

## تصحیح تصویر حاصل از پروفایلومترها از سطوحی با زبری نانومتری

مجید سلامی<sup>۱\*</sup>، مریم زمانی<sup>۲</sup>، سیدمهدی فاضلی<sup>۳</sup> و غلامرضا جعفری<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، تهران، ایران

۲- گروه فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳- گروه فیزیک، دانشگاه قم، قم

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۹/۰۱/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۹/۰۳/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۹/۰۶/۲۹

### چکیده

در این مقاله نشان می‌دهیم که فرآیندهای مارکوف نقشی اساسی در جاروب سطح زیر و مشخص کردن توپوگرافی آن سطح دارند. توپوگرافی سطح حاصل شده از یک پروفایلومتر مانند میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscope) AFM، وابسته به برهمکنش سطح با سوزن پروب است. وقتی سایز سوزن پروب با تغییرات ارتفاع سطح قابل مقایسه باشد، تصویر سطح نسبت به سطح اصلی مقداری متفاوت خواهد داشت. اثر سوزن باعث بوجود آمدن یک تلاقی در تابع ساختار سطح می‌شود. برای مقیاس‌های کوچکتر از طول مارکوف - مقیاس طول مینیمم بر روی فرآیندی که مارکوف باشد - تابع تصادفی که سطح زیر را توصیف می‌کند غیر مارکوفی است، درحالی‌که برای مقیاس طول بزرگتر از طول مارکوف، سطح می‌تواند توسط یک فرآیند مارکوف توصیف شود. سطوح زیر مصنوعی تولید شده با روش (Fractional Gaussian Noise) FGN، به خوبی سطح زیر  $V_2O_5$  حاصل شده توسط AFM، این نتایج را تایید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** فرآیند مارکوف، طول مارکوف، میکروسکوپ نیروی اتمی، سوزن پروب، سطح زیر.

### ۱- مقدمه

بوسیله روش‌های پروفایلی مانند روش AFM، متاثر از برهمکنش بین سوزن پروب میکروسکوپ و نمونه می‌باشد. قلب دستگاه AFM یک سوزن تیز از جنس  $Si_3N_4$  است که روی نگهدارنده سرامیکی سوار شده است. نیروی برهمکنش میان اتم‌های سر سوزن با اتم‌های نمونه را می‌توان از منحنی نیروی لنارد جونز تخمین زد. در مد تماسی AFM نزدیک بودن سوزن به نمونه باعث بوجود آمدن نیروی برهمکنش میدان نزدیک و اندروالسی می‌شود و در روش غیرتماسی NC-AFM برهمکنش میان سوزن و

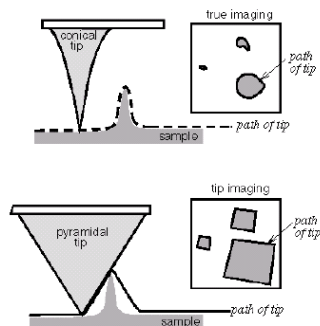
پیدا کردن توپوگرافی سطوح زیر، و تاثیر توپوگرافی بر ویژگیهای ماده، موضوع مورد علاقه در بیش از دو دهه گذشته بوده است [۸-۱]. استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی AFM، برای اندازه گیری افت و خیزهای سطح، روش قدرتمندی برای تصویربرداری با دقت بالا و مشخص کردن افت و خیزهای با مقیاس نانو و میکرو در سطوح مواد مختلف می‌باشد [۲۷-۹]. اکثر فرآیندهای تصویرسازی

\* عهده‌دار مکاتبات: مجید سلامی

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فیزیک پلاسما

تلفن: ۰۲۷۳-۳۳۹۴۵۳، دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۹۴۲۸۳، پست الکترونیکی: majidsalami@yahoo.com

تیزتر از پروب هستند تصویرشان تحت تاثیر شکل پروب قرار خواهد گرفت.

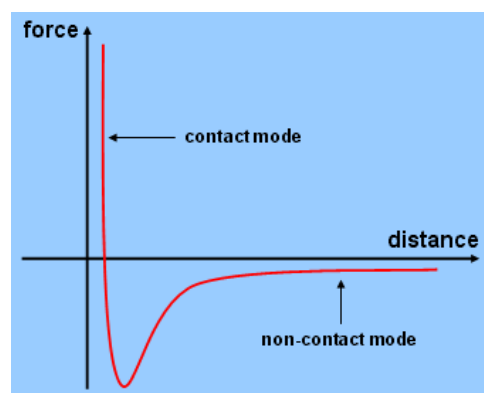


شکل ۲: مقایسه تصویر حقیقی و تصویر پروب سوزنی.

در بعضی از شیوه‌ها در صورتی که خواص فیزیکی سطح رعایت نشود ممکن است ساختارهای کاذبی در تصویر مشاهده شود مثلاً اگر خواص رسانش الکتریکی در نقاط مختلف سطح فرق کند تصویر برداری در شیوه STM (Scanning Tunneling Microscope) ساختار کاذبی را نشان می‌دهد. همچنین سطح نرم یا کشسان نواقصی در تصویر با شیوه AFM نشان خواهد داد.

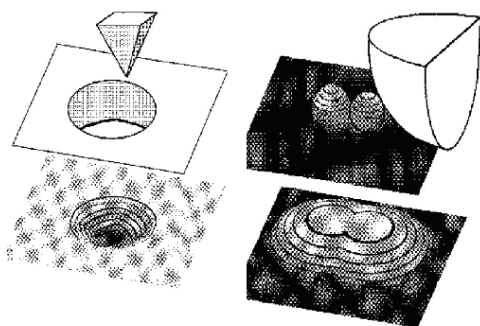
یکی از دغدغه‌های موجود در تصاویر حاصل از زبری سنج‌ها، میزان اعتماد به واقعی بودن این تصاویر است. یکی از علت‌های اصلی این دغدغه به نحوه جاروب شدن سطوح به وسیله زبری سنج باز می‌گردد. در واقع تصویربرداری به کمک تحلیل برهمکنش سطح و سوزن صورت می‌گیرد. اما باید به خاطر داشته باشیم که سوزن دارای ابعاد فیزیکی است و این شکل سوزن خود باعث برهمکنش اضافی بین سطح مواد می‌گردد. برخی از گزارشات حاکی از توجه بعضی از نویسندگان به اثرات سایز محدود سوزن AFM بوده است [۲۸-۳۰]. این دغدغه وقتی قوت می‌گیرد که مقیاس تصویربرداری از مرتبه ابعاد سوزن باشد. بسیاری از مقالات از این اثر به عنوان پیچیدگی سوزن (Tip Convolution) یاد می‌کنند. شکل ۳ به طور شماتیک دو بعدی تصویر حاصل از سوزن مثلی را نشان می‌دهد که چگونه اثرات سایز سوزن در تصویربرداری سطح اثر گذاشته است.

نمونه میدان دور و اندروالسی است (شکل ۱). روش غیر تماسی برای سطوح مواد نرم مناسب‌تر است. فاصله‌ای که در رژیم تماسی، نگهدارنده با سطح نمونه دارد باعث نیروی دافعه بین سطح و نگهدارنده می‌شود. در روش غیرتماسی، نگهدارنده در فاصله‌ای از مرتبه ۱۰ الی ۱۰۰ آنگستروم از سطح نمونه قرار گرفته و نیروی بین نمونه و نگهدارنده از نوع جاذبه است. سوزن روی قسمت آزاد یک نگهدارنده ۱۰۰ الی ۲۰۰  $\mu\text{m}$  سوار است. نیروی بین سوزن و سطح نمونه باعث خم شدن و یا منحرف شدن نگهدارنده می‌شود و یک آشکارساز انحراف نگهدارنده را در نقاط مختلف سطح اندازه‌گیری می‌کند. ثبت مقادیر انحراف نگهدارنده در هر نقطه توسط کامپیوتر، امکان تولید یک طرح از توپوگرافی سطح را ممکن می‌سازد.

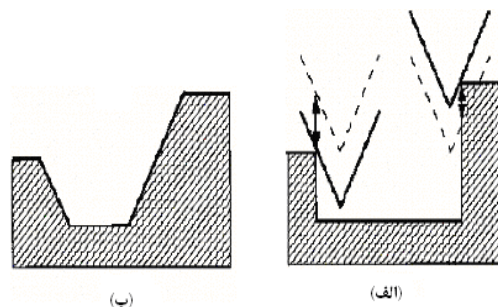


شکل ۱: منحنی نیروی بین اتمی بر حسب فاصله.

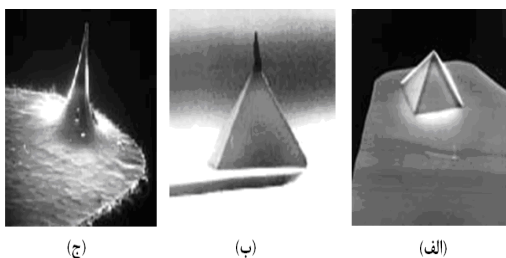
مسئله مهمی که در تصویربرداری رعایت می‌شود نوع سوزن و طول اهرم قابل انعطاف آن است هر چه نوک سوزن تیزتر باشد حسگر بهتری برای ناهمواری سطح خواهد بود و ریخت سطحی نشان داده شده حقیقی‌تر می‌باشد یا به عبارتی کاذب بودن الگو به کمینه مقدار خود می‌رسد اما در این صورت امکان شکستن سوزن و خراشیدن نمونه وجود دارد. اکثر ساختارهای کاذب در تصاویر گزارش شده از سطح یک نمونه به وسیله AFM ناشی از شکل پروب سوزنی دستگاه است که توصیف آن به طور واضح در شکل ۲ نمایان است. تا زمانی که، پروب خیلی تیزتر از ساختار باشد، پروفایل حقیقی‌تر ساختار سطحی گزارش می‌شود. با این حال، برای ساختارهایی که



شکل ۴: مقایسه تصاویر واقعی و تصاویر جاروب شده توسط سوزنهای هرمی و کروی.



شکل ۳: الف) تصویر واقعی یک سطح دوبعدی و ب) تصویر گزارش شده توسط سوزن مثلثی شکل.



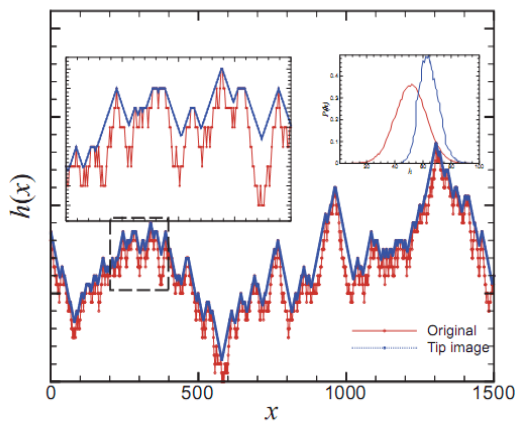
شکل ۵: سه نوع سوزن موجود در AFM که ارتفاع سوزن‌ها ۳ میکرون می‌باشد.

اثر برهمکنش سوزن و سطح باعث هم بسته شدن نقاطی از سطح می‌شود که همزمان با سوزن تماس پیدا می‌کنند. این امر هم باعث بزرگتر شدن طول همبستگی شده و هم باعث بوجود آمدن یک طول مشخصه اضافی در سطح گزارش شده، می‌شود. همبسته شدن دو نقطه در سطح توسط سوزن را می‌توان اینگونه تعبیر کرد که: سوزن قادر نیست دره‌های مجاور یک ارتفاع بلند را درست جاروب کند. به عبارت دیگر ارتفاع گزارش شده در دره بستگی به ارتفاع قله مجاور دارد. این مسئله طول مشخصه‌ای را به سیستم تحمیل می‌کند که طبق تعریف همان طول مارکوف است. بنابراین یکی از مشخصه‌هایی که اثر سوزن را در سطح نمایان می‌سازد افزایش طول مارکوف است. از آنجایی که مسئله قابلیت اطمینان به تصویر گرفته شده از سطوح مواد توسط روش‌های پروفایلی مهم است و همچنین تصویر حاصل از یک سطح ابزار اصلی برای کسب اطلاعات بیشتر درباره ساختار سطح مواد می‌باشند (مخصوصاً مواد بیولوژیکی)، ولی هیچ سعی و تلاشی در

همچنین شکل ۴ تصاویر واقعی و گزارش شده توسط دو سوزن هرمی و کروی را نشان می‌دهد. انحرافات ایجاد شده توسط شکل سوزن وقتی دقت مشاهده قابل مقایسه با اندازه سوزن باشد، توسط افراد مختلفی گزارش شده است [۲۸، ۲۹]، اگرچه توسط اشخاص دیگری [۳۰] نیز توصیف انحرافات به کمک مفهوم تاخیر صورت گرفته است. در مقالات چاپ شده، حضور اثر پیچیدگی سوزن در انحراف تصویر سطح در تصویر سازی مواد مختلف گزارش شده است [۳۸-۳۰]. در مراجع [۳۰، ۳۹] حضور مولتی فراکتالی در تابع ساختار سطح نیز آمده است. در مرجع [۴۰] اثر افزایش شعاع انحنای سوزن بر تابع ساختار مورد توجه قرار گرفته و تغییرات شیب تابع ساختار را در مقیاس‌های طولی قابل مقایسه با اندازه سوزن مشاهده کرده‌اند.

در شکل ۵ سه نمونه از سوزن‌های مورد استفاده در دستگاه AFM به نمایش گذاشته شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، سوزن (الف) دارای ابعاد بزرگتری نسبت به سوزن‌های (ب) و (ج) است بنابراین برهمکنش این سوزن و سطح نیز بیشتر است. اما محدودیت آن گاهی باعث می‌شود، در شرایطی سوزن (الف) به سوزن‌های (ب) و (ج) ترجیح داده شود.

این محدودیت‌ها عبارتند از: وقتی سطوح مورد مطالعه سخت باشند امکان شکستگی این سوزن کمتر است و اگر سطح نرم باشد احتمال خراشیده شدن سطح توسط سوزن‌های (ب) و (ج) افزایش می‌یابد. بنابراین همواره در انتخاب نوع سوزن آزادی عمل نداشته و در این صورت مواجه شدن با اثر برهمکنش سایز سوزن و سطح بسته به شرایط امری اجتناب ناپذیر خواهد بود.



شکل ۶: ارتفاع  $h(x)$  یک سطح تولید شده به روش FGN قبل و بعد از اسکن شدن توسط یک سوزن با زاویه  $\theta = 45^\circ$ ، منحنی الحاق شده تغییرات تابع چگالی احتمال سطح را بر حسب افت و خیزهای سطح اسکن شده نشان می‌دهد.

بعضی از قسمت‌های پروب با شکلی دلخواه قبل از اینکه راس سوزن دقیقاً سطح را لمس کند با آن برهمکنش می‌نماید. بنابراین، ارتفاع نقاطی که زیر راس سوزن قرار دارند وابسته به ارتفاع نقاطی است که واقعا در تماس با سوزن می‌باشند. پس، این اثر می‌تواند تابع احتمال جفت شدگی را به صورت تابعی از ارتفاع دو نقطه و فاصله آنها از هم تغییر دهد.

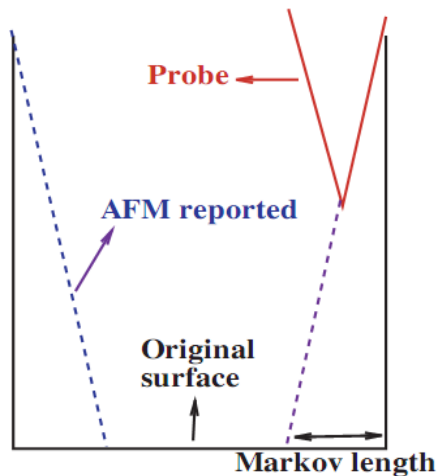
در این کار، نشان می‌دهیم که یک ویژگی مقیاسی جدید با مقیاس طولی بیشینه‌ای که تابع چگالی احتمال جفت شده (Joint Probability Density Function) در آن می‌باشد، وجود دارد که بطور فیزیکی مقیاس طولی کمینه‌ای را تخمین می‌زند بخاطر تاثیر پروب از بین رفته و به این صورت توپوگرافی نمونه حاصل شده از پروفایلو متر واقعی می‌شود. برای شناخت این مقیاس طولی، می‌توان با مطالعه اطلاعات از دست رفته در محاسبه پارامترهای آماری مهمی که سطح را مشخص می‌کنند شروع کرد. برای ساده‌سازی، ما به یک پروب هرمی شکل، که توسط  $y = 2 \tan(\theta) |x|$  توصیف می‌شود، توجه کرده و سطح زیر را جاروب می‌کنیم، که در آن  $\theta$  نصف زاویه پروب و  $x$  و  $y$  به ترتیب ارتفاع و طول پایه پروب می‌باشند. برای استنتاج اطلاعات مورفولوژی سطح و اثرات پروب، ما از تابع ساختار سطحی (که وابسته به مقیاس طول  $\Delta x = l$  می‌باشد) به صورت زیر استفاده کردیم:

این زمینه صورت نگرفته است. توجه به این زمینه یکی از اصلی‌ترین نکات این مقاله می‌باشد. ما یک روش جدید که تا به حال استفاده نشده است برای پاسخ به این سؤال مهم معرفی می‌کنیم. بعضی از محققین به جای این که انحرافات توپوگرافی القا شده توسط شکل هندسی سوزن را کاهش دهند سعی در بهبود روشهایی برای پالایش تصویر کردند [۳۱-۳۷]. استفاده از سوزن‌های مختلف با شکل هندسی متفاوت باعث دیده شدن پدیده‌های متفاوتی همچون پهن‌شدگی پهنای ظاهری و گردش لبه‌های تیز شده است. چندین مطالعه شبیه‌سازی بر روی ناپیچیدگی (Deconvolution) سوزن و سطح نیز به جای اینکه پدیده پیچیدگی (Convolution) را کاهش دهند، انجام شد که البته تا حد زیادی این مشکل حل نشد [۳۲]. برای مثال وقتی یک نفر از AFM برای مطالعه رفتار مقیاسی سطوح فراکتالی استفاده می‌کند، موضوع این است که گستره مقیاس مشاهده نمای سطح فراکتالی متأثر از انحراف تصویر سطح چقدر است؟ [۳۰].

## ۲- نتایج و بحث

این حقیقت که برهمکنش‌هایی که باید در راس سوزن رخ دهد، در عمل در پهلوی سوزن اتفاق می‌افتد، باعث افزایش انحراف در اطلاعات مشاهده شده از سطح می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر پروب به اندازه کافی تیز باشد، بطور مناسب با سطح تماس پیدا می‌کند و تصویر درستی از سطح می‌دهد. اما اگر به اندازه کافی تیز نباشد، تصویر قسمتی از سطح انحراف خواهد یافت. افت و خیزهای ارتفاع یک سطح در یک بعد در شکل ۶، قبل و بعد از جاروب شدن با یک پروب هرمی شکل نشان داده شده است (زاویه پروب  $45^\circ$  درجه است). اطلاعات حاصل شده بیشتر از پیک‌ها تاثیر می‌پذیرند تا از گودی‌های سطح بهره ببرند. همچنین، تصویر یک سطح صاف‌تر از سطح واقعی حاصل می‌شود ( $\sigma_{\text{imaged}} < \sigma_{\text{real}}$ ) در شکل ۶ سمت راست). به عبارت دیگر، اکثر اطلاعاتی که از بین می‌رود بخاطر اثر سوزن پروب در گودی‌های سطح می‌باشد. یعنی این که اثر پروب یک نقشه غیرخطی از سطح نهایی را نشان می‌دهد تا اینکه توپوگرافی تصویر سطح را بدهد، و این تصویر وابسته به مقیاس اسکن سطح می‌باشد.

مقیاس طول مارکوف در نمونه می‌باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد که پروب چگونه توپوگرافی سطح را نسبت به حالت اصلی آن گزارش می‌کند. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود، بدلیل اتصال هر نقطه از پروب با یک نقطه از سطح، توپوگرافی نتیجه شده با توپوگرافی اصلی فرق می‌کند. این بدین معنی است که ارتفاع نقاط اتصال یافته با ارتفاع گزارش شده توسط رأس پروب اشتراک دارد.

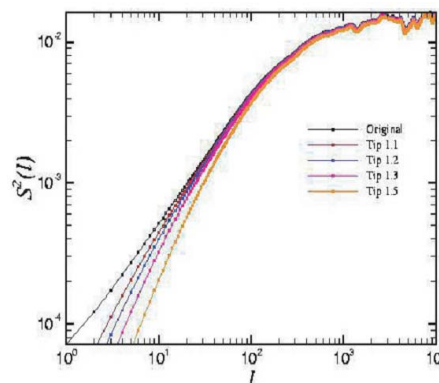


شکل ۸: شکل شماتیک شبیه سازی شده یک بعدی برای بدست آوردن یک تصویر AFM (برهمکنش سوزن بین یک سوزن مثلثی شکل و یک حفره).

در حقیقت، در این مقیاس طولی اشتراکی، فرآیند غیرمارکوفی است و بزرگترین مقیاس طولی اشتراکی در سطح مقیاس طول مارکوف است. این نقاط می‌توانند در یک جمله خلاصه شوند که «کمینه مقیاس طول یا بزرگترین مقیاس قدرت تفکیک در سطح اسکن شده، که مطمئناً معتبر است، مقیاس طول مارکوف می‌باشد». برای برآورد  $l_M$ ، باید توجه کرد که توصیف کامل از خواص آماری افت و خیزهای ارتفاع سطح زیر،  $h$  برحسب  $x$ ، احتیاج به تعیین تابع چگالی احتمال جفت شده، یعنی  $p(h_1, x_1; \dots; h_n, x_n)$ ، برای هر  $n$  دلخواهی دارد. برای یک فرآیند مارکوف،  $p$  بوسیله ضرب احتمالات شرطی  $p(h_{i+1}, x_{i+1} | h_i, x_i)$ ، برای  $i = 1, \dots, n-1$  حاصل می‌شود.

$$S(l, t) = \langle (h(x+l, t) - h(x, t))^2 \rangle \quad (1)$$

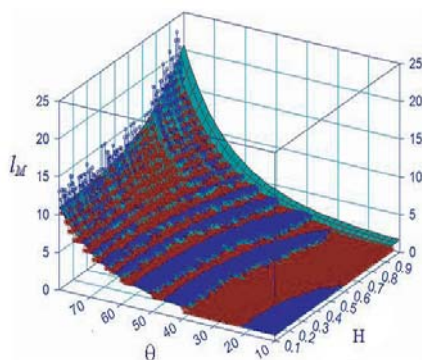
ابتدا، با استفاده از روش FGN سطوحی با نماهای هارتس (Hurst Exponents) در بازه  $0.1 < H < 0.9$  تولید می‌کنیم [۴۱، ۴۲]. سپس تابع ساختار این سطوح بعد از اینکه با سوزن‌هایی با زوایای  $1/8$  تا  $1/1$  رادیان جاروب شدند مورد مقایسه قرار می‌دهیم (شکل ۷). همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه پروب، مقیاس پیچیدگی‌اش افزایش می‌یابد. توابع ساختار برای شیب‌های نسبی متفاوت تلاقی را از یک شیب بزرگتر به کوچکتر نشان می‌دهند. نقطه تلاقی با افزایش شیب نسبی به مقیاس‌های بزرگتر جابجا می‌شود. نتایج با مطالعات مراجع [۳۰، ۳۹] بر روی مولتی فراکتالی در تابع ساختار مطابقت دارد.



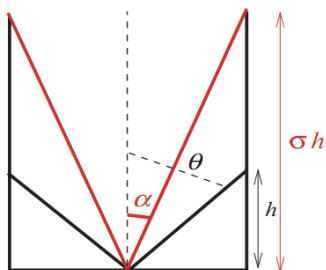
شکل ۷: انحراف تابع ساختار یک سطح کاوش شده نوعی، قبل و بعد از جاروب شدن توسط سوزنی با زوایای مختلف  $\theta$  (برحسب رادیان). این شکل یک تلاقی در تابع ساختار اطلاعات مشاهده شده در مقایسه با مقادیر اصلی را نشان می‌دهد.

برای شناخت مقیاس طولی که در آن اثر پروب تقلیل می‌یابد، ما از فرآیندهای مارکوف استفاده کردیم. ما طول مارکوف  $l_M$  [۳۴، ۴۳-۴۹]، را طول بین نقاطی تعیین کردیم که ارتفاع آنها از فرآیند مارکوف پیروی کنند. به عبارت دیگر، اگر مقیاس مشاهده کوچکتر از طول مارکوف باشد، فرآیند تصادفی که افت و خیزهای ارتفاع را توصیف می‌کند غیرمارکوفی خواهد بود. در واقع برهمکنش بین پروب و افت و خیزهای ارتفاع سطح دلیل اصلی وجود

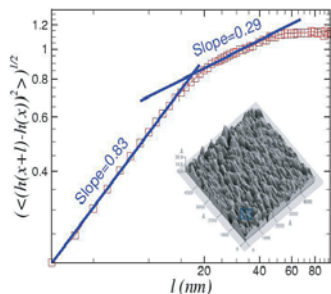
همبستگی پیدا می‌کنیم زیرا اثر سایز سوزن ما را به یک سطح صاف‌تر در مقیاس طول مارکوف رهنمون می‌کند. بنابراین، ما دو نمای زبری پیدا می‌کنیم (شکل ۱۱). ما نمای اصلی را با دانستن زاویه پروب، زبری سطح و طول مارکوف اطلاعات گزارش شده، پیدا می‌کنیم.



شکل ۹: وابستگی طول مارکوف به نمای هارتس و زاویه سوزن پروب.



شکل ۱۰: شکل دوبعدی بدست آمده از رابطه بین زاویه سوزن پروب و زبری، یعنی اینکه زاویه پروب اطلاعات زبری را در خود دارد. یک پروب نازک‌تر با یک سطح زبرتر اثرات یکسانی با یک پروب پهن‌تر با زبری صاف‌تر دارد. به عبارت دیگر، افزایش زبری نتیجه مشابهی با رفتار افزایش زاویه پروب دارد.



شکل ۱۱: تصویر سطح  $V_2O_5$  بدست آمده از AFM، و تابع ساختارش، تلاقی در شکل مشخص شده است.

بعنوان یک شرط لازم، برای شروع فرآیند مارکوف معادله چپمن - کولموگوروف (Chapman-Kolmogorov) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p(h_2, x_2 | h_1, x_1) = \sum_{h'} p(h_2, x_2 | h', x') p(h', x' | h_1, x_1) \quad (2)$$

باید برای هر مقداری از  $x_i$  در بازه  $x_1 < x_i < x_2$  صادق باشد [۲۹]. ساده‌ترین راه برای تعیین  $l_M$  اطلاعات گرفته شده از سطح، محاسبه عددی کمیته، برای  $D = p(h_2, x_2 | h_1, x_1) - \sum_{h'} p(h_2, x_2 | h', x') p(h', x' | h_1, x_1)$  هر  $h_1$  و  $h_2$  برحسب  $x_2 - x_1$  است. پس،  $l_M$  آن مقداری از  $x_2 - x_1$  است که برای آن  $D=0$  باشد. این آنالیز برای سطوح مختلفی با نماهای هارتس  $0.1 < H < 0.9$  و پروب‌های مختلف با زوایای  $10^\circ < \theta < 80^\circ$  انجام شد (شکل ۹). ما همچنین بطور تجربی رابطه بین طول مارکوف  $l_M$ ، نمای هارتس  $H$  و زاویه سوزن پروب  $\theta$  را به صورت  $\ln(l_M) = a + bH^3 + c\theta^2$  بدست آوردیم، که در آن  $a = -0.1698$ ،  $b = 0.6398$  و  $c = 0.0004$  است.

در آنالیزهای ما، به زبری واحد ( $\sigma=1$ ) توجه شده است. اثر زبری در زاویه سوزن پروب ظاهر می‌شود. زبری‌های بالاتر معادل با اسکن کردن با پروب‌های نازک‌تر است. رابطه بین زوایای سوزن پروب با زبری واحد  $\theta_0$  و زبری اصلی سطح  $\sigma$ ، برابر  $\tan(\theta_0) = \tan(\theta) / \sigma$  است (شکل ۱۰)، که در آن  $\theta$  زاویه سوزن پروب برای سطحی با زبری  $\sigma$  است. نکته مهم دیگری که باید برای پیچیدگی‌های پروب به آن توجه کنیم، بیشینه قدرت تفکیک تصویر اسکن شده است. شبیه به مسئله زبری، قدرت تفکیک بالاتر معادل با پروب پهن‌تر می‌باشد. به عبارت دیگر، اگر قدرت تفکیک دو برابر شود، شبیه این است که اثر پروب مثل وقتی باشد که زبری دو برابر افزایش یافته است. این بدین معنی است که ما نه تنها باید به زبری توجه کنیم، بلکه باید به قدرت تفکیک نمونه‌ها نیز توجه داشته باشیم.

برای توجه به اثر طول همبستگی در آنالیزهای صورت گرفته، دو حالت در ارتباط با طول مارکوف وجود دارد. یکی وقتی است که طول همبستگی بزرگتر از طول مارکوف باشد. در این حالت، ما یک تلاقی در تابع

40 nm بدست آمده است. به علاوه، بخاطر اثر سوزن پروب، نماهای هارتس اندازه‌گیری شده می‌تواند بزرگتر از مقادیر واقعی باشد. همانطور که در بالا بحث شد، این سؤال پیش می‌آید، تا چه حدی نماهای مقیاس مشاهده شده بوسیله شکل سوزن پروب تحت تاثیر قرار می‌گیرد؟ به عبارت دیگر، چه مقیاسی است که در آن برآوردها حقیقی می‌باشد؟ در آنالیز سطح  $V_2O_5$ ، طول مارکوف  $l_M \approx 14nm$  بدست آمد، که در توافق با آنچه که شکل ۱۱ نمایش داده شده می‌باشد.

### ۳- نتیجه‌گیری

بطور خلاصه، دلیل اصلی اینکه مقیاس طول مارکوف در پروفایلو مترها وجود دارد برهمکنش سوزن پروب با افت و خیزهای ارتفاع سطح می‌باشد. کمینه مقیاس طول قابل اعتماد (بزرگترین مقیاس قدرت تفکیک) در اسکن تصویر مقیاس طول مارکوف است (شکل ۸). اگر  $\delta$  یک مقدار برای قدرت تفکیک مقیاس‌های طول (یک مقیاس کمینه که مساوی با سایز پیکسل باشد) در فرآیند اسکن کردن باشد، اثر سوزن پروب به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \delta < l_M &\Rightarrow H_{image} > H_{real}, \\ \delta \geq l_M &\Rightarrow H_{image} = H_{real} \end{aligned} \quad (3)$$

این روابط یعنی اینکه در مقیاس‌های کوچکتر از طول مارکوف، نماهای هارتس ارزیابی شده تصاویر AFM بزرگتر از تصاویر اصلی می‌باشند. یعنی این که اثر سایز سوزن باعث گزارش صاف‌تر سطوح می‌شود.

### مراجع

- [1] M. Sahimi, "Heterogeneous Materials II, Nonlinear and Breakdown Properties and Atomistic Modeling", New York: Springer, chapters 2 and 7, 2003, 340-364.
- [2] A.L. Barabasi, H.E. Stanley "Fractal Concepts in Surface Growth", New York, Cambridge University Press, 1995.
- [3] M.C. Lafouresse, P.J. Heard, W. Schwarzacher, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 2007, 36101.
- [4] A.G. Peressadko, N. Hosoda, B.N.J. Persson, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 2005, 124301.
- [5] B.N.J. Persson, O. Albohr, U. Tartaglino, A.I. Volokitin, E. Tosatti, *J. Phys.: Condens. Matter*, **17**, 2005, 62.
- [6] T.J. Oliveira, F.D.A. Reis, *J. Appl. Phys.*, **101**, 2007, 063507.
- [7] F.D.A.A. Reis, *Phys. Rev. E*, **72**, 2005, 032601.
- [8] M. Ausloos, D.H. Berman, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **400**, 1985, 331.

دومی زمانی اتفاق می‌افتد که طول همبستگی کوچکتر از طول ساختگی مارکوف باشد. در این حالت، ما باید منبع این مقیاس طول را بطور اساسی توضیح دهیم. بطور مثال، برای رشد یک سطح ممکن است از سایز یا شکل ذراتی که برای رشدش استفاده شده حاصل شود، و مشاهدات ما کمتر از این سایز شود. به علاوه، اگر یک طول مارکوف در حالت اصلی وجود داشته باشد، بعد از اسکن شدن با سوزن پروب، ممکن است طول مارکوفی از پیچیدگی پروب تولید شده باشد که می‌تواند برابر با طول مارکوف اصلی باشد یا نباشد. اما نکته مهم این است که باید در مقیاس‌های کوچکتر از طول مارکوف مراقب باشیم، حتی اگر بدانیم که این یک مقیاس طول اصلی در تصویر اسکن شده است. این برای ما اهمیت دارد که «کمینه مقیاس طول یا بالاترین مقیاس قدرت تفکیک در تصویر اسکن شده، که مطمئناً واقعی است، مقیاس طول مارکوف باشد». این بدین معنی است که ما باید در مقیاس کوچکتر از طول مارکوف مراقب باشیم.

حالا این عقاید را با یک لایه  $V_2O_5$ ، که به روش تیخیری مقاومتی (Resistive Evaporation Method) در یک محفظه با خلاء بالا بر روی یک زیرلایه صیقل شده Si(100) لایه نشانی شده، آزمایش می‌کنیم [۵۰]. این ماده یک سطح به شدت متخلخل می‌باشد، و موضوع مطالعات زیادی بوده است [۵۱-۵۳]. فشار در طول فرآیند تیخیر ۵ تا ۱۰ تور است. اطلاعات اولیه توپوگرافی سطح فیلم با استفاده از یک AFM (از شرکت Park Scientific Instruments مدل Model Autoprobe CP) بدست آمد. اطلاعات تصویر در مد نیروی ثابت دستگاه با اندازه پیکسلی  $256 \times 256$  با فرکانس اسکن 0.6 Hz بصورت دیجیتالی دریافت شد. یک پایه با ثابت فنر  $0.05 \text{ Nm}^{-1}$  با یک سوزن هرمی استاندارد تجاری  $\text{Si}_3\text{N}_4$  با اندازه  $3 \mu\text{m}$  مورد استفاده قرار گرفت. سوزن پروب ما هرمی شکل با زاویه  $\theta=35^\circ$  است، که  $\theta$  نصف زاویه سوزن پروب و نسبت طول به عرض آن ( $2\tan\theta$ ) در حدود 1.4 بود. شکل ۱۱ تابع ساختار سطح  $V_2O_5$ ، همراه با تصویر AFM سطح را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، یک تلاقی در تابع ساختار از شیب  $0.83 \pm 0.02$  برای طول‌های کوچکتر از حدود 16 nm، تا  $0.29 \pm 0.04$  در بازه 20 nm تا

- [32] A.A. Bukharaev, N.V. Berdunov, D.V. Ovchinnikov, K.M. Salikhov, *Scanning Microsc.*, **12**, 1998, 225.
- [33] P. Markiewicz, M.C. Goha, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13**, 1995, 1115.
- [34] G.S. Pingali, R. Jain, L. Kong, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **12**, 1994, 2134.
- [35] J. Vesenka, R. Miller, E. Henderson, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 1994, 2249.
- [36] D. Keller, *Surf. Sci.*, **253**, 1991, 353.
- [37] M. Lee, W. Jhe, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 2006, 036104.
- [38] S. Barrett, B.R. Bickmore, E. Rufe, M.F. Hochella, G. Torzo, D. Cerolini, *J. Comput. Assist. Microsc.*, **10**, 1998, 2.
- [39] B.S. Good, A. Banerjee, *J. Phys.: Condens. Matter*, **8**, 1996, 1325.
- [40] P. Klapetek, I. Ohlidal, J. Bilek, *Ultramicroscopy*, **102**, 2004, 51.
- [41] R. Buzio, U. Valbusa, "Morphological and tribological characterization of rough surfaces by atomic force microscopy *Applied Scanning Probe Methods*", Berlin: Springer, chapter 19, 2006.
- [42] H.G. Hansma, K.A. Browne, M. Bezanilla, T.C. Bruice, *Biochemistry*, **33**, 1994, 8436.
- [43] H.A. Makse, S. Havlin, M. Schwartz, H.E. Stanley, *Phys. Rev. E*, **53**, 1996, 5445.
- [44] H. Risken, "The Fokker-Planck Equation", Berlin Springer, 1984.
- [45] C. Renner, J. Peinke, R. Friedrich, *J. Fluid Mech.*, **433**, 2001, 383.
- [46] R. Friedrich, J. Zeller, J. Peinke, *Europhys. Lett.*, **41**, 1998, 153.
- [47] R. Friedrich, J. Peinke, *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 1997, 863.
- [48] F. Ghasemi, M. Sahimi, J. Peinke, R. Friedrich, G.R. Jafari, M.R. Rahimi Tabar, *Phys. Rev. E*, **75**, 2007, 060102.
- [49] S. Kimiagar, G.R. Jafari, M.R. Rahimi Tabar, *J. Stat. Mech.*, 2008, P02010.
- [50] F. Ghasemi, A. Bahraminasab, M.S. Movahed, S. Rahvar, K.R. Sreenivasan, M.R. Rahimi Tabar, *J. Stat. Mech.*, 11, 2006, P11008.
- [51] A. Iraj Zad, G. Kavei, M.R. Rahimi Tabar, S.M. Vaez Allaei, *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, 2003, 1889.
- [52] M. Benmoussa, E. Ibnouelghazi, A. Bennouna, E.L. Ameziane, *Thin Solid Films*, **265**, 1995, 22.
- [53] S.N. Svitashcheva, V.N. Kruchinin, *Thin Solid Films*, **313**, 1998, 319.
- [9] M. Ausloos, J.M. Kowalski, *Phys. Rev. B*, **45**, 1991, 12830.
- [10] M. Paillet, P. Poncharal, A. Zahab, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 2005, 186801.
- [11] Y. Yaish, J.Y. Park, S. Rosenblatt, V. Sazonova, M. Brink, P.L. McEuen, *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 2004, 046401.
- [12] J.J. Métois, A. Saül, P. Müller, *Nat. Mater.*, **4**, 2005, 238.
- [13] A.K. Mazur, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 2007, 218102.
- [14] M. Tolan, O.H. Seeck, J.P. Schlomka, W. Press, J. Wang, S.K. Sinha, Z. Li, M.H. Rafailovich, J. Sokolov, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 1998, 2731.
- [15] P.A. Wiggins, T.V.D. Heijden, F. Moreno-Herrero, A. Spakowitz, R. Phillips, J. Widom, C. Dekker, P.C. Nelson, *Nat. Nanotechnol.*, **1**, 2006, 137.
- [16] M. Waechter, F. Riess, Th. Schimmel, U. Wendt, J. Peinke, *Eur. Phys. J. B*, **41**, 2004, 259.
- [17] A. Buldum, S. Ciraci, C.Y. Fong, J.S. Nelson, *Phys. Rev. B*, **59**, 1999, 5120.
- [18] G.R. Jafari, S.M. Fazeli, F. Ghasemi, S.M. Vaez Allaei, M.R. Rahimi Tabar, A. Iraj Zad, G. Kavei, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 2003, 226101.
- [19] G.R. Jafari, A.A. Saberi, R. Azimirad, A.Z. Moshfegh, S. Rouhani, *J. Stat. Mech.*, 11, 2006, P09017.
- [20] G.R. Jafari, P. Kaghazchi, R.S. Dariani, A. Iraj Zad, S.M. Mahdavi, M.R. Rahimi Tabar, N. Taghavinia, *J. Stat. Mech.*, 8 2005, P04013.
- [21] G.R. Jafari, M.R. Rahimi Tabar, A. Iraj Zad, G. Kavei, *Physica A*, **375**, 2007, 239.
- [22] G.R. Jafari, S.M. Mahdavi, A. Iraj Zad, P. Kaghazchi, *Surf. Interface Analysis*, **37**, 2005, 641.
- [23] M. Vahabi, G.R. Jafari, N. Mansour, R. Karimzadeh, D. Zamiranvari, *J. Stat. Mech.*, 19, 2008, P03002.
- [24] W.H.J. Rensen, N.F. Van der Hulst, A.G.T. Ruiters, P.E. West, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1999, 1640.
- [25] Y. Seo, H. Choe, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2003, 1860.
- [26] J.K.H. Hörber, M.J. Miles, *Science*, **302**, 2003, 1002.
- [27] A. Knoll, K.S. Lyakhova, A. Horvat, G. Krausch, G.J.A. Sevink, A.V. Zvelindovsky, R. Magerle, *Nature*, **3**, 2004, 886.
- [28] R. Garc, R. Perez, *Surf. Sci. Rep.*, **47**, 2002, 197.
- [29] M. Bogana, D. Donadio, G. Benedek, L. Colombo, *Europhys. Lett.*, **54**, 2001, 72.
- [30] R. Buzio, C. Boragno, U. Valbusa, *Wear*, **254**, 2003, 917.
- [31] J. Aue, Th.M. De Hosson, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1997, 1347.