

بررسی فاز دوم جابه‌جایی سه‌بعدی نانوذره‌ی طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و در سطوح زبر و صاف

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی اراک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، mtaheri@just.ac.ir *** معین طاهری**
 دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی اراک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، p- karimi@msc.araku.ac.ir **پیمان کریمی**
 استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی اراک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، h-moradzadeh@araku.ac.ir **حسن مرادزاده**

چکیده

مطالعه‌ی مواد در فرآیند نانوجابه‌جایی در دو فاز و با هدف بررسی حرکت ذره قبل از شروع حرکت و بعد از آن، صورت می‌پذیرد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی ذراتی همچون طلا در فاز نخست انجام شده و نیرو و زمان بحرانی برای این ذره با توجه به شرایط مختلف محیطی و هندسی محاسبه شده است. به‌منظور تکمیل فرآیند در این مقاله جابه‌جایی ذره‌ی طلا در فاز دوم مورد بررسی قرار گرفته است. 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 و همچنین با توجه به بررسی حرکت در دو راستای X و Y، جابه‌جایی در راستای Y بیشتر بوده است. از دیگر نتایج محاسبه شده در این تحقیق، می‌توان به بررسی پارامترهای سطح و هندسه‌ی ذره‌ی طلا اشاره نمود.

واژه‌های کلیدی: جابه‌جایی سه‌بعدی، نانوذره‌ی طلا، میکروسکوپ نیروی اتمی، سطوح زبر، فاز دوم، هندسه‌ی ذره.

Investigation of the second phase of three-dimensional manipulation of gold nanoparticles using atomic force microscope on rough and smooth surfaces

M. Taheri Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
P. Karimi Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
H. Moradzadeh Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

Abstract

The study of materials in nanomanipulation process is done in two phases with the aim of examining the motion of the particle before and after the motion. Studies have been performed on particles such as gold in the first phase and the critical force and time for this particle has been calculated according to different environmental and geometric conditions. In order to complete the process, in this paper, gold particle manipulation in the second phase is investigated. In this research, motion modeling has been done in three dimensions and particle motion has been observed on rough and smooth surfaces. Finally, using the results of modeling and manipulation of gold particles using atomic force microscope and due to the presence of elevations and heights in the nanoscale, the results show more displacement on smooth than rough surfaces and also according to the motion study. In both x and y directions, the displacement in the y direction was greater. Other results calculated in this study include the study of surface parameters and geometry of gold particles.

Keywords: Three-dimensional manipulation, gold nanoparticles, atomic force microscope, rough surfaces, second phase, geometry of particle.

بررسی‌های صورت گرفته در این حوزه، به بررسی عوامل ساختاری و هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی، بررسی ذرات مختلف همچون طلا، DNA و سایر ذرات بیولوژیکی و استخراج خواص نانوذرات پرداخته‌اند. مشیرپناهی و همکارانش [۱] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی نانوذرات استوانه‌ای در طی فرآیند جابه‌جایی سه‌بعدی پرداخته‌اند. شبیه‌سازی انجام شده با در نظر گرفتن نیروهای اصطکاکی و چسبندگی و همچنین مکانیک تماس ذرات استوانه‌ای انجام شده است. چن و ژو [۲] علل استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی را در حوزه‌های مختلف همچون، دارو، پلیمرها و صنایع نیمه‌هادی، وضوح بالا، آنالیز در زمان واقعی، تصویربرداری در محل، محدودیت‌های زیست‌محیطی اندک و عملکرد ساده بیان نموده‌اند. همچنین سایر روش‌ها نیز با میکروسکوپ نیروی

۱- مقدمه

نانوتکنولوژی شاخه‌ای از علوم پرکاربرد در صنایع ساختمانی، الکترونیک، پزشکی و کشاورزی می‌باشد که اهدافی همچون تولید محصولات در مقیاس نانو، تغییر در ساختار مواد، بهبود خواص مکانیکی و سایر موارد را دنبال می‌نماید. پیشرفت در هر یک از این اهداف نیازمند مطالعه‌ی دقیق در ابعاد نانو و بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر روند تحقیقات می‌باشد. لذا فرآیند جابه‌جایی با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی به کمک این اهداف آمده است. با توجه به کارایی بالای این ابزار در محیط‌های مختلف می‌توان از آن برای مطالعه‌ی هر نوع ذره‌ای در ابعاد نانو استفاده نمود و مطلوب‌ترین پارامترها را برای بهبود عملکرد در طی فرآیند جابه‌جایی به دست آورد.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m-taheri@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۱/۲۲

اتمی مقایسه شده است. ژو و همکارانش [۳] عدم ارائه اطلاعات دقیق از گروه‌های مولکولی و محدودیت‌های فن‌آوری موجود، مانند سرعت پایین تصویربرداری را از جمله محدودیت‌های میکروسکوپ نیروی اتمی در مطالعه علوم مختلف بیان نموده‌اند و ترکیب کردن میکروسکوپ نیروی اتمی را با سایر روش‌های مکمل از جمله اهداف محققان برای رفع نواقص فنی این ابزار مطرح کرده‌اند. ژو و همکارانش [۴] محدودیت‌ها و مزایای طرح جدید میکروسکوپ نیروی اتمی را با کاربرد در محیط هوا مورد بررسی قرار داده‌اند و فرآیند جابه‌جایی سه‌بعدی را با موفقیت انجام داده‌اند. شینانو و همکارانش [۵] به بررسی خوردگی فلز که از جمله کاربردهای میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد، پرداخته‌اند و به منظور بررسی صحت اطلاعات به دست آمده با سایر آزمایش‌ها در این حوزه مقایسه کرده‌اند. وانگ و همکارانش [۶] به بیان پیشرفت‌های اخیر میکروسکوپ نیروی اتمی در مطالعه مواد پلیمری پرداخته‌اند. آن‌ها وضوح فضایی بالا، بهبود در وضوح مکانی و زمانی، خصوصیات چند پارامتری و چند عملکردی را از جمله این مزایا معرفی کرده‌اند. غفرانی و همکارانش [۷] به منظور رفع مشکل عدم مشاهده همزمان فرآیند جابه‌جایی به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی، از محیط حقیقت مجازی استفاده کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ثبت شده توسط میکروسکوپ، موقعیت ذرات را مشخص کرده‌اند. سپس نیرو و زمان بحرانی با شبیه‌سازی دینامیکی فرآیند استخراج شده و نتایج شبیه‌سازی برای هر سه هندسه تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی گسترش یافته است. در نهایت نتایج مطلوب محیط واقعیت مجازی برای شبیه‌سازی فرآیند تأیید شده است.

خلیلی و همکارانش [۸] تغییرشکل و عمق نفوذ مولکول DNA را در طی فرآیند جابه‌جایی و با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی محاسبه کرده‌اند. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با روش المان محدود و با در نظر گرفتن مدل‌های تماسی هرترز، JKR، DMT و BCP انجام شده است. کورایم و همکارانش [۹] به تحلیل حساسیت پارامتر رطوبت در طی فرآیند جابه‌جایی سه‌بعدی مخمر پرداخته‌اند. آن‌ها از روش آنالیز حساسیت Sobol استفاده نموده و تأثیر شعاع ذرات، مواد ذرات، انرژی سطح بستر انتخاب شده، مقدار پیش‌بار و زاویه‌ی تماس را بر نیروی بحرانی مورد بررسی قرار داده‌اند. در نهایت به کاهش نیروی بحرانی در جابه‌جایی ذره‌ی مخمر با سطح رطوبت بالا پی برده‌اند. همچنین با توجه به نتایج حاصل از آنالیز حساسیت Sobol به تأثیر بسیار بالای شعاع ذرات بر نیروی جابه‌جایی بحرانی و تأثیر بسیار کم عرض تیرک، بر نیروی بحرانی دست یافته‌اند. طاهری و میرزالیو [۱۰] تحقیقاتی در حوزه‌ی جابه‌جایی و بر روی بافت سرطانی سینه انجام داده‌اند. هدف از این تحقیق استخراج مدول یانگ بافت سرطانی در فاز دوم جابه‌جایی و با در نظر گرفتن مدل‌های تماسی مشخص بوده است.

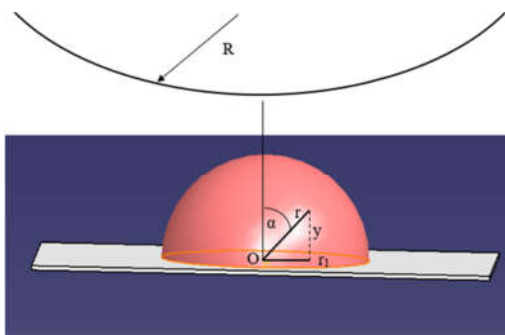
ذاکری و فرجی [۱۱] به بررسی جابه‌جایی نانوامیکرو ذره بر روی سطح زبر با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده‌ی آن است که مدل‌سازی با فرض تماس چندنقطه‌ای خصوصاً در شعاع زبری کوچک، تأثیر عمده‌ای در تعیین نیروی بحرانی دارد و فرض سطح صاف و یا تماس تک‌نقطه‌ای منجر به خطای بالایی در تخمین نیروی موردنیاز در جابه‌جایی می‌شود. در نهایت نتایج کلی نشان‌دهنده‌ی کاهش نیروی بحرانی به‌دست آمده از مدل‌های تماس چندنقطه‌ای در مقایسه با مقادیر به‌دست آمده برای

سطح صاف و افزایش آن نسبت به مدل تماس تک‌نقطه‌ای بوده است. کورایم و همکارانش [۱۲] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به مطالعه‌ی توپوگرافی سلول خوش‌خیم سرطان سینه در محیط مایع در حالت تماس پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش نیروی بحرانی در محیط مایع به دلیل تغییر در نیروی چسبندگی و همچنین وجود نیروی پسا و کشش سطحی، نیروی بحرانی نسبت به محیط هوا بوده است و تأثیر زبری ذرات بر نیروی بحرانی و زمان قابل مشاهده است.

کورایم و همکارانش [۱۳] جابه‌جایی سه‌بعدی ذرات طلا را با استفاده از مدل‌های تماسی مختلف مورد مطالعه قرار داده‌اند و میزان تغییر شکل و عمق نفوذ را محاسبه کرده‌اند. در نهایت نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش عمق نفوذ در سطح تماس ذره-صفحه‌ی مینا، با مدل داسون و کمترین تغییر با مدل نیک‌پور بوده‌اند. همچنین در تماس سوزن- ذره بیشترین تغییرات مربوط به مدل تماسی JKR و کمترین مقدار برای مدل تماسی هرترز بوده است. پارک و همکارانش [۱۴] به بیان روشی کاربردی در جابه‌جایی ذرات طلا پرداخته‌اند. در این روش جابه‌جایی از حالت ساده‌ی دوبعدی به سه‌بعدی پیشرفت داشته است. کورایم و رستگار [۱۵] نتایج جابه‌جایی با در نظر گرفتن مدل‌های مکانیک تماس را برای DNA و نانوذرات طلا مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده‌ی این است که در ذرات نرم‌تر، با افزایش سطح تماس بار اعمال‌شده با شیب شدید کاهش یافته است؛ اما سلول‌های بیولوژیکی یا مواد لزج بیش‌ازحد الاستیسیته هستند و این نوع مواد دارای ویژگی‌های دمایی هستند که باعث تغییر شکل مواد به دلیل نیروهای کوچک نمی‌شود. طاهری [۱۶] به مدل‌سازی فرآیند جابه‌جایی ذره‌ی طلا با در نظر گرفتن مدل‌های تماسی هرترز، JKR، DMT و BCP در این مدل‌سازی استفاده شده‌اند و در نهایت با بررسی‌های صورت گرفته به کم‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی در فاز اول با مدل تماسی هرترز دست یافته است. حبیب‌نژاد کورایم و همکارانش [۱۷] جابه‌جایی ذرات طلا، پلاکت و مخمر را مدل‌سازی و شبیه‌سازی کرده‌اند و نیرو و زمان بحرانی را برای هر سه ذره در محیط‌های گازی، آبی، الکلی و پلاسما محاسبه کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده‌ی تأخیر زمانی بیشتر حرکت نانوذرات در محیط‌های بیولوژیکی نسبت به محیط گازی بوده است. فریدونی و همکارانش [۱۸] تحقیقات مربوط به جابه‌جایی را در فاز دوم مورد بررسی قرار داده‌اند. شعاع ذره، شعاع سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، عرض تیرک، طول ذره، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته، پارامترهای مورد بررسی بر نیرو می‌باشند. به‌منظور بررسی کیفی اثر پارامترهای مطرح شده، از روش آنالیز حساسیت E-Fast استفاده شده‌است. در نهایت نتایج نشان‌دهنده‌ی اثر قابل توجه ارتفاع سوزن بر نیرو بوده است.

در تحقیقات صورت گرفته در این بخش به صورت مختصر به ارائه‌ی کاربردهای مختلف میکروسکوپ نیروی اتمی در حوزه‌های مختلف پرداخته شده است و به صورت خاص نیز تحقیقات انجام شده بر روی ذره‌ی طلا مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش‌ها به صورت قابل توجهی بر روی مکانیک تماس و بررسی نیرو و زمان بحرانی در فاز اول جابه‌جایی بحث شده است. لذا با توجه به اهمیت زبری سطح در مقیاس نانو، بررسی این پارامتر از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

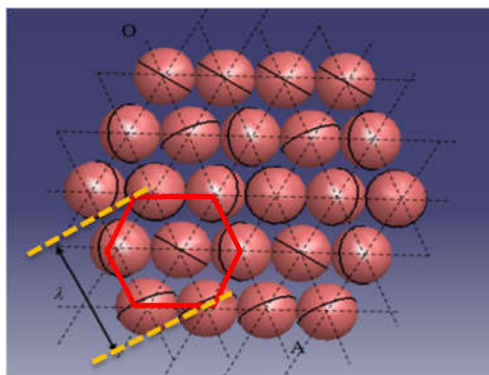
از آن‌جا که فاز نخست جابه‌جایی به محاسبه‌ی نیرو و زمان بحرانی



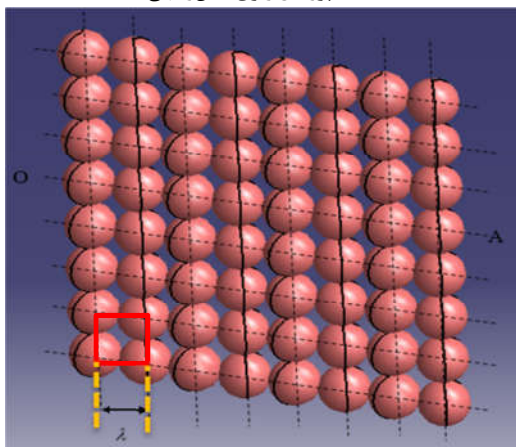
شکل ۱- هندسه مدل رامپ برای تماس ذره کروی به شعاع R در امتداد محور y با زبری کروی به شعاع r که مرکز آن روی صفحه قرار گرفته است [۲۰].

شکل ۲- الف پروفیل شش وجهی که در آن قله‌ی برجستگی‌ها بر روی رئوس یک شش ضلعی قرار دارند و شکل ۲- ب پروفیل چهاروجهی که در آن قله‌ی برجستگی‌ها بر روی رئوس یک چهار ضلعی قرار دارند را نمایش می‌دهد. بر اساس هندسه پروفیل شش‌وجهی مشاهده شده در شکل ۲، با فرض توزیع زبری فشرده و طول موج $\lambda = 2r$ و تعداد برآمدگی‌های در تماس N به صورت معادله (۲) محاسبه شده است:

$$N = 1 + \sum_{i=1}^{\frac{a}{n}} \frac{360}{\arccos(1 - \frac{1}{2i^2})} \quad (2)$$



الف) پروفیل زبری شش‌وجهی



ب) پروفیل زبری چهاروجهی

شکل ۲- نمای فوقانی پروفیل زبری

حرکت می‌پردازد و مراحل بعد از حرکت را شامل نمی‌شود، در مقایسه با فاز دوم اهمیت کمتری دارد. در فاز دوم جابه‌جایی هدف نهایی بررسی حرکت میکرو/نانوذرات هدف، از لحظه‌ی شروع به حرکت در مبدأ تا رسیدن به نقطه‌ی هدف در مقصد بوده و لذا از اهمیت بیشتری در جابه‌جایی و جابه‌جایی برخوردار است.

با توجه به موارد مذکور و اهمیت بالای مطالعه‌ی فاز دوم جابه‌جایی، پس از به دست آوردن نیرو و زمان بحرانی برای جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا، در این مقاله بررسی فاز دوم مورد بررسی قرار گرفته است.

به صورت کلی در این پژوهش، جابه‌جایی سه‌بعدی ذره‌ی طلا مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پارامتر زبری در آن مورد بحث قرار گرفته است. تحقیق صورت گرفته به صورت تجربی و از طریق تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شده است. مدل‌سازی‌های صورت گرفته در فاز دوم و به صورت سه‌بعدی مطرح شده‌اند. همچنین تصاویر توپوگرافی و پارامترهای سطح استخراج شده از دیگر نتایج این مقاله بر روی نانوذره‌ی طلا می‌باشند. نوآوری اصلی این مقاله بررسی فاز دوم جابه‌جایی در سطوح زبر و همچنین انجام کارهای تجربی در این زمینه می‌باشد.

۲- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا به مدل‌سازی هندسی تماس چند-نقطه‌ای برای پروفیل سطح زبر با توزیع شش‌وجهی و چهاروجهی پرداخته شده است. سپس فاز دوم جابه‌جایی سه‌بعدی بررسی شده است. همچنین کارهای تجربی صورت گرفته تشریح شده است.

۲-۱- مدل‌سازی هندسی تماس چند-نقطه‌ای برای

پروفیل سطح زبر با توزیع شش‌وجهی و چهاروجهی

با تغییر مدل همیکر و اعمال اثر ارتفاع برآمدگی بر نیروهای چسبندگی اولین مدل ساده برای بررسی توصیف زبری سطوح بر مقدار نیروی چسبندگی، توسط رامپ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ذره کروی با شعاع R در بالای برآمدگی به شعاع r و به مرکز O قرار گرفته و در امتداد محور y بر هم نیرو وارد کرده‌اند. نیروی عکس‌العملی مؤثر نیز از مجموع دو عبارت که برهم‌کنش‌های وان‌دروالس دو سطح در تماس هستند، به دست آمده است. برای برهم‌کنش بین دو سطح از تقریب درزاگوبین استفاده شده است و معادله‌ی (۱) به دست آمده است.

$$F_{ad} = \frac{A_H R}{6D_0^2} \left[\frac{r}{r+R} + \frac{1}{(1+r/D_0)^2} \right] \quad (1)$$

پارامترهای معادله‌ی (۱) برابر با، r شعاع برآمدگی، A_H ثابت همکر و D_0 کمترین فاصله بین کره و برآمدگی (معادل فاصله بین‌اتمی) می‌باشند. همچنین مقادیر نیروی وان‌دروالس تماسی بین ذره و برآمدگی و نیروی برهم‌کنش غیر تماسی بین ذره و صفحه مینای صاف که ذره در فاصله‌ای معادل شعاع برآمدگی r از صفحه مینا قرار دارند، توسط عبارت اول و دوم داخل براکت تعریف شده‌اند [۲۰].

در معادله‌ی (۲) شعاع تماسی ذره با صفحه مینا، n فاصله مرکز برآمدگی‌ها از یکدیگر بوده و زاویه برحسب درجه است. معادله به‌دست آمده مشابه معادله موجود برای تماس کره زبر با سطح صاف است [۲۱].

با در نظر گرفتن تعداد نقاط تماسی برابر N ، معادله نیروی تماسی برای حالت تماس چند-نقطه‌ای و توزیع زبری با ضرب نیروی تماسی در N به شکل معادله (۳) تغییر کرده است:

$$F_{ad} = \frac{A_H R}{6D_0^2} \left[\frac{Nr}{r+R} + \frac{1}{(1+r/D_0)^2} \right] \quad (3)$$

نیروی معادل هرتزین در مدل JKR، F_H^{JKR} ، با در نظر گرفتن نیروی دوربرد $2\pi r \omega_2$ به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$F_H^{JKR} = F + 3\pi r \omega_2 \pm \sqrt{6\pi r \omega_2 F + (3\pi r \omega_2)^2} \quad (4)$$

با جایگذاری نیروی خارجی معادل، $F + 2\pi r \omega_2$ در معادله‌ی (۴)، معادل هرتزین به صورت معادله (۵) استخراج شده است:

$$F_H^{JKR} = F + 2\pi r \omega_2 + 3\pi r \omega_1 \pm \sqrt{6\pi r \omega_1 (F + 2\pi r \omega_2) + (3\pi r \omega_1)^2} \quad (5)$$

نهایتاً تغییر شکل و نیز شعاع سطح تماس از معادلات JKR به دست می‌آیند [۲۲]. معادلات تعمیم داده‌شده شوارتز جهت استفاده برای تماس چند-نقطه‌ای به صورت معادله (۶) به دست می‌آید:

$$F_{adh}^{Tough} = (F_{nc} + F_{external}) + 3N\pi R'\gamma \pm \sqrt{6\pi R'\gamma (F_{nc} + F_{external}) + (3N\pi R'\gamma)^2} \quad (6)$$

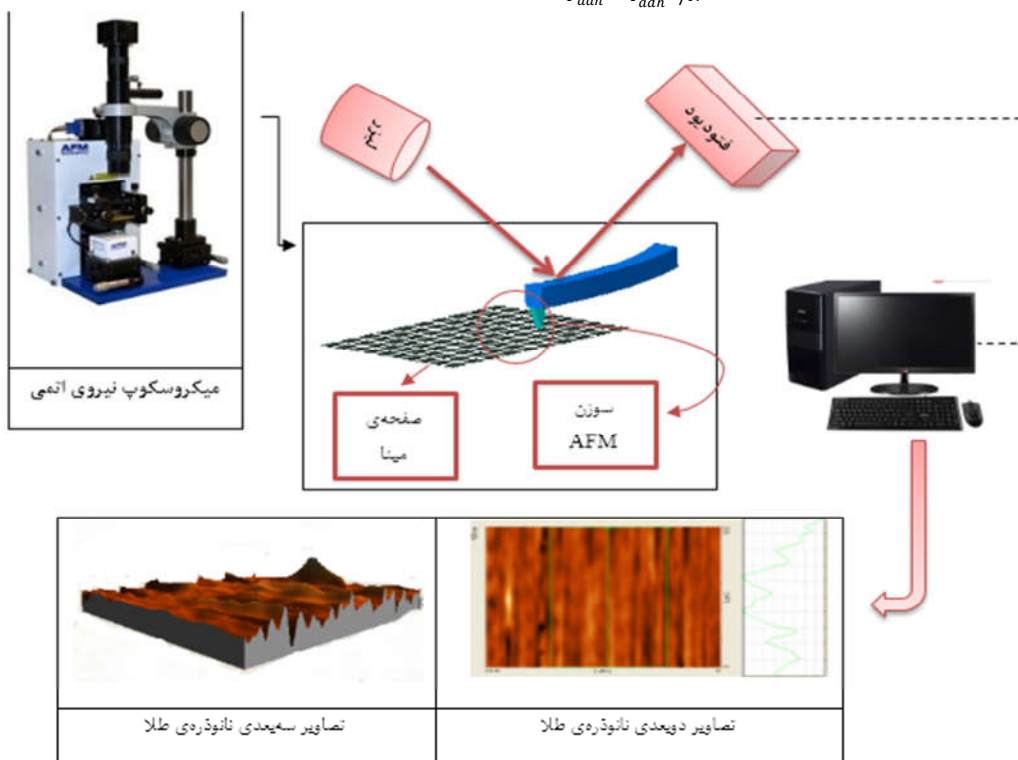
پس از تعیین نیروی کل چسبندگی سطح و با تقسیم آن بر تعداد نقاط تماسی، مقدار نیروی چسبندگی در تماس تک-نقطه‌ای ذره با یک قله برآمدگی سطح زبر F_{adh}^S به دست می‌آید.

$$F_{adh}^S = F_{adh}^{Tough} / N \quad (7)$$

مقادیر تغییر شکل و سطح تماس بین ذره کروی با یک قله برآمدگی سطح زبر، با جایگذاری F_{adh}^S در معادلات JKR برای تماس تک‌نقطه‌ای به دست خواهند آمد. سطح تماس واقعی کل A ، از ضرب سطح تماس بین ذره کروی با یک قله برآمدگی سطح زبر در تعداد نقاط تماسی به دست می‌آید.

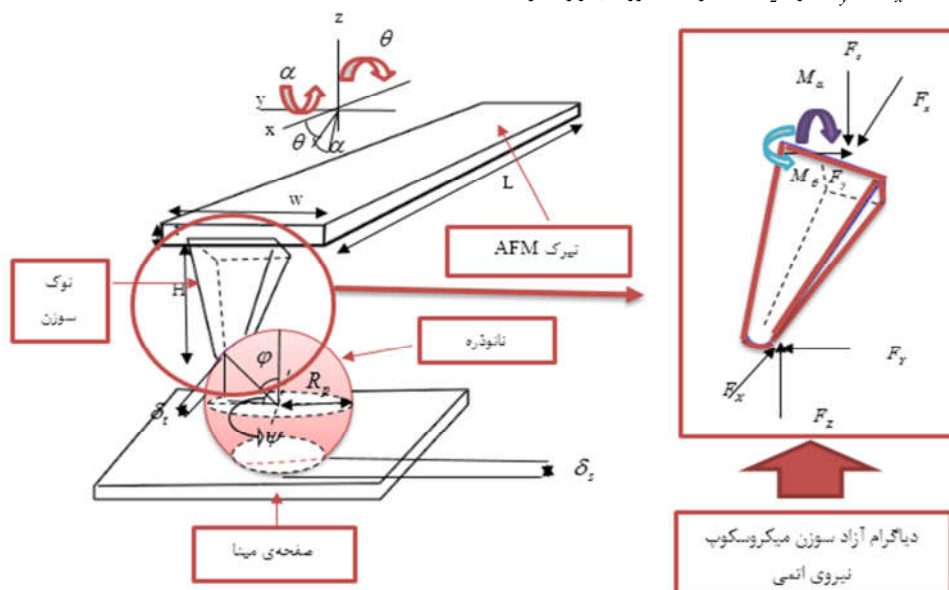
۲-۲- مدل‌سازی فاز اول نانو جابه‌جایی

فرآیند جابه‌جایی را می‌توان جابه‌جایی ذرات برای رسیدن به هدفی خاص تعریف نمود. در آغاز این فرآیند، نوک سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با ذره‌ی هدف تماس پیدا کرده، سپس با اعمال نیرو به تیرک جابه‌جایی در فاز اول صورت می‌پذیرد. در طی این فرآیند، نیروی اعمال تا زمانی که بر نیروهای مقاوم همچون اصطکاک و نیروی چسبندگی، غلبه پیدا کند، افزایش می‌یابد. نیرویی که سبب غلبه بر نیروهای مقاوم می‌گردد را نیروی بحرانی و زمان رخ دادن این اتفاق را زمان بحرانی، می‌نامند. هدف اصلی در فاز نخست جابه‌جایی، رسیدن به نیرو و زمان بحرانی تحت شرایط محیطی و هندسی نزدیک به واقعیت می‌باشد. فاز دوم پس از شروع حرکت آغاز می‌شود. کاوش سطح مورد نظر در این فاز صورت می‌گیرد و اطلاعات ثبت شده از تغییرات جابه‌جایی تیرک و نیرو توسط تابش نور لیزر به تیرک و بازتاب آن بر روی دیود نوری، به اطلاعات قابل فهم برای کامپیوتر تبدیل می‌گردد. اطلاعات به‌دست آمده شامل تصاویر توپوگرافی، نمودارهای نیرو-جابه‌جایی و سایر موارد می‌باشد. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی فرآیند کلی صورت گرفته در این تحقیق می‌باشد.



شکل ۳- فرآیند کلی صورت گرفته در طی تحقیق

طرف تیرک به انتهای سوزن را در راستای محورهای x ، y و z تعریف شده‌اند و M_α و M_θ نمایانگر گشتاورهای وارده از طرف تیرک به انتهای سوزن می‌باشند. همچنین نمادهای F_x ، F_y و F_z نیز به منظور نمایش نیروهای وارده از طرف ذره‌ی هدف به نوک سوزن در راستای محورهای x ، y و z استفاده شده‌اند.

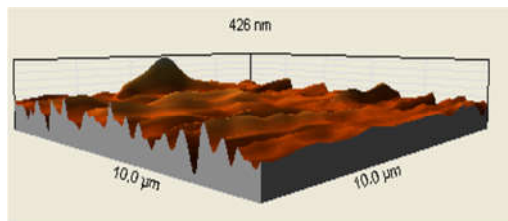


شکل ۴- شماتیکی از پارامترهای هندسی AFM

است. سپس نمودارهای نیرو، شتاب، سرعت و جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا در راستای محورهای x و y ترسیم شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

۳-۱- تعیین هندسه و پارامترهای سطح نانوذره‌ی طلا

به‌منظور بررسی نانوذره‌ی طلا، ابتدا با پیمایش سطح مینا، تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، ثبت شده و تحلیل نتایجی همچون تعیین هندسه‌ی ذره و بررسی پارامترهای سطح نانوذره، با استفاده از این تصاویر انجام می‌شود. لذا شکل ۵ نمایانگر تصویر سه‌بعدی گرفته شده از نانوذره‌ی طلا و با ابعاد مشخص شده در تصویر می‌باشد.



شکل ۵- تصویر ثبت شده از نانوذره‌ی طلا

تصاویر توپوگرافی ثبت شده از نانوذره توسط نرم‌افزارهای مورد نظر تحلیل شده و همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با ترسیم خطوطی در راستای افقی و عمودی، پروفیل سطح در آن راستا نمایش داده می‌شوند. از نتایج حاصل از این تصاویر برای تعیین هندسه‌ی

همان‌طور که قبلاً بیان شده است، تحقیق صورت گرفته بر روی ذره‌ی طلا در فاز دوم جابه‌جایی و به صورت سه‌بعدی انجام شده است. لذا تمامی روابط مورد نیاز برای مدل‌سازی فرآیند جابه‌جایی سه‌بعدی در این بخش ارائه شده است.

همان‌گونه که در شکل ۴ و معادلات (۸) تا (۱۰) مشاهده می‌شود، نیروهای اعمالی در راستای محورهای x ، y و z تعریف شده‌اند [۱۹]. در روابط (۸) تا (۱۰)، F_x ، F_y و F_z به ترتیب نیروهای وارده از

$$F_x = F_x + m \left(\ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi + \frac{H \ddot{\alpha} \cos \alpha - H \dot{\alpha}^2 \sin \alpha}{2} \right) \quad (8)$$

$$F_z = F_z \cos^2 \alpha + m \cos^2 \alpha \left(\ddot{z}_s - \ddot{\delta}_t \sin \varphi - \ddot{\delta}_s + \frac{-H \ddot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta - H(\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos \alpha \cos \theta}{2} - \frac{H \ddot{\theta} \cos \alpha \sin \theta}{2} \right) \quad (9)$$

$$+ \left(\frac{I_p \ddot{\alpha} + M_\alpha}{H} \right) \sin \theta + F_x \sin \alpha \cos \alpha$$

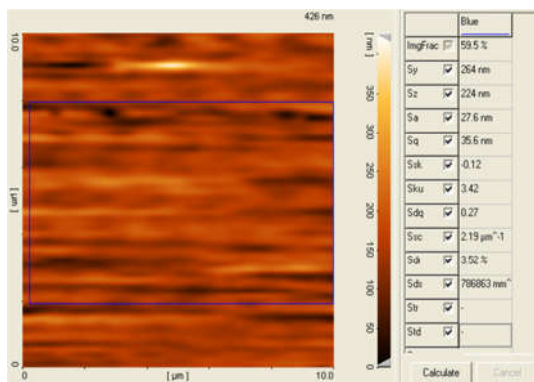
$$F_y = F_y \sin^2 \theta + m \sin^2 \theta \left(\ddot{y}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi - \ddot{\delta}_s + \frac{-H \ddot{\theta} \cos \theta + H \dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} \right) \quad (10)$$

$$+ \left(\frac{I_p \ddot{\theta} + M_\theta}{H} \right) \cos \theta - F_z \sin \theta \cos \theta$$

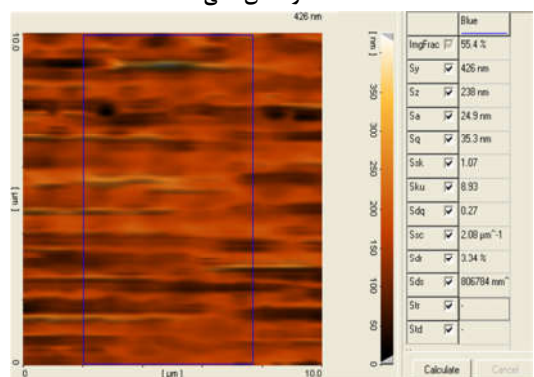
۳- نتایج

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی در تعیین هندسه‌ی نانوذره‌ی طلا و پارامترهای سطح ارائه شده

نانوذره‌ی مورد نظر استفاده می‌شود.



الف- راستای افقی



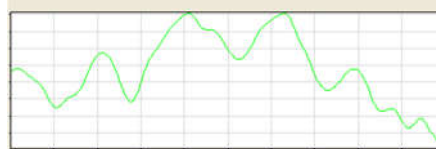
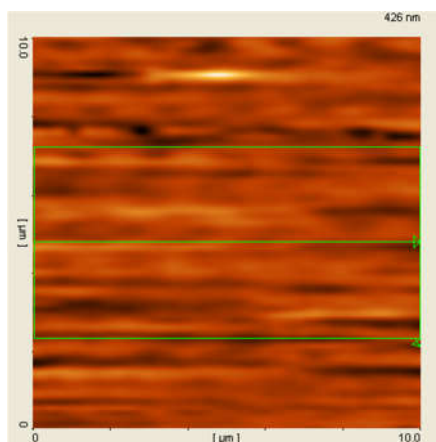
ب- راستای عمودی

شکل ۷- محدوده‌ی مشخص شده از سطح نانوذره‌ی طلا و پارامترهای محاسبه شده توسط نرم‌افزار

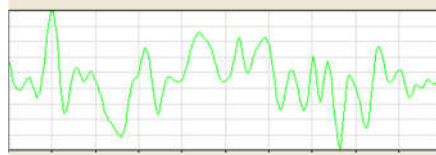
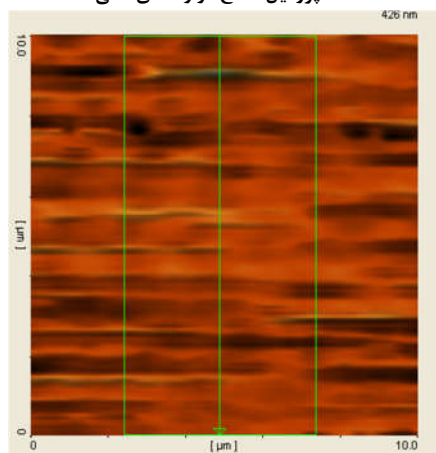
همچنین جدول ۱ نشان‌دهنده‌ی مقادیر تعیین شده، می‌باشد. نتایج این جدول نشان‌دهنده‌ی این است که در راستای محور y سطحی به نسبت صاف‌تر وجود دارد.

جدول ۱- پارامترهای سطح نانوذره‌ی طلا

پارامترها	مقادیر سطح در راستای محور x	مقادیر سطح در راستای محور y
S_p : (متوسط زبری)	۲۷/۶nm	۲۴/۹nm
S_q : (انحراف معیار پروفیل ارزیابی شده)	۳۵/۶nm	۳۵/۳nm
S_{ds} : (تراکم قله‌ها)	۷۸۶۸۶۳nm	۸۰۶۷۸۴nm
S_{sk} : (کجی پروفیل ارزیابی شده)	۰/۱۲	۱/۰۷
S_{ku} : (تیزی پروفیل ارزیابی شده)	۳/۴۲	۸/۹۳
S_{sc} : (مجموع مقدار انحنای هر نقطه از سطح در دو راستای عمود بر هم)	۲/۱۹ μm^{-1}	۲/۰۸ μm^{-1}
S_{dq} : (شیب ریشه میانگین مربعی پروفیل ارزیابی شده)	۰/۲۷	۰/۲۷



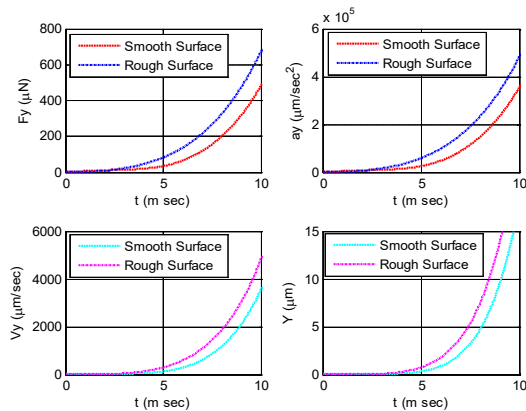
الف- پروفیل سطح در راستای افقی



ب- پروفیل سطح در راستای عمودی

شکل ۶- تصاویر توپوگرافی برای تعیین هندسه‌ی نانوذره‌ی طلا

از جمله کاربردهای بررسی نانوذرات، محاسبه‌ی پارامترهای سطح می‌باشد. در این تحقیق و با استفاده از نرم‌افزار، پس از تعیین سطح مورد نظر در راستاهای عمودی و افقی، پارامترهای سطح محاسبه شده‌اند. شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی مشخص شده از سطح نانوذره‌ی طلا و پارامترهای محاسبه شده توسط نرم‌افزار می‌باشد.



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا در فاز دوم

۴- نتیجه‌گیری

ساخت طیف وسیعی از محصولات با دقت اتمی، سبب اهمیت فرآیند جابه‌جایی در حوزه‌ی فناوری نانو شده است. همچنین بهبود خواص مواد، مطالعه بر روی ساختار نانوذرات از دیگر کاربردهای فناوری نانو در صناعی همچون الکترونیک، پزشکی و ساختمانی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، اولین گام استفاده از ابزاری مناسب جهت این جابه‌جایی‌ها و مطالعات ساختار می‌باشد. بدین منظور ابزارهای گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است که میکروسکوپ نیروی اتمی از جمله پرکاربردترین آن‌ها می‌باشد. در این مقاله با توجه به گستردگی استفاده از ذره‌ی طلا در صنایع مختلف، جابه‌جایی این ذره در فاز دوم و با در نظر گرفتن مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند، مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به وجود زبری‌های بسیار در ابعاد نانو، بررسی حرکت نانوذره‌ی طلا با در نظر گرفتن این پارامتر از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بدین منظور حرکت ذره در راستای محورهای X و Y در سطوح صاف و زبر مطالعه شده است. میزان جابه‌جایی در دو راستا محاسبه شده و نتایج حاکی از جابه‌جایی بیشتر ذره‌ی طلا در سطوح صاف و در راستای Y می‌باشد. همچنین هندسه‌ی نانوذره‌ی طلا برای استفاده در مدل‌سازی‌ها با استفاده از تصاویر ثبت شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، محاسبه شده است. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به محاسبه‌ی مقادیر پارامتر سطح ذره‌ی طلا اشاره نمود.

۵- نمادها

F_X	نیروی اعمالی انتهای سوزن در راستای X
F_x	نیروی اعمالی نوک سوزن در راستای X
F_Y	نیروی اعمالی انتهای سوزن در راستای Y
F_y	نیروی اعمالی نوک سوزن در راستای Y
F_Z	نیروی اعمالی انتهای سوزن در راستای Z
F_z	نیروی اعمالی نوک سوزن در راستای Z
H	ارتفاع سوزن
I_p	ممان اینرسی تیرک حول نقطه‌ی ابتدایی
M	جرم تیرک

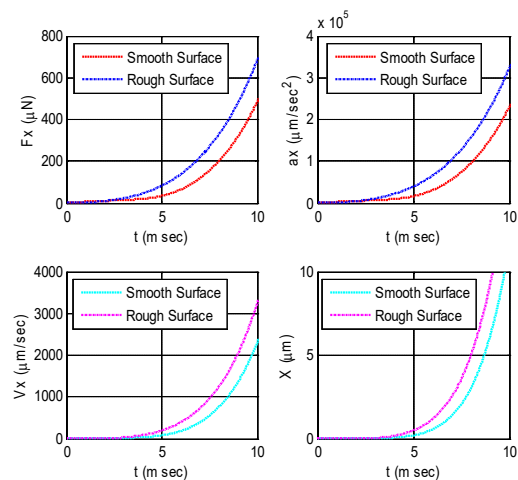
۲-۲- نتایج تحلیل فاز دوم جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا با

سطوح زبر و صاف

جابه‌جایی ذرات مختلف در دو فاز صورت می‌پذیرد. فاز نخست با هدف به دست آوردن نیرو و زمان جابه‌جایی و فاز دوم با هدف رسیدن به مکان مورد نظر در هنگام حرکت و بررسی میزان جابه‌جایی ذره تحت شرایط محیطی و هندسی مختلف انجام می‌پذیرند. در این تحقیق فاز دوم جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا مورد بررسی قرار گرفته و نیرو در راستای محورهای X و Y در طول زمان محاسبه شده و نمودارهای مربوطه برای سطوح صاف و زبر ترسیم شده است.

از آنجا که هدف این فاز بررسی میزان جابه‌جایی نانوذره‌ی هدف در سطوح مختلف بوده است با مدل‌سازی‌های انجام شده، شتاب، سرعت و در نهایت جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا در راستای محورهای X و Y شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشند. همانطور که در شکل ۸-الف و ۸-ب مشاهده می‌شود، با افزایش زمان، مقدار نیرو در هر دو راستا افزایش یافته و سبب افزایش شتاب، سرعت و در نهایت جابه‌جایی نانوذره می‌گردد. با بررسی نمودارهای به دست آمده، نتایج نشان‌دهنده‌ی میزان جابه‌جایی کمتر در سطوح زبر می‌باشند و از آنجایی که در ابعاد نانو، ناهمواری‌ها نمایان‌تر می‌باشند، به منظور شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت در جابه‌جایی ذرات باید به این مهم توجه نمود.

همچنین با بررسی مقادیر جابه‌جایی در راستای محورهای X و Y، مقدار این جابه‌جایی در راستای Y بیشتر می‌باشد؛ که این موضوع را نیز با توجه به نتایج جدول ۱ می‌توان توضیح داد، چرا که با توجه به نتایج تجربی به دست آمده، مشاهده می‌گردد که متوسط زبری در راستای محور Y کمتر بوده و لذا در راستای این محور سطح صاف‌تر و در نتیجه جابه‌جایی بیشتری را مشاهده می‌نماییم.



الف- نتایج فاز دوم نانوذره‌ی طلا در راستای محور X

correction. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Vol. 90, pp. 313-327, 2019.

- [13] Korayem M. H., Taheri M., Khaksar H., Bathae S. H., Using Micro/Nano Scale Contact Models in 3D Manipulation of Deformation of Au Particles Under Angular Effect. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp. 33-43, 2020.
- [14] Park K. J., Huh J. H., Jung D. W., Park J. S., Choi G. H., Lee G., Yoo P. J., Park H. G., Yi G. R., 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. 1-10, 2017.
- [15] Korayem M. H., Rastegar Z., Application of Nano-Contact Mechanics Models in Manipulation of Biological Nano-Particle: FE Simulation. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 8, No. 1, pp. 35-50, 2012.
- [16] 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.
- [17] Taheri M., using of sphericalcontact models in 3d manipulationmodeling of Au nanoparticles using atomic force microscopy to calculate the critical force and time, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 48, No. 2, pp. 175-184, 2018.
- [18] Korayem A. H., Taheri M., Korayem M. H., Dynamic Modeling and simulation of nanoparticle motion in different environments using AFM nano-robot. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 294-300, 2015.
- [19] 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*, Vol. 19, No. 1, pp. 181-190, 2019.
- [20] Israelachvili J. N., Intermolecular and Surface Forces with Applications To Colloidal And Biological Systems, pp. 150-189, London: Academic Press, 1985.
- [21] Rumpf H., *Mechanische Verfahrenstechnik*, Munich: Hanser, Taylor & Francis, pp. 95-105, 1975
- [22] Cooper K., Ohler N., Gupta A., Beaudoin S., Analysis of contact interactions between a rough deformable colloid and a smooth substrate. *Journal of colloid and interface science*, Vol. 222, No. 1, pp. 63-74, 2000.

گشتاور پیچشی تیرک حول محور Y	M_{α}
گشتاور پیچشی تیرک حول محور Z	M_{θ}
موقعیت صفحه‌ی مینا در راستای X	x_s
موقعیت صفحه‌ی مینا در راستای Y	y_s
زاویه‌ی چرخش حول محور Y	α
عمق نفوذ نانوذر در صفحه‌ی مینا	δ_s
عمق نفوذ نانوذر در سوزن	δ_t
زاویه‌ی پیچش	θ
زاویه سوزن	ϕ
زاویه‌ی نیروی سوزن	ψ

۶- مراجع

- [1] Moshirpanahi A., Haghighi S. E., Imam A. Dynamic modeling of a cylindrical nanoparticle manipulation by AFM. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 611-619, 2021.
- [2] Chen J., Xu K., Applications of atomic force microscopy in materials, semiconductors, polymers, and medicine: A minireview. *Instrumentation Science & Technology*, Vol. 48, No. 6, pp. 667-681, 2020.
- [3] Zhou L., Cai M., Tong T., Wang H., Progress in the Correlative Atomic Force Microscopy and Optical Microscopy. *Sensors*, Vol. 17, pp. 938:1-15, 2017.
- [4] Xie H., Haliyo D. S., Régnier S., A versatile atomic force microscope for three-dimensional nanomanipulation and nanoassembly. *Nanotechnology*, Vol. 20, No. 21, pp. 215301: 1-9, 2009.
- [5] Shinato K. W., Huang F., Jin Y., Principle and application of atomic force microscopy (AFM) for nanoscale investigation of metal corrosion. *Corrosion Reviews*, Vol. 38, No. 5, pp. 423-432, 2020.
- [6] Wang D., Russell T. P., Advances in atomic force microscopy for probing polymer structure and properties. *Macromolecules*, Vol. 51, No. 1, pp. 3-24, 2018.
- [7] Ghofrani, M., Korayem M. H., Hoshidar A. K., Modeling and Simulation of Cylindrical Nano-particles Movement Using Various AFM Cantilever Types in Virtual Reality Environment. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 179-186, 2017.
- [8] Khalili M., Taheri M., Bathae S. H., Shakeri F., Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics. *Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 155 – 174, 2022.
- [9] Korayem M. H., 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*, Vol. 436, pp. 105-119, 2018.
- [10] Taheri M., Mirzalu M., Experimental Extraction of Young's modulus of MCF-7 Breast Cancer Cell Using Spherical Contact Models. *AmirKabir Journal of Mecanichal Engineering*, Vol. 53, No. 12, 2022.
- [11] Zakeri M., Faraji J. Dynamic modeling of nano/microparticles displacement in multi-point contact based on the Rumpf model. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 120-130, 2016.
- [12] Korayem M. H., Shahali S., Rastegar Z., Simulation of 3D nanomanipulation for rough spherical elastic and viscoelastic particles in a liquid medium; experimentally determination of cell's roughness parameters and Hamaker constant's