

معرفی و مدل‌سازی یک میکروروبات کپسولی شکل بدیع با در نظر گرفتن نیروهای سطحی

رضا نادافی دشت بیاض^{۱*}؛ منصور کبگانیان^۲

چکیده

در راستای توسعه کپسول‌های آندوسکوپی، در این مقاله طرح یک میکروروبات کپسولی شکل دارای پا با میکروعملگرهای پلیمر یونی کامپوزیت فلزی پیشنهاد می‌شود. ابتدا چگونگی حرکت میکروروبات توضیح داده می‌شود سپس ضمن در نظر گرفتن نیروهای سطحی اعمالی و میکروعملگر، میکروروبات مدل‌سازی دینامیکی می‌شود. نیروهای سطحی شامل اصطکاک لغزشی، چسبندگی سطحی و چسبندگی ایستای و میکروعملگر پلیمری از نوع پلیمر یونی کامپوزیت فلزی است. رفتار زمانی میکروعملگر پلیمری بر اساس معادله‌ی مشخصه کوپل مکانیکی - الکتریکی و معادل‌سازی الکتریکی حجم ژل پلیمری مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل دینامیکی میکروروبات، نشان می‌دهد که بهترین زاویه نصب پاها ۶۰ درجه، جرم مناسب میکروروبات ۲ گرم و سرعت پیشروی ۱ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد.

کلمات کلیدی: میکروروبات، آندوسکوپی، میکروعملگر، پلیمر یونی کامپوزیت فلزی، چسبندگی ایستای، چسبندگی سطحی، ماژول.

Suggestion and Modeling of a Novel Capsular Microrobot with Surface Forces

R. Nadafi D. B. ; M. Kabganian

ABSTRACT

For developing of endoscopic Capsular, a design of legged capsular microrobot with ionic polymer metal composite actuator is suggested in this paper. First locomotion of microrobot is explained then microrobot is modeled by envisage exerting surface forces and microactuator. Surface forces contain slip-friction, surface adhesion and resting adhesion and polymeric microactuator is ionic polymer metal composite. Time variant response of polymeric microactuator is modeled fundamental of coupled electromechanical equation and electric equivalent bulk gel polymeric.

Result simulation of dynamical model microrobot shows that best installation angle of legs is 60 degree, proper mass of microrobot is 2g and speed marching is 1 millimeter per second.

KEYWORDS: Microrobot, Endoscopy, Microactuator, Ionic Polymer Metal Composite, Resting Adhesion, Surface Adhesion, Modul.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۰/۱۵

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۴/۲۸

*^۱ نویسنده مسئول و مربی: پژوهشکده فناوریهای نو؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Email: rezanadafi@aut.ac.ir

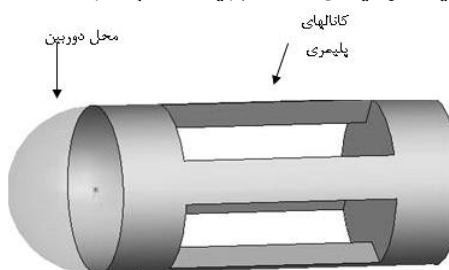
^۲ استاد؛ دانشکده مهندسی مکانیک؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Email: kabgan@aut.ac.ir

سرعت پیشروی ۱ میلیمتر بر ثانیه حداقل انرژی، ولتاژ حدود ۱ ولت و شدت جریان زیر ۰/۱ آمپر، نیاز دارد. به دلیل بهره‌گیری از فرایندهای میکروساخت و میکرومونتاز محدودیتی برای کوچک‌سازی در حد میکرونی ابعاد میکروروبات وجود ندارد.

مدل میکروروبات با هدف شناختن پارامترهای موثر طرح مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی شده است. این پارامترها شامل جرم میکروروبات، زاویه نصب پاها، فنریت ماده بین صفحات واسط، مقدار مقاومت و خازن معادل میکروعملگر، سطح ولتاژ اعمالی و غیره است. در ادامه به معرفی سازه میکروروبات پرداخته می‌شود.

۲- معرفی سازه میکروروبات و نحوه راه رفتن

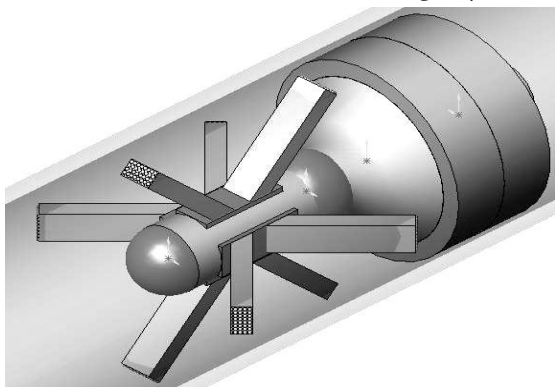
میکروروبات کپسولار مورد نظر دارای دو ماژول فعال و غیر فعال می‌باشد. ماژول فعال استوانه‌ای با طول ۱۵ میلیمتر و قطر ۴ میلیمتر که در شکل (۱) نشان داده شده وظیفه‌ی ایجاد نیرو محرکه و ماژول غیر فعال استوانه‌ای با طول ۱۴ میلیمتر و قطر ۱۲ میلیمتر وظیفه‌ی حمل تجهیزات را بر عهده دارد.



شکل (۱): نمایش ماژول فعال

۲-۱- معرفی سازه میکروروبات

ماژول فعال دارای ۴ جفت پای متقارن مطابق شکل (۲) می‌باشد. این پاها توسط صفحات صلب واسط به میکروروبات متصل می‌شوند. فضای بین صفحات با پلیمری خاص با فنریت محاسبه شده پر می‌شود.



شکل (۲): نمایش ماژولها و پایهای پلیمری میکروروبات

آندوسکوپی کپسولار غیر فعال از سال ۲۰۰۱ مرسوم شده است. وجود درد و خونریزی هنگام عمل آندوسکوپی کلاسیک، محققین را واداشت تا طرح کپسول آندوسکوپ را ارائه دهند. نقص‌هایی همچون کنترل ناپذیری، کندی حرکت و غیره سبب شد تا میکروروبات‌های کپسولی موضوع تحقیقات پژوهشگران زمینه ریز سیستمها قرار گیرد. با بهره‌گیری از میکروعملگرهای متداول ریز سیستمها، آلیاژهای حافظه‌دار و میکروموتورهای الکترواستاتیک میکروروبات‌های کپسولی شکل مطرح شده‌اند [۱]-[۴]. تاکنون طرح شایسته و در خور توجهی در قالب میکروروبات‌های کپسولار با کاربری خاص ارائه نشده است. از جمله نواقص طرحهای قبلی می‌توان نداشتن تطبیق‌پذیری با محیط درون بدن، محدودیت تکنولوژیکی برای کوچک‌سازی، ایجاد حرارت و غیره را نام برد.

پژوهشگران زیادی در زمینه شناخت و مدل‌سازی نیروهای سطحی در حوزه میکروفنآوری و همچنین مدل‌سازی و ساخت میکروعملگرهای پلیمری بطور جداگانه و اغلب بی توجه به زمینه میکروروباتیک فعالیت می‌نمایند. در اینجا بایستی توجه داده شود کاری که در این مقاله صورت گرفته استفاده از نتایج تحقیقات ایشان برای کاربری در حوزه میکروروباتیک و معرفی و مدل‌سازی طرحی بدیع از میکروروبات کپسولار است تا بتواند با حداقل انرژی مصرفی، شرط اولیه برای بی‌سیم شدن میکروروبات، پیشروی مناسبی داشته باشد.

در مراجع [۵]-[۹] به بررسی و مدل‌سازی نیروهای سطحی بین دو سطح در تماس در حالت سکون پرداخته شده است. بررسی اثر نیروهای سطحی بین دو سطح در تماس در حال لغزش نیز بطور مفصل در [۱۰]-[۱۲] بیان شده است. از بین میکروعملگرهای متداول حوزه میکروفنآوری، میکروعملگر پلیمری یونی کامپوزیت فلزی که دارای سطح انرژی مصرفی پایین و کرنش بالا هستند در ساختار میکروروبات این پژوهش استفاده شده است. معرفی، مدل‌سازی و ساخت این دسته از میکروعملگرها در [۱۳] و [۱۴] ارائه شده است.

در پایان، مدل دینامیکی میکروروبات کپسولار مطرح شده در این مقاله، با در نظر گرفتن نیروهای سطحی اعمالی بر میکروروبات، ساختار بدیع میکروروبات و مدل میکروعملگر استخراج شده است.

میکروروبات ارائه شده در این نوشتار، که دارای ۴ جفت پای پلیمری است، به دلیل استفاده از پلیمرهای یونی کامپوزیت فلزی از قابلیت زیست‌سازگاری بالایی برخوردار است. برای

به حالت اول باز می‌گردند در این حالت چون هیچگونه لغزشی بین پاها و دیواره هنگام تحریک و عدم تحریک وجود ندارد بنابراین در لحظه ۵ نیز مرکز جرم روبات به اندازه Δx در جهت راست حرکت می‌کند. در ادامه به مدل‌سازی نیروهای سطحی موثر بر میکوروبات ارائه می‌گردد.

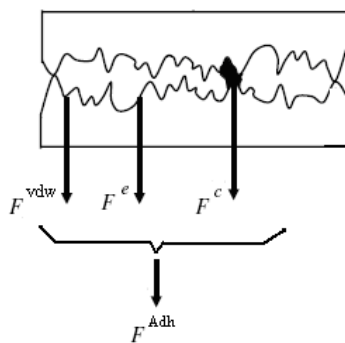
۳- مدل‌سازی نیروهای سطحی

نیروهای سطحی شامل اصطکاک لغزشی، چسبندگی ایستای و چسبندگی سطحی می‌باشد. زیربها در این مقاله با نیم‌کره به شعاع R معادل‌سازی شده‌اند.

۳-۱- چسبندگی سطحی

از گذشته تاثیرات چسبندگی سطحی دو جسم نزدیک به هم شناخته شده است. در سال ۱۹۹۶ اولین بار ساتو [۷] روشی را برای استفاده از نیروی چسبندگی سطحی برای گرفتن و بلند کردن اشیاء معرفی نمود. چسبندگی سطحی نیرویی متشکل از نیروی مویبندی، F^c ، الکترواستاتیک، F^e ، و واندروالسی، F^{vdw} است [۷]-[۹]. شکل (۴) تقابل این نیروها را برای دو سطح در تماس نشان می‌دهد. مقدار نیروی چسبندگی سطحی به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$F^{adh} = F^{ele} + F^c + F^{vdw} \quad (1)$$



شکل (۴): مولفه‌های نیروی چسبندگی سطحی [۱۳]

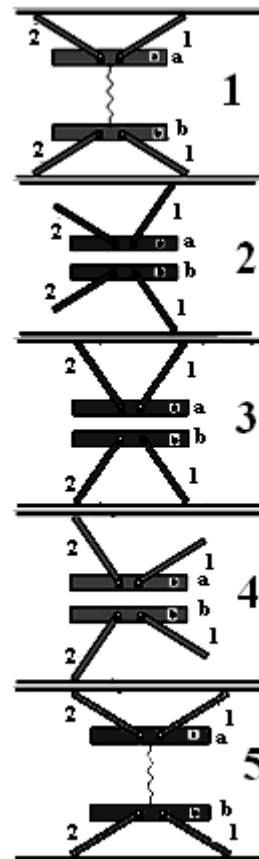
۳-۱-۱- نیروی مویبندی

به دلیل وجود رطوبت ۵۰ درصدی در محیط که بیشتر امری اجتناب ناپذیر است نیروی مویبندی به وجود می‌آید. در واقع کشش سطحی مولکولهای مایع و فشار لاپلاس بین سطح داخل مایع محبوس شده و لایه خارجی مایع، سبب ایجاد نیروی مویبندی می‌شود. نیروی مویبندی برای نوع تماس کره - سطح صاف بصورت رابطه (۲) است [۶]، [۷].

ماژول فعال بدلیل تغییر شکل و جابجایی صفحات واسط پاها، صفحات نصب پاها به ماژول فعال، دارای حجم داخلی کمی برای ذخیره‌سازی و جانمایی تجهیزات است به همین دلیل ماژول غیر فعال، برای هر واحد میکوروبات در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- نحوه راه رفتن

حرکت میکوروبات در صفحه و دو بعدی فرض شده است. طبق شکل (۳) ترتیب تحریک پایهای میکوروبات سبب حرکت رو به جلو، یا عقب، میکوروبات می‌گردد.



شکل (۳): ترتیب تحریک پایهای هم فاز و غیر هم فاز

در لحظه ۱ هر ۴ جفت پا بدون تحریک هستند و در محل اولیه قرار دارند. در لحظه ۲ پایهای شماره ۱، که ۴ عدد هستند، همزمان تحریک می‌شوند در این هنگام صفحات واسط تحت فشار قرار گرفته و جابجا می‌شوند بطوریکه فنر بینشان فشرده می‌گردد همچنین مرکز جرم میکوروبات به اندازه Δx به سمت راست صفحه می‌رود. در لحظه ۳ پایهای شماره ۲، ۴ عدد، تحریک شده همانند پایهای ۱ به دیواره می‌رسند. در لحظه ۴ پایهای شماره ۱ از تحریک خارج شده به حالت اول باز می‌گردند و صفحات واسط توسط پایهای شماره ۲ تحریک شده، همچنان فشرده باقی می‌مانند. در لحظه ۵ پایهای شماره ۲

۲-۳- چسبندگی ایستای

جنس دندان‌های دو سطح در تماس سخت هستند بنابراین فرض چسبندگی ایستای با تغییر شکل برشی در محل تماس مناسب به نظر می‌رسد. رابطه بین چسبندگی ایستای و بار خارجی به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود.

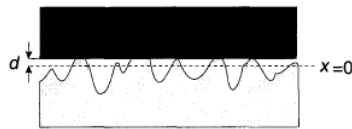
$$F_f = \mu_e (F^{Adh} + L) \quad (6)$$

F^{Adh} نیروی چسبندگی سطحی، L بار خارجی، نیروی فشاری وارد بر دو سطح تماس، و μ_e ضریب چسبندگی ایستای می‌باشند.

مقدار μ_e بر اساس رابطه (۷) نوشته می‌شود.

$$\mu_e = S/P_e \quad (7)$$

S قوام برشی دندان‌هاست که به جنس بستگی دارد. P_e فشار متوسط الاستیک است که بر اساس روابط آماری و توزیع گاسین ارتفاع دندان‌ها روی سطوح در تماس تعیین می‌شود. شکل (۵) سطح مبنای ارتفاعی توزیع دندان‌ها (x) را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نمایش سطح مبنای دندان‌ها [۵]

در مدل گرین وود و ویلیامسون سطح تماس واقعی A_r و بار خارجی با L نشان داده می‌شوند [۵]. این پارامترها به منظور استفاده از تابع نرمال گوسین برای تحلیل و مدلسازی توزیع دندان‌ها و در پایان، تعیین فشار متوسط الاستیک بصورت روابط (۸) و (۹) با فرض وجود چسبندگی سطحی نرمالیزه می‌گردند.

$$A^* = \frac{A_r}{\eta R \sigma_1 A_a} = \pi F_1(h) \quad (8)$$

$$L^* = \frac{DL}{\eta A_a R^{1/2} \sigma_1^{3/2}} \quad (9)$$

$$= F_{3/2}(h) - \frac{2\pi}{\theta_1} F_0(h)$$

θ_1 پارامتر چسبندگی توسط فولر و تابور به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$\theta_1 = \frac{\sigma_1^{3/2} R^{1/2}}{D w_a R} \quad (10)$$

w_a کار نیروی چسبندگی سطحی است. ارتفاع هر دندان d ، x فاصله بین دو پایه دو سطح که در شکل (۵) نشان داده شده است، به صورت $y = x/\sigma_1$ و $h = d/\sigma_1$ نرمالیزه می‌شود. از

$$F^c = \frac{4\pi R_{ball} \gamma_L}{1 + D_1} \quad (2)$$

D_1 ، عمق غوطه‌وری، γ_L کشش سطحی مولکولهای مایع و R_{ball} شعاع زبریهای تماس است.

۲-۱-۳- نیروی واندروالسی

هنگامیکه دو سطح در تماس نزدیک با هم قرار می‌گیرند هسته و الکترونیهای دو سطح با یکدیگر کنش و واکنش نشان می‌دهند بطوریکه وقتی دو سطح در تماس هستند دارای انرژی مانند رابطه (۳) است [۷]

$$E = - \int_{V_1} dV_1 \int_{V_2} dV_2 \frac{q_1 q_2 \lambda_{12}}{H^6} \quad (3)$$

λ_{12} ضریب لاندن، H فاصله بین دو اتم، q_1 و q_2 تعداد اتم در واحد سطح سانتیمتر مربع و V_1 و V_2 حجم دو سطح در تماس هستند. نیروی واندروالسی از تغییرات انرژی لندن در جهت فاصله‌های اتمی طبق رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$F^{vdw} = \frac{\partial E}{\partial H} \quad (4)$$

در حالت تماس کره- سطح صاف برای دو سطحی که فاصله میکرومتری نسبت هم داشته باشند نیروی واندروالسی بصورت رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$F^{vdw} = \frac{AR}{6D^2} \quad (5)$$

A ضریب هاماکر است که بستگی به دو جنس در تماس دارد و واحد آن ژول و از جنس انرژی است. R شعاع کره و D فاصله جدایی دو سطح از یکدیگر است، کمترین مقدار مجاز آن 0.4 نانومتر است [۷].

۳-۱-۳- نیروی الکترواستاتیکی

این نیرو در مواقعی که دو سطح بهم می‌رسند و یا از هم جدا می‌شوند معنا دارد. در مدل میکروروبات موردنظر هنگام حرکت، پاها به دیواره ثابت است و جدایی وجود ندارد بنابراین $F^{ele} = 0$ است. حتی اگر $F^{ele} \neq 0$ باشد چون دارای مقدار مثبت است پس در نظر نگرفتن آن سبب ایجاد نیروی چسبندگی سطحی کمتر از مقدار واقعی اعمالی بر میکروروبات می‌شود، که چنانچه در شبیه‌سازی میکروروبات برخلاف فرض $F^{ele} = 0$ نلغزد پس حتماً با وجود $F^{ele} \neq 0$ هم نخواهد لغزید. بنابراین فرض صفر بودن نیروی الکترواستاتیک برای اطمینان است.

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \quad (13)$$

که v سرعت نسبی دو سطح نسبت به هم و z متوسط شکست دندانها هستند. نیروی اصطکاک لغزشی بر اساس مدل جامع استاتیکی استریبک به صورت رابطه (۱۴) نوشته می شود

$$F_{sl} = \sigma_0 g(v) \operatorname{sgn}(v) - \frac{\sigma_0 g(v)}{|v|} \cdot \frac{dz}{dt} + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (14)$$

در حالتی که $\frac{dz}{dt} = 0$ باشد، در حالت پایای شکست دندانها، رابطه اصطکاک استریبک به صورت رابطه (۱۵) نوشته می شود.

$$F_{sl} = F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\dot{x}}{v_s}\right)^2} \operatorname{sgn}(\dot{x}) + \sigma_2 \dot{x} \quad (15)$$

در بخش بعدی میکروعملگرهای پلیمر یونی کامپوزیت فلزی آورده می شود.

۸- مدل سازی میکروعملگر پلیمر یونی کامپوزیت فلزی

پلیمرهای یونی کامپوزیت فلزی ماده پلیمری جدید است که به کلاس پلیمرهای الکترواکتیو تعلق دارد. تادوکو و همکارانش مدلی بر اساس عملکرد آن بر پایه فرضیه فیزیکی - شیمیایی ارائه دادند. بر طبق آن مدل تحت ولتاژ اعمال شده یک میدان الکتریکی در حجم عملگر به وجود می آید. علت اصلی تحریک پذیری و تغییر شکل یافتن پلیمرهای کامپوزیت فلزی مربوط است به مهاجرت یونهای هیدراته شده به سمت الکترودهای غیر هم نام [۱۳]. با دریافت انرژی کم حدود ولتاژ حدود ۲ تا ۳ ولت جابجایی و تغییر شکل بزرگی می دهند [۱۴]. این ماده بعنوان عملگر و هم حسگر می تواند بکار گرفته شود. مدلی که آقای کیم در [۱۴] ارائه کرده مربوط است به حالت اثر مستقیم بودن پلیمر که با شرط نفوذناپذیری الکترودها نسبت به آب بدست آورده است. رابطه (۱۶) ارتباط بین ولتاژ اعمالی و گشتاور بر واحد عرض مقطع عملگر را نشان می دهد.

رابطه (۷) و (۸) L و A_r بر حسب تابع توزیع نرمال، $F_n(h)$ بدست می آید. بنابراین P_e به صورت رابطه (۱۱) تعیین می شود.

$$P_e = \frac{L}{A_r} = \frac{\sigma_1^{1/2} \left(F_{3/2}(h) - \frac{2\pi}{\theta_1} F_0(h) \right)}{\pi R^{1/2} DF_1(h)} = \sqrt{\frac{\sigma_1}{R}} \cdot \frac{\left(F_{3/2}(h) - \frac{2\pi}{\theta_1} F_0(h) \right)}{\pi DF_1(h)} \quad (11)$$

رابطه توزیع نرمال به ازاء n به صورت رابطه (۱۲) نوشته می شود.

$$F_n(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_h^{\infty} (y-h)^n e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (12)$$

با ترکیب روابط (۶)، (۷) و (۱۱) به همراه مقدار چسبندگی سطحی که در بخش (۳-۱) بیان شد، چسبندگی ایستای که شرط نداشتن لغزش پاها را برآورده می کند، تعیین می شود.

۳-۳- اصطکاک لغزشی

چگونگی ایجاد اصطکاک لغزشی تا حدودی متفاوت تر از چسبندگی سطحی است. دو سطح در تماس به دلیل داشتن زبری، همچون دندانهای دو شانه موی سر که در هم فرو رفته باشند مطابق شکل (۶) با هم در تماسند [۱۰].



شکل (۶): چگونگی درگیری دندانها در حین لغزش دو سطح بر روی یکدیگر [۱۲]

هنگام اعمال نیروی مماسی به دو سطح زبریها، دندانهای شانه فرضی، بصورت الاستیک تغییر شکل می دهند یعنی نیروی اصطکاک به دلیل تغییر شکل دندانها افزایش می یابد. هنگامیکه نیروی مماسی به حد مشخصی رسید بعضی از زبریها شکسته می شوند که در این هنگام لغزش دو سطح نسبت بهم اتفاق می افتد. این اتفاق کاملاً رندوم و تصادفی اتفاق می افتد. سرعت متوسط شکستن دندانهای شانه فرضی توسط هسینگ و فردلند بطورت رابطه (۱۳) ارائه شده است [۱۱] و [۱۲].

T گشتاور تولیدی توسط هر پای پلیمری است که طبق رابطه (۱۹) از ضرب عرض تیر پلیمر، w، در Γ و در پایان به صورت رابطه (۲۰) تعیین می‌شود.

$$T = \Gamma \times w \quad (۱۹)$$

$$T = \frac{w}{12} \cdot \frac{1-2\sigma_p}{1-\sigma_p} \cdot \frac{L_1 h^3}{K_1} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{R_2}{R_2 + 2R_1} \\ \frac{2R_1 \cdot R_2}{R_2(R_2 + 2R_1)} \\ \cdot \exp\left(-\left(\frac{R_2 + 2R_1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C}\right) \cdot t\right) \end{array} \right\} \quad (۲۰)$$

با ترکیب روابط (۱۷)، (۱۸) و (۲۰) دینامیک حلقه باز سیستم میکروروبات برای درجه آزادی x، میزان پیشروی مرکز جرم میکروروبات، تعیین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول (۱) در بخش بعدی آورده شده اند.

۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

مشخصات فیزیکی در نظر گرفته شده برای پاهای پلیمری، اصطکاک لغزشی، چسبندگی ایستای، چسبندگی سطحی و سازه میکروروبات بر اساس جداول (۱) - (۵) می‌باشد.

جدول (۱): مقادیر عددی هر پای پلیمری یونی کامپوزیت فلزی [۱۴]

پارامتر	σ_p	K_1	$h(\mu m)$	L_1
مقدار	۰/۴	$3/4 \times 10^{-17}$	۲۰۰	10^{-8}
پارامتر	R_1	R_2	$C(F)$	$V_A(V)$
مقدار	۰/۵	۱۵	۰/۲۵	۱

جدول (۲): مقادیر پارامترهای اصطکاک لغزشی هر پا بادیواره [۱۲]

پارامتر	V_s	F_s	F_c	F_v
مقدار	۰/۰۰۱	$1/5 \times 10^{-4}$	10^{-4}	۰/۰۲

جدول (۳): مشخصات عددی مورد نیاز چسبندگی ایستای [۵]

پارامتر	$\eta(m^{-2})$	$R(\mu m)$	$\gamma\Delta (J.m^{-2})$
مقدار	4×10^{-12}	۰/۴	۰/۱
پارامتر	$\sigma(\mu m)$	$D(Pa^{-1})$	$A_s(\mu m^2)$
مقدار	۰/۰۴	$9/1 \times 10^{-12}$	۱۰۰

جدول (۴): مشخصات فیزیکی سازه میکروروبات

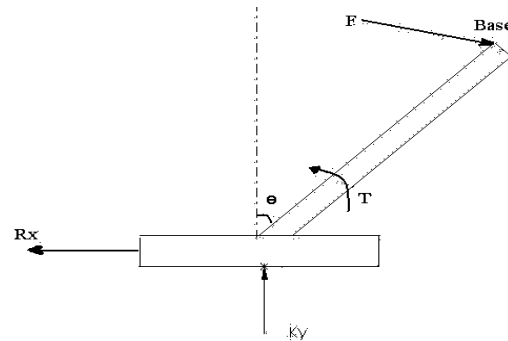
پارامتر	w (mm)	L(mm)	m (gr)	$K(\mu N/\mu m)$	(Degree) θ
مقدار	۱	۴	۱	۰/۰۲	۶۰

$$\Gamma = \frac{1}{12} \cdot \frac{1-2\sigma_p}{1-\sigma_p} \cdot \frac{L_1 h^3}{K_1} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{R_2}{R_2 + 2R_1} \\ \frac{2R_1 \cdot R_2}{R_2(R_2 + 2R_1)} \\ \cdot \exp\left(-\left(\frac{R_2 + 2R_1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C}\right) \cdot t\right) \end{array} \right\} \quad (۱۶)$$

حال در بخش بعد با جمع‌بندی مدل‌سازی نیروهای سطحی و میکروعملگر، به مدل دینامیکی میکروروبات بر اساس سازه آن پرداخته می‌شود.

۵- مدل‌سازی حرکت میکروروبات

بر اساس سازه معرفی شده در بخش ۲، نیروهای تماسی بدست آمده در بخش ۳ و مدل میکروعملگر این میکروروبات، مدل دینامیکی بدست می‌آید. شکل (۷) پیکره آزاد هر صفحه واسط و پای متصل به آن است. نیروها و گشتاورهایی مطابق شکل (۷) به مجموعه صفحه واسط و پاهای متصل به آن اعمال می‌گردد.



شکل (۷): دیاگرام آزاد نیورها و گشتاورهای وارده بر مجموعه هر صفحه واسط و پاهای متصله

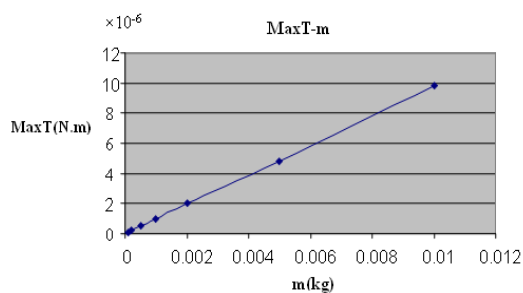
R_x اصطکاک لغزشی مازول غیرفعال است که همچون اضافه بار بر مازول فعال اعمال نیرو می‌کند. F_x , F_y عکس‌العمل جداره لوله بر پا است. T گشتاور تولیدی توسط پای پلیمری است و y میزان جابجایی عرضی صفحه واسط است.

برای نقطه پایه در شکل (۷)، معادله گشتاور بصورت رابطه (۱۷) نوشته می‌شود.

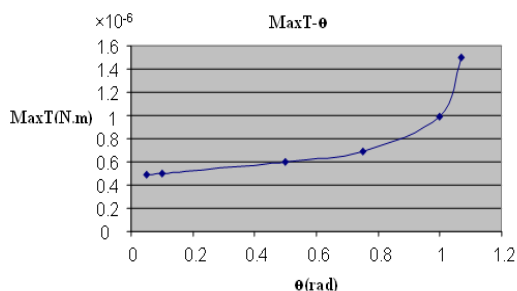
$$I\ddot{x} = T - \frac{1}{4} L \cos(\theta) R_x - KL \sin(\theta) \tan(\theta) x \quad (۱۷)$$

اصطکاک لغزشی مطابق رابطه (۱۸) بیان می‌گردد.

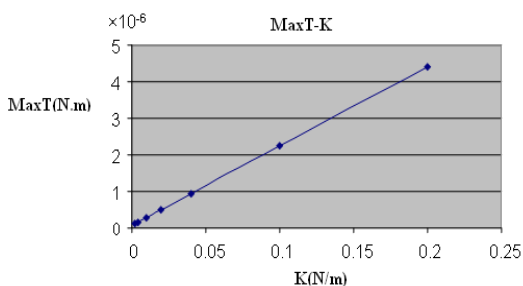
$$R_x = F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\dot{x}}{v_s}\right)^2} + F_v \dot{x} \quad (۱۸)$$



شکل (۱۱): نمایش اثر افزایش جرم میکروروبات بر ماکزیمم گشتاور مورد نیاز



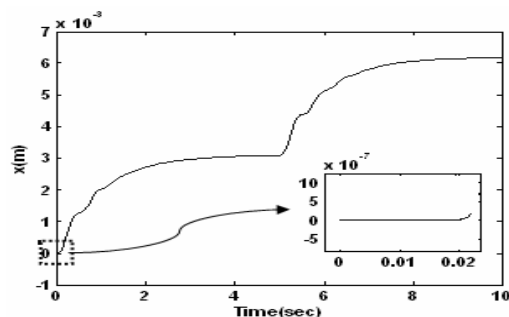
شکل (۱۲): نمایش اثر افزایش زاویه نصب پای پلیمریونی کامپوزیت فلزی بر ماکزیمم گشتاور مورد نیاز



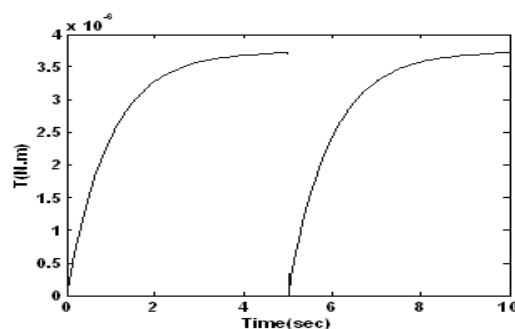
شکل (۱۳): نمایش اثر افزایش سختی پلیمر بین صفحات واسط بر ماکزیمم گشتاور مورد نیاز

۱- مقدار گشتاور تولیدی میکروعملگر پلیمری کامپوزیت یونی موجود در بازار که در سایت فروش اینترنتی شرکت‌های تجاری معرفی شده، مقدار 0.16 نیوتن‌متر بر گرم گزارش شده است. این سقف به عنوان محدوده اشباع عملگر در این مقاله در نظر گرفته شده است. همچنین چگالی میکروعملگر این شرکت حدود 0.00125 گرم بر میلی‌متر مکعب است. با توجه به ابعاد میکروعملگر در میکروروبات که $4\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ می‌باشد، بیشترین گشتاور قابل حصول از میکروعملگر با ابعاد بکار رفته در ساختار میکروروبات، حدود $1/6 \times 10^{-6}$ نیوتن‌متر می‌باشد. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان، حد اشباع این عملگر 5×10^{-6} نیوتن‌متر لحاظ تعیین می‌گردد. با توجه به شکل (۱۱) مشخص می‌شود چنانچه جرم میکروروبات از 5 گرم بیشتر شود، گشتاور مورد نیاز برای حرکت میکروروبات از ظرفیت عملگر بیشتر است و در عمل میکروروبات حرکت نمی‌کند.

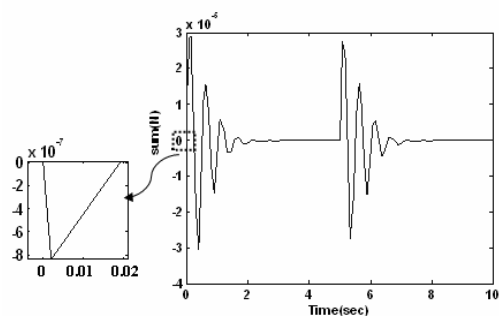
شکل‌های (۸) و (۱۰) نشان می‌دهد که تا ثانیه 0.2 که مقدار برآیند نیروها منفی است، میکروروبات حرکتی ندارد و در موقعیت صفر باقی می‌ماند. اما در انتهای حرکت برآیند نیروی منفی سبب صفر شدن سرعت و ثابت ماندن موقعیت میکروروبات می‌شود.



شکل (۸): رفتار زمانی مرکز جرم میکروروبات



شکل (۹): رفتار زمانی گشتاور تولیدی پای پلیمریونی کامپوزیتی



شکل (۱۰): رفتار زمانی برآیند نیروهای اعمالی بر میکروروبات

شکل (۹) مقدار گشتاور تولیدی توسط هر پای پلیمری را نشان می‌دهد. مقدار ماکزیمم گشتاور تولیدی حدود 5 میکرونیوتن‌متر است که در محدوده ظرفیت عملگرهای پلیمریونی کامپوزیت فلزی است.

بیشتر می‌شود گشتاور مورد نیاز برای حرکت میکروروبات از ظرفیت عملگر بیشتر شده و عملاً میکروروبات حرکت نمی‌کند.

۷- تقدیر و تشکر

در اینجا لازم است از جناب آقای دکتر فرشاد برازنده، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیر کبیر تشکر و قدردانی گردد.

۲- با توجه به شکل (۱۲) مشخص می‌شود هر چه زاویه نصب (θ) به ۹۰ درجه نزدیک‌تر می‌شود، مقدار گشتاوری که باید تولید شود بیشتر باید باشد و در ۹۰ درجه مقدار گشتاور تولیدی به بینهایت میل می‌کند. به منظور رسیدن به بیشترین مقدار پیشروی میکروروبات ضمن وجود مقدار بهینه گشتاور تولیدی، زاویه ۶۰ درجه پیشنهاد می‌شود.

۳- با توجه به شکل (۱۳) مشخص می‌شود هر چه فنریت ماده پلیمری بین صفحات واسط بیشتر گردد، گشتاور بیشتری بایستی تولید گردد. هنگامیکه فنریت از میزان ۰/۱۷ نیوتن برمتر

۸- مراجع

- [۸] D. Sinan Haliyo, Yves Rollet and Stéphane Régnier, "Manipulation of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects," IEEE, International Conference on Robotics and Automation, 2002.
- [۹] D. S. Haliyo, S. Regnier, J. Guinot, "[mü]MAD, the adhesion based dynamic micro-manipulator," European Journal of Mechanics A/Solids, 2003.
- [۱۰] P. Rougeot, S. Regnier, N. Chaillet, "Forces analysis for micro-Manipulation," International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, IEEE, 2005.
- [۱۱] N. Tayebi & A. A. Polycarpou, "Adhesion and contact modeling and experiments in microelectromechanical systems including roughness effects," Microsyst Technol, 2006.
- [۱۲] C. Canudas, H. Olsson, K. J. Åström, and P. Lischinsky, "A New Model for Control of Micro-Systems with Friction," IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 40, NO. 3, MARCH 1995.
- [۱۳] Y. Kanedal, N. Kamamichi, M. Yamakita, K., "Control of Linear Artificial Muscle Actuator Using IPMC," SICE Annual Conference in Fuhu, Fuhu University, Japan, August 4-6.2003.
- [۱۴] K. Kim, J. Nam, Y. Tak, "An Equivalent Circuit Model for Ionic Polymer-Metal Composites and Their Performance Improvement by a Clay-Based Polymer Nano-Composite Technique," J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.14, October 2003.
- [۱] Byungkyu K., Sunghak L., Jong H., "Design and Fabrication of a Locomotive Mechanism for Capsule-Type Endoscopes Using Shape Memory Alloys SMAs," IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 10, NO. 1, FEBRUARY 2005.
- [۲] Dario P, Menciassi A, et al., "Modeling and Experiments on a Legged Microrobot Locomoting in a Tubular, Compliant and Slippery Environment", The International Journal of Robotics Research, Vol. 25, No. 5-6, May-June 2006.
- [۳] Dario P, Menciassi A, et al. "Teleoperated endoscopic capsule equipped with active Locomotion system" Patent No. WO 2005082248.
- [۴] Zvi Fireman, D Paz, Y Kopelman, "Capsule endoscopy: Improving transit time and Image view," World Journal of Gastroenterology, 2005;11(37):5863-5866.
- [۵] N.R. Tas, C. Gui, and M. Elwenspoek, "Static Friction in Elastic Adhesive MEMS Contacts, Models and Experiment," IEEE, 2000.
- [۶] K. Fuller, D. Tabor, "The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids", Proc. R. Soc. Lond. A., vol. 345, pp.327-342.1975.
- [۷] Y. Rollet, S. Regnier and J. Guinot, "Dynamical model for the micro-Manipulation by adhesion: experimental validations for determined conditions," Journal of Micromechatronics, Vol. 1, No. 4, pp. 273-297, 2002.