



## تأثیر پارامترهای هندسی تیرک‌های مختلف بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن میکرو/نانوذرات با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای-فست

محرم حبیب نژاد کورایم<sup>1\*</sup>، سپهر دهقانی قهنویه<sup>2</sup>، مهدی قاسمی<sup>3</sup>، معین طاهری<sup>4</sup>

- 1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 13114-16846، hkorayem@iust.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در منیپولیشن نانو ذرات با میکروسکوپ نیروی اتمی، به منظور مدل‌سازی دقیق دینامیک منیپولیشن و جلوگیری از آسیب به نانو ذره، محاسبه‌ی دقیق نیروی بحرانی امری ضروری است. برای مدل‌سازی دینامیکی دقیق و محاسبه‌ی نیروی وارد بر نانو ذره نیز نیاز به مدل‌سازی سختی در انواع تیرک‌ها، شناخت پارامترهای هندسی حساس مؤثر بر سختی تیرک‌ها و پارامترهای حساس مؤثر بر زمان و نیروی بحرانی است. از این رو در این مقاله ابتدا به صورت مجزا به بررسی دو نوع متداول تیرک‌ها یعنی تیرک‌های وی-شکل و خنجرری پرداخته شده است. برای مدل‌سازی سختی تیرک وی-شکل، این تیرک به دو قسمت تقسیم شده است؛ قسمت اول مثلثی و قسمت دوم شامل دو تیر مورب مستطیلی است. سپس سختی هر قسمت به طور مجزا مدل شده و سختی نهایی محاسبه شده است. برای مدل‌سازی سختی تیرک خنجرری نیز از همین روش استفاده شده و تیرک به دو قسمت مثلثی و مستطیلی تقسیم شده و سختی نهایی به دست آورده شده است. با توجه به این که بررسی پارامترهای اثرگذار بر سختی تیرک و زمان و نیروی بحرانی منیپولیشن در منیپولیشن ذرات زیستی اهمیت بالایی دارد، لذا با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای-فست به انتخاب مناسب نوع تیرک و پارامترهای آن پرداخته شده است. در انتها در این مقاله نشان داده شده است که تیرک خنجرری برای جابه‌جایی ذرات بیولوژیکی مناسب‌تر است.

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 19 شهریور 1393  
 پذیرش: 06 آبان 1393  
 ارائه در سایت: 23 آذر 1393  
 کلید واژگان:  
 تیرک  
 منیپولیشن  
 نیرو و زمان بحرانی  
 ای-فست

## Effect of different geometrical parameters of atomic force microscope cantilevers in critical force and time based on manipulation by applying EFAST sensitivity analyses

Moharam Habibnejad Korayem\*, Sepehr Dehghani Ghahnaviyeh, Mehdi Ghasemi, Moein Taheri

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
 \*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, hkorayem@iust.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 10 September 2014  
 Accepted 28 October 2014  
 Available Online 14 December 2014

**Keywords:**  
 Cantilever  
 Manipulation  
 Critical force and time  
 EFAST

### ABSTRACT

In nanoparticles manipulation with atomic force microscope, for modeling exact manipulation dynamics and prevention of damaging nanoparticles, it is necessary to compute critical force. For modeling dynamics and computing critical force that apply to nanoparticles it is necessary to model cantilever stiffness and determine sensitive geometrical parameters which effect cantilever stiffness and critical force. In this paper, first, two different kinds of cantilevers, V-shaped and dagger cantilevers are investigated. For modeling V-shaped cantilever stiffness this cantilever is divided into two parts, a triangular head section and two slanted rectangular beams. After that, the stiffness of each part is modeled separately and the total stiffness is computed. For modeling dagger cantilever stiffness the same method is used and the cantilever is divided into two parts, a triangular head section and a rectangular beam and then the total stiffness is computed. Cantilevers stiffness and critical force in manipulation of biological particles and non-biological particles are very important, hence EFAST sensitivity analyses for selecting suitable cantilever and its parameters is used. In this paper it has been shown that the dagger-shaped cantilever is more suitable for the manipulation of biological particles.

به‌دقت بیشتر در جابه‌جایی میکرو/نانوذرات توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و خودکار نمودن این فرآیند انجام شده است. تیرک مهم‌ترین قسمت این دستگاه است که در مدل‌سازی دینامیک منیپولیشن نانو ذرات مورد بررسی

### 1- مقدمه

قابلیت میکروسکوپ نیروی اتمی در منیپولیشن میکرو/نانوذرات در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات گوناگونی با اهداف دست‌یابی

Please cite this article using:

M. Habibnejad Korayem, S. Dehghani Ghahnaviyeh, M. Ghasemi, M. Taheri, Effect of different geometrical parameters of atomic force microscope cantilevers in critical force and time based on manipulation by applying EFAST sensitivity analyses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 310-316, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نیز تحقیقاتی در زمینه‌ی محاسبه‌ی سختی‌های انواع مختلف تیرک‌ها انجام داده‌اند که این مطالعات برای آنالیز حساسیت دوبعدی دینامیک منیپولیشن قابل‌استفاده نیست [8].

بنابراین محاسبه‌ی سختی انواع مختلف تیرک‌ها به منظور شناخت پارامترهای هندسی تأثیرگذار تیرک بر دینامیک منیپولیشن امری ضروری است. لذا در این مقاله ابتدا دو نوع متداول از تیرک‌ها که عبارت‌اند از تیرک خنجری و وی-شکل معرفی شده و سختی‌های آن‌ها برای استفاده در مدل‌سازی دینامیک منیپولیشن محاسبه شده است. هرکدام از این تیرک‌ها در فضای دوبعدی دارای سه سختی هستند که به طور مجزا به آن‌ها پرداخته شده است.

روش مورد استفاده در این مقاله برای به دست آوردن سختی‌های مربوط به تیرک‌ها در هر جهت دلخواه روش نیرو-جابجایی است. در این روش برای به دست آوردن سختی در یک جهت خاص یک نیرو در آن جهت به تیرک وارد شده، سپس جابه‌جایی ناشی از آن نیرو در آن جهت حساب شده و با تقسیم مقدار نیروی وارد شده بر میزان جابه‌جایی اندازه‌گیری شده مقدار سختی در آن جهت به دست می‌آید.

پس از شناخت تیرک‌ها و محاسبه‌ی سختی هرکدام به معرفی روش آنالیز حساسیت ای-فست پرداخته شده است. سپس با استفاده از این روش آنالیز حساسیت به بررسی پارامترهای هندسی تیرک بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن پرداخته شده و تأثیر این پارامترها با استفاده از نمودارهای رسم شده بررسی شده است. در انتها نتایج آنالیز حساسیت به دست آمده با نتایج موجود برای تیرک مستطیلی مقایسه شده و صحت نتایج مورد تأیید قرار گرفته است.

## 2- بررسی سختی انواع مختلف تیرک‌ها

### 2-1- بررسی سختی تیرک وی-شکل

برای مدل‌سازی سختی تیرک وی-شکل، این تیرک به دو قسمت مثلثی و مستطیلی مورب تقسیم شده و سختی هر قسمت مدل شده و با استفاده از اصل برهم‌نهی سختی نهایی محاسبه شده است. مدلی که در این مقاله برای مدل‌سازی سختی تیرک وی-شکل ارائه شده برگرفته از مدل سابِر [9] است که در آن برای محاسبه‌ی سختی عمودی طبق رابطه (1) داریم:

$$K_z = \left[ \frac{6}{E \sin \alpha t^3} \left[ \frac{\left( \frac{w}{\tan \alpha} - d \right)^2}{2} + d \left( \frac{w}{\tan \alpha} - d \right) \left( \ln \frac{d \tan \alpha}{w} - 1 \right) + \frac{w}{\tan \alpha} d \ln \frac{w}{d \tan \alpha} \right] + \frac{((L \tan \alpha - w) \cot \alpha)^2}{E w \cos^3 \alpha t^3} \left[ \frac{2(L \tan \alpha - w) \cot \alpha}{\cos \alpha} + 3(w \cos \alpha \cot \alpha - d \cos \alpha - r \sin \alpha) \right] + \frac{3(L \tan \alpha - w) \cot \alpha (1 + \nu)}{E w \cos^2 \alpha t^3} (w \cot \alpha - d + r \cot \alpha) \right] (w \cot \alpha - d)^{-1} \quad (1)$$

که در آن  $t$  ضخامت تیرک،  $\alpha$  نصف زاویه‌ی بین دو بازو،  $w$  عرض بازوها در حالت موازی با لبه‌ی مبنا (بر لبه‌ی بازو عمود نیست) و  $L$  طول تیرک است که به طور مستقیم از لبه‌ی مبنا به سمت رأس اندازه‌گیری می‌شود و موازی بازو نیست. برای محاسبه‌ی  $r$  نیز طبق رابطه (2) داریم:

$$r = \frac{L_{II} \tan \alpha + (w \cos \alpha - d \sin \alpha)(1 - \nu) \cos \alpha}{2 - (1 - \nu) \cos^2 \alpha} \quad (2)$$

قرار می‌گیرد و نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن وابستگی زیادی به آن دارد. در فرآیند منیپولیشن نیروی ناشی از جابه‌جایی تیرک از طریق یک سوزن که در نزدیکی سر تیرک است، به نانوذره‌ی هدف منتقل شده و باعث حرکت آن می‌شود. در مدل‌سازی دینامیک منیپولیشن نانوذرات، می‌توان از روی تغییر شکل تیرک، نیروها را در راستاهای مختلف به دست آورد. در غیر این صورت بدون داشتن نیرو، مدل‌سازی دینامیکی بی‌معنی خواهد بود. تیرک‌ها در انواع مختلفی استفاده می‌شوند که ساده‌ترین آن‌ها تیرک مستطیلی است. ولی امروزه از دو نوع متداول تیرک‌ها که عبارت‌اند از تیرک خنجری<sup>1</sup> و وی-شکل<sup>2</sup> استفاده می‌شود.

برای بررسی دو نوع اصلی تیرک‌ها و همچنین مدل‌سازی دینامیک منیپولیشن و آنالیز حساسیت آن نیاز به بررسی تحقیقات انجام شده در این زمینه است. یانگ و همکارانش به آنالیز سختی دیزموزوم‌ها<sup>3</sup> با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی بر پایه‌ی نانومنیپولیشن پرداختند [1]. دیزموزوم‌ها اتصالات سلول-سلول هستند که استحکام مکانیکی برای سلول‌ها ایجاد کرده و موجب حفظ یکپارچگی بافت در پوست و قلب حیوانات می‌گردند. هرتل و همکارانش به منیپولیشن نانو لوله‌های منفرد کربنی و برهم‌کنش آن‌ها با سطوح پرداختند و نشان دادند که نوک یک میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند برای کنترل شکل و موقعیت نانو لوله‌های منفرد کربنی چند جداره‌ی پراکنده بر روی یک سطح مورد استفاده قرار گیرد [2]. آن‌ها به طور خاص توانستند نانو لوله‌ها را تحت خمش، راست شدن، انتقال، چرخش و در شرایط خاص قطع شدن، قرار دهند.

منیپولیشن نانوذرات استوانه‌ای فرآیندی پیچیده است که جهت هدفمند نمودن طراحی و اجرای آن نیاز به مدل‌سازی دقیق و شناسایی رفتار مدل و پارامترهای مؤثر در آن است. در زمینه‌ی منیپولیشن نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، بررسی مدل‌های تماسی، انتخاب مدل اصطکاکی مناسب و همچنین بررسی نوع تیرک مورد استفاده، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. از این رو کارهای آنالیز حساسیت صورت گرفته در این زمینه بیشتر بر این سه موضوع متمرکز است. کورایم و همکارانش به بررسی آنالیز حساسیت مدل‌های اصطکاکی اچ-کی<sup>4</sup> و لاگره<sup>5</sup> پرداخته و تأثیر آن‌ها بر منیپولیشن نانوذرات کروی طلا را به دست آورده‌اند [3]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از مدل‌های دقیق‌تر اصطکاکی تأثیر بسزایی در شبیه‌سازی دقیق منیپولیشن نانوذرات طلا خواهد داشت. کورایم و همکارانش همچنین به بررسی آنالیز حساسیت مدل اصطکاکی لاگره در منیپولیشن دوبعدی با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل پرداخته‌اند [4]. آن‌ها تأثیر ابعادی تیرک‌های مستطیلی در نیروی بحرانی منیپولیشن را بررسی کرده و ضخامت تیرک مستطیلی را به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر ابعادی در نیروی بحرانی منیپولیشن معرفی نموده‌اند. کورایم و ذاکری نیز به بررسی تیرک‌های وی-شکل در منیپولیشن ذرات کروی طلا پرداخته‌اند، ولی در مطالعات آن‌ها تأثیر پارامترهای ابعادی تیرک بر منیپولیشن مورد توجه قرار نگرفته است [5]. کورایم و طاهری به بررسی مدل‌های مختلف تماسی در منیپولیشن نانوذرات توسط میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته و این مدل‌سازی‌ها را در محیط‌های زیستی برای ذرات مختلف زیستی توسعه داده‌اند [6]. همچنین کورایم و طاهری به بررسی مدل‌های مختلف تماسی برای ذرات زیستی با هندسه‌های مختلف بر پایه‌ی منیپولیشن پرداخته‌اند [7]. کورایم و دائی نبی

1- Dagger  
2- V-shaped  
3- Desmosomes  
4- HK  
5- LuGre

که در معادلات فوق با توجه به شکل 2، معادلات (8-10) را داریم:

$$L_I = \frac{w}{\tan \alpha} \quad (8)$$

$$L_{II} = (L \tan \alpha - w) \cot \alpha \quad (9)$$

$$w' = w \cos \alpha \quad (10)$$

در مورد خیز تیر باید علاوه بر اضافه کردن خیز دو تیر در هر دو قسمت، چون تیر مثلثی را یکسر گیردار فرض کردیم، در هر جهت برای به دست آوردن خیز کل، شیب انتهای مستطیلی را حساب کرده و سپس در فاصله‌ی سوزن تا سر تیر مستطیلی ضرب کرده تا خیز ناشی از تغییر زاویه‌ی تکیه‌گاه تیر مثلثی که در اصل یکسر گیردار نیست، نیز حساب شده باشد و از جمع هر سه این‌ها خیز کلی مطابق معادله‌ی (11) به دست می‌آید.

$$K_Z = F_Z \left[ Z_I + Z_{II} + \theta_{II} \left( \frac{w'}{\sin \alpha} - d \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

لذا سختی عمودی به صورت رابطه (12) محاسبه خواهد شد:

$$K_Z = F_Z \left[ \frac{6L_I}{Ewt^3} \left[ \frac{(L_I - d)^2}{2} + d(L_I - d) \left( \ln \frac{d}{L_I} - 1 \right) + L_I d \ln \frac{L_I}{d} \right] + \frac{4L_{II}^3}{Ewt^3} + \frac{6(L_I - d)L_{II}}{Ewt^3} + \frac{6L_{II}^2}{Ewt^3} + \frac{12(L_I - d)L_{II}}{Ewt^3} (L_I - d) \right]^{-1} \quad (12)$$

سختی پیچشی و جانبی تیرک خنجری نیز مشابه سختی عمودی محاسبه شده که روابط نهایی آن به ترتیب در معادلات (13) و (14) ذکر شده است.

سختی پیچشی:

$$K_\theta = \left( \frac{3(1+\nu)}{Et^3 \tan \alpha} \log \frac{L_I}{d} + \frac{6L_{II}(1+\nu)}{Ewt^3} \right)^{-1} \quad (13)$$

سختی جانبی:

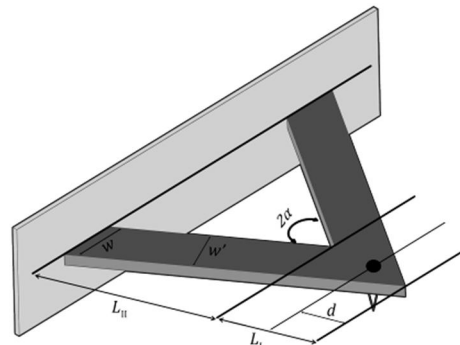
$$K_y = \left( \frac{3}{2tE \tan^3 \alpha} \left( -\ln d - \frac{d}{2d} \right) + c_1 d + c_2 + \frac{4L_{II}^3}{Ewt^3} + \frac{6(L_I - d)L_{II}}{Ewt^3} + (L_I - d) \left[ \frac{L_{II}^2}{2EI} + \frac{(L_I - d)L_{II}}{EI} \right] \right)^{-1} \quad (14)$$

$$c_1 = \frac{-3F}{2tE \tan^3 \alpha} \left( \frac{-1}{L_I} + \frac{d}{2L_I^2} \right) \quad (15)$$

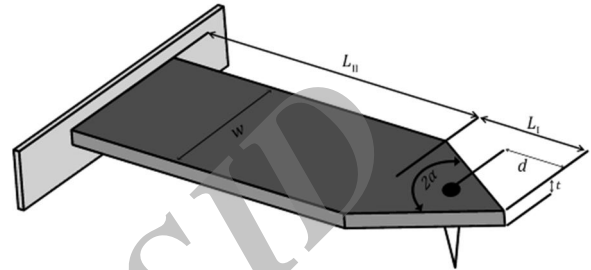
$$c_2 = \frac{-3F}{2tE \tan^3 \alpha} \left( -\ln L_I - \frac{d}{2L_I} \right) + \frac{3FL_I}{2tE \tan^3 \alpha} \left( \frac{-1}{L_I} + \frac{d}{2L_I^2} \right) \quad (16)$$

### 3- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی می‌کند و بیان می‌کند که این عدم قطعیت در خروجی چگونه به عدم قطعیت در ورودی مربوط می‌شود [10]. این روش برای شناسایی پارامترهای مؤثر و پارامترهای غیر مؤثر در خروجی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های آنالیز حساسیت در دو نوع محلی و عمومی طبقه‌بندی می‌شوند [11]. روش‌های عمومی نه تنها حساسیت مختص به فاکتورها (شاخص حساسیت اصلی) را حساب می‌کنند، بلکه قادر به محاسبه‌ی برهم‌کنش بین فاکتورها نیز می‌باشند. از بین روش‌های عمومی روش‌های بر پایه‌ی واریانس بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند که امروزه به صورت گسترده از این روش‌ها در زمینه‌های مختلفی برای بررسی مدل‌سازی‌ها استفاده می‌شود. روش‌های آنالیز حساسیت سوبل و ای-فست از جمله‌ی این روش‌ها می‌باشند که مستقل



شکل 1 تیرک وی-شکل



شکل 2 تیرک خنجری شکل

معادله‌ی 1 بیانگر سختی عمودی تیرک وی-شکل است که به پارامترهای هندسی تیرک وابسته است. سختی پیچشی نیز توسط هازل و همکارانش [5] مدل شده است. معادله‌ی (3) بیانگر سختی پیچشی است، در این حالت نیز از اصل برهم‌نهی برای به محاسبه‌ی سختی استفاده شده است، با این تفاوت که به جای وارد کردن نیرو به تیرک، گشتاور وارد می‌شود و به جای اندازه‌گیری طول، تغییر زاویه اندازه‌گیری می‌شود.

$$K_\theta = \frac{Et^3}{3(1+\nu)} \left( \frac{1}{\tan \alpha} \log \frac{w'}{d \sin \alpha} + \frac{L_{II} \cos \alpha}{w'} - \frac{3 \sin 2\alpha}{8} \right)^{-1} \quad (3)$$

برای به دست آوردن سختی جانبی نیز از مدل تحلیلی تیموشنکو استفاده می‌شود. معادله‌ی (4) مشخص‌کننده‌ی سختی جانبی تیرک وی-شکل است.

$$K_y = Et (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \left[ \ln \left( \frac{L_I}{d} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

که در آن  $\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{w}{L_I} \right)$  است.

ابعاد و پارامترهای هندسی تیرک وی-شکل در شکل 1 نشان داده شده‌اند.

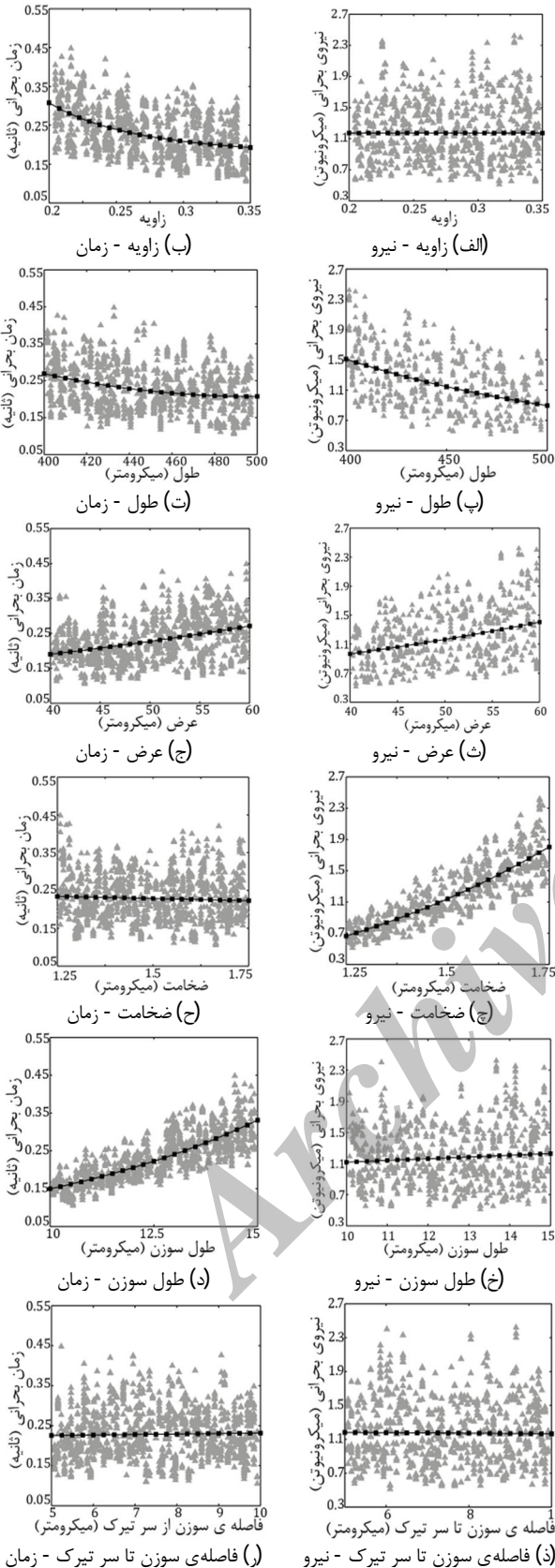
### 2-2- بررسی سختی تیرک خنجری

برای محاسبه‌ی سختی عمودی تیرک خنجری، تیر را به دو قسمت مستطیلی و مثلثی تقسیم می‌کنیم و برای به دست آوردن خیز قسمت مستطیلی از معادلات مربوط به تیر مستطیلی استفاده کرده و خیز را در راستای عمودی محاسبه می‌نماییم (معادله‌ی 5). در قسمت مثلثی هم می‌توان معادلات خیز (معادله‌ی 6) و به تبع آن شیب (معادله‌ی 7) را استخراج نمود.

$$Z_I = \frac{6F_Z L_I}{Ewt^3} \left[ \frac{(L_I - d)^2}{2} + d(L_I - d) \left( \ln \frac{d}{L_I} - 1 \right) + L_I d \ln \frac{L_I}{d} \right] \quad (5)$$

$$Z_{II} = \frac{F_Z L_{II}^2}{Ewt^3 \cos^2 \alpha} \left[ \frac{2L_{II}}{\cos \alpha} + 3(w' \cot \alpha - d \cos \alpha - r \sin \alpha) \right] \quad (6)$$

$$\theta_{II} = \frac{3F_Z L_{II} (1+\nu)}{Ewt^3 \cos \alpha} \left( \frac{w'}{\sin \alpha} - d + r \cot \alpha \right) \quad (7)$$



شکل 3 آنالیز حساسیت تیرک وی-شکل

همان‌گونه که در شکل (3-الف) و (3-ب) ملاحظه می‌گردد، با افزایش زاویه‌ی تیرک وی-شکل، نیروی بحرانی مینیولیشن تغییرات چندانی نمی‌کند و بیانگر تأثیر بسیار کم این پارامتر بر نیروی بحرانی مینیولیشن است. درحالی‌که

از هرگونه فرض (خطی و یکنواخت) بین ورودی‌ها و خروجی‌ها (ها) است. روش ای-فست توسط کوکیر و همکارانش [12] ارائه شده و سالتلی و همکارانش [13]. این روش را بهبود داده‌اند. این روش برخلاف روش سوپل که برای به دست آوردن واریانس کلی و واریانس‌های جزئی از انتگرال‌های چندبعدی استفاده می‌کند، با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل کرده و موجب ساده‌سازی روند محاسبه‌ی شاخص‌های حساسیت می‌گردد.

روش ای-فست فضای  $n$  بعدی فاکتورهای ورودی  $(K^n)$  را با استفاده از منحنی جست‌وجوی تعریف‌شده با مجموعه‌ای از معادلات پارامتریک، کاوش می‌کند. طبق رابطه (17) داریم:

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) \quad (17)$$

که  $\omega_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) فرکانس مربوط به فاکتور  $x_i$ ،  $s$  متغیری است که در بازه  $-\pi$  تا  $\pi$  تغییر می‌کند و  $\varphi_i$  نقطه‌ی شروع منحنی را مشخص می‌کند. واریانس خروجی مدل با استفاده از آنالیز فوریه تقریب زده می‌شود. طبق رابطه (18) داریم:

$$V(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2) \quad (18)$$

که  $f(s) = f(G_1(\sin(\omega_1 s)), G_2(\sin(\omega_2 s)), \dots, G_n(\sin(\omega_n s)))$  تابع انتقال،  $A_j$  و  $B_j$  ضرایب فوریه می‌باشند.

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

با محاسبه‌ی ضرایب فوریه برای فرکانس پایه  $\omega_i$  و هارمونیک‌های بالاتر آن می‌توان واریانس جزئی مرتبه‌ی اول ورودی  $x_i$  را به دست آورد. طبق رابطه (19) داریم:

$$V_i = \sum_{p \in \mathbb{Z}^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (19)$$

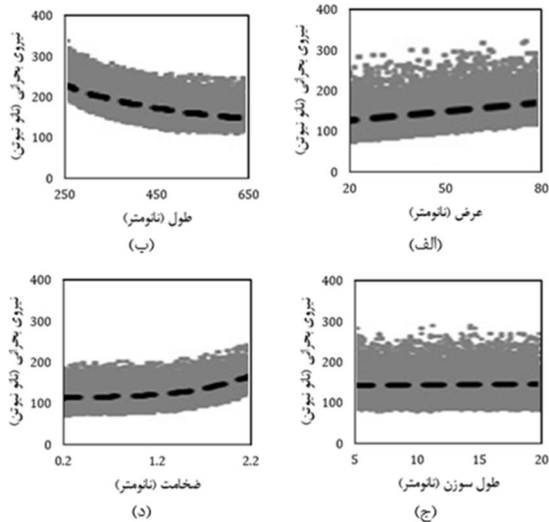
برای محاسبه‌ی شاخص حساسیت اصلی از نسبت واریانس جزئی مرتبه‌ی اول به واریانس کلی استفاده می‌کنیم. شاخص حساسیت کلی نیز از معادله‌ی (20) به دست می‌آید:

$$ST_i = 1 - \frac{V_{-i}}{V} \quad (20)$$

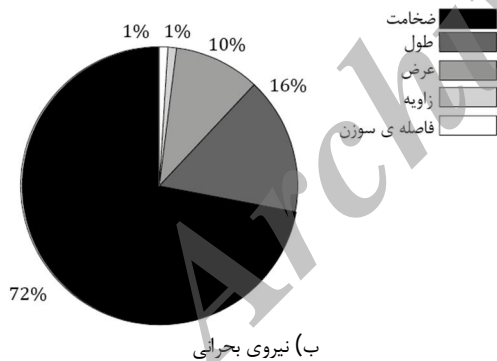
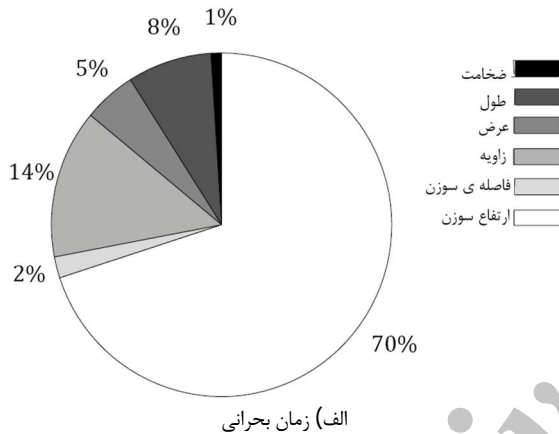
واریانس  $V_{-i}$  از تغییر همه‌ی پارامترها، به جز تغییر پارامتر  $x_i$  به دست می‌آید.

### 3-1- آنالیز حساسیت تیرک وی-شکل

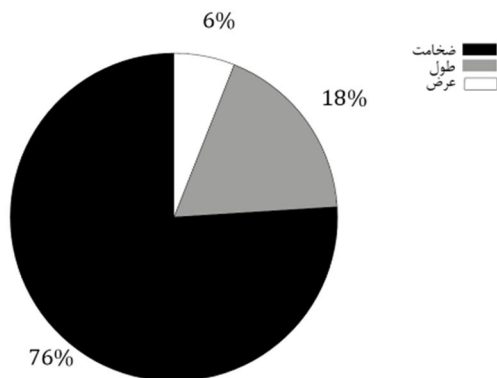
در این بخش به آنالیز حساسیت تأثیر پارامترهای مختلف بر زمان و نیروی بحرانی برای تیرک وی-شکل پرداخته‌شده و نتایج حاصل، با نتایج موجود برای تیرک‌های مستطیلی [4] مقایسه شده و صحت نتایج بررسی شده است. نمودارها در این قسمت با استفاده از معادلات سختی به دست آورده شده در این مقاله و معادلات دینامیکی موجود در مراجع و الگوریتم روش آنالیز حساسیت ای-فست به دست آورده شده‌اند. این پارامترها عبارت‌اند از طول تیرک ( $L$ )، عرض تیرک ( $V$ )، ضخامت تیرک ( $t$ )، ارتفاع سوزن ( $h$ )، زاویه‌ی تیرک ( $\alpha$ ) و فاصله‌ی سوزن از انتهای تیرک ( $d$ ). در نمودارهای شکل 3 تأثیر هر کدام از این پارامترها را بر زمان و نیروی بحرانی می‌توان مشاهده کرد.



شکل 4 تأثیر پارامترهای ابعادی تیرک مستطیلی بر نیروی بحرانی منیپولیشن [4]



شکل 5 تأثیر پارامترهای تیرک وی-شکل در زمان و نیروی بحرانی



شکل 6 تأثیر پارامترهای ابعادی تیرک مستطیلی بر نیروی بحرانی منیپولیشن [4]

افزایش زاویه‌ی تیرک باعث کاهش نسبتاً زیاد زمان بحرانی منیپولیشن می‌شود و بیانگر تأثیر بالای این پارامتر بر زمان بحرانی منیپولیشن است. در شکل (3-پ) و (3-ت) ملاحظه می‌گردد که با افزایش طول تیرک وی-شکل، نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن به طور خطی کاهش می‌یابند. در شکل (3-ث) و (3-ج) نشان داده شده است که با افزایش عرض تیرک وی-شکل، نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن به طور خطی افزایش می‌یابند. در شکل (3-چ) و (3-ح) ملاحظه می‌گردد، با افزایش ضخامت تیرک وی-شکل، نیروی بحرانی منیپولیشن افزایش زیادی می‌یابد و بیانگر تأثیر بسیار زیاد این پارامتر بر نیروی بحرانی منیپولیشن است. همچنین افزایش ضخامت تیرک منجر به کاهش کم و نسبتاً خطی زمان بحرانی منیپولیشن می‌شود. همان‌گونه که در شکل (3-خ) و (3-د) می‌توان مشاهده کرد، با افزایش ارتفاع سوزن تیرک وی-شکل، نیروی بحرانی منیپولیشن تغییر چندانی نمی‌کند و بیانگر تأثیر بسیار کم این پارامتر بر نیروی بحرانی منیپولیشن است. در شکل (3-ذ) و (3-ر) نشان داده شده است که با افزایش فاصله‌ی سوزن از انتهای تیرک وی-شکل، نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن کاهش بسیار کمی می‌یابند و بیانگر تأثیر بسیار کم این پارامتر بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن است. در تمام موارد شکل 3، همان‌طور که در شکل 4 قابل مشاهده است، نتایج به‌دست آمده با نتایج موجود برای تیرک مستطیلی مطابقت می‌کند.

### 3-2- آنالیز حساسیت ابعادی تیرک وی-شکل با استفاده از روش ای-فست

شکل (5-الف) و (5-ب) به ترتیب تأثیر پارامترهای مختلف تیرک وی-شکل شامل طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، زاویه‌ی تیرک و فاصله‌ی سوزن از انتهای تیرک بر زمان و نیروی بحرانی منیپولیشن با استفاده از روش ای-فست را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (5-الف) مشخص است مهم‌ترین پارامتری که زمان بحرانی مربوط به تیرک وی-شکل را مورد تأثیر قرار می‌دهد، ارتفاع سوزن است که به میزان 70 درصد بر زمان بحرانی تأثیر دارد و بعدازآن به ترتیب زاویه با 14 درصد، طول تیرک با 8 درصد و عرض تیرک با 5 درصد تأثیر، پارامترهای بعدی حساس هستند و دو پارامتر دیگر تقریباً بر زمان بحرانی بی‌تأثیر هستند.

در شکل (5-ب) نمودار آنالیز حساسیت ابعادی برای نیروی بحرانی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است در این حالت ضخامت تیرک با 72 درصد تأثیر، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار است و بعدازآن طول تیرک با 16 درصد و عرض تیرک با 10 درصد تأثیر، پارامترهای بعدی اثرگذار می‌باشند. از تأثیر پارامترهای دیگر می‌توان چشم‌پوشی کرد. با مقایسه‌ی شکل (5-ب) با شکل 6 می‌توان مشاهده کرد که در تیرک وی-شکل نیز همانند تیرک مستطیلی، ضخامت تأثیرگذارترین پارامتر بر نیروی بحرانی است.

### 3-3- آنالیز حساسیت تیرک خنجری

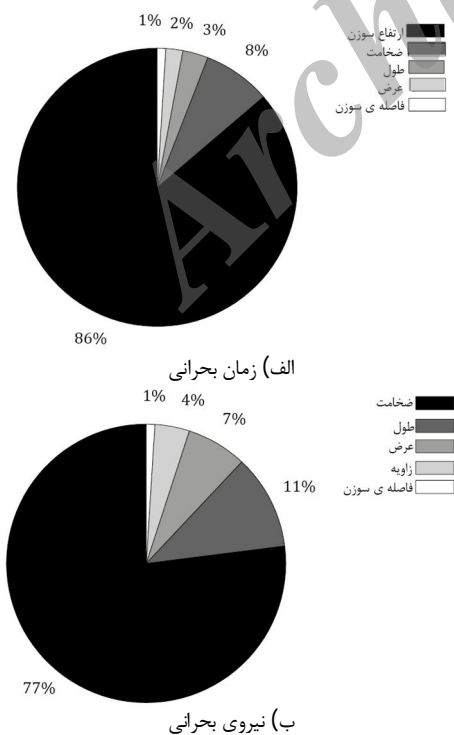
در این بخش همانند قسمت قبل بعد از برشمردن پارامترهای هندسی مهم در تیرک خنجری، به آنالیز حساسیت این پارامترها پرداخته شده و نتایج حاصل با نتایج موجود برای تیرک‌های مستطیلی [4] مقایسه شده و صحت نتایج بررسی شده است. این پارامترها عبارت‌اند از طول تیرک ( $L$ )، عرض تیرک ( $W$ )، ضخامت تیرک ( $t$ )، ارتفاع سوزن ( $h$ )، زاویه‌ی تیرک ( $\alpha$ ) و فاصله‌ی سوزن از انتهای تیرک ( $d$ ). در نمودارهای شکل 7 تأثیر هرکدام از این پارامترها را بر زمان و نیروی بحرانی می‌توان مشاهده کرد.

است. در شکل (7-پ) و (7-ت) نشان داده شده است که با افزایش طول تیرک خنجری شکل، نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن به طور خطی کاهش می‌یابد که این نتایج با نتایج موجود برای تیرک‌های وی-شکل مطابقت دارد. همان‌گونه که در شکل (7-ث) و (7-ج) ملاحظه می‌گردد، با افزایش عرض تیرک خنجری شکل، نیروی بحرانی منیپولیشن به طور خطی افزایش می‌یابد، که این نتایج با نتایج موجود برای تیرک‌های وی-شکل مطابقت دارد و زمان بحرانی تقریباً ثابت است. در شکل (7-ح) و (7-د) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ضخامت تیرک خنجری شکل، نیروی بحرانی منیپولیشن افزایش زیادی می‌یابد و بیانگر تأثیر بسیار زیاد این پارامتر بر نیروی بحرانی منیپولیشن است، که این نتایج موجود برای تیرک‌های وی-شکل مطابقت می‌کند. همچنین افزایش ضخامت تیرک منجر به تغییر محسوسی در زمان بحرانی منیپولیشن نخواهد شد. همان‌گونه که در شکل (7-خ) و (7-د) ملاحظه می‌گردد، با افزایش ارتفاع سوزن تیرک خنجری شکل، نیروی بحرانی منیپولیشن تغییر چندانی نمی‌کند و بیانگر تأثیر بسیار کم این پارامتر بر نیروی بحرانی منیپولیشن است، که این نتایج نیز با نتایج موجود برای تیرک‌های وی-شکل مطابقت دارد. همان‌گونه که در شکل (7-ذ) و (7-ز) ملاحظه می‌گردد، با افزایش فاصله‌ی سوزن از انتهای تیرک خنجری شکل، نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن تغییر بسیار کمی می‌کند و بیانگر تأثیر بسیار کم این پارامتر بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن است. از مقایسه‌ی نتایج شکل 7 با شکل 4 که نتایج موجود برای تیرک مستطیلی را نشان می‌دهد، می‌توان به صحت نتایج فوق پی برد.

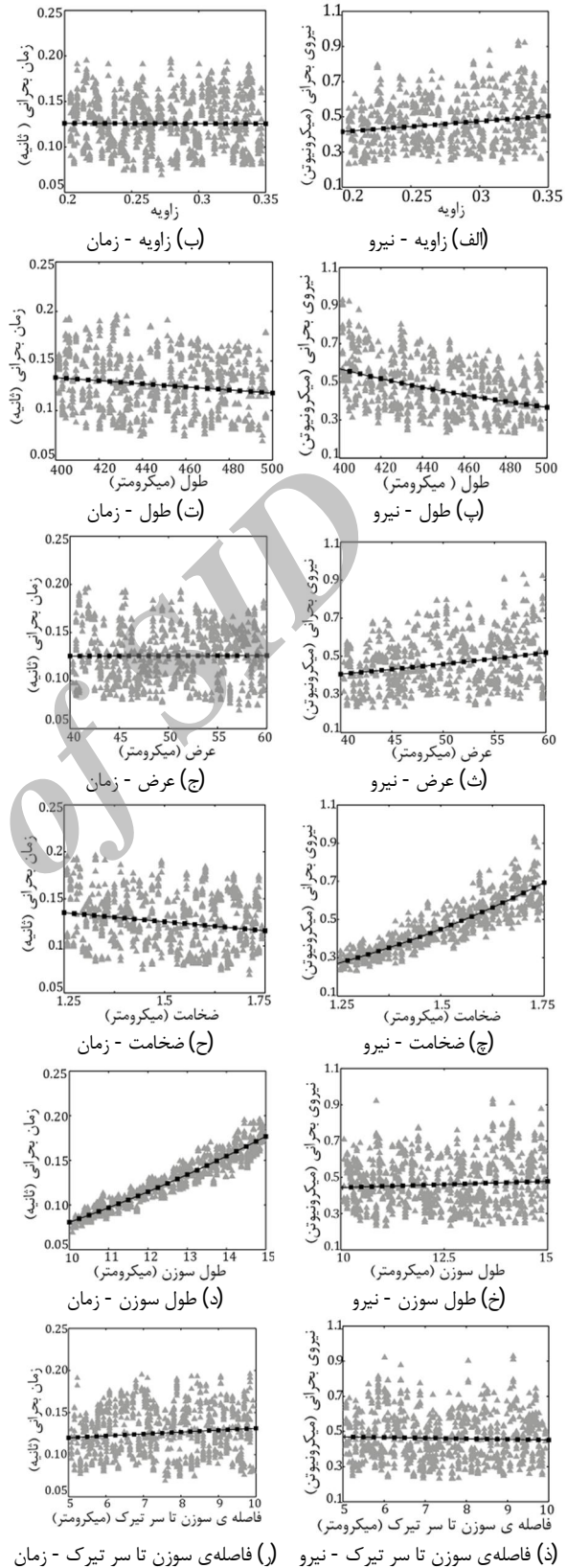
### 3-4- آنالیز حساسیت ابعادی تیرک خنجری شکل با استفاده از

#### روش ای-فست

شکل (8-الف) و (8-ب) به ترتیب تأثیر پارامترهای مختلف تیرک خنجری شکل شامل طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، زاویه‌ی تیرک و فاصله‌ی سوزن از انتهای تیرک بر زمان و نیروی بحرانی منیپولیشن با استفاده از روش ای-فست را نشان می‌دهد.



شکل 8 تأثیر پارامترهای تیرک خنجری شکل در زمان بحرانی و نیروی بحرانی



شکل 7 آنالیز حساسیت تیرک خنجری

همان‌گونه که در شکل (7-الف) و (7-ب) ملاحظه می‌گردد، با افزایش زاویه‌ی تیرک خنجری شکل، نیروی بحرانی منیپولیشن به طور خطی افزایش می‌یابد، درحالی‌که افزایش زاویه‌ی تیرک منجر به کاهش نسبتاً کم زمان بحرانی منیپولیشن می‌شود و بیانگر تأثیر کم این پارامتر بر زمان بحرانی منیپولیشن

طول قسمت مستطیلی تیرک	$L_{II}$
پارامتر متغیر	$s$
شاخص حساسیت کلی	$ST_i$
ضخامت تیرک	$t$
واریانس	$V$
عرض تیرک	$w$
فاکتورها	$x_i$
<b>علائم یونانی</b>	
زاویه‌ی سر تیرک	$\alpha$
ضریب پواسون	$\nu$
مشخص‌کننده‌ی نقطه‌ی شروع منحنی	$\varphi_i$
فرکانس‌های مربوط به فاکتور	$\omega_i$
<b>زیر نویس‌ها</b>	
خنجری	Dagger
دیزموزوم	Desmosomes
اچ-کی	HK
لاگره	LuGre
وی-شکل	V-shaped

**6- مراجع**

- [1] R. Yang, N. Xi, C. Kar, M. Fung, K. Wai, and C. Lai., Analysis of keratinocytes stiffness after desmosome disruption using atomic force microscopy based nanomanipulation, *In Nanotechnology, 9th IEEE Conference on*, pp. 640-643, 2009.
- [2] T. Hertel, R. Martel, and P. Avouris, Manipulation of individual carbon nanotubes and their interaction with surfaces, *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 102, pp. 910-915, 1998.
- [3] M. H. Korayem, M. Taheri, and M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models, *Applied Surface Science*, vol. 258, pp. 6713-6722, 2012.
- [4] M. H. Korayem, M. Taheri, and Z. Rastegar, Sobol method application in sensitivity analysis of LuGre friction model during 2D manipulation, *Accepted in Scientia Iranica*.
- [5] M. H. Korayem and M. Zakeri, The effect of off-end Tip distance on the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFMs, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, pp. 579-589, 2010.
- [6] M. H. Korayem, M. Taheri, modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFM, *Journal of nano particle research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1- 13.
- [7] M. H. Korayem, H. Khaksar, M. Taheri, Modeling of contact theories for the manipulation of biological micro/nanoparticles in the form of circular crowned rollers based on the atomic force microscope, *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, No. 3, pp. 1- 13, 2013.
- [8] K. Daeinabi, M. H. Korayem, and S. A. Yarijani, Force transducer modelling Of rectangular, V-Shaped, And dagger cantilever probes based On atomic force microscopy, *Instrumentation Science & Technology*, vol. 40, pp. 338-354, 2012.
- [9] J. E. Sader and C. P. Green, In-plane deformation of cantilever plates with applications to lateral force microscopy, *Review of scientific instruments*, vol. 75, pp. 878-883, 2004.
- [10] A. Saltelli and I. M. sobol, about the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output, *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 50, pp. 225-239, 1995.
- [11] A. Saltelli, K. Chan, and E. Scott, sensitivity analysis Wiley series in probability and statistics, *Willey*, New York, 2000.
- [12] R. Cukier, H. Levine, and K. Shuler, Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems, *Journal of computational physics*, vol. 26, pp. 1-42, 1978.
- [13] A. Saltelli, S. Tarantola, and K.-S. Chan, A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, *Technometrics*, vol. 41, pp. 39-56, 1999.

همان‌طور که در شکل (8-الف) مشخص است همانند تیرک وی-شکل در این تیرک نیز ارتفاع سوزن با 88 درصد تأثیر، بیشترین اثر را در زمان بحرانی دارد و بعدازآن ضخامت تیرک با 6 درصد و طول تیرک با 3 درصد مؤثر هستند و از تأثیر پارامترهای دیگر می‌توان صرف‌نظر کرد.

با مقایسه‌ی شکل‌های (8-ب) و 6 مشخص می‌گردد که ضخامت تیرک در تیرک‌های خنجری شکل نیز مانند تیرک‌های مستطیلی شکل با 77 درصد تأثیر، پارامتر اصلی تأثیرگذار در نیروی بحرانی منیپولیشن است و بعدازآن طول تیرک با 11 درصد، عرض تیرک با 7 درصد و زاویه‌ی تیرک با 4 درصد تأثیر، پارامترهای مؤثر بعدی هستند. درحالی‌که از تأثیر سایر پارامترها بر نیروی بحرانی نیز می‌توان صرف‌نظر کرد.

**4- بحث و جمع‌بندی**

نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن دو پارامتر مهم و اثرگذار بر منیپولیشن می‌باشند. مقدار نیرو از دو جنبه حائز اهمیت است، ابتدا این‌که مقدار آن از حدی فراتر نرود که به نانوذره آسیب برساند (به خصوص در مواقعی که نانوذره‌ی هدف زیستی باشد) و دیگری این‌که، این مقدار نیرو تا حدی مشخص‌کننده‌ی ویژگی‌های تماسی ذره است. در این مقاله با بررسی دو نوع متداول از تیرک‌ها و محاسبه‌ی نیروی بحرانی منیپولیشن، این نتیجه به دست آمد که تیرک خنجری با توجه به کمتر بودن مقدار نیروی بحرانی مربوط به آن برای جابه‌جایی ذرات حساس زیستی مناسب‌تر است.

هم‌چنین بعد از بررسی پارامترهای هندسی حساس تیرک‌ها بر نیروی بحرانی منیپولیشن، می‌توان به این نتیجه رسید که در تیرک وی-شکل ضخامت بیشترین تأثیر را بر نیروی بحرانی داشته و بعدازآن به ترتیب طول و عرض تیرک مؤثر می‌باشند و از تأثیر پارامترهای دیگر می‌توان صرف‌نظر کرد. در تیرک خنجری نیز ضخامت بیشترین تأثیر را در مقدار نیروی بحرانی دارد و بعدازآن به ترتیب طول، عرض و زاویه‌ی تیرک مؤثر هستند و از تأثیر پارامترهای دیگر می‌توان چشم‌پوشی کرد.

در مورد پارامترهای حساس هندسی تیرک بر زمان بحرانی منیپولیشن نیز می‌توان نتیجه گرفت که در تیرک وی-شکل طول سوزن بیشترین تأثیر را بر زمان بحرانی دارد و بعدازآن زاویه، طول و عرض تیرک مؤثر هستند و از تأثیر پارامترهای دیگر می‌توان چشم‌پوشی کرد. در تیرک خنجری نیز طول سوزن بیشترین تأثیر را در زمان بحرانی منیپولیشن دارد و بعدازآن ضخامت و طول تیرک مؤثر هستند و از تأثیر پارامترهای دیگر می‌توان چشم‌پوشی کرد.

**5- فهرست علائم**

$A_j$	ضرایب فوریه
$B_j$	ضرایب فوریه
$d$	فاصله‌ی سوزن از سر تیرک
$E$	مدول الاستیسیته
$G$	توابع انتقال
$h$	طول سوزن
$K_y$	سختی جانبی
$K_z$	سختی عمودی
$K_\theta$	سختی پیچشی
$L$	طول تیرک
$L_I$	طول قسمت مثلثی تیرک