

درصدی در نیروی بحرانی به دست آمده در نتایج سه بعدی نسبت به دوبعدی می باشد.

تفضلی و همکارانش [12] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به مونتاژ دوبعدی میکرو/نانوذرات پرداخته اند. سیتی [13] سیستم به طراحی سیستم نانومنیپولیشن خودکار با استفاده از تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته است.

باباحسینی و همکارانش [14] به کنترل نانومنیپولیشن دوبعدی با استفاده از تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته اند. کنترل دقیق موقعیت نوک تیرک برای منیپولیشن توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بسیار مهم است و اگر نوک تیرک از نانوذرات عبور نماید، می تواند موجب شکست فرآیند منیپولیشن گردد. بنابراین، مدل سازی دقیق و درک درست نیروهای اعمالی بر روی نوک تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی نقش محوری در این فرآیند دارند.

مرادی و همکارانش [15] به بررسی نسبت ابعادی در منیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته اند. نتایج آن ها نشان می دهد که افزایش طول، باعث افزایش قابل توجه خیز تیرک و کاهش ضریب ایمنی می شود. مرادی و همکارانش [16] همچنین به مدل سازی دینامیکی نانومنیپولیشن نانولوله های پلی استرن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته اند.

بخش دیگری از مقالات با استفاده از دینامیک مولکولی به ارائه روش های جدیدی در میکرو/نانومنیپولیشن پرداخته اند که به دلیل بزرگ نمایی، مشکلات مقیاس دهی زمان و مکان را ندارند. کورایم و همکارانش [17, 18] با استفاده از روش دینامیک مولکولی، اثر آسیب سوزن بر خطای موقعیت دهی در فرآیند منیپولیشن را مورد بررسی قرار داده اند.

با توجه به تاریخچه ذکر شده، مشاهده می گردد که تمامی کارهای آنالیز حساسیت گذشته بر پایه تئوری های دوبعدی منیپولیشن بوده و کار عمده ای جهت آنالیز حساسیت تأثیر فاکتورهای ابعادی و یا محیطی بر مدل سه بعدی منیپولیشن صورت نپذیرفته است.

از این رو با توجه به گستردگی فاکتورهای مؤثر بر منیپولیشن سه بعدی، در این پژوهش برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری ای-فست اثر شش فاکتور ابعادی شامل طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیر، ارتفاع سوزن، شعاع ذره و شعاع نوک سوزن، 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 لغزش در راستای محور z ، غلتش حول محور z ، در منیپولیشن سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش ابتدا به بررسی معادلات دینامیک سه بعدی نانومنیپولیشن پرداخته شده و پس از آن روش های مختلف آنالیز حساسیت را بررسی نموده و روش آنالیز حساسیت ای-فست شرح داده شده است و سپس الگوریتم کلی حل مسأله تشریح شده است.

پس از آن به شبیه سازی و بررسی اثر فاکتورهای مختلف محیطی بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن سه بعدی پرداخته شده و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده اند. در انتهای نیز به نتیجه گیری کلی و پیشنهادات آتی پرداخته شده است.

2- مدل سازی

در این بخش ابتدا به مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی منیپولیشن سه بعدی

رابطه با مدل سازی و شبیه سازی فرآیند منیپولیشن جهت محاسبه نیرو و زمان بحرانی در شرایط مختلف و با استفاده از تئوری های تماسی و اصطکاکی مختلف صورت پذیرفته است.

سالتلی و همکارانش [1] روش هایی کمی مستقل از مدل برای تجزیه و تحلیل حساسیت کلی خروجی مدل را توسعه داده اند. هما و سالتلی [2] اقدامات مهمی در تجزیه و تحلیل حساسیت کلی مدل های غیرخطی انجام داده اند.

رفائی و همکارانش [3] به توسعه ای یک طرح مدل و کنترل برای سیستم های نانومنیپولیشن بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته اند. این مدل شامل دینامیک کوپل شده میکروتیرک و محرک پیژوتیوب است. فوتیادیس و همکارانش [4] به تصویربرداری و منیپولیشن ساختارهای زیستی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته اند. محبوبی و همکارانش [5] با یک سری از شبیه سازی های دینامیک مولکولی به مطالعه ای نفوذ نانولوله های کربنی به یک غشاء سلولی تحت سرعت تزریق های مختلف پرداخته اند.

کورایم و همکارانش [6] پس از تعریف مسأله منیپولیشن دوبعدی، مدل های اصطکاکی مختلف جهت کاربرد در مقیاس میکرو/نانو را ارائه نموده اند. آن ها همچنین معادلات دینامیکی منیپولیشن دوبعدی نانوذرات را استخراج نموده و نهایتاً معادلات دینامیکی سیستم را با استفاده از مدل های اصطکاکی دقیق تر شبیه سازی نموده اند و به محاسبه نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن پرداخته اند. کورایم و همکارانش [7] آنالیز حساسیت آماری مدل های اصطکاکی مختلف با استفاده از مدل سوپل را در منیپولیشن دوبعدی مورد توجه قرار داده و تأثیر پارامترهای مختلف ابعادی و محیطی بر نیروی بحرانی منیپولیشن دوبعدی را بررسی نموده اند. کورایم و همکارانش [8] همچنین به بررسی آنالیز حساسیت آماری تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن دوبعدی ذرات زبر با استفاده از روش سوپل پرداخته اند.

طاهری [9] به مدل سازی و شبیه سازی منیپولیشن سه بعدی میکرو/نانوذرات بیولوژیکی شامل دی ان ای و پلاکت در محیط هوا پرداخته و با استفاده از مدل تماسی جی کالر و مدل اصطکاکی کولمب نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن را محاسبه نموده است. نتایج حاکی از این امر است که غلتش ذرات دی ان ای نسبت به پلاکت حول محورهای مختلف نیاز به نیروی بحرانی بیشتری دارد، بدین معنا که جهت جابه جایی و منیپولیشن ذرات دی ان ای نیاز به نیروی بیشتری جهت آغاز به حرکت این ذرات بر روی صفحه مینا می باشد.

طاهری [10] به مدل سازی سه بعدی فرآیند منیپولیشن نانوذره طلا در محیط هوا با استفاده از مدل اصطکاکی ایچ کا پرداخته است. وی برای نخستین بار از مدل اصطکاکی ایچ کا در مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی جابه جایی سه بعدی نانوذره طلا استفاده نموده است. برای این منظور پس از بررسی مدل های مهم اصطکاکی قابل کاربرد در مقیاس میکرو/نانو، به مدل سازی سینماتیک سه بعدی و استخراج ماتریس سختی تیرک مستطیل شکل پرداخته شده است. نتایج به دست آمده بیانگر اختلاف 16 درصدی در نیروی بحرانی به دست آمده در نتایج سه بعدی نسبت به دوبعدی می باشد. طاهری [11] همچنین مدل سازی دینامیکی منیپولیشن جهت ساخت تجهیزات میکرو/نانو با استفاده از مدل اصطکاکی لاگره را مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله نیز استفاده از مدل دقیق اصطکاکی لاگره بیانگر اختلاف 18

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:

- تحلیل رگرسیون
- تحلیل واریانس
- روش سطح پاسخ
- شاخص اطلاعات اتصال
- سوئل
- تست حساسیت دامنه فوریه
- روش تعمیم‌یافته تست حساسیت دامنه فوریه

روش ای-فست یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد [19]. کاربرد روش ای-فست در چند مرحله ارائه می‌شود.

مرحله اول: انتخاب مجموعه‌ای از n فرکانس، که n تعداد پارامترهای ورودی مدل می‌باشد.

مرحله دوم: نسبت دادن به‌دلخواه یک فرکانس از مجموعه فرکانس‌ها برای هر پارامتر ورودی.

مرحله سوم: معرفی منحنی جست‌وجو، که فضای همه پارامترهای ورودی را کاوش می‌کند.

مرحله چهارم: محاسبه اندیس‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی به‌وسیله تحلیل فوریه برای خروجی [20].

از کاربردهای این روش در زمینه‌های متعدد مانند مطالعات رفتاری در کارهای سوئل [21] و راسیر [22]، داروسازی در کار کوگو [23] می‌توان نام برد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد [24].

3-2- الگوریتم کلی فرآیند آنالیز حساسیت

"شکل 2" الگوریتم کلی آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد، جهت آنالیز حساسیت ابتدا بایستی پارامترهای ورودی انتخاب گردند، که در این مقاله شش پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، شعاع ذره و شعاع نوک سوزن به‌عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شده‌اند. پس از آن دامنه‌ی تغییرات این شش پارامتر را باید انتخاب نمود، که در شکل این دامنه‌ی تغییرات مشخص شده است. شایان ذکر است که بازه‌های انتخاب شده برای تمامی پارامترهای ورودی بر مبنای مقادیر موجود در انواع میکروسکوپ‌های نیروی اتمی و ابعاد ذرات نیز با توجه به نوع ذرات انتخاب شده است. با انتخاب دامنه‌ی پارامترهای ورودی، نرم‌افزار سیملب به تولید نمونه‌ها خواهد پرداخت و پس از تولید نمونه، پارامترهای خروجی با توجه به کد منیپولیشن (مدل دینامیکی نانومنیپولیشن سه‌بعدی که در پیوست الف آمده است) تولید خواهند شد.

در این مقاله هشت پارامتر خروجی شامل نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y ، لغزش در راستای محور z ، غلتش حول محور z ، تعیین مقدار پارامترهای خروجی که در نرم‌افزار متلب صورت پذیرفته است، مجدداً نرم‌افزار سیملب با استفاده از روش ای-فست به تولید اندیس‌های حساسیت پرداخته

پرداخته شده و سپس روش آنالیز حساسیت ای-فست تشریح شده و در نهایت و الگوریتم چگونگی انجام آنالیز حساسیت توضیح داده شده است.

1-2- مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی منیپولیشن سه‌بعدی

"شکل 1" شماتیکی از منیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی را نشان می‌دهد. مدل دینامیکی نانومنیپولیشن سه‌بعدی در پیوست الف آمده است. برای محاسبه‌ی نیرو در منیپولیشن سه‌بعدی داریم [9]:

$$F_X = F_x + m(\ddot{x}_s - \delta_t \cos\varphi \cos\psi + \frac{H\ddot{\alpha}\cos\alpha - H\dot{\alpha}^2\sin\alpha}{2}) \quad (1)$$

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

$$F_Y = F_y \sin^2\theta + m\sin^2\theta (\ddot{y}_s - \delta_t \cos\varphi \sin\psi + \frac{-H\ddot{\theta}\cos\theta + H\dot{\theta}^2\sin\theta}{2}) + \left(\frac{I_p\ddot{\theta} + M_\theta}{H}\right)\cos\theta - F_z \sin\theta \cos\theta \quad (3)$$

در روابط (1) تا (3)، F_x ، F_y و F_z ، به ترتیب نیروهای اعمالی انتهایی سوزن در راستای محورهای x ، y و z و F_x ، F_y و F_z ، به ترتیب نیروهای اعمالی نوک سوزن در راستای محورهای x ، y و z ، H ارتفاع سوزن، m جرم تیرک، I_p ممان اینرسی تیرک حول نقطه ابتدایی، M_α گشتاور پیچشی تیرک حول محور y ، M_θ گشتاور پیچشی تیرک حول محور z ، δ_s عمق نفوذ نانوذره در صفحه‌ی مینا و δ_t عمق نفوذ نانوذره در سوزن می‌باشند.

ذرات موردنظر در این پژوهش نیز ذرات زیستی مختلف از جمله دی‌ان‌ای و پلاکت بوده است.

2-2- بررسی روش‌های آنالیز حساسیت

به‌طورکلی آنالیز حساسیت دستبازی برای آنالیزور 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 آنالیزور کمک می‌کند. اما عمده‌ترین اهدافی که می‌توان با آنالیز حساسیت پیگیری نمود عبارت‌اند از:

1- 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.

2- 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 غیرحساس 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.

3- 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.

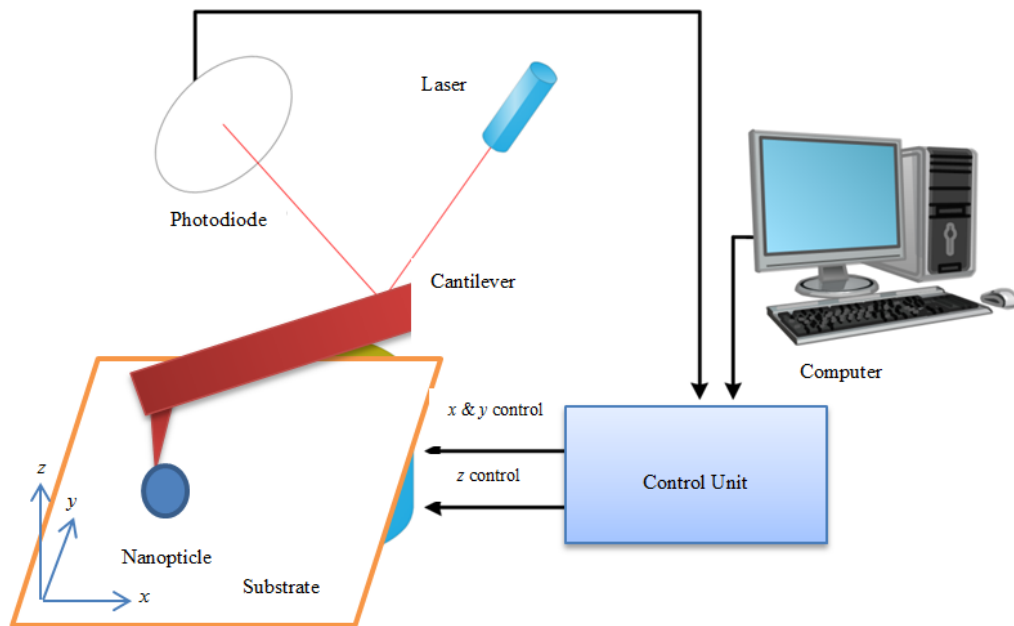


Fig. 1 Schematic of CNT manipulation by using AFM

شکل 1 شماتیک منیپولیشن نانوذره کروی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و فرآیند آنالیز حساسیت به پایان خواهد رسید.

3- آنالیز حساسیت پارامترهای ابعادی مختلف

در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی آنالیز حساسیت پرداخته شده 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 می‌باشند. دلیل پراکندگی نقاط در نتایج به دست آمده نیز ماهیت روش آنالیز حساسیت آماری به جهت تغییر همزمان تمامی پارامترهای مورد بررسی می‌باشد.

3-1- بررسی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن

"شکل 3" اثر پارامترهای مختلف ابعادی شامل شش پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، شعاع ذره و شعاع نوک سوزن بر چهار 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. تغییرات غیرخطی و با شیب تند در نتایج موجود بیانگر حساسیت بالای پارامتر مورد بررسی در نتایج می‌باشد. در "شکل 3-الف" مشاهده می‌شود که با افزایش طول تیرک، نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y کاهش و نیروی بحرانی غلتش حول محور x افزایش می‌یابد. در "شکل 3-ب" مشاهده می‌شود که با افزایش عرض تیرک، نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y افزایش و نیروی بحرانی غلتش حول محور x کاهش می‌یابد. در "شکل 3-ج" مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت تیرک، نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y افزایش و نیروی بحرانی غلتش حول محور x کاهش می‌یابد. "شکل‌های 3-د تا 3-و" نیز نشان‌دهنده اثر ناچیز سایر پارامترها (شامل ارتفاع سوزن شعاع ذره و نوک سوزن) بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x و لغزش در راستای محور y می‌باشد.

2-3- بررسی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر زمان بحرانی منیپولیشن "شکل 4" اثر پارامترهای مختلف ابعادی شامل شش پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، شعاع ذره و شعاع نوک سوزن بر چهار پارامتر خروجی زمانی شامل زمان بحرانی لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y و غلتش حول محور y را نشان می‌دهد.

در "شکل 4-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 "شکل 4-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 "شکل 4-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 یافته، درحالی‌که بر زمان بحرانی غلتش حول محور x تأثیر ناچیزی دارد. در "شکل 4-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. "شکل 4-ه" نشان از اثر فراوان افزایش شعاع ذره بر افزایش زمان بحرانی غلتش حول محور x دارد. "شکل 4-و" نیز اثر جزئی شعاع سوزن بر زمان‌های بحرانی را نشان می‌دهد.

3-3- مقایسه کمی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروی بحرانی منیپولیشن با استفاده از روش ای-فست

"شکل 5" درصد تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروهای بحرانی براساس روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست را نشان می‌دهد. با توجه به "شکل‌های 5-الف و 5-ج"، پارامترهای ضخامت تیرک با 59 درصد تأثیر، طول تیرک با 27 درصد تأثیر و عرض تیرک با 14 درصد تأثیر، بیشترین اثر را بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محوره‌های x و y دارند، درحالی‌که از اثر سایر پارامترها بر این نیرو می‌توان صرف‌نظر نمود. "شکل 5-ب" بیانگر آن است که شعاع ذره

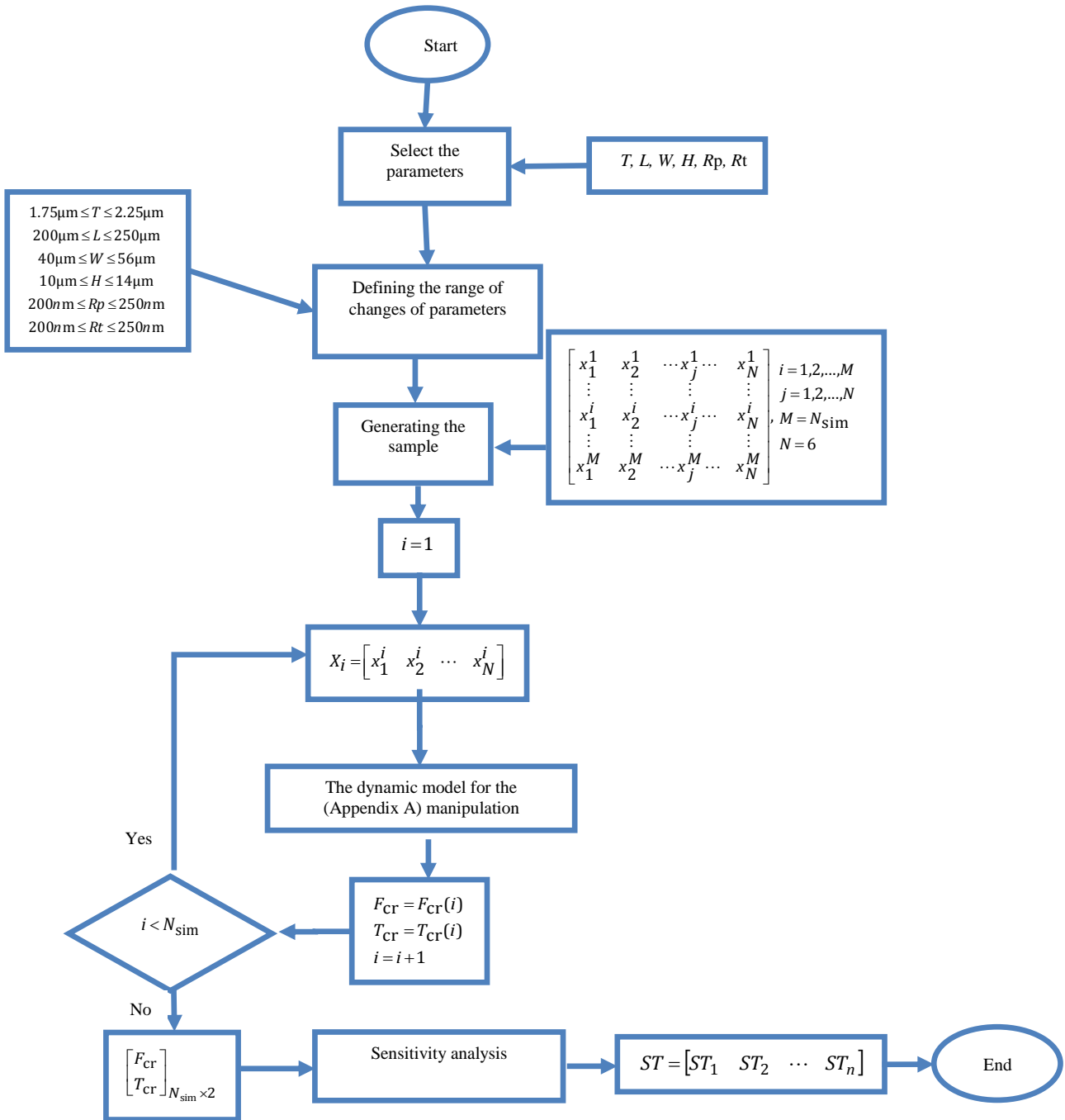
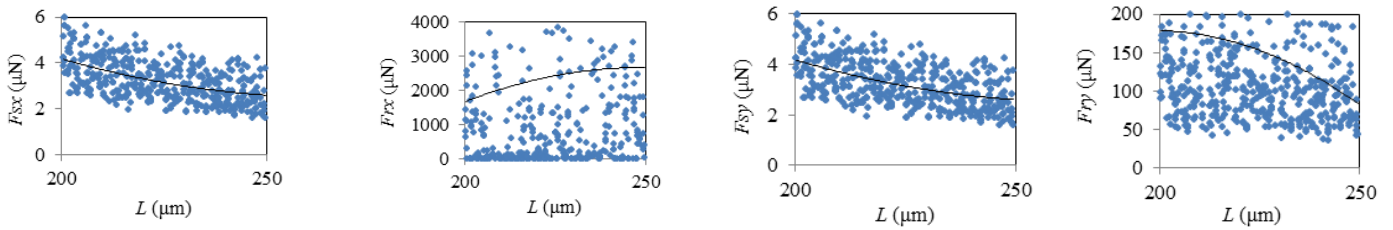


Fig. 2 General algorithm for sensitivity analysis

شکل 2 الگوریتم کلی جهت آنالیز حساسیت



a) effect of cantilever length
الف) اثر طول تیرک

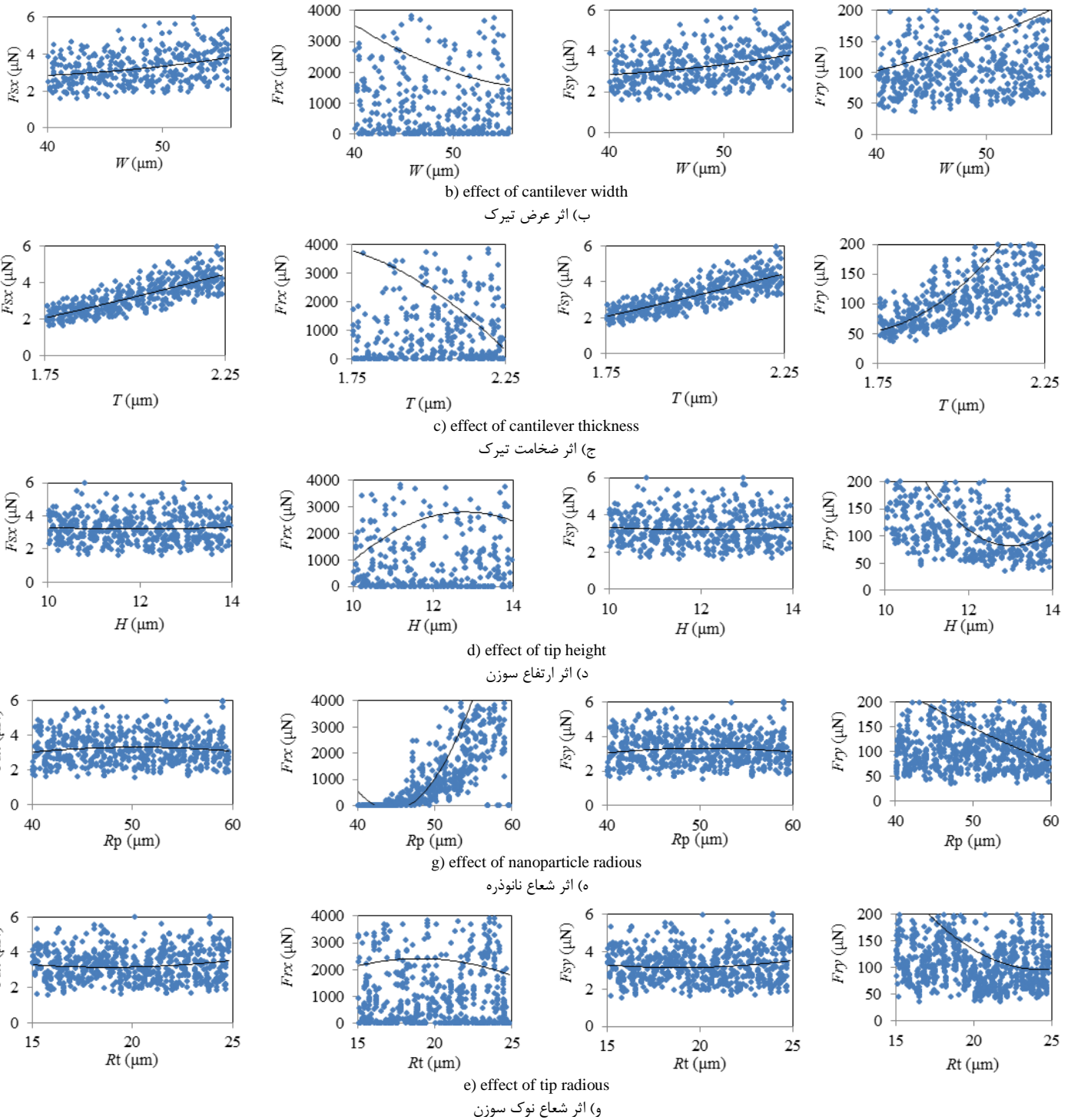
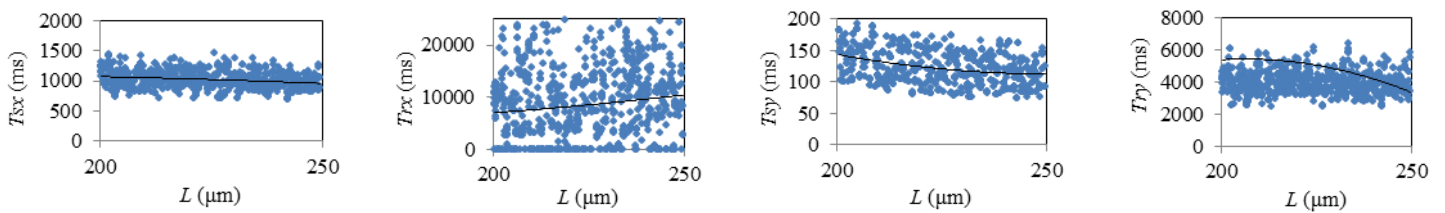


Fig. 3 The effect of various parameters in critical force, from left to right: sliding along the x-axis, rolling around the x-axis, sliding along the y-axis, rolling around the y-axis

شکل 3 اثر پارامترهای مختلف بر نیروی بحرانی، از چپ به راست: لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y



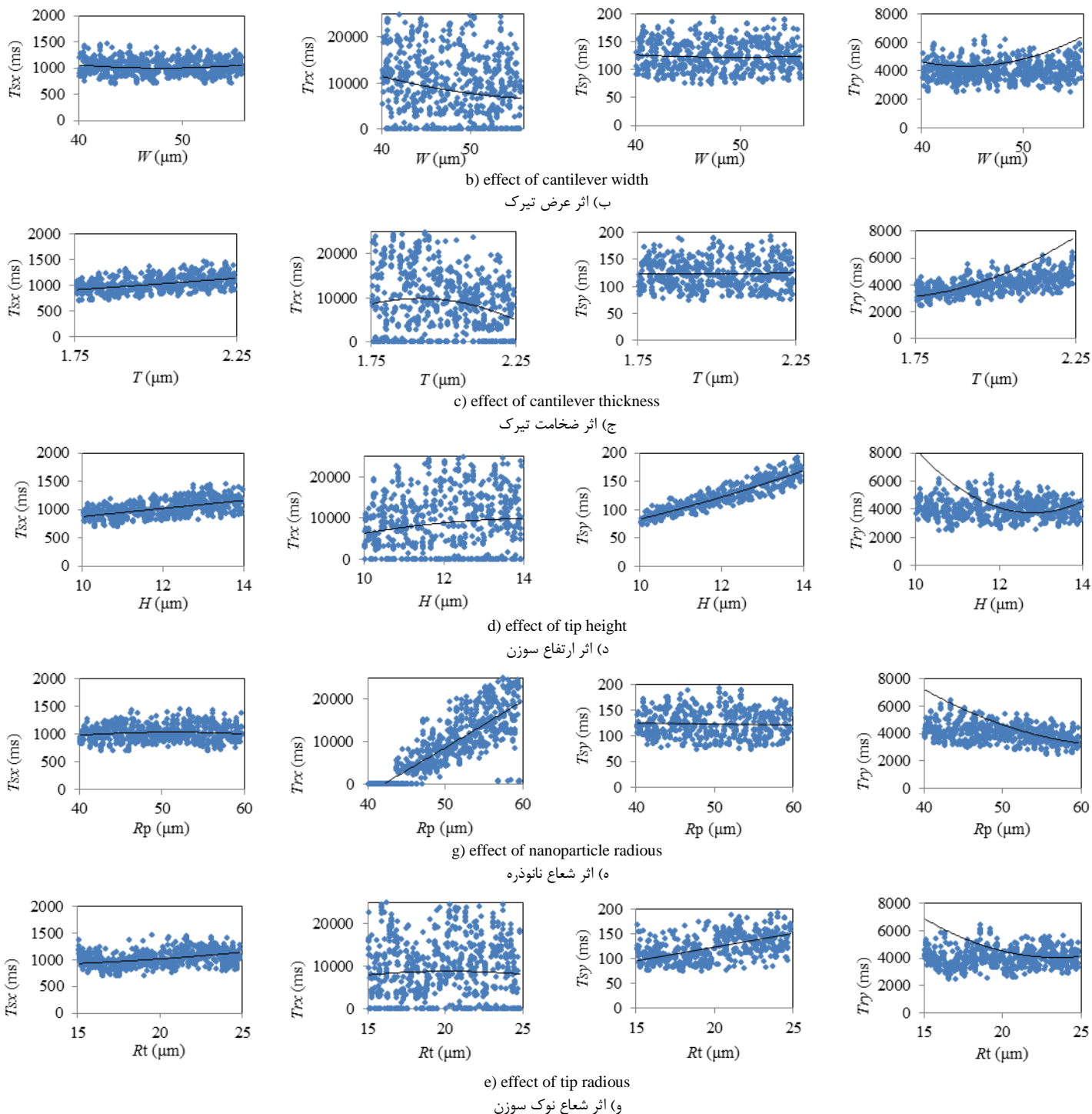


Fig. 4 The effect of parameters in critical time, from left to right: sliding along the x -axis, rolling around the x -axis, sliding along the y -axis, rolling around the y -axis

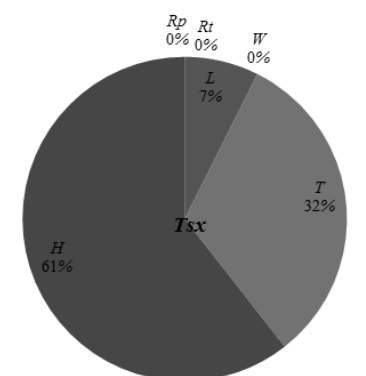
شکل 4 اثر پارامترهای مختلف بر زمان بحرانی، از چپ به راست: لغزش در راستای محور x ، غلتش حول محور x ، لغزش در راستای محور y ، غلتش حول محور y

پارامترها شامل شعاع ذره، طول تیرک و عرض تیرک نیز به عنوان سه پارامتر نیمه حساس بر این نیرو به شمار می‌روند.

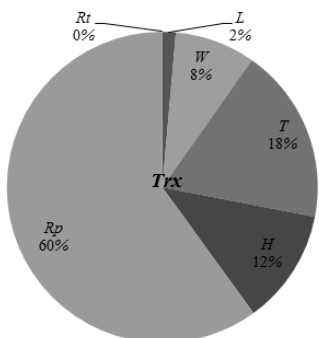
3-4- مقایسه کمی اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر زمان بحرانی منیبولیشن با استفاده از روش ای-فست

با 49 درصد تأثیر، ضخامت تیرک با 22 درصد تأثیر، ارتفاع سوزن با 17 درصد تأثیر و عرض تیرک با 11 درصد تأثیر به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها بر نیروی بحرانی غلتش حول محور x می‌باشند، درحالی‌که سایر پارامترها اثر بسیار کمتری بر این نیرو دارند. مطابق با "شکل 5-د" نیز دو پارامتر ضخامت تیرک با 35 درصد تأثیر و ارتفاع سوزن با 31 درصد تأثیر مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر نیروی بحرانی غلتش حول محور y بوده، درحالی‌که پارامتر شعاع سوزن، را می‌توان پارامتر غیر حساس بر این نیرو دانست. سایر

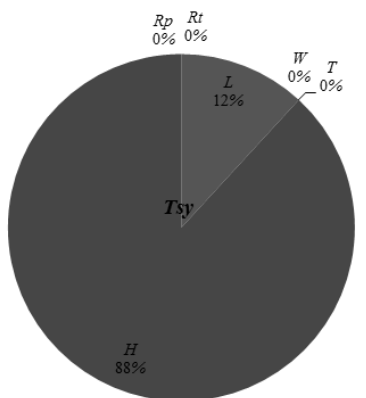
بیشترین اثر را بر زمان بحرانی لغزش در راستای محورهای x دارند، درحالی که از اثر سایر پارامترها بر این زمان می توان صرف نظر نمود. "شکل 6-ب" بیانگر آن است که شعاع ذره با 60 درصد تأثیر، ضخامت تیرک با 18 درصد تأثیر، ارتفاع سوزن تیرک با 12 درصد تأثیر و عرض تیرک با 8 درصد تأثیر به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها بر زمان بحرانی غلتش حول محور x می باشند، درحالی که سایر پارامترها اثر بسیار کمتری بر این زمان دارند. با توجه به "شکل 6-ج"، سه پارامتر ارتفاع سوزن تیرک با 88 درصد تأثیر و طول تیرک با 12 درصد تأثیر بیشترین اثر را بر زمان بحرانی لغزش در راستای محور y دارند، در نهایت و مطابق با "شکل 6-د" نیز همزمان دو پارامتر ضخامت تیرک و ارتفاع سوزن تیرک با 31 درصد تأثیر مهم ترین پارامترهای اثرگذار بر زمان بحرانی غلتش حول محور y بوده، درحالی که پارامتر شعاع سوزن را می توان پارامتر غیرحساس بر این زمان دانست.



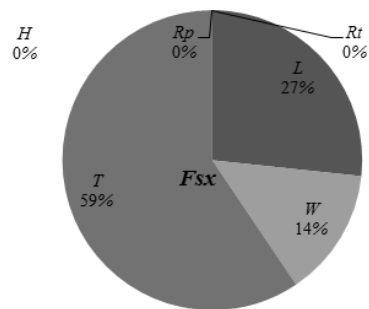
a) Critical time of sliding along the x -axis
الف) زمان بحرانی لغزش در راستای محور x



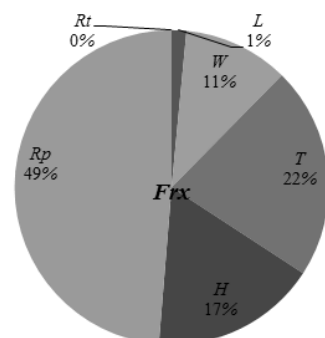
b) Critical time of rolling around the x -axis
ب) زمان بحرانی غلتش حول محور x



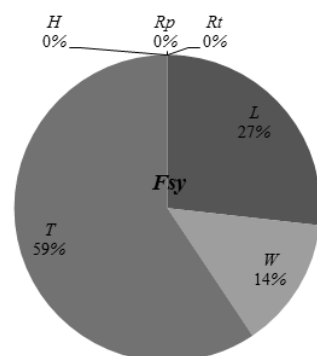
c) Critical time of sliding along the y -axis
ج) زمان بحرانی لغزش در راستای محور y



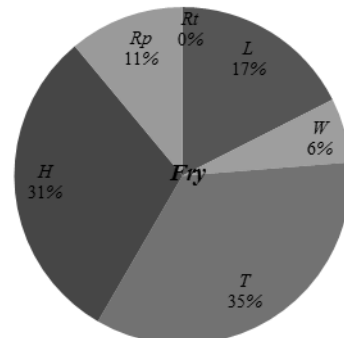
a) Critical force of sliding along the x -axis
الف) نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x



b) Critical force of rolling around the x -axis
ب) نیروی بحرانی غلتش حول محور x



c) Critical force of sliding along the y -axis
ج) نیروی بحرانی لغزش در راستای محور y



d) Critical force of rolling around the y -axis
د) نیروی بحرانی غلتش حول محور y

Fig. 5 The effect of various dimensional parameters in critical forces
شکل 5 اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروهای بحرانی

"شکل 6" درصد تأثیر پارامترهای مختلف بر زمان های بحرانی براساس روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست را نشان می دهد. با توجه به "شکل 6-الف"، پارامترهای ارتفاع سوزن با 61 درصد تأثیر و ضخامت تیرک با 32 درصد تأثیر

مشاهده نمود، روش‌های آماری می‌باشند. در میان روش‌های آماری روش ای-فست یکی از سریع‌ترین روش‌هاست که به‌طور دقیق می‌توان با استفاده از آن درصد اثرگذاری پارامترهای مختلف ورودی بر یک یا چند خروجی مورد نظر مسأله را به دست آورد.

در این پژوهش با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست و استفاده از اندیس حساسیت کل اثر کلی پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروها و زمان‌های بحرانی منیپولیشن بررسی شده است. نتایج کلی به‌دست‌آمده بیانگر آن است که:

- در بین تمامی شش پارامتر ابعادی بررسی شده، پارامتر ضخامت تیرک بیشترین اثر را بر نیروهای بحرانی منیپولیشن دارد.
- پارامتر شعاع سوزن در بازه‌های مورد بررسی جزء پارامترهای غیرحساس نیروی بحرانی منیپولیشن به حساب خواهد آمد.
- در رابطه با زمان‌های بحرانی منیپولیشن، می‌توان پارامتر ارتفاع سوزن را به‌عنوان اثرگذارترین پارامتر برشمرد.
- از اثر پارامتر شعاع سوزن در بازه‌ی بررسی شده بر زمان بحرانی منیپولیشن سه‌بعدی می‌توان صرف‌نظر نمود.

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

5- تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اراک و در قالب طرح پژوهشی به شماره قرارداد 95/8586 مورخ 1395/8/16 صورت پذیرفته است.

6- پیوست A: مدل دینامیکی نانومنیپولیشن سه‌بعدی

A-1- بررسی سینماتیک منیپولیشن سه‌بعدی

برای محاسبه‌ی معادلات سینماتیکی تغییر شکل در سوزن و محاسبه‌ی شتاب برای مدل‌سازی سوزن و استخراج نیروهای عمل و عکس‌العمل در سطح تماسی تیپ-نانوذره روابط سینماتیکی مربوط به نقاط p (محل اتصال انتهای سوزن-تیرک) و t (محل تماس نوک سوزن-نانوذره در راستای عمق نفوذ ماکزیمم) با توجه به "شکل a-1" به صورت روابط (a-1) تا (a-6) به دست آمده‌اند [9].

$$x_t = x_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \cos \psi \quad (a-1)$$

$$y_t = y_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \sin \psi \quad (a-2)$$

$$z_t = z_s + (R_p + R_t - \delta_t) \sin \varphi + (R_p - \delta_s) \quad (a-3)$$

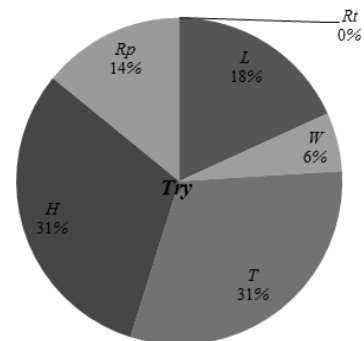
$$x_p = x_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \cos \psi + H \sin \alpha \quad (a-4)$$

$$y_p = y_s + (R_p + R_t - \delta_t) \cos \varphi \sin \psi - H \sin \theta \quad (a-5)$$

$$z_p = z_s + (R_p + R_t - \delta_t) \sin \varphi + (R_p - \delta_s) + H \cos \alpha \cos \theta \quad (a-6)$$

با دو بار مشتق‌گیری از روابط (a-1) تا (a-6)، مقادیر شتاب به صورت روابط (a-7) تا (a-12) به دست خواهند آمد [9]:

$$\ddot{x}_t = \ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi \quad (a-7)$$



d) Critical time of rolling around the y-axis

(د) زمان بحرانی غلتش حول محور y

Fig. 6 The effect of various dimensional parameters in critical times

شکل 6 اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر زمان‌های بحرانی

با توجه به عدم انجام آنالیز حساسیت منیپولیشن سه‌بعدی، برای صحت‌سنجی نتایج در این مقاله از نتایج موجود برای آنالیز حساسیت دوبعدی [25] استفاده شده است. "شکل 7" اثر چهار پارامتر ابعادی طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک و ارتفاع سوزن بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x در منیپولیشن سه‌بعدی را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج این شکل با نتایج این مقاله نشان‌دهنده‌ی آن است که ضخامت تیرک در منیپولیشن سه‌بعدی و دوبعدی (با 76 درصد اثرگذاری) بیشترین اثر را بر نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x داشته در حالی که ارتفاع سوزن تقریباً بی‌اثر می‌باشد و این امر دلیلی بر صحت نتایج می‌باشد. شایان ذکر است که در تمامی این نتایج از اندیس حساسیت کل در روش ای-فست استفاده شده است.

4- نتیجه‌گیری

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

جهت بررسی اثرگذاری پارامترهای مختلف بر یک خروجی‌های یک فرآیند می‌توان از روش‌های مختلف آنالیز حساسیت استفاده نمود. یکی از روش‌های آنالیز حساسیت که در آن می‌توان تأثیر پارامترها را به‌صورت کمی

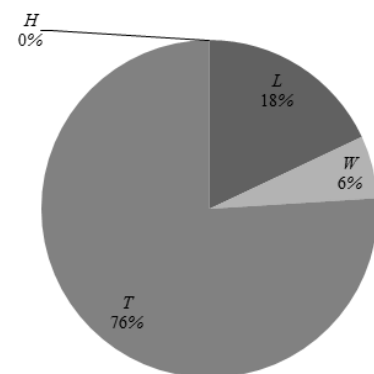


Fig. 7 The effect of dimensional parameters in critical force [25]

شکل 7 اثر پارامترهای ابعادی مختلف بر نیروی بحرانی [25]

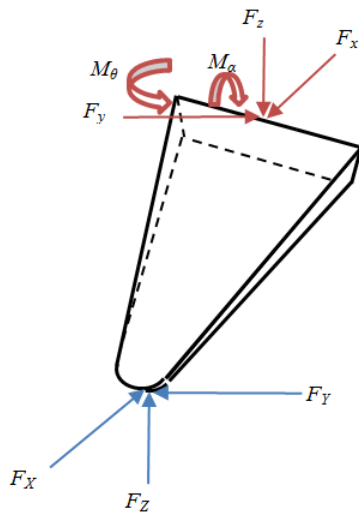


Fig. 2-a Free-body diagram of tip [9]

شکل 2-ا دیاگرام آزاد سوزن [9]

7- مراجع

- [1] A. Saltelli, S. Tarantola, K. S. Chan, A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, *Technometrics*, Vol. 41, No. 1, pp. 39-56, 1999.
- [2] T. Homma, A. Saltelli, Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 52, No. 1, pp. 1-17, 1996.
- [3] K. El Rifai, O. El Rifai, K. Youcef-Toumi, Modeling and control of AFM-based nano-manipulation systems, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, Apr 18, pp. 157-162, 2005.
- [4] D. Fotiadis, S. Scheuring, S. A. Müller, A. Engel, D. J. Müller, Imaging and manipulation of biological structures with the AFM, *Micron*, Vol. 33, No. 4, pp. 385-397, 2002.
- [5] S. H. Mahboobi, A. Taheri, A. H. N. Pishkenari, A. Meghdari, M. Hemmat, Cellular injection using carbon nanotube: A molecular dynamics study, *Nano*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-11, 2015.
- [6] M. H. Korayem, M. Taheri, M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models, *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 18, pp. 6713-6722, 2012.
- [7] M. H. Korayem, M. Taheri, A. H. Korayem, Z. Rastegar, Sensitivity analysis of coulomb and HK friction models in 2D AFM-Based Nano-Manipulation: Sobol method, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-31, 2015.
- [8] M. H. Korayem, M. Taheri, M. Ghasemi, H. Badkoobehzavh, Investigating the effective parameters in the Atomic Force Microscope-based dynamic manipulation of roughmicro/nanoparticles by using the Sobol sensitivity analysis method, *Simulation*, Vol. 91, No. 12, pp. 1068-1080, 2015.
- [9] M. Taheri, 3D-Dynamic modeling and simulation of biological nanoparticle motion using AFM nano-robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 311-316, 2015. (in Persian)
- [10] M. Taheri, 3D modeling of nanoparticle manipulation in air using HK friction model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 275-282, 2016. (in Persian)
- [11] M. Taheri, Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model, *Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 45-53, 2016. (in Persian)
- [12] A. Tafazzoli, C. Pawashe, M. Sitti, Atomic force microscope based two-dimensional assembly of micro/nanoparticles, *(ISATP 2005) The 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing*, Los Alamitos, July, pp. 230-235, 2005.
- [13] M. Sitti, Teleoperated and automatic nanomanipulation systems using atomic force microscope probes, *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, June, pp. 1371-1376, 2003.
- [14] H. Babahosseini, S. H. Mahboobi, M. K. Vakilzadeh, A. Alasty, A. A. Meghdari, 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.
- [15] M. Moradi, A. H. Fereidon, S. Sadeghzadeh, Aspect ratio and dimension effects on nanorod manipulation by atomic force microscope, *Micro & Nano Letters*, Vol. 5, No. 5, pp. 324-327, 2010.
- [16] M. Moradi, A. H. Fereidon, S. Sadeghzadeh, Dynamic modeling for nanomanipulation of polystyrene nanorod by atomic force microscope, *Scientia Iranica*, Vol. 18, No. 3, pp. 808-815, 2011.

$$\dot{y}_t = \dot{y}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi \quad (a-8)$$

$$\dot{z}_t = \dot{z}_s - \dot{\delta}_t \sin \varphi - \dot{\delta}_s \quad (a-9)$$

$$\ddot{x}_p = \ddot{x}_s - \ddot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi + H \ddot{\alpha} \cos \alpha - H \dot{\alpha}^2 \sin \alpha \quad (a-10)$$

$$\dot{y}_p = \dot{y}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi - H \dot{\theta} \cos \theta + H \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (a-11)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_p = \dot{z}_s - \dot{\delta}_t \sin \varphi - \dot{\delta}_s - H \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta \\ - H (\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos \alpha \cos \theta \\ - H \dot{\theta} \cos \alpha \sin \theta \end{aligned} \quad (a-12)$$

2- بررسی دینامیک منیپولیشن سه بعدی

جهت استخراج معادلات دینامیک سه بعدی با توجه به دیاگرام آزاد سوزن که در "شکل 2-a" نمایش داده شده است، خواهیم داشت [9]:

$$F_x - F_x = m \ddot{x}_G = m \left(\frac{\ddot{x}_p + \ddot{x}_t}{2} \right) \quad (a-13)$$

$$F_y - F_y = m \ddot{y}_G = m \left(\frac{\ddot{y}_p + \ddot{y}_t}{2} \right) \quad (a-14)$$

$$F_z - F_z = m \ddot{z}_G = m \left(\frac{\ddot{z}_p + \ddot{z}_t}{2} \right) \quad (a-15)$$

$$F_y H \cos \theta + F_z H \sin \theta - M_\theta = I_p \ddot{\theta} \quad (a-16)$$

$$-F_x H \cos \alpha + F_z H \sin \alpha - M_\alpha = I_p \ddot{\alpha} \quad (a-17)$$

لذا با جایگذاری معادلات شتابی (a-13) تا (a-17) برای محاسبه نیرو

خواهیم داشت [9]:

$$F_x = F_x + m \left(\ddot{x}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \cos \psi + \frac{H \ddot{\alpha} \cos \alpha - H \dot{\alpha}^2 \sin \alpha}{2} \right) \quad (a-18)$$

$$F_z = F_z \cos^2 \alpha +$$

$$\begin{aligned} m \cos^2 \alpha \left(\ddot{z}_s - \dot{\delta}_t \sin \varphi - \dot{\delta}_s \right. \\ \left. - H \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \theta - H (\dot{\theta}^2 + \dot{\alpha}^2) \cos \alpha \cos \theta \right. \\ \left. + \frac{-H \dot{\theta} \cos \alpha \sin \theta}{2} \right) + \left(\frac{I_p \ddot{\alpha} + M_\alpha}{H} \right) \sin \theta \\ + F_x \sin \alpha \cos \alpha \end{aligned} \quad (a-19)$$

$$\begin{aligned} F_y = F_y \sin^2 \theta + m \sin^2 \theta \left(\dot{y}_s - \dot{\delta}_t \cos \varphi \sin \psi \right. \\ \left. + \frac{-H \dot{\theta} \cos \theta + H \dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} \right) \\ \left. + \left(\frac{I_p \dot{\theta} + M_\theta}{H} \right) \cos \theta - F_z \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (a-20)$$

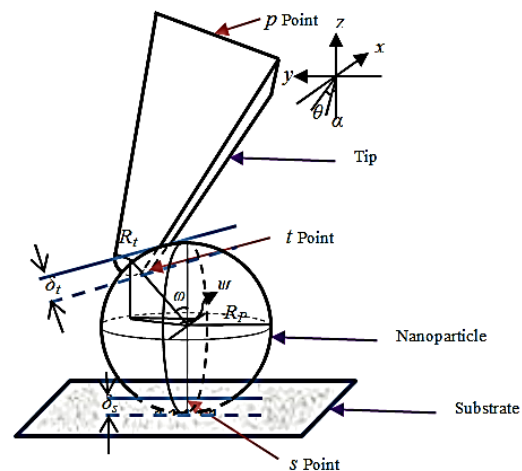


Fig. 1-a Schematic of contacts between particles, tip and substrate [9]

شکل 1-ا شماتیکی از تماس بین ذره، سوزن و صفحه‌ی مبنا [9]

- and their Monte Carlo estimates, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 55, pp. 271-280, 2001.
- [22] P. Rossier, D. T. Wade, M. Murphy, 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.
- [23] N. Kogo, M. Ariel, Membrane properties and monosynaptic retinal excitation of neurons in the turtle accessory optic system, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 78, pp. 614-627, 1997.
- [24] I. M. Sobol, Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models, *Mathematical Modeling Computer Experiment*, Vol. 14, pp. 407-414, 1993.
- [25] M. H. Korayem, M. Taheri, Z. Rastegar, 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.
- [17] M. H. Korayem, V. Rahneshin, S. Sadeghzadeh, Coarse-grained molecular dynamics simulation of automatic nanomanipulation process: The effect of tip damage on the positioning errors, *Computational Materials Science*, Vol. 60, pp. 201-211, 2012.
- [18] M. H. Korayem, V. Rahneshin, and S. Sadeghzadeh, Nano cluster manipulation success considering flexibility of system: Coarse grained molecular dynamics simulations, *Scientia Iranica*, Vol. 19, No. 5, pp. 1288-1298, 2012.
- [19] M. H. Korayem, M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, pp. 714-726, 2009.
- [20] R. Cukier, H. Levine, K. Shuler, Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems, *Journal of Computational Physics*, Vol. 26, pp. 1-42, 1978.
- [21] I. M. Sobol', Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models