

مدلسازی و شبیه سازی حرکت ذرات استوانه‌ای با استفاده از شکل‌های مختلف کانتیلور میکروسکوپ نیروی اتمی در محیط حقیقت مجازی

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، ایران
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
 استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

مآنده غفرانی*
 محرم حبیب‌نژادکورایم
 علی کفاش‌هوشیار

چکیده

با گسترش نانو فناوری، روباتهای بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی بعنوان ابزاری کارآمد جهت انتقال و ساخت نانو ساختارها بصورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است. عدم امکان مشاهده همزمان عملیات هل دادن کنترل شده نانو ذرات یکی از مهمترین محدودیت های این روش می باشد. بمنظور رفع این محدودیت در این مقاله از یک محیط حقیقت مجازی جهت مشاهده روند عملیات استفاده شده است. در شبیه سازی صورت گرفته در این پژوهش ابتدا تصاویر گرفته شده از میکروسکوپ نیروی اتمی پردازش شده و موقعیت و ابعاد نانو ذرات مشخص شده است. پس از آن با استفاده از مدلسازی دینامیک انتقال نانو ذرات و شبیه سازی نمودار نیرو زمان بحرانی، امکان انتقال کنترل شده ذرات فراهم آمده است. شبیه سازیها جهت استفاده از کانتیلور های مستطیلی، Dagger و V-Shape گسترش یافته است. محیط واقعیت مجازی ارائه شده امکان شبیه سازی دقیق فرآید کاربردی نمودن مدلسازیهای ارائه شده جهت کاربران را فراهم آورده است.

واژه‌های کلیدی: نانوربات AFM، محیط حقیقت مجازی، نانو ذرات استوانه ای.

Modeling and Simulation of Cylindrical Nano-particles Movement Using Various AFM Cantilever Types in Virtual reality Environment

M. Ghofrani
 M. H. Korayem
 A. K. Hoshiar

Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran
 Islamic Azad University of Qazvin, Qazvin, Iran

Abstract

As nanotechnology develops, atomic force microscope Nano-robots attracted the attentions as an efficient instrument in order to Nano-structures transfer and construction. Lack of possibility of simultaneously observing the Nano-particles controlled pushing operation is one of the most important limitations on this method. In present research a virtual reality environment is used for observing the operation process in order to eliminate the limitations. At first, the images obtained from the AFM Nano-robots were processed in the simulation performed and then Nano-particles dimensions were determined. Then, the particles were transferred using Nano-particles transference dynamic simulation and simulating the critical time-force diagram. The simulations developed in order to make use of the rectangular, dagger and V-shaped cantilevers. The virtual reality environment provided allowed for the modeling applicability accurate process simulation for users.

Keywords: AFM Nano-robot, Virtual Reality Environment, Cylindrical Nano-particles.

۱- مقدمه

پس از آن مدلسازی دینامیک منیپولیشن نانو ذرات استوانه ای در حالت ۳ بعدی مورد بررسی قرار گرفت. [۷، ۸] و به دنبال آن تاثیر شکل هندسی کانتیلور میکروسکوپ نیروی اتمی توجه محققین را به خود جلب نمود. [۹، ۱۰، ۱۱] مدلسازی ها جهت شبیه سازی انتقال نانو ذرات در محیط مایع گسترش یافته است. [۱۲، ۱۳] مدلسازیهای ارائه شده به بررسی دینامیک حرکت پرداخته اند اما محیط واقعیت مجازی که امکان مشاهده همزمان فرآیند را ایجاد می کند در این پژوهش ها مورد توجه قرار نگرفته است.

Lie و همکاران یک سیستم واقعیت افزاینده جهت رفع مشکل مشاهده همزمان فرآیند را پیشنهاد داده اند. [۱۴] Varol و همکاران به بررسی جعبه ابزار واقعیت مجازی برای Path Planning در انتقال نانو ذرات کروی پرداخته اند. [۱۵] آنها همچنین رابط گرافیکی برای کاربردی نمودن محیط واقعیت مجازی ارائه نموده اند. [۱۶] Naebi و همکاران مساله برخورد نانوذرات در طول عملیات

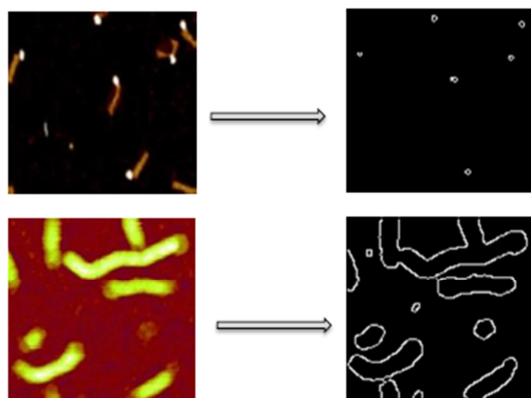
انتقال نانو ذرات و ساخت نانو ساختارها با استفاده از روبات های بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی در یک دهه گذشته بصورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است. در این فرآیند نانو ذرات (کروی، استوانه ای، بیولوژیکی) با استفاده از نوک پروب میکروسکوپ نیروی اتمی هل داده شده و Nano structure ها را می سازند. مهمترین ضعف این روش عدم امکان مشاهده همزمان فرآیند می باشد. [۱]

بمنظور افزایش کارایی نانو روبات های بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی، مدلسازی و شبیه سازی کامپیوتری دینامیک فرآیند برای انتقال نانو ذرات کروی مورد توجه قرار گرفته است. [۲] Onal و همکاران منیپولیشن نانو ذرات کروی در فضای دو بعدی در حالت بهینه و با سرعت مناسب را بررسی نموده اند. [۳، ۴] مدلسازی و شبیه سازی منیپولیشن نانو ذرات زیستی کروی توسط کورایم و همکاران ارائه شد. [۵] Hou به مدلسازی فرآیند مونتاژ نانو لوله ها پرداخته است. [۶]

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: maedeh_ghofrani@hotmail.com

- ۲- پیش پردازش اولیه و تشکیل ماتریس فرمون اولیه
- ۳- لبه یابی ذرات با بکارگیری الگوریتم کلونی مورچگان
- ۴- تشخیص ابعاد و مکان ذرات نانو در تصویر با استفاده از عملگرهای مورفولوژی
- ۵- شماره گذاری ذرات
- ۶- انتخاب ذره هدف جهت حرکت به سمت مقصد نهایی

پس از ورود تصویر به نرم افزار و تنظیمات اولیه اندازه تصویر جهت نمایش مناسب به کاربر، با استفاده از فیلترهای پایین گذر میانگین، گوسی و مقدار میانی نویز تصویر را کاهش و تصویر مناسب تری به دست می آید. سپس برای شدت دادن به لبه ها از فیلتر لاپلاسی استفاده شده است تا جزئیات لبه نمایان تر گردد. در این پژوهش از الگوریتم کنی لبه یابی ابتدایی ذرات استفاده شده است. دلیل استفاده از الگوریتم کنی، تمرکز بر کاهش نویز و بدست آوردن ماکزیمم نقاط احتمالی لبه می باشد. در شکل ۲ نتیجه پیش پردازش برای چهار تصویر گرفته شده از میکروسکوپ نیروی اتمی آورده شده است:



شکل ۲- پیش پردازش تصاویر نانو

پس از پایان مرحله پیش پردازش، با بکارگیری الگوریتم کلونی مورچه ذرات لبه یابی نهایی و شناسایی می گردند. [۲۳] الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه هر دو قدرت همگرایی مناسبی در حل مسائل دارند اما در الگوریتم کلونی مورچه امکان پردازش مراحل به صورت موازی و بر روی چند پردازنده به صورت همزمان نیز وجود دارد. مراحل پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه در فلوجارت شکل ۳ ارائه شده است.

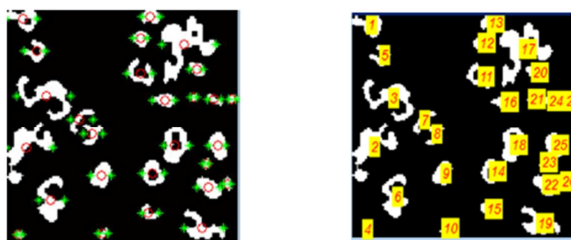
انتقال مورچه ها بر اساس فرمول احتمال زیر صورت می گیرد:

$$P_{(i_0, j_0), (i, j)}^{(n)} = \frac{(\tau_{i, j}^{(n-1)})^\alpha (\eta_{i, j})^\beta}{\sum_{(i, j) \in \Omega_{(i_0, j_0)}} (\tau_{i, j}^{(n-1)})^\alpha (\eta_{i, j})^\beta} \quad (1)$$

$$j \in \Omega_i$$

مینیولیشن و انتخاب بهترین مسیر به منظور مینیمم کردن میزان حرکت میکروسکوپ نیروی اتمی را بررسی نموده اند. [۱۷] نرم افزار حقیقت مجازی با استفاده از پردازش تصویر با الگوریتم ژنتیک و برای ذرات کروی ارائه شده است. [۱۸] محیط واقعیت مجازی بمنظور شبیه سازی انتقال نانو ذرات استوانه ای در محیط هوا و در مد های لغزشی و غلتشی گسترش یافته است. [۱۹] محیط واقعیت مجازی ارائه شده در این مقاله، بصورت جامع کلیه مدهای حرکتی، شرایط محیطی و هندسه کانتیلور را مورد توجه قرار داده است. در این مقاله همچنین انتقال تصاویر نانو ذرات به محیط واقعیت مجازی مورد توجه قرار گرفته است.

در تحقیقات پیشین پردازش تصویر با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه مورد بررسی قرار گرفته است. [۲۰، ۲۱، ۲۲] در این مقاله برای یافتن لبه ذرات پس از انجام یک مرحله پیش پردازش تصویر، از این الگوریتم با ایجاد تغییراتی جهت پردازش تصویر نانو استفاده شده است. پس از آن با استفاده از عملگرهای مورفولوژیکی، پردازش تصویر تکمیل، ذرات شناسایی و شماره گذاری می گردند. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می گردد، ابعاد تقریبی و مختصات مکانی ذره نیز به دست آمده و با قرار دادن علائم سبز رنگ به کاربر نشان داده می‌شود.



شکل ۱- شناسایی ذرات در تصویر برگرفته از میکروسکوپ نیروی اتمی

در این پژوهش ابتدا تصاویر به محیط واقعیت مجازی انتقال داده شده و سپس با استفاده از الگوریتم شبیه سازی ارائه شده شبیه سازی عملیات، برای کانتیلور با شکل های مختلف و در کلیه مدهای حرکتی در محیط واقعیت مجازی شبیه سازی شده است. محیط واقعیت مجازی ارائه شده بعنوان ابزاری قدرتمند و جامع، امکان شبیه سازی عملیات انتقال نانو ذرات استوانه ای و مشاهده فرآیند را فراهم آورده است.

۲- پردازش تصویر به منظور مشخص کردن شکل هندسی نانو ذرات

برای طراحی یک محیط مجازی نزدیک به محیط حقیقی جهت مشاهده انتقال نانو ذره، نیاز به آنالیز تصاویر گرفته شده از میکروسکوپ نیروی اتمی می باشد تا بتوان به مشخصات و مکان واقعی ذرات پی برد و آنها را به محیط شبیه ساز واقعیت مجازی منتقل نمود. مراحل تشخیص ذرات در تصاویر نانو به ترتیب زیر می باشد:

- ۱- ورود تصویر گرفته شده از میکروسکوپ نیروی اتمی

زیر بروزرسانی می گردد.

$$\tau_{i,j}^{(n)} = (1 - \phi) \cdot \tau_{i,j}^{(n-1)} + \phi \cdot \tau_{init} \quad (2)$$

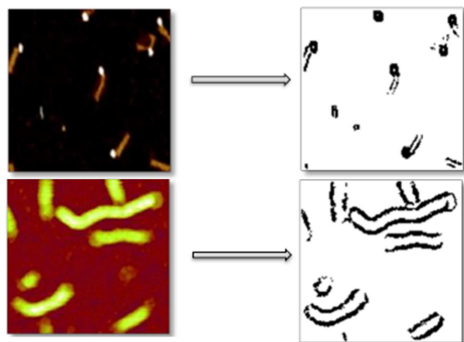
$\phi(0, 1]$ معرف نرخ تبخیر فرومون و τ_{init} مقدار اولیه فرومون می باشد که مقادیر ماتریس آن از مرحله پیش پردازش بدست می آید. [۲۵] بروزرسانی فرومون در این مرحله، مقادیر ماتریس در مسیری که احتمال وجود لبه در آنها بیشتر است را افزایش می دهد. از آنجایی که ممکن است مورچه در چرخه گره های تکراری بیفتد، برای جلوگیری از این امر در برنامه یک آرایه با ۱۰۰ خانه جهت حفظ مسیرهای طی شده توسط یک مورچه در نظر گرفته شده است. در هر حرکت، با قرار دادن چند دستور شرطی کنترل می شود که مورچه مسیری به خارج از تصویر پیدا نکند. در نهایت، به منظور نشان دادن عمل تبخیر از معادله زیر جهت بروزرسانی ماتریس فرومون استفاده می شود:

$$\tau_{i,j}^{(n)} = (1 - \rho) \cdot \tau_{i,j}^{(n-1)} + \sum_{k=1}^K \Delta \tau_{i,j}^{(k)} \quad (3)$$

$\Delta \tau_{i,j}^{(k)}$ معرف مقدار فرومون موجود در لبه i به j که توسط k امین مورچه قرار داده شده است.

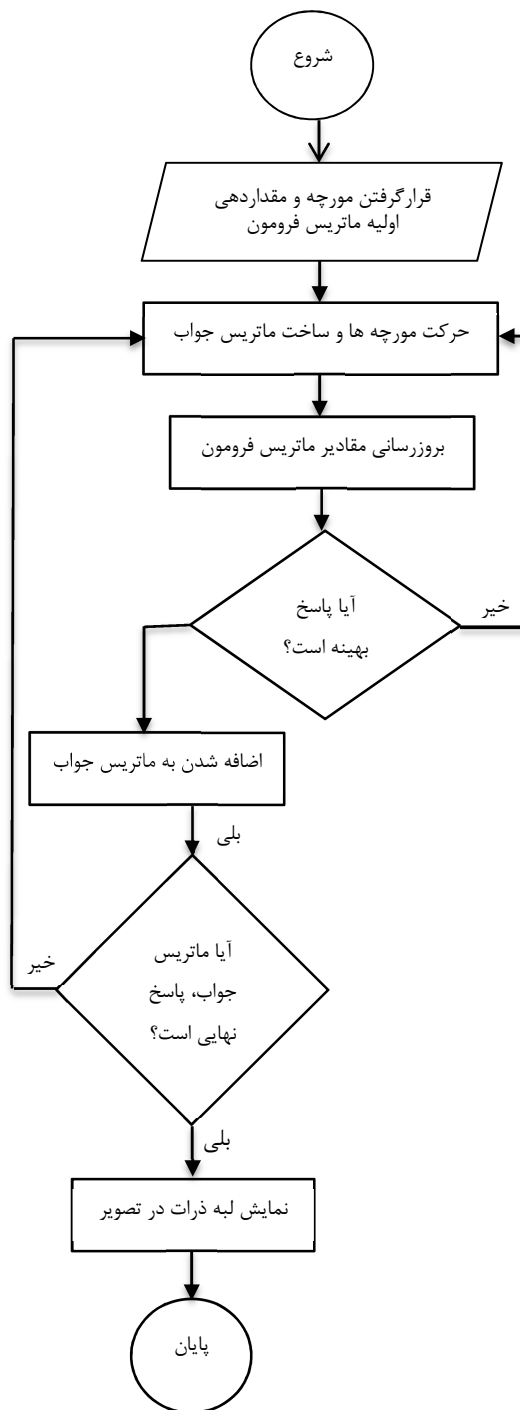
$$\Delta \tau_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} \frac{1}{L_k} & \text{if ant } k \text{ passed edge } (i, j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

L_k طول مسیر K امین مورچه که با تبخیر فرومون، مسیرهای طولانی و غیر بهینه در طول عملیات حذف و درصد احتمال گمراهی مورچگان در طول زمان کاهش می یابد. با اعمال این مراحل شکل ۴ ایجاد می گردد.



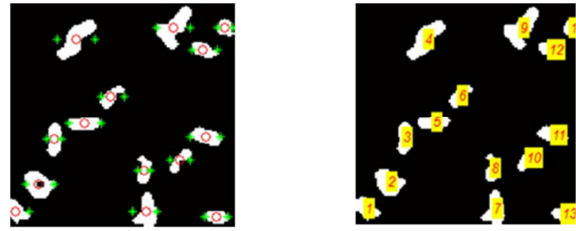
شکل ۴- لبه یابی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه

پس از شناسایی لبه ها از عملگرهای باز کردن و بستن مورفولوژیکی جهت حذف چسبندگی ذرات مختلف و اتصال و یکپارچه سازی لبه یک ذره استفاده می شود [۲۶]. در حالتی که ذرات خمیده و شکل هندسی دقیقی ندارند نرم افزار به صورت تقریبی مختصات بیشینه و کمینه طول و عرض ذره خمیده را محاسبه و نقطه وسط را به عنوان مکان ذره در نظر می گیرد.



شکل ۳- مراحل پردازش تصویر نانو

$\tau_{i,j}^{(n-1)}$ مقدار فرومون لبه از گره i به گره j ، $\eta_{i,j}$ اطلاعات هیوریستیک لبه از گره i به گره j و $\Omega_{(i_0, j_0)}$ گره های همسایگی برای مورچه در گره i می باشد. برای α و β مقدار ثابت ۱ را در نظر گرفته ایم. مقدار ماتریس هیوریستیک در هر پیکسل برابر با میانگین تغییرات شدت روشنایی در همسایگی 8×8 آن پیکسل می باشد [۲۴]. ماتریس فرومون در ابتدا بوسیله مقادیر بدست آمده از مرحله پیش پردازش مقدار دهی و پس از آن هنگامی که مورچه ای به نقطه مناسب کاندید لبه رسید ماتریس فرومون طبق فرمول



شکل ۵- شناسایی ذرات و شماره گذاری آنها

۳-مدلسازی حرکت نانو ذرات استوانه ای

در این مقاله نانو ذرات استوانه ای در محیط های مختلف، برای کانتیلور های مستطیلی، V-Shape و Dagger و برای کلیه مدهای حرکتی (Spinning, Rolling and Sliding) شبیه سازی شده است. دینامیک حرکت در مقالات مختلف بصورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است. [۷، ۸، ۱۱، ۱۳] در این مقاله از ارایه نحوه بدست آوردن روابط دینامیکی حاکم صرف نظر شده است و در قسمت مدلسازی به ارایه مرجع مرتبط اکتفا شده است.

اولین مرحله مدلسازی، ارایه روابط سینماتیک حرکت می باشد. در نظر گرفتن کلیه تغییر شکل های ایجاد شده در نانو ذره و کانتیلور روابط سینماتیک در حالت کلی بصورت زیر ارایه شده است. [۱۳] مدلسازی حرکت ذرات استوانه ای در محیط هوا در پنج مرحله انجام می پذیرد. مرحله اول بدون در نظر گرفتن تغییر شکل الاستیک ذره می باشد. سپس در دومین مرحله تغییر شکل الاستیک ایجاد شده به دلیل برخورد نوک پروب به ذره و همچنین ذره به سطح، به روابط اضافه شده است. پس از آن به دلیل اعمال نیرو، کانتیلور حرکتی به سمت بالا، پیچشی و کمی انحراف خواهد داشت که در مرحله سوم این موارد نیز اعمال می گردد. در مرحله چهارم خمش کانتیلور به داخل، وارد محاسبات شده و در نهایت در پنجمین مرحله، سینماتیک حرکت نانو ذره با توجه به دوران نانو لوله مورد توجه قرار می گیرد.

$$\begin{aligned} X_p &= X_s + (R_p - \delta_t) \sin \varphi - H \sin \theta - 2\delta_D - \delta_{ST} + L \sin \lambda \\ Z_p &= Z_s + (R_p - \delta_t) \cos \varphi + (R_p - \delta_s) + H \cos \theta - 2H \sin^2 \left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ Y_p &= Y_s + 2H \sin(\gamma) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + 2L \sin^2\left(\frac{\lambda}{2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

X_p, Y_p, Z_p مختصات نقطه مرجع، φ زاویه تماس نوک پروب با ذره و ثابت فرض شده است، λ زاویه دوران نانو ذره، R_p شعاع نانو ذره، L طول نانو ذره، H ارتفاع نوک پروب می باشد، δ_s و δ_t به ترتیب تغییر شکل الاستیک سطح و ذره و δ_D و δ_{ST} تغییر شکل حاصل از نیروی کشش سطحی و درگ می باشند.

با مشخص شدن مدل سینماتیک بمنظور مدلسازی نیروهای داخلی مدل کانتیلور ارایه شده است. مدل ارایه شده وابسته به شکل کانتیلور بوده و با توجه به معادلات (۶) و جدول ۱ برای کانتیلورهای مختلف بدست می آید.

$$\begin{bmatrix} F_X^c \\ F_Y^c \\ F_Z^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_X & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{\theta y}}{L_{tip}^2} \\ 0 & K_Y & 0 & \frac{K_{\theta x}}{L_{tip}^2} & 0 \\ 0 & 0 & K_Z & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

در جدول ۱، L_{top} بیانگر طول مقطع مستطیلی شکل، θ_I و θ_{II} نشان دهنده تغییر شکل در انتهای کنسول V شکل می باشند. سایر پارامترهای اشاره شده در جدول بطور مفصل توسط کورایم توضیح داده شده است. [۱۱]

برای مدلسازی تغییر شکل الاستیک و چسبندگی ذره، کورایم و هوشیار از مدل تماسی JKR استفاده نموده است. [۸، ۷] مدل تماسی برای دو حالت ارائه شده است. حالت اول تماس پروب و ذره که می توان آن را تماس دو کره در نظر گرفت و حالت دوم تماس ذره و سطح مینا که تماس دو استوانه می باشد. معادلات جامع دینامیک (معادلات ۷ تا ۱۱) حرکت در ادامه آورده شده است، حل این معادلات امکان شبیه سازی نیروهای دینامیکی را فراهم آورده است.

$$F = \left(\frac{I\ddot{\theta} + M}{H} \right) \sin \theta - ma \sin \theta \cos \theta - F \sin \theta \cos \theta + F \cos \theta + ma \cos \theta + W \sin \gamma \cos \theta \quad (7)$$

$$F = \left(\frac{I\ddot{\gamma} + M}{H} \right) \cos \gamma - F \sin \gamma \cos \gamma - V \sin \theta \cos \gamma \sin \gamma - ma \cos \gamma \sin \gamma - ma \sin \gamma + F \sin \gamma \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{\sin \theta} (F - F - w \sin \gamma - ma) \quad (9)$$

$$W = \frac{1}{\sin \gamma} (F - F - v \sin \theta - ma) \quad (10)$$

$$F_X = ma_x + F_x + V \cos \theta \quad (11)$$

جدول ۱- ضریب سختی برای کانتیلورها با شکل های مختلف

Spring Constants	Cantilever shape		
	Rectangular	V- Shape	Dagger
K_X	$\frac{Etw^3}{4L^3}$	$Et(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \left[\ln \left(\frac{L}{d} \right) \right]^{-1}$	$\frac{\ln(L_1/d)}{Et(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)}$
K_Y	$\frac{Ewt}{L}$	$Ewt \left(\frac{10}{3} L_{top} + 2L_{II} \right)^{-1}$	$Ewt \left(\frac{5}{3} L_I + L_{II} \right)^{-1}$
K_Z	$\frac{Ewt^3}{4L^3}$	$[Z_I + Z_{II} + \theta_{II} \left(\frac{w}{\tan \alpha} - d \right)]^{-1}$	$[Z_I + Z_{II} + \theta_{II} (L_I - d)]^{-1}$
$K_{\theta y}$	$\frac{Ewt^3}{12L}$	$\frac{\left(\frac{Et}{3(1+v)} \right)}{\left[\frac{1}{\tan \alpha} \log \left(\frac{w}{d \tan \alpha} \right) + \frac{L}{w} - \frac{3 \sin 2\alpha}{8} \right]}$	$\frac{1}{\left[\left(\frac{3(1+v)}{Et^3 \tan \alpha} \right) \log \left(\frac{L}{d} \right) + \frac{6L_{II}(1+v)}{Ewt^3} \right]}$
$K_{\theta x}$	$\frac{Ewt^3}{12L}$	$\frac{1}{\theta_1 + \theta_2}$	$\frac{1}{\theta_1 + \theta_2}$

۴- شبیه سازی عملیات هل دادن نانو ذرات در

نرم افزار واقعیت مجازی

با شناسایی ذرات در تصویر گرفته شده از میکروسکوپ نیروی اتمی، کاربر پس از انتخاب ذره هدف و مشاهده آن بر روی محور و انتخاب نوع کانتیلور میکروسکوپ نیروی اتمی، با استفاده از اسلایدهای موجود در برنامه کانتیلور را به سمت ذره هدایت می نماید. کانتیلور میکروسکوپ نیروی اتمی از نظر هندسی به سه شکل مستطیلی، خنجری و ۷ شکل می باشد که با توجه به ضریب سختی طولی، جانبی و پیچشی شرایط مختلفی در حرکت به وجود می آید و تحلیل سینماتیکی و مکانیکی متنوعی را خواهیم داشت. کلیه مراحل بعد با توجه به انتخاب نوع کانتیلور شبیه سازی گشته و نرم افزار نتایج متنوعی را بر حسب شکل هندسی کانتیلور ارائه می دهد. همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، ذره ای که در آستانه حرکت قرار دارد با اعمال اندکی نیرو حرکت می کند. در این شبیه سازی پروب با سرعت ثابت شروع به حرکت و ذره را به مکان مورد نظر انتقال می دهد. [۷].

در نتایج شبیه سازی های ارائه شده مشاهده می گردد که بیشترین نیروی اثر گذار در ابتدا، F_z بوده (بدلیل خمش حول محور Z) که در طول انجام عملیات حرکت ذره تقریباً ثابت می ماند.

در شکل ۷ نمودار نیروها آورده شده است. نیروی F_x ، اصلی ترین نیرو می باشد که تا رسیدن ذره به حد آستانه حرکت افزایش یافته و پس از آن ثابت می ماند. نیروی F_y نیز همزمان با F_x افزایش می یابد، چون این نیرو با خم شدن پروب حول محور Y ایجاد شده است. F_T برآیند نیروها می باشد که در لحظه اول برابر با F_z و پس از آن با افزایش F_x و F_y ، افزایش می یابد.

در معادلات ارایه شده نیروهای خارجی که از محیط به نوک پروب وارد می شوند، شامل F_x, F_y, F_z و نیروهای داخلی شامل $F_x, F_y, F_z, M_{\theta_x}, M_{\theta_y}, W, V$ می باشند. θ زاویه پیچش، γ زاویه خمش و F_T نیروی برآیند می باشد. a_x, a_y, a_z شتاب ها بر اساس معادلات سینماتیک، I ممان اینرسی و m جرم کانتیلور می باشند. در این مقاله کلیه مدهای حرکتی (لغزش، غلتش و چرخش) شبیه سازی شده است [۷، ۸] (معادلات ۱۲ تا ۱۵).

$$F_{Sl1}^* = \frac{\tau_T A_T}{\cos \epsilon + \mu_T \cos \epsilon} \quad \text{Sliding Probe's (12)}$$

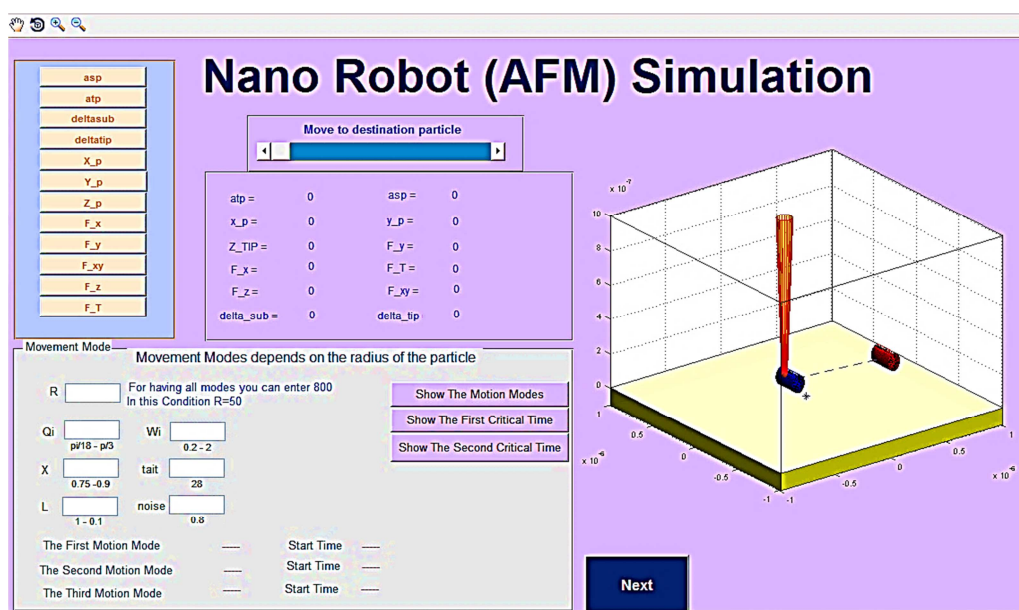
$$F_S^* = \frac{\tau_S A_S}{\sin \psi_1 - \mu_S \cos \psi_1} \quad \text{Sliding (13)}$$

$$F_R^* = \frac{\tau_S A_S + \tau_T A_T}{R_p (\cos \epsilon + \sin \psi_1) - \mu_{rS} \cos \psi_1 + \mu_{rT} \sin \epsilon} \quad \text{Rolling (14)}$$

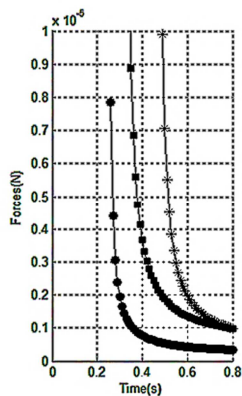
$$F_{SP}^* = \frac{\tau_S A_S + \tau_T A_T}{\sin \psi_1 \left(\frac{2X - L_p}{3} \right) + R \sin \psi_1 \cot \psi_3 - \mu_{rS} \cos \psi_1 + \mu_{rT} \sin \epsilon} \quad \text{Spinning (15)}$$

در معادلات ارایه شده، $F_{Sl1}^*, F_S^*, F_R^*, F_{SP}^*$ و

F_{Sl2}^* تابعی از زاویه بین نیروها ψ ، زاویه تماس پروب و ذره Φ ، پارامترهای تماسی سطح μ و τ ، سطوح تماس A_S و A_T ، شعاع ذره R_p ، طول ذره L_p و محل تماس ذره و پروب X می باشند. زاویه بین نیروهای F_y و F_z بوسیله زاویه ψ_1 نمایش داده شده است، همچنین زاویه بین F_T و f_T بوسیله پارامتر ϵ مشخص شده است. در نهایت با حل همزمان معادلات ارایه شده همانگونه که در الگوریتم نشان داده شده است، نیرو و زمان بحرانی در شبیه سازی بدست آمده است.

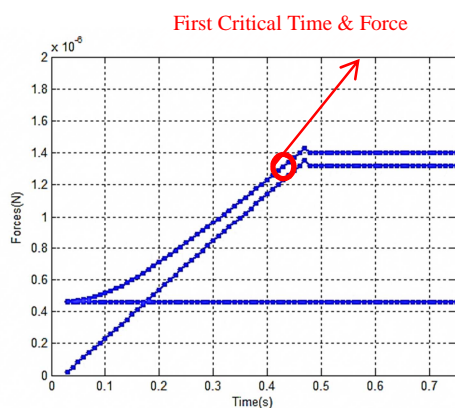


شکل ۶ - شبیه سازی عملیات مینیولیشن نانو ذره استوانه ای



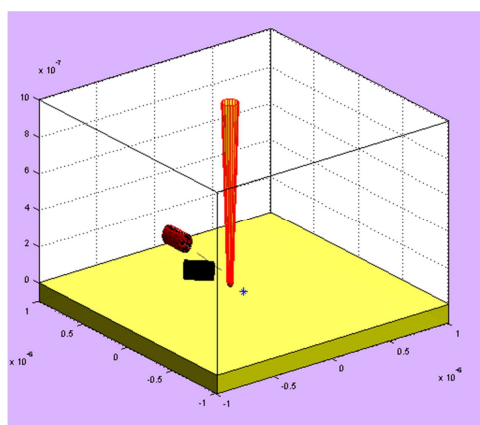
شکل ۸ - ترتیب مدهای حرکتی

در حرکت نانو ذرات استوانه ای می توان دو زمان و نیروی بحرانی تعریف کرد. زمان بحرانی اول به لحظه ای اشاره دارد که با افزایش میزان نیروی وارد شده به ذره از سمت کانتیلور، این نیرو بر نیروهای چسبندگی و اصطکاک غلبه می نماید و جسم شروع به حرکت می کند. به این مقدار نیرو، نیروی بحرانی اول گفته می شود که در شکل ۹ نمودار آن آورده شده است.

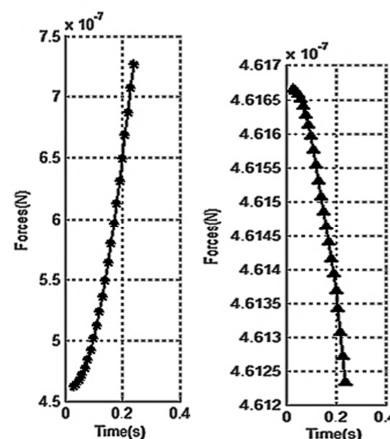
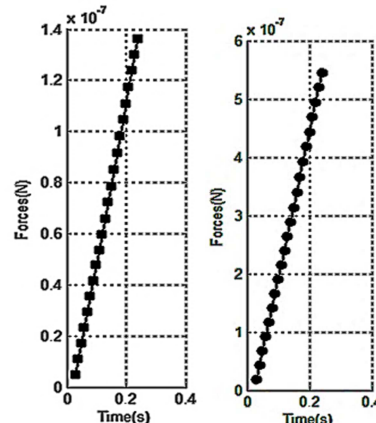


شکل ۹- نیرو و زمان بحرانی اول برای کانتیلور خنجری شکل

پس از لحظه شروع حرکت بسته به محل اعمال نیرو، اگر مد حرکتی چرخشی رخ دهد نانو ذره شروع به چرخش می کند. (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- چرخش ذره و جدا شدن از کانتیلور



شکل ۷- نمودارهای نیرو برای کانتیلور خنجری شکل

در یک نانو ساختار واقعی امکان برخورد پروب کانتیلور به سایر ذرات نانو وجود دارد، که در این صورت ممکن است سایر ذرات آسیب ببینند. جهت جلوگیری از این امر مراحل زیر قبل از مرحله اصلی حرکت به صورت گرافیکی و تحت کنترل کاربر، پروب به اندازه h بالا رفته و پس از نزدیک شدن به ذره تا برخورد به صفحه مبنا پایین می آید و سپس دوباره به اندازه قطر ذره بالا می رود. بسته به محل برخورد نوک پروب به نانو ذره مطابق شکل ۸، چهار مد حرکتی در انتقال نانو ذرات استوانه ای روی یک سطح می تواند رخ دهد: [۸]

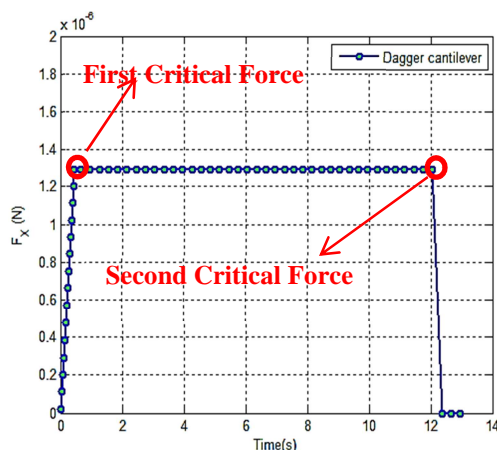
- ۱- مد حرکتی لغزشی که در این حالت لغزش و حرکت مستقیم نانو ذره روی سطح مبنا را خواهیم داشت. در نانو لوله ها با طول کوتاه، امکان رخداد مد حرکتی لغزشی بیشتر از بقیه موارد می باشد.
- ۲- مد حرکتی غلتشی که در این مد حرکتی، غلتش حول محور نانو ذره می باشد و در این حالت نیز حرکت به صورت مستقیم روی سطح مبنا خواهد بود.
- ۳- مد حرکتی چرخشی که در این حالت چرخش حول محور Z بوده و حرکت دورانی روی سطح مبنا اتفاق می افتد. در ذرات با طول زیاد احتمال رخداد مد چرخشی بیشتر می باشد.
- ۴- لغزش نوک پروب بر روی ذره که در این حالت عملیات منیپولیشن انجام نمی شود.

۶- مراجع

- [1] Onal C. D., Sitti M., Teleoperated 3-D force feedback from the nanoscale with an atomic force microscope, *Nanotechnology*, IEEE Transactions on, Vol. 9, No. 1, pp.46-54, 2010.
- [2] Sitti M., Tafazzoli A., Dynamic Modes of Nanoparticle Motion during Nanoprobe-Based Manipulation, *Nanotechnology*, 4th IEEE Conference on, IEEE, pp. 35-37, 2004.
- [3] Onal C. D., Ozcan O., Sitti M., Automated 2-D nanoparticle manipulation with an atomic force microscope, *Robotics and Automation*, ICRA'09. IEEE International Conference on, IEEE, pp. 485-489, 2009.
- [4] Onal C. D., Ozcan O., Sitti M., Automated 2-D nanoparticle manipulation using atomic force microscopy, *Nanotechnology*, IEEE Transactions on, Vol. 10, No. 3, pp. 472-481, 2011.
- [5] Korayem M. H., Mahmoodi Z., Taheri M., Saracee M. B., Three-dimensional modeling and simulation of the AFM-based manipulation of spherical biological micro/nanoparticles with the consideration of contact mechanics theories, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*: 1464419314567551, 2015.
- [6] Hou J., Wu C., Liu L., Wang Z., Modeling and analyzing nano-rod pushing with an AFM, *Nanotechnology* (IEEE-NANO), 2010 10th IEEE Conference on, IEEE, pp. 329-334, 2010.
- [7] Korayem M. H., Hoshiar A., Dynamic 3D modeling and simulation of nanoparticles manipulation using an AFM nanorobot, *Robotica*, Vol. 32, No. 04, pp. 625-641, 2014.
- [8] Korayem M. H., Hoshiar A., Modelling and simulation of dynamic modes in manipulation of nanorods, *Micro & Nano Letters*, IET, Vol. 8, No. 6, pp. 284-287, 2013.
- [9] Gates R. S., Reitsma M., Kramar J. A., Pratt J. R., Atomic force microscope cantilever flexural stiffness calibration: Toward a standard traceable method, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 116, No. 4, pp. 703-727, 2011.
- [10] Sader J. E., Sanelli J. A., Adamson B. D., Monty J. P., Wei X., Crawford S. A., Friend J. R., Marusic I., Mulvaney P., Bieske E. J., Spring constant calibration of atomic force microscope cantilevers of arbitrary shape, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 83, No. 10, 103705, 2012.
- [11] Daeinabi K., Korayem M. H., AYarijani S., Force transducer modeling of rectangular, V-shaped, and dagger cantilever probes based on atomic force microscopy, *Instrumentation Science & Technology*, Vol. 40, No. 4, pp. 338-354, 2012.
- [12] Korayem M. H., Motaghi A., Zakeri M., Dynamic modeling of submerged nanoparticle pushing based on atomic force microscopy in liquid medium, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, No.10, pp. 5009-5019, 2011.
- [13] Korayem M. H., Hoshiar A., Kordi F., Dynamic modeling and simulation of cylindrical nanoparticles in liquid medium, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 1, pp. 197-208, 2014.
- [14] Li G., Xi N., Chen H., Pomeroy C., Prokos M., "Videolized Atomic Force Microscopy for Interactive Nanomanipulation and Nanoassembly", *IEEE Transactions on nanotechnology*, Vol. 4, No. 5, pp. 605-615, 2005.
- [15] Varol A., Gunev I., Basdogan C., A virtual reality toolkit for path planning and manipulation at nano-scale, *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 14th Symposium on, IEEE, pp.485-489, 2006.
- [16] Vogl W., Bernice K. L., Augmented reality user interface for an atomic force microscope-based nanorobotic system, *Nanotechnology*, IEEE Transactions on, Vol. 5, No.4, pp. 397-406, 2006.
- [17] Naebi A., Korayem M. H., Hoseinpour F., Ramadass S., Simulation of routing in nano-manipulation for creating pattern with atomic force microscopy using hybrid GA and PSO-AS algorithms, *Advances in Swarm Intelligence*, Springer, Vol. 6728, pp. 606-615, 2011.
- [18] Korayem M. H., Esmailzadehha S., Virtual reality interface for nano-manipulation based on enhanced images, *The*

در لحظه جدا شدن پروب از ذره همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، زمان بحرانی دوم را خواهیم داشت. [۸].

ایجاد مد حرکتی به γ پارامتر شعاع ذره (R)، طول ذره (L)، زاویه برخورد پروب با ذره (ϕ)، محلی پروب با کانتیلور برخورد می نماید (X)، انرژی سطح (W_i)، نیروی اصطکاک (noise) و نیروی چسبندگی سطح (τ) وابسته می باشد که این موارد نیز در محیط واقعیت مجازی ارائه شده است، تا کاربر بتواند تاثیر پارامترهای مختلف را بر عملیات منیپولیشن تست نماید.



شکل ۱۱- نمودار نیرو و زمان بحرانی دوم برای کانتیلور خنجری شکل

پارامتر شعاع نانو ذره بیشینه اثر را بر روی تعیین مد حرکتی دارا می باشد، بدین ترتیب که احتمال اتفاق مد حرکتی چرخش در ذرات با شعاع بالا بیشتر از ذرات با شعاع کم می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله جهت حل مشکل عدم امکان مشاهده همزمان انتقال نانو ذرات، محیط واقعیت مجازی برای ذرات استوانه ای گسترش یافته است. در ابتدا تصاویر گرفته شده از میکروسکوپ نیروی اتمی با دقت بالا با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه به محیط واقعیت مجازی تبدیل شده است. مراحل انجام عملیات منیپولیشن ذرات با شکل هندسی استوانه ای در محیط هوا به صورت دقیق در محیط حقیقت مجازی شبیه سازی شده است.

در شبیه سازیهای ارائه شده مشاهده می شود که مد حرکتی غالب برای ذرات با شعاع بالا و طول کم (شبه دیسک) مد لغزش می باشد و با افزایش طول ذره و کاهش قطر آن مد حرکتی به چرخش تبدیل شده است.

همچنین محیط واقعیت مجازی ارائه شده امکان شبیه سازی انتقال نانو ذرات با استفاده از کانتیلورهای مستطیلی، V-shape و Dagger را فراهم آورده است. در مجموع محیط واقعیت مجازی ارائه شده، امکان مشاهده و پیش بینی انتقال نانو ذرات برای کلیه حالت های عملی در محیط هوا را فراهم آورده است.

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 63, No. 9, pp. 1153-1166, 2012.
- [19] Korayem A. H., Hoshiar A. K., Ashtiani N. N., Korayem M. H., Using a Virtual Reality Environment to Simulate the Pushing of Cylindrical Nanoparticles, International journal of nanoscience and nanotechnology , Vol. 10 (3), pp. 133-144, 2014.
- [20] Verma O. P., Hanmandlu M., Kumar P., Srivastava S., A novel approach for edge detection using ant colony optimisation and fuzzy derivative technique, Computer and Information Science (ICIS), IEEE/ACIS 9th International Conference on, IEEE, pp. 228-233, 2010.
- [21] Rajeswari R., Rajesh R., A modified ant colony optimization based approach for image edge detection, Image Information Processing (ICIIP), International Conference on, IEEE, pp. 1-6, 2011.
- [22] Saini M.K., Sindhu D., Directional approach and modified self-adaptive ant colony optimization for edge detection, Signal Processing and Communication (ICSC), International Conference on, IEEE, pp. 252-255, 2013.
- [23] Dorigo M., Blum C., Ant colony optimization theory: A survey, Theoretical computer science, Vol. 344, No. 2, pp. 243-278, 2005.
- [24] Tian J., Yu W., Xie S., An ant colony optimization algorithm for image edge detection. Evolutionary Computation, 2008. Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on , IEEE, pp. 751-756, 2008.
- [25] Rezaee A., Extracting edge of images with ant colony, Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, No. 1, pp. 57-59, 2008.
- [26] Yang H., Zhang J., Mathematical Morphology in Edge Detection Application, Journal of Liaoning University (Natural Science Edition), Vol. 32, No. 1, pp. 50-53, 2005.