



بررسی فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی با رویکرد مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها*

مقاله پژوهشی

معین طاهری^(۱)*، فرشته قانع^(۲)، نگین فرجی^(۳)

DOI:

چکیده میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) یکی از ابزارهای کلیدی در فناوری نانو است که امکان جابه‌جایی و موقعیت‌دهی دقیق نانوذرات را فراهم می‌کند. در این راستا، فاز دوم در نانومنیپولیشن دوبعدی، که مربوط به حرکت پایدار ذره پس از آغاز جابه‌جایی است، نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیند دارد. این مطالعه به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی بر نیروی منیپولیشن با استفاده از رویکرد طراحی آزمایش‌ها (DOE) می‌پردازد. نوآوری این پژوهش در توسعه یک مدل تماس مبتنی بر نظریه (JKR) و تحلیل کمی فاز دوم نانومنیپولیشن با بهره‌گیری از DOE است. یک مدل رگرسیون چندمتغیره استخراج شد و شاخص‌های برازش آماری ($R^2 = 89.49\%$) صحت مدل را تأیید کردند. نتایج نشان دادند که پارامترهای هندسی بیشترین تأثیر را بر تغییرات نیرو دارند. به‌طور مشخص، شعاع نوک (62%) و شعاع ذره (25%) بیشترین نقش را در کاهش نیروی منیپولیشن ایفا کردند. ارتفاع تیرک نیز تأثیر کاهشی جزئی (12%) داشته است. در مقابل، مدول یانگ و ضریب پواسون اثر ناچیزی نشان دادند.

واژه‌های کلیدی نانو منیپولیشن دوبعدی، معادله رگرسیون، نیرو، طراحی آزمایش، آنالیز حساسیت.

* تاریخ دریافت مقاله و تاریخ پذیرش آن می‌باشد.

(۱) دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. m-taheri@araku.ac.ir

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

(۳) فارغ التحصیل کارشناسی، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

مقدمه

نانومنیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) به عنوان یکی از دقیق‌ترین ابزارهای مهندسی در مقیاس نانو، امکان اعمال و اندازه‌گیری نیروهای بسیار کوچک را فراهم می‌کند و به همین دلیل جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات و کاربردهای نانوفناوری یافته است. این روش قادر است جابه‌جایی و آرایش کنترل‌شده نانوذرات و بیو نانوذرات را با دقتی در حد نانومتر انجام دهد و مسیر طراحی و ساخت ساختارهای نوین را هموار سازد. از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به مونتاژ و سازمان‌دهی نانوساختارها، نانو لیتوگرافی برای تولید الگوهای دقیق، بررسی برهم‌کنش‌های سلولی و مولکولی در زیست‌فناوری، و توسعه ابزارهای پزشکی نوین و نانورباتیک زیستی اشاره کرد. توانایی AFM در ایجاد تماس‌های کنترل‌شده و آشکارسازی تغییرات مکانیکی در مقیاس بسیار کوچک، آن را به ابزاری بی‌بدیل برای توسعه فناوری‌های پیشرفته و کاربردهای بین‌رشته‌ای در حوزه نانو بدل ساخته است.

لی و همکاران [۱] مروری به نقش میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در نانوساخت مواد دوبعدی با خواص الکترونیکی و اپتوالکترونیکی ویژه می‌پردازد. AFM به عنوان روشی چندمنظوره، علاوه بر تصویربرداری، امکان نانوساخت کنترل‌شده را فراهم می‌کند. در این چارچوب، روش‌های مختلف نانوساخت AFM بر اساس نوع برهم‌کنش نوک و سطح دسته‌بندی و کاربرد آن‌ها در طراحی ساختارهای مصنوعی و پیچیده دوبعدی مرور شده است.

مطالعات پارک و همکاران [۲] نشان داده‌اند که نانومنیپولیشن با AFM روشی مؤثر برای مونتاژ خوشه‌های پلاسمونیک با دقت بالا است، هرچند که بیشتر این رویکردها به ساختارهای دوبعدی محدود بوده‌اند. به منظور غلبه بر این محدودیت، استفاده از قالب‌های نانوحفرهای پیشنهاد شده است که امکان آرایش سه‌بعدی نانوسفرهای طلایی را با تقارن و هندسه کنترل‌شده فراهم می‌سازد. این پیشرفت، زمینه‌ساز طراحی متامولکول‌ها و متامتریال‌های جدید با مدهای پلاسمونیک سه‌بعدی از جمله رزونانس فانو و مغناطیس مصنوعی شده و چشم‌انداز تازه‌ای برای توسعه سامانه‌های نوری پیشرفته فراهم می‌کند.

پژوهش‌های گسترده نشان داده‌اند که نانومنیپولیشن اگرچه دقت بالایی دارد، اما به دلیل محدودیت پراش نوری از بازخورد

تصویری کافی برخوردار نیست. در یک رویکرد جدید، با اتصال میکروولتز به پروب AFM امکان تصویربرداری با تفکیک‌پذیری حدود ۸۰ نانومتر فراهم شد. این روش قابلیت انجام منیپولیشن در زمان واقعی و تحت هدایت تصویری را برای نانوذرات فلورسانس و نانوسیم‌های نقره نشان داده و چشم‌انداز کاربرد آن در نمونه‌های زیستی را گسترش داده است [۳].

یکی از چالش‌های اصلی در نانومنیپولیشن با AFM عدم قطعیت در موقعیت نوک سوزن است که با حسگرهای مرسوم قابل‌رفع نیست. در یک رویکرد جدید، سوزن AFM به عنوان حسگر برای شناسایی نقاط مرجع سطح نمونه به کار گرفته شد و با مدل‌سازی و کالیبراسیون آماری، دقت موقعیت آن بهبود یافته است. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌ها بیانگر آن بوده است که این روش دقت منیپولیشن را افزایش داده و در ساخت نانوساختارها و ابزارهای دقیق مؤثر است [۴].

در ادامه مطالعات، با توسعه یک سامانه واقعیت افزوده، امکان ترکیب بازخورد نیرویی و تصویری هم‌زمان در میکروسکوپ نیروی اتمی فراهم شده است. این سامانه با به‌روزرسانی محلی تصاویر AFM بر اساس داده‌های نیرو، محیطی تعاملی ایجاد می‌کند که در آن اپراتور می‌تواند تغییرات نانومقیاس را هم‌زمان ببیند و حس کند. این نوآوری زمینه را برای نانو لیتوگرافی و مونتاژ نانوذرات به صورت عملی و کارآمد فراهم ساخته است [۵].

به دلیل کاربرد گسترده AFM در جابه‌جایی نانوذرات، مدل‌سازی دینامیکی فرایند منیپولیشن برای ذرات استوانه‌ای مانند نانولوله‌ها و نانوسیم‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا، مدلی جامع برای منیپولیشن سه‌بعدی مبتنی بر فشار با در نظر گرفتن نیروهای مؤثر در مقیاس نانو ارائه شده است. ویژگی برجسته مدل، لحاظ کردن نیروی اصطکاک به صورت توزیعی و متغیر با طول تماس است که امکان محاسبه دقیق نیرو و زمان بحرانی را فراهم می‌سازد. شبیه‌سازی‌ها بر روی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در حالت لغزش و چرخش انجام و با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند که صحت مدل را تأیید می‌کند [۶].

در پژوهشی دیگر حساسیت پارامترهای بحرانی در منیپولیشن نانومقیاس با AFM، شامل نیروی فشاری و زمان بحرانی، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیشنهادی علاوه بر نیروهای اصطکاک و چسبندگی، از مکانیک تماسی JKR برای

مدل‌سازی نیروی جدایش بهره می‌گیرد و معادلات دینامیکی بر اساس دیاگرام آزاد اجسام توسعه یافته‌اند. شبیه‌سازی دینامیکی جابه‌جایی نانوذرات طلا روی بستر سیلیکونی نشان داد که بسته به شرایط، ذره می‌تواند رفتارهایی مانند لغزش، چرخش، غلطش و پدیده لغزش چسبندگی از خود نشان دهد. نوآوری اصلی کار، تحلیل حساسیت نیرو و زمان بحرانی نسبت به تمامی پارامترهاست که می‌تواند راهنمایی مؤثری در انتخاب جنس و هندسه سوزن، بستر و نانوذره، تعیین شرایط اولیه مناسب و تنظیم دقیق نیرو و زمان اعمالی در فرایند مینیولیشن و مونتاژ نانومقیاس باشد [۷].

کورايم و همکاران [۸] در دیگر مقاله به مدل‌سازی مینیولیشن نانومقیاس با AFM می‌پردازد.

در پژوهشی دیگر دو روش نوین برای مینیولیشن نانومقیاس با AFM غیرتماسی معرفی شد. روش اول با خاموش کردن بازخورد و جابه‌جایی ذره توسط نوک، و روش دوم با استفاده از معکوس شدن کنتراست در تصویر به دلیل ناپایداری بازخورد انجام می‌شود. هر دو روش در چینش نانوذرات طلای ۵ و ۱۵ نانومتری روی سطح میکا موفق بوده‌اند و امکان مونتاژ دقیق در مقیاس نانو را نشان داده‌اند [۹].

در پژوهش باباحسینی و همکاران [۱۰] رویکردی برای مینیولیشن دوبعدی ذرات با استفاده از AFM ارائه شده است. در این مطالعه، نیروی اصطکاک با مدل لاگره شبیه‌سازی شده که توانسته رفتار لغزش چسبندگی را مشابه مقیاس نانو بازتولید کند. همچنین نیروی برهم‌کنش درزاگین برای تماس نوک و ذره به‌کارگرفته شده و AFM با مدل پارامتر متمرکز نمایش داده شده است. در ادامه، یک کنترل‌کننده بر پایه روش مود لغزشی طراحی شد که نتایج شبیه‌سازی دقت و کارایی آن را در انجام مینیولیشن تأیید می‌کند.

کورايم و همکاران [۱۱] چهار مدل تماسی هرتز، جاماری، جنگ‌وانگ و ونگ‌تانگ‌ژوژو را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده است که جنگ‌وانگ بیشترین و ونگ‌تانگ‌ژوژو کمترین عمق نفوذ را دارند و از میان مواد، گرافیت بیشترین و کروم کمترین نفوذ را نشان می‌دهند. در مجموع، مدل‌های جنگ‌وانگ و جاماری برای مینیولیشن نانوذرات بیضوی مناسب‌ترند.

در دیگر مطالعه از کورايم و همکاران [۱۲]، برای برآورد دقیق سطح تماس در مینیولیشن میکرو/نانوذرات زیستی، تئوری‌های تماس الاستیک-پلاستیک کامل توسعه و شبیه‌سازی شده است. سه نوع سلول سرطانی پروستات و پنج نوع سلول نرمال و سرطانی مثانه بررسی شدند. مقایسه مدل‌های هرتز، المان محدود و مدل‌های الاستیک-پلاستیک بریک و چانگ نشان داد که تئوری هرتز قادر به توصیف رفتار تماس ذرات زیستی نرم نیست. برای نخستین بار، از مدل‌های بریک و چانگ به‌منظور محاسبه خواص مکانیکی و شبیه‌سازی مکانیک تماس در مینیولیشن سلول‌ها با AFM استفاده شده است.

کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان ابزاری قدرتمند در نانومکانیک سلولی، امکان بررسی تغییرات اسکلت سلولی و پاسخ آن به برهم‌کنش با سطوح و نانوذرات را فراهم می‌کند. مطالعات جدید ترکیب AFM با شبیه‌سازی اجزای محدود را به‌عنوان رویکردی نوین برای بهبود دقت تحلیل و مطالعه سلول‌های زنده ارائه می‌دهند [۱۳].

در دیگر مطالعه، روش جدیدی برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی نانوسیم‌ها با AFM ارائه شد. نانوسیم‌های اکسید روی به روش اکسیداسیون یک‌مرحله‌ای تولید و پس از تثبیت روی بستر ویژه و عملیات حرارتی بررسی شدند. نتایج نشان داد که مدول یانگ نانوسیم‌ها پس از آنیلینگ تا ده برابر افزایش یافته و به حدود ۲۰۰ GPa رسیده است. این رویکرد امکان سنجش دقیق و درجا خواص مکانیکی نانوساختارها را فراهم می‌کند [۱۴].

در مطالعه پناهی و همکاران، جابه‌جایی نانوذرات بیضوی با AFM با در نظر گرفتن زبری سطح مدل‌سازی شد. استفاده از مدل‌های مختلف تماس و زبری نشان داد خطای محاسبه نیرو و زمان بحرانی کمتر از ۶٪ بوده و نتایج با داده‌های تجربی تطابق خوبی دارد [۱۵].

مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد که AFM در حوزه‌های مختلفی از جمله علم مواد، صنایع نیمه‌هادی، پلیمرها و پزشکی به‌طور گسترده به‌کاررفته و نسبت به روش‌های سنتی مزایای

قابل توجهی ارائه کرده است. همچنین، توسعه فناوری‌های مبتنی بر AFM مسیرهای نوینی را برای کاربردهای آینده، به‌ویژه در نانومنیپولیشن، گشوده است [۱۶].

در مطالعه‌ای دیگر، مدول یانگ بافت کبد به‌صورت تئوری با مدل‌های دال، بیلمن و سورین محاسبه و به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی به‌صورت تجربی تعیین شده است. مقایسه نتایج نشان داده که مدل دوم بیلمن و سورین دقت بالاتری در ارزیابی مدول یانگ دارند و برای مطالعات نانومقیاس بافت کبد مناسب‌تر است [۱۷].

جابه‌جایی نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و مدل اصطکاکی اچ کا در پژوهشی شبیه‌سازی شده است تا نیروی بحرانی و زمان بحرانی بادقت محاسبه شوند. طراحی آزمایش‌ها بر پایه روش تاگوچی در سه سطح انجام گرفته و تحلیل نتایج با نسبت سیگنال به نویز صورت پذیرفته است. یافته‌ها نشان داده‌اند که پارامترهای B و M بیشترین تأثیر را به ترتیب بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی دارند [۱۸].

باتوجه به جایگاه برجسته نانومنیپولیشن در توسعه فناوری‌های نوین و کاربردهای زیستی، درک سازوکار نیروهای حاکم و شناسایی عوامل مؤثر بر فرایند جابه‌جایی ذرات امری اجتناب‌ناپذیر است. به‌ویژه، فاز دوم نانومنیپولیشن که حرکت پایدار ذره پس از غلبه بر موانع اولیه را در بر می‌گیرد، نقشی کلیدی در تضمین دقت و پایداری فرایند ایفا می‌کند. بررسی این مرحله نه تنها می‌تواند به بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و کاهش نیروهای موردنیاز منجر شود، بلکه مسیر طراحی ابزارهای پیشرفته‌تر و توسعه راهکارهای کارآمد در مقیاس نانو را هموار می‌سازد. از این رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد طراحی آزمایش‌ها (DOE)، اثر عوامل هندسی و مکانیکی را بر نیروی منیپولیشن مورد تحلیل قرار داده و تلاش دارد تا چارچوبی علمی برای بهبود عملکرد فرایندهای مبتنی بر AFM در حوزه‌های زیستی و فناوریانه فراهم آورد.

در مقایسه با مدل‌های کلاسیک، در این مطالعه مکانیزمی نوین برای تحلیل پایدار حرکت ذره در فاز دوم منیپولیشن ارائه شده است که با بهره‌گیری از مدل تماس چند نقطه‌ای مبتنی بر نظریه JKR و رویکرد آماری طراحی آزمایش‌ها، قادر است اثرات

هندسی و مکانیکی را به صورت کمی بررسی نماید. این چارچوب تحلیلی جدید، دقت مدل‌سازی نیرو را افزایش داده و مسیر بهینه‌سازی هندسه ابزار را برای کاهش نیرو در فرایند نانومنیپولیشن روشن می‌سازد.

مدل‌سازی

منیپولیشن دوبعدی

نانومنیپولیشن را می‌توان فرایند جابه‌جایی و هدایت ذرات در ابعاد نانو باهدف قراردادن آن‌ها در موقعیت موردنظر تعریف کرد. در این فرایند، سطح بستر و ذره نانومتری از طریق نیروی اعمال‌شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) یا ابزار مشابه با یکدیگر در تعامل قرار می‌گیرند. به‌طور کلی، دستیابی به جابه‌جایی موفق ذرات نیازمند غلبه بر نیروهای مقاومتی نظیر اصطکاک و نیروهای چسبندگی سطحی است. زمانی که نوک میکروسکوپ نیروی اتمی بر ذره نیرو وارد می‌کند، ذره ابتدا دچار تغییر مکان جزئی شده و سپس با ادامه اعمال نیرو می‌تواند از سد نیروهای مقاومتی عبور کرده و وارد فاز حرکتی پایدار شود. این پدیده را می‌توان در دوفاز اصلی موردبررسی قرارداد:

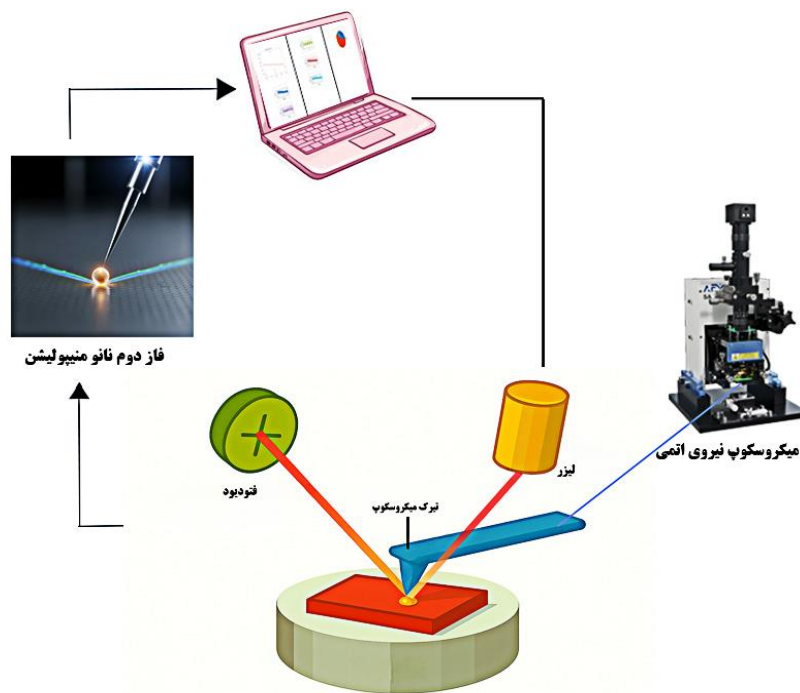
فاز نخست (مرحله آغازین جابه‌جایی): در این مرحله، ذره تحت تأثیر نیروی واردشده از سمت ابزار قرار می‌گیرد؛ اما به دلیل وجود اصطکاک ایستا، حرکت آن به‌کندی آغاز می‌شود. در واقع، انرژی خارجی باید به‌اندازه‌ای باشد که بر نیروی اصطکاک ایستا غلبه کرده و شرایط لازم برای شروع حرکت را فراهم آورد. این فاز اهمیت بالایی دارد؛ زیرا رفتار ذره در همین مرحله تعیین‌کننده ورود آن به حالت جابه‌جایی پایدار خواهد بود.

فاز دوم (مرحله حرکت پایدار): پس از آنکه نیروی اعمال‌شده بر ذره از حد بحرانی عبور کند، ذره وارد حرکت لغزشی می‌شود. در این وضعیت، مقاومت اصطکاکی کاهش یافته و ذره می‌تواند با سرعت و پایداری بیشتری در مسیر تعیین‌شده جابه‌جا گردد. در این فاز، موقعیت ذره به‌شدت تحت تأثیر عوامل محیطی نظیر ناهمواری سطح بستر، خواص مکانیکی ماده، نیروهای بین‌مولکولی و شرایط مرزی محیط اطراف قرار دارد؛ بنابراین، دقت در کنترل شرایط محیطی و تنظیم پارامترهای ابزار نقشی کلیدی در دستیابی به جابه‌جایی دقیق و موفق دارد.

مدل‌ها می‌توانند دوبعدی، سه‌بعدی، کلاسیک یا مبتنی بر دینامیک مولکولی باشند که انتخاب آن‌ها به کاربرد وابسته است. جنس و شکل نانوذره و شرایط محیطی بیشترین نقش را

در مکانیک تماس و برهم‌کنش‌ها دارند، درحالی‌که هندسه AFM اهمیت کمتری دارد. برای نانوذرات نرم، مدل‌های ویسکوالاستیک یا الاستوپلاستیک مناسب‌ترند و در محیط‌های غیر خالص، مدل‌های زبری با ضرایب چسبندگی پیشرفته کاربردی‌تر هستند. همچنین برنامه‌ریزی مسیر و کنترل دقیق AFM برای افزایش دقت منیپولیشن ضروری است.

در مجموع، بررسی دقیق این دوفاز امکان تحلیل جامع‌تری از رفتار دینامیکی ذرات در فرایند نانومینیپولیشن را فراهم می‌سازد. همچنین داده‌های به‌دست‌آمده از ردیابی مسیر حرکت ذره و ثبت نیروهای وارد بر آن از طریق آشکارسازهای نوری نصب‌شده بر روی فتودیودها قابل استخراج بوده و می‌توانند در تحلیل‌های کمی و شبیه‌سازی‌های عددی به کار گرفته شوند.



شکل ۱ شماتیک نانومینیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی.

تحلیل حرکت منیپولیشن

برای تحلیل جابه‌جایی ذره در فرایند نانومینیپولیشن دوبعدی، لازم است نیروهای وارد بر ذره و تعادل دینامیکی آن در نظر گرفته شوند. در این حالت، نیروی اصلی اعمال‌شده از سمت نوک میکروسکوپ به ذره از طریق تماس مکانیکی منتقل شده و به دو مؤلفه در راستای افقی و عمودی تجزیه می‌گردد. باتوجه‌به زاویه تماس نوک ابزار با سطح ذره، نیروی واردشده F_{cr} به دو مؤلفه نیروی عمودی و افقی تقسیم می‌شود:

این مؤلفه‌ها پایه اصلی در تحلیل حرکت ذره روی سطح بستر هستند. مؤلفه افقی مسئول ایجاد حرکت در راستای جابه‌جایی است، درحالی‌که مؤلفه عمودی همراه با وزن ذره، بر نیروی عمود بر سطح و میزان اصطکاک اثرگذار خواهد بود. در راستای محور x ، نیروهای وارد بر ذره شامل نیروی مؤلفه افقی تماس $(F_{cr}\cos\theta)$ ، نیروی اصطکاک جنبشی $\mu(F_{cr}\sin\theta) + mg$ و همچنین نیروی کشسانی ناشی از مدل تماس (JKR) هستند. با توجه به قانون دوم نیوتن، معادله‌ی حرکت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum F_x = ma_x \rightarrow F_x - f_f = ma_x \quad (3)$$

$$F_{cr}\cos\theta - \mu(F_{cr}\sin\theta + mg) - \tau\pi a_{JKR}^2 = ma_x \quad (4)$$

$$F_x = F_{cr}\cos\theta \quad (1)$$

$$F_y = F_{cr}\sin\theta \quad (2)$$

این رابطه نشان می‌دهد که شتاب ذره تحت تأثیر برآیند نیروهای محرک و مقاومتی قرار دارد. در راستای محور y ، ذره تحت تأثیر وزن (mg)، مؤلفه عمودی نیروی تماس ($F_{cr}\sin\theta$) و نیروی عکس‌العمل نرمال (N) قرار می‌گیرد. با فرض تعادل در این راستا، رابطه زیر برقرار است:

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_y + mg - N = 0 \rightarrow N = F_{cr}\sin\theta + mg \quad (5)$$

این مقدار نیروی نرمال همان نیرویی است که در محاسبه اصطکاک جنبشی استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی دقیق تماس بین ذره و بستر، از نظریه JKR استفاده می‌شود که به‌ویژه برای ذرات زیستی و نرم مناسب است. در این مدل، شعاع ناحیه تماس (a_{JKR}) تابعی از نیروی وارد بر ذره، شعاع ذره (R) و ثابت‌های الاستیسیته مواد است. رابطه‌ی زیر بیان‌کننده این وابستگی است:

$$a_{JKR} = \left[\frac{\bar{R}}{K} \left[F + 3\pi\bar{R}\omega + (6\pi\bar{R}\omega F + (3\pi\bar{R}\omega)^2)^{1/2} \right] \right]^{1/3} \quad (6)$$

در این معادله ω بیانگر انرژی چسبندگی سطحی بوده و K معیاری از سختی مؤثر تماس است. نیروی مؤثر حاصل از تغییر شکل الاستیک در تماس ذره و بستر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{JKR} = (6\pi\omega_p k a_{JKR}^3)^{1/2} \quad (7)$$

این نیرو در واقع مقاومت مکانیکی ناشی از تغییر شکل سطح تماس است و به‌صورت مستقیم بر حرکت ذره اثر می‌گذارد. با ترکیب نیروهای مؤثر در راستای افقی و در نظر گرفتن جرم ذره، شتاب آن به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$a_x = \left(\frac{1}{m} \right) (F_{cr}\cos\theta - \mu(F_{cr}\sin\theta + mg) - \pi\omega_p^2 a_{JKR}^2) \quad (8)$$

این معادله نشان می‌دهد که افزایش جرم ذره یا نیروی اصطکاک می‌تواند موجب کاهش شتاب و کندی حرکت شود. با انتگرال‌گیری از معادله شتاب، موقعیت ذره در طول زمان به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x = \int \left(\frac{1}{m} \right) (F_{cr}\cos\theta - \mu(F_{cr}\sin\theta + mg) - \pi\omega_p^2 a_{JKR}^2) dt \quad (9)$$

این رابطه توصیف‌کننده مسیر حرکتی ذره در بستر است و امکان پیش‌بینی میزان جابه‌جایی بر حسب زمان را فراهم می‌آورد.

طراحی آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها و تحلیل داده‌های حاصل، روش‌های گوناگونی وجود دارد که هر یک بسته به شرایط و اهداف پژوهش می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در میان این روش‌ها، طراحی آزمایش‌ها (DOE) به‌عنوان یکی از رویکردهای آماری کارآمد و مقرون‌به‌صرفه شناخته می‌شود. مزیت اصلی این روش در آن است که با حداقل تعداد آزمایش‌ها می‌توان بیشترین حجم اطلاعات معتبر را به دست آورد، به‌گونه‌ای که هم هزینه و هم زمان اجرای پژوهش به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد.

از مهم‌ترین ویژگی‌های طراحی آزمایش‌ها، توانایی آن در استخراج مدل یا معادله‌ای ریاضی بر اساس داده‌های تجربی است. این ویژگی امکان می‌دهد که ضمن بررسی اثرات فردی هر متغیر، تأثیر متقابل متغیرها نیز به طور هم‌زمان تحلیل شود. به عبارت دیگر، این روش صرفاً به مطالعه اثرات تک عاملی بسنده نکرده و قابلیت بررسی روابط پیچیده بین عوامل مستقل و پاسخ‌های وابسته را فراهم می‌آورد.

انتخاب نوع طراحی آزمایش وابسته به ماهیت مسئله پژوهشی، تعداد متغیرهای مؤثر، و نوع پاسخ‌های مورد انتظار است. بر اساس این معیارها، طرح‌های مختلفی قابل استفاده‌اند که از جمله می‌توان به طرح تک عاملی، طرح فاکتوریل، روش سطح پاسخ و طرح‌های مبتنی بر روش تاگوچی اشاره نمود. هر یک از این رویکردها دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند و بسته به هدف مطالعه، سطح دقت مورد نیاز و منابع در دسترس انتخاب می‌شوند. در این مطالعه تأثیر پارامترهای مؤثر بر نیرو در فاز دوم نانومینیولیشن دوبعدی بررسی گردیده است. نتایج این آزمایشات در جدول ۱ قابل مشاهده است.

۲۴	۱,۰	۶	۰,۴	۱۴	۱۲,۵	۲۵۰,۷۵
۲۵	۱,۰	۶	۰,۳	۱۲	۱۲,۵	۲۵۰,۷۵
۲۶	۱,۰	۱۰	۰,۴	۱۲	۱۲,۵	۲۵۷,۲۶
۲۷	۱,۰	۶	۰,۵	۱۲	۱۲,۵	۲۵۰,۷۵

تحلیل نتایج نتایج آنالیز واریانس

در ادامه، به منظور تحلیل دقیق‌تر میزان اثرگذاری پارامترهای طراحی بر نیرو، معادله رگرسیون به همراه ضرایب متناظر بررسی شده است. سپس با بهره‌گیری از نتایج آنالیز واریانس و شاخص‌های برازش مدل، اعتبار معادله و سهم هر یک از متغیرها در تغییرات پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، چهار جدول شامل ضرایب برآوردی، شاخص‌های اطمینان مدل، نتایج ANOVA و داده‌های غیرعادی ارائه و تحلیل شده‌اند تا تصویری جامع از نقش عوامل هندسی و مکانیکی در فرایند نانومنیولیشن دوبعدی فراهم آید.

برای بررسی اثر عوامل مختلف بر نیروی منیولیشن (F)، یک مدل رگرسیون خطی چندمتغیره توسعه داده شد. معادله کلی رگرسیون به صورت زیر به دست آمده است:

$$F = 4749 - 1073.5 R_p - 0.9 E_p - 0.0 v_p - 0.0 R_t - 263.4 H \quad (10)$$

نتایج به دست آمده از تحلیل رگرسیون در جدول ضرایب نشان می‌دهد که همه متغیرها اثر یکسانی بر متغیر پاسخ ندارند. ضریب متغیر (Rp) منفی و بسیار معنادار است ($p < 0.001$) که بیانگر اثر کاهنده قوی این پارامتر بر پاسخ است.

همچنین متغیر (H) نیز با ضریب منفی و مقدار ($p = 0.004$) در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات پاسخ دارد. در مقابل، متغیرهای (Ep)، (v_p) و (R_t) دارای سطوح معناداری بالا هستند و اثر قابل ملاحظه‌ای بر متغیر خروجی نشان ندادند. این موضوع تأکید می‌کند که تنها بخشی از متغیرهای ورودی در شکل‌دهی مدل نقش مؤثر دارند.

جدول 2 ضرایب و اثر گذاری پارامترها

ترمها	ضرایب	T-Value	P-Value	VIF
-------	-------	---------	---------	-----

جدول 1 نتایج آزمایشات

شماره آزمایش	Rp ضرایب شعاع ذره (μm)	Ep مدول الاستیسیته	v_p ضریب پواسون	Rt شعاع سوزن (μm)	H ارتفاع سوزن (μm)	F نیروی (mN)
۱	۰,۵	۲	۰,۳	۱۴	۱۱,۵	۱۲۰۱,۵۱
۲	۱,۵	۲	۰,۳	۱۰	۱۱,۵	۹۳,۱۱
۳	۰,۵	۱۰	۰,۳	۱۰	۱۱,۵	۱۱۵۸,۱۰
۴	۱,۵	۱۰	۰,۳	۱۴	۱۱,۵	۱۱۱,۳۶
۵	۰,۵	۲	۰,۵	۱۰	۱۱,۵	۱۲۰۱,۵۱
۶	۱,۵	۲	۰,۵	۱۴	۱۱,۵	۹۳,۱۱
۷	۰,۵	۱۰	۰,۵	۱۴	۱۱,۵	۱۱۵۸,۱۰
۸	۱,۵	۱۰	۰,۵	۱۰	۱۱,۵	۱۱۱,۳۶
۹	۱,۰	۶	۰,۴	۱۲	۱۱,۵	۲۴۸,۴۸
۱۰	۰,۵	۲	۰,۳	۱۰	۱۲,۰	۱۱۹۸,۴۵
۱۱	۱,۵	۲	۰,۳	۱۴	۱۲,۰	۹۳,۵۳
۱۲	۰,۵	۱۰	۰,۳	۱۴	۱۲,۰	۱۱۵۸,۶۲
۱۳	۱,۵	۱۰	۰,۳	۱۰	۱۲,۰	۱۱۲,۰۶
۱۴	۰,۵	۲	۰,۵	۱۴	۱۲,۰	۱۱۹۸,۴۵
۱۵	۱,۵	۲	۰,۵	۱۰	۱۲,۰	۹۳,۵۳
۱۶	۰,۵	۱۰	۰,۵	۱۰	۱۲,۰	۱۱۵۸,۶۲
۱۷	۱,۵	۱۰	۰,۵	۱۴	۱۲,۰	۱۱۲,۰۶
۱۸	۱,۰	۶	۰,۴	۱۲	۱۲,۰	۲۴۹,۶۱
۱۹	۰,۵	۶	۰,۴	۱۲	۱۲,۵	۱۱۵۷,۱۹
۲۰	۱,۵	۶	۰,۴	۱۲	۱۲,۵	۱۰۹,۰۷
۲۱	۱,۰	۲	۰,۴	۱۲	۱۲,۵	۲۲۹,۰۷۵
۲۲	۱,۰	۶	۰,۴	۱۰	۱۲,۵	۲۵۰,۷۵
۲۳	۱,۰	۶	۰,۴	۱۲	۱۲,۵	۲۵۰,۷۵

الاستیسیته					
ضریب پواسون	۱	۰	۰	۰,۰۰	۱,۰۰۰
شعاع سوزن	۱	۰	۰	۰,۰۰	۱,۰۰۰
ارتفاع سوزن	۱	۳۱۲۱۲۶	۳۱۲۱۲۶	۱۰,۷۲	۰,۰۰۴
خطا	۲۱	۶۱۱۴۲۸	۲۹۱۱۶		
کل	۲۶	۶۱۰۹۴۳۰			

در نهایت، نتایج تحلیل باقیمانده‌ها نشان داد که تنها یک مشاهده به‌عنوان داده غیرمعمول شناسایی شده است. اگرچه مقدار باقیمانده استاندارد نقطه (۲,۴۲-) نسبت به سایر داده‌ها بزرگ‌تر بود، اما همچنان در بازه قابل قبول قرار داشته و موجب اختلال در برازش کلی مدل نشده است. بنابراین، می‌توان گفت داده‌های جمع‌آوری‌شده از کیفیت بالایی برخوردار بوده و مدل به طور کلی پایدار و قابل اعتماد است.

جدول 5 آنالیز داده‌های غیرعادی

داده بزرگ	استاندارد باقی‌مانده	باقی‌مانده	پرداش شده	مقدار واقعی	داده غیرعادی
R	-۲,۴۲	۳۹۲,۸-	۶۴۱,۲	۲۴۸,۵	۹

برای ارزیابی دقت مدل رگرسیون و بررسی صحت فروض آماری، مجموعه‌ای از نمودارهای تشخیصی موردبررسی قرار گرفت. نمودار احتمال نرمال نشان داد که پسماندها عمدتاً بر روی خط ۴۵ درجه قرار دارند که بیانگر نرمال بودن خطاها است. هرچند، حضور تعداد محدودی نقاط دورافتاده در دو انتهای نمودار می‌تواند ناشی از داده‌های غیرمعمول یا شرایط خاص آزمایش باشد. هیستوگرام پسماندها نیز توزیعی تقریباً متقارن حول مقدار صفر را نشان داد که این امر اعتبار بیشتری برای فرض نرمال بودن خطاها فراهم می‌کند.

در نمودار پسماندها در برابر مقادیر برازش شده، پراکندگی نقاط به‌صورت تصادفی حول محور صفر مشاهده شد که نشان‌دهنده فقدان الگوی سیستماتیک و مناسب بودن مدل برای پیش‌بینی است. با این حال، مقادیر پسماند بزرگ در برخی نقاط تأکید می‌کند که وجود داده‌های پرت می‌تواند بر برازش نهایی اثرگذار باشد. همچنین، بررسی پسماندها بر اساس ترتیب مشاهدات نشان داد که هیچ روند مشخص یا الگوی وابستگی زمانی در

ثابت‌ها	۴۷۴۹	۱۰۱۳	۴,۶۹	۰,۰۰۰	
شعاع ذره	-۱۰۷۳,۵	۸۰,۴	-۱۳,۳۵	۰,۰۰۰	۱,۰۰
مدول	-۰,۹	۱۰,۱	۰,۰۹-	۰,۹۳۰	۱,۰۰
الاستیسیته					
ضریب پواسون	۰,۰	۴۰۲	۰,۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰
شعاع سوزن	۰,۰	۲۰,۱	۰,۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰
ارتفاع سوزن	-۲۶۳,۴	۸۰,۴	-۳,۲۷	۰,۰۰۴	۱,۰۰

در ادامه، شاخص‌های برازش مدل در جدول 3 خلاصه مدل گزارش شده است. مقدار ضریب تعیین ($R^2=89.99\%$) نشان می‌دهد که تقریباً ۹۰ درصد تغییرات متغیر پاسخ توسط متغیرهای مستقل مدل توضیح داده می‌شود. مقادیر ضریب تعیین تعدیل‌شده ($Radj^2=87.61\%$) و پیش‌بینی‌شده ($Rpred^2=85.96\%$) که بیانگر ثبات مدل و توانایی آن در تعمیم نتایج به داده‌های جدید است. انحراف معیار باقی‌مانده‌ها نیز در مقدار پایین گزارش شده که این امر نشان می‌دهد که مدل از دقت مناسبی در پیش‌بینی داده‌ها برخوردار است.

جدول 3 قابلیت اطمینان مدل

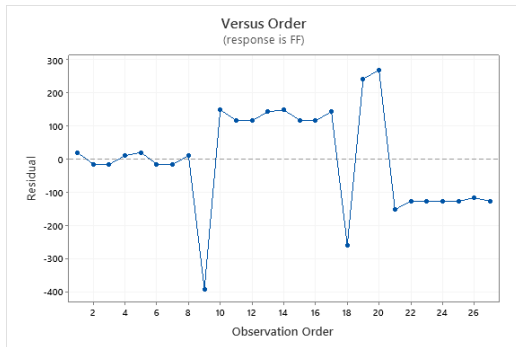
ضریب تعیین پیش‌بینی	ضریب تعیین تعدیل‌شده	ضریب تعیین	انحراف معیار
۸۵,۹۶٪	۸۷,۶۱٪	۸۹,۹۹٪	۱۷۰,۶۳۳

در ادامه آنالیز واریانس که در جدول 4 آورده شده است، نشان می‌دهد که مدل کلی در سطح اطمینان بالا معنادار است ($F=37.77, p<0.001$) در میان عوامل بررسی‌شده، متغیر (R_p) با بالاترین مقدار آماره F و سطح معناداری بسیار پایین ($p<0.001$) به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر شناسایی شد. همچنین متغیر (H) نیز اثر معناداری بر پاسخ داشته است ($p=0.004$). سایر متغیرها به دلیل مقادیر بالای (p -value) فاقد اثر آماری قابل توجه بودند؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اصلی پاسخ عمدتاً تحت تأثیر دو عامل (R_p) و (H) قرار دارد.

جدول 4 واریانس

P-Value	F-Value	میانگین مربعات	جمع مجزورات	درجه آزادی	منابع
۰,۰۰۰	۳۷,۷۷	۱۰۹۹۶۰۰	۵۴۹۸۰۰۲	۵	رگرسیون
۰,۰۰۰	۱۷۸,۱۱	۵۱۸۵۶۴۴	۵۱۸۵۶۴۴	۱	شعاع ذره
۰,۹۳۰	۰,۰۱	۲۳۳	۲۳۳	۱	مدول

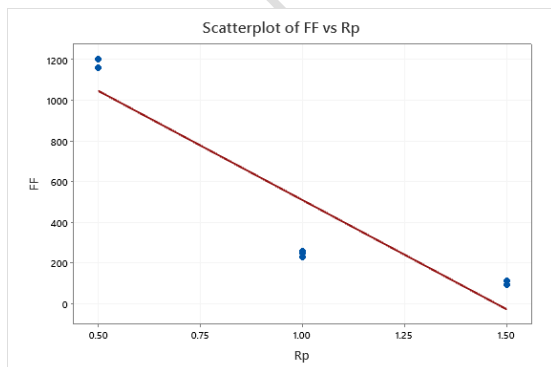
داده‌ها وجود ندارد و این موضوع استقلال خطاها را تأیید می‌کند.



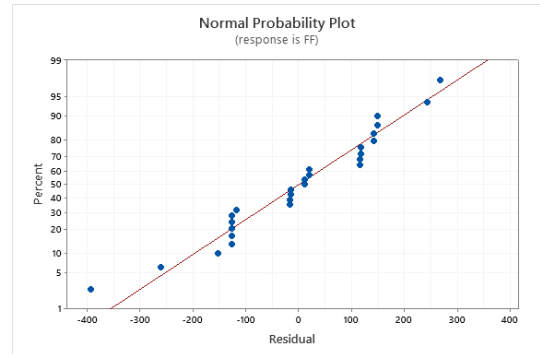
(د)

شکل ۲ نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها

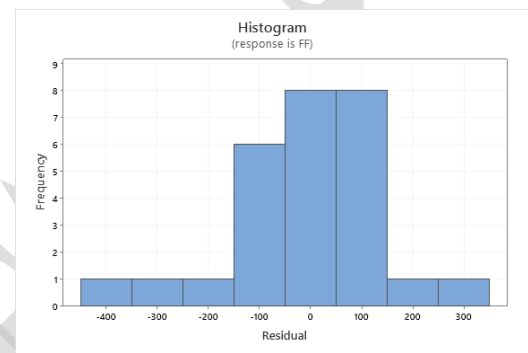
همچنین، برای بررسی اثر متغیرهای ورودی بر پاسخ نیرو، نمودارهای پراکنش میان F و هر یک از عوامل طراحی ترسیم شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که شعاع ذره (R_p) بیشترین تأثیر را دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش (R_p) مقدار (F) به طور معناداری کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان به بهبود شرایط تماس ابزار و ماده در سرعت‌های بالاتر نسبت داد. در مقابل، تغییرات مدول الاستیسیته (E_p) و ضریب پواسون (ν_p) تأثیر قابل توجهی بر نیروی برشی نشان ندادند و پراکندگی داده‌ها روند مشخصی را آشکار نکرد. این یافته با نتایج تحلیل رگرسیون و مقادیر P -Value نیز همخوانی دارد. بررسی اثر زمان فرایند (R_t) نیز رابطه معناداری را آشکار نکرد و داده‌ها بدون الگوی مشخص پراکنده بودند. از سوی دیگر، ارتفاع تیرک (H) اگرچه نسبت به شعاع ذره (R_p) تأثیر ضعیف‌تری دارد، اما روندی کاهشی در مقدار نیرو ایجاد می‌کند. این موضوع احتمالاً ناشی از تغییر در مکانیزم تماس ابزار با ماده و کاهش سطح مؤثر برش در سختی‌های بالاتر است.



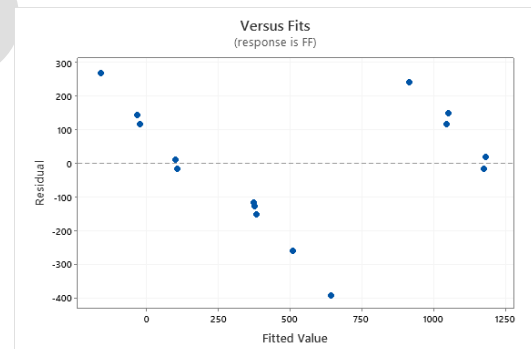
(الف)



(الف)



(ب)



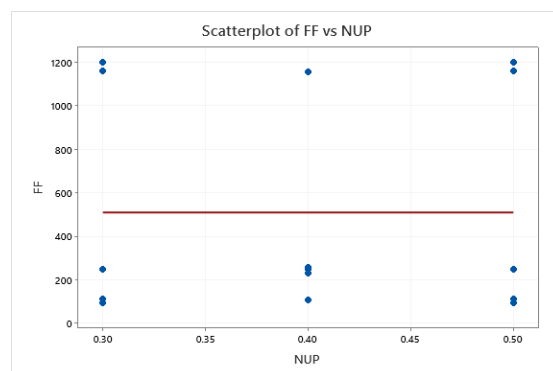
(ج)

(ه)

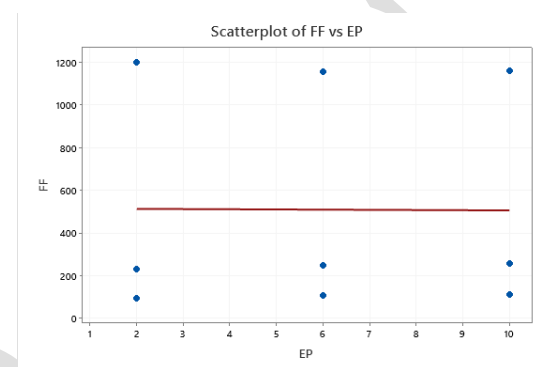
شکل ۳ نمودار پراکنش اثر گذاری پارامترها

نتایج آنالیز حساسیت پارامترها

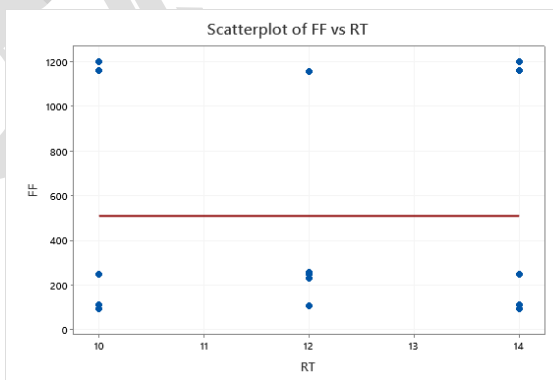
برای ارزیابی دقیق اثر عوامل مختلف بر نیروی منیپولیشن، نمودارهای پراکنش و تحلیل حساسیت ترسیم و بررسی شدند. نتایج در شکل ۴ نشان می‌دهد که تأثیر متغیرها یکسان نبوده و هرکدام نقش متفاوتی در تعیین مقدار نیروی منیپولیشن ایفا می‌کنند. نمودار الف-۴ بیانگر یک‌روند کاهشی مشخص است؛ به‌طوری‌که با افزایش شعاع ذره، مقدار نیرو کاهش می‌یابد. این رفتار ناشی از توزیع یکنواخت‌تر تنش در تماس‌های بزرگ‌تر بوده و در نتیجه مقاومت ذره در برابر منیپولیشن کمتر می‌شود؛ بنابراین، (R_p) به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در کنترل نیرو شناخته می‌شود. در نمودار ب-۴ پراکندگی داده‌ها بدون روند معنادار مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات مدول الاستیسیته ذره در محدوده موردبررسی اثر قابل‌توجهی بر نیرو ندارد. به‌عبارت‌دیگر، سختی الاستیک ماده در این بازه نمی‌تواند تغییر محسوسی در مکانیزم تماس و در نتیجه در نیروی منیپولیشن ایجاد کند. بررسی نمودار ج-۴ نیز حاکی از نبود الگوی مشخص است. این امر بیانگر آن است که ضریب پواسون که بیانگر رفتار جانبی ماده در تغییر شکل است، تأثیر معناداری بر نیرو در فرایند حاضر ندارد. این نتیجه با مقادیر بسیار پایین سهم این پارامتر در تحلیل حساسیت همخوانی دارد. نمودار د-۴ کاهش بارز نیرو را با افزایش شعاع سوزن نشان می‌دهد. افزایش (R_t) منجر به افزایش سطح تماس بین ابزار و ذره شده و تمرکز تنش را کاهش می‌دهد. این پدیده منجر به افت محسوس نیروی منیپولیشن شده و اهمیت بالای هندسه سوزن در طراحی فرایند نانومنیپولیشن را نشان می‌دهد. در نمودار ه-۴ نیروی منیپولیشن نیز روندی کاهشی دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با افزایش ارتفاع تیرک، مقدار نیرو کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به تغییر شرایط پایداری و کاهش سطح مؤثر تماس در ارتفاع‌های بیشتر مربوط باشد. هرچند سهم H کمتر از (R_p) و (R_t) است، اما همچنان به‌عنوان یک متغیر مؤثر قابل‌توجه است.



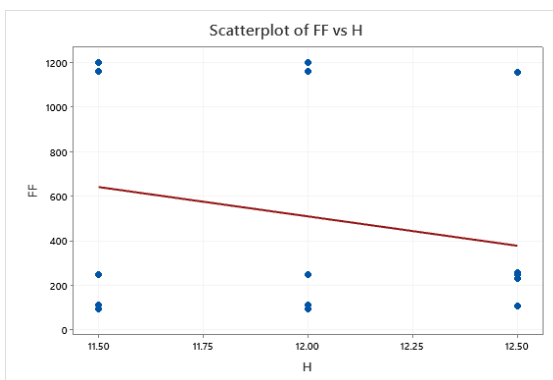
(ب)

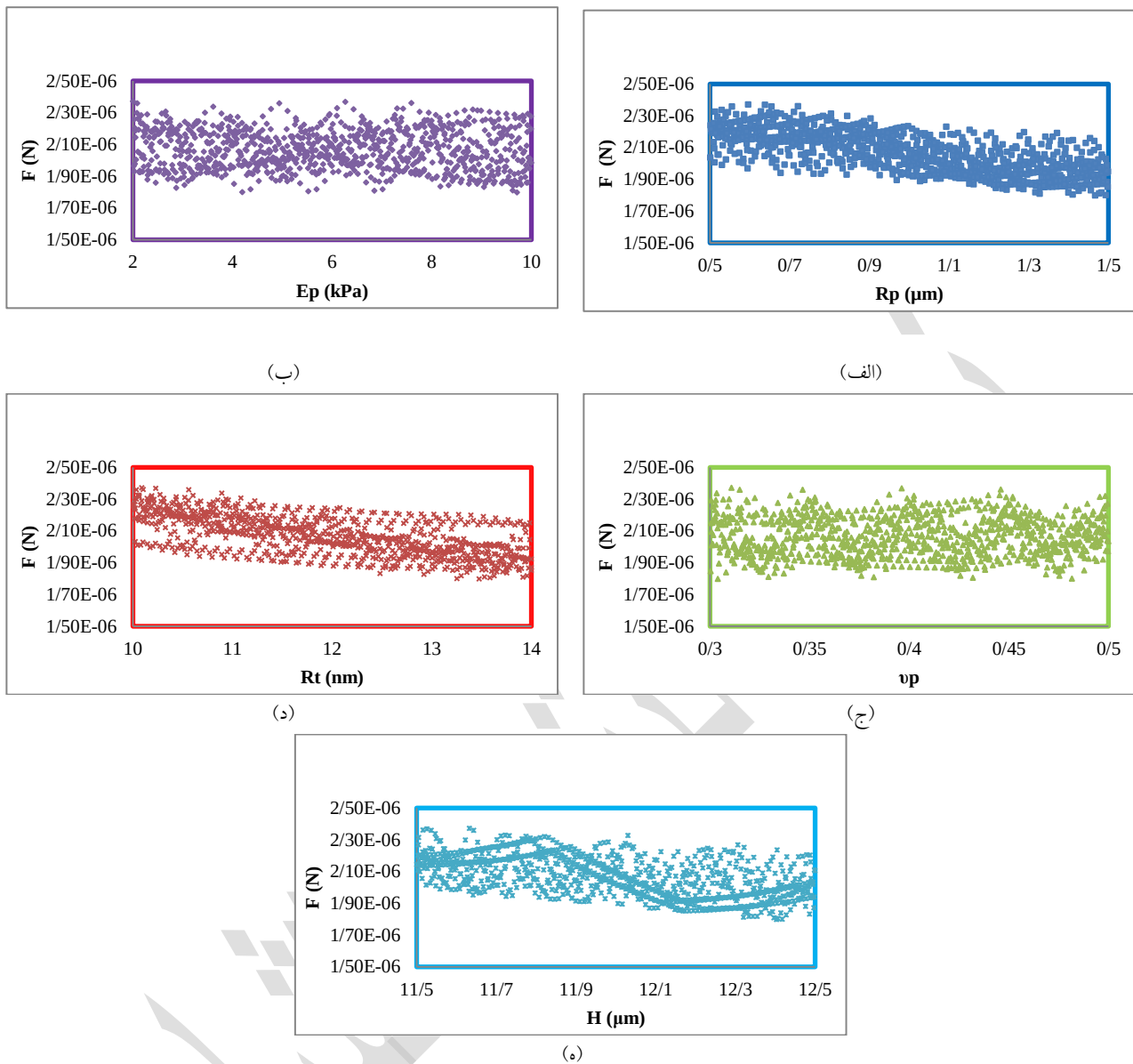


(ج)



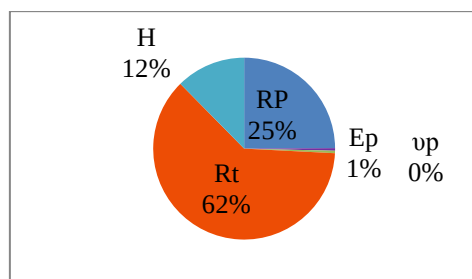
(د)





شکل ۴ نمودار اثرگذاری پارامترها بر نیروی منیپولیشن دو بعدی

هستند. در مقابل، ویژگی‌های مکانیکی ذره (E_p) و (v_p) سهم ناچیزی در تغییرات پاسخ دارند. از این رو، بهینه‌سازی هندسه ابزار می‌تواند به عنوان رویکردی کارآمد برای کنترل نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن مطرح شود.

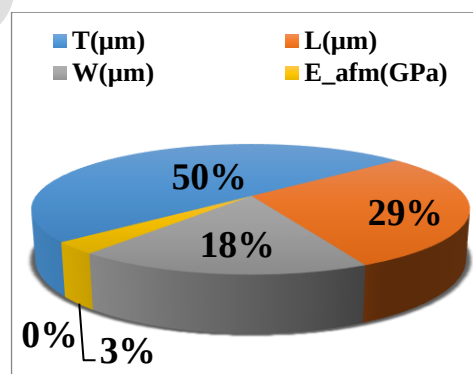


در نهایت، نتایج تحلیل حساسیت که در نمودار دایره‌ای شکل ۵ نمایش داده شده‌اند، این نمودار بیانگر سهم متفاوت هر پارامتر در تغییرات نیرو است. در این میان، شعاع سوزن با سهم ۶۲٪ بیشترین نقش را دارد و پس از آن شعاع ذره با ۲۵٪ و ارتفاع تیرک با ۱۲٪ قرار می‌گیرند. سهم مدول الاستیسیته تنها ۱٪ و ضریب پواسون نزدیک به صفر است که می‌توان تبیین نمود اثر این دو پارامتر بر نیروی منیپولیشن قابل چشم‌پوشی است. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که هندسه ابزار و ذره به‌ویژه (R_t) و (R_p) اصلی‌ترین عوامل تعیین‌کننده در کاهش نیرو طی فرایند نانومنیپولیشن دوبعدی

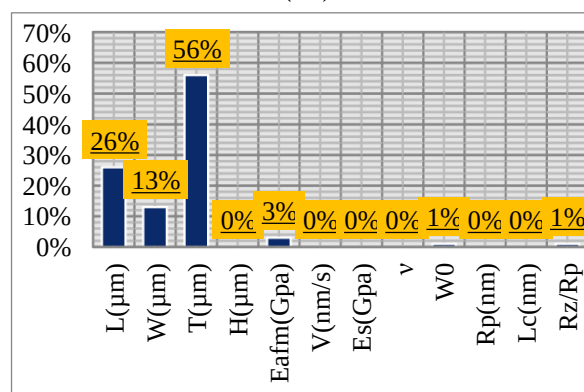
صحت سنجی نتایج

به منظور بررسی دقت مدل توسعه یافته، نتایج تحلیل حساسیت و طراحی آزمایش‌ها در مرحله‌ی شبیه‌سازی با داده‌های حاصل از مدل نهایی فاز دوم منیپولیشن مقایسه شد. مطابق با نتایج شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب)، پارامترهای هندسی مرتبط با ساختار سوزن شامل ضخامت (T) و طول (L) بیشترین سهم را در تغییرات نیروی منیپولیشن دارند، در حالی که تاثیر پارامترهای مکانیکی مانند مدول الاستیسیته ابزار یا ضریب پواسون (V) در مقایسه با عوامل هندسی بسیار کمتر بوده و در حدود صفر تا سه درصد برآورد شده است.

در مقابل، نتایج اعتبارسنجی مدل نهایی که در نمودار شکل ۵ نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که در شرایط واقعی تماس، سهم شعاع سوزن (Rt) بیشترین مقدار (حدود ۶۲٪) را به خود اختصاص داده و پس از آن شعاع ذره (Rp) و ارتفاع تیرک (H) به ترتیب با ۲۵٪ و ۱۲٪ بیشترین اثر را بر نیروی منیپولیشن دارند. این نتایج با روند به دست آمده از شکل‌های (الف) و (ب) سازگار بوده و تأکید می‌کند که کنترل پارامترهای هندسی ابزار نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری و دقت فرآیند منیپولیشن دارد.



(الف)



نتیجه‌گیری

منیپولیشن با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) به دلیل توانایی منحصربه‌فرد آن در ایجاد تماس‌های کنترل‌شده در مقیاس نانو و ثبت جا به جایی‌های بسیار کوچک، به ابزاری کلیدی در حوزه‌های نانوفناوری و زیست‌فناوری تبدیل شده است. این فناوری امکان جابه‌جایی، مونتاژ و سازمان‌دهی نانوذرات و بیو ذرات را با دقت بالا فراهم می‌کند و در کاربردهایی چون نانو لی‌توگرافی، توسعه سگ‌های زیستی، مهندسی بافت، نانورباتیک پزشکی و ساخت نانو ساختارهای ترکیبی نقش اساسی ایفا می‌کند. اهمیت ویژه این روش در آن است که می‌تواند به طور هم‌زمان، نیروهای بین سطحی و رفتار مکانیکی ذرات را آشکار ساخته و مسیر را برای طراحی ابزارهای دقیق‌تر و پایدارتر هموار کند.

یافته‌های این پژوهش در زمینه فاز دوم نانومنیپولیشن دوجوهری با رویکرد مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها نشان داد که نیرو (F) به طور مستقیم تحت تاثیر عوامل هندسی و مکانیکی قرار دارد، اما شدت و نوع این اثرگذاری در میان پارامترها متفاوت است. تحلیل رگرسیونی استخراج‌شده و نمودارهای پراکنش بیانگر آن بودند که شعاع سوزن (Rt) و شعاع ذره (Rp) به ترتیب بیشترین نقش را در کاهش نیرو ایفا می‌کنند؛ به گونه‌ای که افزایش این دو پارامتر منجر به کاهش قابل توجه در میزان نیرو شد. این موضوع نشان می‌دهد که تغییر در شرایط تماس ابزار و ذره، به ویژه در ابعاد هندسی، عامل اصلی کنترل نیرو در فرایند نانومنیپولیشن محسوب می‌شود. از سوی دیگر، بررسی اثر ارتفاع تیرک (H) نشان داد که این پارامتر اگرچه سهم کمتری نسبت به (Rt) و (Rp) دارد، اما همچنان روندی کاهشی در نیرو ایجاد می‌کند. این رفتار احتمالاً به تغییر شرایط پایداری تماس در ارتفاع‌های مختلف مرتبط است.

در مقابل، پارامترهای مدول الاستیسیته (Ep) و ضریب پواسون νp در بازه مورد بررسی اثر معناداری بر نیرو نداشتند و سهم آن‌ها در مدل رگرسیونی و نمودار دایره‌ای بسیار ناچیز بود. این موضوع نشان می‌دهد که ویژگی‌های مکانیکی ماده در مقیاس نانو به اندازه عوامل هندسی در تعیین رفتار نیرو اثرگذار نیستند.

نتایج تحلیل حساسیت و سهم نسبی عوامل نیز این یافته ها را تأیید کرد؛ به طوری که (Rt) با سهم ۶۲٪، (Rp) با ۲۵٪ و (H) با ۱۲٪ به عنوان مهم ترین عوامل مؤثر شنا سایی شدند، درحالی که (Ep) و (v_p) به ترتیب تنها ۱٪ و نزدیک به صفر از تغییرات نیرو را توضیح دادند. هم خوانی این نتایج با ضرایب معادله رگرسیون و مقادیر P-Value، اعتبار مدل و دقت پیش بینی آن را تقویت می کند.

به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که هندسه ا بزار و ذره اصلی ترین متغیرهای تعیین کننده نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی هستند و در مقابل، ویژگی های مکانیکی ذره اثر چندانی بر پاسخ ندارند؛ بنابراین، راهبرد بهینه سازی در چنین فرایندهایی باید بر تغییر و تنظیم پارامترهای هندسی متمرکز باشد. این یافته می تواند مبنایی برای توسعه ابزارهای دقیق تر و کارآمدتر در کاربردهای آینده نانومنیپولیشن و دستکاری زیستی نانوذرات فراهم کند.

برای گسترش دامنه کارایی این پژوهش، می توان در تحقیقات آتی به چند مسیر کلیدی توجه داشت: نخست، توسعه مدل های غیرخطی و چندهدفه برای بررسی همزمان نیرو، دقت و پایداری منیپولیشن. دوم، گسترش فضای طراحی آزمایش ها با در نظر گرفتن پارامترهای محیطی مانند دما، رطوبت و انرژی سطحی که بر نیروهای چسبندگی اثرگذارند. سوم، ترکیب نتایج تجربی با شبیه سازی های عددی (مانند المان محدود یا مدل های مولکولی) به منظور درک عمیق تر سازوکار تماس. در نهایت، طراحی کنترل کننده های هوشمند و مبتنی بر یادگیری ماشین می تواند به اجرای منیپولیشن های زمان واقع با حداقل نیرو و بیشترین دقت منجر شود.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

a_{JKR}	شعاع نفوذ در مدل JKR
Ep	مدول الاستیسیته

مراجع

F	نیرو
F_f	نیروی اصطکاکی اچکا
F_{cr}	نیروی بحرانی
F_y	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای y
F_x	نیروی اعمالی به نوک سوزن در راستای x
H	ارتفاع سوزن
m	جرم سوزن
K	مدول یانگ مؤثر
v_p	ضریب پواسون
$\bar{R}$	شعاع معادل سلول و سوزن
Rp	شعاع نانو ذره
Rt	شعاع سوزن
ω	ضریب چسبندگی

واژه نامه

Atomic force microscopy	میکروسکوپ نیروی اتمی
Cancerous bladder cells	سلول های سرطانی مثانه
Derjaguin model	مدل دژاگوین
Distributed friction force	اصطکاک توزیعی وابسته
Jeng-Wang	جنگ-وانگ
Nanolithography	نانو لیتوگرافی
Nano manipulation	نانو منیپولیشن
Prostate cancer cells	سلول های سرطانی پروستات
Real-time visual feedback	بازخورد تصویری بلادرنگ
stick-slip	لغزش-چسبندگی
Weng-Tang-Zhou-Zhu	ونگ-تانگ-ژو-ژو
Viscoelastic Models	مدل های ویسکوالاستیک
zinc oxide (ZnO)	اکسید روی

- [1] M. Li, K. Xun, X. Zhu, D. Liu, X. Liu, X. Jin, and M. Wu, "Research on AFM tip-related nanofabrication of two-dimensional materials," *Nanotechnology Reviews*, vol. 12, no. 1, Art. no. 20230153, 2023, doi: 10.1515/ntrev-2023-0153.
- [2] K. J. Park, J. H. Huh, D. W. Jung, J. S. Park, G. H. Choi, G. Lee, et al., "Assembly of 3D plasmonic clusters by 2D AFM nanomanipulation of highly uniform and smooth gold nanospheres," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, p. 6045, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-05965-2.
- [3] T. Zhang, H. Yu, P. Li, X. Wang, F. Wang, J. Shi, et al., "Microsphere-based super-resolution imaging for visualized nanomanipulation," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 42, pp. 48093–48100, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c15229.
- [4] S. Yuan, Z. Wang, N. Xi, Y. Wang, and L. Liu, "AFM tip position control in situ for effective nanomanipulation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 2825–2836, 2018, doi: 10.1109/TMECH.2018.2870242.
- [5] G. Li, N. Xi, M. Yu, and W. K. Fung, "Development of augmented reality system for AFM-based nanomanipulation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 2, pp. 358–365, 2004, doi: 10.1109/TMECH.2004.828663.
- [6] A. Moshirpanahi, S. E. Haghighi, and A. Imam, "Dynamic modeling of a cylindrical nanoparticle manipulation by AFM," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 611–619, 2021, doi: 10.1016/j.jestech.2020.12.004.
- [7] M. H. Korayem and M. Zakeri, "Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 7, pp. 714–726, 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1511-4.
- [8] M. H. Korayem and H. Khaksar, "A survey on dynamic modeling of manipulation of nanoparticles based on atomic force microscope and investigation of involved factors," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, no. 1, p. 27, 2020, doi: 10.1007/s11051-019-4722-5.
- [9] T. R. Ramachandran, C. Baur, A. Bugacov, A. Madhukar, B. E. Koel, A. Requicha, and C. Gazen, "Direct and controlled manipulation of nanometer-sized particles using the non-contact atomic force microscope," *Nanotechnology*, vol. 9, no. 3, pp. 237–245, 1998, doi: 10.1088/0957-4484/9/3/010.
- [10] H. Babahosseini, S. H. Mahboobi, M. Khorsand Vakilzadeh, A. Alasty, and A. Meghdari, "Optimal sliding mode control for atomic force microscope tip positioning during nano-manipulation process," *Scientia Iranica*, vol. 20, no. 6, pp. 2285–2296, 2013, doi: 10.1016/j.scient.2013.11.017.
- [11] M. H. Korayem, P. Panahi, and H. Khaksar, "Studying and simulation of ellipsoidal contact models for application in AFM nano manipulation," *Micron*, vol. 140, p. 102960, 2021, doi: 10.1016/j.micron.2020.102960.
- [12] M. H. Korayem, H. Khaksar, R. N. Hefzabad, and M. Taheri, "Contact simulation of soft micro/nano bioparticles for use in identification of mechanical properties and manipulation based on atomic force microscopy," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. 232, no. 2, pp. 274–285, 2018, doi: 10.1177/1464419317733645.
- [13] G. Zhou, B. Zhang, G. Tang, X. F. Yu, and M. Galluzzi, "Cells nanomechanics by atomic force microscopy: focus on interactions at nanoscale," *Advances in Physics: X*, vol. 6, no. 1, p. 1866668, 2021, doi: 10.1080/23746149.2020.1866668.
- [14] B. C. Pruchnik, J. D. Fidelus, E. Gacka, K. Mika, L. Zaraska, G. D. Sulka, and T. P. Gotszalk, "Atomic force microscopy in mechanical measurements of single nanowires," *Ultramicroscopy*, vol. 263, p. 113985, 2024, doi: 10.1016/j.ultramicro.2024.113985.
- [15] P. Panahi, M. H. Korayem, and H. Khaksar, "Manipulation of ellipsoidal nanoparticles considering roughness based on atomic force microscopy," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. 233, no. 3, pp. 763–774, 2019, doi: 10.1177/1464419318816235.
- [16] J. Chen and K. Xu, "Applications of atomic force microscopy in materials, semiconductors, polymers, and medicine: A minireview," *Instrumentation Science & Technology*, vol. 48, no. 6, pp. 667–681, 2020, doi: 10.1080/10739149.2020.1750230.

- [17] M. Taheri and Z. S. Eghdami, "Using new friction models to investigate the mechanical properties of liver cancer tissue," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 3, pp. 107–122, 2024
- [18] M. Taheri and H. Faraji, "Investigating the effect of HK friction model input parameters on the force and critical time in gold nanoparticle manipulation," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 4, pp. 1–16, 2023, doi: 10.22067/jacsm.2023.80792.1160.
- [19] M. H. Korayem, M. Taheri, M. Ghasemi, and H. Badkoobehhezavh, "Investigating the effective parameters in the Atomic Force Microscope-based dynamic manipulation of rough micro/nanoparticles by using the Sobol sensitivity analysis method," *Simulation*, vol. 91, no. 12, pp. 1068–1080, 2015.

نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک