



## تغییر شکل نانوذرات طلا تحت تأثیر منیپولیشن سه‌بعدی و اثر زاویه‌ای بر مبنای مکانیک تماس با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

محرم حبیب نژاد کورایم<sup>1</sup>، معین طاهری<sup>2\*</sup>، حسام خاکسار<sup>3</sup>، سید حسن بطحائی<sup>4</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

### چکیده

### اطلاعات مقاله

تعاریف مختلف نانوتکنولوژی نشان دهنده‌ی این واقعیت است که فناوری نانو دامنه‌ی وسیعی از حوزه‌های علمی را دربر می‌گیرد. در حقیقت نانوتکنولوژی یک علم بین رشته‌ای و رویکردی جدید به تمام رشته‌ها است. در فرایند نانومنیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، مدل‌های تماسی برای تعیین نیرو و زمان بحرانی که تشکیل دهنده‌ی فاز اول این فرایند هستند، نقش بسیار مهمی دارند. در این مقاله دو بخش تماسی در نانومنیپولیشن میکرو/نانوذرات استوانه‌ای طلا مورد بررسی قرار گرفته است. بخش اول تماس میکرو/نانوذرات هدف و صفحه‌ی مینا و بخش دوم تماس نوک سوزن تیرک و میکرو/نانوذرات هدف است. برای بخش اول از پنج مدل تماسی مهم هرتز، لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور و هواپریچ استفاده شده است. در بخش دوم نیز از مدل‌های تماسی هرتز و جی‌کی‌آر بهره گرفته شده است. برای تماس در بخش اول تغییر شکل صورت گرفته بین صفحه‌ی مینا و میکرو/نانوذرات استوانه‌ای طلا، مدل داوسون بیشترین و مدل نیک‌پور کمترین میزان تغییر شکل و عمق نفوذ را داشته است. همچنین در تغییر شکل صورت گرفته بین ذرات استوانه‌ای هدف و نوک گروه سوزن، مدل هرتز کمترین و مدل جی‌کی‌آر بیشترین تغییر شکل و عمق نفوذ را به دلیل در نظر گرفتن نیروهای چسبندگی نشان داده است. نتایج داشته است، که با افزایش زاویه‌ی نوک سوزن با محور Z، میزان عمق نفوذ و تغییر شکل ایجاد شده بین ذره و صفحه‌ی مینا به‌طور کلی کاهش خواهد یافت که، مدل لاندبرگ بیشترین و مدل نیک‌پور کمترین میزان کاهش را نمایش داده است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 22 مهر 1398  
داوری اولیه: 19 آذر 1398  
پذیرش: 28 آذر 1398

### کلیدواژگان:

منیپولیشن سه‌بعدی  
مدل‌های تماسی مقیاس میکرو/نانو  
میکروسکوپ نیروی اتمی  
تغییر شکل ناحیه تماس  
اثر زاویه‌ای

## Using Micro/Nano Scale Contact Models in 3D Manipulation of Deformation of Au Particles Under Angular Effect

Moharam Habib Nejad Korayem<sup>1</sup>, Moein Taheri<sup>2\*</sup>, Hesam Khaksar<sup>1</sup>, Seyed Hasan Bathaee<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University and Science Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

### Article Information

Original Research Paper  
Received 14 October 2019  
First Decision: 10 December 2019  
Accepted 19 December 2019

### Keywords:

3D manipulation  
Micro/nano scale contact models  
Atomic Force Microscope  
Contact area deformation  
Angular effect

### Abstract

Different definitions of nano-technology prove this truth that nano-technology includes wide range of various scientific fields. In fact, nano-technology is an interdisciplinary science and a new approach to the all domains. In Nano manipulation process by utilizing Atomic Force Microscope, contact models play important role for determining critical force and time which constituent the first phase of this process. In current study, two contact stages in Nano manipulation of gold cylindrical micro/nano particles are investigated. First stage is the contact of micro/nanoparticles and substrate and the second one is the contact between cantilever tip and micro/nanoparticles. For the first stage, five significant contact models including Hertz, Lundeberg, Dawson, Nikpour and Heoprich have been used. Also in the second stage, contact models of Hertz and JKR have been applied. Dawson model predicts maximum and Nikpour model predicts the least amounts of deformation and penetration depth for the contact of the first stage of deformation between substrate and gold cylindrical micro/nanoparticles. Also the deformation between cylindrical particles and spherical tip apex has the minimum amount in Hertz model and the highest amount of deformation and penetration depth have been showed in JKR model due to regarding adhesion forces. Generally, the results indicate increasing the angle of tip apex along the z axis leads to decrease of penetration depth and the amount of deformation between particles and substrate which Lundeberg model has been demonstrated the least amount and Nikpour model has been showed the highest amount of decrease.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Habib Nejad Korayem, M. Taheri, H. Khaksar, S. H. Bathaee, 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 (in Persian)

## 1- مقدمه

امروزه نانومینیولیشن واژه‌ای نام‌آشنا برای محققان و دستداران جهان نانو است. دنیای پزشکی، بیولوژیکی، ساخت تجهیزات، ابزار و ماشین آلات و صنایع نوین همچون هوافضا، بیوتکنولوژی و نانوتکنولوژی از جمله زمینه‌های کاربرد نانومینیولیشن است. نانولوله‌های فلزی و کربنی به منظور ساخت تجهیزات در اندازه‌های میکرو/نانو در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌گردند. ابزاری که در فرایند نانومینیولیشن مورد استفاده قرار می‌گیرد، میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>1</sup> است. اجزای مهم آن تیرک و سوزن است که عمل حرکت یا هل دادن نانولوله‌ها را بر عهده دارد. سوزن آن می‌تواند خواص مواد، اصطکاک، رفتار مغناطیسی و خواص مکانیکی را اندازه‌گیری کند. از دیگر کاربردهای آن تصویربرداری با وضوح بالا و فرایند برش در مقیاس نانو می‌باشد [1].

تحلیل رفتار کمانش برای نانولوله‌های کربنی بر مبنای مکانیک مولکولی توسط ذاکری و افضل‌نژاد مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها زاویه‌ی کایرال را تأثیرگذارترین عامل بر بارگذاری پیچشی معرفی کرده‌اند، در حالی که بر بار کمانش محوری اثر قابل توجهی ندارد. همچنین در شرایط کمانش پیچشی، ساختارهای کایرال ممکن است ضعیف‌تر یا قوی‌تر از ساختارهای متقارن عمل کنند [2]. پس از موفقیت میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه‌های علوم مواد، شیمی و فیزیک به سرعت در علم زیست‌شناسی نیز مورد استفاده قرار گرفت. حساسیت بالا، قابلیت‌پذیری بسیار خوب و رزولوشن بسیار قوی (1000 برابر رزولوشن بالاتر نسبت به میکروسکوپ نوری) میکروسکوپ نیروی اتمی را به عنوان یک ابزار قدرتمند معرفی کرد. طیف‌سنجی همراه با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی یا دما و الکتریک از پیشرفت‌های نوین این میکروسکوپ است [3]. برای شبیه‌سازی مناسب دینامیک و مکانیک نانوذرات، تحت فشار سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی، در ابتدا دانش فیزیکی مقیاس نانو مورد مطالعه قرار گرفت که نتیجه‌ی آن عبور از دنیای ماکرو به جهان نانو به صورت کاهش اندازه و ابعاد ذرات تعریف شده است. این تغییر ابعاد منجر به برخی تغییرات هندسی و خواص فیزیکی می‌شود، در این مقیاس نیروهای چسبندگی با توجه به نیروهای بحرانی تعیین می‌شوند و تغییرات قابل توجهی در فیزیک و خواص مواد به وجود می‌آوردند [4].

یوان و همکارانش دلیل اصلی پیشرفت نکردن نانومینیولیشن

بر مبنای میکروسکوپ نیروی اتمی را سوزن میکروسکوپ بیان کرده‌اند. آن‌ها برای حل این مشکل سوزن میکروسکوپ را به عنوان سنسوری برای شناسایی موقعیت ذره با استفاده از اسکن سطح مبتنی بر حرکت سوزن بیان کرده‌اند. نتایج تجربی نشان داده است، که روش پیشنهادی توانسته است موقعیت سوزن را بهبود ببخشد [5]. ایجاد تصاویر نانو بدون محدودیت در نمونه الکتریکی، هدایت آسان و بیشینه محیط اسکن از دلایل برتری میکروسکوپ نیروی اتمی بر دیگر میکروسکوپ‌های روبشگر است، اما با این مزایا نیز دارای بسیاری از نواقص است که کاربرد آن را به شدت محدود کرده است [6].

کورایم و همکارانش به بررسی خواص مکانیکی سلول‌های زیستی پرداخته‌اند. تعیین خواص مکانیکی سلول‌های سرطانی می‌تواند به طور قابل توجهی به بهبود سرطان کمک کند. آن‌ها خواص الاستیک و ویسکوالاستیک سلول سرطانی سینه را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به دست آورده‌اند. برای این کار ابتدا توپوگرافی و خواص ظاهری سلول مورد بررسی قرار گرفته است و سپس با استفاده از تئوری تماسی هرتز<sup>2</sup> و تحلیل‌های آماری، توابع توزیع برای مدول کششی به دست آمده است [7].

مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی یک نانوذره بر روی یک سطح زبر در حین مینیولیشن بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل تماس چند نقطه‌ای توسط ذاکری و همکارش ارائه شده است. این مدل که از ترکیب مدل تماس تک‌نقطه‌ای رامپ<sup>3</sup> با مدل‌های تماسی جی‌کی‌آر<sup>4</sup> و شوارتز<sup>5</sup> استخراج گردیده است. نشان داده است که استفاده از مدل تماسی چندنقطه‌ای به خصوص در شعاع‌های زبری کوچک تأثیر به‌سزایی در تعیین نیروی بحرانی مینیولیشن دارد [8].

نانولوله‌های کربنی در طول دو دهه گذشته مورد توجه بسیاری از محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. خواص خارق‌العاده آن‌ها و کاربردهای گسترده این نانولوله‌ها در زمینه‌های متعدد باعث شده که پیشرفت روزافزونی داشته باشند. مزایای شگفت‌انگیز این نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های مکانیکی، حرارتی، الکترونیکی و نانو الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. ژانگ و همکارانش در یک مطالعه، سازوکار رشد، کنترل ساختار، خواص مکانیکی و فیزیکی و برنامه‌های کاربردی نانولوله‌های کربنی را ارائه کرده‌اند [9].

<sup>2</sup> Hertz<sup>3</sup> Ramp<sup>4</sup> JKR<sup>5</sup> Schwartz<sup>1</sup>AFM: Atomic Force Microscopic

منیپولیشن سه بعدی نانوذرات بیولوژیکی شامل دی‌ان‌ای و پلاکت با استفاده از تیرک مستطیلی میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته است [18].

سرایبی و کورایم به مدل‌سازی دینامیک و شبیه‌سازی منیپولیشن سه بعدی روی سطوح زبر بر اساس مدل‌های چسبنده‌ی پیشرفته پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شعاع نفوذ، نیروی بحرانی مورد نیاز برای منیپولیشن نانوذرات افزایش می‌یابد [19].

طاهری به تحلیل و بررسی تأثیر پارامترهای ابعادی و سرعت بر روی نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل<sup>3</sup> پرداخته است. او در این پژوهش با استفاده از مدل سه بعدی سینماتیک و دینامیک نانوذرات و روش آنالیز حساسیت تأثیر پارامترهای ابعادی را بر روی نیرو و زمان بحرانی به دست آورده است. ضخامت تیرک و طول تیرک اثرگذارترین پارامترها بر روی نیروی بحرانی و پارامترهای ارتفاع سوزن و ضخامت تیرک اثرگذارترین پارامترها بر روی زمان بحرانی شناخته شده‌اند [20]. برای ایجاد یک فرایند دقیق منیپولیشن شرایط محیطی مانند رطوبت بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی روش‌های موجود در مدل‌سازی به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند: مکانیک پیوسته، مدل چندمقیاسی و دینامیک مولکولی. مدل‌سازی میکروسکوپ نیروی اتمی نیز از دو جنبه متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است: بخش اول سر سوزن و بخش دوم نانوذرات که به دلیل ارتباط سوزن با نانوذرات در ابعاد بسیار کوچک معادلات حاکم در نظریه مکانیک پیوسته باید همراه با نظریه دینامیک مولکولی باشد تا راهگشای حل مسأله باشد [21].

طاهری و همکارانش به بررسی فاز دوم منیپولیشن با استفاده از مدل‌های اصطکاکی کولمب<sup>4</sup>، اچ‌کا<sup>5</sup> و لاگره<sup>6</sup> پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که بیشترین مقدار جابه‌جایی و سرعت بر اساس مدل اصطکاکی لاگره و کمترین میزان بر اساس مدل اصطکاکی کولمب است. همچنین با افزایش شعاع ذره، جابه‌جایی و سرعت آن کاهش یافته است. همچنین در بررسی صحت و دقت مدل‌های اصطکاکی مدل کولمب کمترین و مدل لاگره بیشترین میزان دقت و صحت را داشته‌اند و مدل اصطکاکی اچ‌کا در بین این دو قرار گرفته است [22]. کورایم و همکارانش به توسعه و مدل‌سازی نانوذرات زیستی به شکل

از تئوری‌های مکانیک تماس که مبنای بسیاری از فعالیت‌های مهندسی در زمینه‌های گوناگون مورد استفاده قرار گرفته باشد، تئوری هرتز است که عمده‌ترین نقص آن در نظر نگرفتن نیروی چسبندگی است [10].

از مدل‌های تماسی تعمیم یافته پس از تئوری هرتز می‌توان به جی‌کار [11] و دی‌ام‌تی<sup>1</sup> [12] اشاره کرد. در این مدل‌ها با در نظر گرفتن نیروی چسبندگی نواقص تئوری هرتز تا حدود بسیار زیادی اصلاح شده است. همچنین چادوری و همکاران نیروی چسبندگی بین یک لنز استوانه‌ای و صفحه تخت را بررسی کرده‌اند [13]. چسبندگی بین یک میکرونانو ذره و میکرو گیره‌ی تمام‌کننده‌ی کار از چالش‌های اصلی و بسیار مهم فرایند میکرونانومنیپولیشن است. مخائیل و همکارانش فرضیه‌ای را مبنی بر اینکه، نیروی چسبندگی به‌طور مستقیم با ساختار شیمیایی ذره و گیره در ارتباط است را ارائه کرده‌اند. آن‌ها برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی از یک مدل چندوجهی از نوع مدل نیروهای واندروالس بهره برده‌اند. همچنین مدل خود را با آزمایش نیروی کششی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی مقایسه کرده‌اند [14].

طاهری چهار مدل تماسی کروی شامل مدل‌های هرتز، جی‌کار، دی‌ام‌تی و بی‌سی‌پی<sup>2</sup> را در منیپولیشن سه بعدی جهت مدل‌سازی دقیق حرکت نانوذره به کار برده است. نتایج این بررسی نشان داده است، که مدل تماسی هرتز کم‌ترین میزان نیرو و زمان بحرانی را صرف کرده است که این امر به دلیل در نظر نگرفتن نیروهای چسبندگی است [15].

کورایم و همکارانش به مدل‌سازی و شبیه‌سازی منیپولیشن سه بعدی میکرونانوذرات زیستی با استفاده از مدل‌های مکانیک تماس استوانه‌ای با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آن‌ها در این پژوهش از مدل‌های تماسی هرتز، لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور و هوپریچ برای شبیه‌سازی تماس استوانه‌ای استفاده نموده‌اند [16]. تلاش‌های اولیه برای استخراج روابط و همچنین بررسی تئوری و مدل‌سازی نیروها در فرایند نانومنیپولیشن نانوذرات بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی توسط جونو و همکارانش انجام گرفته است. آن‌ها یک مدل ساده از چگونگی کنش و واکنش نیروها بین نانوذره‌ی کروی و نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی که آن‌هم به صورت یک کره فرض شده است را ارائه کرده‌اند [17].

طاهری با استفاده از مدل تماسی جی‌کار به مدل‌سازی

<sup>3</sup> Sobol

<sup>4</sup> Coulomb

<sup>5</sup> HK

<sup>6</sup> LuGre

<sup>1</sup> DMT

<sup>2</sup> BCP

مدل‌های تماسی جی‌کآر و هرتز برای آن‌ها استفاده شده است. برای تماس در بخش اول صفحه/استوانه و در بخش دوم استوانه/کره استفاده شده است. سپس در بخش شبیه‌سازی ابتدا به بررسی تأثیر نیرو در عمق نفوذ ناحیه‌ی تماس بین ذره‌ی استوانه‌ای طلا و صفحه‌ی مینا پرداخته شده است. سپس تأثیر نیرو در عمق نفوذ ناحیه‌ی تماس بین ذره‌ی استوانه‌ای طلا و نوک کروی سوزن تیرک بررسی شده است. در انتهای این بخش نیز اثر زاویه‌ی تیرک بر میزان عمق نفوذ در دو ناحیه‌ی مورد بررسی، شبیه‌سازی و مطالعه شده است.

## 2- مدل‌سازی

در بخش مدل‌سازی ابتدا مدل‌های تماسی هرتز، لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور و هواپریچ از حالت تماسی صفحه/استوانه جهت بررسی تماس بین صفحه‌ی مینا و ذرات استوانه‌ای طلا جهت کاربرد در نانومنیپولیشن سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است، سپس مدل‌های هرتز و جی‌کآر برای حالت تماسی استوانه/کره جهت بررسی تماس بین ذرات استوانه‌ای و نوک کروی سوزن تیرک بیان شده است. ابتدا به تشریح توسعه‌ی مدل‌های تماسی صفحه/استوانه و استوانه/کره و روابط آن‌ها پرداخته شده است.

### 2-1- تعمیم مدل‌های تماسی صفحه/استوانه

هنگامی که فرایند منیپولیشن صورت می‌پذیرد، اولین تماس بین صفحه‌ی مینا و ذرات استوانه‌ای طلا رخ می‌دهد. این ناحیه تماس که در اثر منیپولیشن میکرو/نانوذرات استوانه‌ای با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی تشکیل می‌شود، به دلیل بالا بودن سطح تماس اثر مهمی بر نیروهای چسبندگی و اصطکاک خواهد داشت. ناحیه‌ی تماس بین سطح بالای صفحه مینا و سطح زیرین ذره است. برای مدل‌سازی دقیق اثر نیروهای مذکور از پنج مدل مهم تماسی شامل هرتز، لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور و هواپریچ استفاده شده است.

**مدل تماسی هرتز:** از مهم‌ترین مدل‌های تماسی که توسط هرتز معرفی شد. در این مدل تماسی، که نقص عمده‌ی آن در نظر نگرفتن نیروهای چسبندگی است. اگر نیروهای سطحی موجود باشند کارایی خود را به‌طور کلی از دست می‌دهد، در واقع مدل تماسی هرتز عملکرد خود را برای بارگذاری‌های کم از دست می‌دهد. به همین دلیل در شبیه‌سازی نانومنیپولیشن نانوذرات تنها زمانی قابل استفاده است که میزان اعمال نیروی خارجی از میزان نیروی سطحی بیش‌تر باشد. معادله بین شعاع تماس و نیروی بارگذاری در این مدل از معادله (1) حاصل می‌گردد [24]:

استوانه‌ای و استوانه‌ای پخ خورده با بهره‌گیری از تئوری‌های تماسی مختلف جهت نانومنیپولیشن میکرو/نانوذرات زیستی مختلف بر پایه‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. مدل‌سازی تئوری‌های تماس شامل: مدل‌های تماسی لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور، هواپریچ و هرتز بوده است. نتایج نشان داده است، که در حالت استوانه‌ای مدل تماسی هرتز و در حالت تماس استوانه‌ای پخ خورده تئوری تماس هواپریچ بیشترین تغییر شکل را داشته‌اند. همچنین با در نظر گرفتن جنس ذرات زیستی، نانو ذرات با جنس پلاکت به دلیل داشتن خواص مکانیکی در نظر گرفته‌شده در بین تمامی مدل‌ها بیشترین تغییر شکل را داشته‌اند [23].

اقدامات انجام شده در زمینه نانومنیپولیشن با بهره‌گیری از مدل‌های تماسی مناسب فقط در جهت ذرات با اشکال و جنس‌های مختلف در نظر گرفته شده است، اما در تمامی پژوهش‌های انجام شده به طور دقیق کاربرد منیپولیشن سه بعدی مورد بررسی قرار نگرفته است. یکی از اصول اساسی در منیپولیشن سه بعدی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی حالت تماس بین میکرو/نانوذرات هدف بین تیرک و صفحه‌ی مینا تقسیم‌بندی شده است. به همین دلیل مدل‌های تماسی در دو دسته‌ی مجزا قرار گرفته‌اند. بخش اول تماس بین صفحه‌ی مینا و میکرو/نانوذرات هدف و بخش دوم تماس بین میکرو/نانوذرات هدف و نوک سوزن تیرک می‌باشد. در این پژوهش برای نخستین بار به توسعه‌ی مدل‌های تماس صفحه/استوانه و استوانه/کره جهت کاربرد در منیپولیشن سه بعدی میکرو/نانوذرات طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است.

مدل‌سازی در این مقاله با در نظر گرفتن شکل استوانه‌ای برای میکرو/نانوذرات طلا، مدل‌های مختلف تماسی جهت استفاده در منیپولیشن سه بعدی توسعه یافته‌اند. به همین جهت در این پژوهش از مدل‌های تماسی هرتز، لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور و هواپریچ به منظور تماس صفحه/استوانه بین صفحه‌ی مینا و میکرو/نانوذرات طلا مورد توسعه قرار گرفته است. همچنین برای تماس استوانه/کره‌ی بین میکرو/نانوذرات طلا و نوک سوزن تیرک مدل‌های تماسی جی‌کآر و هرتز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در حالت کلی دو بخش تماس در بخش مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. تماس میکرو/نانوذرات هدف و صفحه‌ی مینا که مدل‌های تماسی هرتز، لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور و هواپریچ در این بخش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تماس نوک سوزن تیرک و میکرو/نانوذرات هدف که

قرار گرفته است. مبنای این مدل برای مکانیک تماس صفحه‌استوانه است، که توسط هواپریچ ارائه شده است. معادله بین شعاع تماس و نیروی بارگذاری در مدل هواپریچ از معادله (10) حاصل می‌گردد [28]:

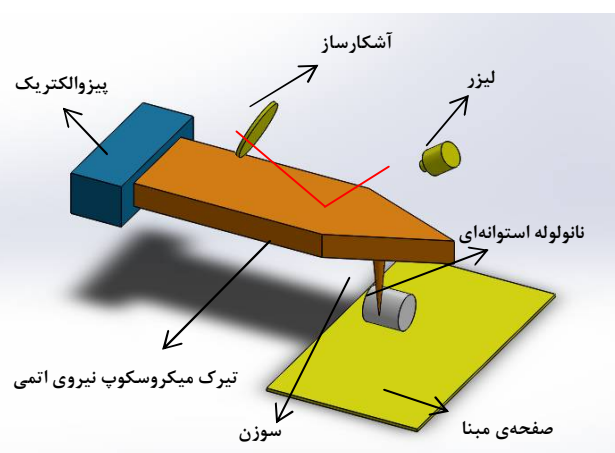
$$a_{Hoeprich} = \left( \frac{8F \cos(\theta_z) R}{L \pi E^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

با توسعه‌ی مدل هواپریچ به منظور کاربرد در منیپولیشن می‌توان ارتباط بین عمق نفوذ و نیروی بارگذاری را از معادله (11) به دست آورد.

$$\delta_{Hoeprich} = 4 \left( \frac{F \cos(\theta_z)}{L \pi E^*} \right) \ln \left( \frac{L \pi E^* H e^{\frac{-1}{2(1-\nu)} \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{L}\right)^2}}}{F \cos(\theta_z)} \right) \quad (11)$$

## 2-2- توسعه‌ی مدل‌های تماسی استوانه/کره

مکان هندسی نقاطی از صفحه که مجموع فاصله‌های آن‌ها از دو نقطه‌ی ثابت مساوی با ثابتی مثبت باشد بیضی نامیده می‌شود. در هندسه، بیضی یک خم مسطح است که از برخورد یک صفحه با یک استوانه به گونه‌ای که یک خم بسته ایجاد شود، به وجود می‌آید. از تماس کره با استوانه هندسه‌ای بیضی ایجاد می‌شود، که به دلیل پیچیدگی‌های موجود، غالب مدل‌های تماسی توانایی توصیف تماس بیضی را ندارند. در این بخش از پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر و بهتر شبیه‌سازی تماس بیضی علاوه بر مدل هرتز، مدل تماسی جی‌کی‌آر که عامل بسیار مهم و دقیق چسبندگی را در نظر می‌گیرد، بررسی شده است. در شکل 1 اجزای اصلی فرایند منیپولیشن نشان داده شده است، که تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی در حال جابه‌جایی یک نانولوله استوانه‌ای بر روی صفحه‌ی مینا می‌باشد.



شکل 1 شماتیکی از تماس بین ذره‌ی استوانه‌ای، سوزن و صفحه‌ی مینا

Fig. 1 Schematic of the contact between the cylindrical Particle, the tip and the base plate

$$a_{Hertz} = \left( \frac{4F \cos(\theta_z) R}{\pi E^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

معادله (2) ارتباط بین عمق نفوذ و شعاع تماس و معادله (3) ارتباط بین عمق نفوذ و نیروی بارگذاری را نشان می‌دهد.

$$\delta_{Hertz} = \frac{a_{Hertz}^2}{4R} \left[ 2 \ln \left( \frac{4R}{a_{Hertz}} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$\delta_{Hertz} = \frac{F \cos(\theta_z)}{L \pi E^*} \left[ 2 \ln \left( \frac{4R}{a_{Hertz}} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

**مدل تماسی لاندبرگ:** از دیگر مدل‌های تماسی می‌توان به مدل لاندبرگ اشاره کرد که به بررسی مکانیک تماس صفحه‌استوانه پرداخته است. معادله بین شعاع تماس و نیروی بارگذاری در مدل لاندبرگ از معادله (4) حاصل می‌گردد [25]:

$$a_{Lundberg} = \left( \frac{8F \cos(\theta_z) R}{L \pi E^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

معادله (5) مدل توسعه یافته‌ی لاندبرگ جهت محاسبه‌ی مقدار عمق نفوذ بر حسب نیروی بارگذاری را نشان می‌دهد.

$$\delta_{Lundberg} = 4 \left( \frac{F \cos(\theta_z)}{L \pi E^*} \right) \ln \left( \frac{L^2 \pi E^*}{F \cos(\theta_z)} \right) \quad (5)$$

**مدل تماسی داوسون:** در زمینه‌ی مکانیک تماس صفحه‌استوانه داوسون یکی دیگر از افرادی است که به مطالعه در این زمینه پرداخته است. نتایج پژوهش او با عنوان مدل تماسی داوسون به شرح زیر است:

معادله بین شعاع تماس و نیروی بارگذاری در مدل داوسون از معادله (6) به دست می‌آید [26]:

$$a_{Dowson} = \left( \frac{8F \cos(\theta_z) R}{L \pi E^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

معادله (7) نیز ارتباط بین عمق نفوذ و نیروی بارگذاری در مدل داوسون را نشان می‌دهد، که جهت کاربرد در نانومنپولیشن تعمیم یافته است.

$$\delta_{Dowson} = 4 \left( \frac{F \cos(\theta_z)}{L \pi E^*} \right) \ln \left( \frac{L \pi E^* R e^{\frac{-\nu}{2(1-\nu)}}}{2F \cos(\theta_z)} \right) \quad (7)$$

**مدل تماسی نیک‌پور:** در زمینه‌ی مکانیک تماس برای صفحه‌استوانه مدل‌های زیادی ارائه شده است که مدل تماسی نیک‌پور برای شعاع تماس و نیروی بارگذاری معادله‌ی (8) را معرفی کرده است [27]:

$$a_{Nikpur} = \left( \frac{8F \cos(\theta_z) R}{L \pi E^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

با توسعه‌ی مدل نیک‌پور می‌توان ارتباط بین عمق نفوذ و نیروی بارگذاری را از معادله (9) استخراج نمود.

$$\delta_{Nikpur} = 4 \left( \frac{F \cos(\theta_z)}{L \pi E^*} \right) \ln \left( \frac{L^2 \pi E^*}{F \cos(\theta_z)} \left( \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2H}{L}\right)^2} - 1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H}{L}\right)^2} + 1} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (9)$$

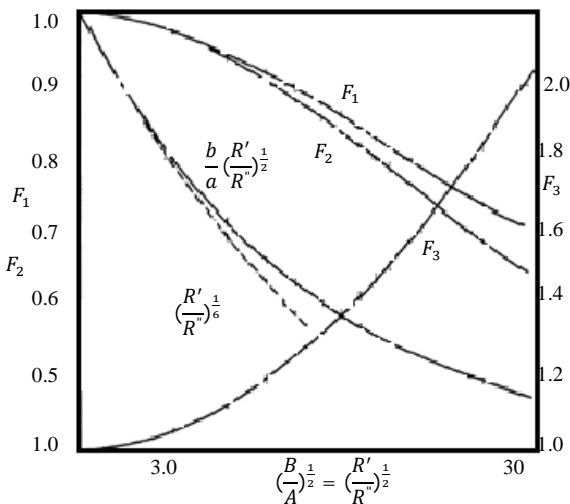
**مدل تماسی هواپریچ:** یک مدل تماسی با بهره‌گیری از یک غلتک استوانه‌ای که میان دو صفحه تخت به صورت فشرده شده

### 3- شبیه‌سازی مدل‌های تماسی جهت کاربرد در مینیولیشن سه بعدی

فرایند نانومینیولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل 3 نشان داده شده است. در این فرایند پس از نزدیک شدن تیرک به صفحه‌ی مینا و تماس سوزن با نانوذره‌ی هدف لیزر به تیرک تابیده شده و بازتاب آن به آشکارساز منتقل می‌شود، پس از آن سیگنال‌های بازخورد توسط سیستم بازخورد به رایانه انتقال می‌یابد، که در نقش یک تحلیل‌گر ظاهر شده است.

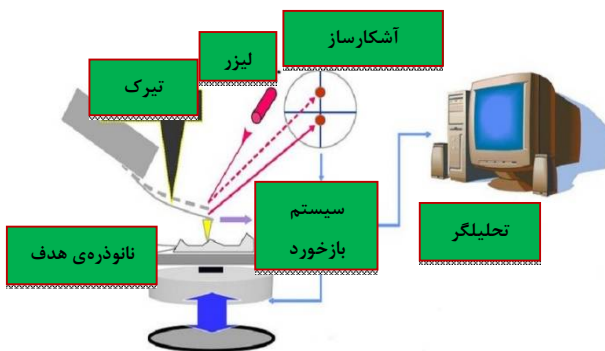
بخش شبیه‌سازی در این پژوهش به دو قسمت تقسیم‌بندی می‌شود:

- 1- تأثیر نیرو در عمق نفوذ
- 2- اثر زاویه‌ای



شکل 2 نمودارهای  $F_1(e)$  و  $F_2(e)$  در مدل تماسی بیضی هرتز [24]

Fig. 2 Charts  $F_1(e)$  and  $F_2(e)$  in the elliptic Hertz contact model [24]



شکل 3 فرایند نانومینیولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

Fig. 3 Nanomanipulation process using Atomic force microscopy

در بخش اول شبیه‌سازی به بررسی تأثیر نیرو در عمق نفوذ

پارامتر مهمی که قبل از بیان مدل‌های تماسی باید بررسی شود شعاع‌های معادل است که در شبیه‌سازی، انتگرال‌ها و ثابت‌های انتگرال‌های بیضی مورد استفاده قرار گرفته است. اگر شعاع استوانه  $R_c$  و شعاع کره  $R_s$  تعریف شود، برای شعاع معادل  $R_e$  می‌توان نوشت [25]:

$$R_e = \sqrt{R_a R_b} = \frac{R_s}{\sqrt{1 + \frac{R_s}{R_c}}} \quad (12)$$

مدل تماسی هرتز:  $\hat{a}$  و  $\hat{b}$  به ترتیب شعاع‌های کوچک و بزرگ بیضی تماس می‌باشند. در این مدل  $C_{C,Hertz}$  به عنوان شعاع معادل از رابطه‌ی (13) معرفی می‌گردد [24].

$$C_{C,Hertz} = \sqrt{a'b'} = \left(\frac{3FR_e}{4E^*}\right)^{\frac{1}{3}} F_1(e) \quad (13)$$

که در رابطه‌ی (13)،  $F_1(e)$  را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (14) و یا با توجه به شکل 2 به دست آورد.

$$F_1(e) \cong 1 - \left[\left(\frac{R_c + R_s}{R_s}\right)^{0.0602} - 1\right]^{1.456} \quad (14)$$

عمق نفوذ بر حسب شعاع معادل را نیز از رابطه‌ی (15) می‌توان به دست آورد.

$$\delta_{C,Hertz} = \frac{C_{C,Hertz}^2}{R_e} \left(\frac{F_2(e)}{F_1(e)^2}\right) \quad (15)$$

که در رابطه‌ی (15)، نیز  $F_2(e)$  با استفاده از رابطه‌ی (16) و یا با توجه به شکل 2 به دست می‌آید.

$$F_2(e) \cong 1 - \left[\left(\frac{R_c + R_s}{R_s}\right)^{0.0684} - 1\right]^{1.531} \quad (16)$$

مدل تماسی جی‌کآر: در این مدل نیز  $C_{C,JKR}$  به عنوان شعاع معادل در رابطه‌ی (17) نمایش داده شده است [29].

$$C_{C,JKR} = \left(\frac{3FR_e}{4E^*Q}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

که در رابطه‌ی (17)،  $Q$  را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (18) به دست آورد.

$$Q = \frac{8}{3\pi} \left[\frac{g(1-g^{0.5})^2}{(\alpha_2 g^2 - \alpha_1)^2}\right] \times \left[\frac{\alpha_1 - \alpha_2 g^{\frac{5}{2}}}{1-g^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{3}(\alpha_2 g^2 + \alpha_1)\right] \quad (18)$$

همچنین در این مدل عمق نفوذ بر حسب شعاع تماسی معادل از رابطه‌ی (19) به دست می‌آید.

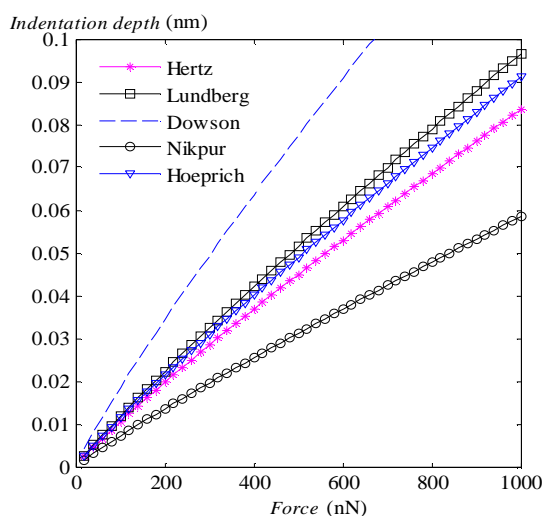
$$C_{C,JKR} = \left(\frac{3FR_e}{4E^*Q}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

در رابطه‌ی (19) می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$X = \left(\frac{4\sqrt{2}g^{\frac{5}{2}}(1-g^{0.5})^{\frac{2}{3}}}{3\pi(\alpha_2 g^2 - \alpha_1)}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (20)$$

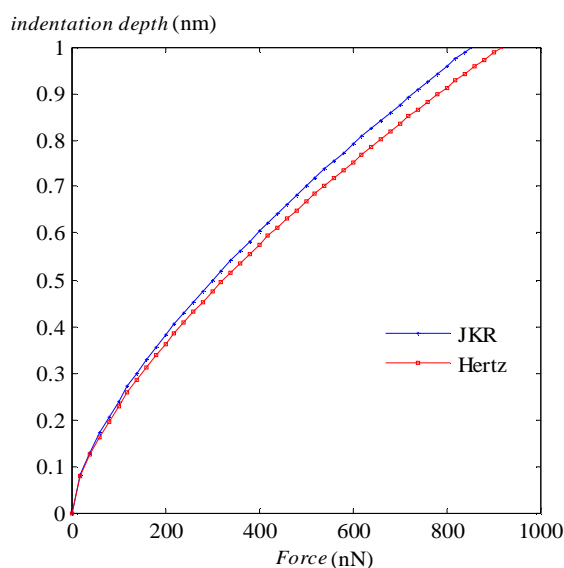
$$Z = \left(\frac{2^{\frac{7}{2}}}{9\pi^2}\right)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{g(1-g^{0.5})^2}{(\alpha_2 g^2 - \alpha_1)^2}\right]^{\frac{2}{3}} \times \left[2K_e \frac{\alpha_1 - \alpha_2 g^{\frac{5}{2}}}{1-g^{\frac{1}{2}}} - \alpha_1 B - g^2 \alpha_2 D\right] \quad (21)$$

نسبت به سطح تماس بین ذره و صفحه‌ی مبنا قابل پیش‌بینی می‌باشد.



شکل 4 عمق نفوذ بر حسب نیرو در تماس صفحه/استوانه

Fig. 4 Indentation depth according to force in the contact of the plate/cylinder



شکل 5 عمق نفوذ بر حسب نیرو در تماس استوانه/کره

Fig. 5 Indentation depth according to force in the contact of the cylinder/sphere

### 3-3- بررسی تأثیر زاویه‌ی برخورد نوک سوزن تیرک با ذره بر

#### عمق نفوذ بین ذره و صفحه‌ی مبنا

عامل بسیار مهمی در منیپولیشن سه‌بعدی، جهت جابه‌جایی میکرو/نانوذره به نام اثر زاویه‌ای وجود دارد، که از برخورد نوک سوزن تیرک در محل تماس با ذره به وجود می‌آید در اثر این برخورد زاویه‌ای با محور z پدید می‌آید که وابسته به ارتفاع سوزن است و با توجه به ارتفاع آن قابل تغییر می‌باشد. هدف

ناحیه‌ی تماس بین ذره‌ی استوانه‌ای طلا و صفحه‌ی مبنا پرداخته شده است. سپس تأثیر نیرو در عمق نفوذ ناحیه‌ی تماس بین ذره‌ی استوانه‌ای طلا و نوک گروه سوزن تیرک بررسی شده است. در بخش بعدی شبیه‌سازی اثر زاویه‌ی تیرک بر میزان عمق نفوذ در دو ناحیه‌ی مورد بررسی، مطالعه شده است.

### 3-1- شبیه‌سازی مدل‌های تماسی صفحه/استوانه

در این بخش به شبیه‌سازی تماس بین صفحه‌ی مبنا و ذرات استوانه‌ای طلا با استفاده از پنج مدل تماسی صفحه/استوانه قابل کاربرد در نانومنیپولیشن شامل مدل‌های هرترز، لاندبرگ، داوسون، نیکپور و هواپرچ پرداخته شده است. با توجه به شکل 4 به صورت کلی با افزایش نیرو عمق نفوذ نیز افزایش یافته است، اما مدل تماسی داوسون با کمترین مقدار نیرو بیشترین میزان تغییر شکل و عمق نفوذ در میکرو/نانوذرات استوانه‌ای طلا را داشته است و بر خلاف آن، مدل تماسی نیکپور با بیشترین میزان نیرو کمترین تغییر شکل و عمق نفوذ را داشته است. به عبارت دیگر مدل تماسی داوسون با میزان تقریباً 630 نانونیوتن به عمق نفوذ 0/1 نانومتر رسیده است اما برخلاف آن، مدل تماسی نیکپور با مقدار 1000 نانونیوتن تنها به میزان 0/06 نانومتر عمق نفوذ داشته است. عمق نفوذ بر حسب نیرو به ترتیب از مدل تماسی داوسون، لاندبرگ، هواپرچ، هرترز و نیکپور از زیاد به کم تغییر کرده است.

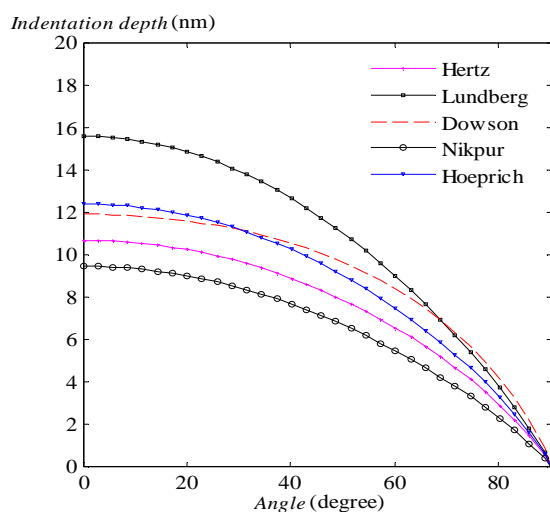
### 3-2- شبیه‌سازی مدل‌های تماسی استوانه/کره

حاصل تماس کره با استوانه یک هندسه بیضوی است، مدل‌های تماسی برای این برخورد که قابل استفاده در نانومنیپولیشن است، مدل‌های هرترز و جی‌کآر هستند. این تماس که بر اساس نوک گروه سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی و ذرات استوانه‌ای هدف شکل گرفته است، در این بخش شبیه‌سازی شده است. با توجه به شکل 5 مشخص است که این دو مدل تماسی بسیار به هم نزدیک هستند و یکدیگر را با اختلاف بسیار کمی دنبال می‌کنند اما مدل تماسی جی‌کآر به دلیل در نظر گرفتن عامل چسبندگی تغییر شکل و عمق نفوذ بیشتری را نسبت به مدل هرترز پیش‌بینی می‌نماید.

یک تمایز کلی که از مقایسه‌ی بین شکل‌های 4 و 5 به وجود می‌آید این است که عمق نفوذ بین ذره و سوزن تیرک بسیار بیشتر از عمق نفوذ بین ذره و صفحه‌ی مبنا می‌باشد، دلیل این امر است که با توجه به کم بودن سطح تماس بین ذره و سوزن

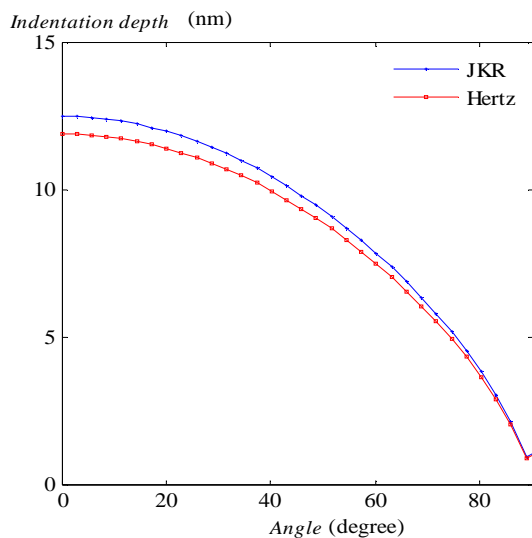


برای هر دو مدل به یک میزان است. و اثر زاویه‌ی برخورد نوک سوزن با ذره باعث کاهش چشم‌گیر میزان عمق نفوذ شده است.



شکل 6 عمق نفوذ بر حسب زاویه‌ی سوزن در تماس صفحه/استوانه

Fig. 6 Indentation depth according to the angle of tip in the contact of the plate/cylinder



شکل 7 عمق نفوذ بر حسب زاویه‌ی سوزن در تماس استوانه/کره

Fig. 7 Indentation depth according to the angle of tip in the contact of the cylinder/sphere

از مقایسه بین شکل‌های 6 و 7 این اشتراک یافت شده است که اثر زاویه‌ی نوک سوزن برای هر دو حالت تماس یکسان بوده است و با افزایش آن کاهش بسیار زیادی در میزان عمق نفوذ مشاهده است، پس این عامل بسیار مهم در تعیین میزان نیرو برای تغییر شکل و عمق نفوذ میکرو/نانوذررات هدف در نانومنیپولیشن سه بعدی تأثیرگذار است.

#### 4- نتیجه‌گیری

این پژوهش که برای نخستین بار به توسعه و تعمیم مدل‌های

نهایی در منیپولیشن، جابه‌جایی میکرو/نانوذررات هدف با کمترین مقدار نیرو و در حداقل زمان ممکن است، لذا بررسی اثر زاویه‌ی نوک سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی بر تغییر شکل میکرو/نانوذررات هدف می‌تواند به تعیین ارتفاع مناسب سوزن جهت اعمال حداقل عمق نفوذ و تغییر شکل ممکن همراه با نیروی مناسب کمک مؤثری نماید. به همراه مدل‌های تماسی که نقش بسیار مهمی در تغییر شکل و عمق نفوذ بر حسب نیرو در نانوذررات هدف دارند و سعی بر این است که مدل تماسی با کمترین میزان نیرو و بیشترین عمق نفوذ مورد استفاده قرار گیرد، اثر زاویه‌ی نوک سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی نیز عامل بسیار مهمی در این امر می‌باشد و مقدار آن بسیار تأثیرگذار در عمق نفوذ میکرو/نانوذررات هدف است.

شکل 6 اثر تغییر زاویه‌ی سوزن با محور  $z$  بر عمق نفوذ و تغییر شکل بین ذره و صفحه‌ی مینا با استفاده از مدل‌های تماسی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که به‌طور کلی با افزایش زاویه‌ی نوک سوزن با محور  $z$ ، میزان عمق نفوذ و تغییر شکل ایجاد شده بین ذره و صفحه‌ی مینا کاهش خواهد یافت. هنگامی که هیچ زاویه‌ای موجود نباشد مدل تماسی لاندبرگ بیشترین و مدل تماسی نیک‌پور کمترین میزان عمق نفوذ را دارد اما با افزایش زاویه روند کاهش عمق نفوذ ایجاد شده است، که میزان کاهش در مدل لاندبرگ نسبت به سایر مدل‌ها بسیار مشهودتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه‌ی نوک سوزن با محور  $z$ ، میزان عمق نفوذ و تغییر شکل ایجاد شده بین ذره و صفحه‌ی مینا کاهش خواهد یافت که این کاهش در مدل لاندبرگ نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر و در مدل نیک‌پور کمتر می‌باشد.

#### 3-4- بررسی تأثیر زاویه‌ی برخورد نوک سوزن تیرک با ذره بر عمق نفوذ بین نوک سوزن و ذره

اثر تغییر زاویه‌ی سوزن با محور  $z$  بر عمق نفوذ و تغییر شکل بین نوک سوزن و ذره با استفاده از مدل‌های تماسی هر تیز و جی‌کی‌آر در شکل 7 نمایان شده است. نتایج این شکل نیز نشان‌گر کاهش عمق نفوذ و تغییر شکل بین نوک سوزن و ذره در اثر افزایش زاویه‌ی سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با میکرو/نانوذرره‌ی هدف است. به‌طور کلی مدل تماسی جی‌کی‌آر به دلیل در نظر گرفتن عامل بسیار مهم چسبندگی در زاویه‌ی صفر درجه میزان عمق نفوذ بیشتری از مدل تماسی هر تیز دارد، اما با افزایش زاویه میزان عمق نفوذ هر دو مدل تماسی به‌طور بسیار زیادی کاهش یافته است. که این میزان در زاویه قائمه تقریباً



میکرو/نانوذرات استوانه‌ای طلا، مدل داوسون بیشترین و مدل نیک‌پور کمترین میزان تغییر شکل و عمق نفوذ را داشته است.

- تغییر شکل صورت گرفته بین ذرات استوانه‌ای هدف و نوک کروی سوزن، مدل هرگز کمترین و مدل جی‌کی‌آر بیشترین تغییر شکل و عمق نفوذ را نشان داده است.

- با افزایش زاویه‌ی نوک سوزن با محور  $z$ ، میزان عمق نفوذ و تغییر شکل ایجاد شده بین ذره و صفحه‌ی مینا به‌طور کلی کاهش خواهد یافت که، مدل لاندبرگ بیشترین و مدل نیک‌پور کمترین میزان کاهش را نمایش داده است.

- نتایج به دست آمده همچنین نشان‌گر کاهش عمق نفوذ و تغییر شکل بین نوک سوزن و ذره در اثر افزایش زاویه‌ی سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با محور  $z$  می‌باشد.

در پژوهشی از کورایم و همکارانش که تغییر شکل میکرو/نانو ذرات زیستی شامل: دی‌ان‌ای، مخمر، باکتری و پلاکت‌ها که این نانوذرات به‌صورت استوانه‌ای و استوانه‌ای پخ‌خورده در نظر گرفته شده بودند، با استفاده از مدل‌های تماسی لاندبرگ، داوسون، هواپریچ، نیک‌پور و هرگز مورد بررسی قرار داده شده‌اند. همچنین آنان با کم کردن طول قسمت استوانه‌ای در هندسه استوانه پخ‌خورده، هندسه را به سمت تشکیل یک کره میل داده‌اند. این شبیه‌سازی که در محیط‌های مختلف بیولوژیکی صورت گرفته است، دارای نتایج زیر است:

- مدل تماسی هواپریچ بیشترین تغییر شکل برای ذرات استوانه‌ای پخ‌خورده را داشته است.

- مدل تماسی هرگز بیشترین تغییر شکل برای ذرات استوانه‌ای را داشته است.

- مدل تماسی داوسون کمترین میزان تغییر شکل برای هر دو هندسه مورد بررسی را داشته است.

همچنین می‌توان نتیجه گرفت که جهت منیپولیشن دقیق ذرات زیستی مختلف استاده از مدل‌های دقیق تماسی می‌تواند بسیار مؤثر باشد. که این امر مستلزم شناخت دقیق هندسه ذرات مختلف می‌باشد [23].

در این پژوهش ذرات هدف به شکل استوانه‌ای در نظر گرفته شده‌اند، که می‌توان در کارهای آتی سایر شکل‌های پیچیده‌تری را برای ذرات مختلف که به شکل واقعی ذرات نزدیک‌تر می‌باشند، بررسی نمود. همچنین معادلات توسعه یافته‌ی مدل‌های تماسی در این مقاله، قابلیت کاربرد در مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی سه‌بعدی منیپولیشن میکرو/نانوذرات استوانه‌ای در کارهای آتی را دارا می‌باشند.

تماس صفحه/استوانه و استوانه/کره جهت کاربرد در نانومنیپولیشن سه‌بعدی پرداخته است، به منظور بررسی تغییر شکل میکرو/نانوذرات طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی صورت گرفته است.

در بخش مدل‌سازی تماسی برای بررسی صفحه/استوانه پنج مدل مهم شامل مدل‌های هرگز، لاندبرگ، داوسون، نیک‌پور و هواپریچ مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی با افزایش نیرو، عمق نفوذ و مقدار تغییر شکل نیز افزایش یافته است. اما در بین مدل‌های تماسی ذکر شده، مدل داوسون بیشترین و مدل نیک‌پور کمترین مقدار عمق نفوذ و تغییر شکل را پیش‌بینی می‌نماید. مدل‌های تماسی به همراه مدل‌سازی دینامیک-سینماتیک و مدل‌سازی دقیق اصطکاکی یکی از سه بخش اصلی مدل‌سازی فرایند منیپولیشن می‌باشند. در نظر گرفتن نیروهای چسبندگی در مقیاس میکرو/نانو، بارگذاری‌های بسیار کم و عمق نفوذ از شاخصه‌های اصلی این مدل‌سازی می‌باشد. در این پژوهش مدل‌های تماسی بکار گرفته شده دارای ویژگی‌هایی اعم از در نظر گرفتن این شاخصه‌ها به‌صورت همزمان در مقیاس‌های میکرو/نانو می‌باشند. همچنین برخی از این مدل‌های تماسی مانند هرگز که از مدل‌های کلاسیک تماس می‌باشد اثر بسیار مهم نیروی چسبندگی را دربر نمی‌گیرد، به همین دلیل استفاده از این مدل امکان مقایسه و امکان‌سنجی مطلوبی را در قیاس به دیگر مدل‌های مکانیک تماس ارائه داده است.

در بخش مدل‌سازی تماسی برای استوانه/کره نیز علاوه بر مدل هرگز مدل تماسی جی‌کی‌آر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مدل تماسی هرگز به دلیل در نظر نگرفتن نیروهای چسبندگی مقدار عمق نفوذ و تغییر شکل کمتری نسبت به مدل تماسی جی‌کی‌آر داشته است، که این امر به دلیل در نظر گرفتن نیروهای چسبندگی در مدل تماسی جی‌کی‌آر امری طبیعی است. اثر زاویه‌ای نیز روند یکسانی بر روی شبیه‌سازی هر دو بخش مدل‌سازی تماسی صفحه/استوانه و استوانه/کره داشته است، بدین منظور که با افزایش مقدار زاویه عمق نفوذ و تغییر شکل کاهش یافته است. برای بخش تماس صفحه/استوانه مدل تماسی لاندبرگ بیشترین و مدل تماسی نیک‌پور کمترین میزان کاهش را داشته‌اند و در بخش تماس استوانه/کره مدل تماسی جی‌کی‌آر میزان بیشتری در امر کاهش عمق نفوذ و تغییر شکل داشته است. نتایج کلی حاصل از این پژوهش در چهار دسته عنوان شده است:

- تغییر شکل صورت گرفته بین صفحه‌ی مینا و

## 5- فهرست علائم

$a_{Dowson}$	شعاع تماسی در مدل داوسون
$a_{Hertz}$	شعاع تماسی در مدل هرتز
$a_{Hoeprich}$	شعاع تماسی در مدل هواپریچ
$a_{Lundberg}$	شعاع تماسی در مدل لاندبرگ
$a_{Nikpurz}$	شعاع تماسی در مدل نیکپور
$a'$	شعاع کوچک بیضی ناحیه تماس
$b'$	شعاع بزرگ بیضی ناحیه تماس
$C_{C,Hertz}$	شعاع معادل بیضی تماس در مدل هرتز
$C_{C,JKR}$	شعاع معادل بیضی تماس در مدل جی کآر
$E^*$	مدول الاستیسیته مؤثر
$F$	نیروی وارده از طرف نوک سوزن بر ذره
$F_1(e)$	تابع اول مدل تماسی هرتز
$F_2(e)$	تابع دوم مدل تماسی هرتز
$H$	عمق سطح مبنا
$L$	طول استوانه
$Q$	تابع کاربردی شعاع تماس بیضوی مدل جی کآر
$R$	شعاع ذره
$R_c$	شعاع استوانه
$R_s$	شعاع کره
$R_e$	شعاع معادل
$X$	تابع کاربردی اول عمق نفوذ مدل تماسی جی کآر
$Z$	تابع کاربردی دوم عمق نفوذ مدل تماسی جی کآر
$\delta_{C,Hertz}$	عمق نفوذ بیضی تماس در مدل هرتز
$\delta_{C,JKR}$	عمق نفوذ بیضی تماس در مدل جی کآر
$\delta_{Dowson}$	عمق نفوذ در مدل داوسون
$\delta_{Hertz}$	عمق نفوذ در مدل هرتز
$\delta_{Hoeprich}$	عمق نفوذ در مدل هواپریچ
$\delta_{Lundberg}$	عمق نفوذ در مدل لاندبرگ
$\delta_{Nikpur}$	عمق نفوذ در مدل نیکپور
$\nu$	ضریب پواسون

## 6- مراجع

- based on atomic force microscopy and surface sensitive measurement techniques, RSC Advances, Vol. 7, pp. 47464–47499, 2017.
- [4] M. H. Korayem, M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM, Int J Adv Manuf Technol, Springer-Verlag London Limited, Vol. 41, No. 1, pp.714–726, 2008.
- [5] Shuai Yuan, Zhidong Wang, Ning Xi, Yuechao Wang and Lianqing Liu, AFM Tip Position Control in situ for Effective Nano-Manipulation, IEEE Industrial Electronics Society ASME Dynamic Systems and Control Division IEEE Robotics and Automation Society, Vol. 23, pp. 2825-2836, 2018.
- [6] Y. Wu, Y. Fang and X. Rena, A high-efficiency Kalman filtering imaging mode for an atomic force microscopy with hysteresis modeling and compensation, Mechatronics, Vol. 50, No. 6, pp. 69-77, 2018.
- [7] M. H. Korayem, Y. H. Sooha and Z. Rastegar, MCF-7 cancer cell apparent properties and viscoelastic characteristics measurement using AFM, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 40, pp. 297-308, 2018.
- [8] M. Zakeri, J. Faraji, Dynamic modeling of nano/microparticles displacement with multi-point contact based on the Rumpf model, Modares Mechanical Engineering, Vol.16, pp. :120-130, 2016. (in Persian)
- [9] R. Zhang, Y. Zhang, and F. Wei, Horizontally aligned carbon nanotube arrays: growth mechanism, controlled synthesis, characterization, properties and applications, Chem Soc Rev, Vol. 46, pp. 3661-3718, 2017.
- [10] B. V. Derjaguin, V. M. Muller and Y. P. Toporov, Effect of contact deformations on the adhesion of particles, Journal of Colloid Interface Science, Vol. 53, No. 2, pp. 314–326, 1975.
- [11] M. K. Chaudhury, T. Weaver, C. Y. Hui and E. J. Kramer, Adhesive contact of cylindrical lens and a flat sheet, Journal of applied physics, Vol. 80, pp. 30-37, 1996.
- [12] M. Barquins, Adherence and rolling kinetics of a rigid cylinder in contact with a natural rubber surface, The Journal of Adhesion, Vol. 26, pp. 1-12, 1988.
- [13] M. Sitti, Survey of nanomanipulation systems, In Nanotechnology, Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on Nanotechnology, Conference. Maui, HI, USA, USA, 2002.
- [14] J. Dejeu, M. Bechelany, P. Rougeot, L. Philippe, and M. Gauthier, Adhesion Control for Micro- and Nanomanipulation, ACS NANO, Vol. 5, pp. 4648-4657, 2011.
- [15] M. Taheri, Using of Spherical Contact Models in 3D Manipulation Modeling of Au Nanoparticles using Atomic Force Microscopy to Calculate the Critical Force and Time, Mechanical Engineering Tabriz University, Vol. 48, pp. 175-184, 2018. (in Persian)
- [1] M. H. Korayem, A. K. Hoshiar, and M. Nazarahari, A hybrid coevolutionary genetic algorithm for multiple nanoparticle assembly task path planning, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 87, pp. 3527–3543, 2016.
- [2] M. Zakeri, O. Afzalnazhad, Analysis of buckling behavior of CNTs using molecular structural mechanics, Aerospace Knowledge and Technology Journal, Vol. 3, No. 2, pp. 55-64, 2015. (in Persian)
- [3] S. Handschuh-Wang, T. Wang, and X. Zhou, Recent advances in hybrid measurement methods

- Atomic Force Microscopy Using Coulomb, HK, and LuGre Friction Models, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, pp. 181-190, 2019. (in Persian)
- [23] M. H. Korayem, H. Khaksar, and M. Taheri, Modeling of contact theories for the manipulation of biological micro/nanoparticles in the form of circular crowned rollers based on the atomic force microscope, *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, pp. 183715-183729, 2013.
- [24] Hertz, H., "Über die Berührung fester elastischer Körper", *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Vol. 92, pp. 156-171, 1881.
- [25] G. Lundberg, Elastische Berührung zweier Halbräume, *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, Vol. 10, No. 5, pp. 201-211, 1939.
- [26] D. Dowson, G. R. Higginson, *Theory of Roller Bearing Lubrication and Deformation*, *Lubrication and Wear Convention*, Vol. 19, pp. 216-227, 1963.
- [27] K. Nikpur, R. Gohar, Deflection of a Roller Compressed Between Plates, *Tribol. Int.* Vol. 8, No. 1, pp. 2-8, 1975.
- [28] M. R. Hoeprich, H. Zantopulos, Line Contact Deformation: a Cylinder Between two flat plates, *Journal of Tribology*, Vol. 103, No. 1, pp. 21-25, 1981.
- [29] C. Jin, A. Jagota and C. Y. Hui, An easy-to-implement numerical simulation method for adhesive contact problems involving asymmetric adhesive contact, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, No. 40, pp. 1-12, 2011.
- [16] M. H. Korayem, M. B. Saraee, Z. Mahmoodi and S. Dehghani, Modeling and simulation of three dimensional manipulations of biological micro/nanoparticles by applying cylindrical contact mechanics models by means of AFM, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol.17, pp. 439, 2015.
- [17] T. Junno, K. Deppert, L. Montelius and L. Samuelson, Controlled manipulation of nanoparticles with an atomic force microscope, *Applied Physics Letters*, Vol.66, pp. 3627-3639, 1995.
- [18] C. Jin, A. Jagota, and C. Y. Hui, An easy-to-implement numerical simulation method for adhesive contact problems involving asymmetric adhesive contact, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, pp. 1-12, 2011.
- [19] M.B. Saraee, M. H. Korayem, Dynamic modeling and simulation of 3D manipulation on rough surfaces based on developed adhesion models, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, pp. 529-545, 2017.
- [20] M. Taheri, 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, pp. 125-135, 2019. (in Persian)
- [21] M. H. Korayem, A. Homayooni and R. N. Hefzabad, Non-classic multiscale modeling of manipulation based on AFM in aqueous and humid ambient, *Surface Science*, Vol. 671, pp. 27-35, 2018.
- [22] B. Zarei, S. H. Bathaee, M. Taheri and M. Momeni, Second Phase of Nanomanipulation of Particles by