

مدل سازی مسیریابی بهینه ی میکرو/نانو ذرات در فاز دوم منیپولیشن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی

چکیده: میکروسکوپ نیروی اتمی یکی از ابزارهای جدید کاربردی در حوزه ی نانو تکنولوژی است که در نانومنیپولیشن مورد استفاده قرار می گیرد. هدف اصلی از این پژوهش مدل سازی مسیریابی بهینه ی میکرو/نانو ذرات در فاز دوم منیپولیشن و حرکت ذرات با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی می باشد. بدین منظور در این پژوهش، ابتدا به انجام کار تجربی و تصویربرداری از بافت سلولی سرطانی سر و گردن، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است. پس از آن، این تصاویر مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سپس با استفاده از الگوریتم های مختلف مسیریابی، شامل الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده، مسیر بهینه جهت انجام فاز دوم نانومنیپولیشن، استخراج شده است. نتایج به دست آمده حاکی از بهینه شدن مسیر در فاز دوم نانومنیپولیشن جهت کاربرد در جابه جایی ذرات است.

واژه های راهنما: نانومنیپولیشن، مسیریابی بهینه، بافت سلولی سر و گردن، الگوریتم های مختلف مسیریابی، میکروسکوپ نیروی اتمی

زهرة مرادی
کارشناسی ارشد

خسرو خاندانی
استادیار

معین طاهری*
دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

مهدي مدبری فر
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

Zohre Moradi
M.Sc.

Khosro Khandani
Assistant Professor

Moein Taheri*
Associate Professor,
Manufacturing
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

**Mehdi
Modabberifar**
Associate Professor,
Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Modeling of optimal path planning of micro-nano/particles in second phase of manipulation using image of atomic force microscopy

Abstract: Atomic force microscope is one of the new practical tools in the field of nanotechnology, which is used in nanomanipulation. The main goal of this research is to model the optimal routing of micro/nanoparticles in the second phase of manipulation and movement of particles using atomic force microscope images. For this purpose, in this research, firstly, experimental work and imaging of head and neck cancerous cell tissue has been done using an atomic force microscope. After that, these images are examined and analyzed and then using different routing algorithms, including particle swarm optimization algorithm, genetic algorithm and simulated refrigeration algorithm, the optimal path to perform the second phase of nanomanipulation is extracted. The obtained results indicate the optimization of the path in the second phase of nanomanipulation for the use of in-situ replacement of particles.

Keywords: Nanomanipulation, Optimal routing, Head and neck cell tissue, Different routing algorithms

۱- مقدمه

تیرک به منظور بررسی ظرفیت حمل بار در فرآیند منیپولیشن برای نانوربات میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند.

کورایم و همکارانش [۷] به تحلیل حساسیت و بررسی اثر پارامترهای مختلف ابعادی تیرک از جمله طول، عرض و ضخامت تیرک و ارتفاع سوزن بر روی ظرفیت حمل بار، به منظور طراحی و انتخاب تیرک مناسب برای اهداف جابه‌جایی نانوذرات و مونتاژ دقیق و صحیح در فرآیند منیپولیشن برای نانوربات میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که پارامتر ارتفاع سوزن حساس‌ترین پارامتر است، در حالی که ضخامت تیرک دارای حساسیت کمی در منیپولیشن است. ژائو و همکارانش [۸] یک روش خودکار برای پیاده‌سازی الگو در میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده‌اند. این روش فشار را در یک جهت مستقیم حفظ می‌کند و آن قدر آن را تکرار می‌کند تا ذره در خط مستقیم به نقطه‌ی هدف برسد. کورایم و همکارانش [۹] به مقایسه‌ی روش‌های کنترلی PID و کنترلر مود لغزشی روی سیستم غیرخطی تیرک و نمونه میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که هر دو این روش‌ها خطای موقعیت‌یابی را نسبت به روش کنترلی تطبیقی ۱۰ درصد کاهش داده‌اند.

لی و چانگ [۱۰] به حل تقریبی یک معادله بر اساس تئوری تعمیم‌یافته‌ی تنش کوپل با استفاده از روش ریلی-ریتلز برای بررسی حساسیت خمشی تیرک V-شکل میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که برای سختی تماس پایین، حساسیت تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از تئوری تعمیم‌یافته تنش کوپل کمتر از تیرک مدل شده با تئوری کلاسیک تیر است. کورایم و همکارانش [۱۱] به تجزیه و تحلیل دینامیکی میکروسکوپ نیروی اتمی در حالت ضربه زدن با در نظر گرفتن فعل و انفعالات نیروی مویرگی پرداخته‌اند. کورایم و همکارانش [۱۲] به بررسی حساسیت پارامترهای منیپولیشن نانوذرات با روش آنالیز حساسیت سوبل پرداخته‌اند. آن‌ها پارامترها را در دو گروه ابعادی و محیطی مورد بررسی قرار داده‌اند و مدل اصطکاکی لاگره را برای این تحلیل استفاده کرده‌اند. در نهایت آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که ضخامت تیرک مهم‌ترین پارامتر ابعادی مؤثر در نیروی بحرانی منیپولیشن است و طول و عرض تیرک اهمیت کمتری نسبت به ضخامت تیرک دارند.

لی و همکارانش [۱۳] به تحلیل حساسیت ارتعاشات خمشی با استفاده از رابطه‌ی بین فرکانس رزونانس و سختی تیرک و نمونه، برای تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی ترک‌دار پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی سختی

منیپولیشن و جابه‌جایی میکرو/نانوذرات، امروزه جهت ساخت تجهیزات ریزمقیاس، بررسی خواص بافت‌های سلولی، تصویربرداری و شناسایی سطوح و غیره، کاربردهای فراوانی یافته است. یکی از تجهیزاتی که جهت انجام نانومنیپولیشن توسعه یافته است، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) است. استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در دو فاز بررسی می‌گردد. فاز نخست قبل از زمان شروع به حرکت میکرو/نانوذرات و به منظور استخراج نیرو و زمان بحرانی حرکت، جهت جلوگیری از آسیب به بافت‌های زیستی می‌باشد. فاز دوم نیز در حین حرکت و رسیدن میکرو/نانوذره به نقطه‌ی هدف و در راستای کنترل دقیق ذرات هدف است.

تز و یورکوویچ [۱] به بررسی یک روش تحلیل حساسیت جهت کنترل منیپولاتورها پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از استراتژی کنترلر مود لغزشی این نتیجه رسیده‌اند که یک کنترلر تطبیقی، زمانی مقاوم خواهد بود که پارامترهای آن به صورت آبی تعیین شوند، که در این صورت توانایی مقاومت در برابر همه متغیرهای مشخص تا بار ماکزیمم را دارا خواهند بود. سیتی [۲] با بررسی سیستم‌های نانومنیپولیشن به این نتیجه رسیده است که ساختارهای نانومنیپولیشن برای کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. وی بیان نموده است که جهت افزایش سرعت منیپولیشن، می‌توان از ساختارهای سه‌بعدی استفاده نمود، اما تحلیل و بررسی سیستم سه‌بعدی پیچیده‌تر خواهد شد. چانگ و همکارانش [۳] با بررسی تأثیر دمپینگ داخلی بین نوک سوزن و نمونه در حساسیت موده‌های ارتعاشی، خمشی و پیچشی برای تیرک مستطیلی میکروسکوپ نیروی اتمی به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی سختی عمودی تیرک پایین باشد، حساسیت دو مد ارتعاشی خمشی و پیچشی با احتساب تأثیر دمپینگ تقریباً از بین خواهد رفت.

وو و همکارانش [۴] به بررسی فرکانس رزونانس و حساسیت ارتعاش خمشی یک تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند و یک رابطه‌ی حلقه بسته برای حساسیت موده‌های ارتعاشی با استفاده از رابطه‌ی بین فرکانس رزونانس و سختی جانبی تیرک ارائه نموده‌اند. کورایم و ذاکری [۵] با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی فرآیند نانومنیپولیشن، تأثیر فاصله‌ی نوک سوزن روی سختی تیرک مستطیلی و تیرک V-شکل را بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین مطالعه‌ی بیشتری روی تغییرات سختی پیچشی تیرک V-شکل بر پایه‌ی معادله‌ی ND انجام داده‌اند. کورایم و امانتی [۶] نیز به تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف

آئروس را انتخاب کرده‌اند. کورایم و همکارانش [۲۳] با بررسی دو نوع متداول تیرک‌ها و محاسبه‌ی نیروی بحرانی منیپولیشن به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به کمتر بودن نیروی بحرانی لازم در تیرک خنجری، این تیرک برای جابجایی ذرات حساس زیستی مناسب‌تر است.

کورایم و همکارانش [۲۴] یک کنترل‌کننده برای کنترل میزان انحراف سوزن از موقعیت عمودی آن، معرفی کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که تغییرات در زمان لازم برای جابه‌جایی نانوذرات طلا در محیط‌های متفاوت نه تنها بر منیپولیشن نانوذرات تأثیر می‌گذارد، بلکه بر روند کنترل نیز به همان اندازه تأثیر می‌گذارد.

لی و همکارانش [۲۵] یک استراتژی جدید مبتنی بر سنجش فشار برای مسیریابی سریع نانومنیپولیشن و یک مدل جدید سینماتیک برای یافتن موقعیت نوک سوزن با ذره‌ی هدف در فرآیند نانومنیپولیشن ارائه کرده‌اند. هوشیار و همکارانش [۲۶] یک الگوریتم ژنتیک جدید برای مسیریابی نانوذرات ارائه کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از یک تابع هزینه که شامل پارامترهای نیرو و زمان بحرانی، زبری سطح و صافی مسیر است به تعیین مسیری که به کمترین تغییر موقعیت سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی برای حرکت ذره نیاز باشد، پرداخته‌اند. طاهری و میرزالی [۲۷] استخراج تجربی مدول یانگ بافت سلولی سرطانی سینه MCF-7 را با استفاده از مدل‌های تماسی کروی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار داده‌اند.

طاهری [۲۸] به بررسی کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در استخراج نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن دوبعدی برای بافت سرطانی معده با مدل‌های اصطکاکی مختلف پرداخته است. طاهری [۲۹] همچنین به بررسی تأثیر مدل‌های اصطکاکی مختلف بر استخراج تجربی نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن سه‌بعدی بافت سرطانی روده‌ی بزرگ پرداخته است. خلیلی و همکارانش [۳۰] به مطالعه‌ی منیپولیشن نانوذره DNA با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی برپایه‌ی روش المان محدود با استفاده از تئوری‌های مکانیک تماس پرداخته‌اند.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که آن‌چه که در فاز دوم فرآیند نانومنیپولیشن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مسیریابی بهینه‌ی میکرو/نانو ذرات در طول مسیر می‌باشد، لذا در این مقاله به عنوان مهم‌ترین نوآوری به مدل‌سازی/نانوذرات در فاز دوم منیپولیشن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است.

عمودی اتصال پایین باشد، حساسیت سه مد ارتعاشی از تیرک ترک‌دار بیشتر از مدل تیرک بدون ترک است و تأثیر ترک در مودهای بالاتر اهمیت بالایی دارد. کورایم و همکارانش [۱۴] به طراحی یک کنترل‌کننده مود لغزشی (SMC) به‌عنوان یک کنترل‌کننده قوی برای فشار دادن نانوذرات بر روی صفحه‌ی مینا پرداخته‌اند. کورایم و امید [۱۵] یک مدل اصلاح شده برای جابه‌جایی نانو ذرات برای فرآیند نانومنیپولیشن میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه کرده‌اند که برای محاسبه‌ی پارامترهای نانومنیپولیشن وقتی که صفحه‌ی مینا در حال حرکت است، مناسب می‌باشد.

کورایم و قادری [۱۶] به بررسی رفتار ارتعاشی میکروتیرک‌های پیزوالکتریک در محیط مایع پرداخته‌اند. آن‌ها برای این بررسی از مدل تیر غیریکنواخت و از مدل جرم متمرکز استفاده کرده‌اند. دمیرچی و کورایم [۱۷] به مدل‌سازی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از تئوری تیر تیموشنکو و حساسیت فرکانس و دامنه چهار مود پیچشی اول برای تغییرات سختی صفحه پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که مود اول برای مواد نرم حساس‌ترین مود خواهد بود و با افزایش سختی نمونه‌ها مودهای بالاتر حساس خواهند بود. کورایم و همکارانش [۱۸] مدل دینامیکی جابه‌جایی نانوذرات را با استفاده از تیرک‌های مستطیلی و V-شکل روی صفحه‌ی مینا بر پایه‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی کرده‌اند.

کورایم و همکارانش [۱۹] الگوریتمی را که می‌تواند امکان انجام فرآیند نانومنیپولیشن با توجه به محدودیت‌های هندسی تیرک و مسیر مطرح‌شده بررسی کند، ارائه کرده‌اند. کورایم و همکارانش [۲۰] به شبیه‌سازی تأثیرپذیری ذرات نرم بر پایه‌ی تئوری الاستیک-پلاستیک پرداخته‌اند و برای دو مورد ضربه بین ذره DNA با سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی و ذره DNA با صفحه‌ی مینا پرداخته‌اند. کورایم و همکارانش [۲۱] به مقایسه‌ی نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت در محیط‌های گازی، آبی، الکلی و پلاسما پرداخته‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که با تغییر نانوذره در فرآیند نانومنیپولیشن، به دلیل این که میزان چسبندگی نانوذرات مورد بررسی با صفحه‌ی مینا و سوزن باهم متفاوت هستند، زمان شروع به حرکتشان متفاوت خواهد بود.

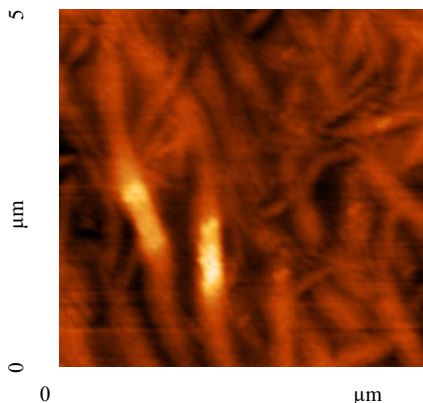
کورایم و همکارانش [۲۲] تئوری تماسی الاستیک-پلاستیک کامل چانگ را جهت شبیه‌سازی میکرو/نانو ذرات نرم توسعه و مورد استفاده قرار داده‌اند. آن‌ها پنج نوع باکتری مختلف از سه دسته گوناگون اپیدرمیس، سالی و پروس و

۲-۳- تصویربرداری از بافت سلولی

جهت تصویربرداری از بافت سلول، ارتفاع لام حاوی سلول با توجه به محدوده‌ی ارتفاع میکروسکوپ نیروی اتمی تنظیم می‌گردد. سپس تنظیمات نهایی بر روی لام و دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌شود. تصاویر ابتدایی با بزرگنمایی ۵ میکرومتر می‌گردد. با توجه به این‌که در این تصاویر محل دقیق سلول قابل مشاهده نمی‌باشد، نیاز به تصاویری با بزرگنمایی بیشتر می‌باشد. شکل (۱) نمایانگر تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی موجود در دانشگاه اراک می‌باشد. مدل میکروسکوپ نیروی اتمی مورد استفاده عبارت است از DME DualScope DS 95-50-E که دارای محدوده اسکن استاندارد ۵۰ میکرومتر در ۵۰ میکرومتر در ۵ میکرومتر است. شکل (۲-الف) تصاویر اولیه گرفته شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی از سلول به صورت دوبعدی و شکل (۲-ب) نمایانگر تصاویر اولیه گرفته شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی از سلول به صورت سه بعدی می‌باشند.



شکل ۱ میکروسکوپ نیروی اتمی



الف) تصاویر دوبعدی از بافت سلولی

برای این منظور، در این مقاله، ابتدا به انجام کار تجربی پرداخته شده و با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر یک بافت سلولی سرطانی سر و گردن استخراج شده است. سپس تصاویر بافت به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار متلب، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در انتها با استفاده از الگوریتم‌های مختلف به مدل‌سازی/نانوذرات در فاز دوم منیپولیشن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است.

۲-۲- شرح مسئله

در ابتدای مقاله به بررسی کارهای تجربی صورت گرفته در انجام این مقاله پرداخته شده است. سپس الگوریتم‌های مختلف شامل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، جهت مسیریابی بهینه، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- فرآیند تجربی

با شروع به رشد خارج از کنترل یک سلول در بدن، سلول دچار نقص شده و به آن سلول سرطانی گفته می‌شود. از عوامل ایجاد این بیماری می‌توان به عوامل وراثتی، شرایط زندگی، سن و سایر موارد اشاره نمود. رشد تومورها در ناحیه‌ی سر و گردن به معنای ابتلا به سرطان می‌باشد.

سرطان سر و گردن در محل‌هایی همچون سینوس‌ها، دهان، گلو، حنجره و غدد بزاقی رخ می‌دهد. از جمله علل بروز این بیماری مواردی همچون مصرف الکل و دخانیات، ویروس اچ‌آی‌وی، اشعه‌ی ماوراءبنفش و جنسیت می‌باشد. سلول موردتحقیق در این پژوهش سلول سرطانی سر و گردن HN می‌باشد.

۲-۲- آماده‌سازی بافت سلولی

به منظور مطالعه‌ی سلول موردنظر از سلول کشت شده در آزمایشگاه استفاده شده است. شستشوی این سلول‌ها پس از جداسازی انجام شده است. بعد از قرار گرفتن ماده‌ی تثبیت‌کننده به مدت یک دقیقه، سلول مورد نظر در طی سه مرحله با نمک شسته شده است. در نهایت سلول خشک شده و درون دستگاه قرار گرفته و جهت تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی آماده شده است.

این الگوریتم اولین بار توسط کندی و ابرهات در سال ۱۹۹۵ ارائه شد. الگوریتم ازدحام ذرات از پرواز پرندگان الهام گرفته شده است و قصد اولیه آن شبیه‌سازی رفتار اجتماعی پرندگان، پرواز زیبا و غیرقابل پیش‌بینی دسته پرندگان بوده است. در PSO موجودات ذره نامیده می‌شوند؛ که در فضای چندبعدی جستجو حرکت می‌کنند. بهینه‌سازی ازدحام ذرات بیشتر برای مسائل بهینه‌سازی با پارامترهای پیوسته به کاررفته است.

۳-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک، تکامل ژنی را مدل می‌کنند، به‌صورتی که در آن‌ها برای نشان دادن ویژگی‌های موجودات از ژنو تایپ‌ها استفاده می‌شود. عملگرهای اصلی در الگوریتم‌های ژنتیک عبارت‌اند از: انتخاب (برای مدل کردن قانون بقا اصلح) و تولیدمثل از طریق عملگرهای بازتربیک و جهش (برای مدل کردن تولیدمثل).

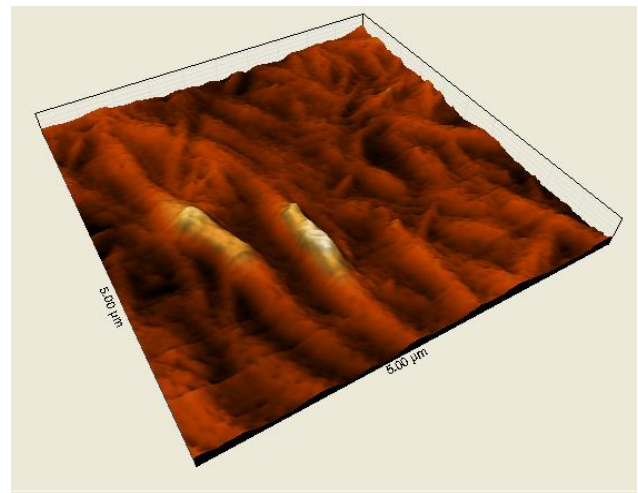
الگوریتم ژنتیک، برای حل گسترده وسیعی از مسائل دنیای واقعی به کاررفته است. مسائلی از قبیل جستجو، بهینه‌سازی پیوسته و ترکیباتی، یادگیری ماشین، مهندسی کنترل، طراحی، زمان‌بندی کارها، برنامه‌ریزی حرکت روبات، پردازش سیگنال و مسائل بازی‌های گوناگون در الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۳- الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده یک الگوریتم فرامکاشفه‌ای غیرزیستی است که مبنی بر روش تبرید تدریجی است که در آن به‌وسیله متالورژیست‌ها برای رسیدن به حالتی که در آن ماده جامد، به‌خوبی مرتب و انرژی آن کمینه شده باشد، استفاده می‌شود. این روش شامل قرار دادن ماده در دمای بالا و سپس کم کردن تدریجی این دماست. هدف در این روش، انتقال سیستم از حالت اولیه دلخواه، به حالتی است که سیستم در آن کمترین انرژی را داشته باشد.

۴- فرآیند نانومنیپولیشن

در فاز نخست نانومنیپولیشن، ابتدا نوک سوزن با سطح بافت سلولی تماس پیدا کرده، هم‌زمان میزان جابه‌جایی تیرک از طریق تابش لیزر و بازتاب آن بر فتودیود اندازه‌گیری می‌شود.



ب) تصاویر سه‌بعدی از بافت سلولی

شکل ۲ تصاویر اولیه از بافت سلول با بزرگنمایی ۵ میکرومتر

۲-۴- تفسیر تصاویر

برآیند نیروهای وارد بر بافت سلول و همچنین عمق نفوذ حاصل از نیروهای وارده در هر آن، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه‌گیری می‌گردد. نیرو و عمق نفوذ به دست آمده، در نقاط مختلف سلول با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی و ثبت می‌گردد. نمودارهای موردنیاز هم بعد از استخراج و ثبت نمودارهای نیرو برحسب عمق نفوذ در زمان‌های مختلف، در نرم‌افزار تحلیل عملیات میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار می‌گیرند. به‌منظور تحلیل دقیق نتایج به دست آمده، محدوده‌ای که سلول در آن می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. تعیین هندسه و ابعاد سلول جهت استفاده در مدل‌سازی و شبیه‌سازی و همچنین تعیین دقیق محل سلول، به‌منظور مسیریابی و انجام فاز دوم منیپولیشن نیز در این مرحله و با توجه به تصاویر گرفته‌شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، صورت می‌پذیرد.

۳- الگوریتم‌های مورد استفاده

به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی جهت مسیریابی بهینه، در این پژوهش از سه الگوریتم مختلف، شامل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید، استفاده شده است، که در این بخش از پژوهش به بررسی این الگوریتم‌ها پرداخته شده است.

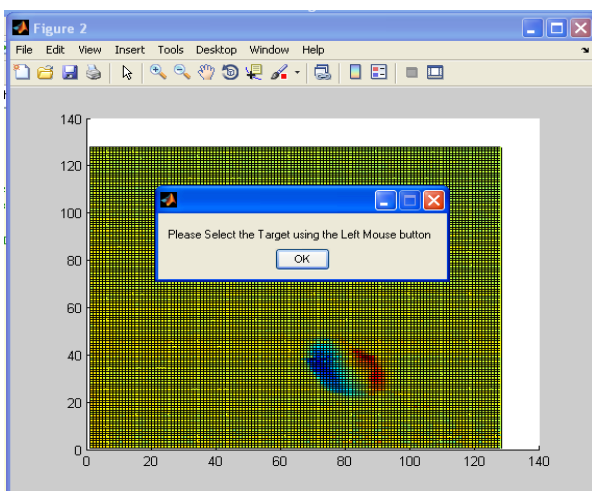
۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۵- تفسیر و تحلیل نتایج

در این بخش به نتایج حاصل از روش‌های مختلف مسیریابی و مقایسه‌ی این نتایج پرداخته شده است.

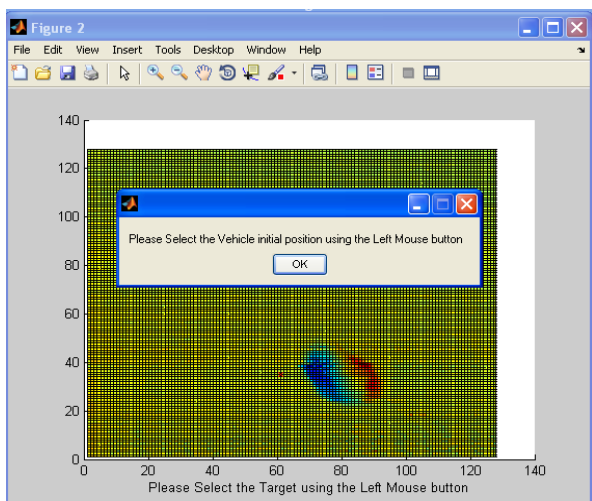
۵-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

شکل (۳) اولین گام از نتایج اجرای برنامه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. در این گام کاربر بایستی نقطه‌ی مقصد نهایی را مشخص نماید.



شکل ۳ نتایج گام اول الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

شکل (۴) گام بعدی از نتایج اجرای برنامه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. در این گام کاربر بایستی نقطه‌ی شروع به حرکت ذره‌ی هدف و مبدأ آن را مشخص نماید.



شکل ۴ نتایج گام دوم الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

نیروی اعمالی از طرف نوک سوزن بر بافت سلولی افزایش می‌یابد تا جایی که بر نیروهای چسبندگی و اصطکاکی غلبه یافته، که نیروی وارده را در این لحظه، نیروی بحرانی و زمان شروع حرکت را زمان بحرانی می‌نامند. آغاز حرکت ذره‌ی هدف، تا زمان رسیدن آن به نقطه‌ی موردنظر نهایی، فاز دوم منیپولیشن را دربر خواهد گرفت، که هدف اصلی این پروژه مسیریابی ذره‌ی هدف در این فاز از منیپولیشن است. در مدل‌سازی فاز دوم نانومنیپولیشن در معادلات (۱) و (۲) برآیندگیری در محورهای حرکت و گشتاور موردنظر انجام می‌شود.

$$\sum F_x = ma_x \rightarrow F \cos \theta - F^* = ma_x \quad (1)$$

$$\sum F_y = ma_y \rightarrow F \sin \theta + mg = N \quad (2)$$

$$\sum M_G = I\alpha \rightarrow F \cos \theta \times r + F^* \times r = I\alpha \quad (3)$$

با جایگذاری معادله‌ی (۱) در (۳) داریم:

$$\begin{aligned} F \cos \theta \times r - ma \times r + F \cos \theta \times r &= I\alpha \\ \rightarrow 2F \cos \theta \times r - ma \times r \\ &= I\alpha \xrightarrow{\alpha=r \times \alpha} \alpha(I + m \times r^2) \quad (4) \\ &= 2F \cos \theta \times r \rightarrow \alpha \\ &= \frac{2F \cos \theta \times r}{I + m \times r^2} \end{aligned}$$

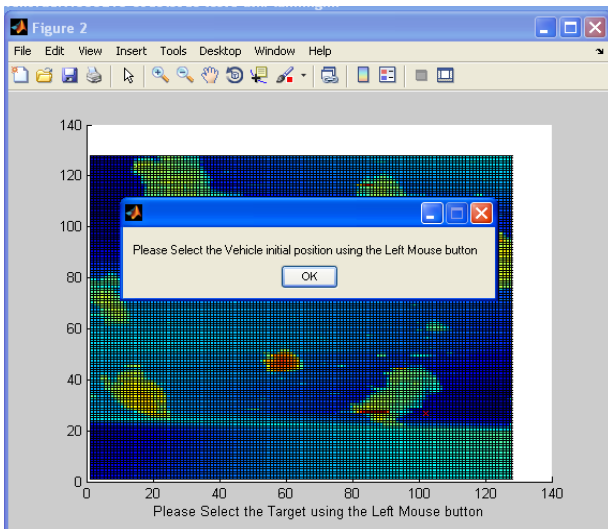
با توجه به فرض غلتش خالص داریم:

$$a = r \times \alpha \rightarrow a = \frac{2F \cos \theta \times r^2}{I + m \times r^2} \quad (5)$$

همچنین با فرض غلتش همراه با لغزش معادله‌ی شتاب در معادلات ذیل آورده شده است.

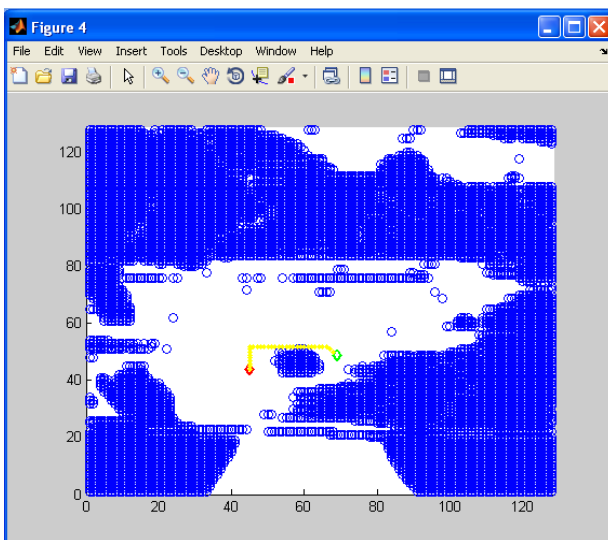
$$\begin{aligned} \sum F_x = ma_x \rightarrow F \cos \theta - F^* \\ &= F \cos \theta - \mu_k \times N = ma_x \\ \rightarrow a &= \frac{F \cos \theta - \mu_k \times N}{m} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_G = I\alpha \rightarrow F \cos \theta \times r + F^* \times r &= I\alpha \\ \rightarrow \alpha &= \frac{r \times (F \cos \theta + F^*)}{I} \quad (7) \end{aligned}$$



شکل ۷ نتایج گام دوم الگوریتم ژنتیک

در شکل (۸) مسیر بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص شده و در شکل نشان داده شده است.



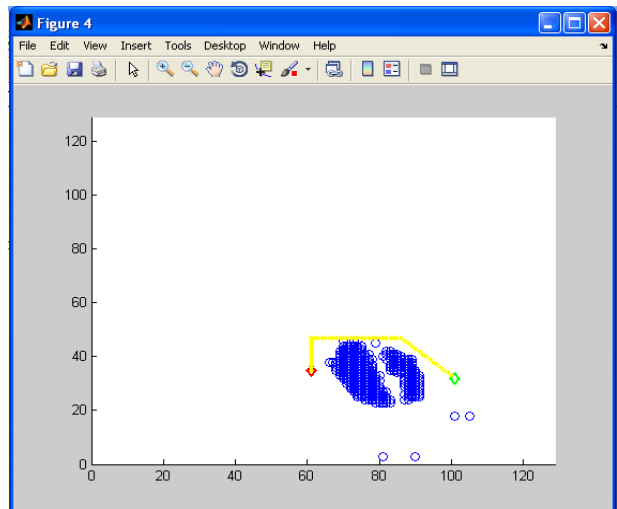
شکل ۸ نتایج نهایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۵-۳- الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده نیز مانند دو الگوریتم قبل، در گام نخست کاربر بایستی ابتدا نقطه‌ی مقصد را جهت ذره‌ی هدف مشخص نماید، که این موضوع در شکل (۹) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱۰) پس از مشخص شدن مقصد، کاربر بایستی مبدأ و نقطه‌ی شروع به حرکت ذره‌ی هدف را نیز تعیین نماید؛ تا پس از آن با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، مسیر بهینه برای حرکت ذره مشخص گردد.

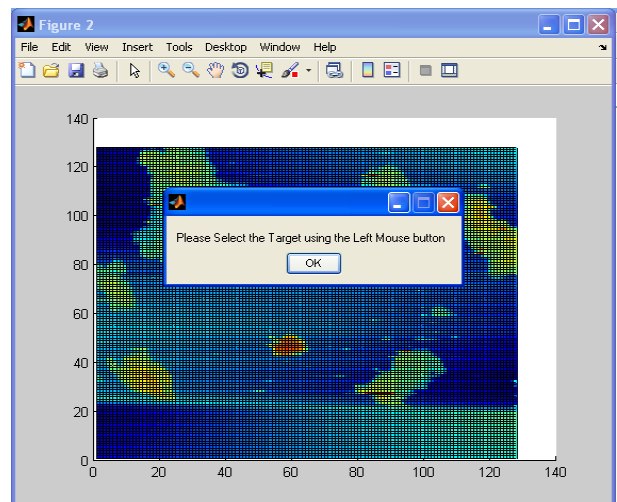
شکل (۵) نیز نتیجه‌ی نهایی و مسیر بهینه برای رسیدن ذره‌ی هدف از نقطه‌ی شروع به حرکت تا نقطه‌ی پایان حرکت را نشان می‌دهد.



شکل ۵ نتایج نهایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۵-۲- الگوریتم ژنتیک

در شکل (۶) اولین گام از نتایج اجرای برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۶ نتایج گام اول الگوریتم ژنتیک

شکل (۷) گام دوم نتایج حاصل از اجرای برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در این گام کاربر بایستی نقطه‌ی شروع به حرکت ذره‌ی هدف و مبدأ آن را مشخص نماید؛ تا پس از آن با توجه به داشتن مختصات نقاط مبدأ و مقصد، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مسیر بهینه جهت رسیدن از مبدأ به مقصد مشخص گردد.

۶- صحت‌سنجی نتایج

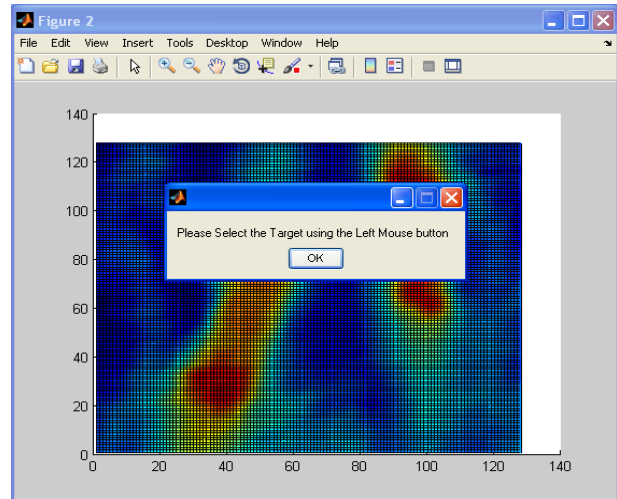
در این مقاله صحت‌سنجی در دو بخش کار با میکروسکوپ نیروی اتمی و همچنین تحلیل نتایج صورت پذیرفته است. در بخش کار با میکروسکوپ نیروی اتمی به منظور رسیدن به نتایج دقیق و صحیح، تصویربرداری چندین بار تکرار شده و آنچه که در مقاله قرار گرفته است، نتایج نهایی و بهینه بوده است. در بخش نتایج نیز جهت اعتبار‌سنجی کار از سه الگوریتم مختلف شامل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده استفاده شده و نتایج این سه الگوریتم در یافتن مسیر بهینه با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

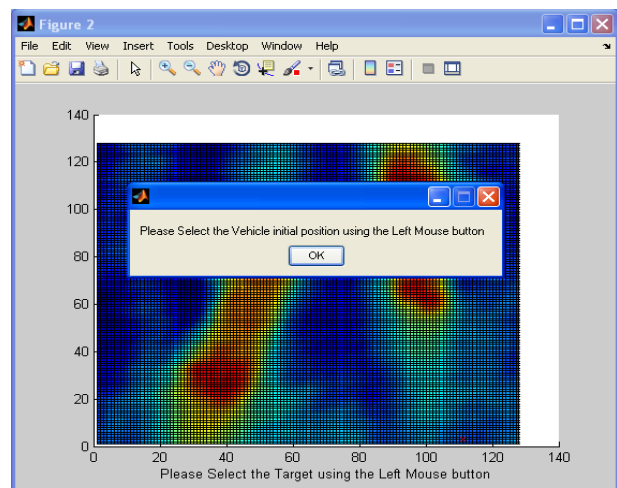
در این مقاله، به بررسی فاز دوم مینیولیشن و مسیریابی بهینه‌ی ذرات هدف، با استفاده از الگوریتم‌های مختلف پرداخته شده است. همچنین جهت استفاده کاربردی از این موضوع و به‌منظور کاربردهای آتی نتایج حاصل از این پژوهش، مسیریابی بهینه بر روی تصاویری که به‌صورت تجربی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به دست آمده است، صورت پذیرفته است. سلول موردتحقیق در این پژوهش سلول سرطانی سر و گردن HN می‌باشد. از نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان با توجه به داشتن مسیر بهینه، به‌منظور جابه‌جایی میکرو/نانو ذرات و یا انتقال ذرات هدف دارویی جهت رساندن به بافت‌های خاص از جمله بافت‌های سرطانی به‌منظور درمان بیماری استفاده نمود. همچنین با توجه به تصاویر به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، می‌توان برای شناخت مکان دقیق بافت، هندسه، شکل و ابعاد بافت و یا سایر ذرات، جهت انجام فرآیند نانومینیولیشن استفاده نمود.

در این مقاله، می‌توان پیشنهادهای زیر را به عنوان کارهای آتی مطرح نمود:

۱. استفاده از سایر الگوریتم‌های متداول جهت مسیریابی بهینه‌ی ذرات به‌منظور مینیولیشن و جابه‌جایی آن‌ها از نقطه‌ی مبدأ به نقطه‌ی مقصد.
۲. بررسی پارامترهای ورودی اثرگذار بر مینیولیشن و مسیریابی بهینه، به‌منظور شناخت پارامترهای مهم مؤثر.
۳. استفاده از تصاویر مختلف سایر بافت‌های سلولی به دست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی.
۴. استفاده از روش‌هایی همچون آنالیز حساسیت، جهت بررسی دقیق و کمی میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی بر خروجی.

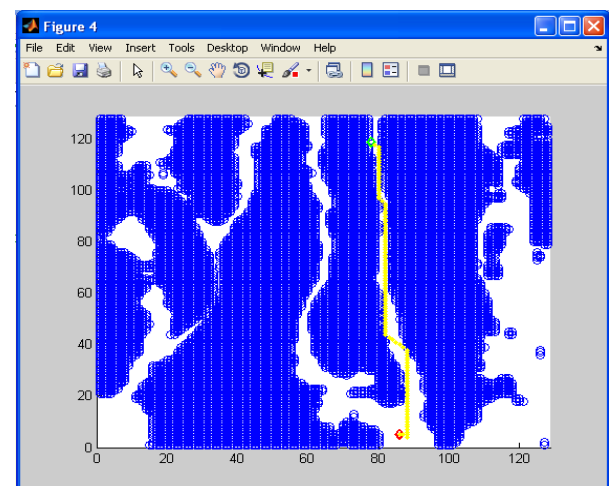


شکل ۹ نتایج گام اول الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده



شکل ۱۰ نتایج گام دوم الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

در انتها با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و مشخص نمودن مبدأ و مقصد ذره‌ی هدف، توسط کاربر، مطابق شکل (۱۱) مسیر بهینه مشخص می‌گردد.



شکل ۱۱ نتایج نهایی الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

۸- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اراک و در قالب طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۹۹/۸۳۱ مورخ ۱۳۹۹/۲/۳۰ صورت پذیرفته است.

۹- مراجع

- [9] Korayem, M. H., Zafari, S., Amanati, A., Damircheli, M., Ebrahimi, N., Analysis and control of micro-cantilever in dynamic mode AFM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 9, pp. 979-990, DOI: 10.1007/s00170-010-2588-4, (2010).
- [10] Lee, H. L., Chang, W. J., Sensitivity of V-shaped atomic force microscope cantilevers based on a modified couple stress theory, *Microelectronic Engineering*, Vol. 88, No. 11, pp. 3214-3218, DOI: 10.1007/s00170-010-2588-4, (2011).
- [11] Korayem, M. H., Kavousi, A., Ebrahimi, N., Dynamic analysis of tapping-mode AFM considering capillary force interactions, *Scientia Iranica*, Vol. 18, No. 1, pp. 121-129, DOI: 10.1016/j.scient.2011.03.014, (2011).
- [12] Korayem, M. H., Rastegar, Z., Taheri, M., Sensitivity analysis of nano-contact mechanics models in manipulation of biological cell, *Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 2, No. 3, pp. 49-56, DOI: 10.5923/j.nn.20120203.02, (2012).
- [13] Lee, H. L., Chang, W. J., Sensitivity analysis of a cracked atomic force microscope cantilever, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 3, pp. 035202:1-4, DOI: 10.1143/JJAP.51.035202, (2012).
- [14] Korayem, M. H., Noroozi, M., Daeinabi, Kh., Control of an atomic force microscopy probe during nano-manipulation via the sliding mode method. *Scientia Iranica*, Vol. 19, No. 5, pp. 1346-1353, DOI: 10.1016/j.scient.2012.06.026, (2012).
- [15] Korayem, M. H., Omid, E., Robust controlled manipulation of nanoparticles using atomic force microscope. *Micro & Nano Letters*, Vol. 7, No. 9, pp. 927-931, DOI: 10.1049/mnl.2012.0293, (2012).
- [16] Korayem, M. H., Ghaderi, R., Vibration response of an atomic force microscopy piezoelectrically actuated microcantilever in liquid environment, *Micro & Nano Letters*, Vol. 8, No. 5, pp. 229-233, DOI: 10.1049/mnl.2012.0882, (2013).
- [17] Damircheli, M., Korayem, M. H., Sensitivity of higher mode of rectangular atomic force microscope to surface stiffness in air environment, *Micro & Nano Letters*, Vol. 8, No. 12, pp. 877-881, DOI: 10.1049/mnl.2012.0882, (2013).
- [18] Korayem, M. H., Taheri, M., Rastegar, Z., Sobol method application in sensitivity analysis of LuGre friction model during 2D manipulation, *Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 1461-1469, (2014).
- [19] Korayem, A. H., Hoshiar, A. K., Korayem, M. H. Algorithm for determining the cantilever load carrying capacity in the 3D manipulation of nanoparticles with
- [1] Tzes, A., Yurkovich, S., A sensitivity analysis approach to control of manipulators with unknown load, *In Proceedings, 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 496-502, DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1088054, (1987).
- [2] Sitti, M., Survey of nanomanipulation systems, *In Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on Nanotechnology, IEEE-NANO 2001 (Cat. No. 01EX516)*, pp. 75-80, DOI: 10.1109/NANO.2001.966397, (2001).
- [3] Chang, W. J., Te, H. F., Huann, M. Ch., Effect of interactive damping on sensitivity of vibration modes of rectangular AFM cantilevers, *Physics Letters A*, Vol. 312, No. 3-4, pp. 158-165, DOI: 10.1016/S0375-9601(03)00620-0, (2003).
- [4] Wu, T. S., Chang, W. J., Hsu, J. Ch., Effect of tip length and normal and lateral contact stiffness on the flexural vibration responses of atomic force microscope cantilevers, *Microelectronic Engineering*, Vol. 71, No. 1, pp. 15-20, DOI: 10.1016/j.mee.2003.08.009, (2004).
- [5] Korayem, M. H., Zakeri, M., The effect of off-end tip distance on the nanomanipulation based on rectangular and V-shape cantilevered AFMs, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 5, pp. 579-589, DOI: 10.1007/s00170-010-2539-0, (2010).
- [6] Korayem, M. H., Amanati, A., Sensitivity analysis of load carrying capacity in AFM-based manipulation, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 2, No. 6, pp. 7692-7693, DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.05.182, (2010).
- [7] Korayem, M. H., Taheri, M., Ghahnaviyeh, S. D., Sobol method application in dimensional sensitivity analyses of different AFM cantilevers for biological particles, *Modern Physics Letters B*, Vol. 29, No. 22, pp. 1550123:1-23, DOI: 10.1142/S0217984915501237, (2015).
- [8] Zhao, W., Xu, K., Qian, X., Wang, R., Tip based nanomanipulation through successive directional push, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 132, No. 3, pp. 030909:1-9, DOI: 10.1115/1.4001676, (2010).

- [25] Li, G., Wang, W., Wang, Y., Yuan, Sh., Yang, W., Xi, N., Liu, L., Nano-manipulation based on real-time compressive tracking, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 14, No. 5, pp. 837-846, DOI: 10.1109/TNANO.2015.2449871, (2015).
- [26] Korayem, M. H., Taheri, M., Korayem, A. H., Rastegar, Z., Sensitivity analysis of coulomb and HK friction models in 2D AFM-Based Nano-Manipulation: Sobol method, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-31, (2015).
- [27] Taheri, M., Mirzalu, M., Experimental Extraction of Young's Modulus of MCF-7 Breast Cancer Cell Using Spherical Contact Models, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 12, pp. 5769-5784, DOI: 10.22060/mej.2021.19993.7149, (2022).
- [28] 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*, Vol. 9, No. 1, pp. 136-145, DOR: 20.1001.1.24235628.1401.9.1.14.0, (2022).
- [29] 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*, Vol. 54, No. 4, pp. 791-804, DOI: 10.22060/mej.2021.20300.7210, (2022).
- [30] Khalili, M., Taheri, M., Bathaee, S. H., Shakeri, F. Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics, *Mechanic of Advanced and Smart Materials*, Vol. 1, No. 2, pp. 155-174, DOI: 10.52547/masm.1.2.155, (2022).
- geometrical constraints based on FEM simulations, *Robotica*, Vol. 34, No. 9, pp. 2087-2104, DOI: 10.1017/S0263574714002756, (2016).
- [20] Korayem, M. H., Khaksar, H., Taheri, M., Simulating the impact between particles with applications in nanotechnology fields (identification of properties and manipulation), *International Nano Letters*, Vol. 4, No. 4, pp. 121-127, DOI: 10.1007/s40089-014-0127-2, (2014).
- [21] Korayem, A. H., Taheri, M., Korayem, M. H., Dynamic Modeling and simulation of nano particle motion in different environments using AFM nano-robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 294-300, DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.12.8, (2015).
- [22] Korayem, M. H., Khaksar, H., Hefzabad, R. N., Taheri, M., Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 227-234, DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.14.9, (2015).
- [23] Korayem, M. H., Ghahnaviyeh, S. D., Ghasemi, M., Taheri, M., Effect of different geometrical parameters of atomic force microscope cantilevers in critical force and time based on manipulation with applying EFAST sensitivity analyses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 310-316, DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.26.2, (2015).
- [24] Korayem, A. H., Korayem, M. H., Taheri, M., Robust controlled manipulation of nanoparticles using the AFM nanorobot probe, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 2685-2699, DOI: 10.1007/s13369-015-1730-x, (2015).