



## مدل سازی دینامیکی جابجایی نانو/میکرو ذرات در تماس چند نقطه‌ای بر پایه مدل رامپ

منیزه ذاکری<sup>۱\*</sup>، جواد فرجی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۴۷۶۱

### چکیده

در این مقاله رفتار دینامیکی نانوذره بر روی سطوح زیر در حین راندن بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، با استفاده از مدل تماس چند نقطه‌ای برای دو سطح با هندسه زبری متفاوت شامل پروفیل زبری شش و چهار وجهی و چهار وجهی، از ترکیب مدل تماس تک نقطه‌ای رامپ با مدل‌های تماسی JKR و شوارتز استخراج گردید و معادلات مربوط به سطح تماس واقعی و نیروی چسبندگی برای تماس چند نقطه‌ای سطوح زیر ارائه شد. سپس رفتار دینامیکی نانو/میکرو ذره کروی در راندن روی سطوح زیر، با استفاده از مدل تماس چند نقطه‌ای جدید، مدل سازی شد. به علاوه، شبیه‌سازی دینامیکی نانو/میکرو ذره کروی در شاعع‌های ۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ نانومتر در جابجایی بر روی سطوح زیر مختلف، با فرض تماس چند نقطه‌ای، تک نقطه‌ای، و سطح صاف اجرا و تحلیل شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که استفاده از مدل تماس چند نقطه‌ای خصوصاً در شاعع‌های زبری کوچک، تأثیر عمده‌ای در تعیین نیروی بحرانی حرکت دارد. به علاوه، فرض سطح صاف و یا تماس تک نقطه‌ای منجر به ایجاد خطای قابل توجهی در تعیین نیروی بحرانی می‌شود. نشان داده شد که پروفیل زبری سطح و توزیع زبری عوامل سیار مؤثری در تعیین تعداد نقاط تماسی بوده و موجب تغییر مقادیر نیروی بحرانی پیش‌بینی شده می‌شوند. در کل، نیروی بحرانی به دست آمده از مدل تماس چند نقطه‌ای در مقایسه با مقادیر به دست آمده از مدل‌های سطح صاف و تماس تک نقطه‌ای، به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۰ خرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۰ تیر ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۲۴ مرداد ۱۳۹۵

کلید واژگان:

مدل سازی دینامیکی

راندن نانو/میکرو ذره

سطح زبر

تماس چند نقطه‌ای

## Dynamic modeling of nano/microparticles displacement with multi-point contact based on the Rumpf model

Manizhe Zakeri<sup>\*</sup>, Javad Faraji

School of Engineering Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 5166614761, Tabriz, Iran, m.zakeri@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 30 May 2016

Accepted 10 July 2016

Available Online 14 August 2016

#### Keywords:

Dynamic modeling  
pushing nano/micro particles  
rough surface  
multipoint contact

### ABSTRACT

In this paper, dynamic behavior of a nano particle on a rough surface in pushing based on the atomic force microscopy (AFM) was modeled and simulated by using the multipoint contact model. First, a multipoint contact model was extracted for two different roughness profiles of rough surfaces including the hexagonal and tetrahedral by combination of the Rumpf singular point contact model with JKR and Schwarz contact models, and the equations of the real contact area and adhesion force were proposed for multipoint contact of rough surfaces. Then, the dynamic behavior of particles in pushing on the rough substrate was modeled by using the new multipoint contact model. Additionally, simulation of the particles dynamics with radii of 50, 400 and 500 nm in moving on the different rough substrates was performed and analyzed, by assuming multipoint, singular point contacts, and flat surface contacts. Results showed that the multipoint contact model, especially in small radii of roughness has an essential impact on determination of the critical force. Moreover, assumptions of the flatness or the singular point contact leads to a considerable error in estimating the critical force. Results showed profiles of rough surface and roughness distribution are very important factors in determining the numbers of the contact points, and changing the estimated amount of the critical force. In general, the obtained critical force based on the new multi-point contact model in comparison with those based on the flat surface and the singular point contact models, was decreased and increased, respectively.

### - مقدمه

دینامیکی، ابزار اساسی در فهم پروسه نانو/میکرو جابجایی است و نانو/میکرو ذرات می‌توانند در هر لحظه مسیریابی بشوند که این امر ما را قادر به قرار دادن آن‌ها در موقعیت موردنظر برای ساخت و مونتاژ در مقیاس‌های نانو/میکرومتری می‌کند. مطالعات گسترده‌ای در زمینه جابجایی نانو/میکرو

جابجایی نانو/میکرو ذرات با استفاده از پروب میکروسکوپ‌های روبشی میله‌ای<sup>۱</sup> (SPM) از جمله اهداف کلان سال‌های اخیر بوده است. مدل سازی

<sup>۱</sup> Scanning probe microscopy

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Zakeri, J. Faraji, Dynamic modeling of nano/microparticles displacement with multi-point contact based on the Rumpf model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 120-130, 2016 (in Persian)

نیروی چسبندگی را با استفاده از خواص مشخصه زبری ارائه می‌کنند. این خواص یا مستقیماً اندازه‌گیری شده و یا از پروفیل سطح استخراج می‌شوند. خواص مشخصه عبارت از مقدار متوسط ارتفاع و انحراف<sup>6</sup> rms پروفیل آن، شعاع انحنای قله برآمدگی، ارتفاع برآمدگی‌ها و فاصله بین آن‌ها یا طول موج زبری، نسبت سطح صاف در مقابل سطح زبر و یا حتی طیف کامل ارتفاع سطح می‌باشند. مدل‌ها و روش‌های تئوری مختلفی بر پایه استفاده از برآمدگی‌های نیمه کروی با توزیع ارتفاع گاوین، rms زبری سطح و طول موج مشخصه و تحلیل آن ارائه شده‌اند. با این حال در تحقیقات کمی از مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی زبری برای پیش‌بینی نیروی چسبندگی بین سطوح غیر ایده‌آل استفاده شده است. البته، در برخی پژوهش‌ها نیروهای چسبندگی سطوح زبر نیز با استفاده از مدل‌های تماشی JKR و یا DMT وارد مدل‌سازی شده‌اند [16, 20]. ذاکری و خوارزمی اصطکاک در مقیاس میکرو/نانو را در سطوح با توزیع زبری مدل‌سازی کرده و نشان دادند که زبری سطوح در مقیاس نانومتری تأثیر زیادی بر رفتار اصطکاکی دارد [25].

در مجموع، تحقیقات کمی در زمینه مدل‌سازی جابجایی ذره روی سطح زبر با در نظر گرفتن تأثیر زبری سطوح و پروفیل زبری انجام شده است. تحقیقات حاضر با فرض سطح صاف و یا تماس تکنقطه‌ای انجام شده‌اند. لذا در این مقاله به عنوان کار جدید، مدل‌سازی دینامیکی راندن نانوذره روی صفحه مبنای زبر با فرض تماس چند نقطه‌ای ارائه خواهد شد. بدین منظور جهت تعیین تعداد نقاط تماسی به صورت تابعی از پارامترهای سطح زبر و شعاع ذره، و نیروی چسبندگی سطوح، مدل تماس چند نقطه‌ای بین ذره کروی صاف و سطح زبر استخراج خواهد گردید. جهت مدل‌سازی نیروهای چسبندگی و سطح تماس واقعی از پروفیل زبری شش‌وجهی و چهاروجهی براساس تئوری رامپ [15] استفاده خواهد شد. سپس، تئوری تماشی JKR جهت کاربرد در تماس چند نقطه‌ای توسعه داده خواهد شد. برای اعمال نیروهای کوتاه‌برد و دور-برد نیروهای چسبندگی در سطح زبر و مدل‌سازی تغییر شکل‌های تماسی سطوح، از تئوری تماسی شوارتز استفاده خواهد شد [12]. طبق مدل‌های تماسی سطوح زبر، مساحت سطح تماس از مجموع نقاط تماسی بین دو سطح در تماس تشکیل می‌شود که به عنوان سطح واقعی تماس تعریف می‌شود. سطح واقعی تماس بستگی به اندازه شعاع قله و توزیع برآمدگی‌های روی سطح زبر دارد. همچنین، زبری سطح موجب افزایش یا کاهش چسبندگی ذرات به سطح بسته به مقیاس زبری، محل قرارگیری ذره و اندازه و هندسه ذره می‌شود. در ادامه این مقاله، ابتدا تئوری‌های موردنیاز جهت مدل‌سازی راندن ذره کروی بر سطح زبر با فرض تماس چند نقطه‌ای شامل تئوری‌های مکانیک تماس، چسبندگی سطوح زبر، تماس چند نقطه‌ای و اصطکاک در مقیاس میکرو/نانو ارائه خواهد شد. در ادامه مدل دینامیکی راندن نانو/میکرو ذرات بر روی صفحه مبنای نامهوار با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های میکرو‌تیرک و عکس العمل‌های نانو/میکرو ذره در سطح تماسی ارائه خواهد شد و نهایتاً رفتار دینامیکی ذره در حرکت بر روی سطح زبر مطالعه خواهد شد.

## 2- مدل‌سازی جابجایی نانو/میکرو ذره به روش راندن

برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی ذره و استخراج نیرو بحرانی در لحظه شروع حرکت ذره روی سطح، نیاز به تعریف کامل هندسه و نیروهای عمل کننده در این مسئله می‌باشد. بعلاوه در تعریف هندسه مسئله، تغییر شکل سطوح

ذرات کروی با هدف استفاده از SPM و خصوصاً نوع مکانیکی آن که میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>1</sup> (AFM) است، انجام می‌گردد. با این حال تحقیقات کمی در خصوص مدل‌سازی و کاربردهای آن در پیش‌بینی مسیر حرکت نانوذره یا انتهای سوزن ابزار انجام شده است [1].

مدل اولیه برای جابجایی دوبعدی نانو/میکرو ذرات به شکل راندن توسط فالوو ارائه شده است. در این مدل از تئوری تماسی هرتز<sup>2</sup> استفاده شده و از نیروی چسبندگی ناشی از انرژی سطحی مواد صرف‌نظر گشته است [2]. سیتی و هاشمی‌موتو با استفاده از تئوری تماسی JKR<sup>3</sup> و مدل جرم و فنر مدلی ارائه نموده و از آن برای جابجایی کنترل شده به صورت نیمه اتوماتیک استفاده نموده و مسیر حرکت ذره را با استفاده از داده‌های بینایی سیستم کنترل کرده‌اند [3]. کیم و همکارانش به مدل‌سازی مکانیکی پرسه‌های راندن/کشیدن و برداشت/موقعیت دهی ذرات در مقیاس نانو پرداخته‌اند، اما آن‌ها مدل کامل را بررسی نکرده‌اند [4]. نفضلی و سیتی مدل دینامیکی نسبتاً کاملی از پرسه راندن نانو/میکرو ذرات با استفاده از تئوری JKR ارائه داده و رفتار دینامیکی نانو/میکرو ذرات را روی صفحه مبنای صاف بررسی کرده‌اند. آن‌ها سعی کرده‌اند با شبیه‌سازی، نیرو و زمان واقعی جابجایی را در هر لحظه از پرسه تعیین کنند [5]. طاهری جابجایی نانوذرات بیولوژیکی را توسط AFM به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی کرد و نشان داد که در نانوذرات مورد بررسی شروع حرکت غلتشی حول محور x قبل از غلتش حول محورهای y و z اتفاق می‌افتد [6]. با توجه به اهمیت زبری سطح و تأثیر آن بر چسبندگی سطوح، کوایم و ذاکری به توسعه مدل دینامیکی جابجایی نانو/میکرو ذرات صاف بر روی سطوح زبر در تماس تکنقطه‌ای پرداخته‌اند [7]. ذاکری و فرجی به مدل‌سازی راندن نانو/میکرو ذرات زبر در سطح صاف پرداخته و نشان داده‌اند که وجود زبری بر روی ذرات نیز سبب کاهش مقدار نیروی بحرانی در شروع حرکت ذره می‌شود [8]. آدوسین و همکارانش به بررسی تجربی منیپولیشن دوبعدی تک ذره طلا به شکل 20 وجهی پرداختند. آن‌ها نیروهای اطراف نانوذره شامل چسبندگی، اصطکاک و نیرو خارجی را به صورت بلادرنگ بررسی کردند و تأثیر تغییر این نیروها بر حرکت نانوذره را مورد مطالعه قرار دادند [9]. آن‌چه موجب تفاوت تحلیل دینامیکی سیستم در مقیاس نانو نسبت به مقیاس مacro می‌گردد، اهمیت یافتن نیروهای سطحی و همچنین تغییر شکل سطوح تماسی در مقیاس میکرو/نانو از اهمیت بالای برخوردارند [10, 11]. در مطالعه تماس/تغییر شکل، مدل‌های مکانیکی مختلف هرتن، JKR<sup>4</sup> و MD<sup>5</sup> ارائه شده‌اند و مدل تحلیلی تغییر شکل الاستیک تماس چسبنده بین کره و سطح صاف در محدوده مشخص JKR و DMT توسط شوارتز ارائه شده است [12, 11]. اما در حال حاضر ثابت شده که نیروهای برهمنکش و خصوصاً نیروهای جدایش یا چسبندگی ذره/سطح برای یک هندسه بسیار ساده یعنی کره/اصفحه در مواد نرم بسیار کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده با تئوری‌های تماسی JKR، DMT و MD در سطح صاف ایده‌آل است. عموماً زبری سطح و حضور برآمدگی‌ها به عنوان پاسخ این اختلاف بین تئوری و آزمایش‌ها مطرح شده که موجب کاهش سطح تماس واقعی و افزایش فاصله بین سطوح اجسام می‌شود [13-24]. پس از تحقیقات اولیه فولر و همکارانش [13]، تئوری‌های مختلفی ارائه شده‌اند که بیان ریاضی

<sup>1</sup> Atomic force microscopy

<sup>2</sup> Hertz

<sup>3</sup> Johnson-Kendall-Roberts

<sup>4</sup> Derjaguin- Muller -Toporov

<sup>5</sup> Maugis-Dugdale

<sup>6</sup> root mean square

چسبندگی اعمال کند. مدل رامپ بر پایه تماس بین یک برآمدگی منفرد نیمه کروی روی صفحه و یک ذره کروی است (شکل ۱). مرکز ذره با شعاع بزرگ‌تر در بالای مرکز برآمدگی است و سیستم بدون تغییر شکل فرض شده است. ذره کروی با شعاع  $R$  در بالای برآمدگی به شعاع  $r$  و به مرکز O قرار گرفته و در امتداد محور  $z$  بر هم نیرو وارد می‌کنند. نیروی عکس‌العملی مؤثر در این مدل از مجموع دو عبارت که برهم‌کنش‌های وندروالس دو سطح در تماس هستند، به دست می‌آید. رامپ از تقریب درجاگوین برای برهم‌کنش بین دو سطح استفاده نموده و معادله (۶) را به دست آورد.

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

که در آن  $r$  شعاع برآمدگی،  $A_H$  ثابت همیکر و  $D_0$  کمترین فاصله بین کره و برآمدگی (معادل فاصله بین اتمی) است. عبارت اول و دوم داخل برآکت در معادله به ترتیب مقادیر نیروی وندروالس تماسی بین ذره و برآمدگی و نیروی برهم‌کنش غیرتماسی بین ذره و صفحه مبنای صاف را بیان می‌کند که ذره در فاصله‌ای معادل شعاع برآمدگی  $r$  از صفحه مبنای قرار دارد [۱۵]. راینویوج و همکارانش رابطه بین شعاع زبری  $r$  و ریشه میانگین مربعات یا  $r^{rms}$  را مشخص کردند [۱۷, ۱۶]. کوپر و همکارانش مدلی جهت تعیین نیروی چسبندگی در تماس ذره کروی زبر با سطح صاف ارائه دادند که در آن از پراکندگی همگن برآمدگی‌های نیمه کروی که مرکز آن روی ذره کروی قرار دارد، استفاده شده است. در مدل مذکور نیروی چسبندگی کل برابر مجموع چسبندگی تماسی در یک برآمدگی ضربدر تعداد ارائه دادند که در آن تماسی موجود در سطح مشترک دو جسم و نیروی غیرتماسی بین کره و سطح می‌باشد [۱۸]. جورج، هندسه سطحی با توزیع زبری شش‌وجهی پوشیده از برآمدگی‌های کروی به شعاع یکسان را جهت تخمین پروفیل سطوح زبر واقعی پیشنهاد کرده است [۱۹]. تحقیقات تجربی مختلفی نیز جهت اندازه‌گیری نیروی چسبندگی و مقایسه مدل‌های موجود انجام می‌گیرد [۲۰]. بیچ و همکارانش به اندازه‌گیری مستقیم نیروهای چسبندگی بین ذرات دارویی (بلکوتازون، لاکتوز و ...) با هندسه منظم و سطوح زیرین پلیمری با استفاده از AFM پرداخته‌اند. این اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که زبری سطوح تماسی، عامل مهمی است که نیروهای چسبندگی اندازه‌گیری شده در آزمایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۱]. فتاو تأثیر تغییرات زبری‌های با شعاع بسیار کوچک از ۰ تا ۱۰ نانومتر را بر نیروی چسبندگی ذرات کروی از روشی مشابه با روش رامپ استفاده و بررسی کرده است [۲۴]. آن‌ها نشان دادند که در زبری بسیار کم، عبارت غیرتماسی چسبندگی نیروی وندروالس بین سطح دو ذره غالب است که با افزایش شعاع زبری، این نیرو کاهش می‌یابد و نیروی چسبندگی تماسی بین ذره با برآمدگی سطح زبر، افزایش می‌یابد. یکی از خاصیت‌های اساسی سطوح زبر، توزیع قابل توجه نیروی جدایش است [۲۳, ۱۴, ۱۳]. در قسمت‌های قبل الگوهای موجود جهت بررسی چسبندگی سطوحی با زبری مشخص که در آن‌ها از پوشش سطح با ذرات کروی استفاده شده بود، مرور شد. راینویوج از برآمدگی‌های کروی به شعاع یکسان و با پوشش قله-دره را جهت تخمین هندسه پروفیل سطوح زبر واقعی استفاده کرده است [۱۶] که با تکرار آن در راستای محور عمود بر صفحه، پروفیل مربعی به دست می‌آید. همچنان، جهت تخمین دقیق تری از پروفیل سطوح واقعی، هندسه سطحی با توزیع زبری شش‌وجهی پوشیده از برآمدگی‌های کروی به شعاع یکسان جهت تخمین از سطوح زبر واقعی پیشنهاد شده بود [۱۹].

تماسی با پایستی لحظه‌گرد. نیروهای موجود شامل نیروهای تماسی و اصطکاک و نیروهای ابزار بوده و با پایستی با استفاده از تئوری‌های مکانیک تماس و اصطکاک در مقیاس میکرو/نانو استخراج شوند که در ادامه به آن می‌پردازیم.

## ۲- چسبندگی و مکانیک تماس در مقیاس میکرو/نانو

نیروی چسبندگی به مقاومت در برابر جدایش دو سطح در تماس که در خلاف جهت هم کشیده می‌شوند، گفته می‌شود. چسبندگی سطوح کاملاً واپسنه به کار چسبندگی  $W$  و درنتیجه انرژی سطحی  $\gamma$  بوده و معادلات او لیه توسط تابور ارائه شده است. نقطه شروع تحلیل او معادله زیر است:

$$W = 2\gamma \quad (1)$$

برای مطالعه مکانیک تماس/تغییر شکل در مقیاس نانو/میکرومتری، استفاده از مدل‌های تماسی هرتز، JKR و DMT پیشنهاد شده‌اند [۱۰, ۱۱]. ساده‌ترین قانون نیرو برای تخمین عکس‌العمل‌های واقعی بین کره/صفحه توسط هرتز مدل شده که مکانیک تغییر شکل تماسی بین کره با سطح صاف را بدون در نظر گرفتن چسبندگی ارائه نمود. با افزودن چسبندگی به مدل هرتز، مدل‌های پیشرفت‌های مکانیک تماس به دست می‌آیند. یکی از این مدل‌ها، مدل JKR است. در این مدل نیروهای جاذبه فقط در داخل سطح تماس عمل می‌کنند و نیروهای چسبندگی در فواصل بینهایت نزدیک را در برمی‌گیرد. تئوری معروف JKR استفاده از بار ظاهری هرتز را ارائه می‌کند که به عبارت دیگر، بار معادل در غیاب نیروهای چسبندگی است که موجب افزایش سطح تماسی می‌شود. تئوری JKR به شکل معادلات (۲) تا (۴) بیان می‌شود:

$$F_{(\text{adh})\text{JKR}} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R \quad (2)$$

$$\delta = \frac{a_{\text{JKR}}^2}{R} - \sqrt{\frac{8\pi\gamma a_{\text{JKR}}}{3K}} \quad (3)$$

$$a_{\text{JKR}} = \left[\frac{R}{K}(\sqrt{F_{(\text{adh})\text{JKR}}} + \sqrt{F - F_{(\text{adh})\text{JKR}}})^2\right]^{1/3} \quad (4)$$

که در آن  $F$  نیروی عمودی اعمال شده خارجی و  $F_{(\text{adh})\text{JKR}}$  نیروی جداسازی دو سطح است.  $K$  مدول الاستیک مؤثر است که مقدار آن از رابطه (۵) به دست می‌آید.  $E_1$  و  $E_2$  مدول یانگ و  $\vartheta_1$  و  $\vartheta_2$  ضرایب پواسون دو سطح در تماس است.  $a$ : شعاع تماسی و  $\delta$ : عمق تماس می‌باشد.

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left( \frac{1 - \vartheta_1^2}{E_1} + \frac{1 - \vartheta_2^2}{E_2} \right) \quad (5)$$

## ۲- تئوری‌های چسبندگی در سطوح زبر

اغلب سطوح مهندسی صرف‌نظر از روش آماده‌سازی دارای برآمدگی‌هایی در سطح هستند. باودن و تابور در سال ۱۹۵۶ مدعی شدن که سطح تماس واقعی بین ذره و سطح زبرین از سطح تماس ظاهری خیلی کوچک‌تر می‌باشد و در حالت تئوری، نیروی اصطکاک متناسب با سطح تماس واقعی است. در تحقیقات بعدی، فولر و تابور تأثیر زبری سطح نمونه بر چسبندگی را با استفاده از مدل تماسی JKR بررسی نمودند [۱۳]. آن‌ها پارامتر بدون بعدی را محاسبه نمودند که به معنی کاهش چسبندگی به علت زبری سطح بود. اولین مدل برای زبری سطوح در سال ۱۹۶۶، توسط گرین‌وود و همکارانش ارائه شد که در آن برآمدگی‌های سطح زبر با کره‌های مستقل و بر اساس خواص آماری سطوح تقریب زده شده بود [۱۴]. اولین مدل ساده برای توصیف تأثیر زبری سطوح بر میزان نیروی چسبندگی توسط رامپ ارائه شده است. او مدل همیکر را تغییر داد تا اثر ارتفاع برآمدگی را بر نیروهای

### 2-3-2- مدل‌سازی نیروی چسبندگی کره/سطح زبر در حالت تماس چند نقطه‌ای

در این قسمت، نیروی چسبندگی تماسی سطوح با توجه به تأثیر پروفیل زبری و تعداد نقاط تماسی بر میزان نیروی چسبندگی برای توزیع زبری با طول موج  $\lambda = 4r$  و  $\lambda = 2r$  استخراج می‌شود. با در نظر گرفتن تعداد نقاط تماسی برابر  $N$ ، معادله (6) که بیانگر نیروی تماسی در تماس چند نقطه‌ای است، برای حالت تماس چند نقطه‌ای و توزیع زبری با ضرب نیروی تماسی در  $N$  به شکل معادله (8) تغییر می‌کند:

$$F_{ad} = \frac{A_H R}{6D_0^2} \left[ \frac{Nr}{r+R} + \frac{1}{(1+r/D_0)^2} \right] \quad (8)$$

در تحقیقات هدف تعیین نیروی چسبندگی بوده و سطح تماس واقعی و تغییر شکل سطوح بررسی نشده است و در موارد موردنیاز، سطح تماس واقعی بین ذره و سطح زبر غالباً با استفاده از نیروی چسبندگی مدل‌های JKR در سطوح صاف به دست آمده و لذا نیروی چسبندگی دقیق در معادلات تماسی اعمال نشده است؛ اما آزمایش‌ها نشان داده‌اند که برخلاف زبری مقیاس میکرو که نیروی چسبندگی را می‌توان با استفاده از ناحیه کوچک تماسی مشخص نموده و با عبارت‌هایی از تئوری الاستیسیته بیان نمود، برهم‌کنش‌های سطوح ماشین‌کاری شده با زبری نانومتری به میزان زیادی تحت تأثیر نیروی وندروالس بین سطوح غیرتماسی است. از این‌رو در مدل‌سازی نانو راندن به معادلات تغییر شکل تماسی و نیز سطح واقعی تماس در تماس چند نقطه‌ای توسط کوایرام و ذاکری با استفاده از مدل ریاضی تغییر شکل الاستیک تماس چسبندۀ شوارتز و براساس معادلات نیروی چسبندگی سطوح زبر ارائه شده است. در این مدل تأثیر کامل نیروهای وندروالس کوتاه‌برد و دور‌برد در داخل و خارج سطح تماس واقعی اعمال شده است. به علاوه، برهم‌کنش تماسی بین ذره با قله برآمدگی سطح زبر مشابه نیروی چسبندگی مدل JKR در نظر گرفته شده و نیروی برهم‌کنش دور-برد ذره با صفحه مینا به نیروی خارجی اضافه می‌گردد. سپس برای استخراج رابطه شعاع تماسی و بار واردۀ از روش استخراج مدل JKR استفاده شده است [7]. نیروی معادل هرتزین در مدل JKR  $F_H^{JKR}$ ، با در نظر گرفتن نیروی دور-برد  $2\pi r \omega_2$  به شکل زیر می‌باشد:

$$F_H^{JKR} = F + 3\pi r a = \sqrt{F + (3\pi r \omega)^2} \quad (9)$$

با جایگذاری نیروی خارجی معادل  $F + 2\pi r \omega_2$  در معادله (9)، بار معادل هرتزین به صورت معادله (10) استخراج شده است:

$$F_H^{JKR} = F + 2\pi r \omega_2 + 3\pi r \omega_1 \pm \sqrt{6\pi r \omega_1(F + 2\pi r \omega_2) + (3\pi r \omega_1)^2} \quad (10)$$

از طرفی، طبق معادلات (6) و (8)، نیروی چسبندگی در سطوح زبر از دو بخش نیروی داخل دایره تماسی یا کوتاه-برد و نیروی خارج دایره تماس یا دور-برد تشکیل شده است که بیانگر مقادیر نیروی وندروالس تماسی بین ذره برآمدگی و نیروی وندروالس میانگین غیرتماسی بین ذره/صفحه مینا به عنوان سطح صاف می‌باشد. با فرض تماس چند نقطه‌ای، نیروی وندروالس، معادل در معادلات (9) و (10)، بایستی در تعداد نقاط تماسی ضرب  $\lambda$  طبق معادله (10)، نیروی دور-برد یا عبارت غیرتماسی نیروی چسبندگی  $F_{ad}$  به عنوان یک نیروی خارجی در نظر گرفته می‌شود. نهایتاً، معادلات تعمیمی داده شده شوارتز جهت استفاده در مدل تماس چند نقطه‌ای به صورت معادله (11) به دست می‌آید:

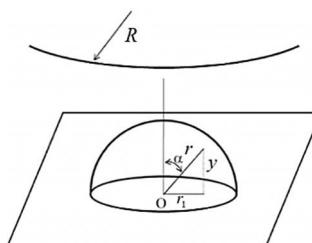
**2-3-3- مدل‌سازی مکانیک تماس کره/سطح زبر در تماس چند نقطه‌ای**  
چنان‌که ذکر شد در مدل رامپ نیروی چسبندگی بین ذره کروی/سطح زبر برای تماس تک نقطه‌ای مطالعه شده است. در حالت واقعی وقتی شعاع ذره بزرگ‌تر از اندازه شعاع قله برآمدگی‌های سطح زبر باشد، تعداد نقاط تماسی ذره/سطح زبر، در منطقه تماسی بیش از یک نقطه خواهد بود که این امر موجب تغییر نیروی چسبندگی به دست آمده در مقایسه با مدل‌های موجود می‌گردد. از این‌رو وجه تعریف نیروی موردنیاز برای جدا کردن ذره از سطح زبر، تعداد نقاط تماسی باید مشخص شود. در ادامه با فرض مشخص بودن سطح تماس ظاهری مطابق تئوری‌های موجود در مکانیک تماس، تعداد نقاط موجود در منطقه تماسی براساس هندسه توزیع زبری استخراج خواهد شد.

### 2-1-3- مدل‌سازی هندسی تماس چند نقطه‌ای برای پروفیل سطح زبر با توزیع شش‌وجهی و چهار‌وجهی

در "شکل 2" نمای فوقانی پروفیل سطح زبری با توزیع شش‌وجهی و چهار‌وجهی مشاهده می‌شود. هندسه تماس ذره کروی با پروفیل‌های زبری شش‌وجهی و چهار‌وجهی به صورت فشرده و دارای طول موج  $\lambda = 2r$  است. براساس هندسه پروفیل شش‌وجهی، با فرض توزیع زبری فشرده و طول موج  $\lambda = 2r$  و تعداد برآمدگی‌های در تماس  $N$  به صورت معادله (7) به دست می‌آید:

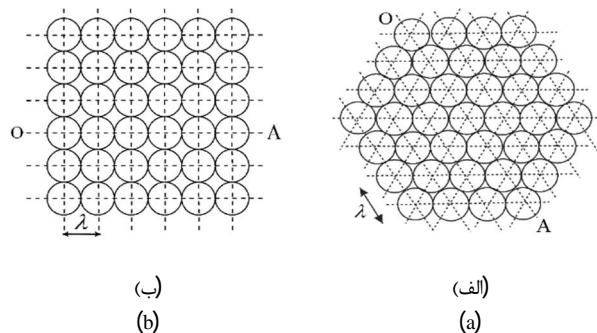
$$N = 1 + \sum_{i=1}^{\frac{a}{r}} \frac{360}{\arccos\left(1 - \frac{1}{2i^2}\right)} \quad (7)$$

که در آن  $a$  شعاع تماسی ذره با صفحه مبنای  $n$  فاصله مرکز برآمدگی‌ها از یکدیگر بوده و زاویه برحسب درجه است. معادله به دست آمده مشابه معادله موجود برای تماس کره زبر با سطح صاف است [18].



**Fig. 1** Geometry of the Rumpf model for contact of a particles of radii  $R$  along the  $y$ -axis with spherical roughness of radius  $r$  that its center is on the substrate [15]

شکل 1 هندسه مدل رامپ برای تماس ذره کروی به شعاع  $a$  در امتداد محور  $y$  زبری کروی به شعاع  $r$  که مرکز آن روی صفحه قرار گرفته است [15]



**Fig. 2** Top view of roughness profiles, (a) hexahedron roughness profile, (b) tetrahedron roughness profile, (c) پروفیل زبری شش‌وجهی، (d) پروفیل

شکل 2 نمای فوقانی پروفیل زبری، (الف) پروفیل زبری شش‌وجهی، (ب) پروفیل زبری چهار‌وجهی

از اطمینان از تماس ذره با ابزار، صفحه مبنا با سرعت ثابت  $V_{\text{sub}}$  حرکت می‌کند که با استفاده از فرض سرعت نسبی می‌توان فرض نمود ذره با سرعت نسبی معادل سرعت صفحه مبنا ولی در خلاف جهت آن در حرکت است (فاز اول). در فاز اول ورودی مسئله موقعیت لحظه‌ای ذره براساس سرعت حرکت صفحه مبنا بوده و خروجی مدل، مقدار نیروی واردہ از طرف رأس سوزن پرورب بر ذره  $F_T$  در هر لحظه است. حرکت ذره موجب افزایش پیچش و خمش میکروتیرگ نانو ربات شده و نیروی عکس‌العمل بین نوک سوزن/نانو/میکرو ذره را افزایش می‌دهد. افزایش نیرو تا لحظه غلبه بر چسبندگی و اصطکاک بین ذره/صفحه مبنا ادامه یافته و پس از آن حرکت نسبی بین ذره/صفحه مبنا آغاز می‌گردد (فاز دوم). با رسیدن ذره به موقعیت هدف، حرکت متوقف شده و ابزار به مکان اولیه باز می‌گردد [5]. خروجی این فاز میزان جابجایی ذره است [29]. در راندن نانو/میکرو ذره بر روی سطح زیر، تغییراتی در مدل نیروی چسبندگی، عمق تغییر شکل و مساحت سطح تماسی ایجاد می‌شود و پروسه جابجایی نانو/میکرو ذره، مشابه مدل‌های موجود است [29,5,3]. چنان‌که در "شکل 3 (الف)" نشان داده شده است، نیروی  $F_T$  موجب خمش و پیچش میکروتیرگ پرورب می‌گردد. در "شکل 3 (الف)"،  $L$  و  $w$  به ترتیب طول و عرض و خامت میکروتیرگ و  $H$  طول سوزن پرورب AFM است. نیروها و ممان پیچشی میکروتیرگ ( $F_z$  و  $F_y$  و  $M_\theta$ )، نیروهای عمودی و افقی رأس نوک سوزن پرورب ( $F_z$  و  $F_y$ ) و نیروی راندن ذره  $F_T$  در حرکت افقی نانو/میکرو ذرات، در "شکل 3 (الف)" نشان داده شده‌اند. نیروها بر زاویه پیچش  $\theta$  و خیز  $Z_c$  عمودند.  $\gamma$  و  $\theta$  به هم وابسته‌اند [30,29].

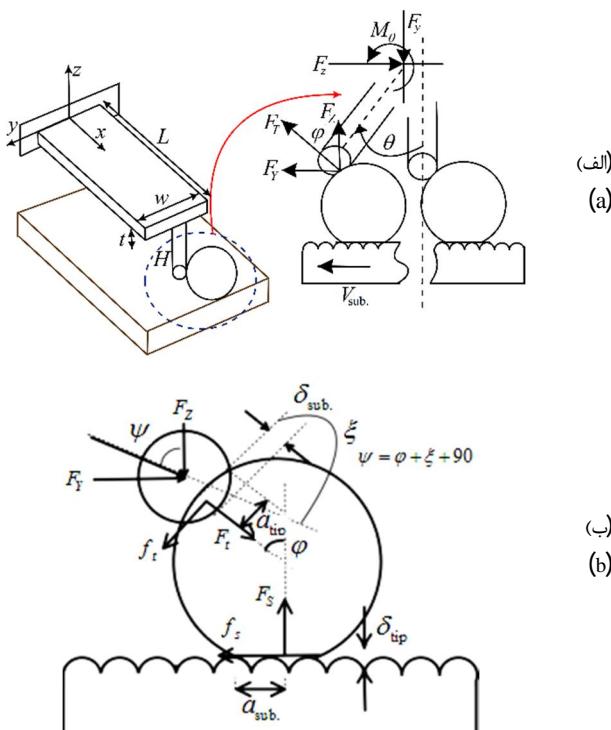


Fig. 3 Displacement of the particle by using the tip of AFM probe, (a) the microcantilever deformation during pushing of the nanoparticle, (b) the interaction forces and deformation of the contact surfaces between the tip/particle and particle/substrate

شکل 3 جابجایی ذره توسط رأس سوزن پرورب AFM، (الف) تغییر شکل میکروتیرگ در حین راندن نانوذرات، (ب) نیروهای برهم‌کنش سطوح و تغییر شکل‌های تماسی بین نوک سوزن/ذره و ذره/صفحه مبنا

$$F_{\text{adh}}^{\text{rough}} = (F_{\text{nc}} + F_{\text{external}}) + 3N\pi R'\gamma \pm \sqrt{6\pi R'\gamma(F_{\text{nc}} + F_{\text{external}}) + (3N\pi R'\gamma)^2} \quad (11)$$

پس از تعیین نیروی کل چسبندگی سطح براساس معادله (11)، با تقسیم آن بر تعداد نقاط تماسی، نیروی چسبندگی در یک نقطه تماس ذره با هر قله برآمدگی سطح زیر  $F_{\text{adh}}^{\text{s}}$  در مدل تماس چند نقطه‌ای به دست می‌آید.

$$F_{\text{adh}}^{\text{s}} = F_{\text{adh}}^{\text{rough}} / N \quad (12)$$

مقادیر تغییر شکل و ح تماس بین ذره کروی با یک قله برآمدگی سطح زیر، با جای‌گذاری  $F_{\text{adh}}^{\text{s}}$  در معادلات JKR در هر نقطه تماس به دست خواهد آمد [10]. سطح تماس کل  $A$  در مدل تماس چند نقطه‌ای، از سطح تماس ذره کروی با یک قله برآمدگی سطح زیر ضرب در تعداد نقاط تماسی به دست خواهد آمد.

#### 2-4- نیروی اصطکاک در مقیاس نانو

در حین حرکت دادن ذرات، حرکات محتمل ذرات عبارت از چسبندگی، لغزش و غلتش می‌توانند باشد [27-25]. بنابراین باستی از مدل‌های اصطکاکی لغزش و غلتش در مقیاس نانو استفاده نمود. با فرض عدم وجود سایش و خوردگی و این‌که اصطکاک اساساً ناشی از چسبندگی است، اصطکاک لغزشی به شکل رابطه (13) تعریف می‌شود:

$$f = \tau A \quad (13)$$

که در آن  $\tau$  شدت برش دو سطح در تماس و  $A$  سطح تماس واقعی کلی است. برای هر ماده‌ای، مقدار  $\tau$  در تئوری معادل  $G/29$  می‌باشد که  $G$  مدول برشی ماده است [26]. برای اصطکاک غلتی بین ذره کروی با صفحه مينا، مدل اصطکاک به صورت معادله (14) فرض می‌شود:

$$f_{\text{sub}}^{\psi} = \tau_{\psi} A \quad (14)$$

در معادله فوق  $\tau_{\psi}$  ضریب اصطکاک دورانی است و برای بیشتر مواد  $f_{\text{sub}}^{\psi}$  خیلی کمتر از اصطکاک لغزشی است [26].

#### 2-5- مدل دینامیکی راندن نانوذرات بر صفحه مبنای با سطح زیر توسط نانو ربات AFM

در این قسمت با توجه به تأثیر و اهمیت زیری سطوح در جابجایی اجسام در مقیاس میکرو/نانو‌متري، اثر زیری سطح بر مدل دینامیکی راندن نانو/میکرو ذرات با استفاده از پرورب AFM در حالت تماس چند نقطه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گيرد. در تحقیقات ارائه شده قبلی برای محاسبه نیروهای اصطکاک از سطح تماسی ظاهری بین ذره صاف و صفحه مبنا و یا فرض تماس تک نقطه‌ای استفاده شده بود. در این قسمت، جهت مدل‌سازی مکانیک تماس ذره صاف بر روی صفحه مبنا زیر از مدل تماس چند نقطه‌ای با پروفیل زیری شش‌وجهی و چهاروجهی، در دو حالت توزیع زیری فشرده و قله-دره استفاده خواهد شد. تغییر شکل سطوح با استفاده از روش شوارتز و براساس نیروی چسبندگی استخراج شده به دست می‌آید. از این‌رو، مدل دقیقی که شامل نیروهای چسبندگی و نیروهای اصطکاک براساس سطح تماس واقعی است، ارائه خواهد شد. بعد از تعیین محل نانو/میکرو ذرات توسط AFM غیرتماسی آن، نوک سوزن نانو ربات در تماس با ذره هدف قرار می‌گیرد. در طراحی پارامترها از لغزش رأس ابزار و دوران آن اجتناب شده و زاویه تماس  $\varphi$  در کل زمان پروسه ثابت باقی می‌ماند و برای عمل جابجایی به شکل راندن، بزرگ‌تر از صفر است. تماس نوک سوزن با نانو/میکرو ذره موجب تغییر شکل اولیه در میکروتیرگ شده و توسط سیستم فیدبک احراز می‌گردد. پس

### 3- شبیه‌سازی رفتار دینامیکی نانو/میکرو ذره در جابجایی به شکل راندن بر سطح زبر

در ادامه این قسمت ابتدا مقادیر و شرایط اولیه ارائه خواهد شد. سپس رفتار دینامیکی ذره در جابجایی به شیوه راندن بر سطح زبر با فرض تماس چند نقطه‌ای، با حل همزمان معادلات دینامیکی، تماسی و بحرانی و با اعمال شرایط اولیه شبیه‌سازی و تحلیل خواهد شد. شبیه‌سازی‌ها با حل همزمان معادلات (7) تا (26) و با استفاده از شرایط اولیه ارائه شده در معادله (27) اجرا می‌گردد و معادلات (25) و (26) به عنوان شروط آغاز حرکت ذره می‌باشند. نتیجه شبیه‌سازی‌ها، نمودار تغییرات نیروهای دینامیکی  $F_T$  و  $F_s$  و  $F_r$  در هین حرکت است که نیروی بحرانی شروع حرکت لغزشی یا غلتشی ذره از آن استخراج می‌شود.

#### 3-1- مقادیر اولیه مسئله

در این تحقیق، جابجایی ذراتی کروی از جنس طلا بر روی صفحه مبنایی زبر از جنس اکسید سیلیکون و با توزیع زبری شش‌وجهی و چهاروجهی که با سرعت ثابت  $V_{\text{sub}} = 100 \text{ nm/s}$  حرکت می‌کند، شبیه‌سازی می‌شود. زاویه تماس پروب با ذره معادل  $\varphi = 60^\circ$  و ثابت است [29]. قبل از شروع حرکت صفحه مبنا، برای اطمینان از تماس رأس سوزن پروب با ذره تغییر مکان اولیه  $\emptyset_0 = 0.7^\circ$  حول محور  $z$  در میکروتیرک ایجاد می‌شود. مقدار انرژی سطحی معادل طلا و سیلیکون برای ذره رأس سوزن پروب و ذره/صفحه مبنا، تقریباً معادل  $\omega = 0.2 \text{ J/m}^2$  است [20]. جهت بررسی رفتار دینامیکی نانو/میکرو ذرات، از ذراتی با شاعع‌های مختلفی در محدوده 50 تا 500 نانومتری استفاده خواهد شد. این محدوده از اندازه ذره، برای بررسی تغییر حرکت لغزشی به غلتشی یا بر عکس انتخاب شده است. در تحقیقات گذشته جابجایی نانو/میکرو ذرات 50 تا 1000 نانومتری بر سطوح صاف، بررسی شده است. طبق این تحقیقات، نانو ذراتی با شاعع 50 تا 500 نانومتر در هین جابجایی بر روی سطح صاف و در شرایط تعریف شده مسئله، ابتدا شروع به لغزش می‌کنند و ذرات با شاعع بالای 500 نانومتر ابتدا شروع به غلتشی می‌کنند [30,29]. به علاوه، جابجایی ذره بر سطح زبر با فرض تماس تک نقطه‌ای مطالعه شده است [7]. در این تحقیق، امکان غلتش در زبری‌های کم برای ذرات نانومتری مشاهده شده است. مقادیر هندسی پروب AFM در جدول 1 و خواص مکانیکی آن در جدول 2 ارائه شده است. ضرایب اصطکاکی موردنیاز برای سطح تماسی در جدول 3 ارائه شده‌اند. ضرایب  $\mu_d$  و  $\mu_s$  ثابت‌های ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی حرکت نانو/میکرو ذره روی صفحه مبنا است (جدول 3).  $\tau$  مقاومت برشی سطح در تماس بین ذره/صفحه مبنا و نوک/ذره ثابت فرض شده و  $\mu_r$  و  $\tau_r$  پارامترهای اصطکاک غلتشی می‌باشند. نهایتاً، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از پروفیل زبری سطح با توزیع شش‌وجهی و چهاروجهی و طول موج‌های  $= 2r$  و  $\lambda = 4r$  براساس مدل رامپ برای تماس چند نقطه‌ای انجام خواهد شد.

#### 3-2- شرایط اولیه

با جای‌گذاری مقادیر عددی و ساده نمودن معادلات در زمان  $t = 0$ ، شرایط

جدول 1 ابعاد هندسی AFM [29]

طول میکروتیر ( $\mu\text{m}$ )	عرض میکروتیر ( $\mu\text{m}$ )	ضخامت میکروتیر ( $\mu\text{m}$ )	ارتفاع سوزن ( $\mu\text{m}$ )	شعاع نوک سوزن (nm)
225	48	1	12	20

در شکل 3 (ب) نیروهای برهم‌کنش سطوح و تغییر شکل‌های تماسی بین نوک سوزن/ذره و ذره/صفحه مبنا مشاهده می‌شوند. معادلات نیروهای وارد بر میکروتیرک به عنوان تیر یک سر گیردار به ترتیب زیر است:

$$F_y = K_y y_p \quad (15)$$

$$F_z = K_z z_p \quad (16)$$

$$M_\theta = K_\theta \theta \quad (17)$$

ماتریس سختی فری میکروتیرک در راستای  $z$  و  $z$  به صورت تابعی از خواص مکانیکی و هندسه میکروتیرک به دست می‌آید [29]:

$$K_z = \frac{Ewt^3}{4L^3}, \quad K_y = \frac{Et w^3}{4L^3}, \quad K_\theta = \frac{Gwt^3}{6L} \quad (18)$$

که  $E$  و  $\vartheta$  به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون میکروتیرک می‌باشند. با در نظر گرفتن تغییر شکل تماسی بین ذره-راس ابزار  $\delta_t$  و ذره-صفحه مبنا  $\delta_s$  در شاعع یا ارتفاع برآمدگی  $r$  براساس مدل تماس چند نقطه‌ای، معادلات سینماتیکی برای موقعیت انتهای آزاد میکروتیرک به دست می‌آیند:

$$y_p = y_{\text{sub}} + (R_p - \delta_t) \sin \varphi - H \sin \theta \quad (19)$$

$$z_p = z_{\text{sub}} + (R_p - \delta_t) \cos \varphi + (R_p + r - \delta_s) + H \cos \theta \quad (20)$$

$$\begin{aligned} F_y &= F_y \sin^2 \theta - F_z \cos \theta \sin \theta \\ &+ \frac{M_\theta \cos \theta + I_p \ddot{\theta} \cos \theta}{H} + \frac{m \sin \theta}{2} (\ddot{y}_T \sin \theta \\ &+ \ddot{y}_p \sin \theta - \ddot{z}_T \cos \theta - \ddot{z}_p \cos \theta) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} F_z &= F_z \cos^2 \theta - F_y \cos \theta \sin \theta \\ &+ \frac{M_\theta \sin \theta + I_p \ddot{\theta} \sin \theta}{H} - \frac{m \cos \theta}{2} (\ddot{y}_T \sin \theta \\ &+ \ddot{y}_p \sin \theta - \ddot{z}_T \cos \theta - \ddot{z}_p \cos \theta) \end{aligned} \quad (22)$$

نهایتاً نیروی راندن ذره  $F_T$  و زاویه آن با محور عمود بر سطح افق  $\psi$  با استفاده از معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$F_T = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \quad (23)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{F_y}{F_z} \right) \quad (24)$$

#### 2- مدل‌سازی رفتار دینامیکی ذرات

نیروهای اصطکاکی و عمودی و نهایتاً شرایط بحرانی برای لحظه حرکت ذره براساس "شکل 3 (ب)" از نیروهای وارد بر رأس سوزن پروب به دست می‌آیند. معادلات لازم برای تعیین مقدار بحرانی نیروی اعمالی از طرف رأس سوزن پروب در لحظه حرکت با استفاده از روش به کار رفته در استخراج معادلات در سطوح صاف به دست می‌آیند [29,5]. نهایتاً، شرایط موجود در معادلات زیر برای غلبه نیروی ابزار بر چسبندگی و شروع حرکت ذره با پستی ارض اشوند که نهایتاً نیروی بحرانی اعمالی از طرف رأس سوزن پروب در لحظه حرکت را تعیین می‌کند [29] با استفاده از معادله اصطکاک لغزشی، شرط لازم جهت شروع حرکت لغزشی ذره بر روی صفحه مبنا به دست می‌آید [:5]

$$F_T > \frac{\tau_s A}{\sin \psi - \mu_s \cos \psi} = F_s \quad (25)$$

با استفاده از معادله اصطکاک غلتشی، شرط لازم جهت شروع حرکت غلتشی ذره بر روی صفحه مبنا به شکل معادله (26) است [:5]:

$$F_T > \frac{\tau_{r_s} A + \tau_{r_t} A_t}{R(\sin \psi + \cos \zeta) + \mu_{r_t} \sin \zeta - \mu_{r_s} \cos \psi} = F_r \quad (26)$$

که در معادلات فوق،  $A$  برابر سطح تماس واقعی در مدل تماس چند نقطه‌ای خواهد بود.

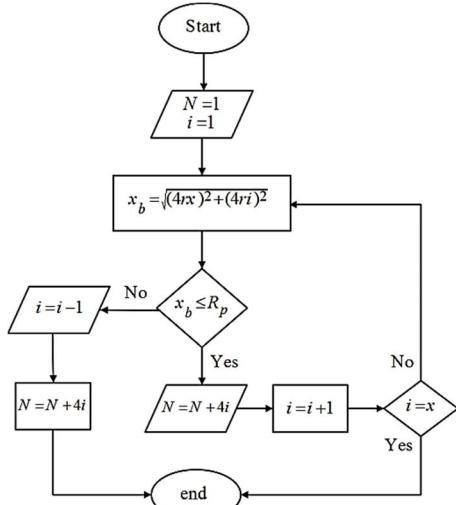


Fig. 5 The algorithm of the number of contact points calculation for tetrahedron roughness profile with  $\lambda = 4r$

شکل 5 الگوریتم محاسباتی تعداد نقاط تماسی برای پروفیل زبری چهاروجهی با

$$\lambda = 4r$$

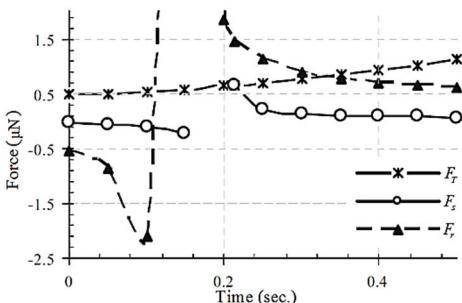


Fig. 6 Nanoparticle starts to sliding on the smooth substrate after 0.213 seconds and critical force of 0.647  $\mu\text{N}$  [29]

شکل 6 شروع به حرکت لغزش بر روی صفحه مبنای صاف بعد از 0.213 ثانیه و نیروی  $0.647 \mu\text{N}$  [29]

شروع به لغزش بر روی صفحه مبنای صاف می‌کند [29]. در "شکل‌های 7 تا 12"، نتایج شبیه‌سازی‌های جدید و نمودار تغییرات نیروی بحرانی راندن نانو/میکرو ذره، صفحه مبنای زبر با پروفیل شش وجهی و چهاروجهی و با  $\lambda = 2r$  و  $\lambda = 4r$  و  $\lambda = 2r$  و  $\lambda = 4r$  ارائه شده‌اند. با توجه به این که در معادلات نیروی چسبندگی در سطوح زبر، عبارت نیروی چسبندگی غیرتاماسی بین ذره و سطح نیز لحاظ شده است، جهت افزایش دقت در مقایسه نمودارها با سطح صاف و تعیین میزان تأثیر زبری سطح، نیروی بحرانی حرکت ذره در سطح صاف نیز با افزودن نیروی چسبندگی غیرتاماسی به معادلات JKR تعیین شده است.

در "شکل‌های 9 و 10"، نمودار تغییرات نیروی بحرانی حرکت لغزشی و غلتی شی نسبت به تغییر شعاع قله زبری برای نانوذراتی با شعاع 400 نانومتر به ترتیب روی سطوح زبری با پروفیل زبری شش وجهی و چهار وجهی، و با طول موج‌های  $\lambda = 2r$  و  $\lambda = 4r$  نشان داده است.

با توجه به نمودارها مشاهده می‌گردد که میکرو ذراتی به شعاع 400 نانومتر در لحظه شروع حرکت روی صفحه مبنای زبر رفتار لغزشی خواهد داشت که مطابق نتایج به دست آمده در تحقیقات گذشته است [29,5]. علاوه در شعاع‌های زبری کوچک تا حدود  $r = 4\text{nm}$ ، مقدار نیروی بحرانی لغزشی ذره

جدول 2 خواص مکانیکی AFM [29]

مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	مدول برشی (GPa)	چگالی (kgm <sup>-3</sup> )
169	0.27	66.54	2330

جدول 3 ضرایب اصطکاک لغزشی/غلتشی [29]

ضریب اصطکاک	مقدار واحد	پارامتر	ضریب اصطکاک
استاتیکی	-	$\mu_s$	
دینامیکی	-	$\mu_d$	
غلتشی	nm	$\mu_r$	
مقاومت برشی سطح	MPa	$\tau$	
مقاومت برشی سطح غلتشی	Pa.m	$\tau_s, \tau_r$	

اولیه مسئله به ترتیب زیر به دست می‌آید. توجه شود که مشتق دوم تغییر شکل زاویه‌ای و تغییر شکل‌های تماسی ناچیز است و معادل صفر فرض شده است.

$$\begin{cases} \theta_0 = 0 \\ \dot{\theta} = \frac{\dot{y}_{\text{sub}}}{H} \\ \ddot{\theta} = 0 \end{cases}, \begin{cases} y_{p_0} = y_{T_0} = 0 \\ \dot{y}_p = \dot{y}_T = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta_{\text{tip}} = \delta_{\text{sub}} = \text{cte.} \\ \ddot{\delta}_{\text{tip}} = \ddot{\delta}_{\text{sub}} = 0 \end{cases}, \begin{cases} \Phi_0 = 0.7^\circ \\ z_{p_0} = L \sin(\Phi_0) \\ \dot{z}_{p_0} = -\dot{y}_{\text{sub}}^2 / H \\ z_{T_0} = z_{p_0} - H \end{cases} \quad (27)$$

### 3-3- نتایج شبیه‌سازی نیروی بحرانی حرکت نانو/میکرو ذره بر سطح زبر در تماس چند نقطه‌ای

براساس هندسه پروفیل چهاروجهی، با فرض توزیع زبری فشرده و طول موج "λ = 4r" تعداد برآمدگی‌های در تماس  $N$  با استفاده از الگوریتم "شکل 5" (براساس هندسه "شکل 4") به دست می‌آید.

در "شکل 5"،  $a_{\text{sub}}$  بیانگر شعاع تماسی ذره با صفحه مبنای  $n$  فاصله مرکز برآمدگی‌ها از یکدیگر بوده و زاویه برحسب درجه است. در الگوریتم "شکل 6، [n/a\_{\text{sub}}]" می‌باشد که علامت []، بیانگرتابع جز صحیح می‌باشد.

در "شکل 6" نمودارهای تغییرات نیروهای وارد، لغزشی و غلتی در حین پرسه راندن و قبل از غلبه بر نیروی چسبندگی ذره با سطح صاف برای ذره کروی به شعاع 50 نانومتر نشان داده شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود، ذره تقریباً پس از زمان 0.213 ثانیه با نیروی بحرانی 0.647 میکرو نیوتون

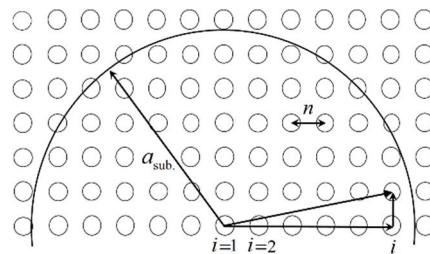
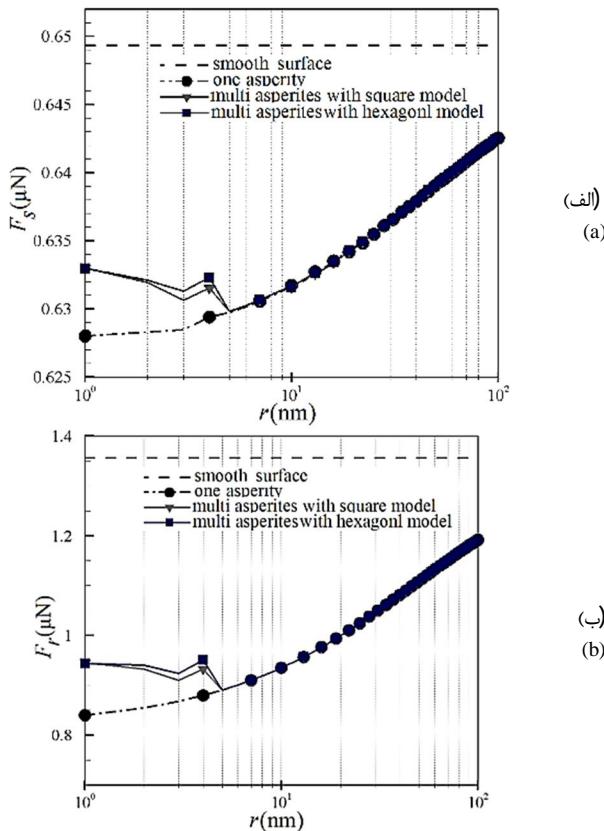


Fig. 4 Tetrahedron roughness distribution with  $\lambda = 4r$  to calculate the contact point number  $N$

شکل 4 توزیع زبری چهاروجهی با فرض  $\lambda = 4r$  برای محاسبه تعداد زبری‌های در تماس  $N$

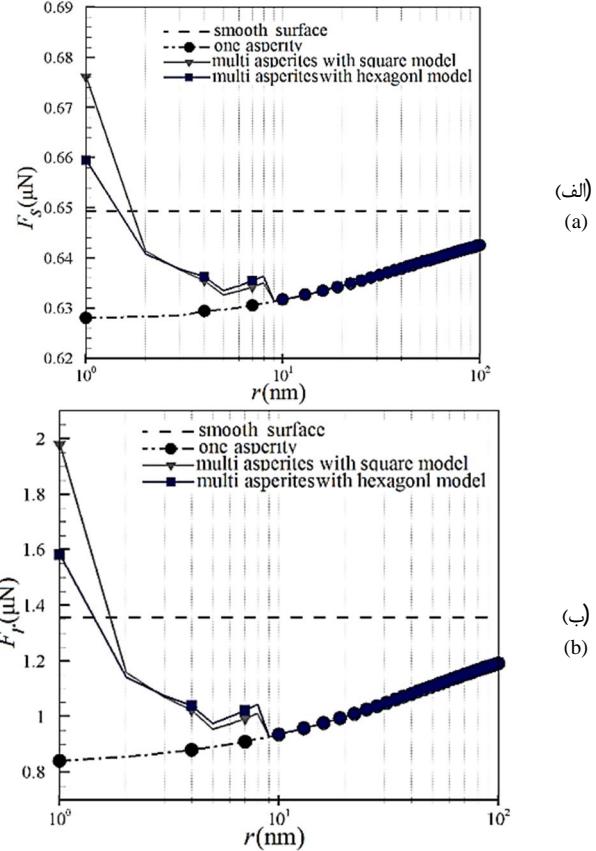
تغییر کرده و بیانگر حرکت غلتی می‌باشد که مطابق نتایج به دست آمده در تحقیقات گذشته است [29,7]. طبق نتایج، پیش‌بینی رفتار ذره براساس مدل‌های تماس چند نقطه‌ای در حد واسط مدل‌سازی‌هایی با فرض سطح کاملاً صاف و تماس چند نقطه‌ای قرار دارد و بیانگر دقیق مدل‌سازی براساس تماس چند نقطه‌ای می‌باشد. در مجموع، مقدار نیروی پیش‌بینی شده توسط مدل‌سازی راندن نانومیکرو ذره در سطوح زبر در مقایسه با مقدار آن برای سطوح صاف کمتر است و دقت آن بستگی به دقیقیت مدل‌سازی سطح زبر دارد. در حالت کلی، نتایج بیانگر کاهش نیروی اصطکاک چسبندگی در سطوح زبر می‌باشند که این مسئله مطابق نتایج مطالعات انجام شده در زمینه چسبندگی و اصطکاک سطح زبر است.

در مجموع با تحلیل کلی نمودارهای به دست آمده در شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌گردد که برای نانوذره با شاعع 50 نانومتری مقدار نیروی بحرانی لغشی در توزیع زبری فشرده با  $\lambda = 2r$  برای پروفیل زبری چهاروجهی در  $r = 1\text{nm}$  2.5 درصد بیشتر از توزیع زبری شش وجهی می‌باشد؛ که به دلیل تغییر تعداد زبری‌های در تماس است و در توزیع زبری فشرده با  $\lambda = 4r$  مقدار نیروی بحرانی لغشی برای پروفیل زبری شش وجهی و چهاروجهی هیچ اختلافی باهم نداشته و باهم برابر هستند که ناشی از قطر کوچک ذره و برابری تعداد نقاط تماسی است. با افزایش شاعع ذرات اختلاف زیادی در مقادیر نیروی بحرانی مشاهده می‌گردد که ناشی از تفاوت تعداد نقاط تماسی



شکل 8 تغییرات نیروی بحرانی راندن نسبت به تغییر شاعع قله زبری روی سطح زبر با طول موج  $\lambda = 4r$  برای ذره به شاعع  $R_p = 50 \text{ nm}$ ; (الف) نیروی لغشی، (ب)

نیروی غلتی



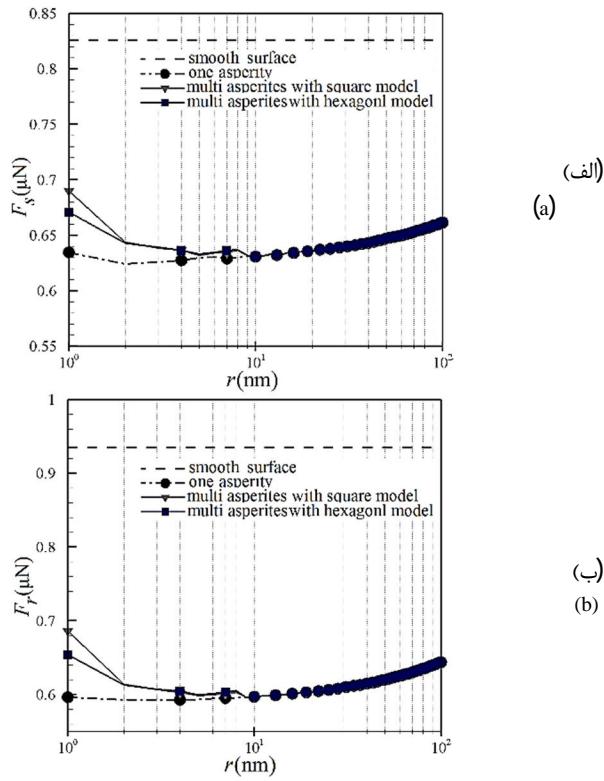
شکل 7 تغییرات نیروی بحرانی راندن نسبت به تغییر شاعع قله زبری روی سطح زبر با طول موج  $\lambda = 2r$  برای ذره به شاعع  $R_p = 50 \text{ nm}$ ; (الف) نیروی لغشی، (ب)

نیروی غلتی

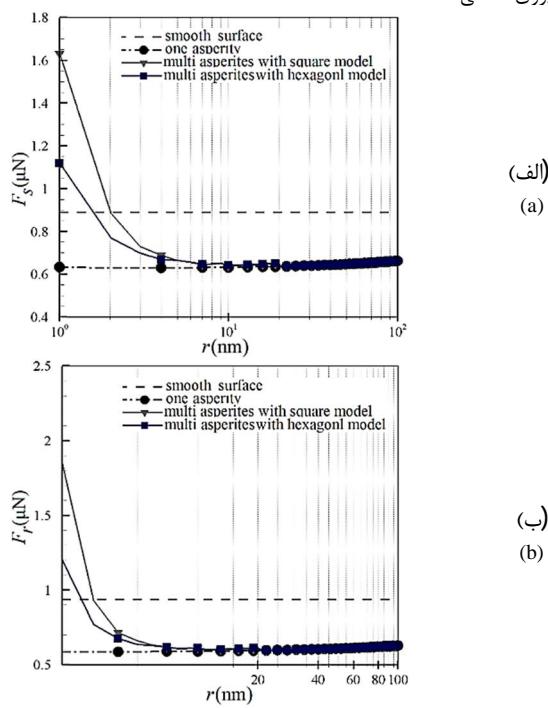
براساس پروفیل زبری شش وجهی کمتر از مقدار پروفیل زبری چهاروجهی است و با افزایش شاعع قله زبری، وضعیت عکس شده است. در  $r=19\text{nm}$  به دست آمده از مدل‌های چند نقطه‌ای به سمت تماس چند نقطه‌ای میل می‌کند و با کاهش فشردگی توزیع زبری، تماس چند نقطه‌ای در زبری‌های کوچک‌تر اتفاق می‌افتد.

در "شکل‌های 11 و 12" تغییرات نیروی بحرانی حرکت لغشی و غلتی نسبت به تغییر شاعع قله زبری برای نانوذره‌ای با شاعع 500 نانومتر به ترتیب روی سطوح زبری با پروفیل زبری شش وجهی و چهاروجهی و طول موج‌های  $\lambda=2r$  و  $\lambda=4r$  نشان داده شده است. طبق نتایج، در شاعع‌های زبری کوچک تا حدود  $r=2\text{nm}$ ، مقدار نیروی بحرانی غلتی ذره براساس پروفیل زبری شش وجهی کمتر از مقدار آن براساس پروفیل زبری چهاروجهی است و با افزایش شاعع قله زبری، وضعیت عکس شده است. در سطوح زبری با توزیع زبری فشرده، با افزایش شاعع زبری در حدود  $r=11\text{nm}$  نیروی به دست آمده از مدل‌های چند نقطه‌ای به سمت تماس چند نقطه‌ای میل می‌کند و با کاهش فشردگی توزیع زبری، تماس چند نقطه‌ای در زبری‌های کوچک‌تر اتفاق می‌افتد.

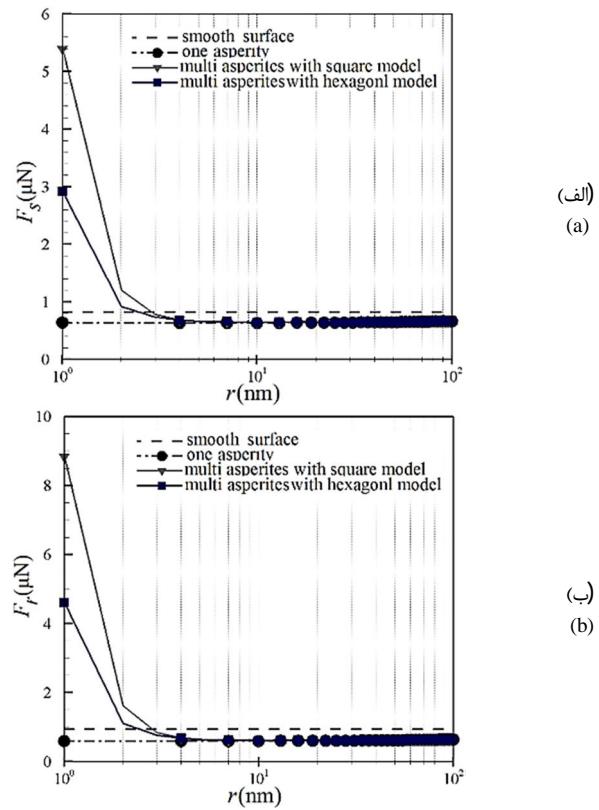
با توجه به نمودارها مشاهده می‌گردد که میکرو ذره‌ای به شاعع 500 نانومتر در لحظه شروع حرکت روی صفحه صاف حرکت لغشی دارد اما با در نظر گرفتن زبری صفحه مینا رفتار پیش‌بینی شده براساس مدل‌سازی‌ها،



**شکل 10** تغییرات نیروی بحرانی راندن نسبت به تغییر شعاع قله زبری روی سطح زبر با طول موج  $\lambda = 4r$  برای ذره به شعاع  $\lambda = 4r$ ؛ (الف) نیروی لغزشی، (ب) نیروی غلتشی



**شکل 11** تغییرات نیروی بحرانی راندن نسبت به تغییر شعاع قله زبری روی سطح زبر با طول موج  $\lambda = 2r$  برای ذره به شعاع  $\lambda = 2r$ ؛ (الف) نیروی لغزشی، (ب) نیروی غلتشی

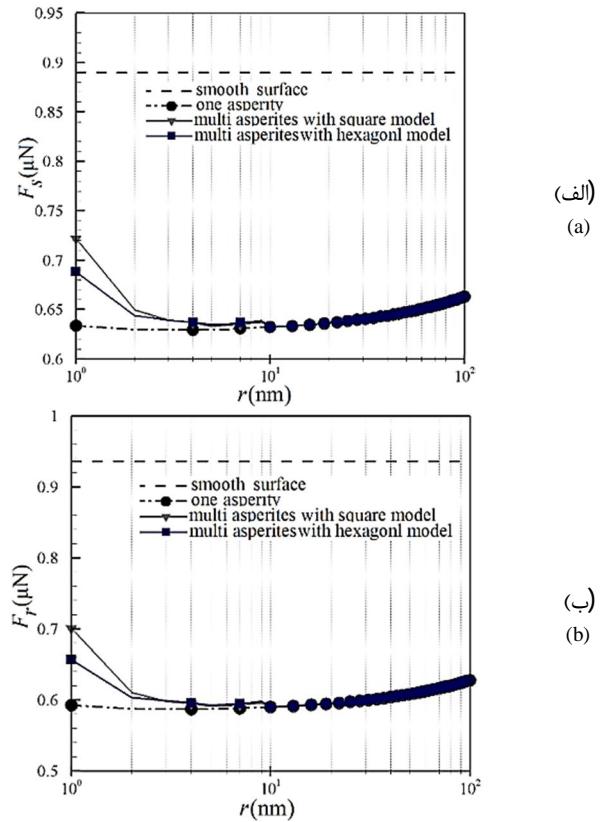


**شکل 9** تغییرات نیروی بحرانی راندن نسبت به تغییر شعاع قله زبری روی سطح زبر با طول موج  $\lambda = 2r$  برای ذره به شعاع  $\lambda = 2r$ ؛ (الف) نیروی لغزشی، (ب) نیروی غلتشی

با استفاده از پروفیل زبری متفاوت و اختلاف فشرده‌گی توزیع زبری می‌باشد. به عنوان نمونه برای ذره 400 نانومتر و در  $\lambda = 2r$  این اختلاف 45 درصد می‌باشد. لذا به طور کلی با افزایش شعاع ذره اختلاف بین تخمین تعداد نقاط تماسی در استفاده از پروفیل زبری ششوجهی و چهاروجهی بیشتر می‌شود. با بزرگ شدن شعاع ذره، سطح تماس نیز افزایش یافته و بنابراین تعداد زبری‌های در تماس نیز افزایش می‌یابد. بعلاوه برای شعاع زبری‌های کوچک، پروفیل زبری ششوجهی، تعداد نقاط تماسی بیشتری را در مقایسه با پروفیل زبری چهاروجهی، برآورد می‌کند. اما با افزایش شعاع زبری‌ها و با استفاده از هر دو پروفیل زبری ششوجهی و چهاروجهی، تعداد نقاط تماسی تقریباً یکسانی به دست می‌آید. البته با استی توچه گردد که تعریف شعاع زبری کوچک در مقایسه با شعاع ذره تعریف می‌شود. به عنوان نمونه برای نانوذره با شعاع 50 نانومتری برای  $\lambda = 2r$  مقدار نیروی بحرانی در  $r = 9\text{ nm}$  در دو حالت توزیع زبری ششوجهی و چهاروجهی باهم برابر می‌شود، در حالی که برای ذره 400 نانومتری این اتفاق در  $r = 19\text{ nm}$  مشاهده می‌شود. همچنین برای نانوذرات با شعاع ثابت، با تغییر شعاع زبری در برخی بازه‌ها با توجه به هندسه توزیع زبری، تعداد زبری‌های در تماس با ذره ثابت باقی می‌ماند. در این حالت به علت افزایش شعاع زبری مقدار نیروی چسبندگی تماسی (با توجه به عبارت اول معادله (8)) و در نتیجه نیروی بحرانی در حال افزایش می‌باشد. در ادامه با افزایش بیشتر شعاع زبری و تغییر تعداد نقاط تماسی به دلیل افزایش شعاع زبری که می‌تواند کاهشی باشد، گاه‌ها کاهش مقدار نیروی بحرانی مشاهده می‌شود که سبب بروز روند صعودی و نزولی در نمودار

تابعی از پارامترهای سطح زبر و شعاع ذره و نیروی چسبندگی سطوح استخراج گردید. مدل تماس چند نقطه‌ای از ترکیب مدل رامپ، تئوری تماسی JKR و شوارتز، و براساس هندسه تماس با پروفیل زبری شش‌وجهی و چهار‌وجهی با ارائه معادلات لازم جهت استخراج نیروهای چسبندگی و سطح تماس واقعی استخراج شد و سپس تغییرات لازم در معادلات دینامیکی راندن ذرات کروی بر روی صفحه مبنای زبر بر مبنای مدل تماس چند نقطه‌ای اعمال شد. نهایتاً در این پژوهش مدل دینامیکی راندن نانو/میکرو ذره کروی بر پایه تئوری تماس چند نقطه‌ای روی سطح زبری با پروفیل توزیع زبری شش‌وجهی و چهار‌وجهی جهت بررسی رفتار دینامیکی جابجایی آن شبیه‌سازی و مطالعه شد. هندسه سطح زبر با استفاده از دو پارامتر اصلی شامل شعاع قله یا اندازه برآمدگی، و طول موج زبری (فرشگی توزیع زبری یا فاصله رأس دو برآمدگی) تعریف شد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از پروفیل هندسه شش‌وجهی و چهار‌وجهی برای طول موج‌های  $2r = \lambda$  و  $\lambda = 4r$  براساس مدل تماس چند نقطه‌ای اجرا شد. نهایتاً رفتار دینامیکی نانو/میکرو ذراتی با شعاع‌های 50، 400، و 500 نانومتر در جابجایی بر سطح زبری با پروفیل هندسه شش‌وجهی و چهار‌وجهی در توزیع فشرده و نیز قله‌دره شبیه‌سازی و تحلیل شد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مقدار نیروی بحرانی کمتر از مقدار به دست آمده برای صفحه مبنای صاف و بیش از مقدار آن با فرض تماس تک نقطه‌ای می‌باشد که بدینه می‌باشد. با افزایش شعاع نانو/میکرو ذرات، اختلاف نیروی بحرانی حرکت با مقادیر نیروی لازم برای حرکت روی سطح صاف افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شعاع قله زبری نیروی بحرانی پیش‌بینی شده براساس مدل‌های چند نقطه‌ای به سمت مقدار به دست آمده با فرض تماس تک نقطه‌ای میل می‌کند. با کاهش فرشگی توزیع زبری، تماس تک نقطه‌ای در زبری‌های کوچک‌تری اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که نیروی بحرانی حرکت ذره با افزایش شعاع زبری و در مقادیر کوچک، ابتدا سیر نزولی داشته و با افزایش بیشتر زبری، شروع به افزایش می‌کند که ناشی از افزایش نیروهای چسبندگی تماسی در شعاع‌های زبری بزرگ است. برای زبری‌های کوچک مقدار نیروی بحرانی لغزشی ذره در تماس چند نقطه‌ای، براساس پروفیل زبری چهار‌وجهی بیشتر از مقدار آن براساس پروفیل زبری شش‌وجهی است که با افزایش شعاع قله زبری، در دو مدل نیروی بحرانی تقریباً یکسان می‌شود. همچنین نیروی بحرانی حرکت با کم شدن فرشگی توزیع زبری کاهش می‌یابد که ناشی از تفاوت تعداد نقاط تماسی است. این اختلاف در پیش‌بینی مقدار نیروی بحرانی در زبری‌های کوچک قابل توجه است. طبق نتایج تحقیقات موجود میکروذراتی به شعاع بیش از 500 نانومتر در لحظه شروع حرکت روی صفحه صاف حرکت لغزشی دارد اما با در نظر گرفتن زبری صفحه مبنای رفتار پیش‌بینی شده براساس مدل‌سازی‌ها، تغییر کرده و میکرو ذرهای به شعاع کمتر از 500 نانومتر روی سطح زبر در لحظه شروع رفتار غلتتشی دارد. پیش‌بینی رفتار لغزشی/غلتشی ذره براساس مدل‌های تماس چند نقطه‌ای در حد واسطه مدل‌سازی‌هایی با فرض سطح کاملاً صاف و تماس تک نقطه‌ای قرار دارد که بیانگر دقت مدل‌سازی براساس تماس چند نقطه‌ای می‌باشد. از آنجایی که در حالت واقعی سطوح کاملاً صاف وجود ندارند، نتایج به دست آمده امکان جابجایی و کنترل دقیق‌تر مسیر حرکت نانو/میکروذرات را بر روی صفحه مبنای واقعی به وجود می‌آورد.



**Fig. 12** Variation of the pushing critical force versus to change of the peak radius of the rough surface with the wavelength  $\lambda = 4r$  for the particle of radius  $R_p = 500$  nm; (a) sliding force, (b) rolling force

شکل 12 تغییرات نیروی بحرانی راندن نسبت به تغییر شعاع قله زبری روی سطح زبر با طول موج  $\lambda = 4r$  برای ذره به شعاع  $\lambda = 4r$ ؛ (الف) نیروی لغزشی، (ب) نیروی غلتتشی

نیروی بحرانی می‌گردد.

#### 4- بحث و جمع‌بندی

هدف از مدل‌سازی پروسه راندن ذره در مقایس نانو توصیف رفتار اصطکاکی و دینامیکی با تکیه بر تحلیل خواص مکانیکی ناهمواری‌ها در اندازه‌های نانومتری است که هدف غایی آن جابجایی دقیق و کنترل موقعیت ذره در هر لحظه از حرکت است که اساس کنترل اتوماتیک جابجایی ذره در توسط میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. با توجه به اهمیت زبری سطح و تأثیر آن بر چسبندگی سطوح و مدل‌سازی دقیق پروسه راندن، و با توجه به این که تحقیقات کمی جهت مدل‌سازی جابجایی ذره با در نظر گرفتن هندسه دقیق پروفیل زبری انجام شده است و نیز تحقیقات موجود با فرض سطح صاف و یا تماس تک نقطه‌ای انجام شده‌اند، در این مقاله به عنوان کار جدید، مدل‌سازی دقیق‌تری از پروسه راندن نانوذره روی صفحه مبنای زبر بر مبنای مدل تماس چند نقطه‌ای ارائه شد.

ابتدا، با توجه به این که طبق هندسه مدل رامپ نیروی چسبندگی بین ذره کروی/سطح زبر برای تماس تک نقطه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است، و در حالت واقعی وقتی شعاع ذره بزرگ‌تر از اندازه شعاع قله برآمدگی‌های سطح زبر باشد، تعداد نقاط تماسی ذره/سطح ذره در منطقه تماسی بیش از یک نقطه خواهد بود و لذا جهت تعیین نیروی موردنیاز برای جدا کردن ذره از سطح زبر، تعداد نقاط تماسی باید مشخص می‌شد. بدین منظور مدل جدیدی برای تماس چند نقطه‌ای بین ذره کروی صاف و سطح زبر به صورت

*Colloid and Interface Science*, Vol. 232, No. 1, pp. 10-16, 2000.

- [17] Y. I. Rabinovich, J. J. Adler, A. Ata, R. K. Singh, B. M. Moudgil, Adhesion between nanoscale rough surfaces: II. Measurement and comparison with theory, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 232, No. 1, pp. 17-24, 2000.
- [18] K. Cooper, N. Ohler, A. Gupta, S. Beaudoin, Analysis of contact interactions between a rough deformable colloid and a smooth substrate, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 222, No. 1, pp. 63-74, 2000.
- [19] M. George, D. Goddard, The characterisation of rough particle contacts by atomic force microscopy, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 299, No. 2, pp. 665-672, 2006.
- [20] Q. Li, V. Rudolph, W. Peukert, London-van der Waals adhesiveness of rough particles, *Powder Technology*, Vol. 161, No. 3, pp. 248-255, 2006.
- [21] E. Beach, G. Tormoen, J. Drelich, R. Han, Pull-off force measurements between rough surfaces by atomic force microscopy, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 247, No. 1, pp. 84-99, 2002.
- [22] M. C. Audry, S. Ramos, E. Charlaix, Adhesion between highly rough alumina surfaces: an atomic force microscope study, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 331, No. 2, pp. 371-378, 2009.
- [23] Y. V. Kudryavtsev, E. Gelinck, H. R. Fischer, Theoretical investigation of van der Waals forces between solid surfaces at nanoscales, *Surface Science*, Vol. 603, No. 16, pp. 2580-2587, 2009.
- [24] N. Fatah, Study and comparison of micron and nanometric powders: Analysis of physical, flow and interparticle properties of powders, *Powder Technology*, Vol. 190, No. 1, pp. 41-47, 2009.
- [25] M. Zakeri, M. Kharazmi, Modeling of Friction in Micro/Nano scale with Random Roughness Distribution, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 175-184, 2014. (in Persian) [فارسی](#)
- [26] M. Sitti, Nanotribological characterization system by AFM based controlled pushing, *Proceedings of the 1th International Conference Nanotechnology IEEE*, Maui, HI, October 28-30, pp. 99-104, 2001.
- [27] L. M. Dorogin, S. Vlassov, B. Polyakov, M. Antsov, R. Löhmus, I. Kink, A. E. Romanov, Real-time manipulation of ZnO nanowires on a flat surface employed for tribological measurements: Experimental methods and modeling, *Physica Status Solidi (b)*, Vol. 250, No. 2, pp. 305-317, 2013.
- [28] H. J. Kim, K. H. Kang, D. E. Kim, Sliding and rolling frictional behavior of a single ZnO nanowire during manipulation with an AFM, *Nanoscale*, Vol. 5, No. 13, pp. 6081-6087, 2013.
- [29] M. Korayem, M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, No. 7-8, pp. 714-726, 2009.
- [30] A. Tafazzoli, M. Sitti, Dynamic modes of nanoparticle motion during nanoprobe-based manipulation, *Proceedings of the 4th International Conference Nanotechnology IEEE*, August 16-19, pp. 35-37, 2004.

## 5- مراجع

- [1] H. Xie, C. Onal, S. Régnier, M. Sitti, *Atomic Force Microscopy Based Nanorobotics: Modelling, Simulation, Setup Building and Experiments*, pp. 1-61, Berlin: Springer, 2011.
- [2] M. R. Falvo, R. Superfine, Mechanics and friction at the nanometer scale, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 237-248, 2000.
- [3] M. Sitti, H. Hashimoto, Controlled pushing of nanoparticles: Modeling and experiments, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 2, pp. 199-211, 2000.
- [4] D. H. Kim, J. Park, B. Kim, K. Kim, Modeling and simulation of nano robotic nano manipulation with an AFM probe, *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, Muju Resort, Jeonbuk, Korea, October 16-19, 2002.
- [5] A. Tafazzoli, M. Sitti, Dynamic behavior and simulation of nanoparticle sliding during nanoprobe-based positioning, *Proceedings of the international mechanical engineering congress and exposition*, ASME, Anaheim, California, USA, November 13-19, pp. 965-972, 2004.
- [6] M. Taheri, 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) [فارسی](#)
- [7] M. H. Korayem, M. Zakeri, Dynamic modeling of manipulation of micro/nanoparticles on rough surfaces, *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 15, pp. 6503-6513, 2011.
- [8] M. Zakeri, J. Faraji, Modeling of the rough spherical nanoparticles manipulation on a substrate based on the AFM nanorobot, *Applied Physics A*, Vol. 117, No. 4, pp. 1947-1962, 2014.
- [9] D. Alducin, G. Casillas, F. Mendoza-Santoyo, A. Ponce, M. José-Yacamán, Kinematics of gold nanoparticles manipulation in situ transmission electron microscopy, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1-7, 2015.
- [10] J. N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces With Applications To Colloidal And Biological Systems*, pp. 150-189, London: Academic Press, 1985.
- [11] K. L. Johnson, K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, pp. 202-277, London: Cambridge university press, 1985.
- [12] U. D. Schwarz, A generalized analytical model for the elastic deformation of an adhesive contact between a sphere and a flat surface, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 261, No. 1, pp. 99-106, 2003.
- [13] K. Fuller, D. Tabor, The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids, *Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 345, No. 1642, pp. 327-342, 1975.
- [14] J. Greenwood, J. Williamson, Contact of nominally flat surfaces, *Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 295, No. 1442, pp. 300-319, 1966.
- [15] H. Rumpf, *Mechanische Verfahrenstechnik*, pp. 95-105, Munich: Hanser, 1975.
- [16] Y. I. Rabinovich, J. J. Adler, A. Ata, R. K. Singh, B. M. Moudgil, Adhesion between nanoscale rough surfaces: I. Role of asperity geometry, *Journal of*