

مدل سازی دینامیکی نانومنیپولیشن دو بعدی نانوذره با استفاده از میکروسکوپ اتمی (AFM) در محیط مایع و بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی و هندسی در آن

دکتر محرم حبیب نژاد کورایم^۱، دکتر منیژه زاگری^۲، علی متقی^۳

خلاصه

مقدمه: مدل سازی منیپولیشن ذره با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در محیط هوا انجام گردید و رفتار دینامیکی ذره و انتهای پروب مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقاله منیپولیشن نانوذرات در محیط مایع با استفاده از پروب Atomic force microscope (AFM) مدل سازی شد و با نتایج محیط گاز مقایسه گردید.

روش ها: در این تحقیق با استفاده از آنالیز تئوریک نیروها در محیط مایع و دینامیک راندن نانوذره، منیپولیشن نانوذره‌ی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت نیروهای هیدرودینامیکی و کشش سطحی در محیط مایع محاسبه شد و در مدل به کار گرفته شد. مسأله برای یک ذره‌ی کروی از جنس طلا بر روی زیر ساختی از سیلیکون در زیر آب شبیه سازی گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد که نیرو و زمان بحرانی برای شروع حرکت ذره در محیط آب در حالت لغزشی و غلتشی در حدود ۷ درصد بود و ۳ درصد نسبت به محیط هوا تأخیر داشت. علاوه بر آن با تغییر موقعیت تماس کانتیلور با سطح مایع، میزان مقادیر بحرانی در حدود ۹ درصد در لغزش و ۱۰/۵ درصد در غلتش تأخیر نسبت به هوا را نشان داد.

نتیجه گیری: تمامی این نتایج نشان از تأخیر اندکی در زمان حرکت و کاهش شیب تغییرات نیرو در محیط مایع نسبت به محیط هوا دارد.

واژگان کلیدی: میکروسکوپ اتمی، نانومنیپولیشن، محیط مایع، نیروهای هیدرودینامیکی

مقدمه

سطح در محیط مایع به دلیل حذف اثر رطوبتی فضای هوا کاهش می یابد و شرایط جدیدی حاکم می گردد. تحقیقات تجربی منیپولیشن در محیط مایع نشان داده است که این محیط جهت کاهش احتمال تخریب نمونه مناسب تر از محیط هوا است.

تلاش های زیادی برای مدل سازی راندن ذرات و کنترل آن در محیط هوا انجام شده است ولی در حال حاضر تحقیقات در محیط مایع به صورت تجربی هستند. اولین مدل ارائه شده در جابجایی نانوذرات توسط Falvo صورت گرفت که در آن نیروهای ناشی

نانورباتیک علم استفاده از منیپولیشن کنترل شده برای تولید محصولات جدید می باشد. در این پروسه برای جابجایی کنترل شده‌ی نمونه در محیط گاز و مایع، استفاده از پروب Atomic force microscope (AFM) به دلیل قابلیت های زیاد آن اهمیت ویژه ای دارد و مدل سازی پروسه، نقش عمده ای در کاربرد دقیق این ابزار دارد. یکی از شاخه های اصلی تحقیقات نانو در علوم پزشکی است و نمونه های بیولوژیکی در حالت واقعی در محیط مایع قرار دارند. همچنین چسبندگی

^۱ استاد، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی و دینامیک، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۳ کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

در ادامه، ابتدا نیروهای سطحی و هیدرودینامیکی در محیط مایع بررسی شدند و سپس جابجایی نانوذره‌ی کروی در محیط مایع و با استفاده از AFM مدل‌سازی گردید. در نهایت شبیه‌سازی پروسه منیپولیشن در محیط مایع انجام و با محیط هوا مقایسه شد.

نیروهای محیط مایع شامل نیروهای سطحی و اندروالس، الکترواستاتیکی، استریک، حلال پوشی، هیدریشن، کشش سطحی و اثرات هیدرودینامیکی ناشی از حرکت سیال می‌باشند.

نیروی و اندروالس می‌تواند به شکل دافعه و یا جاذبه باشد. که مقدار آن با توجه به هندسه‌ی اجسام و فواصل آن‌ها تغییر می‌یابد.

نیروی الکترواستاتیکی، نیروی برهمکنش سطوح است. هنگامی که جسم در مایع فرو می‌رود، باردار می‌گردد و یون‌های موجود در مایع با بار مخالف سطح را می‌پوشانند که به آن لایه‌ی استرن یا هلمولتز می‌گویند. در درون مایع هنگام نزدیک شدن دو جسم، لایه‌ی استرن نیروی دافعه ایجاد می‌کند که به آن نیروی الکترواستاتیک دو لایه می‌گویند. با توجه به شرایط پتانسیل و شارژ سطوح، مقدار این نیرو از روابط متفاوتی به دست می‌آید.

اثر سوم بین مولکولی به نیروی استریک (Steric) معروف می‌باشد و بین دو سطح پوشیده شده از پلیمرهای با زنجیره‌های بلند اتفاق می‌افتد. منشأ این پدیده، افزایش آنتروپی زنجیره‌ی پلیمری سطوح هنگام نزدیک شدن به یکدیگر است.

نیروی برهمکنشی دیگر، نیروی حلال پوشی (Solvation) است. به طور معمول ساختار سیال نزدیک دیواره، متفاوت از حالات آن در حجم پیوسته است. در منطقه‌ای تا قطر چند مولکول مایع، نیروی نوسانی دافعه

از تغییر مقیاس در نظر گرفته نشد. اولین مدلی که در آن نیروهای سطحی در نظر گرفته شده‌اند توسط Sitti و همکاران ارائه گردید (۱). در این تحقیق از تئوری تماسی Johnson-Kendall-Robert (JKR) استفاده شد و کنترل از راه دور جابجایی نانوذرات، در آن طراحی شد. Sitti و Tafazzoli مدل کامل‌تری را برای جابجایی نانوذرات ارائه کردند و سعی نمودند نانومنیپولیشن در زمان واقعی را شبیه‌سازی کنند (۲). حبیب نژاد کورایم و همکاران به بررسی مدل دینامیکی منیپولیشن با استفاده از AFM پرداختند و در محیط گاز مدل‌سازی دینامیکی و حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف را بررسی کردند (۳). در محیط مایع، Resch و همکاران برای اولین بار منیپولیشن ذرات طلا را در محیط آب انجام دادند (۴). Frank و همکاران از AFM در شرایط یونی و PH‌های مختلف جهت بررسی نیروی چسبندگی و بین مولکولی استفاده نمودند (۵). Jones و همکاران به بررسی نیروهای وارد بر کانتیلور غوطه‌ور در آب پرداختند و مقادیر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر کانتیلور را در حرکت عمودی ابزار محاسبه کردند (۶). Gauthier و همکاران نشان دادند که در میکرومنیپولیشن، چسبندگی و نیروهای سطحی موجود در محیط گاز ایجاد مزاحمت می‌کنند اما در محیط مایع این نیروها تأثیر کمتری خواهند داشت و در ادامه‌ی تحقیقات سعی نمودند تغییرات احتمالی را در ورود به محیط مایع را بررسی کنند و نیروهای هیدرودینامیکی و سطحی را بررسی نمودند (۷-۸).

در این تحقیق با توجه به اهمیت مدل‌سازی منیپولیشن در محیط مایع، نیروهای هیدرودینامیکی وارده از طرف سیال بر کانتیلور و ذره، استخراج و مدل جدید منیپولیشن در محیط مایع ارائه و شبیه‌سازی شده است.

و جاذبه ایجاد می‌گردد. وقتی دو سطح به یکدیگر نزدیک می‌گردند، لایه‌ها یکی پس از دیگری از هم جدا می‌شوند و تغییرات نوسانی بین مولکول‌ها به صورت نمایی کاهش می‌یابد. این پدیده بین سطوح آب‌دوست (هیدروفیل) در محلول‌های آبی به صورت نمایی و دافعه است و با نام نیروی هیدریشن (Hydration) شناخته می‌شود (۹).

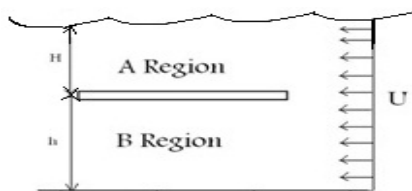
$$dw = \gamma \cdot dA \quad (1)$$

و مقدار نیرو از مشتق کار به دست می‌آید:

$$F = - \frac{dw}{dx} = -\gamma \cdot b \quad (2)$$

که علامت منفی به دلیل مقاومت نیرو در برابر حرکت خواهد بود و b برابر محیط مقطع کانتیلور در تماس با مایع است.

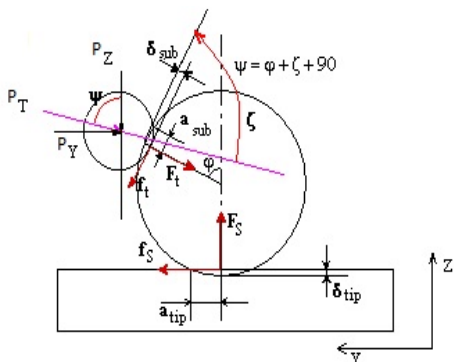
علاوه بر نیروهای سطحی بین مولکولی، در محیط مایع نیروهایی نیز بر اثر وزن مایع و حرکت آن ایجاد می‌شوند که به عنوان نیروهای هیدرودینامیکی تعریف می‌شوند. نیروهای هیدرودینامیکی بر اساس قوانین بقای جرم، ممتوم و انرژی محاسبه می‌گردد. از آن جا که کانتیلور در درون سیال حرکت نسبی دارد، نیروی درگ بر بدنه‌ی آن وارد می‌گردد. اگر فرض شود که جریان دارای رینولدز بسیار کمتر از یک است، اثرات اینرسی قابل صرف نظر است. در نتیجه‌ی نیروی ناشی از فشار و ویسکوزیته در نیروی درگ وارد بر جسم مؤثر هستند. حال فرض می‌شود سیال از بالا و پایین کانتیلور عبور کند و هر دو وجه کانتیلور در معرض نیروی درگ اصطکاکی قرار بگیرد (شکل ۱).



شکل ۱. عبور جریان از بالا و پایین کانتیلور و ایجاد دو ناحیه‌ی جریانی

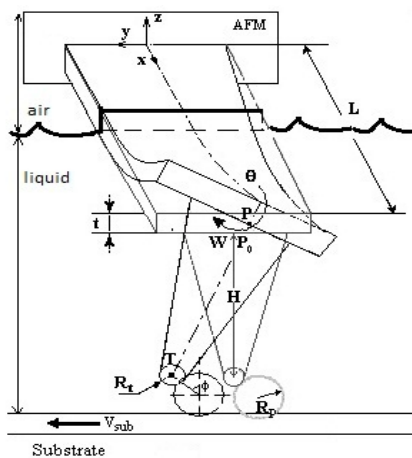
یکی از مهم‌ترین شرایط چسبندگی دو سطح میزان رطوبت محیط است. مایعاتی از قبیل آب که بر روی سطوح دچار میعان می‌گردند، هنگام نزدیکی دو جسم به یکدیگر آن‌ها را به هم می‌چسباند و جاذبه‌ای بین آن‌ها ایجاد می‌کنند و نیروی موینگی ایجاد می‌گردد. پارامترهایی از قبیل شرایط محیطی، سختی سطوح و میزان آب‌دوستی نیز در میزان این نیرو مؤثر است. لازم است ذکر شود که نیروی موینگی برای اجسامی که در داخل محیط مایع قرار گرفته‌اند، حذف می‌شود. کشش سطحی مایعات پدیده‌ی دیگری است که در مدل‌سازی نقش اساسی دارد. کشش سطحی مایع موجب ایجاد پیوندهایی بین مولکول‌های مایع می‌گردد تا از تبخیر آن‌ها جلوگیری شود. در سطح مایع، مولکول‌ها به صورت نسبی توسط همسایگان خویش احاطه شده‌اند و تعداد آن‌ها برای مولکول درون سیال بیشتر است. برای این که مولکول‌ها از داخل مایع به سطح آورده شوند، می‌باید مقداری کار انجام داد. به همین دلیل انرژی سطحی σ را می‌توان به عنوان انرژی لازم مولکول‌ها تا رسیدن به سطح تعبیر کرد. کشش سطحی مایعات همیشه مثبت است و علت آن است که انرژی آزاد گیبس در غیاب کشش سطحی باعث تبخیر سیال مایع می‌گردد. در مدل حاضر هنگامی که کانتیلور پروب درون سیال قرار گیرد، کانتیلور با سطح مایع در

نیروی مقاوم درگ و کشش سطحی از جانب سیال بر آن وارد می‌شود. این نیروها در مدلسازی اعمال شدند تا تغییرات نیروی عکس‌العمل بین ذره و ابزار بررسی شود. در شکل ۲ برهم‌کنش‌های بین ذره با سوزن پروب و صفحه‌ی مبنا نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲. دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر نانوذره (۳)

مشخصات هندسی کانتیلور و تغییر شکل آن در منیولیشن، در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. مشخصات هندسی کانتیلور و ذره (۳)

معادلات سینماتیکی و دینامیکی منیولیشن از دیاگرام آزاد شکل ۴ استخراج شدند. نیروهای برهم‌کنش وارده از کانتیلور و ذره بر سوزن پروب AFM در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.

است و با توجه به ضخامت بسیار کم مقطع کانتیلور جریان سیال را یک بعدی فرض می‌کنیم. برای جریان در سطح فوقانی کانتیلور خواهیم داشت:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Rightarrow$$

$$y=0 \rightarrow u=0, \quad y=H \rightarrow u=U$$

$$u(y) = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) y^2 + \frac{1}{2\mu H} (2\mu U - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) H^2) y \quad (۳)$$

برای دبی جریان داریم:

$$Q_{total} = Q_{top} + Q_{below}$$

$$Q_{below} = \frac{1}{2} hU, \quad Q_{top} = \int_0^H u \cdot dy \quad (۴)$$

$$Q_{total} = U(H+h) \rightarrow$$

$$Q_{top} = U(H+h) - \frac{1}{2} hU$$

در نهایت گرادیان فشار از معادلات ۳ و ۴ به دست

می‌آید:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{3\mu^2 U}{H^2} - \frac{6\mu U}{H^2} \left(H - \frac{h}{2} \right) \quad (۵)$$

(۶)

$$F_{D-top} = wL \left(\frac{3\mu^2 U}{H^2} - \frac{6\mu U}{H^2} \left(H - \frac{h}{2} \right) \right) \left(y + \frac{2\mu U}{\frac{\partial p}{\partial y}} - H^2 \right)$$

همچنین برای جریان سیال در سطح تحتانی کانتیلور

با فرض گرادیان فشار صفر $\left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0$ خواهیم داشت:

$$F_{D-bottom} = wL\mu \frac{U}{h} \quad (۷)$$

روش‌ها

برای جابجایی نانوذره توسط پروب AFM ابتدا سوزن پروب در تماس با ذره هدف قرار گرفت. سپس، سطح زیرین به همراه ذره شروع به حرکت کرد (فاز چسبندگی). حرکت ذره باعث افزایش نیروی وارده بر ذره (P_T) شد. برای مدلسازی پروسه در محیط مایع، فرض شد که نیمی از کانتیلور درون آب قرار دارد و دو

$$\sum F_y = m \left(\frac{\dot{y}_T + \dot{y}_P}{2} \right)$$

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

$$\sum F_z = m \left(\frac{\dot{z}_T + \dot{z}_P}{2} \right)$$

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

در نهایت مقادیر P_T و ψ از روابط زیر به دست آمدند:

$$P_T = \sqrt{P_Y^2 + P_Z^2}, \quad \psi = \tan^{-1} \left(\frac{P_Y}{P_Z} \right) \quad (14)$$

برای تعیین دینامیک حرکت ذره توسط سوزن پروب، محاسبه‌ی نیرو و زمان بحرانی که بیانگر نیروی مورد نیاز و لحظه‌ی شروع حرکت نسبی ذره بر صفحه هستند، از اهمیت ویژه برخوردار است. از مدل اصطکاکی شرایط لازم برای لغزش یا غلتش ذره به شکل زیر به دست می‌آید (۲-۳۲).

لغزش ذره روی صفحه‌ی مبنا:

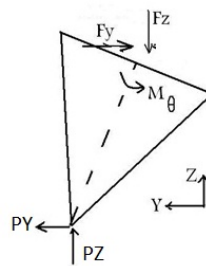
$$f_s > \mu_s F_s + \tau_s A_s \Rightarrow P_T > \frac{\tau_s A_s}{\sin \psi - \mu_s \cos \psi} \quad (15)$$

غلتش ذره روی صفحه‌ی مبنا:

$$P_T > \frac{\tau_{rs} A_s + \tau_{rt} A_t}{R(\sin \psi + \cos \xi) + \mu_{rt} \sin \xi - \mu_{rs} \cos \psi} \quad (16)$$

در لحظه‌ای که نیروی ابزار P_T از نیروی اصطکاکی لغزشی یا غلتشی تجاوز کرد، ذره با رفتار دینامیکی مربوطه شروع به حرکت کرد.

برای شبیه‌سازی این مدل از ذره‌ای با شعاع ۵۰ نانومتر که روی صفحه‌ی مبنا قرار گرفته است، استفاده گردید. صفحه‌ی مبنا با سرعت ۱۰۰ نانومتر بر ثانیه شروع به حرکت کرد. در شبیه‌سازی محیط مایع از آب



شکل ۴. نمایش نیروهای دینامیکی وارده از پروب و ذره بر سوزن پروب AFM

با توجه به این که علاوه بر نیروی خارجی ناشی از حرکت نانوذره، نیروهای درگ و کشش سطحی محیط مایع نیز در تغییر شکل کانتیلور تأثیر می‌گذارند، تغییر شکل کانتیلور در راستای y با استفاده از اصل برهم‌کنش نیروها به دست آمد:

$$y_p = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = \frac{F_y}{K_y} + \delta_{\text{Drag}} + \delta_{\text{Surf}} \quad (8)$$

که δ_{Surf} تغییر شکل تیر ناشی از کشش سطحی سیال با فرض بار متمرکز در میانه‌ی تیر و δ_{Drag} تغییر شکل ناشی از بار گسترده‌ی درگ بر نیمی از کانتیلور است. F_y نیروی عکس‌العمل در جهت y و k_y ضریب فنریت در جهت y است. بنابراین نیروی F_y برابر بود با:

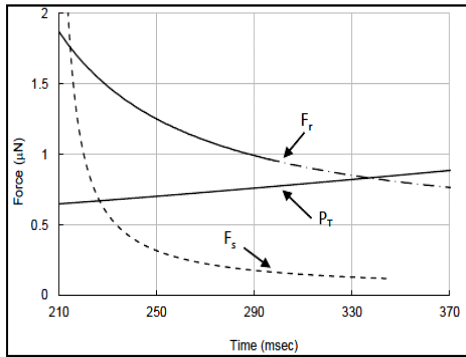
$$F_y = K_y (y_p - \delta_{\text{Drag}} - \delta_{\text{Surf}}) \quad (9)$$

از طرف دیگر معادلات سینماتیکی از شکل ۴ به دست آمدند:

$$y_p = y_{\text{sub}} + (R_p - \delta_t) \sin \phi - H \sin \theta \quad (11)$$

$$z_p = z_{\text{sub}} + (R_p - \delta_t) \cos \phi + (R_p - \delta_s) + H \cos \theta$$

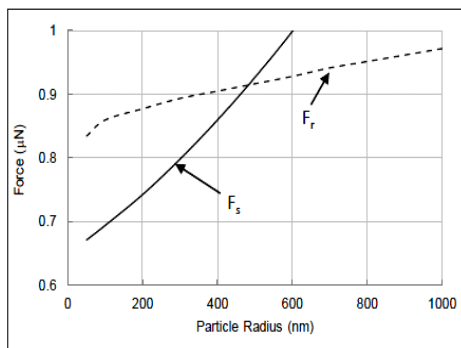
نیروی بین ذره و پروب از معادلات نیوتن-اوایلر به دست آمد:



شکل ۵. زمان و نیروی بحرانی حرکت ذره در حالات لغزشی و غلتشی در آب خالص

نتایج نشان داد که در آب خالص در مقایسه با محیط هوا، مقادیر برای لغزش به میزان ۷ درصد و برای غلتش ۳ درصد افزایش یافت و حرکت با تأخیر انجام شد.

در ادامه‌ی تأثیر تغییرات شعاع ذره میزان زمان و نیروی بحرانی لغزشی و غلتشی مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر بحرانی برای ذراتی با شعاع ۵۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر به دست آمد که نمودار این تغییرات در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است.



شکل ۶. نیروی بحرانی حرکت ذره بر حسب شعاع نانوذره

در نمودارها مشاهده می‌شود که رفتار دینامیکی ذره‌ای با شعاع بیشتر از ۴۸۰ نانومتر در شروع حرکت از نوع حرکت غلتشی بود. در محیط هوا این مقدار در

خالص به عنوان سیال استفاده شد. نیمی از کانتیلور داخل مایع فرض شد و شرایط محیط مایع با فرض آب خالص در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد مدل‌سازی شد. همچنین در زمان شروع حرکت ($t=0$) پارامترهای هندسی و دینامیکی مدل مشابه تحقیقات قبلی این گروه در نظر گرفته شدند.

برای شبیه‌سازی از هندسه و خواص مکانیکی کانتیلور مطابق جداول ۱ و ۲ استفاده شد. انرژی چسبندگی بین نانوذره/پروب و نانوذره و سطح در هوا $\omega = 0.21/m^2$ آب خالص برابر $\omega = 0.11/m^2$ بود.

جدول ۱. خواص هندسی پروب

L(µm)	w(µm)	t(µm)	H(µm)	Rt(nm)
۲۲۵	۴۸	۱	۱۲	۲۰

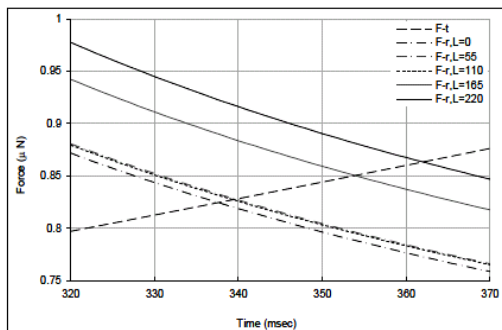
جدول ۲- خواص مکانیکی پروب

E (GPa)	ν	G (GPa)	$\rho (Kg/m^3)$
۱۶۹	۰.۲۷	۶۶.۵۴	۲۳۳۰

یافته‌ها

با افزایش نیروی وارده از طرف ابزار بر ذره، P_r ، بر نیروی چسبندگی ذره/صفحه‌ی مینا غلبه شد و ذره با نیروی بحرانی P_{cr} در لحظه‌ی t_{cr} شروع به حرکت کرد. در محیط هوا، نانوذره‌ی ۵۰ نانومتری با نیروی ۰/۶۴۰ میکرونیوتن و در لحظه‌ی ۰/۲۱۴ ثانیه شروع به لغزش کرد. در آب خالص مطابق شکل ۵ مشاهده شد که نانوذره در لحظه‌ی ۰/۲۲۷ ثانیه و با نیروی بحرانی ۰/۶۷۰ میکرونیوتن با غلبه بر اصطکاک لغزشی به حرکت درآمد. اما زمان غلبه بر اصطکاک غلتشی در لحظه‌ی ۰/۳۳۸ ثانیه و با نیروی ۰/۸۳۴ میکرونیوتن بود که بیانگر حرکت لغزشی ذره روی سطح است.

بحرانی نسبت به هوا در حدود ۲ درصد است. اما در حالتی که تنها سوزن و لبه‌ی تیر وارد آب شود (۲۲۰ میکرون)، تغییراتی در حدود ۹ درصد در مقادیر لغزش و ۱۰/۵ درصد در مقادیر غلتشی مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که کشش سطحی در مقایسه با نیروی درگ تأثیر بیشتری بر منیپولیشن داشت. به طوری که در حالت غوطه‌وری کامل، هنگامی که کشش سطحی به صفر رسید و کانتیلور تنها تحت اثر نیروی درگ قرار داشت، تغییر محسوسی در زمان و نیروی بحرانی مشاهده نشد. در حالتی که سوزن و رأس پروب داخل مایع قرار داشتند و تأثیر کشش سطحی به ماکزیمم مقدار خود رسید، میزان تغییرات زمان و نیروی لغزشی و غلتشی بیشتر بود. به بیان دیگر تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی بر منیپولیشن کمتر از تأثیر نیروی کشش سطحی بر کانتیلور بود و نیروی درگ در عمل بسیار ناچیز بود.

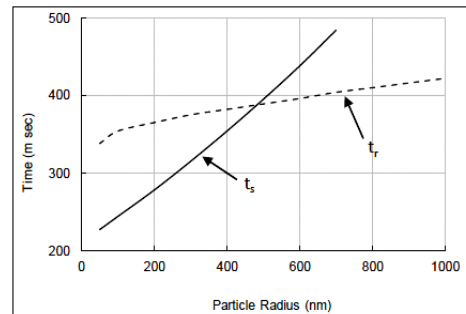


شکل ۹. نمودار تغییرات نیرو و زمان بحرانی حرکت غلتشی ذره در موقعیت‌های مختلف تماس کانتیلور با مایع

بحث

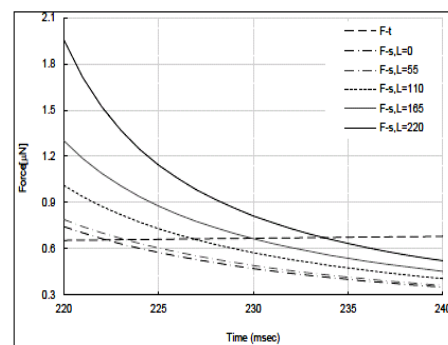
در این تحقیق، منیپولیشن نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ اتمی (AFM) برای حالت راندن نانوذره در محیط مایع مدل‌سازی شد. طبق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در آب خالص، تغییر مقادیر نیرو و

شعاع بالای ۵۴۰ نانومتر بود که نشان می‌دهد احتمال حرکت غلتشی در محیط مایع با افزایش شعاع نانوذره به میزان ۱۱ درصد افزایش یافت.



شکل ۷. زمان بحرانی حرکت ذره بر حسب شعاع نانوذره

در شبیه‌سازی نمودارهای قبل، نتایج با فرض قرار داشتن نیمی از کانتیلور در محیط مایع استخراج شده‌اند. با توجه به این که موقعیت تماسی کانتیلور با سطح مایع بر مقادیر تغییر شکل‌های آن مؤثر است، مقادیر بحرانی در حالت قرار داشتن محل تماس کانتیلور/مایع در ۵ نقطه از راستای طول کانتیلور (صفر، ۵۵، ۱۱۰، ۱۶۵ و ۲۲۰ میکرون) نیز محاسبه شدند که نتایج در نمودارهای شکل ۸ و ۹ ارائه شدند.



شکل ۸. نمودار تغییرات نیرو و زمان بحرانی حرکت لغزشی ذره نسبت به موقعیت تماس کانتیلور با مایع

در شکل های ۸ و ۹، هنگامی که کل کانتیلور درون آب فرض شود (۰ میکرون)، تغییرات مقادیر

نسبت به محیط هوا ندارد. اما به دلیل تأخیر اندک ایجاد شده در زمان حرکت و کاهش شیب تغییرات نیرو می‌توان گفت که منیپولیشن در محیط مایع دارای مزایایی نسبت به محیط هوا است.

البته در این تحقیق با فرض نانوذره‌ای از جنس طلا و نیز عدم وجود نمک و ذرات یون در محیط مایع، از سایر اثرات بین مولکولی در برهم‌کنش صرف نظر شده است. اما نتایج تجربی موجود اثبات می‌کنند که تأثیر کاهش نوسانات در محیط مایع را می‌توان به عنوان مزیت منیپولیشن در این محیط برشمرد (۸).

در تحقیقات آینده می‌توان منیپولیشن ذرات نرم و بیولوژیکی با اشکال متفاوت جنس‌های مختلف را در محیط واقعی با بررسی تأثیرات شرایط محیط سیال به لحاظ وجود نمک‌ها و میزان یونیزاسیون آن‌ها درون مایع که موجب تغییر نیروهای بین مولکولی موجود در محیط مایع می‌شود، بررسی نمود. همچنین با توجه به وابستگی نیروی درگ سیال به بعضی پارامترهای سیال نظیر ویسکوزیته و دانسیته، بررسی تغییرات این پارامترها نیز از اهمیت برخوردار هستند. در پایان لازم به یادآوری است که پیشرفت منیپولیشن در ابعاد نانو در محیط سیال تأثیر شگرفی در پیشبرد اهداف علوم زیستی و پزشکی نظیر روش‌های مبارزه با سرطان، ره‌ایش دارو، تولید نانوربات‌های درمان‌گر و بسیاری دیگر از محصولات مفید در این زمینه خواهد داشت که لزوم شناخت بیشتر محیط و خواص آن را نشان می‌دهد.

زمان لازم برای شروع حرکت ذره به میزان ۳ تا ۷ درصد نسبت به هوا تأخیر داشت که مشابه با نتایج موجود است (۴). علت این پدیده وجود نیروهای مقاوم در برابر حرکت کانتیلور یعنی نیروی درگ و کشش سطحی سیال می‌باشد. با مقایسه‌ی مقادیر نیروهای مقاوم در مقایسه با نیروهای فشاری وارده از پروب بر ذره، تغییرات اندک مقادیر نسبت به حالت هوا قابل توجیه است. این نتیجه در تحقیقات تجربی نیز گزارش شده است (۶).

به علاوه در مقایسه‌ی تأثیر دو نیروی کشش سطحی و نیروی درگ بر منیپولیشن، مشاهده شد که تأثیر کشش سطحی بیشتر از نیروی درگ بود. علت این پدیده این است که میزان نیروی درگ با توجه به رینولدز بسیار کم و سرعت پایین کانتیلور چندین مرتبه از میزان نیروی کشش سطحی کمتر بود. همچنین هنگامی که بدنه‌ی کانتیلور به طور کامل خارج از مایع قرار داشت (۲۲۰ میکرون)، تمرکز کشش سطحی بر ابتدای پروب با بازوی گشتاور ماکزیمم بوجود آمد که موجب تغییر شکل بیشتری شد. در مقابل، هنگامی که کل کانتیلور داخل مایع قرار گرفت، اثر کشش سطحی با بازوی گشتاور صفر از بین رفت و فقط نیروی درگ بر منیپولیشن تأثیر داشت که با توجه به نیروی کم آن، تغییرات به وجود آمده ناچیز بود. با توجه به موارد مذکور می‌توان گفت که همان‌طور که در تحقیق Resch اشاره شد (۴)، نتایج درون آب تغییر چندانی

References

1. Sitti M, Hashimoto H. Force controlled pushing of nanoparticles: modeling and experiments. Proceedings of IEEE/ASME International Conference. 1999.
2. Tafazzoli A, Sitti M. Dynamic Behavior and Simulation of Nanoparticle Sliding During Nanoprobe-Based Positioning. Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2004 November 13 – 19; Anaheim, California; 2004. p. 965-72.
3. Habibnejad_Korayem M, Zakeri M. Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2009; 41(7-8): 714-26.

4. Resch R, Lewis D, Meltzer S, Montoya N, Koel BE, Madhukar A, et al. Manipulation of gold nanoparticles in liquid environments using scanning force microscopy. *Ultramicroscopy* 2000; 82(1-4): 135-9.
5. Frank BP. Intermolecular Forces of Marine Adhesive Molecules. [PhD Thesis]. New York, NY: Rensselaer Polytechnic Institute; 2001.
6. Jones RE, Hart DP. Force interactions between substrates and SPM cantilevers immersed in fluids. *Tribology International* 2005; 38(3): 355-61.
7. Gauthier M, Regnier S, Rougeot P, Chaillet N. Forces analysis for micromanipulations in dry and liquid media. *Journal of Micromechatronics* 2006; 3(3-4): 389-413.
8. Gauthier M, Nourine M. Capillary Force Disturbances on a Partially Submerged Cylindrical Micromanipulator. *IEEE Transactions on Robotics* 2007; 23(3): 600-4.
9. Israelachvili JN. Intermolecular and surface forces. 2nd ed. New York, NY: Academic Press; 2007.

Dynamic Modeling of 2D Nano-Manipulation based on Atomic Force Microscopy in Liquid Medium and Studying the Hydrodynamic and Geometric Parameters of the Model

Moharram Habibnejad Korayem PhD¹, Maneezheh Zakeri PhD², Ali Motaghi MSc²

Abstract

Background: Dynamic behaviors of probe tip and nanoparticles have been investigated by modeling the manipulation of nanoparticles in the air using atomic force microscopy (AFM) as a nano manipulator. This study evaluated the manipulation of submerged nanoparticles in liquid environment.

Methods: The artificial nanoparticle manipulation was analyzed by theoretical analysis of forces in liquids and dynamics of spherical nanoparticle pushing. Hydrodynamic drag force and surface tension of the liquid were then calculated and used in the new dynamic modeling. The problem was simulated for a gold nanoparticle on a silicon substrate in water.

Findings: The results showed that the required manipulation force and time for nanoparticle sliding and rolling increased by respectively 7% and 3% in water as compared to the air. Moreover, for various submerged lengths of the cantilever in water, the critical values related to sliding and rolling were delayed for 9% and 10.5%, respectively.

Conclusion: The required critical force and time for the manipulation in water showed a little increase over the existing values for air.

Keywords: Nano-manipulation, Atomic force microscopy, Liquid medium

¹ Professor, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

² Department of Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Corresponding Author: Moharram Habibnejad Korayem PhD, Email: hkorayem@iust.ac.ir