



## تحلیل حساسیت پارامترهای محیطی در جابه‌جایی مقیاس نانو در فضای سه‌بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ‌کا

معین طاهری<sup>۱\*</sup> و سیدحسن بطحائی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران  
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

### چکیده

جابه‌جایی نانو ذرات از دو فاز تشکیل شده است. فاز اول بررسی نیرو و زمان بحرانی و فاز دوم، بررسی حرکت و جابه‌جایی نانو ذرات است. در این مقاله به بررسی فاز اول جابه‌جایی نانو ذرات پرداخته شده است. نیروی بحرانی مقدار نیروی لازم برای غلبه بر نیروهای اصطکاک و چسبندگی سطح است؛ همچنین زمان بحرانی مدت زمانی است که ذره از حالت استاتیکی خود به حالت دینامیکی تغییر پیدا می‌کند. دو دسته پارامتر به صورت عمده بر این دو فاکتور مهم تأثیر گذار است: ۱- پارامترهای محیطی ۲- پارامترهای ابعادی. در این مقاله با استفاده از آنالیز حساسیت که روش آماری ای-فست یکی از آن‌ها است و مدل دقیق اصطکاکی اچ‌کا به بررسی تأثیر پارامترهای محیطی بر نیرو و زمان بحرانی غلتش پرداخته شده است. انرژی سطحی، کارچسبندگی، مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره پارامترهای محیطی مورد بررسی هستند. نانو ذره بدون تغییر شکل بوده است و مدول الاستیسیته ذره، به‌عنوان تأثیر گذارترین فاکتور روی نیرو و زمان بحرانی غلتش در راستای محور  $x$  و مدول الاستیسیته سوزن، اثر گذارترین پارامتر روی نیرو و زمان بحرانی غلتش در راستای محور  $y$  در جابه‌جایی نانو ذرات با استفاده از مدل اصطکاکی اچ‌کا بوده است.

**کلمات کلیدی:** فناوری نانو؛ جابه‌جایی در مقیاس نانو؛ مدل اصطکاکی اچ‌کا؛ آنالیز حساسیت؛ روش آماری ای-فست؛ پارامترهای محیطی.

## Sensitivity Analysis of Peripheral Parameters in Three Dimensional Nano-Manipulation by using HK Model

M. Taheri<sup>1,\*</sup>, S. H. Bathaee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Arak Univ., Arak, Iran.

<sup>2</sup> Bsc. Student, Mech. Eng., Arak Univ., Arak, Iran.

### Abstract

Nano particle manipulation is composed of two phases. First phase is critical force and time investigations and the second phase is nano particle motion and displacements. In this paper the first phase of nano particle manipulation was investigated. Critical force is the amount of force required for overcoming the friction and surface adhesion forces. Also critical time is the duration for particle to change from static to dynamic state. Two noticeable categories of parameters are chiefly effecting on two significant factors: 1- peripheral parameters and 2- dimensional parameters. In this paper by utilizing sensitivity analysis, which A-fast method is one of them, and HK precise friction model effect of peripheral parameters on critical rolling's time and force was studied. Surface energy, work adhesion, elastic modulus of needle and particle and poisson coefficients of needle and particle, are the studied peripheral parameters. With nano particle considered to be rigid and without its deformation, elastic modulus of particle and needle was known as the most effective factor on critical rolling force and time in x-axis direction and y-axis direction in nano manipulation using Hk model respectively.

**Keywords:** Nano-Technology; 3D Nanomanipulation; HK Friction; Sensitivity Analysis-E-Fast Method; Environmental parameters.

## ۱- مقدمه

فرآیند جابه‌جایی<sup>۱</sup> که بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌شود، یکی از مهم‌ترین بخش‌های نانوفناوری است.

میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۲</sup> به‌عنوان ابزاری قدرتمند در زمینه جابه‌جایی نانو ذره و اندازه‌گیری خواص مکانیکی اجسام و نیروهای بین‌اتمی و تصویربرداری از سطوح در مقیاس نانو با دقت اتمی بکار می‌رود. از سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی برای تصویربرداری از سطوح و به‌عنوان ریزبازویی جهت جابه‌جایی اجسام نیز استفاده می‌شود. جابه‌جایی شامل موقعیت‌دهی، جابه‌جایی نانو ذره با کشیدن یا هل دادن روی سطح، بریدن و تشریح، لمس کردن و دندان‌دادن است [۱].

افزایش هزینه‌ها برای تصویربرداری سه‌بعدی به دلیل دقت بالا و نبود هیچ عاملی برای بررسی سطوح، یکی از مشکلات محققان برای انجام آزمایش‌ها شده است. میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه فناوری نانو به یاری محققان آمده است که برای مشاهده و کنترل نانو ساختارها از آن استفاده نمایند [۲]. یکی از کاربردهای میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه نانوبات‌ها است که امروزه توجه بسیاری از دانشمندان و صنعتگران را به‌خود جلب کرده است. به‌همین خاطر کورایم و همکارانش، به مدل‌سازی سه‌بعدی حرکت دینامیکی برای تیرک‌های یک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آن‌ها تیرک‌های مستطیل شکل، ۷ شکل و خنجر شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳]. مدل‌سازی دقیق و شبیه‌سازی دینامیک تیرک برای طراحی و ساخت ریزساختارها، بسیار دقیق و ضروری است. ضخامت تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی در بازه میکرون قرار گرفته است. با کوچک‌تر شدن اندازه ضخامت تیرک، وضوح و حساسیت آن نیز بیش‌تر شده است. بر اساس نظریه کوپل تنش اصلاح شده<sup>۳</sup> و نظریه تیر اوپلر- برنولی، رفتار دینامیکی میکروتیر میکروسکوپ نیروی اتمی با بکارگیری روش گلرکین<sup>۴</sup> تحلیل شده است؛ همچنین تجزیه و تحلیل پاسخ‌های فرکانسی میکروسکوپ نیروی اتمی بر اساس مدل‌های کلاسیک و غیرکلاسیک، مورد بررسی قرار گرفته است و به مقایسه نتایج بدست آمده پرداخته شده است. نتایج نشانگر این است که اثر اندازه‌ی تیرک تأثیر قابل توجهی بر دینامیک میکروسکوپ

نیروی اتمی گذاشته است [۴]. جابه‌جایی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی به‌صورت معمول بسیار پیچیده و وقت‌گیر است که با استفاده از یک الگوریتم برنامه‌ریزی مسیر توانسته است بهبود یابد. کورایم و همکارانش با استفاده از یک محیط واقعیت مجازی توانسته‌اند، مسیر اصلی حرکت نانو ذرات را به‌صورت بهینه به چندین بخش تقسیم کنند. این تکنیک با استفاده از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر، باعث کاهش پیچیدگی پارامترها و کاهش زمان جابه‌جایی نانو ذرات شده است [۵]. رفتار ارتعاش غیرخطی یک میکروسکوپ نیروی اتمی توسط عباسی، مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار نوک سوزن به‌شدت از لحاظ تغییر شکل غیرخطی بوده و دائماً به سرعت در حال تغییر شکل و فرکانس آن نیز، دارای نوسانات بسیار زیادی بوده است. معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر رفتار حرکت نوک سوزن با استفاده از نظریه تیر اوپلر- برنولی به‌دست آمده است [۶]. برای رسیدن به یک جابه‌جایی ایده‌آل داشتن یک مدل دقیق شامل، اثر اندازه و شرایط محیطی ضروری است. کورایم و همکارانش یک مدل چندبعدی غیرکلاسیک در محیط خلاء، مایع و مرطوب را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج جابه‌جایی نشان داده است که انحراف پیش‌بینی شده در مدل غیرکلاسیک، کمتر از مدل کلاسیک است. مقایسه جابه‌جایی نانو ذرات نشان داده است که جابه‌جایی در محیط مایع به شرایط ایده‌آل، بسیار نزدیک‌تر است، زیرا نانو ذرات غوطه‌ور حداقل آسیب ممکن را دیده‌اند [۷]. علم بیولوژیک بسیاری از پیشرفت‌های حال حاضر خود را مرهون میکروسکوپ نیروی اتمی است. دانشمندی که در علوم زیست‌شناسی در حال آزمایش و تحقیق هستند، نام این میکروسکوپ برای آن‌ها آشنا است. از جمله کاربردهای آن در این زمینه می‌توان به اندازه‌گیری نیروهای بین مولکولی، شناسایی خواص مختلف سلول‌ها، تصویربرداری و هل دادن آن‌ها اشاره کرد [۸]. میکروتیرک میکروسکوپ نیروی اتمی در اثر فرکانس رزونانس برانگیخته می‌شود، پس مطالعه فرکانس رزونانس بسیار پراهمیت است. احمدی و همکارانش، رفتار ارتعاش غیرخطی یک میکروتیرک در محیط مایع را با یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی، مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده که افزایش چگالی و گرانیوی مایع موجب کاهش فرکانس رزونانس شده است [۹]. با پیشرفت فناوری نانو،

<sup>4</sup> Galerkin

<sup>1</sup> Manipulation

<sup>2</sup> AFM: Atomic Force Microscopic

<sup>3</sup> MCS: Modified Couple Stress

ریز فناوری میکرو ماشین کاری و میکروالکترونیک نیز از این حیث دور نمانده است. میکروهیترها<sup>۱</sup> که امروزه کاربرد زیادی در میکرو حسگرها پیدا کرده‌اند، توسط عقیفی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. عقیفی دو میکروهیتر با هندسه یکسان، اما با دو فلز مختلف را روی یک بستر سیلیکون بر اساس میکرو ماشین کاری حجمی، مورد بررسی قرار داده است که میکروهیتر ساخته شده از جنس طلا پاسخ زمانی کمتری و توان مصرفی بیشتری نسبت به میکروهیتر ساخته شده از جنس پلاتین داشته است [۱۰]. مدل سازی و شبیه سازی رفتار دینامیکی یک نانو ذره روی یک سطح زیر در حین جابه جایی بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل تماس چند نقطه‌ای، توسط ذاکری و همکارش ارائه شده است. این مدل که از ترکیب مدل تماس تک نقطه‌ای رامپ<sup>۲</sup> با مدل‌های تماسی جی کی آر<sup>۳</sup> و شوارتز<sup>۴</sup> استخراج گردیده، نشان داده است که استفاده از مدل تماسی چند نقطه‌ای به خصوص در شعاع‌های زبری کوچک تأثیر به سزایی در تعیین نیروی بحرانی جابه جایی دارد [۱۱]. روش آنالیز حساسیت ای-فست<sup>۵</sup>، توسط طاهری به منظور محاسبه دقیق پارامترهای اثرگذار زمان و نیروی بحرانی ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که عامل ضخامت تیرک، اثرگذارترین عامل بر نیروهای بحرانی و عامل ارتفاع سوزن، اثرگذارترین عامل بر زمان‌های بحرانی جابه جایی سه بعدی بوده است [۱۲]. مدل سازی جابه جایی در مقیاس نانو به شکل راندن و نیروهای عکس العمل آن بر ذره توسط فالو<sup>۶</sup> ارائه شده است که در آن نیروهای ناشی از تغییر مقیاس در نظر گرفته نشده است [۱۳]. از مهم ترین عامل‌های تأثیر گذار در فرآیند جابه جایی نانو ذرات، مدل اصطکاکی مورد استفاده شده در آن است. از مدل‌های دقیق اصطکاکی می توان به اچ کا<sup>۷</sup> اشاره کرد. این مدل که در بردارنده عامل مهم چسبندگی و نیروهای آن است، از مدل‌های دقیق در این زمینه به شمار می رود. طاهری برای اولین بار در فرآیند جابه جایی نانو ذرات طلا از مدل اصطکاکی اچ کا استفاده کرده است. نتایج نشان می دهد که نیروی بحرانی در فضای سه بعدی نسبت به دوبعدی با اختلاف

اثرگذاری ۱۶ درصد رو برو شده است [۱۴]. مدل اصطکاکی لاگره<sup>۸</sup> که یکی از دقیق ترین مدل‌های اصطکاکی حال حاضر است، نیز توسط طاهری در فرآیند جابه جایی نانو ذرات مورد استفاده قرار گرفته است. مدل اصطکاکی لاگره به دلیل در نظر گرفتن دو عامل مهم چسبندگی سطح و سرعت ثابت با حالت استریک<sup>۹</sup> مسئله، دارای پیچیدگی خاصی است. نتایج استفاده از این مدل اصطکاکی همراه با مدل سازی دینامیکی حاکی از آن است که نیروی بحرانی در سه بعد نسبت به دوبعد با اختلاف ۱۸ درصدی همراه بوده است [۱۵]. تلاش‌های اولیه برای استخراج روابط و بررسی ثنوری و مدل سازی نیروها در فرآیند جابه جایی نانو ذرات در سطوح بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی، توسط جونو<sup>۱۰</sup> و همکارانش انجام گرفته است. آن‌ها یک مدل ساده از چگونگی کنش و واکنش نیروها بین نانو ذره کروی و نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی که آن‌هم به صورت یک کره فرض شده را ارائه کرده‌اند [۱۶]. فرجی و همکارانش، اهمیت فرآیند جابه جایی و محاسبه دقیق نیرو و زمان بحرانی در این فرآیند را بررسی کرده‌اند. در زمینه جابه جایی دوبعدی، کارهای مختلفی صورت پذیرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو و زمان بحرانی جابه جایی با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوئل در جابه جایی دوبعدی بررسی شده است، همچنین در زمینه جابه جایی سه بعدی نیز، مدل سازی‌های مختلفی با استفاده از مدل‌های اصطکاکی متفاوت صورت پذیرفته است؛ اما در جابه جایی سه بعدی بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در فرآیند جابه جایی و نیرو و زمان بحرانی حرکت صورت پذیرفته است [۱۷]. طاهری چهار مدل تماسی کروی شامل، مدل‌های هرتز<sup>۱۱</sup>، جی کار آر<sup>۱۲</sup>، دی ام تی<sup>۱۳</sup> و بی سی پی<sup>۱۴</sup> را در جابه جایی سه بعدی جهت مدل سازی دقیق حرکت نانو ذره بکار برده است. نتایج این بررسی نشان داده است که مدل تماسی هرتز، کمترین میزان نیرو و زمان بحرانی را صرف کرده است که این امر به دلیل در نظر نگرفتن نیروهای چسبندگی است [۱۸]. کاستیلو و همکاران، جابه جایی نمونه‌های بیولوژیکی با استفاده از روش-های میکرو/نانو را بررسی کرده‌اند. آن‌ها به بررسی روش‌های

<sup>8</sup> LuGre

<sup>9</sup> Stribeck

<sup>10</sup> Junno

<sup>11</sup> Hertz

<sup>12</sup> JKR

<sup>13</sup> DMT

<sup>14</sup> BCP

<sup>1</sup> Micro Heaters

<sup>2</sup> Ramp

<sup>3</sup> JKR

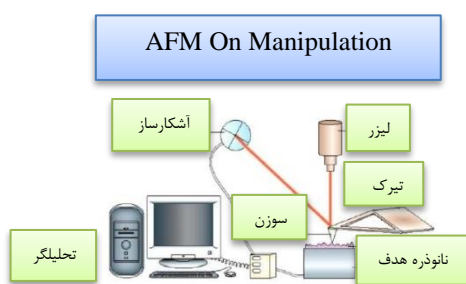
<sup>4</sup> Schwartz

<sup>5</sup> E-Fast

<sup>6</sup> Flavo

<sup>7</sup> HK

شکل ۱ فرآیند کلی جابه‌جایی را نشان می‌دهد، در این فرآیند تیرک و سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی، نور لیزر، آشکارساز و تحلیلگر از ابزارهای اساسی فرآیند به‌شمار می‌آیند که پس از تماس بین نانو ذره هدف و سوزن تیرک نور لیزر از طریق آشکارساز به رایانه به‌عنوان تحلیلگر منتقل شده است و پارامترهای لازم آنالیز و بررسی خواهد شد.



شکل ۱- فرآیند جابه‌جایی در مقیاس نانو با استفاده از AFM

## ۲- مدل‌سازی

مدل‌سازی در این مقاله از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

- ❖ مدل آنالیز حساسیت که شامل تشریح روش آماری ای-فست و روابط آن است که در نهایت منجر به استخراج تأثیر کمی هر یک از پارامترهای محیطی روی نیرو و زمان بحرانی غلتش شده است.
- ❖ مدل اصطکاکی اچ‌کا که دربردارنده روابط مدل‌سازی اصطکاکی است و بر پایه معادله آمونتون<sup>۲</sup> و سرعت ثابت است.
- ❖ مدل سینماتیکی و دینامیکی سه‌بعدی که شامل بررسی نیروهای عمل و عکس‌العمل در فضای سه‌بعدی برای ذره است.

### ۲-۱- بررسی روش آنالیز حساسیت ای-فست

آنالیز حساسیت به مطالعه چگونگی عدم قطعیت در خروجی مدل (عددی و غیر عددی) ناشی از منابع مختلفی از عدم قطعیت در عامل‌های ورودی مدل گفته می‌شود [۱۹].

مختلف در دسترس برای جابه‌جایی و یکپارچه‌سازی مواد بیولوژیکی به شیوه‌ای کنترل شده، یا با لغزش آن‌ها در امتداد یک سطح (جابه‌جایی دوبعدی) و یا توسط خوشه‌بندی آن‌ها و حرکت آن‌ها به موقعیت جدید (جابه‌جایی سه‌بعدی) و یا توسط جابه‌جایی و جابه‌جایی آن‌ها با استفاده از نیروهای خارجی پرداخته‌اند [۱۹]. ارسواگا و همکارانش، به بررسی مجموعه DNA ویروسی با استفاده از مدل‌های مکانیک مولکولی پرداخته‌اند [۲۰]. مکنیم و همکاران به عوامل مؤثر بر مقاومت چسبندگی بین سلول‌های زنده و سوزن کلونیدی اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند [۲۱]. ایکائی و همکاران کشیدن و هل دادن مولکول‌های پروتئین توسط میکروسکوپ نیروی اتمی را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۲]. خی و همکاران میکروسکوپ نیروی اتمی مبتنی بر کاربرد نانورباتیک برای تحقیقات پزشکی را بررسی نموده‌اند [۲۳]. شن و همکاران اثر رطوبت محیط بر قدرت نیروی چسبندگی تک‌سلولی مخمر داخل محیط زیستی را بررسی نموده‌اند. در تحقیقات آن‌ها یک روش جدید برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی تک‌سلولی مخمر بر اساس سیستم جابه‌جایی نانورباتیک در داخل محیط میکروسکوپ الکترونی اسکنی ارائه شده است [۲۴]. نیروی بحرانی جابه‌جایی مقدار نیرویی است که ذره از حالت استاتیک به دینامیک تغییر پیدا کرده و مقدار زمانی که صرف این عملیات می‌شود، زمان بحرانی نامیده می‌شود. یکی از بخش‌های مهم بهینه‌سازی آنالیز حساسیت<sup>۱</sup> است. از آنالیز حساسیت برای بررسی اثر ورودی‌های مختلف روی یک یا چند خروجی استفاده می‌شود. استفاده از روش‌های مختلف آنالیز حساسیت در عین حال که می‌تواند سبب ساده‌سازی معادلات جابه‌جایی گردد، می‌تواند در انتخاب دقیق عامل‌ها به منظور انجام صحیح فرآیند جابه‌جایی کمک نماید. در این مقاله با استفاده از روش ای-فست که از روش‌های آنالیز حساسیت آماری است، به همراه مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیک در فضای سه‌بعدی و مدل اصطکاکی اچ‌کا به بررسی تأثیر پارامترهای محیطی روی نیرو و زمان بحرانی غلتش پرداخته شده است و اثر هر یک از این پارامترهای محیطی روی نیرو و زمان بحرانی غلتش در راستای محورهای x و y روی صفحه مبنا به‌دست آمده است.

<sup>1</sup> Sensitivity Analysis

<sup>2</sup> Amonton's Equation

$$\hat{D} = \bar{y}^{(2)} - (\bar{y}^{(1)})^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^1(s) ds \right]^2 \quad (5)$$

$f(s)$  را توسط سری فوریه بسط می‌دهیم و رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$f(s) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \{A_j \cos js + B_j \sin js\} \quad (6)$$

ضرایب فوریه  $A_j$  و  $B_j$  به صورت معادلات (۷) و (۸) تعریف می‌شوند:

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos js ds \quad (7)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin js ds \quad (8)$$

در محدوده عددی فرکانس‌ها  $z \in Z = \{-\infty, \dots, 0, \dots, \infty\}$  تعریف می‌شوند. طیف توسعه یافته سری فوریه به صورت  $\Lambda = A_j^2 + B_j^2$  تعریف می‌شود. چون  $f(s)$  یک تابع با مقادیر عددی حقیقی است،  $A_j$ ،  $B_j$  و  $\Lambda_j$ ، دارای خصوصیات ذکر شده در معادله (۹) می‌باشند:

$$A_{-j} = A_j; \Lambda_{-j} = \Lambda_j; B_{-j} = -B_j \quad (9)$$

روش E-FAST روشی ارزان برای محاسبه نسبت به شاخص‌های سو بل است؛ چون در روش E-FAST یک نمونه درست می‌شود، اما روش سو بل نیازمند ساخت چندین نمونه متفاوت است [۲۲].

### ۲-۲- مدل اصطکاکی اِچ‌کا

مدل اصطکاکی اِچ‌کا را به طور کلی می‌توان مدل اصطکاکی تعمیم یافته کولمب دانست با این تفاوت که در این مدل اثر چسبندگی سطح و بستر به طور دقیق، مورد بررسی قرار گرفته

فری<sup>۱</sup> آنالیز حساسیت را تأثیر تغییرات مقادیر ورودی بر خروجی مدل و همانند آن سالتلی<sup>۲</sup> آنالیز حساسیت را بررسی تغییرات خروجی با توجه به داده‌های ورودی تعریف کرده‌اند [۲۰].

در جدول ۱ جمع‌بندی مختصری از روش‌های آنالیز حساسیت، مزایا و معایب آن‌ها ارائه شده است.

### ۲-۱-۱- محاسبه شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی

واریانس مدل را می‌توان به واریانس عامل‌ها و عکس‌العمل‌های آن‌ها تقسیم کرد. طبق تئوری ویل<sup>۳</sup> تمین گشتاور خروجی  $y$  در طول منحنی به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید [۲۱].

$$\bar{y}^{(n)} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{2\tau} \int_{-\tau}^{\tau} f(x_1(s), x_2(s), \dots, x_n(s)) ds \quad (1)$$

تئوری ویل بر این دلالت دارد که:

$$\langle y^{(n)} \rangle \cong \bar{y}^{(n)} \quad (2)$$

واریانس مدل برابر است با:

$$D = y^{(2)} - \langle y^{(1)} \rangle^2 \cong \bar{y}^2 - (\bar{y}^{(1)})^2 \quad (3)$$

ترم‌های معادله (۳) از معادله (۱) به دست می‌آیند؛ بنابراین عدد گویای محدود و مثبت مانند  $\tau$  وجود دارد که  $f(s+\tau) = f(s)$  از این رو منحنی در مسیر بسته تعریف می‌شود. برای سادگی  $f(x_1(s), x_2(s), \dots, x_n(s))$  را به صورت  $f(s)$  نشان می‌دهیم. با فرض  $f(s)$  در بازه  $(-\pi, \pi)$  معادلات (۱) و (۲) به صورت معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آیند.

$$\bar{y}^{(n)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^n(s) ds \quad (4)$$

جدول ۱- مزایا و معایب روش‌های آنالیز حساسیت

نام روش	پایه تحلیل	مزایا	معایب
FAST	واریانس	برای مدل‌های غیر خطی و پیچیده کاربرد دارد.	قادر به محاسبه‌ی برهم‌کنش بین ورودی‌ها را نیست.
سو بل	واریانس	قادر به محاسبه‌ی برهم‌کنش بین ورودی‌ها و برای مدل‌های خطی و غیر خطی کاربرد دارد.	تعداد نمونه‌ها برای تحلیل حساسیت زیاد است و وقت‌گیر است.
EFAST	واریانس	برای مدل‌های خطی و غیر خطی کاربرد دارد. تعداد نمونه‌ها برای انجام تحلیل کم است.	دقت کمتری نسبت به مدل‌های دیگر برپایه‌ی واریانس دارد.

<sup>3</sup> Weyl

<sup>1</sup> Frey

<sup>2</sup> Saltelli

۲-۳- مدل دینامیکی و سینماتیکی جابه‌جایی سه بعدی در مدل‌سازی سینماتیک و دینامیک با بهره‌گیری از قانون دوم نیوتن، می‌توان با داشتن موقعیت‌های ذره در فضای سه‌بعدی به ترتیب با بهره‌گیری از سینماتیک ذرات و مشتق‌گیری از هر کدام از موقعیت‌های ذرات نسبت به پارامتر زمان به ترتیب سرعت و شتاب نانوذرات را به دست آورد. نیروهای حاصل در این معادلات طبق قانون سوم نیوتن از عمل و عکس‌العمل نیروهای انتهایی سوزن تیرک و نانوذره به دست آمده است؛ همچنین در استخراج این معادلات بیشینه عمق نفوذ سوزن در یک نانو ذره در نظر گرفته شده است [۱۲]. برای محاسبه معادلات سینماتیکی تغییر شکل در سوزن و محاسبه شتاب برای مدل‌سازی سوزن و استخراج نیروهای عمل و عکس‌العمل در سطح تماسی تیپ-نانوذره روابط سینماتیکی مربوط به نقاط p (محل اتصال انتهایی سوزن-تیرک) و t (محل تماس نوک سوزن-نانوذره در راستای عمق نفوذ ماکزیمم) به صورت زیر به دست آمده‌اند.

$$x_t = x_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \cos \psi \quad (17)$$

$$y_t = y_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \sin \psi \quad (18)$$

$$z_t = z_s + (R_p + R_t - \delta_t) \sin \varphi + (R_p - \delta_s) \quad (19)$$

$$x_p = x_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \cos \psi + H \sin \alpha \quad (20)$$

$$y_p = y_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \sin \psi - H \sin \theta \quad (21)$$

$$z_p = z_s + (R_p + R_t - \delta_t) \sin \varphi + (R_p - \delta_s) + H \cos \alpha \cos \theta \quad (22)$$

اگر از رابطه‌های ۱۷ تا ۲۲ دوبار نسبت به پارامتر زمان مشتق گرفته شود، معادلات ۲۳ تا ۲۸ بیانگر کمیت شتاب خواهند بود.

$$\ddot{x}_t = \ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi \quad (23)$$

$$\ddot{y}_t = \ddot{y}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi \quad (24)$$

$$\ddot{z}_t = \ddot{z}_s - \ddot{\delta}_t \sin \varphi - \ddot{\delta}_s \quad (25)$$

$$\ddot{x}_p = \ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi + H \ddot{\alpha} \cos \alpha - H \dot{\alpha}^2 \sin \alpha \quad (26)$$

$$\ddot{y}_p = \ddot{y}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi - H \ddot{\theta} \cos \theta + H \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (27)$$

است. این اثر چسبندگی حاصل لغزش ذرات در مقیاس ماکروسکوپی است که نظریه آمونتون را نیز با خود به همراه دارد. در نهایت معادله کلی  $f_T$ ، این مدل اصطکاکی را می‌توان مجموع نیروی عمودی سطح  $f_N$  و نیروی چسبندگی  $f_0$  نوشت؛ همچنین سطح ظاهری اجسام در کمیت ماکروسکوپی اثری در آن نداشته است.

$$f_T = \mu(f_N + f_0) \quad (10)$$

اگر یک تماس در مقیاس نانو/میکرو رخ دهد، نیروی اصطکاک را می‌توان به صورت معادله (۱۱) نمایش داد.

$$f_T = \tau A \quad (11)$$

پارامترهای مرتبط با نیروی عمودی در معادله (۱۱)، مساحت واقعی تماس میکرو/نانو با  $A$  و استحکام برشی با  $\tau$  نشان داده شده‌است؛ همچنین تنش اصطکاکی و شعاع تماس بی‌بعد به صورت  $\bar{a} = a/b$  و  $\bar{\tau}_f = \tau_f/G^*$  شرح داده شده است. در این روابط  $a$  شعاع تماس،  $b$  دامنهی بردار برگرد  $G^*$  مدول برشی مؤثر است. این مقدار با توجه به مدول برشی دو جسم در تماس با هم است که از رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۲۴،۲۳].

$$G^* \times (G_1 G_2) = 2 \times (G_1 G_2) \quad (12)$$

رابطه‌ای که بیانگر مقدار  $\bar{\tau}_f$  باشد، به صورت زیر حاصل شده است.

$$\bar{\tau}_f = \begin{cases} \log(\log \bar{\tau}_{f1}) & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ \log(M \log \bar{a} + b) & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \log(\log \bar{\tau}_{f2}) & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (13)$$

با توجه به روابط به دست آمده معادلات (۱۴، ۱۵) را می‌توان نوشت:

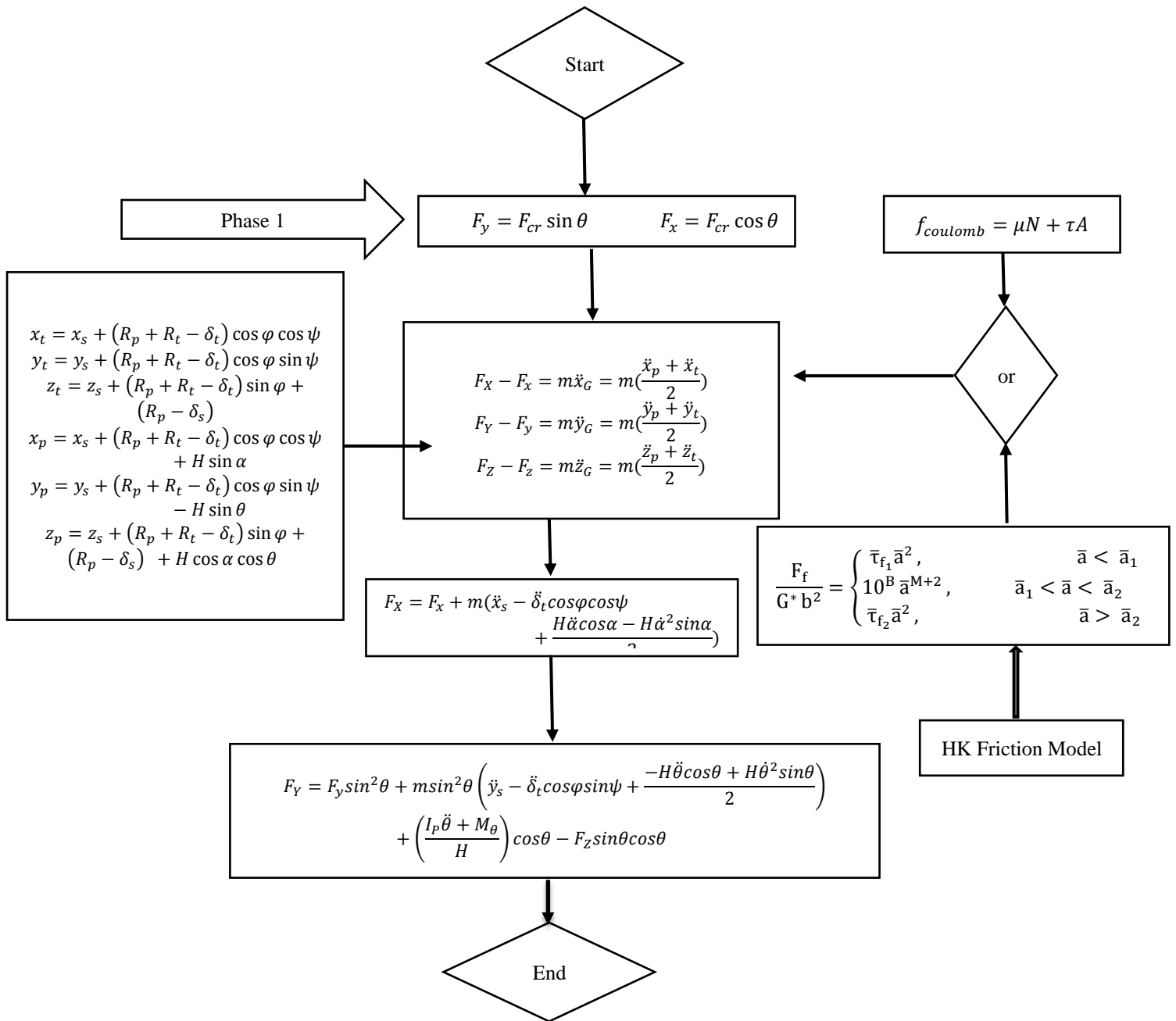
$$\log M = - \frac{\bar{\tau}_{f1}}{\bar{a}_2} \quad (14)$$

$$\log B = \frac{(\bar{\tau}_{f1} \times \bar{a}_2 - \bar{\tau}_{f2} \times \bar{a}_1)}{(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1})} \quad (15)$$

در نهایت می‌توان نیروی اصطکاکی مدل اچ‌کا را از رابطه (۱۶) به دست آورد.

$$F_f = \begin{cases} G^* b^2 \times (\bar{\tau}_{f1} \bar{a}^2) , & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ G^* b^2 \times (10^B \bar{a}^{M+2}) , & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ G^* b^2 \times (\bar{\tau}_{f2} \bar{a}^2) , & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (16)$$

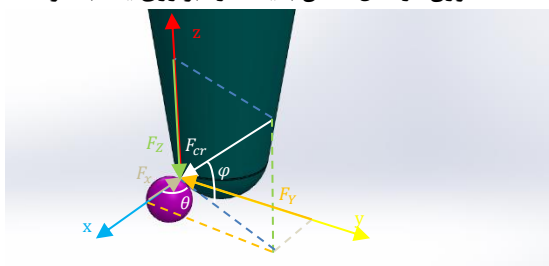
<sup>1</sup> Burger



شکل ۲- الگوریتم مدل سازی سینماتیک و دینامیک فاز اول جابه جایی با استفاده از مدل اصطکاکی اچکا



(الف) سوزن در حال تماس با یک ذره بر روی یک بستر



(ب) نیروی بحرانی وارد بر یک نانو ذره

شکل ۳- نیروهای وارد بر یک نانو ذره توسط تیرک

### ۳- شبیه‌سازی

در این بخش پس از مدل‌سازی دینامیکی و سینماتیکی نانو ذرات و در نظر گرفتن مدل دقیق اصطکاکی اچ‌کا به شبیه‌سازی با استفاده از آنالیز حساسیت پرداخته شده است. داده‌های ورودی به‌صورت تصادفی با استفاده از روش آماری ای-فست به‌دست آمده است. برای بررسی اثرگذاری هر یک از پارامترهای محیطی که شامل انرژی سطحی، کار چسبندگی، مدول الاستیسیته و ضریب پیواسون است، روی نیرو و زمان بحرانی غلتش روی صفحه‌ی مینا از نمودارهای گرافیکی بهره گرفته شده است. در این بخش تأثیر کلی و لحظه‌ای هر یک از این عوامل روی دو فاکتور مهم نیرو و زمان بحرانی به‌دست آمده است. به‌طوری که با افزایش یا کاهش هرکدام از این عوامل، مقدار افزایش یا کاهش نیرو و زمان بحرانی نیز، مورد بررسی قرار گرفته است. حرکت نانو ذره هدف روی یک سطح و داخل صفحه صورت می‌گیرد. به همین دلیل نیروی بحرانی تنها در راستای x و y تعریف می‌شود و در راستای z هیچ نیرویی به دلیل نداشتن حرکت وجود ندارد.

### ۳-۱- بررسی تأثیر عوامل محیطی روی نیروی بحرانی

#### غلتش

در شکل ۴ اثر پارامترهای محیطی روی نیروی بحرانی غلتش مشاهده می‌شود. نوع برازش منحنی‌های به‌دست آمده

$$\begin{aligned} \ddot{z}_p &= \ddot{z}_s - \ddot{\delta}_t \sin \varphi - \ddot{\delta}_s - H \ddot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta \\ &\quad - H(\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos \alpha \cos \theta \\ &\quad - H\ddot{\theta} \cos \alpha \sin \theta \end{aligned} \quad (28)$$

معادلات دینامیک سه‌بعدی را به‌صورت روابط زیر می‌توان نشان داد.

$$F_X - F_x = m\ddot{x}_G = m\left(\frac{\ddot{x}_p + \ddot{x}_t}{2}\right) \quad (29)$$

$$F_Y - F_y = m\ddot{y}_G = m\left(\frac{\ddot{y}_p + \ddot{y}_t}{2}\right) \quad (30)$$

$$F_Z - F_z = m\ddot{z}_G = m\left(\frac{\ddot{z}_p + \ddot{z}_t}{2}\right) \quad (31)$$

$$F_Y H \cos \theta + F_Z H \sin \theta - M_\theta = I_p \ddot{\theta} \quad (32)$$

$$-F_X H \cos \alpha + F_Z H \sin \alpha - M_\alpha = I_p \ddot{\alpha} \quad (33)$$

لذا با جایگذاری معادلات شتابی ۲۳ تا ۲۸ برای محاسبه‌ی نیرو خواهیم داشت:

$$F_X = F_x + m\left(\ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi + \frac{H \ddot{\alpha} \cos \alpha - H \dot{\alpha}^2 \sin \alpha}{2}\right) \quad (34)$$

$$\begin{aligned} F_Z &= F_z \cos^2 \alpha + m \cos^2 \alpha (\ddot{z}_s - \ddot{\delta}_t \sin \varphi - \ddot{\delta}_s \\ &\quad - H \ddot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta - H(\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos \alpha \cos \theta \\ &\quad + \frac{-H\ddot{\theta} \cos \alpha \sin \theta}{2}) \\ &\quad + \left(\frac{I_p \ddot{\alpha} + M_\alpha}{H}\right) \sin \theta + F_x \sin \alpha \cos \alpha \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} F_Y &= F_y \sin^2 \theta \\ &\quad + m \sin^2 \theta \left( \ddot{y}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi \right. \\ &\quad \left. + \frac{-H\ddot{\theta} \cos \theta + H\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} \right) \\ &\quad + \left(\frac{I_p \ddot{\theta} + M_\theta}{H}\right) \cos \theta - F_z \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (36)$$

در جدول (۲) موقعیت قرارگیری سوزن تیرک نسبت نانو ذره هدف مشخص شده است که با استفاده از این زوایا به تجزیه و تحلیل روابط دینامیک و سینماتیک پرداخته شده است.

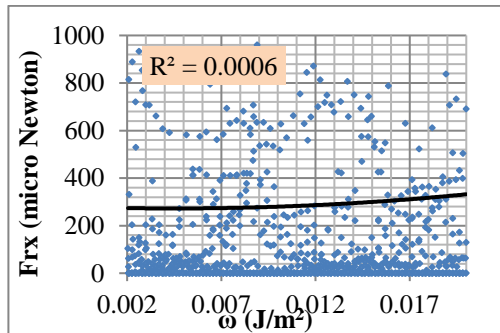
جدول ۲- مقادیر اولیه زوایا تیرک

$\theta$	$\varphi$
$30^\circ$	$45^\circ$

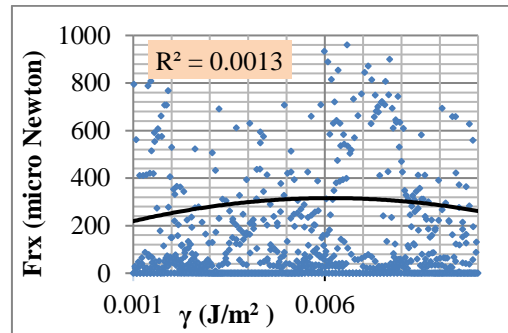


نیز کاهش یافته است. در شکل ۴-د مدول الاستیسیته ذره یک عامل مهم در تعیین مقدار نیروی بحرانی غلتش است. به طوری که با افزایش آن نیروی بحرانی با افزایش چشم گیری همراه بوده است. تأثیر ضریب پواسون در شکل ۴-ه نمایش داده شده است که یک رابطه خطی برای کاهش نیروی بحرانی غلتش در راستای افق ایجاد می کند و با کاهش آن مقدار نیروی بحرانی

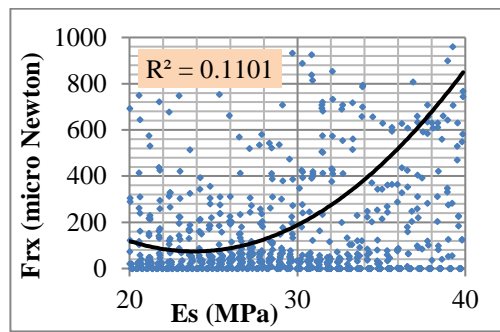
چندجمله ای از درجه ۲ است که در شکل ۴-الف با افزایش انرژی سطحی نیروی بحرانی دچار نوسانات می شود و در ابتدا با افزایش کم و سپس با کاهش بسیار ناچیزی روبرو است. در شکل ۴-ب تأثیر کار چسبندگی روی نیروی بحرانی غلتش بسیار کم بوده است؛ اما با افزایش بسیار ناچیز همراه است؛ اما در شکل ۴-ج با افزایش مدول الاستیسیته سوزن نیروی بحرانی غلتش



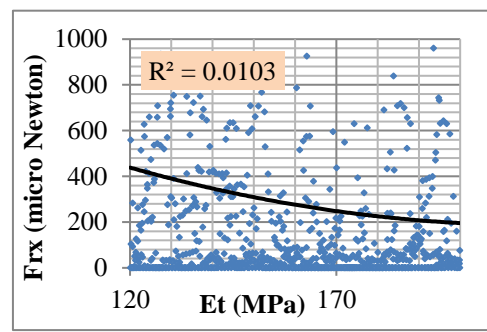
(ب) اثر کار چسبندگی



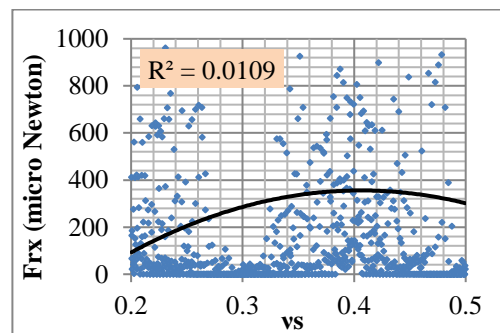
(الف) اثر انرژی سطحی



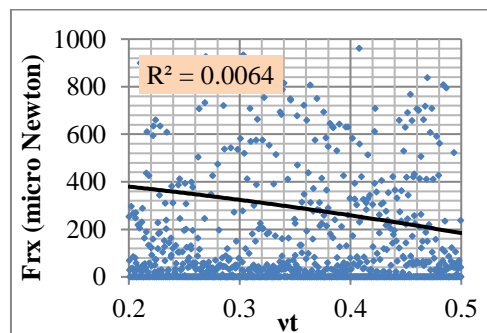
(د) اثر مدول الاستیسیته ذره



(ج) اثر مدول الاستیسیته سوزن



(و) اثر ضریب پواسون ذره

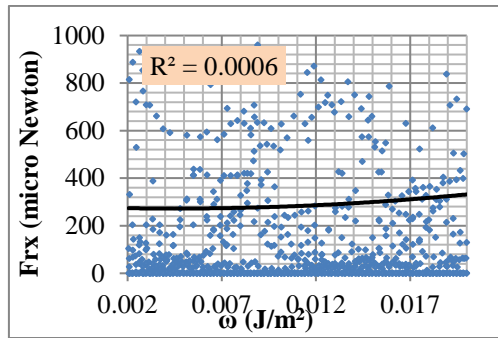


(ه) اثر ضریب پواسون سوزن

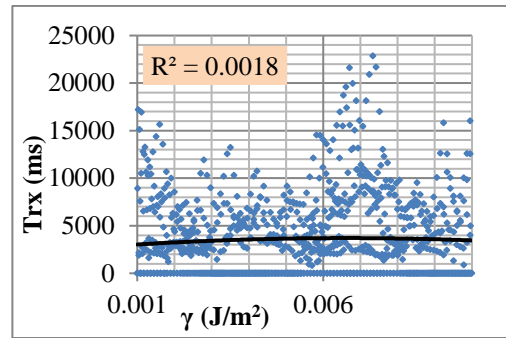
شکل ۴- اثر پارامترهای محیطی بر روی نیروی بحرانی غلتش در راستای محور x

۳-۲- بررسی تأثیر پارامترهای محیطی بر روی زمان بحرانی غلتش  
در نمودارهای گرافیکی شکل ۵ اثر هر یک از پارامترهای محیطی روی زمان بحرانی غلتش نشان داده شده است.

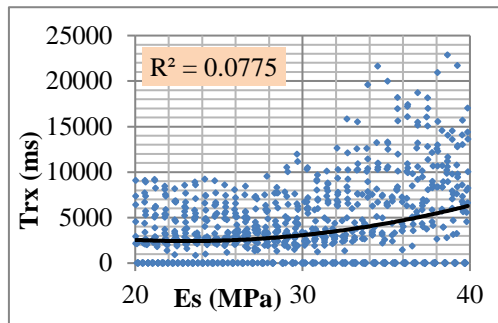
نیز به صورت ثابت کم می‌شود؛ اما بر خلاف ضریب پواسون سوزن، ضریب پوسوان ذره باعث افزایش نیروی بحرانی غلتش در راستای افق شده است. در شکل ۴-و این مقدار افزایش قابل مشاهده است.



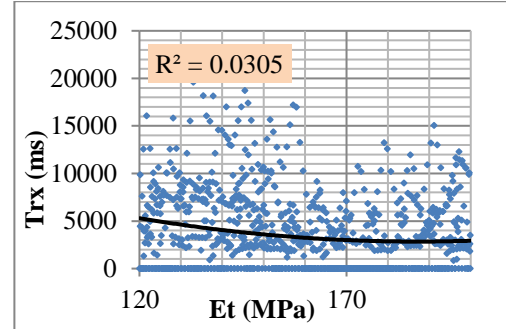
(ب) اثر کار چسبندگی



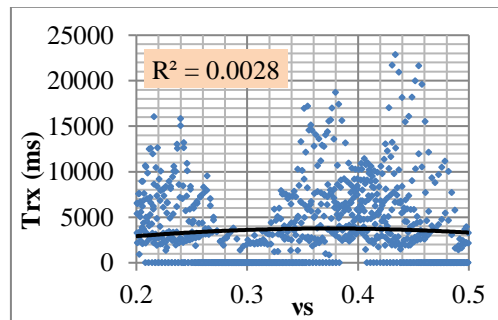
(الف) اثر انرژی سطحی



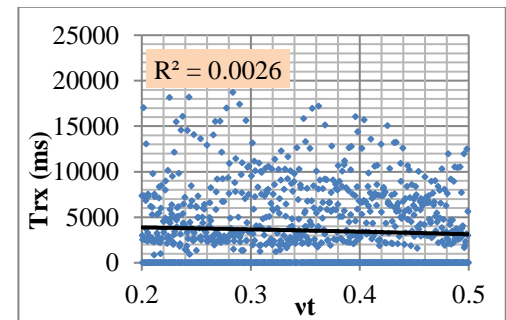
(د) اثر مدول الاستیسیته ذره



(ج) اثر مدول الاستیسیته سوزن



(و) اثر ضریب پواسون ذره



(ه) اثر ضریب پواسون سوزن

شکل ۵- اثر پارامترهای محیطی بر روی زمان بحرانی غلتش در راستای محور x

و خطی انرژی سطحی روی زمان بحرانی غلتش مشاهده می‌شود؛ همچنین در شکل ۵-ب اثر ثابت کار چسبندگی بر

نمودارهای به‌دست آمده نیز در این بخش از نوع چندجمله‌ای درجه ۲ برازش شده‌اند. در شکل ۵-الف اثر ناچیز

#### ۳-۴ بررسی کمی اثر هریک از پارامترهای محیطی بر

##### روی زمان بحرانی غلتش در راستای محورهای X و Y

شکل ۷ درصد تاثیر پارامترهای محیطی روی زمان بحرانی غلتش در راستای محورهای X و Y را نشان می‌دهد.

تأثیر گذارترین پارامتر روی زمان بحرانی غلتش در راستای محور X را می‌توان مدول الاستیسیته ذره برشمرد که نزدیک ۳۱ درصد از کل تأثیر پارامترهای محیطی را شامل شده است. سپس مدول الاستیسیته سوزن با ۲۹ درصد، ضریب‌های پواسون سوزن و ذره هر یک با مقدار یکسان ۱۵ درصد تأثیر گذار هستند. کارچسبندگی و انرژی سطحی نیز با ۶ و ۴ درصد به‌عنوان پارامترهای کم تأثیر یا ناچیز در نظر گرفته شده‌اند. همانطور که در بخش نیروی بحرانی غلتش برای محورهای X و Y مشاهده شد، در این بخش نیز مدول الاستیسیته سوزن بر خلاف ذره به‌عنوان تأثیر گذارترین پارامتر روی زمان بحرانی غلتش در راستای محور Y به‌دست آمده است؛ همچنین مدول الاستیسیته ذره با ۲۷ درصد یعنی ۱ درصد کمتر نسبت به مدول الاستیسیته سوزن از اثرگذاری بالایی برخوردار است. ضریب پواسون سوزن با ۱۹ درصد، انرژی چسبندگی با ۱۱ درصد در درجه بعدی تأثیر گذاری روی زمان بحرانی غلتش در راستای محور Y قرار می‌گیرند و کار چسبندگی با ۷ درصد اثر ناچیزی از خود برجای می‌گذارد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد، مدول الاستیسیته ذره با ۳۱ درصد تأثیر گذارترین پارامتر روی زمان بحرانی غلتش در راستای محور X و مدول الاستیسیته سوزن با ۲۸ درصد، تأثیر گذارترین پارامتر روی زمان بحرانی غلتش در راستای محور Y است.

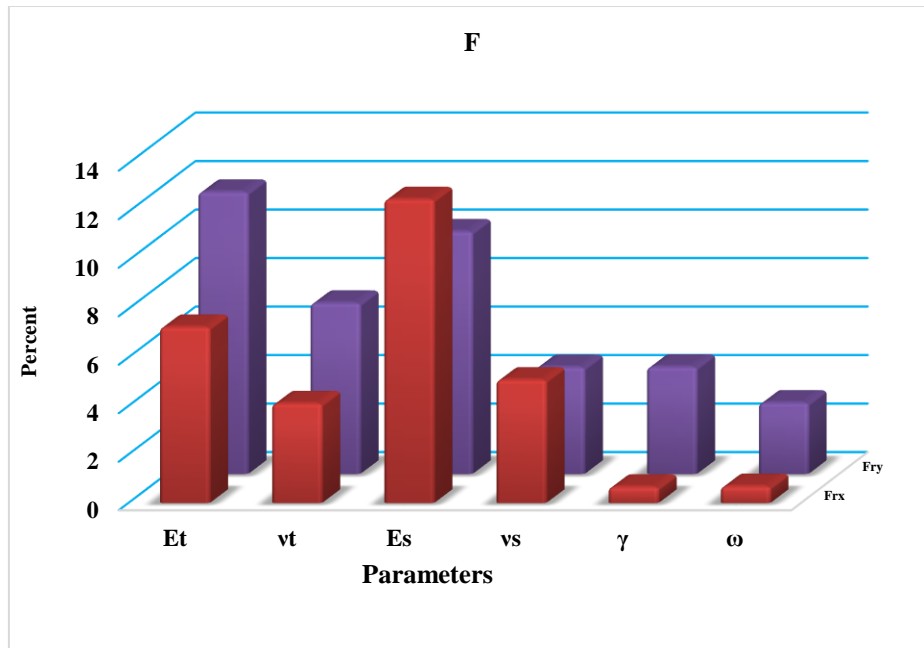
در جدول ۳ نتیجه‌گیری کلی از اثر پارامترهای محیطی روی نیرو و زمان بحرانی غلتش نشان داده شده است. به طور کلی می‌توان گفت که مدول الاستیسیته مؤثر که با توجه به مدول الاستیسیته ذره و سوزن استخراج می‌گردد، مؤثرترین پارامتر اثرگذار بر نیرو و زمان بحرانی جابه‌جایی در مقیاس نانو است که دلیل اصلی این امر، اثرگذاری مستقیم این پارامتر در سختی تیرک و به تبع آن تأثیر در نیرو و زمان بحرانی نانو جابه‌جایی است. پارامترهای انرژی سطحی و کار چسبندگی نیز تأثیر چندانی ندارند، چرا که در مدل‌سازی مسأله از مدل تماسی هرگز استفاده شده است که در آن اثر این دو پارامتر بسیار ناچیز است.

زمان بحرانی مشاهده می‌شود. در شکل ۵-ج با افزایش مدول الاستیسیته سوزن، زمان بحرانی غلتش نیز کاهش داشته است؛ اما در شکل ۵-د بر خلاف مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره باعث افزایش زمان بحرانی غلتش شده است. در شکل‌های ۵-ه و و نیز اثر ناچیز و کم ضریب‌های پواسون سوزن و ذره بر زمان بحرانی غلتش نمایان شده است؛ همچنین پراکندگی نتایج نمودارها به دلیل استفاده از روش آماری آنالیز حساسیت ای-فست است که در آن پارامترهای ورودی به‌صورت هم‌زمان تغییر می‌کنند.

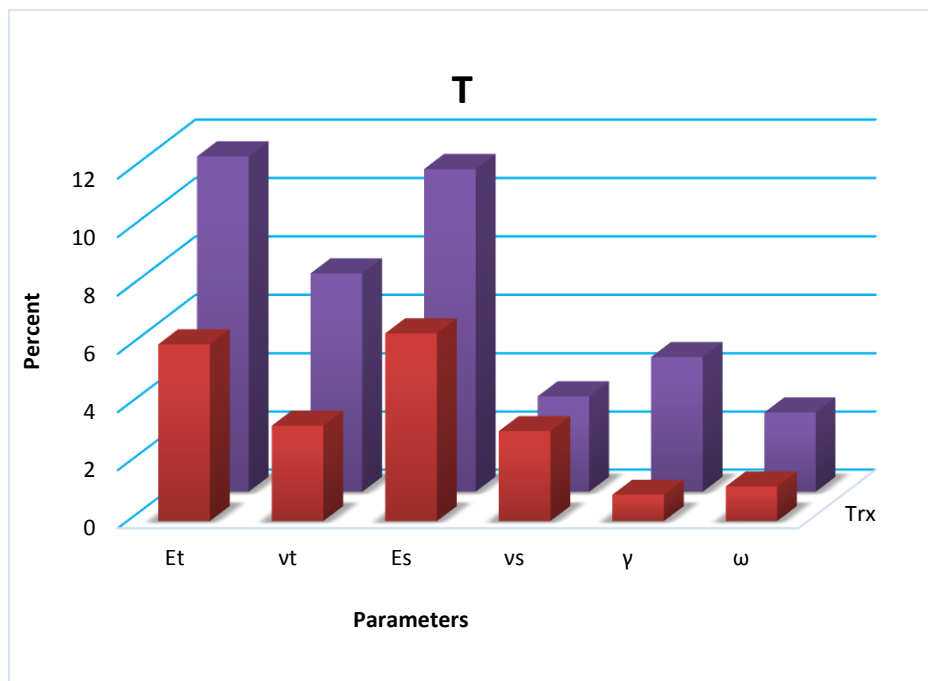
#### ۳-۳ بررسی کمی اثر هر یک از پارامترهای محیطی بر

##### روی نیروی بحرانی غلتش در راستای محورهای X و Y

شکل ۶ نشان دهنده اثر کمی پارامترهای محیطی روی نیروی بحرانی غلتش در راستای محورهای X و Y است. پارامترهای تأثیر گذار روی نیروی بحرانی غلتش در راستای محور X را می‌توان به‌ترتیب مدول الاستیسیته ذره با ۴۱ درصد، مدول الاستیسیته سوزن با ۲۴ درصد و سپس ضریب پواسون ذره با ۱۷ درصد و ضریب پواسون سوزن با ۱۴ درصد تأثیر نام برد و به‌طور کلی اذعان داشت که پارامترهای ذره تأثیر بیشتری نسبت به پارامترهای سوزن دارند و انرژی سطحی و کار چسبندگی نیز با تأثیر حدود ۲ درصد کمترین میزان تأثیر روی نیروی بحرانی غلتش در راستای محور X را دارند؛ اما بر خلاف نیروی بحرانی غلتش در راستای محور X پارامترهای تأثیر گذار روی نیروی بحرانی غلتش در راستای محور Y را می‌توان به‌ترتیب مدول الاستیسیته سوزن با ۲۹ درصد، مدول الاستیسیته ذره با ۲۵ درصد نام برد که این کاملاً بر خلاف نیروی بحرانی غلتش در راستای محور X است که دلیل آن جابجایی سوزن در راستای محور Y است. این جابه‌جایی سبب تأثیر فاکتورهای مهم سوزن و ذره است، زیرا حرکت به صورت غلتشی صورت گرفته شده است. سپس ضریب پواسون سوزن با ۱۷ درصد و ضریب پواسون ذره با ۱۱ درصد گواهی بر این مدعا می‌باشند. انرژی سطحی با ۱۱ درصد و کار چسبندگی نیز به‌عنوان آخرین عامل با ۷ درصد از فاکتورهای تأثیر گذار روی نیروی بحرانی غلتش در راستای محور Y می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد، برای نیروی بحرانی غلتش در راستای محور X مدول الاستیسیته ذره و برای نیروی بحرانی غلتش در راستای محور Y مدول الاستیسیته سوزن مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عامل می‌باشند.



شکل ۶- اثر کمی پارامترهای محیطی بر روی نیرو بحرانی غلتش



شکل ۷- اثر کمی پارامترهای محیطی بر روی زمان بحرانی غلتش

جدول ۳- مقایسه کمی اثر پارامترهای محیطی بر روی نیرو و زمان بحرانی غلتش

پارامترهای محیطی	نیروی بحرانی غلتش		زمان بحرانی غلتش	
	محور X	محور Y	محور X	محور Y
مدول الاستیسیته سوزن	۲۴٪	۲۹٪	۲۸٪	۲۸٪
ضریب پواسون سوزن	۱۴٪	۱۷٪	۱۵٪	۱۵٪
مدول الاستیسیته ذره	۴۱٪	۲۵٪	۳۱٪	۲۷٪
ضریب پواسون ذره	۱۷٪	۱۱٪	۱۵٪	۱۹٪
انرژی سطحی	۲٪	۱۱٪	۴٪	۱۱٪
کار چسبندگی	۲٪	۷٪	۶٪	۷٪
اثر گذارترین پارامتر	Es	Et	Es	Et

#### ۴- صحنه سنجی نتایج

در صحنه سنجی از دو مرجع [۳۲،۳۱] بهره گرفته شده است. در مراجع ذکر شده پژوهش‌هایی روی نانولوله‌های استوانه‌ای زیستی و نانومیکرو ذرات زبر صورت گرفته است. در این

بررسی‌ها از روش آنالیز حساسیت سوئیل استفاده شده است که این روش آنالیز حساسیت، قادر به محاسبه برهم‌کنش بین ورودی‌ها برای مدل‌های خطی و غیرخطی است؛ همچنین از معایب آن، تعداد نمونه‌های زیادی برای تحلیل حساسیت است، که این امر بسیار وقت‌گیر است. در این مقاله روش آنالیز حساسیت ای-فست به کار برده شده است که همانند روش سوئیل برای مدل‌های خطی و غیرخطی کاربرد دارد، اما برخلاف آن تعداد نمونه‌های کمی را برای تحلیل در نظر می‌گیرد. همچنین روش ای-فست دقت کمتری بر پایه‌ی واریانس نیز دارد. جدول ۴ مقایسه کمی بین نتایج مرجع [۳۲،۳۱] برای نیروی بحرانی غلتش حول محور X و جدول ۵ مقایسه کمی بین نتایج مرجع [۳۲،۳۱] برای نیروی بحرانی غلتش حول محور Y با این پژوهش را برای صحنه سنجی نتایج نشان می‌دهد، که به منظور اختصار این مقایسه بین نیروهای بحرانی غلتش حول محورهای X و Y این پژوهش و مراجع صورت گرفته است. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که همانند مراجع [۳۲،۳۱] مدول الاستیسیته ذره و مدول الاستیسیته سوزن به ترتیب اثرگذارترین پارامتر روی نیروی بحرانی غلتش حول محور X و Y شناخته شده‌اند. اختلاف درصد زیاد در پارامتر ضریب چسبندگی به این دلیل است که در این پژوهش، هر دو عامل ضریب چسبندگی و انرژی سطحی به صورت مجزا در نظر گرفته شده‌اند و روی هر یک از آن‌ها و عوامل تاثیرگذارشان آنالیز حساسیت صورت گرفته است، اما در مراجع [۳۲،۳۱] هر

جدول ۴- صحنه سنجی نتایج  $F_{rx}$

پارامتر	مقاله موجود	مرجع [۳۱]	مرجع [۳۲]	درصد اختلاف موجود با مرجع [۳۱]	درصد اختلاف موجود با مرجع [۳۲]
$E_t$	٪۲۴	٪۲۶	٪۳۲	۷۱/۶۹	٪۲۵
$\nu_t$	٪۱۴	-	-	-	-
$E_s$	٪۴۱	٪۴۳	٪۴۲	۴۱/۶۵	۲۱/۳۸
$\nu_s$	٪۱۷	٪۲۳	٪۲۱	۲۶/۰۸	۱۹/۰۴
$\gamma$	٪۲	-	-	-	-
$\omega$	٪۲	٪۸	٪۵	٪۷۵	٪۶۰

جدول ۵- صحه سنجی نتایج  $F_{Ty}$

پارامتر	مقاله موجود	مرجع [۳۱]	مرجع [۳۲]	درصد اخلاف موجود با مرجع [۳۱]	درصد اخلاف موجود با مرجع [۳۲]
$E_t$	٪۲۹	٪۳۹	٪۴۳	۲۵/٪۶۴	۳۲/٪۵۵
$\nu_t$	٪۱۷	-	-	-	-
$E_s$	٪۲۵	٪۳۶	٪۳۴	۳۰/٪۵۵	۲۶/٪۴۷
$\nu_s$	٪۱۱	٪۱۵	٪۱۴	۲۶/٪۶۶	۲۱/٪۴۲
$\gamma$	٪۱۱	-	-	-	-
$\omega$	٪۷	٪۱۰	٪۹	٪۳۰	۲۲/٪۲۲

دو پارامتر ضریب چسبندگی و انرژی سطحی به عنوان یک عامل تاثیرگذار روی نیروی بحرانی غلتش در نظر گرفته شده است و این عمل موجب به وجود آمدن اختلاف درصد زیادی شده است.

جدول ۴ و ۵ دلیل اختلاف قابل ملاحظه برای مدول الاستیسیته سوزن و ذره وجود زوایای مختلف اعم از زوایا اولیه برای تیرک و نیروی بحرانی و همچنین یکسان نبودن تغییرات نیرویی در راستای افق و قائم است که باعث ایجاد اختلاف بین این دو فاکتور شده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

اهمیت فرآیند جابه‌جایی نانوذرات امروزه دیگر بر هیچ علاقه‌مند حوزه‌ی نانو پوشیده نیست. فناوری نانو با رشد و گسترش در انواع حوزه‌های ساخت و تولید ابزار، ماشین آلات، ریز ساختارها، حسگرها و علم بیولوژیک و دنیای پزشکی نقش مهم و مؤثری در زندگی انسان امروز دارد. از تازه‌ترین دست‌آوردهای فناوری نانو می‌توان به تخریب و تشخیص سلول‌های سرطانی و انتقال دارو به وسیله‌ی آن اشاره کرد. در این فرآیند که شامل دوفاز عمده است، به بررسی فاز اول پرداخته شده است. دو عامل مهم نیرو و زمان بحرانی، پایه و اساس فاز اول جابه‌جایی نانوذرات هستند که مقدار آن‌ها به دلیل حساس بودن و ذرات نانو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فاز اول نانو جابه‌جایی برپایه دو فاکتور نیرو و زمان بحرانی بنا شده است. برای ورود به فاز دوم

فرآیند جابه‌جایی نانوذرات یعنی جابه‌جایی آن‌ها در یک بستر با سرعت مناسب با استفاده از یک الگوریتم بسیار کارآمد بایستی ابتدا در فاز اول مقدار نیروی بحرانی متناسب با زمان آن به صورت دقیق محاسبه گردد، به دلیل اهمیت بسیار بالای این فرآیند برای مثال در دنیای پزشکی که به صورت تحویل دارو در قالب سلول یا تخریب سلول‌های سرطانی ظاهر شده است محاسبه این دو پارامتر بسیار حساس از اهمیت بسیار ویژه برخوردار است. دو دسته پارامتر محیطی و ابعادی، مهم‌ترین عوامل موجود و تأثیرگذار روی مقدار نیرو و زمان بحرانی هستند. در این پژوهش با استفاده از یک مدل‌سازی سه بخشی که شامل روش آماری ای-فست از بخش آنالیز حساسیت و مدل سینماتیکی و دینامیکی با استفاده از قوانین نیوتن و مدل اصطکاکی اچ‌کا است، به تأثیر پارامترهای محیطی روی این دو عامل بسیار مهم پرداخته شده است و تأثیر کمی هر یک از این فاکتورها روی نیرو و زمان بحرانی غلتش در راستای محورهای  $x$  و  $y$  به دست آمده است. مدول الاستیسیته ذره، مهم‌ترین و تأثیر گذارترین عامل روی نیرو و زمان بحرانی غلتش جابه‌جایی نانو ذرات در راستای محور  $x$  و مدول الاستیسیته سوزن اثرگذارترین پارامتر روی زمان بحرانی غلتش جابه‌جایی نانو ذرات در راستای محور  $y$  به دست آمده است، دیگر عوامل محیطی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، دارای اهمیت می‌باشد؛ اما به صورتی است که به علت ناچیز بودن آن‌ها می‌توان صرف نظر کرد و در درجه اهمیت پایین تری قرار

داد و باید به دو عامل مدول الاستیسته ذره و سوزن اهمیت و توجه بیشتری نشان داد تا وارد شدن به فاز دوم فرآیند جابه‌جایی، دارای دقت و صحت بیشتری داشته باشد.

### ۶- فهرست علائم

جرم تیرک، Kg	m	
شعاع سوزن، m	R <sub>t</sub>	
ضخامت تیرک، m	t	
عرض تیرک، m	w	
موقعیت انتهای سوزن در راستای محور X	x <sub>p</sub>	مساحت واقعی تماس، m <sup>2</sup>
موقعیت ذره بر صفحه‌ی مینا در راستای محور X	x <sub>s</sub>	شعاع تماس، m
موقعیت نوک سوزن در راستای محور X	x <sub>t</sub>	بردار برگر
موقعیت انتهای سوزن در راستای محور Y	y <sub>p</sub>	ضریب فوریه
موقعیت ذره بر صفحه‌ی مینا در راستای محور Y	y <sub>s</sub>	ضریب فوریه
موقعیت نوک سوزن در راستای محور Y	y <sub>t</sub>	نیروی اصطکاکی اچ‌کا، N
موقعیت انتهای سوزن در راستای محور Z	z <sub>p</sub>	نیروی عمودی سطح، N
موقعیت ذره بر صفحه‌ی مینا در راستای محور Z	z <sub>s</sub>	نیروی اصطکاکی، N
موقعیت نوک سوزن در راستای محور Z	z <sub>t</sub>	نیروی چسبندگی، N
انرژی سطحی، J/m <sup>2</sup>	γ	مدول الاستیسته تیرک، MPa
عمق نفوذ نانوذره در صفحه‌ی مینا، m	δ <sub>s</sub>	مدول الاستیسته ذره، MPa
عمق نفوذ نانوذره در سوزن، m	δ <sub>t</sub>	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای X، N
ضریب پواسون تیرک	ν <sub>t</sub>	نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای X، N
ضریب پواسون ذره	ν <sub>s</sub>	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای Y، N
استحکام برشی، N/m <sup>2</sup>	τ <sub>f</sub>	نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای Y، N
تنش اصطکاکی، N/m <sup>2</sup>	τ̄ <sub>f</sub>	نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای Z، N
ضریب چسبندگی، J/m <sup>2</sup>	ω	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای Z، N
		ارتفاع سوزن، m
		مدول برشی، GPa
		مدول برشی معادل، GPa
		ممان اینرسی تیرک حول نقطه ابتدایی، m <sup>4</sup>
		طول تیرک، m

### ۷- مراجع

- [1] Bhushan B, Jung Y, Nosonovsky M (2010) Springer handbook of nanotechnology.
- [2] Korayem AH, Taghizadeh M, Abdi M (2017) Experimental analysis of rough surface topography and modifying the humidity effect in AFM images to

- Modares Mechanical Engineering 16(10): 311-316. (in Persian)
- [15] Taheri (2016) Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model. Modares Mechanical Engineering 16(10): 311-316. (in Persian)
- [16] Junno T, Deppert K, Montelius L, Samuelson L (1995) Controlled manipulation of nanoparticles with an atomic force microscope. Appl Phys Lett 66: 3627-3629.
- [17] Zakeri M, Kharazmi M (2014) Modeling of friction in micro/nano scale with random roughness distribution. Modares Mechanical Engineering 14(11): 175-184. (in Persian)
- [18] Taheri M (2018) Using of spherical contact models in 3d manipulation modeling of Au nanoparticles using atomic force microscopy to calculate the critical force and time. Mechanical Engineering Tabriz University 48(2): 175-184. (in Persian)
- [19] Castillo J, Dimaki M, Svendsen WE (2009) Manipulation of biological samples using micro and nano techniques. Integr Biol 1(1): 30-42.
- [20] Arsuaga J, Tan RK-Z, Vazquez M, Harvey SC (2008) Investigation of viral DNA packaging using molecular mechanics models. Biophys Chem 4(2): 475-487
- [21] McNamee CE, Pyo N, Tanaka S, Vakarelski IU, Kanda Y, Higashitani K (2006) Parameters affecting the adhesion strength between a living cell and a colloid probe when measured by the atomic force microscope. Colloid Surface B 48(2): 176-82.
- [22] Ikai A, Afrin R, Sekiguchi H (2007) Pulling and pushing protein molecules by AFM. Curr Nanosci 3(1): 17-29.
- [23] Xi N, Yang R, Fung CKM, Lai KWC, Song B, Qu C (2010) Atomic force microscopy based nanorobotic operations for biomedical investigations. Nanotechnology (IEEE-NANO), 2010 10th IEEE Conference on; 2010: IEEE.
- [24] Shen Y, Nakajima M, Ahmad MR, Kojima S, Homma M, Fukuda T (2011) Effect of ambient humidity on the strength of the adhesion force of single yeast cell inside environmental-SEM. Ultramicroscopy 11(8): 1176-1183.
- [25] Frey H, Patil SR (2002) Identification and review of sensitivity analysis methods. Risk Anal 22(3): 553-578.
- [26] Saltelli A, Annoni P (2010) How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. Environ Modell Softw 25(12): 1508-1517.
- [27] Weyl H (1938) Mean motion. Am J Math 60(4): 889-896.
- [28] Saltelli A, Bolado R (1998) An Alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST). Comput Stat Data An 26(4): 445-460.
- improve the topography quality. Int J Adv Manuf Technol 94(4): 1229-1241.
- [3] Korayem MH, Hoshiar AK, Badrlou S, Yoon J (2016) Modeling and simulation of critical force and time in 3D manipulations using rectangular, V-shaped and dagger-shaped cantilevers. Eur J Mech A-Solid 59: 333-343
- [4] Jazi MM, Ghayour M, Rad SZ, Miandoab EM (2018) Effect of size on the dynamic behaviors of atomic force microscopes. Microsyst Technol 24(4): 1755-1765.
- [5] Korayem MH, Nosoudi S, Far SK, Hoshiar AK (2018) Hybrid IPSO-automata algorithm for path planning of micro-nanoparticles through random environmental obstacles, based on AFM. J Mech Sci Technol 32(2): 805-810.
- [6] Abbasi M (2018) A simulation of atomic force microscope microcantilever in the tapping mode utilizing couple stress theory. Micron 107: 20-27.
- [7] Korayem MH, Homayooni A, Hefzabad RN (2018) Non-classic multiscale modeling of manipulation based on AFM, in aqueous and humid ambient. Surf Sci 671: 27-35.
- [8] Korayem MH, Khaksar H, Hefzabad RN, Taheri M (2018) Contact simulation of soft micro/nano bioparticles for use in identification of mechanical properties and manipulation based on atomic force microscopy. P I Mech Eng K-J Mul 232(2): 274-285.
- [9] Ahmadi M, Ansari R, Darvizeh M, Rouhi H (2017) Effects of fluid environment properties on the nonlinear vibrations of AFM piezoelectric microcantilevers. Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials 50(2): 117-123.
- [10] Samaeifar F, Afifi A, Abdollahi H (2017) Design and Fabrication of optimized gold micro-heater and comparison of its performance with platinum microheater. Journal of Solid and Fluid Mechanics 6(1): 259-272. (in Persian)
- [11] Zakeri M, Faraji J (2016) Dynamic modeling of nano/microparticles displacement with multi-point contact based on the Rumpf model. Modares Mechanical Engineering 16(8): 120-130. (in Persian)
- [12] Taheri M (2017) Sensitivity analysis of 3D manipulation of spherical nanoparticles by using E-fast method. Modares Mechanical Engineering 17(11): 59-69. (in Persian)
- [13] Falvo M, Taylor R, Helser A, Chi V, Brooks FP, Washburn S, Superfine R (1999) Nanometre-scale rolling and sliding of carbon nanotubes. Nature 397: 236-238.
- [14] Taheri M (2016) 3D modeling of gold nanoparticle manipulation in air using HK friction model.



- cylindrical biological particles in various biological mediums by means of the sobol method. *Int J Nanosci Nanotechno* 12(3): 149-166.
- [32] Korayem MH, Ghasemi M, Taheri M, Badkoobehhezaveh H (2015) Investigating the effective parameters in the Atomic Force Microscope-based dynamic manipulation of rough micro/nanoparticles by using the Sobol sensitivity analysis method. *Simul-T Soc Mod Sim* 91(12): 1068-1080.
- [29] Hurtado JA, Kim KS (1999) Scale effects in friction of single-asperity contacts. I. From concurrent slip to single-dislocation-assisted slip. *P Roy Soc A-Math Phy* 455: 3363-3384.
- [30] Hurtado JA, Kim KS (1999) Scale effects in friction of single-asperity contacts. I. From concurrent slip to single-dislocation-assisted slip. *P Roy Soc A-Math Phy* 455: 3385-3400.
- [31] Korayem MH, Badkoobehhezaveh H, Taheri M, Ghasemi M (2016) Sensitivity analysis of the critical conditions of AFM-based biomanipulation of