



فاز دوم جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا مبتنی بر AFM در محیط‌های مختلف مایع

معین طاهری

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

چکیده

کاربرد فلز طلا در فضاوردی، الکترونیک و در علوم پزشکی، سبب مورد توجه قرار گرفتن آن شده است؛ لذا بررسی‌های ساختاری و انجام تغییرات برای بهبود خواص و یا برقراری چیدمان‌های خاص اتمی در علوم نانو برای این فلز خاص صورت گرفته است. میکروسکوپ نیروی اتمی، از جمله ابزارهای پرکاربرد با اهداف ذکر شده است؛ لذا در این مقاله جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا در حین منیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی که از اهداف فاز دوم است، در شرایط محیطی آب، پلاسما و متانول، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا فرآیند به صورت دوبعدی مدل‌سازی شده و نیروهای بین مولکولی وان‌دروالس، نیروی الکترواستاتیک دولایه و آب‌پوشی در آن در نظر گرفته شده‌اند. سپس، نمودارهای جابه‌جایی با در نظر گرفتن نیروهای بین مولکولی و محیط‌های مورد مطالعه ترسیم شده‌اند. در نهایت نیز طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط‌های مختلف بیشترین جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا در فاز دوم منیپولیشن، در محیط آب و کمترین مقدار در محیط پلاسما بوده است.

کلمات کلیدی: جابه‌جایی؛ نانوذره‌ی طلا؛ میکروسکوپ نیروی اتمی؛ نیروهای بین مولکولی؛ محیط‌های مختلف مایع.

The Second Phase of Gold Nanoparticle Manipulation based on AFM in Different Liquid Environments

M. Taheri

Assoc. Prof., Mech. Eng., Arak Univ., Arak, Iran

Abstract

The use of gold metal in astronautics, electronics and medical sciences has led to its consideration. Therefore, structural studies and changes have been made to improve the properties or establish special atomic arrangements in nanoscience for this particular metal. Atomic force microscopy (AFM) is one of the most widely used tools for these purposes. Therefore, in this paper, the displacement of gold nanoparticles during manipulation using the atomic force microscopy, which is one of the objectives of the second phase, in the environmental conditions of water, plasma and methanol, has been investigated. For this purpose, the process is first modeled in two dimensions and the intermolecular forces of van der Waals, the double layer force and the hydration force are considered. Then, the displacement diagrams are drawn considering the forces between the molecule and the studied environments. Finally, according to the simulation results in different environments, the highest displacement of gold nanoparticles in the second phase of manipulation was in water and the lowest in plasma.

Keywords: Manipulation; Gold Nanoparticles; Atomic Force Microscope; Intermolecular Forces; Different Liquid Environments.

۱- مقدمه

بررسی ساختار هندسی و شیمیایی مواد، بهبود خواص نانو ساختارها، مطالعه‌ی سلول‌های بیولوژیکی و تعیین خواص مکانیکی سلول‌ها و نانوذرات از جمله عوامل اهمیت میکروسکوپ نیروی اتمی در صنایع ساختمانی، پزشکی، هوا فضا و الکترونیکی است؛ لذا از این ابزار به صورت گسترده در حوزه‌های مختلف و در طی فرآیندهایی همچون منیپولیشن استفاده شده است؛ همچنین اهمیت فلز طلا به علت خواص الکتریکی، رسانایی و سایر موارد، سبب توجه به این فلز در صنایع مختلف شده است؛ لذا در طی فرآیند منیپولیشن به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر نانوذره‌ی طلا در فاز اول و دوم پرداخته شده است تا با شناخت کامل این فلز در ابعاد نانو بتوان خواص آن را بهبود بخشید و در ساخت نانو ساختارهایی با دقت اتمی از آن استفاده نمود.

آندو [۱] با توجه به اهمیت چگونگی ساختار پروتئین‌ها و پدیده‌های بیولوژیکی پیچیده به بررسی ابزاری به نام میکروسکوپ نیروی اتمی با سرعت بالا پرداخته‌است که امکان ارزیابی هم‌زمان ساختار و دینامیک مولکول‌های تک پروتئین را در عمل فراهم می‌کند. چن و ژو [۲] به مزایای استفاده از میکروسکوپ اتمی اشاره نموده‌اند که شامل، وضوح بالا، آنالیز در زمان واقعی، تصویربرداری در محل، محدودیت‌های زیست‌محیطی اندک و عملکرد ساده بوده است. همچنین به برخی تحقیقات بر پایه‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی در حوزه‌ی اصلی مواد، صنعت نیمه‌هادی، پلیمرها و دارو اشاره نموده‌اند. دزینانسیسکی و همکارانش [۳] به بررسی نیروی وان‌دروالس پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین بیان نموده‌اند که ایده‌ی اصلی این نظریه، این است که برهم‌کنش بین اجسام از طریق یک میدان الکترومغناطیسی نوسانی در نظر گرفته می‌شود. این میدان همیشه در داخل یک محیط مادی وجود دارد و همچنین به دلیل نوسانات ترمودینامیکی از مرزهای آن فراتر می‌رود.

طاهری و بطحایی [۴] به آنالیز حساسیت پارامترهای محیطی بر روی نیرو و زمان غلتش به روش آماری ای-فست پرداخته‌اند. انرژی سطحی، کار چسبندگی، مدول الاستیسیته‌ی سوزن، مدول الاستیسیته‌ی ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره از جمله پارامترهای ورودی مورد بررسی در طی فرآیند نانومنیپولیشن می‌باشند. کورایم و

ذاکری [۵] منیپولیشن نانوذره‌ی طلا را بر روی یک بستر سیلیکونی شبیه‌سازی کرده‌اند. مدل ارائه شده توسط آن‌ها با توجه به نیروی اصطکاک و مدل تماسی جی‌کآر بوده است. آن‌ها همچنین به تحلیل حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر نیرو و زمان بحرانی پرداخته‌اند.

کوریتو و همکارانش [۶] به اهمیت کنترل حرکت نانومواد برای ساخت و مونتاژ، نانو ساختارها اشاره نموده‌اند. لذا جابه‌جایی یک نانو ساختار دو بعدی را روی یک سطح با استفاده از دو میدان الکتریکی عمود بر هم کنترل کرده‌اند. کورایم و همکارانش [۷] منیپولیشن نانوذره‌ی کرومی و ساده‌ی بیضی شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند. این مدل‌سازی با در نظر گرفتن مدل‌های تماسی، دینامیکی و استاتیکی انجام شده است؛ همچنین با استفاده از مکانیک تماس، عمق تماس بین نانوذره و سوزن و نانوذره و سطح مبنا محاسبه شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی حرکت لغزشی و سپس غلتشی در نانوذره‌ی بیضوی متخلخل برخلاف نانوذره‌ی بیضوی ساده است.

کریج و همکارانش [۸] به بررسی مزایا و محدودیت‌های میکروسکوپ نیروی اتمی در تعیین خواص مکانیکی ذرات بیولوژیکی پیچیده پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین به چگونگی تأثیر خواص مکانیکی بر روی نانوذرات اشاره کرده‌اند. در نهایت نیز به تکمیل میکروسکوپ نیروی اتمی با سایر روش‌ها پرداخته‌اند. کورایم و همکارانش [۹] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و در طی فرآیند منیپولیشن به بررسی زبری سطح سلول سرطانی پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین حرکت غلتشی و لغزشی را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از مدل‌های مختلف زبری، نیرو و زمان بحرانی را محاسبه کرده‌اند.

گراس و همکارانش [۱۰] با توجه به اهمیت میکروسکوپ نیروی اتمی در شیمی و برای بررسی واکنش‌های سطحی و شناسایی مولکول‌های گریزان و مخلوط‌های مولکولی پیچیده، به مطالعه بر روی این دستگاه پرداخته‌اند و نوک سوزن این میکروسکوپ را مورد مطالعه قرار داده‌اند. گور و همکارانش [۱۱] معادله پواسون-بولتزمن را با نظریه گوی-چپمن مقایسه کرده‌اند و به نتایجی همچون: کاهش غلظت یون‌های سطحی، شکستن اتصال خطی بین بار سطحی و میدان الکتریکی سطحی و خم شدن منحنی ظرفیت دیفرانسیل لایه دوگانه رسیده‌اند.

با مطالعه‌ی پژوهش‌های گذشته ابتدا به بررسی فرآیند مینیولیشن و حوزه‌های مطالعاتی آن پرداخته شده است. سپس کاربردهای میکروسکوپ نیروی اتمی مشخص گردیده است؛ همچنین مطالعاتی در خصوص نانوذره‌ی طلا در فاز نخست مینیولیشن و به‌منظور یافتن پارامترهای تأثیرگذار بر نیرو و زمان بحرانی انجام شده است.

در این تحقیق مینیولیشن نانوذره‌ی طلا در محیط‌های مختلف مایع و در فاز دوم مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است؛ همچنین سطح این نانوذره توسط میکروسکوپ نیروی اتمی کاوش شده و تصاویر توپوگرافی و نتایج حاصل از آن ارائه گردیده است. محیط‌های مورد بررسی شامل محیط آب، پلاسما و متانول است. دلیل در نظر گرفتن این محیط‌ها، نزدیک شدن شرایط آزمایش به شرایط واقعی بیولوژیکی است. در نهایت نیز میزان جابه‌جایی در هر سه محیط در فاز دوم مینیولیشن مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی‌های صورت گرفته به صورت دوبعدی انجام شده‌اند.

۲- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا نیروهای بین مولکولی و معادلاتشان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس معادلات فاز دوم به صورت دو بعدی مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲-۱- نیروهای بین مولکولی

بررسی نیروهای بین مولکولی در ابعاد نانو در این بخش مورد تحلیل قرار گرفته شده است و از معادلات مطرح شده در این بخش در شبیه‌سازی‌های فاز دوم مینیولیشن نانوذره‌ی طلا استفاده شده است.

۲-۱-۱- نیروی وان دروالس

بررسی نیروی جاذبه‌ی بین مولکول‌های غیرمشابه با بررسی نیروی وان دروالس [۳] مطرح شده است. در معادله‌ی ۱ پارامتر D فاصله بین رأس ابزار و سطح، R_t شعاع رأس کروی سوزن و H ثابت همکر بوده است که برای بیان رابطه‌ی نیروی وان دروالس آورده شده است.

$$F_{vdw}(D) = -\frac{H R_t}{6 D^2} \quad (1)$$

متقی و همکارانش [۱۲] فاز اول مینیولیشن نانوذره‌ی طلا را شبیه‌سازی کرده‌اند. مدل‌سازی صورت گرفته به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است و نیرو و زمان بحرانی در محیط مایع در دو حالت لغزشی و غلتشی با نتایج پژوهش‌های قبل در محیط هوا مقایسه شده است. محمودی و همکارانش [۱۳] مینیولیشن یک سلول کروی را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مدل‌سازی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از تغییر شکل میکروسکوپ نیروی اتمی و مدل مشتق شده‌ی سه‌بعدی، به شبیه‌سازی جابه‌جایی سلول مخمر پرداخته‌اند. در نهایت به نیرو و زمان کمتر در مینیولیشن جانبی نسبت به طولی اشاره شده است؛ همچنین نوع خاصی از میکروسکوپ نیروی اتمی برای مطالعه بر روی ذرات زیستی حساس ارائه شده است.

موراگ و همکارانش [۱۴] نیروی الکترواستاتیک را با در نظر گرفتن میزان پی‌اچ در بین سطوح سیلیس مورد بررسی قرار داده‌اند. بررسی‌های صورت گرفته توسط میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شده است.

طاهری [۱۵] به بررسی تأثیر مدل‌های اصطکاکی مختلف بر استخراج تجربی نیرو و زمان بحرانی نانومینیولیشن سه‌بعدی بافت سرطانی روده‌ی بزرگ با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته است. طاهری [۱۶] همچنین کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در استخراج نیرو و زمان بحرانی مینیولیشن دوبعدی برای بافت سرطانی معده را با مدل‌های اصطکاکی مختلف کولمب، اچ‌کا و لاگره مورد بررسی قرار داده است.

خلیلی و همکارانش [۱۷] مطالعه‌ی مینیولیشن نانوذره‌ی دی‌ان‌ای با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی برپایه‌ی روش المان محدود با استفاده از تئوری‌های مکانیک تماس را مورد توجه قرار داده‌اند. کورایم و رستگار [۱۸] به توسعه‌ی مینیولیشن سه بعدی سلول‌های بیولوژیکی ویسکوالاستیک توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و بر اساس مدل‌های تماسی و کشش نوسانی پرداخته‌اند. کورایم و خاکسار [۱۹] مسیریابی بهینه‌ی نانوذرات بیضوی و مکعبی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی یک و دو سوزنه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. طاهری و میرزالی [۲۰] به شبیه‌سازی تئوری و تجربی استخراج مدول یانگ سلول MCF-۱۰ سینه با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند.

$$U = Ae^{-X/\lambda_H} \quad (۴)$$

۲-۲- مدل‌سازی دوبعدی فاز دوم نانومنیپولیشن
 میکروسکوپ نیروی اتمی با توجه به عدم محدودیت در مطالعه‌ی مواد در محیط‌های مختلف و سایر مزایا به عنوان ابزاری برای کاوش سطح مواد و سلول‌های بیولوژیکی استفاده می‌شود. این ابزار با ایجاد تماس در دو سطح ذره-سوزن و ذره-صفحه‌ی مینا، و کاوش سطح نانوذره‌ی مورد نظر، به استخراج خواص می‌پردازد. در این فرآیند با تماس سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با نانوذره، اعمال نیرو آغاز می‌گردد، این روند افزایش نیرو تا زمان غلبه بر نیروهای مقاوم و شروع حرکت ادامه پیدا می‌کند. زمان و نیروی شروع کننده حرکت را به ترتیب، زمان و نیروی بحرانی گویند. با شروع حرکت و کاوش و جابه‌جایی نانوذره، فاز دوم منیپولیشن آغاز می‌گردد. فرآیند کلی منیپولیشن در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند استخراج اطلاعات به این صورت است که نور لیزر به تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی تابانده شده، تغییرات جابه‌جایی، با بازتاب نور بر روی فتودیود ثبت شده و سپس به صورت سیگنال‌های قابل فهم برای کامپیوتر درآورده می‌شوند. مدل‌سازی صورت گرفته در این مقاله برای حرکت نانوذره‌ی طلا در فاز دوم به صورت دوبعدی است [۵]. به منظور درک بهتر روابط پارامترهای هندسی وارد بر ذره و نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل ۲ آورده شده‌اند.

به منظور به دست آوردن ثابت همکر از معادله‌ی ۲ استفاده شده و در نهایت قسمت دوم معادله‌ی ۲ به دلیل کم بودن مقدار این قسمت حذف شده است و رابطه‌ی نهایی محاسبه شده است.

$$H_{total} = H_{V=0} + H_{V>0} \approx \frac{3}{4} k T \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 + \epsilon_3} \right) \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3} \right) + \frac{3h\nu_e}{8\sqrt{2}} \frac{(n_1^2 - n_3^2)((n_2^2 - n_3^2))}{(n_1^2 + n_3^2)^{\frac{1}{2}}(n_2^2 + n_3^2)^{\frac{1}{2}}[(n_1^2 + n_3^2)^{\frac{1}{2}} + (n_2^2 + n_3^2)^{\frac{1}{2}}]} \approx \frac{3}{4} k T \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 + \epsilon_3} \right) \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3} \right) \quad (۲)$$

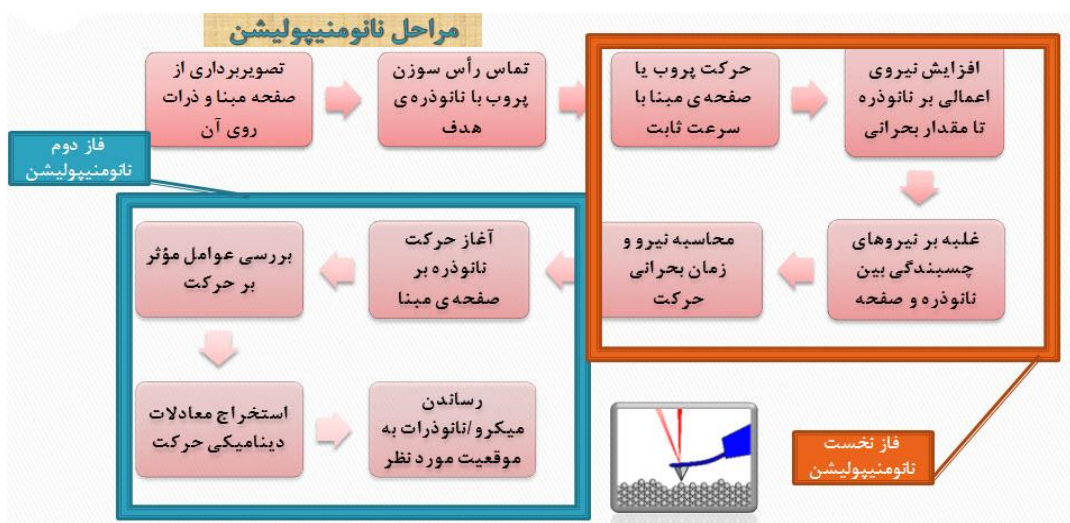
۲-۱-۲- نیروی الکترواستاتیک دولایه

نیروی الکترواستاتیک دولایه [۱۴] از رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است. σ_T و σ_S به ترتیب برابر شار نمونه و شار سر سوزن تعریف شده‌اند؛ همچنین ϵ مقدار ثابت دی‌الکتریک و ϵ_0 مقدار نفوذ در خلأ بوده است.

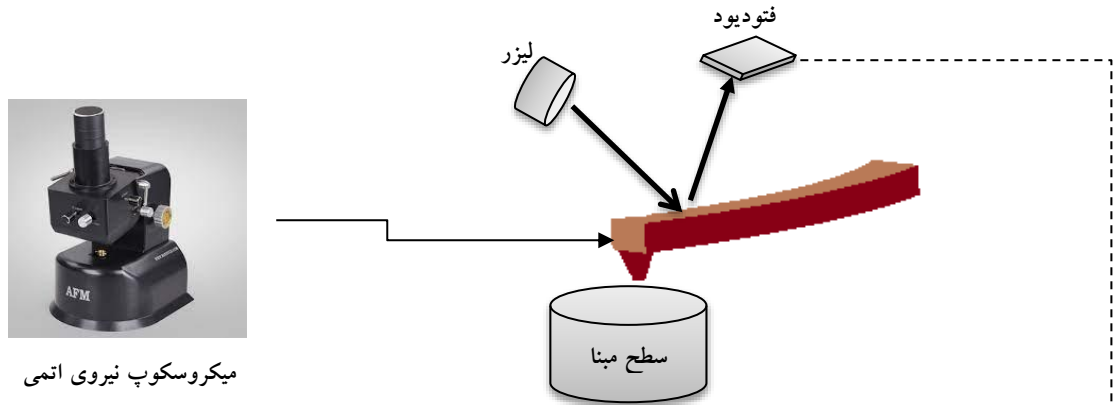
$$F_{el} = \frac{4 \pi R \sigma_S \sigma_T \lambda_D}{\epsilon \epsilon_0} e^{-D/\lambda_D} \quad (۳)$$

۳-۱-۲- نیروی آب‌پوشی

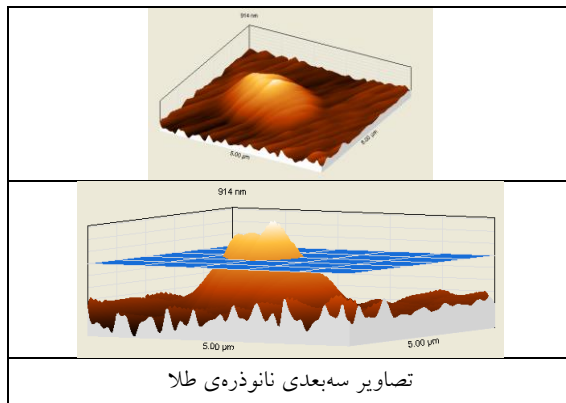
آخرین نیروی مورد بررسی نیروی آب‌پوشی [۱۱] می‌باشد که از رابطه‌ی انرژی در معادله‌ی ۴ محاسبه شده است. پارامترهای λ_H همان طول دبابی و A برابر با دامنه تعریف شده است.



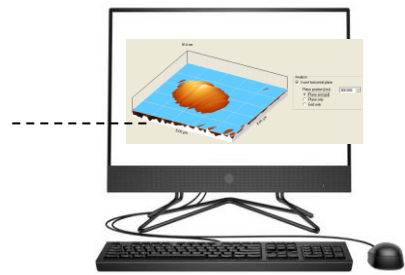
الف) الگوریتم فرآیند



میکروسکوپ نیروی اتمی

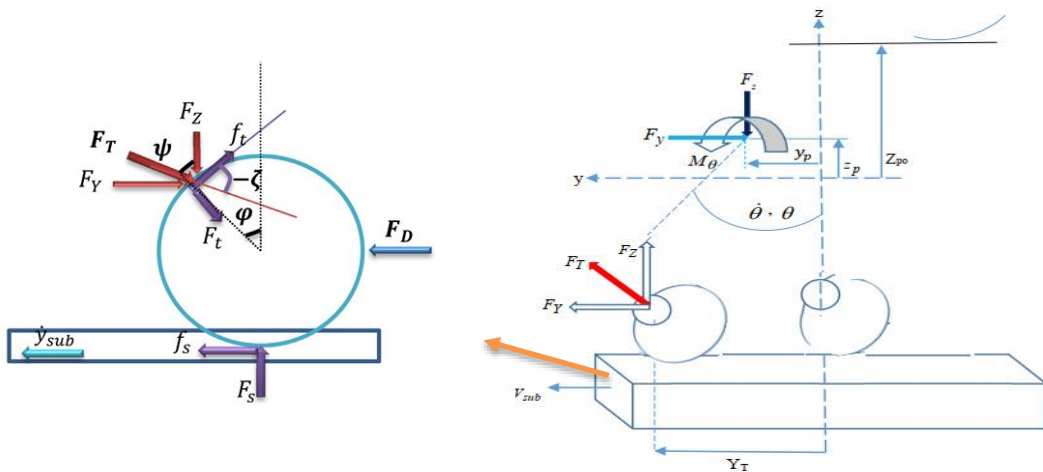


تصاویر سه بعدی نانوذره‌ی طلا



شکل شماتیک فرآیند

شکل ۱- فرآیند نانومنیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی



ب) پارامترهای مؤثر در تماس ذره و سوزن

الف) نمایش نیروهای وارده به ذره و سوزن

شکل ۲- پارامترهای مورد استفاده در معادلات

$$F_y = F_y + \frac{m}{2} H \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (12)$$

$$F_z = F_z - \frac{m}{2} H \dot{\theta}^2 \cos \theta \quad (13)$$

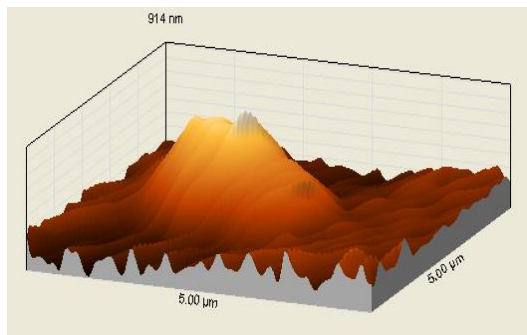
$$F_T = \sqrt{(F_y^2 + F_z^2)} \quad (14)$$

۳- تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، سپس نیروهای بین مولکولی بررسی و شبیه‌سازی شده‌اند. پس از آن نیرو در فاز دوم مینیولیشن محاسبه شده و در نهایت نیروی بین مولکولی در محیط‌های مختلف مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته است.

۳-۱- تصاویر به‌دست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی

از جمله نتایج حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی از نانوذره‌ی مورد تحلیل می‌باشد. شکل (۳) نمایانگر تصویر سه‌بعدی گرفته شده از نانوذره‌ی طلا و با ابعاد مشخص شده در تصویر است. در این تصویر سه‌بعدی که با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به دست آمده است، مساحت $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ از سطح مورد بررسی نمایش داده شده است تا برآوردی از شکل و ابعاد ذره‌ی مورد نظر به دست آید.



شکل ۳- تصویر ثبت شده از نانوذره‌ی طلا

۳-۲- بررسی نیروهای بین مولکولی در محیط‌های مختلف

به‌منظور محاسبه‌ی روابط سینماتیکی مینیولیشن نانوذره‌ی طلا، تغییر شکل تماسی بین سلول-رأس ابزار برابر با سلول-صفحه‌ی مینا δ_s و زاویه‌ی پیش θ در نظر گرفته می‌شوند. بدین صورت، روابط (۵) و (۶) نشان‌دهنده‌ی نیروهای وارد بر انتهای تیرک در راستاهای عمودی و افقی و رابطه‌ی (۷) نشان‌دهنده‌ی گشتاور وارد بر انتهای تیرک می‌باشند.

$$F_y = K_y y_p \quad (5)$$

$$F_z = K_z z_p \quad (6)$$

$$M_\theta = K_\theta \times \theta \quad (7)$$

تغییر شکل تیرک از طریق معادلات سینماتیکی مطرح شده در روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌گردد.

$$y_p = y_{sub} + (R_p - \delta_s) \sin \phi - H \sin \theta \quad (8)$$

$$z_p = y_{sub} + (R_p - \delta_s) \cos \phi + (R_p - \delta_s) - H \cos \theta \quad (9)$$

با استفاده از معادلات تعادل در روابط (۱۰) و (۱۱) معادلات دینامیکی در جهت y و z به‌علاوه گشتاور جانبی به دست می‌آیند.

$$\sum F_y = m a_y = m \left(\frac{\ddot{y}_T + \ddot{y}_P}{2} \right) \quad (10)$$

$$\sum F_z = m a_z = m \left(\frac{\ddot{z}_T + \ddot{z}_P}{2} \right) \quad (11)$$

با دو بار مشتق‌گیری از روابط (۸) و (۹) و جایگذاری مقادیر شتاب به دست آمده در معادلات (۱۰) و (۱۱) روابط (۱۲) و (۱۳) به دست آمده است.

F_y و F_x به ترتیب به عنوان نیروهای وارده از طرف تیرک به انتهای سوزن در راستاهای محورهای x و y تعریف شده‌اند. همچنین F_y و F_x نیز به منظور نمایش نیروهای وارده از طرف ذره‌ی هدف به نوک سوزن در راستاهای محورهای x و y نشان داده شده‌اند.

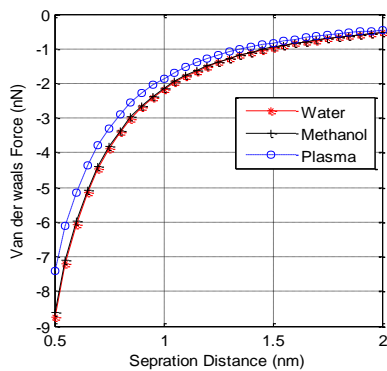
در نتیجه نیروی وارده بر سوزن از روابط (۱۲) و (۱۳) در راستای عمودی و افقی حاصل شده‌اند. با برآیندگیری از نیروها، نیروی برآیند در معادله‌ی (۱۴) به دست می‌آید.

کم است. مقدار این نیرو در محیط آب از سایر محیطها بیشتر بوده است.

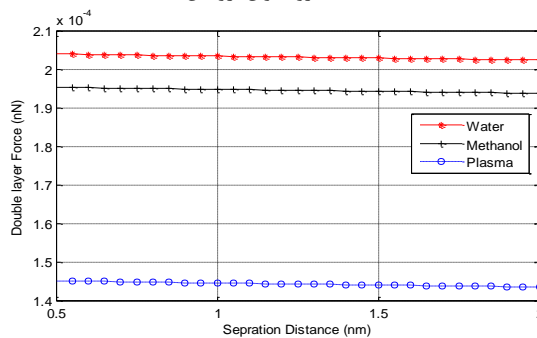
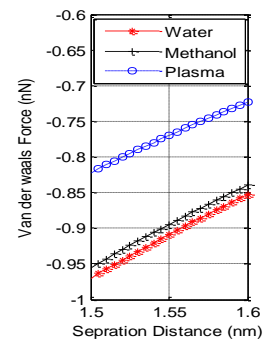
نمودار ۴-ج روند تغییرات نیروی آبپوشی را در طی حرکت نشان داده است. روند تغییرات به صورت کاهشی با شیب قابل توجه می‌باشد. همان‌طور که نشان داده شده است تا قبل از ۱,۵۵ نانومتر، مقدار نیروی آبپوشی در محیط آب بیشتر از پلاسما و متانول بوده است، اما بعد از این مقدار نیروی آبپوشی در محیط پلاسما بیشتر از آب محاسبه شده است.

شکل ۴، نمودارهای تغییرات نیروهای بین‌مولکولی را در طی جابه‌جایی در محیط‌های مختلف نمایش داده است. نمودار ۴-الف نیروی بین‌مولکولی وان‌دروالس را مورد تحلیل قرار داده است. در این نمودار با افزایش فاصله‌ی جدایش، نیروی وان‌دروالس افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه‌ی نیروی وان‌دروالس در محیط آب بیشتر از متانول و پلاسما بوده است.

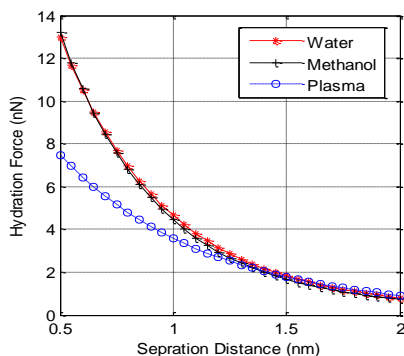
نمودار ۴-ب نیروی الکترواستاتیک دولایه را نمایش می‌دهد. روند تغییرات این نیرو به صورت کاهشی با شیب بسیار



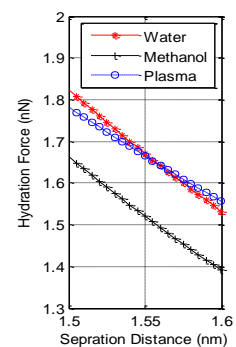
الف) نیروی وان‌دروالس



ب) نیروی الکترواستاتیک دولایه



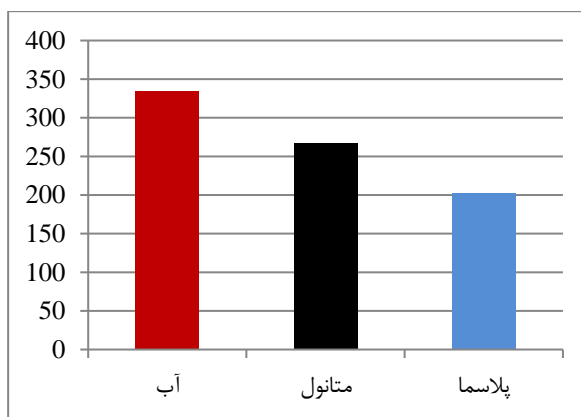
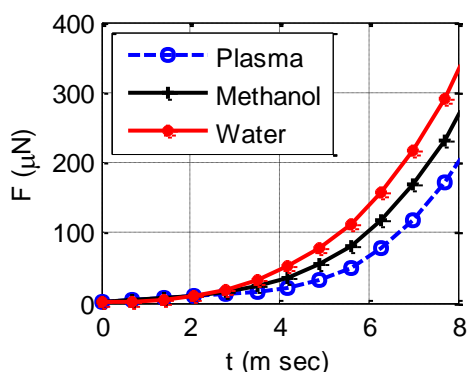
ج) نیروی آبپوشی



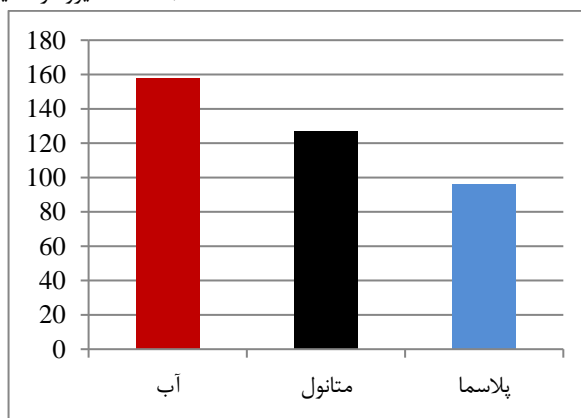
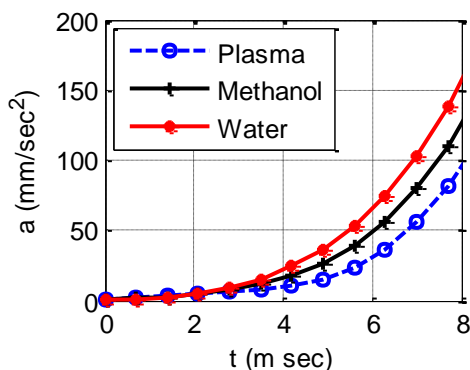
شکل ۴- نمودار نیروهای بین‌مولکولی- فاصله‌ی جدایش در محیط‌های مختلف

با افزایش زمان، تمامی این نمودارها روند افزایشی خود را در هر سه محیط ادامه می‌دهند. با بررسی میزان جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا در زمانی مشخص، مشاهده می‌شود که میزان جابه‌جایی در محیط آب بیشتر از متانول و در محیط متانول بیشتر از پلاسما است که این موضوع را با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۴ و تفاوت در نیروهای بین مولکولی موجود در این سه محیط می‌توان تأیید نمود.

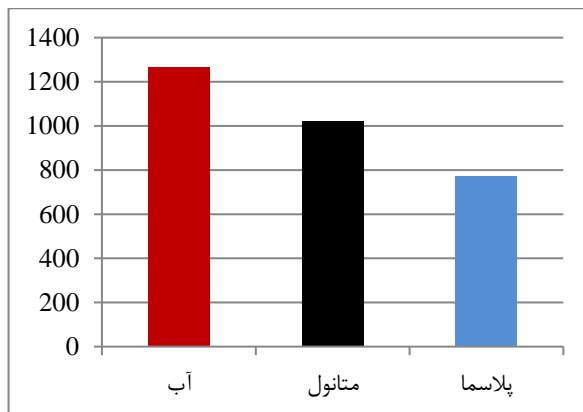
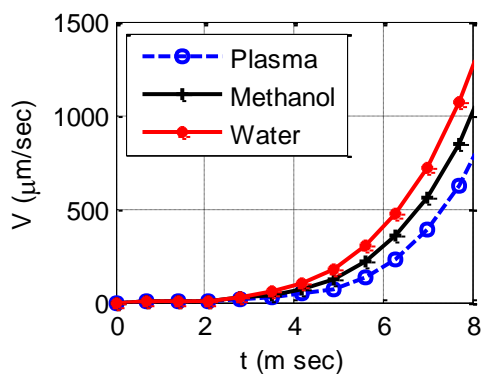
۳-۳- نتایج فاز دوم منیپولیشن دوبعدی نانوذره‌ی طلا
پس از مشخص شدن نیرو و زمان بحرانی در فاز اول منیپولیشن، هدف بعدی که همان جابه‌جایی و حرکت است در فاز دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمودارهای نیرو، شتاب، سرعت و در نهایت جابه‌جایی در محیط‌های پلاسما، آب و متانول ترسیم شده‌اند.



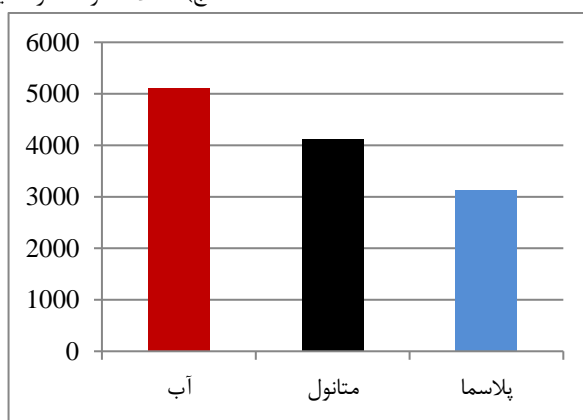
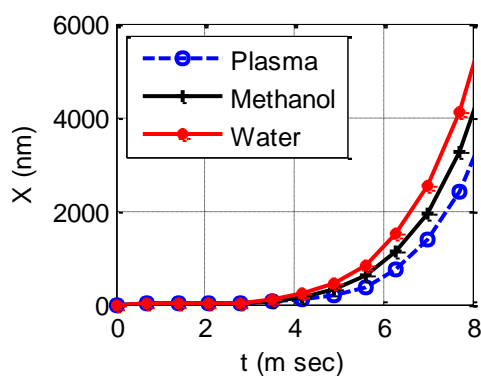
الف) اختلاف نیرو در محیط‌های مختلف



ب) اختلاف شتاب در محیط‌های مختلف

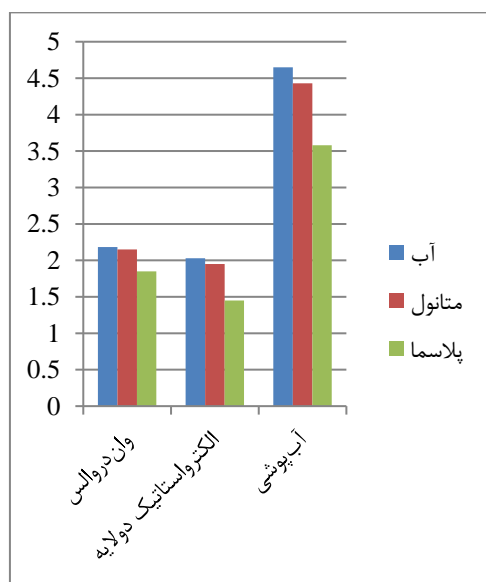


ج) اختلاف سرعت در محیط‌های مختلف



د) اختلاف موقعیت در محیط‌های مختلف

شکل ۵- نتایج فاز دوم نانومنیوپولیشن محیط‌های مختلف



الف) نتایج مقاله‌ی موجود برای ذره‌ی طلا

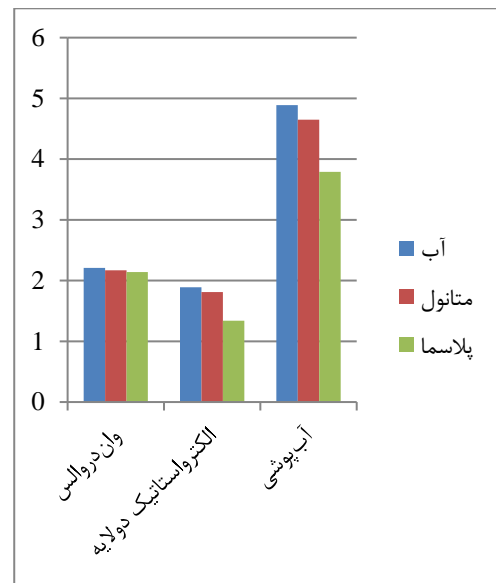
۳-۴- صحت‌سنجی و مقایسه‌ی نیروهای بین مولکولی

در این بخش از مقاله، به بررسی نتایج به دست آمده برای نیروهای بین مولکولی در این مقاله و صحت‌سنجی آن از طریق مقایسه با نتایج مرجع ۲۱ پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، قدر مطلق و اندازه‌ی نیروهای وان‌در والس، الکترواستاتیک دولایه و آب‌پوشی، در فاصله‌ی جدایش ۱ نانومتر در محیط آب دارای بیشترین مقدار و در محیط پلازما دارای کمترین مقدار بوده‌اند، که نتایج مرجع ۲۱ نیز این موضوع را تأیید نموده و بر درستی نتایج دلالت می‌نماید؛ شایان ذکر است که دلیل اختلاف بین این نتایج نوع ذره‌ی مورد بررسی در این مقاله و مرجع ۲۱ است که در این مقاله ذره‌ی طلا و در مرجع ۲۱ دی‌ان‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

محیط‌های مختلف، میزان جابه‌جایی در فاز دوم منیپولیشن در محیط‌های، آب، پلاسما و متانول مورد بررسی قرار گرفته است. روند تغییرات نیروهای بین مولکولی با افزایش جابه‌جایی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نمودارهای نیرو، شتاب، سرعت و جابه‌جایی نانوذره‌ی طلا در محیط‌های مختلف و با توجه به تغییرات برآیند نیروهای بین مولکولی، ترسیم شده‌اند. نتایج حاکی از بیشترین مقدار جابه‌جایی در محیط آب و کمترین مقدار در محیط پلاسما است؛ همچنین با افزایش جابه‌جایی، نیروی وان‌دروالس روند افزایشی و سایر نیروهای بین مولکولی روند کاهشی داشته‌اند.

۵- مراجع

- [1] Ando T (2017) High-speed atomic force microscopy and its future prospects. *Biophys Rev* 10(2): 285–292.
- [2] Chen J, Xu K (2020) Applications of atomic force microscopy in materials, semiconductors, polymers, and medicine: A minireview. *Instrum Sci Technol* 48(6): 667-681.
- [3] Dzyaloshinskii IE, Lifshitz EM, Pitaevskii LP (1961) The general theory of van der Waals forces. *Adv Phys* 10(38): 165-209.
- [4] Taheri M, Bathaee SH (2019) Sensitivity analysis of peripheral parameters in three dimensional nanomanipulation by using HK model. *J Sol and Flu Mech* 9(2): 123-139.
- [5] Korayem MH, Zakeri M (2008) Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM. *J Adv Manuf Technol* 41(7-8): 714–726.
- [6] Curiotto S, Cheynis F, Müller P, Leroy F (2020) 2D Manipulation of Nanoobjects by Perpendicular Electric Fields: Implications for Nanofabrication. *ACS Appl Nano Mater* 3(2): 1118–1122.
- [7] Korayem MH, Jahanshahi M, Khaksar H (2020) Modeling and simulation of the dynamics, contact mechanics and control of the nanomanipulation of elliptical porous alumina nanoparticles based on atomic force microscopy. *Eur J Mech A Solids* 84: 104060-1-15.
- [8] Krieg M, Fläschner G, Alsteens D, Gaub BM, Roos WH, Wuite GJL, Müller DJ (2018) Atomic force microscopy-based mechanobiology. *Nat Rev Phys* 1(1): 41-57.
- [9] Korayem MH, Badkoobehhezaveh H, Taheri M (2017) Experimental Determination of HT29 Cancerous Cell Surface Roughness by Atomic Force Microscopy to be Applied in Nanomanipulation. *J Appl Comput Sci Mech* 28(1): 111-122.



ب) نتایج مرجع [۲۱] برای ذره‌ی دی‌ان‌ای

شکل ۶- نمودار مقایسه‌ی اندازه‌ی نیروهای بین مولکولی در فاصله‌ی جدایش ۱ نانومتر

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت فلز طلا در ساخت تراشه‌های الکترونیکی، صنایع هوافضا، تشخیص برخی از بیماری‌ها و در علوم مختلف مبتنی بر لیزر، محققان به بررسی ساختار این فلز علاقه‌مند شده‌اند؛ لذا فرآیندهای مختلفی برای شناخت ساختار اتمی، بهبود خواص مکانیکی و سایر اهداف بر روی نانوذره‌ی طلا صورت گرفته است. با توجه گسترده‌ی کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در مطالعه‌ی ذرات در ابعاد نانو و در طی فرآیند نانومنیپولیشن، لذا از این روند در طی این مقاله به‌منظور بررسی نانوذره‌ی طلا استفاده شده است. منیپولیشن نانوذرات در دو فاز صورت می‌پذیرد. در فاز نخست با غلبه بر نیروهای مقاوم، نیرو و زمان بحرانی، محاسبه شده و ادامه‌ی فرآیند در فاز دوم و با اهداف مختلف، جابه‌جایی و کاوش سطح توسط میکروسکوپ نیروی اتمی صورت می‌پذیرد؛ لذا در این مقاله جهت مدل‌سازی فرآیند معادلات حرکت به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده و نیروهای بین مولکولی، وان‌دروالس، آب‌پوشی و الکترواستاتیک دولایه نیز مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. با توجه به عدم محدودیت کار با میکروسکوپ نیروی اتمی در

- [16] Taheri M (2022) Application of atomic force microscopy in critical force and critical time extraction of 2D manipulation for gastric cancer tissue with different friction models, *Nanoscale* 9(1): 136-145.
- [17] Khalili M, Taheri M, Bathaee SH, Shakeri F (2022) Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics. *Mech Adv Smart Mater* 1 (2): 155-174.
- [18] Korayem MH, Rastegar Z (2021) Development of 3D manipulation of viscoelastic biological cells by AFM based on contact models and oscillatory drag. *Mech Adv Mater Struct* 28(24): 2572-2584.
- [19] Korayem MH, Khaksar H (2022) Optimum path planning of elliptic and cubic nanoparticles using one and dual probe atomic force microscopes. *Mech Adv Mater Struct* 29(15): 2126-2141.
- [20] Taheri M, Mirzalou M (2022) Theoretical and Experimental Simulation of Young Modulus Extraction of Breast MCF-10 Cells Using Atomic Force Microscope. *Modares Mech Eng* 22(01): 37-45.
- [21] Korayem MH, Taheri M, Korayem AH (2014) Manipulation with atomic force microscopy: DNA and yeast micro/nanoparticles in biological environments. *Proc Inst Mech Eng Part K: J Multi-body Dyn* 228(4): 414-425.
- [10] Gross L, Schuler B, Pavliček N, Fatayer S, Majzik Z, Moll N, Meyer G (2018) Atomic Force Microscopy for Molecular Structure Elucidation. *Angew Chem Int Edition* 57(15): 3888–3908.
- [11] Gur Y, Ravina I, Babchin AJ (1978) On the electrical double layer theory. II. The Poisson—Boltzmann equation including hydration forces. *J Colloid Interface Sci* 64(2): 333-341.
- [12] Motaghi A, Korayem MH, Zakeri M (2010) Dynamic modeling of 2D nano-manipulation based on AFM in liquid environment. 2010 17th Iranian Conference of Biomedical Engineering (ICBME): 1-4.
- [13] Mohammadi SZ, NejatPishkenari H, Mohammadi Moghaddam M (2021) 3D distributed modeling of troling-mode AFM during 2D manipulation of a spherical cell. *J Nanopart Res* 23(4): 1-20.
- [14] Morag J, Dishon M, Sivan U (2013) The governing role of surface hydration in ion specific adsorption to silica: An AFM-based account of the Hofmeister universality and its reversal. *Langmuir* 29(21): 6317-6322.
- [15] Taheri M (2022) Investigation of the effect of different friction models on experimental extraction of 3D nanomanipulation force and critical time of colon cancer tissue. *Amirkabir J Mech Eng* 54(4): 791-804.