1\text{V}$ ، محاسبه شد. تحقیقات بعدی به کنترل بهینه این میکرو ربات با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای افزایش دقت حرکت ربات اختصاص خواهد یافت.

## 10- مراجع

- [1] T. Ebefors, G. Stemme, *Microrobotics, The MEMS Handbook*, pp. 28.1-28.42, Boca Raton, FL: CRC Press, M. Gad-el Hak, ed, 2005.
- [2] G. Caprari, *Autonomous micro-robots: Applications and limitations*, Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2003.
- [3] H. Suzuki, N. Ohya, N. Kawahara, M. Yokoi, S. Ohyanagi, T. Kurahashi, T. Hattori, Shell-body fabrication for micromachines, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 36-40, 1995.
- [4] T. Yasuda, I. Shimoyama, H. Miura, Microrobot locomotion in a mechanical vibration field, *Advanced Robotics*, Vol. 9, No. 2, pp. 165-176, 1994.
- [5] K. B. Yesin, K. Vollmers, B. J. Nelson, Modeling and control of untethered biomicrobots in a fluidic environment using electromagnetic fields, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 5-6, pp. 527-536, 2006.
- [6] T. Akiyama, K. Shono, Controlled stepwise motion in polysilicon microstructures, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 106-110, 1993.
- [7] B. R. Donald, C. G. Levey, C. D. McGray, I. Paprotny, D. Rus, An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-15, 2006.
- [8] W. Driesen, *Concept, Modeling and Experimental Characterization of the Modulated Friction Inertial Drive (MFID) Locomotion Principle: Application to Mobile Microrobots*, Thesis, Citeseer, 2008.
- [9] M. Mohammadi-Moghaddam, M. Moradi-Dalvand, Design construct and control of a stair climber smart mobile robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 13-30, 2006. (in Persian)
- [10] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Analysis and design of a novel mini-platform employing vibration micro-motors, in *Proceedings 2005 IEEE International Conference on*, pp. 3627-3632, April 18-22, 2005.
- [11] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Dynamic analysis and speed control of a novel micro-platform driven by vibrating motors, *International Conference on Robotics and Applications*, October 31- November 2, 2005.
- [12] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Dynamics, design and simulation of a novel microrobotic platform employing vibration microactuators, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 128, No. 1, pp. 122-133, 2006.
- [13] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, Analysis, design and control of a planar micro-robot driven by two centripetal-force actuators, *Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, pp. 649-654, May 15-19, 2006.
- [14] M. Rubenstein, C. Ahler, R. Nagpal, Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors, *2012 IEEE International Conference on*, pp. 3293-3298, May 14-18, 2012.
- [15] I. Spartali, K. Vlachos, E. Papadopoulos, Speed control of vibration micro-motors of a micro-robotic platform, *21st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp. 1-6, June 25-28, 2013.

موتور ارتعاشی کوچک جهت تولید نیرو و حرکت می‌باشد. "شکل 19" میکرو ربات ساخته شده را نشان می‌دهد.

## 8-2- ارزیابی تجربی اولیه

"شکل 20" حرکت میکرو ربات بر روی مسیر مستقیم به ازای ولتاژ  $1\text{V}$  در مدت زمان 25 ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 20" نشان داده شده است، این میکرو ربات در این مدت زمان به اندازه  $0.102$  متر، حرکت کرده است. سرعت متوسط این میکرو ربات در این حالت حدود  $4\text{mm/s}$  می‌باشد.

## 9- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل‌سازی، ساخت، و کنترل یک میکرو ربات مجهز به عملگرهای ارتعاشی بررسی شده است. از دو عدد موتور ارتعاشی کوچک جهت راه‌اندازی میکرو ربات استفاده شده است. معادلات دینامیکی حاکم بر میکرو ربات با استفاده از روش نیوتن-اولیتر استخراج شد. نکته مهم در استخراج معادلات دینامیکی این میکرو ربات، محاسبه نیروهای اصطکاک می‌باشد. یکی از مزیت‌های استفاده از مدل جرم و فنر برای محاسبه اصطکاک، امکان بررسی تاثیر سختی پایه های میکرو ربات بر روی حرکت، می‌باشد. در این پژوهش به تاثیر سختی پایه های میکرو ربات و ضریب اصطکاک بر روی حرکت میکرو ربات پرداخته شده است. با توجه به فرمول‌های استخراج شده، حداقل و حداکثر سرعت دورانی عملگرها برابر با  $701.2\text{ rad/s}$  و  $1205\text{ rad/s}$  محاسبه شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که دقت حرکتی میکرو ربات در بیشترین سرعت، حدود 17

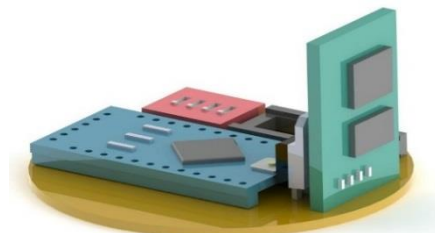


Fig.18 Designing the position of the electrical and communication part

شکل 18 طراحی محل قرارگیری اجزاء بخش الکترونیکی و ارتباطی

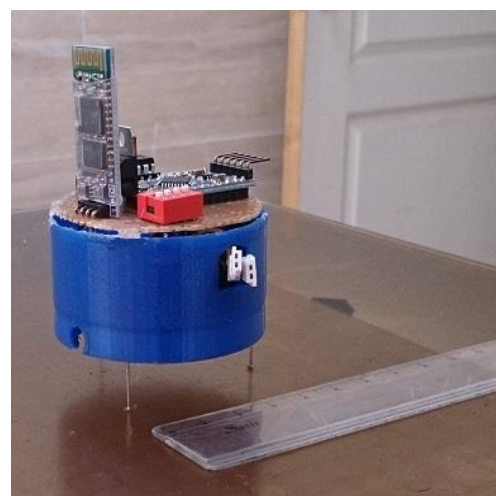


Fig.19 Experimental model of micro-robot

شکل 19 مدل آزمایشگاهی میکرو ربات