

## بررسی افت و خیزهای اصطکاک در مقیاس نانو مبتنی بر آمار وارون

بتول حسینی تلی<sup>۱</sup>، سکینه حسین آبادی<sup>۲</sup>، لاله فرهنگ متین<sup>۱</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۷/۲ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۵

**چکیده:** این مقاله با استفاده از روش آمار وارون به بررسی اصطکاک نمونه های تجربی NaCl در مقیاس نانو می پردازد. یکی از نظریه های تلاطم، آمار وارون است. در روش آمار وارون، که گاهی آمار فاصله اتلاف نیز نامیده می شود، متغیرها به گونه ای تغییر می کنند که متغیرهای نوسانی جایگزین متغیرهای ثابت، و برعکس می شوند.

در این پژوهش، نیروی اصطکاک اعمال شده بر روی نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، وقتی سوزن روی سطح تمیز NaCl (۰۰۱) در خلاء فوق العاده بالا در دمای اتاق کشیده می شود، بررسی می گردد. در اینجا، تمرکز روی افت و خیزهای نیروی اصطکاک است که با استفاده از روش آمار وارون، رفتار داده های سیگنال های اصطکاک در مقیاس نانو تحلیل می گردد. نتایج، رفتار تک مقیاسی فاصله اتلاف بر حسب تغییرات نیروی اصطکاک را نشان می دهد؛ حال آنکه آنالیز مستقیم نیروی اصطکاک بیانگر رفتار چندفرکتالی می باشد. همچنین احتمال تغییرات نیروی اصطکاک در بازه های بالا ( $\rho = 3\sigma$ ) نسبت به بازه های پایین ( $\rho = \sigma$ ) کمتر است.

**واژه های کلیدی:** اصطکاک نانو مقیاس، الگوی رفتار چسبان- لغزان، رفتار مقیاسی، همبستگی بین افت و خیزهای اصطکاک نانو مقیاس، چندفرکتالی، تک مقیاسی.

### ۱. مقدمه

تماس با درجه های آزادی میکروسکوپی مانند فونون ها یا برانگیختگی های الکترونیکی است. سازگاری میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای بررسی اصطکاک در تماس های مجزا تنها منجر به دانش عمیق مکانیسم های میکروسکوپی زمینه ای در سطوح و شرایط مختلف شد. اولین اندازه گیری های اصطکاک در مقیاس اتمی توسط میت و همکاران با حرکت سوزنی از جنس تنگستن روی زیرلایه گرافیت انجام شد. نیروی اصطکاک نانو مقیاس از اندازه گیری نیروی عرضی وارد بر سوزن توسط تداخل سنج نوری بدست می آید، این نیروی عرضی به شکل یک موج دندان اره ای به صورت تابعی از مکان (زمان) مشاهده می شود. دوره تناوب این موج برابر با ثابت شبکه گرافیت

اصطکاک بین دو سطح لغزشی، جدا از ایفای نقش اساسی در زندگی روزمره، پدیده ای است که از اهمیت اساسی برای انواع کاربردهای پیشرفته فناوری و مطالعات بنیادین علمی برخوردار است. درک اصطکاک در مقیاس اتمی به منظور دستیابی به راه های به حداقل رساندن سایش و اتلاف انرژی در دستگاه های میکرو و نانو مقیاس که از جمله تماس های لغزشی است، ضروری می باشد. اصطکاک لغزشی بدون سایش مربوط به انتقال انرژی از درجه های آزادی ماکروسکوپی ناشی از حرکت نسبی اجسام در

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال،

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق

هریک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نویزهای موجود در یک آزمایش AFM را به سه دسته نویز ردیابی (که مرتبط با اپتیک دستگاه است)، نویز نیرو (که مرتبط با افت و خیز گرمایی کانتیلور است) و نویز جابجایی (که مرتبط با نیروی کشسان است) تقسیم کردند. آن‌ها نشان دادند چگالی طیف توان روش خوب و قدرتمندی برای آنالیز نویزها است. با دانستن خواص آماری چگالی طیف توان اندازه‌گیری شده نویزهای مختلف سری AFM اصطکاک در مقیاس نانو را شبیه سازی کردند که می‌تواند اثر هر یک از نویزها را به صورت مجزا روی اصطکاک در مقیاس نانو نشان دهد.

مطالعات اخیر نشان دادند که افت و خیزهای اصطکاک در مقیاس نانو، مولتی فرکتال هستند و با نویز سفید توصیف نمی‌شوند [۱۶-۱۷].

در این مقاله، ما سعی داریم برخی از خصوصیات مکانی سیستم (با توجه به فواصل مختلف مکانی و بازه‌های ویژه) که می‌تواند برای طراحی سطح تماس مورد استفاده قرار گیرد، بیان کنیم. بنابراین، ما ویژگی‌های سری مکانی نیروی اصطکاک را وقتی که تغییرات نیروی اصطکاک کمتر و بیشتر می‌شوند، مطالعه می‌کنیم. برای این منظور، ما از روشی به نام آمار وارون استفاده کردیم که اخیراً برای بررسی تلاطم معرفی شده است [۱۸]. آمار وارون پیشنهاد می‌کند که معادله تابع ساختار، وارون شود و بجای در نظر گرفتن میانگین‌های فاصله بین دو نقطه، اختلاف نیروی اصطکاک مقادیر بین این نقاط در نظر گرفته شود [۱۸-۲۶]. این روش راهکار جایگزینی برای توصیف و تحلیل سیگنال‌های نیروی اصطکاک می‌باشد. در یک سری مکانی نیروی اصطکاک، می‌توان از آن برای مطالعه توزیع فاصله اتلاف مورد نیاز برای رسیدن به تغییر خاصی در اختلاف نیروی اصطکاک و همچنین برای بررسی تغییرات ناگهانی در نیروی اصطکاک استفاده کرد.

در این مقاله، این سوال مطرح می‌شود که تصویر وارون خواص مقیاسی اصطکاک در مقیاس اتمی چگونه است؟ آیا می‌توان گفت در اصطکاک نیز، انرژی در مقیاس‌های بزرگ انتقال یافته و در کوچکترین مقیاس که از مرتبه اتم

است. این رفتار دندان اره‌ای بخاطر ناپایداری کشسانی در حرکت سوزن و پرش آن بین مکان‌های همسایه در شبکه بوجود می‌آید. به این مشخصه حرکت در مقیاس اتمی، چسبان-لغزان اطلاق می‌شود و در آزمایش‌های متعدد اندازه‌گیری اصطکاک نانو مقیاس روی زیر لایه‌هایی از جنس مختلف مشاهده می‌شود [۱].

مدل پرنتل-تاملینسون (PT) یکی از موفق‌ترین مدل‌های پیشنهاد شده برای توصیف رفتار چسبان-لغزان اصطکاک نانو مقیاس ناشی از سوزن است. (جرم نقطه‌ای مانند سوزن بوسیله فنر هارمونیک با سرعت ثابت در امتداد سطح زیر لایه کشیده می‌شود) [۲-۳]. در این مدل، افت و خیزهای گرمایی سوزن به صورت یک عبارت نویز سفید گوسی فرمول‌بندی می‌شود [۴-۷].

ولی علاوه برافت و خیزهای گرمایی، پارامترهای دیگری مانند نویز دستگاه، نقص شبکه و غیره نیز وجود دارد. چون، در مقیاس اتمی، برهم کنش بین تک زبری و سطح از مرتبه نانو است، در نتیجه هر یک از این منابع نویز می‌تواند در اندازه‌گیری اصطکاک اتمی نقش ایفا کند و قابل چشم‌پوشی نیستند [۸-۹].

بنابراین در مطالعات متعدد تلاش شده سهم منابع دیگر نویز به صورت مجزا یا همزمان در مدل‌های تئوری اصطکاک در مقیاس نانو وارد شود برای مثال دانگ و همکاران [۱۰-۱۱] سهم نویز گرمایی و نویز دستگاه را به صورت نویز سفید در نظر گرفته و آن دو را به طور همزمان در معادله اصلی وارد کردند. نتایج آن‌ها، با مشاهدات تجربی در دمای پایین سازگار است.

همچنین در مطالعات دیگر به منظور بررسی تأثیر نقص سطح بر روی اصطکاک در مقیاس نانو، فجار دو و همکاران، شبیه سازی‌های عددی براساس مدل یک بعدی PT انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، نقص زیر لایه به طور خاص، نقش مهمی در اصطکاک اتمی در دماهای پایین بازی می‌کند. اگرچه در دماهای به اندازه کافی بالا، نوسانات حرارتی قادرند اثر نقص زیر لایه را بپوشانند [۱۲]. همچنین لابودا و همکاران [۱۳-۱۵] نویزهای مختلف یک آزمایش نوعی اصطکاک در مقیاس نانو را شناسایی و اثر

تغییر بین اختلاف سرعت اندازه‌گیری شده در فاصله جدایی  $r$ ، با نمای مقیاسی  $q$ ، توصیف می‌شود، که بصورت زیر است:

$$\langle \Delta u(r) |^q \rangle \sim r^{\xi q} \quad (2)$$

تابع ساختار وارون یک روش جایگزین برای مطالعه رابطه بین جدایی فیزیکی و افزایش سرعت با وارون کردن معادله تابع ساختار و میانگین‌گیری ممان‌های فواصل به عنوان تابعی از افزایش سرعت پیشنهاد می‌کند. تابع ساختار وارون به این صورت تعریف شده است:

$$\langle r(\Delta u)^q \rangle \sim |\Delta u|^{\delta q} \quad (3)$$

که در آن  $r(\Delta u)$  کمترین فاصله از  $x$  (مبدأ مکان) است که اختلاف سرعت به مقدار مشخص و از پیش تعیین شده  $\Delta u$  می‌رسد و  $\delta q$  نمای مقیاسی تابع ساختار وارون با ممان  $q$  است [۱۸، ۳۰]. به بیان دیگر، یک مقدار مشخص برای اختلاف سرعت  $\Delta u$  در نظر گرفته می‌شود و با شروع از نقطه  $x$ ، فاصله‌های  $r(\Delta u)$  مورد بررسی قرار می‌گیرد که اختلاف سرعت را به مقدار از پیش تعیین شده  $\Delta u$  برسانند. به این آمار، اصطلاحاً "آمار فاصله خروج" یا "آمار وارون" گفته می‌شود.

مطالعه داده‌ها، مشابه آنچه در سیستم‌های آشوبناک وجود دارد، اطلاعات غیربدیهی زیادی را بدست می‌دهد. با میانگین‌گیری روی مکان و یا زمان، تابع ساختار فاصله،  $\langle r(\Delta u)^q \rangle \sim |\Delta u|^{\delta q}$  بدست می‌آید. شیب نمودار لگاریتم  $\langle r \rangle$  نسبت به  $|\Delta u(r)|$ ، نسبت  $\delta q$  به  $q$  را نشان می‌دهد.

### ۳. داده‌های آزمایش

برای اندازه‌گیری اصطکاک نانو مقیاس، یک میکروسکوپ نیروی اتمی در خلاء بسیار بالا و در دمای اتاق بکار گرفته می‌شود. نیروی اصطکاک از نیروهای عمودی و عرضی وارد بر سوزن بدست می‌آیند که به ترتیب متناسب با خمش

است، آزاد می‌شود؟ بعبارتی آیا مقیاس وارون کولموگروف می‌تواند افت و خیزهای اصطکاک در مقیاس نانو را توجیه نماید؟ اگر اینگونه باشد و مقیاس وارون تأیید شود، باید خواص مقیاسی در افت و خیزهای اصطکاک در مقیاس نانو حاکم باشد و انرژی جنبشی از مقیاس‌های بزرگتر به مقیاس‌های کوچکتر انتقال یافته و به دلیل نیروهای الکتروستاتیکی بین اتمی در مقیاس اتمی بصورت گرما آزاد شود. برای پاسخ به این سوال، رفتار مقیاسی یک نمونه اصطکاک اتمی، بین سوزن AFM و سطح صاف NaCl با استفاده از روش آمار وارون که برای اولین بار برای مطالعه تلاطم معرفی شده است، مورد بررسی قرار گرفت.

در این مقاله، با انجام تجزیه و تحلیل آمار وارون بر روی نمونه‌های تجربی NaCl در مقیاس نانو، توزیع فاصله اتلاف برای یک مقدار مشخصی از تغییرات اختلاف نیروی اصطکاک بررسی شد. طرح کلی این مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم، آمار وارون با جزئیات مورد بحث قرار می‌گیرد. بخش سوم جزئیات آزمایش نانو اصطکاک را توضیح می‌دهد. شرح و تجزیه و تحلیل داده‌ها مبتنی بر این روش در بخش چهارم آورده شده است. در بخش پایانی نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

### ۲. روش آمار وارون

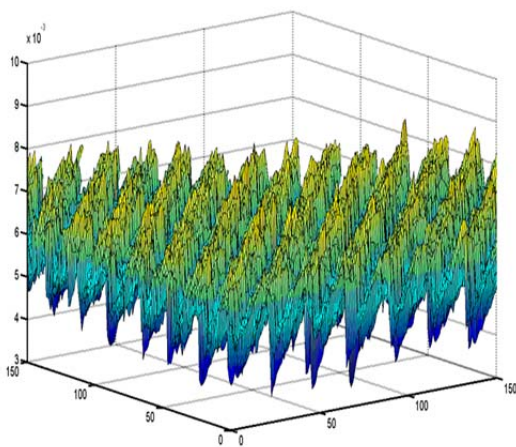
کولموگروف پیشنهاد کرد که ساختار آبشار تلاطم، انتقال انرژی جنبشی تلاطم بین مقیاس‌های مختلف حرکت در یک جریان آشفته را توصیف می‌کند [۲۹-۲۷]. تابع ساختار میدان سرعت، با در نظر گرفتن اختلاف سرعت بین دو نقطه، افزایش تغییرات سرعت با ممان  $q$  و مطالعه تغییر در فاصله بین نقاط جریان را در حالت متلاطم بررسی می‌کند. اختلاف سرعت  $\Delta u(x, r)$  از تفاضل سرعت مشاهده شده در مکان‌های  $x+r$  و  $x$  بدست می‌آید که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta u(x, r) = u(x+r) - u(x) \quad (1)$$

پرتو و فرکانس اولین مد خمش عمودی برای تعیین ضخامت کانتیلور محاسبه شد.

نیروی اصطکاک بر روی  $256 \times 256$  نقاط شبکه نمونه برداری می شود که به صورت یکنواخت در ناحیه  $6 \times 6 \text{ nm}^2$  توزیع شده است (شکل (۱) را مشاهده کنید). به عبارت دیگر، مجموعه داده ها شامل  $256$  خط اسکن است و هر خط شامل  $256$  داده که به فاصله مساوی  $0.23 \text{ A}^\circ = \frac{6 \text{ nm}}{256}$  قرار دارند. طول هر خط اسکن در جهت کریستالوگرافی [001] برابر  $6 \text{ nm}$  است، یعنی سوزن در اسکن هر خط بطور متناوب حداقل  $10$  یون Na و  $10$  یون Cl می بیند. یا به عبارتی در اسکن هر خط، اصطکاک با گام هایی به طول  $0.23 \text{ A}^\circ$  ثبت می شود.

$$K_N = \frac{Ewt^3}{4l^3} \quad (۴)$$



شکل ۱: نقشه نیروی عرضی از سطح NaCl در دمای اتاق و خلاء بسیار بالا وقتی سوزن در جهت (۰۰۱) حرکت می کند. این نقشه شامل  $256 \times 256$  نقاط شبکه است که به صورت یکنواخت روی مساحت  $6^2 \text{ nm}^2$  توزیع شده است.

شکل (۲) اصطکاک را نسبت به مکان سوزن در امتداد یک خط اسکن که با خط چین مشخص شده، نشان می دهد. مشاهده می شود نیروی اصطکاک شامل یک روند شبه پریودیک (دندان اره ای) با دوره تناوبی منطبق با ثابت

عمودی و چرخشی کانتیلور هستند. هر دو این نیروها توسط انحراف پرتو نور اندازه گیری می شوند.

نمونه مورد مطالعه، تک بلور NaCl است که در هوا بریده شده و سریع به خلاء بسیار بالا منتقل می شود. برای از بین بردن آلاینده ها، نمونه در دمای  $100$  درجه سانتی گراد به مدت  $30$  دقیقه حرارت داده می شود. آماده سازی نمونه در خلاء بسیار بالا، امکان مطالعه سطوح تمیز، بدون آب و مواد جذب شده را فراهم می کند.

در این تحقیق، آزمایش های اصطکاک بدون روان کننده، روی سطوح خشک و تمیز انجام می شود. و از کانتیلور سیلیکونی شامل مواد تک بلور استفاده شده است. سوزن هرمی شکل در جهت [001] روی سطح حرکت می کند و دارای یک مخروط میکروسکوپی است. در انتها، زاویه مخروط کاهش می یابد شعاع اسمی آن کمتر از  $10 \text{ A}^\circ$  است [۳۱-۳۳].

برای تفسیر کمی تصاویر میکروسکوپ نیروی اصطکاک، خمش عمودی و چرخشی، کانتیلور باید کالیبره شود [۳۴-۳۷]. ثابت عمودی فنر  $K_N$  برای کالیبره کردن نیروی عمودی برابر است با:

$$K_T = \frac{Gwt^3}{3h^2l} \quad (۵)$$

که  $w$  پهنا،  $l$  طول،  $t$  ضخامت کانتیلور،  $E$  مدول یانگ مواد است. برای سیلیکون  $E = 1.69 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  است [۳۸-۳۹].

ثابت پیچشی فنر  $K_T$  برای کالیبره کردن نیروی عرضی برابر است با [۴۰، ۳۴]:

که (برای سیلیکون  $G = 0.5 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ) مدول برشی است.

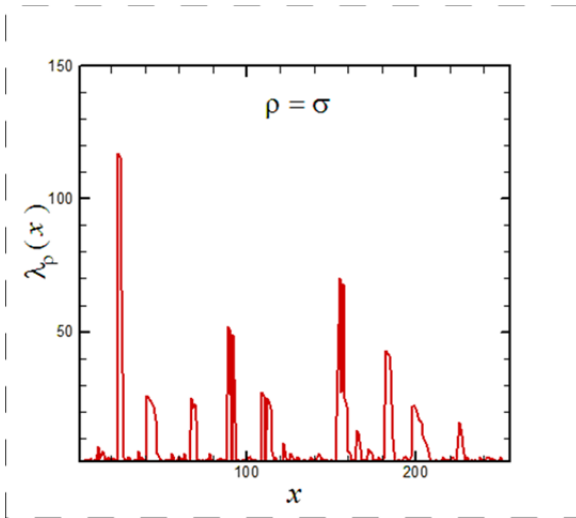
در این پژوهش، ثابت فنر سیلیکون کانتیلور که سوزن تیز را حمل می کند، برای خمش عمودی  $K_N = 0.09 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  و برای پیچش  $K_T = 62 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  است. برای پرتو هندسی، ثابت های فنر با استفاده از داده های میکروسکوپ نوری برای طول و پهنا

(۲) پیدا کردن کوچکترین  $\lambda$  برای هر  $x$ ، که برای آن  $\Delta f_x(\lambda)$  به بازه  $3\sigma$  و  $2\sigma$  و  $1\sigma = \rho$  برسد.

(۳) تشکیل توابع  $\lambda(x)$ ،  $\lambda_2(x)$  و  $\lambda_3(x)$  برای بازه های انتخاب شده.

(۴) محاسبه توزیع  $P(\lambda)$  برای هر مجموعه داده.

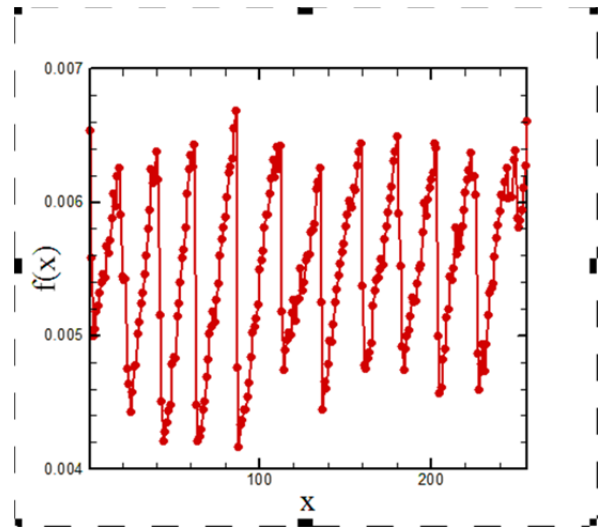
نمودار میانگین فاصله بر حسب تغییرات نیروی اصطکاک در روش آمار وارون در شکل (۳) ترسیم شده است. همچنین نمودار فاصله اتلاف  $\lambda$  بر حسب فاصله برای بازه  $\rho = \sigma$  در شکل (۴) نشان داده شده است که کوچکترین فاصله اتلاف ( $\lambda$ ) برای هر  $x$ ، بر اساس مرحله (۲) الگوریتم، برای  $\Delta f_x(\lambda) \geq (\rho = \sigma)$  بدست می آید.



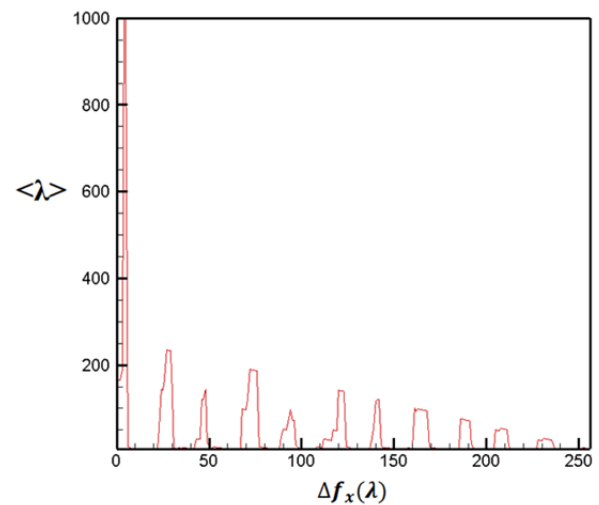
شکل ۴: کوچکترین فاصله اتلاف ( $\lambda$ ) برای هر  $x$ ، که برای  $\Delta f_x(\lambda) \geq (\rho = \sigma)$

توزیع فاصله اتلاف برای تغییرات کم ( $\rho = \pm\sigma$ ) و تغییرات زیاد ( $\rho = \pm 3\sigma$ ) در شکل (۵) رسم شده است. با مقایسه دو منحنی شکل (۵) (ب)، می توان فهمید که منحنی  $\rho = 3\sigma$  بالای منحنی  $\rho = -3\sigma$  قرار دارند، که تضمین می کند افزایش و کاهش نیروی اصطکاک در بازه  $\rho = 3\sigma$  سریع تر از بازه  $\rho = -3\sigma$  صورت می گیرد.

شبکه NaCl برابر  $0.56 \text{ nm}$  است. نیروی عمودی ثابت نیست و با تغییر مکان عرضی سوزن، تغییر می کند.



شکل ۲: نیروی اصطکاک نسبت به مکان سوزن در امتداد یک جهت افقی بر حسب مکان نوک میکروسکوپ نیروی اتمی.



شکل ۳: نمودار میانگین فاصله بر حسب تغییرات نیروی اصطکاک در روش آمار وارون.

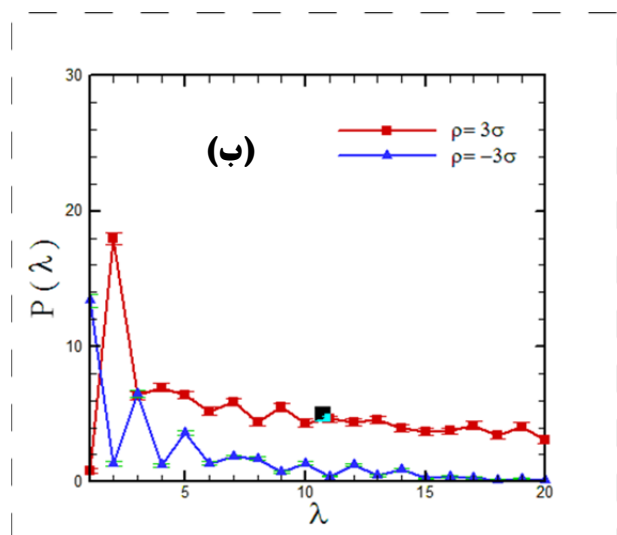
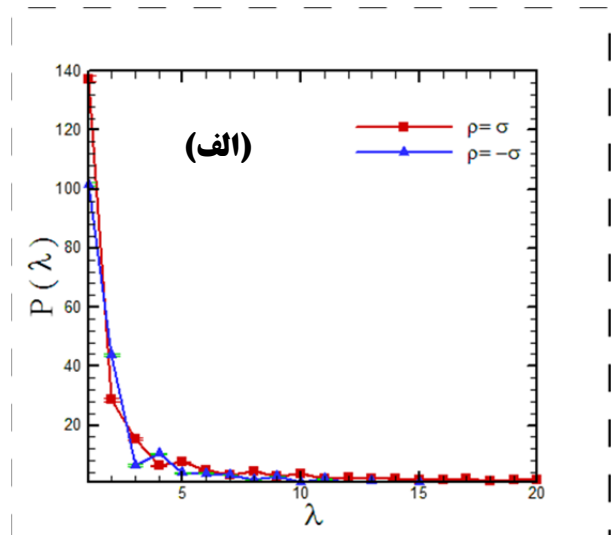
#### ۴. شرح و تجزیه و تحلیل داده ها

به منظور بررسی ویژگی های آمار وارون نمونه های تجربی NaCl در مقیاس نانو، ما تجزیه و تحلیل را روی نمونه های تجربی NaCl در مقیاس نانو انجام دادیم. الگوریتم به طور خلاصه شرح داده شده است [۴۲]:

(۱) ساخت سری  $\Delta f_x(\lambda)$  از سری نیروی اصطکاک.

فاصله اتلاف برای بازه‌های بزرگتر ( $\rho = 3\sigma$ )، نسبت به بازه‌های کوچکتر ( $\rho = \sigma$ ) بیشتر است. بیشینه احتمال رسیدن به اختلاف نیروی اصطکاک بیشتر در بلور NaCl در بازه  $\rho = \sigma$  در گام اول ( $0.23 \text{ \AA}$ ) قرار دارد، در حالی که بیشینه احتمال رسیدن به اختلاف نیروی اصطکاک بیشتر در بازه  $\rho = 3\sigma$  در فاصله بیشتری یعنی ( $2 \times 0.23 \text{ \AA}$ ) صورت می‌گیرد. بنابراین برای رسیدن به اختلاف نیروی اصطکاک بیشتر، باید فاصله بیشتری طی شود.

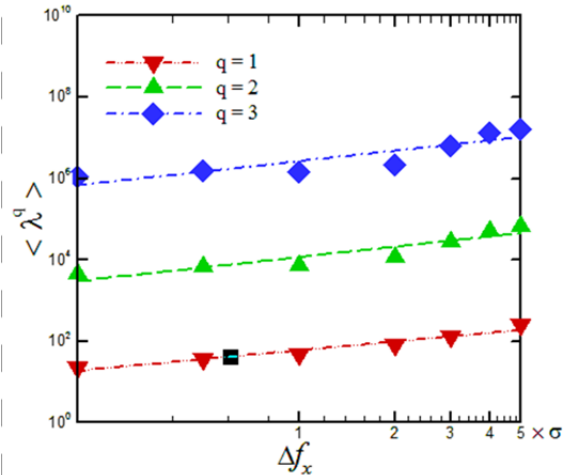
برای بررسی اثر بازه‌ها در تغییرات افت و خیزهای نیروی اصطکاک، نمودار توزیع آمار وارون (فاصله اتلاف  $\lambda$ ) مربوط به یک سری داده نیروی اصطکاک NaCl برای رسیدن به بازه‌های  $\rho = \pm\sigma$ ،  $\rho = \pm 2\sigma$  و  $\rho = \pm 3\sigma$  در شکل (۶) نشان داده شده است. شکل (۶الف) نمودار توزیع فاصله اتلاف برای بازه‌های  $\rho = \pm\sigma$  و  $\rho = \pm 3\sigma$  در مقیاس نانو را نشان می‌دهد. چنین منحنی‌هایی نشان دهنده توزیع احتمال فاصله‌های اتلاف برای مشاهده نیروی اصطکاک در فاصله‌های بیشتر از  $\rho$  است. توزیع فاصله اتلاف همان مجموعه داده‌ها برای بازه‌های  $\rho = -3\sigma$  و  $\rho = -2\sigma$  و  $\rho = -\sigma$  در شکل (۶ب) نشان داده شده است. از مقایسه شکل (۶الف) و (۶ب) می‌توان نتیجه گرفت، برای نمونه‌های تجربی NaCl در مقیاس نانو، منحنی‌های بازه  $\rho = \pm\sigma$  بالاتر از دو بازه دیگر قرار دارد و منحنی‌های بازه  $\rho = \pm 3\sigma$  پایین‌تر از دو بازه دیگر قرار دارد. این مقایسه منجر به این واقعیت می‌شود که مقدار بیشینه توزیع که نمایانگر حداکثر احتمال برای رسیدن به اختلاف نیروی اصطکاک مورد نظر است، برای بازه‌های پایین و مثبت زودتر از بازه‌های منفی صورت می‌گیرد.



شکل ۵: الف) توزیع احتمال فاصله اتلاف مورد نیاز برای دستیابی به بازه  $\rho = \sigma$  و  $\rho = -\sigma$  (ب) بازه‌های  $\rho = 3\sigma$  و  $\rho = -3\sigma$

از مقایسه دو نمودار شکل (۵) به ترتیب مربوط به توزیع احتمال فاصله اتلاف مورد نیاز برای دستیابی به بازه‌های  $\rho = \pm\sigma$  و  $\rho = \pm 3\sigma$ ، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش و کاهش نیروی اصطکاک در بازه‌های  $\rho = \pm\sigma$  تقریباً منطبق بر یکدیگر هستند ولی افزایش و کاهش نیروی اصطکاک در بازه‌های  $\rho = \pm 3\sigma$  اختلاف قابل توجهی در توزیع احتمال فاصله اتلاف مشاهده می‌شود. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، تغییرات نیروی اصطکاک در بازه‌های کمتر ( $\rho = \sigma$ )، نسبت به بازه‌های بزرگتر ( $\rho = 3\sigma$ ) با احتمال بیشتری صورت می‌گیرد. علاوه بر این، توزیع

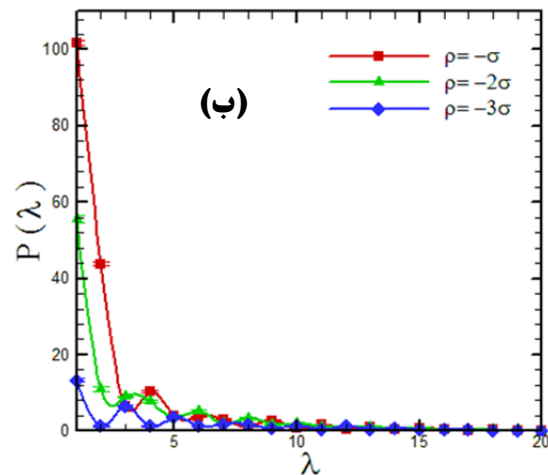
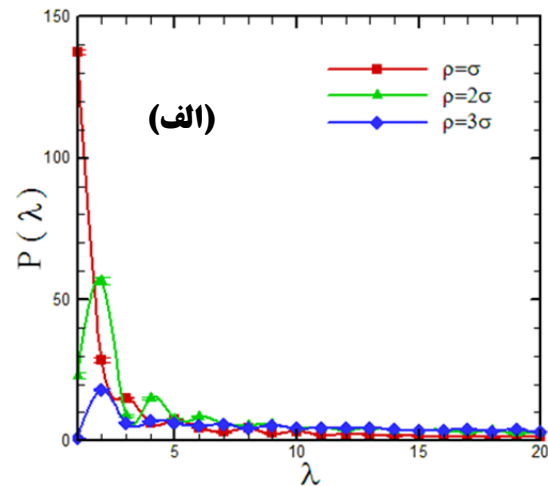
شکل (۷) نمودار لگاریتمی میانگین فاصله اتلاف مرتبه  $q$   $\langle \lambda^q \rangle$ ، بر حسب تغییرات نیروی اصطکاک  $\Delta f_x$  را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، شیب نمودار برای مقادیر مختلف  $q$  یکسان است که رفتار تک‌فرکتالی را تایید می‌کند.



شکل ۷- نمودار لگاریتمی میانگین فاصله خروج مرتبه  $q$   $\langle \lambda^q \rangle$ ، بر حسب تغییرات نیروی اصطکاک  $\Delta f_x$ .

### ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، نیروی اصطکاک نانو مقیاس از نیروی عرضی وارد بر سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی که در دمای اتاق و خلاء بسیار بالا در امتداد سطح صاف  $\text{NaCl}[001]$  کشیده می‌شود، بدست آمده و رفتار دندان اره‌ای مشاهده شد. در این مطالعه، سیگنال‌های نیروی اصطکاک نانو مقیاس با استفاده از تجزیه و تحلیل آمار وارون، رویکرد جدیدی برای بررسی سری مکانی نیروی اصطکاک نانومقیاس در نمونه‌های تجربی  $\text{NaCl}$  ارائه شده است. به طور خاص، شباهت و تفاوت بین توزیع فاصله اتلاف برای بازه‌های مختلف بررسی شد. به عنوان یک نتیجه مهم، هیچ تفاوت اساسی بین سری‌های مکانی نمونه‌های تجربی  $\text{NaCl}$  در مقیاس نانو در بازه پایین  $(\rho = \pm \sigma)$  مربوط به تغییرات نیروی اصطکاک با احتمال تغییرات نیروی اصطکاک بالا وجود ندارد.



شکل ۶: نمودار توزیع آمار وارون (فاصله اتلاف  $\lambda$ ) مربوط به یک سری داده نیروی اصطکاک  $\text{NaCl}$  برای رسیدن به بازه های  $\rho = \pm 3\sigma$  و  $\rho = \pm 2\sigma$ ،  $\rho = \pm \sigma$ .

برای بررسی رفتار مقیاسی تک‌فرکتالی یا چندفرکتالی افت وخیزهای نانو اصطکاک، نمودار لگاریتمی میانگین فاصله اتلاف مرتبه  $q$ ،  $\langle \lambda^q \rangle$ ، بر حسب تغییرات نیروی اصطکاک  $\Delta f_x$  باید بررسی شود. شیب این نمودار رابطه میان نماها را مشخص می‌کند. ما برای مقادیر مختلف  $q$ ، میانگین فاصله اتلاف مرتبه  $q$  را تعیین کردیم. اگر شیب نمودار لگاریتمی میانگین فاصله اتلاف برای ممان‌های مختلف  $q$ ، ثابت باشد، بنابراین رفتار مقیاسی برای مقیاس‌های مختلف، یکسان و تک‌فرکتالی است، ولی اگر شیب متغیر باشد، رفتار چندفرکتالی خواهد بود.

### مراجع

- [1]. C.M. Mate, G.M. McClelland, R. Erlandsson, S. Chiang, Phys. Rev. Lett. 59, 1942 (1987)
- [2] L. Prandtl, J. Appl. Math. Mech. 8, 85 (1928).
- [3] G. T. Tomlinson, London Edinburgh Dublin Philos. Mag. J. Sci. 7, 905 (1929).
- [4] Y. Sang, M. Dubé, and M. Grant, Phys. Rev. Lett. 87, 174301(2001).
- [5] L. Jansen, H. Hölscher, H. Fuchs, and A. Schirmeisen, Phys. Rev. Lett. 104, 256101 (2010).
- [6] I. Barel, M. Urbakh, L. Jansen, and A. Schirmeisen, Phys. Rev. Lett. 104, 066104 (2010).
- [7] E. Gnecco, R. Bennewitz, T. Gyalog, C. Loppacher, M. Bammerlin, E. Meyer, and H.-J. Güntherodt, Phys. Rev. Lett. 84, 1172 (2000).
- [8] A. E. Filippov and V. L. Popov, Phys. Rev. E 75, 027103 (2007).
- [9] V. L. Popov, J. Starcevic, and A. E. Filippov, Phys. Rev. E 75, 066104 (2007).
- [10] Y. Dong, H. Gao, and A. Martini, Europhys. Lett. 98, 16002(2012).
- [11] Y. Dong, H. Gao, A. Martini, and P. Egberts, Phys. Rev. E 90,
- [12] O.Y. Fajardo, I. Barel, and M. Urbakh, J. Phys.: Condens. Matter 26, 315005 (2014).
- [13] A. Labuda, M. Lysy, and P. Grütter, Appl. Phys. Lett. 101, 113105 (2012).
- [14] A. Labuda, M. Lysy, W. Paul, Y. Miyahara, P. Grütter, R. Bennewitz, and M. Sutton, Phys. Rev. E 86, 031104 (2012).
- [15] A. Labuda, J. R. Bates, and P. H. Grütter, Nanotechnology 23, 025503 (2012).
- [16] M. Jannesar, T. Jamali, A. Sadeghi, S. M. S. Movahed, G. Fesler, E. Meyer, B. Khoshnevisan, and G. R. Jafari, Phys. Rev. E 95, 062802 (2017).
- [17] M. Jannesar, A. Sadeghi, E. Meyer and G. R. Jafari, Scientific Reports 9, 12505 (2019).
- [18] M. H. Jensen, Phys. Rev. Lett. 83(1), 76 (1999).
- [19] Karlin S A, 1966 First Course in Stochastic Processes (New York: Academic) (1966).
- Ding M and Rangarajan G, Phys. Rev. E 52 207(1995).
- Rangarajan G and Ding M, Phys. Lett. A 273 322(2000).
- [20] Simonsen I, Jensen M H and Johansen A, Eur. Phys. J. B 27 583(2002).
- [21] Johansen A, Physica A 234 157(2003).

با این حال، در رویدادهای نادر ( $\rho = \pm 3\sigma$ ) سری‌های مکانی نمونه‌های تجربی NaCl در مقیاس نانو، اختلاف معناداری وجود دارد. در هنگام مطالعه توزیع احتمال فاصله اتلاف در دو مورد  $\rho = \pm \sigma$  و  $\rho = \pm 3\sigma$ ، ویژگی‌های مهم این دو مجموعه داده مشاهده شد. برای نمونه‌های تجربی NaCl در مقیاس نانو، منحنی‌های بازه  $\rho = \sigma$  مربوط به تغییرات نیروی اصطکاک با احتمال بیشتر است.

با بررسی توزیع فاصله اتلاف می‌توان فاصله‌ای را که بیشینه احتمال رسیدن به اختلاف نیروی مطلوب را داشته باشد، تعیین نمود. بیشینه احتمال رسیدن به اختلاف نیروی اصطکاک بیشتر در بلور NaCl در بازه  $\rho = \sigma$  در گام اول (یا ۰/۲۳A) است. بیشینه منحنی تابع توزیع برای اختلاف نیروی اصطکاک بیشتر در فاصله بزرگتر رخ می‌دهد، بدین معنا که بیشینه احتمال رسیدن به اختلاف نیروی اصطکاک کمتر در فاصله کمتری نسبت به اختلاف نیروی اصطکاک بیشتر قرار دارد. بیشینه احتمال رسیدن به اختلاف نیروی اصطکاک در بلور NaCl در  $\rho = 3\sigma$  در فاصله بیشتر یعنی گام دوم (۰/۲۳A × ۲) رخ می‌دهد؛ یعنی، برای رسیدن به یک اختلاف نیروی اصطکاک بزرگتر، فاصله بیشتری روی سطح باید طی شود. همچنین تغییرات  $(\lambda^q)$ ، بر حسب تغییرات نیروی اصطکاک  $\Delta f_x$  خطی و تک فرکتال است.

به طور کلی، در این مطالعه، افت و خیزهای نیروی اصطکاک سطح NaCl با استفاده از روش آمار وارون بررسی شد. توزیع حداقل فاصله‌ها برای دستیابی به مقادیر از پیش تعیین شده نیروی اصطکاک بدست آمد. اگرچه، نشان داده شده است که افت و خیزهای نیروی نانو اصطکاک NaCl مولتی فرکتالی است و نمای تعمیم یافته کلی هارست، بر حسب مقادیر مختلف  $q$ ، رفتار چند مقیاسی را تأیید می‌کند [۱۶]، اما در این پژوهش نشان داده شد که تابع ساختار وارون برای مقادیر مختلف نیروی اصطکاک از رفتار تک مقیاسی تبعیت می‌کند و فاصله بر حسب اصطکاک رفتار تک مقیاسی دارد. و آنچه از نتیجه این تحلیل دیده می‌شود این است که آمار وارون، ویژگی‌های مهمی از سری مکانی نیروی اصطکاک NaCl در مقیاس نانو را آشکار می‌کند.



- [33] E. Meyer, R. Overney, D. Brodbeck, L. Howald, R. Luthi, J. Frommer, and H.-J. Guntherodt, *Phys. Rev. Lett.* 69, 1777 (1992).
- [34] E. Meyer, R. Overney, K. Dransfeld, and T. Gyalog, *Nanoscience: Friction and Rheology on the Nanometer Scale* (World Scientific, Singapore, 1998).
- [35] M. Nonnenmacher, J. Greschner, O. Wolter, and R. Kassing, *Scanning force microscopy with micromachined silicon sensors*, in *J. Vac. Sci. Technol. B*, 9, 1362–1358(1991).
- [36] J. Cleveland, S. Manne, D. Bocek, and P. Hansma, *Review of Scientific Instruments*, 64, 403(1993).
- [37] J. E. Sader, *Journal of Applied Physics*, 84, 64. (1998).
- [38] G. Meyer and N. M. Amer, *Appl. Phys. Lett.* 57, 2089 (1990).
- [39] G. Neubauer, S. R. Cohen, G. M McClelland, D. Horne, and C. M. Mate, *Rev. Sci. Instrum.* 61, 2296 (1990).
- [40] R. Luthi, E. Meyer, M. Bammerlin, L. Howald, H. Haefke, T. Lehmann, Ch. Loppacher, and H.-J. Guntherodt, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 14, 1280 (1996).
- [41] G. Fessler, A. Sadeghi, T. Glatzel, S. Goedecker, E. Meyer, *Tribology Letters* 67, 59 (2019).
- [42] H. Ebadi, A. H. Shirazi, Ali R. Mani, and G R Jafari, *J. Stat. Mech.* P08014 (2011).
- Jensen M H, Johansen A, Petronic F and Simonsen I, *Physica A* 340 678(2004).
- [22] Jensen M H, Johansen A and Simonsen I, *Int. J. Mod. Phys. B* 17 4003(2003).
- [23] Ebadi H, Bolgorian M and Jafari G R, *Physica A* 389 5439(2010).
- [24] Jafari G R, Movahed M S, Fazeli S M and Reza Rahimi Tabar M, *J. Stat. Mech.* P06008(2006).
- [25] Vahabi M and Jafari G R, *Physica A* 388 3859(2009).
- Vahabi M, Hedayatifar L and Jafari G R, *Physica A* 389 1915(2010).
- [26] M.H. Jensen, A. Johansen, I. Simonsen, *Physica A* 324 338. (2003).
- [27] N. Kolmogorov, *Proc. Math. Phys. Sci.* 32(1), 15–17 (1941).
- [28] A. N. Kolmogorov, *J. Fluid Mech.* 13(01), 82–85 (1962).
- [29] N. Ali, A. S. Aseyev, and R. B. Cal, *J. Renewable Sustainable Energy* 8(1), 013304 (2016).
- [30] S. Beaulac and L. Mydlarski, *Phys. Fluids* 16(6), 2126–2129 (2004).
- [31] R. M. Overney, R. Luthi, H. Haefke, J. Frommer, E. Meyer, H.-J. Guntherodt, S. Hild, and J. Fuhrmann, *Appl. Surf. Sci.* 64, 197 (1993).
- [32] R. Luthi, H. Haefke, E. Meyer, L. Howald, H. P. Lang, G. Gerth, and H.-J. Guntherodt. *J. Phys. B. Condensed Matter*, 95, 1(1994).