

## Determining the Critical time for Two-Dimensional Manipulation of Micro-Nanoparticles using a Regression Equation

Research Article

Moein Taheri<sup>1</sup> , Fereshte Ghane<sup>2</sup>

 [10.22067/jacsm.2025.93715.1332](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.93715.1332)

**Abstract**--Manipulation and relocation of particles at the nano- and microscale using Atomic Force Microscopy (AFM) is recognized as one of the advanced techniques in nanotechnology, commonly referred to as nanomanipulation. This process consists of two main stages: the initial phase and the second phase. One of the key factors in enhancing the accuracy and efficiency of this process is minimizing the critical manipulation time. Therefore, identifying and analyzing the factors affecting this time is significant. In this study, the effect of the dimensional parameters of the AFM cantilever including thickness, width, and length of the cantilever, as well as the tip radius and height on the critical time of nanomanipulation is investigated. For this purpose, design of experiments and Response Surface Methodology (RSM) are employed to analysis data and the development of a mathematical model. The regression model derived from the experimental data demonstrates a prediction accuracy of 91.04%, indicating a high level of reliability. The results reveal that among the parameters studied, cantilever thickness has the most significant impact on critical time.  
**keywords** : Cantilever dimensional parameter, regression, critical time, design of experimental.

### 1- Introduction

Nanomanipulation is one of the leading fields in nanotechnology, made possible by using atomic force microscopy, and has provided a new platform for manipulating structures at the nanometer scale. Over the past decades, this technology has undergone significant advances, such that today it has found numerous applications in advanced industries, medical technologies, including cancer treatment, and electronic systems.[1-15]

Atomic force microscopy is the tool used in this process. With the help of this tool, it is possible to identify and measure the mechanical properties of nanoparticles. In addition, nanoparticle manipulation is carried out in two phases. In the first phase of this process, force and critical time are two factors affecting nanoparticles. High amounts of these two parameters can damage nanoparticles and ultimately lead to process failure.

The overall process conducted in this study is illustrated in Figure 1.

Therefore, with the increasing development of this process, the need for a deep understanding of the factors affecting the accuracy, stability, and efficiency of nanoscale operations has doubled, paving the way for performance optimization and increased productivity. In this article, considering the above points, the effect of dimensional parameters on the critical time of manipulation has been investigated.

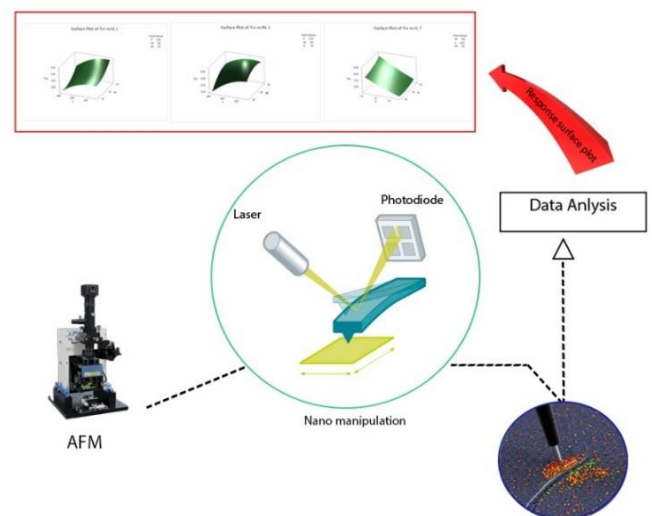


Fig. 1. Graphical abstract of process

### 2- Modeling

The movement and manipulation of micro and nano particles is known as manipulation. Nano particles are examined using an atomic force microscope. This microscope is a well-known tool for recognizing and identifying nanoparticles. During the manipulation

\* Manuscript received 2025 May 25, Revised 2025 July 02, Accepted 2025 August 03.

<sup>1</sup> Corresponding author. Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran, **Email:** [m-taheri@araku.ac.ir](mailto:m-taheri@araku.ac.ir)

<sup>2</sup> Bachelor Student, Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.  
**Email:** [fereshtehghane13@gmail.com](mailto:fereshtehghane13@gmail.com)

process, the microscope cantilever applies a force to the nano particle. Overcoming force applied by the cantilever overcomes the friction force, the particle begins to move. This process continues until the particle reaches the desired position. The manipulation process consists of two phases. Force and critical time are two important parameters in the first phase that have a significant impact on the orientation of the particle.

### 3- Results

#### A. Analysis of variance

Analysis of variance (ANOVA) showed that the thickness, width and length of the pole, the height and the radius of the tip into the liquid had a significant effect on the response variable. The regression model explained a large part of the variation in the response, and the adjusted and predicted coefficient of determination values confirmed that the model was reliable in explaining and predicting the results.

To check the suitability of the model, residual analysis was performed. The results showed that the residuals followed a normal distribution and there was no clear pattern in the residual plots. This means that the assumptions of constant variance and independence of errors were met. Overall, these results confirmed that the model was suitable for analyzing the effect of the tested variables on the response. The extracted regression equation can be seen in Equation 1.

$$T_{cr} = 0.539 - 0.5733 T - 0.00439 W + 0.001044 L + 0.02500 H + 0.00489 Rt \quad (1)$$

#### B. Sensitivity analysis results

To evaluate the interactive effects of various process parameters on critical time, a series of three-dimensional response surface plots was analyzed. Figure 2 presents the effect of these parameters on the critical force during manipulation. The results consistently reveal that increasing cantilever thickness leads to a reduction in critical time across multiple parameter combinations. Cantilever width also shows a negative influence, whereas cantilever length generally has a positive effect, increasing the critical time. These trends are clearly reflected in the slopes of the plots, indicating the significant and opposing effects of these parameters.

Additional interactions highlight the role of tip-related parameters. Tip height and tip radius both exhibit a positive relationship with critical time, while cantilever width consistently shows a negative influence. When variables such as cantilever length and tip height or radius are combined, their effects on critical time are additive and positive. Overall, the response surfaces demonstrate clear patterns of influence, providing insight into how combinations of cantilever and tip dimensions interact to affect critical time.

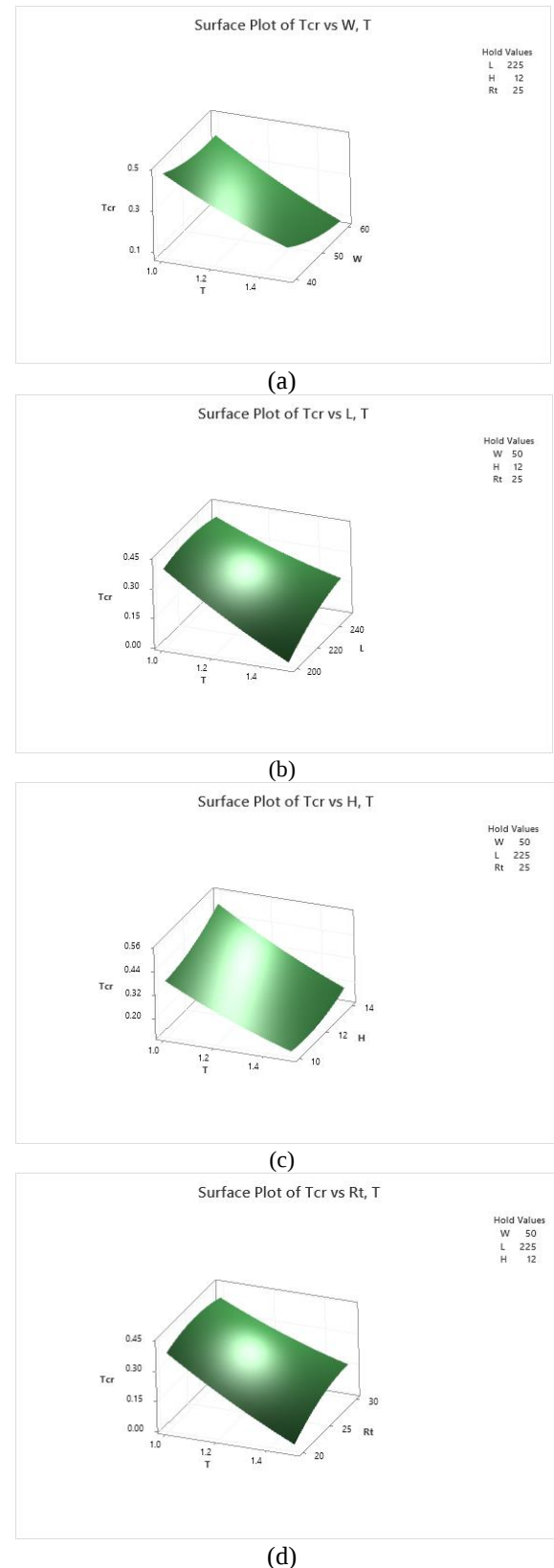


Fig. 2. Simultaneous effect of parameters on critical time

#### 4- Conclusion

In this study, considering the significance of critical time in the first phase of manipulation, the dimensional parameters of the cantilever and the microscope tip were investigated. Initially, 27 experiments were conducted, with three different levels for each parameter. Subsequently, the impact of these variables was assessed using analysis of variance (ANOVA). A regression model was developed based on the collected data. The conducted analyses estimate the reliability of the model to be 91%, confirming its suitability for prediction. Finally, the effect of the parameters on the critical manipulation time was analyzed separately using the response surface methodology. The results obtained from the three-dimensional response surface plots indicate that the cantilever thickness can cause significant variations in critical time.

These findings can serve as a foundation for predicting and optimizing conditions in similar processes and can be expanded upon in future research.

#### 6- References

- [1] S. Yuan, L. Liu, Z. Wang, N. Xi, Y. Wang, "Study of nano-manipulation approach based on the least action principle using AFM-based robotic system," in *Proceeding 36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, China, 26–28 Jul. 2017, pp. 4424–4429. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028055>
- [2] M. H. Korayem, M. Mozafari, Y. H. Sooha, Z. Rastegar, "Development and application of rough viscoelastic contact models in the first phase of 3D manipulation for biological micro-/nanoparticles by AFM," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91, no. 9, pp. 3739–3753, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01967-5>
- [3] M. H. Korayem, S. Shahali, Z. Rastegar, "Simulation of 3D nanomanipulation for rough spherical elastic and viscoelastic particles in a liquid medium; experimental determination of cell's roughness parameters and Hamaker constant's correction," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 90, pp. 313–327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.10.007>
- [4] M. H. Korayem and R. N. Hefzabad, "Nonlinear modeling of nanoscale interaction forces between atomic force microscope and carbon nanotubes," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 161, p. 104690, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104690>
- [5] M. H. Korayem, A. A. Farid, R. N. Hefzabad, "Nonclassical dynamic modeling of nano/microparticles during nanomanipulation processes," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 11, no. 1, pp. 147–166, 2020. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.13>
- [6] G. Wang, Y. Ding, H. Long, Y. Guan, X. Lu, Y. Wang, L. Yang, "Simulation of Optical Nano-Manipulation with Metallic Single and Dual Probe Irradiated by Polarized Near-Field Laser," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, p. 815, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12020815>
- [7] A. Craciun, B. Donnio, J. Gallani, M. Rastei, "High-resolution manipulation of gold nanorods with an atomic force microscope," *Nanotechnology*, vol. 31, no. 8, p. 085302, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab5404>
- [8] T. Zhang, H. Yu, P. Li, X. Wang, F. Wang, J. Shi, Z. Liu, P. Yu, W. Yang, Y. Wang, "Microsphere-based super-resolution imaging for visualized nanomanipulation," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 42, pp. 48093–48100, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12126>
- [9] C. Hou, D. Sun, L. Dong, "Nanomanipulation in biomedical applications," *Current Robotics Reports*, vol. 2, pp. 133–145, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00047-4>
- [10] Y. Yin, H. Xu, Y. Wang, Z. Liu, S. Zhang, Z. Weng, Z. Song, Z. Wang, "Improving adhesion between nanoparticles and surface of mica substrate by aminosilane modification," *Plasmonics*, vol. 15, no. 2, pp. 399–407, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-01030-8>
- [11] X. Ma, W. Wang, G. Xie, D. Guo, S. Wen, "Friction measurement and motion state determination of a single polystyrene nanoparticle during manipulation," *Micro & Nano Letters*, vol. 15, no. 15, pp. 1140–1145, 2020. <https://doi.org/10.1049/mnl.2020.0383>
- [12] Y. Wen, H. Lu, Y. Shen, H. Xie, "Nanorobotic Manipulation System for 360° Characterization Atomic Force Microscopy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2916–2924, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2910042>
- [13] Y. Takechi-Haraya, "Atomic Force Microscopy to Measure the Mechanical Property of Nanosized Lipid Vesicles and Its Applications," *Yakugaku Zasshi*:

*Journal of the Pharmaceutical Society of Japan*,  
vol. 144, no. 5, pp. 511–519, 2024.  
<https://doi.org/10.1248/yakushi.23-00178-2>

- [14] M. Taheri, H. Faraji, and P. Karimi, “Manipulation of breast cell tissue with the aim of calculating Young’s modulus, using Tatara contact theory and atomic force microscopy,” *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 1–16, 2023.
  - [15] M. Taheri, “Investigation of new friction models in two-dimensional manipulation of gastric cancer tissue,” *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 1–16, 2023.
-



## تعیین زمان بحرانی منیپولیشن دو بعدی میکرو نانو ذرات با استفاده از معادله رگرسیون\*

مقاله پژوهشی

معین طاهری<sup>(۱)</sup>  فرشته قانع<sup>(۲)</sup>  
doi 10.22067/jacsm.2025.93715.1332

**چکیده** دستکاری و جابه‌جایی ذرات در مقیاس نانو و میکرو با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، به‌عنوان یکی از تکنیک‌های پیشرفته در فناوری نانو، تحت عنوان "نانومنپولیشن" شناخته می‌شود. این فرآیند شامل دو مرحله اصلی، فاز اولیه و فاز ثانویه است. یکی از مؤلفه‌های کلیدی در افزایش دقت و کارایی این فرآیند، کاهش زمان بحرانی منیپولیشن است؛ از این رو، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر این زمان، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ابعادی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی - شامل ضخامت، عرض، طول تیرک، و همچنین شعاع و ارتفاع سوزن - بر زمان بحرانی نانومنپولیشن بررسی شده است. بدین منظور از روش طراحی آزمایش و سطح پاسخ (RSM) جهت تحلیل داده‌ها و استخراج مدل ریاضی استفاده گردیده است. مدل رگرسیون حاصل از این تحلیل، با اتکا به داده‌های تجربی، دقتی معادل ۹۱/۰۴ درصد را در پیش‌بینی زمان بحرانی نشان داده است که بیانگر قابلیت اطمینان بالای مدل ارائه شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در میان پارامترهای بررسی شده، ضخامت تیرک بیشترین تأثیر را بر زمان بحرانی دارد.

**واژه‌های کلیدی** پارامتر ابعادی تیرک، رگرسیون، زمان بحرانی، طراحی آزمایش.

## مقدمه

برخوردار است، یوان و همکاران [1] نحوه ایجاد و به‌کارگیری مدل را بررسی و شبیه‌سازی منیپولیشن را تشریح کرده‌اند. بنا بر نتایج، مدل‌سازی مناسب علاوه بر شناسایی موقعیت نانو ذره، می‌تواند در بهبود راندمان منیپولیشن مؤثر واقع شود. به‌کارگیری مدل‌های ویسکوالاستیک و الاستیک به‌عنوان دو نوع مدل مکانیکی مشخص برای تخمین نیرو و زمان بحرانی، موضوع تحقیق کورایم و همکاران [2] بوده است. باتوجه به آنچه در این مقاله بیان گردیده است در نظر گرفتن زبری سطح ذرات زیستی و نوع رفتار آن‌ها در فاز اول منیپولیشن دلیل اصلی بررسی این مدل‌هاست.

در دیگر مطالعه کورایم و همکاران [3] سلول‌های خوش خیم سرطانی سینه مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری اصلی این

نانومنپولیشن یکی از حوزه‌های پیشرو در فناوری نانو است که با به‌کارگیری میکروسکوپ نیروی اتمی امکان‌پذیر شده و بستری نوین برای منیپولیشن در مقیاس نانومتری فراهم آورده است. طی دهه‌های اخیر، این فناوری دستخوش پیشرفت‌های چشمگیری شده است به‌گونه‌ای که امروزه کاربردهای متعددی در صنایع پیشرفته، فناوری‌های پزشکی از جمله درمان سرطان و سامانه‌های الکترونیکی یافته است. توسعه روزافزون این فرآیند، نیاز به درک عمیق از عوامل مؤثر بر دقت، پایداری و کارایی عملیات نانومقیاس را دوچندان کرده و مسیر را برای بهینه‌سازی عملکرد و افزایش بهره‌وری هموار ساخته است. از آنجایی که مدل‌سازی فرآیند منیپولیشن از اهمیت بالایی

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۳/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۵/۱۲ می باشد.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

تمرکز خود را بر کاربردهای نوظهور این حوزه در علوم زیستی و پزشکی قرار داده‌اند. یافته‌های اخیر نشان می‌دهند که پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه عمدتاً با اتکاء بر فناوری‌های کمکی مانند تصویربرداری با وضوح فوق‌العاده یا تحریکات موضعی مغناطیسی حاصل شده‌اند. این دستاوردها امکان بررسی ویژگی‌های مولکولی به صورت غیرآماری و تعاملات درون مولکولی و بین مولکولی را فراهم ساخته است.

یکی از موانع بررسی نانوذرات در فرآیند منیپولیشن با میکروسکوپ نیروی اتمی، مشکل چسبندگی پایین به سطح زیرلایه است. بین و همکاران [10] به کارگیری محلول تری آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان را پیشنهاد کرده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که این اصلاح منجر به افزایش قابل توجه نیروی چسبندگی میان نانوذرات مغناطیسی و زیرلایه می‌شود. همچنین، میزان غلظت‌های مختلف این محلول بر میزان چسبندگی بررسی شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که بهبود چسبندگی سطحی می‌تواند نقش مهمی در افزایش دقت و نرخ موفقیت فرآیندهای منیپولیشن داشته باشد.

از آنجایی که نانوذرات در حین فرآیند منیپولیشن توسط پروب میکروسکوپ نیروی اتمی دچار لغزش یا چرخش می‌شوند، در نظر گرفتن تمایز بین اصطکاک لغزشی و چرخشی دشوار می‌گردد و همکاران [11]، آزمایش‌های زیادی برای اندازه‌گیری اصطکاک انجام داده‌اند و با استفاده از مدل دابل هرتز محاسبه اصطکاک لغزشی و چرخشی را گزارش کرده‌اند.

ون و همکاران [12] یک سیستم منیپولیشن نانو رباتیک را معرفی کرده‌اند که با استفاده از آن می‌توان نقشه‌برداری از نمونه‌ها را به صورت سه بعدی انجام داد. این روش با گسترش نواحی می‌تواند امکان نقشه‌برداری را بهبود دهد. همچنین برای اثبات کارایی سیستم، سه نمونه مختلف بررسی شده و نتایج بازسازی سه بعدی آن‌ها تحلیل شده است.

نانوذرات لیپیدی و لیپوزوم‌ها در داروسازی، واکسن‌ها و درمان‌های ژنی کاربرد دارند توجه جهانی را جلب کرده‌اند. باتوجه به این موضوع تاکاچی هارایا [13] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی ویژگی‌های مکانیکی این نانوذرات در محیط مایع را مورد بررسی قرار داده است.

پژوهش، تحلیل ثابت الاستیک سلول در محیط‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی است. در این مطالعه، آزمایش سلول مذکور در دو محیط مایع و هوا و با در نظر گرفتن دو نوع مدل مکانیکی الاستیک و ویسکوالاستیک انجام و تحلیل شده است.

در مطالعه‌ای دیگر از کورایم و همکاران [4]، یک مدل غیرخطی و غیرکلاسیک برای بررسی نیروهای بین میکروسکوپ نیروی اتمی و نانولوله‌های کربنی در فرآیند منیپولیشن ارائه شده است. مدل‌سازی با استفاده از نظریه‌های تماس و اصطکاک انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی این تحقیق نشان داده است که اثرات ابعاد لوله‌های کربنی در رفتار مکانیکی آن مؤثر است.

بررسی رفتار دینامیکی نانوذره طلا در خلال منیپولیشن توسط کورایم و همکاران [5] ارائه گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل‌های کلاسیک و مدل‌های غیرکلاسیک محیط پیوسته از جمله اهداف اصلی این تحقیق به شمار می‌روند. به علاوه داده‌های این آزمایش با منیپولیشن پلی‌استیرن نیز مورد قیاس قرار گرفته است.

بر اساس پیشنهاد وانگ و همکاران [6] گسترش استفاده از طرح‌های غیر تماسی در فرآیند منیپولیشن امری ضروری به نظر می‌رسد. با در نظر گرفتن این موضوع، منیپولیشن نوری توسط آنها مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی میدان الکتریکی و نیروی سوزن میکروسکوپ از جمله کاربردهای این نوع منیپولیشن است.

منیپولیشن در محیط خلا مورد توجه کرایسون و همکاران [7] واقع شده است. آنها ضمن بررسی فرآیند با به کارگیری پروب نوسانی، عملکرد دینامیکی و تماسی را نیز تحلیل کرده‌اند. نانولوله طلای پوشش داده شده ماده مورد بررسی این آزمایش عنوان شده است.

در پژوهشی توسط ژانگ و همکاران [8]، یک روش نوین برای بررسی منیپولیشن با وضوح بالا معرفی شده است که امکان تصویربرداری لحظه‌ای ضمن از بین بردن پراش نوری را فراهم می‌کند. این روش با اتصال یک میکرو لنز به پروب میکروسکوپ نیروی اتمی امکان هم‌زمان بازخورد آبی بصری را فراهم می‌سازد. هو و همکاران [9] با مروری بر فناوری‌های نوین نانودستکاری،

همچنین ارتفاع و شعاع سوزن به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده‌اند. سپس با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر فرآیند استخراج گردیده و سهم نسبی هر یک از پارامترها در تعیین مقدار زمان بحرانی تحلیل و ارزیابی شده است.

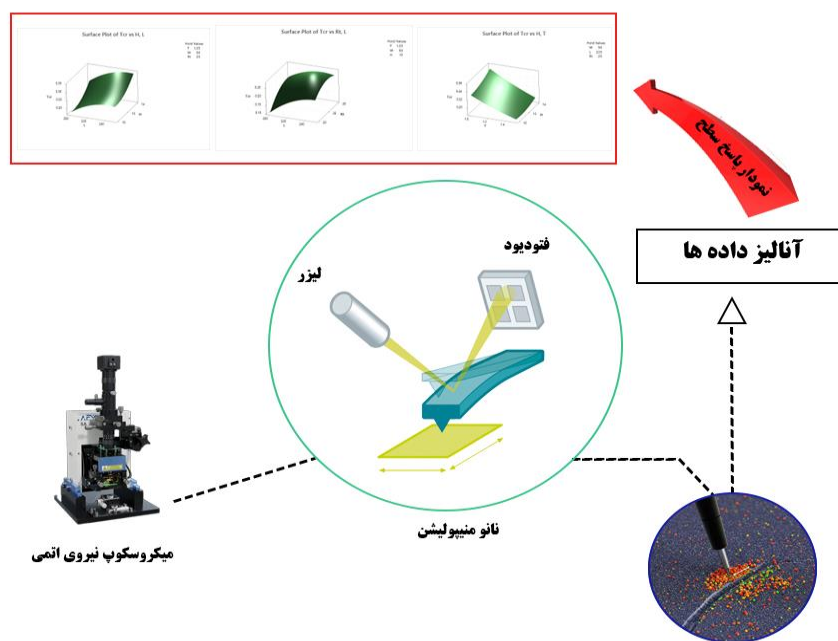
### مدل‌سازی

جابه‌جایی و دست‌کاری میکرو نانوذرات تحت فرآیندی به عنوان منیپولیشن شناخته می‌شود. بررسی نانوذرات به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌گیرد. این میکروسکوپ ابزاری مشهور برای شناخت و شناسایی نانوذره است. در طی فرآیند منیپولیشن تیرک میکروسکوپ به نانوذره نیرو وارد می‌کند. با غلبه میزان نیروی وارده از تیرک بر نیروی اصطکاک، ذره شروع به حرکت می‌کند. این فرآیند تا رساندن ذره به موقعیت موردنظر ادامه می‌یابد. فرآیند منیپولیشن دوفاز را شامل می‌شود. نیرو و زمان بحرانی دو پارامتر مهم و حائز اهمیت در فاز اول هستند که در جهت‌یابی ذره تأثیر قابل‌توجهی دارند. با در نظر گرفتن این نکته، در این مطالعه به بررسی متغیرهای اثرگذار بر زمان بحرانی خواهیم پرداخت. فرآیند کلی انجام شده در این پژوهش مطابق شکل (۱) خواهد بود.

در مطالعه طاهری و همکاران [14]، از میکروسکوپ نیروی اتمی برای تحلیل خواص مکانیکی بافت سرطانی سینه در حین نانومنیپولیشن استفاده شده است. با بررسی رابطه نیرو-جابجایی، نمودارهای مربوط به عمق نفوذ برحسب زمان استخراج گردیده‌اند. جهت محاسبه مدول یانگ، شبیه‌سازی‌هایی بر پایه مدل تماسی تاتارا و با در نظر گرفتن هندسه بافت انجام شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. بر اساس تحلیل‌ها، مقدار مدول یانگ بافت سرطانی در محدوده ۲ تا ۲.۵ کیلوپاسکال برآورد شده است.

در دیگر پژوهش طاهری [15]، به منظور کاهش آسیب به بافت‌های سالم و بهینه‌سازی نانومنیپولیشن بافت سرطانی معده، شبیه‌سازی دوبعدی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شده است. با تمرکز بر اثر اصطکاک، مدل‌های مختلفی بررسی شد و مدل افکاتی کمترین نیرو و زمان بحرانی را ارائه داد. نتایج بیانگر بهبود عملکرد نسبت به مدل‌های پیشین هستند.

در این مقاله، با توجه به نقش کلیدی زمان بحرانی در فاز اول فرآیند نانومنیپولیشن، تأثیر پارامترهای هندسی تیرک و سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی بر این مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پنج پارامتر شامل ضخامت، عرض و طول تیرک،



شکل ۱ چکیده گرافیکی پژوهش

پاسخ‌های احتمالی خواهد بود. طراحی آزمایش به شیوه‌های تک عاملی، فاکتوریل، سطح پاسخ و تاکوچی امکان‌پذیر است. در این مطالعه تأثیر پارامترهای ابعادی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی بر زمان بحرانی منیپولیشن بررسی گردیده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۱) قابل مشاهده است.

در این تحقیق ۲۷ آزمایش با فرض سه سطح برای هر پارامتر تعریف شده است. انتخاب سه سطح برای هر عامل، امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار سیستم در بازه‌ای گسترده‌تر از مقادیر متغیرها را فراهم می‌سازد و در عین حال از پیچیدگی بیش از حد طراحی جلوگیری می‌کند. سطوح تعیین شده در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول ۲ سطوح تعیین شده متغیرها

| شماره | عرض  | طول  | ارتفاع | شعاع | ضخامت |
|-------|------|------|--------|------|-------|
| تیرک  | تیرک | تیرک | سوزن   | سوزن | تیرک  |
| ۱     | ۴۰   | ۲۰۰  | ۱۰     | ۲۰   | سطح ۱ |
| ۱/۲۵  | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۲۵   | سطح ۲ |
| ۱/۵   | ۶۰   | ۲۵۰  | ۱۴     | ۳۰   | سطح ۳ |

## تحلیل نتایج

### نتایج آنالیز واریانس

در جدول (۳) نشان داده می‌شود که هر کدام از متغیرهای ورودی مدل شامل ضخامت، عرض و طول تیرک، همچنین ارتفاع و شعاع سوزن چه اثری بر زمان بحرانی منیپولیشن دارند. در این جدول مقدار ضریب، سطح معناداری و هم‌خطی متغیرها بررسی شده است. نتایج حاصل شده بدین معنی است که هر کدام در تغییر زمان بحرانی نقش دارند، اما شدت و نوع اثرشان متفاوت است.

در ادامه، میزان قدرت مدل رگرسیون در پیش‌بینی تغییرات زمان بحرانی بررسی شده است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) نشان می‌دهد که چه درصدی از تغییرات زمان بحرانی توسط این مدل و متغیرهای ورودی قابل پیش‌بینی است. باتوجه به جدول (۴) مدل عملکرد بسیار خوبی دارد؛ چراکه بیش از ۹۰ درصد تغییرات زمان بحرانی را توضیح می‌دهد. همچنین مقدار تعدیل شده و پیش‌بینی نیز نشان می‌دهند که ضمن لحاظ کردن تعداد متغیرها در مدل، مدل از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار است. همچنین که این مدل نه تنها برای داده‌های فعلی بلکه برای داده‌های جدید نیز می‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد.

جدول ۱ طراحی آزمایش پارامترهای مؤثر بر زمان بحرانی

| ضخامت | عرض  | طول  | ارتفاع | شعاع | شماره  |
|-------|------|------|--------|------|--------|
| تیرک  | تیرک | تیرک | سوزن   | سوزن | آزمایش |
| ۱     | ۶۰   | ۲۰۰  | ۱۰     | ۲۰   | ۱      |
| ۱     | ۴۰   | ۲۰۰  | ۱۰     | ۳۰   | ۲      |
| ۱     | ۴۰   | ۲۰۰  | ۱۴     | ۲۰   | ۳      |
| ۱     | ۶۰   | ۲۰۰  | ۱۴     | ۳۰   | ۴      |
| ۱     | ۴۰   | ۲۵۰  | ۱۰     | ۲۰   | ۵      |
| ۱     | ۶۰   | ۲۵۰  | ۱۰     | ۳۰   | ۶      |
| ۱     | ۶۰   | ۲۵۰  | ۱۴     | ۲۰   | ۷      |
| ۱     | ۴۰   | ۲۵۰  | ۱۴     | ۳۰   | ۸      |
| ۱     | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۲۵   | ۹      |
| ۱/۲۵  | ۴۰   | ۲۰۰  | ۱۰     | ۲۰   | ۱۰     |
| ۱/۲۵  | ۶۰   | ۲۰۰  | ۱۰     | ۳۰   | ۱۱     |
| ۱/۲۵  | ۶۰   | ۲۰۰  | ۱۴     | ۲۰   | ۱۲     |
| ۱/۲۵  | ۴۰   | ۲۰۰  | ۱۴     | ۳۰   | ۱۳     |
| ۱/۲۵  | ۶۰   | ۲۵۰  | ۱۰     | ۲۰   | ۱۴     |
| ۱/۲۵  | ۴۰   | ۲۵۰  | ۱۰     | ۳۰   | ۱۵     |
| ۱/۲۵  | ۴۰   | ۲۵۰  | ۱۴     | ۲۰   | ۱۶     |
| ۱/۲۵  | ۶۰   | ۲۵۰  | ۱۴     | ۳۰   | ۱۷     |
| ۱/۲۵  | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۲۵   | ۱۸     |
| ۱/۵   | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۲۰   | ۱۹     |
| ۱/۵   | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۳۰   | ۲۰     |
| ۱/۵   | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۰     | ۲۵   | ۲۱     |
| ۱/۵   | ۴۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۲۵   | ۲۲     |
| ۱/۵   | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۲۵   | ۲۳     |
| ۱/۵   | ۶۰   | ۲۲۵  | ۱۲     | ۲۵   | ۲۴     |
| ۱/۵   | ۵۰   | ۲۰۰  | ۱۲     | ۲۵   | ۲۵     |
| ۱/۵   | ۵۰   | ۲۲۵  | ۱۴     | ۲۵   | ۲۶     |
| ۱/۵   | ۵۰   | ۲۵۰  | ۱۲     | ۲۵   | ۲۷     |

## طراحی آزمایش

روش‌های متعددی برای انجام آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها وجود دارد. یکی از روش‌های کاربردی و کم‌هزینه، روش طراحی آزمایش‌ها است. این روش آماری قادر است تا ضمن کاهش در میزان هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها، تحلیل کارآمد و دقیقی داشته باشد. استخراج معادله با استفاده از داده‌ها، ضمن بررسی اثر هم‌زمان متغیرهای خروجی بر ورودی از توانمندی‌های قابل توجه این روش به حساب می‌آید. نوع و روش‌های مورد استفاده در طراحی آزمایش بر مبنای ماهیت نوع آزمایش، تعداد متغیر و

در ادامه، داده‌های آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. این تحلیل وجود مورد خاص یا غیرطبیعی در میان داده‌ها را مطالعه می‌کند. بر اساس نتایج که در جدول (۶) به‌دست‌آمده تنها یک داده شناسایی شده که مقدار آن بیشتر از حد معمول بوده است. این مسئله می‌تواند به دلیل خطای اندازه‌گیری، شرایط خاص آزمایش یا ویژگی‌های منحصر به فرد در آن شرایط باشد.

در ادامه کارآمدی مدل رگرسیون توسط آنالیز واریانس مورد بررسی می‌گیرد تا مشخص گردد که هر کدام از متغیرها چقدر در تغییر زمان بحرانی مؤثرند. نتایج جدول (۵) بیانگر آن است که مدل به‌صورت کلی معنادار است. در میان متغیرها، ضخامت تیرک بیشترین سهم را در تغییرات زمان بحرانی دارد. سایر متغیرها نیز تأثیر قابل توجهی دارند.

جدول ۳ ضرایب و اثر گذاری پارامترها

| ترم‌ها          | ضرایب    | خطای معیار | T-Value | P-Value | VIF  |
|-----------------|----------|------------|---------|---------|------|
| مقادیر ثابت     | ۰/۵۳۹    | ۰/۱۵۴      | ۳/۵۰    | ۰/۰۰۲   |      |
| ضخامت تیرک (T)  | -۰/۵۷۳۳  | ۰/۰۴۴۴     | -۱۲/۹۲  | ۰/۰۰۰   | ۱/۰۰ |
| عرض تیرک (W)    | -۰/۰۰۴۳۹ | ۰/۰۰۱۱۱    | -۳/۹۶   | ۰/۰۰۱   | ۱/۰۰ |
| طول تیرک (L)    | ۰/۰۰۱۰۴۴ | ۰/۰۰۰۴۴۴   | ۲/۳۵    | ۰/۰۲۸   | ۱/۰۰ |
| ارتفاع سوزن (H) | ۰/۰۲۵۰۰  | ۰/۰۰۵۵۵    | ۴/۵۱    | ۰/۰۰۰   | ۱/۰۰ |
| شعاع سوزن (Rt)  | ۰/۰۰۴۸۹  | ۰/۰۰۲۲۲    | ۲/۲۰    | ۰/۰۳۹   | ۱/۰۰ |

جدول ۴ قابلیت اطمینان مدل

| ضریب تعیین پیش‌بینی | ضریب تعیین تعدیل شده | ضریب تعیین | انحراف معیار |
|---------------------|----------------------|------------|--------------|
| ۸۴/۷۷%              | ۸۸/۹۱%               | ۹۱/۰۴%     | ۰/۰۴۷۰۵۶۲    |

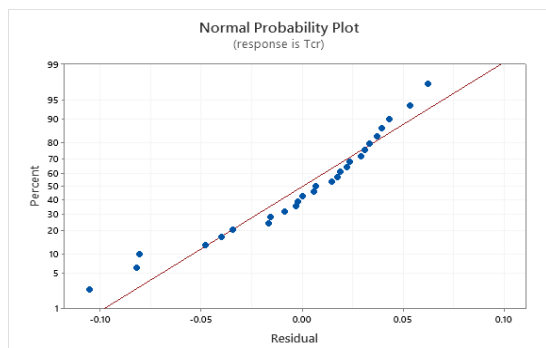
جدول ۵ واریانس

| منابع           | درجه آزادی | جمع مجزورات | میانگین مربعات | F-Value | P-Value |
|-----------------|------------|-------------|----------------|---------|---------|
| رگرسیون         | ۵          | ۰/۴۷۲۵۰     | ۰/۰۹۴۵۰۰       | ۴۲/۶۸   | ۰/۰۰۰   |
| ضخامت تیرک (T)  | ۱          | ۰/۳۶۹۸۰     | ۰/۳۶۹۸۰۰       | ۱۶۷/۰۱  | ۰/۰۰۰   |
| عرض تیرک (W)    | ۱          | ۰/۰۳۴۶۷     | ۰/۰۳۴۶۷۲       | ۱۵/۶۶   | ۰/۰۰۱   |
| طول تیرک (L)    | ۱          | ۰/۰۱۲۲۷     | ۰/۰۱۲۲۷۲       | ۵/۵۴    | ۰/۰۲۸   |
| ارتفاع سوزن (H) | ۱          | ۰/۰۴۵۰۰     | ۰/۰۴۵۰۰۰       | ۲۰/۳۲   | ۰/۰۰۰   |
| شعاع سوزن (Rt)  | ۱          | ۰/۰۱۰۷۶     | ۰/۰۱۰۷۵۶       | ۴/۸۶    | ۰/۰۳۹   |
| خطا             | ۲۱         | ۰/۰۴۶۵۰     | ۰/۰۰۲۲۱۴       |         |         |
| کل              | ۲۶         | ۰/۵۱۹۰۰     |                |         |         |

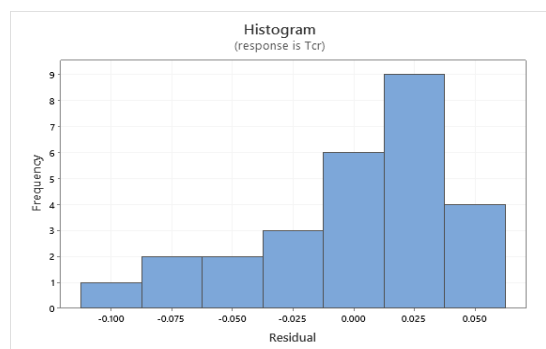
جدول ۶ آنالیز داده‌های غیرعادی

| داده بزرگ | باقی‌مانده استاندارد | باقی‌مانده | پردازش شده | مقدار واقعی | داده غیرعادی |
|-----------|----------------------|------------|------------|-------------|--------------|
| R         | -۲/۶۱                | -۰/۱۰۵۶    | ۰/۲۱۵۶     | ۰/۱۱۰۰      | ۱۲           |

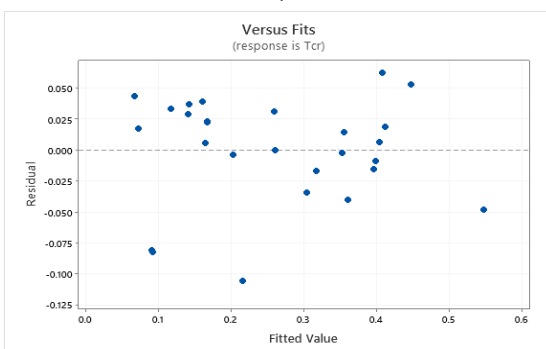
پراکندگی ناشی از اثرگذاری هم‌زمان چند پارامتر کلیدی است که در ادامه با تحلیل‌های آماری و گرافیکی بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.



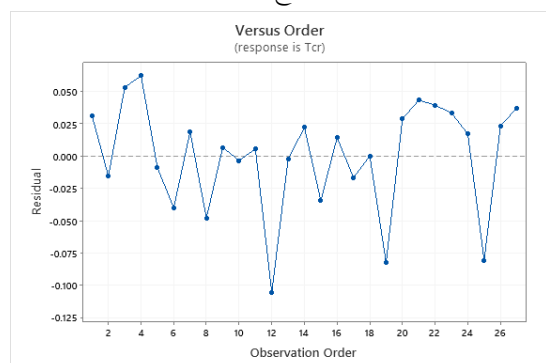
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲ نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها

معادله رگرسیون استخراج شده در رابطه (۱) قابل مشاهده است.

$$T_{cr} = 0.539 - 0.5733 T - 0.00439 W + 0.001044 L + 0.02500 H + 0.00489 Rt \quad (1)$$

به منظور ارزیابی صحت و اعتبار مدل رگرسیون، نمودارهای باقی‌مانده ترسیم شده است که در ادامه به بررسی آنها خواهیم پرداخت. در نمودار (الف)، توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها رسم شده‌اند. در صورتی که توزیع نرمال باشد، نقاط باید تقریباً بر روی یک خط راست قرار گیرند. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌گردد، اغلب نقاط در راستای خط نرمال قرار گرفته و انحراف محسوسی مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مفروضات رگرسیون است. نمودار (ب) نحوه پراکندگی فراوانی باقی‌مانده‌ها را نمایش می‌دهد. شکل هیستوگرام در این مطالعه به حالتی متقارن حول میانگین نزدیک به صفر بود. عدم وجود کشیدگی در توزیع باقی‌مانده‌ها، نشان‌دهنده تعادل پراکندگی خطاها در مدل است. مقادیر باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده در نمودار (ج) نشان داده شده است. در این نمودار، پراکندگی باقی‌مانده‌ها بدون الگوی مشخص و به صورت تصادفی مشاهده شد که نشان‌دهنده همگنی واریانس و عدم وجود واریانس ناهمگن در مدل است. تنها مقدار ۱۲ که یک باقی‌مانده نسبتاً بزرگ است که می‌تواند به عنوان نقطه پرت احتمالی در نظر گرفته شود، هرچند تأثیر معناداری بر کل مدل نداشته است. در نهایت نمودار (د)، باقی‌مانده‌ها بر اساس ترتیب ورود داده‌ها به مدل نشان می‌دهد. بر مبنای نتایج، باقی‌مانده‌ها به صورت پراکنده و بدون الگوی منظم در طول مشاهدات توزیع شده‌اند که نشان می‌دهد خطاها از یکدیگر مستقل بوده و مدل از لحاظ استقلال خطاها قابل قبول است.

جدول (۷) مقادیر زمان بحرانی را برای ۲۷ آزمایش مختلف نشان می‌دهد. این مقادیر در نتیجه تغییر پارامترها در هر آزمایش به دست آمده‌اند و هدف از ثبت آن‌ها، بررسی تأثیر متقابل متغیرها بر زمان بحرانی فرآیند مورد مطالعه است. بر اساس داده‌ها، زمان بحرانی در بازه‌ای بین ۰/۰۱ تا ۰/۵ ثانیه قرار دارد که بیانگر حساسیت بالای این پاسخ به تغییرات شرایط آزمایش است. این

جدول ۷ مقادیر زمان بحرانی منیپولیشن

| زمان بحرانی | شماره آزمایش |
|-------------|--------------|
| ۰/۲۹        | ۱            |
| ۰/۳۸        | ۲            |
| ۰/۵۰        | ۳            |
| ۰/۴۷        | ۴            |
| ۰/۳۹        | ۵            |
| ۰/۳۲        | ۶            |
| ۰/۴۳        | ۷            |
| ۰/۵۰        | ۸            |
| ۰/۴۱        | ۹            |
| ۰/۲۰        | ۱۰           |
| ۰/۱۷        | ۱۱           |
| ۰/۱۱        | ۱۲           |
| ۰/۳۵        | ۱۳           |
| ۰/۱۹        | ۱۴           |
| ۰/۲۷        | ۱۵           |
| ۰/۳۷        | ۱۶           |
| ۰/۳۰        | ۱۷           |
| ۰/۲۶        | ۱۸           |
| ۰/۰۱        | ۱۹           |
| ۰/۱۷        | ۲۰           |
| ۰/۱۱        | ۲۱           |
| ۰/۲۰        | ۲۲           |
| ۰/۱۵        | ۲۳           |
| ۰/۰۹        | ۲۴           |
| ۰/۰۱        | ۲۵           |
| ۰/۱۹        | ۲۶           |
| ۰/۱۸        | ۲۷           |

افزایش آن، زمان بحرانی کاهش می‌یابد. روند نزولی شیب نمودار در هر دو محور به‌خوبی نشان‌دهنده تأثیر معنادار و همسو این دو پارامتر بر زمان بحرانی است. روند تغییرات زمان بحرانی در برابر طول تیرک و ضخامت تیرک در نمودار (ب) بررسی شده است. با افزایش ضخامت تیرک، مشابه آنچه در نمودار قبل دیده می‌شود، مقدار زمان بحرانی کاهش می‌یابد. در مقابل، با افزایش طول تیرک، مقدار زمان بحرانی افزایش یافته و سطح نمودار، شیب مثبت در راستای محور طول تیرک دارد. این موضوع حاکی از آن است که طول تیرک دارای اثر افزایشی و ضخامت تیرک دارای اثر کاهشی بر پاسخ زمان بحرانی می‌باشند. نتایج نمودار (پ) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت تیرک، موجب کاهش یکنواخت زمان بحرانی است. همچنین متغیر ارتفاع سوزن اثر افزایشی بر زمان بحرانی دارد؛ به‌طوری که با افزایش ارتفاع سوزن، مقدار زمان بحرانی افزایش یافته است. ترکیب این دو روند، سطحی با شیب متضاد در دو محور ضخامت تیرک و ارتفاع سوزن ایجاد کرده است. در نمودار (ت)، مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت تیرک می‌تواند به کاهش مقدار زمان بحرانی منجر شود، درحالی که افزایش مقدار شعاع سوزن موجب افزایش زمان بحرانی شده است. سطح نمودار حاصل شده به‌خوبی نمایانگر این رفتار متضاد در محورهای ضخامت تیرک و شعاع سوزن می‌باشد. بر اساس نمودار (ث)، افزایش طول تیرک منجر به افزایش مقدار زمان بحرانی شده و متعاقباً افزایش عرض تیرک سبب کاهش آن می‌شود. نمودار دارای شیب مثبت در راستای محور طول تیرک و شیب منفی در راستای محور عرض تیرک است که نشان‌دهنده اثر متقابل و معکوس این دو متغیر بر زمان بحرانی است.

بر مبنای آنچه در نمودار (ج) مشاهده می‌گردد، افزایش ارتفاع سوزن باعث افزایش مقدار زمان بحرانی و افزایش عرض تیرک منجر به کاهش آن می‌شود. نمودار سطح پاسخ نشان می‌دهد که اثر ارتفاع سوزن به طور نسبی از عرض تیرک برجسته‌تر است، چراکه میزان شیب در راستای ارتفاع سوزن بیش از عرض تیرک است. نتایج حاصل از نمودار (چ) نشان می‌دهد که افزایش شعاع سوزن منجر به افزایش زمان بحرانی و افزایش عرض تیرک باعث کاهش آن خواهد شد. همانند نمودارهای پیشین، اثر شعاع سوزن مثبت و اثر عرض تیرک منفی بوده و سطح نمودار نیز توانسته این روند را به‌خوبی منعکس می‌کند. در نمودار (ح)، مشاهده می‌شود که هر دو متغیر ارتفاع سوزن و طول تیرک دارای اثر افزایشی بر زمان بحرانی هستند. سطح نمودار در این حالت

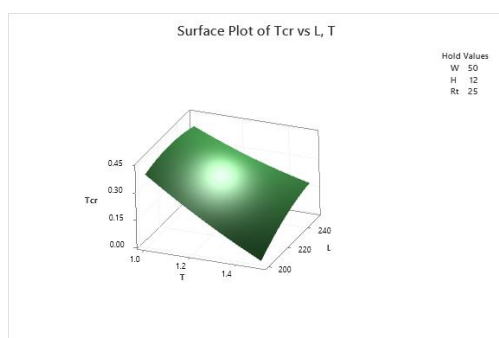
### نتایج آنالیز حساسیت پارامترها

به‌منظور بررسی روابط متقابل میان پارامترها مختلف فرآیندی و ارزیابی نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر زمان بحرانی، مجموعه‌ای از نمودارهای سه‌بعدی ترسیم گردیده است. شکل (۳) نمایی بصری از سطوح پاسخ در شرایط مختلف را ارائه می‌دهند و امکان تحلیل اثرات تعاملی عوامل را میسر می‌سازد.

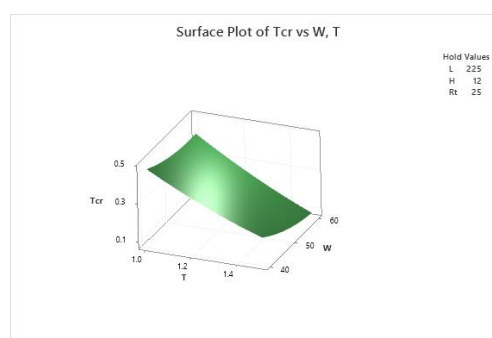
در نمودار (الف) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ضخامت تیرک، مقدار زمان بحرانی به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد. همچنین اثر عرض تیرک نیز به‌صورت منفی بوده و با

بر میزان زمان بحرانی است. مطابق نمودار (د)، افزایش مقدار شعاع سوزن و طول تیرک هر دو موجب افزایش زمان بحرانی می‌شوند. شدت تأثیر شعاع سوزن نسبت به طول تیرک اندکی بیشتر بوده و سطح نمودار دارای شیب مثبت در راستای هر دو پارامتر است.

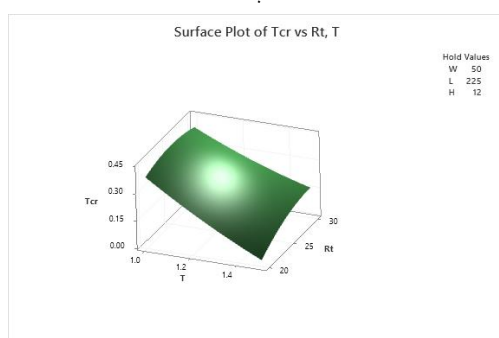
به صورت صعودی در هر دو راستای محورهای ارتفاع سوزن و طول تیرک است که این امر حاکی از هم‌افزایی مثبت این دو متغیر بر مقدار زمان بحرانی می‌باشد. در نمودار (د)، افزایش هر یک از عوامل شعاع سوزن و ارتفاع سوزن منجر به افزایش مقدار زمان بحرانی می‌شود. سطح حاصل شده دارای شیب مثبت در هر دو راستا است که گویای اثرات متقابل و افزایشی این دو متغیر



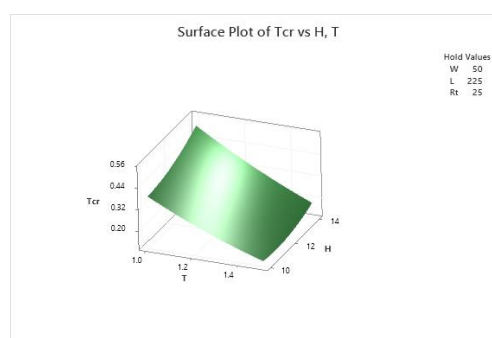
(ب)



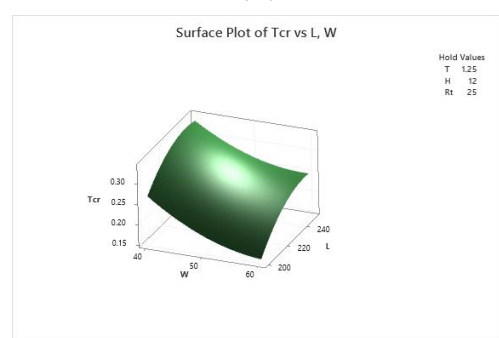
(الف)



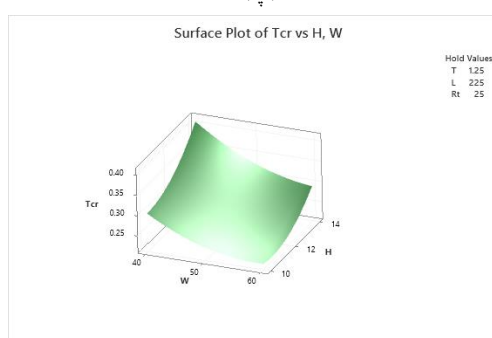
(ت)



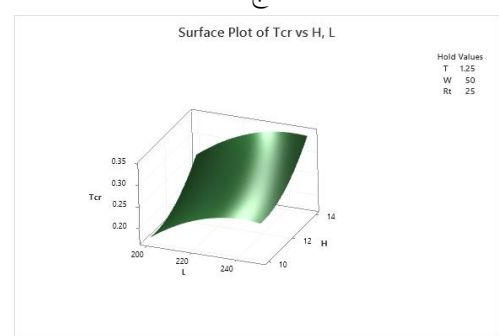
(پ)



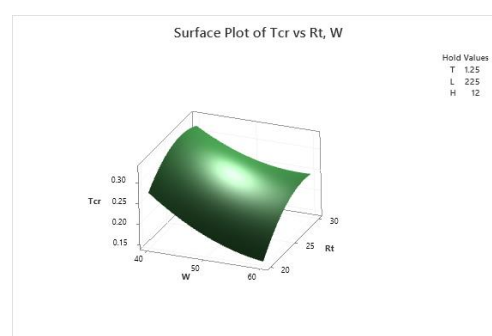
(ج)



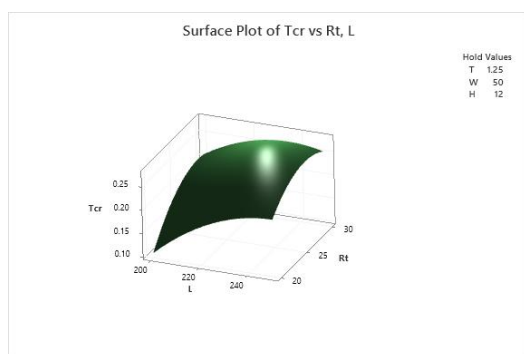
(ث)



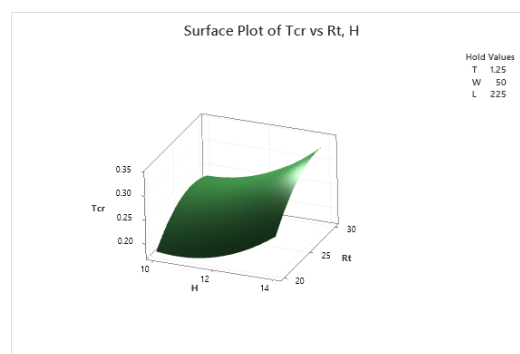
(ح)



(چ)



(ذ)



(د)

شکل ۳ نمودار تأثیر پارامترهای موردبررسی بر روی زمان بحرانی

### نتیجه گیری

پیشرفت‌های سریع علم نانو، توانسته به کارگیری آنها را در زمینه‌های متفاوت ارتقا دهد. منیپولیشن یکی از فرآیندهای مشهوری است با نانوذرات سروکار دارد. در طی این فرآیند با به کارگیری میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی، شناسایی خواص ماده و جابه‌جایی آن ممکن است.

غلبه بر نیروی اصطکاک توسط سوزن میکروسکوپ، فاز اول منیپولیشن و راندن نانوذره فاز دوم این فرآیند است.

در این مطالعه با در نظر گرفتن اهمیت زمان بحرانی در فاز اول منیپولیشن، پارامترهای ابعادی تیرک و سوزن میکروسکوپ موردبررسی قرار گرفته است. ابتدا ۲۷ آزمایش با در نظر گرفتن سه سطح برای هر پارامتر انجام گرفته است. سپس با استفاده از روش آنالیز واریانس میزان اثرگذاری متغیرها برآورد گردیده است. در ادامه، مدل رگرسیون بر پایه داده‌ها استخراج شده است. آنالیزهای صورت گرفته قابلیت اطمینان این مدل را ۹۱/۰۴٪ برآورد می‌کند. این امر قابلیت پیش‌بینی مناسب مدل را تأیید می‌کند. در نهایت با روش سطح پاسخ تأثیر پارامترها بر زمان بحرانی منیپولیشن به صورت جداگانه تحلیل شده است. نتایج به دست آمده از نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ تبیین می‌کند که ضخامت تیرک می‌تواند موجب تغییرات قابل توجه زمان بحرانی شود.

این نتایج می‌تواند به عنوان مبنایی در جهت پیش‌بینی و بهینه‌سازی شرایط در فرآیندهای مشابه به کار گرفته شده و در مطالعات آتی توسعه یابد.

### فهرست علائم و اختصارات

#### علائم انگلیسی

H

ارتفاع سوزن

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| L               | طول تیرک    |
| Rt              | شعاع سوزن   |
| T               | ضخامت تیرک  |
| W               | عرض تیرک    |
| T <sub>cr</sub> | زمان بحرانی |

### واژه نامه

| پیشنهادی نویسنده                 | واژه لاتین                           | پیشنهادی ویراستار   |
|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| میکروسکوپ نیروی اتمی             | Atomic force microscopy              | میکروسکوپی؛ ریزبینی |
| تری آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان | 3aminopropyltriethoxy silane (APTES) |                     |
| دابل هرتز                        | Double-Hertz                         |                     |
| مدل‌های الاستیک                  | Elastic Models                       |                     |
| نانوذرات لیپیدی                  | lipid nanoparticles                  |                     |
| لیپوزوم‌ها                       | Liposomes                            |                     |
| نانو منیپولیشن                   | Nano manipulation                    | دستکاری نانو        |
| منیپولیشن نوری                   | optical manipulation                 | دستکاری نوری        |

|                                     |  |                  |
|-------------------------------------|--|------------------|
| کشسان<br>گرانرو،<br>کشسان<br>سخت‌رو |  | ویسکوالاس<br>تیک |
|-------------------------------------|--|------------------|

## تقدیر و تشکر

|               |                     |                 |
|---------------|---------------------|-----------------|
|               | optical diffraction | پراش نوری       |
| مالش<br>چرخشی | Rolling friction    | اصطکاک<br>چرخشی |
| مالش لغزشی    | Sliding friction    | اصطکاک<br>لغزشی |
| مدل های       | Viscoelastic Models | مدل های         |

## مراجع

- [1] S. Yuan, L. Liu, Z. Wang, N. Xi, Y. Wang, "Study of nano-manipulation approach based on the least action principle using AFM-based robotic system," in Proceeding 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China, 26–28 Jul. 2017, pp. 4424–4429. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028055>
- [2] M. H. Korayem, M. Mozafari, Y. H. Sooha, Z. Rastegar, "Development and application of rough viscoelastic contact models in the first phase of 3D manipulation for biological micro-/nanoparticles by AFM," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91, no. 9, pp. 3739–3753, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01967-5>
- [3] M. H. Korayem, S. Shahali, Z. Rastegar, "Simulation of 3D nanomanipulation for rough spherical elastic and viscoelastic particles in a liquid medium; experimental determination of cell's roughness parameters and Hamaker constant's correction," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 90, pp. 313–327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.10.007>
- [4] M. H. Korayem and R. N. Hefzabad, "Nonlinear modeling of nanoscale interaction forces between atomic force microscope and carbon nanotubes," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 161, p. 104690, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104690>
- [5] M. H. Korayem, A. A. Farid, R. N. Hefzabad, "Nonclassical dynamic modeling of nano/microparticles during nanomanipulation processes," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 11, no. 1, pp. 147–166, 2020. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.13>
- [6] G. Wang, Y. Ding, H. Long, Y. Guan, X. Lu, Y. Wang, L. Yang, "Simulation of Optical Nano-Manipulation with Metallic Single and Dual Probe Irradiated by Polarized Near-Field Laser," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, p. 815, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12020815>
- [7] A. Craciun, B. Donnio, J. Gallani, M. Rastei, "High-resolution manipulation of gold nanorods with an atomic force microscope," *Nanotechnology*, vol. 31, no. 8, p. 085302, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab5404>
- [8] T. Zhang, H. Yu, P. Li, X. Wang, F. Wang, J. Shi, Z. Liu, P. Yu, W. Yang, Y. Wang, "Microsphere-based super-resolution imaging for visualized nanomanipulation," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 42, pp. 48093–48100, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12126>
- [9] C. Hou, D. Sun, L. Dong, "Nanomanipulation in biomedical applications," *Current Robotics Reports*, vol. 2, pp. 133–145, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00047-4>

- [10] Y. Yin, H. Xu, Y. Wang, Z. Liu, S. Zhang, Z. Weng, Z. Song, Z. Wang, "Improving adhesion between nanoparticles and surface of mica substrate by aminosilane modification," *Plasmonics*, vol. 15, no. 2, pp. 399–407, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-01030-8>
- [11] X. Ma, W. Wang, G. Xie, D. Guo, S. Wen, "Friction measurement and motion state determination of a single polystyrene nanoparticle during manipulation," *Micro & Nano Letters*, vol. 15, no. 15, pp. 1140–1145, 2020. <https://doi.org/10.1049/mnl.2020.0383>
- [12] Y. Wen, H. Lu, Y. Shen, H. Xie, "Nanorobotic Manipulation System for 360° Characterization Atomic Force Microscopy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2916–2924, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2910042>
- [13] Y. Takechi-Haraya, "Atomic Force Microscopy to Measure the Mechanical Property of Nanosized Lipid Vesicles and Its Applications," *Yakugaku Zasshi: Journal of the Pharmaceutical Society of Japan*, vol. 144, no. 5, pp. 511–519, 2024. <https://doi.org/10.1248/yakushi.23-00178-2>
- [14] M. Taheri, H. Faraji, and P. Karimi, "Manipulation of breast cell tissue with the aim of calculating Young's modulus, using Tatara contact theory and atomic force microscopy," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 1–16, 2023.
- [15] M. Taheri, "Investigation of new friction models in two-dimensional manipulation of gastric cancer tissue," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 1–16, 2023.

