



## بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی

فاطمه فریدونی<sup>1</sup>، معین طاهری<sup>2\*</sup>، مهدی مدبری<sup>3</sup>

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران
- 2- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
- 3- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

\* اراک، صندوق پستی 3848177584، m-taheri@araku.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 5 آبان 1399  
داوری اولیه: 10 اسفند 1399  
پذیرش: 15 فروردین 1400

### کلیدواژگان:

نانومنیپولیشن دو بعدی  
ای-فست  
میکروسکوپ نیروی اتمی  
فاز دوم

### چکیده

منیپولیشن و جابه‌جایی میکرو/نانوذرات امروزه اهمیت بالایی در ساخت و تولید تجهیزات ریزمقیاس پیدا کرده است. فرآیند نانومنیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، در دو فاز انجام می‌پذیرد. فاز نخست تا قبل از شروع به حرکت ذرات هدف را شامل می‌شود و هدف از آن استخراج نیرو و زمان بحرانی آغاز به حرکت میکرو/نانوذرات می‌باشد. در فاز دوم نیز حرکت ذرات از آغاز در مبدأ تا رسیدن به مقصد مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای مؤثر بر این فاز از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله به بررسی اثرات هشت پارامتر شامل شعاع ذره، شعاع سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، عرض تیرک، طول ذره، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته بر نیرو، در فاز دوم منیپولیشن پرداخته شده است. برای این منظور در این مقاله از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست استفاده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع است که ارتفاع سوزن با 48 درصد، عرض تیرک با 19 درصد، مدول الاستیسیته با 14 درصد و طول تیرک با 8 درصد، بیشترین اثر را بر تغییرات نیرو در فاز دوم منیپولیشن خواهند داشت. در حالی که مطابق نتایج به دست آمده، می‌توان از اثرات ناچیز ناشی از تغییرات شعاع ذره، شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن و طول استوانه‌ای میکرو/نانوذرات هدف چشم‌پوشی نمود.

## Investigation of the effect of different parameters on force in the second phase of two-dimensional nanomanipulation

Fateme Fereiduni, Moein Taheri\*, Mehdi Modabberifar

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

\* P.O.B. 3848177584, Arak, Iran, m-taheri@araku.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 27 October 2020  
First Decision: 1 March 2021  
Accepted: 4 April 2021

### Keywords:

2D-Nanomanipulation  
E-Fast  
AFM  
Second phase

### Abstract

Manipulation and movement of micro / nanoparticles has become very important today in the manufacture and production of micro-scale equipment. The nanomanipulation process is performed in two phases using an atomic force microscope. The first phase involves the target particle before it begins to move, and its purpose is to extract the force and critical time for the micro / nanoparticles to start moving. In the second phase, the motion of the particles from the origin to the destination is examined. Modeling, simulation and investigation of parameters affecting this phase are of great importance. In this paper, the effects of eight parameters including particle radius, probe radius, probe height, cantilever length, cantilever width, particle length, Poisson's ratio and modulus of elasticity on force in the second phase of manipulation are investigated. For this purpose, in this paper, e-Fast statistical sensitivity analysis method has been used. The results show that the probe height with 48%, cantilever width with 19%, modulus of elasticity with 14% and cantilever length with 8%, will have the greatest effect on force changes in the second phase of manipulation. The resulting effects of changes in particle radius, probe radius, probe Poisson's ratio, and the length of the target micro / nanoparticle cylinders can be ignored.

### 1- مقدمه

نانوحسگرها، نانوترانزیستورها، نانوکامپوزیت‌ها و نانوبوش‌ها و همچنین بهبود خواص مواد ساختمانی و افزایش مقاومت مواد اشاره نمود.

از جمله کاربردهای نوظهور فناوری نانو، نانومنیپولیشن<sup>1</sup>

امروزه محققان و صنعتگران با بهره‌مندی از فناوری نانو در صنایع مختلف به بهبود خواص مواد و ایجاد ویژگی‌های جدید، دست‌یافته‌اند. از جمله کاربردهای نانوفناوری می‌توان به فناوری‌های مورد استفاده در ساخت و تولید نانووسیم‌ها،

<sup>1</sup> Nanomanipulation

### Please cite this article using:

F. Fereiduni, M. Taheri, M. Modabberifar, Investigation of the effect of different parameters on force in the second phase of two-dimensional nanomanipulation, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 23- 31, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>1</sup> می‌باشد. میکروسکوپ نیروی اتمی با آنالیز سطح و حرکت بر روی بستر ذرات به بررسی ویژگی‌های ساختاری ذرات و تصویربرداری از آن‌ها می‌پردازد.

فرآیند نانومنیپولیشن در فاز اول و با تماس سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی با ذره آغاز می‌شود و با غلبه بر نیروی اصطکاک در فاز دوم و تا رسیدن به هدف ادامه پیدا می‌کند. در طول این فرآیند عوامل بسیاری بر روند حرکت تأثیر گذاشته که در فاز اول به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات جدید در فاز دوم از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است.

طاهری [1] به مدل‌سازی فاز اول منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از مدل اصطکاکی دقیق لاگره<sup>2</sup> پرداخته‌است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کاهش نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره نسبت به مدل‌های ساده‌ی اصطکاکی بوده است. همچنین با مقایسه‌ی نتایج سه‌بعدی به‌دست آمده با نتایج دوبعدی موجود به افزایش نیرو و زمان بحرانی سه‌بعدی پی برده است.

کوریام و همکارانش [2] فاز اول منیپولیشن سه‌بعدی ذرات بیولوژیکی کروی در محیط هوا را با در نظر گرفتن مکانیک تماس مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به تأثیر خواص نانوذرات درگیر بر نیروی منیپولیشن و مقادیر عمق نفوذ که در حین روند منیپولیشن به وجود می‌آید، اشاره نموده است. همچنین افزایش مقادیر نیروی منیپولیشن، شعاع تماس و عمق نفوذ در مدل‌های سه‌بعدی نسبت به مدل‌سازی دوبعدی مشاهده شده است.

بهباد نسب و حسینی [3] به مطالعه‌ی همزمان محدودیت‌ها و تأثیرات میزان افزایش ذرات بر سایر خواص با استفاده از افزودن میکرونانوذرات ساده و اصلاح سطح شده کربنات کلسیم به یک رزین صنعتی با همزن مکانیکی و بررسی خواص فیزیکی مکانیکی تقویت شده‌ی آن پرداخته‌اند.

نان و یان [4] به‌منظور نانومنیپولیشن نوری همه‌کاره با نانوساختارها به بررسی هم‌افزایی شدت، فاز و قطبش در نور ساختار یافته، پرداخته‌اند.

چن و ژو [5] در زمینه‌های مواد، صنعت نیمه‌هادی، پلیمرها و دارو، تحقیقاتی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی را انجام داده‌اند. همچنین مزایای استفاده از روش‌های مبتنی بر

آزاد و همکارانش [7] بیان نموده‌اند که استفاده از نانوذرات فلزی در صنایع مختلف به اندازه‌ای گسترش یافته است که لزوم یافتن روش‌های نوین در زمینه‌ی تولید نانوذرات به یک چالش تبدیل شده است، به همین علت به بررسی روش تخلیه‌ی الکتریکی در محیط مایع برای تولید نانوذرات پرداخته‌اند. آن‌ها علت استفاده از این روش را ارزان بودن فرآیند و سازگار بودن با محیط زیست، نسبت به سایر روش‌های تولید نانوذرات بیان نموده‌اند. همچنین آن‌ها با طراحی و ساخت سیستم تولید ارتعاشات فراصوتی و همراه نمودن آن با فرآیند تخلیه‌ی الکتریکی، اقدام به تولید نانوذرات مس در محیط مایع دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه خالص کرده‌اند و به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری مانند شدت جریان، زمان روشنی و خاموشی جرقه و اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی اندازه‌ی ذرات تولیدی، نرخ تولید، پایداری ذرات معلق در مایع و درصد فراوانی ذرات پرداخته‌اند.

تیان و همکارانش [8] به ضرورت کالیبراسیون پارامتر ثابت فنر تیرک‌های<sup>3</sup> میکروسکوپ نیروی اتمی برای اندازه‌گیری نیروهای میکرونانو اشاره نموده‌اند. بدین منظور یک سیستم سازگار جدید مبتنی بر کالیبراسیون ثابت فنر تیرک‌های میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه داده‌اند. نتایج به‌دست آمده، بیان‌گر عملکرد مطلوب این سیستم بوده و می‌تواند ثابت فنر تیرک‌های میکروسکوپ نیروی اتمی را به طور دقیق و مؤثر کالیبره کند.

یان و همکارانش [9] به بررسی علل به‌وجود آمدن عدم قطعیت موقعیت نوک سوزن، پرداخته‌اند. آن‌ها برای مقابله با این

<sup>1</sup> Atomic Force Microscope (AFM)

<sup>2</sup> LuGre

<sup>3</sup> Cantilevers

تماس بزرگ‌تری را در بر می‌گیرد. از نتایج حاصل از شبیه‌سازی نانوذرات مکعبی دریافته‌اند که تئوری‌های جی‌کی‌آر و دی‌ام‌تی<sup>4</sup>، عمق تورفتگی بیشتری را در تماس نوک با نانوذرات نشان داده‌اند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که تئوری جی‌کی‌آر و پس از آن تئوری‌های هرتز و جماری بالاترین نیروی زبری را ایجاد کرده‌اند و در مورد منطقه‌ی تماس خشن، نظریه‌ی هرتز و به دنبال آن تئوری‌های جماری و جی‌کی‌آر بزرگ‌ترین منطقه‌ی تماس را ایجاد کرده‌اند.

کورایم و خاکسار [15] به بررسی تأثیر بارهای مختلف بر روند تماس نانوذرات و تأثیر نانوذرات قبل از شروع تماس، و با توجه به سه نظریه‌ی هرتز، جی‌کی‌آر و جماری پرداخته‌اند. هندسه‌های مکعب و بیضوی برای نانوذرات با توجه به سطوح تماس انتخاب شده است و در نهایت نتایج مدل‌های توسعه‌یافته و نمونه‌ی آزمایشی را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند.

کامل و همکارانش [16] با توجه به استفاده از نانوذرات در سیال‌های پایه به منظور افزایش خاصیت جذب انرژی و بهبود ویسکوزیته سیال به بررسی تأثیر اضافه شدن نانو ذرات فلزی با درصد‌های جرمی متفاوت، در نسبت دمپینگ و ویسکوزیته سیال پایه گلیسیرین پرداخته‌اند.

اورلاندو و همکارانش [17] به بررسی نانومنیپولیشن نانوذرات طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. همچنین چگونگی تولید مناطق نانومتری موضعی با بزرگی میدان الکتریکی بالا و بدون شیب قوی توسط برخی از سازه‌های پلاسمایی را نشان داده‌اند.

زارعی و همکارانش [18] به بررسی فاز دوم نانومنیپولیشن در فضای دوبعدی و با استفاده از سه مدل اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره پرداخته‌اند. هدف از این مطالعه به دست آوردن جابه‌جایی و سرعت ذرات در حین فرآیند نانومنیپولیشن بوده است.

کورایم و ذاکری [19] به بررسی نیرو و زمان بحرانی و با در نظر گرفتن نیروی چسبندگی و اصطکاکی پرداخته‌اند. همچنین معادله‌های دینامیک را نیز بر اساس دیاگرام آزاد طرح کرده‌اند. آن‌ها نانومنیپولیشن نانوذره طلا را روی یک‌لایه سیلیسیم شبیه‌سازی کرده‌اند، به طوری که نانوذره در هر زمان قابل‌ردیابی بوده و تمام اطلاعات دینامیکی تغییر شکل‌های آن از روی شبیه‌سازی عددی قابل به دست آمدن است. آن‌ها همچنین به تأثیر پارامترهای بحرانی در طراحی و انتخاب هندسه و مواد سازنده‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی و همچنین برای انتخاب شرایط اولیه مناسب برای هل دادن اشاره نموده‌اند.

عدم قطعیت‌ها راهکاری را پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از چندین آزمایش، موقعیت‌یابی نوک سوزن را برای نانومنیپولیشن مؤثر ارائه کرده‌اند. در نهایت به بررسی یک نانولوله‌ی کربنی پرداخته‌اند، که نشان می‌دهد روش پیشنهادی می‌تواند پتانسیل بسیار خوبی برای بهبود دقت موقعیت فراهم کند.

کورایم و همکارانش [10] نرمی و آسیب‌پذیری سلول‌های بیولوژیکی را علت وارد نکردن نیروی اضافی برای جابه‌جایی این سلول‌ها در نانومنیپولیشن بیان نموده‌اند. همچنین، به منظور نزدیکی نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی با نتایج واقعی به صورت همزمان، ویسکوالاستیسیته سلول و استحکام در سطح آن و همچنین تصحیح پارامتر ثابت ویسکوالاستیک در محیط مایع، اثرات تعداد ناهنجاری‌ها در ناحیه تماس بین سلول و بستر<sup>1</sup> بر روند نانومنیپولیشن را مورد بررسی قرار داده‌اند و با در نظر گرفتن اثرات محیط‌های مختلف و زبری سلول برای حالت ویسکوالاستیک، نتایج دقیق‌تری از شبیه‌سازی‌ها را به دست آورده‌اند. همچنین به توپوگرافی سلول خوش‌خیم سرطان در محیط مایع با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند.

ژو و همکارانش [11] با ترکیب کردن میکروسکوپ نیروی اتمی با سایر روش‌های مکمل به از بین بردن محدودیت‌های این ابزار پرداخته‌اند.

پناهی و همکارانش [12] نانومنیپولیشن نانوذرات بیضوی طلا توسط میکروسکوپ نیروی اتمی را در فاز اول و با در نظر گرفتن زبری برای بستر مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین برای فاز دوم، زبری را برای ذرات و بستر در نظر گرفته‌اند. آن‌ها نیرو و زمان بحرانی را برای فاز اول توسط بررسی دو مدل به دست آورده‌اند. همچنین فاز دوم را از زمان شروع حرکت تا رسیدن ذره به هدف مورد بررسی قرار داده‌اند.

کورایم و همکارانش [13] با استفاده از ربات‌ها که سبب جابه‌جایی کنترل‌شده از نانوذرات و مدل‌سازی دقیق و مناسب دینامیکی می‌شود، محل دقیق نانوذرات را در مقیاس میکرو/نانو مشخص کرده‌اند.

کورایم و همکارانش [14] به بررسی دو هندسه‌ی نانوذرات بیضوی و مکعب با توجه به مکانیک تماس نانوذرات هموار پرداخته‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که در شبیه‌سازی بیضوی نظریه جی‌کی‌آر<sup>2</sup> به دلیل شامل شدن نیروهای چسبندگی باعث ایجاد عمق نفوذ بیشتر در هر دو هندسه تماس شده است و تئوری جماری<sup>3</sup> عمق نفوذ کمتری را نشان داده است، زیرا منطقه

<sup>1</sup> Substrate

<sup>2</sup> JKR

<sup>3</sup> Jamari

<sup>4</sup> DMT

روش آماری آنالیز حساسیت ای-فست<sup>2</sup> به منظور تعیین میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی، برای اولین بار در این مقاله استفاده شده است.

## 2- روش تحقیق

در این بخش ابتدا به مدل سازی فاز دوم و بررسی معادلات و سپس به آنالیز حساسیت به روش ای-فست پرداخته شده است.

### 2-1- مدل سازی فاز دوم نانومنیپولیشن

نانومنیپولیشن در واقع جابه جایی ذرات تا رسیدن آن‌ها به هدف مورد نظر می‌باشد. همان طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، در این فرآیند سطح بستر مورد نظر توسط میکروسکوپ نیروی اتمی کاوش می‌شود. این کار توسط سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌شود. به طور کلی در این فرآیند نوک سوزن با ذره هدف مورد نظر تماس پیدا کرده و با اعمال نیرو سعی در حرکت ذره دارد. چنانچه نیروی وارده بر تیرک بتواند بر نیروی اصطکاک در ابعاد نانو غلبه نماید، ذره شروع به حرکت می‌کند. تمامی این مراحل در فاز نخست صورت گرفته و سبب به دست آوردن نیرو و زمان بحرانی جهت حرکت می‌شود. با غلبه بر اصطکاک حرکت ذره تا رسیدن به هدف مورد نظر ادامه پیدا می‌کند و در واقع ذره وارد فاز دوم نانومنیپولیشن می‌شود. نیروی اعمالی بر ذره برای رسیدن به هدف با توجه به عوامل مختلف، متغیر بوده و عوامل هندسی و محیطی بسیاری بر آن تأثیر می‌گذارند. اطلاعات حاصل از این کاوش از طریق آشکارسازی نور لیزر بر روی فتودیود و ارسال به تحلیل گر مورد نظر قابل مشاهده است. همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود هندسه تیرک به صورت‌های مختلف بوده و شامل تیرک خنجری، وی شکل و مستطیلی می‌باشد.

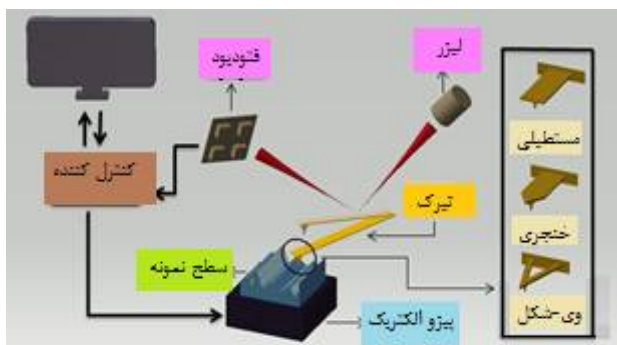


Figure. 1 Overview of nanomanipulation

شکل 1 شمای کلی از نانومنیپولیشن

کورایم و طاهری [20] به بررسی مدل‌های تماسی مختلف ذرات بیولوژیکی دی‌ان‌ای، مخمر، پلاکت و نانو باکتری بر روی عمق نفوذ و زاویه تماسی بین نوک و لایه برای میکرو/نانوذرات مورد نظر پرداخته‌اند. در نهایت آن‌ها به مناسب نبودن مدل تماسی هرگز به دلیل در نظر نگرفتن نیروی چسبندگی و ایجاد خطای قابل ملاحظه دست یافته‌اند.

لی و همکارانش [21] رفتار نانوسیم‌ها را آنالیز کرده‌اند. آن‌ها بیان نموده‌اند که بر اساس نتایج حاصل از این مدل، نیروهای برهم کنشی می‌توانند در به روز کردن تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی به صورت ویدئویی مورد استفاده قرار گیرند؛ که این امر، قابلیت سیستم منیپولیشن را افزایش داده است و موجب انجام چندین عملیات بدون نیاز به اسکن جدید شده است.

حقیقی و همکارانش [22] به توپوگرافی سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی با یک رویکرد جدید پرداخته‌اند. آن‌ها میکروسکوپ نیروی اتمی حالت دوار را به عنوان یک میکروسکوپ نیروی اتمی برای غلبه بر مشکلات تصویربرداری در محیط‌های مایع با کاهش نیروهای متقابل تشدید کننده مایع، معرفی کرده‌اند. در روش‌های تصویربرداری معمولی، زمان دستیابی به حرکت دوره‌ای حالت پایدار سوزن نوسان ساز، سرعت اسکن را محدود می‌کند. برای غلبه بر این محدودیت، آن‌ها یک روش تصویربرداری جدید پیشنهاد کرده‌اند. به منظور افزایش سرعت و دقت در این روش، ارتفاع نمونه به طور مستقیم و بدون نیاز به کنترل کننده‌ی حلقه بسته محاسبه می‌شود.

کورایم و همکارانش [23] به بررسی دو بخش تماسی در نانومنیپولیشن میکرو/نانوذرات استوانه‌ای طلا پرداخته‌اند. در بخش اول تماس میکرو/نانوذرات هدف و صفحه‌ی مبنا و بخش دوم تماس نوک سوزن تیرک و میکرو/نانوذرات هدف مورد بررسی قرار گرفته است. زاگری و همکارانش [24] به بررسی منیپولیشن دوبعدی نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و با در نظر گرفتن سطح زیر برای صفحه‌ی مبنا با استفاده از مدل‌های تماسی جی‌کار و شوارتز<sup>1</sup> پرداخته‌اند. کورایم و زاگری [25] نیز نانومنیپولیشن ذرات کروی بر روی سطوح زیر را شبیه سازی نموده‌اند.

در این تحقیق به بررسی تأثیر کمی و دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی پرداخته شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل شعاع ذره، شعاع سوزن، ضریب پواسون، مدول الاستیسیته، ارتفاع سوزن، طول تیرک و عرض تیرک می‌باشند.

<sup>2</sup> E-Fast

<sup>1</sup> Schwartz

انتگرال تک‌بعدی تبدیل کرده و اندیس‌های حساسیت را به‌صورت کلی به‌وسیله‌ی تحلیل فوریه برای خروجی‌ها به‌دست می‌آورد.

به‌منظور استفاده از این روش، ورودی  $x_i$  در معادله‌ی (7) تعریف می‌گردد.

$$x_i = G_i(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1}(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) \quad (7)$$

که در آن فرکانس مربوط به  $x_i$  به‌صورت  $w_i$  و  $\varphi_i$  نقطه‌ی شروع منحنی تعریف می‌گردد.  $S$  نیز متغیری در بازه‌ی  $-\pi$  تا  $\pi$  است.

$$F = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2) \quad (8)$$

که در آن  $G$  ها توابع انتقال،  $A_j$  و  $B_j$  ضرایب فوریه می‌باشند و  $f(s)$  به‌صورت معادله‌ی (9) تعریف می‌گردد:

$$f(s) = f(G_1(\sin \omega_1(s)), G_2(\sin \omega_2(s)), \dots, G_n(\sin \omega_n(s))) \quad (9)$$

در نهایت واریانس جزئی از رابطه‌ی (10) به‌دست می‌آید.

$$F_i = \sum_{p \in \mathbb{Z}^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} ((A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2)) \quad (10)$$

شاخص حساسیت کلی نیز از رابطه‌ی (11) به‌دست می‌آید.

$$ST_i = 1 - \frac{F_{-i}}{F} \quad (11)$$

### 3- بحث بر روی نتایج

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست پرداخته شده است.

شکل 2 تأثیر پارامترهای شعاع ذره، شعاع سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، عرض تیرک، طول ذره، ضریب پیواسون و مدول الاستیسیته بر نیرو در فاز دوم را در نمودارهای مختلف نشان می‌دهد.

نمودار 2- الف به بررسی تأثیر پارامتر شعاع ذره بر روی نیرو پرداخته است. با توجه به نمودار و تغییرات بسیار کم نیرو در اثر افزایش شعاع ذره، می‌توان تأثیر بسیار ناچیز این پارامتر را بر روی نیرو ملاحظه نمود.

نمودار 2- ب نیز تأثیر ناچیز پارامتر شعاع سوزن بر روی نیرو در فاز دوم منیپولیشن دوبعدی را نمایش می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌گردد که با افزایش شعاع سوزن، همانند افزایش شعاع ذره، نیرو تغییرات چندانی نخواهد داشت.

در این بخش به منظور مدل‌سازی دوبعدی حرکت در فاز دوم از معادلات موجود در مرجع شماره‌ی [18] استفاده شده است. نیروی وارده از طرف تیرک بر ذره در معادلات (1) و (2) آورده شده است.

$$F_x = F_{cr} \cos \theta \quad (1)$$

$$F_y = F_{cr} \sin \theta \quad (2)$$

با توجه به حرکت ذره در محور X و عدم حرکت در محور Y معادلات دینامیکی طبق معادلات (3) و (4) تعریف می‌شوند.

$$\sum F_x = ma_x \rightarrow F_x - f_f = ma_x \rightarrow F_{cr} \cos \theta - \mu F_{cr} (\sin \theta + mg) - \pi a_{jKR}^2 = ma_x \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_y + mg - N = 0 \rightarrow N = F_{cr} \sin \theta + mg \quad (4)$$

شعاع تماسی و نیروی تماسی با توجه به مدل تماسی مورد نظر در معادلات قرار می‌گیرند.

در نهایت شتاب ذره با توجه به معادلات (3) و (4) در معادله‌ی (5) بدست می‌آید.

$$a_x = \frac{1}{m} (F_{cr} \cos \theta - \mu F_{cr} (\sin \theta + mg) - \pi a_{jKR}^2) \quad (5)$$

معادله‌ی جابه‌جایی ذره‌ی هدف را نیز می‌توان از معادله‌ی (6) بدست آورد.

$$x = \int \frac{1}{m} \left( (F_{cr} \cos \theta - \mu F_{cr} (\sin \theta + mg) - \pi a_{jKR}^2) dt \right) dt \quad (6)$$

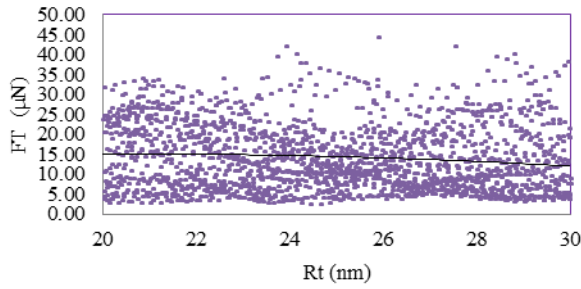
### 2-2- آنالیز حساسیت ای-فست

تحلیل حساسیت به منظور بررسی تأثیر تغییر دادن متغیرهای مستقل در یک محدوده‌ی مشخص بر خروجی‌های سیستم انجام می‌شود. هدف از این تحلیل‌ها بهینه‌سازی مسائل موجود و حذف پارامترهای غیرضروری می‌باشد.

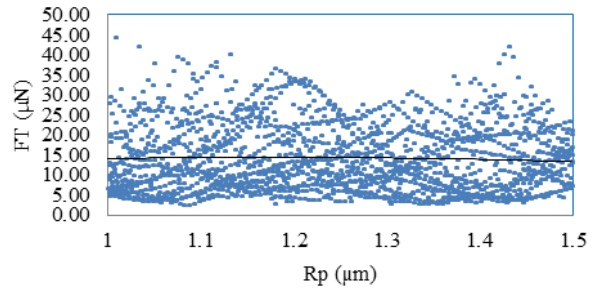
آنالیز حساسیت دارای روش‌ها و مدل‌های مختلفی می‌باشد. از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های آنالیز حساسیت، روش‌های گرافیکی، دیفرانسیلی و آماری می‌باشند. روش‌های آماری به دلیل بررسی همزمان اثر پارامترهای ورودی و نیز مشخص نمودن اثرات کیفی و کمی پارامترها، به طور همزمان، موارد کاربرد گسترده‌ای دارند.

از پرکاربردترین و مهم‌ترین روش‌های آماری نیز، روش‌های سوبل و ای-فست می‌باشند. روش سوبل دارای دقت بالا و در مقابل روش ای-فست سرعت بالاتری دارد، که با توجه به نوع مسئله می‌توان یکی از این دو روش را انتخاب نمود.

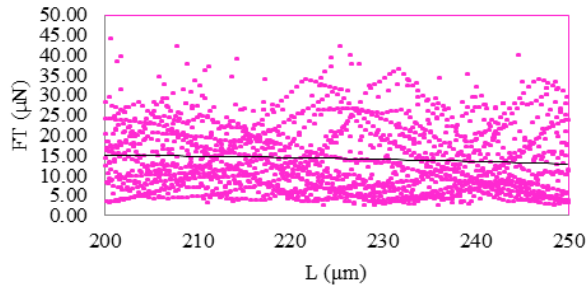
روش آماری مورد استفاده در تحلیل حساسیت، در این مقاله، به دلیل اهمیت سرعت حل بالاتر، روش ای-فست می‌باشد؛ که از طریق تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به



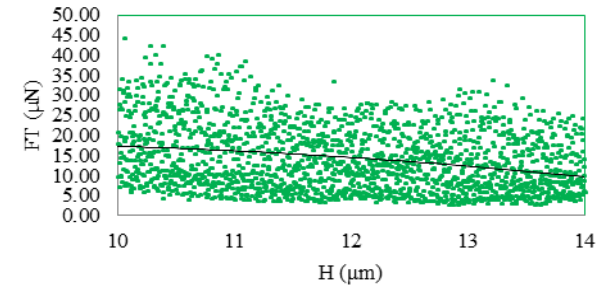
(ب)



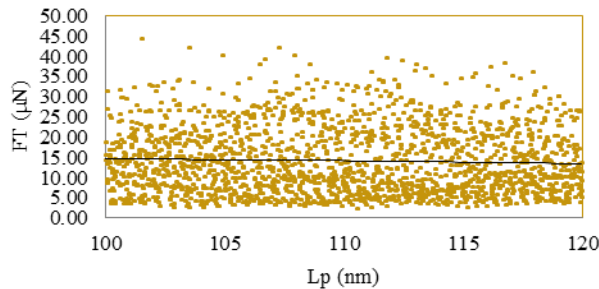
(الف)



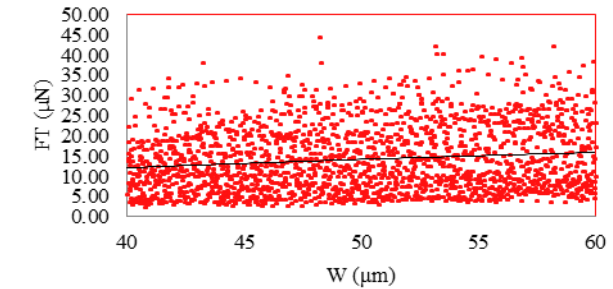
(پ)



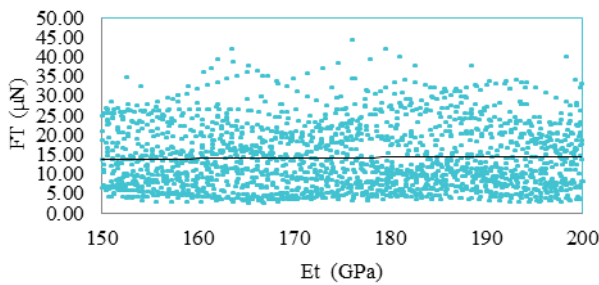
(ت)



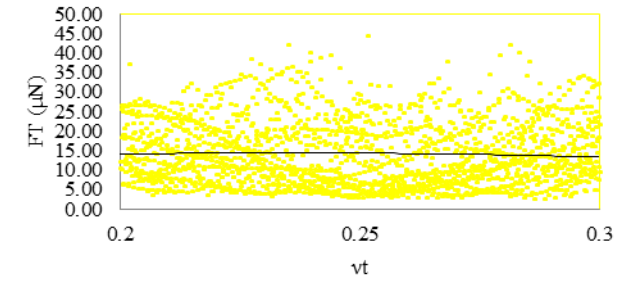
(ج)



(ث)



(چ)



(ح)

نمود. با توجه به شیب سایر نمودارها، میزان تأثیرگذاری این پارامتر نسبت به پارامتر ارتفاع سوزن کمتر ولی در مقایسه با سایر پارامترها بیشتر بوده است.

همچنین تأثیر بسیار ناچیز پارامتر طول ذره نیز در نمودار 2-ج قابل مشاهده است.

اثر پارامتر ضریب پواسون بر نیرو نیز در نمودار 2-چ مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودار، از تأثیر این پارامتر نیز می‌توان در طی فرآیند چشم‌پوشی نمود.

در نهایت تأثیر مدول الاستیسیته بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن در نمودار 2-ح مورد بررسی قرار گرفته است.

تأثیر پارامتر ارتفاع سوزن بر روی نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن در نمودار 2-پ قابل مشاهده است. در این نمودار مشاهده می‌گردد که افزایش ارتفاع سوزن، سبب کاهش قابل ملاحظه‌ی نیرو در فاز دوم می‌شود، به طوری که می‌توان از تغییرات نسبتاً زیاد نیرو در این نمودار، در مقایسه با سایر نمودارها، به اثرگذاری زیاد پارامتر ارتفاع بر تغییرات نیرو پی برد. افزایش پارامتر طول تیرک نیز سبب کاهش ناچیز نیرو می‌شود که در نمودار 2-ت قابل مشاهده است.

با توجه به نمودار 2-ث، از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن می‌توان به عرض تیرک اشاره



مقایسه بین شیب نسبی خطوط نمودارهای شکل 2 که نتایج گرافیکی اثرات پارامترهای مختلف را نشان می‌دهند، با شکل 3 که اثرات کمی این پارامترها را نشان می‌دهند، نشان‌گر صحت کارهای انجام شده می‌باشد.

#### 4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به منظور شناخت فرآیند نانومنیپولیشن باید دو فاز اول و دوم نانومنیپولیشن را مورد بررسی قرار داد. فاز اول از زمان اعمال نیرو توسط تیرک بر ذرات هدف تا لحظه‌ی شروع به حرکت ذرات هدف و فاز دوم از لحظه‌ی شروع به حرکت، تا رسیدن به مقصد مورد نظر برای ذرات هدف می‌باشد. در تحقیقات متعدد گذشته، پارامترهای مختلف در فاز اول و به منظور رسیدن به نیرو و زمان بحرانی پیش از شروع حرکت به طور کامل توسط پژوهشگران مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است.

فاز دوم که شامل بررسی آغاز به حرکت میکرونانوذره بر روی صفحه‌ی مینا، مدل‌سازی و شبیه‌سازی معادلات دینامیکی حرکت، کنترل حرکت و بررسی عوامل تأثیرگذار تا رسیدن میکرونانوذره به نقطه‌ی به هدف می‌باشد، به دلیل پیچیده شدن معادلات حرکت و پارامترهای متعدد مؤثر بر آن، کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

در این مقاله برای اولین بار به استفاده از آنالیز حساسیت به روش آماری ای-فست جهت بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای شعاع ذره، ضریب پواسون، ارتفاع سوزن، طول تیرک، عرض تیرک، طول ذره، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن پرداخته شده است.

نتایج به دست آمده حاکی از اثرگذاری ارتفاع سوزن، به عنوان اولین پارامتر حساس و مؤثر بر نیرو، و سپس پارامترهای عرض تیرک، مدول الاستیسیته و طول تیرک، به عنوان پارامترهای مؤثر بعدی بر نیرو در بازه‌های مورد بررسی می‌باشد. در بررسی و تحلیل نتایج، توجه به این نکته که بازه‌های در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی بسیار مهم بوده و تغییر این بازه‌ها می‌تواند موجب تغییر در نتایج گردد، امری ضروری می‌باشد. لذا بایستی در انتخاب بازه‌های پارامترهای ورودی دقت نموده و آن‌ها را با توجه به مقادیر موجود واقعی انتخاب نمود. به منظور شناخت کامل فاز دوم می‌توان در تحقیقات آتی سایر پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند، مانند پارامترهای هندسی تیرک و ذره را با استفاده از سایر روش‌های تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان به منیپولیشن سه‌بعدی جهت نزدیک‌تر شدن نتایج به واقعیت در کارهای آتی پرداخت.

مشاهده می‌گردد که این پارامتر نیز بعد از ارتفاع و عرض تیرک تأثیر قابل توجهی را ایجاد می‌کند.

شکل 3 به بررسی نتایج کلی به دست آمده در این پژوهش، از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست و تأثیر کمی پارامترهای ورودی مورد بررسی بر نیرو به صورت گرافیکی پرداخته است. نتایج ذکر شده در این شکل با استفاده از نرم‌افزار سیم‌لب<sup>1</sup> استخراج شده است و به بررسی میزان درصد اثرگذاری پارامترهای ورودی مختلف مورد نظر این پژوهش در پارامتر خروجی نیرو می‌پردازد.

باتوجه به مقادیر این نمودار می‌توان پارامتر ارتفاع سوزن را به‌عنوان مؤثرترین پارامتر تأثیرگذار بر نیرو با مقدار اثرگذاری 48 درصد معرفی نمود. همچنین پارامترهای عرض تیرک با مقدار 19 درصد و مدول الاستیسیته با مقدار 14 درصد نیز از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر نیرو در فاز دوم منیپولیشن دو بعدی می‌باشند. طول تیرک نیز با 8 درصد اثرگذاری، اثر متوسطی بر نیرو خواهد داشت.

همچنین نتایج به دست آمده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست در شکل 3 نشان می‌دهد که سایر پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، شامل شعاع میکرونانوذره هدف، شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن و طول ذره، با مقادیر تقریباً مشابه تأثیر تقریباً یکسان و ناچیزی بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی دارند.

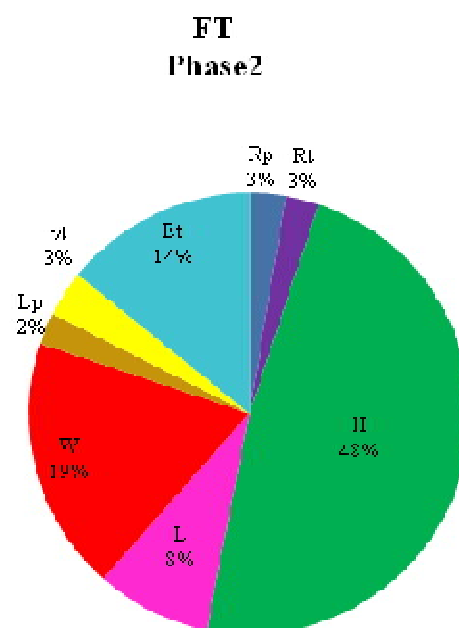


Figure 3 Comparative study of parameters on force in the second phase of nanomanipulation

شکل 3 بررسی مقایسه‌ای پارامترها بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن

<sup>1</sup> Simlab

for industrial applications, *Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 8, pp. 33-42, 2019 (in Persian).

- [4] F. Nan, and Z. Yan, Synergy of intensity, phase and polarization enables versatile optical nanomanipulation, *Nano letters*, Vol. 20, pp. 2778-2783, 2020.
- [5] J. Chen, and K. Xu, Applications of atomic force microscopy in materials, semiconductors, polymers, and medicine: A minireview, *Instrumentation Science and Technology*, Vol. 48, No. 6, pp. 667-681, 2020.
- [6] M. H. Korayem, and Z. Rastegar, Development of 3D manipulation of viscoelastic biological cells by AFM based on contact models and oscillatory drag, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 1-13, 2020.
- [7] M. Azad, A. Mohammadi, and A. R. Fadaei Tehrani, Manufacturing and characterization of copper nano particles by ultrasonicassisted electrical discharge machining, *Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 24-31, 2019 (in Persian).
- [8] Y. Tiana, C. H. Zhoua, F. Wanga, K. Lua, and D. Zhang, A novel compliant mechanism based system to calibrate springconstant of AFM cantilevers, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 309, pp. 112027:1-11, 2020.
- [9] S. H. Yuan, Z. H. Wang, L. Liu, N. Xi, and Y. Wang, Stochastic Approach for Feature-Based Tip Localization and Planning in Nanomanipulations, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 1643-1654, 2017.
- [10] M. H. Korayem, S. Shahali, and Z. Rastegar, Simulation of 3D Nanomanipulation for rough spherical elastic and viscoelastic particles in a liquid medium; experimentally determination of cell's roughness parameters and Hamaker constant's correction, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 90, pp. 313-327, 2018.
- [11] L. Zhou, M. Cai, T. Tong, and H. Wang, Progress in the Correlative Atomic Force Microscopy and Optical Microscopy, *Sensors*, Vol. 17, pp. 938:1-15, 2017.
- [12] P. Panahi, M. H. Korayem, and H. Khaksar, Manipulation of ellipsoidal nanoparticles considering roughness based on atomic force microscopy, *Journal of Multi-body Dynamics*, Vol. 233, No. 3, pp. 1-13, 2019.
- [13] M. H. Korayem, M. Jahanshahi, and H. Khaksar, Modeling and simulation of the dynamics, contact mechanics and control of the nanomanipulation of elliptical porous alumina nanoparticles based on atomic force microscopy, *Journal European Journal of Mechanics-A/Solids*, pp. 104060:1-40, 2020.
- [14] M. H. Korayem, H. Khaksar, and H. J. Sharahi, Modeling and simulation of contact parameters of elliptical and cubic nanoparticles to be used in nanomanipulation based on atomic force microscope, *Ultramicroscopy*, Vol. 206, pp. 112808:1-12, 2019.
- [15] M. H. Korayem, and H. Khaksar, Investigating the

## 5- فهرست علائم

JKR شعاع تماس در مدل	$a$
ضرایب فوریه	$A$
شتاب در راستای محور x	$a$
ضرایب فوریه	$B$
نیروی بحرانی	$F_i$
نیروی اصطکاک	$f_j$
واریانس جزئی	$F_i$
نیرو در راستای محور x	$F_x$
نیرو در راستای محور y	$F_y$
شتاب گرانش	$g$
تابع انتقال	$G$
جرم	$m$
نیروی عمودی سطح	$N$
متغیری در بازه $-\pi$ تا $\pi$	$s$
شاخص حساسیت کلی	$S$
متغیر ورودی	$x$

## علائم یونانی

زاویه نیرو	$\theta$
ضریب اصطکاک	$\mu$
ضریب چسبندگی	$\tau$
نقطه‌س شروع مربوط به $x_i$	$\varphi$
فرکانس مربوط به $x_i$	$\omega$

## 6- تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اراک و در قالب طرح پژوهشی به شماره قرارداد 98/10043 مورخ 1398/10/9 صورت پذیرفته است.

## 7- مراجع

- [1] M. Taheri, Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model, *Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 45-53, 2016 (in Persian).
- [2] M. H. Korayem, Z. Mahmoodi, M. Taheri, and M. B. Sarraee, Three-dimensional modeling and simulation of the AFM-based manipulation of spherical biological micro/nanoparticles with the consideration of contact mechanics theories, *Journal of Multi-Body Dynamics*, Vol. 229, No. 4, pp. 370-382, 2015.
- [3] M. Behzadnasab, and M. Hosseini, Optimization of Physical-Mechanical Properties of light cure Resins for use in 3D printing by micro and nano additives



- biological micro/nanoparticles based on AFM, *Journal of Nanoparticle Reserch*, Vol. 16, pp. 2156:1-18, 2014.
- [21] G. Li, N. Xi, H. Chen, C. Pomeroy, and M. Prokos, Videolized Atomic Force Microscopy for Interactive Nanomanipulation and Nanoassembly, *The Institute of Electrical and Electronics Engineer Tranctions on Nanotechnology*, Vol. 4, pp. 605-615, 2005.
- [22] M. Seifnejad Haghighi, M. R. Sajjadi, and H. Nejat Pishkenari, Model-based topography estimation in trolling mode atomic force microscopy, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 77, pp. 1025-1040, 2020.
- [23] M. H. Korayem, M. Taheri, H. Khaksar, and S. H. Bathaee, Using Micro/Nano Scale Contact Models in 3D Manipulation of Deformation of Au Particles Under Angular Effect, *Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp. 33-43, 2020 (in Persian).
- [24] M. Zakeri, J. Faraji, and M. Kharazmi, Multipoint contact modeling of nanoparticle manipulation on rough surface, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 18, No. 12, pp. 1- 23, 2016.
- [25] M. H. Korayem, and M. Zakeri, Dynamic modeling of manipulation of micro/nanoparticles on rough surfaces, *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 15 pp. 6503-6513, 2011.
- impact models for nanoparticles manipulation based on atomic force microscope (according to contact mechanics), *Powder Technology*, Vol. 344, pp. 17-26, 2018.
- [16] A. Kamel, M. Pour, H. Karimi Male, and E. Jamshidi, Experimental evaluation of the effect of the mass of ZnO, Nio, Fe3O4, Cdo nanoparticles on the damping ratio of Nano-fluid with glycerin base, *Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 8- 16, 2020 (in Persian).
- [17] A. D'Orlando, M. Bayle, G. Louarn, and B. Humbert, AFM-Nano Manipulation of Plasmonic Molecules Used as "Nano-Lens" to Enhance Raman of Individual Nano-Objects, *Materials*, Vol. 12, No. 9, pp. 1372:1-14, 2019.
- [18] B. Zarei, S. H. Bathaee, M. Taheri, and M. Momeni, Second Phase of Nanomanipulation of Particles by Atomic Force Microscopy Using Coulomb, HK, and LuGre Friction Model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, pp. 181-190, 2019.
- [19] M. Zakeri, and M. H. Korayem, Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, pp. 714-726, 2009.
- [20] M. H. Korayem, and M. Taheri, Modeling of various contact theories for the manipulation of different