فصل ۳

کالیبره کردن سیستم

سیستم AFM همیشه اندازه‌گیری‌های نسبی را ارایه می‌دهد. برای به دست آوردن مقادیر مطلق دقیق، باید سیستم را کالیبره کرد.

برای کالیبراسیون، باید در حالت administration وارد نرم‌افزار ویندوز شوید تا اختیارات کافی برای وارد کردن ضرایب کالیبراسیون، داشته باشید.

ضرایب کالیبراسیون برای هر روبش‌گر در کارخانه تعیین شده و در گواهی مطابقت[1] (CoC) ذکر می‌شود. از این ضرایب می‌توان برای اندازه‌گیری‌های استاندارد استفاده کرد. باید توجه داشت که برای اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر، کالیبراسیون روبش‌گر می‌تواند از عوامل زیر تاثیر بپذیرد:

- دمای سیستم و محیط
- سرعت روبش فریم

توجه داشته باشید که به ازای تغییر دما به میزان ۰٫۱ °C، ۱۰nm تغییرطول در یک میله‌ی آهنی به طول ۱۰ mm به وجود می‌آید. بنابراین، واضح است که دما تاثیر زیادی در کالیبراسیون میکروسکوپ پروبی روبشی دارد. اگرچه قطعات داخلی میکروسکوپ از آلیاژ اینوار (Invar) ساخته شده‌اند که ضریب انبساط حرارتی آن ۱۰ برابر کم‌تر از انبساط حرارتی آهن است، برای به دست آوردن مقادیر مطلق دقیق، باید میکروسکوپ کاملا گرم شود. هم‌چنین، سرعت روبش فریم، یعنی زمان صرف‌شده برای روبش هر تصویر، تاثیر عمده‌ای (تا چند برابر) روی کالیبراسیون دارد. بنابراین، باید سرعت روبش نمونه‌ی استاندارد هنگام کالیبراسیون، با سرعت روبش نمونه مورد مطالعه مطابقت داشته باشد.

وقتی که برنامه برای اولین بار نصب می‌شود، ضرایب کالیبراسیون روی مقادیر اولیه تنظیم می‌شوند. برای استفاده از ضرایب کالیبراسیون تنظیم شده در کارخانه، یک تصویر به دست آورید، سپس با رفتن روی تصویر و کلیک دکمه‌ی سمت‌راست موشواره، با آن تصویر به پنجره کالیبراسیون بروید و ضرایب کالیبراسیون کارخانه را به صورت دستی وارد کنید. برای اطلاعات بیش‌تر، به جزوه وارد کردن ضرایب کالیبراسیون کارخانه مراجعه کنید.

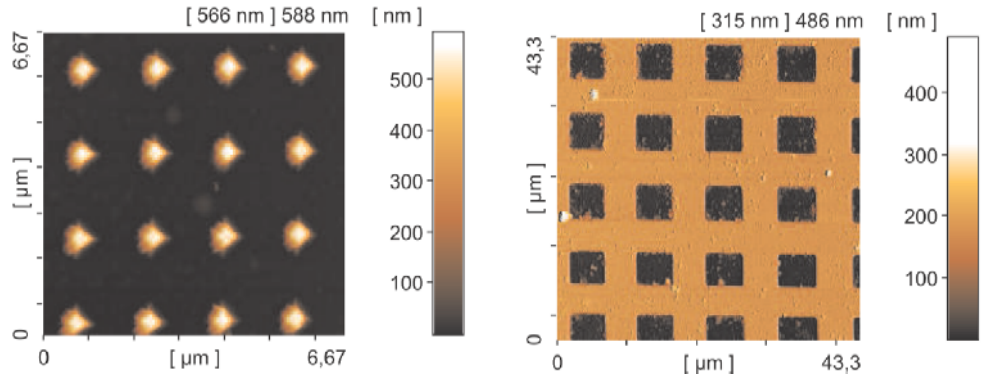
[1] Certificate of Complience

MaharFan

۳-۱- نمونه‌های کالیبراسیون

کالیبره کردن سیستم معمولا به کمک نمونه‌های کالیبراسیون انجام می‌شود. از یک نمونه‌ی بهینه می‌توان برای کالیبراسیون هر سه محور روبش‌گر استفاده کرد. چنین نمونه‌ای باید دارای طرح متقاطع و دو سطح ارتفاع باشد (شکل ۳-۱الف). برای به دست آوردن نتایج آماری خوب برای کالیبره کردن در جهت Z، استفاده از دو سطح ارتفاع ضروری است. شکل ۳-۱ب، نمونه‌ای را نشان می‌دهد که برای کالیبره کردن در جهت‌های X/Y مناسب است، ولی نتیجه خوبی برای کالیبره کردن ارتفاع (جهت Z) نمی‌دهد، زیرا فقط حاوی چند نقطه‌ی تصویری (پیکسل) در سطح بالایی است.

نمونه‌ی استاندارد معمولا کاملا تمیز نیست و ممکن است سوزن نیز در بهترین شرایط نباشد. شکل ۳-۱الف به خوبی این را نشان می‌دهد. ذرات آلودگی زیادی روی سطح مشاهده می‌شود. اما، وقتی که فرایند کالیبره کردن به روش درست انجام شود، هنوز هم می‌توان کالیبراسیون بسیار دقیقی انجام داد. رمز موفقیت کار، استفاده از آمار و شامل کردن تعداد هر چه بیش‌تر نقاط تصویری در فرایند کالیبراسیون است.



(ب) (الف)

شکل ۳-۱: دو نمونه‌ی کالیبراسیون، (الف) مناسب برای کالیبره کردن هر سه محور و (ب) مناسب برای کالیبره کردن جهت‌های X/Y.

از نمونه‌های شیاردار نیز می‌توان استفاده کرد. به دلیل تولید ساده‌تر، اغلب این نمونه‌ها ارزان‌تر از نمونه‌های متقاطع هستند. برای کالیبره کردن در جهت‌های X و Y، باید نمونه را ۹۰ درجه بچرخانید.

MaharFan

هیچ‌وقت از پارامتر جهت روبش، برای چرخاندن نمونه‌ی استاندارد استفاده نکنید. این کار بی‌فایده است زیرا برای کالیبره کردن خواص فیزیکی روبش‌گر فقط با چرخاندن فیزیکی نمونه‌ی استاندارد توسط دست، امکان‌پذیر است.

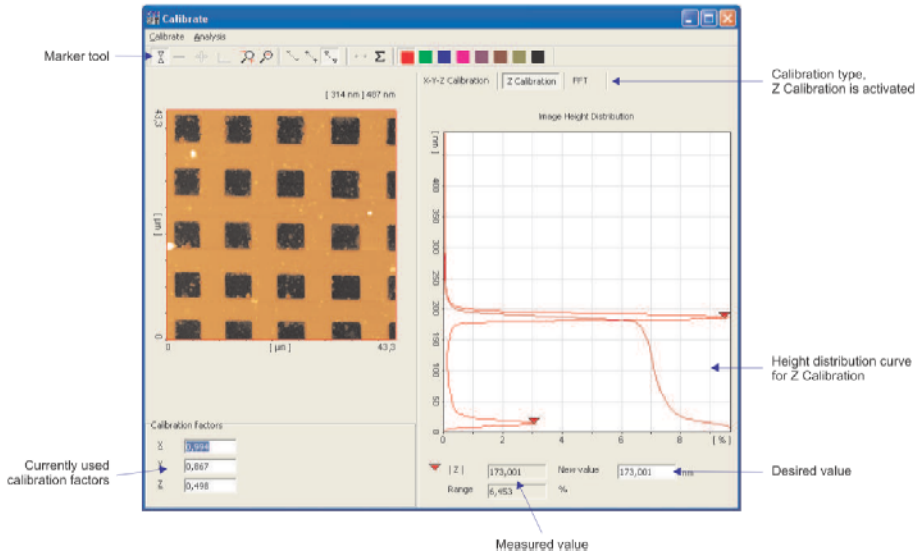
۳-۲- روبش نمونه‌ی کالیبراسیون

برای کالیبراسیون دقیق و مستقل هر سه محور روبش‌گر، باید نمونه‌ی استاندارد در جهت محورهای روبش‌گر تنظیم شود. باید پارامتر جهت روبش در پنجره‌ی روبش‌گر، روی صفر درجه تنظیم شود تا هیچ چرخش غیرواقعی در تصویر صورت نگیرد. باید سطح نمونه تا حد امکان موازی صفحه‌ی روبش باشد. برای مشاهده‌ی جهت نمونه، هنگام روبش نمونه‌ی کالیبراسیون، عمل‌گرهای تصحیح خودکار صفحه و متوسط خط را در منوی اندازه‌گیری، غیرفعال کنید. از یک سوزن تیز استفاده کنید تا تمام لبه‌های نمونه به صورت خیلی تیز دیده شوند. تصویر روبش‌شده شکل ۳-۱الف، به خوبی در جهت‌های X/Y تنظیم شده و لبه‌ها کاملا تیز هستند. اگر تصویر روبش‌شده حاوی خط‌های پارازیت افقی باشد، آن‌ها را با استفاده از عمل‌گر متوسط خط جزیی[1] حذف کنید. در هنگام روبش نمونه‌های استاندارد، عمل‌گر متوسط خط خودکار، به دلیل اصول کاری خود، هیچ‌گاه نتایج خوبی به وجود نمی‌آورد. سپس، تصحیح خودکار یا دستی صفحه را انجام دهید تا آخرین قسمت عدم تطابق بین صفحه‌ی روبش و سطح نمونه نیز برطرف شود.

وقتی که روبش خوبی انجام شد، روبش را متوقف کنید و تصویر موردنظر برای کالیبره کردن را انتخاب کنید. روی این تصویر کلیک‌راست کرده و کالیبراسیون را انتخاب کنید (یا منوی آنالیز را انتخاب کنید). سپس، پنجره‌ی کالیبراسیون نمایش داده می‌شود (شکل ۳-۲). ترتیب کالیبره کردن محورها مهم نیست. شما از کالیبره کردن محور Z شروع کنید.

[1] partial line mean

MaharFan



شکل ۳-۲: پنجره کالیبراسیون در حالت کالیبراسیون Z

برای این‌کار، کالیبراسیون Z را از بین انواع کالیبراسیون، انتخاب کنید. در قسمت راست، منحنی توزیع ارتفاع، نمایش داده می‌شود. این منحنی، جمع تمام مقادیر ارتفاع تصویر است. از آن‌جا که تصویر انتخاب‌شده فقط شامل دو سطح ارتفاع است (یکی ته حفره‌ها و دیگری بقیه قسمت‌های تصویر)، دو پیک در منحنی توزیع ارتفاع وجود دارد. اختلاف بین این دو پیک، معیار دقیقی برای کالیبراسیون Z است، زیرا از تمام پیکسل‌های تصویر استفاده می‌کند. در صورتی که فقط از یک خط پروفیل برای کالیبراسیون استفاده شود (که برای کالیبراسیون X-Y-Z قابل‌انجام است)، این کار با دقت بسیار کم‌تری انجام می‌شود. کالیبراسیون Z از طریق منحنی‌های توزیع ارتفاع فقط زمانی امکان‌پذیر است که نمونه‌ی استاندارد، حاوی سطوح ارتفاع مشخص باشد.

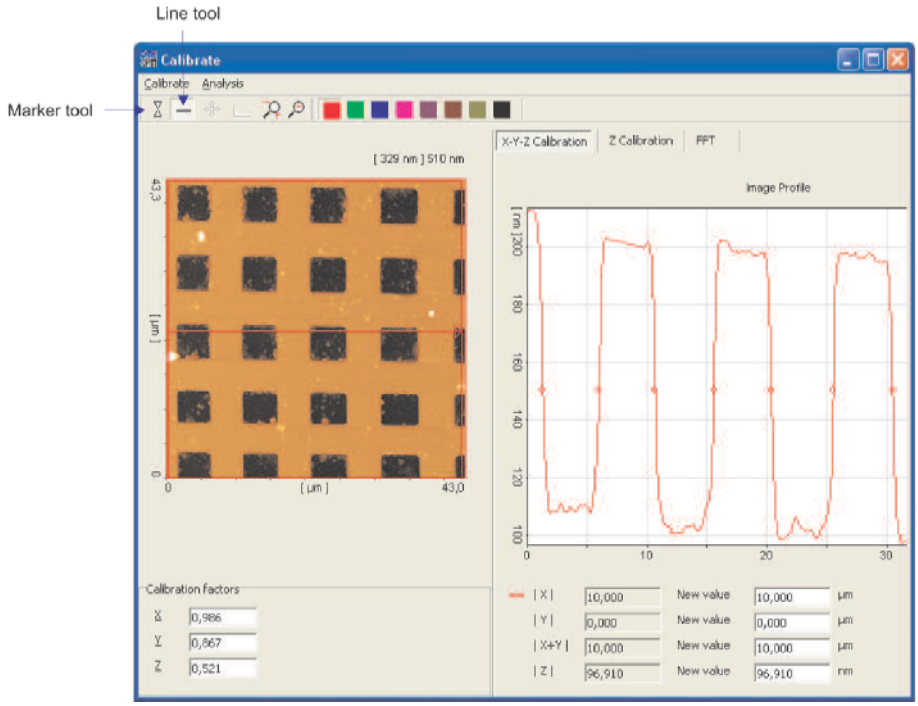
برای انجام کالیبراسیون Z، با فعال کردن ابزار نشان‌گر و کلیک روی دو پیک، آن‌ها را مشخص کنید. اختلاف واقعی اندازه‌گیری شده‌ی این دو پیک در جهت Z، در پایین پنجره ظاهره می‌شود. اکنون در سمت راست مقدار اندازه‌گیری‌شده، مقدار ارتفاع را از برگه‌ی اطلاعات نمونه‌ی استاندارد، وارد کنید. به این ترتیب، با فشار دادن دکمه tab یا کلیک کردن دکمه‌ی موش‌واره در قسمتی خارج از خانه‌ی ورود داده، مقدار ورودی ذخیره‌شده و ضریب کالیبراسیون محاسبه می‌شود.

برای کالیبره کردن محورهای x و y، به حالت کالیبراسیون X-Y-Z بروید. روی تصویر روبش‌شده کلیک کنید و ابزار پروفیل (نشان‌گر سمت چپ در لیست ابزار، مشابه منوی اصلی) را فعال کنید. وقتی که تصویر به طور کامل تنظیم شد، یک خط پروفیل اعمال کنید تا از تمام طول تصویر، متوسط‌گیری کند. برای انجام این کار برای محور x، در قسمت بالا و سمت چپ تصویر روبش‌شده کلیک کنید. سپس موش‌واره را به

MaharFan

سمت راست ببرید. دکمه‌ی آن را فشار دهید و نگه دارید و آن را به قسمت پایین بکشید. همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود، منحنی پروفیل، متوسط تمام تصویر را به دست می‌دهد. حال، روی منحنی پروفیل کلیک کنید تا لیست ابزار و ابزار نشان‌گر برای منحنی باز شود. اکنون، ابزار خط را فعال کنید و خط را در وسط منحنی پروفیل قرار دهید. دوره‌ی تناوب در این مورد، به صورت خودکار از روی شکل‌های مستطیلی محاسبه شده و برای مقدار اندازه‌گیری محور x قرار داده می‌شود. هم‌چنین می‌توان به صورت دستی، با نشان‌گر، دو نقطه را روی منحنی پروفیل نشانه‌گذاری کرد و سپس اختلاف بین این دو نقطه، برای مقدار اندازه‌گیری‌شده‌ی محور x وارد می‌شود. حال، در قسمت سمت راست این خانه، مقدار صحیح نمونه‌ی استاندارد را وارد کنید تا ضریب کالیبراسیون به صورت خودکار اندازه‌گیری شود. برای کالیبره کردن محور y نیز به همین ترتیب عمل کنید و فقط خط پروفیل را از بالا به پایین بکشید.

برای کالیبراسیون xy، به بیش‌ترین تفکیک نیاز است. به این منظور از تفکیک ۵۱۲×۵۱۲ نقطه یا بیش‌تر استفاده کنید. هم‌چنین، باید سطح تصویر زیاد باشد (اگر تعداد حفره‌ها در تصویر بیش‌تر باشد، محاسبات آماری، قابل اعتمادتر خواهند بود).



شکل ۳-۳: پنجره‌ی کالیبراسیون در حالت کالیبراسیون X-Y-Z.

MaharFan

وقتی که کالیبراسیون تمام شد، با استفاده از منوی کالیبراسیون، ضرایب جدید کالیبراسیون را اعمال کنید. در این‌جا، نرم‌افزار از شما سوال می‌کند که آیا علاوه بر تصویری که الان کالیبره شده است، باید روبش‌گر و یک فایل MIF نیز کالیبره شوند. اگر کالیبره کردن روبش‌گر را انتخاب کنید، ضرایب جدید کالیبراسیون برای تمام تصویرهای بعدی اعمال خواهد شد. وقتی که کالیبره کردن فایل MIF انتخاب شود، تمام تصویرهای موجود در فایل MIF حاوی تصویر نمونه‌ی استاندارد، با ضرایب جدید کالیبراسیون، کالیبره می‌شوند.

توجه داشته باشید که وقتی تصویر روبش‌شده بدون خطی‌سازی Z (Z linearization) را کالیبره می‌کنید، فقط کالیبراسیون تصویرهایی که بدون خطی‌سازی Z روبش می‌شوند، تغییر می‌کند. هم‌چنین، زمانی که تصویر مورداستفاده برای کالیبراسیون، با خطی‌سازی Z روبش می‌شود، همیشه ضریب کالیبراسیون تصویرهایی که با خطی‌سازی Z روبش می‌شوند، تغییر می‌کند.

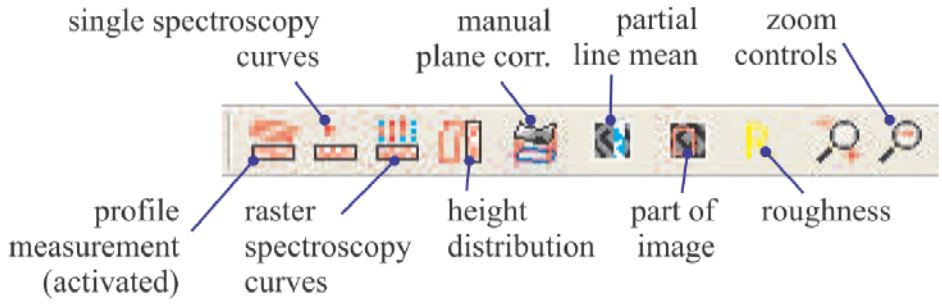
MaharFan

فصل ۴

ارزیابی اندازه‌گیری

در این فصل، عمل‌گرهای متداول برای ارزیابی اندازه‌گیری‌های AFM شامل اندازه‌گیری‌های پروفیل، توزیع‌های ارتفاع، اندازه‌گیری‌های زبری، پردازش تصویر و نمایش سه‌بعدی توضیح داده می‌شود.

برای انجام یک ارزیابی، باید یک تصویر ثبت کنید. می‌توانید این تصویر را از فایل MIF استخراج کنید یا ممکن است تصویر از روبش قبلی روی صفحه نمایش‌گر باقی مانده باشد. وقتی که یک تصویر انتخاب شد (با کلیک کردن روی آن)، کنترل ارزیابی فعال می‌شود (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱: نوارابزار کنترل‌های ارزیابی.

۴-۱- اندازه‌گیری‌های پروفیل

اندازه‌گیری پروفیل، برای استخراج مقادیر مطلق برای تصویر مانند ارتفاع یک پله یا عرض یک ناحیه به کار می‌رود. ابتدا، اندازه‌گیری پروفیل را با فشار دادن دکمه‌ی مربوطه در نوارابزار، فعال کنید. سپس نوارابزار دوم با رنگ‌های متفاوت و یک «حالت رسم[1]» ظاهر می‌شود. در نوارابزار رنگ، یک رنگ را برای رسم نشان‌گر در تصویر، انتخاب کنید. «حالت رسم» می‌تواند به صورت «هر جهت[2]» یا «موازی محور[3]»، تنظیم شود. حالت موازی محور، به تنظیم پروفیل در جهت x یا y تصویر، کمک می‌کند.

اکنون، با استفاده از موش‌واره یک خط در تصویر رسم کنید. ابتدا در نقطه‌ی شروع پروفیل و سپس در انتهای آن کلیک کنید. سپس در انتهای پروفیل، دکمه‌ی موش‌واره را فشار دهید و نگه دارید و آن را به

[1] Draw Mode
[2] Any direction
[3] Axis parallel

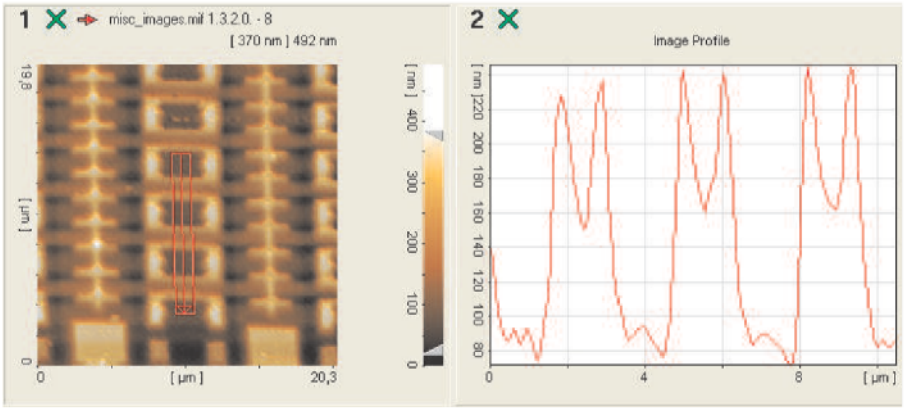
MaharFan

پایین بکشید تا یک مستطیل رسم شود. در این حالت، پروفیل شامل میانه‌ی[1] نقاط روی خط عمود بر پروفیل است. وقتی که دکمه آزاد می‌شود، نمودار کوچکی در پایین تصویر حاوی پروفیل، ظاهر می‌شود. برای ادامه‌ی کار، با استفاده از موش‌واره، این نمودار را به پنل دیگری بکشید.

با استفاده از صفحه‌کلید پروفیل در قسمت سمت راست صفحه‌ی نمایش، می‌توانید پروفیل را عوض کنید.

مرحله‌ی بعد، کلیک کردن روی نمودار است. به این ترتیب، نوارابزار منحنی فعال می‌شود (شکل ۴-۳). اکنون، عمل‌گر قراردادن نشان‌گرها را فعال کنید (شکل ۴-۴). وقتی که نشان‌گرها برای اندازه‌گیری فاصله و زاویه فعال می‌شوند، دو نشان‌گر را می‌توان با کلیک کردن در دو نقطه از نمودار، فعال کرد. نشان‌گرها، به صورت خودکار با منحنی اندازه‌گیری‌شده، تنظیم می‌شوند. وقتی که دو نشان‌گر در موقعیت خود قرار داده شدند، پنجره‌ای حاوی فاصله‌های اندازه‌گیری‌شده و زاویه‌ی بین دو نشان‌گر، ظاهر می‌شود. می‌توان با استفاده از موش‌واره، پنجره را حرکت داد تا جلوی هیچ قسمتی از نمودار را نگیرد.

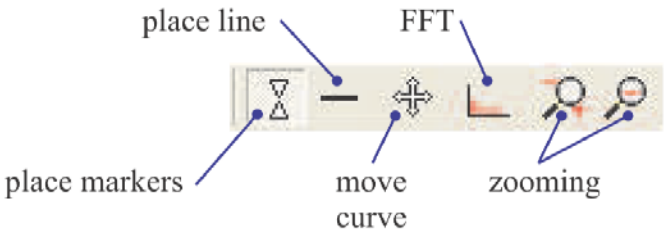
مقادیر اندازه‌گیری‌شده نیز در صفحه‌کلید پروفیل، ظاهر می‌شوند.



شکل ۴-۲: تصویری با نمودار پروفیل مربوطه. پروفیل، نشان‌دهنده‌ی میانه‌ی تمام نقاط عمود بر پیکان پروفیل، در مستطیل است.

[1] median

MaharFan



شکل ۴-۳: نوارابزار منحنی.

نوارابزار منحنی (شکل ۴-۳) حاوی عمل‌گرهای بیش‌تری است: وقتی که عمل‌گر «قراردادن خط[1]» فعال می‌شود، می‌توان خطی درون نمودار رسم کرد. تمام تقاطع‌های بین این خط و منحنی، با دایره‌های کوچک نشان می‌شوند و بعضی محاسبات آماری انجام شده و در صفحه‌کلید پروفیل، نشان داده می‌شود. این موارد بیش‌تر برای ارزیابی جزییات تناوبی استفاده می‌شوند. عمل‌گر بعدی برای حرکت دادن منحنی درون نمودار است. عمل‌گر "FFT" تبدیل فوریه‌ی نمودار را انجام داده و نتیجه را نمایش می‌دهد که برای بررسی جزییات تناوبی، مفید است. دو دکمه‌ی آخر، برای بزرگ کردن هر قسمتی از نمودار استفاده می‌شوند.

علاوه بر استفاده از نوارابزار، می‌توان با کلیک‌راست کردن روی نمودار، به تمام عمل‌گرها دسترسی پیدا کرد.

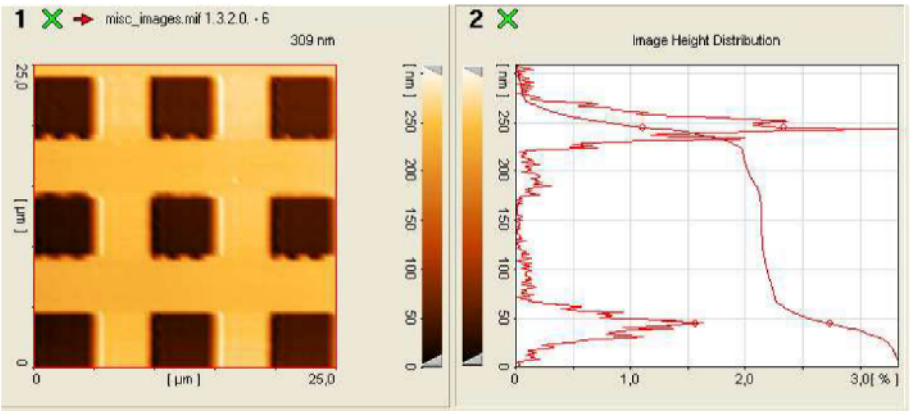
۴-۲- توزیع ارتفاع

توزیع ارتفاع برای اندازه‌گیری دقیق اختلاف ارتفاع در سطوح مختلف، بسیار مفید است.

برای محاسبه‌ی توزیع ارتفاع، غالبا انجام دستی تصحیح صفحه مفید است و باید عمل‌گرهای متوسط خط را خاموش کرد. در غیر این صورت، ممکن است نتایج حاصل به اندازه‌ی موردانتظار، دقیق نباشند.

[1] Place line

MaharFan



شکل ۴-۶: تصویر نمونه‌ی استاندارد به همراه نمودار توزیع ارتفاع آن. از آن‌جا که تصویر حاوی دو سطح کاملا جداگانه است، عمل‌گر توزیع ارتفاع، دارای دو پیک کاملا مشخص است.

برای انجام اندازه‌گیری، تصویر مورد نظر را فعال کنید و دکمه‌ی «توزیع ارتفاع[۱]» را در لیست «ارزیابی[۲]» فعال کنید (شکل ۴-۱). اکنون، لیست «انتخاب ناحیه[۳]» ظاهر می‌شود (شکل ۴-۵) که می‌توان بخشی از تصویر را توسط آن انتخاب کرد. برای تسریع کار، می‌توانید آخرین دکمه‌ی سمت چپ را فشار دهید که تمام تصویر را انتخاب می‌کند و نمودار توزیع ارتفاع را در قسمت سمت راست تصویر، به وجود می‌آورد. اکنون، روی این نمودار کلیک کرده و نگه دارید و آن را به یک پانل دیگر بکشید. تصویر یک نمونه و نمودار توزیع ارتفاع آن در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. اختلاف ارتفاع دو پیک، معیار بسیار دقیقی از اختلاف فاصله‌ی دو سطح نمونه است. برخلاف اندازه‌گیری یک پروفیل ساده که فقط از قسمت کوچکی از تصویر استفاده می‌کند، توزیع ارتفاع، از اطلاعات کل نمونه استفاده می‌کند و بنابراین بسیار دقیق‌تر است.

وقتی که اندازه‌گیری توزیع ارتفاع انجام می‌شود، یک جدول داده در سمت راست پدیدار می‌شود که حاوی اطلاعاتی در مورد اندازه‌گیری است. مقدار "Duty Cycle Level" زیر "Statistics" در این نمونه، حاوی عدد دقیق اختلاف ارتفاع بین دو سطح نمونه است.

مانند اندازه‌گیری پروفیل، می‌توان نشان‌گرها را در نمودار توزیع ارتفاع قرار داد تا بتوان قسمت خاصی از منحنی را اندازه‌گیری کرد. خط قرمز، نمودار توزیع ارتفاع را نشان می‌دهد و دایره‌های کوچک، نشان‌دهنده‌ی موقعیت‌های بیشینه‌ی عددی هستند.

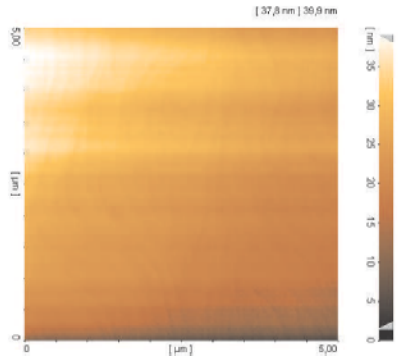
[1] Height distribution
[2] evaluation
[3] area selection

MaharFan

۴-۳- اندازه‌گیری زبری

عملگرهای زبری[1]، پارامترهای مختلف زبری سطح را محاسبه می‌کنند. وقتی که دکمه‌ی مربوط به آن در لیست ارزیابی انتخاب می‌شود (شکل ۴-۱)، لسیت انتخاب ناحیه ظاهر می‌شود (شکل ۴-۵). برای انتخاب تمام تصویر، آخرین دکمه‌ی سمت چپ را فشار دهید یا دکمه‌ی Ctrl+A را فشار دهید. در قسمت سمت راست، لیست اندازه‌گیری زبری ظاهر می‌شود که شامل پارامترهای مختلف زبری است. برای صرفه‌جویی در زمان، می‌توان محاسبه‌ی هر کدام از این پارامترها را با کلیک روی خانه‌ی مربعی مربوط به آن، فعال یا غیرفعال کرد. دکمه‌ی محاسبه[2] را در لیست فشار دهید تا محاسبه‌ی تمام پارامترهای فعال‌شده، انجام شود.

می‌توانید با انتخاب رنگ‌های مختلف از لیست رنگ، چند ناحیه را انتخاب کنید. به این ترتیب، می‌توان زبری ناحیه‌های مختلف را به صورت مستقیم مقایسه کرد.



شکل ۴-۷: تصویر با فرکانس ارتعاش کم و چرخش سطح. فرکانس ارتعاش کم، در تصویر به صورت خطوط افقی ظاهر می‌شود. چرخش تصویر، به صورت گرادیان ارتفاع در تمام طول تصویر ظاهر می‌شود.

۴-۴- پردازش تصویرها

در هنگام بررسی نمونه‌های با سطح خیلی تخت، عوامل خارجی به سادگی اندازه‌گیری را به هم می‌ریزند. مخرب‌ترین عامل، ارتعاش با فرکانس کم و چرخش بین سطح و صفحه‌ی روبش است. خوش‌بختانه می‌توان هر دو این عوامل را با محاسبات عددی، حذف کرد. شکل ۴-۷، اندازه‌گیری یک نمونه‌ی خیلی تخت را نشان

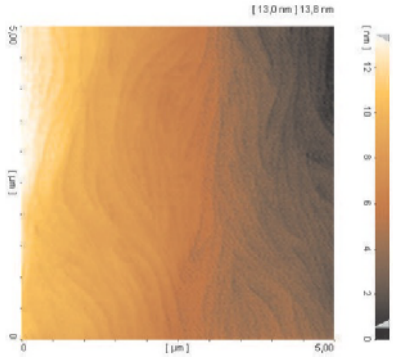
[1] Roughness
[2] Calculate

MaharFan

می‌دهد که فقط حاوی پله‌های اتمی است. به دلیل تخت بودن، تصویر روبش‌شده، تحت تاثیر شدید هر دو عامل فوق است، به گونه‌ای که ساختار سطحی موردنظر، تقریبا غیرقابل‌مشاهده است.

۴-۴-۱- متوسط خط

برای حذف اثرات ارتعاش با فرکانس کم، می‌توان مقدار ارتفاع متوسط را از هر خط کم کرد. این فرایند، متوسط خط[1] نامیده می‌شود. با انجام آن، می‌توان ارتعاش با فرکانس کم را به طور موثری حذف کرد. شکل ۴-۸ اندازه‌گیری مشابه شکل ۴-۷ را بعد از اعمال فرایند متوسط خط، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خط‌های افقی کاملا ناپدید شده‌اند و ساختار سطح، بسیار بهتر شده است.

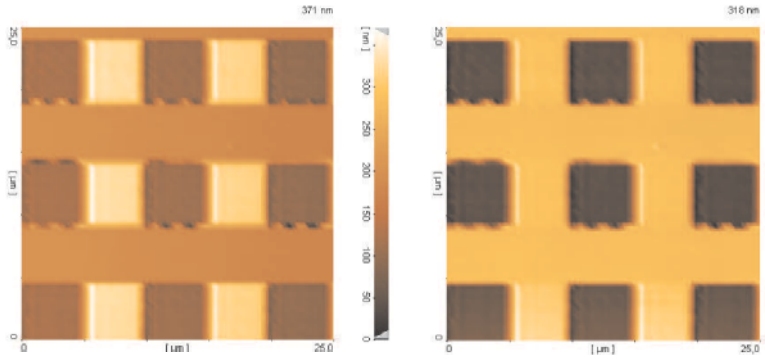


شکل ۴-۸: تصویر پس از اعمال متوسط خط. خط‌های افقی کاملا برطرف شده‌اند.

این عمل‌گر فقط وقتی عمل می‌کند که میانه‌ی هر خط، تقریبا ثابت باشد که معمولا در مورد سطح‌های طبیعی یا اتفاقی، همین‌طور است. اما، زمانی که یک طرح مشخص تکرار شود (مانند نمونه‌های استاندارد)، استفاده از این عمل‌گر مشکلاتی را ایجاد می‌کند. شکل ۴-۹، مثالی از نتیجه‌ی بد ناشی از انجام فرایند متوسط خط را روی چنین نمونه‌ای نشان می‌دهد. خود طرح تناوبی، یک تغییر ارتفاع میانه به وجود می‌آورد، بنابراین، استفاده از تصحیح متوسط خط، در این مورد، اشتباه است.

[1] Line mean

MaharFan



(الف) تصویر اصلی (ب) بعد از تصحیح متوسط خط

شکل ۴-۹: تصویر نمونه‌ای با الگوی منظم؛ در این مورد تصحیح متوسط خط نتیجه بدی می‌دهد.

۴-۴-۲- تصحیح صفحه

غالبا AFM برای بررسی سطوح بسیار تخت استفاده می‌شود. سطح تخت یعنی سطح روبشی مثلا با اندازه ۵×۵ µm با اختلاف ارتفاع فقط چند نانومتر، به گونه‌ای که ابعاد x-y، ۱۰۰۰ برابر بزرگ‌تر از ارتفاع z باشند. بنابراین، فقط چرخش بسیار کوچکی بین سطح نمونه و صفحه‌ی روبش، باعث اختلاف ارتفاع زیادی می‌شود که می‌تواند مانع دیدن اختلاف ارتفاع‌های واقعی روی سطح نمونه شود. برای به دست آوردن نتایج مناسب در هنگام اندازه‌گیری AFM روی نمونه‌های تخت، باید یک صفحه از تصویر کم کرد[۱]. این عمل، تصحیح صفحه[۲] نامیده می‌شود.

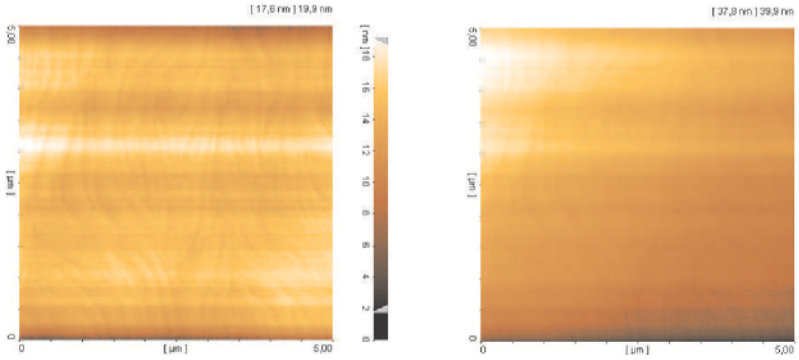
علاوه بر تصحیح مرتبه‌ی ۱ صفحه، تصحیح مرتبه‌ی ۲ صفحه نیز قابل‌انجام است. اعمال تصحیح مرتبه‌ی ۲ صفحه به این معناست که نه فقط صفحه، بلکه انحنای درجه‌ی دوم آن نیز تصحیح می‌شود. این تصحیح، برای روبش سطح بزرگی از نمونه‌های بسیار تخت، مفید است زیرا کانتی‌لیور در واقع روی سطح یک کره (با شعاع بسیار بزرگ) و نه روی یک صفحه‌ی تخت حرکت می‌کند. ولی این مساله فقط روی سطوح روبش بزرگ اثرگذار است.

شکل ۴-۱۰ تصویر را قبل و بعد از اعمال تصحیح صفحه نشان می‌دهد. ساختار سطح کمی بهتر قابل‌مشاهده است ولی حالا ارتعاشات با فرکانس پایین بیش‌تر مشاهده می‌شوند.

[۱] کم کردن صفحه، با فیت کردن یک خط عددی در جهت‌های x و y انجام می‌شود.

[2] Plane correction

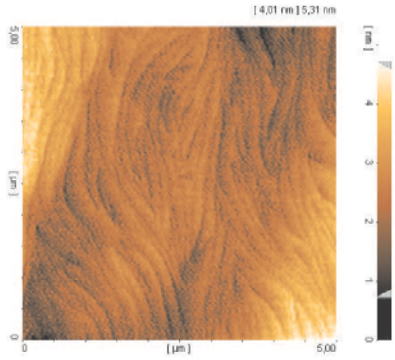
MaharFan



(الف) تصویر اصلی (ب) بعد از تصحیح درجه اول صفحه

شکل ۴-۱۰: تصویر شکل ۴-۷، پس از اعمال تصحیح صفحه.

شکل ۴-۱۱ تصویر را بعد از اعمال هر دو تصحیح صفحه و متوسط خط نشان می‌دهد. اکنون، کیفیت تصویر بسیار بهتر از وقتی است که فقط یکی از این دو تصحیح اعمال شود.



شکل ۴-۱۱: تصویر شکل ۴-۱۰، بعد از اعمال تصحیح صفحه و متوسط خط. حالا ساختار سطح به خوبی قابل‌مشاهده است و تصویر بسیار روشن و مشخص است.

ترتیب اعمال دو تصحیح صفحه یا متوسط خط، مهم نیست. تصحیح صفحه، متوسط خط‌ها را تغییر نمی‌دهد و متوسط خط خودکار، تصحیح مرتبه‌ی ۱ صفحه را در جهت y انجام می‌دهد (از پایین به بالا) ولی صفحه‌ی x را تغییر نمی‌دهد. البته، ممکن است ترتیب اعمال، تغییر کند.

بنابراین، قانون کلی این است که:

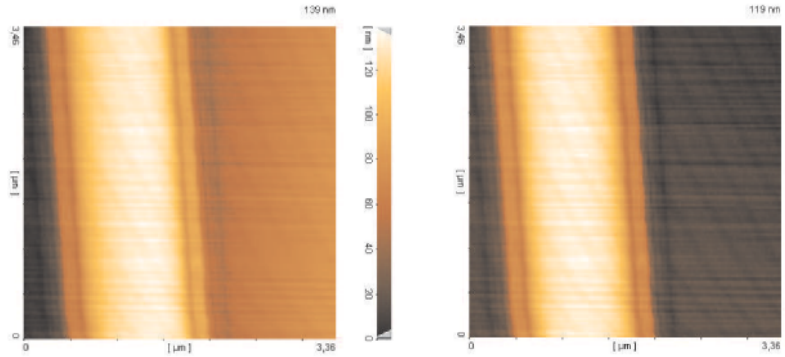
هر دو تصحیح صفحه و متوسط خط را با هم استفاده کنید

MaharFan

معمولا، هنگام روبش نمونه‌های تخت، باید تصحیح خودکار مرتبه‌ی ۱ صفحه و متوسط خط را در منوی «اندازه‌گیری» فعال کنید. سپس نرم‌افزار SPM، به صورت خودکار هر دو تصحیح را حین روبش انجام می‌دهد. به این ترتیب، کاربر می‌تواند بلافاصله کیفیت روبش جاری را ارزیابی کند.

ولی همانند متوسط خط، تصحیح صفحه نیز گاهی نتایج خوبی نمی‌دهد. شکل ۴-۱۲، مثالی را نشان می‌دهد که در آن، تصحیح خودکار صفحه، مشکل ایجاد می‌کند. در این‌جا، ستون نوار چپ باعث می‌شود سطح تخت بالا و سمت راست، به صورت چرخیده به نظر بیاید. در این مورد، باید از تصحیح دستی صفحه استفاده کرد. به این ترتیب، کاربر می‌تواند تصمیم بگیرد که از چه سطحی برای تصحیح صفحه استفاده کند.

با فعال کردن پنل حاوی یک تصویر، تصحیح صفحه را انجام دهید. سپس دکمه مناسب را در نوار کنترل ارزیابی (شکل ۴-۱) فشار دهید. اکنون، یک نوارابزار انتخاب ناحیه ظاهر می‌شود (شکل ۴-۵). در مورد تصویر نشان‌داده‌شده در بالا، یک ناحیه‌ی مستطیلی در قسمت تخت بالای نوار یا سمت راست نوار انتخاب کنید. بعد از انتخاب ناحیه، صفحه‌کلید تصحیح دستی صفحه ظاهر می‌شود که شامل تصویر تصحیح‌شده و تصویر دیگری است که صفحه‌ی کم‌شده را نشان می‌دهد. تصویر تصحیح‌شده را با استفاده از موش‌واره به پنل دیگری بکشید. اکنون تصویر، سطح‌های واقعا تخت را به درستی نشان می‌دهد.



(الف) تصحیح دستی صفحه (ب) تصحیح خودکار مرتبه‌ی ۱ صفحه

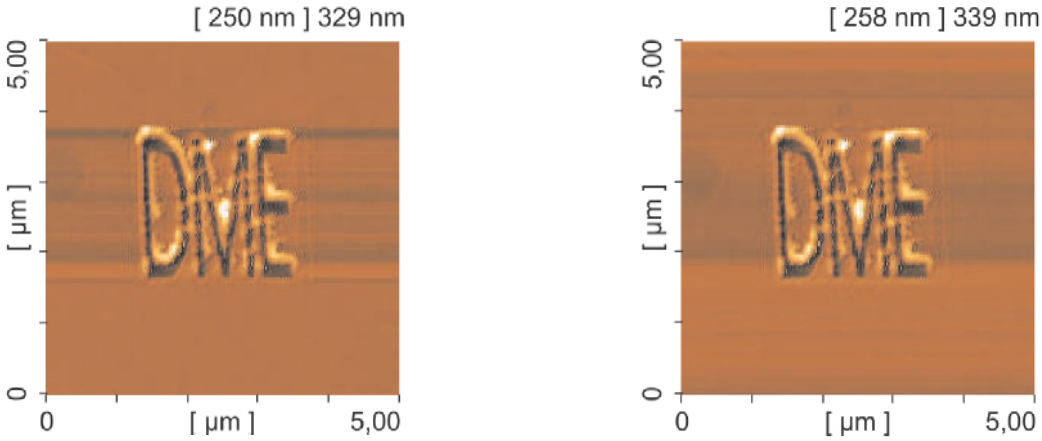
شکل ۴-۱۲: اگر توزیع ارتفاع‌ها و فرورفتگی‌های خود تصویر یک‌نواخت نباشد، ممکن است تصحیح خودکار صفحه، نتیجه خوبی ندهد.

۴-۴-۳- متوسط خط جزیی

در شکل ۴-۹، مثالی نشان داده شده است که در آن نتایج غیرقابل‌استفاده‌ای با استفاده از عمل‌گر متوسط خط به وجود آمده است. معمولا برای نمونه‌هایی که حاوی نوعی الگوی منظم باشند، این اتفاق می‌افتد.

MaharFan

شکل ۴-۱۳ نمونه‌ی متفاوتی را نشان می‌دهد که باز هم عمل‌گر متوسط خط، نتایج قابل‌استفاده‌ای به وجود نمی‌آورد.



(الف) فقط تصحیح شیب انجام شده (ب) هم تصحیح شیب و هم متوسط خط انجام شده

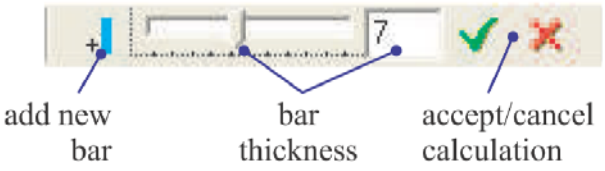
شکل ۴-۱۳: در وسط این تصویر، حروف "DME" با استفاده از عمل‌گر لیتوگرافی DME، در فیلم پلیمری فشرده شده است. بعضی از مواد برداشته‌شده، در کناره‌های حروف جمع شده‌اند که باعث به وجود آمدن نقاط کوچکی در تصویر شده‌اند که ارتفاع بسیار بیش‌تری از بقیه‌ی تصویر دارند. در این مورد، عمل‌گر متوسط خط، نتایج خوبی به وجود نمی‌آورد.

عمل‌گر متوسط خط جزیی، امکان مشخص کردن بخش‌هایی از تصویر را به کاربر می‌دهد که باید برای محاسبه‌ی متوسط خط استفاده شوند. برای این که متوسط خط عمل کند، باید تمام خطوط در محاسبه شامل شوند، یعنی باید ستونی انتخاب شود که از همه‌ی خطوط بگذرد. می‌توان این ستون را به صورت افقی جابه‌جا کرد تا فقط از قسمت تخت نمونه بگذرد.

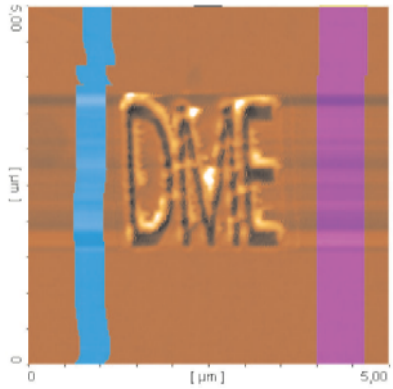
برای انجام متوسط خط جزیی تصویر مربوطه را انتخاب کرده و دکمه‌ی "Partial Line Mean" را در نوارابزار فشار دهید (شکل ۴-۱). اکنون، نوارابزار متوسط خط جزیی (شکل ۴-۱۴) نمایش داده می‌شود و ستون عمودی در تصویر انتخاب‌شده ظاهر می‌شود. سپس می‌توان این ستون را با استفاده از موش‌واره به قسمت مناسب تصویر، منتقل کرد. می‌توان عرض ستون را با لغزاننده‌ی افقی در نوارابزار متوسط خط جزیی،

MaharFan

تغییر داد (شکل۴-۱۴). بعد از این‌که ستون به قسمت مناسب تصویر منتقل شد، می‌توان با فشار دادن دکمه‌ی مربوطه در نوارابزار متوسط خط جزیی، ستون دیگری را اضافه کرد (شکل ۴-۱۵).



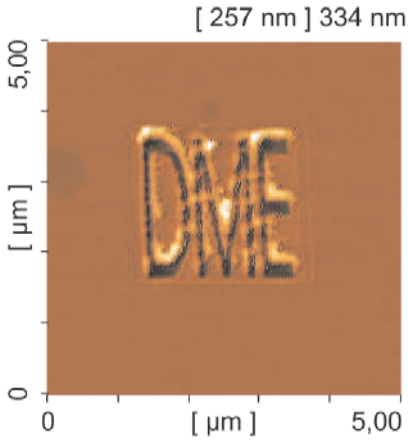
شکل ۴-۱۴: نوارابزار متوسط خط جزیی.



۴-۱۵: تصویر با دو ستون متوسط خط جزیی. هر دو طرف ساختار لیتوگرافی برای استفاده در محاسبه‌ی متوسط خط، استفاده می‌شود.

وقتی که تمام ستون‌ها در جای مناسب قرار داده شدند، نشان‌گر checkmark سبز را در نوارابزار فشار دهید و موقعیت ستون‌ها را تایید کنید. سپس، تصحیحات روی تصویر اعمال می‌شود. شکل ۴-۱۶ تصویر تصحیح‌شده‌ی متوسط خط جزیی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خطوط مزاحم افقی کاملا حذف شده‌اند.

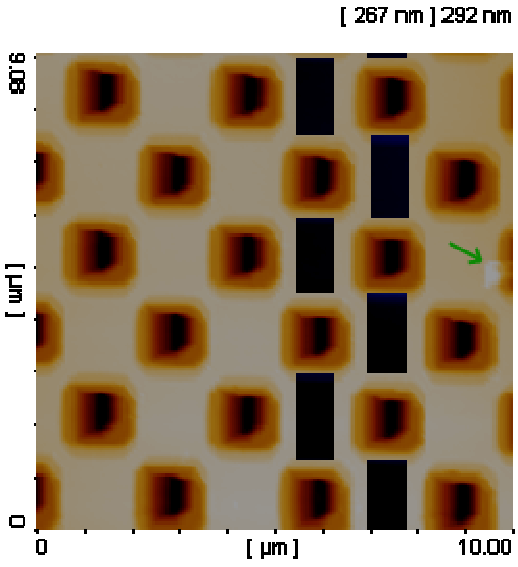
MaharFan



شکل ۴-۱۶: تصویر بعد از اعمال تصحیح متوسط خط جزیی. خطوط افقی مزاحم، حذف شده‌اند.

عمل‌گر متوسط خط جزیی را نیز می‌توان مانند سایر محاسبات تصویر برطرف کرد و تصویر را به حالت اولیه، برگرداند. برای این کار، روی دکمه‌ی "Image ID …" و بعد درون آن روی "Calculations" کلیک کنید. برای برطرف کردن یک محاسبه، روی آن کلیک کرده و دکمه‌ی delete را فشار دهید.

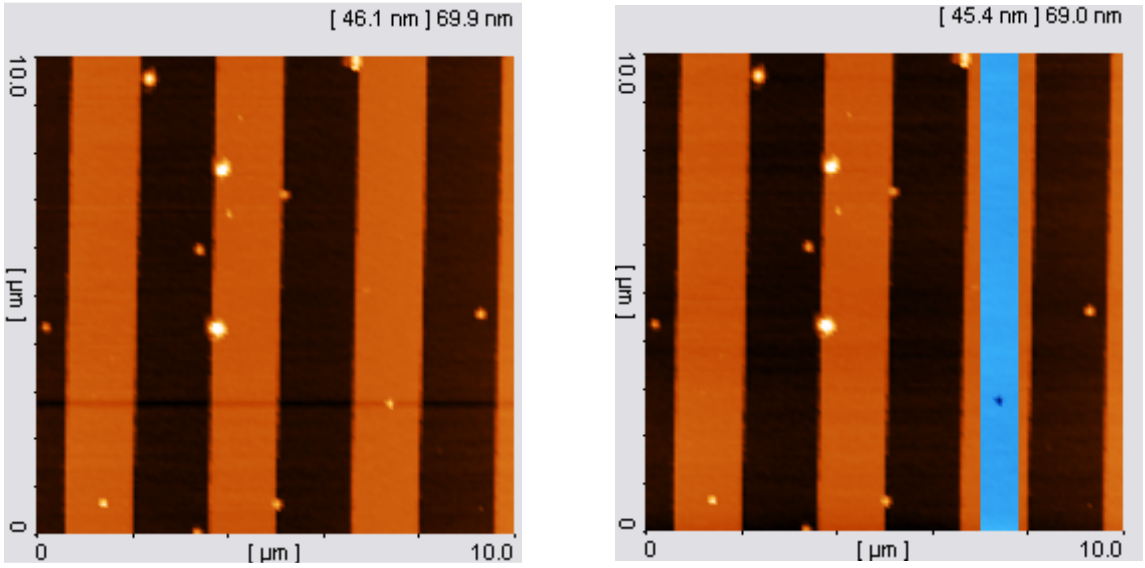
در مورد نمونه‌های دارای اختلاف ارتفاع (شکل ۴-۱۷)، باید ستون موردنظر روی تصویر را به گونه‌ای انتخاب کنید که فقط از مناطق مسطح تصویر نمونه عبور کرده و آلودگی‌های روی تصویر (فلش روی شکل ۴-۱۷) را دربرنگیرد.



شکل ۴-۱۷

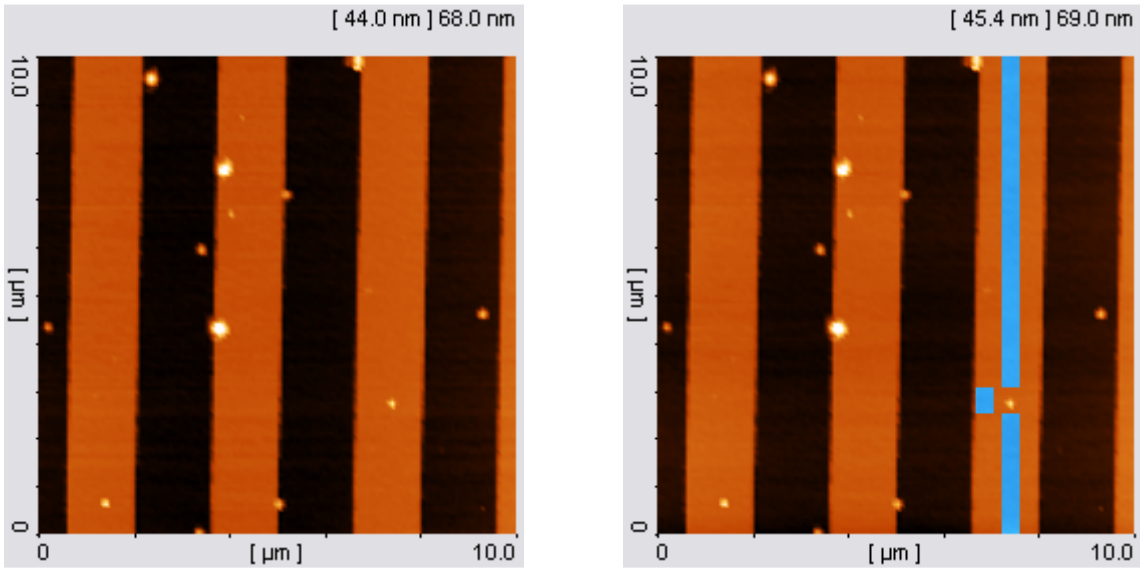
MaharFan

در مورد نمونه‌های دارای دو سطح موازی با ارتفاع متفاوت (مانند نمونه‌ی استاندارد شیاردار)، باید ستون موردنظر ترجیحا روی یکی از خطوط عمودی تصویر انتخاب شود. در صورت عبور ستون از مناطق دارای آلودگی (شکل ۴-۱۸الف)، پس از عمل‌گر متوسط خط جزیی، خطی افقی روی آن منطقه در تصویر ظاهر می‌شود (شکل ۴-۱۸ب) و تصویر قابل‌استفاده نیست. در صورت جابه‌جایی افقی ستون در منطقه‌ی دارای آلودگی (شکل۴-۱۹الف)، تصویر پس از اعمال متوسط خط جزیی کیفیت مناسبی خواهد داشت.



(الف) (ب)

شکل ۴-۱۸



(الف) (ب)

شکل ۴-۱۹

MaharFan