



Investigation and Sensitivity Analysis of Dimensional Parameters and Velocity in the 3D Nanomanipulation Dynamics of Carbon Nanotubes Using Statistical Sobol Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Taheri M.* PhD

How to cite this article

Taheri M. Investigation and Sensitivity Analysis of Dimensional Parameters and Velocity in the 3D Nanomanipulation Dynamics of Carbon Nanotubes Using Statistical Sobol Method. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1):125-135.

ABSTRACT

Critical force and time are the two important output parameters in nanomanipulation of different particles. Various input parameters affect the critical force and time, among which dimensional parameters and velocity can be considered the most important ones. To accurately calculate the critical forces and time of the manipulation requires careful analysis of the effect of various input parameters. One of the new methods in affecting the sensitivity analysis of input parameters on problems are statistical sensitivity analysis methods, one of the most accurate methods of which is the Sobol method. Previously, research on the influence of various parameters on the 2D manipulation has been done. In this paper, for the first time, using Sobol statistical sensitivity analysis method, effects of various dimensional parameters, including length of cantilever, width of cantilever, thickness of cantilever, height of tip, the speed in direction of the x and y-axes, radius of the particle, radius of the tip needle, and length of particle have been studied on 8 output parameters, including critical force of sliding along the x-axis, rolling around the x-axis, sliding along the y-axis, rolling around the y-axis, and critical time of sliding along the x-axis, rolling around the x-axis, sliding along the y-axis, and rolling around the y-axis in 3D manipulation. The final obtained results demonstrate that "cantilever thickness" and "cantilever length" are the most influential parameters on critical forces, and "tip height" and "cantilever thickness" are the most influential ones on critical times.

Keywords 3D Nanomanipulation; Critical Force and Time; Sensitivity Analysis; Sobol Statistical Method; Carbon Nanotubes

CITATION LINKS

- [1] Development of augmented reality system for AFM-based nanomanipulation [2] Assembly of nanostructure using AFM based nanomanipulation system [3] Aspect ratio and dimension effects on nanorod manipulation by atomic force microscope [4] Modeling and control of AFM-based nano-manipulation systems [5] Imaging and manipulation of biological structures with the AFM [6] Cellular injection using carbon nanotube: A molecular dynamics study [7] Vibrational modes and frequencies of borophene in comparison with graphene nanosheets [8] Thermal conductivity of porous graphene nanoribbon implemented in mass detection operations [9] Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models [10] Sensitivity analysis of coulomb and HK friction models in 2D AFM-based nano-manipulation: Sobol method [11] Investigating the effective parameters in the atomic force microscope-based dynamic manipulation of rough micro/nanoparticles by using the Sobol sensitivity analysis method [12] Modeling of friction in micro/nano scale with random roughness distribution [13] Dynamic modeling of nano/microparticles displacement with multi-point contact based on the Rumpf model [14] Modeling and simulation of three dimensional manipulations of biological micro/nanoparticles by applying cylindrical contact mechanics models by means of AFM [15] Dynamic modeling and simulation of 3D manipulation on rough surfaces based on developed adhesion models [16] Dynamics modeling of nanoparticle in AFM-based manipulation using two nanoscale friction models [17] Optimal sliding mode control for atomic force microscope tip positioning during nano-manipulation process [18] 3D-dynamic modeling and simulation of biological nanoparticle motion using AFM nano-robot [19] 3D modeling of nanoparticle manipulation in air using HK friction model [20] Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model [21] Sensitivity analysis of 3D manipulation of spherical nanoparticles by using E-fast method [22] Sensitivity analysis: Gauging the worth of scientific models

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

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Arak University, Sardasht, Arak, Iran.
Postal Code: 3815688349
Phone: +98 (86) 32625724
Fax: +98 (86) 32625001
m-taheri@araku.ac.ir

Article History

Received: April 14, 2018
Accepted: October 06, 2018
ePublished: January 01, 2019

بررسی و تحلیل حساسیت پارامترهای ابعادی و سرعت در دینامیک نانومنیپولیشن سه‌بعدی نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش آماری سوبل

معین طاهری* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

نیرو و زمان بحرانی دو پارامتر خروجی مهم در نانومنیپولیشن ذرات مختلف هستند. پارامترهای ورودی مختلفی بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن اثرگذار بوده که پارامترهای ابعادی و سرعت را می‌توان مهم‌ترین آنها دانست. برای محاسبه دقیق نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن نیاز به تحلیل دقیق میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف ورودی است. یکی از روش‌های نوین در تحلیل حساسیت اثرگذاری پارامترهای ورودی بر مسایل، روش‌های تحلیل حساسیت آماری هستند که یکی از دقیق‌ترین این روش‌ها، روش سوبل است. پیش از این تحقیقاتی در رابطه با اثرگذاری پارامترهای مختلف بر منیپولیشن دوبعدی صورت پذیرفته است. در این مقاله برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل اثر پارامترهای ابعادی مختلف شامل ۹ پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای X و Y، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره بر ۸ پارامتر خروجی شامل نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y، غلتش حول محور Y و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y در منیپولیشن سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کلی به‌دست‌آمده بیانگر این است که پارامترهای ضخامت تیرک و طول تیرک اثرگذارترین پارامترها بر نیروهای بحرانی و پارامترهای ارتفاع سوزن و ضخامت تیرک اثرگذارترین پارامترها بر زمان‌های بحرانی هستند.

کلیدواژه‌ها: نانومنیپولیشن سه‌بعدی، نیرو و زمان بحرانی، تحلیل حساسیت، روش آماری سوبل، نانولوله‌های کربنی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۴

* نویسنده مسئول: m-taheri@araku.ac.ir

۱- مقدمه

در منیپولیشن و جابه‌جایی میکرو/نانوذرات مختلف، محاسبه نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن امری ضروری و مهم است. اهمیت محاسبه دقیق نیروی بحرانی منیپولیشن به‌منظور بررسی عدم آسیب‌رسانی به میکرو/نانوذرات هدف است، زیرا در صورت افزایش بیش از حد نیروی بحرانی، میکرو/نانوذره هدف به‌ویژه در ذرات بیولوژیک دچار آسیب جدی خواهد شد. همچنین اهمیت محاسبه دقیق زمان بحرانی منیپولیشن به‌منظور جابه‌جایی دقیق میکرو/نانوذرات هدف است، زیرا تا قبل از رسیدن به زمان بحرانی منیپولیشن، میکرو/نانوذرات هدف به سطح صفحه مبنا چسبیده و هیچ‌گونه حرکتی نداشته است و جابه‌جایی ذره پس از زمان بحرانی رخ خواهد داد، لذا برای رسیدن ذره به مکان دقیق مورد نظر روی صفحه مبنا نیاز به محاسبه دقیق زمان بحرانی بوده است و در صورت دقیق‌نبودن زمان بحرانی محاسبه‌شده، میکرو/نانوذرات هدف به نقطه مورد نظر نمی‌رسد یا از آن عبور خواهند نمود. به‌دلیل اهمیت ذکرشده، تحقیقات گسترده‌ای توسط محققان مختلف در رابطه با مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند منیپولیشن برای محاسبه نیرو و زمان بحرانی در شرایط مختلف و با استفاده از تئوری‌های تماسی و اصطکاکی مختلف صورت پذیرفته است.

بیش از دو دهه است که از میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان ابزاری برای منیپولیشن و جابه‌جایی میکرو/نانوذرات استفاده می‌شود^[1]. مونتاز نانو ساختارها شامل منیپولیشن نانوذرات، نانومیمه‌ها، نانوسیم‌ها و نانولوله‌ها است. مدل‌سازی رفتار

منیپولیشن یک نانومیمه یا نانولوله تحت فشار توسط نوک میکروسکوپ نیروی اتمی، بسیار پیچیده‌تر از یک نانوذره است^[2]. مرادی و همکاران^[3] به بررسی ابعاد و نسبت ابعادی نانولوله‌ها در منیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و رفتاری و همکاران^[4] به توسعه یک طرح مدل و کنترل برای سیستم‌های نانومنیپولیشن براساس میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. این مدل شامل دینامیک کوپل‌شده میکروتیرک و محرک پیزوتیوب است. فوتیادیس و همکاران^[5] به تصویربرداری و منیپولیشن ساختارهای زیستی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و محبویی و همکاران^[6] با یک‌سری از شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی به مطالعه نفوذ نانولوله‌های کربنی به یک غشای سلولی تحت سرعت تزریق‌های مختلف پرداخته‌اند. همچنین صادق‌زاده و خطیبی^[7] به بررسی فرکانس‌ها و مودهای ارتعاشی بوروفن در مقایسه با نانوذرات گرافنی با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی پرداخته‌اند. همچنین صادق‌زاده و رضاپور^[8] هدایت حرارتی نانونوار گرافن متخلخل استفاده‌شده در عملیات آشکارسازی جرم را با استفاده از روش دینامیک مولکولی بررسی کرده‌اند.

کورایم و همکاران^[9] پس از تعریف مساله منیپولیشن دوبعدی، مدل‌های اصطکاکی مختلف برای کاربرد در مقیاس میکرو/نانو را ارائه نموده‌اند. آنها همچنین معادلات دینامیک منیپولیشن دوبعدی نانوذرات را استخراج کرده و نهایتاً معادلات دینامیک سیستم را با استفاده از مدل‌های اصطکاکی دقیق‌تر شبیه‌سازی نموده و به محاسبه نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن پرداخته‌اند. کورایم و همکاران^[10]، آنالیز حساسیت آماری مدل‌های اصطکاکی مختلف را با استفاده از مدل سوبل در منیپولیشن دوبعدی مورد توجه قرار داده و تاثیر پارامترهای مختلف ابعادی و محیطی را بر نیروی بحرانی منیپولیشن دوبعدی بررسی نموده‌اند. همچنین کورایم و همکاران^[11] به بررسی آنالیز حساسیت آماری تاثیر پارامترهای مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن دوبعدی ذرات زبر با استفاده از روش سوبل پرداخته‌اند.

ذاکری و خوارزمی^[12] به مدل‌سازی اصطکاک در مقیاس میکرو/نانو در سطوحی با توزیع زبری تصادفی پرداخته‌اند. آنها برای این منظور مدل اصطکاکی توسعه‌یافته AMM را برای تماس سطوح تخت صاف/تخت زبر براساس مدل تماسی JKR، مدل اصطکاکی HK و توزیع زبری تصادفی گرینوود- ویلیامسون استخراج نموده‌اند. طبق نتایج شبیه‌سازی، مدل اصطکاکی توسعه‌یافته AMM با در نظر گرفتن نیروهای سطحی مقیاس نانو، نیروی اصطکاکی بزرگ‌تری را در مقایسه با مدل اولیه AMM پیش‌بینی می‌کند و از دقت بالاتری برخوردار است. نتایج آنها همچنین نشان می‌دهد که نیروی عمودی و نیروی اصطکاکی با افزایش مقدار انحراف‌معیار ارتفاع زبری‌ها افزایش می‌یابد، در حالی که ضریب اصطکاک با افزایش مقدار انحراف‌معیار کاهش پیدا می‌کند.

همچنین ذاکری و فرجی^[13] به مدل‌سازی دینامیکی جابه‌جایی نانو/میکروذرات در تماس چندنقطه‌ای بر پایه مدل رامپ پرداخته‌اند. برای این منظور یک مدل تماس چندنقطه‌ای برای دو سطح با هندسه زبری متفاوت شامل پروفیل زبری شش‌وجهی و چهاروجهی، از ترکیب مدل تماس تک‌نقطه‌ای رامپ با مدل‌های تماسی JKR و شوارتز، استخراج و معادلات مربوط به سطح تماس واقعی و نیروی چسبندگی برای تماس چندنقطه‌ای سطوح زبر ارائه شده است.

کورایم و همکاران^[14] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی منیپولیشن سه‌بعدی میکرو/نانوذرات بیولوژیک با استفاده از مدل‌های مکانیک

مینیولیشن با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوپل در مینیولیشن سه‌بعدی بررسی شده است. همچنین در زمینه مینیولیشن سه‌بعدی نیز مدل‌سازی‌های مختلفی با استفاده از مدل‌های اصطکاکی متفاوت صورت پذیرفته، اما در مینیولیشن سه‌بعدی، بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در فرآیند مینیولیشن و نیرو و زمان بحرانی حرکت صورت پذیرفته است.

یافتن متغیرهای ورودی که تاثیر چندانی روی خروجی ندارند و حذف آنها از معادلات سیستم برای ساده‌سازی معادلات دکوپله حاکم بر سیستم، امری مهم و ضروری است. از آنجایی که فرآیند مینیولیشن سه‌بعدی بسیار پیچیده‌تر از مینیولیشن دو‌بعدی بوده است و پارامترهای بیشتری در آن دخیل هستند، لذا آنالیز حساسیت تاثیر پارامترهای مختلف نسبت به مینیولیشن دو‌بعدی ضرورت بیشتری داشته است و با شناسایی پارامترهای مختلف حساس و غیرحساس در فرآیند مینیولیشن سه‌بعدی می‌توان مدل‌سازی را بسیار ساده‌تر نمود.

از این رو در این مقاله، ابتدا مقدمه‌ای در رابطه با روش‌های مختلف آنالیز حساسیت، ذکر و به تشریح مدل آنالیز حساسیت آماری سوپل و سپس به بررسی مدل کلی مینیولیشن سه‌بعدی پرداخته شده است. پس از آن برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوپل، اثر پارامترهای ابعادی مختلف شامل ۹ پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای X و Y، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره بر ۸ پارامتر خروجی شامل نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y، غلتش حول محور Y، زمان بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y در مینیولیشن سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته و شایان ذکر بوده که در این مقاله با توجه به عدم استفاده از روش‌های دینامیک مولکولی و استفاده از روش مکانیک محیط پیوسته به دلیل ابعاد نانولوله، از تغییر شکل نانولوله در این مقاله صرف نظر شده است.

۲- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا روش آنالیز حساسیت سوپل تشریح شده و سپس مدل‌سازی دینامیک و الگوریتم چگونگی انجام آنالیز حساسیت توضیح داده شده است.

۲-۱- بررسی روش‌های آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت بر حسب فرم مدل به روش‌های ریاضی، آماری و گرافیکی دسته‌بندی می‌شود که در ادامه به روش آماری سوپل پرداخته شده است.

روش آماری: این تحلیل حساسیت به صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی ورودی می‌پردازد، سپس تاثیر این ورودی را بر خروجی ارزیابی می‌کند. در این روش‌ها می‌توان اثر متقابل بین چندین ورودی را روی خروجی مشخص کرد. در این روش‌ها حساسیت خروجی مدل به‌ازای یک یا چندین ورودی ارزیابی می‌شود. در این روش‌ها علاوه بر این که امکان مقایسه کیفی نتایج و مشاهده خروجی‌ها وجود دارد، می‌توان به مقایسه کمی نتایج نیز پرداخت و پارامترهای حساس و غیرحساس را شناسایی نمود.

روش آنالیز حساسیت سوپل یک روش آماری بوده و تحلیل حساسیت سوپل از روش‌های تحلیل حساسیت بر پایه واریانس پارامترهای ورودی سیستم روی تغییرهای خروجی سیستم است. با استفاده از روش سوپل می‌توان تاثیرگذاری پارامترهای ورودی را بر خروجی سیستم محاسبه نمود و از آن برای استفاده در معادلات

تماس استوانه‌ای با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آنها در این پژوهش از مدل‌های تماسی هرترز، لاندبرگ، دوسون، نیک‌پور و هوپریچ برای شبیه‌سازی تماس استوانه‌ای استفاده نموده‌اند. سربای و کورایم^[15] نیز به مدل‌سازی دینامیک و شبیه‌سازی مینیولیشن سه‌بعدی روی سطوح زبر براساس مدل‌های چسبندگی پیشرفته پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان می‌دهد که با افزایش شعاع نفوذ، نیروی بحرانی مورد نیاز برای مینیولیشن نانوذرات افزایش می‌یابد.

باباحسینی و همکاران^[16] به مدل‌سازی دینامیکی نانوذرات در مینیولیشن مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از دو مدل اصطکاکی نانومقیاس پرداخته‌اند. همچنین **باباحسینی و همکاران**^[17] به کنترل حالت لغزشی بهینه برای موقعیت نوک میکروسکوپ نیروی اتمی در طول فرآیند نانومینیولیشن پرداخته‌اند. **طاهری**^[18] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مینیولیشن سه‌بعدی میکرو/نانوذرات بیولوژیک شامل دی‌ان‌ای و پلاکت در محیط هوا پرداخته و با استفاده از مدل تماسی جی‌کآر و مدل اصطکاکی کولمب نیرو و زمان بحرانی، مینیولیشن را محاسبه نموده است. نتایج حاکی از این امر است که غلتش ذرات دی‌ان‌ای نسبت به پلاکت حول محورهای مختلف نیاز به نیروی بحرانی بیشتری دارد، بدین معنا که جهت جابه‌جایی و مینیولیشن ذرات دی‌ان‌ای نیاز به نیروی بیشتری برای آغاز به حرکت این ذرات روی صفحه مینا دارد.

طاهری^[19] به مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند مینیولیشن نانوذره طلا در محیط هوا با استفاده از مدل اصطکاکی ایچ‌کا پرداخته و برای نخستین بار از مدل اصطکاکی ایچ‌کا در مدل‌سازی سینماتیک و دینامیک جابه‌جایی سه‌بعدی نانوذره طلا استفاده نموده است. برای این منظور پس از بررسی مدل‌های مهم اصطکاکی قابل کاربرد در مقیاس میکرو/نانو، به مدل‌سازی سینماتیک سه‌بعدی و استخراج ماتریس سختی تیرک مستطیل شکل پرداخته شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر اختلاف ۱۶ درصدی در نیروی بحرانی به‌دست‌آمده در نتایج سه‌بعدی نسبت به دو‌بعدی است. همچنین **طاهری**^[20]، مدل‌سازی دینامیک مینیولیشن را برای ساخت تجهیزات میکرو/نانو با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله نیز استفاده از مدل دقیق اصطکاکی لاگره بیانگر اختلاف ۱۸ درصدی در نیروی بحرانی به‌دست‌آمده در نتایج سه‌بعدی نسبت به دو‌بعدی است.

طاهری^[21] برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری ای-فست، اثر ۶ فاکتور ابعادی شامل طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیر، ارتفاع سوزن، شعاع ذره و شعاع نوک سوزن، بر ۸ پارامتر خروجی شامل نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y، غلتش حول محور Y و زمان بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y را در مینیولیشن سه‌بعدی ذرات کروی مورد بررسی قرار داده است. از نتایج این کار^[21] یکی استفاده از مدل آنالیز حساسیت ای-فست است که هر چند سرعت بالایی دارد، اما دقت آن پایین بوده و دیگری آن است که در آن به بررسی اثر سرعت پرداخته نشده است و همچنین ذرات به شکل ساده کروی فرض شده‌اند.

تاریخچه اجمالی ذکر شده نشان از اهمیت فرآیند مینیولیشن و محاسبه دقیق نیرو و زمان بحرانی در این فرآیند داشته و بیان می‌نماید که در زمینه مینیولیشن دو‌بعدی کارهای مختلفی صورت پذیرفته و تاثیر پارامترهای مختلف بر نیرو و زمان بحرانی

معادله ۴ به دست خواهیم آورد:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,k} \quad (11)$$

۱-۱-۲- اندیس حساسیت

اندازه حساسیت $S_{1,2,\dots,k}$ از تقسیم واریانس هر دسته متغیر به واریانس کل حاصل می‌شود [22].

$$S_{1,2,\dots,k} = \frac{D_{1,2,\dots,k}}{D} \quad \text{for } 1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq k \quad (12)$$

S_i را اندیس حساسیت درجه اول برای فاکتور X_i می‌نامند که بیانگر تاثیر حساسیت پارامتر X_i روی خروجی است و کسر مشارکت X_i را در واریانس $f(X)$ نشان می‌دهد و S_{ij} اندیس حساسیت درجه دوم نامیده می‌شود که تاثیر برهم‌کنش ($i \neq j$) را روی واریانس کل نشان می‌دهد.

نکته: بخش واریانسی که از برهم‌کنش ($i \neq j$) روی $f(X)$ به دست آمده است، با جمع مقدار حساسیت تک‌تک اندیس‌ها برابر نیست.

$$\sum_{i=1}^k S_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} S_{ij} + \dots + S_{1,2,\dots,k} = 1 \quad (13)$$

حال می‌توان از معادله ۱۲ به دست آورد که جمع کل اندازه حساسیت‌ها برابر یک خواهد شد.

۱-۲-۲- اندیس حساسیت کل

اندیس حساسیت کل از جمع همه اندیس حساسیت حاصل می‌شود که شامل پارامتر مورد سؤال است. برای مثال اگر مدل دارای سه فاکتور باشد، تاثیر حساسیت فاکتور ۱ که با $TS(1)$ نشان داده می‌شود، برابر است با [22]:

$$TS(i) = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} \quad (14)$$

که S_1 اندیس حساسیت درجه اول برای فاکتور ۱ بوده و S_{1j} که j مخالف یک بوده، اندیس حساسیت درجه دوم فاکتور یک است که اثر برهم‌کنش فاکتور یک و دیگر فاکتورها را بررسی می‌کند. این محاسبات براساس اندیشه‌های سوبل پایه‌ریزی شده است. همچنین اگر k فاکتور وجود دارد که در دو زیرمجموعه قرار می‌گیرند، می‌توان هر زیرمجموعه را به‌عنوان یک فاکتور جدید در نظر گرفت. به‌عنوان مثال X را می‌توان به دو بخش V و W تقسیم کرد، به نحوی که V شامل فاکتورهای X_1 تا X_t است و مابقی فاکتورها در W قرار می‌گیرد. حال افراز کلی $f(X)$ به‌صورت زیر ارایه می‌شود [22].

$$f(x) = f_0 + f_1(V) + f_2(W) + f_{12}(V, W) \quad (15)$$

$$\int f_1 dV = \int f_2 dW = \int f_{12} dV = \int f_{12} dW = 0 \quad (16)$$

$$D_V = \int f_1^2 dV \quad D_W = \int f_2^2 dW$$

$$D_{VW} = \int f_{12}^2 dVdW \quad (17)$$

واریانس کل خروجی‌ها برابر است با:

$$D = D_V + D_W + D_{VW} \quad (18)$$

اگر تاثیر واریانس V روی واریانس خروجی $0/8$ یا بیشتر باشد، می‌توانیم W را ثابت در نظر بگیریم. به عبارت دیگر می‌خواهیم تاثیر حساسیت کل V را به دست آوریم.

$$D_{V}^{total} = D_V + D_{VW} = D - D_W \quad (19)$$

اندیس حساسیت کل برای V عبارت است از:

$$TS(V) = \frac{D_{V}^{total}}{D} \quad (20)$$

دیدگاه فوق را می‌توان برای اندازه‌گیری تاثیر تک‌تک پارامترها

حاکم بر سیستم، بهینه‌کردن سیستم و همچنین تعیین میزان تاثیرگذاری برهم‌کنش پارامترهای ورودی استفاده نمود. روش سوبل یک روش دقیق آنالیز حساسیت آماری بوده و در مقایسه با روش‌های آماری دیگر از جمله ای- فست به دلیل داشتن دقت بالاتر مورد توجه این مقاله قرار گرفته است. برای توضیح روش سوبل، فضای عامل‌های ورودی Ω تعریف می‌شود [22].

$$\Omega^k = (X | 0 \leq x_i \leq 1; i = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

ایده اصلی پشت دیدگاه سوبل برگرفته شده از تابع $f(X)$ است که از مجموع توابع معادله ۲ به دست می‌آید.

$$f(x_1, \dots, x_k) = f_0 + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq k} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,k}(x_1, \dots, x_k) \quad (2)$$

کار قبلی منتشر شده در ۱۹۷۶، سوبل پایه‌های افرازهای فوق را براساس سری فوریه چندمتغیره ارایه می‌دهد. در سال ۱۹۹۰ یک فرمول کلی براساس افرازها در انتگرال‌های چندبُعدی استفاده شده است که در ادامه ارایه می‌شود [22].

f_0 در معادلات فوق عدد ثابت بوده و همچنین انتگرال هر مجموع بر حسب متغیرهای خودش صفر است.

$$\int_0^1 f_{1,\dots,i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_k} = 0, \text{ if } 1 \leq k \leq s \quad (3)$$

و متعاقباً می‌توان اثبات کرد که مجموع‌های فوق، عمود بر هم بوده و حاصل ضرب هر جفت غیرمشابه آن، صفر است.

$$\int_{\Omega^k} f_{1,\dots,i_s} f_{j_1,\dots,j_l} dX = 0 \quad (4)$$

حال f_0 به‌صورت معادله ۵ تعریف می‌شود.

$$f_0 = \int_{\Omega^k} f(X) dX \quad (5)$$

سوبل در سال ۱۹۹۳ نشان داد که افرازهای فوق یکتا است و همه ترم‌های فرمول $f(X)$ از طریق انتگرال‌های چندگانه محاسبه می‌شوند.

$$f_i(x_i) = -f_0 + \int_0^1 \dots \int_0^1 f(X) dX_{\sim i} \quad (6)$$

$$f_{ij}(x_i, x_j) = -f_0 - f_i(x_i) + \int_0^1 \dots \int_0^1 f(X) dX_{\sim ij} \quad (7)$$

به‌طوری که $dX_{\sim i}$ انتگرال روی همه متغیرها غیر از متغیر X_i و $dX_{\sim ij}$ انتگرال روی همه متغیرها غیر از متغیر X_i و X_j است. بدین ترتیب می‌توان فرمول پیوسته برای درجات بالاتر را نیز به دست آورد. اندیس حساسیت بر پایه واریانس به‌صورت معادله ۸ بیان می‌شود که D عبارت از واریانس $f(X)$ است.

$$D = \int_{\Omega^k} f^2(X) dX - (f_0)^2 \quad (8)$$

واریانس‌های جزئی از معادله ۹ به دست می‌آید.

$$D_{i_1,\dots,i_s} = \int_{\Omega^k} f_{i_1,\dots,i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dX - (f_0)^2 \quad (9)$$

که فرم کلی آن به‌صورت رابطه ۱۰ است که قسمت دوم فرمول به‌علت صفر بودن هر انتگرال و همچنین صفر بودن توان ۲ آن از معادلات حذف شده‌اند.

$$D_{i_1,\dots,i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f_{i_1,\dots,i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dX_{i_1} \dots dX_{i_s} \quad (10)$$

در جایی که $1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq k$ و $S = 1, \dots, k$ است، بعد از مربع‌سازی و انتگرال‌گیری از معادله ۲ روی Ω^k و در نظر گرفتن

۲-۳- الگوریتم کلی فرآیند آنالیز حساسیت

شکل ۲ الگوریتم کلی آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، به منظور آنالیز حساسیت، ابتدا باید پارامترهای ورودی انتخاب شوند که در این مقاله ۹ پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای X و Y، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شده‌اند. پس از آن باید دامنه تغییرات این ۹ پارامتر را انتخاب نمود که این دامنه تغییرات در شکل مشخص شده است. با انتخاب دامنه پارامترهای ورودی، نرم‌افزار سیمپل به تولید نمونه‌ها خواهد پرداخت و پس از تولید نمونه، پارامترهای خروجی با توجه به کد منیپولیشن تولید خواهد شد.

در این مقاله ۸ پارامتر خروجی شامل نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y، غلتش حول محور Y، زمان بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y هستند. پس از تعیین مقدار پارامترهای خروجی که در نرم‌افزار MATLAB صورت می‌پذیرد، مجدداً نرم‌افزار سیمپل با استفاده از روش سوئل به تولید اندیس‌های حساسیت می‌پردازد و فرآیند آنالیز حساسیت به پایان می‌رسد.

۳- آنالیز حساسیت پارامترهای ابعادی مختلف

در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی آنالیز حساسیت، پرداخته و اثرات پارامترهای ابعادی بر نیروی بحرانی و زمان بحرانی بررسی شده است. بایستی یادآوری نمود که اندیس‌های حساسیت بررسی شده در این مقاله، اندیس حساسیت کل است.

۳-۱- بررسی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن

نمودار ۱، اثر پارامترهای مختلف ابعادی شامل ۹ پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای X و Y، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره بر ۴ پارامتر خروجی نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y را نشان می‌دهد. در نمودار ۱- الف مشاهده می‌شود که با افزایش طول تیرک، نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X در راستای محور Y و غلتش حول محور X کاهش و نیروی بحرانی لغزش حول محور X افزایش می‌یابد. در نمودار ۱- ب مشاهده می‌شود که با افزایش عرض تیرک، نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور X کاهش و نیروی بحرانی لغزش حول محور X افزایش می‌یابد. در نمودار ۱- ج مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت تیرک، نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور X کاهش و نیروی بحرانی لغزش حول محور X افزایش می‌یابد. در نمودار ۱- د تا ۳- ط نیز نشان‌دهنده اثر ناچیز سایر پارامترها (شامل ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای X و Y، شعاع ذره، نوک سوزن و طول استوانه‌ای ذره) بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X و لغزش در راستای محور Y است.

۳-۲- بررسی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر زمان بحرانی منیپولیشن

نمودار ۲، اثر پارامترهای مختلف ابعادی شامل ۹ پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای X و Y، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره بر ۴

مشابه روش فوق استفاده کرد، به علاوه برای قسمت‌هایی که اثر برهم‌کنش بین پارامترها را بررسی می‌کند نیز بدین ترتیب عمل می‌شود که در سال ۱۹۹۶ توسط ساتلی و هما انجام گرفت. در این روش X را به دو بخش X_i و $X_{\sim i}$ تقسیم می‌کنند. حال می‌توان تاثیر حساسیت کل اندیس (i) را به صورت زیر محاسبه کرد [22]:

$$TS(i) = S_i + S_{i(\sim i)} = 1 - S_{(\sim i)} \quad (21)$$

S($\sim i$) در فرمول فوق شامل کل ترم‌هایی است که فاقد (i) هستند و کسر متمم X_i را با D_i نمایش می‌دهند که بنابراین سهم کلی X_i روی واریانس خروجی توسط فرمول زیر محاسبه می‌شود [22]:

$$TS(i) = 1 - \frac{D_{\sim i}}{D} \quad (22)$$

نکته: محاسبه $TS(i)$ نمی‌تواند ویژگی‌های کل سیستم را بیان کند. برای بررسی ویژگی‌های کل سیستم باید $(2^k - 1)$ اندیس حساسیت را محاسبه کنیم و بدین دلیل است که در کارهای تحقیقاتی، تاثیر کل فاکتورها را روی متغیرهای خروجی بررسی می‌کنند.

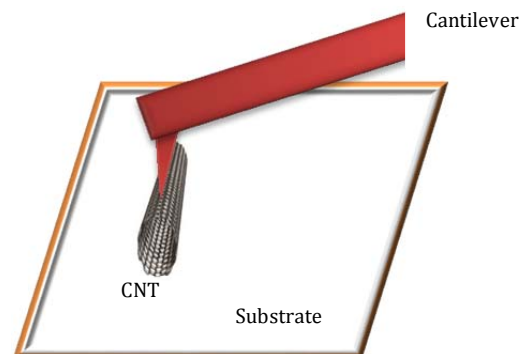
۲-۲- مدل‌سازی منیپولیشن سه‌بعدی

شکل ۱ شماتیکی از منیپولیشن نانولوله کربنی را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد. برای محاسبه نیرو در منیپولیشن سه‌بعدی داریم [18]:

$$F_X = F_x + m(\ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos\varphi \cos\psi + \frac{H\ddot{\alpha} \cos\alpha - H\dot{\alpha}^2 \sin\alpha}{2}) \quad (23)$$

$$F_Z = F_z \cos^2\alpha + m \cos^2\alpha \left(\ddot{z}_s - \ddot{\delta}_t \sin\varphi - \ddot{\delta}_s - \frac{H\ddot{\alpha} \sin\alpha \cos\theta - H(\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos\alpha \cos\theta}{2} + \frac{-H\dot{\theta} \cos\alpha \sin\theta}{2} \right) + \left(\frac{I_p \ddot{\alpha} + M_\alpha}{H} \right) \sin\theta + F_x \sin\alpha \cos\alpha \quad (24)$$

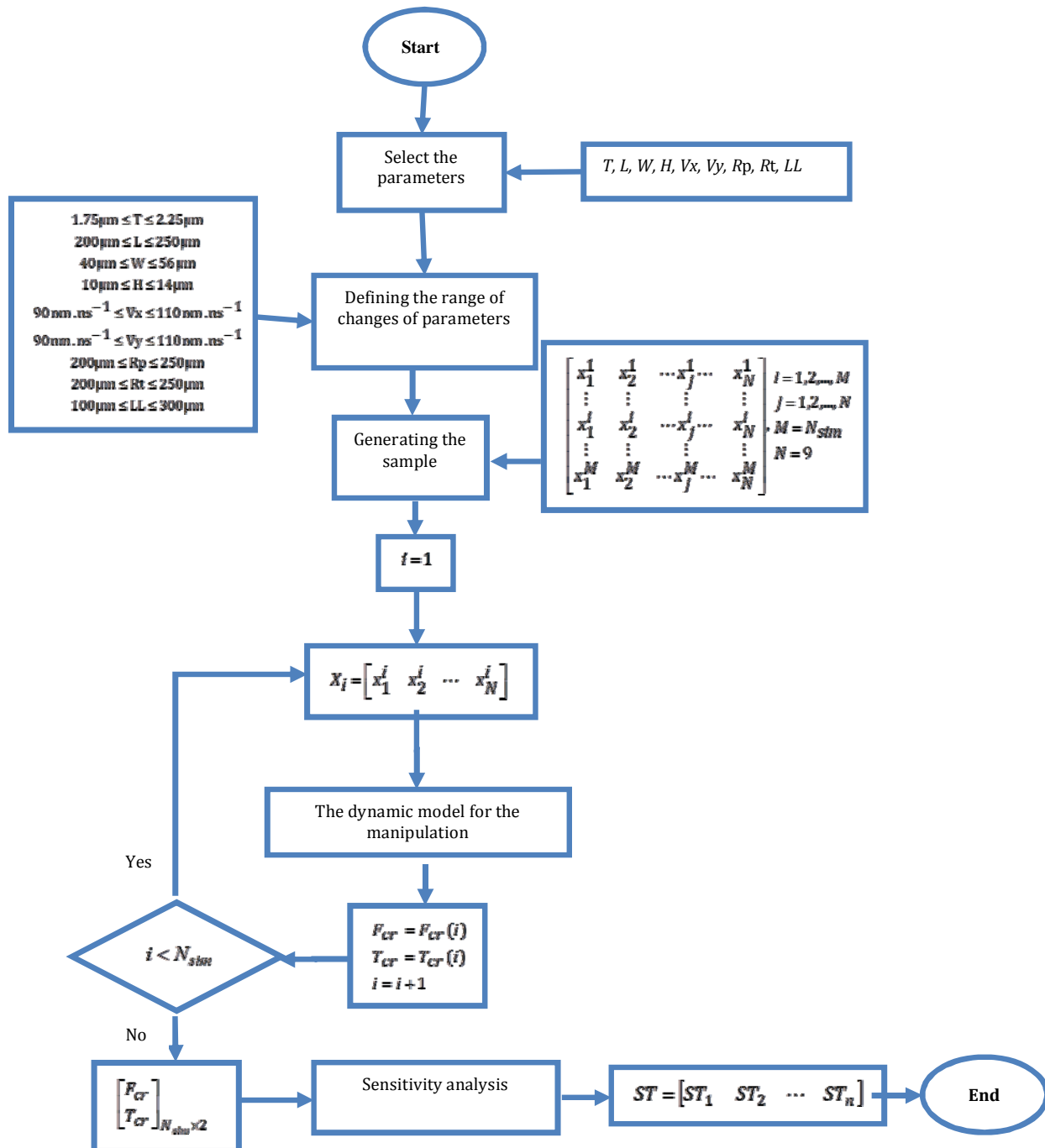
$$F_Y = F_y \sin^2\theta + m \sin^2\theta \left(\ddot{y}_s - \ddot{\delta}_t \cos\varphi \sin\psi + \frac{-H\dot{\theta} \cos\theta + H\dot{\theta}^2 \sin\theta}{2} + \left(\frac{I_p \ddot{\theta} + M_\theta}{H} \right) \cos\theta - F_z \sin\theta \cos\theta \right) \quad (25)$$



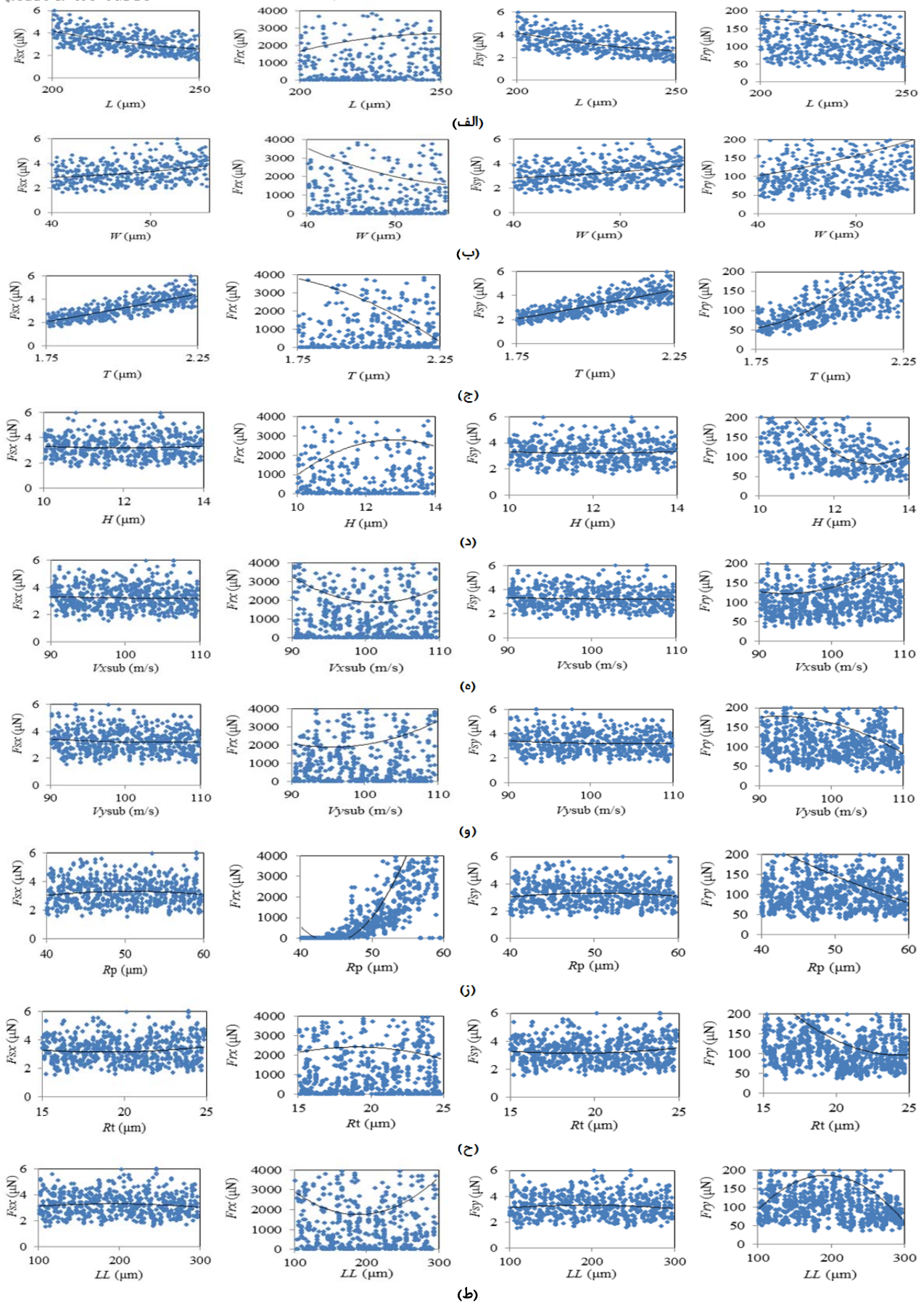
شکل ۱ شماتیک منیپولیشن نانوله کربنی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

تاثیر ناچیزی دارد. در نمودار ۲- د مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سوزن، زمان بحرانی لغزش در راستای محور X، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y افزایش خواهد یافت. نمودارهای ۲- د و ۲- و نیز نشان‌دهنده اثر پارامترهای سرعت در راستای محورهای X و Y بر زمان بحرانی لغزش است. نمودار ۲- ز نشان از اثر فراوان افزایش شعاع ذره بر افزایش زمان بحرانی غلتش حول محور X دارد. نمودار ۲- ح نیز اثر جزیبی شعاع سوزن بر زمان‌های بحرانی را نشان می‌دهد و در نهایت نمودار ۲- ط نشان از اثر نسبتاً زیاد طول استوانه‌ای ذره بر زمان بحرانی لغزش حول محور X در برابر اثر ناچیز آن بر سایر زمان‌های بحرانی دارد.

پارامتر خروجی زمانی شامل زمان بحرانی لغزش در راستای محور، غلتش حول محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y را نشان می‌دهد. در نمودار ۲- الف مشاهده می‌شود که با افزایش طول تیرک، زمان بحرانی لغزش در راستای محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y کاهش و زمان بحرانی غلتش حول محور X افزایش می‌یابد. در نمودار ۲- ب مشاهده می‌شود که افزایش عرض تیرک، اثر ناچیزی بر زمان بحرانی لغزش در راستای محور X و لغزش در راستای محور Y دارد. در نمودار ۲- ج مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت تیرک، زمان بحرانی لغزش در راستای محور X، لغزش در راستای محور Y و غلتش حول محور Y افزایش می‌یابد، در حالی که بر زمان بحرانی غلتش حول محور X،

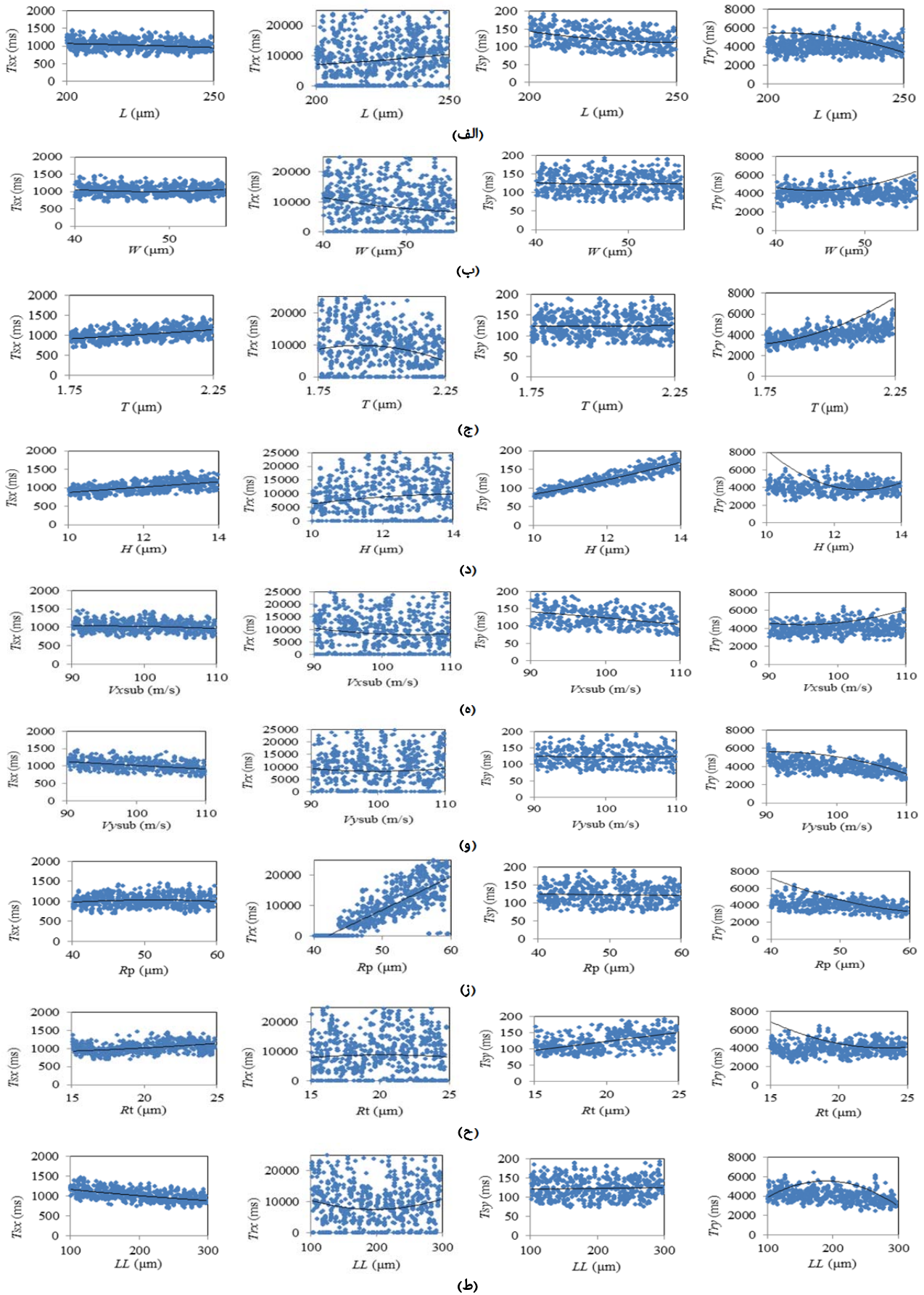


شکل ۲) الگوریتم کلی برای آنالیز حساسیت



(ب)

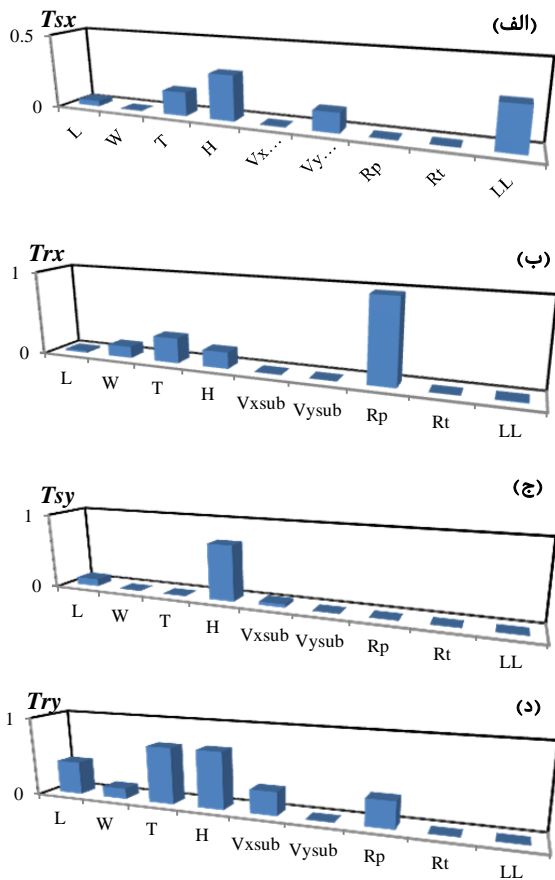
نمودار ۱ اثر پارامترهای مختلف بر نیروی بحرانی، الف) اثر طول تیرک، ب) اثر عرض تیرک، ج) اثر ضخامت تیرک، د) اثر ارتفاع سوزن، ه) اثر سرعت در راستای محور x ، و) اثر سرعت در راستای محور y ، ز) اثر شعاع نانوذر، ح) اثر شعاع نوک سوزن، ط) اثر طول نانولوله؛ از چپ به راست: لغزش در راستای محور x ، لغزش در راستای محور y و لغزش حول محور y



نمودار ۲) اثر پارامترهای مختلف بر زمان بحرانی، (الف) اثر طول تیرک، (ب) اثر عرض تیرک، (ج) اثر ضخامت تیرک، (د) اثر ارتفاع سوزن، (ه) اثر سرعت در راستای محور x ، (و) اثر سرعت در راستای محور y ، (ز) اثر شعاع نانوذره، (ح) اثر شعاع نوک سوزن، (ط) اثر طول نانولوله، از چپ به راست: لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y

۳-۴- مقایسه کمی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر زمان بحرانی منیپولیشن با استفاده از روش سوپل

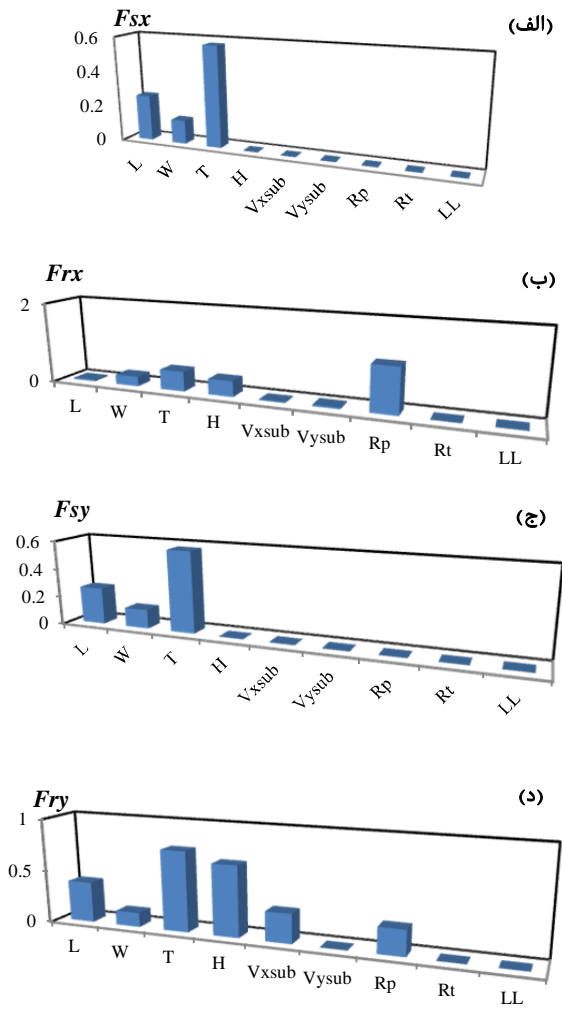
نمودار ۴، درصد تاثیر پارامترهای مختلف بر زمان‌های بحرانی براساس روش آنالیز حساسیت آماری سوپل را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار ۴- الف، پارامترهای ارتفاع سوزن با ۳۳٪، طول استوانه‌ای ذره با ۳۱٪، ضخامت تیرک با ۱۸٪ و سرعت در راستای محور Y با ۱۴٪ تاثیر، بیشترین اثر را بر زمان بحرانی لغزش در راستای محوره‌های X دارند، در حالی که از اثر سایر پارامترها بر این زمان می‌توان صرف نظر نمود. نمودار ۴- ب بیانگر آن است که شعاع ذره با ۶۰٪، ضخامت تیرک با ۱۸٪، ارتفاع سوزن تیرک با ۱۲٪ و عرض تیرک با ۸٪ تاثیر به‌ترتیب تاثیرگذارترین پارامترها بر زمان بحرانی غلتش حول محور X هستند، در حالی که سایر پارامترها اثر بسیار کمتری بر این زمان دارند. با توجه به نمودار ۴- ج، ۳ پارامتر ارتفاع سوزن تیرک با ۸۴٪، طول تیرک با ۱۱٪ و سرعت در راستای محور X تیرک با ۵٪ تاثیر بیشترین اثر را بر زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y دارند. در نهایت و مطابق با نمودار ۴- د نیز ۲ پارامتر ضخامت تیرک با ۲۷٪ و ارتفاع سوزن تیرک با ۲۸٪ تاثیر مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر زمان بحرانی غلتش حول محور Y بوده است، در حالی که ۳ پارامتر شعاع سوزن، طول استوانه‌ای ذره و سرعت در راستای محور Y را می‌توان پارامترهای غیرحساس بر این زمان دانست. سایر پارامترها شامل طول تیرک، شعاع ذره، سرعت در راستای محور X و عرض تیرک نیز به‌عنوان ۴ پارامتر نیمه‌حساس بر این زمان به شمار می‌روند.



نمودار ۴ اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر زمان‌های بحرانی، الف) زمان بحرانی لغزش در راستای محور X ، ب) زمان بحرانی غلتش حول محور X ، ج) زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y

۳-۳- مقایسه کمی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن با استفاده از روش سوپل

نمودار ۳، درصد تاثیر پارامترهای مختلف بر نیروهای بحرانی براساس روش آنالیز حساسیت آماری سوپل را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای ۳- الف و ۳- ج، پارامترهای ضخامت تیرک با ۵۹٪، طول تیرک با ۲۷٪ و عرض تیرک با ۱۴٪ تاثیر، بیشترین اثر را بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محوره‌های X و Y دارند، در حالی که از اثر سایر پارامترها بر این نیرو می‌توان صرف نظر نمود. نمودار ۳- ب بیانگر آن است که شعاع ذره با ۴۷٪، ضخامت تیرک با ۲۱٪، ارتفاع سوزن با ۱۷٪ و عرض تیرک با ۱۱٪ تاثیر به‌ترتیب تاثیرگذارترین پارامترها بر نیروی بحرانی غلتش حول محور X هستند، در حالی که سایر پارامترها اثر بسیار کمتری بر این نیرو دارند. مطابق با نمودار ۳- د نیز دو پارامتر ضخامت تیرک با ۳۱٪ و ارتفاع سوزن با ۲۷٪ تاثیر مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر نیروی بحرانی غلتش حول محور Y بوده است، در حالی که ۳ پارامتر شعاع سوزن، طول استوانه‌ای ذره و سرعت در راستای محور Y را می‌توان پارامترهای غیرحساس بر این نیرو دانست. سایر پارامترها شامل شعاع ذره، طول تیرک، عرض تیرک و سرعت در راستای محور X نیز به‌عنوان ۴ پارامتر نیمه‌حساس بر این نیرو به شمار می‌روند.



نمودار ۳ اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروهای بحرانی، الف) نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X ، ب) نیروی بحرانی غلتش حول محور X ، ج) نیروی بحرانی لغزش در راستای محور Y ، د) نیروی بحرانی غلتش حول محور Y

۴- صحه‌سنجی نتایج

ابعادی بررسی شده، پارامتر ضخامت تیرک بیشترین اثر را بر نیروهای بحرانی منیپولیشن داشته است، در حالی که پارامترهای شعاع سوزن و طول استوانه‌ای ذره در بازه‌های مورد بررسی جزء پارامترهای غیرحساس نیروی بحرانی منیپولیشن به حساب خواهند آمد.

همچنین در رابطه با زمان‌های بحرانی منیپولیشن می‌توان پارامتر ارتفاع سوزن را به‌عنوان اثرگذارترین پارامتر برشمرد، در حالی که اثر پارامتر شعاع سوزن در بازه بررسی شده بر زمان بحرانی منیپولیشن سه‌بُعدی می‌تواند صرف نظر نمود.

این مقاله به آنالیز حساسیت پارامترهای ابعادی در منیپولیشن سه‌بُعدی پرداخته است، ولی در ادامه کار می‌توان اثر پارامترهای غیرابعادی از جمله پارامترهای محیطی را نیز بر منیپولیشن سه‌بُعدی مورد بررسی قرار داد. همچنین در این مقاله از مدل اصطکاکی ساده کولمب استفاده شده است که در کارهای آتی می‌توان از سایر مدل‌های دقیق‌تر و پیچیده‌تر اصطکاکی نیز استفاده نمود.

تشکر و قدردانی: این مقاله به ساحت مقدس شهید مدافع حرم دانشگاه اراک، بسیجی شهید حاج علی‌رضا بابایی، تقدیم می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی این مقاله منتج از فعالیت علمی نویسنده، و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسنده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی ندارد.

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این پژوهش استفاده نشده است.

منابع

- Li G, Xi N, Yu M, Fung WK. Development of augmented reality system for AFM-based nanomanipulation. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2004;9(2):358-365.
- Li G, Xi N, Chen H, Saeed A, Yu M. Assembly of nanostructure using AFM based nanomanipulation system. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 26 April - 1 May, 2004, New Orleans LA, USA. Piscataway: IEEE; 2004.
- Moradi M, Fereidon AH, Sadeghzadeh S. Aspect ratio and dimension effects on nanorod manipulation by atomic force microscope. IET Micro & Nano Letters. 2010;5(5):324-327.
- El Rifai K, El Rifai O, Youcef-Toumi K. Modeling and control of AFM-based nano-manipulation systems. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 18-22 April, 2005, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE; 2005.
- Fotiadis D, Scheuring S, Müller SA, Engel A, Müller DJ. Imaging and manipulation of biological structures with the AFM. Micron. 2002;33(4):385-397.
- Mahboobi SH, Taheri AR, Nejat Pishkenari H, Meghdari A, Hemmat M. Cellular injection using carbon nanotube: A molecular dynamics study. Nano. 2015;10(02):1550025.
- Sadeghzadeh S, Khatibi MM. Vibrational modes and frequencies of borophene in comparison with graphene nanosheets. Superlattices and Microstructures. 2018;117:271-282.
- Sadeghzadeh S, Rezapour N. Thermal conductivity of

برای صحه‌سنجی نتایج در این مقاله نتایج موجود برای آنالیز حساسیت در یک مرجع^[21] به کار برده شد که در آن از مدل آنالیز حساسیت ای-فست استفاده شده است و هر چند سرعت بالایی دارد، اما دقت آن پایین است. بنابراین در این پژوهش از مدل آنالیز حساسیت دقیق سوبل استفاده شده است. همچنین در آن مرجع^[21] به بررسی اثر سرعت پرداخته نشده است و ذرات به شکل ساده کروی فرض شده‌اند، ولی در این مقاله علاوه بر در نظر گرفتن اثرات سرعت در راستای محورهای X و Y، ذرات به صورت استوانه‌ای در نظر گرفته شده و اثر طول ذرات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۱ مقایسه کمی بین نتایج مرجع^[21] و این پژوهش را برای صحه‌سنجی نتایج نشان می‌دهد که به‌منظور اختصار، این مقایسه بین نیروی بحرانی غلتشی حول محورهای X و Y در دو مقاله صورت پذیرفته است. نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله نشان می‌دهد که همانند مرجع^[21]، پارامتر ضخامت اثرگذارترین پارامتر بر نیروهای بحرانی و پارامتر ارتفاع سوزن اثرگذارترین پارامتر بر زمان‌های بحرانی هستند. لذا با توجه به پارامترهای حساس به‌دست‌آمده و همچنین روند تاثیرگذاری سایر پارامترها می‌توان به‌طور کلی نتیجه گرفت که یافته‌ها از صحت مناسبی برخوردار هستند.

جدول ۱) صحه‌سنجی نتایج

پارامتر	Frx		Fsx	
	مقاله موجود	مرجع ^[21]	مقاله موجود	مرجع ^[21]
T	۲۲	۲۱	۳۵	۳۱
L	۱	۱	۱۷	۱۶
W	۱۱	۱۱	۶	۵
Rp	۴۹	۴۷	۱۱	۱۰
Rt	۰	۰	۰	۰
H	۱۷	۱۷	۳۱	۲۷
Vxsub	-	۱	-	۱۱
Vysub	-	۲	-	۰
LL	-	۰	-	۰

۵- نتیجه‌گیری

محاسبه نیرو و زمان بحرانی در منیپولیشن میکرو/نانوذرات مختلف با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و کنترل دقیق آنها، از آنجایی که سبب جلوگیری از آسیب‌دیدگی ذرات هدف و دقت در جابه‌جایی ذرات می‌شود، از اهمیت خاص و ویژه‌ای برخوردار است. پارامترهای مختلف و متنوعی بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن تاثیر داشته که شناسایی دقیق آنها و بررسی کمی اثرگذاری تک‌تک آنها می‌تواند موجب تسهیل فرآیند منیپولیشن شود.

به‌منظور بررسی اثرگذاری پارامترهای مختلف بر خروجی‌های یک فرآیند می‌توان از روش‌های مختلف آنالیز حساسیت استفاده نمود. یکی از روش‌های آنالیز حساسیت، روش‌های آماری است که در آن می‌توان تاثیر پارامترها را به‌صورت کمی مشاهده نمود. بین روش‌های آماری، روش سوبل یکی از دقیق‌ترین روش‌هاست که به‌طور دقیق می‌توان با استفاده از آن درصد اثرگذاری پارامترهای مختلف ورودی بر یک یا چند خروجی مورد نظر مساله را به دست آورد. در این مقاله با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل، اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروها و زمان‌های بحرانی منیپولیشن بررسی شده است.

نتایج کلی به‌دست‌آمده بیانگر آن بوده که بین تمامی ۹ پارامتر

simulation of 3D manipulation on rough surfaces based on developed adhesion models. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;88(1-4):529-545.

16- Babahosseini H, Mahboobi SH, Meghdari A. Dynamics modeling of nanoparticle in AFM-based manipulation using two nanoscale friction models. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 13-19, 2009, Lake Buena Vista, Florida, USA. New York City: ASME; 2009.

17- Babahosseini H, Mahboobi SH, Khorsand Vakilzadeh M, Alasty A, Meghdari A. Optimal sliding mode control for atomic force microscope tip positioning during nano-manipulation process. Scientia Iranica Transaction F Nanotechnology. 2013;20(6):2285-2296.

18- Taheri M. 3D-dynamic modeling and simulation of biological nanoparticle motion using AFM nano-robot. Modares Mechanical Engineering. 2016;15(12):311-316. [Persian]

19- Taheri M. 3D modeling of nanoparticle manipulation in air using HK friction model. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(10):275-282. [Persian]

20- Taheri M. Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2016;3(2):45-53. [Persian]

21- Taheri M. Sensitivity analysis of 3D manipulation of spherical nanoparticles by using E-fast method. Modares Mechanical Engineering. 2018;17(11):59-69. [Persian]

22- Saltelli A, Chan K, Scott EM, editors. Sensitivity analysis: Gauging the worth of scientific models. Hoboken: Wiley; 2000. pp. 1-70.

porous graphene nanoribbon implemented in mass detection operations. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(1):345-352. [Persian]

9- Korayem MH, Taheri M, Zakeri M. Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models. Applied Surface Science. 2012;258(18):6713-6722.

10- Korayem MH, Taheri M, Korayem AH, Rastegar Z. Sensitivity analysis of coulomb and HK friction models in 2D AFM-based nano-manipulation: Sobol method. International Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2015;11(1):23-31.

11- Korayem MH, Taheri M, Ghasemi M, Badkoobehhezavh H. Investigating the effective parameters in the atomic force microscope-based dynamic manipulation of rough micro/nanoparticles by using the Sobol sensitivity analysis method. Simulation. 2015;91(12):1068-1080.

12- Zakeri M, Kharazmi M. Modeling of friction in micro/nano scale with random roughness distribution. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(11):175-184. [Persian]

13- Zakeri M, Faraji J. Dynamic modeling of nano/microparticles displacement with multi-point contact based on the Rumpf model. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(8):120-130. [Persian]

14- Korayem MH, Saraee MB, Mahmoodi Z, Dehghani S. Modeling and simulation of three dimensional manipulations of biological micro/nanoparticles by applying cylindrical contact mechanics models by means of AFM. Journal of Nanoparticle Research. 2015;17:439.

15- Saraee MB, Korayem MH. Dynamic modeling and