

## مدل سازی دینامیکی میکروروبات شناگر سه تاژکی با پیشرانش بیولوژیکی پروکاریوتی

حسین نورمحمدی\*  
 دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز  
 جعفر کیقبادی  
 دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز  
 محسن بهرامی  
 استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
 علی قنبری  
 دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

تکنولوژی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی تحولات چشمگیری را به ویژه در علم پزشکی به وجود آورده است. میکروروبات‌های شناگر دسته‌ای از میکروروبات‌های پزشکی هستند که با استفاده از این تکنولوژی طراحی و ساخته می‌شوند. در این مقاله، با الهام گرفتن از نحوه حرکت موجودات زنده ریز میکروبی در طبیعت نظیر میکروارگانیزم‌ها، یک میکروروبات شناگر تاژکی سه درجه آزادی معرفی شده و مدل دینامیکی مربوط به حرکت سه بعدی آن استخراج می‌شود. در میکروشناگر مورد نظر برای ایجاد پیشروی از تاژک‌های مارپیچی شکل پروکاریوتی استفاده شده است، که حرکت چرخشی این تاژک‌ها در داخل سیال واسطه باعث ایجاد نیروی پیشرانش می‌شود. با توجه به ابعاد ریز و همچنین سرعت بسیار پایین میکروروبات‌های شناگر، حرکت آنها در جریان‌های با رینولدز بسیار کوچک ( $Re \ll 1$ ) صورت می‌گیرد. بنابراین نیروهای اینرسی نقش ناچیزی را در مقایسه با نیروهای لزجی بر عهده خواهند داشت. برای تعیین نیروی پیشرانش ایجاد شده توسط هر تاژک از تئوری نیروی مقاوم استفاده می‌شود. بر اساس این تئوری مولفه‌های نیروی هیدرودینامیکی لزجی با استفاده ضرایب نیروی مقاوم و سرعت‌های محلی تاژک محاسبه می‌شوند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با بکار گرفتن سه تاژک می‌توان قابلیت انجام مانورهای سه بعدی در میکروشناگر ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: میکروروبات شناگر، مدل‌سازی دینامیکی، حرکت تاژکی، پیشرانش پروکاریوتی، تئوری نیروی مقاوم.

### Dynamic Modeling of Three-Flagellated Swimming Microrobot with Prokaryotic Biologic Propulsion

**H. Nourmohammadi** Ph.D. Candidate, University of Tabriz, Department of Mechanical Engineering  
**J. Keighobadi** Associate Professor, University of Tabriz, Department of Mechanical Engineering  
**M. Bahrami** Professor, Amirkabir University of Technology (AUT), Department of Mechanical Engineering  
**A. Ghanbari** Ph.D, Amirkabir University of Technology (AUT), Department of Mechanical Engineering

#### Abstract

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) technology is creating revolutionary changes particularly in medicine. Swimming microrobots can be specified as a kind of miniature biomedical robots which are designed and fabricated applying this technology. In this paper, inspired by microorganism's motion in nature, a three degree-of-freedom flagellar swimming microrobot is introduced and its three-dimensional motion is dynamically modeled. In our design, the body of the swimming microrobot is driven by multiple prokaryotic flagella which rotate in a fluid media and produce propulsion forces. Due to the small size and low velocity of swimming microrobots, their motion occurs in a very low Reynolds number ( $Re \ll 1$ ) fluid flow. Therefore, the inertial forces are less significant compared to viscous forces. Resistive force theory (RFT) is applied to determine the propulsion force which is created by each flagellum. Based on the RFT theorem, the components of the viscous hydrodynamic force are calculated through resistive force coefficients and local velocities of flagellar. Simulation results show that by use of the three flagella the microrobot enables to do three-dimensional maneuvers.

**Keywords:** Swimming microrobot, Dynamic modeling, Flagellar motion, Prokaryotic propulsion, Resistive Force Theory.

## ۱- مقدمه

با توجه به روند رو به رشد پیشرفت و توسعه‌ی فناوری میکرو و نانو دور از انتظار نیست که در آینده‌ای نه چندان دور امکان هدایت میکروروبات‌های پزشکی به درون بافت‌های بدن انسان و انجام عملیاتی بسیار پیچیده و حیاتی که تا قبل غیرممکن بوده است، به واقعیت بپیوندد. از این رو، با طراحی میکروروبات‌های شناگر می‌توان تحولات چشمگیری را در علم پزشکی به وجود آورد و خدمات ارزشمندی را به بشریت ارائه نمود. تشخیص امراض در همان مراحل اولیه، دارودهی موضعی، دفع سنگ کلیه و انجام جراحی‌های خاص با کمترین آسیب از مهم‌ترین کاربردهای پزشکی بالقوه میکروروبات‌های شناگر هستند [۱-۳].

میکروروبات‌های شناگر همانند میکروارگانسیم‌ها، با توجه به ابعاد بسیار ریز و همچنین سرعت کمی که دارند، در جریان‌های با رینولدز بسیار پایین ( $Re \ll 1$ ) شنا می‌کنند. در این جریان‌ها، که رژیم جریان خزشی استوکس نامیده می‌شوند، نیروهای لزجی دارای نقش تعیین‌کننده می‌باشند و تأثیر نیروهای اینرسی قابل صرف‌نظر است. لذا، مکانیزم شنا کردن میکروروبات‌ها در مقایسه با شناگرهای در مقیاس ماکرو نظیر ماهی‌ها یا انسان‌ها بسیار متفاوت است و در مدل‌سازی حرکت آنها با پدیده‌های فیزیکی و هیدرودینامیکی کاملاً متفاوتی سروکار خواهیم داشت [۴].

اولین میکروروبات شناگر در سال ۱۹۹۴، توسط فوکودا و همکارانش معرفی گردید [۵]. این میکروروبات که دارای ۵۰ میلیمتر طول و ۶ میلیمتر عرض بوده است، بر مبنای نیروی اینرسی طراحی شده بود، که برای شنا کردن در جریان‌هایی با رینولدز کمتر از یک، عملکرد مناسبی نخواهد داشت. در سال ۲۰۰۳، اد<sup>۱</sup> و همکارانش با توجه به نحوه‌ی حرکت موجودات زنده‌ی مشابه نظیر باکتری‌ها و سلول‌های جنسی نر (اسپرم‌ها) که مکانیزم پیشرانش آنها بر مبنای استفاده از تاژک و مژک بوده است، توانستند میکروروباتی طراحی کنند که توانایی شنا کردن در محیط‌های با رینولدز بسیار پایین را داشته باشد [۶]. در این طرح وظیفه‌ی پیشرانش به عهده‌ی نانولوله‌های کربنی مارپیچی شکلی بوده است.

از سال ۲۰۰۴، استفاده از سیستم‌های پیشرانش تاژکی در میکروروبات‌های شناگر بیش از پیش مورد توجه محققان قرار گرفت. بهکام و سیتی از جمله افرادی بودند که فعالیت‌های متعددی در این زمینه انجام داده‌اند [۷-۹]. آنها در نخستین کار با الهام گرفتن از حرکت میکروارگانسیم‌های پروکاریوتی<sup>۲</sup> موفق به طراحی یک میکروروبات شناگر تاژکی شدند. مدل‌سازی

با فرض جریان استوکس و نادیده گرفتن نیروهای اینرسی انجام شده است. این نوع سیستم‌های پیشرانش که در آنها نقش تعیین‌کننده به عهده‌ی نیروهای لزجی می‌باشد، برای شنا کردن در جریان‌های با رینولدز کوچکتر از یک عملکرد مناسبی خواهند داشت. در کار جدیدی که از طرف این افراد ارائه شد، یک میکروروبات شناگر تاژکی با تاژک‌های یوکاریوتی<sup>۳</sup> معرفی گردید. در نوع پروکاریوتی یک تاژک مارپیچی شکل به سر میکروروبات متصل شده است. این تاژک توسط میکروموتور تعبیه شده در بدنه‌ی ربات به چرخش در می‌آید و باعث ایجاد نیروی پیشرانش می‌شود و میکروروبات شروع به حرکت می‌کند. اما در نوع یوکاریوتی با اعمال یک موج ورودی در امتداد تاژک صفحه‌ای، میکروروبات به سمت جلو پیشروی می‌کند. بهکام و سیتی با مدل‌سازی و تحلیل این دو نوع سیستم پیشرانش نشان دادند، پیشرانش پروکاریوتی نسبت به یوکاریوتی سرعت و بازده‌ی انرژی بالاتری را به همراه خواهد داشت [۹].

در کار دیگری که توسط کزا و شهام ارائه شد، مکانیزم جدیدی برای ایجاد پیشرانش در میکروشناگرها پیشنهاد شده است [۱۰]. در این مکانیزم از دو تیر انعطاف‌پذیر پوشیده شده از لایه‌های پیژوالکتریکی، به عنوان عملگر استفاده شده است. با اعمال ولتاژ ورودی به این عملگرها، یک موج متحرک در امتداد هر یک از دو تیر ایجاد شده و منجر به پیشروی در میکروشناگر می‌شود.

در مرجع [۱۱] به منظور افزایش نیروی پیشرانش میکروشناگرهای تاژکی، استفاده از چند تاژک در کنار یکدیگر در سیستم پیشرانش میکروشناگر پیشنهاد شده است.

از مدل‌سازی‌های دیگری که در زمینه‌ی میکروروبات‌های شناگر انجام شده است، مدلی است که توسط قنبری و بهرامی پیشنهاد شده است [۱۲، ۱۳]. این افراد توانستند با الهام گرفتن از حرکت مژکی میکروارگانسیم پارامیسیسم<sup>۴</sup> روش نوینی برای ایجاد پیشرانش در میکروشناگرها ارائه دهند. در این طرح تعداد زیادی مژک روی سطح میکروشناگر تعبیه شده است و حرکت ضربه‌ای و رفت و برگشتی این مژک‌ها باعث ایجاد پیشروی در میکروروبات می‌گردد.

از کارهای جدیدی که در زمینه‌ی میکروشناگرهای تاژکی با قابلیت حرکت مانوری انجام شده است، می‌توان به طراحی میکروشناگر دو تاژکی توسط نورمحمدی و بهرامی اشاره کرد [۱۴]. در این مقاله، به طراحی و ارائه‌ی یک میکروروبات شناگر که تنها قابلیت انجام مانورهای دوبعدی را دارد، اکتفا شده است و از مانورهای کلی سه‌بعدی صرف نظر شده است. این

<sup>3</sup> Eukaryotic Flagella

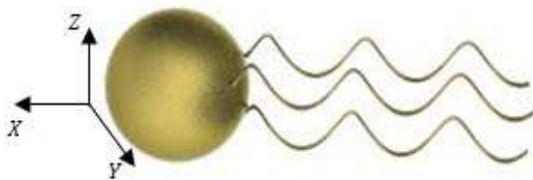
<sup>4</sup> Paramecium

<sup>1</sup> Edd

<sup>2</sup> Prokaryotic Microorganisms

تاژی نیز بسته به شکل ظاهری تاژک‌ها، به دو دسته‌ی میکروشناگرهای تاژی پروکاریوتی و یوکاریوتی تقسیم می‌شوند. هدف اصلی این بخش، مدل‌سازی دینامیکی و بررسی حرکت یک میکروروبات شناگر تاژی پروکاریوتی می‌باشد. تاژک‌های پروکاریوتی به صورت دنباله‌های مارپیچی شکل می‌باشند که به کمک میکروموتورهایی که در بدنه‌ی میکروروبات تعبیه شده‌اند، به چرخش در می‌آیند. چرخش این تاژک‌ها در داخل یک سیال واسطه، منجر به تشکیل جریان سیال در اطراف تاژک می‌شود. در نتیجه‌ی برهم‌کنش بین چرخش تاژک و جریان سیال مجاور آن، یک نیروی پیشراننده لزجی ایجاد می‌شود و میکروروبات شروع به حرکت می‌کند.

تعداد درجات آزادی برای حرکت به تعداد تاژک‌ها، سرعت زاویه‌ای و جهت چرخش آنها بستگی دارد. در میکروشناگر تک‌تاژی تنها یک درجه آزادی برای حرکت وجود دارد و حرکت یک‌بعدی صورت می‌گیرد. در نوع دو تاژی قابلیت انجام حرکت‌های دو بعدی در میکروروبات فراهم می‌شود و برای انجام یک حرکت سه بعدی لازم است، سه تاژک در سیستم پیشراننده میکروروبات بکار گرفته شود. البته افزایش تعداد تاژک‌ها باید یک توجیه منطقی داشته باشد. برای انجام یک مانور سه‌بعدی، وجود سه تاژک کافی است. اما استفاده از تاژک‌های بیشتر به منظور افزایش نیروی پیشراننده هیچ توجیهی ندارد و به طور حتم مشکلاتی به ویژه در مرحله ساخت تاژک به همراه خواهد داشت. طرحواره‌ی میکروشناگر سه‌تاژی مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره‌ی کلی میکروشناگر سه‌تاژی پروکاریوتی

ورودی سیستم فرکانس زاویه‌ای چرخش تاژک‌ها در داخل سیال واسطه و خروجی سیستم سرعت پیشروی میکروشناگر و همچنین سرعت زاویه‌ای دوران بدنه‌ی میکروشناگر می‌باشد.

## ۲-۱- هیدرودینامیک حاکم بر سیستم

سیستم‌های پیشراننده معرفی شده برای ربات‌های شناگر نیز بر مبنای رژیم جریان مربوطه به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول، مکانیزم‌های پیشراننده هستند که بر مبنای نیروهای اینرسی طراحی شده‌اند. به عنوان مثال می‌توان به پیشراننده بکار رفته در ربات شناگر شبه-ماهی اشاره کرد که با کوچک‌سازی ابعادی کارایی خود را از دست می‌دهند. این مکانیزم‌ها برای شنا کردن در مقیاس ماکرو و محیط‌های با

ساده‌سازی برخی از کاربردهای مدنظر برای میکروشناگرهای تاژی را محدود خواهد کرد.

در زمینه‌ی استفاده از اثرات الکترومغناطیسی به منظور ایجاد تحریک و پیشراننده در میکروروبات‌های شناگر نیز فعالیت‌های متعددی صورت گرفته است که از جمله‌ی آنها می‌توان به کار قنبری و همکارانش اشاره کرد [۱۵]. ایشان به طراحی سیستم پیشراننده مغناطیسی و استفاده از آن در میکروروبات پرداختند. از مشکلات اساسی این دسته از سیستم‌های پیشراننده، محدودیت در سرعت پیشروی میکروشناگر و پیچیدگی‌های موجود در آن به ویژه برای ساخت نمونه‌ی عملی می‌باشد.

در طی سال‌های اخیر، کارهای متعددی در زمینه‌ی میکروروبات‌های شناگر انجام گرفته است. بر پایه‌ی پیشراننده‌های بیولوژیکی (زیستی)، طرح‌های متنوعی برای میکروشناگرها معرفی شده و مدل‌سازی‌های زیادی صورت گرفته است. اما بسیاری از این مدل‌سازی‌ها بر پایه‌ی سیستم یک درجه آزادی بوده است. به عبارت دیگر، میکروشناگر پیشنهاد شده تنها قادر به حرکت در امتداد یک مسیر مستقیم بوده است. در موارد معدودی که به جای یک تاژک از چندین تاژک در سیستم پیشراننده میکروشناگر استفاده شده است (به عنوان مثال در مرجع [۱۱])، هدف صرفاً بالا بردن میزان نیروی پیشراننده بوده است و ایجاد قابلیت انجام حرکت مانوری در میکروشناگر مورد توجه قرار نگرفته است. نوآوری اصلی مقاله‌ی حاضر، طراحی یک میکروروبات شناگر تاژی با قابلیت انجام مانورهای کلی سه‌بعدی است. با مدل‌سازی حرکت سه‌بعدی میکروشناگر مورد نظر می‌توان گامی موثر در جهت کامل کردن مدل‌سازی‌های انجام شده، برداشت. در این طرح از سه تاژک پروکاریوتی برای ایجاد پیشراننده در میکروروبات استفاده شده است و بر اساس اینکه فرکانس چرخش تاژک‌ها در داخل سیال واسطه نسبت به یکدیگر به چه صورتی باشد، میکروروبات در مسیرهای متنوع یک، دو و یا سه بعدی حرکت می‌کند. تفاوت اصلی مکانیزم شناکردن در مقیاس‌های میکرو و ماکرو از قوانین هیدرودینامیکی متفاوتی که بر هر یک از دو رژیم جریان مربوطه حاکم است، ناشی می‌شود. به عبارت دیگر، در کنار مشخصات ابعادی، محیط عملکردی ربات شناگر نیز بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اینکه عدد رینولدز مربوط به حرکت میکروشناگرها خیلی کوچکتر از یک است، مدل‌سازی با فرض جریان استوکس و صرف‌نظر کردن از نیروهای اینرسی انجام گرفته است و همچنین نیروی لزجی وارد بر تاژک‌ها از طرف سیال بر اساس تئوری نیروی مقاوم مدل شده است.

## ۲-۲ مدل‌سازی دینامیکی

دو نوع معروف از میکروروبات‌های شناگر، میکروشناگرهای مژکی و میکروشناگرهای تاژی می‌باشند. میکروشناگرهای

$$C_n = \frac{4\pi\mu}{\ln\left(\frac{0.18\lambda}{d}\right) + \frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$C_t = \frac{2\pi\mu}{\ln\left(\frac{0.18\lambda}{d}\right)} \quad (3)$$

که  $d$  قطر مفتول تاژک و  $\lambda$  طول موج تاژک را نشان می‌دهد. در رابطه‌ی (۱)،  $V_n$  و  $V_t$  به ترتیب سرعت‌های عمودی و مماسی المان  $ds$  روی تاژک می‌باشند. وقتی تاژک با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  حول محور  $X$  می‌چرخد، بر هم کنش هیدرودینامیکی جریان سیال ایجاد شده، سبب می‌شود که بدنه‌ی میکروشناگر در جهت عکس بچرخد. این سرعت زاویه‌ای با نماد  $\dot{\theta}$  مشخص می‌شود. همچنین اگر سرعت پیشروی میکروروبات با نماد  $\dot{X}$  نشان داده شود، می‌توان سرعت‌های عمودی و مماسی  $V_n$  و  $V_t$  را به صورت زیر با روابطی بر حسب  $\omega$ ،  $\dot{\theta}$  و  $\dot{X}$  استخراج نمود.

$$V_n = -\dot{X} \sin \beta + A (\omega - \dot{\theta}) \cos \beta \quad (4)$$

$$V_t = \dot{X} \cos \beta + A (\omega - \dot{\theta}) \sin \beta \quad (5)$$

که  $A$  دامنه‌ی مارپیچ تاژک و  $\beta$  زاویه مارپیچ تاژک است و برابر خواهد بود با:

$$\tan \beta = \frac{2\pi A}{\lambda} \quad (6)$$

همچنین، چرخش اسپینی بدنه سبب شکل‌گیری گشتاور لزجی اضافی از طرف سیال روی تاژک پروکاریوتی می‌شود که مولفه در راستای  $X$  این گشتاور از رابطه‌ی زیر بیان می‌شود [۱۸].

$$M_s = n\pi\lambda\mu d^2 \dot{\theta} \cos \beta \quad (7)$$

بدین ترتیب هیدرودینامیک حاکم بر سیستم (شامل نیروها و گشتاور لزجی) که در نتیجه‌ی برهم کنش بین چرخش تاژک و جریان سیال ناشی از آن شکل می‌گیرد، مشخص می‌شود.

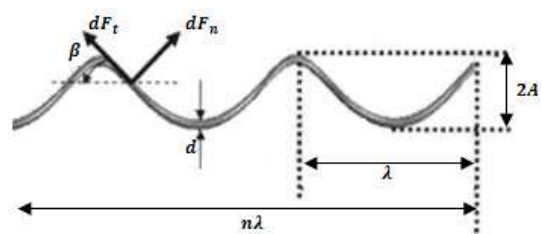
## ۲-۲- معادلات حرکت میکروشناگر سه تاژیکی

در این قسمت به استخراج معادلات حاکم بر میکروروبات شناگر سه تاژیکی پرداخته می‌شود. در مدل ارائه شده، بدنه‌ی میکروروبات به صورت یک کره به شعاع  $a$  در نظر گرفته شده است. سه تاژک پروکاریوتی به صورت متقارن روی سه قطر کره با زاویه‌ی بین  $120^\circ$  نصب شده‌اند. در شکل (۳)، نمودار پیکر آزاد نیروها و گشتاور وارد بر میکروروبات رسم شده است، که در آن  $F_{1,X}$ ،  $F_{2,X}$  و  $F_{3,X}$  نیروهای پیشراننده ایجاد شده توسط سه تاژک می‌باشند و همچنین  $F_{body}$  و  $M_{body}$  نیرو و گشتاور پسای وارد بر بدنه‌ی میکروشناگر را نشان می‌دهند.

رینولدز بالا مناسب هستند. دسته‌ی دوم، مکانیزم‌های پیشراننده هستند که بر مبنای نیروهای لزجی طراحی شده‌اند، نظیر پیشراننده‌های تاژیکی و مژکی که برای شنا کردن در مقیاس میکرو طراحی شده‌اند و از نحوه‌ی شنا کردن میکروارگانیسم‌های موجود در طبیعت الهام گرفته شده‌اند.

نخستین گام در استخراج معادلات حرکت میکروروبات شناگر، محاسبه‌ی نیروی پیشراننده ایجاد شده توسط هر تاژک می‌باشد. در این قسمت، مبتنی بر تئوری نیروی مقاوم<sup>۱</sup> به تعیین نیروهای هیدرودینامیکی لزجی اعمال شده بر تاژک‌ها و نیروی پیشراننده به وجود آمده پرداخته می‌شود. در اثر چرخش تاژک در داخل سیال، یک نیروی هیدرودینامیکی لزجی از طرف جریان سیال به تاژک اعمال می‌شود، که به دو مؤلفه‌ی عمودی و مماسی تجزیه می‌شود. در شکل (۲)، مشخصات هندسی تاژک پروکاریوتی و همچنین مؤلفه‌های عمودی و مماسی نیروی لزجی نشان داده شده است. مقدار نیروی لزجی به سرعت چرخش تاژک و همچنین خواص هیدرودینامیکی سیال بستگی دارد.

برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های عمودی و مماسی  $dF_n$  و  $dF_t$  از تئوری نیروی مقاوم استفاده می‌شود. اساسی‌ترین اصل در تئوری نیروی مقاوم این است که مؤلفه‌های نیروی هیدرودینامیکی با مؤلفه‌های سرعت محلی جسم موجود در جریان سیال متناسب خواهد بود [۱۶].



شکل ۲- مشخصات هندسی تاژک پروکاریوتی

بر اساس این تئوری، مؤلفه‌های عمودی و مماسی نیروی لزجی وارد بر یک المان استوانه‌ای به طول  $ds$  که در سیالی با لزجت  $\mu$  حرکت می‌کند، از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} dF_n &= -C_n V_n ds \\ dF_t &= -C_t V_t ds \end{aligned} \quad (1)$$

که  $C_n$  و  $C_t$  ضرایب مقاومت لزجی نامیده شده و برای یک تاژک مارپیچی شکل با استفاده از روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شوند [۱۷].

<sup>1</sup> Resistive Force Theory (RFT)

و در نهایت گشتاور کل  $M_X$  از رابطه‌ی (۱۷) استخراج می‌شود.

$$M_X = -A^2 n \lambda (C_n \cos \beta + C_t \sin^2 \beta \sec \beta) (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - 3\dot{\theta}) + (3A n \lambda (C_n - C_t) \sin \beta) \dot{X} \quad (17)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۱۰) و همچنین اعمال نیروی پیشرانش هر تاژک در رابطه‌ی (۸)، معادله‌ی تعادل نیرویی میکروشناگر به صورت زیر به دست خواهد آمد.

$$F_{1,X} + F_{2,X} + F_{3,X} - 6\pi\mu a \dot{X} = 0 \quad (18)$$

با جایگذاری روابط (۱۱) در رابطه‌ی (۹) و همچنین اعمال گشتاورهای  $M_S$ ،  $M_X$  و گشتاورهای ناشی از نیروهای پیشرانش  $F_{i,X}$ ، معادلات تعادل گشتاوری در سه راستا به صورت روابط زیر استخراج می‌شوند.

$$M_X + 3M_S - 8\pi\mu a^3 \dot{\theta} = 0 \quad (19)$$

$$F_{1,X} b - (F_{2,X} + F_{3,X}) b / 2 - 8\pi\mu a^3 \dot{\psi} = 0 \quad (20)$$

$$\sqrt{3}/2 (F_{3,X} - F_{2,X}) b - 8\pi\mu a^3 \dot{\phi} = 0 \quad (21)$$

با توجه به دیگرام آزاد رسم شده در شکل (۳)، نیروهای پیشرانش تاژک‌ها حول محور  $X$  گشتاوری ایجاد نمی‌کنند و در رابطه‌ی (۱۹) ظاهر نمی‌شوند. اما این نیروها، حول محورهای  $Y$  و  $Z$  گشتاورهایی ایجاد می‌کنند، که در روابط (۲۰) و (۲۱) ظاهر شده‌اند.

با جایگذاری روابط (۷)، (۱۶) و (۱۷) در روابط (۲۱-۱۸) و ساده‌سازی‌های لازم، سرعت پیشروی میکروروبات و همچنین سرعت زاویه‌ای آن حول سه محور به صورت روابط زیر استخراج می‌شوند.

$$\dot{X} = \frac{q_1}{q_2 + 1} (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \quad (22)$$

$$\dot{\theta} = \frac{q_2}{q_2 + 1} (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \quad (23)$$

$$\dot{\psi} = q_3 (2\omega_1 - \omega_2 - \omega_3) \quad (24)$$

$$\dot{\phi} = q_4 (\omega_3 - \omega_2) \quad (25)$$

که  $q_1$  تا  $q_4$  پارامترهایی بر حسب مشخصات هندسی تاژک و خواص هیدرودینامیکی سیال واسطه هستند و به صورت زیر تعریف شده‌اند.

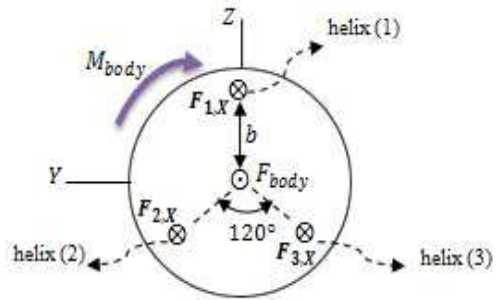
$$q_1 = \frac{p_1}{p_2}$$

$$q_2 = \frac{A^2 n \lambda (p_2 p_3 - p_4)}{p_2 p_5} \quad (26)$$

$$q_3 = \frac{p_1 b}{8\pi\mu a^3}$$

$$q_4 = \frac{\sqrt{3} p_1 b}{16\pi\mu a^3}$$

و  $p_1$  تا  $p_5$  عبارتند از:



شکل ۳- نمودار پیکر آزاد میکروشناگر سه تاژکی

در جریان‌های با رینولدز بسیار پایین، تأثیر نیروهای اینرسی در مقایسه با نیروهای لزجی ناچیز و قابل اغماض است. بنابراین با حذف جملات اینرسی، معادلات تعادل نیروها و گشتاورهای وارد بر میکروشناگر عبارتند از:

$$\sum F_{X, helix} + F_{X, body} = 0 \quad (8)$$

$$\sum M_{i, helix} + M_{i, body} = 0, \quad i = X, Y, Z \quad (9)$$

که برای یک کره به شعاع  $a$ ، نیرو و گشتاور پسای وارده به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$F_{X, body} = 6\pi\mu a \dot{X} \quad (10)$$

$$M_{i, body} = 8\pi\mu a^3 \Omega_i, \quad i = X, Y, Z \quad (11)$$

که  $\Omega_i$ ، بیانگر سرعت زاویه‌ای بدنه‌ی میکروروبات حول هر یک از سه محور می‌باشد. در ادامه،  $\Omega_X$ ،  $\Omega_Y$  و  $\Omega_Z$  به ترتیب با نمادهای  $\dot{\theta}$ ،  $\dot{\psi}$  و  $\dot{\phi}$  بیان می‌شوند. با تجزیه‌ی مولفه‌های  $dF_t$  و  $dF_n$  برآیند نیروها در جهت  $X$  تعیین می‌شود.

$$dF_X = dF_t \cos \beta - dF_n \sin \beta \quad (12)$$

و مولفه‌ی دیگر این نیروها منجر به گشتاور زیر حول محور  $X$  می‌شوند.

$$dM_X = A (dF_t \sin \beta + dF_n \cos \beta) \quad (13)$$

با جایگذاری روابط (۴) و (۵) در رابطه‌ی (۱) و همچنین قرار دادن  $dX = ds \cos \beta$  نتیجه می‌شود:

$$dF_n = C_n (\dot{X} \sin \beta - A (\omega - \dot{\theta}) \cos \beta) \sec \beta dX \quad (14)$$

$$dF_t = -C_t (\dot{X} \cos \beta + A (\omega - \dot{\theta}) \sin \beta) \sec \beta dX$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۱۴) در (۱۲) و انتگرال‌گیری در بازه‌ی  $X \in [0, n\lambda]$ ، نیروی پیشرانش مربوط به هر تاژک به صورت رابطه‌ی (۱۵) استخراج می‌شود.

$$F_{i,X} = A n \lambda (C_n - C_t) (\omega_i - \dot{\theta}) \sin \beta - n \lambda (C_n \sin^2 \beta \sec \beta + C_t \cos \beta) \dot{X} \quad i = 1, 2, 3 \quad (15)$$

همچنین با جایگذاری رابطه‌ی (۱۴) در رابطه‌ی (۱۳) و انتگرال‌گیری در بازه‌ی  $X \in [0, n\lambda]$ ، گشتاور مربوط به هر تاژک به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$M_{i,X} = -A^2 n \lambda (C_n \cos \beta + C_t \sin^2 \beta \sec \beta) (\omega_i - \dot{\theta}) + (A n \lambda (C_n - C_t) \sin \beta) \dot{X} \quad i = 1, 2, 3 \quad (16)$$

بنابراین سرعت پیشروی میکروشناگر سه تاژکی مورد نظر در دستگاه مختصات مرجع دارای مؤلفه‌های زیر خواهد بود.

$$\dot{x} = \dot{X} \cos \psi \cos \varphi \quad (31)$$

$$\dot{y} = \dot{X} \cos \psi \sin \varphi \quad (32)$$

$$\dot{z} = -\dot{X} \sin \psi \quad (33)$$

### ۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

پس از استخراج روابط حاکم بر حرکت میکروشناگر مورد نظر، در این بخش مدل ارائه شده با استفاده از ابزار Simulink در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌شود. روند کلی شبیه‌سازی به این صورت است که ابتدا با اعمال سرعت زاویه‌ای تاژک‌ها و حل معادلات (۲۴) و (۲۵) زوایای دوران میکروشناگر محاسبه می‌شود. با استفاده از این زوایا و حل معادلات (۳۱-۳۳) موقعیت مکانی میکروشناگر مشخص می‌شود. متغیرهای حالت اصلی  $x$ ،  $y$  و  $z$  هستند. اما برای حل معادلات  $\dot{x}$ ،  $\dot{y}$  و  $\dot{z}$  لازم است که ابتدا زوایای دوران  $\psi$  و  $\varphi$  محاسبه شوند. توجه شود که چرخش اسپینی میکروشناگر حول محور  $X$  که با زاویه‌ی  $\theta$  مشخص شده است، تأثیری در موقعیت مکانی میکروشناگر نخواهد داشت. به منظور صحت‌گذاری چند تست حلقه باز بر روی مدل نرم‌افزاری انجام خواهد گرفت. مشخصات هندسی مربوط به تاژک‌ها در جدول (۱) آورده شده است. در شبیه‌سازی فرض شده است سیالی که میکروشناگر در آن شنا می‌کند، دارای خواص هیدرودینامیکی آب باشد و همچنین بدنه‌ی میکروروبات یک کره به شعاع ۱٫۵ میکرومتر باشد.

جدول ۱- مشخصات هندسی تاژک‌های پروکاریوتی

ردیف	پارامتر	اندازه ( $\mu\text{m}$ )
۱	$\lambda$	0.7
۲	$n\lambda$	3.5
۳	$d$	0.02
۴	$A$	0.25
۵	$b$	1.0

در تست اول هر سه تاژک با سرعت زاویه‌ای یکسان می‌چرخند. در تست دوم تاژک‌های ۲ و ۳ دارای سرعت یکسانی هستند، ولی تاژک ۱ سرعت زاویه‌ای متفاوتی دارد و در تست سوم هر سه تاژک با سرعت‌های زاویه‌ای متفاوتی می‌چرخند. لازم به ذکر است در هر سه تست، تاژک‌ها در جهات یکسانی می‌چرخند. پاسخ این تست‌ها در شکل‌های (۴)-(۶) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} p_1 &= n\lambda A(C_n - C_t) \sin \beta \\ p_2 &= n\lambda(C_n \sin^2 \beta \sec \beta + C_t \cos \beta) + 6\pi\mu a \\ p_3 &= C_n \cos \beta + C_t \sin^2 \beta \sec \beta \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} p_4 &= n\lambda(C_n - C_t)^2 \sin^2 \beta \\ p_5 &= 8\pi\mu a^3 + 3n\lambda\pi\mu d^2 \cos \beta \end{aligned}$$

بدین ترتیب معادلات حاکم بر حرکت سه بعدی میکروروبات شناگر مورد بررسی، مدل‌سازی می‌شود. بر اساس معادلات حرکت ارائه شده در روابط (۲۵-۲۲)، به وضوح مشاهده می‌شود، زمانی که هر سه تاژک با سرعت‌های زاویه‌ای یکسانی بچرخند، دورانی حول محورهای  $Y$  و  $Z$  نخواهیم داشت و میکروروبات در امتداد یک مسیر مستقیم یک بعدی حرکت می‌کند. معادلات تعادل گشتاوری (۲۰) و (۲۱) نیز همین مطلب را تایید می‌کند. در این حالت سه نیروی پیشران‌ش یکسان به میکروروبات اعمال می‌شود و بر اساس روابط استخراج شده، گشتاوری حول محورهای  $Y$  و  $Z$  ایجاد نمی‌شود. در نتیجه میکروشناگر در معرض هیچگونه مانوری نبوده و در امتداد مسیر مستقیم حرکت می‌کند. اما به محض آنکه اختلافی در سرعت زاویه‌ای هر تاژک نسبت به یکدیگر به وجود آید، میکروروبات در معرض یک تغییر مسیر ناگهانی قرار می‌گیرد و یک مانور دو یا سه بعدی در امتداد مسیری منحنی شکل انجام می‌گیرد. همچنین باید توجه داشت که سرعت پیشروی  $\dot{X}$ ، در دستگاه مختصات بدنه تعریف شده است که محورهای آن به طور پیوسته با دوران‌های  $\psi$  و  $\varphi$  می‌چرخد. با انتقال دستگاه مختصات به مختصات مرجع، مؤلفه‌های  $\dot{x}$ ،  $\dot{y}$  و  $\dot{z}$  مربوط به سرعت پیشروی میکروروبات مشخص می‌شوند. انتقال از دستگاه مختصات متصل به بدنه‌ی میکروروبات (توجه شود که چرخش اسپینی بدنه‌ی میکروروبات حول محور  $X$  تأثیری در موقعیت میکروروبات نخواهد داشت. از این رو، این دستگاه مختصات مستقل از چرخش اسپینی در نظر گرفته شده است.) به دستگاه مختصات مرجع از طریق رابطه‌ی (۲۸) انجام می‌گیرد.

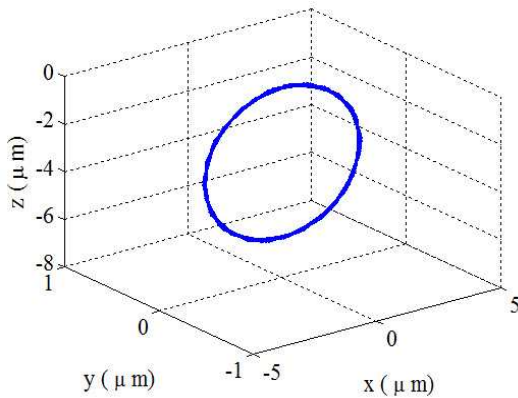
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = R_\varphi R_\psi \begin{bmatrix} \dot{X} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

که در رابطه‌ی (۲۸)،  $R_\varphi$  و  $R_\psi$  به ترتیب ماتریس‌های دوران حول محور  $Z$  و  $Y$  می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

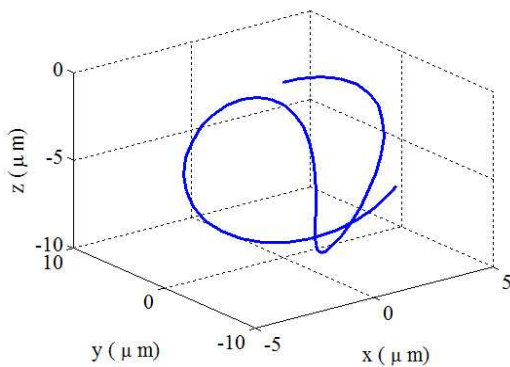
$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (30)$$

داشت و در نتیجه میکروشناگر دارای حرکت دوبعدی خواهد بود و در تست سوم به دلیل ایجاد نیروهای پیشرانش متفاوت، مشاهده می‌شود که حرکت میکروشناگر به صورت سه‌بعدی خواهد بود. به منظور ارائه درک بهتر از قابلیت مانور در میکروشناگر معرفی شده، نمودارهای مربوط به مانور میکروشناگر در مسیرهای دوبعدی و سه بعدی، در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



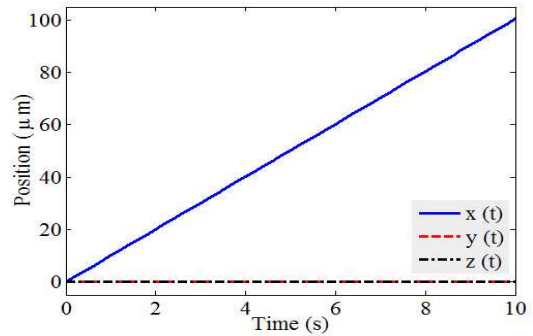
شکل ۷- مسیر حرکت میکروشناگر در مانور دو بعدی تست دوم

عامل ایجاد مانور در میکروشناگر، اختلاف سرعت زاویه‌ای تاژک‌ها است. در تست دوم، چون میکروشناگر با یک نرخ ثابت (متناسب با اختلاف دو برار سرعت زاویه‌ای تاژک ۱ با مجموع سرعت زاویه‌ای تاژک‌های ۲ و ۳) حول محور  $Y$  دوران می‌کند، مسیر حرکت به صورت یک مسیر هارمونیک است. اما در تست سوم، همزمان حول محورهای  $Y$  و  $Z$  مانور انجام می‌گیرد و مسیر حرکت میکروشناگر یک مسیر سه‌بعدی کلی خواهد بود.



شکل ۸- مسیر حرکت میکروشناگر در مانور سه بعدی تست سوم

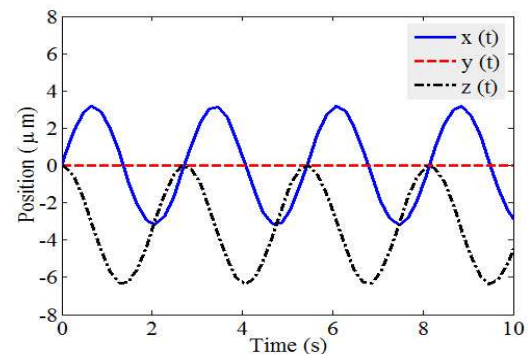
دوران میکروشناگر در تست‌های دوم و سوم به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی در تست اول

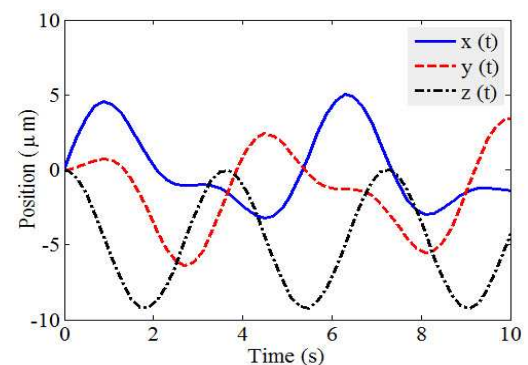
$$(\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 25 \text{ Hz})$$

در تست اول به دلیل یکسان بودن سرعت زاویه‌ای هر سه تاژک، سه نیروی پیشرانش یکسان به وجود می‌آید و با توجه به محل قرار گرفتن تاژک‌ها، که در فواصل یکسان روی قطره‌هایی با زاویه‌ای بین ۱۲۰ درجه قرار گرفته‌اند، گشتاوری حول محورهای  $Y$  و  $Z$  ایجاد نمی‌شود و حرکت میکروشناگر به صورت یک بعدی خواهد بود.



شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی در تست دوم

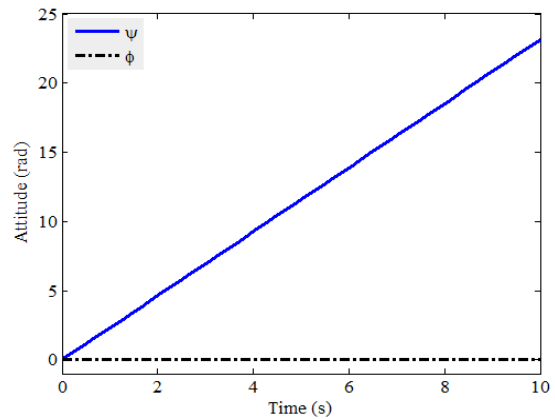
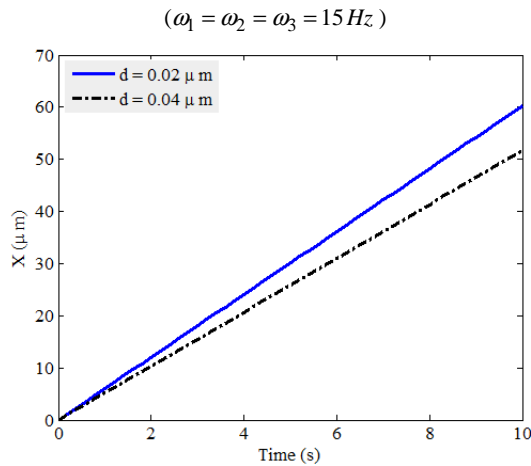
$$(\omega_1 = 25 \text{ Hz}, \omega_2 = \omega_3 = 15 \text{ Hz})$$



شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی در تست سوم

$$(\omega_1 = 25 \text{ Hz}, \omega_2 = 15 \text{ Hz}, \omega_3 = 20 \text{ Hz})$$

در تست دوم چون تاژک‌های دوم و سوم نیروهای پیشرانش یکسانی ایجاد می‌کنند، حول محور  $Z$  گشتاوری وجود نخواهد

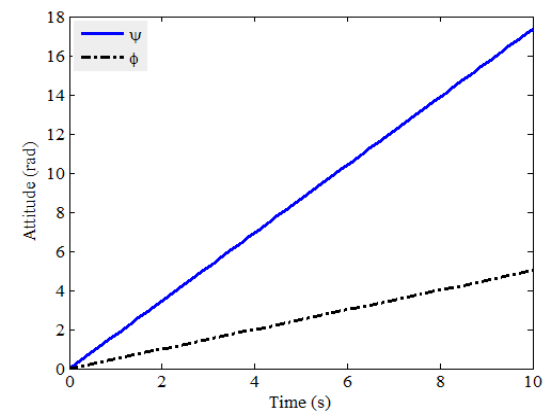


شکل ۹- وضعیت دورانی میکروشناگر در مانور دو بعدی تست دوم

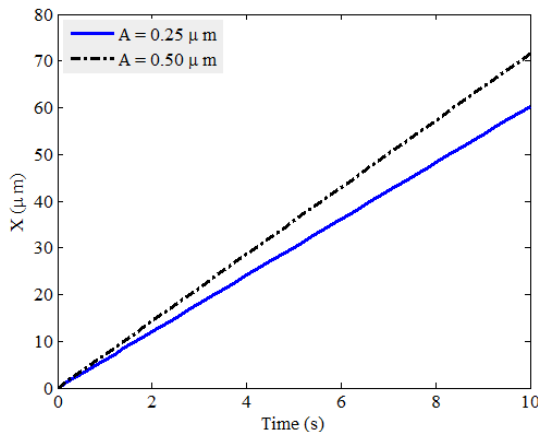
شکل ۱۲- تأثیر قطر مفتول تاژک بر میزان پیشروی میکروشناگر

$$(\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 15 \text{ Hz})$$

با دو برابر کردن طول موج تاژک، سرعت پیشروی میکروشناگر از  $61.26$  میکرومتر بر ثانیه به  $91.353$  میکرومتر بر ثانیه افزایش یافته است، که معادل با  $55.2$  درصد افزایش سرعت می باشد. با دو برابر کردن قطر مفتول تاژک، سرعت پیشروی میکروشناگر از  $61.26$  میکرومتر بر ثانیه به  $51.67$  میکرومتر بر ثانیه کاهش یافته است، که معادل با  $14.3$  درصد کاهش سرعت می باشد. در انتها، با دو برابر کردن دامنه‌ی ماریج تاژک سرعت پیشروی میکروشناگر از  $61.26$  میکرومتر بر ثانیه به  $71.60$  میکرومتر بر ثانیه کاهش یافته است، که معادل با  $18.8$  درصد کاهش سرعت می باشد.



شکل ۱۰- وضعیت دورانی میکروشناگر در مانور سه بعدی تست سوم



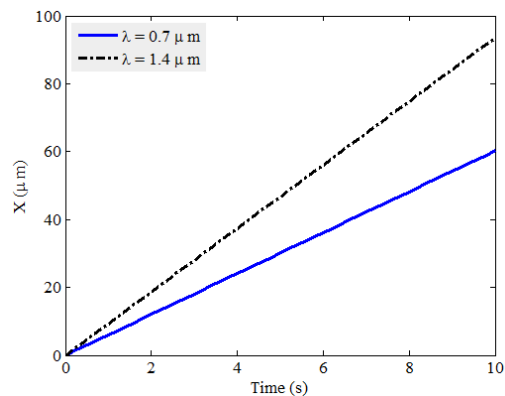
شکل ۱۳- تأثیر دامنه‌ی ماریج تاژک بر میزان پیشروی میکروشناگر

$$(\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 15 \text{ Hz})$$

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، به خوبی مشاهده می شود که در طرح ارائه شده، بر خلاف مدل سازی های گذشته، قابلیت انجام مانورهای دو و سه بعدی در میکروشناگر فراهم شده است. لازم به ذکر است که در تست های فوق، سرعت زاویه ای تاژک ها در مدت زمان انجام تست مقادیری ثابت هستند. اما با طراحی

در تست دوم میکروشناگر تنها حول محور  $Y$  دوران می کند و حرکت آن در صفحه‌ی  $X-Z$  صورت می گیرد. به همین خاطر زاویه‌ی دوران  $\phi$  برابر با صفر خواهد بود.

یکی از نکات حائز اهمیت در میکروشناگرهای تاژی این است که مشخصات هندسی تاژک تأثیر قابل توجهی در سرعت پیشروی میکروشناگر دارد. در شکل های (۱۱)-(۱۳) به ترتیب تأثیر طول موج تاژک، قطر مفتول تاژک و دامنه‌ی ماریج تاژک بر میزان پیشروی میکروشناگر مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۱- تأثیر طول موج تاژک بر میزان پیشروی میکروشناگر



- [4] Nourmohammadi, H., Ghanbari, A. and Bahrami, M. "Dynamic modeling and simulation of three-dimensional motion of a flagellar swimming microrobot", (In Persian), 20<sup>th</sup> Annual International Conference on Mechanical Engineering, ISME 2012, Shiraz, Iran (2012).
- [5] Fukuda, T., Kawamoto, A., Aria, F., and Matsuura, H. "Mechanism and swimming experiment of micro mobile robot in water", In: Proceeding of the IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, New York. pp. 273-278, 1994.
- [6] Edd, J., Payen, S., Sitti, M., Stoller, M. L., and Rubinsky, B. "Biomimetic propulsion mechanism for a swimming surgical micro-robot", In: Proc of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, USA, pp. 2583-2588, 2003.
- [7] Behkam, B., and Sitti, M. "E. Coli Inspired Propulsion for Swimming Microrobots", In: Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, New York, 2004.
- [8] Behkam B. and Sitti M. "Modeling and Testing of a Biomimetic Flagellar Propulsion Method for Microscale Biomedical Swimming Robots", In: Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, California, USA, pp. 37-42, 2005.
- [9] Behkam, B., and Sitti, M. "Design methodology for biomimetic propulsion of miniature swimming robot", Trans. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control 128, pp. 36-43, 2006.
- [10] Kosa, G., Shoham, M. "Propulsion Method for Swimming Microrobot" IEEE Transaction on Robotics, Vol. 23, No, 1, 2007.
- [11] Singleton, J., Diller, E., Andersen, T., Regnier, S., and Sitti, M. "Micro-scale propulsion using multiple flexible artificial flagella" In Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ pp. 1687-1692, 2011.
- [12] Ghanbari, A., and Bahrami, M. "A novel swimming microrobot based on artificial cilia for biomedical applications", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 63, pp. 399-416, 2011.
- [13] Ghanbari, A., Bahrami, M., and Nobari, M. R. H. "Methodology for artificial microswimming using magnetic actuation", Physical Review E. 83, 064301, 2011.
- [14] Nourmohammadi, H. and Bahrami, M. "Dynamic Modeling and Tracking Control of a Swimming Microrobot propelled by Two Prokaryotic Flagella", IJST, Transaction of Mechanical Engineering, Vol. 38, No. M1, pp. 135-141, 2014.
- [15] Ghanbari, A., Chang, P.H., Nelson, B.J., and Choi, H. "Electromagnetic Steering of a Magnetic Cylindrical Microrobot Using Optical Feedback Closed-Loop Control", International Journal of Optomechatronics, Vol. 8, pp. 129-145, 2014

قانون کنترل، می‌توان تغییرات سرعت زاویه‌ای تازک‌ها را به گونه‌ای طراحی نمود، که منجر به یک مانور مطلوب در میکروشناگر گردد. به هر حال، کنترل مسیر میکروشناگر از جمله کارهایی است که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با الهام گرفتن از حرکت موجودات زنده مشابه (میکروارگانیسیم‌ها) و بر مبنای پیشرانش زیستی، یک میکروروبات شناگر سه تازکی معرفی شده و مدل دینامیکی آن استخراج شده است. در میکروروبات شناگر ارائه شده نیروی پیشرانش از طریق سه تازک پروکاریوتی تامین می‌شود که چرخش آنها باعث ایجاد حرکت پیشروی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست‌های حلقه باز حاکی از آن است که اندازه و جهت سرعت زاویه‌ای تازک‌ها در تعیین نوع حرکت میکروروبات شناگر بسیار مهم می‌باشند و مشاهده شد که با اعمال ورودی‌های گوناگون برای سرعت چرخش تازک‌ها می‌توان حرکت یک‌بعدی، دوبعدی و یا سه‌بعدی در میکروروبات شناگر ایجاد کرد. از نتایج مهم دیگر، تأثیر مشخصات هندسی تازک بر سرعت پیشروی میکروشناگر است. با اعمال سرعت زاویه‌ای با فرکانس ۱۵ هرتز به هر سه تازک، تأثیر مشخصات هندسی تازک بر سرعت پیشروی میکروشناگر مورد بررسی قرار گرفت. افزایش دو برابری طول موج موج تازک، قطر مغتول تازک و دامنه‌ی مارپیچ تازک به ترتیب منجر به افزایش ۵۵/۲ درصدی، کاهش ۱۴/۳ درصدی و افزایش ۱۸/۸ درصدی در سرعت پیشروی میکروشناگر شده است. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر طول موج تازک نسبت به سایر پارامترهای تازک بیشتر است. کنترل مسیر میکروشناگر به گونه‌ای که با اعمال آن میکروشناگر وادار به حرکت در امتداد یک مسیر مطلوب گردد، از جمله کارهایی است که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

#### مراجع

- [1] Li, H., Tan, J., and Zhang, M., "Dynamics modeling and analysis of a swimming microrobot for controlled drug delivery", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 6, pp. 220-227, 2009.
- [2] Nelson, B. J., Kaliakatsos, I. k., and Abbott, J. J. "Microrobots for minimally invasive medicine", Annu. Rev. Biomed. Eng., 12, pp. 55-85, 2010.
- [3] Zhang, M., Tran, T. J., and Xi, N. "Micro/Nano-devices for controlled drug delivery", In: Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2068-2073, 2006.

- [16] Hancock, G. "The self-propulsion of microscopic organisms through liquids", In: Proc. R. Soc. London, Ser. A, 217, pp.96-121, 1953.
- [17] Lighthill, J. "Flagellar hydrodynamics", SIAM Review, Vol. 18, pp.161-230, 1976.
- [18] Chwang, T., and Wu, T. "A note on the helical movement of micro-organisms", In: Proc. R. Soc. London, Ser. B, 178, pp. 327-346, 1971.