

بررسی کمی و کیفی پارامترهای مؤثر بر مدل اصطکاکی HK در فاز اول جابه‌جایی نانوذره طلا مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی

معین طاهری*
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، mtaheri@iust.ac.ir
 دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک، ایران، zahra.eghdami@gmail.com
 زهراسادات اقدامی

چکیده

در مقیاس میکرو/نانو اصطکاک و چسبندگی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین استفاده از مدل‌های اصطکاکی مانند مدل اصطکاکی HK می‌تواند به‌دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی جابه‌جایی نانوذرات کمک کند. فاز اول جابه‌جایی نانو ذرات شامل محاسبه نیرو و زمان بحرانی می‌باشد. محاسبه دقیق نیروی بحرانی موجب عدم آسیب‌رسانی به بافت و محاسبه دقیق زمان بحرانی موجب جابه‌جایی دقیق نانوذره می‌شود. در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مدل اصطکاکی HK بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا از طراحی آزمایش به روش تاگوچی و تحلیل حساسیت به E-fast استفاده شده است. پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی HK شامل، \bar{f}_1 ، \bar{f}_2 ، B و M می‌باشند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که اثرگذارترین پارامتر بر کاهش نیروی بحرانی، پارامتر B با ۶۶ درصد تأثیر می‌باشد. همچنین دومین پارامتر مؤثر بر نیروی بحرانی، پارامتر M با ۲۲ درصد تأثیر می‌باشد. مؤثرترین پارامترها برای زمان بحرانی نیز پارامتر B و M به ترتیب با ۷۶ و ۱۵ درصد تأثیر می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، نانو جابه‌جایی، مدل اصطکاکی اچ‌کا، میکروسکوپ نیروی اتمی، نیروی بحرانی، زمان بحرانی.

Quantitative and qualitative investigation of the effective parameters on Hk friction model in the first phase of manipulation gold nano particles based on atomic force microscope

M. Taheri
Z. Eghdami

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran
 Department of Manufacturing, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

Abstract

At the micro/nano scale, friction and adhesion are of great importance. Therefore, the use of friction models such as the HK friction model can help the accuracy of the results obtained from the simulation of the manipulation of nanoparticles. The first phase of moving nanoparticles includes the calculation of force and critical time. Accurate calculation of the critical force causes no damage to the tissue and accurate calculation of the critical time causes accurate manipulation of the nanoparticle. In this research, in order to investigate the effect of HK friction model parameters on reducing the critical force and increasing the critical time in manipulation gold nano particles, Taguchi method and sensitivity analysis by E-fast method were used. The input parameters of HK friction model include \bar{f}_1 , \bar{f}_2 , B and M. According to the obtained results, it was observed that the most effective parameter on the reduction of critical force is parameter B with 66% effect. Also, the second most effective parameter on the critical force is the M parameter with 22% effect. The most effective parameters for critical time are parameters B and M with 76% and 15% respectively.

Keywords: Sensitivity Analysis, nanomanipulation, HK friction model, atomic force microscopy, critical force, critical time.

۱- مقدمه

محاسبه نیرو و زمان بحرانی دقیق با استفاده از مدل‌های تماسی و اصطکاکی مختلفی ارائه شده است.

برگر و همکاران [۲] در پژوهش خود به جابه‌جایی نانو ذرات مغناطیسی به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی تصویر نانوذره قابل‌مشاهده است و جابه‌جایی دقیق آن ذره نیز قابل‌کنترل است. در این پژوهش یک حلقه پسماند به دلیل خواص پسماند مغناطیسی نانو ذرات مغناطیسی در مقاومت حال مشاهده شد. طبق نتایج ارائه‌شده مشاهده می‌شود که اثر حال به‌خوبی با میانگین میدان محاسبه‌شده و تولیدشده توسط نانوذره مغناطیسی با فرض انتقال انتشار در q2DEG مطابقت دارد.

بطحایی [۳] با استفاده از آنالیز حساسیت به روش ای-فست و مدل دقیق اصطکاکی HK به بررسی پارامترهای محیطی مؤثر بر نیرو و زمان بحرانی در طی جابه‌جایی پرداخته‌است. انرژی سطحی، کار

یکی از مهم‌ترین بخش‌های نانو فناوری، جابه‌جایی نانوذرات مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. میکروسکوپ نیروی اتمی یکی از کاربردی‌ترین ابزار جابه‌جایی نانو ذرات جهت بررسی خواص مکانیکی ذرات و تصویربرداری از سطوح در مقیاس نانو می‌باشد [۱] از تصویربرداری به‌عنوان مشاهده و کنترل نانو ساختارها استفاده می‌شود. جابه‌جایی نانو ذرات شامل دو فاز می‌باشد. فاز اول محاسبه و بررسی نیرو و زمان بحرانی می‌باشد. نانو ذرات در هنگام جابه‌جایی بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند لذا محاسبه دقیق نیروی بحرانی جهت غلبه بر نیروی اصطکاک و چسبندگی به‌طوری‌که آسیبی به نانوذره وارد نشود از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین محاسبه دقیق زمان بحرانی به‌منظور رسیدن ذره به نقطه هدف نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین پژوهش‌های مختلفی در رابطه با فرآیند جابه‌جایی نانو ذرات مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی به‌منظور

* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mtaheri@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۳۰/۰۱/۰۷

چسبندگی، مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره پارامترهای محیطی موردبررسی هستند. مطابق نتایج ارائه شده مشاهده شد که مدول الاستیسیته ذره، به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر بر روی نیرو و زمان بحرانی غلتش در راستای محور x و مدول الاستیسیته سوزن، اثرگذارترین پارامتر بر روی نیرو و زمان بحرانی غلتش در راستای محور y در جابه جایی نانو ذرات با استفاده از مدل اصطکاکي HK بوده است.

ذاکری و فرجی [۴] رفتار دینامیکی نانو ذره بر روی سطح زبر در حین جابه جایی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی را با استفاده از مدل تماس چند نقطه‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند. از ترکیب مدل تماس تک نقطه‌ای رامپ با مدل تماسی JKR و شوارتز استفاده شده است. در این پژوهش جابه جایی نانو ذره بر روی دو سطح مختلف با هندسه زبری ۴ وجهی و ۶ وجهی انجام شده است. رفتار دینامیک نانو ذره کروی در جابه جایی روی سطوح زبر با استفاده از مدل تماسی چند نقطه‌ای جدید مدل سازی شد. طبق نتایج ارائه شده مشاهده شد که مدل جدید ارائه شده مخصوصاً در شعاع‌های زبری کوچک تأثیر زیادی بر تعیین نیروی بحرانی دارد.

حیدری و همکاران [۵] تأثیر طلا و تیتانیوم را بر روی نوک میکروسکوپ نیروی اتمی بین چند لایه سیلیکون، طلا و نقره مورد بررسی قرار دادند. تأثیر طلا و تیتانیوم برای نوک (AFM) بر مدول یانگ و نیروهای چسبندگی بررسی شد. مطابق نتایج ارائه شده مشاهده شد که به جز زیر لایه طلا، یک نوک میکروسکوپ نیروی اتمی پوشش داده شده با طلا دارای بالاترین نیروی چسبندگی با مقدار $42/67$ نانو نیوتن برای زیر لایه‌های سیلیکونی می‌باشد. در عین حال پوشش تیتانیوم برای نوک میکروسکوپ نیروی اتمی، نیرو را کاهش می‌دهد. نتایج نهایی نشان داد که استفاده از زیر لایه طلا و پوشش تیتانیوم برای نوک میکروسکوپ منجر به کمترین نیروی چسبندگی می‌شود.

به منظور بررسی ویژگی‌های ساختاری و خواص مکانیکی بافت‌های سلولی، طاهری [۶] به محاسبه نیرو و زمان بحرانی در طی فرآیند جابه جایی بافت سرطانی معده با در نظر گرفتن نیروهای اصطکاکي بافت‌های مختلف، پرداخته است. شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن مدل‌های اصطکاکي مختلف مانند کولمب، لاگره و HK انجام شده است. در طی شبیه‌سازی‌ها هندسه بافت سرطانی معده به شکل کروی فرض شده است. فرآیند جابه جایی در دو بعد انجام شده و نمودارهای نیرویی آن نیز رسم شده است. مطابق نتایج مشاهده می‌شود که کمترین میزان نیرو و زمان بحرانی بافت سرطانی معده در مدل اصطکاکي لاگره به ترتیب با مقادیر $0/51$ نانو نیوتن و 64 میلی‌ثانیه ثبت شده است.

یان و همکارانش [۷] به منظور پیش‌بینی مکان نانو ذره پس از جابه جایی آن مدلی را ارائه داده‌اند. ابتدا نیروی عمل‌کننده جابه جایی نانو ذره را بر اساس اصل کمترین عمل تجزیه و تحلیل کرده‌اند. سپس تأثیر محل تماس بین نانو ذره و نوک سوزن بر جهت فشار در نظر گرفته شده و جابه جایی نانو ذره برای پیش‌بینی موقعیت آن پس از جابه جایی مدل سازی شده است. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان‌دهنده صحت و دقت مدل ارائه شده می‌باشد.

ژانگ و همکارانش [۸] به جابه جایی سلول سرطانی معده با استفاده از میکروسکوپ اسکن صوتی پرداخته‌اند. برای اندازه‌گیری سرعت صدا نمونه‌های ثابت شده با فرمالین از پنج نوع مختلف سرطان

معده استفاده شده است. در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که خواص مافوق صوت تحت تأثیر آرایش سلولی، اتصال بین سلولی و اجزای شیمیایی درون سلولی می‌باشد.

میرزالو و همکاران [۹] به منظور بررسی دقیق‌تر مدول الاستیسیته، علاوه بر شبیه‌سازی نظری به جابه جایی بافت سرطانی سینه با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی نیز پرداخته‌اند. آن‌ها در شبیه‌سازی‌های خود از مدل‌های تماسی پیچیده‌تر مانند MD, DMT, BCP, SUN و استفاده کرده‌اند. در بخش مدل‌سازی پارامترهای مکانیکی و شرایط مرزی فرآیند و میکروسکوپ نیروی اتمی نیز ذکر شده است. در نهایت با مقایسه نتایج مقدار مدول یانگ بافت سرطانی سینه به دست آمده است.

کوربین و همکارانش [۱۰] اندازه‌گیری سفتی سلول‌های سرطان سینه را با استفاده از یک حسگر رزونانس MEMS جدید سیلیکونی گزارش کرده‌اند. در نهایت نتایج حاصل را با میکروسکوپ نیروی اتمی تأیید کرده‌اند. آن‌ها جرم و سفتی سلول‌های سرطان سینه خوش خیم (MCF - 10 A)، بدخیم غیرتهاجمی (MCF - 7) و بدخیم بسیار تهاجمی (MDA - MB - 231) را با استفاده از حسگرهای رزونانس سیلیکونی اندازه‌گیری کرده‌اند. حسگر مقدار متوسط سختی کل سلول را استخراج کرده و امکان مقایسه سختی انواع مختلف سلول را فراهم می‌کند. تفاوت‌هایی را بین رده‌های سلولی در کشش و لزجت مشاهده کرده‌اند و نتایج خود را از طریق اندازه‌گیری‌های مستقل با میکروسکوپ نیروی اتمی تأیید کرده‌اند.

وانگ و همکارانش [۱۱] کاربردهای اخیر میکروسکوپ نیروی اتمی از جمله توپوگرافی سطح، خواص مکانیکی، دینامیک سطح و پیشرفته‌ترین طیف‌سنجی مادون قرمز مبتنی بر AFM (AFM-IR) و تکنیک AFM-Raman را مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف این بررسی نشان دادن دسترسی، تطبیق پذیری، محدودیت‌ها و پیشرفت‌های امیدوارکننده تکنیک‌های AFM در علوم زمین انرژی است.

لی و همکارانش [۱۲] پژوهشی در مورد تشخیص نانومقیاس توزیع منافذ و خواص مکانیکی زغال سنگ با استفاده از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده‌اند و تحلیل‌های کمی بر روی توزیع ساختار منافذ، زبری سطح و خواص مکانیکی انجام شده است. تفاوت خواص مکانیکی بین ماتریس و کانی‌های زغال سنگ به وضوح مشاهده شده است. مشاهده شده که مدول یانگ اجزای آلی در حدود ۲ گیگا پاسکال، و مدول مواد معدنی به‌طور کلی بالاتر از ۱۰ گیگا پاسکال می‌باشد. حداکثر مقادیر نیروی چسبندگی بین ۲۰ تا ۵۰ نانو نیوتن متغیر است. همچنین مشاهده شد مقادیر بالا درجایی رخ می‌دهد که منافذ ایجاد می‌شوند. این کار نشان داد که ترکیب نتایج SEM دوبعدی و AFM سه‌بعدی در تشخیص خواص سطح مؤثر است و در آشکار ساختن ساختار منافذ و خواص مکانیکی در مقیاس نانو اهمیت دارد.

طاهری و همکارانش [۱۳] به بررسی جابه جایی بافت سرطانی کبد پرداخته‌اند. در این پژوهش مدول یانگ بافت سرطان کبد با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و با استفاده از سه نوع تیرک با هندسه مستطیل‌وی-شکل و خنجری بررسی شده است. سپس با استفاده از مدل تماس هر تیرک، دامنه مدول یانگ برای هر سه نوع تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی شبیه‌سازی شده است. در نهایت نتایج کار تجربی و شبیه‌سازی‌های نظری مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان

نیرو و زمان بحرانی موردبررسی قرار گرفته است. همچنین انجام این پژوهش با محدودیت‌های گوناگونی را به‌همراه داشته است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به عدم امکان انجام تنوع در کارهای تجربی و آزمایشگاهی، عدم استفاده از انتخاب جنس‌های مختلف، صحت سنجی نتایج و همچنین انتخاب مدل‌های دقیق اصطکاکی اشاره کرد.

۲- تعریف مسئله

ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی از یک کاوشگر شامل تیرک و یک سوزن در انتهای آن تشکیل شده است. مراحل مختلف نانو جابه‌جایی مبتنی بر میکروسکوپ اتمی به‌طور خلاصه به شرح ذیل می‌باشد: ابتدا تصویری از زیرلایه و نانوذره روی آن تهیه می‌شود. سپس نوک سوزن نانوذره را لمس می‌کند و زیرلایه یا پایه ابزار با سرعت ثابت شروع به حرکت می‌کند. همان‌طور که نوک سوزن یا زیرلایه با سرعت ثابت V_{sub} حرکت می‌کند، نیروی اعمال‌شده بر روی ذره FT، به مقدار بحرانی، F_{cr} افزایش می‌یابد تا زمانی که بر نیروهای چسبندگی متشکل از نیروهای تماس و اصطکاک بین ذره و زیرلایه غلبه کند. از این لحظه ذره شروع به حرکت بر روی بستر می‌کند [۳] ذره با سرعتی معادل سرعت زیرلایه اما در جهت مخالف حرکت می‌کند. در این پژوهش جابجایی نانوذره طلا مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل اصطکاکی HK که بر اساس سطح تماس واقعی است، موردبررسی قرار گرفته شده است.

مدل‌سازی ریاضی با در نظر گرفتن خواص مکانیکی میکروسکوپ نیروی اتمی موردنظر مطابق جدول ۱ انجام شده است. انتقال از دنیای ماکرو به دنیای نانو منجر به افزایش نسبت مساحت به حجم می‌شود و در نتیجه نیروهای سطحی مانند چسبندگی و اصطکاک اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. از این رو مدل‌سازی نانو جابه‌جایی اساساً به اصطکاک وابسته است. مدل HK نتایج دقیق‌تری نسبت به دیگر مدل‌های اصطکاکی ارائه می‌دهد بنابراین با بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای مدل اصطکاکی HK می‌توان نتایج بهینه‌ای را برای نیرو و زمان بحرانی ارائه کرد. در این شبیه‌سازی، به جابه‌جایی یک نانوذره طلا به شعاع $50(Rp)$ نانومتر، بر روی بستر اکسید سیلیکون که با سرعت ثابت حرکت می‌کند پرداخته شده است. محدوده خواص هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی در جدول ۲ و محدوده پارامترهای محیطی اثرگذار در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین روند کلی انجام جابه‌جایی نانوذره طلا نیز در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی میکروسکوپ نیروی اتمی [۱۷]

چگالی (kg/m ³)	مدول برشی (GPa)	ضریب پواسن	مدول یانگ (GPa)
۲۳۳۰	۴۰/۵	۰/۲۷	۱۶۹

جدول ۲- محدوده خواص هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی [۱۷]

طول (μm)	عرض (μm)	ضخامت (μm)	ارتفاع (μm)
۲۲۵	۴۸	۱	۱۲

جدول ۳- محدوده پارامترهای محیطی [۱۷]

سرعت (mm/s)	مدول یانگ (GPa)	چسبندگی (J/m ²)
۱۰۰	۸۵/۵	۰/۲

داد که استفاده از یک کنسول وی-شکل، دامنه دقیق‌تری از مدول یانگ را به دست می‌آورد. همچنین مدول یانگ برای بافت سرطان کبد در محدوده ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ پاسکال به دست آمد.

ظاهری [۱۴] جابه‌جایی بافت سرطان روده بزرگ را موردبررسی قرار داده است. پارامتر مهمی که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته، نیروی بحرانی و زمان بحرانی بر اساس مدل‌های مختلف اصطکاک به‌منظور کاهش آسیب به بافت سرطانی است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل‌های اصطکاک لاگره، کولمب و HK استفاده شده است. در نهایت با مقایسه نمودارهای نیرو و در نظر گرفتن مدل‌های مختلف اصطکاک، در جابه‌جایی سه‌بعدی، حداکثر مقدار نیرو و زمان بحرانی برای مدل اصطکاک کولمب و کم‌ترین مقدار برای مدل اصطکاک لاگره ثبت شده است. با توجه به سطح تماس ظاهری در ابعاد نانو در مدل کولمب و سطح تماس واقعی در مدل اصطکاک لاگره، این نتایج قابل توجیه می‌باشند.

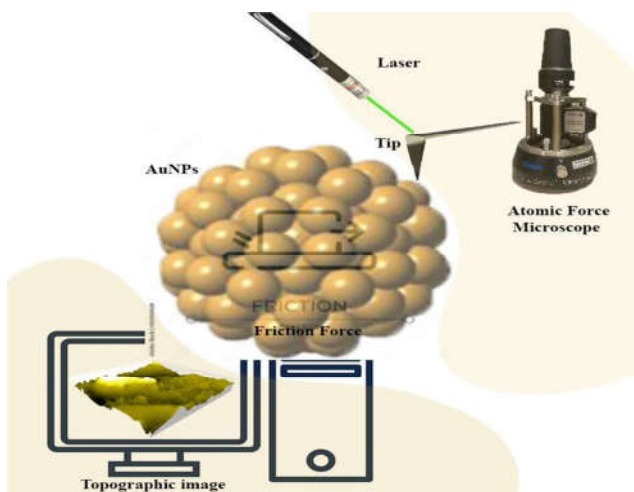
کوریام و خاکسار [۱۵] مجموعه‌ای از مطالعات با توجه به مدل‌سازی جابه‌جایی بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی را موردبحث قرار داده‌اند. به‌طورکلی مشاهده کرده‌اند که پارامترهای مختلفی بر روند جابه‌جایی تأثیر می‌گذارد. این موارد شامل خواص هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی، خواص هندسی مواد نانو ذرات، محیط انجام فرآیند، تأثیر اولیه نانو ذرات، مکانیک تماس و زبری می‌باشد. همچنین مشاهده شد پارامترهای هندسی AFM در مقایسه با سایر عوامل اهمیت کمتری دارند. مواد و هندسه نانوذرات و واکنش محیطی بیشترین نقش را در معادلات تماس و زبری و همچنین نیروهای بین‌مولکولی ایفا می‌کنند.

ظاهری [۱۶] به دستکاری ۳ بعدی با استفاده از مدل‌سازی اصطکاکی و تماسی پرداخته است. برای اولین بار در این پژوهش از ۴ مدل تماسی کروی، شامل مدل‌های هرتز، JKR، دی‌ام‌تی^۱ و بی‌سی‌بی^۲ جهت نانودستکاری سه‌بعدی به‌کاررفته است. هدف از کاربرد این ۴ مدل بررسی اثر آن‌ها بر نیرو و زمان بحرانی در دستکاری سه‌بعدی به‌منظور مدل‌سازی دقیق حرکت نانوذره بر روی سطح مینا می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که مدل تماسی هرتز به دلیل صرف‌نظر از نیروهای چسبندگی کمترین مقدار نیرو و زمان بحرانی را نشان می‌دهد در این پژوهش به بررسی جابجایی نانوذره طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به کمک مدل اصطکاکی HK که بر اساس سطح تماس واقعی می‌باشد، پرداخته شده است. نانوذره طلا به شعاع $50(Rp)$ نانومتر می‌باشد که بر روی بستر اکسید سیلیکون با سرعت ثابت جابه‌جا می‌شود. با توجه به‌مرور ادبیات‌های گذشته می‌توان مشاهده کرد که از مدل‌های مختلف اصطکاکی از جمله مدل اصطکاکی HK به‌منظور جابه‌جایی نانو ذرات طلا استفاده شده است. نوآوری پژوهش صورت گرفته نسبت به دیگر پژوهش‌ها، استفاده از روش آنالیز حساسیت ای-فست جهت بررسی دقیق و کمی تأثیر پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی HK بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا می‌باشد. در این پژوهش تأثیر هم‌زمان ۴ پارامتر شامل \bar{T}_{f1} ، \bar{T}_{f2} ، B و M بر روی

¹ Johnson-Kendall-Roberts (JKR)

² Derjaguin-Muller-Toporov (DMT)

³ Burnham, Colton, Pollock (BCP)



شکل ۱- چکیده گرافیکی پژوهش انجام شده

همچنین، در سطح تماس بسیار کوچک، نیروی اصطکاک به صورت

معادله (۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$f_T = \tau A \quad (2)$$

A، ناحیه ریز تماس واقعی و τ ، مقاومت برشی است. مدول برشی

مؤثر دو جسم تماس با یکدیگر، از رابطه (۳) به دست می‌آید [۱۷].

$$G^* = \frac{2.G_1.G_2}{(G_1 + G_2)} \quad (3)$$

رابطه بین تنش اصطکاکی بی‌بعد $\bar{\tau}_f = \frac{\tau f}{G^*}$ و شعاع تماس بی‌بعد $\bar{a} = \frac{a}{b}$

در معادلات (۴-۶) نشان داده شده است [۱۸]، که در آن a شعاع تماس،

b طول بردار برگر و e^* مدول برشی مؤثر می‌باشد [۱۸].

$$\log \bar{\tau}_f = \begin{cases} \log \bar{\tau}_{f_1}, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ M \log \bar{a} + B, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \log \bar{\tau}_{f_2}, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (4)$$

به طوری که:

$$M = \frac{\log\left(\frac{\bar{\tau}_{f_1}}{\bar{\tau}_{f_2}}\right)}{\log\left(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}\right)} \quad (5)$$

$$B = \frac{\log(\bar{\tau}_{f_1})\log(\bar{a}_2) - \log(\bar{\tau}_{f_2})\log(\bar{a}_1)}{\log\left(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}\right)} \quad (6)$$

$\bar{\tau}_{f_1}$ و $\bar{\tau}_{f_2}$ تنش اصطکاکی بی‌بعد در نواحی ۱ و ۲ است.

همچنین M، شیب خط ناحیه گذر ۲ و B، عرض از مبدأ خط ناحیه گذر

۲ می‌باشد. با استفاده از این معادلات می‌توان نیروی اصطکاک را

به صورت معادله (۷) به دست آورد:

۳- مدل اصطکاکی HK

به طور کلی مدل‌های اصطکاک مختلفی از جمله کولمب و HK برای

مدل‌سازی فرآیند جابه‌جایی نانو ذرات استفاده می‌شود. قوانین اساسی

اصطکاک چندین قرن پیش توسط داونیچی، آمونتون و کولمب

مطرح شده است. در این پژوهش جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر از

مدل اصطکاکی HK استفاده شده است زیرا شباهت زیادی به مدل

کولمب دارد اما با این تفاوت که بسیار دقیق‌تر می‌باشد. بر اساس نظریه

هرتادو و کیم که در شکل ۲ نشان داده شده شعاع تماس (a) با بردار

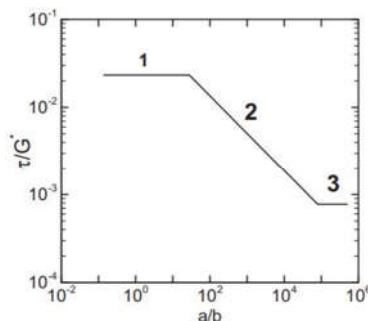
برگر (b) نرمال شده است، و تنش اصطکاک τf نیز با مدول برشی مؤثر

(G) نرمال شده است. در این شکل، ناحیه ۱ لغزش‌های هم‌زمان را با

مقادیر آزمایشی به دست آمده توسط AFM نشان می‌دهد، در حالی که

ناحیه ۳ لغزش‌های چند جابجایی مشترک با مقادیر تجربی

به دست آمده توسط SFA را نشان می‌دهد [۱۷].



شکل ۲- رابطه تنش اصطکاک بدون بعد و شعاع تماس بدون بعد در

مدل اصطکاکی HK [۱۷]

معادله (۱) نشان می‌دهد که نیروی اصطکاک f_T برابر با مجموع

نیروی عمودی f_N و نیروی چسبندگی f_0 است و این نیروی اصطکاک

به سطح تماس ظاهری اجسام ماکروسکوپی وابستگی ندارد [۱۷].

$$f_T = \mu(f_N + f_0) \quad (1)$$

۷	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۹۳	-۲/۸۰۴	-۰/۵۱۲
۸	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۹۳	-۲/۸۰۴	-۰/۵۱۲
۹	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۹۳	-۲/۸۰۴	-۰/۵۱۲
۱۰	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۶۲	-۲/۳۳۷	-۰/۵۱۲
۱۱	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۶۲	-۲/۳۳۷	-۰/۵۱۲
۱۲	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۶۲	-۲/۳۳۷	-۰/۵۱۲
۱۳	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۷۷۵	-۲/۸۰۴	-۰/۳۴۱
۱۴	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۷۷۵	-۲/۸۰۴	-۰/۳۴۱
۱۵	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۷۷۵	-۲/۸۰۴	-۰/۳۴۱
۱۶	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۹۳	-۱/۸۶۹	-۰/۴۲۷
۱۷	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۹۳	-۱/۸۶۹	-۰/۴۲۷
۱۸	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۹۳	-۱/۸۶۹	-۰/۴۲۷
۱۹	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۶۲	-۲/۸۰۴	-۰/۴۲۷
۲۰	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۶۲	-۲/۸۰۴	-۰/۴۲۷
۲۱	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۶۲	-۲/۸۰۴	-۰/۴۲۷
۲۲	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۷۷۵	-۱/۸۶۹	-۰/۵۱۲
۲۳	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۷۷۵	-۱/۸۶۹	-۰/۵۱۲
۲۴	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۷۷۵	-۱/۸۶۹	-۰/۵۱۲
۲۵	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۹۳	-۲/۳۳۷	-۰/۳۴۱
۲۶	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۹۳	-۲/۳۳۷	-۰/۳۴۱
۲۷	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۹۳	-۲/۳۳۷	-۰/۳۴۱

۲-۴- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

رگرسیون خطی، نوعی تابع پیش‌بینی‌کننده خطی است، که در آن یک متغیر وابسته به صورت ترکیبی خطی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌شود، به این معنی که هرکدام از متغیرهای مستقل در ضریبی که در فرایند تخمین برای آن متغیر به دست آمده، ضرب می‌شوند. جواب نهایی، مجموع حاصل ضرب‌ها به علاوه یک مقدار ثابت خواهد بود که آن هم در فرایند تخمین به دست آمده است. معادله (۸) و (۹) نشان‌دهنده معادله رگرسیون حاصل از طراحی آزمایش انجام شده است. معادله (۸) و (۹) به ترتیب نیرو و زمان بحرانی را برحسب متغیرهای آزمایش و برهم‌کنش آن‌ها محاسبه می‌کند.

$$F_{cr} = 20.60 - 474.6 \times \bar{\tau}_{f_1} + 687.4 \times \bar{\tau}_{f_2} + 8.126 \times B + 22.38 \times M + 2604 \times \bar{\tau}_{f_1} \times \bar{\tau}_{f_2} + 0.8991 \times B \times B + 26.43 \times M \times M - 142.4 \times \bar{\tau}_{f_1} \times B \quad (8)$$

$$T_{cr} = 3.034 - 70.34 \times \bar{\tau}_{f_1} + 107.4 \times \bar{\tau}_{f_2} + 1.207 \times B + 3.242 \times M + 422.9 \times \bar{\tau}_{f_1} \times \bar{\tau}_{f_2} + 0.1301 \times B \times B + 3.753 \times M \times M - 20.46 \times \bar{\tau}_{f_1} \times B \quad (9)$$

۳-۴- بررسی روش‌های تحلیل حساسیت

به‌منظور بررسی میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها در مسائل مهندسی، می‌توان از روش تحلیل حساسیت به‌عنوان ابزاری سودمند استفاده نمود. تحلیل حساسیت را می‌توان برحسب کاربرد به چند بخش طبق بندی نمود. این طبقه‌بندی برحسب شکل مدل، به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری انجام می‌شود. در روش تحلیل حساسیت، به‌منظور نشان دادن تغییرات پاسخ‌های خروجی، تحت تأثیر متغیرهای ورودی‌ها از روش گرافیکی استفاده می‌شود. در روش ریاضیاتی، حساسیت را با استفاده از تغییرات پاسخ خروجی برحسب تغییرات متغیرهای ورودی به دست می‌آورند. در این روش، پاسخ خروجی به ازای مقدار اندکی تغییر در ورودی، با

$$\frac{F_f}{G^* b^2} = \begin{cases} \bar{\tau}_{f_1}, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ 10^B a^{-M+2}, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \bar{\tau}_{f_2}, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{cases} \quad (7)$$

۴- طراحی آزمایش و تحلیل حساسیت

در این بخش به توضیحاتی درباره طراحی آزمایش صورت گرفته و نتایج حاصل از آن و همچنین تحلیل حساسیت و انواع آن و روش‌های آن پرداخته می‌شود.

۴-۱- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

طراحی آزمایش به روش تاگوچی، یک روش قدرتمند و مؤثر برای طراحی فرایندهایی است که به‌طور پیوسته و بهینه در شرایط مختلف عمل می‌کنند. رویکرد طراحی آزمایش تاگوچی برای کاربرانی که دانش محدودی از مباحث آمار دارند آسان است. از این رو محبوبیت گسترده‌ای در جامعه مهندسی و علمی به دست آورده است. تاگوچی سه حالت را مشخص کرده است: بزرگ‌تر بهتر، کوچک‌تر بهتر و اندازه اسمی بهتر. این روش کیفیت را بر اساس انحراف از مقدار مطلوب بیان کرده است [۱۹]. در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای مدل اصطکاکی HK بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا پرداخته شده است. همچنین تأثیر هر یک از متغیرهای $\bar{\tau}_{f_1}$ ، $\bar{\tau}_{f_2}$ ، B و M در مدل HK مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نرم‌افزار مینی تب به طراحی آزمایش به روش تاگوچی و بهینه‌سازی پارامترهای ورودی در مدل HK به‌منظور جابه‌جایی نانوذره طلا پرداخته شده است. با بهره‌گیری از روش تاگوچی با توجه به ۴ پارامتر ورودی انتخابی و همچنین سه سطح موجود برای هر پارامتر، به پیشنهاد نرم‌افزار Minitab از آرایه متعامد L27 استفاده شده است. چهار پارامتر فرایند و سطوح عامل آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است. همچنین جدول ۵، طراحی آزمایش به روش تاگوچی با طرح متعامد ۲۷ تایی (L27) را نشان می‌دهد.

جدول ۴- سطوح متغیرهای در نظر گرفته شده برای آزمایش

نوع متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
$\bar{\tau}_{f_1}$	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۳۲۵	۰/۰۲۷۹
$\bar{\tau}_{f_2}$	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۹۳
B	-۲/۸۰۴	-۲/۳۳۷	-۱/۸۶۹
M	-۰/۵۱۲۸	-۰/۴۲۷۴	-۰/۳۴۱۹

جدول ۵- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

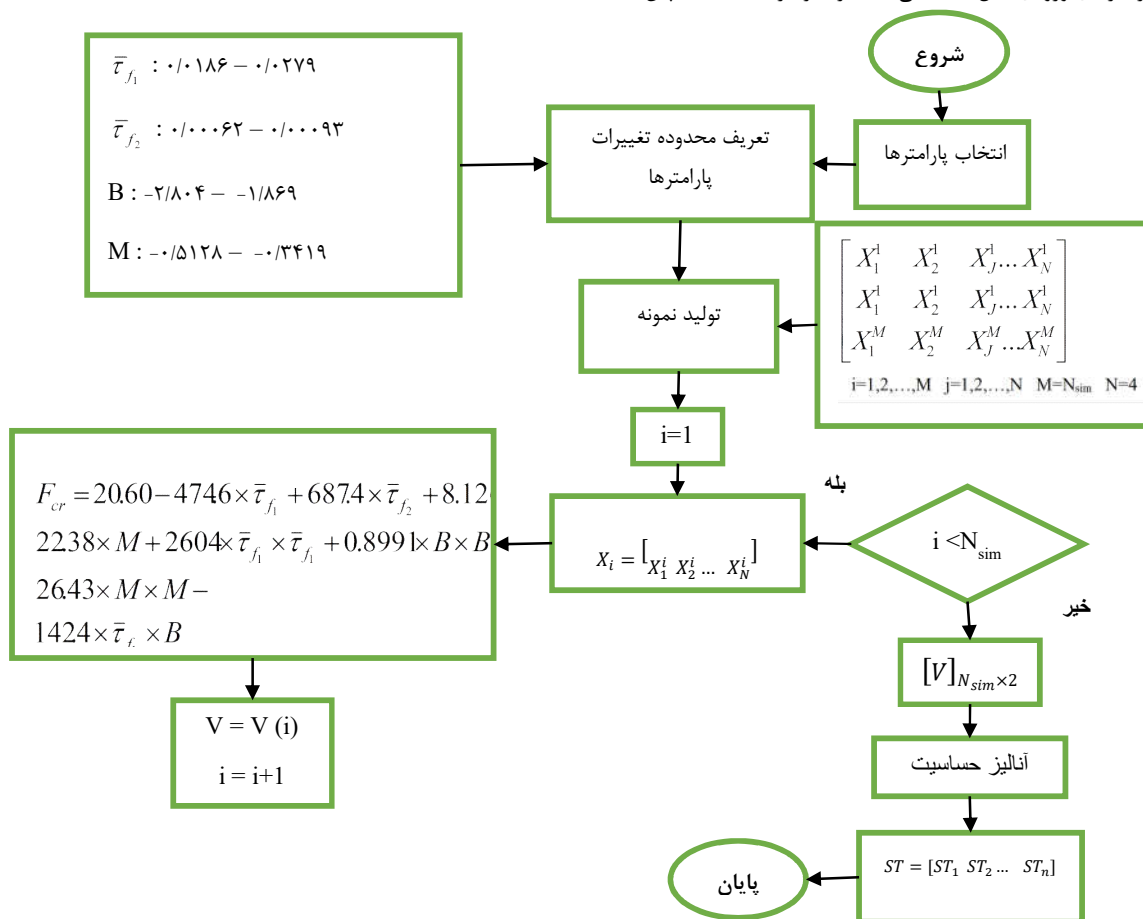
شماره آزمایش	$\bar{\tau}_{f_1}$	$\bar{\tau}_{f_2}$	B	M
۱	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۶۲	-۱/۸۶۹	-۰/۳۴۱
۲	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۶۲	-۱/۸۶۹	-۰/۳۴۱
۳	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۶۲	-۱/۸۶۹	-۰/۳۴۱
۴	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۷۷۵	-۲/۳۳۷	-۰/۴۲۷
۵	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۷۷۵	-۲/۳۳۷	-۰/۴۲۷
۶	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۷۷۵	-۲/۳۳۷	-۰/۴۲۷

استفاده از روش‌های محاسباتی صورت می‌گیرد. همچنین در روش آماری، تحلیل حساسیت به صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی متغیرهای ورودی سیستم می‌پردازد؛ سپس تأثیر متغیرهای ورودی را بر پاسخ سیستم ارزیابی می‌کند. همچنین به‌طور کلی در روش آنالیز حساسیت می‌توان اثر متقابل بین چندین متغیر مختلف ورودی را بر روی پاسخ نهایی سیستم مشخص نمود [۲۰].

۴-۴- الگوریتم کلی فرآیند تحلیل حساسیت

به‌منظور تحلیل حساسیت، ابتدا بایستی پارامترهای ورودی انتخاب شوند. در این مقاله ۴ پارامترهای $\bar{\tau}_{f_1}$ ، $\bar{\tau}_{f_2}$ ، B و M به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی HK در نظر گرفته شده‌اند. سپس به

انتخاب دامنه تغییرات پارامترهای ورودی پرداخته شده است. با انتخاب دامنه‌ی پارامترهای ورودی که در جدول ۱ آورده شده است، نرم‌افزار SimLab به پردازش نمونه‌ها می‌پردازد. پس از تولید نمونه، پارامترهای خروجی مطابق معادله رگرسیون کد شده، تولید خواهند شد. پارامترهای خروجی در این مقاله، نیرو و زمان بحرانی می‌باشد. پس از تعیین مقدار پارامترهای خروجی که در نرم‌افزار MATLAB صورت پذیرفته است، مجدداً نرم‌افزار SimLab با استفاده از E-fast به تولید اندیس‌های حساسیت می‌پردازد. در نتیجه فرآیند آنالیز حساسیت به پایان خواهد رسید. شکل ۳ فلوجارت کلی آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد.



شکل ۳- فلوجارت تحلیل حساسیت

شاخص‌های حساسیت می‌گردد. به‌منظور استفاده از E-fast ورودی X_i در رابطه (۱۰) آورده شده است [۲۱]:

$$x_i = G_i(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1}(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) \quad (10)$$

فرکانس مرتبط با X_i به‌صورت ω_i و φ_i نقطه شروع منحنی

تعریف شده‌اند. S نیز متغیری در بازه $-\pi$ تا π است. φ_i نقطه شروع منحنی را مشخص می‌کند. واریانس خروجی مدل با استفاده از

۴-۵- روش آنالیز حساسیت ای-فست

E-fast، یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است، که بر پایه تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد. این روش همانند روش سوئل بر پایه‌ی واریانس است و مستقل از هرگونه فرض (خطی و یکنواخت) بین ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشد. در این روش با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل می‌شود. همچنین این روش موجب ساده‌سازی روند محاسبه

آنالیز فوریه به شرح زیر تقریب زده می‌شود:

$$V(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds \right]^2 \quad (11)$$

$$\approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2)$$

G ها توابع انتقال، A_j و B_j ضرایب فوریه می‌باشند که در روابط (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos(js) ds \quad (12)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin(js) ds \quad (13)$$

با محاسب ضرایب فوریه برای فرکانس پایه ω_i و هارمونیک‌های بالاتر آن $p\omega_i$ می‌توان واریانس جزئی مرتب اول ورودی X_i را به دست آورد.

$$V_i = \sum_{p \in \mathbb{Z}^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (14)$$

همچنین برای محاسبه شاخص حساسیت اصلی، همانند روش سوئل، از نسبت واریانس جزئی مرتبه اول به واریانس کلی استفاده شده است. شاخص حساسیت کلی نیز از رابطه‌ی (۱۵) به دست می‌آید [۲۲]

$$ST_i = 1 - \frac{F_i}{F} \quad (15)$$

۵- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر نیرو و زمان بحرانی

در این بخش پس از مدل‌سازی جابه‌جایی نانوذره طلا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در نظر گرفتن مدل دقیق اصطکاکی HK به شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از تحلیل حساسیت به E-fast پرداخته شده است. پارامترهای ورودی مدل HK به صورت تصادفی با استفاده از روش آماری ای-فست بدست آمده است. برای بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای مدل اصطکاکی HK که شامل \bar{t}_{f_1} ، \bar{t}_{f_2} ، B و M می‌باشد از نمودارهای گرافیکی استفاده شده است. در این بخش تأثیر کلی و لحظه‌ای هر کدام از پارامترهای ذکر شده بر روی دو فاکتور مهم نیرو و زمان بحرانی به دست آمده و با کاهش یا افزایش هر کدام از پارامترهای مدل اچ‌کا، میزان کاهش یا افزایش نیرو و زمان بحرانی نیز، نشان داده شده است. همچنین از نظر کمی نیز میزان تأثیر هر یک از پارامترها به صورت درصد بیان شده است. نیروی بحرانی در دو راستای x و y می‌باشد و در راستای z نیرویی وجود ندارد زیرا حرکت نانوذره طلا روی یک سطح و داخل یک صفحه انجام شده است.

۵-۱- تأثیر پارامترهای مدل اصطکاکی HK بر کاهش

نیروی بحرانی

شکل ۴ تحلیل حساسیت را با توجه به شاخصه‌های آماری، برای

کاهش نیروی بحرانی نشان می‌دهد. پارامترهای مورد بررسی به ترتیب شامل \bar{t}_{f_1} ، \bar{t}_{f_2} ، B و M می‌باشد. مطابق شکل ۴-الف مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار پارامتر \bar{t}_{f_1} نیروی بحرانی با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که می‌توان از سطح ۳ یعنی مقدار ۰/۰۲۷۹ به منظور کاهش نیروی بحرانی استفاده کرد. با استفاده از معادله رگرسیون بدست آمده از بهینه‌سازی نیروی بحرانی که در معادله (۸) آورده شده است و جایگذاری مقدار \bar{t}_{f_1} در ۳ سطح موجود میزان کاهش نیروی بحرانی قابل مشاهده است. همچنین با توجه به شکل و شیب خط لازم به ذکر است که پارامتر \bar{t}_{f_1} تأثیر ناچیزی بر نیروی بحرانی دارد اما به هر حال موجب کاهش نیروی بحرانی در مدل اصطکاکی HK می‌شود.

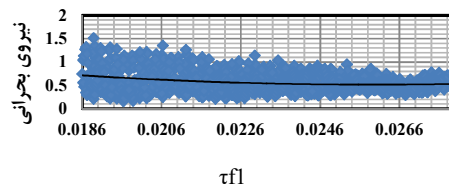
شکل ۴-ب، تأثیر پارامتر \bar{t}_{f_2} بر میزان کاهش نیروی بحرانی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-ب مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار پارامتر \bar{t}_{f_2} میزان نیروی بحرانی با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. با توجه به معادله رگرسیون به دست آمده از بهینه‌سازی و قرار دادن مقادیر سطوح پارامتر \bar{t}_{f_2} در این معادله می‌توان مقدار نیروی بحرانی در هر سه سطح را بررسی کرد و روند کاهش آن قابل مشاهده است. مقدار عددی ۰/۰۰۰۶۲ برای این پارامتر کم‌ترین نیروی بحرانی را به عنوان خروجی می‌دهد. همچنین با توجه به شکل مشاهده می‌شود که تغییرات پارامتر \bar{t}_{f_2} تأثیر ناچیزی بر کاهش نیروی بحرانی دارد.

پارامتر بعدی، پارامتر B می‌باشد که میزان اثرگذاری آن بر کاهش نیروی بحرانی در شکل ۴-ج آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که پارامتر B با نیروی بحرانی رابطه مستقیم دارد، یعنی با افزایش مقدار عددی پارامتر B، میزان نیروی بحرانی نیز با شیب قابل توجهی افزایش می‌یابد. از آنجایی که افزایش نیروی بحرانی موجب آسیب به نانوذره می‌شود، هرچه مقدار نیروی بحرانی کم‌تر باشد بهتر است. بنابراین پارامتر B با مقدار عددی ۲/۸۰۴- کم‌ترین نیروی بحرانی را به عنوان خروجی محاسبه می‌کند. با توجه به شیب خط شکل ۴-ج و مقایسه آن با دیگر پارامترها می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر B اثرگذارترین پارامتر بر روی کاهش نیروی بحرانی در مدل اصطکاکی HK می‌باشد.

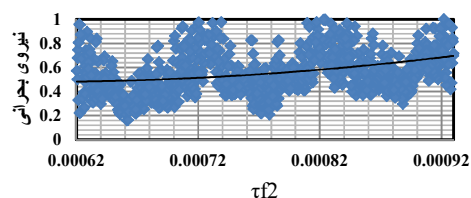
پارامتر بعدی که تأثیر آن مشاهده شده است تأثیر پارامتر M بر میزان کاهش نیروی بحرانی می‌باشد. در شکل ۴-د مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار عددی پارامتر M، نیروی بحرانی دچار نوسان می‌شود که ابتدا با کاهش ناچیز و سپس با افزایش بسیار کم روبه‌رو است. بنابراین با توجه به شکل ۴-د مشاهده می‌شود که پارامتر M با مقدار متوسط خود یعنی ۰/۴۲۷۴-، کم‌ترین نیروی بحرانی را در مدل اصطکاکی HK محاسبه می‌کند. بعد از پارامتر B، پارامتر M تأثیرگذارترین پارامتر بر روی کاهش نیروی بحرانی می‌باشد.

نحوه تغییر زمان بحرانی با تغییر پارامتر B می‌باشد. با توجه به شیب نمودار ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار عددی پارامتر B میزان زمان بحرانی به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. با توجه به شیب صعودی نمودار می‌توان نتیجه گرفت که اثرگذارترین پارامتر بر افزایش زمان بحرانی B می‌باشد. بنابراین پارامتر B با مقدار عددی $1/869$ - بیش‌ترین زمان بحرانی را در مدل اصطکاکی HK محاسبه می‌کند.

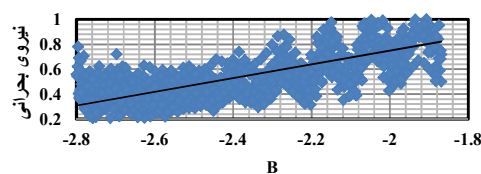
آخرین پارامتری که میزان تأثیرگذاری آن بر زمان بحرانی محاسبه شده، پارامتر M می‌باشد. مطابق شکل ۵-د مشاهده می‌شود که با تغییرات مقدار M، میزان زمان بحرانی دچار نوسان شده است. به‌طوری‌که ابتدا با افزایش مقدار M، زمان بحرانی کاهش یافته و سپس با افزایش مقدار M میزان زمان بحرانی به مقدار قابل قبولی افزایش می‌یابد. با توجه به روند تغییرات نمودار می‌توان دریافت که پس از متغیر B، پارامتر M بیش‌ترین تأثیر را برافزایش زمان بحرانی دارد.



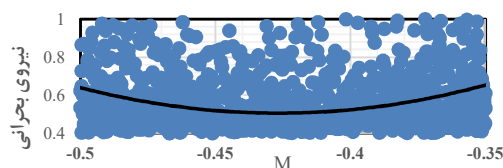
(الف)



(ب)

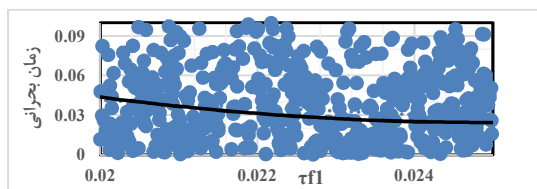


(ج)

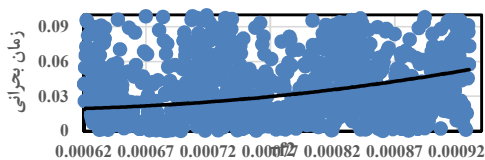


(د)

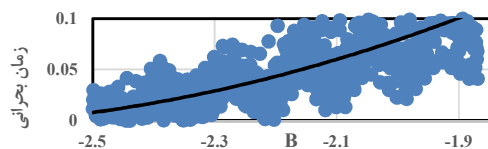
شکل ۴- تأثیر پارامترهای مدل HK بر نیروی بحرانی



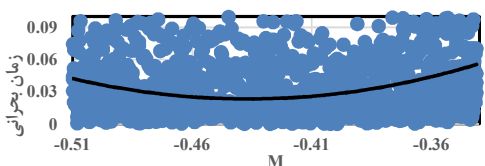
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۵- تأثیر پارامترهای مدل HK بر نیروی بحرانی

۲-۵- تأثیر پارامترهای مدل اصطکاکی HK بر کاهش افزایش زمان بحرانی

شکل ۵ تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر افزایش زمان بحرانی را در مدل اصطکاکی HK نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای استخراج شده از تحلیل حساسیت، به تفسیر هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

در ابتدا شکل ۵-الف میزان تأثیر پارامتر $\bar{\tau}_{f1}$ بر افزایش زمان بحرانی را نشان می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که پارامتر $\bar{\tau}_{f1}$ با زمان بحرانی رابطه عکس دارد یعنی با افزایش پارامتر $\bar{\tau}_{f1}$ ، مقدار زمان بحرانی تقریباً به‌طور خطی کاهش می‌یابد.

پارامتر بعدی که مورد بررسی قرار گرفته است پارامتر $\bar{\tau}_{f2}$ می‌باشد. با توجه به شکل ۵-ب مشاهده می‌شود که افزایش مقدار عددی پارامتر $\bar{\tau}_{f2}$ موجب افزایش زمان بحرانی می‌شود بنابراین پارامتر $\bar{\tau}_{f2}$ با مقدار عددی $0/0093$ بیش‌ترین زمان بحرانی را در مدل اصطکاکی HK محاسبه می‌کند.

پارامتر اثرگذار بعدی پارامتر B می‌باشد. شکل ۵-ج نشان‌دهنده

۶- مقایسه کمی اثر پارامترهای مدل اصطکاکی HK بر نیروی و زمان بحرانی با استفاده از تحلیل حساسیت

روش آماری تحلیل حساسیت ای-فست موجب مشاهده تأثیر کمی و دقیق پارامترهای ورودی مدل HK به‌طور هم‌زمان بر روی پارامترهای نیرو و زمان بحرانی شده است. بنابراین در این بخش از پژوهش، پس از

قرار گرفته شده است. هدف اصلی از این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای مدل اصطکاکی HK بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا به‌صورت کیفی و کمی می‌باشد. پارامترهای مورد بررسی شامل $\bar{\tau}_{f1}$ ، $\bar{\tau}_{f2}$ ، B و M می‌باشند. بدین منظور ابتدا طراحی آزمایش به روش تاگوچی انجام شد و سپس برای هر آزمایش مقدار نیرو و زمان بحرانی محاسبه شد و سپس معادله رگرسیون برای هر دو خروجی نیرو و زمان بحرانی آورده شده است. سپس از روش تحلیل حساسیت ای-فشت به بررسی کمی هر ۴ پارامتر مدل HK پرداخته شد. با توجه به نتایج حاصل شده از تحلیل حساسیت تأثیر هر ۴ پارامتر ورودی مدل اصطکاکی HK بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. طبق بررسی‌های صورت گرفته، برای نیروی بحرانی مشاهده شد که پارامتر B بیشترین تأثیر را بر نیروی بحرانی با تأثیر ۶۶ درصد داشته است. همچنین مشاهده شد که این پارامتر با نیروی بحرانی رابطه مستقیم دارد یعنی با کاهش مقدار عددی پارامتر B، نیروی بحرانی به‌شدت کاهش می‌یابد. با توجه به سطوحی که برای هر پارامتر در طراحی آزمایش در نظر گرفته شده است و نتایج حاصل از آنالیز حساسیت می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر B با مقدار $2/804$ در مدل HK کمترین نیروی بحرانی را محاسبه می‌کند. دومین پارامتر مؤثر بر نیروی بحرانی، پارامتر M با ۲۲ درصد تأثیر می‌باشد.

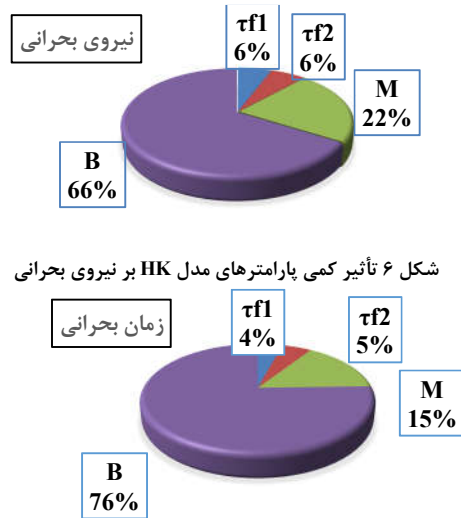
اولین پارامتر مؤثر بر زمان بحرانی، پارامتر B با ۷۶ درصد تأثیر می‌باشد. این پارامتر با زمان بحرانی رابطه مستقیم دارد. بنابراین به‌منظور افزایش زمان بحرانی جهت جابه‌جایی دقیق نانوذره می‌بایست مقدار پارامتر B بیشینه شود. بدین منظور با توجه به سطوح طراحی آزمایش مشاهده می‌شود که مقدار B برای محاسبه ماکزیمم زمان بحرانی باید مقدار عددی $1/869$ باشد. لازم به ذکر است که پارامتر M با ۱۵ درصد تأثیر، پارامتر مؤثر بعدی بر روی زمان بحرانی می‌باشد. پارامترهای $\bar{\tau}_{f1}$ و $\bar{\tau}_{f2}$ ، تأثیر ناچیزی بر نیرو و زمان بحرانی دارند.

۸- نمادها

علائم انگلیسی

A	مساحت واقعی تماس
a	شعاع تماس
\bar{a}	شعاع تماس بی‌بعد
B	عرض از مبدأ خط گذر ناحیه ۲
E	مدول یانگ
E^*	مدول یانگ مؤثر
f_0	نیروی چسبندگی
f_N	نیروی عمودی سطح
G^*	مدول برشی مؤثر
G_1	مدول برشی سوزن
G_2	مدول برشی ذره
H	ارتفاع سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی
L	طول تیرک
M	شیب خط گذر ناحیه ۲

بررسی کیفی نمودارهای گرافیکی به تحلیل و بررسی نمودارهای کمی پرداخته شده است تا به‌طور دقیق تأثیر هر یک از پارامترهای مدل HK بر پارامترهای نیرو و زمان بحرانی پرداخت. مطابق شکل ۶، پارامترهای B و M به ترتیب با ۶۶ و ۲۲ درصد بیشترین تأثیر را بر نیروی بحرانی دارند. همچنین پارامتر B رابطه مستقیمی با کاهش نیروی بحرانی دارد به‌طوری‌که با کاهش مقدار آن، میزان نیروی بحرانی نیز کاهش می‌یابد. همچنین نتایج شکل ۶ نشان‌دهنده تأثیر ناچیز ۲ پارامتر $\bar{\tau}_{f1}$ و $\bar{\tau}_{f2}$ ، هر کدام با ۶ درصد تأثیر بر روی نیروی بحرانی می‌باشد. شکل ۷ نشان‌دهنده تأثیر کمی هر ۴ پارامتر مدل اصطکاکی HK بر روی زمان بحرانی می‌باشد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که پارامترهای B و M به ترتیب با ۷۶ و ۱۵ درصد تأثیر، مؤثرترین پارامترها بر زمان بحرانی می‌باشند. پارامتر B با زمان بحرانی رابطه مستقیم دارد یعنی افزایش این پارامتر در مدل HK موجب افزایش زمان بحرانی می‌شود. همچنین با نگاه به شکل ۷ می‌توان شاهد تأثیر ناچیز دو پارامتر $\bar{\tau}_{f1}$ و $\bar{\tau}_{f2}$ ، به ترتیب با ۴ و ۵ درصد تأثیر بر روی زمان بحرانی بود.



۷- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی جابه‌جایی نانو ذرات با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی فرآیند پیچیده‌ای می‌باشد. در دنیای میکرو/نانو، نیروی اصطکاک و چسبندگی تحت نظارت جدی قرار دارند. در این راستا، مدل‌های اصطکاک مختلفی توسط دانشمندان زیادی به‌منظور مدل‌سازی شرایط حاکم در جابه‌جایی میکرو/نانو ایجاد شده‌اند. در فرآیند جابه‌جایی (دستکاری) کنترل نیرو و زمان بحرانی در خروجی مدل استفاده شده بسیار مهم است. تعیین پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر خروجی نیرو و زمان بحرانی دارند ضروری است زیرا محاسبه دقیق این نیرو منجر به عدم آسیب به ذره می‌شود. همچنین محاسبه دقیق زمان بحرانی موجب جابجایی دقیق و کنترل شده ذرات می‌شود. در این پژوهش جابجایی نانوذره طلا با شعاع ۵۰ نانومتر با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مبتنی بر مدل اصطکاکی HK مورد بررسی

- [16] Taheri M. Using of spherical contact models in 3d manipulation modeling of Au nanoparticles using atomic force microscopy to calculate the critical force and time. *Mechanical Engineering Tabriz University*. 2018 Jul 23;48(2):175-84.
- [17] Adams GG, Muftu S, Azhar NM. A scale-dependent model for multi-asperity contact and friction. *J. Tribol.* 2003 Oct 1;125(4):700-8.
- [18] Hurtado JA, Kim KS. Scale effects in friction of single-asperity contacts. I. From concurrent slip to single-dislocation-assisted slip. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1999 Sep 8;455(1989):3363-84.
- [19] Atarodi A, Karami H, Ardeshtir A, Hosseini K. Optimization of the Geometric Parameters of the Protective Spur Dike using Taguchi Method and GRA. *JWSS-Isfahan University of Technology*. 2020 May 10;24(1):13-26.
- [20] Salamat-Talab M, Tahmasbi V, Safari M, Zeinolabedin Beygi A. Mathematical modeling, sobol sensitivity analysis and optimization of main parameters in drilling of E-glass/epoxy laminated composites. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Feb 19;8(11):43-53.
- [21] Saltelli A, Tarantola S, Chan KS. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*. 1999 Feb 1;41(1):39-56.
- [22] Homma T, Saltelli A. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering & System Safety*. 1996 Apr 1;52(1):1-7.

ضخامت تیرک	t
عرض تیرک	w
علائم یونانی	
تنش اصطکاکی	τ_f
تنش اصطکاکی بی بعد در ناحیه ۱	$\bar{\tau}_{f_1}$
تنش اصطکاکی بی بعد در ناحیه ۲	$\bar{\tau}_{f_2}$

۹- مراجع

- [1] Müller DJ, Dumitru AC, Lo Giudice C, Gaub HE, Hinterdorfer P, Hummer G, De Yoreo JJ, Dufréne YF, Alsteens D. Atomic force microscopy-based force spectroscopy and multiparametric imaging of biomolecular and cellular systems. *Chemical Reviews*. 2020 Nov 9;121(19):11701-25.
- [2] Burger P, Singh G, Johansson C, Moya C, Bruylants G, Jakob G, Kalaboukhov A. Atomic Force Manipulation of Single Magnetic Nanoparticles for Spin-Based Electronics. *ACS nano*. 2022 Oct 31;16(11):19253-60.
- [3] Bathaee SH. Sensitivity analysis of peripheral parameters in three dimensional nano-manipulation by using HK model. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019 Jun 22;9(2):123-39.
- [4] Zakeri M, Faraji J. Dynamic modeling of nano/microparticles displacement in multi-point contact based on the Rumpf model. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Oct 10;16(8):120-30.
- [5] Heidari P, Salehi M, Ruhani B, Purcar V, Căprărescu S. Influence of Thin Film Deposition on AFM Cantilever Tips in Adhesion and Young's Modulus of MEMS Surfaces. *Materials*. 2022 Mar 12;15(6):2102.
- [6] 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 Apr 21;9(1):136-45.
- [7] Yuan S, Liu L, Wang Z, Xi N, Wang Y. Study of nano-manipulation approach based on the least action principle using AFM based robotic system. In 2017 36th Chinese Control Conference (CCC) 2017 Jul 26 (pp. 4424-4429). IEEE.
- [8] Zhang Y, Zhao J, Yu H, Li P, Liang W, Liu Z, Lee GB, Liu L, Li WJ, Wang Z. Detection and isolation of free cancer cells from ascites and peritoneal lavages using optically induced electrokinetics (OEK). *Science advances*. 2020 Aug 5;6(32):eaba9628.
- [9] Mirzaluo M, Fereiduni F, Taheri M, Modabberifar M. Experimental extraction of Young's modulus of MCF-7 tissue using atomic force microscopy and the spherical contact models. *European Biophysics Journal*. 2023 Feb;52(1-2):81-90.
- [10] Corbin EA, Kong F, Lim CT, King WP, Bashir R. Biophysical properties of human breast cancer cells measured using silicon MEMS resonators and atomic force microscopy. *Lab on a Chip*. 2015;15(3):839-47.
- [11] Wang K, Taylor KG, Ma L. Advancing the application of atomic force microscopy (AFM) to the characterization and quantification of geological material properties. *International Journal of Coal Geology*. 2021 Nov 1;247:103852.
- [12] Li Y, Yang J, Pan Z, Tong W. Nanoscale pore structure and mechanical property analysis of coal: An insight combining AFM and SEM images. *Fuel*. 2020 Jan 15;260:116352.
- [13] Taheri M, Jabbari A, Eghdami Z, Faraji H, Mollaei T. Experimental and theoretical investigation of Young's modulus of liver cancer tissue using rectangular, V-shaped and dagger cantilevers of an atomic force microscope. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2023 Sep 18.
- [14] Taheri M. Investigation of the effect of different friction models on experimental extraction of 3D nanomanipulation force and critical time of colon cancer tissue. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2022 Jun 22;54(4):791-804.
- [15] Korayem MH, Khaksar H. A survey on dynamic modeling of manipulation of nanoparticles based on atomic force microscope and investigation of involved factors. *Journal of Nanoparticle Research*. 2020 Jan;22(1):27.