



تعیین زمان بحرانی مینیولیشن دو بعدی میکرو نانو ذرات با استفاده از معادله رگرسیون*

مقاله پژوهشی

DOI:

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 "نانومینیولیشن" 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 مینیولیشن است؛ از این‌رو، 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 نانومینیولیشن 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 ارائه‌شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در میان پارامترهای بررسی‌شده، ضخامت تیرک بیشترین تأثیر را بر زمان بحرانی دارد.

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

Determining the critical time for two-dimensional manipulation of micro-nanoparticles using a regression equation

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 of significant importance. 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 experiment 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 the critical time.

Key Words Cantilever dimensional parameter, regression, critical time, design of experimental

* تاریخ دریافت مقاله و تاریخ پذیرش آن می‌باشد.

مقدمه

نانومنیپولیشن یکی از حوزه‌های پیشرو در فناوری نانو است که با به کارگیری میکروسکوپ نیروی اتمی امکان پذیر شده و بستری نوین برای منیپولیشن در مقیاس نانومتری فراهم آورده است. طی دهه‌های اخیر، این فناوری دستخوش پیشرفت‌های چشمگیری شده است به گونه‌ای که امروزه کاربردهای متعددی در صنایع پیشرفته، فناوری‌های پزشکی از جمله درمان سرطان و سامانه‌های الکترونیکی یافته است. توسعه روزافزون این فرایند، 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 فرایند منیپولیشن از اهمیت بالایی برخوردار است، یوان و همکاران [1] نحوه ایجاد و به کارگیری مدل را بررسی و شبیه‌سازی منیپولیشن را تشریح کرده‌اند. بنا بر نتایج، مدل‌سازی مناسب علاوه بر شناسایی موقعیت نانوذره، می‌تواند در بهبود راندمان منیپولیشن مؤثر واقع شود.

به کارگیری مدل‌های ویسکوالاستیک و الاستیک به عنوان دو نوع مدل مکانیکی مشخص برای تخمین نیرو و زمان بحرانی، موضوع تحقیق کورایم و همکاران [2] بوده است. با توجه 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 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 فرایند 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 فرایند 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 فرایند 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 میکروولتز به پروب میکروسکوپ نیروی اتمی امکان هم‌زمان بازخورد آنی بصری را فراهم می‌سازد.

هو و همکاران [9] با مروری بر فناوری‌های نوین نانودستکاری، 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 فرایند منیپولیشن با میکروسکوپ نیروی اتمی، مشکل چسبندگی پایین به سطح زیرلایه است. یین و همکاران [10] به کارگیری محلول تری‌آمینوپروپیل تری‌اتوکسی 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 فرایندهای منیپولیشن داشته باشد.

از آنجایی که نانوذرات در حین فرایند مینیولیشن توسط پروب میکروسکوپ نیروی اتمی دچار لغزش یا چرخش می‌شوند، در نظر گرفتن تمایز بین اصطکاک لغزشی و چرخشی دشوار می‌گردد. در مقاله‌ای ما 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 مینیولیشن نانو روباتیک 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.

در مطالعه طاهری و همکاران [14]، از میکروسکوپ نیروی اتمی برای تحلیل خواص مکانیکی بافت سرطانی سینه در حین نانومینیولیشن 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 تانارا 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.

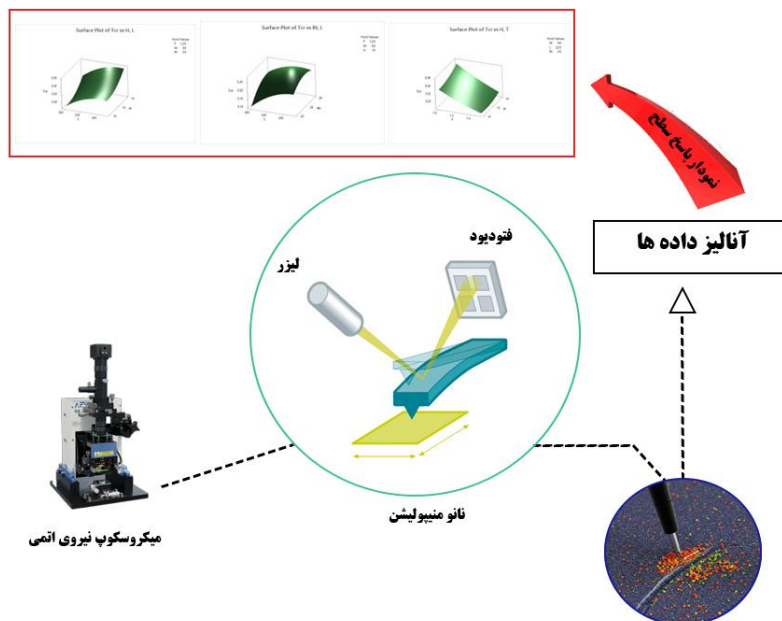
در دیگر پژوهش طاهری [15]، به منظور کاهش آسیب به بافت‌های سالم و بهینه‌سازی نانومینیولیشن بافت سرطانی معده،

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

مدل سازی

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



شکل ۱ چکیده گرافیکی پژوهش

طراحی آزمایش

روش‌های متعددی برای انجام آزمایشات 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 آزمایشات، تحلیل کارآمد و دقیقی داشته باشد. استخراج معادله با استفاده از داده‌ها، ضمن بررسی اثر هم‌زمان متغیرهای خروجی بر ورودی از توانمندی‌های قابل‌توجه این روش به‌حساب می‌آید. نوع و روش‌های مورد استفاده در طراحی آزمایش بر مبنای ماهیت نوع آزمایش، تعداد متغیر و 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 آزمایشات در جدول ۱ قابل‌مشاهده است.

جدول ۱ طراحی آزمایش پارامترهای مؤثر بر زمان بحرانی

۶	۳۰	۱۰	۲۵۰	۶۰	۱
۷	۲۰	۱۴	۲۵۰	۶۰	۱
۸	۳۰	۱۴	۲۵۰	۴۰	۱
۹	۲۵	۱۲	۲۲۵	۵۰	۱
۱۰	۲۰	۱۰	۲۰۰	۴۰	۱/۲۵
۱۱	۳۰	۱۰	۲۰۰	۶۰	۱/۲۵
۱۲	۲۰	۱۴	۲۰۰	۶۰	۱/۲۵
۱۳	۳۰	۱۴	۲۰۰	۴۰	۱/۲۵
۱۴	۲۰	۱۰	۲۵۰	۶۰	۱/۲۵
۱۵	۳۰	۱۰	۲۵۰	۴۰	۱/۲۵
۱۶	۳۰	۱۴	۲۵۰	۴۰	۱/۲۵
۱۷	۳۰	۱۴	۲۵۰	۶۰	۱/۲۵
۱۸	۲۵	۱۲	۲۲۵	۵۰	۱/۲۵
۱۹	۲۰	۱۲	۲۲۵	۵۰	۱/۵
۲۰	۳۰	۱۲	۲۲۵	۵۰	۱/۵
۲۱	۲۵	۱۰	۲۲۵	۵۰	۱/۵
۲۲	۲۵	۱۲	۲۲۵	۴۰	۱/۵
۲۳	۲۵	۱۲	۲۲۵	۵۰	۱/۵
۲۴	۲۵	۱۲	۲۲۵	۶۰	۱/۵
۲۵	۲۵	۱۲	۲۰۰	۵۰	۱/۵
۲۶	۲۵	۱۴	۲۲۵	۵۰	۱/۵
۲۷	۲۵	۱۲	۲۵۰	۵۰	۱/۵

ضخامت تیرک	عرض تیرک	طول تیرک	ارتفاع سوزن	شعاع سوزن	شماره 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

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. همچنان که این مدل نه تنها برای داده‌های فعلی بلکه برای داده‌های جدید نیز می‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد.

جدول ۴ قابلیت اطمینان مدل

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

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 به صورت کلی معنادار است. در میان متغیرها، ضخامت تیرک بیشترین سهم را در تغییرات زمان بحرانی دارد. سایر متغیرها نیز تأثیر قابل توجهی دارند.

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			

در ادامه، داده‌های آزمایشات 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 به دست آمده تنها یک داده

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

ضخامت تیرک	عرض تیرک	طول تیرک	ارتفاع سوزن	شعاع سوزن	شماره
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

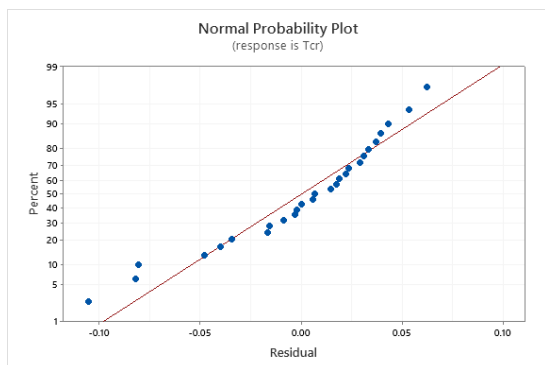
در جدول ۳ نشان داده می‌شود که هر کدام از متغیرهای ورودی مدل شامل ضخامت، عرض و طول تیرک، همچنین ارتفاع شعاع سوزن چه اثری بر زمان بحرانی منیولیشن دارند. در این جدول مقدار ضریب، سطح معناداری و هم خطی متغیرها بررسی شده است. نتایج حاصل شده بدین معنی است که هر کدام در تغییر زمان بحرانی نقش دارند، اما شدت و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

جدول ۳ ضرایب و اثر گذاری پارامترها

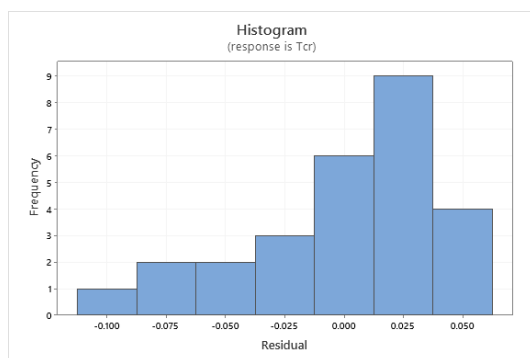
ترم‌ها	ضرایب	خطای معیار	T-Value	P-Value	VIF
مقادیر ثابت	۰/۵۳۹	۰/۱۵۴	۳/۵۰	۰/۰۰۲	
ضخامت تیرک (T)	-۰/۵۷۳۳	۰/۰۴۴۴	-۱۲/۹۲	۰/۰۰۰	۱/۰۰
عرض تیرک (W)	-۰/۰۰۴۳۹	۰/۰۰۱۱۱	-۳/۹۶	۰/۰۰۱	۱/۰۰
طول تیرک (L)	۰/۰۰۱۰۴۴	۰/۰۰۰۴۴۴	۲/۳۵	۰/۰۲۸	۱/۰۰
ارتفاع سوزن (H)	۰/۰۲۵۰۰	۰/۰۰۵۵۵	۴/۵۱	۰/۰۰۰	۱/۰۰
شعاع سوزن (Rt)	۰/۰۰۴۸۹	۰/۰۰۲۲۲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

در ادامه، میزان قدرت مدل رگرسیون در پیش‌بینی تغییرات زمان بحرانی بررسی شده است. ضریب تعیین (R^2) نشان می‌دهد که

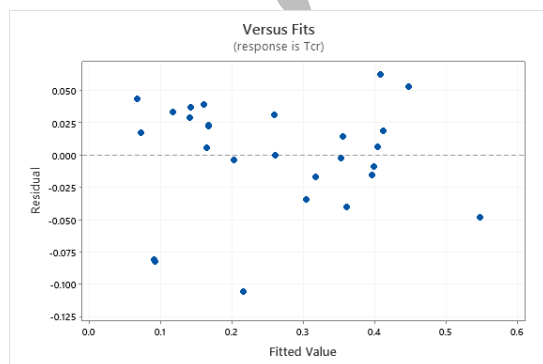
یکدیگر مستقل بوده و مدل از لحاظ استقلال خطاها قابل قبول است.



(الف)



(ب)



(ج)

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.

جدول ۶ آنالیز داده‌های غیرعادی

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

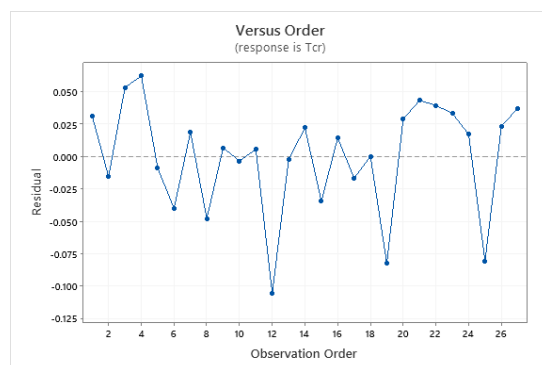
معادله رگرسیون استخراج شده در رابطه ۱ قابل مشاهده است.

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

به منظور ارزیابی صحت و اعتبار مدل رگرسیون، نمودارهای باقی مانده ترسیم شده است که در ادامه به بررسی آنها خواهیم پرداخت. در نمودار (الف)، توزیع نرمال باقی مانده‌ها 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 باقی مانده‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مفروضات رگرسیون است. نمودار (ب) نحوه پراکندگی فراوانی باقی مانده‌ها را نمایش می‌دهد. شکل هیستوگرام در این مطالعه به حالتی مقارن حول میانگین نزدیک به صفر بود. عدم وجود کشیدگی در توزیع باقی مانده‌ها، نشان‌دهنده تعادل پراکندگی خطاها در مدل است.

مقادیر باقی مانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده در نمودار (ج) نشان داده شده است. در این نمودار، پراکندگی باقی مانده‌ها 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 باقی مانده 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)، باقی مانده‌ها بر اساس ترتیب ورود داده‌ها به مدل نشان می‌دهد. بر مبنای نتایج، باقی مانده‌ها به صورت پراکنده و بدون الگوی منظم در طول مشاهدات توزیع شده‌اند که نشان می‌دهد خطاها از

۲۰	۰/۱۷
۲۱	۰/۱۱
۲۲	۰/۲۰
۲۳	۰/۱۵
۲۴	۰/۰۹
۲۵	۰/۰۱
۲۶	۰/۱۹
۲۷	۰/۱۸



(د)

نتایج آنالیز حساسیت پارامترها

به منظور بررسی روابط متقابل میان پارامترها مختلف فرایندی و ارزیابی نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر زمان بحرانی، مجموعه‌ای از نمودارهای سه بعدی 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 به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد. همچنین اثر عرض تیرک نیز به صورت منفی بوده و با افزایش آن، زمان بحرانی کاهش می‌یابد. روند نزولی شیب نمودار در هر دو محور به خوبی 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؛ به طوری 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، در حالی که افزایش مقدار شعاع سوزن موجب افزایش

شکل ۲ نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها

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

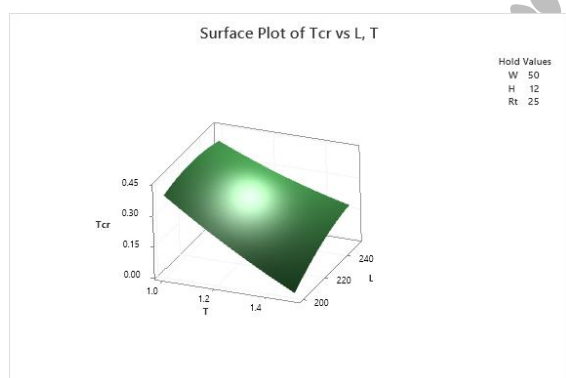
جدول ۷ مقادیر زمان بحرانی منببولیشن

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

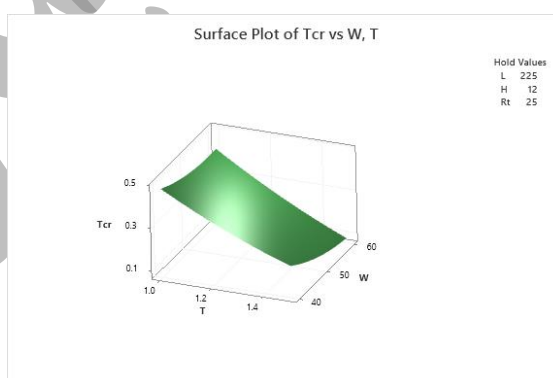
زمان بحرانی شده است. سطح نمودار حاصل شده به خوبی نمایانگر این رفتار متضاد در محورهای ضخامت تیرک و شعاع سوزن می باشد. بر اساس نمودار (ث)، افزایش طول تیرک منجر به افزایش مقدار زمان بحرانی شده و متعاقباً افزایش عرض تیرک سبب کاهش آن می شود. نمودار دارای شیب مثبت در راستای محور طول تیرک و شیب منفی در راستای محور عرض تیرک است که نشان دهنده اثر متقابل و معکوس این دو متغیر بر زمان بحرانی است.

بر مبنای آنچه در نمودار (ج) مشاهده می گردد، افزایش ارتفاع سوزن باعث افزایش مقدار زمان بحرانی و افزایش عرض تیرک منجر به کاهش آن می شود. نمودار سطح پاسخ نشان می دهد که اثر ارتفاع سوزن به طور نسبی از عرض تیرک برجسته تر است، چراکه میزان شیب در راستای ارتفاع سوزن بیش از عرض تیرک است. نتایج حاصل از نمودار (چ) نشان می دهد که افزایش شعاع سوزن منجر به افزایش زمان بحرانی و افزایش عرض تیرک باعث

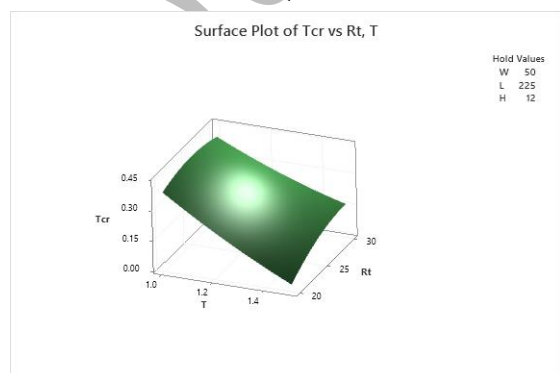
کاهش آن خواهد شد. همانند نمودارهای پیشین، اثر شعاع سوزن مثبت و اثر عرض تیرک منفی بوده و سطح نمودار نیز توانسته این روند را به خوبی منعکس می کند. در نمودار (ح)، مشاهده می شود که هر دو متغیر ارتفاع سوزن و طول تیرک دارای اثر افزایشی بر زمان بحرانی هستند. سطح نمودار در این حالت به صورت صعودی در هر دو راستای محورهای ارتفاع سوزن و طول تیرک است که این امر حاکی از هم افزایی مثبت این دو متغیر بر مقدار زمان بحرانی می باشد. در نمودار (د)، افزایش هر یک از عوامل شعاع سوزن و ارتفاع سوزن منجر به افزایش مقدار زمان بحرانی می شود. سطح حاصل شده دارای شیب مثبت در هر دو راستا است که گویای اثرات متقابل و افزایشی این دو متغیر بر میزان زمان بحرانی است. مطابق نمودار (ذ)، افزایش مقدار شعاع سوزن و طول تیرک هر دو موجب افزایش زمان بحرانی می شوند. شدت تأثیر شعاع سوزن نسبت به طول تیرک اندکی بیشتر بوده و سطح نمودار دارای شیب مثبت در راستای هر دو پارامتر است.



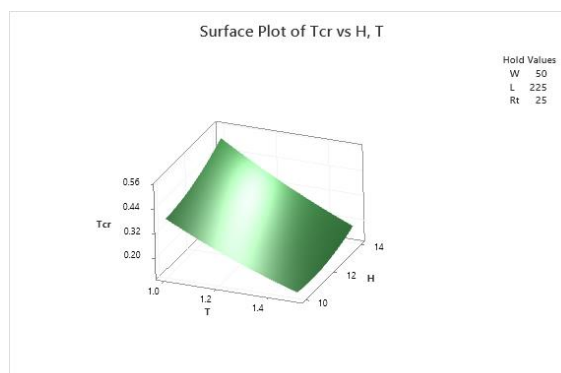
(ب)



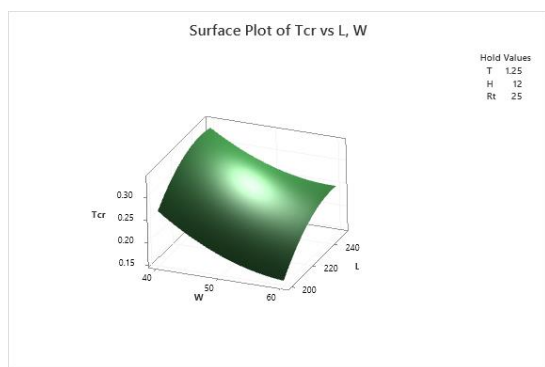
(الف)



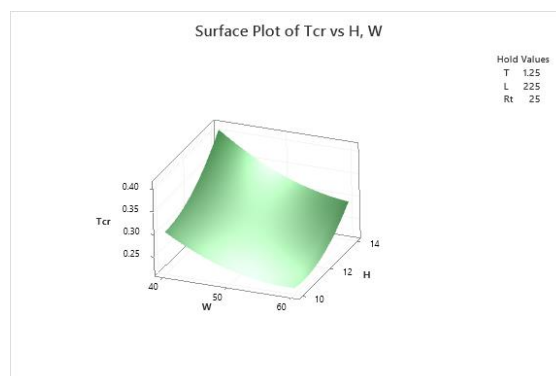
(ت)



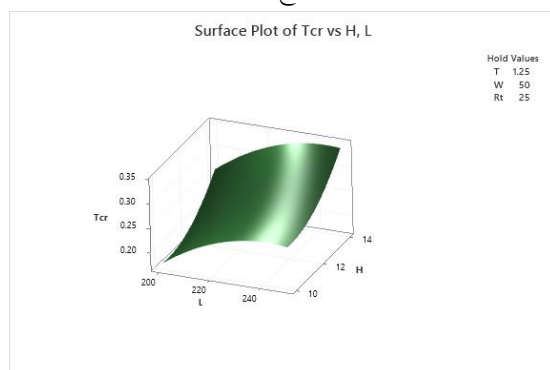
(پ)



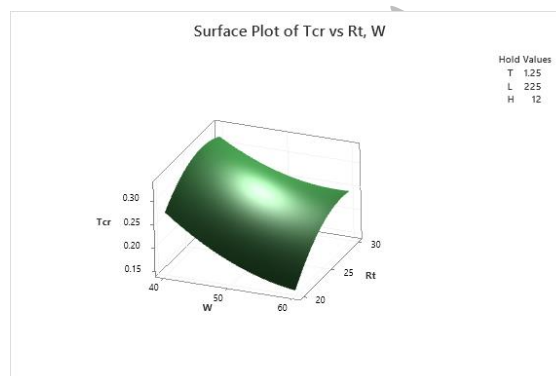
(ج)



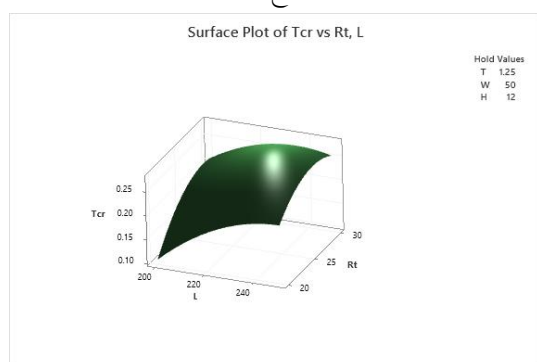
(ث)



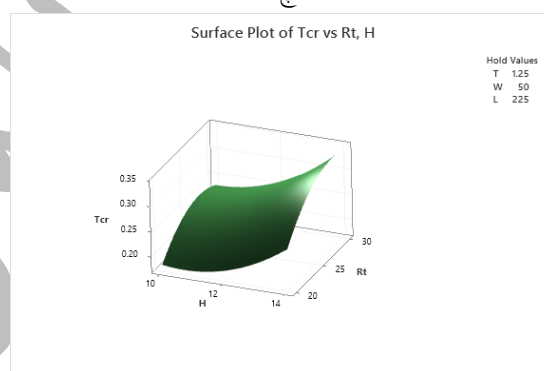
(ح)



(چ)



(ذ)



(د)

شکل ۳ نمودار تأثیر پارامترهای موردبررسی بر روی زمان بحرانی

در این مطالعه با در نظر گرفتن اهمیت زمان بحرانی در فاز اول منیولیشن، 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 منیولیشن به صورت جداگانه تحلیل شده است.

نتیجه‌گیری

پیشرفت‌های سریع علم نانو، توانسته به کارگیری آنها را در زمینه‌های متفاوت ارتقا دهد. منیولیشن یکی از فرایندهای مشهوری است با نانوذرات سروکار دارد. در طی این فرایند با به کارگیری میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی، شناسایی خواص ماده و جابجایی آن ممکن است. غلبه بر نیروی اصطکاک توسط سوزن میکروسکوپ، فاز اول منیولیشن و راندن نانوذره فاز دوم این فرایند است.

نتایج به دست آمده از نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ تبیین می کند که ضخامت تیرک می تواند موجب تغییرات قابل توجه زمان بحرانی شود.

این نتایج می تواند به عنوان مبنایی در جهت پیش بینی و بهینه سازی شرایط در فرایندهای مشابه به کار گرفته شده و در مطالعات آتی توسعه یابد.

Atomic force microscopy میکروسکوپ نیروی

اتمی

3aminopropyltriethoxysilane تری آمینوپروپیل تری

اتوکسی سیلان

(APTES)

دابل هرتز

Double-Hertz

مدل های الاستیک

Elastic Models

نانوذرات لیپیدی

lipid nanoparticles

لیپوزوم ها

liposomes

نانو منیپولیشن

Nano manipulation

منیپولیشن نوری

optical manipulation

پراش نوری

optical diffraction

اصطکاک چرخشی

Rolling friction

اصطکاک لغزشی

Sliding friction

مدل های ویسکوالاستیک

Viscoelastic Models

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

H	ارتفاع سوزن
L	طول تیرک
Rt	شعاع سوزن
T	ضخامت تیرک
W	عرض تیرک
T_{cr}	زمان بحرانی

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 Proc. 36th Chinese Control Conf. (CCC), Dalian, China, 26–28 Jul. 2017, pp. 4424–4429, doi: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, Jun. 2021, doi: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," *J. Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 90, pp. 313–327, 2019.
- [4] M. H. Korayem and R. N. Hefzabad, "Nonlinear modeling of nanoscale interaction forces between atomic force microscope and carbon nanotubes," *Int. J. Non-Linear Mech.*, vol. 161, Art. no. 104690, 2024, doi: 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 J. Nanotechnology*, vol. 11, no. 1, pp. 147–166, 2020, doi: 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, Art. 815, 2022.
- [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, Art. 085302, 2019.
- [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 Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 42, pp. 48093–48100, 2020.
- [9] C. Hou, D. Sun, L. Dong, "Nanomanipulation in biomedical applications," *Current Robotics Reports*, vol. 2, pp. 133–145, 2021.

- [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.
- [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.
- [12] Y. Wen, H. Lu, Y. Shen, H. Xie, "Nanorobotic Manipulation System for 360° Characterization Atomic Force Microscopy," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 4, pp. 2916–2924, Apr. 2019.
- [13] Y. Takechi-Haraya, "Atomic Force Microscopy to Measure the Mechanical Property of Nanosized Lipid Vesicles and Its Applications," *Yakugaku Zasshi: J. Pharm. Soc. Japan*, vol. 144, no. 5, pp. 511–519, 2024, doi: 10.1208/s12249-016-0624-x.
- [14] M. Taheri, H. Faraji, and P. Karimi, "Manipulation of breast cell tissue with the aim of calculating Young's modulus, using Tataru contact theory and atomic force microscopy," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 1–16, 2023, doi: 10.22067/jacsm.2023.80537.1156. (In Persian)
- [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, doi: 10.22067/jacsm.2022.79529.1146. (In Persian)