

بررسی اثر فاکتورهای محیطی بر نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل

معین طاهری*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

به‌منظور محاسبه‌ی دقیق نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن بایستی اثرگذاری فاکتورهای مختلف ورودی بر پارامترهای خروجی را مورد بررسی قرار داد. یکی از روش‌های دقیق در آنالیز حساسیت روش آنالیز حساسیت آماری سوبل می‌باشد. در این مقاله برای نخستین بار اثر شش فاکتور محیطی شامل مدول الاستیسیته تیرک، ضریب پواسون تیرک، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون ذره، انرژی سطحی و کار چسبندگی بر هشت پارامتر خروجی شامل نیروهای بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y ؛ و زمان‌های بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y ، در نانومنیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نهایی به‌دست آمده در این مقاله بیانگر این است که فاکتور مدول الاستیسیته تیرک اثرگذارترین فاکتور بر نیروهای بحرانی و فاکتور ضریب پواسون تیرک اثرگذارترین فاکتور بر زمان‌های بحرانی در نانومنیپولیشن سه‌بعدی می‌باشند. **واژه‌های کلیدی:** آنالیز حساسیت، نانومنیپولیشن سه‌بعدی، نیرو و زمان بحرانی، فاکتورهای محیطی.

The effect of environmental factors on critical force and time of 3D nanomanipulation using Sobol statistical sensitivity analysis method

M. Taheri

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

Abstract

To have a precise calculation of critical force and time of nano-manipulation, the effect of the different input factors on output parameters should be investigated. One of the exact sensitivity analysis methods is the statistical Sobol method. In this paper for the first time, the effect of the six environmental factors including cantilever elasticity module, cantilever Poisson's ratio, particle's elasticity module, particle's Poisson's ratio, surface energy and adhesion work have been investigated on eight output parameters including critical sliding force along x-axis, rolling about x-axis, sliding along y-axis, rolling about y-axis, and critical times of sliding along x-axis, rolling about x-axis, sliding along y-axis and rolling about y-axis, in 3D nano-manipulation based on Sobol statistical method. The final results of this paper showed that the cantilever elasticity module is the most effective factor on critical force and cantilever Poisson's ratio is the most effective one on critical time in 3D nano-manipulation.

Keywords: Sensitivity analysis, 3D manipulation, critical force and time, environmental factors.

استفاده از روش‌های مختلف آنالیز حساسیت در عین حال که می‌تواند سبب ساده‌سازی معادلات منیپولیشن گردد، می‌تواند در انتخاب دقیق فاکتورها به‌منظور انجام صحیح فرآیند منیپولیشن کمک نماید. پیش از این تحقیقات زیادی در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند منیپولیشن صورت پذیرفته است.

تفضلی و همکارانش [۵] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به مونتاژ دوبعدی میکرو/نانوذرات پرداخته‌اند. سیتی [۶] سیستم به طراحی سیستم نانومنیپولیشن خودکار با استفاده از تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته است.

باباحسینی و همکارانش [۷] به کنترل نانومنیپولیشن دوبعدی با استفاده از تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. کنترل دقیق موقعیت نوک تیرک برای منیپولیشن توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بسیار مهم است و اگر نوک تیرک از نانوذرات عبور نماید، می‌تواند موجب شکست فرآیند منیپولیشن گردد. بنابراین، مدل‌سازی دقیق و درک درست نیروهای اعمالی بر روی نوک تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی نقش محوری در این فرآیند دارند.

۱- مقدمه

آنالیز حساسیت شاخه‌ای از بهینه‌سازی می‌باشد که در کلیه علوم و پروژه‌های بهینه‌سازی قابل استفاده است. از آنالیز حساسیت برای تحلیل تأثیر ورودی‌های مختلف بر روی یک یا چند خروجی استفاده می‌گردد. از نتایج آنالیز حساسیت می‌توان در یافتن متغیرهای ورودی که تأثیر چندانی بر روی خروجی ندارند و حذف آن‌ها از معادلات سیستم جهت ساده‌سازی معادلات و همچنین به‌منظور یافتن متغیرهای حساس جهت دقت در انتخاب آن‌ها استفاده نمود.

سالتلی و همکارانش [۱] روش‌هایی کمی مستقل از مدل برای تجزیه و تحلیل حساسیت کلی خروجی مدل را توسعه داده‌اند. هما و سالتلی [۲] اقدامات مهمی در تجزیه و تحلیل حساسیت کلی مدل‌های غیرخطی انجام داده‌اند.

سوبل [۳] شاخص‌های حساسیت کلی برای مدل ریاضی غیرخطی و تخمین مونت کارلو را توسعه داده است. چان و همکارانش [۴] به تحلیل حساسیت خروجی مدل با روش مبتنی بر واریانس پرداخته‌اند.

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

گروه‌های مختلف تقسیم‌بندی نموده و اثر هر گروه را به طور مجزا مورد بررسی قرار می‌دهند. به عنوان مثال دو گروه از مهم‌ترین پارامترها، پارامترهای ابعادی و پارامترهای محیطی می‌باشند؛ از آن‌جا که اثر پارامترهای ابعادی و محیطی متفاوت و به نوعی غیر قابل مقایسه است، با توجه به گستردگی فاکتورهای مؤثر بر منیپولیشن سه‌بعدی، در این مقاله برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل اثر شش فاکتور محیطی شامل مدول الاستیسیته تیرک، ضریب پواسون تیرک، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون ذره، انرژی سطحی و کار چسبندگی بر هشت 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 ، غلتش حول محور y ، در منیپولیشن سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا به بررسی دینامیک منیپولیشن سه‌بعدی پرداخته، سپس روش آنالیز حساسیت سوبل تشریح شده و در انتها الگوریتم چگونگی انجام آنالیز حساسیت توضیح داده شده است. استفاده از روش سوبل در این مقاله به دو دلیل عمده بوده است، دلیل نخست دقت بالای این روش و دلیل دوم خروجی‌های کمی و قابل مقایسه‌ای که در این روش به دست خواهد آمد.

۲-۱- بررسی دینامیک منیپولیشن سه‌بعدی

جهت استخراج معادلات دینامیک سه‌بعدی با توجه به شکل تیرک و دیاگرام آزاد سوزن که در شکل ۱ نمایش داده شده است، خواهیم داشت [۹]:

$$F_x - F_x = m\ddot{x}_G = m\left(\frac{\ddot{x}_p + \ddot{x}_t}{2}\right) \quad (1)$$

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

$$F_z - F_z = m\ddot{z}_G = m\left(\frac{\ddot{z}_p + \ddot{z}_t}{2}\right) \quad (3)$$

$$F_y H \cos \theta + F_z H \sin \theta - M_\theta = I_p \ddot{\theta} \quad (4)$$

$$-F_x H \cos \alpha + F_z H \sin \alpha - M_\alpha = I_p \ddot{\alpha} \quad (5)$$

و با جایگذاری معادلات شتابی برای محاسبه‌ی نیرو خواهیم داشت [۹]:

$$F_x = F_x + m\left(\ddot{x}_s - \delta_t \cos \varphi \cos \psi + \frac{H\ddot{\alpha} \cos \alpha - H\dot{\alpha}^2 \sin \alpha}{2}\right) \quad (6)$$

$$F_z = F_z \cos^2 \alpha + m \cos^2 \alpha \left(\ddot{z}_s - \delta_t \sin \varphi - \delta_s - \frac{-H\ddot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta - H(\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos \alpha \cos \theta}{-H\ddot{\theta} \cos \alpha \sin \theta} \right) + \left(\frac{I_p \ddot{\alpha} + M_\alpha}{H}\right) \sin \theta + F_x \sin \alpha \cos \alpha \quad (7)$$

کوریام و همکارانش [۸] به بررسی آنالیز حساسیت تأثیر فاکتورهای مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن دویبعی با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره پرداخته‌اند. طبق تحقیقات آن‌ها فاکتور مدول الاستیسیته تیرک بیشترین اثر را در بین فاکتورهای محیطی بر نیروی بحرانی منیپولیشن داشته و به‌عنوان حساس‌ترین فاکتور شناخته می‌شود، درحالی‌که می‌توان از اثر فاکتور چسبندگی به‌عنوان فاکتوری غیرحساس صرف‌نظر نمود.

کوریام و همکارانش [۹] به بررسی آنالیز حساسیت آماری تأثیر فاکتورهای ابعادی و محیطی بر نیروی بحرانی منیپولیشن دویبعی ذرات زبر با استفاده از روش سوبل پرداخته‌اند. تحقیقات آن‌ها نشان داده است که در بین فاکتورهای ابعادی، ضخامت تیرک و در بین فاکتورهای محیطی نسبت شعاع زبری به شعاع ذره بیشترین اثر را در نیروی بحرانی منیپولیشن دویبعی داشته است. همچنین کوریام و همکارانش [۱۰] به بررسی آنالیز حساسیت آماری تأثیر فاکتورهای ابعادی تیرک‌های مختلف شامل مستطیلی، وی-شکل و خنجر، بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن دویبعی ذرات زیستی با استفاده از روش سوبل پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر بسیار زیاد فاکتور ضخامت تیرک بر نیروی بحرانی منیپولیشن دویبعی در برابر تأثیر ناچیز فاکتور ارتفاع سوزن بر نیروی بحرانی و همچنین تأثیر فراوان فاکتور ارتفاع سوزن بر زمان بحرانی منیپولیشن در برابر تأثیر جزئی فاکتورهای عرض تیرک و ضخامت تیرک بر زمان بحرانی دارد.

کوریام و همکارانش [۱۱] مدل‌سازی و شبیه‌سازی دویبعی نظریه‌های مختلف تماس کروی برای میکرو/نانوذرات زیستی بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی را انجام داده‌اند. آن‌ها در پژوهشی دیگر [۱۲] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی دویبعی نظریه‌های تماس استوانه‌ای پرداخته‌اند.

کوریام و همکارانش [۱۳] همچنین به بررسی تأثیر فاکتورهای هندسی تیرک‌های مختلف میکروسکوپ نیروی اتمی بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن میکرو/نانوذرات با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای فست پرداخته‌اند.

طاهری [۱۴] نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن سه‌بعدی میکرو/نانوذرات بیولوژیکی را با استفاده از مدل تماسی JKR و مدل اصطکاکی کولمب محاسبه نموده است.

طاهری همچنین به مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند منیپولیشن نانو ذره طلا در محیط هوا با استفاده از مدل‌های اصطکاکی HK [۱۵] و لاگره [۱۶] پرداخته است. نتایج به دست آمده بیانگر اختلاف ۱۶ درصدی مدل اصطکاکی HK در نیروی بحرانی به دست آمده جهت نتایج سه‌بعدی نسبت به دویبعی و همچنین اختلاف ۱۸ درصدی مدل اصطکاکی لاگره در نیروی بحرانی به دست آمده جهت نتایج سه‌بعدی نسبت به دویبعی می‌باشد.

با توجه به تاریخچه‌ی ذکر شده، مشاهده می‌گردد که تمامی کارهای آنالیز حساسیت گذشته بر پایه نظریه‌های دویبعی منیپولیشن بوده و کار عمده‌ای جهت آنالیز حساسیت تأثیر فاکتورهای ابعادی و یا محیطی بر مدل سه‌بعدی منیپولیشن صورت نپذیرفته است.

همان‌گونه که مشخص است فاکتورهای بسیاری در منیپولیشن تأثیرگذار می‌باشند که در نظر گرفتن همگی آن‌ها به صورت همزمان امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لذا معمولاً فاکتورهای مؤثر در منیپولیشن را به

۳- کاهش عدم قطعیت پارامترها، این مورد بیشتر هدف سیستم‌های کنترلی در ربات‌ها می‌باشد. در این مورد پیدا کردن محدوده تغییرات پارامترها و پیدا کردن محدوده‌ی امن می‌تواند هدف موردنظر از آنالیز حساسیت باشد.

آنالیز حساسیت را به چند طریق کلاسه‌بندی می‌کنند. برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب فرم مدل، که به روش‌های ریاضی، آماری و گرافیکی دسته‌بندی می‌شود.

روش‌های تحلیل حساسیت آماری عبارت‌اند از:

۱ تحلیل رگرسیون

۲ تحلیل واریانس

۳ روش سطح پاسخ

۴ شاخص اطلاعات اتصال

سویل

۵ تست حساسیت دامنه فوریه

روش تعمیم‌یافته تست حساسیت دامنه فوریه^۶

از آنجا که روش سویل قادر به محاسبه‌ی برهم‌کنش بین ورودی‌ها می‌باشد و برای مدل‌های خطی و غیر خطی کاربرد داشته و همچنین دقت بالایی در گزارش حساسیت ورودی‌ها دارد، در این مقاله از این روش استفاده شده است.

از کاربردهای این روش در زمینه‌های متعدد مانند مطالعات رفتاری در کارهای سویل [۱۷] و راسبر [۱۸]، داروسازی در کار کوگو [۱۹] و تحلیل حساسیت نرخ براده‌برداری در کار طهماسبی [۲۰] می‌توان نام برد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکپارچه استفاده کرد [۲۱].

در این روش برای مدل تعریف شده با تابع $Y=f(X)$ ، که Y خروجی مدل و $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردار پارامترهای ورودی می‌باشد، و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر جمله تجزیه شده می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1\dots n} \quad (9)$$

که در آن، V_i تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی $x_i (V_i = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i - V_j)$ و V_{ij} برهم‌کنش بین n فاکتور را نشان می‌دهند.

شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند ($S_i = \frac{V_i}{V}$) شاخص حساسیت مرتبه‌ی اول،

شاخص حساسیت مرتبه‌ی دوم و ...). شاخص حساسیت کلی $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$

یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به دست می‌آید:

$$S_{\eta} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (10)$$

¹ Regression analysis

² Analysis of variance

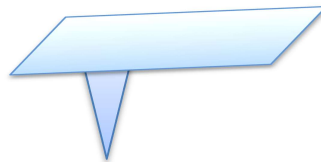
³ Response surface methods

⁴ Mutual information index

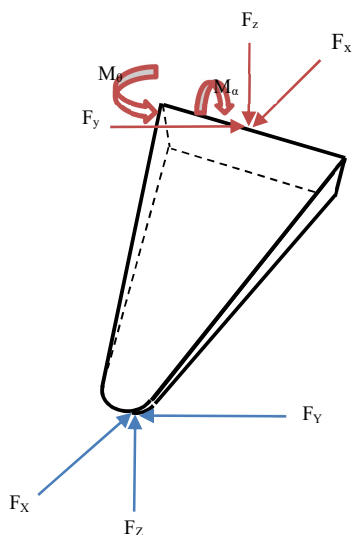
⁵ FAST

⁶ EFAST

$$F_Y = F_Y \sin^2 \theta + m \sin^2 \theta \left(\ddot{y}_s - \ddot{\delta}_i \cos \varphi \sin \varphi + \frac{-H \dot{\theta} \cos \theta + H \dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} + \left(\frac{I_p \ddot{\theta} + M_{\theta}}{H} \right) \cos \theta - F_z \sin \theta \cos \theta \right) \quad (8)$$



الف) شکل تیرک و سوزن



ب) دیاگرام آزاد سوزن

شکل ۱- شکل تیرک و دیاگرام آزاد سوزن

۲-۲- بررسی روش‌های آنالیز حساسیت

به‌طورکلی آنالیز حساسیت دستگیری برای تحلیل‌گر در تصمیم‌گیری می‌باشد، چه در هنگامی که مدل وظیفه‌ی خود را به‌خوبی انجام می‌دهد و چه در مواقعی که مدل عملکرد مناسبی ارائه نمی‌دهد، با راهنمایی و تحقیق برای حل مشکل به تحلیل‌گر کمک می‌کند. اما عمده‌ترین اهدافی که می‌توان با آنالیز حساسیت پیگیری نمود عبارت‌اند از:

۱- شناسایی پارامترهایی که روی یکدیگر اثر متقابل دارند و تأثیر این اثر بر روی خروجی مشهود می‌باشد. در این‌گونه موارد مدل به‌گونه‌ای می‌باشد که متغیرهای ورودی به یکدیگر مرتبط بوده و از یکدیگر مستقل نیستند که بیشتر در مدل‌های احتمالی رخ می‌دهد.

۲- کم کردن تعداد پارامترها و کمک به ساده‌سازی مدل که یکی از اهداف آنالیز حساسیت می‌باشد. در این مورد با پیدا کردن پارامترهای حساس و غیر حساس و با ثابت نگه‌داشتن مقادیر غیر حساس در مقدار ظاهری‌شان می‌توان تعداد پارامترها را کاهش داد. از این مورد بیشتر در مدل‌هایی که تعداد پارامترها زیاد و معادلات مدل به‌صورت کویله شده می‌باشد، استفاده می‌شود.

معادلات و روابط روش سوبل در مرجع [۲۲] به طور کامل ارائه شده است.

۳-۲- بررسی دینامیک منیپولیشن سه بعدی

شکل ۲ الگوریتم کلی آنالیز حساسیت تأثیر فاکتورهای ورودی بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد در ابتدای فرآیند آنالیز حساسیت، در بخش انتخاب پارامترها، بایستی فاکتورهای ورودی را مشخص نمود. در این مقاله شش فاکتور محیطی شامل مدول الاستیسیته تیرک، ضریب پواسون تیرک، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون ذره، انرژی سطحی و کار چسبندگی به‌عنوان فاکتورهای ورودی مسئله جهت بررسی تأثیر آن‌ها بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن انتخاب شده‌اند. پس از انتخاب فاکتورهای ورودی در بخش تعیین دامنه تغییرات پارامترها، بایستی دامنه‌ی تغییرات این فاکتورها را مشخص نمود. پس از آن در بخش تولید نمونه‌ها، نمونه‌های مورد نیاز جهت شروع فرآیند آنالیز حساسیت با استفاده از روش سوبل تولید می‌گردد، سپس در بخش مدل دینامیکی منیپولیشن، این نمونه‌های تولیدی به ترتیب شبیه‌سازی شده و پارامترهای خروجی شامل هشت پارامتر 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 ، غلتش حول محور y ، به دست می‌آید. در انتها و در بخش آنالیز حساسیت، با استخراج پارامترهای خروجی به ازای فاکتورهای ورودی، هر خروجی به طور مستقل مورد آنالیز حساسیت قرار گرفته و شاخص‌های حساسیت برای تک‌تک پارامترهای خروجی با استفاده از روش سوبل استخراج می‌گردد.

۳- آنالیز حساسیت فاکتورهای محیطی مختلف

در این بخش به بررسی تأثیر فاکتورهای مختلف شامل مدول الاستیسیته تیرک، ضریب پواسون تیرک، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون ذره، انرژی سطحی و کار چسبندگی بر نیروها و زمان‌های بحرانی منیپولیشن پرداخته شده است.

۳-۱- بررسی اثر فاکتورهای محیطی مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن

شکل ۳ نمودارهای مربوط به تأثیر فاکتورهای مورد بررسی بر نیروهای بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۳-الف با افزایش مدول الاستیسیته تیرک، نیروهای بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y افزایش خواهند یافت. شکل ۳-ب اثر افزایش ضریب پواسون تیرک بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x و اثر کاهش ضریب پواسون تیرک بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محور y را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۳-ج و ۳-د نشان‌دهنده اثر ناچیز مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ذره نیروهای بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش

حول محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y می‌باشد.

شکل‌های ۳-ه و ۳-و نیز نشان‌دهنده اثر ناچیز انرژی سطحی و کار چسبندگی بر نیروهای بحرانی بوده و نشان‌دهنده این امر است که می‌توان این دو پارامتر را در گروه پارامترهای غیرحساس بر نیروی بحرانی قرار داد.

۳-۲- بررسی اثر فاکتورهای محیطی مختلف بر زمان بحرانی منیپولیشن

شکل ۴ نمودارهای مربوط به تأثیر فاکتورهای مورد بررسی بر زمان‌های بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-الف اثر ناچیز مدول الاستیسیته تیرک بر تمامی زمان‌های بحرانی را نشان می‌دهد. شکل ۴-ب اثر افزایش ضریب پواسون تیرک بر زمان بحرانی لغزش در راستای محور x و غلتش حول محور y در مقابل اثر ناچیز ضریب پواسون تیرک بر زمان بحرانی لغزش حول محور x و لغزش در راستای محور y را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۴-ج و ۴-د نشان‌دهنده اثر کاهشی مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ذره بر زمان بحرانی لغزش در راستای محور x ، در برابر اثر ناچیز مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ذره بر سایر زمان‌های بحرانی می‌باشد.

شکل‌های ۴-ه و ۴-و نیز نشان‌دهنده اثر ناچیز انرژی سطحی و کار چسبندگی بر زمان‌های بحرانی بوده و نشان‌دهنده این امر است که می‌توان این دو پارامتر را در گروه پارامترهای غیرحساس بر زمان بحرانی قرار داد.

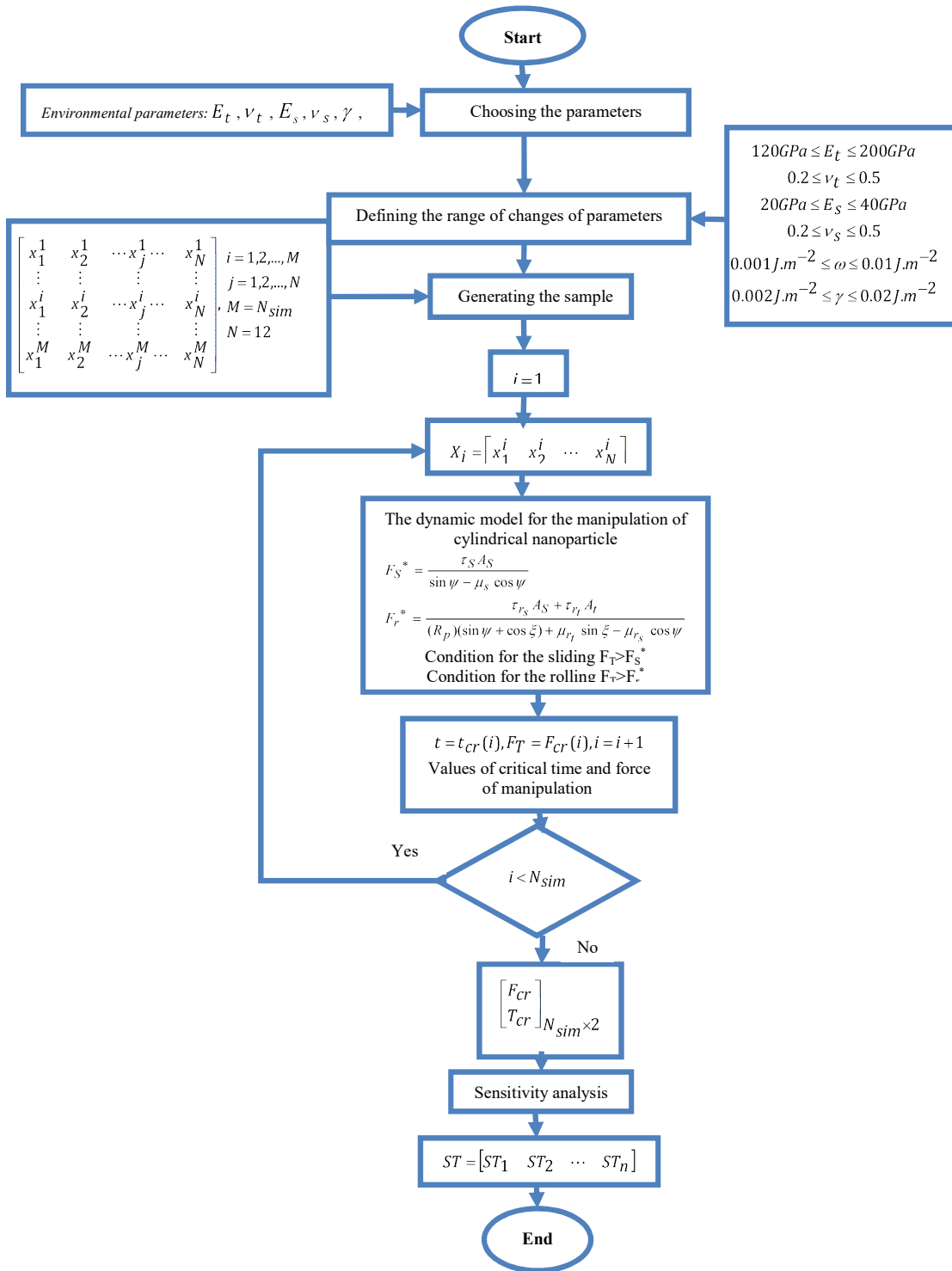
۳-۳- مقایسه اثر فاکتورهای محیطی مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن

در شکل ۵ مقایسه‌ی کمی بین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر نیروهای بحرانی منیپولیشن صورت پذیرفته است. شایان ذکر است که نتایج این شکل مربوط به اندیس حساسیت کل هستند.

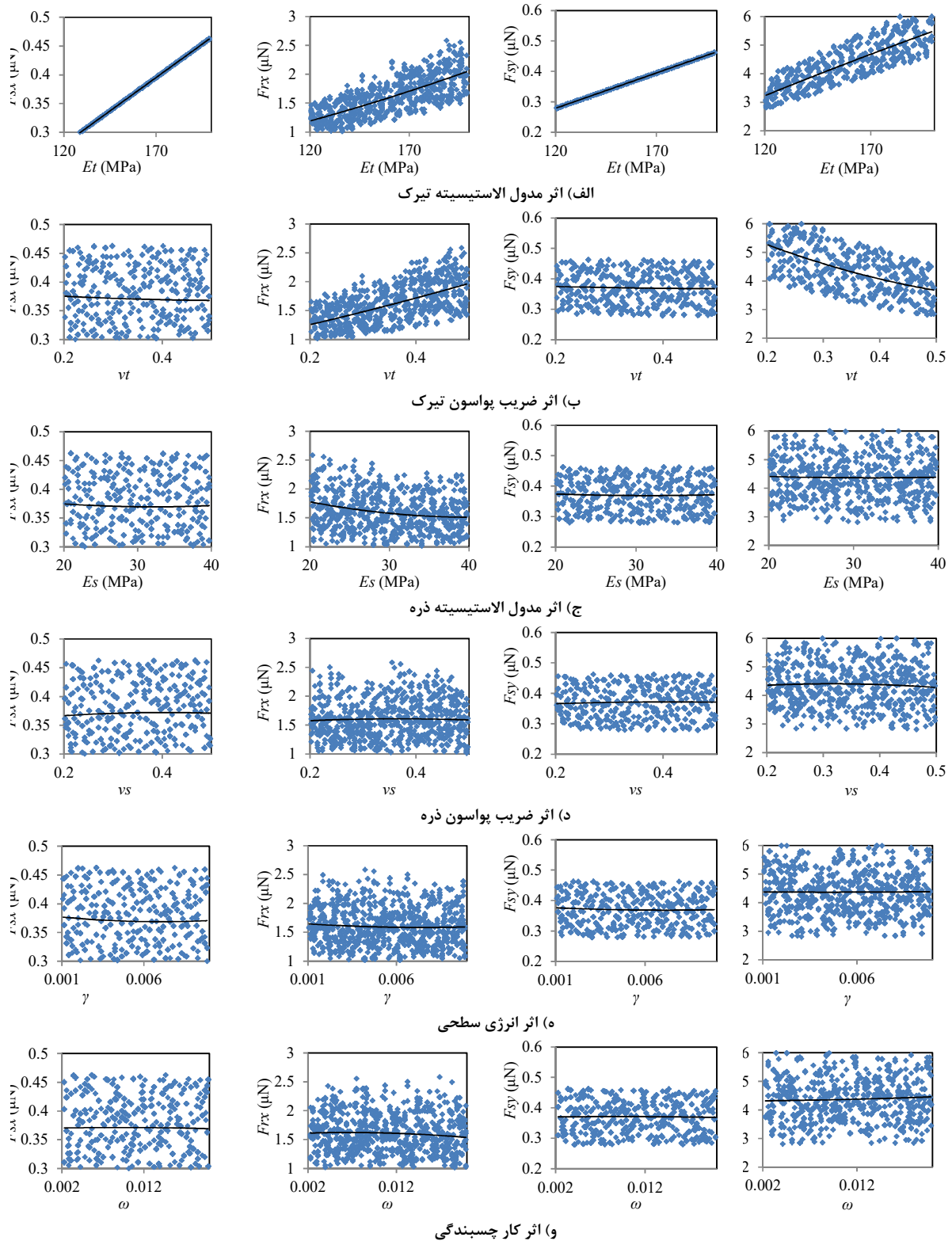
نمودارهای موجود در شکل‌های ۵-الف تا ۵-د بیانگر این امر است که در بازه‌های ورودی در نظر گرفته شده برای فاکتورهای ورودی، مدول الاستیسیته تیرک بیشترین اثر را بر هر چهار پارامتر خروجی نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y خواهد داشت.

همچنین با توجه به نتایج شکل ۵ مشاهده می‌گردد که بعد از مدول الاستیسیته تیرک، فاکتور ضریب پواسون تیرک به‌عنوان دومین فاکتور تأثیرگذار بر نیروهای بحرانی خواهد بود.

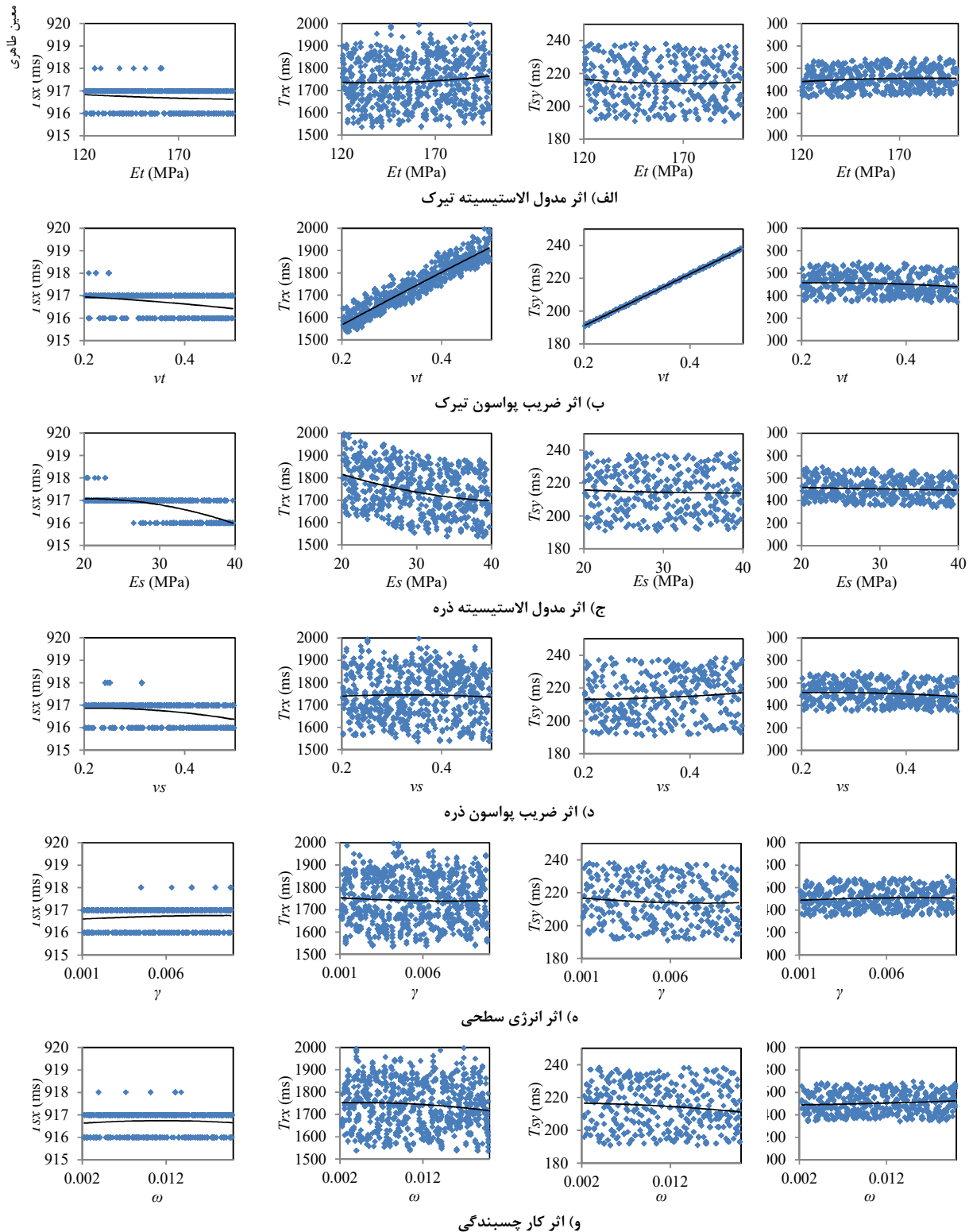
نتایج شکل ۵ همچنین تأثیر ناچیز میزان انرژی سطحی و کار چسبندگی بر نیروهای بحرانی در بازه‌های مورد بررسی فاکتورها را نشان می‌دهد.



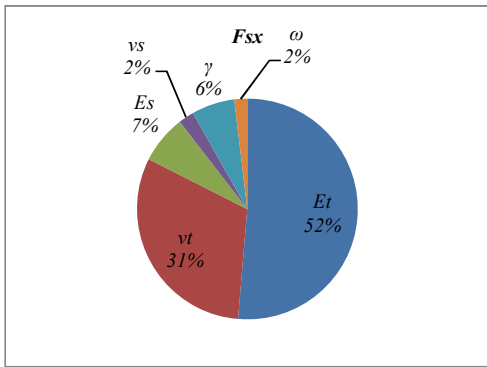
شکل ۲- الگوریتم کلی آنالیز حساسیت تأثیر فاکتورهای ورودی بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن



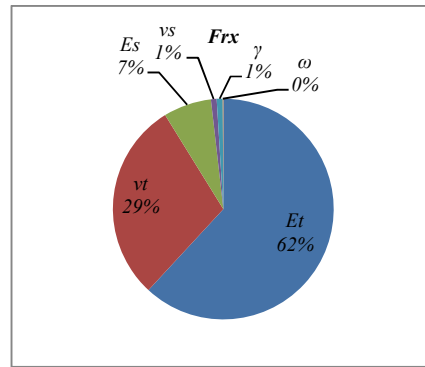
شکل ۳- اثر فاکتورهای مختلف بر نیروی بحرانی، از چپ به راست: لغزش در راستای محور x ، لغزش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، لغزش حول محور y .



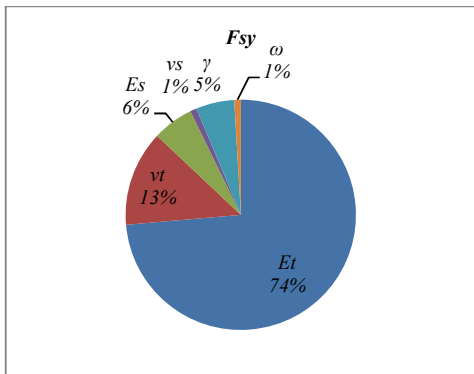
شکل ۴- اثر فاکتورهای مختلف بر زمان بحرانی، از چپ به راست: لغزش در راستای محور x ، لغزش حول محور x ، لغزش حول محور y ، لغزش حول محور z .



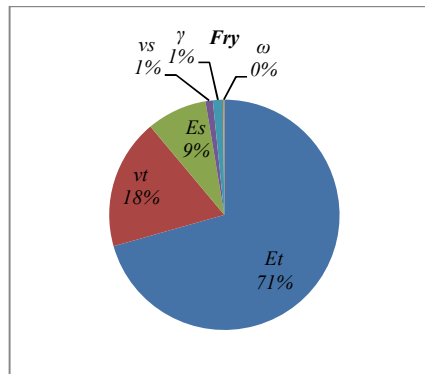
الف) نیروی بحرانی لغزش در راستای محور X



ب) نیروی بحرانی غلتش حول محور X

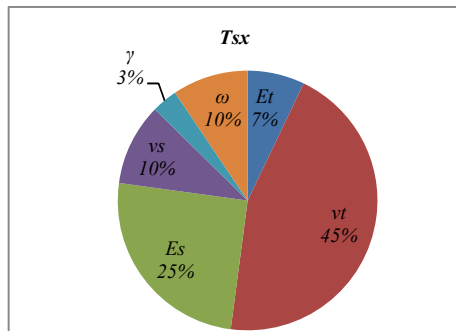


ج) نیروی بحرانی لغزش در راستای محور Y

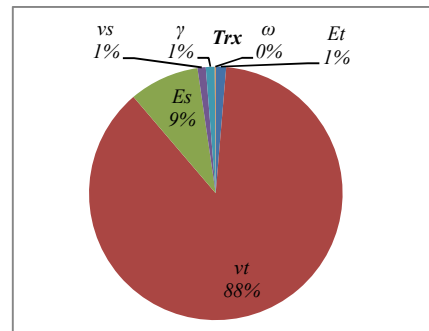


د) نیروی بحرانی غلتش حول محور Y

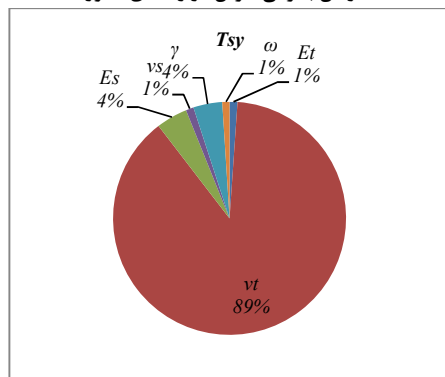
شکل ۵- اثر فاکتورهای محیطی مختلف بر نیروهای بحرانی



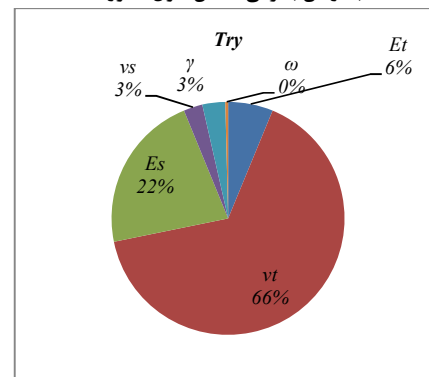
الف) زمان بحرانی لغزش در راستای محور X



ب) زمان بحرانی غلتش حول محور X



ج) زمان بحرانی لغزش در راستای محور Y



د) زمان بحرانی غلتش حول محور Y

شکل ۶- اثر فاکتورهای محیطی مختلف بر زمان‌های بحرانی

نتایج به دست آمده را با یکدیگر مقایسه نمود. همچنین با توجه به این که در اکثر کارهای موجود تمرکز بر فاز اول منیپولیشن و محاسبه نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن می باشد، در کارهای آتی می توان به بررسی فاز دوم منیپولیشن و تعیین دقیق موقعیت ذره پرداخت.

۵- فهرست علائم

| | |
|---|---------------------------|
| مدول الاستیسیته ذره | E_s |
| مدول الاستیسیته تیرک | E_t |
| نیروی بحرانی | F_{cr} |
| نیروی بحرانی غلتشی حول محور x | F_{rx} |
| نیروی بحرانی غلتشی حول محور y | F_{ry} |
| نیروی بحرانی لغزشی در راستای محور x | F_{sx} |
| نیروی بحرانی لغزشی در راستای محور y | F_{sy} |
| نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای x | F_x |
| نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای x | F_X |
| نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای y | F_y |
| نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای y | F_Y |
| نیروی اعمالی به انتهای سوزن در راستای z | F_z |
| نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای z | F_Z |
| ارتفاع سوزن | H |
| ممان اینرسی تیرک حول نقطه ابتدایی | I_p |
| گشتاور پیچشی تیرک حول محور y | M_α |
| گشتاور پیچشی تیرک حول محور z | M_θ |
| جرم سوزن | m |
| شاخص حساسیت مرتبه n ام | $S_{1, \dots, n}$ |
| شاخص حساسیت مرتبه اول | S_i |
| شاخص حساسیت مرتبه دوم | S_{ij} |
| زمان بحرانی | T_{cr} |
| تأثیر برهم کنش بین n فاکتور | $V_{1, \dots, n}$ |
| تأثیر مرتبه اول برای فاکتور i ام | V_i |
| تأثیر برهم کنش برای دو فاکتور | V_{ij} |
| واریانس خروجی مدل | $V(Y)$ |
| بردار پارامترهای ورودی | $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ |
| شتاب مرکز گرانش سوزن در راستای محور x | \ddot{x}_G |
| شتاب انتهای سوزن در راستای محور x | \ddot{x}_p |
| شتاب ذره بر صفحه مبنا در راستای محور x | \ddot{x}_s |
| شتاب نوک سوزن در راستای محور x | \ddot{x}_t |
| خروجی مدل | Y |
| شتاب مرکز گرانش سوزن در راستای محور y | \ddot{y}_G |
| شتاب انتهای سوزن در راستای محور y | \ddot{y}_p |
| شتاب ذره بر صفحه مبنا در راستای محور y | \ddot{y}_s |
| شتاب نوک سوزن در راستای محور y | \ddot{y}_t |
| شتاب مرکز گرانش سوزن در راستای محور z | \ddot{z}_G |
| شتاب انتهای سوزن در راستای محور z | \ddot{z}_p |
| شتاب ذره بر صفحه مبنا در راستای محور z | \ddot{z}_s |

۳-۴- مقایسه اثر فاکتورهای محیطی مختلف بر زمان

بحرانی منیپولیشن

شکل ۶ مقایسه کمی بین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف ورودی بر زمانهای بحرانی منیپولیشن را نشان می دهد. شایان ذکر است که نتایج این شکل نیز مانند شکل ۵ مربوط به اندیس حساسیت کل هستند. نمودارهای موجود در شکل های ۶-الف تا ۶-د بیانگر این امر است که در بازه های ورودی در نظر گرفته شده برای فاکتورهای ورودی، ضریب پواسون تیرک بیشترین اثر را بر هر چهار پارامتر خروجی زمان بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y خواهد داشت. همچنین در شکل ۶ مشاهده می گردد که بعد از ضریب پواسون تیرک، فاکتور مدول الاستیسیته ذره، به عنوان دومین فاکتور تأثیرگذار بر زمانهای بحرانی خواهد بود. نتایج شکل ۶ همچنین حاکی از تأثیر ناچیز میزان انرژی سطحی و کار چسبندگی بر اکثر زمانهای بحرانی در بازه های مورد بررسی فاکتورها می باشد. نتایج به دست آمده در شکل های ۵ و ۶ نشان دهنده این امر است که از پارامتر کار چسبندگی می توان به عنوان یک پارامتر غیر حساس نام برد. درحالی که دو پارامتر ضریب پواسون و مدول الاستیسیته تیرک به عنوان دو پارامتر حساس می باشند که تأثیر زیادی در نتایج خواهند داشت.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل، که دارای دقت بالایی نسبت به سایر روش های آماری آنالیز حساسیت می باشد، برای نخستین بار به بررسی کمی تأثیر شش فاکتور محیطی شامل شش فاکتور محیطی شامل مدول الاستیسیته تیرک، ضریب پواسون تیرک، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون ذره، انرژی سطحی و کار چسبندگی بر هشت 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 ، غلتش حول محور y ، در منیپولیشن سه بعدی پرداخته شده است.

نتایج کلی به دست آمده بیانگر این است که:

فاکتور مدول الاستیسیته تیرک اثرگذارترین فاکتور بر نیروهای بحرانی می باشد.
 فاکتور ضریب پواسون تیرک دومین فاکتور اثرگذار بر نیروهای بحرانی می باشد.
 فاکتورهای انرژی سطحی و کار چسبندگی را می توان کم اثرترین فاکتور بر نیروهای بحرانی دانست.
 فاکتور ضریب پواسون تیرک اثرگذارترین فاکتور بر زمانهای بحرانی منیپولیشن سه بعدی در بازه های مورد بررسی می باشند.
 فاکتورهای انرژی سطحی و کار چسبندگی را می توان کم اثرترین فاکتور بر زمانهای بحرانی دانست.
 در ادامه این مقاله و در کارهای آتی می توان به بررسی سایر مدل های موجود در منیپولیشن سه بعدی پرداخت. به عنوان مثال می توان با جایگزین نمودن مدل های دقیق اصطکاکی به بررسی تأثیر فاکتورهای ورودی مختلف بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن پرداخته و

[11] Korayem M. H. and Taheri M., Modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFM, *Journal of nanoparticle research*, Vol. 16, No. 1, pp. 2156-1-8, 2014.

[12] Korayem M. H., Hefzabad R. N. and Taheri M., Modeling and Simulation of Spherical and Cylindrical Contact Theories for Using in the Biological Nanoparticles Manipulation, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 13, No. 3, pp. 227-239, 2017.

[13] Korayem M. H., Ghahnaviyeh S. D., Ghasemi M. and Taheri M., Effect of different geometrical parameters of atomic force microscope cantilevers in critical force and time based on manipulation with applying EFAST sensitivity analyses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 300-306, 2015. (in Persian).

[14] Taheri M., 3D-Dynamic modeling and simulation of biological nanoparticle motion using AFM nano-robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 311-316, 2015. (in Persian).

[15] Taheri M., 3D Modeling of Gold Nanoparticle Manipulation in Air Using HK Friction Model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 311-316, 2016. (in Persian).

[16] Taheri M., Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model, *Manufacturing Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 311-316, 2016. (in Persian).

[17] Sobol I. M., Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, *Mathematics and computers in simulation*, Vol. 55, pp. 271-280, 2001.

[18] Rossier P., Wade D. T. and Murphy M., An initial investigation of the reliability of the Rivermead Extended ADL index in patients presenting with neurological impairment, *Journal of rehabilitation medicine*, Vol. 33 pp. 61-70, 2001.

[19] Kogo N. and Ariel M., Membrane properties and monosynaptic retinal excitation of neurons in the turtle accessory optic system, *Journal of neurophysiology*, Vol. 78, pp. 614-627, 1997.

[20] Sobol I. M., Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models, *Math. Model. Comput. Exp*, Vol. 14, pp. 407-414, 1993.

[21] Tahmasbi V., Ghoreishi M. and Taheri M., Sensitivity analysis of material removal rate in dry electro-discharge machining process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 382-386, 2015. (in Persian).

[22] Korayem M. H., Rastegar Z. and Taheri M., Sensitivity analysis of contact mechanics models in manipulation of biological cell, *Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 2, pp. 49-56, 2012.

| | |
|--------------------------------------|-----------------|
| شتاب نوک سوزن در راستای محور z | \ddot{z}_t |
| زاویه پیچشی تیرک حول محور y | α |
| سرعت دورانی پیچش تیرک حول محور y | $\dot{\alpha}$ |
| شتاب دورانی پیچش تیرک حول محور y | $\ddot{\alpha}$ |
| شتاب عمق نفوذ نانوذره در صفحه‌ی مبنا | δ_s^t |
| شتاب عمق نفوذ نانوذره در سوزن | δ_t^t |
| زاویه پیچشی تیرک حول محور z | θ |
| سرعت دورانی پیچش تیرک حول محور z | $\dot{\theta}$ |
| شتاب دورانی پیچش تیرک حول محور z | $\ddot{\theta}$ |
| انرژی سطحی | γ |
| کار چسبندگی | ω |
| ضریب پواسون ذره | ν_s |
| ضریب پواسون تیرک | ν_t |

۶- مراجع

[1] Saltelli A., Tarantola S. and Chan K. S., A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, *Technometrics*, Vol. 41, No. 1, pp. 39-56, 1999.

[2] Homma T. and Saltelli A., Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 52, No. 1, pp. 1-17, 1996.

[3] Sobol I. M., Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, *Mathematics and computers in simulation*, Vol. 55, No. 1, pp. 271-280, 2001.

[4] Chan K., Saltelli A. and Tarantola S., December. Sensitivity analysis of model output: variance-based methods make the difference, *In Proceedings of the 29th conference on Winter simulation, IEEE Computer Society*, pp. 261-268, 1997.

[5] Tafazzoli A., Pawashe C. and Sitti M., Atomic force microscope based two-dimensional assembly of micro/nanoparticles, In (ISATP 2005). *The 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing*, pp. 230-235, 2005.

[6] Sitti M., Teleoperated and automatic nanomanipulation systems using atomic force microscope probes, *In ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 1371-1376, 2003.

[7] Babahosseini H., Mahboobi S. H., Vakilzadeh M. K., Alasty A. and Meghdaric A., Optimal sliding mode control for atomic force microscope tip positioning during nano-manipulation process, *Scientia Iranica, Transaction F, Nanotechnology*, Vol. 20, No. 6, 2285, 2013.

[8] Korayem M. H., Taheri M. and Rastegar Z., Sobol method application in sensitivity analysis of LuGre friction model during 2D manipulation. *Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 1461-1469, 2014.

[9] Korayem M. H., Taheri M., Ghasemi M. and 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*, Vol. 91, No. 12, pp. 1068-1080, 2015.

[10] Korayem M. H., Taheri M. and Ghahnaviyeh S. D., Sobol method application in dimensional sensitivity analyses of different AFM cantilevers for biological particles, *Modern Physics Letters B*, Vol. 29, No. 22, pp. 1550123, 2015.