

تخمین معادله رگرسیون نیروی بحرانی در فاز نخست دستکاری دوبعدی

معین طاهری

فرشته قانع

دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک، ایران

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

دستکاری نانومقیاس با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) امکان کنترل و تحلیل دقیق نانوذرات را در مقیاس نانو فراهم می‌سازد. این پژوهش بر فاز نخست فرایند دستکاری تمرکز دارد که در آن نیروی بحرانی و زمان بحرانی، نقش تعیین‌کننده‌ای در موقعیت‌دهی و جهت‌دهی دقیق نانوذرات ایفا می‌کنند. برای این منظور، چارچوب طراحی آزمایش‌ها (DOE) با ۲۷ آزمایش انجام شده به کار گرفته شد تا اثر پارامترهای هندسی تیرک AFM بر نیروی بحرانی دستکاری بررسی شود. داده‌های به دست آمده با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) و روش سطح پاسخ (RSM) مورد ارزیابی قرار گرفت و بر اساس آن یک مدل رگرسیونی تجربی توسعه یافت. مدل حاصل از دقت بالایی با ضریب تعیین $94/16\%$ برخوردار بود و توان پیش‌بینی مناسبی از خود نشان داد. نتایج نشان داد که ضخامت تیرک، تأثیرگذارترین پارامتر بر نیروی بحرانی است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در بهینه‌سازی فرایندهای دستکاری نانوذرات مبتنی بر AFM در کاربردهای نانو فناوری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: نیروی بحرانی، نانو دستکاری، پارامتر ابعادی تیرک، میکروسکوپ نیروی اتمی، طراحی آزمایش، معادله رگرسیون

Estimation of the regression equation of critical force in the first phase of two-dimensional manipulation

Moein Taheri

Fereshte Ghane

Department of Manufacturing Engineering, Arak University, Arak, Iran

Department of Manufacturing Engineering, Arak University, Arak, Iran

Abstract

Nanomanipulation using an atomic force microscope (AFM) enables precise control and characterization of nanoparticles at the nanoscale. This study focuses on the initial phase of manipulation, where the critical force and critical time are key parameters governing the accurate positioning and orientation of nanoparticles. A design of experiments (DOE) framework comprising 27 experimental runs was employed to investigate the influence of the AFM cantilever's dimensional parameters on the critical manipulation force. The collected data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology (RSM), and an empirical regression model was developed accordingly. The model exhibited a high reliability of 94.16%, demonstrating strong predictive capability. Among the examined parameters, the cantilever thickness was identified as the most influential factor affecting the critical force. These findings provide valuable insights for optimizing AFM-based nanoparticle manipulation processes in nanotechnology applications.

Keywords: Critical force, Nanomanipulation, cantilever dimensional parameter, atomic force microscope, Design of Experiment, Regression equation

۱- مقدمه

نانودستکاری شاخه‌ای از علم نانو فناوری است که با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی میسر می‌گردد. اکنون پس از دهه‌ها توسعه توسط محققین، این فرایند قادر بوده است تا جایگاه ویژه‌ای در زمینه‌های صنعتی، پزشکی و الکترونیک به دست آورد و از نتایج تجربی به‌سوی کاربردهای صنعتی قدم گذارد. این میزان از گسترش التزام شناسایی و درک پارامترهای مؤثر در کیفیت و دقت فرایند را فراهم آورده است.

میکروسکوپ نیروی اتمی، به‌عنوان مهم‌ترین ابزار کشف ساختار مواد از پیشرفت تکنولوژی بهره‌مند شده است. در تازه‌ترین مطالعات،

سومیا و همکاران [۱] از میکروسکوپ نیروی اتمی دارای خاصیت رسانایی استفاده کرده‌اند تا ساختار مولیبدن دی سولفید^۱ را در هنگام دستکاری بررسی نمایند. هدف از این تحقیق بررسی خواص الکتریکی کریستال فلز بیان گردیده است.

باتوجه به اهمیت بررسی پارامترهای مؤثر در دستکاری، کورایم و نوحی [۲] نیروی خمشی وارده بر نانولوله‌های کربنی را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه با استفاده از نظریه مکانیک‌های تماس کلاسیک و جدید مدل‌سازی فرایند انجام گرفته است. همچنین شبیه‌سازی آن با استفاده از روش‌های محاسباتی تحلیل شده است. درنهایت کیفیت ارزیابی مدل‌ها بیان شده است.

به‌کارگیری دستکاری در زمینه‌های متفاوت از جمله پزشکی

^۱ MoS₂

سرعت فزاینده‌ای یافته است. استفاده از نانوبات‌ها در جابه‌جایی سلول‌ها یکی از برجسته‌ترین کاربردهای آن به شمار می‌رود. نحوه پیشرفت همچنین چالش‌های استفاده از این ربات‌ها توسط چن و همکاران [۳] ارائه گردیده است.

در ادامه به‌کارگیری میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه پزشکی، این بار ماده مورد نظر تحت بررسی اسکلت سلولی^۲ است. ژائو و همکارانش [۴] ضمن تحلیل ساختار ماده بیولوژیکی، با استفاده از آلمان محدود نحوه پاسخ سلول به محرک‌ها را نیز ارزیابی کرده‌اند.

در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی روند ویروسی شدن سلول بررسی گردیده است. همچنین در خلال تحلیل این فرایند، تخمینی از مدول یانگ نیز برآورد شده است. باتوجه‌به نتایج حاصل از این مطالعه داروی ضدویروسی مورد آزمایش می‌تواند در تغییر ساختار سلول تأثیرگذار باشد [۵].

شیا و تومی [۶] در مطالعه‌ای توسعه اخیر میکروسکوپ نیروی اتمی را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه مروری پیشرفت‌هایی از جمله ارتقای وضوح، نوع تصویربرداری گزارش شده است.

کوریام و خاکسار [۷] مطالعات پیشین در زمینه دستکاری را گردآوری کرده‌اند. در این مقاله مروری شرحی از مدل‌های دو و سه‌بعدی، پارامترهای هندسی مؤثر، محیط‌های مختلف و نظریه‌های مکانیک تماس کلاسیک و توسعه‌یافته داده شده است.

در دیگر مطالعه کوریام و همکاران [۸] با به‌کارگیری مدل‌های الاستیک و پلاستیک سعی در ارتقای تخمین نیرو و زمان بحرانی دستکاری داشته‌اند. بر مبنای نتایج حصول یافته مقدار تخمین مدل کولمب از مدل‌های LuGre و HK بیشتر بوده است.

تخمین نیرو و زمان بحرانی با استفاده از مدل‌های مکانیک تماس کروی دیگر مورد بررسی شده توسط طاهری [۹] است. در این مطالعه بررسی چهار مدل تماسی Hertz، JKR، DMT و BCP گزارش شده است. بر مبنای آنچه طاهری در این تحقیق بیان می‌کند کمترین برآورد نیرو و زمان بحرانی مرتبط با مدل Hertz است.

زمان و نیروی بحرانی دو فاکتور حایز اهمیت در فرایند دستکاری به شمار می‌روند. طاهری [۱۰] با درنظرداشتن این موضوع، با استفاده از آنالیز آماری پارامترهای مؤثر بر دو فاکتور یاد شده را مورد بررسی قرار داده است. بنابر نتایج حاصل از این مطالعه ضریب پواسون و مدول الاستیسیته تیرک مؤثرترین پارامترها بیان شده‌اند.

دستکاری نوری^۳ روش دیگری از دستکاری مواد به شمار می‌رود. ژائو و همکاران [۱۱] باتوجه‌به چالش‌های پیشرو، مدل‌های مختلف این نوع دستکاری از جمله با گرما یا بدون گرما را بررسی نموده و نحوه برهمکنش نور و ماده را ارائه کرده‌اند.

شو و همکاران [۱۲] مروری بر توسعه عملکرد میکروسکوپ اتمی در بررسی مواد دوبعدی را ارائه کرده‌اند. همچنین برشمردن تغییرات مؤثر و چشمگیر میکروسکوپ پروب روبشی^۴ از دیگر مواردی است که به آن اشاره شده است.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه ارتقای وضوح تصویربرداری

میکروسکوپ نیروی اتمی موضوع تحقیق میراندا و همکارانش [۱۳] است. بر مبنای آنچه در این تحقیق عنوان شده است ترکیب قابلیت‌های میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ نوری می‌تواند در حل این چالش مؤثر واقع شود.

ضربه با حداکثر نیرو^۵ روشی نوین در زمینه تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی است که توسط ژانگ و همکاران [۱۴] گزارش شده است. استفاده از این تکنیک در محیط مایع، اندازه‌گیری خواص نانو مکانیکی ضمن برآورد خواص شیمیایی و الکتریکی از جمله قابلیت‌های منحصره‌فرد این تکنیک است.

نانوبات‌ها قسمتی از فرایند دستکاری هستند که به‌کارگیری آنها در حال گسترش است. با درنظرداشتن این موضوع، لو و همکاران توسعه رباتیک را گزارش کرده‌اند. باتوجه‌به آنچه آنان بیان می‌کنند، دستکاری نانوذرات کلونیدی هدف اصلی این مطالعه بوده است [۱۵].

در دیگر مطالعه در زمینه نانودستکاری، حساسیت نیرو و زمان بحرانی در فرایند نانودستکاری مبتنی بر AFM نسبت به پارامترهای مختلف بررسی شده است. مدل ارائه‌شده شامل نیروهای چسبندگی، اصطکاکی و نیروی جاذبه‌شدگی مبتنی بر مدل تماسی JKR است. با استخراج معادلات دینامیکی و شبیه‌سازی جابه‌جایی ذره طلای نانومقیاس روی زیرلایه سیلیکونی، رفتارهایی مانند لغزش، چرخش و نوسان ذره تحلیل شده است [۱۶].

پژوهش حاضر مدلی جامع و دقیق برای دستکاری خودکار در مقیاس نانو ارائه می‌دهد. در این مدل، با بهره‌گیری از مدل اصطکاکی لوند-گرونوبل^۶، رفتار واقعی چسب-لغزش ذره شبیه‌سازی شده و برای کنترل دقیق حرکت زیرلایه از روش کنترل مد لغزشی استفاده شده است تا اثرات رانش، هیستریزس و سایر عدم قطعیت‌ها به حداقل برسد [۱۷].

با توجه به اهمیت توسعه نانودستکاری، در مطالعه‌ای مدل‌های مختلف مکانیک تماس در مقیاس نانو از جمله Hertz، DMT، JKR و دیگر مدل‌ها برای تحلیل رفتار تماس و تأثیر نیروی چسبندگی بررسی و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد درک صحیح از تغییرات شعاع و عمق تماس برای بهبود کنترل و دقت دستکاری ضروری است [۱۸].

با وجود مطالعات متعدد در زمینه نانودستکاری مبتنی بر AFM، بیشتر پژوهش‌های پیشین بر تحلیل‌های نظری ساده یا داده‌های آزمایشگاهی محدود تمرکز داشته‌اند. در این مطالعه، اثر هم‌زمان پارامترهای هندسی تیرک شامل ضخامت، عرض و طول، و همچنین ویژگی‌های سوزن مانند ارتفاع و شعاع نوک، بر مقدار نیروی بحرانی در فاز نخست دستکاری به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش، با به‌کارگیری رویکرد طراحی آزمایش‌ها (DOE) و روش سطح پاسخ (RSM)، مدلی آماری و رگرسیونی توسعه داده شده است که می‌تواند نیروی بحرانی را با دقت بالا و بدون نیاز به انجام آزمایش‌های تکراری پیش‌بینی نماید.

پنج فاکتور ضخامت، عرض و طول تیرک، ارتفاع و شعاع سوزن به‌عنوان پارامترهای ورودی درنظر گرفته شده است. سپس با به‌کارگیری روش طراحی آزمایش معادله حاکم بر فرایند استخراج و

^۵ PeakForce Tapping (PFT)

^۶ Lund-Grenoble

^۲ Cytoskeleton

^۳ Optical manipulation

^۴ Scanning probe microscopy (SPM)

$$M_\theta = K_\theta \theta \quad (3)$$

با در نظر داشتن سه معادله پیشین و با استفاده از معادلات نیوتن می‌توان معادلات دینامیکی را استخراج نمود.

$$F_Y - F_y = m\ddot{y} = m \frac{(y_T + y_P)}{2} \quad (4)$$

$$F_Z - F_z = m\ddot{z} = m \frac{(z_T + z_P)}{2} \quad (5)$$

$$-M_\theta + F_Z H \sin \theta + F_y H \cos \theta = I_P \ddot{\theta} \quad (6)$$

پس از جای گذاری معادلات شتاب‌ها، معادلات نیروهای رأس پروب، معادلات نیروی وارده از سوزن به ذره را خواهیم داشت.

$$F_Z = F_z - m \left[\frac{H}{2} (-\ddot{\theta} \sin \theta + \dot{\theta}^2 \cos \theta) + \ddot{\delta}_t \cos \theta + \ddot{\delta}_s \cos^2 \theta \right] \quad (7)$$

$$F_Y = F_y + m \left[\frac{H}{2} (-\ddot{\theta} \cos \theta + \dot{\theta}^2 \sin \theta) - \ddot{\delta}_t \sin \theta \right] \quad (8)$$

$$F_T = \sqrt{F_Y^2 + F_Z^2} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که معادلات (۱) تا (۹) به عنوان چارچوب نظری تحقیق ارائه شده‌اند و هدف از آن‌ها تعریف روابط مکانیکی حاکم بر تماس نوک-ذره و شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر بر نیروی بحرانی دستکاری است. این معادلات بر اساس مدل‌های کلاسیک تماس الاستیک و نیروهای بین‌سطحی توسعه یافته‌اند و مبنای انتخاب متغیرهای ورودی در طراحی آزمایش‌ها را تشکیل می‌دهند.

از آنجا که تمرکز اصلی این پژوهش بر تحلیل تجربی-عددی رفتار نیروی بحرانی با تغییر ابعاد تیرک است، حل تحلیلی یا عددی معادلات (۱) تا (۹) در این مرحله دنبال نشده است. نتایج حاصل از ۲۷ حالت طراحی شده بر اساس این مبنای در ادامه (جدول ۱) آورده شده و از طریق روش‌های آماری و رگرسیونی (DOE-RSM) در قالب رابطه (۱۰) مدل سازی و تحلیل شده‌اند. به این ترتیب، مدل نهایی ارائه شده تلفیقی از مبنای نظری تماس و نتایج عددی حاصل از طراحی آزمایش‌ها محسوب می‌شود.

میزان اثرگذاری هر کدام از پارامترهای بر نیروی بحرانی دستکاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل سازی

۲-۱- مدل سازی دستکاری

دستکاری فرایندی است که به منظور شناسایی ساختار، بررسی خواص و جابه‌جایی نانو ذرات به کار گرفته می‌شود. ابزار اصلی برای منیپولشن نانو میکرو ذرات به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌گیرد. در ابتدا می‌بایست بافت مورد بررسی آماده گردد. بنابراین، نمونه‌های بافتی مطابق با پروتکل‌های استاندارد آماده‌سازی شدند. سپس، نمونه‌ها با محلول نمکی فیزیولوژیک شست‌وشو داده شده و به منظور حفظ یکپارچگی ساختاری، به مدت ۱ دقیقه در محلول گلوترالدهید ۰.۵٪ تثبیت گردیدند. سپس شست‌وشوی سه مرحله‌ای با محلول بافر فسفات سالین (PBS) به مدت ۴ دقیقه برای حذف بقایای محلول تثبیت‌کننده انجام شد. در ادامه، نمونه‌ها در شرایط محیطی در هوا خشک شدند و پس از آماده‌سازی نهایی، روی پایه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) جهت تصویربرداری و تحلیل مکانیکی نصب گردیدند. میکروسکوپ نیروی اتمی مورد استفاده در این آزمایش در شکل ۱-ب نمایش داده شده است.

حرکت نانو ذره به وسیله تیرک مستطیلی میکروسکوپ انجام می‌پذیرد. ضمن حرکت نانو ذره، میکروسکوپ این قابلیت را دارد که از نانو ذره تصویربرداری کند. این تصویر برداری با بازتاب نور لیزر به فتودیود و سپس ارسال داده‌ها به تحلیل گر ممکن می‌گردد. دستکاری دارای دو فاز است. در فاز اول پارامترهای نیرو و زمان بحرانی از اهمیت به سزایی برخوردار هستند. همانطور که پیشتر بیان گردید سوزن محرکه نانو ذره است بنابراین نیروی وارده از سوزن می‌بایست بر نیروی اصطکاک غلبه نماید. شماتیک کلی این فرایند در شکل ۱-الف نشان داده شده است.

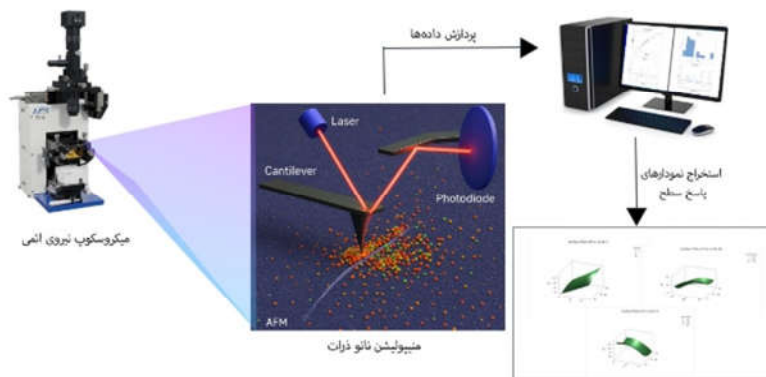
در ادامه به تشریح معادلات دستکاری می‌پردازیم. معادلات با استفاده از مرجع [۱۹] گردآوری شده‌اند. معادلات نیرو و گشتاور وارده از سوزن به ذره بدین صورت است.

$$F_Y = K_Y y_p \quad (1)$$

$$F_Z = K_Z z_p \quad (2)$$



(ب)



(الف)

شکل ۱- طرحواره نانودستکاری و میکروسکوپ نیروی اتمی

۲-۲- طراحی آزمایش

یکی از روش‌های آماری که منجر به افزایش کیفیت در فرایندهای مختلف می‌شود، طراحی آزمایش نام دارد. یافتن میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی بر خروجی ضمن استخراج معادله حاکم بر فرایند نقطه قوت این روش به شمار می‌رود. این مزیت موجب می‌گردد تا با کاهش تعداد آزمایشات لازم میزان هزینه و زمان مورد نیاز کاهش یابد همچنین اطلاعات لازم و کافی از فرایند را در خدمت کاربر قرار می‌دهد. روش‌های تک عاملی، فاکتوریل، سطح پاسخ و تاکوچی از روش‌های مرسوم طراحی آزمایش به شمار می‌آیند. در این تحقیق روش سطح پاسخ برای تحلیل متغیرها به کار برده شده است. دلیل به‌کارگیری این روش را می‌توان داشتن مزیت‌هایی همچون استخراج نمودارهای تأثیرگذاری متغیرهای ورودی و مدل‌سازی رابطه بین متغیرهای خروجی و ورودی به‌صورت معادله رگرسیون نام برد. در این مطالعه به‌منظور بررسی اثرگذاری پارامترهای ابعادی تیرک میکروسکوپ بر نیروی بحرانی دستکاری ۲۷ آزمایش با استفاده از نرم افزار متلب انجام گرفته است. همچنین، به‌منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی تیرک بر نیروی بحرانی دستکاری، از طرح فاکتوریل کامل استفاده شده است. در این روش، تمامی ترکیب‌های ممکن از سطوح پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرند تا اثرات اصلی و متقابل متغیرها با دقت بیشتری شناسایی شوند. پنج پارامتر مستقل شامل ضخامت تیرک (T)، عرض تیرک (W)، طول تیرک (L)، ارتفاع سوزن (H) و شعاع سوزن (Rt) به‌عنوان عوامل ورودی انتخاب شدند. برای هر پارامتر، سه سطح پایین، میانی و بالا در نظر گرفته شد.

بازه تغییرات این پارامترها به‌ترتیب ضخامت تیرک ۱ تا ۱/۵ میکرومتر، عرض تیرک ۴۰ تا ۶۰ میکرومتر، طول تیرک ۲۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر، ارتفاع سوزن ۱۰ تا ۱۴ میکرومتر و شعاع سوزن ۲۰ تا ۳۰ نانومتر است. مقادیر حاصل از آزمایشات در جدول ۱ ارائه گردیده است.

نتایج حاصل که در جدول (۱) ارائه شده است، نشان می‌دهد که مقدار نیروی بحرانی در بازه‌ای از حدود ۰/۸ تا ۳/۶ نانونیوتن متغیر است. این تغییرات بیانگر آن است که ویژگی‌های هندسی تیرک و سوزن تأثیر مستقیمی بر مقاومت اولیه ذره در برابر لغزش دارند. بررسی روند داده‌ها نشان می‌دهد که افزایش ضخامت تیرک به‌طور چشمگیر موجب افزایش نیروی بحرانی می‌شود، در حالی که افزایش طول تیرک اثر معکوس داشته و منجر به کاهش مقدار نیرو شده است. پارامترهای عرض تیرک و ارتفاع سوزن نیز تأثیر متوسط اما مثبت بر نیروی بحرانی داشته‌اند، در حالی که افزایش شعاع سوزن باعث کاهش تدریجی نیروی بحرانی شده است. چنین رفتاری با اصول مکانیکی تیرک و رابطه میان سختی خمشی و ابعاد هندسی آن تطابق دارد.

جدول ۱- طراحی آزمایش پارامترهای مؤثر بر نیروی بحرانی

نیروی بحرانی (μN)	ضخامت تیرک (T) (μm)	عرض تیرک (W) (μm)	طول تیرک (L) (μm)	ارتفاع سوزن (H) (μm)	شعاع سوزن (Rt) (μm)	شماره آزمایش
۱/۷۲۴۲۹۹	۱	۶۰	۲۰۰	۱۰	۳۰	۱
۱/۳۳۸۸۷۴	۱	۴۰	۲۰۰	۱۰	۳۰	۲
۰/۸۷۷۱۱۹	۱	۴۰	۲۰۰	۱۴	۲۰	۳

۰/۹۱۰۷۱۹	۱	۶۰	۲۰۰	۱۴	۳۰	۴
۱/۳۶۸۰۵۳	۱	۴۰	۲۵۰	۱۰	۲۰	۵
۱/۶۳۲۱۴۷	۱	۶۰	۲۵۰	۱۰	۳۰	۶
۱/۱۲۴۹۶۱	۱	۶۰	۲۵۰	۱۴	۲۰	۷
۰/۸۵۸۵۱۱	۱	۴۰	۲۵۰	۱۴	۳۰	۸
۱/۲۳۵۳۰۷	۱	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۹
۲/۲۵۴۹۴	۱/۲۵	۴۰	۲۰۰	۱۰	۲۰	۱۰
۲/۴۱۵۴۱۵	۱/۲۵	۶۰	۲۰۰	۱۰	۳۰	۱۱
۲/۵۰۵۰۹۵	۱/۲۵	۶۰	۲۰۰	۱۴	۲۰	۱۲
۱/۴۵۲۳۲۷	۱/۲۵	۴۰	۲۰۰	۱۴	۳۰	۱۳
۲/۳۵۹۳	۱/۲۵	۶۰	۲۵۰	۱۰	۲۰	۱۴
۱/۹۳۷۹۹۸	۱/۲۵	۴۰	۲۵۰	۱۰	۳۰	۱۵
۱/۴۱۷۰۶	۱/۲۵	۴۰	۲۵۰	۱۴	۲۰	۱۶
۱/۶۴۳۳۸۹	۱/۲۵	۶۰	۲۵۰	۱۴	۳۰	۱۷
۱/۸۷۷۸۲۳	۱/۲۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۱۸
۳/۵۴۸۷۸۴	۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۰	۱۹
۲/۳۵۰۲۲۷	۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۳۰	۲۰
۲/۷۶۹۵۲۶	۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۰	۲۵	۲۱
۲/۲۸۰۱۱۱	۱/۵	۴۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۲۲
۲/۵۲۸۰۳۴	۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۲۳
۲/۸۱۲۳۴۹	۱/۵	۶۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۲۴
۳/۵۹۲۳۲۲	۱/۵	۵۰	۲۰۰	۱۲	۲۵	۲۵
۲/۷۷۸۵۵۶	۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۴	۲۵	۲۶
۲/۳۰۶۱۷۱	۱/۵	۵۰	۲۵۰	۱۲	۲۵	۲۷

در ادامه با توجه به نتایج، آنالیز واریانس پارامترها نیز انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۲ بیان شده است. هدف از این آنالیز برآورد میزان اثرگذاری پارامترها بر نیروی بحرانی دستکاری است. در تحلیل آماری داده‌ها، مقادیر P-Value و T-Value به‌عنوان شاخص‌های آماری اصلی برای سنجش اثرگذاری هر پارامتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقدار T نشان‌دهنده نسبت ضریب هر پارامتر به میزان خطای استاندارد آن است و مقدار بالاتر آن بیانگر اثرگذاری بیشتر متغیر بر پاسخ خروجی است. در مقابل، مقدار P میزان احتمال عدم معناداری پارامتر را نشان می‌دهد و هرچه مقدار آن کمتر باشد، اعتبار آماری تأثیر آن متغیر بیشتر خواهد بود. بر اساس این شاخص‌ها، پارامترهایی که دارای مقدار T بزرگ‌تر و مقدار P کوچک‌تر (کمتر از ۰/۰۵) هستند، به‌عنوان عوامل مؤثر و معنی‌دار بر نیروی بحرانی شناسایی می‌شوند. نتایج جدول (۲) نیز مؤید همین موضوع بوده و نشان می‌دهد که ضخامت تیرک بیشترین اثر را بر مقدار نیروی بحرانی دارد.

در حالی که ارتفاع سوزن (H) با ضریب منفی نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع موجب کاهش نیروی بحرانی می‌شود. در میان پارامترهای برهم‌کنش اثر $T \times L$ و $T \times Rt$ از نظر آماری معنی‌دار است و ضرایب منفی آن‌ها بیان می‌کند که افزایش همزمان ضخامت با طول یا شعاع سوزن، می‌تواند از شدت افزایش نیروی بحرانی بکاهد.

جدول ۲- ضرایب و اثرگذاری پارامترها

ترم‌ها	ضرایب	خطای معیار	T-Value	P-Value	VIF
مقادیر	-۱۵/۸۷	۳/۶۴	-۴/۳۶	۰/۰۰۰	

عرض تیرک (W)	۱	۰/۶۲۰۸	۰/۶۲۰۷۸	۱۴/۰۳	۰/۰۰۱
طول تیرک (L)	۱	۰/۴۸۸۰	۰/۴۸۷۹۵	۱۱/۰۳	۰/۰۰۴
ارتفاع سوزن (H)	۱	۱/۲۴۴۵	۱/۲۴۴۴۷	۲۸/۱۳	۰/۰۰۰
شعاع سوزن (Rt)	۱	۰/۲۶۵۸	۰/۲۶۵۷۸	۶/۰۱	۰/۰۲۴
T*L	۱	۰/۶۱۹۷	۰/۶۱۹۷۳	۱۴/۰۱	۰/۰۰۱
T*Rt	۱	۰/۳۷۱۷	۰/۳۷۱۷۰	۸/۴۰	۰/۰۰۹
خطا	۱۹	۰/۸۴۰۵	۰/۴۴۲۴		
کل	۲۶	۱۴/۳۸۰۴			

معادله رگرسیون استخراج شده در رابطه ۱۰ قابل مشاهده است.

$$Fcr = -15.87 + 17.31 T + 0.01857 W + 0.0466 L - 0.1315 H + 0.1718 Rt - 0.0445 T*L - 0.1724 T*Rt \quad (10)$$

بررسی ضرایب مدل رگرسیونی نشان می‌دهد که ضرایب مربوط به طول تیرک (L) و شعاع سوزن (Rt) منفی هستند. این روند از دیدگاه فیزیکی منطقی است، زیرا افزایش طول تیرک باعث کاهش سختی خمشی و کاهش نیروی منتقل شده به ناحیه تماس می‌شود، و در نتیجه نیروی بحرانی لازم برای شروع لغزش ذره کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش شعاع سوزن موجب افزایش سطح تماس و کاهش تمرکز تنش در ناحیه تماس می‌گردد، که این امر نیز به کاهش نیروی مماسی بحرانی می‌انجامد.

در ادامه، به منظور بررسی مدل رگرسیون از نمودارهای تشخیصی استفاده شده است. نمودار (الف) رابطه‌ی توزیع باقیمانده‌ها را با منحنی نرمال را مقایسه می‌کند. نزدیکی نقاط به خط قطری قرمز رنگ نشان‌دهنده‌ی انطباق مناسب داده‌ها با توزیع نرمال است. تنها چند نقطه در نواحی انتهایی اندکی انحراف دارند که می‌تواند ناشی از وجود داده‌های مرزی باشد. در کل، این نمودار تأیید می‌کند که فرض نرمال بودن خطاها در مدل برقرار است.

در نمودار (ب) در شکل ۲، هیستوگرام باقیمانده‌ها نشان می‌دهد که فراوانی داده‌ها در اطراف مقدار صفر بیشترین مقدار را دارد و توزیع به شکل زنگوله‌ای متقارن است. این الگو نشان‌دهنده‌ی عدم وجود سوگیری سیستماتیک در پیش‌بینی‌ها و دقت بالای مدل در برآورد مقادیر پاسخ است. تمرکز داده‌ها در محدوده‌ی مرکزی، صحت عملکرد مدل در کل دامنه‌ی آزمایش‌ها را تأیید می‌کند.

نمودار باقیمانده‌ها در برابر مقادیر برازش‌یافته، نقاط بدون الگوی خاصی در اطراف خط صفر پراکنده‌اند. این پراکندگی تصادفی نشان می‌دهد که فرض همگنی واریانس برقرار است و مدل در کل بازه‌ی داده‌ها عملکرد یکنواخت دارد. نبود روند یا ساختار مشخص، یکی از نشانه‌های صحت مدل و عدم وجود خطای سیستماتیک در پیش‌بینی‌ها در نمودار (ج) است.

نمودار (د) در شکل ۲، وضعیت استقلال باقی‌مانده‌ها را نسبت به ترتیب ثبت مشاهدات نشان می‌دهد. پراکندگی تصادفی نقاط در اطراف خط صفر و نبود روند صعودی یا نزولی مشخص نشان می‌دهد که

ثابت					
ضخامت تیرک (T)	۱۷/۳۱	۳/۰۷	۵/۶۴	۰/۰۰۰	۲۳۹/۵۰
عرض تیرک (W)	۰/۰۱۸۵۷	۰/۰۰۴۹۶	۳/۷۵	۰/۰۰۱	۱/۰۰
طول تیرک (L)	۰/۰۴۶۶	۰/۰۱۴۰	۳/۳۲	۰/۰۰۴	۵۰/۰۰
ارتفاع سوزن (H)	-۰/۱۳۱۵	-۰/۰۳۴۸	-۵/۳۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰
شعاع سوزن (Rt)	۰/۱۷۱۸	۰/۰۷۰۱	۲/۴۵	۰/۰۲۴	۵۰/۰۰
T*L	-۰/۰۴۴۵	-۰/۰۱۱۹	-۳/۷۴	۰/۰۰۱	۲۳۲/۲۵
T*Rt	-۰/۱۷۲۴	-۰/۰۵۹۵	-۲/۹۰	۰/۰۰۹	۱۰۶/۲۵

نتایج ارائه شده در جدول (۳) دقت مدل آماری استخراج شده را نشان می‌دهد. مقدار ضریب تعیین (R^2) برابر با ۹۴/۱۶ درصد بیانگر انطباق مناسب مدل با داده‌های تجربی است، در حالی که مقدار اصلاح شده آن ۸۷/۵۸٪ از پایداری مدل در برابر تغییرات متغیرها حکایت دارد. مقدار پایین خطای استاندارد باقیمانده‌ها ($S = ۰/۲۱۰$) نیز اعتبار مدل را از نظر آماری تأیید می‌کند. با توجه به اینکه مقدار قابلیت اطمینان مدل سازی بیانگر دقت آن است، قابلیت اطمینان مدل سازی مورد بررسی در این مقاله ۹۴/۱۶٪ بیان می‌گردد.

جدول ۳- قابلیت اطمینان مدل

انحراف معیار	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین پیش‌بینی
۰/۲۱۰۳۲۵	۹۴٪/۱۶	۹۲٪/۰۰	۸۷٪/۵۸

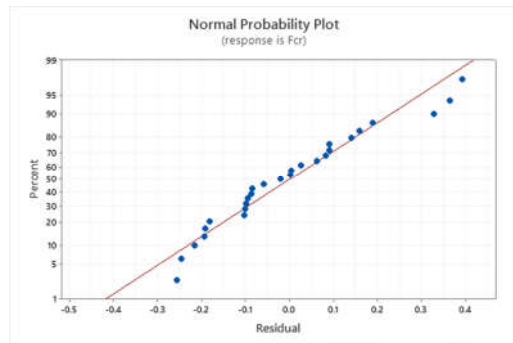
بر اساس این شاخص‌ها، مدل به دست آمده از قابلیت پیش‌بینی مناسبی برای تخمین نیروی بحرانی برخوردار است. همچنین میزان اثرگذاری متغیرها بر نیروی بحرانی در جدول ۴ ارائه گردیده است. تحلیل واریانس ارائه شده در جدول ۳ بیانگر معنی داری کل مدل و هر یک از پارامترهای مؤثر است. مقدار F-Value کل مدل برابر با ۴۳/۷۳ و سطح معنی داری آن کمتر از ۰/۰۰۱ است که نشان‌دهنده‌ی معتبر بودن مدل رگرسیونی است. بین متغیرها، ضخامت تیرک (T) با مقدار ۳۱/۸۱ بیشترین سهم را در تغییرات نیروی بحرانی دارد. پس از آن، ارتفاع سوزن (H) و عرض تیرک (W) به ترتیب بیشترین تأثیر را نشان داده‌اند.

همچنین تعامل‌های $T \times L$ و $T \times Rt$ نیز معنادار گزارش شده‌اند، که بیانگر وجود اثرات هم‌زمان میان ضخامت با طول و شعاع سوزن است.

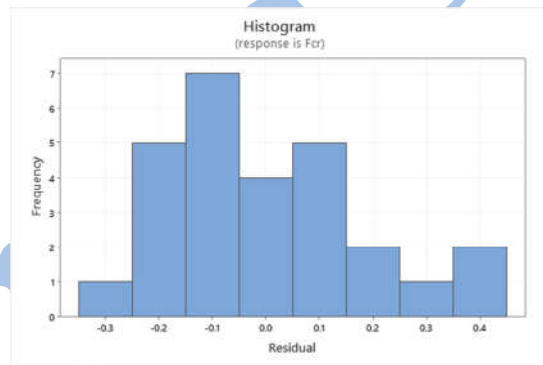
جدول ۴- آنالیز واریانس نیروی بحرانی

منابع	درجه آزادی	جمع مجزورات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
رگرسیون	۷	۱۳/۵۳۹۹	۱/۹۳۴۲۷	۴۳/۷۳	۰/۰۰۰
ضخامت تیرک (T)	۱	۱/۴۰۷۱	۱/۴۰۷۱۱	۳۱/۸۱	۰/۰۰۰

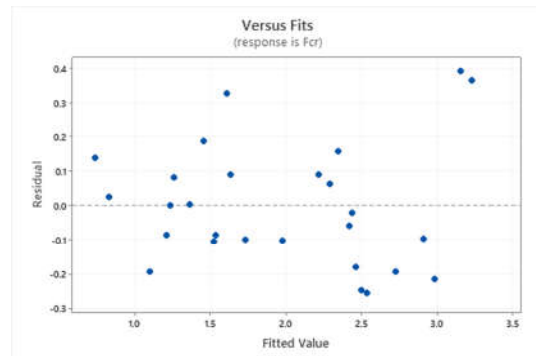
خطاها مستقل از یکدیگر هستند و ترتیب انجام آزمایش‌ها تأثیری بر نتایج ندارد. این ویژگی بیانگر پایداری زمانی و آماری مدل است. نتایج حاصل از نمودارهای شکل ۲ صحت مدل رگرسیون را تایید می‌نمایند.



(الف)



(ب)



(ج)



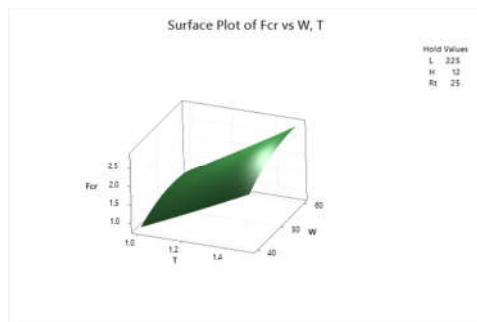
(د)

شکل ۲- نمودار پراکندگی باقیمانده ها

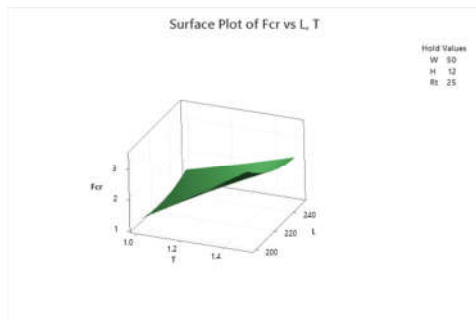
۳- نتایج

۳-۱- نتایج آنالیز حساسیت

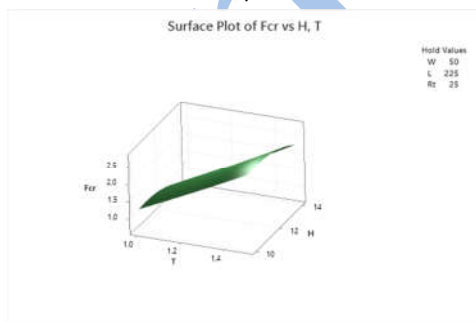
در این مطالعه، برای بررسی اثر متغیرهای مختلف شامل ضخامت، عرض و طول تیرک، ارتفاع و شعاع سوزن بر مقدار نیروی بحرانی، از نمودارهای سطح پاسخ سه‌بعدی استفاده شده است. نمودارها با استفاده از نرم افزار مینی تب استخراج شده است. نمودارهای شکل ۳ به‌خوبی نشان می‌دهند که چگونه تغییرات همزمان دو متغیر ورودی، بر متغیر پاسخ اثر می‌گذارد، در حالی که سایر متغیرها در مقدار ثابت نگه داشته شده‌اند. این رویکرد به درک بهتر روابط غیرخطی و اثرات متقابل متغیرها کمک می‌کند.



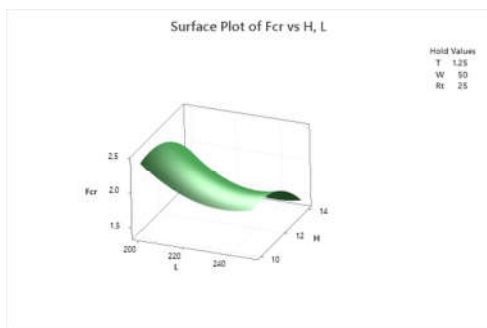
(الف)



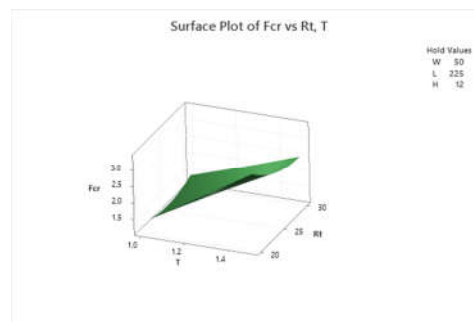
(ب)



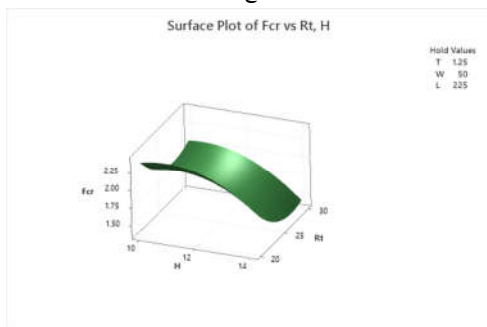
(پ)



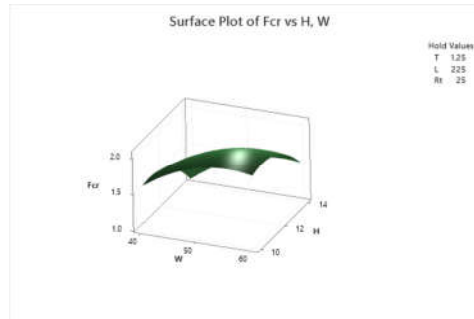
(ح)



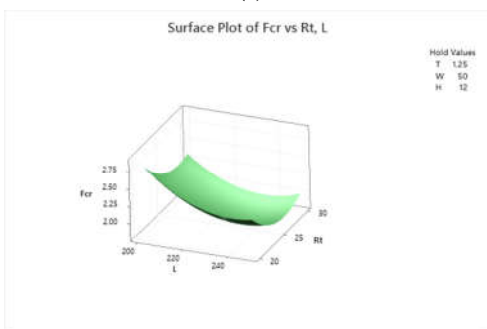
(ت)



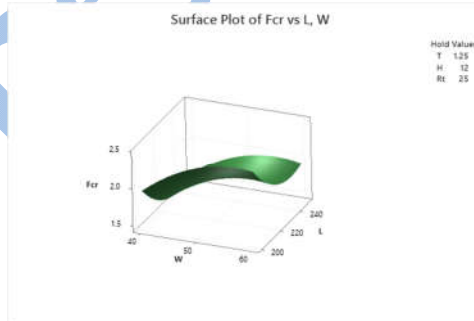
(د)



(ث)

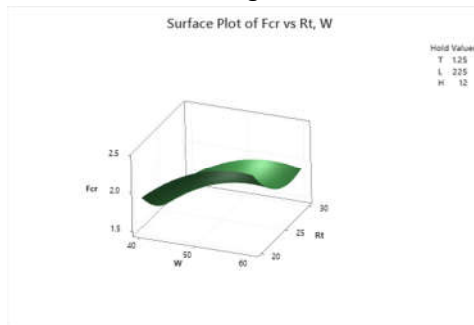


(ذ)



(ج)

شکل ۳- نمودارهای اثرگذاری پارامترها بر نیروی بحرانی



(چ)

شکل ۳ نمودار (الف) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، مقدار نیروی بحرانی به صورت خطی و قابل ملاحظه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عرض تیرک، نیروی بحرانی روند صعودی ملایم دارد. اثر ضخامت تیرک در این نمودار بسیار بیشتر از عرض تیرک است. شیب بیشتر نمودار در راستای ضخامت تیرک توضیح این امر است. در نمودار (ب)، ضخامت تیرک همچنان اثر افزایشی قابل توجهی بر نیروی بحرانی دارد. اما طول تیرک تأثیر کمتری نسبت به ضخامت تیرک نشان می‌دهد و نمودار در راستای طول تیرک نسبتاً مسطح‌تر است. هرچند در مقادیر خیلی بالا یا پایین طول تیرک، مقدار نیروی بحرانی کمی نوسان دارد. نمودار (پ)، افزایش ضخامت تیرک با افزایش قابل توجه نیروی بحرانی را نشان می‌دهد، در حالی که تغییر ارتفاع سوزن اثر منفی جزئی دارد. با توجه به نمودار مقادیر بالای ارتفاع سوزن، نیروی بحرانی کمی کاهش می‌یابد. شیب نمودار (ت) در جهت

ضخامت تیرک مقداری مثبت و در راستای شعاع سوزن منفی است. بنابراین، افزایش ضخامت تیرک باعث افزایش نیروی بحرانی شده و افزایش شعاع سوزن تأثیر منفی نسبی دارد. یعنی در مقادیر بالاتر شعاع سوزن، مقدار نیروی بحرانی کاهش می‌یابد.

نمودار (ج) نشان می‌دهد که افزایش عرض تیرک باعث افزایش نسبی نیروی بحرانی می‌شود. در حالی که ارتفاع سوزن تا حدودی رفتار متغیری دارد؛ در برخی بازه‌ها افزایش و در برخی کاهش خفیفی دارد. اثر عرض تیرک نسبت به ارتفاع سوزن پررنگ‌تر است. هر دو متغیر طول تیرک و عرض تیرک در نمودار (چ) تأثیر کمی دارند. تغییرات نیروی بحرانی در کل بازه تغییر عرض تیرک و طول تیرک زیاد نیست، اما افزایش عرض تیرک نسبت به طول تیرک تأثیر بیشتری در افزایش نیروی بحرانی دارد. با افزایش عرض تیرک، مقدار نیروی بحرانی افزایش یافته و در نهایت افزایش شعاع سوزن باعث کاهش ملایم نیروی بحرانی می‌شود. نمودار (ح) این اثر متضاد را به خوبی نمایش می‌دهد.

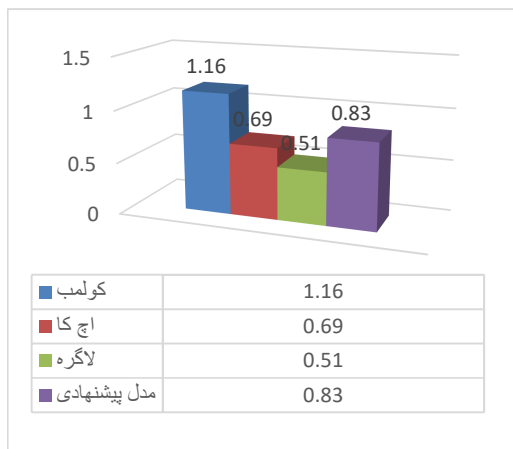
ارتفاع سوزن در نمودار (خ) نقش افزایشی ملایمی دارد در حالی که طول تیرک روند نوسانی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار در مقادیر بالای ارتفاع سوزن، مقدار نیروی بحرانی بیشتر است. بر مبنای نمودار (د) به‌طور کلی افزایش ارتفاع سوزن باعث افزایش نیروی بحرانی شده و افزایش شعاع سوزن باعث کاهش آن می‌شود. بیشترین مقدار نیروی بحرانی در مقادیر زیاد ارتفاع سوزن و کم شعاع سوزن مشاهده می‌شود. در نمودار (ذ)، شعاع سوزن اثر منفی بر نیروی بحرانی دارد و افزایش طول تیرک باعث تغییرات غیرخطی در نیروی بحرانی می‌شود. مقدار نیروی بحرانی در مقادیر بالای طول تیرک و پایین شعاع سوزن به حد اکثر می‌رسد.

۳-۲- صحت سنجی نتایج

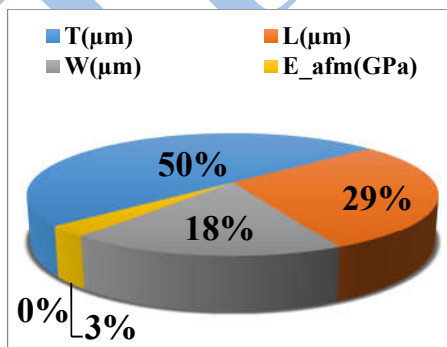
به‌منظور ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل رگرسیونی ارائه‌شده در معادله (۱۰)، نتایج پیش‌بینی‌شده نیروی بحرانی با داده‌های نظری به‌دست‌آمده از مدل‌های اصطکاکی مرجع [۲۰] مقایسه گردید. در این تحلیل، سه مدل HK، Coulomb و LuGre به‌عنوان معیارهای معتبر فیزیکی انتخاب شدند (شکل ۴-الف). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروی بحرانی پیش‌بینی‌شده توسط مدل حاضر در محدوده‌ی نتایج سه مدل مذکور قرار دارد. مدل کولمب بیشترین مقدار نیروی $1/16 \mu\text{N}$ و مدل LuGre کمترین مقدار $(0/51 \mu\text{N})$ را ارائه می‌دهد، در حالی که مدل پیشنهادی این پژوهش با مقدار حدود $(0/83 \mu\text{N})$ ، تطابق مناسبی با میانگین این سه مدل دارد. این هم‌پوشانی عددی بیانگر آن است که مدل آماری توسعه‌یافته توانسته است با وجود سادگی ساختار خود، رفتار مکانیکی تماس نوک و ذره را به‌خوبی بازنمایی کند. اختلاف‌های جزئی میان مقادیر به‌دست‌آمده، ناشی از تفاوت در فرضیات هندسی، جنس تیرک و شرایط محیطی آزمایش‌ها است. در نتیجه، مدل

پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تخمین اولیه نیروی بحرانی در مراحل طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند دستکاری نانوذرات مبتنی بر AFM مورد استفاده قرار گیرد. به علاوه، برای ارزیابی صحت مدل به‌دست‌آمده، سهم نسبی پارامترهای مؤثر بر نیروی بحرانی از نتایج مدل رگرسیونی [۲۱] با نمودار (الف) مقایسه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت تیرک (T) بیشترین سهم را در افزایش نیروی بحرانی داشته و حدود ۵۶٪ از تغییرات را توضیح می‌دهد، در حالی که ارتفاع سوزن (H) و عرض تیرک (W) به‌ترتیب تأثیرات متوسط و کمتری دارند.

این روند دقیقاً با ضرایب و مقادیر آماری مدل رگرسیونی مطابقت دارد و نشان می‌دهد که نمودار (ب) شکل ۴ رفتار فیزیکی مدل را به‌درستی بازتاب می‌دهد. بنابراین، هم‌خوانی نتایج کمی و کیفی تأییدی بر اعتبار و پایداری مدل پیشنهادی در پیش‌بینی نیروی بحرانی دستکاری است.



(الف) [۲۰]



(ب) [۲۱]

شکل ۴- نیروی بحرانی دستکاری و نتایج حاصل از مدل‌های

microscope and carbon nanotubes. *Int J Non-Linear Mech.* 2024;161:104690.

- [3] Chen W, Zhou H, Zhang B, Cao Q, Wang B, Ma X. Recent progress of micro/nanorobots for cell delivery and manipulation. *Adv Funct Mater.* 2022;32(18):2110625.
- [4] Zhou G, Zhang B, Tang G, Yu XF, Galluzzi M. Cells nanomechanics by atomic force microscopy: focus on interactions at nanoscale. *Adv Phys X.* 2021;6(1):1866668.
- [5] Yuan S, Liu L, Liu B, Chu T, Zhang C, Wang W. Study of virus infection procedure using atomic force microscope. In: 2019 IEEE Int Conf Robot Biomimetics (ROBIO); 2019 Dec. p. 1526-31.
- [6] Xia F, Youcef-Toumi K. Advanced atomic force microscopy modes for biomedical research. *Biosensors.* 2022;12(12):1116.
- [7] Korayem MH, Khaksar H. A survey on dynamic modeling of manipulation of nanoparticles based on atomic force microscope and investigation of involved factors. *J Nanopart Res.* 2020;22(1):27.
- [8] Korayem MH, Habibi Sooha Y, Rastegar Z. Modeling and simulation of viscoelastic biological particles' 3D manipulation using atomic force microscopy. *Appl Phys A.* 2018;124:1-13.
- [9] Taheri M. Using spherical contact models in modeling the three-dimensional manipulation of gold nanoparticles using atomic force microscopy to calculate critical force and time. *Mech Eng Univ Tabriz.* 2018;48(2):175-84. (In persian)
- [10] Taheri M. Investigating the effect of environmental factors on the critical force and time of 3D nanomanipulation using the Sobel statistical sensitivity analysis method. *Mech Eng Univ Tabriz.* 2019;49(2):159-68.
- [11] Zhou LM, Shi Y, Zhu X, Hu G, Cao G, Hu J, et al. Recent progress on optical micro/nanomanipulations: structured forces, structured particles, and synergetic applications. *ACS Nano.* 2022;16(9):13264-78.
- [12] Xu R, Guo J, Mi S, Wen H, Pang F, Ji W, et al. Advanced atomic force microscopies and their applications in two-dimensional materials: a review. *Mater Futures.* 2022;1(3):032302.
- [13] Miranda A, Gómez-Varela AI, Stylianou A, Hirvonen LM, Sánchez H, De Beule PA. How did correlative atomic force microscopy and super-resolution microscopy evolve in the quest for unravelling enigmas in biology? *Nanoscale.* 2021;13(4):2082-99.
- [14] Xu K, Sun W, Shao Y, Wei F, Zhang X, Wang W, et al. Recent development of PeakForce Tapping mode atomic force microscopy and its applications on nanoscience. *Nanotechnol Rev.* 2018;7(6):605-21.
- [15] Liu C, Huang Z, Huang S, Zhang Y, Li B, Nan F, et al. Robotic nanomanipulation based on spatiotemporal modulation of optical gradients. *ACS Nano.* 2024;18(29):19391-400.
- [16] Korayem MH, Zakeri M. Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2009;41(7):714-726.
- [17] Korayem MH, Omid E. Robust controlled manipulation of nanoparticles using atomic force microscope. *Micro & Nano Letters.* 2012;7(9):927-931.

اصطلاحات مختلف

۴- نتیجه گیری

دستکاری فرایندی است که با گسترش علم نانو در زمینه های متفاوت مورد توجه چشمگیری واقع شده است. این فرایند می تواند کاربرد فراوانی در شناسایی، جابه جایی و دستکاری میکرو نانوذرات ایفا کند. بررسی پارامترهای اثر گذار در این فرایند یکی از موضوعاتی که در این فرایند بسیار قابل توجه است. از آنجایی می توان اهمیت این موضوع را حاصل نمود که فاکتورها بر میزان کیفیت و دقت انجام دستکاری اثر به سزایی دارد. در این مقاله پارامترهای ابعادی تیرک به عنوان پارامترهای اثر گذار بر نیروی بحرانی دستکاری مطالعه و بررسی شده اند. داده های آزمایشات تجربی به وسیله آنالیز واریانس و روش پاسخ سطح تحلیل شده اند همچنین معادله رگرسیون حاکم بر فرایند نیز استخراج گردیده است. در نهایت تاثیر هر کدام از پارامترها بر نیروی بحرانی دستکاری تشریح گردیده است.

بر مبنای نتایج حاصل از این تحقیق اثرگذاری پارامترها بدین شرح خواهد بود. ضخامت تیرک تحت عنوان موثرترین پارامتر تعیین می گردد. عرض تیرک و ارتفاع سوزن به ترتیب دیگر پارامترها هستند که نسبت به ضخامت تیرک از اثرگذاری کمتری برخوردار هستند.

۵- نمادها

F_y	نیروی اعمالی به نوک پروب در راستای y
F_T	نیروی اعمالی به انتهای پروب در راستای y
F_z	نیروی اعمالی به انتهای پروب در راستای z
F_Z	نیروی اعمالی به نوک پروب در راستای z
F_y	نیروی اعمالی به نوک پروب در راستای y
H	ارتفاع سوزن
I_p	ممان اینرسی تیرک حول نقطه ابتدایی
L	طول تیرک
M_0	گشتاور پیچشی تیرک
m	جرم تیرک
Rt	شعاع سوزن
T	ضخامت تیرک
W	عرض تیرک
y_i	موقعیت ابتدایی پروب در راستای y

۶- مراجع

- [1] Sumaiya SA, Liu J, Baykara MZ. True atomic-resolution surface imaging and manipulation under ambient conditions via conductive atomic force microscopy. *ACS Nano.* 2022;16(12):20086-93.
- [2] Korayem MH, Hefzabad RN. Nonlinear modeling of nanoscale interaction forces between atomic force

- [18] Daeinabi K, Korayem MH. Indentation analysis of nano-particle using nano-contact mechanics models during nano-manipulation based on atomic force microscopy. *Journal of Nanoparticle Research*. 2011;13(3):1075–1091.
- [19] Korayem MH, Taheri M, Zakeri M. Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models. *Appl Surf Sci*. 2012;258(18):6713–22.
- [20] Korayem MH, Taheri M, Ghasemi M, Badkoobehhezavh H. Investigating the effective parameters in the Atomic Force Microscope-based dynamic manipulation of rough micro/nanoparticles by using the Sobol sensitivity analysis method. *Simulation*. 2015;91(12):1068–1080.
- [21] Taheri M. Application of atomic force microscopy in critical force and critical time extraction of 2D manipulation for gastric cancer tissue with different friction models. *Nanoscale*. 2022;9(1):136–145.

In Press