



مدل سازی دینامیکی منیپولیشن جهت ساخت تجهیزات میکرو/نانو با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره

معین طاهری^{*1}

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

* اراک، صندوق پستی 3815688349، m-taheri@araku.ac.ir

کلیدواژگان

ساخت تجهیزات میکرو/نانو
منیپولیشن سه بعدی
مدل سازی دینامیکی
مدل اصطکاکی لاگره

چکیده

فرایند نانومنیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، از روش‌هایی جدید در ساخت و تولید تجهیزات مختلف در مقیاس میکرو/نانو می‌باشد. این فرایند امروزه به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته است. به دلیل دقت بسیار بالایی که در ساخت تجهیزات مقیاس میکرو/نانو وجود دارد، مدل سازی دقیق این فرایند تأثیر مهمی بر ساخت این تجهیزات خواهد داشت. همچنین به دلیل هزینه‌های بالای استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در ساخت تجهیزات میکرو/نانو، ضروری است که ابتدا مدل سازی این فرایند به دقت انجام شده و سپس وارد حوزه‌های ساخت شد. تاکنون محققین بسیاری به مدل سازی فرایند منیپولیشن پرداخته‌اند که بیشتر تحقیقات آن‌ها در رابطه با منیپولیشن دوبعدی و استفاده از مدل‌های ساده اصطکاکی صورت گرفته است. از آنجاکه منیپولیشن واقعی در ساخت تجهیزات میکرو/نانو در محیط سه بعدی صورت می‌پذیرد و همچنین باتوجه به این‌که با گذر از دنیای ماکرو به محیط میکرو/نانو نیروهای سطحی از جمله اصطکاک نقش مهمی دارند، لذا در این مقاله برای اولین بار از مدل اصطکاکی دقیق لاگره در مدل سازی منیپولیشن سه بعدی استفاده شده است. نتایج به دست آمده حکایت از کاهش نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره نسبت به مدل‌های ساده اصطکاکی دارند، که این امر باتوجه به این‌که مدل لاگره به سطح واقعی تماس پرداخته، درحالی‌که سایر مدل‌ها سطح ظاهری تماس را دربر می‌گیرند، قابل توجیه است. همچنین مقایسه نتایج سه بعدی به دست آمده با نتایج دوبعدی موجود نشان از افزایش نیرو و زمان بحرانی سه بعدی داشته که باتوجه به افزایش سطح تماس دلیلی بر صحت مدل سازی انجام شده می‌باشد.

Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model

Moein Taheri^{*}

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

* P.O.B. 3815688349, Arak, Iran, m-taheri@araku.ac.ir

Keywords

Micro/nano-devices manufacturing
3D nanomanipulation
Dynamic modeling
LuGre friction model

Abstract

Nanomanipulation process using atomic force microscopy is one of the new methods in manufacturing. This process has been seriously considered by researchers. Due to very high precision in the manufacture of devices for micro/nano-exist, accurate modeling process will have a significant impact on the construction of the devices. Also, due to the high cost of using atomic force microscopy manufacturing micro/nano-devices, it is necessary to first model this process was carefully done and then enters the construction areas. So far, many researchers have focused on modeling manipulation, most of their research, in conjunction with the 2D manipulation and been made using simple models of friction. Since the real manipulation in micro/nano-devices manufacturing is done in 3D environment and also given that the transition from the macro to the micro/nano, surface forces such as friction are important, therefore, in this paper, for the first time, LuGre friction model, in 3D manipulation modeling has been used. The results, indicating a decrease critical force and time manipulation using LuGre friction model versus the simple models, this is due to the fact that the LuGre friction model contained actual contact area, while other models involve nominal contact surface. Also, compare the 3D results obtained by 2D results show an increase in critical force and time that was due to the increase in surface area is proof of the accuracy of modeling.

Keywords

1- مقدمه

تحقیقات نانوتکنولوژی در حوزه‌ی ساخت تجهیزات میکرو/نانو در راستای دو مسیر هم‌گرا حرکت می‌کنند که عبارت از

Please cite this article using:

M. Taheri, Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 45-53, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مدل‌سازی منیپولیشن در پیش‌بینی نتایج تجربی به میزان زیادی به‌دقت مدل اصطکاکی مورد استفاده وابسته است.

نوسونوفسکی و بوشان [12] مکانیزم‌های مختلفی از اصطکاک جامد-جامد و جامد-مایع را مطالعه نموده‌اند. کرسمیکر و هسن [13]، تغییر شکل‌های استاتیکی سطح در مقیاس نانومتر را به‌وسیله نوک ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده‌اند. فالوو و سوپرفاین [14] آزمایش‌هایی کردند که در آن‌ها نیروهای جانبی منیپولیشن ذرات کوچک میان سطوح اندازه‌گیری می‌شود و نشان می‌دهد که اصطکاک در مقیاس نانومتر بدون فرایند سایش رخ داده و یک خاصیت ذاتی از سطح تماس ویژه است. تامب و بوشان [15]، نیز وابستگی اصطکاک در مقیاس نانو به سرعت را برای نخستین بار در گستره‌ی وسیعی از سرعت‌های بین 1 میکرومتر بر ثانیه تا 10 میلی‌متر بر ثانیه و جهت پویای طول‌های زیادی از 2 تا 25 میکرومتر بررسی کردند.

با توجه به آنچه که ذکر شد، مشخص می‌گردد که استفاده از مدل اصطکاکی دقیق در مقیاس میکرو/نانو امری ضروری می‌باشد، که اکثر کارهای گذشته بر پایه‌ی تئوری‌های دوبعدی منیپولیشن بوده و استفاده از مدل‌های ساده‌ی اصطکاکی صورت پذیرفته است. از این‌رو در این مقاله در بخش مدل‌سازی ابتدا به برخی مدل‌های دقیق اصطکاکی قابل کاربرد در مقیاس میکرو/نانو پرداخته شده، سپس الگوریتم مدل‌سازی دینامیکی منیپولیشن تشریح شده و به استخراج معادلات دینامیک سه‌بعدی نانومنیپولیشن پرداخته شده است.

در بخش شبیه‌سازی، نیز شبیه‌سازی سه‌بعدی نانومنیپولیشن با استفاده از مدل اصطکاکی دقیق لاگره صورت پذیرفته است تا نتایج مدل‌سازی حاصل از تئوری هر چه بیشتر به نتایج حاصل از نانومنیپولیشن واقعی جهت ساخت دقیق تجهیزات مقیاس میکرو/نانو نزدیک گردند. در انتهای بخش شبیه‌سازی نیز مقایسه‌ای بین نتایج مدل سه‌بعدی به دست آمده و مدل‌های دوبعدی موجود صورت پذیرفته است.

2- مدل‌سازی

در بخش مدل‌سازی در ابتدا به بررسی مدل‌های اصطکاکی مهم و دقیق کاربردی در مقیاس میکرو/نانو پرداخته، سپس الگوریتم مدل‌سازی دینامیکی منیپولیشن را تشریح نموده و در آخر معادلات دینامیکی منیپولیشن سه‌بعدی بیان شده‌اند.

2-1- بررسی مدل‌های اصطکاکی دقیق

کشف اصطکاک به‌طور مستقل توسط لئوناردو داوینچی و

تکنیک‌های ساخت از بالا به پائین¹ و پائین به بالا² هستند و هر دو روش به نانورباتیک وابسته‌اند [1-3]. روش ساخت از بالا به پائین که دقیقاً به منیپولاتور وابسته است، مستلزم برداشتن و کنار گذاشتن مقادیر کوچکی از ماده توسط منیپولاتور نانوربات بوده و در محدوده نانولیتوگرافی قرار می‌گیرد. روش پائین به بالا، با قرار دادن اتم‌ها و مولکول‌ها در موقعیت مکانی مورد نظر اقدام به ساختن ساختارهای نانو/میکرونی می‌شود و به دو طریق انجام می‌گیرد:

1) خودمونتاژی

2) استفاده از منیپولاتور نانوربات

در روش خود مونتاژی از تغییرات طبیعی بر اساس شیمی سنتی و فرایند بالک استفاده می‌شود و در روش دوم اجزایی در ابعاد نانومتری با استفاده مستقیم از نیرو، میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و ... به‌صورت کنترل شده در محل مورد نظر قرار می‌گیرند [4-6].

در سال‌های اخیر میکروسکوپ نیروی اتمی به‌صورت یک منیپولاتور نانوربات به‌عنوان یک ابزار اساسی برای جابه‌جایی نانوذرات و ساخت اجسام مورد نظر از اتم‌ها و مولکول‌ها به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است [7،8]. مدل‌سازی منیپولیشن ابزار اساسی برای جابه‌جایی دقیق و کنترل شده‌ی اجسام و ذرات در مقیاس میکرو/نانو می‌باشد.

مدل‌های اصطکاکی مناسب جهت کاربرد در منیپولیشن دوبعدی در مقیاس میکرو/نانو توسط کورایم و همکارانش [9] ارائه شده است. آن‌ها معادلات دینامیکی منیپولیشن دوبعدی را استخراج نموده و معادلات دینامیکی سیستم را با استفاده از مدل‌های اصطکاکی دقیق‌تر شبیه‌سازی نموده‌اند. همچنین کورایم و همکارانش [10] به توسعه و مدل‌سازی منیپولیشن دوبعدی در محیط مایع و با استفاده از مدل اصطکاکی ساده‌ی کولمب پرداخته‌اند. طاهری [11] برای نخستین بار به مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک سه‌بعدی حرکت نانوذرات بیولوژیکی با استفاده از مدل اصطکاکی ساده‌ی کولمب پرداخته است.

از آنجاکه با کاهش اندازه و گذر از دنیای ماکرو به جهان میکرو/نانو نسبت سطح به حجم افزایش یافته و نیروهای سطحی، مانند اصطکاک و چسبندگی مهم‌تر شده است، لذا مدل‌های اصطکاکی گوناگونی برای در نظر گرفتن شرایط واقعی حرکت در مقیاس نانو ارائه شده است. مدل‌سازی منیپولیشن و اصطکاک به‌طور بنیادی به هم وابسته‌اند. در حقیقت موفقیت

¹ Top-Down

² Bottom-Up

$$\alpha = \left(\frac{\sigma}{R}\right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{(R\sigma)^{1/2}}{b} \quad (4)$$

لذا نیروی برشی کلی با انتگرال گیری از نیروی برشی هر برجستگی روی تابع چگالی احتمال بدین صورت به دست می آید.

$$F = N \int_{\bar{a}}^{\infty} F_f \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \quad (5)$$

توجه شود که مقادیر نیروی مماسی به کاررفته (F) کمتر از مقدار داده شده در معادله (5) است. توزیع نیروهای عمودی و مماسی در برجستگی‌ها ممکن است سبب شود که برخی برجستگی‌ها بلغزند، درحالی که دیگر برجستگی‌ها به لغزش ادامه می‌دهند. باین وجود، هنگامی که F به مقدار داده شده در معادله (5) می‌رسد، تمام برجستگی‌های تماسی در اثر لغزش کلی خواهند لغزید. در یک شکل بی‌بعد، نیرو برحسب هر برجستگی با به کارگیری معادلات (1) و (5) بدین صورت به دست می آید [17].

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \frac{F}{N G b^2} = 2\pi \bar{\tau}_{f1} \int_{\bar{a}}^{\bar{z}_1} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} + \\ &+ 2\pi 10^B \int_{\bar{z}_1}^{\bar{z}_2} \bar{a}^{M+2} \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\ &+ 2\pi \bar{\tau}_{f2} \int_{\bar{z}_2}^{\infty} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \end{aligned} \quad (6)$$

مدل کارلسون و باتیستا²: این مدل یک مدل کششی/فشاری اصطکاک نانو می‌باشد که در آن می‌توان روابط (7-8) را نوشت:

$$\ddot{x} + x = Vt - f_1 \quad (7)$$

$$f_1 = \begin{cases} (-\infty, \theta) & \text{for } \dot{x} = 0 \\ \theta + \beta \dot{x} & \text{for } \dot{x} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\theta(1-\theta)}{\tau} - \alpha \theta \dot{x} \quad (9)$$

که V سرعت مطلوب فشاری/کششی، t زمان، τ ، α و β پارامترهای ثابت هستند. موقعیت و سرعت شیء تحت فشار/کشش به ترتیب با x و \dot{x} مشخص شده است. متغیر حالت θ نیز در این مدل حالت روغن کاری در سطح تداخلی تماس را نشان می‌دهد. هنگامی که $\theta = 1$ است، روغن کاری در حالت کاملاً جامد (فاز غلطش) است. به عبارت دیگر هنگامی که $\theta = 0$ است، روغن کاری در حالت کاملاً سیال (فاز لغزش) می‌باشد. این مدل تغییرات تابع تعریف شده f_1 را به کار می‌برد تا به عاملیت لغزش- غلطش برسد. در این مدل عامل اتلافی اصطکاک به روش مشابهی با مدل اصطکاکی کولمب با افزودن

آمونتون صورت گرفت. امروزه به دلیل نیاز به ساخت ابزارهای کوچک در مقیاس میکرو/نانو مطالعه‌ی اصطکاک بعد تازه‌ای یافته است. در این بخش به برخی از انواع مدل‌های اصطکاک پرداخته شده است.

مدل اصطکاک کولمب: مدل‌های کلاسیک اصطکاک [16]، از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند، که هر یک جنبه‌ای از نیروی اصطکاک را در بر می‌گیرند. ایده‌ی اصلی این است که اصطکاک مخالف حرکت است و مقدار آن مستقل از سرعت و سطح تماس است و نیروی اصطکاک F_c متناسب با نیروی عمودی سطح است، یعنی $F_c = \mu F_N$. این توصیف از اصطکاک همان اصطکاک کولمب است. توجه شود که این مدل یک مدل واقعاً ایده‌آل است. مدل اصطکاکی کولمب تعریفی برای نیروی اصطکاک در سرعت صفر ندارد. این مقدار ممکن است صفر و یا هر مقداری بین $-F_c$ و F_c داشته باشد. مدل اصطکاکی کولمب، به دلیل سادگی آن، اغلب برای بیان اصطکاک به کار می‌رود.

مدل GW: مدل گرینوود و ویلیامز¹ یک تماس چند برجستگی از دو سطح زیر واقعی را تشریح می‌کند. در مدل GW هنگامی که دو سطح واقعی با فاصله‌ی d جدا شده‌اند، تعداد برجستگی‌های تماسی n می‌تواند از معادله‌ی (1) استخراج شود.

$$n = N \int_{\bar{a}}^{\infty} \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \quad (1)$$

که N تعداد کل برجستگی‌ها، σ انحراف استاندارد ارتفاع قله‌ی برجستگی‌ها، $\bar{z} = z/\sigma$ ارتفاع بی‌بعد اندازه‌گیری شده از میانگین ارتفاع برجستگی‌ها، $\varphi(\bar{z})$ چگالی احتمالی قله‌ی برجستگی‌ها و $\bar{d} = d/\sigma$ فاصله‌ی جدایش بی‌بعد بین دو سطح می‌باشد. رابطه‌ی کلی بین نیروی عمودی P و تغییر شکل دو برجستگی کروی u در تئوری تماسی هرترز با $P = (4/3)E^* R^{1/2} u^{3/2}$ داده شده است، که R شعاع ترکیبی انحنای نوک برجستگی‌ها و E^* مدول یانگ ترکیبی دو سطح است.

با فرض این که یکی از سطوح صاف و صلب است مدول یانگ برابر خواهد شد با $E^* = E/(1-\nu^2)$ و مدول برشی مؤثر $G^* = 2G$ می‌شود. لذا مدل GW یک نیروی عمودی بی‌بعد برحسب هر برجستگی بین دو سطح بدین صورت می‌دهد.

$$\bar{P} = \frac{P}{N G b^2} = \frac{8 \alpha \beta^2}{3(1-\nu)} \int_{\bar{a}}^{\infty} (\bar{z} - \bar{d})^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \quad (2)$$

در معادله‌ی (2) دو پارامتر سطح بی‌بعد α و β بدین صورت تعریف شده‌اند.

² Carlson and Batista

¹ Greenwood and Williamson

متغیر حالت θ به دست می‌آید [18].

مدل‌های پرسون¹: این مدل‌ها نیز یک سری مدل‌های کششی/فشاری اصطکاک نانو می‌باشند، که در مدل اول می‌توان روابط (10-12) را نوشت:

$$\ddot{x} + x = V t - f_2 \quad (10)$$

$$f_2 = F_c + (F_s - F_c) \theta + \beta \dot{x} \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\theta(1-\theta)}{\tau} - \alpha \theta \dot{x} \quad (12)$$

V سرعت مطلوب فشاری/کششی، t زمان، τ ، α و β پارامترهای ثابت هستند.

موقعیت و سرعت شیء تحت فشار/کشش به ترتیب با x و \dot{x} مشخص شده است. متغیر حالت θ نیز در این مدل حالت روغن‌کاری در سطح تداخلی تماس را نشان می‌دهد. هنگامی که $\theta = 1$ است، روغن‌کاری در حالت کاملاً جامد (فاز غلطش) است. به عبارت دیگر هنگامی که $\theta = 0$ است، روغن‌کاری در حالت کاملاً سیال (فاز لغزش) می‌باشد. این مدل تغییرات تابع تعریف شده f_2 را به کار می‌برد تا به عاملیت لغزش - غلطش برسد. در این مدل عامل اتلافی اصطکاک به روش مشابهی با مدل اصطکاکی کولمب با افزودن متغیر حالت θ به دست می‌آید [19].

در مدل دوم روابط (13-15) را می‌توان نوشت:

$$\ddot{x} + x = V t - f_3 \quad (13)$$

$$f_3 = F_c + (F_s - F_c) \theta + \beta \dot{x} \quad (14)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\theta(1-\theta)}{\tau} (-\ln(1-\theta))^{2/3} - \alpha \theta \dot{x} \quad (15)$$

این مدل تغییرات تابع تعریف شده f_3 را به کار می‌برد تا به عاملیت لغزش - غلطش برسد [19].

در مدل سوم نیز می‌توان روابط (16-18) را نوشت:

$$\ddot{x} + x = V t - f_4 \quad (16)$$

$$f_4 = F_c + (F_s - F_c) (1 - e^{-(\theta/\tau)}) + \beta \dot{x} \quad (17)$$

$$\dot{\theta} = 1 - \theta \dot{x}/D \quad (18)$$

مدل نیز تغییرات تابع تعریف شده f_4 را به کار می‌برد تا به عاملیت لغزش - غلطش برسد [19].

مدل لاگره: مدل لاگره توسط کانوداس دی ویت و همکارانش² [20]، پیشنهاد شده است. اثر استریک³ در این مدل در نظر گرفته شده است که یک اثر غیر ثابت در سرعت‌های بسیار پایین تولید می‌کند. این مدل شامل یک متغیر حالت به نمایندگی از میانگین تغییر شکل الاستیک زبری است که

تجسمی از صفحات تماسی می‌باشند. نتایج مدل به خوبی بیشتر رفتارهای شناخته شده اصطکاک، به طور مثال، جابه‌جایی پیش‌لغزش، تأخیر اصطکاکی، نیروهای گسیختگی متنوع و حرکت لغزش-غلتش را نشان می‌دهد. با این وجود رفتار هیستریزیس با حافظه‌ی غیرمحلی بین نیروی به کار رفته و جابه‌جایی در روش پیش‌لغزش که در انواع مختلف تماس‌ها اندازه‌گیری شده است، با این روش قابل محاسبه نیست. مدل لاگره از یک حالت غیرخطی (معادله (19)) و نیروی اصطکاکی لاگره F_f (معادله (20)) تشکیل شده است.

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \quad (19)$$

$$F_f = \sigma_0 + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (20)$$

که در معادله (19)، v سرعت نسبی بین سطوح لغزنده است و z متغیر حالت بوده که میانگین تغییر شکل زبری‌ها را نشان می‌دهد. در معادله (20) نیز σ_0 سختی معادل برای رابطه‌ی موقعیت نیرو در سرعت معکوس، σ_1 ضریب اصطکاکی میکرو ویسکوز و σ_2 ضریب اصطکاکی ویسکوز است. تداخل بین دو سطح به عنوان دو جسم صلب فرض شده است که تماس از میان زبری‌های الاستیک است که شبیه فنرهایی تغییر شکل داده و باعث شده نیروی اصطکاکی به عنوان یک نیروی مماسی به کار گرفته شود.

همچنین در معادله (19)، تابع $g(v)$ یک تابع مثبت است که رفتار سرعت ثابت را مدل می‌کند و وابسته به برخی فاکتورها مانند خواص مواد، روغن‌کاری و درجه‌ی حرارت است. برای حرکت حالت پایا، رابطه‌ی بین نیروی اصطکاکی و سرعت در مدل لاگره در شکل 1 نشان داده شده است. تابع $g(v)$ که پیشنهاد شده است تا اثر استریک را شرح دهد، بدین صورت است.

$$\sigma_0 g(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2} \quad (21)$$

که در معادله (21)، F_c نیروی اصطکاکی کولمب، F_s نیروی استیکشن⁴ و v_s سرعت استریک است.

مدل لاگره یک توصیف مناسب از رفتار سرعت ثابت می‌دهد و یک گذار ملایم در سرعت معکوس ارائه می‌دهد ولی خواص مدل‌سازی در روش پیش‌لغزش محدود به موارد ذیل است.

(1) مدل در پیش‌لغزش خیلی پراکنده است.

(2) شکل منحنی گذار با ساختار مدل ثابت است و

نمی‌تواند با مقادیر اندازه‌گیری واقعی تطبیق داده شود.

¹ Persson

² Canudas de Wit et al.

³ Stribeck

⁴ Stiction

پس از استخراج معادلات دینامیکی، با استفاده از مدل دقیق اصطکاکی لاگره نیروهای وارد بر ذره از طرف تیرک با نیروهای اصطکاکی مقایسه می‌گردد تا جایی که با غلبه‌ی این نیروها بر اصطکاک، ذره شروع به حرکت نماید. با آغاز شروع به حرکت ذره، نیرو و زمان بحرانی به دست آمده و با توجه به آن‌ها می‌توان ذره را به موقعیت هدف جهت ساخت تجهیز مقیاس میکرو/نانوی مورد نظر رساند.

شکل 3 شماتیکی از تماس بین ذره، سوزن و صفحه‌ی مینا را نشان می‌دهد که مدل اصطکاکی به کار رفته در بخش تماس بین سطح مینا و ذره در نظر گرفته شده است.

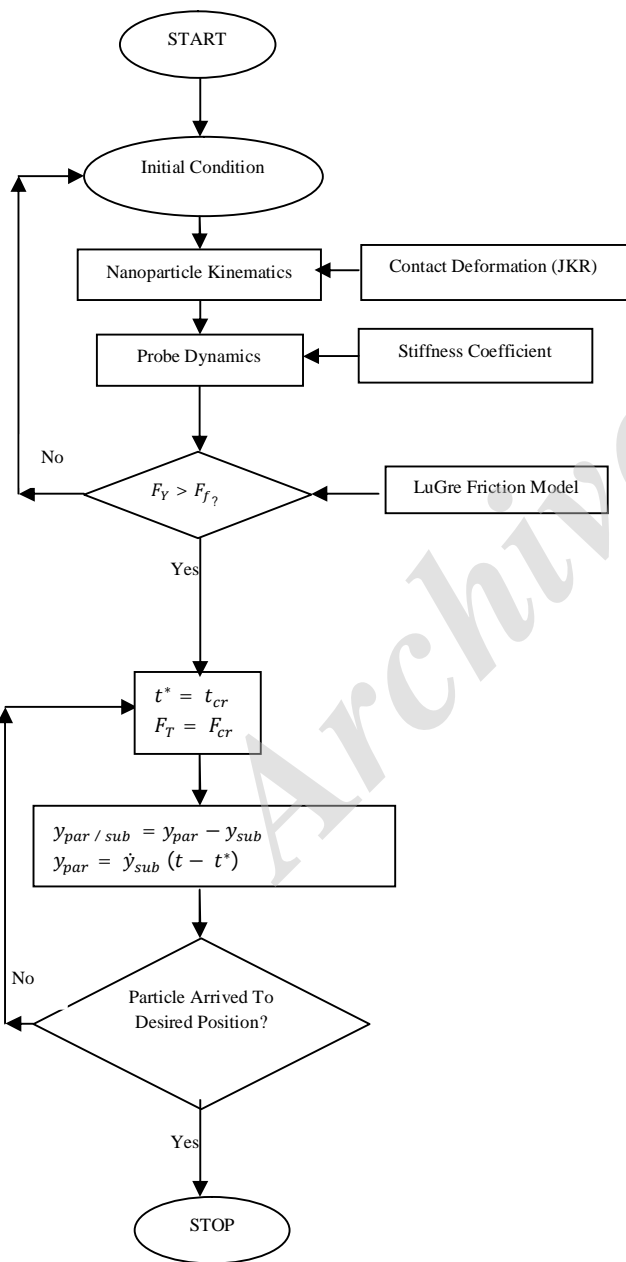


Fig. 2 3D manipulation algorithm by using LuGre friction model
 شکل 2 الگوریتم منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره

مقادیر و ضرایب به کار رفته برای مدل اصطکاکی لاگره در جدول (1) ارائه شده است.

جدول 2 نیز مقایسه‌ای کلی بین مدل‌های اصطکاکی مختلف و مهم‌ترین مزایا و معایب مدل‌ها را نشان می‌دهد.

2-2- الگوریتم نانومنیپولیشن سه‌بعدی جهت ساخت تجهیزات میکرو/نانو

شکل 2 الگوریتم کلی منیپولیشن سه‌بعدی را نشان می‌دهد. با توجه به این الگوریتم، ابتدا بایستی شرایط اولیه منیپولیشن از جمله موقعیت، سرعت و شتاب تیرک و میکرو/نانوذره‌ی هدف جهت جابه‌جایی به منظور ساخت تجهیز مورد نظر مشخص گردد. پس از آن با استفاده از مدل تماسی مناسب، معادلات سینماتیکی استخراج شده و با توجه به نوع تیرک مورد استفاده و ماتریس سختی آن، معادلات دینامیکی منیپولیشن به دست می‌آید.

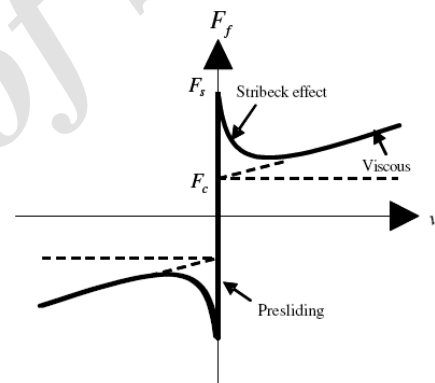


Fig. 1 Characteristics of friction force versus speed in LuGre friction model

شکل 1 مشخصه‌های منحنی نیروی اصطکاکی برحسب سرعت در مدل اصطکاکی لاگره [20]

جدول 1 مقادیر به کار رفته در مدل اصطکاکی لاگره

σ_0	σ_1	σ_2	F_c	F_s	v_s
1×10^5	1.5×10^{-6}	0	6×10^{-10}	1×10^{-9}	1×10^{-5}

جدول 2 مزایا و معایب مدل‌های مختلف اصطکاکی

معایب	مزایا	نام مدل
دقت پایین	سادگی	Coulomb
وابستگی به تابع احتمال	در نظر گرفتن زبری	GW
دقت پایین	حالت کششی/فشاری	Carlson & Batista
دقت پایین	حالت کششی/فشاری	Persson
پیچیدگی حل مسأله	در نظر گرفتن اثر استریک	LuGre

شده، با بهره گیری از مدل اصطکاکی لاگره، به بررسی لغزش و غلتش نانوذره حول محورهای x و y پرداخته شده است.

شکل های 4 و 5 نمودار مربوط به لغزش ذرات حول محورهای x و y را با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره نشان می دهند. نیروی بحرانی لغزش (F_{cr}) در راستای محورهای x و y به ترتیب برابر با $444 \mu N$ و $403 \mu N$ می باشد. همچنین زمان بحرانی منیپولیشن (T_{cr}) در راستای محورهای x و y به ترتیب برابر با 0.277 sec و 0.623 sec می باشد. مقایسه نتایج این دو شکل بیانگر این است که لغزش ذرات در راستای محور x به نیروی بیشتری نیاز داشته ولی در زمان سریع تری رخ می دهد، لذا می توان نتیجه گیری نمود که در منیپولیشن سه بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره، در هنگام وقوع فاز لغزش، ابتدا لغزش در راستای محور x رخ خواهد داد.

همچنین شکل های 6 و 7 نمودار مربوط به غلتش ذرات حول محورهای x و y را با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره نشان می دهند.

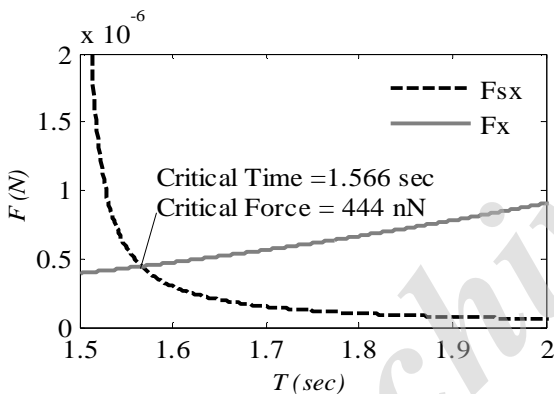


Fig. 4 Sliding critical force and time for particles around the x-axis

شکل 4 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذرات حول محور x

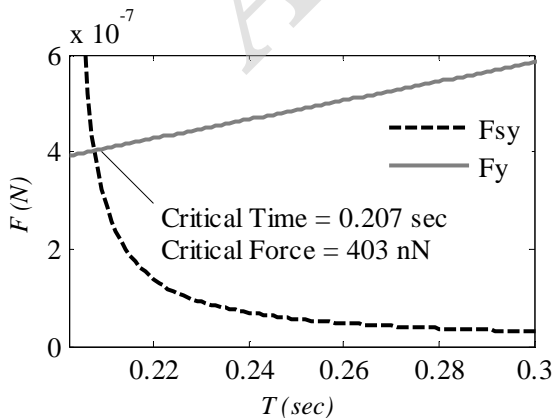


Fig. 5 Sliding critical force and time for particles around the y-axis

شکل 5 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذرات حول محور y

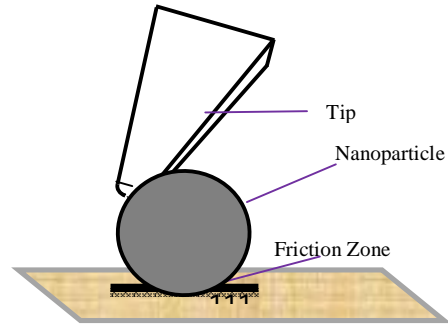


Fig. 3 Schematic of contacts between particles, tip and substrate

شکل 3 شماتیکی از تماس بین ذره، سوزن و صفحه ی مینا

3-2- معادلات نهایی دینامیکی منیپولیشن سه بعدی

معادلات نهایی دینامیکی سه بعدی منیپولیشن در روابط (22) تا (24) ذکر شده اند [11]:

$$F_x = F_x + m(\ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi) + \frac{H\ddot{\alpha} \cos \alpha - H\dot{\alpha}^2 \sin \alpha}{2} \quad (22)$$

$$F_z = F_z \cos^2 \alpha + \cos^2 \alpha (\ddot{z}_s - \ddot{\delta}_t \sin \varphi - \ddot{\delta}_s - H\ddot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta - H(\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos \alpha \cos \theta) + \left(\frac{-H\ddot{\theta} \cos \alpha \sin \theta}{2} \right) + \left(\frac{I_p \ddot{\alpha} + M_\alpha}{H} \right) \sin \theta + F_x \sin \alpha \cos \alpha \quad (23)$$

$$F_y = F_y \sin^2 \theta + m \sin^2 \theta (\ddot{y}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi) + \frac{-H\ddot{\theta} \cos \theta + H\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} + \left(\frac{I_p \ddot{\theta} + M_\theta}{H} \right) \cos \theta - F_z \sin \theta \cos \theta \quad (24)$$

3-3 شبیه سازی سه بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره

در این بخش ابتدا به شبیه سازی منیپولیشن سه بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره پرداخته شده و لغزش و غلتش این ذرات حول محورهای x و y مورد بررسی قرار گرفته است. پس از آن جهت بررسی صحت نتایج، نتایج سه بعدی به دست آمده در این مقاله با نتایج دوبعدی موجود در کارهای گذشته مقایسه شده است.

3-3-1 منیپولیشن سه بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره

در این بخش از مقاله به شبیه سازی منیپولیشن سه بعدی ذرات با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره پرداخته شده و نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن محاسبه شده است. برای این منظور با توجه به معادلات دینامیکی استخراج

خواهد داد، غلتش این ذرات حول محور y در زمان 0.053 sec و با نیرویی معادل $107 \mu\text{N}$ می باشد.

3-2- مقایسه و بررسی صحت نتایج

در این بخش به بررسی صحت نتایج به دست آمده با استفاده از مقایسه نتایج به دست آمده در این مقاله جهت مینیپولیشن سه بعدی ذرات با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره و نتایج موجود در مرجع [9] که در آن سه مدل اصطکاکی کولمب، اچ کا و لاگره جهت مینیپولیشن دوبعدی نانوذرات طلا مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند، پرداخته شده است.

شکل 8 نمودار مربوط به لغزش ذرات طلا حول محور y در دو بعد را با استفاده از مدل های مختلف اصطکاکی نشان می دهند. نیروی بحرانی (F_{cr}) و زمان بحرانی (T_{cr}) برای ذرات طلا در دو بعد با استفاده از مدل لاگره به ترتیب برابر با $4 \mu\text{N}$ و 0.495 sec می باشد که در مقایسه با شکل 4، نیروی بحرانی به دست آمده اختلاف حدود 18 درصدی در نتایج سه بعدی نسبت به دوبعدی را نشان می دهد که دلیلی بر صحت نتایج به دست آمده می باشد.

4- نتیجه گیری

استفاده از مدل اصطکاکی دقیق لاگره برای نخستین بار در مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی مینیپولیشن سه بعدی نانوذرات جهت ساخت تجهیزات مقیاس میکرو/نانو در این مقاله بررسی شده است. برای این منظور پس از بررسی مدل های مهم اصطکاکی قابل کاربرد در مقیاس میکرو/نانو، به ارائه الگوریتم مدل سازی سینماتیک پرداخته شده است.

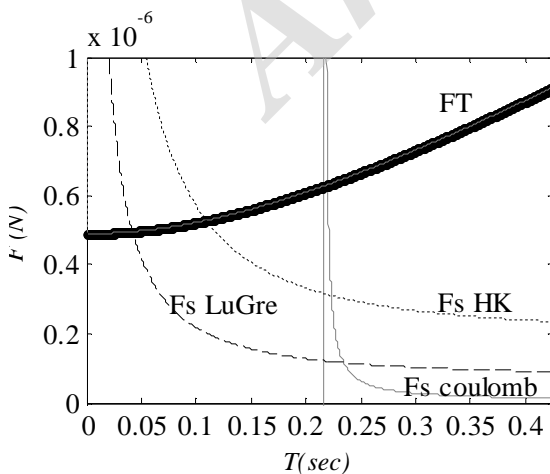


Fig. 8 Sliding critical force and time for Au particles in 2-D around the y-axis [9]

شکل 8 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذرات طلا در دو بعد حول محور y [9]

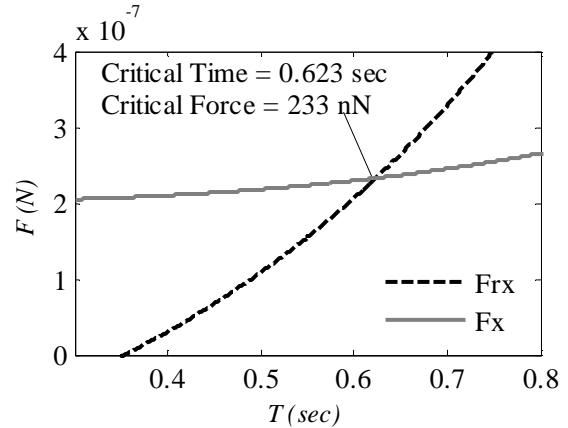


Fig. 6 Rolling critical force and time for particles around the x-axis

شکل 6 نیرو و زمان بحرانی غلتش ذرات حول محور x

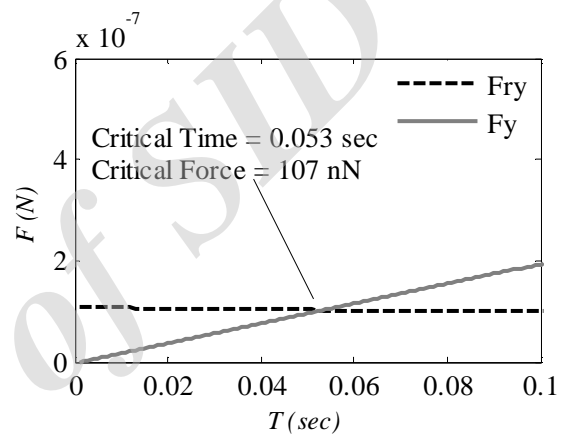


Fig. 7 Rolling critical force and time for particles around the y-axis

شکل 7 نیرو و زمان بحرانی غلتش ذرات حول محور y

نیروی بحرانی (F_{cr}) حول محورهای x و y به ترتیب برابر با $233 \mu\text{N}$ و $107 \mu\text{N}$ می باشد. همچنین زمان بحرانی مینیپولیشن (T_{cr}) حول محورهای x و y به ترتیب برابر با 0.623 sec و 0.053 sec می باشد.

مقایسه نتایج این دو شکل بیانگر این است که غلتش ذرات حول محور x به نیروی بیشتری نیاز داشته و در زمان دیرتری رخ می دهد، لذا می توان نتیجه گیری نمود که در مینیپولیشن سه بعدی در هنگام وقوع فاز غلتش، ابتدا غلتش در راستای محور y رخ خواهد داد.

نتیجه گیری کلی از مقایسه شکل های 4 تا 7 بیانگر این امر است که در مینیپولیشن سه بعدی ذرات با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره، پدیده های که احتمال وقوع آن بسیار کمتر می باشد، لغزش ذرات در راستای محور x است که در زمان 1.566 sec و با نیرویی معادل $444 \mu\text{N}$ رخ خواهد داد. همچنین اولین پدیده های که در زمان سریع تر و با نیروی کمتری رخ

M_θ	گشتاور پیچشی تیرک حول محور z
N	تعداد کل برجستگی‌ها
n	تعداد برجستگی‌های تماسی
P	نیروی عمودی
R	شعاع ترکیبی انحنای نوک برجستگی‌ها
V	سرعت مطلوب فشاری/کششی
v_s	سرعت استریک
u	تغییر شکل دو برجستگی کروی
x	موقعیت شیء تحت فشار/کشش
\dot{x}	سرعت شیء تحت فشار/کشش
x_p	موقعیت انتهای سوزن در راستای محور x
x_s	موقعیت ذره بر صفحه‌ی مبنا در راستای محور x
x_t	موقعیت نوک سوزن در راستای محور x
y_p	موقعیت انتهای سوزن در راستای محور y
y_s	موقعیت ذره بر صفحه‌ی مبنا در راستای محور y
y_t	موقعیت نوک سوزن در راستای محور y
\bar{z}	ارتفاع بی‌بعد اندازه‌گیری شده از میانگین ارتفاع برجستگی‌ها
z_p	موقعیت انتهای سوزن در راستای محور z
z_s	موقعیت ذره بر صفحه‌ی مبنا در راستای محور z
z_t	موقعیت نوک سوزن در راستای محور z
α	پارامتر سطح بی‌بعد
β	پارامتر سطح بی‌بعد
δ_s	عمق نفوذ نانوذره در صفحه‌ی مبنا
δ_t	عمق نفوذ نانوذره در سوزن
σ	انحراف استاندارد ارتفاع قله‌ی برجستگی‌ها
σ_0	سختی معادل برای رابطه‌ی موقعیت نیرو در سرعت معکوس
σ_1	ضریب اصطکاکی میکرو ویسکوز
σ_2	ضریب اصطکاکی ویسکوز
$\varphi(\bar{z})$	چگالی احتمالی قله‌ی برجستگی‌ها

6- مراجع

- [1] A. A. G. Requicha, Nanorobotics, in S. Nof, Ed. *Handbook of Industrial Robotics*, New York: John Wiley & Sons, 2nd ed., pp. 199-210, 1999.
- [2] N. C. Santos, M.A.R.B. Castanho, An Overview of the Biophysical Applications of Atomic Force Microscopy, *Biophysical Chemistry*, Vol. 107, pp.

در انتهای بخش مدل‌سازی نیز به تشریح روابط دینامیکی منیپولیشن در سه بعد پرداخته شده است. این مقاله به منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره پرداخته است، ولی در ادامه‌ی کار می‌توان منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از سایر مدل‌های اصطکاکی را نیز مورد بررسی قرار داد. پس از مدل‌سازی، نیز به شبیه‌سازی فازهای لغزشی و غلتشی نانوذرات حول محورهای x و y پرداخته شده و زمان و نیروی بحرانی منیپولیشن در بخش شبیه‌سازی محاسبه شده است. همچنین در انتهای بخش شبیه‌سازی به بررسی صحت نتایج به دست آمده پرداخته شده است.

اهم نتایج کلی به دست آمده در این مقاله به شرح زیر است:
- نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پدیده‌ای که احتمال وقوع آن بسیار کمتر می‌باشد، لغزش ذرات در راستای محور x می‌باشد.

- نتایج به دست آمده بیانگر این امر است که اولین پدیده‌ای که در زمان سریع‌تر و با نیروی کمتری رخ خواهد داد، غلتش نانوذرات حول محور y می‌باشد.

- مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات قبلی بیانگر اختلاف 18 درصدی در نیروی بحرانی به دست آمده در نتایج سه‌بعدی نسبت به دوبعدی می‌باشد.

5- فهرست علائم

d	فاصله‌ی جدایش بین دو سطح
\bar{d}	فاصله‌ی جدایش بی‌بعد بین دو سطح
E^*	مدول یانگ ترکیبی دو سطح
F_f	نیروی اصطکاکی لاگره
F_c	نیروی اصطکاکی کولمب
F_x	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای x
F_X	نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای x
F_y	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای y
F_Y	نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای y
F_z	نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای z
F_Z	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای z
G^*	مدول برشی مؤثر
$g(v)$	تابع رفتار سرعت
H	ارتفاع سوزن
I_p	ممان اینرسی تیرک حول نقطه ابتدایی
m	جرم تیرک
M_α	گشتاور پیچشی تیرک حول محور y

- [12] M. Nosonovsky and B. Bhushan, Multiscale friction mechanisms and hierarchical surfaces in nano- and bio-tribology, *Materials Science and Engineering*, Vol. 58, pp. 162–193, 2007.
- [13] J. Kerssemakers and J. Th. M. De Hosson, A quantitative analysis of surface deformation by stick/slip atomic force microscopy, *American Institute of Physics*, Vol. 82, pp. 3763–3770, 1997.
- [14] M. R. Falvo and R. Superfine, Mechanics and friction at the nanometer scale, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 237–248, 2000.
- [15] N. S. Tambe and B. Bhushan, Friction model for the velocity dependence of nanoscale friction, *Institute of Physics Publishing, Nanotechnology*, Vol. 16, pp. 2309–2324, 2005.
- [16] H. Olsson, K. J. Åström, C. Canudas de Wit, M. Gäfvert and P. Lischinsky, Friction models and friction compensation, *European Journal of Control*, pp. 1–37, 1997.
- [17] G. G. Adams, S. Muftu, and N. M. Azhar, Scale-dependent model for multi-asperity contact and friction, *ASME Journals of Tribology*, Vol. 125, pp. 700-708, 2003.
- [18] J. M. Carlson and A. A. Batista, Constitutive relation for the friction between lubricated surfaces, *Physical Review E*, Vol. 53, pp. 4153-4157, 1996.
- [19] B. N. J. Persson, Sliding friction: physical principles and applications, *NanoScience and Technology*, Springer, pp. 80-102, 2000.
- [20] C. De Wit, H. Olsson, K. J. Astrom and P. Lischinsky, A new model for control of systems with friction", *IEEE Trans. Automation. Control.*, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425, 1995.
- [3] N. Jalili, K. Laxminarayana, A Review of Atomic Force Microscopy Imaging Systems: Application to Molecular Metrology and Biological Sciences, *Mechatronics*, Vol. 14, pp. 907–945, 2004.
- [4] D. Fotiadis, S. Scheuring, sh. A. Muller, A. Engel, D. J. Muller, Imaging and Manipulation of Biological Structures with the AFM, *Micron*, Vol. 33, pp. 385-397, 2002.
- [5] C. R. Blanchard, Atomic Force Microscopy-In the Classroom, *The Chemical Educator*, Vol. 1, No. 5, pp. 1-8, 1996.
- [6] M. Sitti, Survey of Nanomanipulation Systems, *Proc. of the IEEE-Nanotechnology Conference*, pp. 75-80, 2001.
- [7] A. A.G. Requicha, Nanorobots, NEMS and Nanoassembly, *Proc. IEEE, Special Issue on Nanoelectronics and Nanoprocessing*, Vol. 91, No. 11, pp. 1922-1933, November 2003.
- [8] R. Garcia, R. Perez, Dynamic Atomic Force Microscopy Methods, *Journal of Surface Science Reports*, Vol. 47, pp. 197-301, 2002.
- [9] M. H. Korayem, M. Taheri, and M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models, *Applied surface science*, Vol. 258, No. 18, pp. 6713-6722, 2012.
- [10] A. H. Korayem, M. Taheri, and M. H. Korayem, Dynamic Modeling and simulation of nano particle motion in different environments using AFM nano – robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 294-300, 2015. (In Persian)
- [11] M. Taheri, 3D-Dynamic modeling and simulation of biological nanoparticle motion using AFM nano– robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 311-316, 2015. (in Persian)