مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، آذر 1399، دوره 7، شماره 9، ص.ص. 1- 9

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی پارامترهای محیطی و ابعادی بر روی نیرو و زمان بحرانی فرآیند منیپولیشن نانوذرات با استفاده از تئوری مکانیک تماس دی‌اِم‌تی

سیدحسن بطحائی[1]، معین طاهری[2*]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

* اراک، صندوق پستی 3815688349، m-taheri@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۹اسفند 1398

داوری اولیه: ۱۴ فروردین 1399

پذیرش: ۲۷ فروردین 1399

کلیدواژگان:

فرآیند نانومنیپولیشن

میکروسکوپ نیروی اتمی

مدل مکانیک تماس

آنالیز حساسیت

روش سوبل

چکیده

منیپولیشن نانو ذرات یک فرآیند از شاخه نانوتکنولوژی است که برمبنای میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌شود. امروزه به‌دلیل اهمیت بسیار بالای رونق صنعت و ساخت‌وتولید تجهیزات، ماشین آلات و ابزار در ریز مقیاس، منیپولیشن نانو/میکرو ذرات بیش از پیش مورد توجه و استفاده‌ی صنعتگران است. در فاز اول این فرآیند نیرو و زمان بحرانی، پایه‌ای ترین عوامل خروجی محسوب می‌شوند. دو دسته از فاکتورها شامل محیطی و ابعادی در تعیین میزان آن‌ها سرنوشت‌ساز می‌باشند. در این مقاله با استفاده از مدل مکانیک تماس دی‌اِم‌تی به‌همراه روش آنالیز حساسیت سوبل به بررسی میزان اثرگذاری کمی و کیفی فاکتورهای ورودی محیطی و ابعادی شامل هفت پارامتر ورودی شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن، مدول الاستیسیته سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، ضخامت تیرک و عرض تیرک بر روی چهار خروجی نیروی بحرانی بین سوزن و ذره، زمان بحرانی بین سوزن و ذره، نیروی بحرانی بین ذره و صفحه مبنا و زمان بحرانی بین ذره و صفحه مبنا پرداخته شده است. نوع رابطه‌ی کیفی به‌صورت مستقیم یا معکوس بودن هریک از پارامترها و میزان واریانس هر یک بر روی عوامل خروجی به‌دست آمده است. در اثرگذاری کمی بیشترین تأثیرگذاری هر پارامتر به تفکیک محاسبه شده است. ضخامت تیرک اثرگذارترین پارامتر ورودی بر روی نیروی بحرانی ذره-سوزن و ذره-صفحه‌مبنا با میزان 75% و 66% بوده است. برای زمان بحرانی ذره-سوزن شعاع سوزن با 46% اثرگذارترین پارامتر ورودی بوده است، اما ضخامت تیرک نیز بیش‌ترین تأثیر را بر روی زمان بحرانی ذره-صفحه‌مبنا با مقدار81% داشته است. ضخامت تیرک اثرگذارترین پارامتر ورودی بر روی عوامل خروجی بوده است.

An examination of environmental and dimensional parameters on force and critical time of the manipulation process using the mechanical theory of DMT contact

Seyed Hasan Bathaee[1*], Moein Taheri[2]

1. Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran
* P.O.B. 3815688349, Arak, Iran, m-taheri@araku.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 9 March 2020
First Decision: 2 April 2020
Accepted: 15 April 2020

Keywords:
NanoManipulation Process
Atomic Force Microscope
Contact Mechanics Model
Sensitivity Analysis
Sobol Method

Abstract

The manipulation of Nanoparticles as a process is a branch of Nanotechnology which is done based on the atomic force microscope. Today, due to the great significance of industrial advances, industrialists use and pay much more attention to the manufacture and production of the equipment, machines, tools in small-scale, and the manipulation of Nano/micro particles. In the first phase of this process, force and crucial time are the two basic external factors. Two types of factors, including environmental and dimensional ones, are fatal in determining their amounts. The present study, with the use of the mechanical model of DMT contact accompanied by Sobol Sensitivity Analysis, investigates the influential degree of both quantitative and qualitative importing environmental and dimensional factors, containing seven importing parameters of the needle ray, Poisson's ration of the needle, Elastic Modulus of the needle, height of the needle, length of the mast, density of the mast, and the width of the mast on four outputs of the crucial force between the needle and the particle, the crucial time between the needle and the particle, crucial force between the particle and the baseplate, and the crucial time between the particle and the baseplate. The type of qualitative relation is determined directly or reversely for each parameter along with the degree of variation for every external factor. In the quantitative influence, the highest degree of influence relating to each parameter is calculated individually. The density of the mast has been the most influential importing parameter on the crucial force of the needle-particle and baseplate-particle measured as 75% and 66%. In the case of the crucial time for the needle-particle, the needle ray of 46% has been the most influential importing parameter; nevertheless, the density of the mast has also been of the highest influence during the crucial time of the baseplate-particle measured as 81%.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. H. Bathaee, M. Taheri, An examination of environmental and dimensional parameters on force and critical time of the manipulation process using the mechanical theory of DMT contact, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 9, pp. 1- 9, 2020 (in Persian)

1- مقدمه

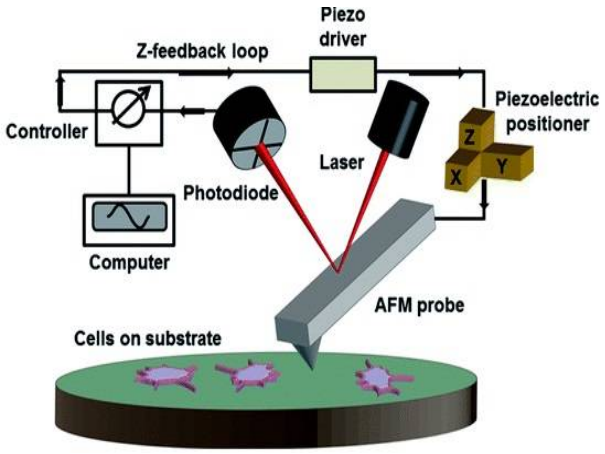
تحقیق و توسعه فناوری نانو علم و مهندسی را وارد دنیایی به‌نام عرصه نانو مواد می‌کند. خواص فیزیکی و شیمیایی نانو مواد با توسعه نانوتکنولوژی رشد بسیار زیادی داشته است. ابزار قدرتمند تصویربرداری نانوتکنولوژی میکروسکوپ نیروی اتمی[1] است. خواص نانو مواد مانند توپوگرافی[2]، کشش، چسبندگی، اصطکاک، خواص‌الکتریکی و مغناطیسی از توانایی‌های میکروسکوپ نیروی اتمی در عرصه فناوری نانو است. اطلاعات جامع از ساختار مواد و انواع مختلف تکنیک‌های تصویربرداری از کاربردهای گسترده میکروسکوپ نیروی اتمی است که در اختیار مهندسان و دانشمندان حوزه نانو مواد قرار گرفته است[1]. میکروسکوپ نیروی اتمی برای ساخت نمونه‌های نانوساختار متشکل از نانوذرات کلوئیدی به‌کار می‌رود. در فرآیند منیپولیشن[3] دقیق میکروسکوپ نیروی اتمی تنها به‌عنوان یک ابزار برای جابه‌جایی نانوذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد و امکان تصویربرداری برای آن میسر نیست. در یک پروتکل جدید که توسط کیم و همکارانش ارائه شده است، امکان تصویر هنگام جابه‌جایی ایجاد شده است[2]. چسبندگی بین یک میکرو یا نانو ذره دغدغه اصلی در زمینه‌ی کنترل در مقیاس نانو است. ایده‌آل‌ترین حالت ممکن کاهش یا از بین بردن این نیروی چسبندگی می‌باشد. نیروی چسبندگی به‌طور مستقیم با ساختار شیمیایی سطح جسم سروکار دارد [3]. توانایی ساخت ساختارهای نانومواد یک گام اساسی در جهت پیشبرد اهداف نانوفناوری است. منیپولیشن دقیق همراه با عملیات حرارتی برای نانوذرات پلیمری بر پایه‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گفته است. نتایج آزمایش‌ها یک نانو ساختار پایدار سه‌بعدی را نشان می‌دهد[4]. برای کنترل خواص سطوح و نیروی اصطکاک نانو مواد در فضای دوبعدی از طرح‌های روانکاری پیشرفته استفاده شده است، که باعث کاهش اصطکاک و افزایش بازدهی انرژی، مواد و سازگاری دستگاه شده است[5]. در دهه گذشته، میکروسکوپ نیروی اتمی تبدیل به یک فناوری قدرتمند شده است. به علت کم بودن هزینه، سادگی در عمل و سطح اتمی منحصر به فرد برای ساخت یک نانوساختار است. قابلیت دستکاری اگر چه طیف گسترده‌ای از ساختار نانو مواد را توسط میکروسکوپ نیروی اتمی در اختیار می‌گذارد، اما هنوز سه چالش مهم در بهبود بیشتر آن باقی مانده است[6]. ارتقا وابستگی سلول‌های عصبی و سیگنال‌های انتقال اطلاعات با استفاده از پوشش‌های میکروسکوپی و نانوساختار در کارکردهای زیست‌پزشکی از دستاوردهای نانوتکنولوژی در دنیای پزشکی است[7]. مکبری و همکارانش به نانومنیپولیشن خودکار با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند[8]. در تحقیقات جاویر و همکارانش نانومنیپولیشن توسط یک میکروسکوپ نیروی اتمی با ترکیب منیپولیشن نوری توسط یک میکرواشعه‌ی لیزر به‌عنوان یک راه‌حل عملی ارائه گردیده است[9]. ارسواگا و همکارانش به بررسی مجموعه دی‌اِن‌اِی[4] ویروسی با استفاده از مدل‌های مکانیک مولکولی پرداخته‌اند[10]. سیتی و همکارانش بازخورد لمسی تله اپراتوری از سطوح در مقیاس نانو را مدل‌سازی و آزمایش کرده‌اند. در تحقیقات آن‌ها، سیستم لمسی تله اپراتوری ابعاد نانو پیشنهاد شده است و مدل‌های مکانیک تماسی پیوسته در مقیاس نانو معرفی شده‌اند[11]. شن و همکاران اثر رطوبت محیط بر قدرت نیروی چسبندگی تک‌سلولی مخمر در داخل محیط زیستی را بررسی نموده‌اند. در تحقیقات آن‌ها یک روش جدید برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی تک‌سلولی مخمر بر اساس سیستم منیپولیشن نانورباتیک در داخل محیط میکروسکوپ الکترونی اسکنی[5] ارائه شده است[12]. استارک و همکاران به نانومنیپولیشن ترکیبی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و اشعه‌ی لیزر فرابنفش جهت تشریح کروموزومی پرداخته‌اند[13]. طاهری و همکارانش به بررسی فاز دوم منیپولیشن با استفاده از مدل‌های اصطکاکی کولمب[6]، اِچ‌کا[7] و لاگره[8] پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که بیشترین مقدار جابه‌جایی و سرعت بر اساس مدل اصطکاکی لاگره و کمترین میزان بر اساس مدل اصطکاکی کولمب است[14]. سرایی و کورایم به مدل‌سازی دینامیک و شبیه‌سازی منیپولیشن سه‌بعدی روی سطوح زبر بر اساس مدل‌های چسبنده‌ی پیشرفته پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شعاع نفوذ، نیروی بحرانی مورد نیاز برای منیپولیشن نانوذرات افزایش می‌یابد[15]. تجزیه و تحلیل حساسیت یک ابزار مهم است، که معمولا برای تأیید دستیابی به مجموعه‌ی بهینه استفاده می‌شود. پارامترهای به‌دست آمده توسط رگرسیون تجزیه و تحلیل می‌شوند. به حداقل رساندن میزان تابع هدف بر اساس مجموع مربع خطاهای پیش‌بینی شده و بررسی‌های تجربی یکی از راه‌حل‌های بهینه کردن آنالیز حساسیت است[16]. آنالیز حساسیت به مطالعه‌ی چگونگی عدم قطعیت در خروجی مدل (عددی و غیر عددی) ناشی از منابع مختلفی از عدم قطعیت در عامل‌های ورودی مدل گفته می‌شود[17]. طاهری با استفاده از مدل دقیق اصطکاکی لاگره به

[1] AFM
[2] Topography
[3] Manipulation

[4] DNA
[5] SEM
[6] Coulomb
[7] HK
[8] LuGre

بررسی نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن پرداخته است. نتایج به‌دست آماده نشان می‌دهد میزان نیرو و زمان بحرانی کاهش یافته است، زیرا به این دلیل که مدل لاگره به سطح واقعی تماس پرداخته است. در حالی‌که سایر مدل های اصطکاکی سطح ظاهری را دربر می‌گیرند[18].

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی دو بخشی شامل مدل مکانیک تماس و روش آنالیز حساسیت آماری به تجزیه و تحلیل اثر کمی و کیفی فاکتورهای محیطی شامل هفت پارامتر ورودی شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن، مدول الاستیسیته سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، ضخامت تیرک و عرض تیرک بر روی چهار خروجی نیروی بحرانی بین سوزن و ذره، زمان بحرانی بین سوزن و ذره، نیروی بحرانی بین ذره و صفحه مبنا و زمان بحرانی بین ذره و صفحه مبنا شده است. شبیه‌سازی شامل نمودارهای گرافیکی به‌منظور تحلیل کیفی برمبنای واریانس و برازش تابع چندجمله‌ای از توان دو است. همچنین بخش دیگر آن نمودارهای دایره‌ای است که به‌جهت تحلیل میزان دقیق کمی هر یک از فاکتورهای ورودی بر روی نیرو و زمان بحرانی آورده شده است. فرآیند منیپولیشن که در حوزه‌ی نانو کاربردهای فراوانی دارد، برای مثال رساندن دارو از اهمیت فراوانی برخوردار است، از طرفی این فرآیند بسیار پرهزینه بوده است، همچنین میزان دقیق نیرو و زمان بحرانی در این فرآیند برای جلوگیری از آسیب رساندن به سلول‌های انسان بسیار حائز اهمیت می‌باشد که در این پژوهش میزان دقیق کمی و کیفی پارامترهای مؤثر فرآیند مشخص شده است و با استفاده از آنها می‌توان میزان دقیق این عامل‌های خروجی را کنترل کرد. در شکل 1 فرآیند منیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داده شده است.



شکل 1 فرآیند نانومنیپولیشن بر مبنای میکروسکوپ نیروی اتمی

Fig. 1 Atomic force microscopy Nanomanipulation process

2- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا به تشریح مدل مکانیک تماس دی‌اِم‌تی پرداخته شده است و پس از آن روش آنالیز حساسیت سوبل و مدل‌های آماری به‌طور کلی شرح داده شده است.

2-1- مدل‌سازی مکانیک تماس

مدل دی‌اِم‌تی: یکی از شاخه‌های اصلی در تحقیقات مقیاس نانومتری، نانو مکانیک تماس است. مکانیک تماس علمی است که تماس و برخورد اجسام گوناگون با یکدیگر را در حالت های مختلف بررسی می‌کند. پدیده تماس در تحلیل چسبندگی، عمق فرورفتگی و تغییر شکل سطح نمونه نقش کلیدی دارد، به همین منظور مدل‌های نانو مکانیک تماس مختلفی جهت مدل‌سازی نیروی‌چسبندگی، نیروی‌تماسی، شعاع‌تماسی، عمق فرورفتگی و تغییر شکل سطح نمونه به وجود آمده است که هرکدام از آن‌ها دارای یک‌سری فرضیات و محدودیت‌هایی می‌باشند. مکانیک تماس در حوزه منیپولیشن برپایه میکروسکوپ نیروی اتمی شامل بررسی تماس سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی با نمونه و نمونه با سطح مبنا می شود. عمق نفوذ، شعاع تماس، سرعت عمق نفوذ، مدت زمان دوام تماس، پروفیل فشار و پروفیل نیرو در حین تماس از مهم‌ترین پارامترهایی است که در مکانیک تماس بررسی می‌شوند. که در این بین عمق نفوذ و شعاع تماس اصلی‌ترین نقش را جهت کاربرد مکانیک تماس در منیپولیشن ایفا می‌کنند. با توجه به هندسه نمونه، تئوری‌های گوناگونی درزمینه مکانیک تماس ارائه گردیده است. تئوری های مختلف تماسی در حوزه‌ی مکانیک تماس وجود دارد اما برای فرآیند نانومنیپولیشن باید به چند ویژگی مهم توجه داشت:

در نظر گرفتن نیروهای چسبندگی در ریز مقیاس با بهره‌گیری از نیرو چسبندگی، شعاع چسبندگی و عمق نفوذ که از اساسی‌ترین ویژگی‌های یک مدل تماسی برای این فرآیند می‌باشد، زیرا این عوامل تأثیر مهمی در تعیین میزان نیرو و زمان بحرانی فرآیند منیپولیشن می‌باشند. تئوری دی‌اِم‌تی هر سه عامل مهم ذکر شده را دربردارد که روابط آن هم به‌صورت تئوریک قابل بیان است. البته مدل‌های تماسی دیگری با این پارامترها وجود دارد که در پژوهش‌های آتی می‌توان به مقایسه بین آن‌ها برای تعیین بهینه‌ترین مدل پرداخت، همچنین نوع تماس نیز در تعیین این مدل‌ها تأثیرگذار است.

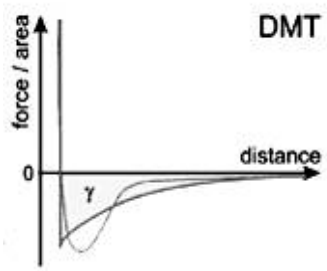
تئوری تماس دی‌اِم‌تی بر پایه‌ی مدلی است که توسط درژاگویین-توپوروف و مولر ارائه شد. تئوری آن‌ها با در نظرگرفتن نیروهای جاذبه در حوزه‌ی دور، در برگیرنده‌ی

نیروهای چسبندگی خارج از سطح تماس است که در شکل 2 نمایش داده شده است. درژاگویین و همکارانش در تئوری DMT فرض نمودند که پروفیل سطح تغییر شکل یافته از مدل هرتز پیروی می‌کند. معادلات نیروی چسبندگی و سطح تماس تئوری DMT به شکل زیر است[19].

$$F_{(adh)DMT} = -2\pi\gamma R \quad (1)$$

$$\delta = \frac{a_{DMT}^2}{R} \quad (2)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{R\,(F - F_{(adh)DMT})}{K}\right]^{1/3} \quad (3)$$



شکل 2 منحنی نیرو بر حسب فاصله در تئوری تماس دی‌ام‌تی [18].

Fig. 2 Curve of force in terms of distance in DMT theory

2-2- روش آنالیز حساسیت

مدل سوبل: این روش نیز بر پایه‌ی تجزیه‌ی واریانس بوده و از آن می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیر یکنواخت استفاده کرد. 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. برای توضیح روش سوبل، فضای عامل‌های ورودی Ω تعریف می‌شود[20].

$$\Omega^k = (x|0 \le x_i \le 1; i = 1.2\dots.k) \quad (4)$$

تابع $f(x)$ مبنای اصلی روش سوبل است که مجموع توابع معادله (5) به‌دست می‌آید.

$$f(x_1\dots.x_k) = f_0 + \sum_{i=1}^{k} f_i(x_i) + \sum_{1\le i<j\le k} f_{ij}(x_i.x_j) + \cdots + f_{1.2\dots.k}(x_1\dots.x_k) \quad (5)$$

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

$$\int_0^1 f_{i_1\dots.i_s}(x_{i_1\dots.}x_{i_s})dx_{i_k} = o.if\ 1 \le k \le s \quad (6)$$

همچنین می‌توان اثبات کرد که مجموع‌های فوق، عمود برهم بوده و حاصل ضرب هر جفت غیرمشابه آن، صفر است.

$$f_0 = \int_{\Omega^k}^{\infty} f_{i_1\dots.i_s} f_{j_1\dots.j_s} dx = 0 \quad (7)$$

حال f_0 به صورت معادله (8) تعریف می شود.

$$f_0 = \int_{\Omega^k}^{\infty} f(x)\,dx = 0 \quad (8)$$

سوبل در سال 1993 نشان داد که افرازهای فوق یکتا است و همه ترم‌های فرمول $f(x)$ از طریق انتگرال‌های چندگانه محاسبه می‌شوند.

$$f_i(x_i) = -f_0 + \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x)dx_{\sim i} \quad (9)$$

$$f_{ij}(x_i.x_j) = -f_0 - f_i(x_i) + \int_0^1 f(x)dx_{\sim ij} \quad (10)$$

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 (11) بیان می‌شود. که D عبارت از واریانس $f(x)$ است.

$$D = \int_{\Omega^k}^{\infty} f^2(x_{i_1\dots.}x_{i_s})\,dx - (f_0)^2 \quad (11)$$

همچنین واریانس‌های جزئی از رابطه‌ی (12) به دست می‌آید.

$$D_{i_1\dots.i_s} = \int_{\Omega^k}^{\infty} {f_{i_1\dots.i_s}}^2(x)\,dx - (f_0)^2 \quad (12)$$

که فرم کلی آن به‌صورت رابطه (13) است، که قسمت دوم فرمول به‌علت صفر بودن هر انتگرال و همچنین صفر بودن توان2 آن از معادلات حذف شده‌اند.

$$D_{i_1\dots.i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 {f_{i_1\dots.i_s}}^2(x_{i_1\dots.}x_{i_s})\,dx_{i1}\dots dx_{is} \quad (13)$$

درجایی که $1 \le i_1 < \cdots < i_s \le k$ و $S = 1.\dots.k$ بعد از مربع سازی و انتگرال‌گیری از معادله (13) بر روی Ω^k و در نظر گرفتن معادله (4)، رابطه (14) بدست می‌آید:

$$D = \sum_{i=1}^{k} D_i + \sum_{1\le i<j\le k} D_{ij} + \cdots + D_{1.2\dots.k} \quad (14)$$

در جدول 1 جمع‌بندی مختصری از روش‌های آنالیز حساسیت، مزایا و معایب آن‌ها ارائه شده است.

3- شبیه‌سازی

3-1- اثر کیفی فاکتورهای محیطی بر روی نیرو و زمان بحرانی

مطالعه کیفی پارامترهای محیطی بر روی نیرو و زمان بحرانی ذره-سوزن و ذره-صفحه‌ی مبنا در شکل 3 نمایش داده شده است. ضریب پواسون سوزن تقریبا یک اثر ثابت و خطی را بر روی نیرو و زمان بحرانی داشته است و تأثیر بسزایی بر روی تغییرات عوامل خروجی نداشته است.

جدول 1 مزایا و معایب روش‌های آنالیز حساسیت

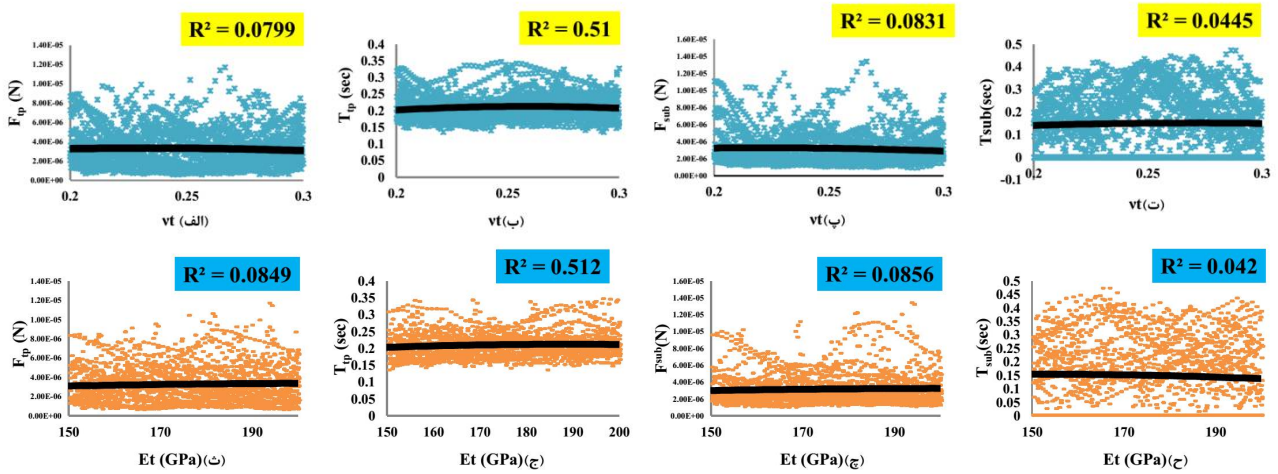
Table 1 Advantages and disadvantages of sensitivity analysis methods[21].

نام روش	پایه تحلیل	مزایا	معایب
FAST	واریانس	برای مدل‌های غیر خطی و پیچیده کاربرد دارد.	قادر به محاسبه‌ی برهم‌کنش بین ورودی‌ها را نیست.
سوبل	واریانس	قادر به محاسبه‌ی برهم‌کنش بین ورودی‌ها و برای مدل‌های خطی و غیر خطی کاربرد دارد.	تعداد نمونه‌ها برای تحلیل حساسیت زیاد است و وقت‌گیر است.
EFAST	واریانس	برای مدل‌های خطی و غیر خطی کاربرد دارد. تعداد نمونه‌ها برای انجام تحلیل کم است.	دقت کمتری نسبت به مدل‌های دیگر برپایه‌ی واریانس دارد.

برازش منحنی که از نوع چندجمله‌ای درجه 2 می‌باشد در شکل 3- الف تا ت نشان داده است که اثر ضریب پواسون سوزن بسیار ناچیز بوده است، براساس مقدار واریانس ضریب پواسون سوزن بیش‌ترین اثرگذاری را بر روی زمان بحرانی ذره-سوزن داشته است، که در شکل 3- ب مشهود است. در شکل‌های 3- ث تا ح میزان اثرگذاری کیفی مدول الاستیسیته سوزن نمایش داده شده است. دقیقاً همانند ضریب پواسون سوزن اثرگذاری مدول الاستیسیته سوزن به‌همان ترتیب است. بیش‌ترین تأثیر نیز بر روی زمان بحرانی ذره-سوزن است. پس از آن بر اساس واریانس به‌دست آمده بیشینه تأثیر بر روی نیروی بحرانی ذره-صفحه‌مبنا و ذره-سوزن است که در شکل‌های 3- چ و ث نشان داده شده است.

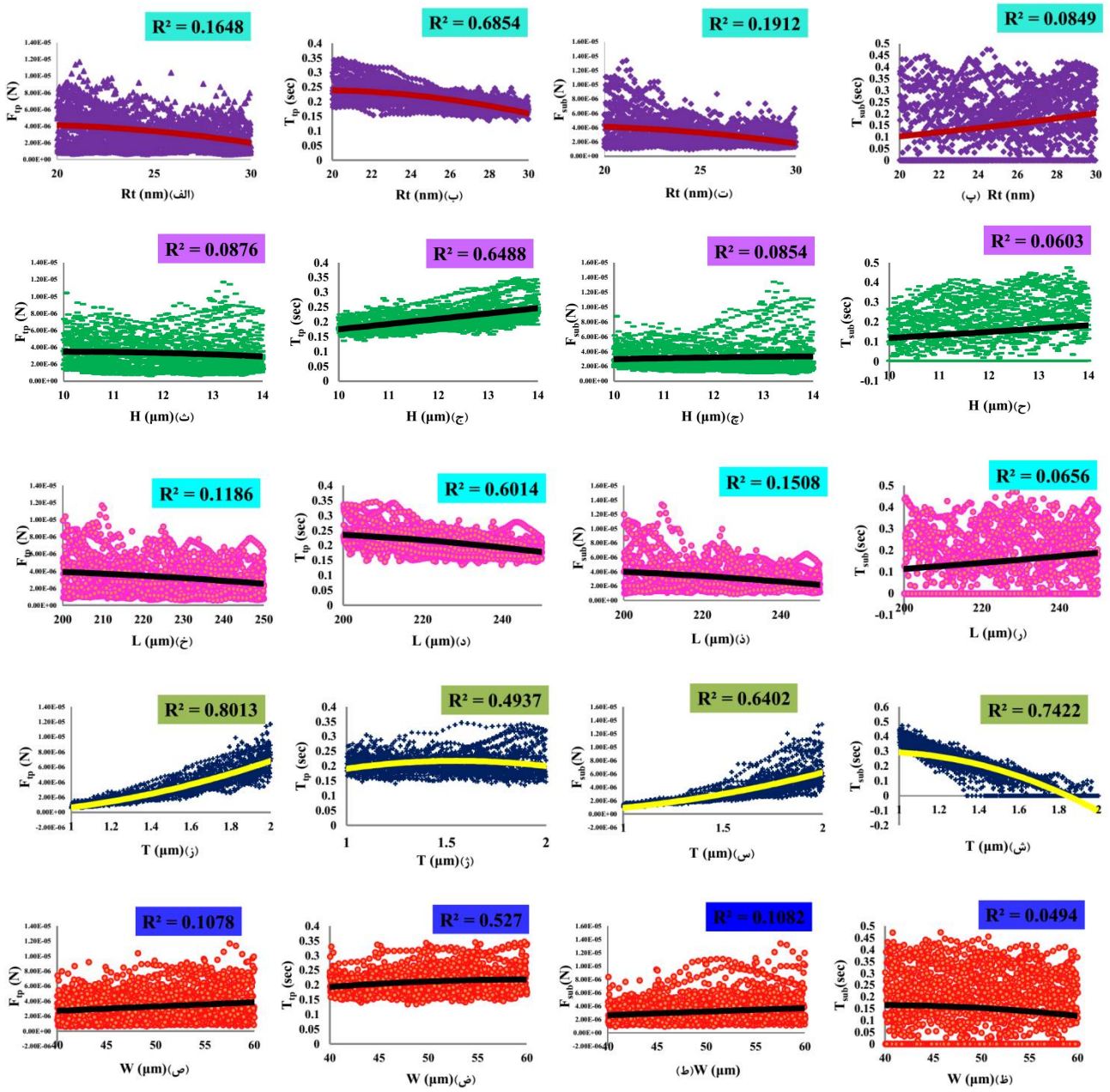
3-2- اثر کیفی فاکتورهای ابعادی بر روی نیرو و زمان بحرانی

اثرگذاری کیفی پارامترهای ابعادی شامل شعاع سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، عرض تیرک و ضخامت تیرک در شکل 4 نشان داده شده است. شعاع سوزن تنها بر روی زمان بحرانی ذره-صفحه‌مبنا اثر مستقیم داشته است و با افزایش آن نیز میزان زمان بحرانی افزایش یافته است. همچنین از نظر میزان واریانس نیز از بقیه عوامل خروجی اندازه بیش‌تری داشته است. اما برخلاف این عامل خروجی پارامتر شعاع سوزن بر روی زمان بحرانی ذره-سوزن و نیروی بحرانی ذره-سوزن و ذره-صفحه‌مبنا اثر معکوس داشته است و با افزایش آن عوامل خروجی کاهش یافته‌اند. کمترین میزان اثرگذاری شعاع سوزن بر روی نیروی بحرانی ذره-صفحه‌مبنا با مقدار 19/ واریانس بوده است که در شکل 4- ت نمایش داده شده است. ارتفاع سوزن که از پارامترهای حساس ابعادی محسوب می‌گردد بر روی زمان‌های بحرانی ذره-سوزن و ذره-صفحه‌مبنا تأثیر بسزایی داشته است. در شکل 4- ج با 0/64 واریانس بیش‌ترین میزان اثرگذاری نمایان شده است. اما اثر این پارامتر ابعادی بر روی نیروهای بحرانی تقریبا ثابت بوده است و میزان آن بسیار ناچیز است. طول تیرک عامل تأثیرگذار بر روی میزان نیرو و زمان بحرانی ذره-سوزن است و با این عوامل رابطه‌ی عکس دارد و با افزایش طول تیرک میزان آن‌ها کاهش یافته است، گرچه میزان پراکندگی در نیروی بحرانی بیش‌تر بوده است و اثرگذاری بر روی آن را کاهش داده است. اما در تماس ذره-صفحه‌مبنا طول تیرک باعث افزایش میزان نیرو و زمان بحرانی شده است و یک رابطه‌ی مستقیم بین این پارامتر ورودی با عوامل خروجی وجود دارد. هرچه میزان آن افزایش یافته است بزرگی عوامل خروجی نیز افزایش یافته است. طول تیرک با نیرو و زمان بحرانی رابطه‌ی مسقیم دارد و باعث افزایش هردو شده است اما برای مقایسه بین اثرگذاری بیش‌تر بین این دو منحنی باید از میزان واریانس کمک گرفته شود، باتوجه به اینکه نوع برازش منحنی‌ها چندجمله‌ای از درجه دو است.



شکل 3 اثر کیفی فاکتورهای محیطی بر روی نیرو و زمان بحرانی

Fig. 3 Qualitative effect of environmental factors on force and critical time



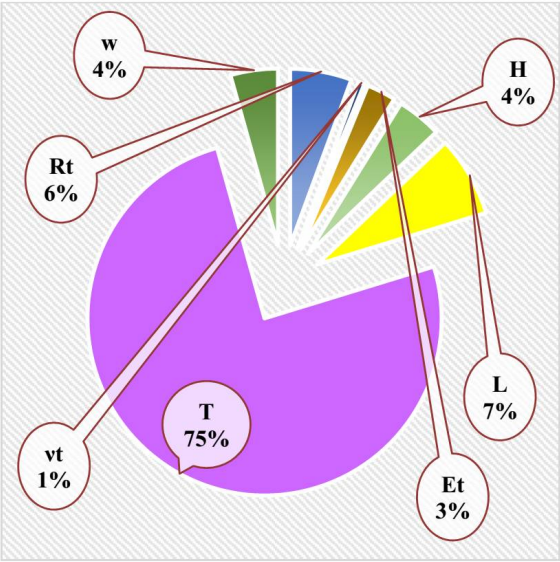
شکل 4 اثر کیفی فاکتورهای ابعادی بر روی نیرو و زمان بحرانی

Fig. 4 Qualitative effect of dimensional factors on force and critical time

میزان واریانس در نیروی بحرانی ذره-صفحه‌مبنا 0/15 است اما در حالی‌که میزان واریانس زمان بحرانی ذره-صفحه‌مبنا 0/06 است، در نتیجه میزان اثرگذاری آن بر روی نیروی بحرانی بیش‌تر است و با افزایش این پارامتر ورودی میزان نیروی بحرانی بیش‌تر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ضخامت تیرک در شکل‌های 4-ز تا س رابطه‌ی مستقیم دارد و افزایش آن باعث افزایش نیروی بحرانی ذره-سوزن و ذره-صفحه‌مبنا و زمان بحرانی ذره-سوزن شده است. ضخامت تیرک در شکل 4- ش نشان‌دهنده‌ی یک رابطه‌ی معکوس با زمان بحرانی ذره-صفحه‌مبنا است که با افزایش آن میزان زمان بحرانی کاهش یافته است. بیشینه تأثیر ضخامت تیرک بر روی نیروی بحرانی ذره-سوزن با مقدار واریانس 0/64 بوده است که در شکل 4- ز نشان داده شده است. عرض تیرک نیز بر روی سه عامل خروجی اثرگذاری مستقیم داشته است که عبارتنداز: نیروی بحرانی ذره-سوزن و زمان بحرانی ذره-سوزن و ذره-صفحه‌مبنا که در شکل‌های 4-ص تا ط نمایش داده شده است. پارامتر ورودی عرض تیرک فقط بر روی زمان بحرانی ذره-صفحه‌مبنا تأثیر معکوس داشته است. عرض تیرک بیشترین تأثیر را بر روی زمان بحرانی ذره-سوزن با میزان 0/52 داشته است و باعث افزایش آن شده است.

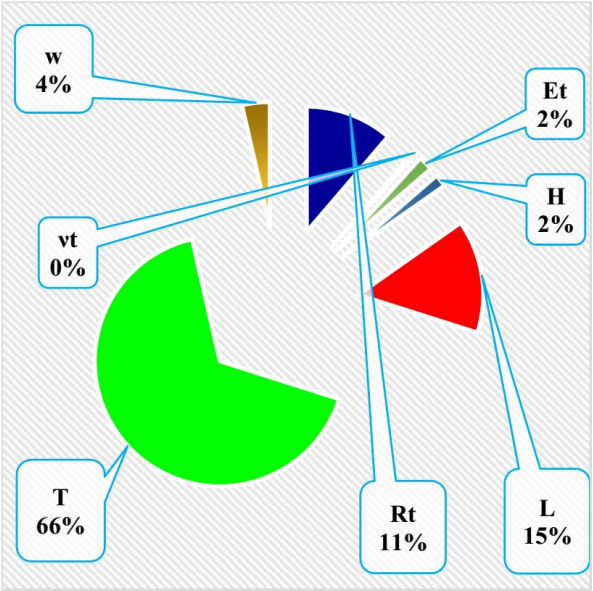
3-3- اثر کمی فاکتورهای ورودی بر روی نیرو و زمان بحرانی

در بررسی کمی تأثیر هفت پارامتر ورودی شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن، مدول الاستیسیته سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، ضخامت تیرک و عرض تیرک بر روی چهار خروجی نیروی بحرانی بین سوزن و ذره، زمان بحرانی بین سوزن و ذره، نیروی بحرانی بین ذره و صفحه مبنا و زمان بحرانی بین ذره و صفحه مبنا میزان دقیق هر کدام از آن‌ها به‌دست آمده است. در شکل 5 اثر پارامترها بر روی نیروی بحرانی ذره و سوزن نشان داده شده است. ضخامت تیرک با 75% بیش‌ترین میزان اثرگذاری را بر روی نیروی بحرانی ذره و سوزن دارد. همچنین این پارامتر ورودی رابطه‌ی مستقیم با عامل خروجی دارد و افزایش آن باعث بیشینه شدن نیروی بحرانی می‌شود. عمده‌ترین میزان اثرگذاری نیروی بحرانی ذره و سوزن ضخامت تیرک می‌باشد که با توجه به هندسه‌ی آن انواع مختلفی دارد و باید تعیین میزان نیروی بحرانی درنظر گرفته شود، پس از ضخامت تیرک، طول تیرک با 7%، شعاع سوزن با 6%، ارتفاع سوزن و عرض تیرک با 4% و مدول الاستیسیته ذره با 3% اثرگذاری داشته‌اند. همچنین ضریب پواسون سوزن تقریبا هیچ اثرگذاری با میزان 1% بر روی نیروی بحرانی ذره و سوزن نداشته است. در شکل 6 اثر پارامترهای ورودی بر روی عامل خروجی نیروی بحرانی ذره و صفحه‌ی مبنا نشان داده شده است، به‌ترتیب همانند نیروی بحرانی ذره و سوزن است که، ضخامت تیرک با 66% بیش‌ترین میزان اثرگذاری را داشته است. در مقایسه با نیروی بحرانی ذره و سوزن میزان شعاع سوزن و طول تیرک نیز افزایش یافته‌اند و به 11% و 15% افزایش یافته‌اند. عرض تیرک با 4% و ارتفاع سوزن و مدول الاستیسیته سوزن بدون هیچ اثرگذاری بوده است. در نتیجه عامل خروجی نیروی بحرانی هم در جهت ذره و سوزن و هم ذره و صفحه‌ی مبنا به ضخامت تیرک وابسته است و این پارامتر در تغییرات و اندازه‌ی آن تأثیر بسزایی دارد. در شکل 7 اثر کمی پارامترهای ورودی بر روی زمان بحرانی ذره و سوزن نمایش داده شده است، برخلاف نیروی بحرانی ذره و سوزن ضخامت تیرک با 2% تقریباً اثرگذاری محسوسی بر روی زمان بحرانی ذره و سوزن نداشته است. شعاع سوزن، ارتفاع سوزن و طول تیرک به‌ترتیب با 42%، 28% و 25% بیش‌ترین میزان تأثیر را بر روی زمان بحرانی ذره و سوزن داشته‌اند. در شکل 8 نیز تأثیر پارامترهای ورودی بر روی زمان بحرانی ذره و صفحه‌مبنا نشان داده شده است، اما برخلاف زمان بحرانی ذره و سوزن ضخامت تیرک با 81% بیش‌ترین میزان اثرگذاری را بر روی میزان زمان بحرانی ذره و صفحه‌مبنا دارد که دقیقاً همانند نیروهای بحرانی در هر دو جهت است. همچنین طول تیرک با 6% و عرض تیرک با 4% نیز از عوامل ناچیز تأثیرگذاری بر روی عامل خروجی زمان بحرانی ذره و صفحه‌مبنا است. در نتیجه ضخامت تیرک به‌عنوان اثرگذارترین پارامتر ورودی تعیین شده است که پس از آن شعاع و ارتفاع سوزن و همچنین طول تیرک در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.



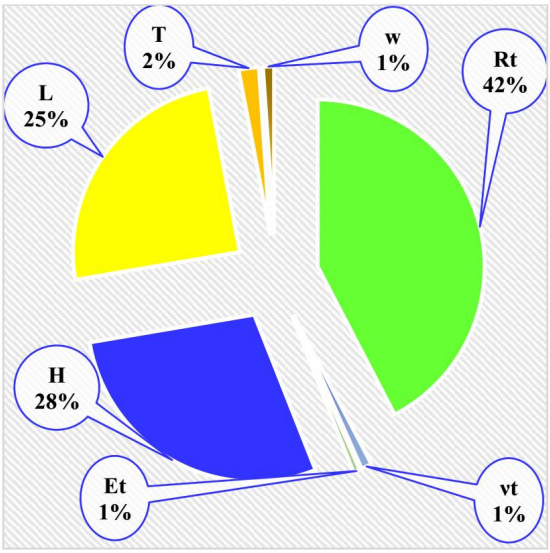
شکل 5 اثر کیفی فاکتورهای ورودی بر روی نیروی بحرانی ذره و سوزن

Fig. 5 Qualitative effect of input factors on the critical force of the particle and tip



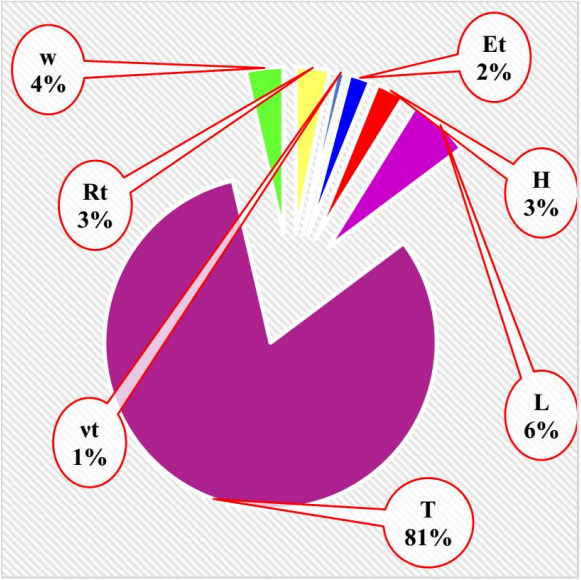
شکل 6 اثر کیفی فاکتورهای ورودی بر روی نیروی بحرانی ذره و صفحه‌مبنا

Fig. 6 Qualitative effect of input factors on particle and substrate critical force



شکل 7 اثر کیفی فاکتورهای ورودی بر روی زمان بحرانی ذره و سوزن

Fig. 7 Qualitative effect of input factors on particle and tip critical time



شکل 8 اثر کیفی فاکتورهای ورودی بر روی نیروی بحرانی ذره و صفحه‌مبنا

Fig. 8 Qualitative effect of input factors on the particle and substrate critical force

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

فرآیند منیپولیشن که در دو فاز کلی صورت می‌گیرد به‌صورت گسترده‌ای در نانوتکنولوژی نفوذ کرده است. دنیای پزشکی و صنعت ساخت‌وتولید پیشرفت‌های خود را مدیون به این فرآیند می‌دانند. رساندن دارو و همچنین تخریب سرطان و تومور از موضوعات پراهمیت این فرآیند مهم است. در فاز اول این فرآیند محاسبه‌ی نیرو و زمان بحرانی صورت می‌گیرد که بسیار حائز اهمیت است. به‌صورت کلی دو دسته از پارامترها شامل محیطی و ابعادی بر روی این دو عامل تأثیرگذار هستند که بررسی این عامل‌ها نیازمند مدل‌سازی دقیق تماسی و آنالیز حساسیت به‌جهت تفکیک، نوع رابطه‌ی کیفی و میزان کمی دقیق هر یک از این فاکتورهای ورودی بر روی نیرو و زمان بحرانی است. در این مقاله با استفاده از مدل مکانیک تماس دی‌اِم‌تی و روش آنالیز حساسیت سوبل میزان کمی و نوع رابطه‌ی کیفی هر یک از فاکتورهای ورودی شامل هفت پارامتر ورودی شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن، مدول الاستیسیته سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، ضخامت تیرک و عرض تیرک بر روی چهار خروجی نیروی بحرانی بین سوزن و ذره، زمان بحرانی بین سوزن و ذره، نیروی بحرانی بین ذره و صفحه مبنا و زمان بحرانی بین ذره و صفحه مبنا به‌دست آمده است. ضخامت تیرک به‌عنوان اثرگذاری‌ترین پارامتر کمی بر روی نیرو و زمان بحرانی ذره-سوزن و همچنین نیروی بحرانی ذره-صفحه‌مبنا بوده است. همچنین برای زمان بحرانی ذره-سوزن سه پارامتر ورودی شعاع و ارتفاع سوزن و طول تیرک بیش‌ترین مقدار اثرگذاری را داشته‌اند. در این فرآیند حرکت نانوذره از روی صفحه‌مبنا هدف اصلی است اما در عین حال باتوجه به حساسیت‌های موجود مانند این‌که یک ذره زیستی باشد باید به آن آسیب نرسد مقدار نیروی بحرانی بسیار مؤثر و حائز اهمیت است. مقدار نیرو باید طوری باشد که هم بر نیروهای چسبندگی و اصطکاک غلبه کند هم به ذره آسیبی نرساند. شناسایی پارامترهای تأثیرگذار و میزان اثرگذاری آن‌ها بر روی نیرو و زمان بحرانی از مهم‌ترین راه‌های تعیین میزان نیرو و زمان بحرانی است که در این پژوهش به 7 پارامتر پرداخته شده است، همچنین در جدول 2 تأثیرگذارترین پارامترهای ورودی بر روی زمان و نیروی بحرانی نشان داده شده است.

جدول 2 تحلیل و بررسی فاکتورهای ورودی بر زمان و نیروی بحرانی

Table 2 Analysis of input factors on time and critical force

تأثیرگذارترین پارامتر ورودی	نیروی بحرانی ذره-سوزن	نیروی بحرانی ذره-صفحه‌مبنا
	ضخامت تیرک	ضخامت تیرک
	زمان بحرانی ذره-سوزن	زمان بحرانی ذره-صفحه‌مبنا
	شعاع سوزن	ضخامت تیرک

6- مراجع و منابع

[1] Zhong, J., Yan, J., 2016. Seeing is Believing: Atomic Force Microscopy Imaging For Nanomaterials Research. RSC Advances, 6(2), 1103-1121.

[2] Kim, S., Ratchford, D., and Li, X., 2009. Atomic Force Microscope Nanomanipulation with Simultaneous Visual Guidance. ACS Nano, 3(10), 2989-2994.
[3] Dejeu, J., Bechelany, M., Rougeot, P., Philippe, L., and Gauthier, M., 2011. Adhesion Control for Micro- and Nanomanipulation. ACS Nano, 5(6), 4648-4657.
[4] Harel, E., Meltzer, Sh., Requicha, A., Thompson, A., and Koel, B., 2005. Fabrication of Polystyrene Latex Nanostructures by Nanomanipulation and Thermal Processing. NANOLETTERS 5(12), 2624-2629.
[5] Spear, J., Ewers, B., and Batteas, J., 2015. 2D-nanomaterials for controlling friction and wear at interfaces. Nanotoday, 10, 301-314.
[6] Tseng, A., 2011. Advancements and challenges in development of atomic force microscopy for nanofabrication. Nanotoday, 6, 493-509.
[7] Chen, N., Tian, L., Patil, A., Peng, Sh., Yang, I., Thakor, N., and Ramakrishna, S., 2017. Neural interfaces engineered via micro- and nanostructured coatings. Nanotoday, 14, 59-83.
[8] Mokaberi, B., Yun, J., Wang, M., and Requicha, A., 2007 editors. Automated nanomanipulation with atomic force microscopes. Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference.
[9] Rubio-Sierra, FJ., Heckl, WM., and Stark, RW., 2005. Nanomanipulation by atomic force microscopy. Advanced Engineering Materials, 7(4), 193-6.
[10] Arsuaga, J., Tan, RK-Z., Vazquez, M., and Harvey, SC., 2002. Investigation of viral DNA packaging using molecular mechanics models. Biophysical chemistry, 101, 475-84.
[11] Sitti, M., Hashimoto, H., 2003. Teleoperated touch feedback from the surfaces at the nanoscale: modeling and experiments. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 8(2), 287-98.
[12] Shen, Y., Nakajima, M., Ahmad, MR., Kojima, S., and Homen, M,. and Fukuda, T., 2011. Effect of ambient humidity on the strength of the adhesion force of single yeast cell inside environmental-SEM. Ultramicroscopy, 111(8), 1176-83.
[13] Stark, RW., Rubio-Sierra, FJ., Thalhammer, S., Heckl, WM., 2003. Combined nanomanipulation by atomic force microscopy and UV-laser ablation for chromosomal dissection. European Biophysics Journal, 32(1), 33-9.
[14] Zarei, B., Bathaee, S.H., Taheri, M., Momeni, M., 2019. Second Phase of Nanomanipulation of Particles by Atomic Force Microscopy Using Coulomb, HK, and LuGre Friction Models. Modares Mechanical Engineering, 19(1), 181-190.
[15] Saraee, M., Korayem, M. H., 2017. Dynamic modeling and simulation of 3D manipulation on rough surfaces based on developed adhesion models. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88, 529-545.
[16] Félix, G., Ancheyta, J., and Trejo, F., 2019. Sensitivity analysis of kinetic parameters for heavy oil hydrocracking. Fuel, 241, 836-844.
[17] Frey, H., Patil, SR., 2002. Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. Risk Analysis, 22(3), 553-578.
[18] M. Taheri, Manipulation dynamic modeling for micro/nano-devices manufacturing using the LuGre friction model, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 45-53, 2016 (in Persian)
[19] Derjaguin, B.V., Muller, V.M., Toporov YuP 1975. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. J Colloid Interface Sci 53(2):314–326
[20] [Saltelli, A., Chan, K., Scott, EM., editors. 2000. Sensitivity analysis: Gauging the worth of scientific models. Hoboken: Wiley;1-70.
[21] Taheri, M., Bathaee, S.H., 2019. Sensitivity Analysis of Peripheral Parameters in Three Dimensional Nano-Manipulation by using HK Model. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 9(2):123-139.