



کنترل نانوربات AFM بر مبنای روش کنترلی مود لغزشی در محیط‌های مختلف بیولوژیکی

محرم حبیب نژاد کورایم^{1*}، امین حبیب نژاد کورایم²، معین طاهری³، سعید رفیعی نکوو³

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، hkorayem@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 مرداد 1395

پذیرش: 28 شهریور 1395

ارائه در سایت: 24 آبان 1395

کلید واژگان:

کنترل مود لغزشی

نانومنیپولیشن

میکروسکوپ نیروی اتمی

محیط‌های مختلف

چکیده

امروزه جابه‌جایی میکرو/نانوذرات مورد توجه بسیار جهت ساخت ابزارهای مختلف در مقیاس میکرو/نانو و کاربرد در علوم پزشکی و زیستی است. پروب میکروسکوپ نیروی اتمی بسیار رایج برای جابه‌جایی دقیق در مقیاس ابعاد کوچک است. در حین نانومنیپولیشن، میکرو/نانوذرات می‌توانند به نقطه‌ی مطلوب نهایی با دقت بسیار بالایی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در مود تماسی با کنترل دقیق پروب آن جابه‌جا شوند. در این مقاله با انتخاب مناسب ورودی گشتاور اعمالی به رأس پروب، به کنترل انحراف از مرکز پروب و مشاهده‌ی میزان جابه‌جایی پروب از راستای قائم‌ش پرداخته شده است. تا در هنگام جابه‌جایی، میکرو/نانوذره همواره با پروب در تماس باشد. محیط‌های مایع مختلف (آب، الکل و پلاسما) با میکرو/نانوذرات مختلف اعم از زیستی و غیر زیستی جهت این مطالعه به کار گرفته شده است. علاوه بر این، با استفاده از کنترل مود لغزشی، پروب میکروسکوپ نیروی اتمی در محیط‌های آب، الکل و پلاسما استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که زمان لازم برای کنترل میکرو/نانوذرات مختلف در محیط پلاسما کمتر از محیط آب است؛ همچنین زمان مورد نیاز در محیط آب کمتر از محیط الکل می‌باشد.

Control of AFM nano-robot based on sliding mode control method in different biological environments

Moharam Habibnejad Korayem^{*}, Amin Habibnejad Korayem, Moein Taheri, Saeed Rafee Nekoo³

Department of Mechanical Engineering, Iran University and Science Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, hkorayem@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 July 2016
Accepted 18 September 2016
Available Online 14 November 2016

Keywords:

Sliding Mode Control
Nanomaniipulation
Atomic Force Microscope
Different Environments

ABSTRACT

Nowadays, movement of micro/nano particles has been attracted considerable attention to manufacturing different devices in micro/nano scale and medical and biological applications. Atomic Force Microscope Probe is widely being used for precise small scale movements. During nano-manipulation, micro/nano particles can be moved to a desired destination with high accuracy using Atomic Force Microscope while in contact mode with precise probe control. In this article, by selecting a proper amount of torque applied to the probe tip, deviation from the center and movement of probe have been investigated to ensure the contact between the probe and micro/nano particle. Different liquid environments (water, alcohol, and plasma) with different micro/nano particles including biological and non-biological have been used for this investigation. In addition, using sliding mode control, Atomic Force Microscope Probe was used in different environments such as water, alcohol, and plasma. Obtained results showed that the time needed to control different micro/nano particles in plasma was shorter than that of in water; also the time needed in water was shorter than that of in alcohol.

1- مقدمه

از پروب میکروسکوپ نیروی اتمی¹، نانوذرات با کشیدن و یا راندن روی سطح، جابه‌جا شده و به نقطه‌ی مطلوب رسانده می‌شوند [1].

در دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای مدل‌سازی دقیق نانومنیپولیشن بر پایه‌ی به‌کارگیری پروب میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان نانومنیپولاتور انجام شده است [2,3]. مدل‌سازی اولیه‌ی راندن نانوذرات و نیروهای عکس‌العملی وارد بر ذره توسط فالوو و سوپرفاین ارائه شده ولی در آن نیروهای چسبندگی سطوح در نظر گرفته نشده است [4]. سپس سیستم کنترل راندن نانوذرات توسط تفضلی و سیتی و با استفاده از تئوری تماسی

در سال‌های اخیر از نانومنیپولیشن به‌منظور مونتاژ و جابجا نمودن ساختارهایی با ابعاد میکرو/نانو استفاده شده است. دنیای نانو برای بشر غیرقابل درک است، لذا برای بهبود این درک علمی به نام نانوفتآوری پدید آمده است. نانوباتیکی که شاخه‌ای از علم نانوفتآوری است، سعی دارد تا از نظر دینامیکی و کنترلی این محیط را مورد بررسی قرار دهد. در بحث کنترل نانومنیپولیشن، حرکت با دقت بالای نانوذره و مقاومت الگوریتم کنترلی از جمله مهم‌ترین اهدافی است که مطرح می‌شود. در واقع با اعمال سیستم کنترلی بر مجموعه، سعی بر احقاقی این دو هدف می‌باشد. با استفاده

¹ Atomic Force Microscope (AFM)

2- کنترل مود لغزشی

سیستم غیرخطی به صورت معادله (1) در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x(t)) + b(x(t))u(t) \quad (1)$$

که در آن $u(t)$ ورودی کنترل n مرتبه سیستم، $x(t) = [q, \dot{q}, \dots, q^{(n-1)}]^T$ بردار حالت، $f(x(t))$ و $b(x(t))$ توابع اسکالر و غیرخطی سیستم می‌باشند. معادله (1) نمایشی از سیستم است که در حالت کلی بیان شده است. اکنون با توجه به روش کنترلی مود لغزشی، سطح لغزش به شکل روابط (3,2) تعریف می‌شود [14]:

$$s(x(t), t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{(n-1)} \tilde{q}(t) \quad (2)$$

$$\tilde{q}(t) = q(t) - q_{des}(t) \quad (3)$$

که در آن یک عدد ثابت اکیداً مثبت می‌باشد، n مرتبه سیستم، $\tilde{q}(t)$ خطای حالت و q_{des} مقدار مطلوب متغیرهای حالت می‌باشند. اکنون برای بررسی پایداری سیستم با توجه به اینکه سطح لغزش تعریف شده است، از تئوری لیاپانوف استفاده می‌شود و به این منظور تابع لیاپانوف و مشتق آن به صورت روابط (5,4) تعریف می‌گردند [14]:

$$V = \frac{1}{2} S_i^2(x(t)) \quad (4)$$

$$\dot{V} < 0 \rightarrow \dot{V} = S_i(x(t)) \dot{S}_i(x(t)) \leq -\eta |S_i(x(t))| \quad (5)$$

معادله (5) شرط لغزش نام دارد و در آن η یک ثابت اکیداً مثبت² است. هدف در کنترل مود لغزشی هدایت حالت‌ها به سمت سطح لغزش و نگه داشتن آنها روی سطح می‌باشد. همچنین بردار خطا تعریف شده در معادله (3) به صورت معادله (6) تعمیم می‌یابد:

$$\tilde{x}(t) = [\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}}, \dots, \tilde{x}^{(n-1)}]^T \quad (6)$$

در حالت کلی روابط روش کنترلی مود لغزشی برای سیستم به فرم معادله (1) نشان داده شد، اما با توجه به سیستم مورد بررسی این تحقیق که به صورت غیرخطی و دارای چند خروجی می‌باشد، ساختار کنترلی و معادله (2) به شکل برداری و مرتبه دو ادامه می‌یابد.

سیستمی به فرم معادله (7) در نظر گرفته شده است که در آن بردار $x(t)$ به صورت $x(t) = \begin{bmatrix} q_{n \times 1} \\ \dot{q}_{n \times 1} \end{bmatrix}$ می‌شود [15].

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t)) + B(x(t))u(t) \\ &= \begin{bmatrix} \dot{q}_{n \times 1} \\ f_m(x(t)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_m(x(t)) \end{bmatrix} u(t) \end{aligned} \quad (7)$$

که همان‌طور که گفته شد به دلیل چند خروجی بودن سیستم توابع f و B به فرم ماتریسی ظاهر می‌شوند. با توجه به اینکه بردار خطا در سطح لغزش تعریف شده است، مقدار مطلوب زمانی حاصل می‌شود که سطح لغزش به صفر میل کند. برای سیستم مرتبه دو سطح لغزش به فرم معادله (8) نشان داده می‌شود:

$$S(x(t)) = \dot{\tilde{x}}(t) + \lambda \tilde{x}(t) \quad (8)$$

که در این شرایط بردار خطا $\tilde{x}(t) \in R^n$ به صورت رابطه (9) نمایش داده می‌شود:

$$\tilde{x}(t) = [x - x_{des}]^T; \quad \dot{\tilde{x}}(t) = [\dot{x} - \dot{x}_{des}]^T \quad (9)$$

برای بررسی پایداری سیستم طبق معادله (5) از تئوری لیاپانوف استفاده می‌شود و به منظور برقراری شرط لغزش، مقدار ورودی کنترلی از حل معادله $\dot{S}(x(t)) = 0$ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{S}(x(t)) &= \dot{\tilde{x}}(t) + \lambda \dot{\tilde{x}}(t) = \dot{f}_m(x(t)) + \dot{B}_m(x(t))\dot{u}(t) \\ &\quad - \ddot{x}_{des}(t) + \lambda \dot{\tilde{x}}(t) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

جی کا آر¹ برای در نظر گرفتن چسبندگی سطوح ارائه شده که هدف آن کنترل جابه‌جایی ذره به صورت نیمه‌خودکار بوده است [5]. ژو و همکارانش تحلیل گشتاور نیروهای وارد بر جسم میکروکروی را جهت تسریع در منیپولیشن به کار برده‌اند [6].

رفائی و همکارانش یک مدل نانومنیپولیشن متشکل از کوپل دینامیکی خیز میکروتیرک و کشش عملگر پیزوتیوب میکروسکوپ نیروی اتمی معرفی کرده‌اند [7]. کورایم و همکارانش به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی میکروتیرک میکروسکوپ نیروی اتمی بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن با استفاده از روش‌های آماری پرداخته‌اند [8]. آن‌ها همچنین به توسعه و مدل‌سازی تئوری‌های تماسی الاستیک-پلاستیک جهت نانوباکتری‌های نرم کروی شکل به منظور کاربرد در منیپولیشن میکرو/نانوذرات زیستی مختلف بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند [9].

اباتایا و همکارانش، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و تغییراتی در ساختمان پروب آن دادند، دستگاهی را به منظور انجام جراحی‌های در ابعاد نانو بر روی سلول‌های زنده طراحی کرده و ساخته‌اند. در این دستگاه که به نوعی به منظور منیپولیشن سلولی به کار می‌رود نانوپروبی بسیار ظریف بر روی سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی قرار داده و از این سوزن بسیار ظریف و دارای قطر حدودی 200-300 نانومتر، به منظور جراحی‌های دقیق در ابعاد نانو بر روی سلول‌های زنده استفاده نموده‌اند [10].

کورایم و طاهری به بررسی نیروهای مختلف موجود در محیط‌های بیولوژیکی و توسعه‌ی مدل‌های مختلف تماسی الاستیک جهت منیپولیشن میکرو/نانوذرات مختلف پرداخته‌اند [11]. آن‌ها همچنین به بررسی آنالیز حساسیت مدل‌های اصطکاکی مختلف پرداخته و تأثیر آن بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن را مطالعه نموده‌اند [12]. در این تحقیقات چگونگی کنترل پروب میکروسکوپ نیروی اتمی جهت جابه‌جایی دقیق میکرو/نانوذرات هدف مورد توجه قرار نگرفته است. علاوه بر این در همین راستا کورایم و همکارانش به بررسی نیروی لازم جهت وقوع نانو منیپولیشن پرداختند [13]. در این تحقیق حداقل نیروی موردنیاز جهت جابه‌جایی نانو ذرات مختلف حساب شده است.

با توجه به بررسی کارهای گذشته، این موضوع نتیجه می‌شود که در تحقیقات انجام شده، بررسی نیرو و زمان بحرانی برای نانوذرات مختلف در محیط‌های زیستی و کنترل آن انجام نشده است، لذا در این مقاله به کنترل پروب با استفاده از کنترل‌کننده مود لغزشی پرداخته شده است. پارامترهایی از پروب که در این مقاله کنترل شده‌اند، انحراف پروب از راستای قائم و میزان جابه‌جایی پروب در راستای حرکت نانوذره می‌باشند. این فرایند کنترلی در محیط‌های آب، الکل و پلاسما برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت انجام شده و پیشرفتی در جهت تمام‌خودکار کردن عملیات نانومنیپولیشن کرده است.

در بخش 2، مدل کنترلی مود لغزشی توضیح داده خواهد شد و سپس در بخش 3 به مدل‌سازی روابط کنترلی برای کنترل پروب پرداخته می‌شود که در این بخش روابط دینامیکی به‌دست‌آمده به فرم معادلات کنترل مود لغزشی تبدیل می‌شود. بخش 4 به اعمال کنترل‌کننده برای پروب نانو ربات می‌پردازد. بخش 5 مباحث مربوط به محیط مایع و بخش 6 به شبیه‌سازی می‌پردازد. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش هفتم بیان خواهد گردید.

² Strictly positive constant

¹ JKR

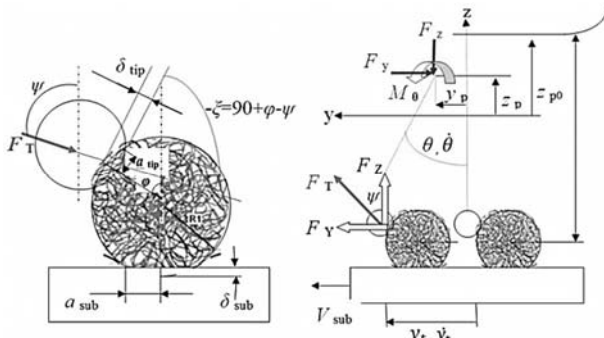


Fig. 1 The displacement and forces resulting from contact between Nan-particle and probe [16]

شکل 1 میزان جابه‌جایی و نیروهای ناشی از تماس پروب با نانو ذره [16]

گونه‌ای باشد که تحت تأثیر ورودی و خروجی قرار گیرد، یعنی متغیرهای فضای حالت بر خروجی تأثیرگذار و از ورودی تأثیرپذیر باشند. بر اساس روابط مربوط به میکروسکوپ نیروی اتمی که در [17] آورده شده است، این تأثیرپذیری قابل مشاهده می‌باشد. متغیرهای حالت به منظور کنترل عملیات نانومینیولیشن به صورت معادله (16) تعریف می‌شوند.

$$x(t) = [\theta(t), y_c(t), y_p(t), z_t(t), \dot{\theta}(t), \dot{y}_c(t), \dot{y}_p(t), \dot{z}_t(t)]^T \quad (16)$$

که در آن θ زاویه انحراف پروب و همچنین اندیس c مربوط به نقطه اتصال کنترولور و پروب و اندیس t مربوط به نقطه تماس نوک پروب به نانو ذره می‌باشد. با توجه به چیدمان متغیرهای حالت، معادله فضای حالت به فرم معادله (17) می‌باشد.

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + B(x(t))u(t) \quad (17)$$

که در آن می‌توان روابط (18, 19) را نوشت:

$$f(x(t)) = [\dot{\theta}(t), \dot{y}_c(t), \dot{y}_p(t), \dot{z}_t(t), f_5(t), f_6(t), f_7(t), f_8(t)]^T \quad (18)$$

$$B(x(t)) = [0_{1 \times 4}, g_1(t), g_2(t), 0, g_3(t)]^T \quad (19)$$

هستند و همچنین درایه‌های بردارهای $f(x(t))$ و $B(x(t))$ به شرح معادلات (20) تا (26) می‌باشند. این روابط بر اساس روابط دینامیک میکروسکوپ نیروی اتمی آورده شده در مرجع [17] می‌باشد.

$$f_5(t) = \frac{1}{I_c} (F_{tp} \cos \psi H \sin y_1 + F_{tp} \sin \psi H \cos y_1 - K_0 y_1) \quad (20)$$

$$f_6(t) = \frac{1}{\frac{M}{H}} (-F_{tp} \sin \psi - K_y y_2) + \frac{1}{2I_c} (F_{tp} \cos \psi H \sin y_1 + F_{tp} \sin \psi H \cos y_1 - K_0 y_1) \cos y_1 + \frac{H}{2} y_2^2 \sin y_1 \quad (21)$$

$$f_7(t) = \frac{1}{M_p} (F_{tp} \sin \psi - \text{sign}(y_7) F_{frict}) \quad (22)$$

$$f_8(t) = \frac{1}{m_t} (-F_{tp} \cos \psi - K_z (y_4 - H \cos y_1)) + \frac{H^2}{2I_c} \sin x_1(t) [F_{tp} \cos \psi H \sin y_1 + F_{tp} \sin \psi H \cos y_1 - K_0 y_1] - \frac{H}{2} x_5^2 \cos y_1 \quad (23)$$

$$g_1(t) = \frac{1}{I_c} \quad (24)$$

$$g_2(t) = \frac{H}{I_c} \cos x_1(t) \quad (25)$$

$$\hat{u}(t) = \hat{B}_m^{-1}(x(t))[-\hat{f}_m(x(t)) + \ddot{x}_{des}(t) - \lambda \dot{\hat{x}}(t)] \quad (11)$$

مقادیر $\hat{f}_m(x(t))$ و $\hat{B}_m(x(t))$ مقادیر تخمین زده شده از $f_m(x(t))$ و $B_m(x(t))$ می‌باشند و از آنجا که کنترل کننده مود لغزشی در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم است و همچنین از آنجایی که از مقدار دقیق مقادیر ثابت سیستم اطلاعاتی وجود ندارد، برای این مقادیر با احتساب یک محدوده تغییر به فرم معادله (12)، عدم قطعیت‌ها در سیستم اعمال می‌شوند [15]:

$$|\hat{f}_m(x(t)) - f_m(x(t))| \leq F_b(x(t)) \quad (12)$$

$$0 < B_{min,ij} \leq B_{m,ij} \leq B_{max,ij}; \hat{B}_{m,ij} = (B_{min,ij} B_{max,ij})^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

که در آن $F_b(x(t))$ و $B_{max,ij}$ حداکثر و $B_{min,ij}$ حداقل باند خطای تقریب می‌باشد. برای این که شرط لغزش (اگر عدم قطعیت در دینامیک‌های موجود در $\hat{f}_m(x(t))$ و $B_m(x(t))$ برقرار باشد و بتوان روی سطح لغزش باقی ماند، یک جمله کنترلی اصلاحی به $\hat{u}(t)$ به صورت معادله (14) اضافه می‌شود:

$$u_{corr}(t) = \hat{B}_m^{-1}(x(t))[-K \text{sign}(S(x(t)))] \quad (14)$$

که در آن K یک ماتریس ثابت اکیداً مثبت می‌باشد و در نهایت مقدار ورودی کنترلی به صورت معادله (15) تعیین می‌شود:

$$u(t) = \hat{u}(t) + u_{corr}(t) \quad (15)$$

که در آن u_{corr} سیگنال اصلاحی کنترلی می‌باشد که از تعاریفات اصلی روش مود لغزشی می‌باشد که به منظور مقابله با عدم قطعیت اضافه می‌گردد. با اعمال معادله (15) بر روی سیستم به عنوان ورودی کنترل سیستم محقق خواهد شد.

3- مدل سازی و طراحی کنترل کننده مود لغزشی جهت کنترل پروب نانوربات AFM

در این بخش با توجه به اینکه سیستم کنترلی مود لغزشی در بخش قبل توضیح داده شد، به طراحی کنترل کننده مود لغزشی جهت کنترل پروب میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است. از کارهای انجام شده مرتبط با این موضوع می‌توان به کار ارجمند و همکارانش اشاره کرد [16]. آن‌ها به کنترل میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از ایجاد پس‌خورد تأخیری با استفاده از روش مود لغزشی جهت ممانعت از ایجاد سیکل‌های حدی پرداختند. این کنترل شامل کنترل جابه‌جایی پروب و میزان انحراف پروب از راستای قائم است. برای این کنترل از کنترل گر مود لغزشی استفاده می‌گردد، چراکه این کنترل گر در برابر عدم قطعیت‌ها و در برابر نوسانات پاسخ مورد قبولی را از خود حاصل می‌کند. در این فرایند کنترل سیستم دارای معادلات دینامیکی کوپله شده است و می‌توان از معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم، برای کنترل پروب میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده کرد. در این فرایند کنترلی ورودی سیستم، گشتاور اعمال شده به انتهای تیرک است (از نیرو در جهت x به این دلیل استفاده نمی‌گردد که در فرایند نانومینیولیشن این نیرو تقریباً ثابت است) و خروجی این سیستم نیز میزان انحراف پروب از راستای قائم و میزان جابه‌جایی پروب است.

شکل 1 نمای کلی سینماتیک و دینامیک نانومینیولیشن و همچنین نحوه تغییر شکل‌ها و فرورفتگی‌ها مابین سطح، نانو ذره و پروب نشان داده شده است. همچنین در این شکل زوایای تماسی، جهت نیروها و میزان جابه‌جایی‌ها از نمای جلوای میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داده شده است. معادلات حالت بر اساس معادلات دینامیکی حرکت پروب میکروسکوپ نیروی اتمی حاصل می‌شوند، که این معادلات دینامیکی سیستم نیز با استفاده از معادلات نیوتن-اولیئر حاصل گشته‌اند [17]. انتخاب متغیرهای حالت باید به

چسبندگی و کار چسبندگی بین سطح 2 و 3 می‌باشد.

چهارمین مشخصه از تأثیر محیط بر فرایند کنترلی نانومنیپولیشن مربوط به نیروهای درگ و موئینگی وارده بر تیرک است، که این نیروها به‌صورت جابه‌جایی در معادلات ظاهر می‌شوند. به عبارت دیگر این نیروها باعث انحراف تیرک می‌شوند که این میزان جابه‌جایی وارد معادلات می‌شود. این نیروها در مرجع [16] به دست آمده‌اند.

5- شبیه‌سازی کنترل‌گر مود لغزشی باهدف کنترل زاویه و جابه‌جایی پروب

با استفاده از معادله (11) اقدام به شبیه‌سازی می‌شود. به این صورت که با توجه به الگوریتم کنترلی شکل 2 با در نظر گرفتن متغیرهای حالت سیستم و در نظر گرفتن گشتاور اعمالی به ابتدای پروب به عنوان ورودی کنترلی که با نماد u در الگوریتم نشان داده شده است، به کنترل پارامتر ذکر شده با اعمال ورودی کنترلی محاسبه شده پرداخته می‌شود. در این شبیه‌سازی از یک تابع لیپانوف استفاده شده است تا معیاری برای پایداری سیستم موردنظر باشد. همان‌طور که مشخص است، در فرایند نانومنیپولیشن پروب میکروسکوپ باید ثابت بماند تا میزان جابه‌جایی مدنظر به‌طور دقیق انجام شود، زیرا اگر برای مثال پروب از راستای قائمش منحرف شود؛ منظور از انحراف از راستای قائم پروب خم شدن و جابه‌جایی پروب نسبت به کانتیلور می‌باشد که این خم‌شدگی بر اثر خاصیت الاستیکی بودن پروب به وجود می‌آید، دیگر آن نیروی مدنظر را به نانوذره وارد نمی‌کند این موضوع را می‌توان با توجه به تأثیر زاویه تماس بر روی نیروی اعمالی به نانو ذره متوجه شد چراکه زاویه تماس به‌صورت صریح در رابطه نیرو آمده است و در نتیجه نانوذره به‌صورت صحیح جابه‌جا نمی‌شود. همچنین باید خاطرنشان کرد که این مشکل از دو طریق کنترل جابه‌جایی پروب و اعمال تمهیداتی در فرایند نانو منیپولیشن نظیر انتخاب پروب مناسب قابل‌حل می‌باشد که در این مقاله از راه اول استفاده شده است. در فرایند کنترلی صورت گرفته ضرایب کنترلی در جدول 1 آورده شده‌اند.

برای معادله (24) به مقادیر ثابت ε نیاز است. این مقادیر برای محیط‌های مختلف در جدول 2 ذکر شده است.

بعد از اعمال معادلات کنترلی که در الگوریتم برنامه نشان داده شده، با نشان دادن خروجی‌های برنامه به‌صورت نمودار، صحت معادلات مشخص می‌شوند. برای حذف پدیده وزوز در سیگنال کنترلی از تابع اشباع استفاده می‌شود که فرم کلی آن به‌صورت معادلات (31) و (32) می‌باشند:

$$U = U_{eq} + K \text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) \quad (31)$$

$$U = \frac{1}{G(y)} \left(-K \text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) - F(y) - \lambda \right) \quad (32)$$

که در آن K و ϕ پارامترهای ثابت هستند ($\phi < 0$) و ϕ لایه‌ی مرزی نازک در همسایگی صفحه‌ی S (سطح لغزش) تعریف می‌شود. همچنین $F(y)$ و $G(y)$ تعریف سیستم در فضای حالت می‌باشند که در بخش 2 توضیح داده شد. به‌وسیله تابع لیپانوف $V = 1/2 S^2$ می‌توان مطمئن شد که $S_i \dot{S}_i < 0$ است، در نتیجه:

$$\dot{V} = S \dot{S} = -\eta \text{sat}(S) S = -\eta |S| \quad (33)$$

مقدار η یک عدد مثبت در نظر گرفته می‌شود تا $\dot{V}$ همواره منفی شود. ضرایب کنترلی در نظر گرفته شده در این مقاله برای حذف پدیده وزوز در جدول 3 ذکر شده است.

$$g_3(t) = \frac{H^2}{2I_c} \sin x_1(t) \quad (26)$$

که در آن F_{tp} برآیند نیروهای وارده از طرف نوک پروب به نانو ذره می‌باشد. همچنین H طول پروب و K_θ ضریب فنریت پیچشی می‌باشد. تا به اینجا با توجه به اینکه روابط کنترلی کنترل‌کننده مود لغزشی در بخش 2 توضیح داده شده و با دانستن اینکه مقادیر $\hat{f}_m(x(t))$ و $\hat{B}_m(x(t))$ در سیستم مورد نظر به‌صورت دو ماتریس:

$$\hat{f}_m(x(t)) = [f_5(t), f_6(t), f_7(t), f_8(t)]^T$$

$$\hat{B}_m(x(t)) = [g_1(t), g_2(t), 0, g_3(t)]^T$$

در نظر گرفته می‌شوند، می‌توان روابط کنترلی را به فرمی که در بخش 2 آورده شده است، پیاده‌سازی کرد.

4- طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی جهت کنترل پروب نانوروبات AFM در محیط مایع

در این بخش با استفاده از معادلات کنترلی فرایند نانومنیپولیشن در محیط هوا، به توسعه فرایند کنترل نانومنیپولیشن پرداخته و این فرایند، برای محیط‌های زیستی انجام می‌گردد. تأثیر خواص محیط بر فرایند نانومنیپولیشن در چهار پارامتر اساسی خلاصه می‌شود که عبارت‌اند از نیروی واندروالسی وارده بر انتهای تیرک، نیروی درگ و نیروی موئینگی وارده بر تیرک، تأثیر در نیروی چسبندگی و اثرگذاری در تئوری‌های تماسی بین نانوذره/ تیرک، نانوذره/ سطح زیرین.

همانند بخش قبل برای کنترل فرایند نانومنیپولیشن از کنترل‌گر مود لغزشی استفاده می‌شود و درواقع معادلات کنترلی تغییر جزئی می‌کند که این تغییرات به شرح زیر است:

اولین اثر در نیروی اعمالی به نوک پروب که بر اساس نیروی واندروالسی است به وقوع می‌پیوندد؛ چراکه نیروی واندروالسی به محیط اطرافش وابسته است. نیروی اعمالی به انتهای پروب به صورت رابطه (27) است [18]:

$$F_{tp}(h(t)) = \begin{cases} -\frac{H^2}{6h(t)^2} & a_0 < h(t) \leq 100\text{nm} \\ -\frac{H_{tp} \bar{R}}{6a_0^2} + \frac{4}{3} K \sqrt{\bar{R}} (a_0 - h(t))^{\frac{3}{2}} & h(t) < a_0 \end{cases} \quad (27)$$

که تأثیر محیط بر پارامتر H_{tp} است و به فرم معادله (28) درمی‌آید [18]:

$$H_{tp} = \frac{3}{4} k t \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \right) \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} \right) + \frac{3hVe(n_1^2 - n_3^2)(n_2^2 - n_3^2)}{8\sqrt{2}\sqrt{(n_1^2 + n_3^2)(n_2^2 + n_3^2)}[\sqrt{n_1^2 + n_3^2} + \sqrt{n_2^2 + n_3^2}]} \quad (28)$$

که در آن ε ثابت دی‌الکتریک، n شاخص انکسار محیط، Ve فرکانس اصلی جذب الکترونی در ناحیه‌ی فرابنفش می‌باشد. در معادله (28) از جمله‌ی دوم این معادله به دلیل تأثیر کم آن در مقدار H_{tp} از آن جمله صرف‌نظر شده است.

دومین حالت از تأثیر محیط بر فرایند کنترلی نانومنیپولیشن در بحث تئوری تماسی است. سومین حالت از تأثیر محیط بر فرایند کنترلی نانومنیپولیشن در قسمت نیروهای چسبندگی است که معادلات آن به‌صورت معادلات (29) و (30) می‌باشند:

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\sqrt{\gamma_1 \gamma_2} \quad (29)$$

$$\gamma_{123} = \omega_{12} + \omega_{33} - \omega_{13} + \omega_{23} = \gamma_{13} + \gamma_{23} + \gamma_{12} \quad (30)$$

که در آن γ_1 نیروی چسبندگی سطح 1 می‌باشد. همچنین γ_{12} و ω_{12} به ترتیب چسبندگی و کار چسبندگی بین سطح 1 و 2 و γ_{23} و ω_{23} به ترتیب

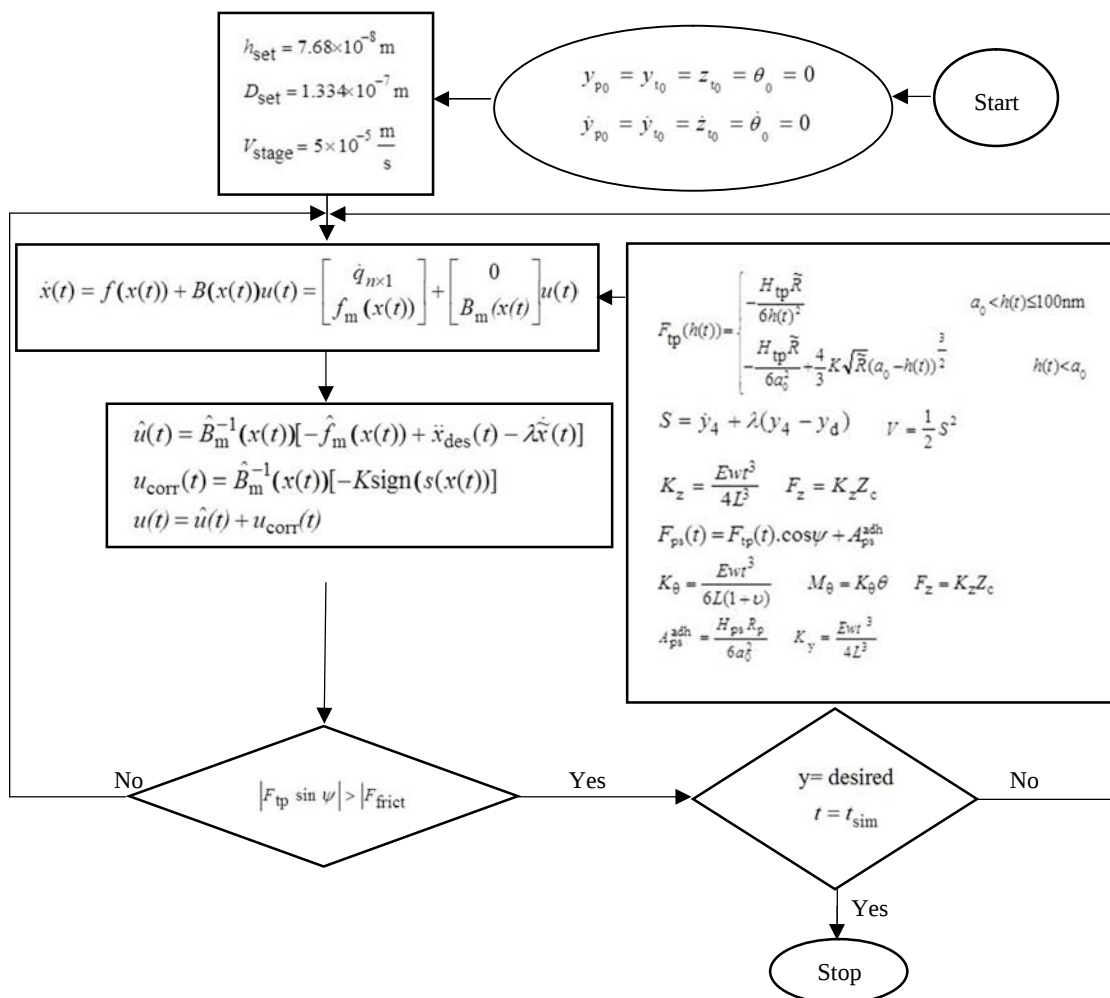


Fig. 2 Control algorithm into the air environment

شکل 2 الگوریتم کنترلی در محیط هوا

همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده، متغیرهای حالت سیستم در کمتر از 0.1 ثانیه به مقدار مطلوب از پیش تعیین شده رسیده و با توجه به استفاده از توابع جدید از پدیده‌ی وزوز هم جلوگیری شده است. در ادامه‌ی این بحث، با تغییر نانوذره از طلا به نانوذرات مخمر و پلاکت فرایند کنترلی برای این نانوذرات در محیط هوا بررسی می‌گردد.

با توجه به شکل 4 می‌توان این نتیجه را گرفت که متغیرهای حالت سیستم به‌خوبی به مقدار مطلوب از پیش تعیین شده (0.003 رادیان) رسیدند. آخرین نانو ذراتی که در این بخش موردبررسی قرارگرفته‌اند، نانوذرات پلاکت می‌باشند که نتایج این شبیه‌سازی در شکل 5 آمده است.

با مقایسه‌ی بین شکل‌های 3 الی 5 می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات زمان مورد نیاز جهت رسیدن به مقدار مطلوب زاویه و جابه‌جایی پروب، با میزان تغییر چسبندگی بین نانوذره و سطح مینا رابطه‌ی مستقیم دارد. در واقع هرچه چسبندگی نانوذره به سطح زیرین کمتر باشد، زمان بیشتری لازم است تا پروب میکروسکوپ نیروی اتمی به مقدار مطلوبش برسد این نتیجه با استفاده از اعداد درج شده در روی نمودار قابل استنباط بوده است، زیرا هرچه چسبندگی کمتر باشد، هرچند که روند تغییرات زاویه پروب کمتر می‌شود، اما ثابت نگه داشتن زاویه‌ی پروب کار مشکلی می‌شود که این امر مستلزم زمان بیشتر برای کنترل زاویه‌ی پروب می‌باشد.

جدول 1 مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده

Table 1 control coefficients

پارامتر	λ_1	λ_2	λ_3	ϕ
مقدار عددی پارامتر	10^6	10^{-1}	9^6	10^{-5}

جدول 2 مشخصات ثابت محیط‌های مختلف [19]

Table 2 Constants Specifications of different environments [19]

سیال	چگالی (kgm^{-3})	ویسکوزیته (mPas)	انرژی سطحی (Nm^{-1})	مؤلفه قطبی انرژی سطحی	مؤلفه غیرقطبی انرژی سطحی	ثابت دی‌الکتریک
آب	1000	1	0.0728	0.051	0.0218	80.1
متانول	786.6	0.544	0.0225	0.043	0.0182	32.7
اتانول	785	1.084	0.0224	0.026	0.0188	24.5
پلاسما	1025	1.5-1.6	0.0505	0.039	0.011	76.1

جدول 3 مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده با تابع اشباع

Table 3 Control coefficients for saturation function

پارامتر	λ	ϕ	K
مقدار عددی پارامتر	10^5	10^{-5}	5^{-6}

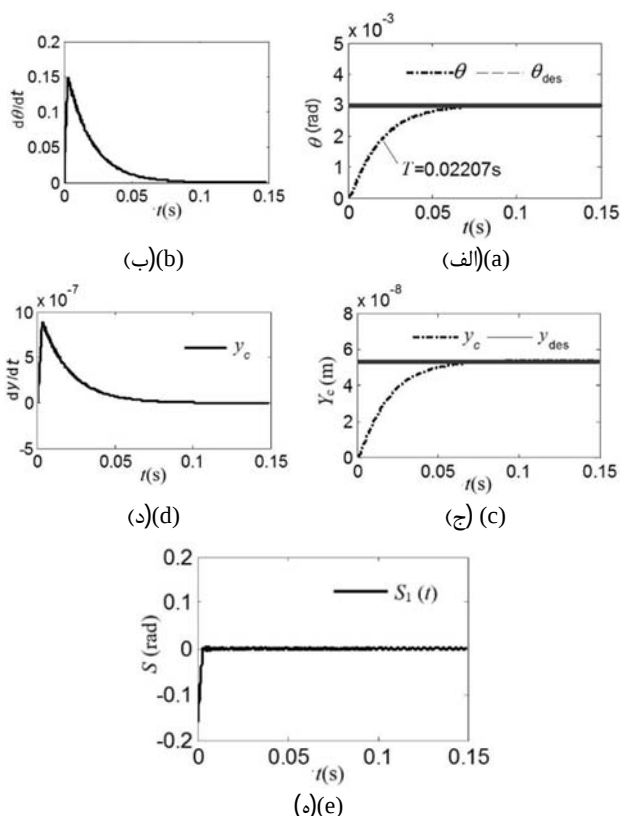


Fig. 5 Controlling of probe from its center while trying to move platelet nanoparticles in air (a) probe angle, (b) derivative of the probe angle, (c) probe displacement, (d) derivative of the probe displacement, (e) sliding surface

شکل 5 کنترل پروب در مواجه با نانوذرات پلاکت در محیط هوا (الف) زاویه پروب (ب) مشتق زاویه پروب (ج) جابه‌جایی پروب (د) مشتق جابه‌جایی پروب (ه) سطح لغزش

صحت شد، به بررسی کنترل نانوذرات ذکر شده در سه محیط آب، الکل و پلاسما پرداخته می‌شود. فرایند کنترلی در این بخش، الگوریتمی مانند الگوریتم کنترلی محیط هوا دارد، با این تفاوت که تغییراتی در الگوریتم اعمال شده است. تفاوتی که در تغییر محیط ایجاد می‌شود، این است که در قسمت سینماتیک پروب، جابه‌جایی ناشی از نیروی درگ و نیروی کشش سطحی نیز وارد شده و همچنین در بحث تئوری تماسی نیز دچار تغییر شده و نیروهای درگ و کشش سطحی وارد شده و در نهایت آخرین تغییر اعمالی در مقدار چسبندگی بین نانوذره و سطح زیرین می‌باشد که با اعمال این تغییرات در محیط هوا می‌توان فرایند کنترلی را برای پروب میکروسکوپ نیروی اتمی در محیط‌های زیستی مختلف پیاده‌سازی کرد.

فرایند کنترلی برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت در محیط آب انجام شده است که در شکل 6 نشان داده شده است. از شکل 6 می‌توان نتیجه گرفت که برای نانوذرات مختلف با توجه به مقدار چسبندگی‌شان به سطح و با توجه به خواص محیطی‌شان در زمان کنترل شدن تغییر ایجاد می‌شود، زیرا میزان نیروی اعمالی به پروب تغییر کرده و این تغییر سبب این می‌شود، که در زمان رسیدن به مقدار موردنظر برای انحراف از مرکز و میزان جابه‌جایی پروب وقفه بیفتد. در ادامه این فرایند کنترلی را برای محیط الکل و بعد از آن برای محیط پلاسما انجام می‌گردد.

با بررسی شکل 7 نتیجه می‌شود که با تغییر محیط از محیط آب به الکل تغییرات در عملیات کنترلی جزئی بوده اما تغییراتی که صورت گرفته است، با نتایجی که با مقایسه شکل‌های 6 تا 8 حاصل می‌شود مطابقت دارد. به این

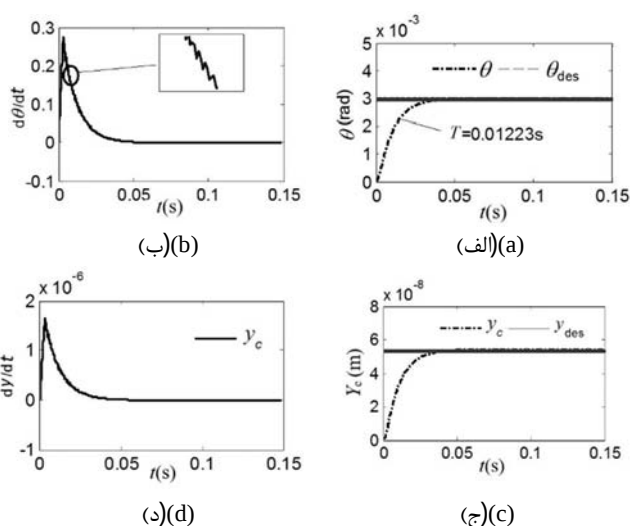


Fig. 4 Controlling of probe from its center while trying to move yeast nanoparticles in air (a) probe angle, (b) derivative of the probe angle, (c) probe displacement, (d) derivative of the probe displacement, (e) sliding surface

شکل 4 کنترل پروب در مواجه با نانوذرات طلا با اعمال توابع اشباع (الف) زاویه پروب (ب) مشتق زاویه پروب (ج) جابه‌جایی پروب (د) مشتق جابه‌جایی پروب (ه) سطح لغزش

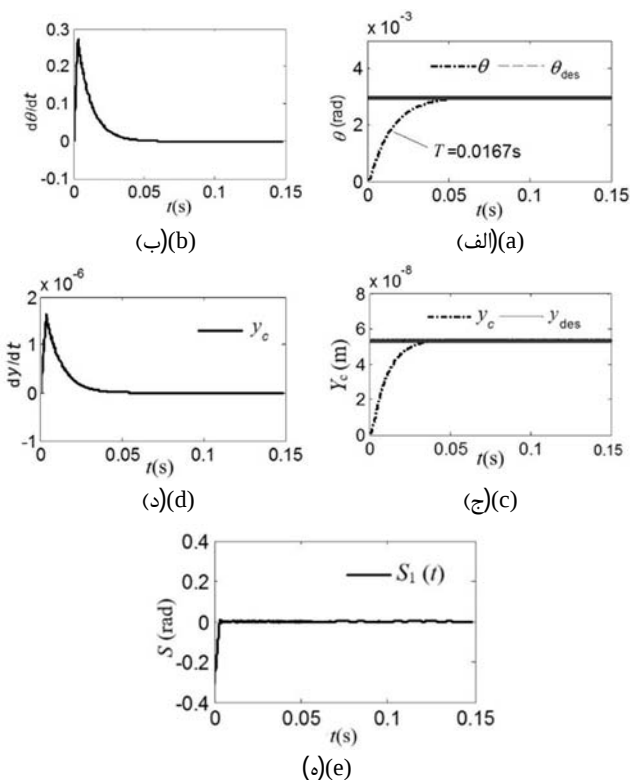
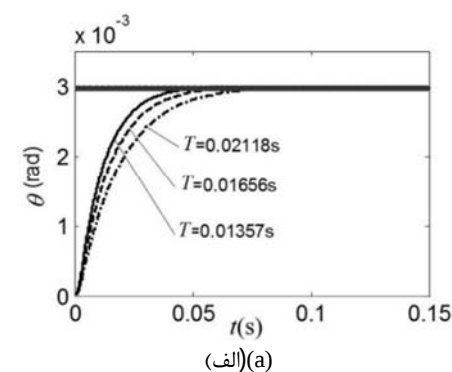


Fig. 4 Controlling of probe from its center while trying to move yeast nanoparticles in air (a) probe angle, (b) derivative of the probe angle, (c) probe displacement, (d) derivative of the probe displacement, (e) sliding surface

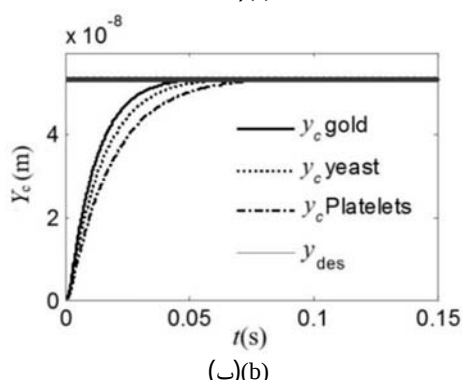
شکل 4 کنترل پروب در مواجه با نانوذرات مخمر در محیط هوا، (الف) زاویه پروب (ب) مشتق زاویه پروب (ج) جابه‌جایی پروب (د) مشتق جابه‌جایی پروب (ه) سطح لغزش

6- شبیه‌سازی کنترل گر مود لغزشی برای کنترل زاویه و جابه‌جایی پروب در محیط‌های زیستی

در این بخش با توجه به تغییرات اعمالی که در بخش مدل‌سازی راجع به آن



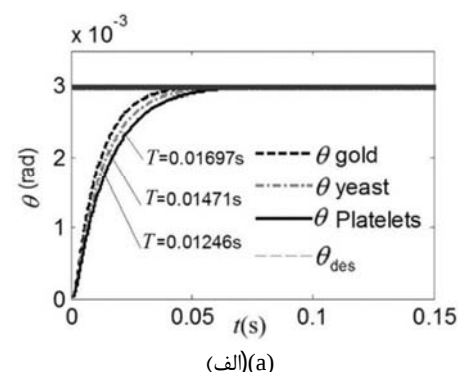
(الف)



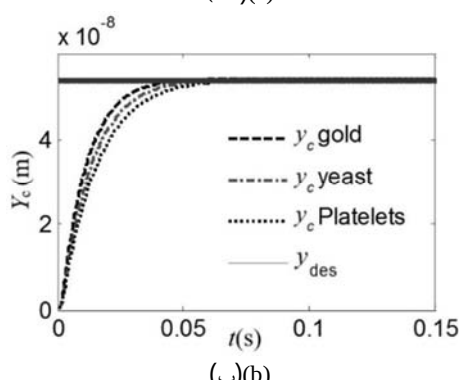
(ب)

Fig. 7 Controlling probe from its center while trying to move gold, yeast and platelet nanoparticles in alcohol (a) probe angle control, (b) probe displacement control

شکل 7 کنترل پروب برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت در محیط الکل (الف) کنترل زاویه پروب (ب) کنترل جابه‌جایی پروب



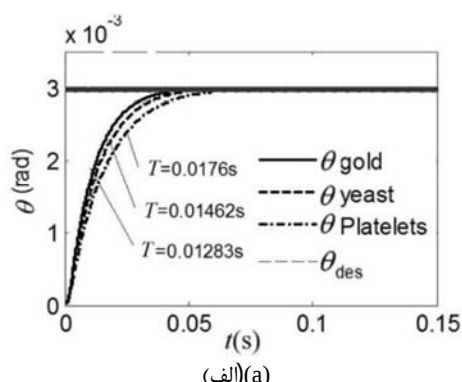
(الف)



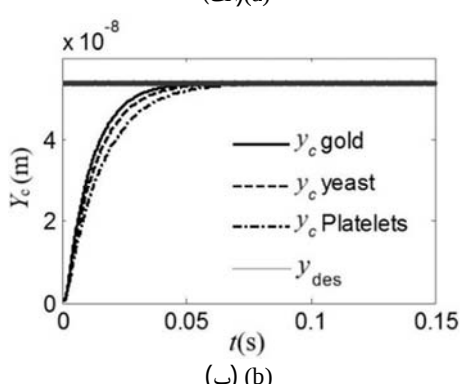
(ب)

Fig. 6 Controlling of probe from its center while trying to move gold, yeast and platelet nanoparticles in water (a) probe angle control, (b) probe displacement control

شکل 6 کنترل کنترل پروب برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت در محیط آبی (الف) کنترل زاویه پروب (ب) کنترل جابه‌جایی پروب



(الف)



(ب)

Fig. 8 Controlling of probe from its center while trying to move gold, yeast and platelet nanoparticles in plasma (a) probe angle control, (b) probe displacement control

شکل 8 کنترل پروب برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت در محیط پلاسما (الف) کنترل زاویه پروب (ب) کنترل جابه‌جایی پروب

صورت که پس از مقایسه‌ی سه شکل مذکور این نتیجه حاصل می‌شود که زمان مورد نیاز برای حرکت هر سه نانوذره افزایش یافته است. این مهم را در شکل 7 نیز می‌توان یافت به این صورت که منحنی‌های مربوط به هر نانوذره کمی کشیده‌تر شده‌اند. این گواه از این امر دارد که نتایج حاصله در این قسمت با نتایج حاصل در قسمت دینامیکی منیپولیشن مطابقت دارد.

همان‌طور که در شکل 8 مشخص است برای نانوذرات طلا، مخمر و پلاکت در محیط پلاسما در زمان رسیدن به انحراف از مرکز پروب به میزان 0.002 رادیان اختلاف وجود دارد. این اختلاف نشان می‌دهد که نانوذرات طلا 0.00173 ثانیه زودتر از نانوذرات مخمر و نانوذرات مخمر 0.00298 ثانیه زودتر از نانوذرات پلاکت کنترل می‌شوند. این میزان اختلاف به دلیل ماهیت نانوذرات است که در میزان اصطکاک و میزان چسبندگی با یکدیگر متفاوت‌اند و از آنجاکه این پارامترها یعنی میزان چسبندگی و نیروی اصطکاک در معادلات منیپولیشن وارد می‌شوند، لذا این اختلافات قابل توجه است. با توجه به شکل‌های 6 الی 8 این نتیجه حاصل می‌شود که چسبندگی نانوذرات طلا و پلاکت در محیط الکل بیشتر از محیط پلاسما و چسبندگی در محیط پلاسما نیز بیشتر از چسبندگی در محیط آب می‌باشد. اما برای نانوذرات مخمر چسبندگی در محیط هوا بیشتر از چسبندگی در محیط پلاسما است.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور دست‌یابی به هدف اصلی در بحث کنترلی یعنی کمک به خودکار نمودن و اجرای دقیق فرآیند نانومنیپولیشن یک نانوذره، در مقیاس نانو، اقدام به طراحی کنترلی برای کنترل میزان انحراف پروب از راستای قائم‌گرددید، تا با استفاده از آن از رد شدن نانوذره از زیر پروب در

K_z	سختی عمودی تیرک
K_ϕ	سختی پیچشی تیرک
L	طول تیرک
L_1	طول قسمتی از تیرک که در مایع فرورفته
M	جرم تیرک
M_t	جرم تیپ انتهایی پروب
M_p	جرم نانو ذره
M_0	گشتاور پیچشی تیرک
m	جرم پروب
n	تعداد تغییرهای فضای حالت/ شاخص انکسار محیط
R_p	شعاع نانو ذره
S	سطح لغزش
T	گشتاور پیچشی
t	ضخامت تیرک
Ve	فرکانس اصلی جذب الکترونی در ناحیه‌ی فرابنفش
V_{sub}	سرعت پایه سطح
W	پهنای تیرک مستطیلی
y_c	موقعیت انتهایی پروب
y_d	مقدار مدنظر مطلوب
y_p	مختصات نقطه انتهایی (در تماس با ذره) پروب در محور y
y_{sub}	موقعیت سطح مبنا در راستای محور y
y_{st}	میزان جابه‌جایی سطح مبنا در راستای y
y_t	مختصات نقطه ابتدایی (متصل به تیرک) پروب در محور y

9- مراجع

- [1] A. H. Korayem, M. H. Korayem, M. Taheri, Robust controlled manipulation of nanoparticles using the AFM nanorobot probe, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 2685-2699, 2015.
- [2] R. Resch, A. Bugacov, C. Baur, B. Koel, A., MAdhukarand P. Will, Manipulation of Nanoparticles Using Dynamic Force Microscopy: Simulation and Experiments, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 67, No. 3, pp. 265-271, 1998.
- [3] R. Resch, C. Baur, A. Bugacov, B. E. Koel, A. Madhukar, A. A. G. Requicha, P. Will, Building and Manipulating Three-Dimensional and Linked Two-Dimensional Structures of Nanoparticles Using Scanning Force Microscopy, *Langmuir* Vol. 14, No. 23, pp. 6613-6616, 1998.
- [4] M. R. Falvo, R. Superfine, Mechanics and Friction at the Nanometer Scale, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 237-248, 2000.
- [5] A. Tafazzoli, M. Sitti, Dynamic Behavior and Simulation of Nanoparticles Sliding During Nanoprobe-Based Positioning, *Proc. of IMECE'04 2004 American Society of Mechanical Engineers International Mechanical Engineering Congress*, pp. 965-972, 2004.
- [6] Q. Zhou, P. Kallio, F. Aria, T. Fukudaand H. N. Koivoc, A Model for Operating Spherical Micro Objects, *Proceeding of International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, Nagoya, Japan, pp. 79-85, 1999.
- [7] K. E. Rifai, O. E. Rifaiand K. Youcef-Toumi, Modeling and Control of AFM Based Nano-Manipulation Systems, *Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain*, pp. 157-162, 2005.
- [8] M. H. Korayem, S. D. Ghahnaviyeh, M. ghasemi, M. taheri, Effect of different geometrical parameters of atomic force microscope cantilevers in critical force and time based on manipulation with

هنگام عملیات نانومنیپولیشن جلوگیری شود. همچنین در طول انجام عملیات کنترلی به مشاهده‌ی میزان انحراف تیرک در جهت y پرداخته شد تا با استفاده از این مشاهده مقدار خیز تیرک، در راستای موازی با جهت حرکت نانو ذره نیز به دست آید. مناسب بودن تیرک جهت این عملیات نیز بررسی شد، چراکه اگر میزان خیزش تیرک بیش از حد باشد، نانو ذره از زیر آن در حین انجام عملیات نانومنیپولیشن عبور می‌کند و این امر باعث می‌شود تا دیگر نانو ذره به نقطه‌ی از قبل تعیین شده نرسد.

مقایسه‌ی کمی نتایج نشان می‌دهد که در بحث نیز زمان لازم برای کنترل نانو ذرات طلا در محیط‌های آب، الکل و پلاسما در زاویه‌ی 0.002 رادیان به ترتیب برابر است با 0.01248، 0.01357 و 0.01283. که این روند تغییرات با درصد تغییرات زمان شروع به حرکت برای نانو ذرات طلا مطابقت دارد. این امر نشان می‌دهد که همان‌طور که تعویض محیط در عملیات منیپولیشن نانو ذرات تأثیر می‌گذارد، در فرایند کنترلی نیز تأثیر می‌گذارد، که این میزان تأثیر در هر دو مورد یکسان بوده است و دلیل این میزان تغییرات، تغییر در مقدار کار نیروی چسبندگی است که کار نیروی چسبندگی برای نانو ذرات طلا در محیط‌های آب، الکل و پلاسما به ترتیب برابر 0.0953، 0.2309 و 0.1396 نیوتن در متر می‌باشد. برای نانو ذرات دیگر نیز به همین صورت می‌توان نتیجه گرفت. به‌عنوان مثال برای نانو ذرات مخمر زمان مورد نیاز در فرایند کنترلی برای رسیدن به 0.002 رادیان زاویه پروب در محیط‌های آب، الکل و پلاسما به ترتیب برابر 0.01471، 0.01658 و 0.01462 می‌باشد و نتیجه می‌شود که روند تغییرات و درصد تغییرات برای نانو ذرات مختلف برای شروع به حرکت با میزان تغییر زمان کنترلی در پی تغییر محیط یکسان است. دلیل این میزان تغییرات، تغییر در مقدار کار نیروی چسبندگی است که کار نیروی چسبندگی برای نانو ذرات مخمر در محیط‌های آب، الکل و پلاسما به ترتیب برابر 0.0248، 0.0572 و 0.0069 نیوتن در متر می‌باشد که توجیه مناسبی برای میزان تغییرات در دو بخش نیرو و زمان بحرانی و همچنین تأخیر در زمان کنترل می‌باشد.

8- فهرست علائم

A_{ps}^{adh}	نیروی چسبندگی نانو ذره - سطح
A_s	سطح تماس نانو ذره و صفحه مبنا
a	شعاع تماسی کروی
b	محیط سطح مقطع تیرک
E	مدول یانگ تیرک
E_s	مدول یانگ نمونه
F_y	نیروی اعمالی به نوک پروب در راستای y
F_y	نیروی اعمالی به نقطه انتهایی پروب در راستای y
F_z	نیروی اعمالی به نقطه انتهایی پروب در راستای z
F_z	نیروی اعمالی به نوک پروب در راستای z
F_1	نیروی وارد بر نانو ذره در راستای عمود بر حرکت
f_{as}	نیروی اصطکاک نانو ذره و صفحه مبنا
f_s	نیروی لغزش
G	مدول برشی تیرک
H	ارتفاع سوزن
I_c	ممان اینرسی تیرک حول نقطه ابتدایی
I_p	ممان اینرسی پروب حول نقطه ابتدایی
K_y	سختی طولی تیرک

- Englewood Cliffs, NJ: prentice-Hall, 1991.
- [15] M. H. Korayem, A. Khademi, S. R. Nekoo. A comparative study on SMC, OSMC and SDRE for robot control. *In Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotic, Oct 15, pp. 013-018, 2014.
- [16] M. T. Arjmand, H. Sadeghian, H. Salarieh, A. Alasty. Chaos control in AFM systems using nonlinear delayed feedback via sliding mode control, *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Vol. 2, No. 3, 993-1001, 2008.
- [17] A. H. Korayem, M. Taheri, M. H. Korayem, 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, 2015. (in Persian فارسی)
- [18] H. Babahosseini, S. H. Mahboobi, A. Meghdari, “Dynamics modeling of nanoparticle in AFM-based manipulation using two nanoscale friction models”, *American Society of Mechanical Engineers, International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Jan 1 .pp. 1-10, 2009.
- [19] A. Tafazzoli, M. Sitti, Dynamic behavior and simulation of nanoparticle sliding during nanoprobe-based positioning, *American Society of Mechanical Engineers, Mechanical Engineering Congress*, Jan 1, pp. 965-972, 2004.
- applying EFAST sensitivity analyses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 310-316, 2015. (in Persian فارسی)
- [9] M. H. Korayem, H. Khaksar, R. N. Hefz Abad, M. Taheri, Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 227-234, 2014. (in Persian فارسی)
- [10] I. Obataya, C. Nakamura, S. Han, N. Nakamura, J. Miyake, Nanoscale Operation of a Living Cell Using an Atomic Force Microscope with a Nanoneedle, *Journal of Nano Letter*, Vol. 5, No. 1, pp. 27–30, 2005.
- [11] M. H. Korayem, M. Taheri. Modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFM *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-18, 2014.
- [12] M. H. Korayem, M. Taheri, M. Zakeri. Sensitivity analysis of nanoparticles manipulation based on different friction models, *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 18, pp. 6713-6722, 2012.
- [13] A. H. Korayem, M. H. Korayem, M. taheri, 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, 2015. (in Persian فارسی)
- [14] J. E. Slotine, L. Weiping, *Applied nonlinear control*, pp. 298-348,