

استفاده از مدل‌های تماس کروی در مدل‌سازی منیپولیشن سه‌بعدی نانوذرات طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی جهت محاسبه نیرو و زمان بحرانی

معین طاهری*، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

امروزه منیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین ساخت تجهیزات مقیاس میکرو/نانو مورد توجه محققین قرار گرفته است. از آنجاکه این روش نیاز به فرآیندهای دقیق و پیچیده داشته و هزینه‌های بالایی را دربردارد، لذا پیش از انجام هرگونه کار تجربی بایستی به مدل‌سازی دقیق آن پرداخت. مدل‌سازی دقیق فرآیند منیپولیشن سه‌بعدی از چهار بخش عمده شامل سینماتیک، دینامیک، اصطکاک و تماس تشکیل شده است. مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی منیپولیشن سه‌بعدی پیش‌ازاین توسط محققین مختلف بررسی شده است، اما به مدل‌سازی اصطکاک و تماسی توجه کمتری شده است. در این مقاله برای نخستین بار چهار مدل تماسی کروی، شامل مدل‌های هرتز، جی‌کار، دی‌ام‌تی و بی‌سی‌پی جهت نانومنیپولیشن سه‌بعدی توسعه یافته و به کار برده شده‌اند. هدف از کاربرد این مدل‌ها، بررسی اثر آن‌ها بر نیرو و زمان بحرانی در منیپولیشن سه‌بعدی به‌منظور مدل‌سازی دقیق حرکت نانوذره بر روی سطح مبنا می‌باشد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که مدل تماسی هرتز به دلیل صرف‌نظر از نیروهای چسبندگی کم‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی را نشان می‌دهد، همچنین نتایج نشان می‌دهد که غلتش ذرات حول محور X به‌عنوان محتمل‌ترین مد حرکتی، و لغزش در راستای محور X به‌عنوان کم‌احتمال‌ترین مد حرکتی خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: منیپولیشن سه‌بعدی، مدل‌های مختلف تماسی، نانوذرات کروی، نیرو و زمان بحرانی.

Using of Spherical Contact Models in 3D Manipulation Modeling of Au Nanoparticles using Atomic Force Microscopy to Calculate the Critical Force and Time

M. Taheri

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Abstract

Nowadays manipulation by using atomic force microscope is one of the modern methods of construction micro/nano-scale equipment has been of interest to researchers. Because of this method requires detailed and complex processes and involves high costs, before any experimental work should be paid to accurate modeling of this process. The accurate modeling of 3D manipulation process is made of four major parts including the kinematic, dynamic, friction and contact. 3D modeling of static and dynamic manipulation previously has been studied by various researchers, but less attention has been to the frictional and contact modeling. In this paper for the first time, four contact spherical models, including Hertz, JKR, DMT and BCP models for 3D nanomanipulation have been developed and used. The purpose of the application of these models is investigating their effects on critical force and time in 3D manipulation, in order to accurate modeling of motion of nanoparticles on the substrate. The results indicate that, Hertz contact model, because regardless of the adhesion forces, shows the least amount of critical force and time, also the results show that the rolling particles around the x axis is the most likely mode of motion and sliding particle along the x axis is the less likely mode of motion.

Keywords: 3D manipulation, different contact models, spherical nanoparticles, critical force and time.

۱- مقدمه

کوریام و همکارانش [۳] اثر عدم قطعیت در مقیاس ماکرو بر تصویربرداری و منیپولیشن خودکار نانوذرات را بررسی نموده‌اند. شن و همکارانش [۴] اثر رطوبت محیط بر قدرت نیروی چسبندگی تک سلولی مخمردر داخل محیط زیستی را بررسی نموده‌اند. استارک و همکارانش [۵ و ۶] به نانومنیپولیشن ترکیبی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و اشعه‌ی لیزر فرا بنفش جهت تشریح کروموزومی پرداخته و بیان نموده‌اند که نانومنیپولیشن در مقیاس نزدیک و دور از محدوده‌ی وضوح میکروسکوپ نوری، برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی مدرن در تحقیقات بیولوژیکی مورد نیاز است.

اسچاپوهمکارانش [۷] پاسخ الاستیک، کماتش و بی‌ثباتی میکرولوله تحت تورفتگی شعاعی را مطالعه نموده و خواص مکانیکی میکرولوله‌های منفرد را با تورفتگی جانبی توسط نوک یک میکروسکوپ نیروی اتمی آزمایش کرده‌اند. ناران و همکارانش [۸] مدل‌های ریاضی چسبندگی

با توجه به توسعه‌ی روزافزون در دنیای نانو و لزوم ساخت ابزار و تجهیزات مقیاس میکرو/نانو، امروزه روش‌های مختلفی جهت ساخت تجهیزات ریزمقیاس مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از جدیدترین این روش‌ها استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. میکروسکوپ نیروی اتمی در عین حال که دقت بالایی که در ساخت تجهیزات ریزمقیاس دارد، به دلیل مدل‌سازی‌های پیچیده و هزینه‌های نسبتاً بالا، در منیپولیشن، به‌طور محدود مورد استفاده قرار گرفته است، و برای گسترش کاربرد آن در ابتدا نیاز به مدل‌سازی دقیق فرآیند منیپولیشن می‌باشد. برای مدل‌سازی دقیق فرآیند منیپولیشن تلاش‌های گسترده‌ای با استفاده از روش‌های چندمقیاسی صورت پذیرفته است [۱ و ۲].

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mtaheri@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۰۳

سلول‌ها در تومورها را بررسی کرده‌اند. از آن‌جا که چسبندگی سلول‌های جایگزین دارویی به‌عنوان درمان احتمالی برای سرطان مطرح شده‌اند، لذا آن‌ها در تحقیقات شان چسبندگی سلول‌های تومور را با استفاده از سه مدل ریاضیاتی مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. مرادی و همکارانش [۹] به منیپولیشن نانولوله‌ها با استفاده از میکروسکوپ نیروی تماسی پرداخته‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن سه نیروی اساسی و مهم وان در والس، تماسی و اصطکاک به تجزیه و تحلیل هل دادن و منیپولیشن نانو ذرات استوانه‌ای شکل پرداخته و رفتار دینامیکی نانو لوله‌ها را بررسی نموده‌اند.

کورایم و همکارانش [۱۰] به شبیه‌سازی دینامیک مولکولی فرآیند نانومنیپولیشن اتوماتیک پرداخته و اثر آسیب نوک سوزن تیرک بر خطاهای موقعیت‌دهی را بررسی نموده‌اند [۱۱]. کورایم و همکارانش همچنین یک روش چند مقیاسی جدید برای مدل‌سازی سازه یگانه و چندگانه ارائه داده‌اند [۱۲]

وو [۱۳] مدل چسبندگی بین استوانه و نیم فضا را مورد مطالعه قرار داده است. وی به شبیه‌سازی عددی با استفاده از پتانسیل لِنارد-جونز و تقریب در ژاگوبین در مقایسه با مدل ماگیس که بر اساس قانون داگدیل می‌باشد، پرداخته است. ساندرام و همکارانش [۱۴] به بررسی چسبندگی JKR در تماس سطوح استوانه‌ای پرداخته‌اند. آن‌ها با توجه به تماس استوانه‌ای منطبق و با استفاده از مقیاس قوس ترک، یک روش حلقه بسته برای تماس و روابط نیرو و اندازه برای یک شکل چسبندگی سطحی به دست آورده‌اند. لیو و همکارانش [۱۵] نیز به مطالعه بر روی مشخصات تماس با ناهمواری‌های مقیاس نانو با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی پرداخته‌اند.

لیو و همکارانش [۱۶] یک مدل میکروتماسی برای تماس سطوح کروی و استوانه‌ای مبتنی بر فراکتال با یک سطح صلب را توسعه داده‌اند. در مطالعات آن‌ها توابع توزیع اندازه برای محاسبه نیروی تماس و سطح تماس واقعی با سه رژیم تغییر شکل استخراج شده‌ی میکروتماسی به کار گرفته شده است. تابع چگالی احتمال غیر گاوسی برای دو فرم تماس (استوانه‌ای و کروی) با ترکیب توابع چگالی احتمال توسعه داده شده برای همه‌ی المان‌های کوچک در سطح تماس با روش برهم‌نهی توسعه یافته است. در مدل حاضر، رفتار تغییر شکل نشان داده شده در الاستیک، الاستو پلاستیک و پلاستیک کامل بیان شده که مطابق با نظریه‌ی کلاسیک (آماری) می‌باشد.

در زمینه‌ی مدل‌سازی منیپولیشن دو بعدی نیز کارهای مختلفی توسط محققین صورت گرفته است. سیتی و همکارانش [۱۷] با ز خورد لمسی تله اپراتور باز سطوح در مقیاس نانو را مدل‌سازی و آزمایش کرده‌اند.

کورایم و طاهری [۱۸] به بررسی و توسعه‌ی مدل‌های تماسی مختلف جهت کاربرد در منیپولیشن دوبعدی ذرات زیستی پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین [۱۹] با در نظر گرفتن شکل استوانه‌ای یخ‌خورده برای ذرات هدف، نیرو و زمان منیپولیشن دوبعدی را جهت ذرات بیولوژیکی محاسبه نموده‌اند. کورایم و همکارانش [۲۰] همچنین به شبیه‌سازی تماس باکتری‌های نرم جهت کاربرد در منیپولیشن پرداخته‌اند.

اما به منظور مدل‌سازی دقیق و ایجاد شرایط واقعی نیاز به گسترش مدل‌سازی منیپولیشن در سه بعد می‌باشد. مدل‌سازی دقیق فرآیند منیپولیشن سه‌بعدی از چهار بخش عمده شامل مدل سینماتیکی، مدل دینامیکی، مدل اصطکاک و مدل تماسی تشکیل شده است. در زمینه‌ی

مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی پیش از این کارهای محدودی صورت پذیرفته است. کورایم و همکارانش [۲۱] مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی منیپولیشن سه بعدی را توسعه داده‌اند. طاهری [۲۲] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی منیپولیشن ذرات کروی با استفاده از مدل تماسی جی‌کآر پرداخته است. طاهری [۲۳] همچنین به استفاده از مدل اصطکاک‌ی‌اچ‌کا در منیپولیشن سه‌بعدی نانوذرات طلا در محیط هوا پرداخته است.

هدف از این مقاله توسعه‌ی بخش چهارم مدل کلی منیپولیشن سه‌بعدی، یعنی بخش مدل‌های تماسی می‌باشد. در تمامی کارهای قبلی مدل تماسی استفاده شده، مدل تماسی ساده شده‌ی JKR می‌باشد. لذا، در این مقاله برای نخستین بار با در نظر گرفتن ذرات کروی طلا، چهار مدل تماسی کروی، شامل مدل‌های هرتز JKR، DMT و BCP جهت کاربرد در نانومنیپولیشن سه‌بعدی توسعه یافته و به کار برده شده‌اند. هدف از کاربرد این مدل‌ها، بررسی اثر آن‌ها بر نیرو و زمان بحرانی در منیپولیشن سه‌بعدی به منظور مدل‌سازی دقیق حرکت نانو ذره بر روی سطح مینا می‌باشد.

۲- مدل‌سازی

گام اصلی و اولیه در منیپولیشن میکرو/نانوذرات، شناسایی نظریه تماسی مختلف و به‌کارگیری سازگارترین نظریه جهت مدل‌سازی دینامیکی ذرات می‌باشد.

در این بخش از مقاله ابتدا به بررسی و توسعه‌ی مدل‌های تماسی کره/کره شامل مدل‌های هرتز JKR، DMT و BCP جهت کاربرد در تماس بین نانو ذره کروی و نوک کروی سوزن تیرک پرداخته شده است. سپس به توسعه‌ی مدل‌های تماسی کره/صفحه شامل مدل‌های هرتز JKR، DMT و BCP جهت کاربرد در تماس بین نانو ذره کروی و سطح صاف صفحه‌ی مینا پرداخته شده است. در انتهای بخش مدل‌سازی نیز الگوریتم کلی منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل‌های تماسی توسعه یافته با ذکر جزئیات، توضیح داده شده است.

۲-۱- بررسی مدل‌های تماسی بین نانوذره‌ی کروی و نوک

کروی سوزن تیرک

در این بخش چهار مدل تماسی کره/کره بین نانوذره و نوک سوزن مدل‌سازی شده است.

۲-۱-۱- مدل تماسی هرتز

کارا ولیه در زمینه‌ی مکانیک تماس به هر تزن نسبت داده می‌شود [۲۴]. طبق رابطه‌ی (۱) نیروی چسبندگی در این مدل در نظر گرفته نمی‌شود. روابط بین شعاع تماس و نیروی بارگذاری و عمق نفوذ و شعاع تماس، در این مدل به ترتیب به صورت روابط (۲) و (۳) است.

$$F_{(adh)Hertz} = 0 \quad (1)$$

$$a_{Hertz} = \left(\frac{RF}{K} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$\delta_{Hertz} = \frac{a_{Hertz}^2}{R} \quad (3)$$

با توسعه‌ی روابط هرتز، و افزودن نیروهای بین مولکولی شامل الکترواستاتیکی (F_{el})، استریک (F_{steric}) و آب‌پوشی (F_{Hyd})،

$$F_{(adh)DMT} = 2\pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL}) \frac{(R_p + R_t)}{R_p \times R_t} \quad (15)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{(R_p \times R_t)}{(R_p + R_t)K} [(F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Z \cos \varphi + (F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Y \sin \varphi + 2\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} (\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL})] \right]^{1/3}$$

$$(\delta_{DMT}) = \frac{a_{DMT}^2 (R_p + R_t)}{R_p \times R_t} \quad (17)$$

۲-۱-۴- مدل تماسی BCP

این مدل تماسی یک مدل نیمه تجربی است که به دلیل این که مدل های هرتز، JKR و DMT تطابق خوبی با نتایج تجربی نداشته، به وجود آمده است. در نظریه هرتز نیروهای سطحی در نظر گرفته نشده است، نظریه DMT یک گسست شدید در شیب تماسی را پیش بینی می کند و در نظریه JKR پیش بینی هیچ نیروی جاذبه ای قبل از تماس را ندارد. در حالی که در آزمایشات تجربی، نیروهای جاذبه ای دور برد قبل از تماس مشاهده شده، و پس از آن یک انتقال تدریجی بین دامنه های مثبت و منفی در منحنی های نیرویی رخ می دهد [۲۷]. مدل BCP نماینده رفتار ترکیبات بسیاری از مواد سوزن-نمونه می باشد. معادلات مدل نیمه تجربی BCP عبارتند از:

$$F_{(adh)BCP} = \left(\frac{3\pi\omega Ka_{BCP}^3}{2} \right)^{1/2} + \pi\omega\bar{R} \quad (18)$$

$$a_{BCP} = \frac{\bar{R}}{K} \left[F + \frac{7}{4}\pi\omega\bar{R} + \left(\frac{33}{16}(\pi\omega\bar{R})^2 + \frac{3}{2}(\pi\omega\bar{R}F) \right)^{1/2} \right]^{1/3} \quad (19)$$

$$\delta_{BCP} = \frac{a_{BCP}^2}{\bar{R}} - \left(\frac{\pi^2\omega^2\bar{R}}{K^2} \right)^{1/3} \quad (20)$$

با توسعه روابط BCP، برای تماس کره/کره، جهت منیپولیشن سه بعدی داریم:

$$F_{(adh)BCP} = \left(\frac{3\pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL})Ka_{BCP}^3}{2} \right)^{1/2} + \pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL}) \left(\frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \right) \quad (21)$$

$$a_{BCP} = \frac{R_p \times R_t}{K(R_p + R_t)} \left[\frac{F + \frac{7}{4}\pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL}) \left(\frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \right) + \frac{33}{16} \left(\pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL}) \left(\frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \right) \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL}) \left(\frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \right) (P_Z \cos \varphi + P_Y \sin \varphi) \right)}{2} \right]^{1/2} \quad (22)$$

$$\delta_{BCP} = \frac{a_{BCP}^2 (R_p + R_t)}{R_p \times R_t} - \left(\frac{\pi^2 (\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL})^2 (R_p \times R_t)}{K^2 (R_p + R_t)} \right)^{1/3} \quad (23)$$

به دلیل تأثیر زیاد آن ها در مقایسه با سایر نیروهای بین مولکولی، بین نوک کره سوزن و نانوذره ی کره، جهت منیپولیشن سه بعدی خواهیم داشت:

$$a_{Hertz} = \left(\frac{(R_p \times R_t) [(F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Z \cos \varphi + (F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Y \sin \varphi]}{(R_p + R_t)K} \right)^{1/3} \quad (4)$$

$$\delta_{Hertz} = \frac{a_{Hertz}^2 (R_p + R_t)}{R_p \times R_t} \quad (5)$$

۲-۱-۲- مدل تماسی JKR

با افزودن چسبندگی به مدل هرتز، مدل های پیشرفته تر مکانیک تماس به دست می آیند. اولین مدل ارائه شده، مدل JKR است [۲۵]. نظریه JKR به شکل روابط (۶) تا (۸) بیان می شود.

$$F_{(adh)JKR} = \left(6\pi\omega Ka_{JKR}^3 \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{\bar{R}}{K} [F + 3\pi\bar{R}\omega + (6\pi\bar{R}\omega F + (3\pi\bar{R}\omega)^2)^{1/2}] \right]^{1/3} \quad (7)$$

$$\delta_{JKR} = \frac{a_{JKR}^2}{\bar{R}} - \sqrt{\frac{8\pi\omega a_{JKR}}{3K}} \quad (8)$$

با توسعه روابط JKR، برای تماس کره/کره، جهت منیپولیشن سه بعدی داریم:

$$F_{(adh)JKR} = \left(6\pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL})Ka_{JKR}^3 \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{(R_p \times R_t)}{(R_p + R_t)K} \left[\frac{(F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Z \cos \varphi + (F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Y \sin \varphi + 3\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} (\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL}) + 6\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} (\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL})}{(F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Z \cos \varphi + (F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd})_Y \sin \varphi + 3\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} (\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL})} \right] \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\delta_{JKR} = \frac{a_{JKR}^2 (R_p + R_t)}{R_p \times R_t} - \sqrt{\frac{8\pi(\omega_{ip} + \omega_{LL} - \omega_{iL} - \omega_{pL})a_{JKR}}{3K}} \quad (11)$$

۲-۱-۳- مدل تماسی DMT

این نظریه بر پایه ی مدلی است که توسط درژاگوین، مولر و توپوروف^۱ ارائه شده است [۲۶]. معادلات نیروی چسبندگی و سطح تماس این نظریه به شکل روابط (۱۲) تا (۱۴) است.

$$F_{(adh)DMT} = 2\pi\omega\bar{R} \quad (12)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{\bar{R}(F + 2\pi\omega\bar{R})}{K} \right]^{1/3} \quad (13)$$

$$\delta_{DMT} = \frac{a_{DMT}^2}{\bar{R}} \quad (14)$$

با توسعه روابط DMT، بین نوک کره سوزن و نانوذره ی کره، جهت منیپولیشن سه بعدی خواهیم داشت:

¹Derjaguin-Muller-Toporov

۲-۲-۲- بررسی مدل‌های تماسی بین نانوذره‌ی کروی و سطح

صاف صفحه‌ی مبنا

در این بخش چهار مدل تماسی کره/صفحه بین نانوذره و صفحه‌ی مبنا مدل‌سازی شده است.

۲-۲-۲-۱- مدل تماسی هرتز

با توسعه‌ی روابط هرتز، که از نیروی چسبندگی در آن صرف‌نظر می‌شود، بین نانوذره‌ی کروی و سطح صاف صفحه‌ی مبنا، جهت منیپولیشن سه‌بعدی خواهیم داشت:

$$a_{Hertz} = \left(\frac{R_p (F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd}) Z}{K} \right)^{1/3} \quad (24)$$

$$\delta_{Hertz} = \frac{a_{Hertz}^2}{R_p} \quad (25)$$

۲-۲-۲-۲- مدل تماسی JKR

با افزودن چسبندگی و توسعه‌ی روابط جی‌کآر، برای تماس کره/صفحه، جهت منیپولیشن سه‌بعدی داریم:

$$F_{(adh)JKR} = \left(6\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) K a_{JKR}^3 \right)^{1/2} \quad (26)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{R_p}{K} [(F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd}) Z + 3\pi R_p (\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) + [6\pi R_p (\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) (F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd}) Z + (3\pi R_p (\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}))^2]^{1/2}] \right]^{1/3} \quad (27)$$

$$\delta_{JKR} = \frac{a_{JKR}^2}{R_p} - \sqrt{\frac{8\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) a_{JKR}}{3K}} \quad (28)$$

۲-۲-۲-۳- مدل تماسی DMT

با توسعه‌ی روابط دی‌ام‌تی، بین نوک کروی سوزن و نانوذره‌ی کروی، جهت منیپولیشن سه‌بعدی خواهیم داشت:

$$F_{(adh)DMT} = 2\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) R_p \quad (29)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{R_p}{K} [(F_1 + F_{el} + F_{steric} + F_{Hyd}) Z + 2\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) R_p] \right]^{1/3} \quad (30)$$

$$\delta_{DMT} = \frac{a_{DMT}^2}{R_p} \quad (31)$$

۲-۲-۲-۴- مدل تماسی BCP

با توسعه‌ی روابط بی‌سی‌پی، برای تماس کره/کره، جهت منیپولیشن سه‌بعدی داریم:

$$F_{(adh)BCP} = \left(\frac{3\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) K a_{BCP}^3}{2} \right)^{1/2} + \pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) R_p \quad (32)$$

$$a_{BCP} = \frac{R_p}{K} \left[\frac{P_Z + \frac{7}{4}\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) R_p + \left(\frac{33}{16}(\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) R_p)^2 + \frac{3}{2}(\pi(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL}) R_p P_Z) \right)^{1/2}} \right]^{1/3} \quad (33)$$

$$\delta_{BCP} = \frac{a_{BCP}^2}{R_p} - \left(\frac{\pi^2(\omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL})^2 R_p}{K^2} \right)^{1/3} \quad (34)$$

۳-۲- الگوریتم کلی نانومنیپولیشن سه‌بعدی

شکل ۱ الگوریتم کلی منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل‌های مختلف تماسی را نشان می‌دهد.

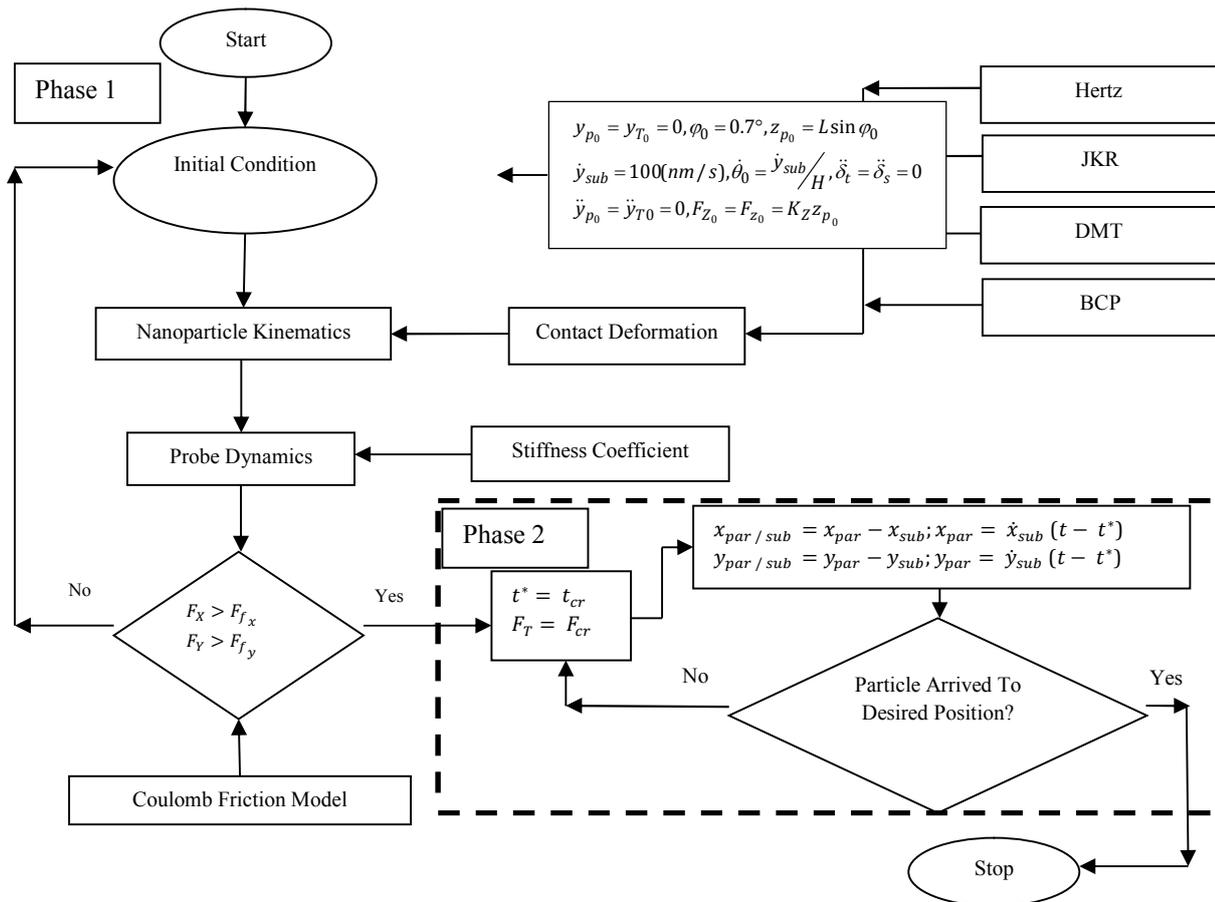
در فاز نخست منیپولیشن پس از بررسی شرایط اولیه، سینماتیک نانوذره با توجه به مدل‌های تماسی توسعه یافته در این مقاله استخراج شده است. سپس با توجه به نوع تیرک، که در این مقاله تیرک مستطیلی در نظر گرفته شده است، معادلات دینامیکی منیپولیشن سه‌بعدی با توجه به مراجع [۲۱ و ۲۲] استخراج شده است. سپس با توجه به مرجع [۲۳] مدل‌سازی اصطکاکی منیپولیشن سه‌بعدی صورت گرفته، که در این مقاله از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است.

پس از آن با مقایسه‌ی نیروهای وارده از طرف تیرک به ذره و نیروی اصطکاکی بین ذره و صفحه‌ی مبنا، در لحظه‌ی غلبه‌ی نیروهای وارده از طرف تیرک بر نیروی اصطکاکی، نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن به دست آمده است.

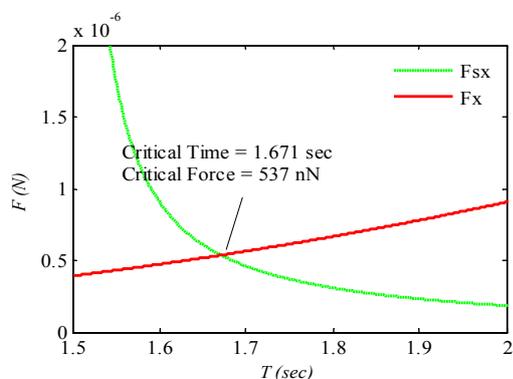
پس از رسیدن به زمان بحرانی، وارد فاز دوم منیپولیشن شده که در آن ذره از صفحه‌ی مبنا جدا شده و با داشتن زمان بحرانی می‌توان مکان دقیق ذره را در هر لحظه با توجه به مدل سه‌بعدی توسعه یافته، به دست آورده و ذره را به مکان مورد نظر هدایت نمود.

۳- شبیه‌سازی نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل‌های تماسی مختلف

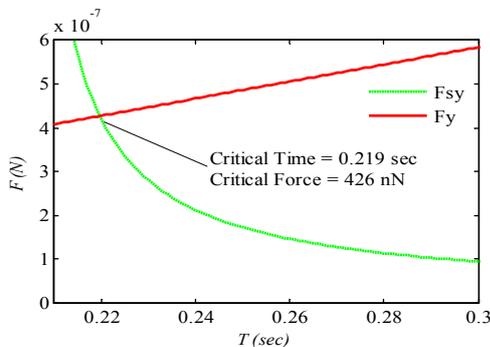
در این بخش به شبیه‌سازی منیپولیشن سه‌بعدی نانوذره طلا با استفاده از مدل‌های مختلف تماس کروی و محاسبه‌ی نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن پرداخته شده است. اهمیت محاسبه‌ی دقیق نیروی بحرانی منیپولیشن به جهت بررسی عدم آسیب رسیدن به میکرونانوذرات هدف می‌باشد، زیرا در صورت افزایش بیش از حد نیروی بحرانی، میکرونانوذره هدف، به‌ویژه در ذرات بیولوژیکی، دچار آسیب جدی خواهد شد. همچنین اهمیت محاسبه‌ی دقیق زمان بحرانی منیپولیشن به جهت جابه‌جایی دقیق میکرونانوذرات هدف می‌باشد، زیرا تا قبل از رسیدن به زمان بحرانی منیپولیشن، میکرونانوذرات هدف به سطح صفحه‌ی مبنا چسبیده و هیچ‌گونه حرکتی نداشته و جابه‌جایی ذره پس از زمان بحرانی رخ خواهد داد، لذا جهت رسیدن ذره به مکان دقیق



شکل ۱- الگوریتم کلی منیپولیشن سه بعدی با استفاده از مدل های تماسی مختلف



(الف) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X با استفاده از مدل هرتز

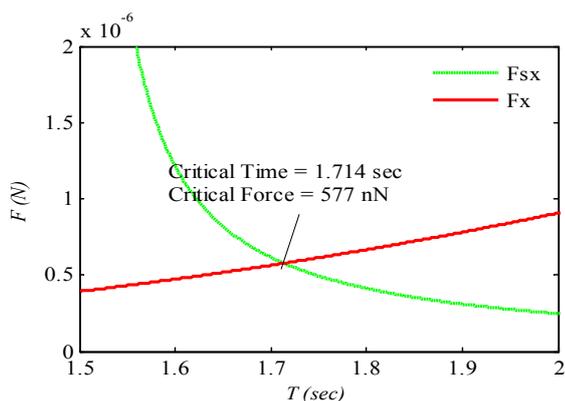


(ب) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y با استفاده از مدل هرتز

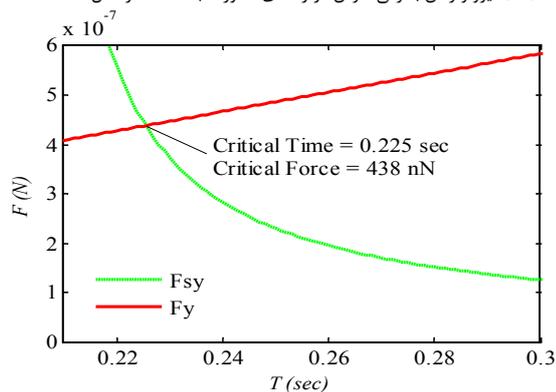
مورد نظر بر روی صفحه‌ی مبنا نیاز به محاسبه‌ی دقیق زمان بحرانی بوده و در صورت دقیق نبودن زمان بحرانی محاسبه شده، میکرو/نانوذرات هدف به نقطه‌ی مورد نظر نرسیده و یا از آن عبور خواهند نمود.

۱-۳- مدل تماسی هرتز

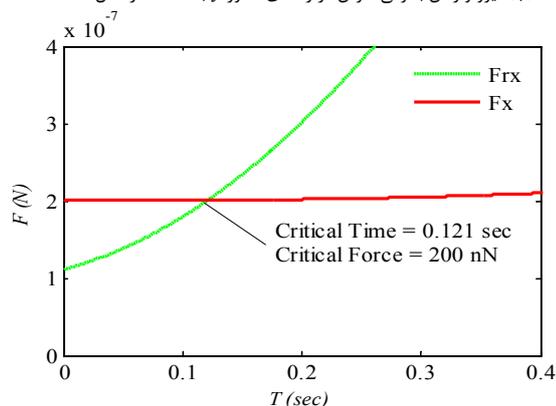
در شکل ۲ نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن نانوذره‌ی طلا با استفاده از مدل هرتز نشان داده شده است. شکل ۲-الف نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۵۳۷ نانونیوتن و ۱/۶۷۱ ثانیه است. شکل ۲-ب نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۴۲۶ نانونیوتن و ۰/۲۱۹ ثانیه است. شکل ۲-ج نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور X را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۲۰۲ نانونیوتن و ۰/۲۰۶ ثانیه است. شکل ۲-د نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور Y را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۳۶۶ نانونیوتن و ۰/۱۷۳ ثانیه است. براساس دینامیک سیستم و با توجه به جهت اعمال نیروی وارده از طرف نوک سوزن بر ذره، زمان بحرانی لغزش در راستای X بیشتر از لغزش در راستای Y می‌باشد.



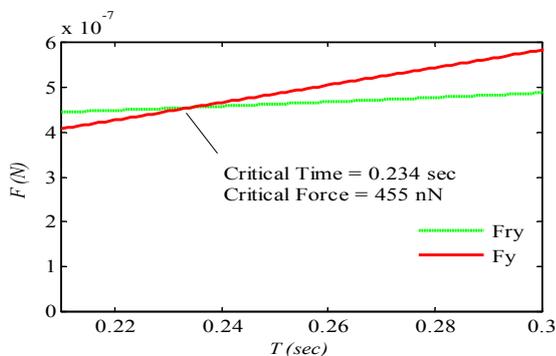
(الف) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X با استفاده از مدل JKR



(ب) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y با استفاده از مدل JKR



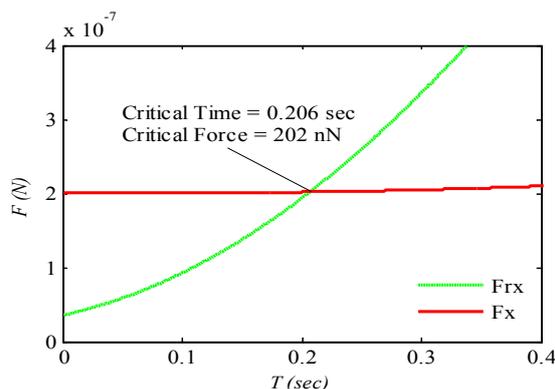
(ج) نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور X با استفاده از مدل JKR



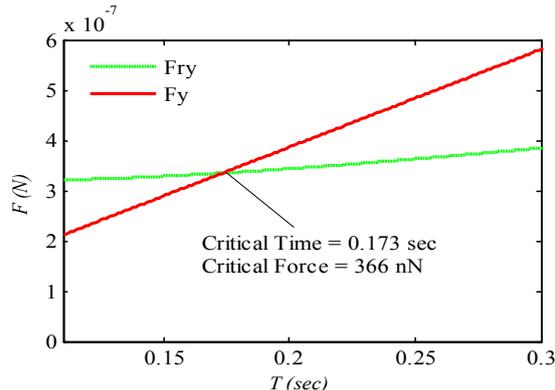
(د) نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور Y با استفاده از مدل JKR

شکل ۳-نیرو و زمان بحرانی مینیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از

مدل JKR



(ج) نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور X با استفاده از مدل هرترز



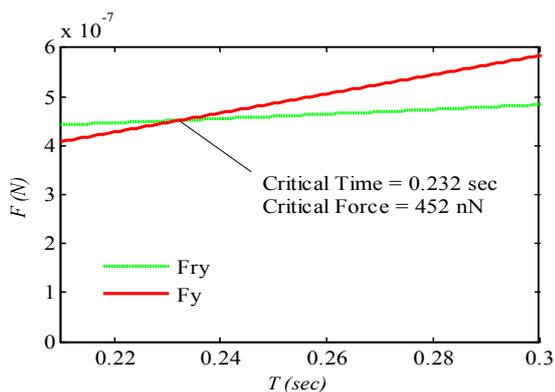
(د) نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور Y با استفاده از مدل هرترز

شکل ۲-نیرو و زمان بحرانی مینیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل هرترز

۳-۲- مدل تماسی جی‌کآر

شکل ۳ نیرو و زمان بحرانی مینیپولیشن، که برای یک سیستم یکسان استخراج شده، جهت نانوذرهای طلا با استفاده از مدل جی‌کآر را نشان می‌دهد. به دلیل تفاوت در مدل JKR و در نظر گرفتن چسبندگی در این مدل، نتایج شکل ۲ با شکل ۳ متفاوت می‌باشد.

در شکل ۳-الف نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X به ترتیب برابر با ۵۷۷ نانونیوتن و ۱،۷۱۴ ثانیه است. در شکل ۳-ب نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y به ترتیب برابر با ۴۳۸ نانونیوتن و ۰،۲۲۵ ثانیه است. در شکل ۳-ج نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور X به ترتیب برابر با ۲۰۰ نانونیوتن و ۰،۱۲۱ ثانیه است. و در شکل ۳-د نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور Y به ترتیب برابر با ۴۵۵ نانونیوتن و ۰،۲۳۴ ثانیه است. در این مدل نیز با توجه به جهت اعمال نیروی وارده از طرف نوک سوزن بر ذره، زمان بحرانی لغزش در راستای X بیشتر از لغزش در راستای Y می‌باشد.

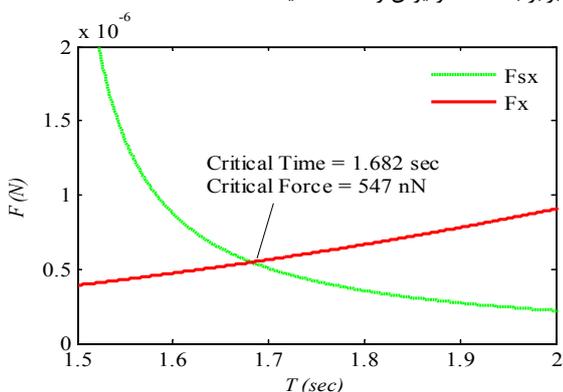


(د) نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور Y با استفاده از مدل DMT
شکل ۴-۳ نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن سه بعدی با استفاده از مدل DMT

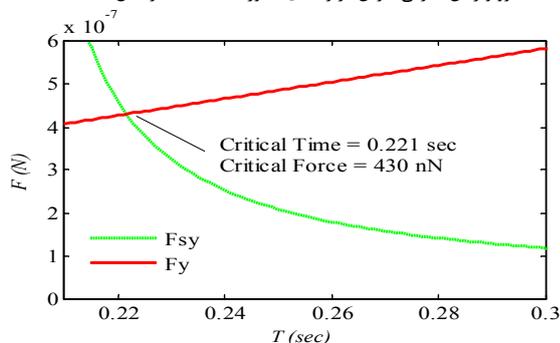
DMT

۴-۳- مدل تماسی بی سی بی

شکل ۵ نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن نانوذره‌ی طلا با استفاده از مدل BCP را نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X به ترتیب برابر با ۵۴۷ نانونیوتن و ۱/۶۸۲ ثانیه است. در شکل ۵-ب نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y به ترتیب برابر با ۴۳۰ نانونیوتن و ۰/۲۲۱ ثانیه است. در شکل ۵-ج نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور X به ترتیب برابر با ۲۱۸ نانونیوتن و ۰/۵۰۸ ثانیه است. و در شکل ۵-د نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور Y به ترتیب برابر با ۴۹۶ نانونیوتن و ۰/۲۳۱ ثانیه است.



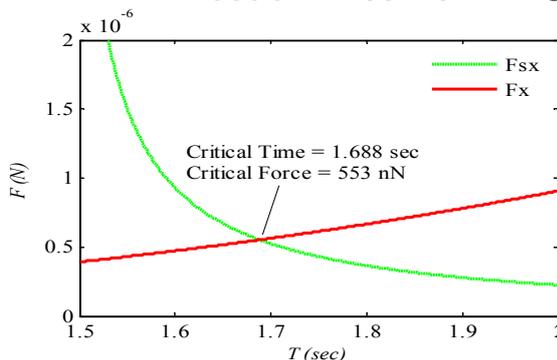
(الف) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X با استفاده از مدل BCP



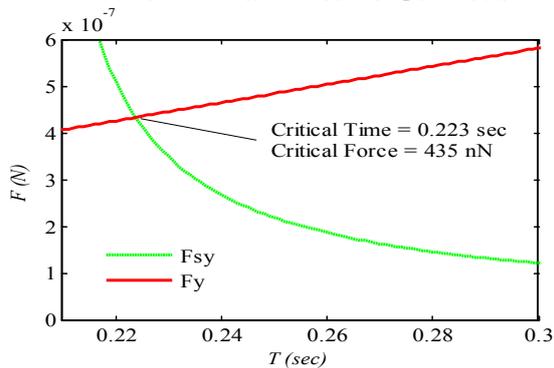
(ب) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y با استفاده از مدل BCP

۳-۳- مدل تماسی DMT

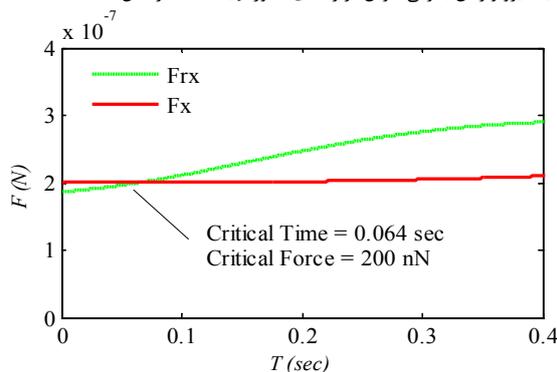
در شکل ۴ نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن نانوذره‌ی طلا با استفاده از مدل تماسی DMT نشان داده شده است. شکل ۴-الف نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۵۵۳ نانونیوتن و ۱/۶۸۸ ثانیه است. شکل ۴-ب نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۴۳۵ نانونیوتن و ۰/۲۲۳ ثانیه است. شکل ۴-ج نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور X را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۲۰۰ نانونیوتن و ۰/۰۶۴ ثانیه است. شکل ۴-د نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور Y را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۴۵۲ نانونیوتن و ۰/۲۳۲ ثانیه است.



(الف) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X با استفاده از مدل DMT



(ب) نیرو و زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y با استفاده از مدل DMT



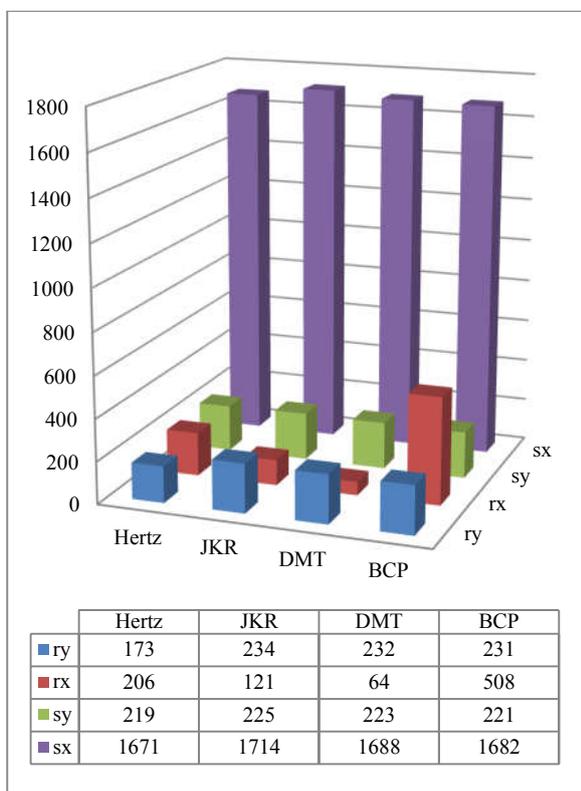
(ج) نیرو و زمان بحرانی غلتش حول محور X با استفاده از مدل DMT

شکل ۶-ب نیز مقایسه‌ای کلی بین نیروی بحرانی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، نیروی بحرانی نیز همانند زمان بحرانی، در مدل تماسی هرتز، به دلیل صرف‌نظر از نیروی چسبندگی، دارای کمترین مقدار در بین مدل‌های مختلف تماسی می‌باشد. همچنین با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد که بیشترین نیروی بحرانی در بین مدهای مختلف حرکتی مربوط به لغزش در راستای محور X می‌باشد.

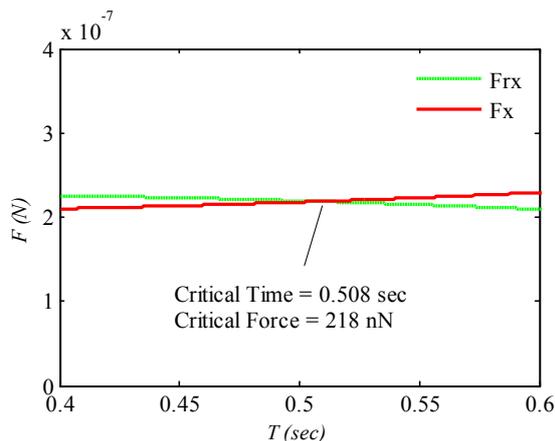
مقایسه‌ی کلی نتایج به دست آمده در این مقاله با کارهای گذشته [۲۱-۲۳] نشان‌دهنده‌ی تطابق کیفی نتایج بوده و بر صحت شبیه‌سازی‌های صورت گرفته دلالت دارد.

در ادامه این مقاله و در کارهای آتی می‌توان به بررسی سایر هندسه‌های موجود برای میکرو/نانوذرات هدف پرداخته و تأثیر هندسه بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن را بررسی نمود.

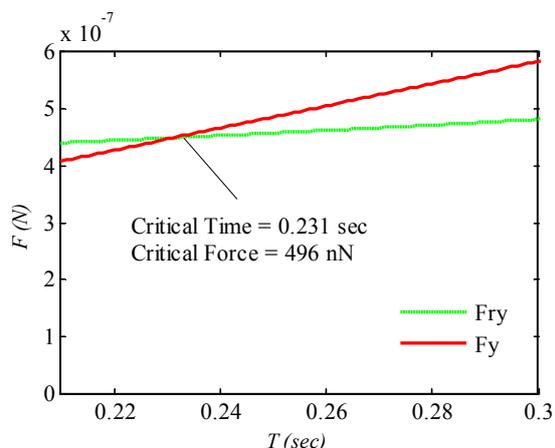
در ادامه این مقاله و در کارهای آتی می‌توان به بررسی سایر هندسه‌های موجود برای میکرو/نانوذرات هدف پرداخته و تأثیر هندسه بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن را بررسی نمود.



الف) زمان بحرانی



ج) نیرو و زمان بحرانی غلغش حول محور X با استفاده از مدل BCP



د) نیرو و زمان بحرانی غلغش حول محور Y با استفاده از مدل BCP

شکل ۵- نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل BCP

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله برای نخستین بار چهار مدل تماسی هرتز، JKR، DMT و BCP در نانومنیپولیشن سه‌بعدی به منظور افزایش دقت مدل کلی منیپولیشن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بدین‌منظور چهار مدل لغزشی در راستای محورهای X و Y و غلغش حول محورهای X و Y به‌عنوان مدهای حرکتی در فاز اول منیپولیشن مورد توجه قرار گرفته و نیرو و زمان بحرانی برای این چهار مدل حرکتی با استفاده از چهار مدل توسعه یافته به دست آمده است.

شکل ۶ مقایسه‌ی کلی بین نتایج نیرو و زمان بحرانی در مدهای مختلف حرکتی با استفاده از چهار مدل تماسی را نشان می‌دهد.

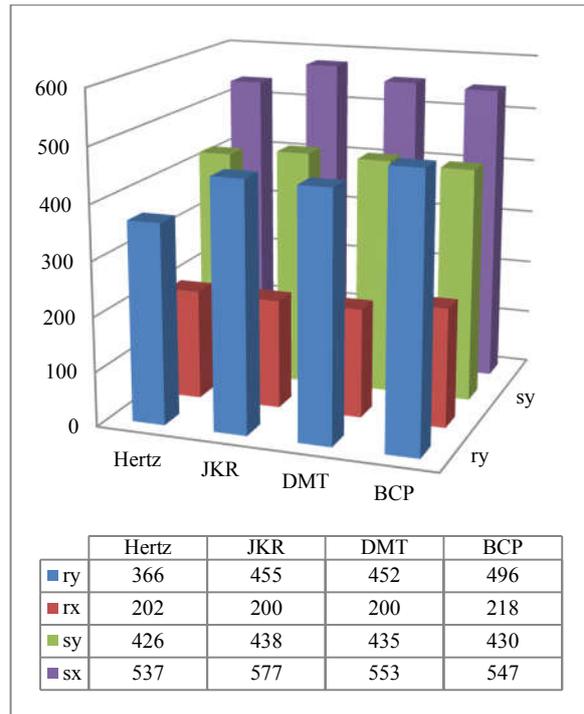
در شکل ۶-الف مشاهده می‌گردد که در بین چهار مدل تماسی توسعه یافته، مدل هرتز برای اکثر مدهای مختلف حرکتی کم‌ترین زمان بحرانی را دارد، که دلیل اصلی این امر این است که در مدل هرتز، نیروی چسبندگی که یکی از نیروهای مقاوم در برابر حرکت است، برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین نتایج این شکل نشان می‌دهد که در بین چهار مدل حرکتی مورد بررسی، لغزش ذره در راستای محور X دارای بیشترین زمان بحرانی بوده و به‌عنوان آخرین مدل حرکتی در نظر گرفته خواهد شد.

نیروی چسبندگی در مدل DMT $F_{(adh)DMT}$
 نیروی چسبندگی در مدل هرتز $F_{(adh)Hertz}$
 نیروی چسبندگی در مدل JKR $F_{(adh)JKR}$
 نیروی بحرانی F_{cr}
 نیروی الکترواستاتیک F_{el}
 نیروی اصطکاکی در راستای محور X F_{f_x}
 نیروی اصطکاکی در راستای محور Y F_{f_y}
 نیروی آب پوشی F_{Hyd}
 نیروی استریک F_{steric}
 نیرو در راستای محور X F_X
 نیرو در راستای محور Y F_Y
 مدول الاستیسیته مؤثر K

شعاع معادل \bar{R}
 شعاع ذره R_p
 شعاع نوک سوزن R_t
 زمان بحرانی t_{cr}
 موقعیت ذره در راستای محور X x_{par}
 موقعیت صفحه‌ی مبنا در راستای محور X x_{sub}
 سرعت صفحه‌ی مبنا در راستای محور X \dot{x}_{sub}
 موقعیت ذره در راستای محور Y y_{par}
 موقعیت صفحه‌ی مبنا در راستای محور Y y_{sub}
 سرعت صفحه‌ی مبنا در راستای محور Y \dot{y}_{sub}
 عمق نفوذ در مدل BCP δ_{BCP}
 عمق نفوذ در مدل DMT δ_{DMT}
 عمق نفوذ در مدل هرتز δ_{Hertz}
 عمق نفوذ در مدل JKR δ_{JKR}
 ضریب چسبندگی ω
 ضریب چسبندگی محیط ω_{LL}
 ضریب چسبندگی بین ذره و محیط ω_{pL}
 ضریب چسبندگی بین صفحه‌ی مبنا و محیط ω_{sL}
 ضریب چسبندگی صفحه‌ی مبنا و ذره ω_{sp}
 ضریب چسبندگی بین سوزن و محیط ω_{tL}
 ضریب چسبندگی سوزن و ذره ω_{tp}

۶- مراجع

[1] Korayem M. H., Sadeghzadeh S., Rahneshtin V., Homayooni A., and Safa M., Precise manipulation of metallic nanoparticles: Multiscale analysis, *Computational Materials Science*, Vol. 67, pp. 11-20, 2013.
 [2] Korayem M. H., Sadeghzadeh S., and Homayooni A., Coupled dynamics of piezo-tube and microcantilever in scanning probe devices and sensitive samples imaging, *JET Micro & Nano Letters*, Vol. 7, No. 9, pp.986-990, 2012.
 [3] Korayem M. H., Sadeghzadeh S., and Homayooni A., Effects of macro-scale uncertainties on the imaging and automatic manipulation of nanoparticles. *Journal of nanoparticle research*, Vol. 15, No. 1, pp.1-17, 2013.
 [4] Shen Y., Nakajima M., Ahmad M. R., Kojima S., Homma M., and Fukuda T., Effect of ambient humidity on the strength of the adhesion force of single yeast cell inside environmental-SEM,



شکل ۶- نتایج زمان و نیروی بحرانی منیپولیشن با استفاده از مدل‌های تماسی مختلف (ب) نیروی بحرانی

نتایج به دست آمده در این مقاله را می‌توان به صورت کلی در موارد زیر جمع‌بندی نمود.

- با توجه به اهمیت مدل‌های تماسی در منیپولیشن سه‌بعدی، نیاز به بررسی مدل‌های مختلف تماسی و تأثیر آن‌ها در نیرو و زمان بحرانی امری ضروری می‌باشد.
- در بین مدل‌های تماسی مورد بررسی، مدل تماسی هرتز به دلیل صرف‌نظر از نیروهای چسبندگی کم‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن سه‌بعدی را نشان می‌دهد.
- در بین چهار مدل حرکتی مورد بررسی، حرکت در راستای محور X دارای بیشترین مقدار نیرو و زمان بحرانی بوده و لذا در منیپولیشن سه‌بعدی، به‌عنوان آخرین مدل حرکتی که احتمال وقوع آن بسیار پایین است، شناخته می‌شود.
- در بین چهار مدل حرکتی، غلتش حول محور X دارای کمترین مقدار نیرو و زمان بحرانی بوده و لذا اولین مدل حرکتی که به احتمال بسیار بالایی در منیپولیشن سه‌بعدی رخ خواهد داد، لغزش ذره حول محور X خواهد بود.

۵- فهرست علائم

a_{BCP} شعاع تماسی در مدل BCP
 a_{DMT} شعاع تماسی در مدل DMT
 a_{Hertz} شعاع تماسی در مدل هرتز
 a_{JKR} شعاع تماسی در مدل JKR
 F نیروی وارده از طرف نوک سوزن بر ذره
 $F_{(adh)BCP}$ نیروی چسبندگی در مدل BCP

- [23] Taheri M., Using HK friction model in 3-D manipulation of Au nanoparticle motion in air environment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 311-316, 2016. (in Persian)
- [24] Hertz H., Über die Berührung fester elastischer Körper, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Vol. 92, pp. 156-171, 1881.
- [25] Johnson K. L., Kendall K. and Roberts A. D., Surface energy and the contact of elastic solid, *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol. 324, pp. 301-313, 1971.
- [26] Derjaguin B. V., Muller V. M. and Toporov Yu. P., Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 53, No. 2, pp. 314-326, 1975.
- [27] Burnham N. A. and Kulik A. J., Surface forces and adhesion, *Bhushan B (ed) Handbook of micro/nanotribology*, Chap. 5. CRC Press LLC, Boca Raton, 1999.
- Journal of Ultramicroscopy*, Vol. 111, No. 8, pp. 1176-11831-8, 2011.
- [5] Stark R. W., Rubio-Sierra F. J., Thalhammer S., and Heckl W. M., Combined nanomanipulation by atomic force microscopy and UV-laser ablation for chromosomal dissection, *Journal of European Biophysics*, Vol. 32, pp. 33-39, 2003.
- [6] Stark R. W., Thalhammer S., Wienberg J. and Heckl W. M., The AFM as a tool for chromosomal dissection – the influence of physical parameters, *Journal of Applied Physics. A: Materials Science & Processing*, Vol. 66, pp. 579-584, 1998.
- [7] Schaap A. T., Carrasco C., Pablo P., MacKintosh F. C. and Schmidt C. F., Elastic response, buckling, and instability of microtubules under radial indentation, *Biophysical Journal*, Vol. 91, pp. 1521-1531, 2006.
- [8] Narang V., Wong S. Y., Leong Sh. R., Abastado J. P. and Gouaillard A., Comparing mathematical models, *Mathematical Models of cell adhesion Cell Adhesion in tumors, Defense Science Research Conference and Expo (DSR)*, pp. 1-4, 2011.
- [9] Moradi M., Fereidon A. H. and Sadeghzadeh S., Dynamic modeling of nanomanipulation of polystyrene nanorod by atomic force microscope, *Scientia Iranica*, Vol. 18, No. 3, pp. 808-815, 2011.
- [10] Korayem M. H., Rahneshin V. and Sadeghzadeh S., Nano cluster manipulation success considering flexibility of system: Coarse grained molecular dynamics simulations, *Scientia Iranica*, Vol. 19, No. 5, pp. 1288-1298, 2012.
- [11] Korayem M. H., Rahneshin V. and Sadeghzadeh S., Coarse-grained molecular dynamics simulation of automatic nanomanipulation process: The effect of tip damage on the positioning errors, *Computational Materials Science*, Vol. 60, pp. 201-211, 2012.
- [12] Korayem M. H., Sadeghzadeh S. and Rahneshin V., A new multiscale methodology for modeling of single and multi-body solid structures, *Computational Materials Science*, Vol. 63, pp. 1-11, 2012.
- [13] Wu J. J., Adhesive contact between a cylinder and a half-space, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 42, pp. 1-8, 2009.
- [14] Sundaram M., Farris T. N. and Chandrasekar S., JKR adhesion in cylindrical contacts, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 60, pp. 37-54, 2012.
- [15] T. Liu, G. Liu, P. Wriggers, and Sh. Zhu, Study on contact characteristic, *Contact Characteristic of nanoscale asperities Nanoscale Asperities by using molecular dynamics simulations, Journal of Tribology*, Vol. 131, pp. 1-10, 2009.
- [16] J. L. Lioua, Ch. M. Tsaib, and J. F. Lin, A microcontact model developed for sphere- and cylinder-based fractal bodies in contact with a rigid flat surface, *Wear*, Vol. 268, pp. 431-442, 2010.
- [17] Sitti M. and Hashimoto H., Teleoperated touch feedback from the surfaces at the nanoscale modeling and experiments, *ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 8, No. 2, pp. 287-298, 2003.
- [18] Korayem M. H. and Taheri M., Modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFM, *Journal of nanoparticle research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-18, 2014.
- [19] Korayem M. H. and Taheri M., Simulating the Manipulation of Various Biological Micro/Nanoparticles by Considering a Crowned Roller Geometry, *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-14, 2016.
- [20] Korayem M. H., Khaksar H., Hefzabad R. N. and Taheri M., Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, 2015. (In Persian).
- [21] Korayem M. H., Mahmoodi Z., Taheri M. and Saraee 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*, Vol. 229, No. 4, pp. 370-382, 2015.
- [22] Taheri M., 3D-Dynamic modeling and simulation of biological nanoparticle motion using AFM nano-robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 311-316, 2015. (in Persian)