

مطالعه‌ی تجربی فاز دوم نانوجابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از مدل‌های دقیق اصطکاکی

معین طاهری*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، mtaheri@iust.ac.ir

زهره مرادی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، nairikka@gmail.com

چکیده

فناوری نانو امروزه در حوزه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از ابزار کاربردی این فناوری نوین، میکروسکوپ نیروی اتمی است. از میکروسکوپ نیروی اتمی در تصویربرداری، ساخت تجهیزات ریزمقیاس، استخراج خواص بافت‌های زیستی و جابه‌جایی استفاده می‌گردد. جابه‌جایی ذرات با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در دو فاز مورد توجه قرار می‌گیرد. فاز نخست، پیش از حرکت ذره هدف و فاز دوم، در حین حرکت ذره هدف است. تعیین مسیر دقیق ذره در فاز دوم نانوجابه‌جایی از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از پارامترهای مهم در شبیه‌سازی فاز دوم، مدل اصطکاکی مورد استفاده است. در این پژوهش برای نخستین بار از سه مدل اصطکاکی دقیق لاگره، لون و گرین‌وود- ویلیامسون، جهت بررسی سه‌بعدی فاز دوم نانوجابه‌جایی استفاده شده است. ذره هدف مورد بررسی نانوذره‌ی طلا می‌باشد که ابعاد و هندسه‌ی آن به‌صورت تجربی با تصویربرداری به‌وسیله‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی به‌دست‌آمده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌است که مدل لاگره کمترین میزان جابه‌جایی و مدل گرین‌وود- ویلیامسون، بیشترین میزان جابه‌جایی را پیش‌بینی نموده‌اند. **واژه‌های کلیدی:** مطالعه‌ی تجربی، نانوجابه‌جایی، سه‌بعدی، فاز دوم، مدل‌های دقیق اصطکاکی، نانوذرات طلا.

Experimental Study of the Second Phase of 3D Nanomanipulation Using Accurate Friction Models

M. Taheri

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, ArakUniversity, Arak, Iran

Z. Moradi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, ArakUniversity, Arak, Iran

Abstract

Today, nanotechnology is used in various fields. One of the practical tools of this new technology is the Atomic Force Microscope (AFM). AFM is used in imaging, making microscale equipment, extracting the properties of biological tissues and manipulation. Manipulation of particles using AFM is considered in two phases. The first phase is before the movement of the target particle and the second phase is during the movement of the target particle. Determining the exact path of the particle in the second phase of nanomanipulation is of great importance. One of the important parameters in the simulation of the second phase is the friction model used. In this research, for the first time, three exact friction models of LuGre, Leuven and Greenwood-Williamson have been used to investigate the 3D second phase of nanomanipulation. The target particle under investigation is a gold nanoparticle, whose dimensions and geometry were obtained experimentally by imaging with an AFM. The obtained results have shown that the LuGre model predicts the lowest amount of displacement and the Greenwood-Williamson model predicts the highest amount of displacement.

Keywords: Experimental Study, Nanomanipulation, 3D, Second Phase, Accurate Friction Models, Gold Nanoparticle.

۱- مقدمه

نسبت به مقیاس ماکرو، با توجه به افزایش نسبت سطح به حجم، نیروهای سطحی از جمله نیروهای تماسی و اصطکاک نسبت به نیروهای حجمی مانند وزن، اهمیت بسیار بیشتری خواهند داشت. لی و چانگ [۱] به حل تقریبی یک معادله بر اساس نظریه‌ی تعمیم‌یافته‌ی تنش کوپل برای بررسی حساسیت خمشی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند که نیروی برهم‌کنش نرمال در این معادله بین نوک تیرک و سطح نمونه در نظر گرفته شده است. ژائو و همکارانش [۲] یک روش خودکار برای پیاده‌سازی الگو در میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده‌اند. این روش فشار را در یک‌جهت مستقیم حفظ می‌کند و آن‌قدر آن را تکرار می‌کند تا ذره در خط مستقیم به نقطه‌ی هدف برسد. این روش از طریق نقشه‌برداری‌های چندین مکان در خطوط موازی، مختصات جانبی ذره را مشخص می‌کند و قادر است به‌طور خودکار ذرات را از موقعیت اولیه به موقعیت هدف برساند. دمیچلی و کورایم [۳] به مدل‌سازی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از نظریه تیر تیموشینکو و حساسیت فرانکس و

فناوری نانو از فناوری‌های جدید و مورد استفاده در کاربردهای مختلف و متنوع است. یکی از ابزارهای مهم این فناوری، میکروسکوپ نیروی اتمی^۱ است. از میکروسکوپ نیروی اتمی می‌توان در بخش‌های مختلف و جهت اهداف گوناگون استفاده کرد. از میکروسکوپ نیروی اتمی در تصویربرداری و استخراج توپوگرافی سطوح، نانوجابه‌جایی و جابه‌جایی میکرو/نانوذرات مختلف، استخراج خواص میکرو/نانوذرات و بافت‌های مختلف زیستی استفاده می‌گردد. یکی از کاربردهای مهم این ابزار، استفاده در جابه‌جایی جهت جابه‌جایی و ساخت تجهیزات ریزمقیاس است؛ که برای این موضوع، مدل‌سازی دقیق فرآیند نانوجابه‌جایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مقیاس میکرو/نانو

¹ Atomic Force Microscope (AFM)

دامنه‌ی چهار مد پیچشی اول برای تغییرات سختی صفحه پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که مد اول برای مواد نرم حساس‌ترین مد خواهد بود و با افزایش سختی نمونه‌ها مودهای بالاتر حساس خواهند بود.

لی و همکارانش [۴] یک استراتژی جدید مبتنی بر سنجش فشاری برای مسیریابی سریع نانوجابه‌جایی و یک مدل جدید سینماتیک برای یافتن موقعیت نوک سوزن با ذره هدف در فرآیند نانوجابه‌جایی ارائه کرده‌اند. هوشیار و همکارانش [۵] یک الگوریتم ژنتیک جدید برای مسیریابی نانوذرات ارائه کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از یک تابع هزینه که شامل پارامترهای نیرو و زمان بحرانی، زبری سطح و صافی مسیر است به تعیین مسیری که به کمترین تغییر موقعیت سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی برای حرکت ذره نیاز باشد، پرداخته‌اند. سی‌وی‌ای و همکارانش [۶] فرآیند نانوجابه‌جایی روی نانولوله‌های کربنی را مورد بررسی قرار داده‌اند. طاهری [۷] به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی جابه‌جایی سه‌بعدی ذرات پرداخته است. طاهری [۸] همچنین برای نخستین بار به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی جابه‌جایی سه‌بعدی ذرات بیولوژیکی پرداخته است.

کوریام و همکارانش [۹] به بررسی فرآیند جابه‌جایی نانولوله‌های کربنی و تأثیر هندسه‌ی نانوذره‌ی هدف در فرآیند جابه‌جایی به‌صورت سه‌بعدی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش قطر نانولوله سبب افزایش میزان چسبندگی نانولوله به سطح مبنا می‌گردد و میزان عمق نفوذ محل تماس نیز افزایش می‌یابد. صادق زاده و کوریام [۱۰] اثرات تغییر شکل سوزن بر نتیجه نانوجابه‌جایی خودکار را مدل‌سازی و کنترل کرده‌اند. پارک و همکارانش [۱۱] نشان داده‌اند که از سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی در کاربردهای دوبعدی برای مونتاژ کردن سه‌بعدی نانوکوره‌های گروهی و صاف بر روی یک سطح نسبتاً صاف یا دارای پستی بلندی می‌توان استفاده کرد.

طاهری [۱۲] برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل اثر پارامترهای ابعادی مختلف شامل ۹ پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای x و y ، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره بر ۸ پارامتر خروجی شامل نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y و زمان بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y در جابه‌جایی سه‌بعدی مورد بررسی قرار داده است. زارعی و همکارانش [۱۳] برای اولین بار جابه‌جایی و سرعت ذرات در فاز دوم در فضای دوبعدی را با استفاده از سه مدل مهم اصطکاکی کولمب، HK و لاگره مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که بیش‌ترین جابه‌جایی و سرعت بر اساس مدل اصطکاکی لاگره و کم‌ترین میزان بر اساس مدل اصطکاکی کولمب است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش شعاع ذره‌ی هدف، جابه‌جایی و سرعت آن نیز کاهش یافته که این اثر حتی بدون در نظر گرفتن عامل اصطکاک ایجاد شده است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که مدل اصطکاکی کولمب کمترین و لاگره بیشترین میزان دقت و صحت را در مدل‌سازی داشته و مدل HK بین این دو قرار گرفته است.

کوریام و همکارانش [۱۴] به مطالعه‌ی رابطه‌ی بین حرکت ارتعاشی و کنترل میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. طاهری و

همکارانش [۱۵]، فاز دوم جابه‌جایی سه‌بعدی نانوذره‌ی طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در سطوح زبر و صاف را بررسی نموده‌اند. آن‌ها پژوهش خود مدل‌سازی حرکت به صورت سه‌بعدی را انجام داده و حرکت ذره در سطوح زبر و صاف را مورد مشاهده قرار داده‌اند. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی و جابه‌جایی ذره‌ی طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و با توجه به وجود پستی و بلندی‌ها در ابعاد نانو، نتایج نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی بیشتر در سطوح صاف نسبت به خشن بوده است. طاهری [۱۶] کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در استخراج نیرو و زمان بحرانی جابه‌جایی دوبعدی برای بافت سرطانی معده با مدل‌های اصطکاکی کولمب، HK و لاگره را بررسی نموده است. وی در این پژوهش، نیرو و زمان بحرانی فرآیند جابه‌جایی بافت سرطانی معده را با در نظر گرفتن نیروهای اصطکاکی با مدل‌های مختلف، مورد بررسی قرار داده است. در روند کلی جابه‌جایی نیروی بحرانی هنگام غلبه بر نیروهای مقاوم همچون اصطکاک رخ داده و بالا بودن این نیرو سبب آسیب رساندن به بافت‌های سرطانی می‌شود. مدل‌های اصطکاکی کولمب، لاگره و HK در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با تحلیل تصاویر توپوگرافی حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی، هندسه‌ی بافت سرطانی معده به‌صورت کروی فرض شده است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با در نظر گرفتن مدل‌های اصطکاکی متفاوت انجام شده است. نمودارهای نیرویی در جابه‌جایی دوبعدی ترسیم شده است و از نمودار نیروی برآیند برای مقایسه استفاده شده است. پس از ثابت شدن مقدار نیرو در مدل‌های اصطکاکی متفاوت، مقدار نیرو و زمان بحرانی به دست آمده است.

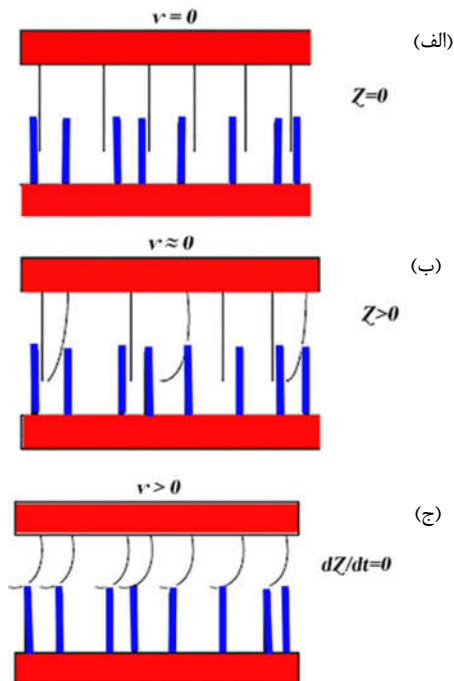
خلیلی و همکارانش [۱۷] به مطالعه‌ی جابه‌جایی نانوذره DNA با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی بر پایه‌ی روش المان محدود با استفاده از نظریه‌های مکانیک تماس پرداخته‌اند. در این مطالعه با استفاده از نظریه‌های مکانیک تماس هرتر، JKR، DMT و BCP و همچنین استفاده از ساختار سلول زیستی DNA با بهره‌گیری از روش المان محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS به مطالعه میزان جابه‌جایی، شتاب، نیرو، تنش و سرعت برحسب زمان و جابه‌جایی مولکول DNA بر روی یک صفحه‌ی مبنا و عوامل مؤثر بر آن‌ها پرداخته شده است. فریدونی و همکارانش [۱۸] به بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر نیرو در فاز دوم نانوجابه‌جایی دوبعدی پرداخته‌اند.

مرور پژوهش‌های مختلف گذشته، نشان‌دهنده‌ی اهمیت بررسی اصطکاک و دستیابی به یک مدل دقیق و کامل اصطکاکی، به‌ویژه در فاز دوم نانوجابه‌جایی و در حین حرکت نانوذرات هدف می‌باشد. محققین مختلفی به بررسی و توسعه‌ی مدل‌های اصطکاکی متنوعی پرداخته‌اند که در اکثر موارد نیز این موضوع را در جابه‌جایی دوبعدی مورد توجه قرار داده‌اند.

در این پژوهش برای نخستین بار سه مدل اصطکاکی گرین‌وود-ویلیامسون، لون و لاگره جهت استفاده در جابه‌جایی سه‌بعدی نانوذره‌ی طلا در فاز دوم حرکتی توسعه داده شده و به کار رفته‌اند. لذا نوآوری‌های اصلی این اثر را می‌توان شامل موارد زیر دانست:

- توسعه‌ی مدل‌های اصطکاکی دقیق در سه بعد جهت کاربرد در فاز دوم نانوجابه‌جایی
- توسعه‌ی معادلات فاز دوم نانوجابه‌جایی به صورت

لغزشی، همان‌طور که در شکل ۱- ج، نشان داده شده‌است، نزدیک خواهد شد.



شکل ۱- سطوح تداخلی نیروی اصطکاکی بین دو سطح (الف) حالت استاتیک، (ب) رژیم پیش‌لغزش و (ج) رژیم لغزشی [۱۹]

تابع $g(v)$ یک تابع مثبت است که رفتار سرعت ثابت را مدل می‌کند و وابسته به برخی فاکتورها مانند خواص مواد، روغن کاری و دما است. برای حرکت حالت پایا، رابطه‌ی بین نیروی اصطکاکی و سرعت در مدل لاگره در شکل ۲- الف نشان داده شده است. تابع $g(v)$ که پیشنهاد شده‌است تا اثر استریک را شرح دهد بدین صورت است [۱۹].

$$\sigma_0 g(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2} \quad (3)$$

که σ_0 سختی معادل برای رابطه‌ی موقعیت نیرو در سرعت معکوس، F_c نیروی اصطکاکی کولمب، F_s نیروی اصطکاک استاتیکی، v_s سرعت حرکت و v 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.

(۱) مدل در پیش‌لغزش خیلی پراکنده است.

(۲) شکل منحنی گذار با ساختار مدل ثابت است و نمی‌تواند با مقادیر اندازه‌گیری واقعی تطبیق داده شود.

مدل لاگره می‌تواند تلاشی در جهت در بر گرفتن هیستریزس با حافظه‌ی غیر محلی انجام دهد. هر دو مدل دال و لاگره یک رفتار شبه هیستریزس تنها هنگامی که نیروی اصطکاکی کمتر از بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی نشان داده شده در شکل ۲- ب است، نشان می‌دهند. با این وجود، این مدل با رفتارهای مشاهده شده‌ی تجربی نیروی اصطکاکی موافق نیست. در بخش بعد به رفتار هیستریزس به طور کاربردی‌تری با نتایج تجربی به‌وسیله‌ی مدل لون پرداخته شده

سه‌بعدی و با استفاده از معادلات دقیق اصطکاکی

- انجام کار تجربی و عکس‌برداری‌های متعدد جهت به دست آوردن ابعاد دقیق نانوذرات طلا

برای این منظور، در این مقاله، ابتدا معادلات این سه مدل اصطکاکی ذکر شده، سپس این معادلات توسعه یافته و در معادلات حرکتی فاز دوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور یافتن پارامترهایی همچون ابعاد و هندسه‌ی نانوذره‌ی هدف، جهت قرارگیری در معادلات، از نتایج تجربی به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شده است. در نهایت نیز شبیه‌سازی فاز دوم صورت پذیرفته و نتایج سه مدل اصطکاکی مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲- مدل‌های اصطکاکی

۲-۱- مدل اصطکاکی لاگره^۱

مدل لاگره توسط کانوداس دی ویت و همکارانش [۱۹]، پیشنهاد شده‌است که در آن مدل دال با مشخصات اصطکاکی حالت پایای دلخواه ترکیب شده‌است. اثر استریک^۲ در این مدل در نظر گرفته شده‌است که یک اثر غیرثابت 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 به‌خوبی بیشتر رفتارهای شناخته شده‌ی اصطکاک، به طور مثال، جابه‌جایی پیش‌لغزش، تأخیر اصطکاکی، نیروهای گسیختگی متنوع و حرکت لغزش-غلتش را نشان می‌دهد. با این وجود رفتار هیستریزس با حافظه‌ی غیرمحلی بین نیروی به‌کار رفته و جابه‌جایی در روش پیش‌لغزش که در انواع مختلف تماس‌ها اندازه‌گیری شده‌است، با این روش قابل محاسبه نیست. مدل لاگره از یک حالت غیرخطی (معادله‌ی

(۱) و نیروی اصطکاکی (معادله‌ی (۲)) تشکیل شده‌است [۱۹].

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \quad (1)$$

$$F_f = \sigma_0 + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (2)$$

که σ_0 سختی معادل برای رابطه‌ی موقعیت نیرو در سرعت معکوس، σ_1 ضریب اصطکاکی میکرولزجت، σ_2 ضریب اصطکاکی لزجت و v سرعت نسبی بین سطوح لغزنده است. تداخل بین دو سطح به عنوان دو جسم صلب فرض شده‌است 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. z متغیر حالت است که میانگین تغییر شکل زبری‌ها را نشان می‌دهد.

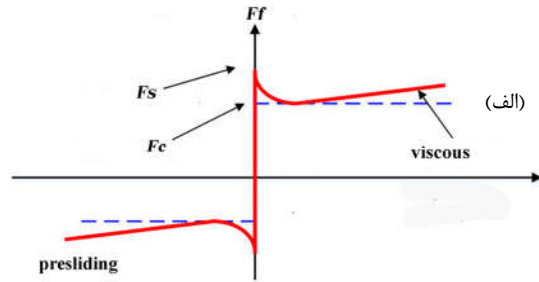
رابطه‌ی بین سرعت v و متغیر حالت z در شکل ۱ نشان داده شده‌است. در شکل ۱- الف، این حالت استاتیکی است، بنابراین سرعت v و متغیر حالت z صفر هستند، هنگامی که سرعت v خیلی کوچک و نزدیک صفر است، نیروی اصطکاکی باید با متغیر حالت z در رژیم پیش‌لغزش، همان‌طور که در شکل ۱- ب، نشان داده شده، توصیف شود. اگر سرعت بیشتر شود، متغیر حالت z به حالت پایه در روش

¹ LuGre

² Stribeck

است.

را نشان می‌دهد، یعنی بخشی از نیروی اصطکاکی که رفتار هیستریزس را با متغیر z به عنوان ورودی ارائه می‌دهد. نیروی اصطکاکی هیستریزس، یک غیرخطی اصطکاکی با حافظه غیرمحللی است. این بدین معناست که



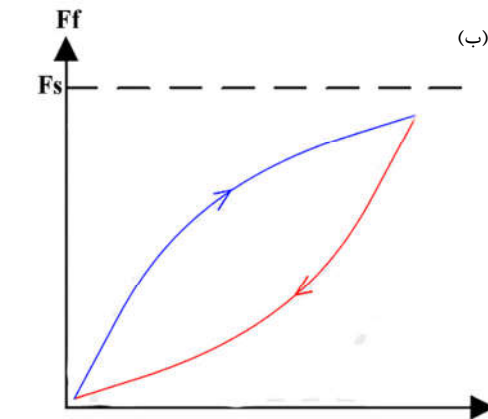
(۱) یک منحنی گذار جدید (یعنی یک شاخه از منحنی

هیستریزس) بازگشت سرعت را بنیان می‌نهد.

(۲) شکل منحنی‌ها با مقادیر پیش از بی‌نهایت $F_h(z)$

تعیین می‌شود، یعنی شکل منحنی مستقل از رفتار

خاص تغییر z بین نقاط بیشینه است [۱۹].



شکل ۲- مشخصه‌های مدل لاگره

(الف) مشخصه‌های منحنی نیروی اصطکاکی - سرعت (ب) منحنی

هیستریزس نیروی هیستریزس F_f بر حسب جابه‌جایی [۱۹]

۲-۳- مدل اصطکاکی گرین‌وود- ویلیامسون^۲

مدل گرین‌وود و ویلیامسون یک تماس چند برجستگی از دو سطح زبر واقعی را تشریح می‌کند. در این مدل هنگامی که دو سطح واقعی با فاصله d جدا شده‌اند، تعداد برجستگی‌های تماسی n می‌تواند از معادله‌ی (۷) پیدا شود [۲۰].

$$n = N \int_{\bar{a}}^{\infty} \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \quad (7)$$

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 نظریه‌ی تماسی هرتز 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 این‌که 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 این مدل یک نیروی عمودی بی‌بعد برحسب هر برجستگی بین دو سطح بدین صورت می‌دهد [۲۰].

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

در معادله‌ی (۸) دو پارامتر سطح بی‌بعد α و β بدین صورت تعریف شده‌اند [۲۰].

$$\alpha = \left(\frac{\sigma}{R}\right)^{1/2}, \quad \beta = \frac{(R\sigma)^{1/2}}{b} \quad (9)$$

لذا نیروی برشی کلی با انتگرال‌گیری از نیروی برشی هر برجستگی روی تابع چگالی احتمال بدین صورت به‌دست می‌آید [۲۰].

$$F = N \int_{\bar{a}}^{\infty} F_f \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \quad (10)$$

توجه شود که مقادیر نیروی مماسی به کار رفته (F) کمتر از مقدار داده شده در معادله‌ی (۱۰) است. توزیع نیروهای عمودی و مماسی در برجستگی‌ها ممکن است سبب شود که برخی برجستگی‌ها بلغزند، درحالی‌که دیگر برجستگی‌ها به لغزش ادامه می‌دهند. با این

$$\frac{dz}{dt} = v(1 - \operatorname{sgn}\left(\frac{F_h(z)}{s(v)}\right)) \left| \frac{F_h(z)}{s(v)} \right|^n \quad (4)$$

$$F_f = F_h(z) + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (5)$$

که n یک ضریب است که برای شکل منحنی به کار می‌رود. $s(v)$ یک تابع است که رفتار سرعت ثابت را مدل می‌کند و با معادله‌ی (۶) داده شده‌است [۱۹].

$$s(v) = \operatorname{sgn}(v) \left(F_c + (F_s - F_c) e^{-(|v|/v_s)^\delta} \right) \quad (6)$$

که δ یک توان دلخواه است. $F_h(z)$ نیروی اصطکاکی هیستریزس

² Greenwood and Williamson

¹ Leuven

$$\begin{aligned}
 F\cos\theta\cos\varphi - 2\pi \bar{\tau}_{f_{1x}} \int_{\bar{a}}^{\bar{z}_1} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 - 2\pi 10^{Bx} \int_{\bar{z}_1}^{\bar{z}_2} \bar{a}^{Mx+2} \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 - 2\pi \bar{\tau}_{f_{2x}} \int_{\bar{z}_2}^{\infty} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 - \tau\pi a_{jkr}^2 = m\ddot{x}
 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 F\cos\theta\sin\varphi - 2\pi \bar{\tau}_{f_{1y}} \int_{\bar{a}}^{\bar{z}_1} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 - 2\pi 10^{By} \int_{\bar{z}_1}^{\bar{z}_2} \bar{a}^{My+2} \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 - 2\pi \bar{\tau}_{f_{2y}} \int_{\bar{z}_2}^{\infty} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 - \tau\pi a_{jkr}^2 = m\ddot{y}
 \end{aligned} \quad (19)$$

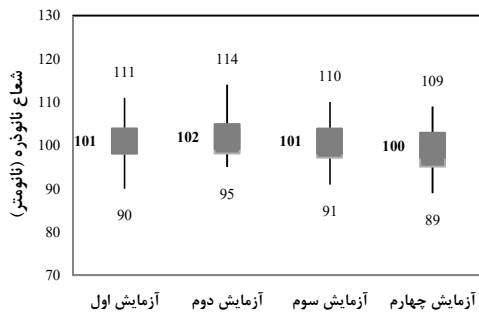
۲-۳- تصاویر تجربی

در این بخش با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر تجربی از نانوذرات طلای موجود بر روی صفحه‌ی مینا، به منظور استخراج ابعاد و هندسه‌ی ذرات به دست آمده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

برای به دست آوردن شعاع تقریبی نانوذرات طلا، چهار بار آزمایش تکرار شده و هر بار ابعاد نانوذرات موجود بر روی بستر سیلیکونی به دست آمده است که نتایج آن در شکل ۳ مشاهده می‌گردد.

در شکل ۴-الف میکروسکوپ نیروی اتمی و اجزای آن، و در شکل ۴-ب تصاویر تجربی نانوذره‌ی طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مشاهده می‌گردد.

نتایج به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی، نشان‌دهنده‌ی این است که ذرات طلا از نظر هندسی بسیار نزدیک به هندسه‌ی کروی بوده که شعاع آن نیز 10.1 ± 2 نانومتر تخمین زده می‌شود. از اطلاعات این بخش، جهت شبیه‌سازی و به دست آوردن نتایج استفاده شده است.



شکل ۳- استخراج ابعاد تخمینی نانوذرات طلا

وجود، هنگامی که F به مقدار داده شده در معادله‌ی (۱۰) می‌رسد، تمام برجستگی‌های تماسی در اثر لغزش کلی خواهند لغزید. در یک شکل بی‌بعد، نیرو بر حسب هر برجستگی با به کارگیری معادلات (۷) و (۱۰) بدین صورت به دست می‌آید [۲۰].

$$\begin{aligned}
 \bar{F} = \frac{F}{N G b^2} = 2\pi \bar{\tau}_{f_1} \int_{\bar{a}}^{\bar{z}_1} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 + 2\pi 10^B \int_{\bar{z}_1}^{\bar{z}_2} \bar{a}^{M+2} \varphi(\bar{z}) d\bar{z} \\
 + 2\pi \bar{\tau}_{f_2} \int_{\bar{z}_2}^{\infty} \bar{a}^2 \varphi(\bar{z}) d\bar{z}
 \end{aligned} \quad (11)$$

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- توسعه‌ی معادلات فاز دوم

در این بخش به توسعه‌ی معادلات فاز دوم نانوجابه‌جایی بر اساس مدل‌های اصطکاکی پرداخته شده است. برای این منظور برآیند نیروها در راستای محور x (معادله‌ی (۱۲)) و محور y (معادله‌ی (۱۳)) استخراج و برابر با حاصل ضرب شتاب در راستای مورد نظر در جرم ذره قرار داده شده است.

$$\sum F_x = ma_x \rightarrow F_x - f_x - \tau A = ma_x \quad (12)$$

$$\sum F_y = ma_y \rightarrow F_y - f_y - \tau A = ma_y \quad (13)$$

با توجه به این معادلات، مشخص می‌گردد که با افزایش نیروهای اصطکاکی، برآیند نیروهای وارد بر جسم کاهش یافته و در پی آن شتاب و به تبع آن جابه‌جایی کاهش خواهد یافت؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل اصطکاکی که کم‌ترین مقدار نیروی اصطکاک را برآورد نماید، بیشترین شتاب و در نتیجه بیشترین مقدار جابه‌جایی را در بر خواهد داشت.

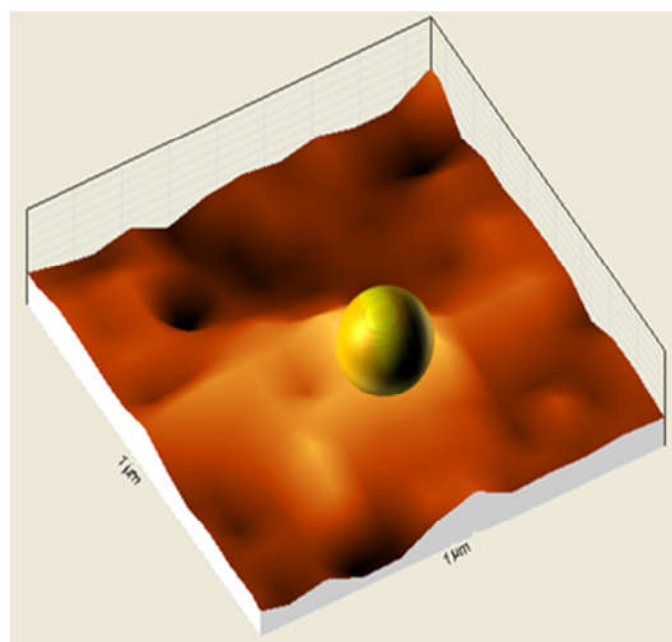
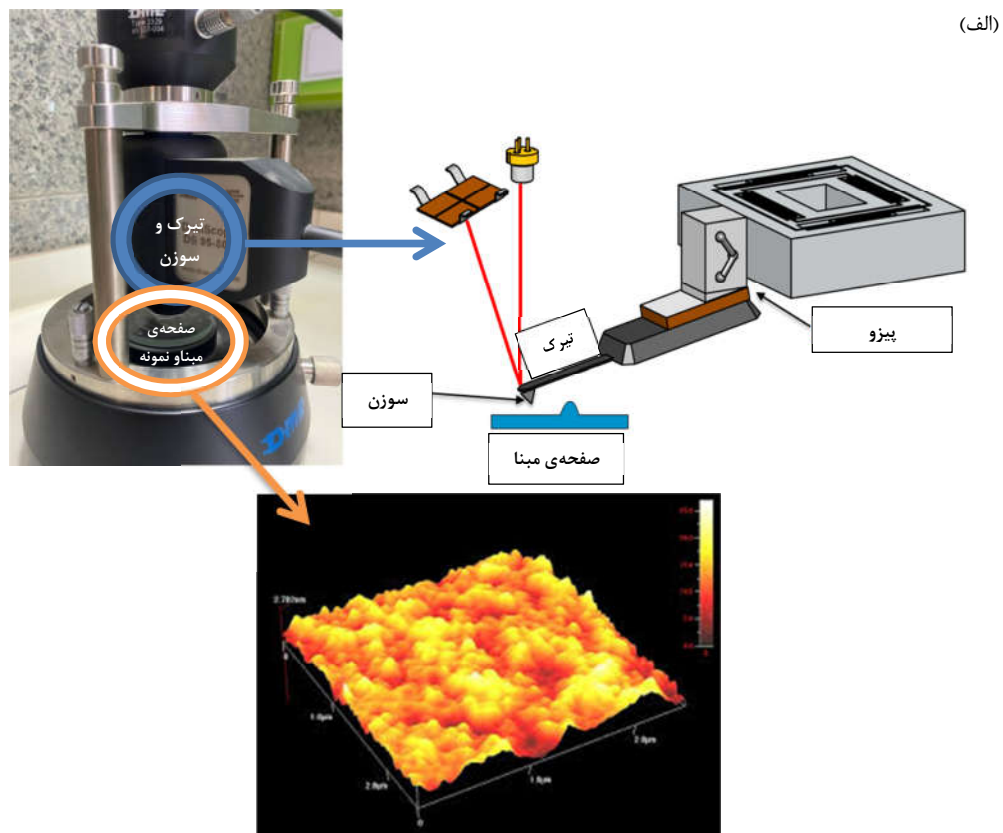
پس از آن با توجه مدل‌های اصطکاکی مورد بررسی، به ترتیب در راستای محورهای x و y ، معادلات (۱۴) و (۱۵) برای مدل اصطکاکی لاگره، معادلات (۱۶) و (۱۷) برای مدل اصطکاکی لون و معادلات (۱۸) و (۱۹) برای مدل اصطکاکی گرین‌وود-ویلیامسون در این مقاله توسعه یافته و مورد کاربرد در بخش شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند.

$$F\cos\theta\cos\varphi - \sigma_{0x} - \sigma_{1x} \frac{dz}{dt} - \sigma_{2x} \dot{x} - \tau\pi a_{jkr}^2 = m\ddot{x} \quad (14)$$

$$F\cos\theta\sin\varphi - \sigma_{0y} - \sigma_{1y} \frac{dz}{dt} - \sigma_{2y} \dot{y} - \tau\pi a_{jkr}^2 = m\ddot{y} \quad (15)$$

$$F\cos\theta\cos\varphi - F_h(z) - \sigma_{1x} \frac{dz}{dt} - \sigma_{2x} \dot{x} - \tau\pi a_{jkr}^2 = m\ddot{x} \quad (16)$$

$$F\cos\theta\sin\varphi - F_h(z) - \sigma_{1y} \frac{dz}{dt} - \sigma_{2y} \dot{y} - \tau\pi a_{jkr}^2 = m\ddot{y} \quad (17)$$



شکل ۴- نتایج تجربی (الف) میکروسکوپ نیروی اتمی و اجزای آن، (ب) تصاویر تجربی نانوذره‌ی طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

هندسی تیترک و سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی و در جدول ۲ مشخصات مکانیکی آن ذکر شده است.

تیترک مورد استفاده مستطیلی شکل و شکل هندسی سوزن به شکل مخروطی با نوک کروی بوده است. در جدول ۱ مشخصات

۴- نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی مدل‌های مختلف اصطکاکی

شکل ۵ نتایج به دست آمده در راستای محور x را نشان می‌دهد. این نتایج به ترتیب نیرو، شتاب، سرعت و موقعیت ذره را در راستای محور x نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌گردد که مدل اصطکاکی لاگره کمترین میزان برآیند نیروی اعمالی به نانوذره را خواهد داشت که می‌توان این موضوع را ناشی از بیشتر بودن میزان نیروی مقاوم اصطکاکی در مدل لاگره نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی در این مقاله دانست. در پی کم بودن برآیند نیروی اعمالی در مدل لاگره، شتاب نانوذره‌ی هدف و به تبع آن سرعت نانوذره و در نهایت میزان جابه‌جایی نانوذره‌ی هدف نیز در مدل لاگره کمترین میزان خواهد بود.

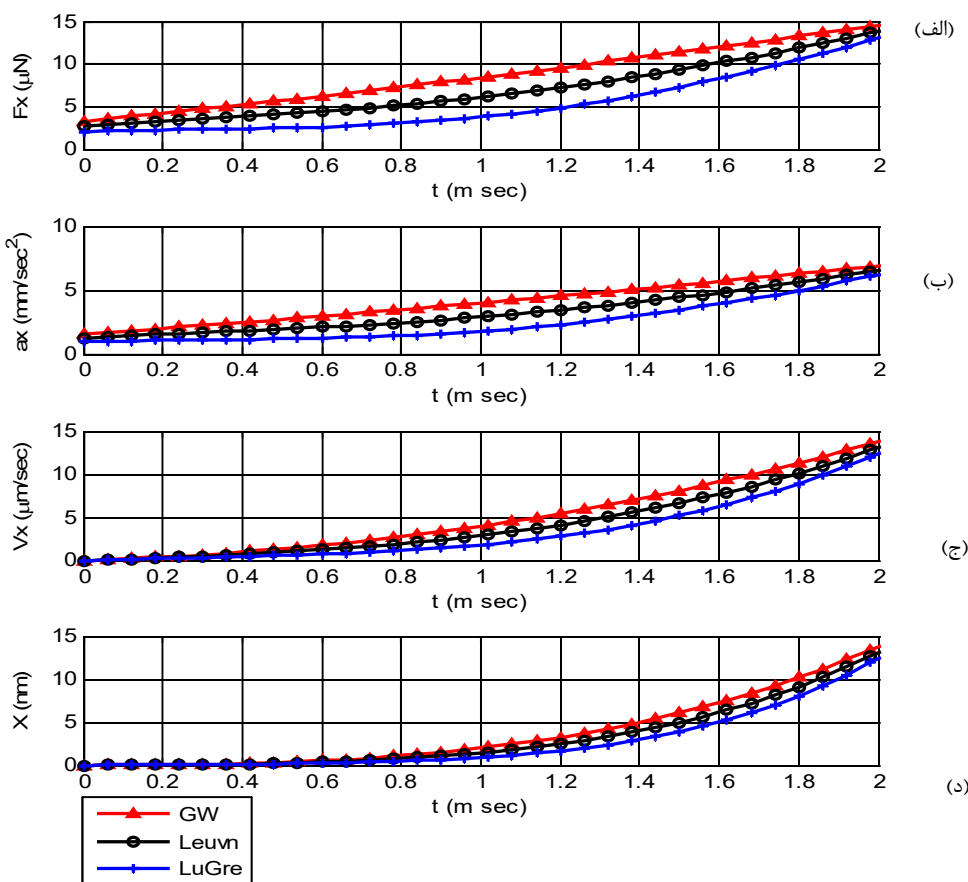
مدل گرین‌وود- ویلیامسون نیز از آن‌جا که کم‌ترین میزان نیروی اصطکاکی را برآورد می‌نماید، بیشترین مقدار نیروی معادل را به نانوذره‌ی هدف وارد خواهد نمود که در نتیجه مشاهده می‌گردد که بیشترین میزان جابه‌جایی در این مدل تخمین زده شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی

مسططیلی	نوع تیرک
۲۲۵ میکرومتر	طول تیرک
۱ میکرومتر	عرض تیرک
۴۸ میکرومتر	ضخامت تیرک
۱۲ میکرومتر	ارتفاع سوزن
۲۰ نانومتر	شعاع سوزن

جدول ۲- مشخصات مکانیکی میکروسکوپ نیروی اتمی [۱۷]

مسططیلی	نوع تیرک
۱۶۹ گیگاپاسکال	مدول الاستیسیته
۰/۲۷	ضریب پواسون
۲۳۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب	چگالی



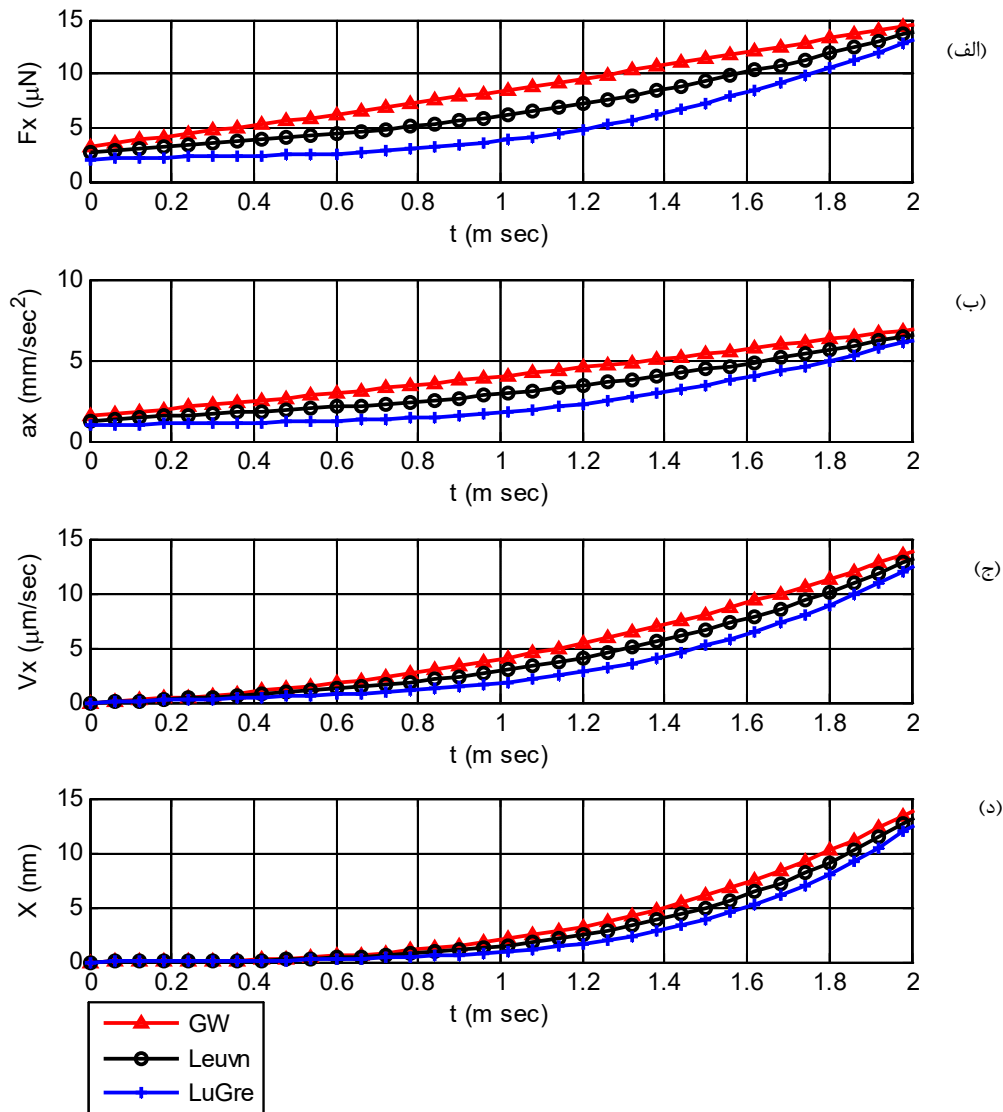
شکل ۵- نتایج به دست آمده در راستای محور x (الف) نیرو، (ب) شتاب، (ج) سرعت، (د) موقعیت

برآیند نیروی اعمالی به نانوذره را داشته که در نتیجه‌ی آن، شتاب ذره سرعت ذره و میزان جابه‌جایی نانوذره‌ی هدف در مدل لاگره کمترین میزان شده است. مدل گرین‌وود- ویلیامسون نیز با توجه به دقت بالا

در شکل ۶ نیز نیرو، شتاب، سرعت و موقعیت ذره در راستای محور y نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در این شکل نشان داده است که در راستای محور y نیز، مدل اصطکاکی لاگره کمترین میزان

است. نزدیک بودن نتایج در راستای محورهای x و y به یکدیگر را می‌توان ناشی از کروی بودن ذره هدف و همچنین اعمال نیروی تقریباً یکسان، با توجه به زاویه‌ی نیروی اعمالی به نانوذره هدف دانست.

نسبت به دو مدل دیگر مورد بررسی در این مقاله، نیروی اصطکاکی کم‌تری را به دلیل در نظر گرفتن سطح واقعی و دقیق تماس نشان خواهد داد که در نتیجه سبب افزایش برآیند نیروی وارد بر ذره در حین حرکت شده و منجر به جابه‌جایی بیشتر نانوذره‌ی هدف گشته

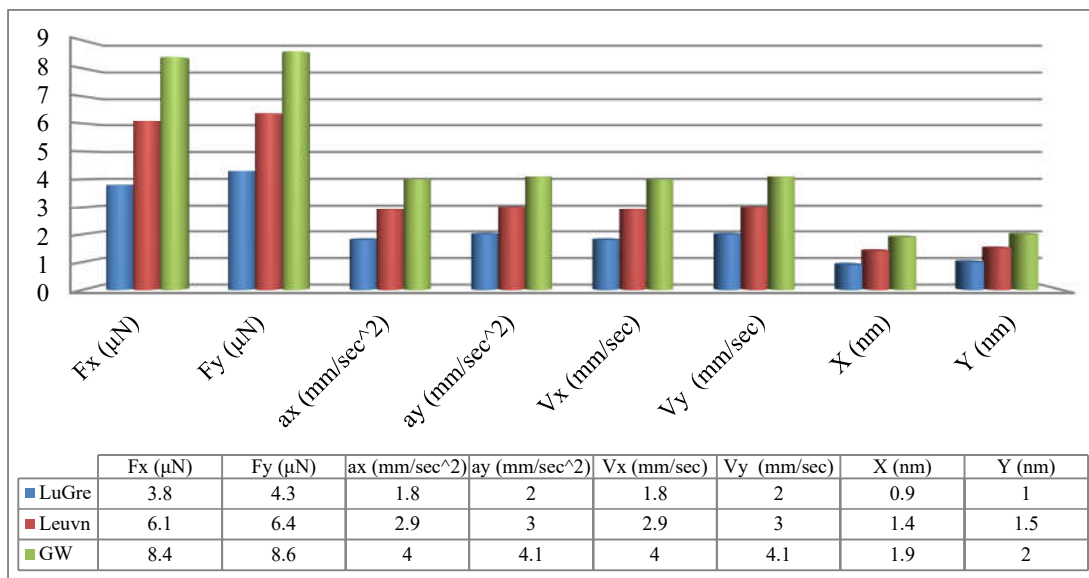


شکل ۶- نتایج به دست آمده در راستای محور y (الف) نیرو، (ب) شتاب، (ج) سرعت، (د) موقعیت

ویلیمسون و در راستای محور y رخ داده است که این موضوع را می‌توان ناشی از کمتر بودن میزان اصطکاک در این مدل و زیاد بودن زاویه‌ی نیروی وارده از طرف سوزن تیرک در راستای محور y دانست. همچنین نتایج شکل ۷ نشان داده است که کم‌ترین جابه‌جایی در مدل اصطکاکی لاگره و در راستای محور x به وقوع پیوسته است.

۲-۴- مقایسه‌ی مدل‌های مختلف اصطکاکی

در شکل ۷ به جمع‌بندی و مقایسه‌ی کلی نتایج پرداخته شده است. برای این منظور نتایج موجود در نمودارهای شکل‌های ۵ و ۶، در لحظه‌ی ۱ میلی‌ثانیه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج کلی نشان می‌دهد که بیشترین جابه‌جایی در مدل اصطکاکی گرین‌وود-



شکل ۷- مقایسه‌ی نتایج کلی (اعداد در زمان ۱ میلی‌ثانیه بررسی شده‌اند).

۵- صحت‌سنجی

در این بخش به صحت‌سنجی نتایج پرداخته شده است. برای این منظور نتایج به دست آمده در این مقاله، با نتایج مرجع ۱۵ که به بررسی سطوح صاف و زبر و با استفاده از مدل اصطکاکی ساده‌ی کولمب پرداخته است، مقایسه شده‌اند.

مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که مدل اصطکاکی لاگره که در این پژوهش کمترین میزان جابه‌جایی را نشان داده‌است، بین نتایج سطح صاف و سطح زبر از مرجع ۱۵ قرار گرفته که حاکی از صحت نتایج به دست آمده است. همچنین نتایج این پژوهش همانند مرجع ۱۵ در راستای محور y جابه‌جایی بیشتری را نسبت به محور x نشان داده‌اند.

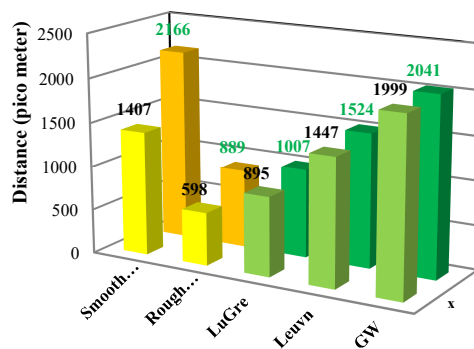
۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی فاز دوم نانوجابه‌جایی نانوذره‌ی طلا به صورت سه‌بعدی و با استفاده از سه مدل اصطکاکی لاگره، لون و گرین‌وود- ویلیامسون پرداخته شد. برای این منظور، پس از بررسی این سه مدل اصطکاکی، معادلات فاز دوم با توجه به این مدل‌ها برای نخستین بار در این مقاله توسعه یافته و مورد کاربرد قرار گرفته است. سپس با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر تجربی از نانوذرات طلای موجود بر روی صفحه‌ی مینا استخراج شده و با توجه به نتایج، ابعاد و هندسه‌ی ذرات به دست آمده و در نهایت به شبیه‌سازی نیرو، شتاب، سرعت و جابه‌جایی نانوذره‌ی هدف پرداخته شده است.

نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی کمتر بودن نیروی اصطکاک در مدل گرین‌وود- ویلیامسون، بیشتر بودن نیروی برآیند در این مدل و لذا بیشتر بودن میزان جابه‌جایی در این مدل می‌باشد. در ادامه‌ی این پژوهش نیز می‌توان در کارهای آتی به بررسی اثر پارامترهای موجود در مدل‌های مورد مطالعه در این مقاله و همچنین بررسی سایر مدل‌های اصطکاکی پرداخت.

۷- مراجع

- [1] Lee, H. L., Chang, W. J., Sensitivity of V-shaped atomic force microscope cantilevers based on a modified couple stress theory, *Microelectronic Engineering*, Vol. 88, No. 11, pp. 3214-3218, 2011.
- [2] Zhao W, Xu K, Qian X, Wang R., Tip based nanomanipulation through successive directional push, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 132, No. 3, pp. 030909, 2010.
- [3] Damircheli, M., Korayem, M. H., Sensitivity of higher mode of rectangular atomic force microscope to surface stiffness in air environment, *Micro & Nano Letters*, Vol. 8, No. 12, pp. 877-881, 2013.
- [4] Li, G., Wenxue W., Yuechao W., Shuai Y., Wenguang Y., Xi, N., Liu, L., Nano-manipulation based on real-time compressive tracking, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 14, No. 5, pp. 837-846, 2015.



شکل ۸- مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر با مرجع [۱۵]

- Transaction Automation Control., Vol. 40, No. 3, pp. 419-425, 1995.
- [20] Adams, G. G., Muftu, S., Azhar, N. M., Scale-dependent model for multi-asperity contact and friction, ASME Journals of Tribology, Vol. 125, pp. 700-708, 2003.
- [5] Hoshiar, A. K., Kianpour, M., Nazarahari, M., Korayem, M. H., Path planning in the AFM nanomanipulation of multiple spherical nanoparticles by using a coevolutionary Genetic Algorithm, In 2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS), pp. 1-6. IEEE, 2016.
- [6] Cui, J., Yang, L., Mei, X., Wang, Y., Wang, W., Liu, B., Fan, Z., Nanomanipulation of carbon nanotubes with the vector scanning mode of atomic force microscope, Integrated Ferroelectrics, Vol. 163, No. 1, pp. 81-88, 2015.
- [7] Taheri, M., 3D-Dynamic modeling and simulation of biological nanoparticle motion using AFM nano-robot, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 311-316, 2016.
- [8] Taheri, M., 3D Modeling of Gold Nanoparticle Manipulation in Air Using HK Friction Model, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 275-282, 2016.
- [9] Korayem, M. H., Experimental determination of roentgenicity of the HT29 cancer cell line using a nuclear atomic microscope for application in nanoscale portions, Applied and Computational Sciences in Mechanics, Vol. 28, No. 1, pp. 111-122, 2017.
- [10] Sadeghzadeh, S., Korayem, M. H., Modeling and controlling the deformation of AFM nanorubble needles in automated portions of nanoscale operations, Mechanical Engineering, Tabriz University, Vol.47, No. 1, pp. 169-178, 2017.
- [11] Park, K. J., Huh, J. H., Jung, D. W., Park, J. S., Choi, G. H., Lee, G., Lee, S. Assembly of "3D" plasmonic clusters by "2D" AFM nanomanipulation of highly uniform and smooth gold nanospheres. Scientific reports, Vol. 7, No. 1, pp. 6045, 2017.
- [12] Taheri, M., Investigation and Sensitivity Analysis of Dimensional Parameters and Velocity in the 3D Nanomanipulation Dynamics of Carbon Nanotubes Using Statistical Sobol Method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 125-135, 2019.
- [13] Zarei, B., Bathaee, 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, Vol. 19, No. 1 pp. 181-190, 2019.
- [14] Korayem, A. H., Ghasemi, P., Korayem, M. H., Vibration Analysis and Control of AFM Microcantilever Based on the MCS Theory Using the FSMC Control in the Air, Arabian Journal for Science and Engineering, pp. 1-10, 2019.
- [15] Taheri, M., Karimi, P., Moradzaeh, H., Investigation of the second phase of three-dimensional manipulation of gold nanoparticles using atomic force microscope on rough and smooth surfaces, Mechanical Engineering, Tabriz University, Vol. 52, No. 3, pp. 199-206, 2022.
- [16] Taheri, M., Application of atomic force microscopy in critical force and critical time extraction of 2D manipulation for gastric cancer tissue with different friction models. Nanoscale, Vol. 9, No. 1, pp. 136-145, 2022.
- [17] Khalili, M., Taheri, M., Bathaee, S. H., Shakeri, F., Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics. Mechanic of Advanced and Smart Materials, Vol. 1, No. 2, pp. 155-174, 2022.
- [18] Fereiduni, F., Taheri, M., Modabberifar, M., Investigation of the effect of different parameters on force in the second phase of two-dimensional nanomanipulation. Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 23-31, 2021.
- [19] De Wit, C., Olsson, H., Astrom, K. J., Lischinsky, P., A new model for control of systems with friction, IEEE