

## مدل‌سازی نیروی بحرانی منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها

معین طاهری<sup>۱</sup><sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

## چکیده

در این پژوهش، مدل‌سازی نیروی بحرانی منیپولیشن ذرات در فضای سه‌بعدی با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، تحلیل تأثیر عوامل هندسی و کنترلی بر نیروی بحرانی لازم جهت منیپولیشن ذره با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) بود. پنج پارامتر کلیدی شامل شعاع ذره، ضخامت تیرک، طول تیرک، عرض تیرک و ارتفاع سوزن به‌عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شدند و نیروهای بحرانی در راستاهای X و Y به‌عنوان پاسخ‌های خروجی مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفتند. با اجرای ۲۷ آزمایش طراحی‌شده و تحلیل آماری نتایج حاصل از مدل رگرسیونی استخراج شده، مشخص شد که پارامترهای ضخامت تیرک و شعاع ذره بیشترین تأثیر را در افزایش نیروی بحرانی منیپولیشن دارند، درحالی‌که افزایش طول تیرک و ارتفاع سوزن منجر به کاهش این نیرو می‌شود. بررسی نمودارهای سه‌بعدی نشان داد که تأثیر متقابل پارامترها بر نیروی بحرانی قابل توجه بوده و عملکرد نهایی منیپولیشن به ترکیب مناسب ویژگی‌های هندسی و فیزیکی وابسته است. همچنین، تحلیل باقیمانده‌ها، توزیع نرمال خطا و دقت بالای مدل ( $R^2 > 0.99$ ) را تأیید کرد. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی و توسعه بهینه ابزارهای منیپولیشن مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** نانومنیپولیشن سه‌بعدی؛ نیروی بحرانی؛ طراحی آزمایش؛ مدل رگرسیون؛ پارامترهای هندسی.

## Modeling of the critical force in three-dimensional manipulation using the design of experiments method

M.Taheri<sup>1</sup><sup>1</sup> Assoc. Prof., Department of Manufacturing Engineering, Arak University, Arak, Iran.

### Abstract

In this study, the modeling of the critical manipulation force of particles in three-dimensional space was investigated using the Design of Experiments (DoE) approach. The main objective was to analyze the influence of geometric and control parameters on the critical force required for particle manipulation using an Atomic Force Microscope (AFM). Five key parameters, including particle radius ( $R_p$ ), cantilever thickness ( $T$ ), cantilever length ( $L$ ), cantilever width ( $W$ ), and tip height ( $H$ ) were selected as input variables, while the critical forces in the X and Y directions were modeled and analyzed as output responses. Based on the results from 27 designed experiments and the statistical analysis of the derived regression model, it was found that cantilever thickness and particle radius had the most significant impact on increasing the critical manipulation force, whereas increasing the cantilever length and tip height led to a reduction in this force. The 3D surface plots revealed that the interaction effects between the parameters were considerable, and the overall manipulation performance strongly depended on the appropriate combination of geometric and physical properties. Additionally, residual analysis confirmed the normal distribution of errors and the high accuracy of the model ( $R^2 > 99\%$ ). The findings of this study can serve as a foundation for the optimal design and development of advanced manipulation tools.

**Keywords:** Three-dimensional nanomanipulation; critical force; design of experiments; regression model; and geometric parameters.

## ۱- مقدمه

منیپولیشن ذرات در ابعاد میکرو و نانو، به‌ویژه در فضای سه‌بعدی، یکی از چالش‌های اساسی در زمینه‌هایی چون نانوفناوری، زیست‌فناوری و ساختاردهی دقیق مواد محسوب می‌شود. این فرایند به جابه‌جایی کنترل‌شده ذرات بسیار کوچک با استفاده از ابزارهایی چون میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۱</sup> AFM متکی است که دقت و پایداری بالایی را در محیط‌های مقیاس نانو فراهم می‌آورد. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در این حوزه، یکی از مسائل مهم، تعیین نیروی بحرانی موردنیاز برای آغاز حرکت ذره است؛ نیرویی که بر غلبه بر نیروهای چسبندگی سطحی، اصطکاک و مقاومت تماس غلبه می‌کند و موفقیت منیپولیشن را تضمین می‌نماید.

در پژوهش‌های اخیر، برای بررسی دقیق نیروهای برهم‌کنش میان میکروسکوپ نیروی اتمی و نانولوله‌های کربنی، مدل‌های غیرخطی و غیرکلاسیک به کار گرفته شده‌اند. در این مطالعات رفتار مکانیکی نانو ساختارها را با استفاده از نظریه‌های تماس و تیر تیموشنکو<sup>۲</sup> تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثرات مقیاسی نقش مهمی در دقت مدل‌سازی دارد، به طوری که تفاوت میان مدل‌های کلاسیک و غیرکلاسیک در شرایط خاص می‌تواند قابل‌توجه باشد. [۱]

مهندسی نانو ساختاری سطح ایمپلنت‌ها به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود آن‌ها شناخته شده است. از جمله روش‌های پیشرفته برای تحلیل تعاملات سطح ایمپلنت با سلول‌ها، می‌توان به استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی اشاره کرد. مطالعات اخیر بر استفاده از طیف‌سنجی نیروی تک‌سلولی (SCFS)<sup>۳</sup> متمرکز شده‌اند که از طریق آن می‌توان نیروهای چسبندگی میان سلول منفرد و سطح ایمپلنت را ارزیابی کرد. این رویکرد، چشم‌انداز جدیدی برای طراحی نسل بعدی ایمپلنت‌های زیست‌فعال فراهم می‌سازد. [۲]

قابلیت منحصربه‌فرد میکروسکوپ نیروی اتمی علاوه بر تصویرسازی توپوگرافی، امکان اندازه‌گیری خواص مکانیکی و دست‌کاری مستقیم مولکول‌ها و سلول‌ها را فراهم کرده است. استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در بررسی پروتئین‌ها،

RNA، DNA و سلول‌ها، درک بهتری از ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها ارائه داده و افق‌های نوینی در نانوپزشکی گشوده است. [۳] با توجه به مطالعات انجام شده ترکیب میکروسکوپ نیروی اتمی با سیستم میکرومنیپولیشن میکروپیت<sup>۴</sup>، امکان انجام دست‌کاری‌های سه‌بعدی و اندازه‌گیری‌های نانومکانیکی دقیق را فراهم کرده است. این روش با تثبیت فیزیکی سلول‌های زنده میکرونی، ویژگی‌های ویسکوالاستیک سلول‌ها را به‌صورت کمی بررسی کرده و تغییرات مکانیکی سلول را در شرایط مختلف آشکار می‌سازد. [۴]

در مطالعه‌ای مروری پیشرفت‌های میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که مشاهده نمونه‌های زیستی در محیط طبیعی و در مقیاس میکروسکوپی برای مطالعه فرایندهای دینامیک زیستی و تعاملات پیچیده آن‌ها اهمیت زیادی دارد. توسعه قابلیت‌ها این ابزار را به‌گزینه‌ای توانمند برای تحقیقات زیست‌پزشکی تبدیل کرده است. [۵] استفاده از حسگر کیوپلاس<sup>۵</sup> در میکروسکوپ نیروی اتمی موضوع مطالعه گیسبیل [۶] بوده است. این حسگر بر پایه کوارتز و سختی بالا، نسبت به کانتیلیورهای سیلیکونی، امکان نوسان در دامنه‌های بسیار کوچک و دستیابی به وضوح فضایی بالا در مجاورت سطوح واکنش‌پذیر را فراهم می‌سازد. این فناوری در مطالعات پیشرفته مواد کاربردهای گسترده‌ای یافته است.

با توجه به مطالعه کانپا و همکاران [۷] میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه و دست‌کاری نانومقیاس است که امکان اصلاح موضعی نمونه‌ها، تحلیل پاسخ مکانیکی لایه دی‌ان‌ای<sup>۶</sup> نسبت به تغییرات محیطی و ساخت پلتفرم‌های آن با چگالی مولکولی تنظیم‌شده را فراهم می‌کند. همچنین، ترکیب AFM با روش‌های تحلیلی دیگر، می‌تواند تفسیر جامع‌تری از واکنش‌های بیوشیمیایی مرتبط ارائه می‌دهد.

با وجود قابلیت‌های گسترده میکروسکوپ نیروی اتمی در تصویربرداری دوبعدی و سه‌بعدی محدود، دستیابی به بازسازی کامل ۳۶۰ درجه از توپوگرافی و ویژگی‌های نانومکانیکی نمونه‌ها همچنان چالش‌برانگیز است. استفاده از سامانه‌های نانو روباتیک<sup>۷</sup> با شش درجه آزادی، امکان چرخش دقیق نمونه و

<sup>۵</sup> qPlus

<sup>۶</sup> DNA

<sup>۷</sup> nanorobotic manipulation system (NMS)

<sup>۱</sup> Atomic force microscopy (AFM)

<sup>۲</sup> Timoshenko

<sup>۳</sup> single-cell force spectroscopy (SCFS)

<sup>۴</sup> micropipette micromanipulation

سطح و زمان بحرانی برای آغاز حرکت ذره اهمیت دارد. با استفاده از مدل اصطکاکی اچ کا و تحلیل حساسیت به روش آماری ای-فست، تأثیر پارامترهای محیطی بر این دو عامل بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته ذره در راستای  $x$  و مدول الاستیسیته سوزن در راستای  $y$  بیشترین تأثیر را بر نیروی و زمان بحرانی غلطش دارند. [۱۳]

در پژوهش دیگر از طاهری و همکاران، میکروسکوپ نیروی اتمی با سه نوع تیرک مختلف برای اندازه‌گیری مدول یانگ بافت سرطانی کبد به کار گرفته شد. شبیه‌سازی بر اساس مدل هرتز و مقایسه با داده‌های تجربی نشان داد که تیرک وی‌شکل دقت بیشتری دارد. [۱۴]

یکی از محدودیت‌های متداول AFM، کارکرد تک‌پروب است که مانع انجام هم‌زمان تصویربرداری و منیپولیشن می‌شود. در یک پژوهش، میکروسکوپ نیروی اتمی با دوپروب (DP-AFM) معرفی شد که امکان استفاده هم‌زمان از دو پروب مستقل در محیط کاری را فراهم می‌کند. این ساختار می‌تواند یک پروب تصویربرداری و دیگری عملیات‌هایی مانند شیپ‌زنی یا منیپولیشن را انجام دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که عمق شیپ‌زنی با دقت در حد نانومتر کنترل‌پذیر است [۱۵].

مطالعات نشان داده است که مدول‌سازی نانومنیپولیشن با AFM می‌تواند به صورت دوبعدی، سه‌بعدی یا بر پایه دینامیک مولکولی انجام شود و روش‌های چندمقیاسی نتایج واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهند. در این میان، جنس و شکل نانوذرات، محیط اجرا، تماس و زبری سطح بیشترین اثر را دارند، در حالی که ابعاد هندسی AFM نقش کمتری دارند. برای نانوذرات نرم، مدول‌های الاستوپلاستیک و ویسکوالاستیک مناسب‌ترند و در محیط‌های غیرخلأ، مدول‌های زبری همراه با ترم‌های چسبندگی دقیق‌تر عمل می‌کنند [۱۶].

ترکیب تصویربرداری و طیف‌سنجی نیروی اتمی در AFM امکان نقشه‌برداری ساختاری و دست‌کاری سه‌بعدی این سامانه‌ها را با دقت مولکولی فراهم می‌سازد. انتظار می‌رود این رویکردها در دهه آینده نقش مهمی در درک و طراحی زیرساخت‌های زیستی و حل چالش‌های اساسی این حوزه ایفا کنند [۱۷].

قابلیت‌هایی مانند تصویربرداری با وضوح بالا، حساسیت نیرو در مقیاس پیکونیوتن و امکان منیپولیشن در شرایط فیزیولوژیک، AFM را به ابزاری کلیدی در زیست‌شناسی

بازسازی سه‌بعدی کامل را فراهم می‌سازد. این رویکرد نوین، تصویربرداری گسترده، دقیق و قابل‌درک از ساختارهای پیچیده را میسر کرده است. [۸]

میکروسکوپ نیروی اتمی امکان تعیین خواص مکانیکی نظیر مدول یانگ را فراهم می‌سازد. روش نانوایندنتیشن مبتنی بر AFM به طور دقیق برای تعیین مدول الاستیسیته نمونه‌هایی با طیف گسترده‌ای از سختی، از سلول‌های زنده در محیط به کاررفته است. انتخاب صحیح پروب، کالیبراسیون، یکنواختی نمونه، زبری سطح، و تحلیل آماری داده‌ها از عوامل کلیدی در پیاده‌سازی موفق این روش هستند اطلاعاتی جامع از ترکیب و ساختار نمونه فراهم خواهند آورد. [۹]

تکنیک‌های نانومقیاس فروسرخ<sup>۸</sup> مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی با عبور از محدودیت پراش نوری، امکان تصویربرداری و طیف‌سنجی در مقیاس نانو را فراهم کرده‌اند. این روش‌ها به‌تازگی برای بررسی فرایندهای بین سطحی در کاتالیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تصویربرداری و طیف‌سنجی فروسرخ، دیدگاه‌های منحصربه‌فردی در درک سازوکارهای کاتالیزوری ارائه می‌دهد و به شناخت عمیق‌تری از فرایندهای سطحی در این حوزه منجر می‌شود. [۱۰]

در دیگر پژوهش با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و فرایند نانومنیپولیشن، مدول یانگ سلول سرطانی سروگردن تخمین زده شده است. تصاویر توپوگرافی و داده‌های تجربی حاصل از AFM با مدل‌های تماسی جی‌کی‌آر و تاتارا تحلیل شدند. نتایج نشان دادند که مدول یانگ بافت سرطانی به ترتیب ۱۲ و ۱۱ کیلوپاسکال برآورد می‌شود. این روش می‌تواند به بهبود تشخیص و درمان هدفمند سرطان سروگردن کمک کند [۱۱].

بر خلاف پژوهش‌های گذشته که ذرات هدف را کروی فرض می‌کردند، در تحقیق طاهری و همکاران مدل‌های تماسی استوانه‌ای مختلف شبیه‌سازی و با داده‌های تجربی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدل هواپریچ بیشترین تطابق را با آزمایش‌ها دارد و مدول الاستیسیته با دقت مناسبی استخراج شد [۱۲].

طاهری و فرجی در مطالعه ای فاز اول منیپولیشن نانوذرات شامل بررسی نیروی بحرانی و زمان بحرانی مورد مطالعه قرار گرفته است. نیروی بحرانی برای غلبه بر اصطکاک و چسبندگی

<sup>8</sup> nanoscale infrared (nano-IR)

ذره، ضخامت، طول و عرض تیرک، ارتفاع زیرلایه و زمان تماس نوک، همگی می‌توانند نقش بسزایی در تعیین نیروی بحرانی ایفا کنند. از این رو، شناسایی و تحلیل سیستماتیک این عوامل برای بهینه‌سازی عملکرد فرایند ضروری است.

در این تحقیق، باهدف مدل‌سازی و تحلیل حساسیت نیروی بحرانی منیپولیشن سه‌بعدی، از روش طراحی آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر شش پارامتر کلیدی یادشده بر نیروهای بحرانی در دو راستای X و Y استفاده شده است. نتایج حاصل، تصویری روشن از روابط بین پارامترهای فیزیکی سیستم و پاسخ مکانیکی آن ارائه داده و می‌تواند به‌عنوان مبنایی جهت طراحی و کنترل دقیق‌تر در کاربردهای صنعتی و پژوهشی در مقیاس نانو به کار گرفته شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

نانونمیپولیشن فرایندی است که ضمن دست‌کاری و جابه‌جایی نانوذرات، قادر به استخراج خواص مکانیکی آن خواهد بود. در این مقاله باهدف توسعه دقت و کیفیت منیپولیشن، نیروی بحرانی موردبررسی قرار گرفته است. پس از تعیین پارامترها، مدل رگرسیونی بر پایه میزان اثرگذاری پارامترها بر نیروی بحرانی در دو راستای X و Y استخراج شده است و در نهایت با استفاده از نمودارهای کانتور اهمیت و تأثیر این پارامترها در دو راستای یاد شده تبیین گردیده است. شماتیک کلی از فرایند در شکل ۱ قابل‌مشاهده است.

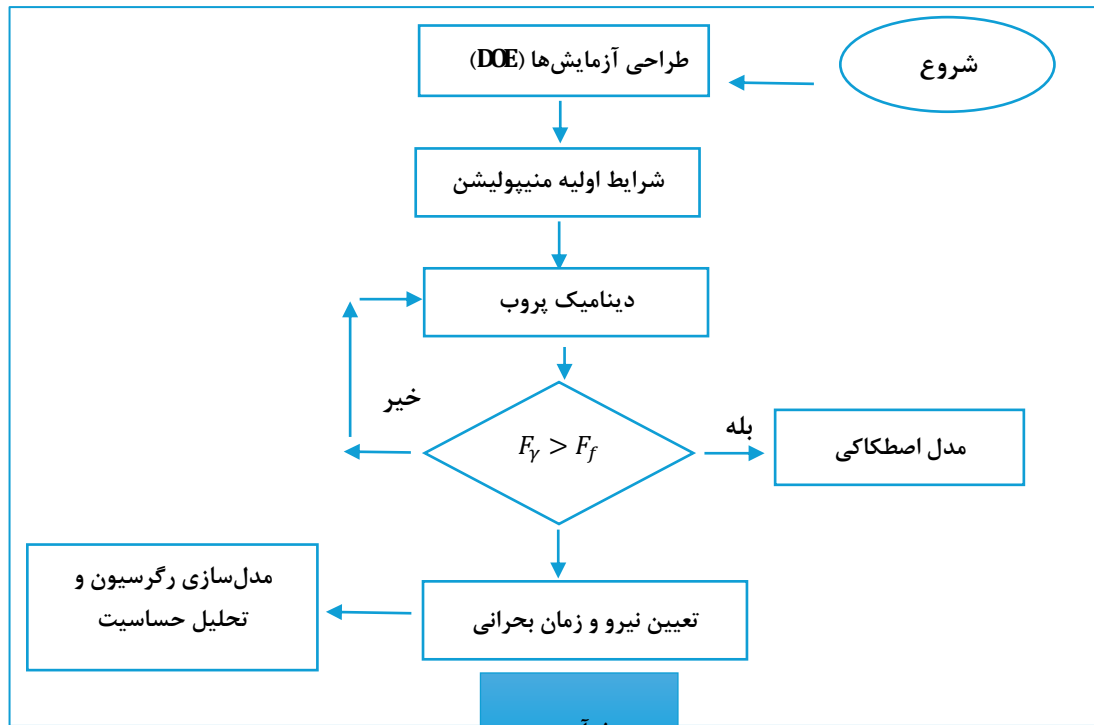
سلولی و مولکولی بدل کرده است. به‌علاوه، با بررسی ساختارهای نانومقیاس غشا و دیواره سلولی، درک عمیق‌تری از سازوکارهای چسبندگی و پایداری باکتری‌های بیماری‌زا فراهم می‌آورد [۱۸].

همانطور که قبل تر بیان شد، میکروسکوپ نیروی اتمی امکان بررسی خواص مکانیکی و زیست‌شناسی نمونه‌های زیستی را از مقیاس مولکول تا بافت فراهم می‌کند و در مطالعات اخیر برای تحلیل بیومکانیک و توسعه مدل‌های نظری مورد استفاده قرار گرفته است. پیش‌بینی می‌شود که AFM در آینده نقش مهم‌تری در کشف و کاربردهای زیستی ایفا کند [۱۹].

مدل‌سازی توده‌ای دینامیکی برای AFM در حالت ترولینگ<sup>۹</sup> به منظور دست‌کاری نمونه‌های زیستی ارائه شده است. مطالعه نوین در این حوزه نشان داده است که اگرچه AFM ابزار دقیقی برای کار در محیط مایع است، اما کشش هیدرودینامیکی موجب افت حساسیت و افزایش نویز می‌شود. به همین دلیل طراحی مناسب نانوسوزن از نظر طول، جنس و هندسه اهمیت دارد. در این مدل، رفتار مکانیکی سوزن و کانتیلور با تحلیل تحلیلی و المان محدود بررسی و تماس سوزن-ذره با استفاده از نظریه جی کی آر شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی شامل نیروی بحرانی، زمان بحرانی و تغییرات ناشی از سرعت بوده و صحت مدل با داده‌های پیشین تأیید شده است [۲۰].

درک دقیق روابط میان عوامل تأثیرگذار مانند ویژگی‌های هندسی ذره، خواص مکانیکی تیرک AFM، شرایط تماس و مشخصات سطح زیرلایه، در پیش‌بینی و کنترل رفتار منیپولیشن بسیار حائز اهمیت است. پارامترهایی نظیر شعاع

<sup>9</sup> Trolling



شکل ۱- شماتیک فرایند منیپولیشن

## ۲-۲- آنالیز واریانس

یکی از روش‌های قدرتمند برای بررسی هم‌زمان چندین عامل تأثیرگذار، روش طراحی آزمایش‌ها (DOE) است. این رویکرد نه تنها امکان کاهش تعداد آزمایش‌ها را بدون کاهش دقت فراهم می‌سازد، بلکه قادر است اثرات متقابل بین پارامترها را نیز آشکار سازد. به‌ویژه، استفاده از طراحی فاکتوریل کامل می‌تواند در شناسایی ساختارهای پیچیده بین متغیرهای ورودی و پاسخ‌های مکانیکی سیستم مؤثر واقع شود. در این پژوهش، از روش طراحی آزمایش به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و زمانی بر نیروهای بحرانی در منیپولیشن سه‌بعدی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شد. در مجموع، ۲۷ آزمون تجربی با پیکربندی‌های مختلف از پارامترهای ورودی شامل شعاع ذره، ارتفاع سوزن، طول و عرض تیرک همچنین ضخامت تیرک انجام گرفت. پاسخ‌های خروجی شامل نیرو در راستای  $x$ ، نیرو در راستای  $y$  اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱- طراحی آزمایش پارامترهای مؤثر بر نیروی بحرانی

شماره آزمایش	شعاع ذره ( $\mu\text{m}$ )	ارتفاع سوزن ( $\mu\text{m}$ )	طول تیرک ( $\mu\text{m}$ )	عرض تیرک ( $\mu\text{m}$ )	ضخامت تیرک ( $\mu\text{m}$ )	FX nN-	FY nN-
۱	۴۰۰	۸	۲۰۰	۵۲	۰/۸	۰/۴ ۲۱۹	۰/۵ ۹۶۳
۲	۶۰۰	۸	۲۰۰	۴۴	۰/۸	۰/۳ ۶۷۵	۰/۹ ۲۱۸
۳	۴۰۰	۱۶	۲۰۰	۴۴	۰/۸	۰/۳ ۵۷۰	۰/۵ ۹۱۲
۴	۶۰۰	۱۶	۲۰۰	۵۲	۰/۸	۰/۴ ۲۱۹	۰/۹ ۱۶۴
۵	۴۰۰	۸	۲۵۰	۴۴	۰/۸	۰/۱ ۸۳۲	۰/۵ ۹۱۴
۶	۶۰۰	۸	۲۵۰	۵۲	۰/۸	۰/۲ ۱۶۶	۰/۹ ۱۷۱
۷	۴۰۰	۱۶	۲۵۰	۵۲	۰/۸	۰/۲ ۱۶۰	۰/۵ ۹۶۴
۸	۶۰۰	۱۶	۲۵۰	۴۴	۰/۸	۰/۱ ۸۲۹	۰/۹ ۰۵۵
۹	۵۰۰	۱۲	۲۲۵	۴۸	۰/۸	۰/۲ ۷۳۶	۰/۷ ۵۶۲
۱۰	۴۰۰	۸	۲۰۰	۴۴	۱/۰	۰/۶ ۹۷۳	۰/۶ ۱۸۵
۱۱	۶۰۰	۸	۲۰۰	۵۲	۱/۰	۰/۸ ۲۴۱	۰/۹ ۲۳۳
۱۲	۴۰۰	۱۶	۲۰۰	۵۲	۱/۰	۰/۸ ۲۳۹	۰/۵ ۹۴۰

در ادامه این بخش ابتدا معادلات سینماتیکی منیپولیشن تشریح می‌گردد. سپس به بررسی روش طراحی آزمایش و آزمایشات صورت گرفته می‌پردازیم. در نهایت نتایج آنالیز آماری مدل‌های رگرسیونی استخراج شده را شرح داده می‌شود.

## ۲-۱- تحلیل سینماتیک منیپولیشن سه‌بعدی

تحلیل سینماتیکی تغییر شکل سوزن و محاسبه شتاب مؤثر در فرایند مدل‌سازی دینامیکی سوزن، به‌ویژه باهدف استخراج نیروهای کنش و واکنش در ناحیه تماس بین نوک تیپ و نانوذره، روابط مربوط به سینماتیک نقاط مشخص شده و سوزن به‌صورت دقیق مورد استفاده قرار گرفتند. در این چارچوب، نقطه  $p$  محل اتصال انتهایی سوزن به تیرک و نقطه  $t$  محل تماس نوک سوزن با نانوذره در راستای بیشینه نفوذ در نظر گرفته شده است. مختصات سه‌بعدی این نقاط به‌صورت  $(x_p, y_p, z_p)$  و  $(x_t, y_t, z_t)$  تعریف شده و تغییر مکان آن‌ها نقش اصلی در توصیف رفتار تماس ایفا می‌کند. همچنین، پارامترهایی نظیر شعاع ذره  $(R_p)$ ، طول تیرک  $(L)$ ، عرض تیرک  $(W)$ ، ضخامت تیرک  $(T)$  و ارتفاع سوزن  $(H)$  در این روابط لحاظ شده‌اند تا اثر ویژگی‌های هندسی بر تغییر شکل و جابه‌جایی نوک سوزن مدنظر قرار گیرد. در نهایت، متغیر  $\delta$  به‌عنوان عمق نفوذ ذره در سطح زیرلایه یا در سوزن معرفی شده که بیانگر شدت برهم‌کنش مکانیکی میان نوک و ذره است. این مجموعه معادلات چارچوبی دقیق برای محاسبه تغییر شکل‌ها و نیروهای متقابل در فرآیند منیپولیشن فراهم می‌آورد.

روابط (۱) تا (۶) بیانگر معادلات سینماتیکی حاکم بر حرکت نقاط کلیدی سوزن در فرآیند منیپولیشن سه‌بعدی هستند.

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

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

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

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

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

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

نیروهای بحرانی منیپولیشن در راستای X و Y استخراج شده است. فرم کلی مدل رگرسیون به صورت زیر است:

$$F = \beta_0 + \beta_1 R_p + \beta_2 H + \beta_3 L + \beta_4 W + \beta_5 T + \varepsilon \quad (7)$$

که در آن،  $\beta_0$  عرض از مبدأ،  $\beta_i$  ضرایب رگرسیون و  $\varepsilon$  میزان خطا است. معناداری آماری ضرایب بر اساس مقدار احتمال ( $P\text{-value} < 0.05$ ) بررسی گردید و همچنین شاخص تورم واریانس (VIF) برای ارزیابی چندمخطی بودن بین متغیرها محاسبه شد.

برای مدل رگرسیون نیروی بحرانی در راستای X، مقدار ضریب تعیین R-sq برابر ۰.۹۵،۲۵٪ به دست آمد که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل است. در این مدل، طول تیرک (L) و ضخامت تیرک (T) معنادار بودند ( $p < 0.05$ ) و پارامتر ضخامت تیرک به‌عنوان مؤثرترین متغیر شناخته شد. معادله رگرسیون برای این نیروی بحرانی منیپولیشن به‌صورت زیر حاصل گردید:

$$F_{CrX} = -0.044 + 0.000006 R_p - 0.00017 H - 0.006433 L + 0.00989 W + 1.6163 T \quad (8)$$

در ادامه، مدل رگرسیون نیروی بحرانی در راستای Y، باتوجه‌به نتایج آنالیز، برازش مدل قوی‌تر بود و مقدار ضریب تعیین برابر ۰.۹۹،۷۷٪ محاسبه شد. باتوجه‌به ضرایب پارامترها در این مدل، شعاع ذره  $R_p$  و ارتفاع سوزن  $H$  به‌صورت آماری معنادار بودند. معادله نهایی این مدل عبارت است از:

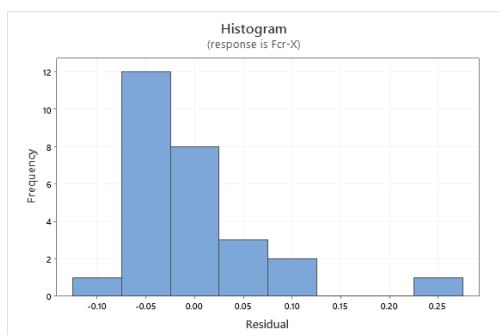
$$F_{CrY} = -0.0239 + 0.001582 R_p - 0.001011 H - 0.000023 L + 0.000114 W + 0.00283 T \quad (9)$$

تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار مینی تب انجام گرفت. همچنین پیش‌فرض‌های مدل از جمله نرمال بودن و یکنواختی واریانس باقیمانده‌ها بررسی و تأیید شدند. به‌منظور ارزیابی صحت مدل‌های رگرسیونی حاصل از تحلیل Y، از تحلیل باقی‌مانده‌ها بهره گرفته شد. برای این منظور، چهار نمودار استاندارد شامل نمودار نرمال احتمالی، هیستوگرام باقی‌مانده‌ها، نمودار باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده و

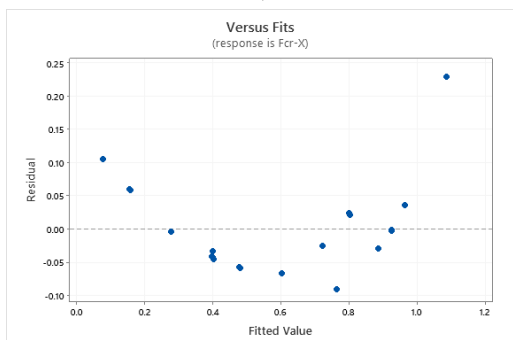
۱۳	۶۰۰	۱۶	۲۰۰	۴۴	۱/۰	۰/۶	۰/۹
						۹۷۳	۲۰۰
۱۴	۴۰۰	۸	۲۵۰	۵۲	۱/۰	۰/۴	۰/۶
						۲۲۰	۱۵۹
۱۵	۶۰۰	۸	۲۵۰	۴۴	۱/۰	۰/۳	۰/۹
						۵۷۶	۲۵۱
۱۶	۴۰۰	۱۶	۲۵۰	۴۴	۱/۰	۰/۳	۰/۵
						۵۷۱	۹۶۷
۱۷	۶۰۰	۱۶	۲۵۰	۵۲	۱/۰	۰/۴	۰/۹
						۲۲۰	۱۷۹
۱۸	۵۰۰	۱۲	۲۲۵	۴۸	۱/۰	۰/۵	۰/۷
						۳۴۳	۵۸۵
۱۹	۴۰۰	۱۲	۲۲۵	۴۸	۱/۲	۰/۹	۰/۶
						۲۳۱	۰/۶۵
۲۰	۶۰۰	۱۲	۲۲۵	۴۸	۱/۲	۰/۹	۰/۹
						۲۳۲	۰/۶۹
۲۱	۵۰۰	۸	۲۲۵	۴۸	۱/۲	۰/۹	۰/۷
						۲۳۲	۵۶۱
۲۲	۵۰۰	۱۲	۲۲۵	۴۴	۱/۲	۰/۸	۰/۷
						۵۶۲	۵۷۹
۲۳	۵۰۰	۱۲	۲۲۵	۴۸	۱/۲	۰/۹	۰/۷
						۲۳۱	۵۶۶

به منظور افزایش دقت فرایند طراحی آزمایش، متغیرهای ورودی در بازه‌های مشخص، به ترتیب شعاع ذره از ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر، ارتفاع سوزن از ۸ تا ۱۶ میکرومتر، طول تیرک از ۲۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر، عرض تیرک از ۴۴ تا ۵۲ میکرومتر و ضخامت تیرک از ۰/۸ تا ۱/۲ میکرومتر تعیین شده است.

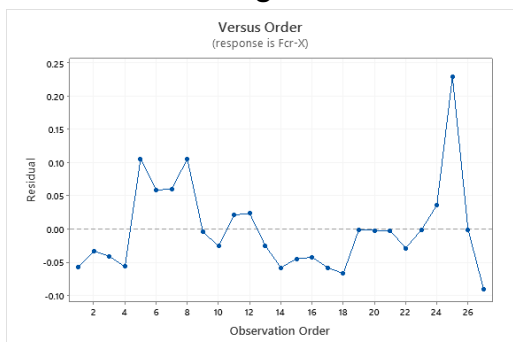
برای تحلیل داده‌های حاصل از ۲۷ آزمایش طراحی‌شده و استخراج روابط ریاضی میان متغیرهای هندسی و نیروهای بحرانی، از رگرسیون خطی چندمتغیره در نرم‌افزار آماری Minitab استفاده گردید. در این مرحله، کلیه ضرایب مدل از طریق روش کمترین مربعات برآورد شدند و معنی‌داری آماری آن‌ها بررسی شد. به‌منظور ارزیابی وجود چندمخطی بین متغیرها، شاخص تورم واریانس (VIF) محاسبه گردید. همچنین برازش کلی مدل با استفاده از ضریب تعیین و تعدیل‌شده ارزیابی شد. در نهایت، پیش‌فرض‌های رگرسیون شامل نرمال بودن و استقلال خطاها و یکنواختی واریانس باقیمانده‌ها از طریق نمودارهای تشخیصی (احتمال نرمال، هیستوگرام، پراکنش باقیمانده‌ها) مورد بررسی قرار گرفت. این رویکرد اطمینان می‌دهد که مدل‌های رگرسیونی به‌دست‌آمده، از اعتبار آماری کافی برای پیش‌بینی نیروهای بحرانی برخوردار هستند. رگرسیون خطی چندمتغیره به‌صورت جداگانه برای



(ب)



(ج)



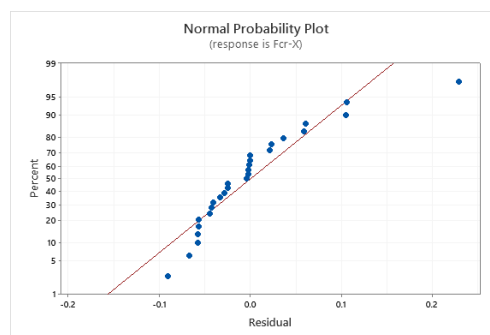
(د)

شکل ۲- نمودار پراکندگی باقیمانده ها  $F_{crX}$

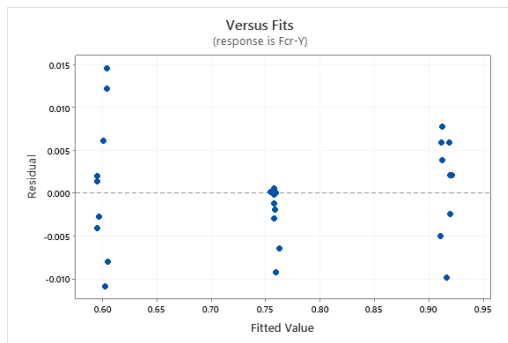
در ادامه، آنالیز مربوط به مدل رگرسیون نیروی بحرانی در راستا  $\gamma$  بررسی شده است. در نمودار (الف) احتمال نرمال باقی مانده‌ها، نقاط تقریباً روی خط نرمال قرار گرفته‌اند و فقط انحراف‌های بسیار جزئی در انتهای نمودار مشاهده می‌شود. این امر حاکی از آن است که توزیع خطاها با فرض نرمال بودن تطابق مناسبی دارد. به‌علاوه، در نمودار (ب) هیستوگرام باقی مانده‌ها نیز ساختاری تقریباً متقارن با تمرکز نقاط حول مقدار صفر دارد. این ویژگی تأییدی دیگر بر فرض نرمال بودن توزیع خطاها در مدل نیروی بحرانی در راستا  $\gamma$  است. همچنین

نمودار باقی مانده‌ها در برابر ترتیب مشاهدات موردبررسی قرار گرفت.

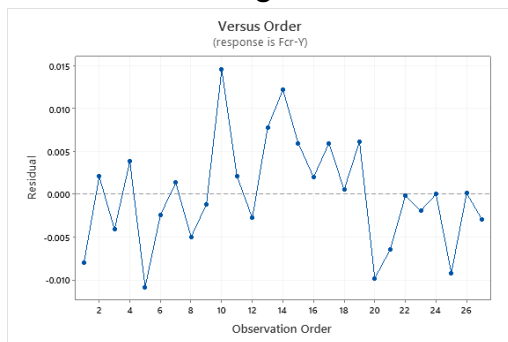
در تحلیل انجام شده برای مدل رگرسیونی مربوط به نیروی بحرانی در راستای  $X$  نمودار (الف) نرمال احتمالی باقی مانده‌ها نشان داد که بیشتر نقاط در راستای خط قطری نرمال قرار دارند که حاکی از آن است که توزیع باقی مانده‌ها به طور قابل قبولی نرمال است. اندک انحرافی در نقاط انتهایی مشاهده می‌شود که ممکن است به اثرات جزئی داده‌های پرت یا تغییرات تصادفی مربوط باشد. در ادامه، در نمودار (ب)، هیستوگرام باقی مانده‌ها ساختاری نسبتاً متقارن با مرکزیت حول صفر دارد. این ویژگی‌ها مؤید توزیع نرمال باقی مانده‌ها است و بیانگر آن است که فرض نرمال بودن خطاها در مدل تا حد زیادی برقرار است. همچنین، نمودار (ج) باقی مانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده نشان‌دهنده پراکندگی یکنواخت و تصادفی نقاط در اطراف محور افقی (صفر) است. عدم وجود الگوی مشخص یا روند صعودی/نزولی در این نمودار دلیلی بر همگنی واریانس (ثبات واریانس خطاها) در طول دامنه پیش‌بینی مدل است و در نهایت نمودار (د) باقی مانده‌ها در برابر ترتیب مشاهدات نیز الگوی خاصی را نشان نمی‌دهد. پراکندگی تصادفی و نوسانی باقی مانده‌ها در طول محور زمان یا ترتیب آزمون‌ها، دلالت بر استقلال مشاهدات و عدم وجود خودهمبستگی بین خطاها دارد.



(الف)



(ج)



(د)

شکل ۳- نمودار پراکندگی باقیمانده ها  $F_{CrY}$ 

### ۳- بحث و نتایج

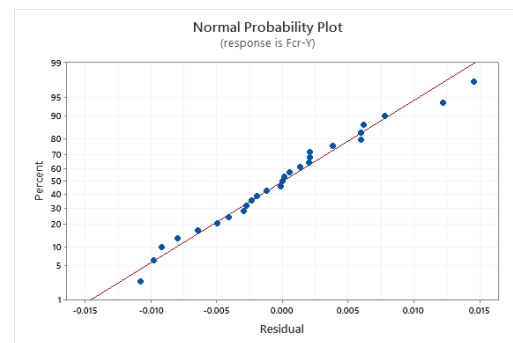
در این بخش، اثرات متقابل پارامترهای مختلف هندسی بر نیروی بحرانی منیپولیشن سه بعدی ذرات، با استفاده از نمودارهای سه بعدی بررسی شده است. پاسخ‌ها شامل نیروی بحرانی در راستای  $X$  و در راستای  $Y$  هستند که باتوجه به ترکیب سطوح مختلف متغیرها حاصل شده‌اند. نتایج این آنالیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

در نمودار (الف)، مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع ذره ( $R_p$ ) از ۴۰۰ به ۶۰۰ نانومتر، مقدار نیروی بحرانی در راستای  $X$  به‌طور کلی افزایش می‌یابد. این افزایش برای مقادیر کمتر ارتفاع سوزن مشهودتر است. به‌طور خاص، برای  $H = 8 \mu m$ ، مقدار نیروی بحرانی در راستای  $X$  بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات شعاع ذره نشان می‌دهد. این رفتار را می‌توان به افزایش سطح تماس بین ذره و ابزار در اندازه‌های بزرگ‌تر ذره نسبت داد.

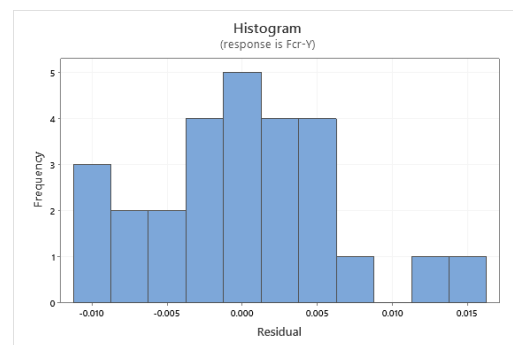
بر مبنای آنچه در نمودار (ب) مشاهده می‌شود، الگوی تغییرات نیروی بحرانی در راستای  $Y$  در این نمودار نسبت به نیروی بحرانی در راستای  $X$  مشابه است، اما افزایش نیروی بحرانی در

نمودار (ج) باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده نشان می‌دهد که باقی‌مانده‌ها به‌صورت تصادفی و بدون الگوی مشخص در اطراف محور افقی توزیع شده‌اند. این موضوع گواهی بر همگنی واریانس‌ها در مدل است و نشان می‌دهد که خطاها مستقل از مقادیر پیش‌بینی شده هستند. در نهایت، نمودار (د) باقی‌مانده‌ها در برابر ترتیب مشاهدات نیز هیچ روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. پراکندگی تصادفی نقاط به‌خوبی نشان می‌دهد که ترتیب ورود داده‌ها به مدل تأثیری در ساختار خطاها نداشته و مشاهدات از استقلال زمانی برخوردارند.

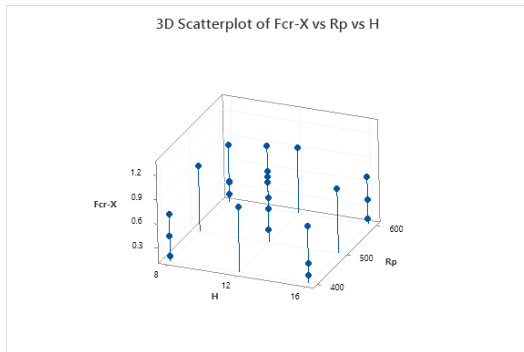
نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای تشخیصی برای هر دو مدل رگرسیونی حاکی از برقراری مفروضات اساسی رگرسیون خطی شامل نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، همگنی واریانس‌ها و استقلال خطاها است. این امر اعتبار آماری و قابلیت اطمینان مدل‌های به‌دست‌آمده را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که مدل‌ها برای تحلیل و پیش‌بینی متغیرهای پاسخ مناسب هستند.



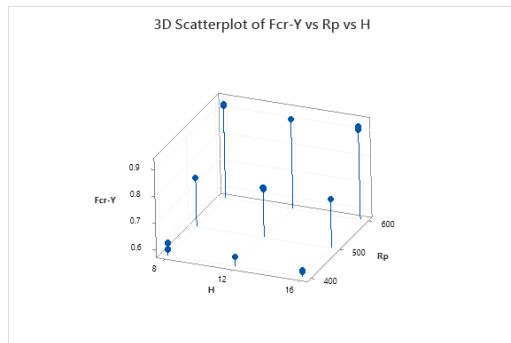
(الف)



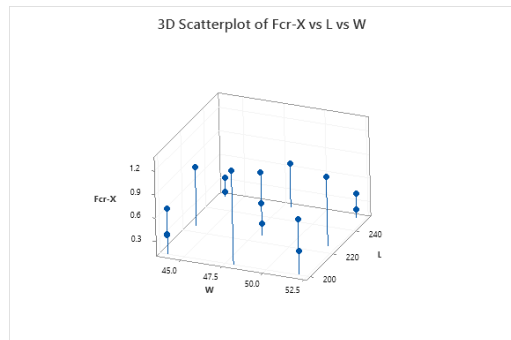
(ب)



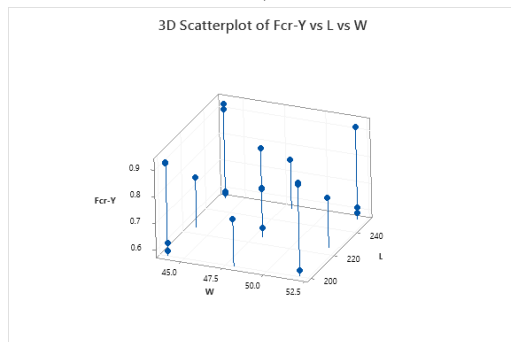
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

راستا Y با افزایش شعاع ذره، نسبتاً یکنواخت و کمتر نوسانی است. همچنین، در این راستا، تأثیر ارتفاع سوزن کمتر از نیروی بحرانی در راستا X است، به طوری که مقادیر نیروی بحرانی در راستای Y کمتر به تغییرات ارتفاع سوزن حساس هستند. این موضوع نشان می‌دهد که راستای Y نسبت به راستای X پایداری بیشتری دارد.

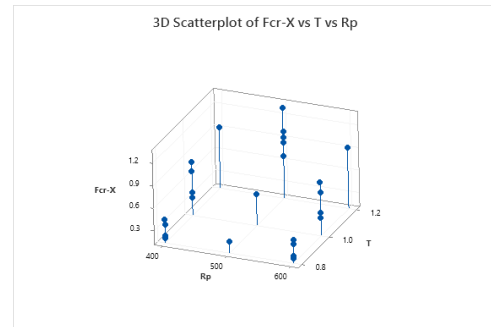
باتوجه به نمودار (پ)، مشاهده می‌شود که با افزایش طول تیرک از ۲۰۰ به ۲۵۰ میکرومتر، مقدار نیروی بحرانی در راستا X کاهش می‌یابد، به‌ویژه برای مقدار عرض تیرک کوچک‌تر که این کاهش می‌تواند ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری تیرک باشد. عرض تیرک نقش مهمی در تعیین نیروی بحرانی دارد، به‌گونه‌ای که افزایش عرض تیرک معمولاً باعث افزایش نیروی بحرانی در راستا X می‌شود.

باتوجه به ارزیابی‌ها، در نمودار (ت) رفتار نیروی بحرانی در راستا Y مشابه با نیروی بحرانی در راستا X است، اما میزان تغییرات ملایم‌تر است. به عبارت دیگر، کاهش نیروی بحرانی در راستا Y با افزایش طول تیرک کمتر محسوس است. همچنین، افزایش عرض تیرک باعث افزایش نسبی نیروی بحرانی در راستا Y می‌شود که این نیز با افزایش مقاومت تیرک در برابر انحراف در این راستا قابل‌توجه است.

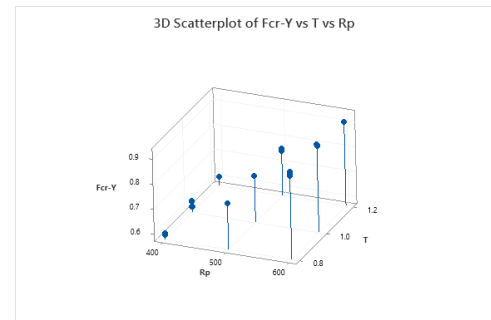
در نمودار (ث)، با افزایش ضخامت تیرک از ۰٫۸ به ۱٫۲ میکرومتر، مقدار نیروی بحرانی در راستا X به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، به‌ویژه در مقادیر بالاتر شعاع ذره این رفتار نشان می‌دهد که ضخامت تیرک یکی از پارامترهای بحرانی در کنترل نیروهای اعمالی حین منیپولیشن است. افزایش ضخامت موجب افزایش مقاومت در برابر نیروهای وارده در راستای X می‌شود.

در نمودار (ج) تغییرات نیروی بحرانی در راستای Y تغییرات نیروی بحرانی در راستا Y نیز نشان‌دهنده افزایش با رشد میزان ضخامت تیرک است، اما مجدداً این افزایش ملایم‌تر از نیرو در راستای X است. به‌ویژه برای مقادیر پایین شعاع ذره، تفاوت بین ضخامت‌های مختلف کمتر محسوس است. این امر حاکی از آن است که ضخامت تیرک در ترکیب با اندازه ذره می‌تواند نقش کنترل‌کننده‌ای در فرایند منیپولیشن داشته باشد.

ضخامت تیرک (T) به‌عنوان مهم‌ترین عامل در افزایش نیروی بحرانی منیپولیشن در هر دو راستای X و Y شناسایی شد، به‌گونه‌ای که افزایش ضخامت منجر به افزایش چشمگیر نیرو گردید. این نتیجه با نمودار (ب) که سهم غالب ضخامت تیرک را در حدود ۵۶٪ نشان می‌دهد، مطابقت کامل دارد و تأثیر این پارامتر را به‌عنوان عامل اصلی کنترل‌کننده نیرو تأیید می‌کند. همچنین در این پژوهش، طول تیرک (L) اثر معکوس بر نیروی بحرانی داشته و افزایش آن موجب کاهش نیرو شده است. این موضوع نیز با نمودار (الف) که سهم قابل‌توجهی (۲۹٪) را برای طول تیرک نشان می‌دهد، همخوانی دارد و اهمیت این پارامتر در تعیین پایداری فرآیند را اثبات می‌نماید. علاوه بر این، نقش عرض تیرک (W) در افزایش نسبی نیرو در نتایج مقاله گزارش گردیده که با سهم ۱۳٪ مشاهده‌شده در نمودار (ب) سازگار است. در مقابل، تأثیر ارتفاع سوزن (H) در هر دو منبع ناچیز ارزیابی شد (کمتر از ۳٪ در نمودار a و نزدیک به صفر در نمودار ب)، که بیانگر کم‌اهمیت بودن این پارامتر در مقایسه با سایر متغیرها است.

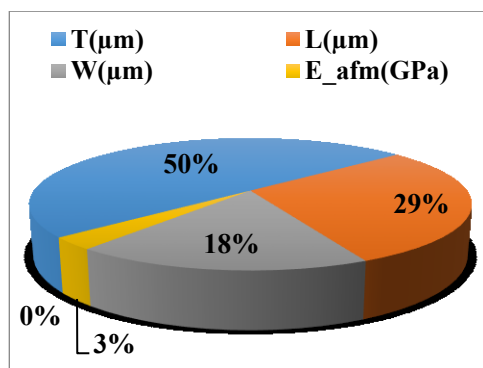


(ث)

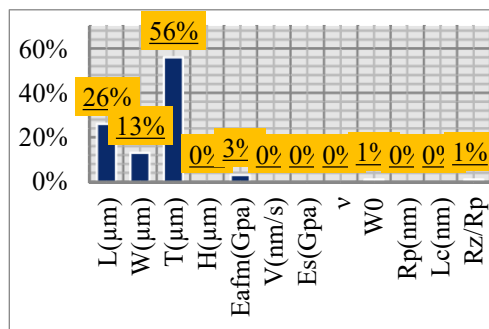


(ج)

شکل ۴- نمودار اثرگذاری پارامترها بر نیروی بحرانی



(الف)



(ب)

شکل ۵- نمودارهای صحت‌سنجی [21]

به‌طور کلی نتایج شکل ۴ بیان می‌کنند که میزان حساسیت نیروهای بحرانی نسبت به تغییرات پارامترها یکنواخت نبوده و رفتار غیرخطی در برخی شرایط مشاهده می‌شود. به‌طور خاص، اثر شعاع ذره در ترکیب با ضخامت تیرک افزایش مضاعف نیرو را به همراه دارد که بیانگر وجود برهم‌کنش قوی میان این دو پارامتر است. همچنین، گرچه افزایش طول تیرک عموماً موجب کاهش نیروی بحرانی می‌شود، اما این کاهش در حضور عرض بیشتر تیرک شدت کمتری داشته و نشان‌دهنده نقش تقویتی عرض در برابر انعطاف‌پذیری طولی است. از سوی دیگر، ارتفاع سوزن تنها در مقادیر پایین شعاع ذره اثر محسوسی بر نیرو داشته و در سایر شرایط سهم آن ناچیز است. این یافته‌ها بیانگر آن است که انتخاب بهینه پارامترها نه به‌صورت مستقل، بلکه با در نظر گرفتن اثرات متقابل آن‌ها امکان‌پذیر است.

### ۱-۳- صحت‌سنجی نتایج

برای اطمینان از اعتبار مدل‌های رگرسیونی استخراج‌شده، نتایج حاصل از این پژوهش با تحلیل حساسیت ارائه‌شده در نمودارهای شکل ۵ مقایسه گردید. در مدل مقاله حاضر، پارامتر

طول کم تیرک، مقدار نیروی بحرانی در راستا  $X$  و نیروی بحرانی در راستا  $Y$  به حداکثر می‌رسد که نشانگر پایداری بالاتر سیستم در مقابل نیروهای جانبی است.

تحلیل‌های آماری با استفاده از نمودارهای باقیمانده شامل نرمال، هیستوگرام، و نمودار ترتیب مشاهدات، صحت فروض مدل رگرسیونی را تأیید کرده و توزیع نرمال خطاها و نبود روند سیستماتیک در باقی‌مانده‌ها را نشان داد. همچنین، مقادیر بالای ضریب تعیین ( $R^2 > 0.99$ ) برای مدل‌های نیروی بحرانی در راستا  $X$  و نیروی بحرانی در راستا  $Y$  اعتبار بالای مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی‌کننده را اثبات کرد.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که با تنظیم مناسب پارامترهای هندسی تیرک و ویژگی‌های ذره، می‌توان فرایند منیپولیشن سه‌بعدی را به‌گونه‌ای بهینه کرد که هم دقت و هم پایداری افزایش یابد. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی و توسعه سیستم‌های پیشرفته منیپولیشن در حوزه‌های میکروروباتیک، نانو تکنولوژی و مهندسی پزشکی مورداستفاده قرار گیرند. همچنین، مدل‌های توسعه‌یافته قابلیت استفاده به‌عنوان ابزارهای پیش‌بینی دقیق برای طراحی هندسه نوک سوزن‌های میکروسکوپ برای منیپولیشن با عملکرد مطلوب را دارا هستند.

#### ۵- علائم، نشانه‌ها و ارقام

ارتفاع سوزن، $\mu\text{m}$	$H$
طول تیرک، $\mu\text{m}$	$L$
شعاع نانوذره، $\mu\text{m}$	$R_p$
شعاع سوزن، $\mu\text{m}$	$R_t$
ضخامت تیرک، $\mu\text{m}$	$T$
عرض تیرک، $\mu\text{m}$	$W$
موقعیت انتهای سوزن در راستای محور $X$	$x_p$
موقعیت ذره بر صفحه مبنا در راستای محور $X$	$x_s$
موقعیت نوک سوزن در راستای محور $X$	$x_t$
موقعیت انتهای سوزن در راستای محور $Y$	$y_p$

به‌طور کلی، مقایسه کیفی نتایج مقاله با داده‌های نمودارهای مرجع نشان می‌دهد که روند تغییرات و عوامل مؤثر شناسایی شده در هر دو تحلیل مشابه بوده و سازگاری بالای نتایج را تأیید می‌کند. این تطابق نه تنها بر دقت مدل رگرسیونی استخراج‌شده در این پژوهش صحت می‌گذارد، بلکه نشان می‌دهد مدل پیشنهادی قابلیت تعمیم به شرایط مشابه را داراست و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی معتبر در طراحی هندسی ابزارهای منیپولیشن سه‌بعدی به کار رود.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار نیروی بحرانی منیپولیشن ذره در فضای سه‌بعدی و شناسایی پارامترهای مؤثر بر آن، از روش طراحی آزمایش بهره گرفته شده است. هدف اصلی، مدل‌سازی ریاضی و تحلیل حساسیت تأثیر پنج پارامتر کلیدی شامل شعاع ذره ( $R_p$ )، ضخامت تیرک ( $T$ )، طول تیرک ( $L$ )، عرض تیرک ( $W$ ) و ارتفاع سوزن ( $H$ ) بر نیروهای بحرانی در راستاهای  $X$  و  $Y$  بود. این متغیرها به‌صورت کنترل‌شده در قالب ۲۷ آزمایش طراحی شدند و داده‌های خروجی حاصل از آن‌ها از طریق تحلیل رگرسیون و نمودارهای سه‌بعدی موردبررسی قرار گرفت.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که شعاع ذره و ضخامت تیرک اثر مستقیمی بر افزایش نیروی بحرانی دارند. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش این دو پارامتر، نیروی موردنیاز برای منیپولیشن ذره به شکل قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده ویژگی‌های مکانیکی ذره و سختی سیستم کنترلی در پایداری منیپولیشن است. در مقابل، افزایش طول تیرک و ارتفاع سوزن منجر به کاهش مقدار نیروی بحرانی گردید. این رفتار می‌تواند ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری سیستم و کاهش مقاومت نوک در برابر تغییر شکل باشد.

از میان پارامترهای موردبررسی، ضخامت تیرک ( $T$ ) بیشترین تأثیر را بر افزایش  $F_{cr}$  نشان داد، به‌ویژه زمانی که با مقادیر بالای شعاع ذره ( $R_p$ ) ترکیب می‌شود. همچنین، اثر متقابل پارامترها در نمودارهای سه‌بعدی به‌خوبی نمایان بود و نشان داد که عملکرد منیپولیشن تنها به یک پارامتر خاص محدود نمی‌شود، بلکه نتیجه ترکیبی از چند ویژگی هندسی و فیزیکی است. به‌طور خاص، مشاهده شد که در ترکیب ضخامت بالا و

- [5] Xia, F., & Youcef-Toumi, K. (2022). Advanced atomic force microscopy modes for biomedical research. *Biosensors*, 12(12), 1116.
- [6] Giessibl, F. J. (2024). Atomic force microscopy with qPlus sensors. *MRS Bulletin*, 49(5), 492-502.
- [7] Canepa, P., Rotondi, S. M. C., & Cavalleri, O. (2024). Atomic force microscopy as a nanolithography tool to investigate the DNA/gold interface. *Curr Opin Electrochem*, 44, 101444.
- [8] Wen, Y., Lu, H., Shen, Y., & Xie, H. (2019). Nanorobotic Manipulation System for 360° Characterization Atomic Force Microscopy. *IEEE Trans Ind Electron*, 67(4), 2916-2924.
- [9] Enriques, A. E., Howard, S., Timsina, R., Khadka, N. K., Hoover, A. N., Ray, A. E., ... & Davis, P. H. (2022). Atomic force microscopy cantilever-based nanoindentation: mechanical property measurements at the nanoscale in air and fluid. *J Vis Exp*, (190), 10-3791.
- [10] Li, J., Liang, J., Lan, M. H., & Xia, X. H. (2023). Atomic force microscopy-based nanoscale infrared techniques for catalysis. *J Phys Chem Lett*, 14(50), 11318-11323.
- [11] Taheri, M., Karimi, P., Mostali, and Nazemizadeh, M. (1401). Calculation of Young's modulus of head and neck cancer cells during nanomanipulation process based on atomic force microscopy. *J Mech Eng*, 31(4), 22-31. doi: 10.30506/mmep.2022.557330.2029.(in persian)
- [12] Taheri, M., Modabberifar, M., Hasani, A., Karimi, P., & Rahmani, N. (2023). Experimental extraction of modulus of elasticity of gastric cancer tissue using cylindrical developed contact mechanics models. *J Solid Fluid Mech*, 13(4), 83-94.(in persian)
- [13] Taheri, M., & Bathaei, H. (2019). Sensitivity analysis of environmental parameters in nanoscale displacement in three-dimensional space using the HKA friction model. *Structural Fluid Mech*, 9(2), 123-139.(in persian)
- [14] Taheri, M., Jabbari, A., Eghdami, Z., Faraji, H., & Mollaie, T. (2023). Experimental and theoretical investigation of Young's modulus of liver cancer tissue using rectangular, V-shaped and dagger cantilevers of an atomic force microscope. *J Solid Fluid Mech*, 13(5), 121-135.(in persian)
- [15] Loganathan, M., Al-Ogaidi, A., & Bristow, D. A. (2017). Design and control of a dual-probe atomic force microscope. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 23(1), 424-433.
- [16] Korayem, M. H., & Khaksar, H. (2020). A survey on dynamic modeling of manipulation of nanoparticles based on atomic force microscope and investigation of involved factors. *J Nanopart Res*, 22(1), 27.
- موقعیت ذره بر صفحه مبنا در راستای محور  $y$ ،  $\mu\text{m}$   $y_s$
- موقعیت نوک سوزن در راستای محور  $y$ ،  $\mu\text{m}$   $y_t$
- موقعیت انتهای سوزن در راستای محور  $Z$ ،  $\mu\text{m}$   $z_p$
- موقعیت ذره بر صفحه مبنا در راستای محور  $Z$ ،  $\mu\text{m}$   $z_s$
- موقعیت نوک سوزن در راستای محور  $Z$ ،  $\mu\text{m}$   $z_t$
- عمق نفوذ نانوذره در صفحه مبنا،  $\mu\text{m}$   $\delta_s$
- عمق نفوذ نانوذره در سوزن،  $\mu\text{m}$   $\delta_t$
- ۶- ضمایم**
- موضوعات مرتبط با متن مقاله که در یکی از گروه‌های زیر قرار می‌گیرند، باید در بخش ضمایم آورده شوند:
- اثبات قضایا،
  - روابط و فرمول‌های طولانی،
  - داده و اطلاعات نمونه(ها)ی مورد مطالعه (Case Study)
  - چنانچه طولانی باشند،
  - نتایج کارهای دیگران چنانچه نیاز به تفصیل باشد،
  - مجموعه تعاریف متغیرها و پارامترها (فهرست علائم)،
  - چنانچه طولانی بوده و در متن به انجام نرسیده باشد.
- مراجع**
- [1] Korayem, M. H., & Hefzabad, R. N. (2024). Nonlinear modeling of nanoscale interaction forces between atomic force microscope and carbon nanotubes. *Int J Non Linear Mech*, 161, 104690.
- [2] Gulati, K., & Adachi, T. (2023). Profiling to Probing: Atomic force microscopy to characterize nano-engineered implants. *Acta Biomaterialia*, 170, 15-38.
- [3] Ikai, A., Afrin, R., Saito, M., & Watanabe-Nakayama, T. (2018, January). Atomic force microscope as a nano-and micrometer scale biological manipulator: A short review. In *Seminars in Cell & Developmental Biology* (Vol. 73, pp. 132-144). Academic Press.
- [4] Feng, Y., & Li, M. (2023). Micropipette-assisted atomic force microscopy for single-cell 3D manipulations and nanomechanical measurements. *Nanoscale*, 15(32), 13346-13358.

- [20] Mohammadi, S. Z., Moghadam, M., & Pishkenari, H. N. (2019). Dynamical modeling of manipulation process in troling-mode AFM. *Ultramicroscopy*, 197, 83-94.
- [21] Korayem, M. H., Taheri, M., Ghasemi, M., & Badkoobehhezavh, H. (2015). Investigating the effective parameters in the Atomic Force Microscope-based dynamic manipulation of rough micro/nanoparticles by using the Sobol sensitivity analysis method. *Simulation*, 91(12), 1068-1080.
- [17] Alsteens, D., Gaub, H. E., Newton, R., Pfreundschuh, M., Gerber, C., & Müller, D. J. (2017). Atomic force microscopy-based characterization and design of biointerfaces. *Nat Rev Mater*, 2(5), 1-16.
- [18] Dufrêne, Y. F., Viljoen, A., Mignolet, J., & Mathelié-Guinlet, M. (2021). AFM in cellular and molecular microbiology. *Cell Microbiol*, 23(7), e13324.
- [19] Liang, W., Shi, H., Yang, X., Wang, J., Yang, W., Zhang, H., & Liu, L. (2020). Recent advances in AFM-based biological characterization and applications at multiple levels. *Soft Matter*, 16(39), 8962-8984.