



# مدل سازی سه بعدی فرآیند منیپولیشن نانوذره در محیط هوا با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا

معین طاهری\*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک  
\* اراک، صندوق پستی 3815688349، m-taheri@araku.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 09 تیر 1395  
پذیرش: 22 شهریور 1395  
ارائه در سایت: 24 مهر 1395  
کلید واژگان:  
مدل اصطکاکی اچ کا  
نانوذره طلا  
جابه جایی سه بعدی  
میکروسکوپ نیروی اتمی

## چکیده

امروزه میکروسکوپ نیروی اتمی، در ساخت تجهیزات میکرو/نانو به طور گسترده ای مورد توجه محققان قرار گرفته است. برای این منظور استخراج معادلات جابه جایی و منیپولیشن میکرو/نانوذرات امری ضروری است. اگر چه نیروهای سطحی مانند اصطکاک و چسبندگی در مقیاس ماکرو قابل چشم پوشی هستند، افزایش نسبت سطح به حجم در مقیاس میکرو/نانو، آن ها را بسیار مهم می کند. از مدل های مختلف اصطکاکی برای جابه جایی دوبعدی در کارهای گذشته استفاده شده است. در این مقاله به استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا در مدل سازی و شبیه سازی دینامیک سه بعدی نانوجابه جایی جهت نزدیک تر شدن هرچه بیشتر نتایج مدل سازی به نتایج حاصل از نانوجابه جایی واقعی پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا مدل های مهم اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفته و جهت کاربرد در مقیاس میکرو/نانو توسعه یافته اند. سپس معادلات سه بعدی جابه جایی تشریح شده و ماتریس ضرایب سختی تیرک استخراج شده است و تمامی این معادلات جهت محاسبه نیرو و زمان بحرانی جابه جایی ترکیب شده اند. در انتها با شبیه سازی معادلات به دست آمده، مقادیر نیرو و زمان بحرانی جابه جایی سه بعدی برای ذره طلا با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا محاسبه شده است. نتایج به دست آمده بیانگر شروع به حرکت غلتشی ذره مورد بررسی حول محور  $x$  قبل از غلتش حول محور  $y$  و همچنین لغزش در راستای محور  $y$  قبل از لغزش در راستای محور  $x$  می باشد.

## 3D modeling of nanoparticle manipulation in air using HK friction model

Moein Taheri\*

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran  
\* P.O.B. 3815688349, Arak, Iran, m-taheri@araku.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 29 June 2016  
Accepted 12 September 2016  
Available Online 15 October 2016

**Keywords:**  
HK friction model  
Au nanoparticle  
3D-manipulation  
Atomic force microscope

### ABSTRACT

Nowadays, atomic force microscopy has widely attracted researchers' attention in manufacturing of micro/nano equipment. For this purpose, the displacement and manipulation equations for micro/nano-particle are essential. Although surface forces such as friction and adhesion are ignorable in macro scale, increased surface to volume ratio in micro/nano scale makes them very important. Various friction models have been used for two-dimensional manipulation in previous works. In this paper, HK friction model has been used to model and simulate three dimensional manipulation dynamically in order to have closer results to real manipulation. For this purpose, the important friction models have been studied and developed for use in micro/nano scale. Then, three-dimensional manipulation equations have been obtained and stiffness coefficient matrix for beam is extracted and all of the equations are combined to calculate the critical force and time of manipulation. Finally, simulation of obtained equations was used to calculate the critical force and time values of the three-dimensional manipulation for gold particle using HK friction model. The results indicate that rolling starts around  $x$ -axis before  $y$ -axis, and sliding starts along  $y$ -axis before  $x$ -axis.

### 1- مقدمه

دارد، متفاوت است و بنابراین اصطکاک به مقیاس وابسته است. نوسونوفسکی و بوشان [1] مکانیزم های مختلفی از اصطکاک جامد-جامد و جامد-مایع را مطالعه نموده اند. کرممیکر و هسن [2]، تغییر شکل های استاتیکی سطح در مقیاس نانومتر را به وسیله ی نوک ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده اند. تاس و همکاران [3]، بیان نموده اند که اصطکاک ایستایی در مد برشی، می تواند نتیجه ی مقاومت برشی سطوح تداخلی و مساحت واقعی تماس باشد. آن ها اثرات زبری سطح بر اصطکاک در تماس چسبنده ی الاستیک را تحلیل کرده اند. آدامز و همکارانش [4] مدل تک برجستگی تماس نانویی هرتادو و کیم را در یک مدل چندبرجستگی برای تماس و اصطکاک جای داده اند، که

میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان یک ابزار اساسی برای جابه جایی نانوذرات و ساخت اجسام مورد نظر از اتم ها و مولکول ها به شدت مورد توجه می باشد. از آنجا که 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 مهم تر شده است، لذا مدل های اصطکاکی گوناگونی برای در نظر گرفتن شرایط واقعی حرکت در مقیاس نانو ارائه شده است.

از آزمایش های تجربی واضح است که مقدار ضریب اصطکاک، هنگامی که در مقیاس میکرو/نانو اندازه گیری شود با آن چه که در مقیاس های بزرگ وجود

در بخش شبیه سازی، نیز شبیه سازی سه بعدی نانوجابه جایی با استفاده از مدل اصطکاکی دقیق اچ کا صورت پذیرفته است تا نتایج مدل سازی حاصل از تئوری هر چه بیشتر به نتایج حاصل از نانوجابه جایی واقعی نزدیک گردند. در انتهای بخش شبیه سازی نیز مقایسه ای بین نتایج مدل کولمب و مدل اچ کا صورت پذیرفته است.

## 2- مدل سازی

در این بخش ابتدا به بررسی مدل های اصطکاکی مهم قابل کاربرد در مقیاس میکرو/نانو پرداخته شده، سپس به بررسی سینماتیک جابه جایی سه بعدی پرداخته شده و پس از آن ماتریس ضرایب سختی تیرک مستطیلی شکل در سه بعد استخراج شده و در نهایت معادلات دینامیکی جابه جایی سه بعدی تشریح شده است.

### 2-1- بررسی مدل های اصطکاکی

اصطکاک به دلیل نقش مهمی که در مدل سازی سیستم مکانیکی ایفا می کند، همواره مورد توجه محققان بوده است [12]. قانون های بنیادی اصطکاک چند قرن پیش توسط داونچی، آموتون و کولمب بیان شده اند. با افزایش نیاز به ساخت ابزارهای کوچک در مقیاس میکرو/نانو مطالعه ای اصطکاک بعد تازه ای یافت [13]. در این بخش به بررسی برخی مدل های اصطکاکی که قابلیت کاربرد در مقیاس میکرو/نانو دارند، پرداخته شده است.

**مدل های کلاسیک اصطکاک:** این مدل ها از اجزای مختلفی تشکیل شده اند، که هر یک جنبه ای از نیروی اصطکاک را در برمی گیرند. ایده اصلی این است که اصطکاک مخالف حرکت است و مقدار آن مستقل از سرعت و سطح تماس است. یک تشریح کلی از اصطکاک در مدل کلاسیک می تواند به صورت رابطه (1) باشد:

$$F = f(x) = \begin{cases} F(v), & \text{اگر } v \neq 0 \\ F_e, & \text{اگر } v = 0 \text{ و } |F_e| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F_e), & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (1)$$

$F(v)$  یک تابع اختیاری است که یک نوع رایج آن به صورت رابطه (2) است:

$$F(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\frac{|v|}{v_s} \delta_s} + F_v v \quad (2)$$

$v_s$  سرعت اصطکاکی نامیده می شود. این مدل برای مدت های طولانی به کار گرفته شده است. تابع  $F$  به آسانی با اندازه گیری نیروی اصطکاک برای حرکت با سرعت ثابت به دست می آید. منحنی اغلب نامتقارن است [14]. عیب اصلی این مدل در به کارگیری آن هنگام اهداف شبیه سازی یا کنترلی می باشد، که در آن مشکل شبیه سازی و کنترل هنگامی که سرعت صفر است، به وجود خواهد آمد.

**مدل دال:** این مدل برای هدف شبیه سازی های سیستم های کنترلی با اصطکاک توسعه یافته است. نقطه ای شروع برای مدل دال منحنی تنش- کرنش در مکانیک جامد کلاسیک است (شکل 1). وقتی در معرض تنش قرار گیرد، نیروی اصطکاک به تدریج افزایش یافته تا شکست رخ دهد. دال منحنی تنش- کرنش را با معادلات مختلف مدل کرد. اگر  $x$  جابه جایی،  $F$  نیروی اصطکاک و  $F_c$  نیروی اصطکاک کولمب باشد، آن گاه مدل دال به صورت رابطه (3) خواهد بود.

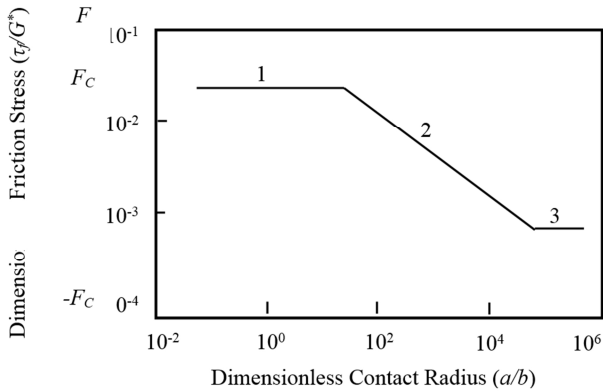
$$\frac{dF}{dx} = \sigma \left(1 - \frac{F}{F_c} \operatorname{sgn} v\right)^\alpha \quad (3)$$

اثر نیروی چسبندگی برجستگی ها با استفاده از مدل دینامیک مولکولی را در برمی گیرد. استارک و همکاران [5]، وابستگی اصطکاک به سرعت را بررسی کرده اند. آن ها بیان نموده اند که نیروهای اصطکاکی در تماس نوک ابزار- نمونه، دینامیک تماس مدهای میکروسکوپ نیروی اتمی را کنترل می کند. یون و همکاران [6]، نیز تأثیرات سطح تماس را بر اصطکاک در مقیاس میکرو/نانو به طور تجربی بررسی کرده اند. گائو و همکاران [7]، به مقایسه ای اصطکاک کولمب و مدل های تنش اصطکاک بر پایه آزمایش های تماسی چندبعدی نانو پرداخته اند.

کوریام و همکارانش [8] مدل های اصطکاکی مناسب جهت کاربرد در جابه جایی دوبعدی در مقیاس میکرو/نانو را ارائه نموده اند. آن ها همچنین معادلات دینامیکی جابه جایی دوبعدی نانوذرات را استخراج نموده و نهایتاً معادلات دینامیکی سیستم را با استفاده از مدل های اصطکاکی دقیق تر شبیه سازی نموده و نتایج به دست آمده را با نتایج موجود در تحقیقات قبلی تحلیل و بررسی نموده اند. کوریام و همکارانش [9] به توسعه و مدل سازی جابه جایی دوبعدی در محیط مایع و با استفاده از مدل اصطکاکی کولمب نیز پرداخته اند. کوریام و همکارانش همچنین [10] به توسعه و مدل سازی تئوری های تماسی الاستیک- پلاستیک جهت نانوباکتری های نرم کروی شکل به منظور کاربرد در جابه جایی میکرو/نانوذرات زیستی مختلف بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی و با استفاده از مدل اصطکاکی کولمب پرداخته اند. طاهری [11] به مدل سازی و شبیه سازی دینامیک سه بعدی حرکت نانوذرات بیولوژیکی پرداخته است. در این مقاله با در نظر گرفتن شکل کروی برای میکرو/نانوذرات هدف، ابتدا روابط سینماتیک سه بعدی جابه جایی استخراج شده است. سپس مدل تماسی جی کار جهت استفاده در جابه جایی ارائه شده و معادلات سختی تیرک مستطیلی در سه بعد استخراج شده است. در آخرین مرحله از بخش مدل سازی، دینامیک سه بعدی حرکت میکرو/نانوذرات هدف استخراج شده و معادلات نیرو و زمان بحرانی جابه جایی بر اساس مدل اصطکاکی ساده کولمب به دست آمده است. با وجود میکروسکوپ نیروی اتمی در برخی مراکز علمی و دانشگاه ها، اکثر کارهای تجربی صورت گرفته در جهت عکس برداری و استخراج خواص ذرات صورت گرفته است و تاکنون کار تجربی چشم گیری در زمینه جابه جایی ذرات، با توجه به دقیق و کامل نبودن مدل سازی ها در این زمینه، صورت نپذیرفته است.

اهمیت دست یابی به زمان بحرانی جابه جایی نانوذره بدین دلیل است که در جابه جایی ذره به منظور رسیدن ذره به محل مورد نظر، تا قبل از زمان بحرانی ذره به صفحه مینا چسبیده و نسبت به آن حرکتی ندارد، لذا بایستی این زمان را به زمان مورد نظر جابه جایی جهت رسیدن ذره به موقعیت دقیق مورد نظر اضافه نمود. تاریخچه ذکر شده نشان می دهد که استفاده از مدل اصطکاکی دقیق در مقیاس میکرو/نانو امری ضروری می باشد، که اکثر کارهای گذشته بر پایه تئوری های دوبعدی جابه جایی بوده و استفاده از مدل اصطکاکی کولمب می باشد و تاکنون کار عمده ای جهت مدل سازی سه بعدی سینماتیک و دینامیک جابه جایی با استفاده از مدل های دقیق اصطکاکی صورت نپذیرفته است.

از این رو در این مقاله در بخش مدل سازی ابتدا به صورت خلاصه به استخراج معادلات سینماتیک سوزن پرداخته شده، سپس به بررسی مدل های مهم اصطکاکی در مقیاس میکرو/نانو پرداخته و پس از آن مدل اصطکاکی مورد استفاده شرح داده شده است. پس از آن ماتریس سختی تیرک استخراج شده و به استخراج معادلات دینامیک سه بعدی نانوجابه جایی پرداخته شده است.



**Fig. 2** Equation between dimensionless frictional stress and dimensionless contact radius in the HK model [16]

شکل 2 رابطه‌ی بین تنش اصطکاکی بی‌بعد و شعاع تماس بی‌بعد در مدل اچ کا [16]

با داشتن این روابط می‌توان نیروی اصطکاک را از رابطه‌ی (11) به دست آورد.

$$\frac{F_f}{G^* b^2} = \begin{cases} \bar{\tau}_{f1} \bar{a}^2, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ 10^B \bar{a}^{M+2}, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \bar{\tau}_{f2} \bar{a}^2, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (11)$$

**2-2- بررسی سینماتیک جابه‌جایی سه‌بعدی**

برای استخراج نیروهای عمل و عکس‌العمل در سطح تماسی تیپ-نانوذره مربوط به نقاط p (محل اتصال انتهای سوزن-تیپ) و t (محل تماس نوک سوزن-نانوذره در راستای عمق نفوذ ماکزیمم) با توجه به مراجع [19,11] مقادیر شتاب با توجه به شکل 3 به صورت روابط (12) تا (17) به دست خواهند آمد:

$$\dot{x}_t = \dot{x}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi \quad (12)$$

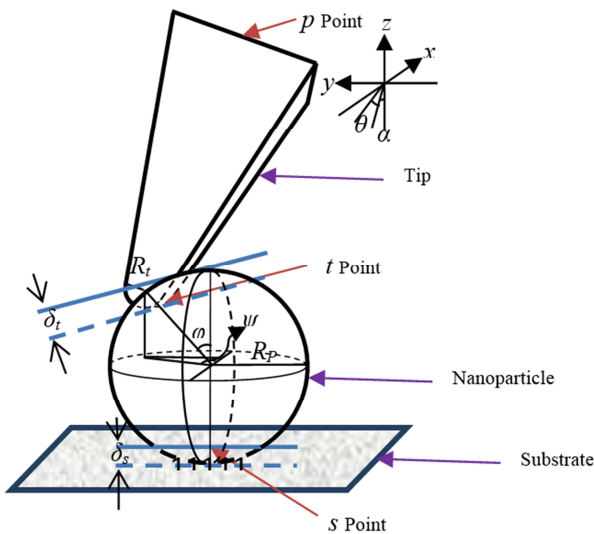
$$\dot{y}_t = \dot{y}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi \quad (13)$$

$$\dot{z}_t = \dot{z}_s - \dot{\delta}_t \sin \varphi - \dot{\delta}_s \quad (14)$$

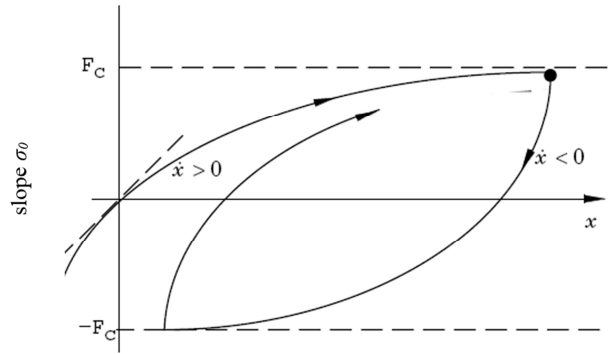
$$\dot{x}_p = \dot{x}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi + H \ddot{\alpha} \cos \alpha - H \dot{\alpha}^2 \sin \alpha \quad (15)$$

$$\dot{y}_p = \dot{y}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi - H \ddot{\theta} \cos \theta + H \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (16)$$

$$\dot{z}_p = \dot{z}_s - \dot{\delta}_t \sin \varphi - \dot{\delta}_s - H \ddot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta - H \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \cos \theta - H \dot{\theta}^2 \cos \alpha \sin \theta \quad (17)$$



**Fig. 3** Schematic of contacts between particle, tip and substrate [11]  
شکل 3 شماتیکی از تماس بین ذره، سوزن و صفحه‌ی مبنا [11]



**Fig. 1** Friction force as a function of displacement in the Dahl model [15]

شکل 1 نیروی اصطکاکی به‌عنوان تابعی از جابه‌جایی در مدل دال [15]

که  $\sigma$  ضریب سختی و  $\alpha$  پارامتری است که شکل منحنی تنش- کرنش را تعیین می‌کند. مقدار  $\alpha$  معمولاً برابر 1 در نظر گرفته می‌شود. مدل دال نه اثر سرعت بر اصطکاک را در بر می‌گیرد و نه اثر چسبندگی را و این موارد انگیزه‌های اصلی برای گسترش مدل است.

برای به دست آوردن یک مدل وابسته به زمان دال رابطه (4) را پیشنهاد کرد:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{dF}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dF}{dx} v = \sigma \left(1 - \frac{F}{F_C} \operatorname{sgn} v\right)^\alpha v \quad (4)$$

این مدل یک حالت عمومی از اصطکاک معمولی کولمب است [15].  
**مدل اچ کا:** اصطکاک لغزشی ماکروسکوپی معمولاً با معادله‌ی آمونتون (معادله 5) که بیان می‌کند نیروی اصطکاک  $f_T$  متناسب با مجموع نیروی عمودی  $f_N$  و نیروی چسبندگی  $f_0$  است و بستگی به سطح ظاهری تماس اجسام ماکروسکوپی ندارد، توصیف می‌شود [16].

$$f_T = \mu (f_N + f_0) \quad (5)$$

برای یک تماس میکرو، نیز فرض می‌شود که نیروی اصطکاک با معادله‌ی (6) داده می‌شود.

$$f_T = \tau A \quad (6)$$

که  $A$  مساحت واقعی تماس میکرو و  $\tau$  استحکام برشی است، که هر دوی این پارامترها مرتبط با نیروی عمودی است. رابطه‌ی بین تنش اصطکاکی بی‌بعد در این روابط  $\bar{\tau}_f = \tau_f / G^*$  و شعاع تماس بی‌بعد  $\bar{a} = a/b$  در شکل 2 آمده است.

در این روابط  $a$  شعاع تماس،  $b$  دامنه‌ی بردار برگر و  $G^*$  مدول برشی مؤثر است. این مقدار با توجه به مدول برشی دو جسم در تماس با هم است که از رابطه‌ی (7) به دست می‌آید [18,17].

$$G^* = \left( \frac{2 G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right) \quad (7)$$

مقدار  $\bar{\tau}_f$  از رابطه‌ی (8) حاصل می‌شود.

$$\log \bar{\tau}_f = \begin{cases} \log \bar{\tau}_{f1}, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ M \log \bar{a} + b, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \log \bar{\tau}_{f2}, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (8)$$

که در نتیجه می‌توان روابط (10,9) را نوشت:

$$M = - \frac{(\log(\frac{\bar{\tau}_{f1}}{\bar{\tau}_{f2}}))}{(\log(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}))} \quad (9)$$

$$B = \frac{(\log(\bar{\tau}_{f1}) \log(\bar{a}_2) - \log(\bar{\tau}_{f2}) \log(\bar{a}_1))}{(\log(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}))} \quad (10)$$

## 3-2- بررسی ضرایب سختی تیرک در سه بعد

نیروهای ایجاد شده در تیرک در سه بعد طبق رابطه ی (18) استخراج می گردند [19]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_\theta \\ M_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L}{Ewt} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4L^3}{Etw^3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4L^3}{Ewt^3} & 0 & \frac{6L^2}{Ewt^3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{6(1+\nu)L}{Ewt^3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6L^2}{Ewt^3} & 0 & \frac{12L}{Ewt^3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ \theta \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (18)$$

در رابطه ی (18)،  $E$  و  $\nu$  مدول الاستیسیته و ضریب پواسون تیرک،  $W$  و  $L$  به ترتیب طول، عرض و ضخامت تیرک است.  $\delta_x$ ،  $\delta_y$  و  $\delta_z$  به ترتیب تغییر مکان های نقطه ی اتصال در راستای محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$ ، زاویه ی پیچش و  $\alpha$  زاویه ی خمش در تیرک است.  $F_x$ ،  $F_y$  و  $F_z$  نیرو در سه جهت اصلی  $x$ ،  $y$  و  $z$  و  $M_\theta$  و  $M_\alpha$  به ترتیب ممان پیچشی و خمشی در تیرک هستند.

## 4-2- بررسی دینامیک جابه جایی سه بعدی

با توجه به بخش های مختلف ذکر شده در مدل سازی و کارهای پیشین انجام شده، می توان فرآیند کامل مدل سازی را در الگوریتم شکل 4 مشاهده نمود. مطابق این الگوریتم در ابتدا شرایط اولیه مسأله تعریف شده از جمله سرعت و شتاب صفحه ی مبنا مشخص می گردد. سپس معادلات مکان نانوذره استخراج شده و با دو بار مشتق گیری شتاب ذره به دست آمده و با توجه به مدل تماسی مورد نظر، که وابسته به شکل ذرات هدف می باشد [20,21]، معادلات سینماتیکی حرکت نانوذره کامل می گردند.

پس از استخراج معادلات سینماتیکی حاکم، با استفاده از معادلات دینامیکی نیوتن-اولر و استفاده از معادلات ضرایب سختی تیر، معادلات دینامیکی حاکم بر سوزن تیرک به دست می آیند.

از روی معادلات دینامیکی به دست آمده می توان نیروهایی را که از طرف سوزن تیرک بر ذره وارد می شود محاسبه نمود. از طرف دیگر هم با توجه به معادلات اصطکاکی می توان نیروهای مقاوم در برابر حرکت ذره که از طرف صفحه ی مبنا بر ذره وارد می شود را به دست آورد.

با مقایسه ی این دو نیرو در لحظه ای که نیروی وارده از طرف سوزن بر نانوذره، به نیروی مقاومت اصطکاکی وارده از طرف صفحه ی مبنا بر نانوذره غلبه نماید، نانوذره شروع به حرکت نموده و فاز اول جابه جایی به پایان می رسد که نیرو و زمانی را که در این لحظه ی شروع به حرکت نانوذره بر آن اعمال می گردد، نیروی بحرانی و زمان بحرانی می نامیم.

اهمیت نیروی بحرانی بیشتر در رابطه با ذرات بیولوژیکی مانند سلول و مخمر می باشد که نیروی وارده در صورتی که از مقداری افزایش یابد سبب آسیب رسیدن به ذره خواهد شد. اهمیت زمان بحرانی نیز به دلیل مهم بودن زمان حرکت صفحه ی مبنا در رسیدن نانوذره به نقطه ی هدف می باشد.

پس از این مرحله حرکت نانوذره بر روی صفحه ی مبنا آغاز شده و وارد فاز دوم جابه جایی، تا رسیدن نانوذره به نقطه ی هدف، خواهیم شد که این فاز دوم مورد توجه این مقاله نمی باشد.

## 3- شبیه سازی جابه جایی سه بعدی

در این بخش ابتدا به شبیه سازی جابه جایی سه بعدی ذره طلا با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا پرداخته شده و لغزش و غلتش این ذره حول محورهای  $x$  و  $y$  مورد بررسی قرار گرفته است. پس از آن جهت بررسی صحت نتایج، نتایج به دست آمده در این مقاله با نتایج موجود در کارهای گذشته در رابطه با جابه جایی دوبعدی مقایسه شده است.

## 3-1- شبیه سازی جابه جایی سه بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا

در این بخش از مقاله به شبیه سازی جابه جایی سه بعدی ذره مورد بررسی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا پرداخته شده و نیرو و زمان بحرانی جابه جایی محاسبه شده است.

برای این منظور با توجه به معادلات دینامیکی استخراج شده، با بهره گیری از مدل اصطکاکی اچ کا، و با استفاده از ضرایب سختی به دست آمده برای تیرک مستطیلی شکل، به بررسی لغزش و غلتش نانوذره حول محورهای  $x$  و  $y$  پرداخته شده است.

شکل های 5 و 6 نمودار مربوط به لغزش ذره طلا حول محورهای  $x$  و  $y$  را با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا نشان می دهند. نیروی بحرانی لغزش ( $F_{cr}$ ) در راستای محورهای  $x$  و  $y$  به ترتیب برابر با  $577 \mu\text{N}$  و  $438 \mu\text{N}$  می باشد. همچنین زمان بحرانی جابه جایی ( $T_{cr}$ ) در راستای محورهای  $x$  و  $y$  به ترتیب برابر با  $1.714 \text{ sec}$  و  $0.225 \text{ sec}$  می باشد.

مقایسه ی نتایج این دو شکل بیانگر این است که لغزش ذره طلا در راستای محور  $x$  به نیروی بیشتری نیاز داشته و در زمان دیرتری رخ می دهد، لذا می توان نتیجه گیری نمود که در جابه جایی سه بعدی در هنگام وقوع فاز لغزش، ابتدا لغزش در راستای محور  $y$  رخ خواهد داد.

همچنین شکل های 7 و 8 نمودار مربوط به غلتش ذره طلا حول محورهای  $x$  و  $y$  را با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا نشان می دهند. نیروی بحرانی ( $F_{cr}$ ) حول محورهای  $x$  و  $y$  به ترتیب برابر با  $201 \mu\text{N}$  و  $435 \mu\text{N}$  می باشد. همچنین زمان بحرانی جابه جایی ( $T_{cr}$ ) حول محورهای  $x$  و  $y$  به ترتیب برابر با  $0.121 \text{ sec}$  و  $0.234 \text{ sec}$  می باشد.

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

مقایسه ی کلی بین شکل های 5 تا 8 بیانگر این امر است که در جابه جایی سه بعدی ذره طلا با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا، اولین پدیده ای که در زمان سریع تر و با نیروی کمتری رخ خواهد داد غلتش این ذره حول محور  $x$  در زمان  $0.121 \text{ sec}$  و با نیروی معادل  $201 \mu\text{N}$  می باشد. همچنین پدیده ای که احتمال وقوع آن بسیار کمتر می باشد، لغزش ذره در راستای محور  $x$  می باشد که در زمان  $1.714 \text{ sec}$  و با نیروی معادل  $577 \mu\text{N}$  رخ خواهد داد.

## 3-2- بررسی صحت نتایج به دست آمده

در این بخش به بررسی صحت نتایج به دست آمده با استفاده از مقایسه ی نتایج به دست آمده در این مقاله جهت جابه جایی سه بعدی ذره طلا با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا و نتایج موجود در مرجع [8] که در آن سه مدل اصطکاکی کولمب، اچ کا و لاگره جهت جابه جایی دوبعدی نانوذره طلا مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند، پرداخته شده است.

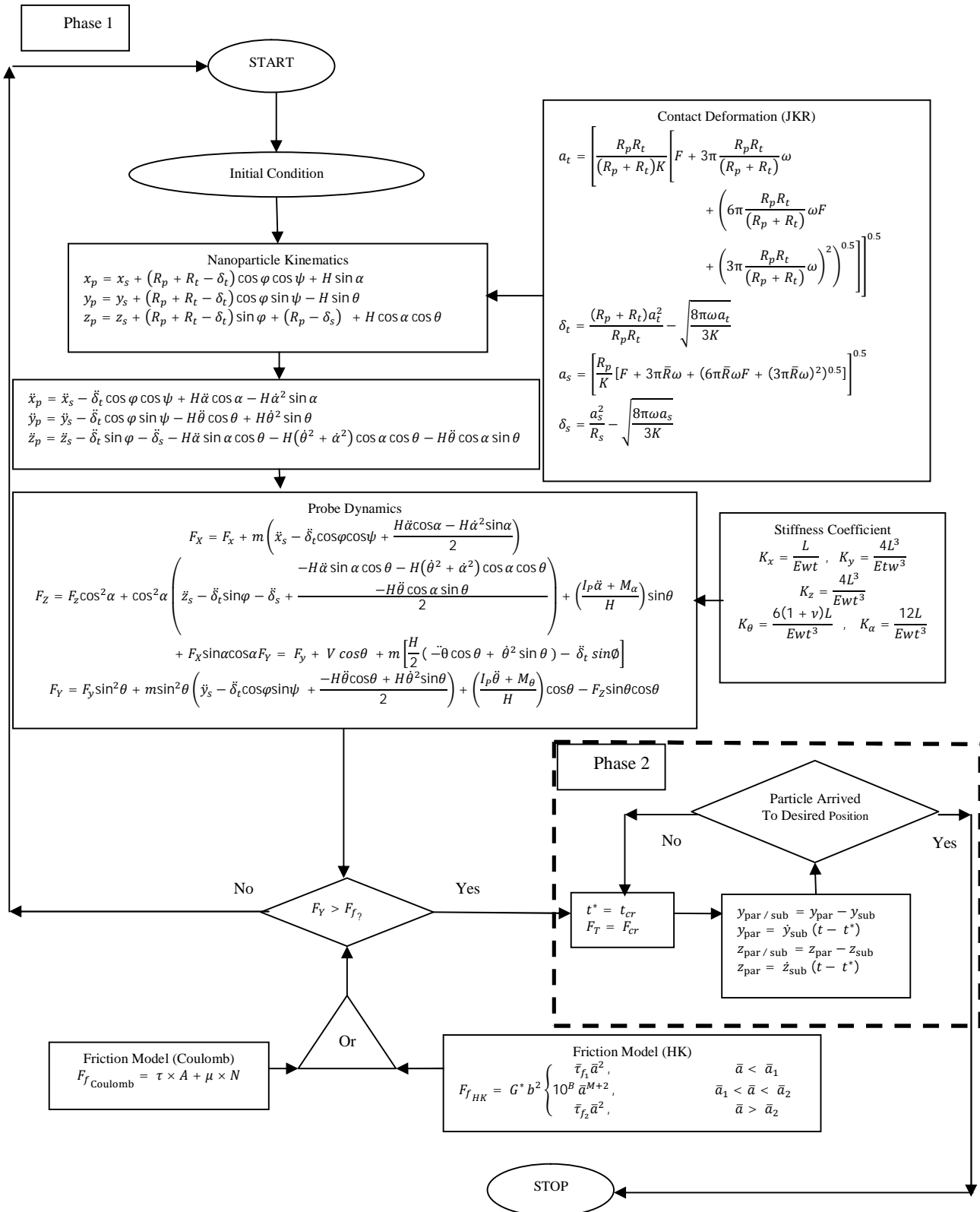


Fig. 4 Algorithm of 3D nanomanipulation

شکل 4 الگوریتم نانو جابه جایی سه بعدی

شکل 9 نمودار مربوط به لغزش ذره 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 ذره طلا در دو بعد با استفاده از مدل اچ کا به ترتیب برابر با  $0.222 \text{ sec}$  و  $0.527 \mu\text{N}$  می باشد که در مقایسه با شکل 6، نیروی بحرانی

به دست آمده اختلاف حدود 16 درصدی در نتایج سه بعدی نسبت به دوبعدی و زمان بحرانی به دست آمده نیز اختلاف حدود 1 درصدی در نتایج سه بعدی نسبت به دوبعدی را نشان می دهد که دلیلی بر صحت نتایج به دست آمده می باشد.

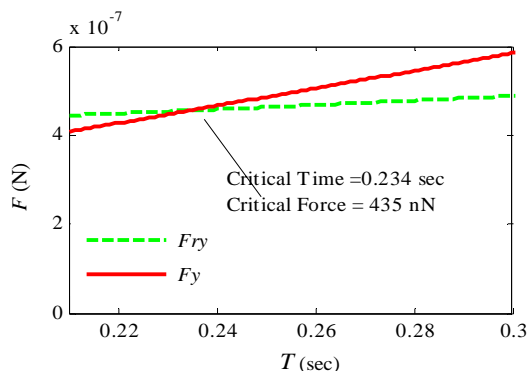


Fig. 8 Rolling critical force and time for Au particle around the y-axis in air environment

شکل 8 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذره طلا حول محور  $y$

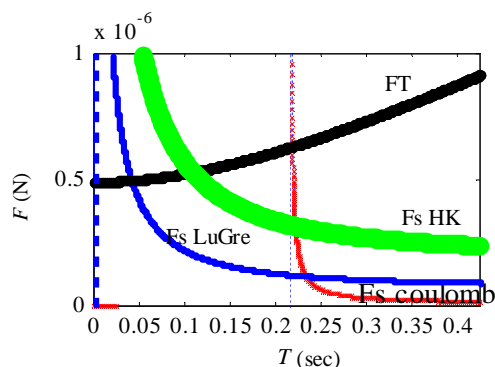


Fig. 9 Sliding critical force and time for Au particle in 2-D around the y-axis in air environment

شکل 9 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذره طلا در دو بعد حول محور  $y$  در محیط هوا

پس از مدل سازی، نیز به شبیه سازی فازهای لغزشی و غلتشی نانوذره طلا حول محورهای  $x$  و  $y$  پرداخته شده و زمان و نیروی بحرانی جابه جایی در بخش شبیه سازی محاسبه شده است. همچنین در انتهای بخش شبیه سازی 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 بیانگر این امر است که اولین پدیده ای که در زمان سریع تر و با نیروی کمتری رخ خواهد داد، غلتش نانوذره طلا حول محور  $x$  می باشد.

- نتایج به دست آمده همچنین نشان می دهد که پدیده ای که احتمال وقوع آن بسیار کمتر می باشد، لغزش ذره در راستای محور  $x$  می باشد.

- مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات قبلی بیانگر اختلاف 16 درصدی در نیروی بحرانی به دست آمده در نتایج سه بعدی نسبت به دوی بعدی می باشد.

- همچنین نتایج به دست آمده در رابطه با زمان بحرانی اختلاف حدود 1 درصدی در نتایج سه بعدی نسبت به دوی بعدی را نشان می دهد.

این مقاله به جابه جایی سه بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا پرداخته است، ولی در ادامه می توان جابه جایی سه بعدی با استفاده از سایر مدل های اصطکاکی، که در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است، از جمله مدل های گرینود و ویلیامز و لاگره را نیز مورد بررسی قرار داد. بدیهی است که دقیق تر شدن مدل اصطکاکی مورد استفاده، به عنوان بخشی از مدل کلی نانوجابه جایی، سبب دقیق تر شدن مدل کلی نانوجابه جایی نیز خواهد شد. البته در صورت امکان انجام کار تجربی، می توان به طور کمی میزان دقیق تر

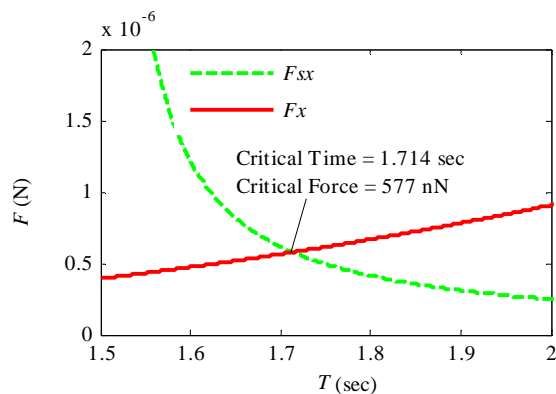


Fig. 5 Sliding critical force and time for Au particle around the x-axis in air environment

شکل 5 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذره طلا حول محور  $x$  در محیط هوا

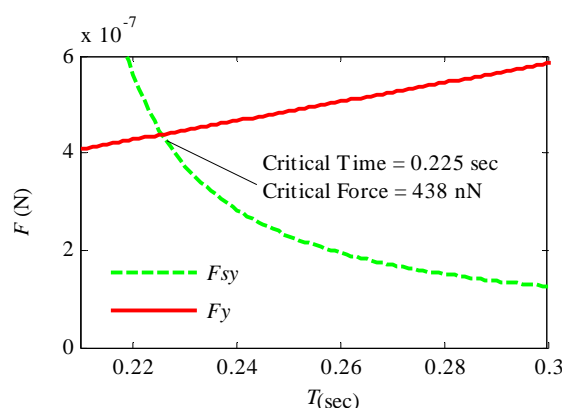


Fig. 6 Sliding critical force and time for Au particle around the y-axis in air environment

شکل 6 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذره طلا حول محور  $y$  در محیط هوا

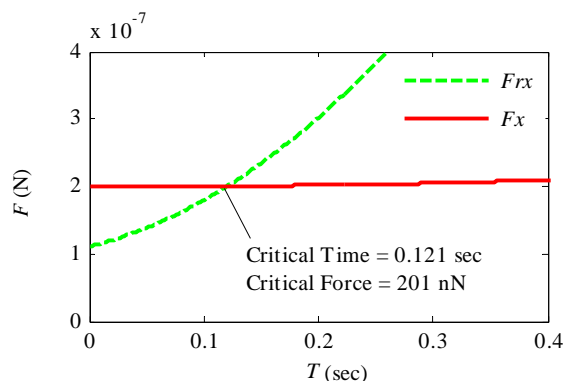


Fig. 7 Rolling critical force and time for Au particle around the x-axis in air environment

شکل 7 نیرو و زمان بحرانی لغزش ذره طلا حول محور  $x$  در محیط هوا

#### 4- نتیجه گیری

در این مقاله برای نخستین بار از مدل اصطکاکی اچ کا در مدل سازی سینماتیک و دینامیکی جابه جایی سه بعدی نانوذره طلا استفاده شده است. برای این منظور پس از بررسی مدل های مهم اصطکاکی قابل کاربرد در مقیاس میکرو/نانو، به مدل سازی سینماتیک سه بعدی و استخراج ماتریس سختی تیرک مستطیل شکل پرداخته شده است. در انتهای بخش مدل سازی نیز به تشریح روابط دینامیکی جابه جایی در سه بعد پرداخته شده است.

شدن مدل کلی نانو جابه جایی، با استفاده از مدل های دقیق اصطکاکی را نیز بررسی نمود.

همچنین در این مقاله تنها نانو ذره طلا مورد بررسی قرار گرفته اند که با توجه به اهمیت روز افزون جابه جایی ذرات بیولوژیکی در ادامه می توان ذرات مهم بیولوژیکی را نیز به عنوان ذرات هدف مورد بررسی قرار داد.

## 5- فهرست علائم

$a$	شعاع تماس
$A$	مساحت واقعی تماس
$b$	بردار برگر
$E$	مدول الاستیسیته تیرک
$f_0$	نیروی چسبندگی
$f_N$	نیروی عمودی
$f_T$	نیروی اصطکاکی کولمب
$F_f$	نیروی اصطکاکی اچ کا
$F_x$	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 معادل
$H$	ارتفاع سوزن
$I_p$	ممان اینرسی تیرک حول نقطه ابتدایی
$K$	مدول الاستیسیته مؤثر
$K_x$	سختی تیرک در راستای محور $x$
$K_y$	سختی تیرک در راستای محور $y$
$K_z$	سختی تیرک در راستای محور $z$
$K_\alpha$	سختی پیچشی تیرک حول محور $y$
$K_\theta$	سختی پیچشی تیرک حول محور $z$
$L$	طول تیرک
$m$	جرم تیرک
$M_\alpha$	گشتاور پیچشی تیرک حول محور $y$
$M_\theta$	گشتاور پیچشی تیرک حول محور $z$
$R_p$	شعاع نانو ذره
$R_t$	شعاع سوزن
$t$	ضخامت تیرک
$v_s$	سرعت اصطکاکی
$w$	عرض تیرک
$\ddot{x}_p$	شتاب انتهای سوزن در راستای محور $x$
$\ddot{x}_s$	شتاب ذره بر صفحه میبنا در راستای محور $x$
$\ddot{x}_t$	شتاب نوک سوزن در راستای محور $x$
$\ddot{y}_p$	شتاب انتهای سوزن در راستای محور $y$
$\ddot{y}_s$	شتاب ذره بر صفحه میبنا در راستای محور $y$
$\ddot{y}_t$	شتاب نوک سوزن در راستای محور $y$

## علائم یونانی

$\delta_s$	شتاب فرورفتگی نانو ذره در صفحه میبنا
$\delta_t$	شتاب فرورفتگی نانو ذره در سوزن
$\nu$	ضریب پواسون تیرک
$\sigma$	ضریب سختی
$\tau$	استحکام برشی
$\omega$	ضریب چسبندگی

## 6- مراجع

- [1] M. Nosonovsky, B. Bhushan, Multiscale friction mechanisms and hierarchical surfaces in nano- and bio-tribology, *Materials Science and Engineering*, Vol. 58, No. 3, pp. 162–193, 2007.
- [2] J. Kerssemakers, J. Th. M. De Hosson, A quantitative analysis of surface deformation by stick/slip atomic force microscopy, *American Institute of Physics*, Vol. 82, No. 8, pp. 3763–3770, 1997.
- [3] N. R. Tas, C. Gui, M. Elwenspoek, Static friction in elastic adhesive MEMS contacts, models and experiment, *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference*, Miyazaki, Japan: IEEE Computer Society, pp. 193-198, 2000.
- [4] G. G. Adams, S. Müftü, N. M. Azhar, A Nano-Scale Multi-Asperity Contact and Friction Model, *ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, New Orleans, Louisiana, USA: ASME, pp. 455-462, 2002.
- [5] R. W. Stark, G. Schitter, A. Stemmer, Velocity dependent friction laws in contact mode atomic force microscopy, *Ultramicroscopy*, Vol. 100, No. 3, pp. 309–317, 2004.
- [6] E. S. Yoon, R. A. Singh, H. J. Oh, H. Kong, The effect of contact area on nano/micro-scale friction, *Wear*, Vol. 259, No. 7, pp. 1424–1431, 2005.
- [7] Y. F. Gao, H. T. Xu, W. C. Oliver, G. M. Pharr, A comparison of coulomb friction and friction stress models based on multidimensional nanocontact experiments, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 75, No. 3, pp. 1–3, 2008.
- [8] M. H. Korayem, M. Taheri, M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models, *Applied surface science*, Vol. 258, No. 18, pp. 6713-6722, 2012.
- [9] A. H. Korayem, M. Taheri, 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)
- [10] M. H. Korayem, H. Khaksar, R. N. Hefz Abad, M. Taheri, Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 227-234, 2014. (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)
- [12] E. Berger, Friction modeling for dynamic system simulation, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 55, No. 6, pp. 535-577, 2002.
- [13] B. Bhushan, *Handbook of Micro/Nano Tribology*, Second Edition, Columbus: CRC Press, pp. 211-231, 1999.
- [14] H. Olsson, K. J. Åström, C. Canudas de Wit, M. Gäfvert, P. Lischinsky, Friction models and friction compensation, *European Journal of Control*, Vol. 4, No. 3, pp. 176–195, 1998.
- [15] P. Dahl, A solid friction model, *The Aerospace Corporation*, Vol. 18, No. 1, pp. 1–24, 1968.
- [16] G. G. Adams, S. Muftu, N. M. Azhar, Scale-dependent model for multi-asperity contact and friction, *ASME Journals of Tribology*, Vol. 125, No. 4, pp. 700-708, 2003.
- [17] J. A. Hurtado, K. S. Kim, Scale effects in friction of single asperity contacts: part1; from concurrent slip to single-dislocation-assisted slip, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, London: The Royal Society, pp. 3363-3384, 1999.

- Dynamics*, Vol. 229, No. 4, pp.370-382, 2015.
- [20] M. H. Korayem, M. Taheri, Modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFM, *Journal of nanoparticle research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-18, 2014.
- [21] M. H. Korayem, M. Taheri, Simulating the manipulation of various biological micro/nanoparticles by considering a crowned roller geometry, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol 41, No. 11, pp. 1-14, 2016.
- [18] J. A. Hurtado, K. S. Kim, Scale effects in friction of single asperity contacts: part2; multiple-dislocation-cooperated slip, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, London: The Royal Society, pp. 3385-3400, 1999.
- [19] M. H. Korayem, Z. Mahmoodi, M. Taheri, M. B. Saraee, Three-dimensional modeling and simulation of the AFM-based manipulation of spherical biological micro/nanoparticles with the consideration of contact mechanics theories, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body*