



## Second Phase of Nanomanipulation of Particles by Atomic Force Microscopy Using Coulomb, HK, and LuGre Friction Models

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Zarei B.<sup>1</sup> BSc,  
Bathae S.H.<sup>1</sup> BSc,  
Taheri M.<sup>\*1</sup> PhD,  
Momeni M.<sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Zarei B, Bathae S.H, Taheri M, Momeni M. Second Phase of Nanomanipulation of Particles by Atomic Force Microscopy Using Coulomb, HK, and LuGre Friction Models. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1):181-190.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Arak University, Arak, Iran

<sup>2</sup>Electrical Engineering Department, Engineering Faculty, Arak University, Arak, Iran

#### \*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Arak University, Sardasht, Arak, Iran.  
Postal code: 3815688349  
Phone: +98 (86) 32625724  
Fax: +98 (86) 32625001  
m-taheri@araku.ac.ir

#### Article History

Received: June 27, 2018  
Accepted: October 08, 2018  
ePublished: January 01, 2019

### ABSTRACT

Nanotechnology deals with objects and materials in nanometer scale and it is being expanded in the field of materials tools and systems. Nowadays, human knowledge in nanotechnology is going through a commercializing path in order to provide more services. Living creatures are built of cells with 10  $\mu\text{m}$  size. Some nanoparticles application in biology and medicine include drug and gene delivery, tissue engineering, and tumor destruction with heat. These procedures, which are done with nanoparticles manipulation, have two specific phase in general; in phase one, the amount of critical force and time are calculated based on dimensional and peripheral parameters. Now, it is tried to calculate nanoparticles displacement and velocity during the process in the phase two of nanoparticles manipulation. Also, in this paper, nanoparticles displacement and velocity were investigated in two dimensional space, using three main friction model namely coulomb, Hk, and lugre in phase two of nanoparticles manipulation. According to the results of this project, maximum speed and displacement was obtained, using lugre friction model and the minimum amounts in coulomb model. Also, with particles radius increase, displacement and velocity were reduced; this effect is engendered even without considering friction factor. Correspondingly, considering accuracy and validity, the coulomb model was the least accurate model and lugre was the most accurate one and the HK model was placed between these two models.

**Keywords** Second Phase of Nanomanipulation; Different Friction Models; Atomic Force Microscopy; Nanotechnology

### CITATION LINKS

[1] A hybrid co-evolutionary genetic algorithm for multiple nanoparticle assembly ... [2] Molecular dynamics simulation of nanomanipulation based on AFM ... [3] Vibration analysis of different AFM cantilever with a piezoelectric layer in the ... [4] A high-efficiency Kalman filtering imaging mode for an atomic force microscopy with hysteresis ... [5] Evaluation of the single yeast cell's adhesion to ITO substrates with various surface energies via ESEM ... [6] 3D investigation of dynamic behavior and sensitivity analysis of the parameters of spherical biological particles in the first phase of AFM-based manipulations with the ... [7] Performance of sinusoidal scanning ... [8] Non-classic multiscale modeling of manipulation based on AFM, in ... [9] In-situ single cell manipulation via nanorobotic manipulation ... [10] Manipulation of gold nanoparticles in liquid environments using scanning ... [11] Tracking of triangular reference signals using LQG controllers for lateral positioning ... [12] Modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles ... [13] Survey of nanomanipulation systems. Proceedings of 1st IEEE Conference on Nanotechnology, ... [14] IMolecular dynamics simulation of manipulation of metallic ... [15] Multipoint contact modeling of nanoparticle ... [16] Investigation of the size-dependent dynamic characteristics of atomic force microscope microcantilevers based on the ... [17] On the nonlinear-flexural response of piezoelectrically driven microcantilever sensors [18] Non-linear vibrations and frequency response analysis of ... [19] Precise positioning and assembly of metallic nanoclusters as building blocks of nanostructures... [20] Non-classic multi scale analysis of 2D-manipulation with AFM based on ... [21] Dynamic behavior and simulation of nanoparticle sliding ... [22] CAD-guided automated nanoassembly using atomic force ... [23] A virtual reality toolkit for path planning and manipulation at nano-scale. 14th Symposium on Haptic Interfaces ... [24] Analysis of the effect of dimensions of the atomic force microscope on calculating the critical force of nanomanipulation in 3D... [25] A scale dependent model for multi-asperity ... [26] Scale effects in friction ... [27] Scale effects in friction of single-asperity ...

## فاز دوم نانومنیپولیشن ذرات به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل‌های اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره

بهاره زارعی BSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

سیدحسن بطحائی BSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

معین طاهری \* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

مریم مومنی PhD

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

### چکیده

نانوفناوری با اشیا و مواد در اندازه نانومتر سروکار دارد و در زمینه مواد، ابزارها و سامانه‌ها گسترش می‌یابد. امروزه دانش بشری در زمینه نانو مسیر تجاری شدن را برای ارائه خدمات بیشتر طی می‌کند. موجودات زنده از سلول‌هایی با اندازه‌های ۱۰ میکرومتر ساخته شده‌اند. برخی از کاربردهای نانوذرات در زیست‌شناسی و پزشکی مانند تحویل دارو و ژن، مهندسی بافت و تخریب تومور به وسیله گرما است. این فرآیندها که به وسیله منیپولیشن نانوذرات صورت گرفته به صورت کلی دارای دو فاز است که در فاز اول مقادیر نیرو و زمان بحرانی برحسب پارامترهای ابعادی و محیطی به دست آمده است. اکنون در فاز دوم نانومنیپولیشن ذرات سعی بر آن است تا جابه‌جایی و سرعت ذرات حین فرآیند منیپولیشن به دست آورده شود. همچنین در این مقاله برای اولین بار جابه‌جایی و سرعت ذرات در فاز دوم در فضای دوبعدی با استفاده از سه مدل مهم اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این مقاله نشان می‌دهد که بیشترین جابه‌جایی و سرعت براساس مدل اصطکاکی لاگره و کمترین میزان براساس مدل اصطکاکی کولمب است. همچنین با افزایش شعاع ذره، جابه‌جایی و سرعت آن نیز کاهش یافته که این اثر حتی بدون در نظر گرفتن عامل اصطکاک ایجاد شده است. همچنین در بررسی دقت و صحت مدل‌های اصطکاکی، مدل کولمب کمترین و لاگره بیشترین میزان دقت و صحت را داشته و مدل اچ‌کا بین این دو قرار گرفته است.

**کلیدواژه‌ها:** فاز دوم نانومنیپولیشن، مدل‌های مختلف اصطکاکی، میکروسکوپ نیروی اتمی، تکنولوژی نانو

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۶

\* نویسنده مسئول: m-taheri@araku.ac.ir

### ۱- مقدمه

رشد و گسترش حوزه نانو تکنولوژی که اهمیت آن امروزه بر کسی که جویای علم و فناوری است یا در عرصه ساخت و تولید فعالیت دارد، قابل چشم‌پوشی نیست. همچنین کاربردهای بسیار نانوتکنولوژی در عرصه پزشکی و بیولوژیکی یا ساخت و تولید قطعات و ابزارها، اهمیت آن را بیش از پیش افزایش داده است. میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) که یکی از ابزارهای مهم آزمایش و پژوهش در این زمینه بوده، نسبت به سه دهه گذشته پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته، به طوری که پیشینه نیاز دانشمندان در این زمینه را فراهم کرده است. پیش از این در تحقیقات انجام شده که از آن به عنوان فاز اول نانومنیپولیشن نام برده شده، دو پارامتر بسیار مهم در این امر یعنی نیرو و زمان بحرانی به دست آمده است. اهمیت تکنولوژی نانو امروزه بر کسی پوشیده نیست. یکی از اهداف مهم نانوتکنولوژی ساخت ابزار، وسایل و ماشین‌ها است. در حال حاضر یکی از بحث‌های مهم در دنیای نانو، جابه‌جایی یا منیپولیشن ذرات است. این بحث در بسیاری از موارد از جمله پزشکی، بیولوژیکی و ساخت و تولید بسیار

پرکاربرد است. استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان یک ابزار برای هل دادن نانوذرات و ایجاد نانو ساختارها در سه دهه گذشته کاربرد چندانی نداشته است. اما در دهه اخیر، با گسترش شبیه‌سازی کامپیوتری برای تولید و کار تحقیقاتی در مدل‌های مختلف حرکت، استفاده از آن افزایش یافته است [1].

میکروسکوپ نیروی اتمی، یک نوع روبشگر سطح است که سوزن آن می‌تواند برای تشخیص نوع مواد استفاده شود و ویژگی‌هایی مانند اصطکاک، رفتار مغناطیسی و خواص مکانیکی را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین منیپولیشن نانوذرات، فرآیند برش و تصویربرداری با وضوح بالا در مقیاس نانو از عملکردهای آن است [2]. اندازه‌گیری و دقت در زمینه‌های مختلف مهندسی بسیار مهم است. خاصیت ماده به ریزساختار، خواص فیزیکی و شیمیایی آن بستگی دارد. میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه‌های مختلف مانند اندازه‌گیری نیروهای اتمی و خواص مکانیکی سطوح در مقیاس مولکولی کاربرد دارد و همچنین یکی از مهم‌ترین ابزارها در زمینه نانو است. استفاده از لایه پیژوالکتریک در میکروسکوپ نیروی اتمی توسط کورایم و همکاران ارایه شده که به دلیل سادگی آن، مورد استقبال واقع شده است و دقت و هزینه کم نیز نقطه قوت آن به حساب می‌آید [3].

میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر نانو را بدون محدودیت در نمونه الکتریکی به دست می‌آورد. همچنین هدایت آسان و محیط اسکن بیشتری که در اختیار محقق قرار می‌دهد، از دلایل برتری آن بر میکروسکوپ‌های روبشگر دیگر است. حتی اگر میکروسکوپ نیروی اتمی دارای مزایای فوق هم باشد، هنوز با بسیاری از نواقص مواجه بوده که عملکرد آن را به شدت محدود کرده است [4]. همچنین میکروسکوپ نیروی اتمی برای سلول‌ها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه‌گیری نیروی چسبندگی بر خلاف روش‌های سنتی می‌تواند داده‌های کمی را فراهم کند. برای یک نتیجه دقیق‌تر به طور کلی سه روش برای اندازه‌گیری وجود دارد، روش اول استفاده از سوزن اصلاح شده برای لمس سطح سلول و اندازه‌گیری چسبندگی بین سوزن و سلول بوده و مشکل این رویکرد متکی بر دشواری تشخیص آن بوده که چه بخشی از سلول با تیرک ارتباط برقرار کرده است. روش دوم این است که یک سلول در انتهای تیرک قرار گرفته باشد و سپس برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی، بین سلول و بستر اندازه‌گیری شود. سومین روش برای ایجاد یک لبه برشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیروی چسبندگی تا زمانی که سلول از آن جدا باشد، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود [5]. کورایم و همکاران به منیپولیشن سه‌بعدی در فاز اول پرداخته‌اند. آنها با استفاده از مدل توسعه داده شده در فاز نخست، معادلات حالت‌های حرکت ذرات (غلتش، لغزش و چرخش) در آغاز جنبش را استخراج نموده و اندازه نیروی بحرانی را به دست آورده‌اند [6].

برای حل مسایل مربوط به حالت تصویربرداری سنتی، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا کارایی سیستم و دقت تصویربرداری با ایجاد روش‌های مختلف بهبود بخشیده شود. برای مثال *Rana* و همکاران، روش اسکن مارپیچی را مطرح کرده‌اند. آنها یک مدل پیشرفته را پیش‌بینی کرده‌اند که در آن کنترل را با استفاده از یک فیلتر فشرده شده برای افزایش سرعت تصویربرداری و بهبود کارایی سیستم انجام می‌دهد [7]. مطالعه رفتار نانوذرات طی فرآیند منیپولیشن توسط محققان بررسی شده و شرایط محیطی مانند رطوبت در منیپولیشن دقیق بسیار موثر است. با در نظر گرفتن مقیاس‌های مختلف از میکروسکوپ نیروی اتمی، روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در مطالعات را می‌توان به سه دسته مکانیک پیوسته، دینامیک مولکولی و مدل چندمقیاسی تقسیم

تجزیه و تحلیل خوشه‌های فلزی را در دو حالت لایه‌های زیرین بررسی کرده‌اند<sup>[19]</sup>. کورایم و همایونی، منیپولیشن در دو بُعد را با استفاده از روش چندمقیاسی تحلیل کرده‌اند. منیپولیشن بیولوژیک یکی از جالب‌ترین زمینه‌های قابل توجه در منیپولیشن ذرات است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل قطعات میکروسکوپ نیروی اتمی در مدل‌های غیرکلاسیک کمتر از مدل کلاسیک بوده، در نتیجه در مدل کلاسیک نانوذرات، آسیب و تغییر شکل بیشتری دیده شده است<sup>[20]</sup>. تفصیلی و سیتی دینامیک حاکم در حالت‌های میکرومنیپولیشن و نانومنیپولیشن در ذرات کروی را بررسی کرده‌اند که در نهایت یک الگوریتم تکرارپذیر برای نیروهای وارد بر یک نانو/میکرو ذره روی یک بستر را ارائه کرده‌اند<sup>[21]</sup>.

چین و همکاران یک روش برای برنامه‌ریزی مسیر نانوذرات کروی و نانولوله‌ها ارائه کرده‌اند. در این روش ابتدا مسیرهای قابل اجرا بین ذرات و مقصدهای هدف وجود دارد، سپس خطوط مستقیم، تعیین و مسیر خطی بسته‌بندی شده است و ذرات دیگر نمی‌توانند به‌طور مستقیم به آنجا حرکت کنند<sup>[22]</sup>. وارول و همکاران یک مدل برای ارتباط بین نانوذرات ارائه کرده‌اند که سوزن تیرک و جابه‌جایی ذرات نانو از رویکرد میدان پتانسیل مصنوعی بهره برده است<sup>[23]</sup>.

در بررسی فاز اول جابه‌جایی نانوذرات، دو فاکتور بسیار مهم نیرو و زمان بحرانی بسیار حایز اهمیت بوده است. در این راستا مدل‌سازی دقیق رفتار دینامیک نانوی اجسام حین منیپولیشن کمک می‌کند تا در آینده ساخت و مونتاژ نانواینزرها و میکرو/نانوسیستم‌های پیشرفته امکان‌پذیر شود. از منیپولیشن و فناوری مربوط به آن می‌توان برای مشاهده، ارزیابی و جابه‌جایی مواد مختلف در اندازه‌های نانو مانند اتم‌ها، مولکول‌ها و حتی سلول‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها استفاده نمود. همچنین اهمیت محاسبه دقیق زمان بحرانی منیپولیشن به دلیل جابه‌جایی دقیق میکرو/نانوذرات هدف است. زیرا تا قبل از رسیدن به زمان بحرانی منیپولیشن، میکرو/نانوذرات هدف به سطح صفحه مینا می‌چسبند، هیچ گونه حرکتی ندارد و جابه‌جایی ذره پس از زمان بحرانی رخ خواهد داد، لذا برای رسیدن ذره به مکان دقیق مورد نظر روی صفحه مینا نیاز به محاسبه دقیق زمان بحرانی داشته است و در صورت دقیق نبودن زمان بحرانی محاسبه شده، میکرو/نانوذرات هدف به نقطه مورد نظر نمی‌رسد یا از آن عبور خواهد نمود. به دلیل اهمیت ذکر شده، تحقیقات گسترده‌ای توسط محققان مختلف در رابطه با مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند منیپولیشن برای محاسبه نیرو و زمان بحرانی در شرایط مختلف و با استفاده از تئوری‌های تماسی و اصطکاکی مختلف صورت پذیرفته است<sup>[24]</sup>.

در این مقاله جابه‌جایی و سرعت ذرات در فاز دوم نانومنیپولیشن با بهره‌گیری از فضای دو بُعدی و استفاده از سه مدل مهم اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. سپس با توجه به اثر هر یک از مدل‌های اصطکاکی نتایج مختلفی به دست آمده که مدل اصطکاکی کولمب به‌خاطر سادگی و سهولت آن کمترین میزان و مدل اصطکاکی لاگره به دلیل در نظر گرفتن اثر استریک بیشترین میزان دقت و صحت نتایج را در بر داشته است.

## ۲- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا مدل‌سازی دینامیک دو بُعدی ذره هدف مورد بررسی قرار گرفته است. سپس تمام معادلات نیرویی و شتاب آن به دست آورده شده است و در نهایت به معادله جابه‌جایی آن در راستای افقی رسیده شد. همچنین به تشریح سه مدل مهم اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره پرداخته شده و معادلات هر کدام

کرد. محققان مدل‌سازی رفتار میکروسکوپ نیروی اتمی را از دو جنبه متفاوت بررسی کرده‌اند. یکی سر سوزن و نانوذرات که میدان نانو (NF) و بالای سوزن و نانوذرات که میدان مغناطیسی (MF) نامیده شده است. دلیل آن این است که در بسیاری از موارد، سر سوزن که با نانوذرات ارتباط برقرار می‌کند، در ابعاد کم در نظر گرفته شده است و با استفاده از معادلات حاکم در نظریه مکانیک پیوسته معتبر نیست، لذا نظریه مکانیک پیوسته به تنهایی نمی‌تواند پاسخگوی نیاز محققان در این بخش باشد و باید از نظریه دینامیک مولکولی نیز بهره گرفت<sup>[8]</sup>. سلول‌های بیولوژیک نقش مهمی در فعالیت‌های زندگی ایفا می‌کنند. آزمایش‌ها براساس تجزیه و تحلیل سلول‌های گروهی می‌تواند انجام شود، از این رو منیپولیشن تک‌سلولی به‌عنوان موضوعی مهم در سال‌های اخیر تبدیل شده است<sup>[9]</sup>. برای اولین بار منیپولیشن دقیق نانوذرات طلا روی بستر سیلیکونی در محیط مایع با استفاده از سوزن میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در آب یونیزه شده و اتانول به‌عنوان محلول آلی توسط ریچ و همکاران انجام شده است<sup>[10]</sup>.

حبیب‌الله و همکاران طراحی یک الگوی خطی مطلوب مبتنی بر یک کنترل‌کننده گاوسی را برای موقعیت جانبی لوله پیژوالکتریک محرک مورد استفاده در یک میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه داده‌اند که نشان داده شده است برای دستیابی به عملکرد کنترل، بهتر است از کنترل‌کننده سنتی استفاده شود<sup>[11]</sup>. کورایم و طاهری برای نخستین بار برای مدل‌سازی دینامیک و سینماتیک از مدل اصطکاکی اچ‌کا برای جابه‌جایی نانوذرات طلا استفاده کرده‌اند. آنها همچنین پس از بررسی مدل‌های مهم اصطکاکی که در زمینه میکرو یا نانو قابل استفاده است، به مدل‌سازی سینماتیک سه بُعدی و همچنین استخراج ماتریس سختی تیرک مستطیل‌شکل مبادرت ورزیده و در آخر به نتیجه ۱۶ درصدی اختلاف در نیروی بحرانی در منیپولیشن سه بُعدی نسبت به دو بُعدی رسیده‌اند<sup>[12]</sup>.

سیتی به بررسی سیستم‌هایی پرداخته است که از نانومنیپولیشن استفاده می‌کنند و بخش‌های اصلی سیستم‌ها از قبیل سنسورها، عملگرها، نانوفیزیک، نانومنیپولاتور و سیستم کنترلی را با اثبات و جزئیات مورد بررسی قرار داده است<sup>[13]</sup>. محبوبی و همکاران با استفاده از فرم‌های سطح پنج‌مرحله‌ای و ترکیب‌های مختلف ذرات و بستر، منیپولیشن نانوذرات را در سطوح پایلوت مدل‌سازی کرده‌اند<sup>[14]</sup>. زاکری و همکاران، میکروسکوپ نیروی اتمی را در مدل‌سازی دینامیک دو بُعدی نانوذرات تحت فشار ریزساختار مورد بررسی قرار داده‌اند که بر این اساس نانوذرات در چندین نقطه تماس با سوزن تیرک ارتباط برقرار می‌کنند که اساس این تحقیقات بر پایه مدل رامپ است<sup>[15]</sup>. کهریاتیان و همکاران به بررسی میکروسکوپ نیروی اتمی با روش اویلر-برنولی با در نظر گرفتن نظریه MCS و استفاده از اصل همپلتون و اثر اندازه پرداخته‌اند که نتیجه آن استخراج معادلاتی سختی تیرک بوده است<sup>[16]</sup>. محمدی و همکاران دو نوع میکروتیرک پیژوالکتریک را مورد بررسی قرار داده‌اند که به‌صورت پایه و گسترده در میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شده که باعث بهبود در اندازه‌گیری جابه‌جایی نانوذرات و نتایجی شده است که از طریق حسگر فوتوالکتریک به دست می‌آید<sup>[17]</sup>.

محمودی و جلیلی نوعی پیژوالکتریک را با خمیدگی ارتعاشات غیرخطی مورد بررسی قرار داده و پارامترهای دیفرانسیل درجه سوم معادلات مدل‌سازی تیرک برای میکروسکوپ نیروی اتمی را به دست آورده‌اند<sup>[18]</sup>. محبوبی و همکاران در زمینه دینامیک مولکولی فعالیت‌های مختلفی انجام داده‌اند. آنها شبیه‌سازی دینامیک برای

آن در دو راستای قائم و افقی است.

با در نظر گرفتن مساله به صورت دو بُعدی، نیروی وارد بر ذره از طرف تیرک مطابق با معادلات ۱ و ۲ و به شرح زیر است:

$$F_x = F_{cr} \cos \theta \quad (1)$$

$$F_y = F_{cr} \sin \theta \quad (2)$$

به دلیل این که ذره هدف در راستای محور افقی (x) دارای حرکت است، بر خلاف محور عمودی (y) که هیچ حرکتی در آن وجود ندارد، معادلات دینامیک به صورت معادلات ۳ و ۴ در می آید.

$$\sum F_x = ma_x \rightarrow F_x - f_f = ma_x \rightarrow F_{cr} \cos \theta - \mu(F_{cr} \sin \theta + mg) - \tau \pi a_{JKR}^2 = ma_x \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_y + mg - N = 0 \rightarrow N = F_{cr} \sin \theta + mg \quad (4)$$

$a_{JKR}$  شعاع تماسی مدل تماسی جی کی آر بوده که در معادله ۵ به صورت زیر بیان شده است:

$$a_{JKR} = \left[ \frac{\bar{R}}{K} \left[ F + 3\pi \bar{R} \omega + (6\pi \bar{R} \omega F + (3\pi \bar{R} \omega)^2)^{1/2} \right] \right]^{1/3} \quad (5)$$

$\bar{R}$  شعاع معادل ذره هدف و سوزن و  $\omega$  ضریب چسبندگی است. همچنین نیروی تماسی در این مدل از معادله ۶ به دست آمده است:

$$F_{JKR} = (6\pi \omega_p k a_{JKR}^3)^{1/2} \quad (6)$$

سپس با استفاده از معادلات به دست آمده ۳ و ۴، شتاب حرکت ذره هدف در راستای محور افقی به صورت معادله ۷ در می آید.

$$a_x = \left( \frac{1}{m} \right) (F_{cr} \cos \theta - \mu(F_{cr} \sin \theta + mg) - \tau \pi a_{JKR}^2) \quad (7)$$

در نهایت می توان معادله جابه جایی ذره هدف را از رابطه ۸ در حالت کلی به دست آورد.

$$x = \int \left( \frac{1}{m} \right) \left( \int (F_{cr} \cos \theta - \mu(F_{cr} \sin \theta + mg) - \tau \pi a_{JKR}^2) dt \right) dt \quad (8)$$

### ۲-۲-۲ مدل سازی اصطکاکی

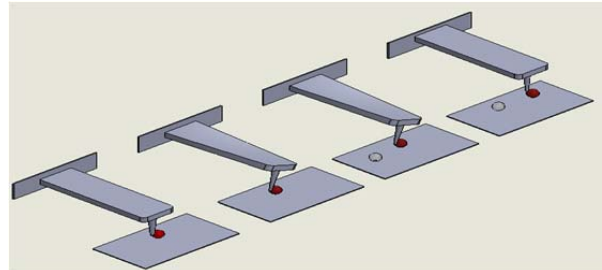
اصطکاک نیروی مقاومی است که در برابر حرکت اجسام به وجود می آید. این نیرو، هم در خلاف جهت حرکت، هم در جهت حرکت ایجاد شده است و با حرکت اجسام مخالفت می کند. برای ایجاد حرکت در اجسام باید نیرویی بزرگ تر از نیروی اصطکاک در جهت حرکت اعمال شود. اصطکاک به عواملی چون نیروی عمودی، شرایط سطح های تماس از نظر زبری و جنس بستگی دارد. این تعریف بیانگر دیدگاه لئوناردو داوینچی و آموتنون و همچنین نظریه کولمب درباره اصطکاک است. اما امروزه با پیشرفت علم و فناوری و همچنین نیاز به ساخت قطعات و ابزار در ابعاد میکرو/نانو نیازمند مطالعه و بررسی مدل های دقیق اصطکاکی افزایش یافته است. در این بخش به شرح سه مدل مهم اصطکاکی پرداخته شده است.

### ۲-۲-۱ مدل اصطکاکی کولمب

این مدل را می توان همان تعریف کلاسیک و اولیه اصطکاک خواند که ایده اصلی آن بدین صورت بوده که اصطکاک مخالف حرکت است و بزرگی آن به سرعت و سطح تماسی که ذره روی آن قرار دارد، بستگی ندارد و کاملاً مستقل از این دو پارامتر مهم است. نیروی

به تفصیل شرح داده شده و در نهایت جابه جایی و سرعت ذرات در بازه شعاعی ۶۰ تا ۱۰۰ میکرومتر به دست آمده و در آخر به مقایسه سه مدل مهم اصطکاکی مذکور پرداخته شده است.

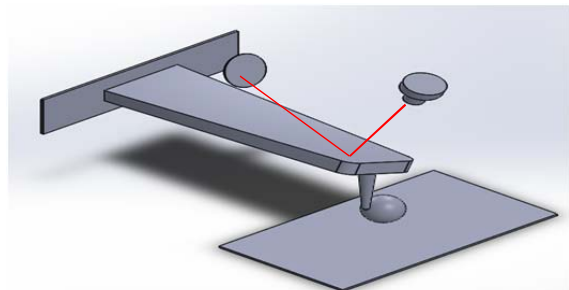
در شکل ۱ جابه جایی ذره هدف بر صفحه مبنا آورده شده که حرکت آن توسط تیرک و سوزن نشان داده شده است. در ابتدا سوزن با ذره ارتباط برقرار کرده و پس از غلبه بر نیروهای اصطکاکی و چسبندگی، ذره شروع به حرکت کرده است.



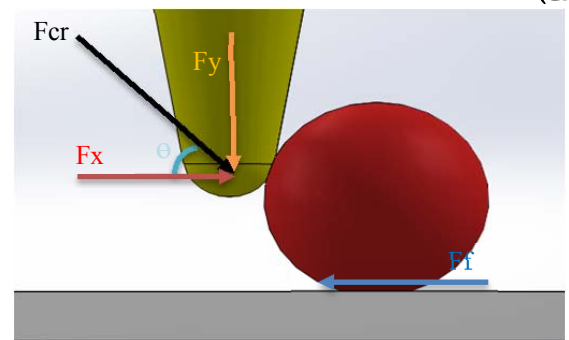
شکل ۱) جابه جایی ذره هدف در فاز دوم

### ۲-۱-۲ مدل سازی دینامیک فاز دوم نانومنیپولیشن

با استفاده از معادله اصلی نیرو، طبق قانون دوم نیوتن که حاصل ضرب شتاب ذره در جرم آن نیرو را نمایان می کند، برای مدل سازی دینامیک فاز دوم نانومنیپولیشن ذرات با توجه به شماتیک نیروها در شکل ۲ و نیروی بحرانی که از معادلات فاز اول نانومنیپولیشن به دست آمده، معادلات نیرو، شتاب و جابه جایی استخراج شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲) شماتیک تیرک و ذره در فاز دوم؛ (الف) شماتیک فاز دوم، (ب) دیاگرام آزاد نانوذره

در شکل ۲- الف، شماتیک کلی فاز دوم نانومنیپولیشن ذرات نشان داده شده است که لیزر پس از برخورد به تیرک به نمایشگر حسگر فوتوالکترونیک بازتاب پیدا می کند و همچنین تیرک جابه جایی ذره هدف را انجام می دهد. در شکل ۲- ب نیز دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر ذره هدف نمایش داده شده که شامل نیروی بحرانی و تجزیه

استریبیک است. مدل لاگره برای رفتار سرعت بسیار کم خوب عمل کرده است و می تواند ارایه دهنده مناسب آن باشد. مقادیر و ضرایب به کاررفته برای مدل اصطکاکی لاگره در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱) مقادیر به کاررفته در مدل اصطکاکی لاگره [12]

$\sigma_0 \left(\frac{N}{mm}\right)$	$\sigma_1 \left(\frac{Ns}{mm}\right)$	$\sigma_2 \left(\frac{Ns}{mm}\right)$	$F_c (N)$	$F_s (N)$	$v_s \left(\frac{m}{s}\right)$
$1 \times 10^{-2}$	$1/5 \times 10^{-2}$	۰	$6 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-2}$

### ۲-۲-۳- مدل ایچکا

اصطکاک لغزشی ماکروسکوپی معمولاً با معادله آمنتون توصیف می شود که بیان دارد 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 [25].

$$f_T = \mu(f_N + f_0) \quad (15)$$

برای یک تماس میکرو نیز فرض می شود که نیروی اصطکاک با معادله ۱۶ داده می شود.

$$f_T = \tau A \quad (16)$$

$A$  مساحت واقعی تماس میکرو و  $T$  استحکام برشی بوده که هر دوی این پارامترها مرتبط با نیروی عمودی است. رابطه بین تنش اصطکاکی بی بعد به صورت  $\bar{f}_f = T_f / G^*$  و شعاع تماس بی بعد  $\bar{a} = a/b$  است.

در این روابط  $a$  شعاع تماس،  $b$  دامنه بردار برگر و  $G^*$  مدول برشی موثر است. این مقدار با توجه به مدول برشی دو جسم در تماس با هم است که از رابطه ۱۷ به دست می آید [26, 27].

$$G^* = \left( \frac{2 G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right) \quad (17)$$

که مقدار  $\bar{f}_f$  از رابطه ۱۸ حاصل می شود.

$$\log \bar{f}_f = \begin{cases} \log \bar{f}_{f1}, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ M \log \bar{a} + b, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \log \bar{f}_{f2}, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (18)$$

که در نتیجه، روابط ۱۹ و ۲۰ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$M = - \frac{\log\left(\frac{\bar{f}_{f1}}{\bar{f}_{f2}}\right)}{\log\left(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}\right)} \quad (19)$$

$$B = \frac{\log(\bar{f}_{f1}) \log(\bar{a}_2) - \log(\bar{f}_{f2}) \log(\bar{a}_1)}{\log\left(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}\right)} \quad (20)$$

با داشتن این روابط می توان نیروی اصطکاک را از رابطه ۲۱ به دست آورد.

$$\frac{F_f}{G^* b^2} = \begin{cases} \bar{f}_{f1} \bar{a}^2, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ 10^B \bar{a}^{M+2}, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \bar{f}_{f2} \bar{a}^2, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (21)$$

شکل ۳ الگوریتم مدل سازی فاز دوم نانومنیولیشن با استفاده از مدل های اصطکاکی مختلف را نشان داده که کلیه مراحل از آغاز تا پایان را در بر گرفته است.

اصطکاک در این مدل کاملاً متناسب با نیروی عمودی سطح است. اگر ضریب اصطکاک (COF) که کاملاً مستقل از جنس ماده بوده، یعنی برای هر ماده طبق نظریه کولمب ثابت است را در اختیار داشته باشیم، می توانیم رابطه آن را بدین صورت بنویسیم:

$$\mu = \frac{F_{cr}}{F_N} \quad (9)$$

این رابطه دقیقاً همان مدل اصطکاکی کولمب است. این موضوع که نظریه کولمب یک مدل کاملاً ایده آل است به راحتی از رابطه ۹ استنباط می شود. همچنین یکی دیگر از بزرگترین نواقص نظریه این است که در سرعت صفر، هیچ نیرویی برای اصطکاک نخواهیم داشت. زیرا امکان وجود داشتن این مقدار در بازه  $(-F_c, F_c)$  وجود دارد و مقدار آن بستگی به چگونگی تعریف تابع  $\text{sgn}$  داشته که در رابطه ۱۰ نمایش داده شده است.

$$F = F_c \text{sgn}(v) \quad (10)$$

$$f_{coulomb} = \mu N + \tau A \quad (11)$$

### ۲-۲-۲- مدل لاگره

مدل اصطکاکی لاگره مدلی بوده که در آن اثر استریبیک بهره گرفته شده است که یک اثر غیرثابت در سرعت های بسیار کم ایجاد می کند. این مدل توسط دی ویت با همکاران ارایه شده است. همچنین مدل اصطکاکی لاگره دارای یک متغیر حالت بوده که میانگین تغییر شکل الاستیک زبری و همچنین مجسم کننده صفحات تماسی است. نتایج مدل در بردارنده تمامی پارامترهای شناخته شده اصطکاک بوده است و به طور مثال تاخیر اصطکاکی، نیروهای گسیختگی متنوع، جابه جایی پیش لغزش و حرکت لغزش- غلطش را نشان می دهد. با این وجود رفتار هیستریزیس با حافظه غیرمحلی بین نیروی به کاررفته و جابه جایی در روش پیش لغزش که در انواع مختلف تماس اندازه گیری شده است، با این روش قابل محاسبه نیست. مدل لاگره از یک حالت غیرخطی (معادله ۱۲) و نیروی اصطکاکی لاگره  $F_f$  (معادله ۱۳) تشکیل شده است [12].

$$g(v) \frac{dz}{dt} = \frac{v}{g(v)} - |v| z \quad (12)$$

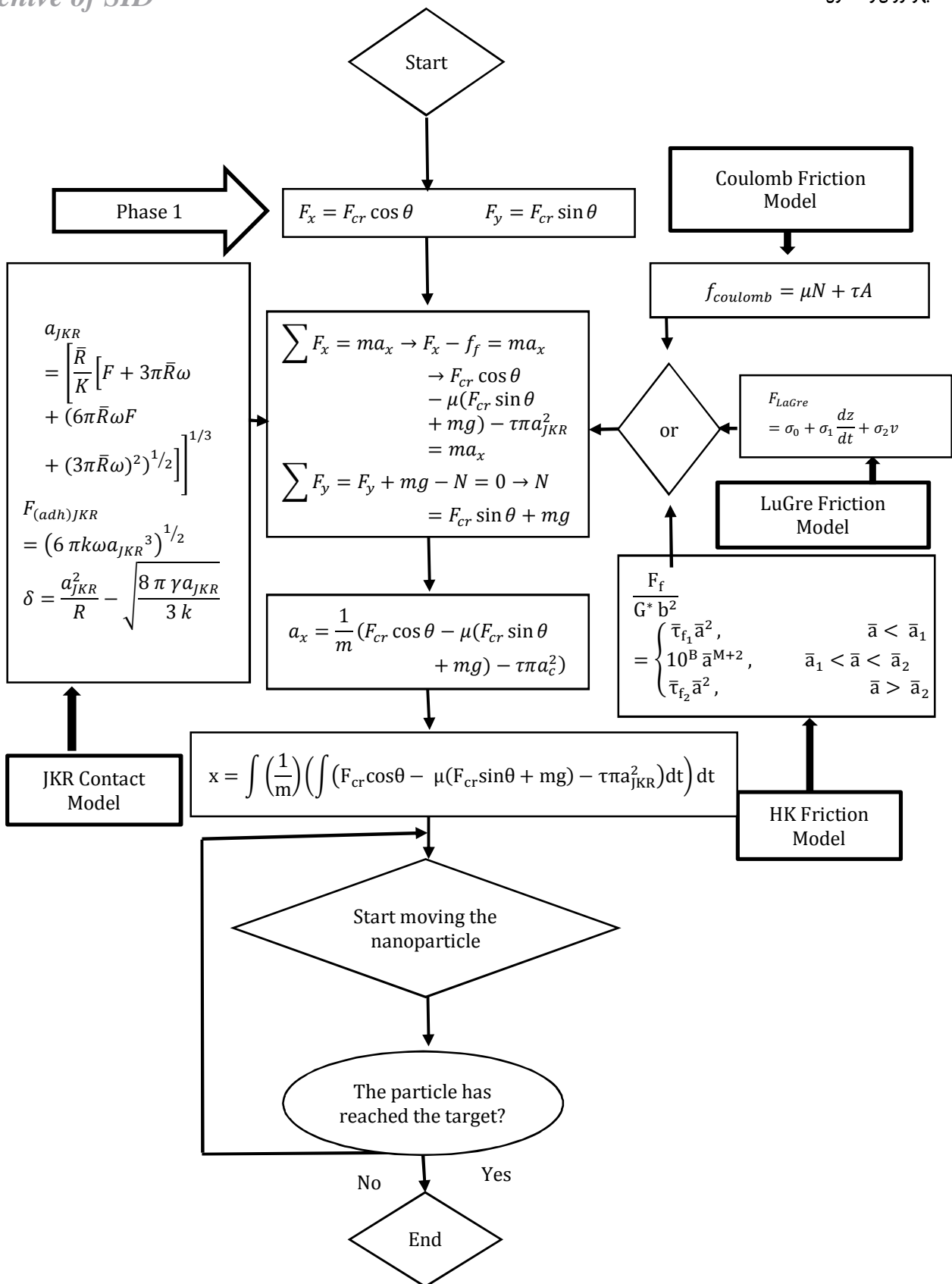
$$F_f = \sigma_0 + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (13)$$

در معادله ۱۲،  $v$  سرعت نسبی بین سطوح لغزنده و  $Z$  متغیر حالت است که میانگین تغییر شکل زبری ها را نشان می دهد. در معادله ۱۳ نیز  $\sigma_0$  سختی معادل برای رابطه موقعیت نیرو در سرعت معکوس،  $\sigma_1$  ضریب اصطکاکی میکروویسکوز و  $\sigma_2$  ضریب اصطکاکی ویسکوز است. تداخل بین دو سطح به عنوان دو جسم صلب فرض شده که تماس از میان زبری های الاستیک است که شبیه فنرهایی تغییر شکل داده و باعث شده اند تا نیروی اصطکاکی به عنوان یک نیروی مماسی به کار گرفته شود.

همچنین در معادله ۱۲، تابع  $g(v)$  یک تابع مثبت است که رفتار سرعت ثابت را مدل می کند و وابسته به برخی پارامترها مانند خواص مواد، روغن کاری و درجه حرارت است. برای حرکت حالت پایا، رابطه بین نیروی اصطکاکی و سرعت در مدل لاگره تابع  $g(v)$  پیشنهاد شده تا اثر استریبیک را شرح دهد که به صورت زیر است [12]:

$$g(v) = \frac{F_c}{\sigma_0} + \frac{(F_s + F_c) e^{-v/v_s}}{\sigma_0} \quad (14)$$

$F_c$  نیروی اصطکاکی کولمب،  $F_s$  نیروی استیکشن و  $v_s$  سرعت

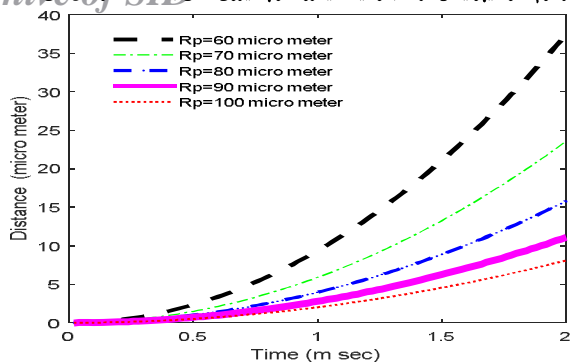


شکل ۳) الگوریتم مدل سازی فاز دوم نانومنیپولیشن با استفاده از مدل های اصطکاکی مختلف

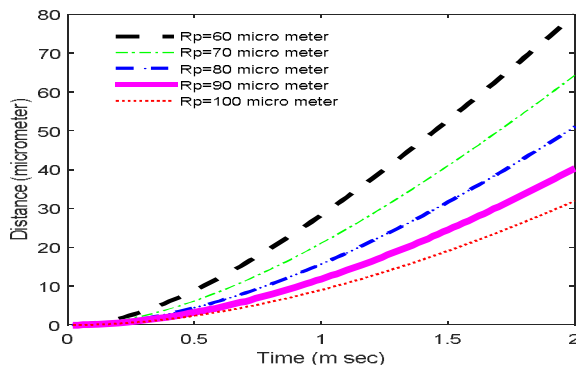
۳- شبیه سازی

چابگی و سرعت ذرات در بازه شعاعی ۶۰ تا ۱۰۰ میکرومتر به دست آمده است. به صورت کلی مشاهده می شود حتی با در نظر گرفتن اثر نیروی

در این بخش ابتدا به شبیه سازی منیپولیشن دو بُعدی با استفاده از مدل های اصطکاکی کولمب، اچکا و لاگره پرداخته شده و سپس



نمودار ۲) جابه‌جایی ذرات در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه در مدل اصطکاکی اچ‌کا



نمودار ۳) جابه‌جایی ذرات در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه در مدل اصطکاکی لاگره

### ۳-۲- شبیه‌سازی سرعت میکروذرات

همان طور که در بخش نمودارهای جابه‌جایی مشاهده می‌شود، برای نمودارهای ۴-۶ مربوط به سرعت نیز همین نتایج را داریم. بدین صورت که برای هر ذره بدون در نظر گرفتن مدل اصطکاکی، با افزایش شعاع آن سرعت نیز کاهش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت که سرعت و جابه‌جایی، بدون در نظر گرفتن مدل اصطکاکی با افزایش شعاع میکروذره رابطه معکوس دارد. برای مثال در مدل اصطکاکی لاگره پس از ۲ میلی‌ثانیه از شروع حرکت، جابه‌جایی از مقدار ۸۰ میکرومتر و سرعت از ۸۰ میکرومتر بر ثانیه برای ذره با شعاع ۱۰۰ میکرومتر به ۳۱ و ۳۱ میکرومتر بر ثانیه برای ذره با شعاع ۶۰ میکرومتر کاهش یافته است.

نمودار ۴، نتایج مربوط به سرعت میکروذره در فاز دوم نانومنیپولیشن با استفاده از مدل اصطکاکی کولمب را نشان می‌دهد. از آنجایی که مدل اصطکاکی کولمب، اثر سرعت ثابت یا سرعت در نقطه صفر و سطح تماس اعم از نیروهای چسبندگی را در نظر نمی‌گیرد و یک مدل کاملاً ساده ایده‌آل است، جزء دسته اولیه نظریات اصطکاکی بوده و بهتر است برای موضوع دقیق و مهمی همچون منیپولیشن ذرات مورد استفاده قرار نگیرد.

نمودار ۵ نیز نتایج مربوط به سرعت ذرات در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه در مدل اصطکاکی اچ‌کا است. در مدل اصطکاکی اچ‌کا با در نظر گرفتن نیروهای چسبندگی در حد مقیاس میکرو مشاهده می‌شود که مقدار جابه‌جایی و سرعت هر دو برای ذرات افزایش پیدا کرده است، به طوری که نسبت به مدل اصطکاکی کولمب با افزایش دوبرابری این پارامترها روبه‌رو هستیم.

نمودار ۶، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سرعت ذره در فاز دوم نانومنیپولیشن را برای میکروذرات با شعاع‌های مختلف ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میکرومتر با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره نشان می‌دهد. همان گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، در مدل اصطکاکی

اصطکاکی با افزایش شعاع ذره، مقدار جابه‌جایی و سرعت آن کاهش یافته است.

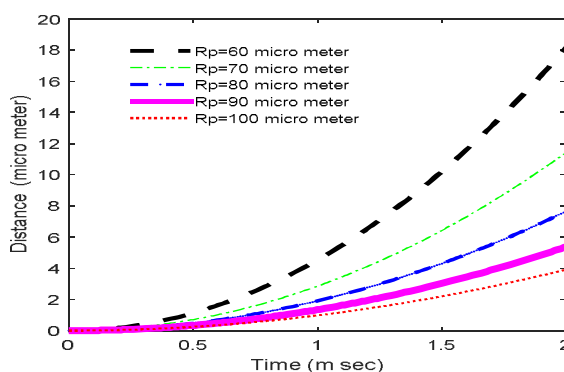
### ۳-۱- شبیه‌سازی جابه‌جایی میکروذرات

نمودار ۱، نتایج شبیه‌سازی مدل اصطکاکی کولمب را برای میکروذرات با شعاع‌های مختلف ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میکرومتر نشان می‌دهد. در مدل اصطکاکی کولمب به دلیل در نظر نگرفتن هیچ یک از اثرهایی که در یک مدل اصطکاکی دقیق تاثیرگذار است، کمینه مقدار جابه‌جایی به دست آمده است. این مدل به دلیل نداشتن اثر چسبندگی و سرعت ثابت، ساده‌ترین و کم‌دقت‌ترین مدل اصطکاکی در ابعاد میکرو/نانو است. همچنین در نمودار ۱ مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع میکروذره هدف، میزان جابه‌جایی میکروذره در فاز دوم کاهش می‌یابد که دلیل اصلی این امر افزایش نیروی اصطکاکی کولمب با افزایش شعاع میکروذره است.

در نمودار ۲، نتایج شبیه‌سازی مدل اصطکاکی اچ‌کا مشاهده می‌شود. در مدل اصطکاکی اچ‌کا به دلیل در نظر گرفتن اثر چسبندگی و نیروهای آن، مقدار جابه‌جایی با افزایش دوبرابری نسبت به مدل اصطکاکی کولمب همراه بوده است، اما این مدل نیز به خاطر این که اثر حالات مختلف سرعت در میان روابطش جایی ندارد، دارای دقت بسیار بالایی نیست.

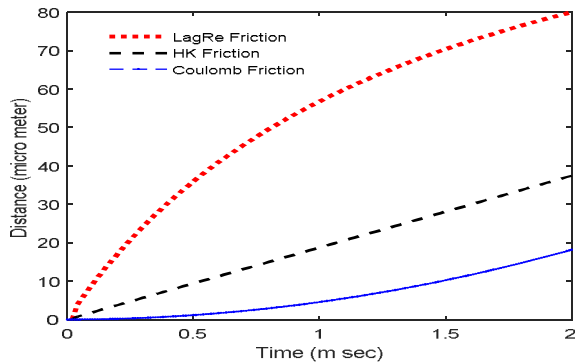
در نمودار ۲ نیز همانند نمودار ۱، مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع میکروذره هدف، میزان جابه‌جایی میکروذره در فاز دوم کاهش می‌یابد که دلیل اصلی این امر افزایش نیروی اصطکاکی اچ‌کا و همچنین افزایش سطح تماس ذره و صفحه مبنا، با افزایش شعاع میکروذره است.

نمودار ۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی جابه‌جایی ذره در فاز دوم نانومنیپولیشن با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره را نشان می‌دهد. همان گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود در مدل اصطکاکی لاگره به خاطر در نظر گرفتن اثر استریک و سرعت‌های ثابت و بسیار کم، بیشترین مقدار جابه‌جایی به دست آمده و دقت نتایج بیشتر شده است. البته علی‌رغم دقت بالای مدل اصطکاکی لاگره بایستی به این موضوع نیز اشاره نمود که یکی از معایب این مدل پیچیدگی حل مساله است، ولی با این حال مقدار جابه‌جایی در این مدل اصطکاکی بیش از دوبرابر نسبت به مدل اصطکاکی اچ‌کا یعنی ۸۰ میکرون است. در نتیجه هر قدر که اثر چسبندگی سطح و نیروهای تماسی که شامل پارامترهایی مانند زبری/صافی سطح و جنس آن است، به همراه عامل سرعت، به ویژه در مقادیر بسیار کم یا حالت‌های ثابت در نظر گرفته شده و اثر آنها در حل مساله وارد شود، نتایج دقیق‌تری به دست خواهد آمد که در نهایت منجر به بیشتر شدن جابه‌جایی می‌شود.

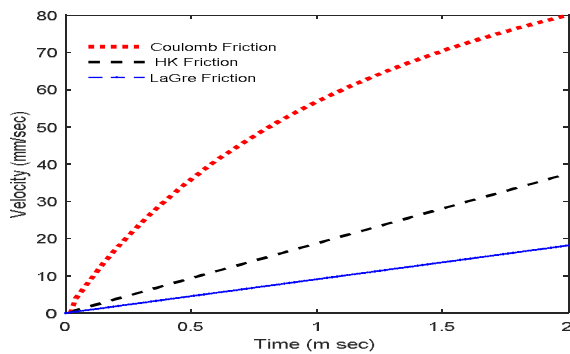


نمودار ۱) جابه‌جایی ذرات در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه در مدل اصطکاکی کولمب

نمودارهای ۷ و ۸ به ترتیب مقایسه جابه‌جایی و سرعت در مدل‌های اصطکاکی مختلف را نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده در این دو نمودار نشان می‌دهد که برای نانومنیوپولیشن ذرات به ترتیب مدل اصطکاکی لاگره، اچ‌کا و کولمب از اهمیت و دقت بیشتری برخوردار هستند و بهتر است که برای انجام مدل‌سازی در مقیاس میکرو/نانو از مدل اصطکاکی لاگره استفاده شود تا در کمترین زمان ممکن با کمینه مقدار نیروی بحرانی، بیشینه جابه‌جایی و سرعت به دست آید.



نمودار ۷) مقایسه جابه‌جایی مدل‌های اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره



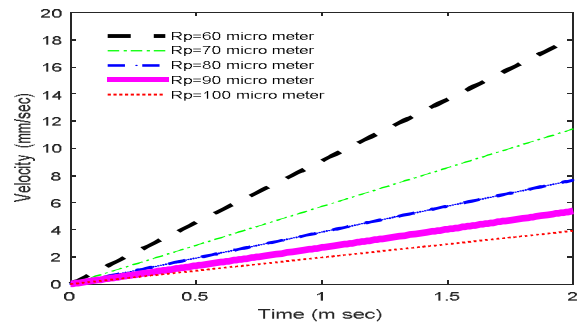
نمودار ۸) مقایسه سرعت مدل‌های اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره

به طور کلی می‌توان اذعان داشت که مدل اصطکاکی کولمب به خاطر بیشینه سهولتی که در نظر می‌گیرد، دقت بسیار پایینی دارد و کمترین میزان جابه‌جایی و سرعت را نتیجه می‌دهد. مدل اصطکاکی اچ‌کا نیز گرچه به دلیل در نظر گرفتن تنها عامل چسبندگی و نیروهای تماسی نسبت به مدل اصطکاکی کولمب بهبود یافته است، اما همچنان به علت در نظر گرفتن عامل مهم سرعت در مقیاس بسیار کم یا ثابت نمی‌تواند مقادیر دقیق جابه‌جایی و سرعت را نمایش دهد. اما مدل اصطکاکی لاگره با در نظر گرفتن هر دو عامل مهم نیروهای چسبندگی و اثر سرعت در مقیاس‌های کوچک و ثابت، دقیق‌ترین مقادیر و اصلاح‌یافته‌ترین را نمایان کرده است.

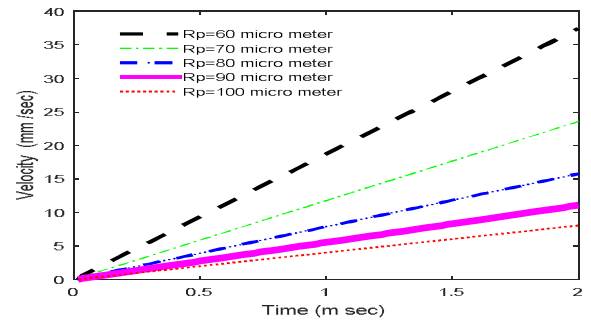
#### ۴- نتیجه‌گیری

در دنیای امروز اهمیت نانومنیوپولیشن ذرات با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه‌های ساخت و تولید ابزار و تجهیزات، گستره پزشکی و علم زیست‌شناسی بسیار گسترش یافته است. در فاز اول نانومنیوپولیشن ذرات به بررسی نیرو و زمان بحرانی برای هل دادن/حرکت یک نانوذره هدف روی یک بستر/سطح پرداخته می‌شود و نیروی بحرانی (مقدار نیرویی که لازم است تا نانوذره هدف با استفاده از آن بر نیروهای چسبندگی سطح/تماس و

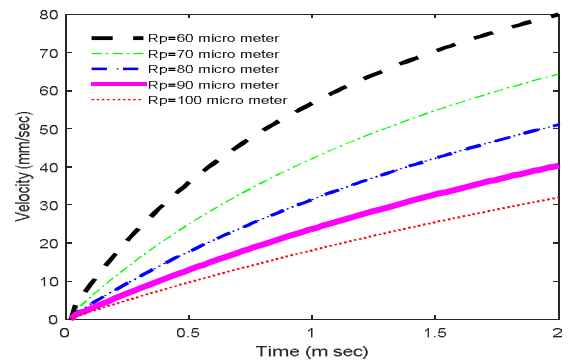
لاگره در مقایسه با سایر مدل‌های اصطکاکی بررسی شده، بیشترین مقدار سرعت به دست آمده و دقت نتایج بیشتر شده است. همچنین در این مدل اصطکاکی نیز همانند سایر مدل‌های اصطکاکی مورد بررسی، با افزایش شعاع ذره هدف، سرعت ذره کاهش یافته است، به طوری که برای ذره ۶۰ میکرومتری سرعت حدود ۸۰ میکرومتر بر ثانیه و برای ذره ۱۰۰ میکرومتری سرعت حدود ۳۲ میکرومتر بر ثانیه به دست آمده است.



نمودار ۴) سرعت ذرات در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه در مدل اصطکاکی کولمب



نمودار ۵) سرعت ذرات در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه در مدل اصطکاکی اچ‌کا



نمودار ۶) سرعت ذرات در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه در مدل اصطکاکی لاگره

#### ۳-۳- مقایسه مدل‌های اصطکاکی مختلف

این مقایسه بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. برای این کار مدل‌سازی دینامیک نانوذرات و مدل‌های اصطکاکی مذکور با استفاده از روابط آنها که ذکر شده است، در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده‌اند و این کار برای ۵ نانوذره با شعاع‌های مختلف از ۶۰ تا ۱۰۰ میکرومتر شبیه‌سازی شده است. همچنین تمامی خواص برای یک ذره نانو اعم از محیطی و ابعادی در نظر گرفته شده، سپس میزان جابه‌جایی و سرعت برای هر یک از ذرات با توجه به شرایط مدل اصطکاکی به دست آمده است.



نیروهای اصطکاکی، غلبه و شروع به حرکت کند) و زمان بحرانی (مدت‌زمانی که ذره از حالت استاتیکی به دینامیک تغییر پیدا می‌کند) استخراج می‌شود.

تشکر و قدردانی می‌گردد.  
**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی این مقاله منتج از فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی ندارد.

**سهم نویسندگان:** بهاره زارعی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ سیدحسن بطحائی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ معین طاهری (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ مریم مومنی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)

**منابع مالی:** منابع مالی خاصی برای انجام این پژوهش استفاده نشده است.

**۵- پی‌نوشت**

شرح	علامه اختصاری
شعاع تماس	$a$
شعاع تماس بی‌بعد	$\bar{a}$
مساحت واقعی تماس	$A$
بردار برگرد	$b$
نیرو	$F$
نیروی اصطکاکی کولمب	$f_c$
نیروی اصطکاکی اچ‌کا	$F_f$
نیروی عمودی	$f_N$
نیروی چسبندگی	$f_0$
نیروی استیکیشن	$f_s$
مدول برشی موثر	$G^*$
مدول برشی سوزن	$G_1$
مدول برشی ذره	$G_2$
تابع رفتار سرعت	$g(v)$
مدول الاستیسیته موثر	$K$
جرم ذره	$m$
گشتاور پیچشی تیرک	$M$
شعاع ذره	$R$
شعاع معادل	$\bar{R}$
میانگین ارتفاع برجستگی‌ها	$z$
ضریب اصطکاکی	$\mu$
سرعت مطلوب فشاری/کششی	$v$
سرعت استریک	$v_s$
ضریب سختی	$\sigma$
سختی معادل برای رابطه موقعیت نیرو در سرعت معکوس	$\sigma_0$
ضریب اصطکاکی میکروویسکوز	$\sigma_1$
ضریب اصطکاکی ویسکوز	$\sigma_2$
استحکام برشی	$\tau$
تنش اصطکاکی بی‌بعد	$\bar{\tau}_f$
ضریب چسبندگی ذره	$\omega_p$

در فاز دوم، دغدغه اصلی پس از یافتن نیرو و زمان بحرانی و عواملی مانند پارامترهای ابعادی و محیطی که روی آنها تأثیر بسزایی دارند، پیدا کردن الگوی مناسب برای حرکت نانو/میکرو ذرات با یک مدل صحیح از سرعت و جابه‌جایی اصلی‌ترین موضوع در فاز دوم فرآیند نانومنیپولیشن است. مدل‌های اصطکاکی که یکی از سه رکن اصلی مدل‌سازی در فرآیند منیپولیشن به حساب می‌آیند، تأثیر بسیار مهمی روی الگوی جابه‌جایی و سرعت نانو/میکرو ذرات دارند. مدل‌های اصطکاکی از دیرباز تاکنون پیشرفت بسیار چشمگیری داشته‌اند. در مدل‌های اولیه تنها عامل خلاف حرکت به‌عنوان نیروی اصطکاک شناخته می‌شد. تنها عاملی که در جهت نیرو مخالفت ایجاد کند، از نظریه‌های کلاسیک برشمرده شده است. اما با گذشت زمان و پیشرفت علم و فناوری، عامل بسیار مهم سرعت در دو مقیاس سرعت ثابت و سرعت ریزمقیاس، تأثیر بسیار زیادی در تغییر میزان اصطکاک ایجاد کرده است.

چسبندگی نیز به‌عنوان دومین عامل اصلی در تغییر میزان اصطکاک معرفی شده است. هر چه مدل‌های اصطکاکی در این دو عامل به‌صورت دقیق‌تر عمل کرده باشند، نتایج دارای دقت و صحت بیشتری است. از کاربردهای نانوفناوری در دنیای پزشکی در زمینه منیپولیشن نانوذرات، تحویل دارو و ژن، مهندسی بافت و تخریب سلول‌های سرطانی است که این عمل نیاز به دقت بسیار بالایی دارد. به همین منظور جابه‌جایی و سرعت نانو/میکروذرات از اهمیت بسزایی برخوردار است. یافتن دقیق‌ترین مدل اصطکاکی می‌تواند تا حدودی بهره‌وری این امر را تامین کند که به همین منظور در این مقاله با بررسی مدل‌های اصطکاکی، میزان جابه‌جایی و سرعت میکرو/نانوذرات برای ۵ نمونه از ذرات با شعاع ۶۰ تا ۱۰۰ میکرومتر به دست آمده است. مدل اصطکاکی لاگره بیشترین میزان دقت و صحت را دارد، زیرا دو عامل بسیار مهم نیروهای چسبندگی، سرعت ثابت و ریزمقیاس را در نظر گرفته است. به همین منظور بیشترین میزان جابه‌جایی و سرعت با حداقل نیروی بحرانی به این مدل اصطکاکی اختصاص یافته است. مدل اصطکاکی اچ‌کا نیز تنها با در نظر گرفتن عامل چسبندگی و نیروهای آن از دقت نسبتاً خوبی برخوردار بوده، اما مدل اصطکاکی کولمب از نظریه‌های کلاسیک و اولیه اصطکاک بهره گرفته و هیچ کدام از دو عامل بسیار مهم سرعت و نیروهای چسبندگی در آن نقش نداشته است و به همین خاطر کمترین میزان جابه‌جایی و سرعت را دارد. همچنین مشاهده شده است که حتی بدون در نظر گرفتن عامل مهم اصطکاک با افزایش شعاع میکرو/نانوذره، جابه‌جایی و سرعت ذرات هدف هر دو کاهش یافته است. به‌طور کلی با افزایش شعاع ذرات از ۶۰ به ۱۰۰ میکرومتر، مقدار جابه‌جایی و سرعت کاهش یافته که دلیل اصلی این امر افزایش شعاع ناحیه تماس و در نتیجه افزایش اصطکاک و چسبندگی به‌عنوان نیروهای مقاوم در برابر حرکت است. بنابراین در فرآیند نانومنیپولیشن ذرات که از دقت و حساسیت بسیار بالایی برخوردار بوده، یکی از عوامل مهم مدل‌سازی‌های اصطکاکی است که برای این امر مدل اصطکاکی لاگره با توجه به شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار MATLAB توانسته است نتایج خوبی را برای این امر نشان بدهد.

**تشکر و قدردانی:** از اعضای محترم شورای مکترونیک دانشگاه اراک

**منابع**  
 1- Korayem MH, Hoshiar AK, Nazarahari M. A hybrid co-evolutionary genetic algorithm for multiple nanoparticle assembly task path planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;87(9-12):3527-3543.  
 2- Korayem MH, Hefzabad RN, Homayooni A, Aslani H. Molecular dynamics simulation of nanomanipulation based on AFM in liquid ambient. Applied Physics A.

- 16- Kahrobaiyan MH, Asghari M, Rahaeifard M, Ahmadian MT. Investigation of the size-dependent dynamic characteristics of atomic force microscope microcantilevers based on the modified couple stress theory. *International Journal of Engineering Science*. 2010;48(12):1985-1994.
- 17- Mahmoodi SN, Daqaq MF, Jalili N. On the nonlinear-flexural response of piezoelectrically driven microcantilever sensors. *Sensors and Actuators A Physical*. 2009;153(2):171-179.
- 18- Mahmoodi SN, Jalili N. Non-linear vibrations and frequency response analysis of piezoelectrically driven microcantilevers. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2007;42(4):577-587.
- 19- Mahboobi SH, Meghdari A, Jalili N, Amiri F. Precise positioning and assembly of metallic nanoclusters as building blocks of nanostructures: A molecular dynamics study. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2009;42(2):182-195.
- 20- Korayem MH, Homayooni A. Non-classic multi scale analysis of 2D-manipulation with AFM based on modified couple stress theory. *Computational Materials Science*. 2016;114:33-39.
- 21- Tafazzoli A, Sitti M. Dynamic behavior and simulation of nanoparticle sliding during nanoprobe-based positioning. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 13-19, 2004, Anaheim, California, USA*. New York: ASME; 2004. p. 965-972.
- 22- Chen H, Xi N, Li G. CAD-guided automated nanoassembly using atomic force microscopy-based nonrobotics. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2006;3(3):208-217.
- 23- Varol A, Gunev I, Basdogan C. A virtual reality toolkit for path planning and manipulation at nano-scale. *14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 25-26 March, 2005, Alexandria, VA, USA*. Piscataway: IEEE; 2006.
- 24- Bathaee SH, Taheri M. Analysis of the effect of dimensions of the atomic force microscope on calculating the critical force of nanomanipulation in 3D using the frictional model of HK. *14th Iranian Conference on Manufacturing Engineering, Arak, Iran*. Arak: Arak University of Technology; 2017. [Persian]
- 25- Adams GG, Müftü S, Azhar NM. A scale dependent model for multi-asperity contact and friction. *Journal of Tribology*. 2003;125(4):700-708.
- 26- Hurtado JA, Kim KS. Scale effects in friction of single-asperity contacts. I. from concurrent slip to single-dislocation-assisted slip. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 1999;455(1989):3363-3384.
- 27- Hurtado JA, Kim KS. Scale effects in friction of single-asperity contacts. II. multiple-dislocation-cooperated slip. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 1999;455(1989):3385-3400.
- 2016;122:977.
- 3- Korayem AH, Mashhadian A, Korayem MH. Vibration analysis of different AFM cantilever with a piezoelectric layer in the vicinity of rough surfaces. *European Journal of Mechanics A Solids*. 2017;65:313-323.
- 4- Wu Y, Fang Y, Ren X. A high-efficiency Kalman filtering imaging mode for an atomic force microscopy with hysteresis modeling and compensation. *Mechatronics*. 2018;50:69-77.
- 5- Shen Y, Ahmad MR, Nakajima M, Kojima S, Homma M, Fukuda T. Evaluation of the single yeast cell's adhesion to ITO substrates with various surface energies via ESEM nanorobotic manipulation system. *IEEE Transactions on NanoBioscience*. 2011;10(4):217-224.
- 6- Korayem MH, Mahmoodi Z, Mohammadi M. 3D investigation of dynamic behavior and sensitivity analysis of the parameters of spherical biological particles in the first phase of AFM-based manipulations with the consideration of humidity effect. *Journal of Theoretical Biology*. 2018;436:105-119.
- 7- Rana MS, Pota HR, Petersen IR. Performance of sinusoidal scanning with MPC in AFM imaging. *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20(1):73-83.
- 8- Korayem MH, Homayooni A, Hefzabad RN. Non-classic multiscale modeling of manipulation based on AFM, in aqueous and humid ambient. *Surface Science*. 2018;671:27-35.
- 9- Shen Y, Nakajima M, Ahmad MR, Kojima S, Homma M, Fukuda T. In-situ single cell manipulation via nanorobotic manipulation system inside E-SEM. *International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 9-11 Nov, 2009, Nagoya, Japan*. Piscataway: IEEE; 2009.
- 10- Resch R, Lewis D, Meltzer S, Montoya N, E Koel B, Madhukar A, et al. Manipulation of gold nanoparticles in liquid environments using scanning force microscopy. *Ultramicroscopy*. 2000;82(1-4):135-139.
- 11- Habibullah H, Pota HR, Petersen IR, Rana MS. Tracking of triangular reference signals using LQG controllers for lateral positioning of an AFM scanner stage. *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*. 2014;19(4):1105-1114.
- 12- Korayem MH, Taheri M. Modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFM. *Journal of Nanoparticle Research*. 2014;16:2156.
- 13- Sitti M. Survey of nanomanipulation systems. *Proceedings of 1st IEEE Conference on Nanotechnology, 30-30 Oct, 2001, Maui, HI, USA*. Piscataway: IEEE; 2001.
- 14- Mahboobi SH, Meghdari A, Jalili N, Amiri F. Molecular dynamics simulation of manipulation of metallic nanoclusters on double-layer substrates. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2010;42(9):2364-2374.
- 15- Zakeri M, Faraji J, Kharazmi M. Multipoint contact modeling of nanoparticle manipulation on rough surface. *Journal of Nanoparticle Research*. 2016;18:374.