

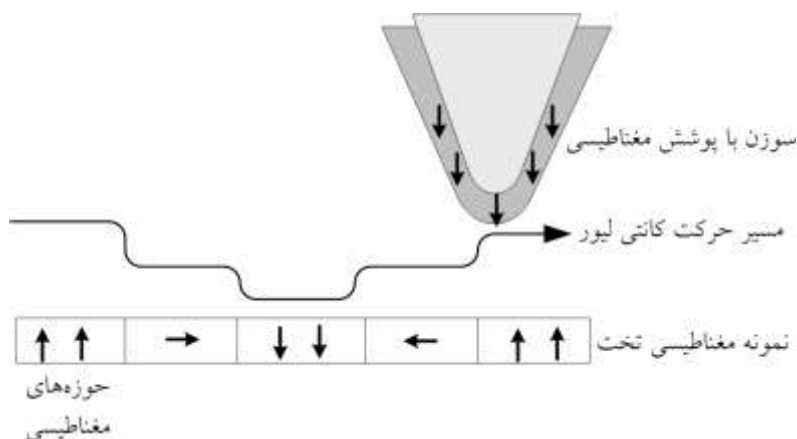
راهنمای کار با تکنیک MFM (*Magnetic Force Microscopy*)

فهرست :

1. مروری بر تکنیک..... 3
2. راهنمای استفاده از نرم افزار SPM شرکت DME 5
 - 1-2. نحوه روشن کردن دستگاه و تعویض پروب 5
 - 2-2. نحوه ورود به برنامه 5
 - 3-2. تهیه یک تصویر توپوگرافی ساده 8
 - 4-2. تصحیح شیب 9
 - 5-2. تنظیمات مربوط به حالت های AC , DC 12
 - 6-2. شروع به تصویر سازی از نیروهای مغناطیسی 14
 - 7-2. نمونه تصاویر 15
3. نکته های قابل توجه 18
 - 1-3. برخی از پارامترهای موثر در تشکیل تصویر MFIM 18
 - 2-3. تهیه یک تصویر توپوگرافی 18
 - 3-3. تنظیم شیب 18
 - 4-3. گرفتن دو یا چند تصویر پیاپی 18

1. مروری بر تکنیک

میکروسکوپی نیروی مغناطیسی معمولاً به عنوان یک تکنیک میکروسکوپی نیروی روبشی در نظر گرفته می‌شود که به اندازه‌گیری نیروهای سوزن-نمونه ایجاد شده¹ توسط یک میدان مغناطیسی، اختصاص یافته است. در حقیقت، اگر از سوزنی با پوشش فرومغناطیسی استفاده شود، می‌توان از هر میکروسکوپ نیروی روبشی به عنوان میکروسکوپ نیروی مغناطیسی استفاده نمود. در این صورت، AFM نسبت به خطوط میدان مغناطیسی خارج شده² از نمونه، حساس می‌شود.



اساس کار بر مبنای روبش سطح نمونه، با سوزن پوشیده شده از مواد فرومغناطیس (مانند Co یا Ni) می‌باشد. غالباً این سوزن در انتهای بازویی که کانتی لیور نامیده می‌شود، قرار دارد. در شکل زیر نمونه‌ای از این مجموعه که پروب دستگاه را تشکیل می‌دهند، مشاهده می‌شود.



الف) نمایی از کانتی لیور (ب) سوزن

اگرچه می‌توان هر میکروسکوپ نیروی روبشی را به عنوان میکروسکوپ نیروی مغناطیسی استفاده کرد، اندازه‌گیری نیروهای مغناطیسی، مسئله‌ای قابل بحث است. در حالی که در یک آزمایش معمول میکروسکوپی نیروی روبشی، نیروی سوزن-نمونه معمولاً در محدوده nN است که برای اندازه‌گیری توپوگرافی نمونه در حالت‌های دینامیکی (AC) و استاتیکی (DC) استفاده می‌شود، نیروهای مغناطیسی، معمولاً دو یا سه برابر کوچک‌تر هستند در نتیجه، آشکارسازی این نیروهای کوچک مغناطیسی بسیار مشکل است.

¹mediated
²emanating

به همین دلیل، روبش در فاصله معینی که فقط نیروهای مغناطیسی حس شوند، انجام می گیرد. نیروی مغناطیسی نسبت به نیروهای توپوگرافی در فواصل بیشتر سوزن تا نمونه باقی می ماند. بنابراین در این تکنیک حفظ فاصله سوزن تا نمونه حائز اهمیت خواهد بود.

برای تثبیت فاصله، ابتدا سوزن مخصوص متصل به کانتی لیور، سطح نمونه را برای به دست آوردن اطلاعات توپوگرافی روبش می کند.

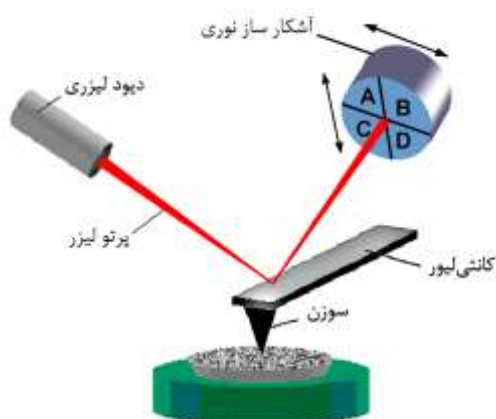
وقتی که توپوگرافی اندازه گیری گردید، می توان از این داده ها برای ثابت نگه داشتن فاصله سوزن- نمونه در طی روبش دوم همان ناحیه، استفاده نمود. سپس برهم کنش مغناطیسی سوزن- نمونه در حالی که سوزن از سطح نمونه دور شده ثبت می شود.

همانگونه که ذکر شد سوزن MFM از ماده فرومغناطیس پوشیده شده است، بنابراین می تواند از حوزه های مغناطیسی طبیعی یا ایجاد شده در سطح نمونه تصویر سازی نمود. تکنیک MFM در حالت های دینامیکی (AC) و استاتیکی (DC) AFM انجام می شود.

در حالت AC تصویر توپوگرافی لازم برای تثبیت فاصله و تصویر مغناطیسی، هر دو در حالت دینامیکی تهیه می شوند. در حالت AC نیروهای اعمال شده روی سوزن، با تغییر در خواص دینامیکی کانتی لیور، مانند فاز، دامنه یا فرکانس رزونانس باعث ایجاد تصویر می شود. در این حالت کانتی لیور با فرکانس رزونانس معین مرتعش شده و سطح را روبش می کند. نیروهای اعمالی به سوزن باعث تغییر فرکانس $(\Delta f \ll f_0)$ می شوند.

در حالت DC نیز تصویر توپوگرافی لازم برای تثبیت فاصله و تصویر مغناطیسی، هر دو در حالت استاتیکی تهیه می شوند. برآیند نیروهای مغناطیسی سطح، باعث انحراف کانتی لیور شده و اندازه و جهت این انحراف باعث ایجاد تصویر می شود.

اغلب MFM هایی که امروزه عرضه می شوند موقعیت کانتی لیور را با تکنیک های اپتیکی تعیین می کنند. در متداول ترین آنها که در شکل پایین نشان داده شده است، یک اشعه لیزر تابانده شده به پشت کانتی لیور به سمت یک آشکارساز نوری حساس به وضعیت^۳ (PSPD) منعکس می شود. با خم شدن کانتی لیور جای اشعه لیزر روی دکتور تغییر می کند. PSPD می تواند جابجایی سوزن به کوچکی 1/ آنگستروم را هم اندازه گیری کند.



شماتیک سیستم اپتیکی تعیین موقعیت کانتی لیور

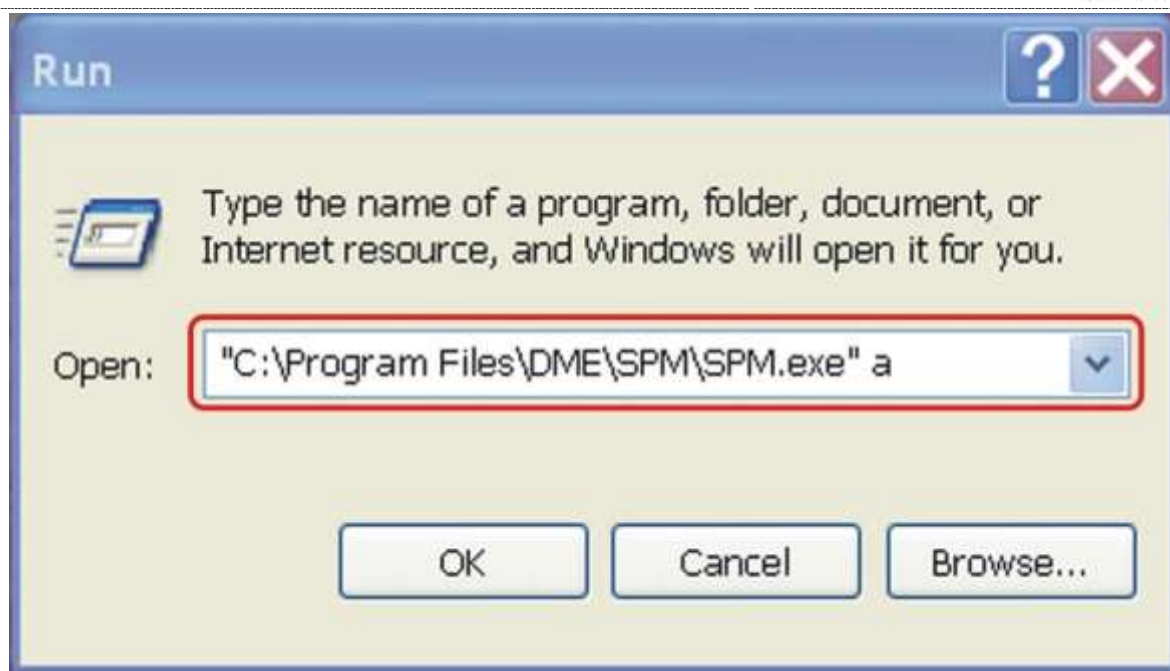
2. راهنمای استفاده از نرم افزار SPM شرکت DME

2-1. نحوه روشن کردن دستگاه و تعویض پروب

ابتدا دستگاه کنترلر را روشن کنید، بعد از روشن کردن کنترلر، 4 صدای کلیک از دستگاه روبشگر به گوش می‌رسد. سپس منبع تغذیه دوربین CCD را از طریق کلید پشت آن روشن کنید. در اولین قدم برای تعویض پروب و نصب پروب مخصوص MFM (به کمک برنامه DME-SPM با انجام قدم به قدم تمامی مراحل) اقدام نمایید. برای این کار پس از ورود به برنامه (که در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد) از منوی *Utility* گزینه *Change Probe* را انتخاب کنید و مراحل را مطابق با راهنماییهای برنامه تا تعویض کامل پروب طی کنید.

2-2. نحوه ورود به برنامه

برای کار در حالت MFM به علت اینکه سوزن در یک فاصله معینی از سطح نمونه حرکت می‌کند شما نمی‌توانید از حالت معمول وارد برنامه شده و از این قابلیت استفاده نمایید. جهت دسترسی به این تنظیم باید از حالت *Service Mode* یا *Advanced user* برنامه استفاده کنید. برای این کار وارد منوی *Start* شده و گزینه *Run* را انتخاب کنید. سپس با استفاده از دکمه *Browse* به آدرسی که برنامه SPM شرکت DME را نصب کرده‌اید رفته و فایل *SPM.EXE* را انتخاب نمایید. در انتهای این آدرس باید حرف **a** را اضافه نمایید (شکل 1). با کلیک کردن دکمه *OK* برنامه وارد حالت *Service Mode* یا *Advanced user* می‌گردد (شکل 2).



شکل 1: نحوه ورود به برنامه. در انتهای آدرس برنامه حرف a را اضافه کنید.



شکل 2: حالت کاربران پیشرفته یا حالت سرویس

به هیچ عنوان غیر از کار در حالت MFMM وارد این قسمت از برنامه نشوید و هیچ یک از تنظیمات اضافی و گزینه‌های دیگر برنامه را تغییر ندهید چون ممکن است دستگاه از تنظیم خارج شده و درست کار نکند.

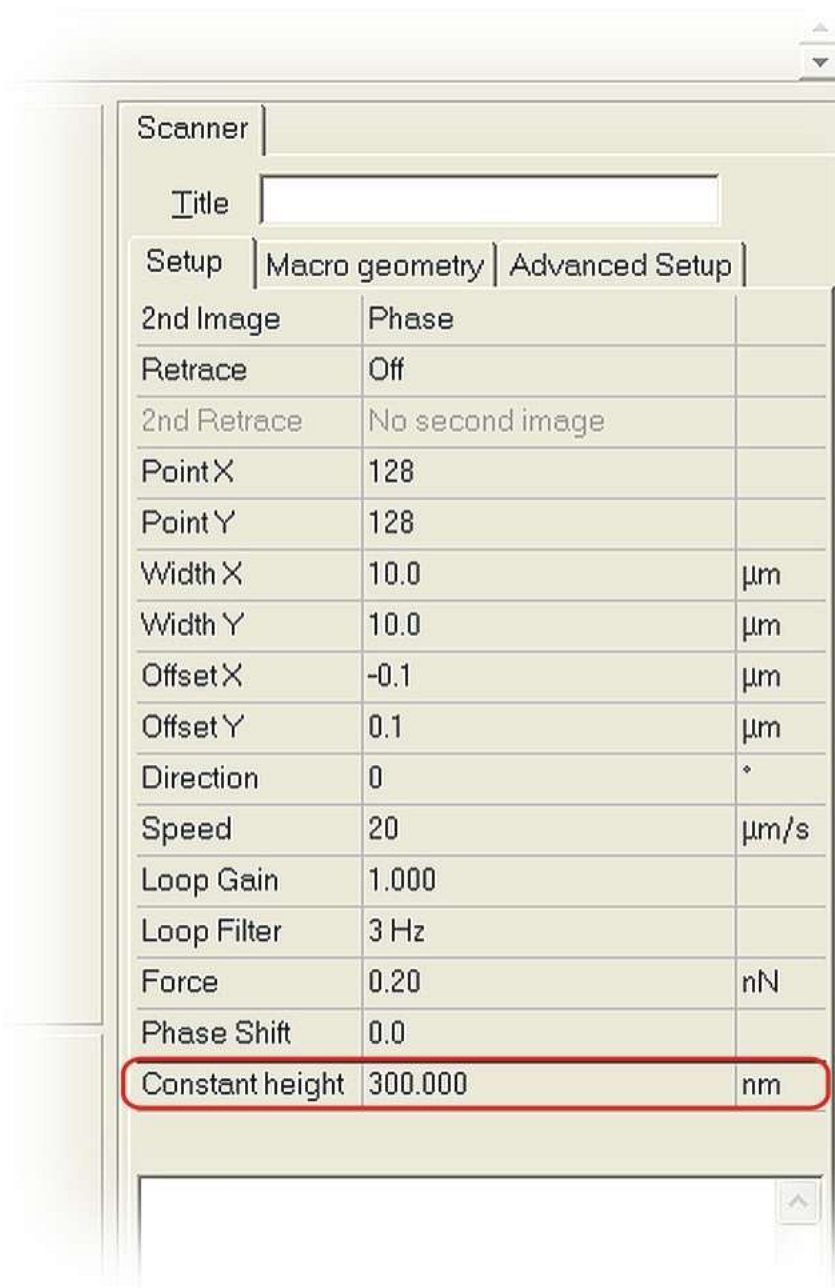


با کمی دقت در ستون سمت راست برنامه در برگه *Setup* متوجه خواهید شد که در انتهای گزینه‌های آن، گزینه‌ای با نام *Constant height* اضافه شده است که این همان گزینه جهت تنظیم ارتفاع سوزن می‌باشد (شکل 3).

در این دستور کار تمامی تنظیمها، روشها و تصویرهای نمونه برای حالت AC می‌باشند. همچنین توضیحاتی در مورد حالت DC نیز در ادامه ذکر شده است.

مراحل اولیه کار (تعویض پروب مخصوص MFMM، تنظیم نمونه زیر اسکنر، فوکوس کردن تصویر CCD و ...) با بقیه حالت‌های AFM یکسان است.



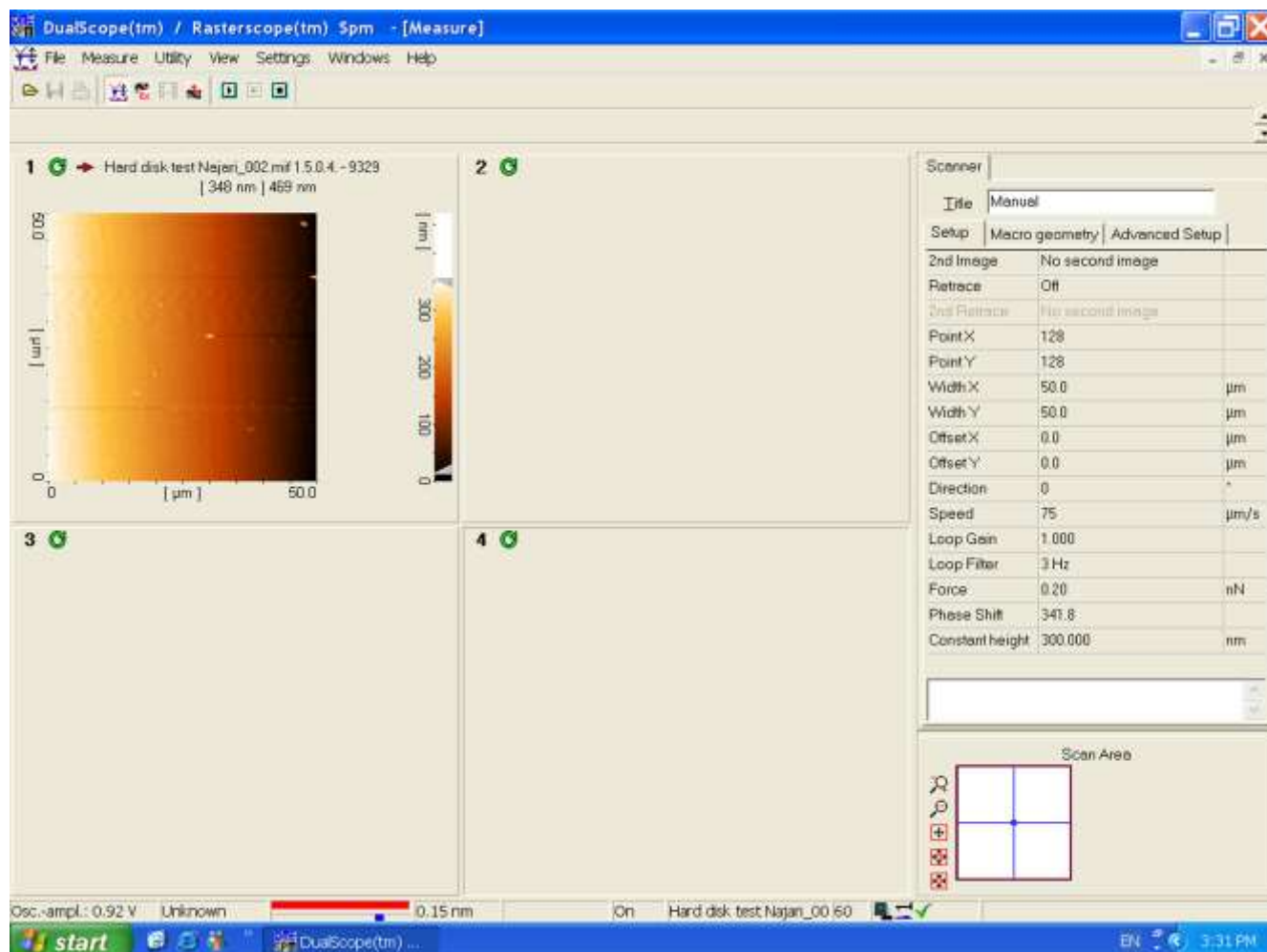


Scanner		
Title		
Setup Macro geometry Advanced Setup		
2nd Image	Phase	
Retrace	Off	
2nd Retrace	No second image	
Point X	128	
Point Y	128	
Width X	10.0	μm
Width Y	10.0	μm
Offset X	-0.1	μm
Offset Y	0.1	μm
Direction	0	°
Speed	20	μm/s
Loop Gain	1.000	
Loop Filter	3 Hz	
Force	0.20	nN
Phase Shift	0.0	
Constant height	300.000	nm

شکل 3: ستون سمت راست برنامه. در انتهای این ستون گزینه اضافی جهت تنظیم ارتفاع سوزن مشاهده می شود.

3-2. تهیه یک تصویر توپوگرافی ساده

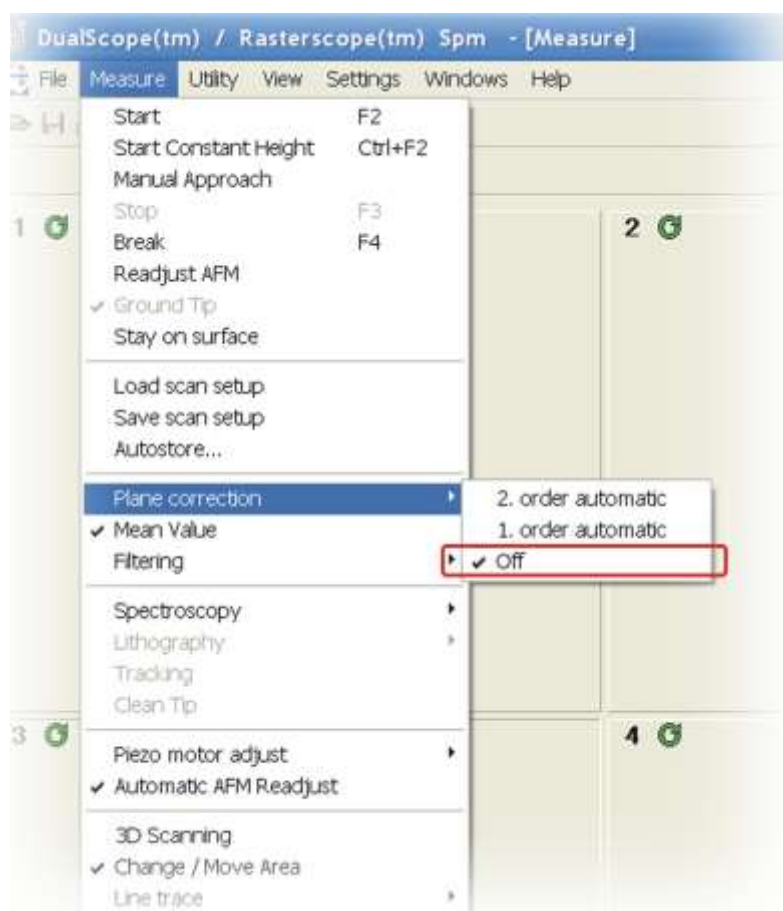
برای شروع باید (بدون تغییر در تنظیم *Constant height*) یک تصویر توپوگرافی ساده از سطح نمونه تهیه نمود. در زیر، تصویر توپوگرافی از سطح یک هارد دیسک (که در مثالهایی که در ادامه خواهد آمد از آن استفاده شده است) را مشاهده می کنید (شکل 4).



شکل 4: تصویر توپوگرافی تهیه شده از سطح یک هارد دیسک در اندازه $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ به همراه تنظیمات آن

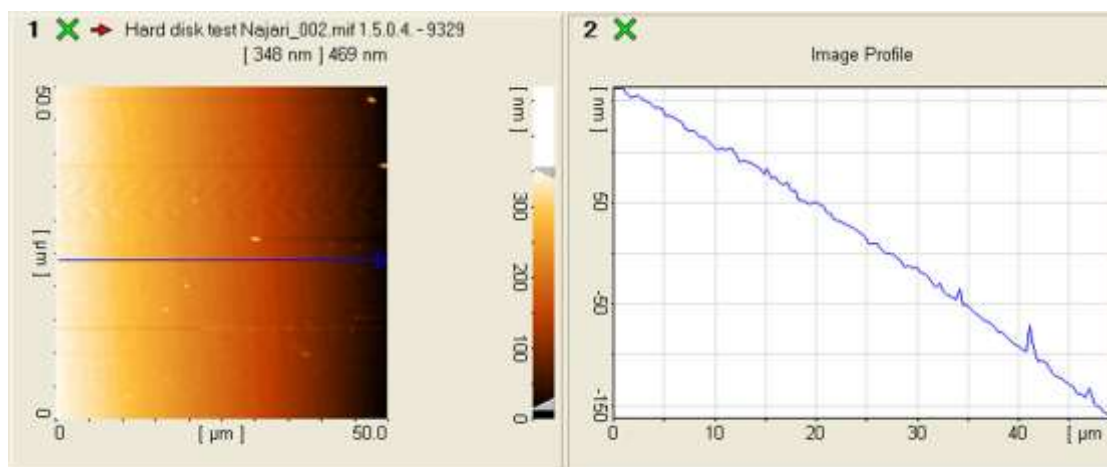
2-4. تصحیح شیب

در این حالت بسیار مهم است که بعد از تهیه تصویر توپوگرافی تا حد امکان شیب نمونه خود را تصحیح کنید. برای تصحیح شیب ابتدا می‌بایستی که "تصحیح خودکار تصویر"، در برنامه را غیرفعال نمایید. برای این کار به منوی *Measure* رفته و سپس از قسمت *Plane correction* گزینه *off* را انتخاب نمایید، تا شیب تصویر به طور واقعی نمایش داده شود (شکل 5).



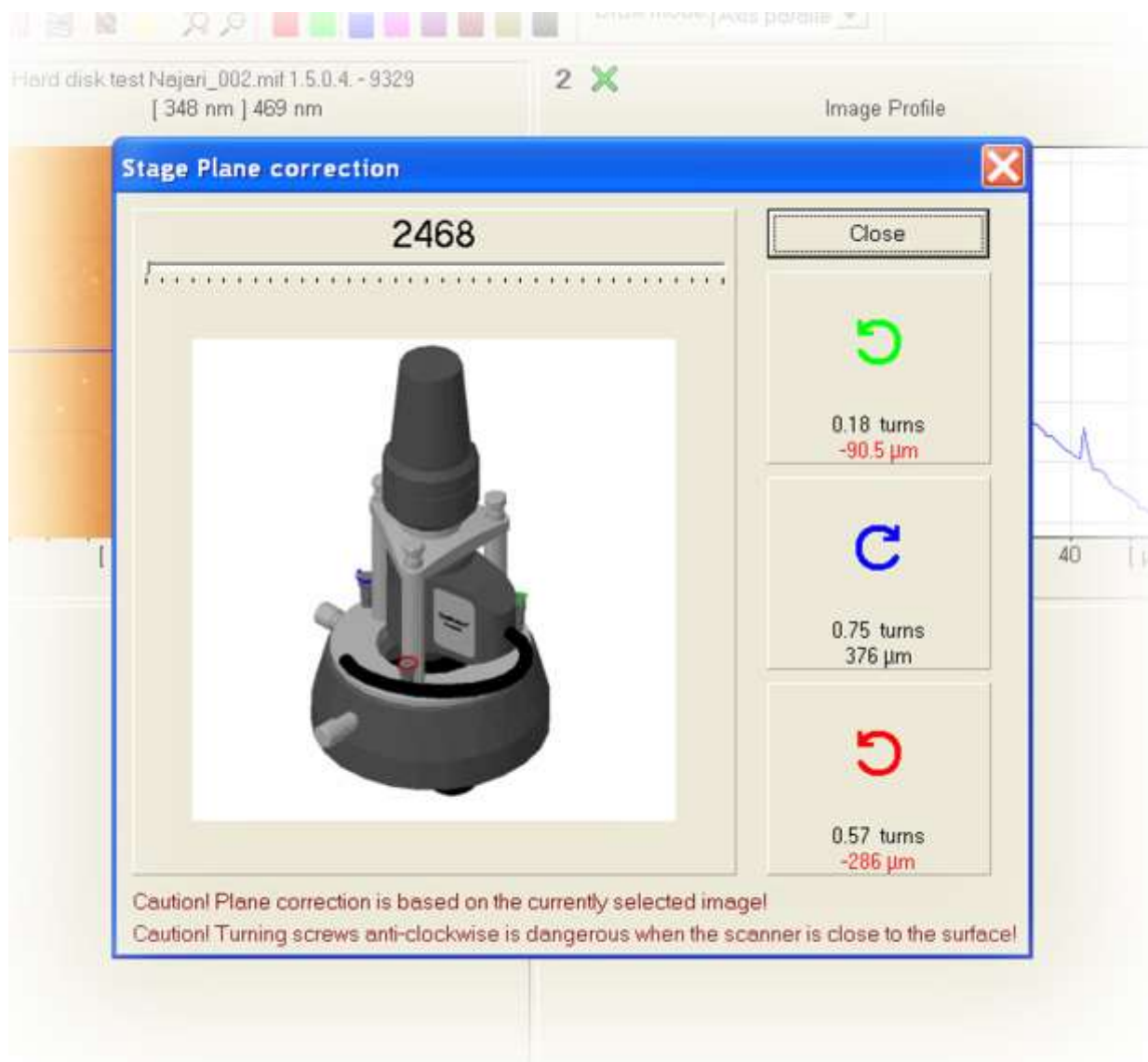
شکل 5: نحوه غیر فعال کردن تصحیح خودکار شیب تصویر

در شکل 6 پروفایل شیب سطح نمونه را مشاهده می‌نمایید که باید با تنظیم پایه دستگاه، این شیب به حداقل برسد.



شکل 6: اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع نمونه (شیب) که در حدود 300 نانومتر در فاصله 50 میکرون می‌باشد.

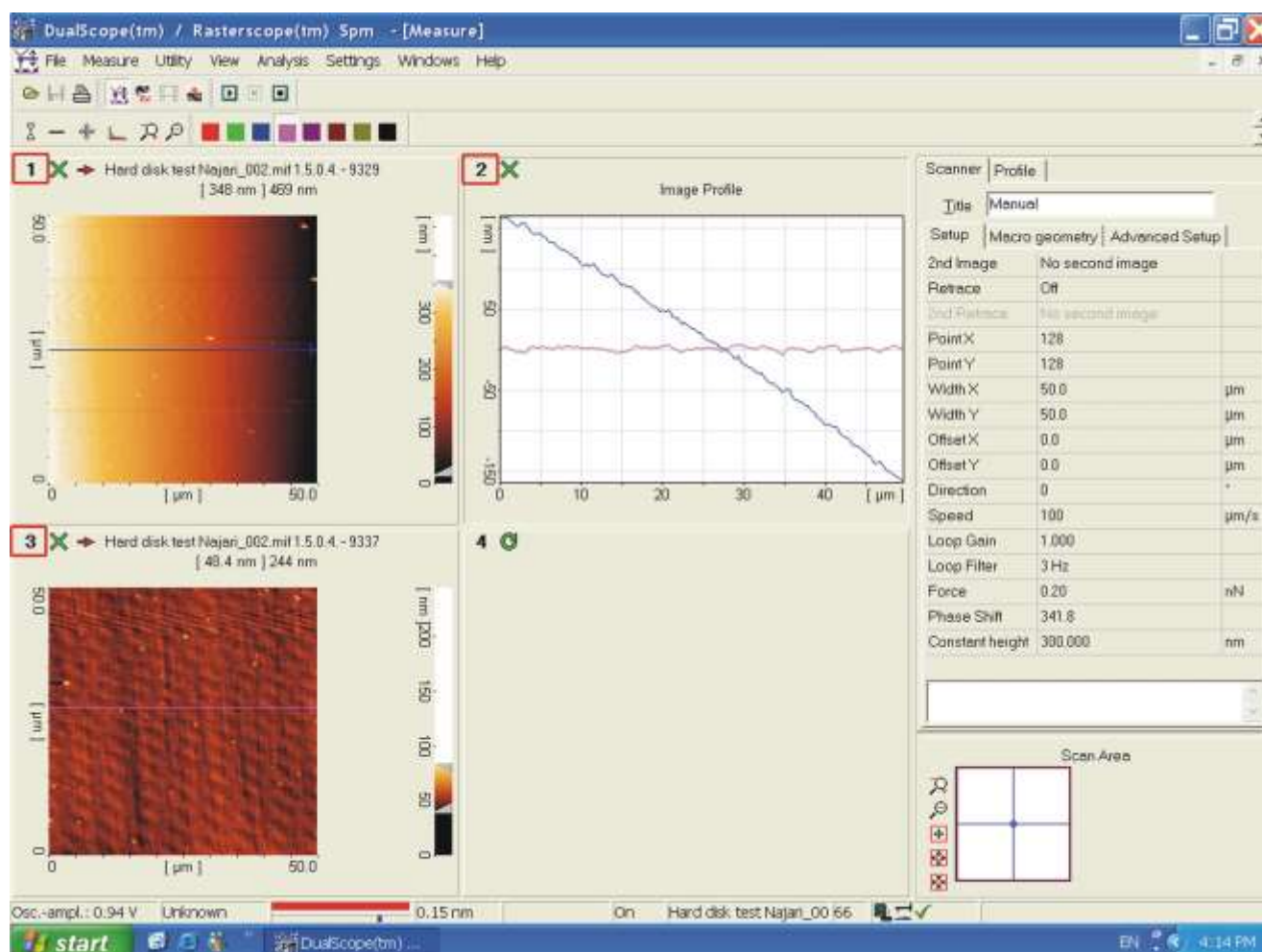
سپس برای تصحیح شیب نمونه خود با تنظیم پایه، می‌توانید از خود برنامه کمک بگیرید. برای این کار پس از کامل شدن تصویر توپوگرافی اول به منوی *utility* رفته و گزینه *plane correct stage* را انتخاب نمایید. با استفاده از راهنماییهای این بخش از برنامه شما می‌توانید شیب نمونه خود را در جهت X تا حد زیادی تصحیح نمایید (شکل 7).



شکل 7 : با استفاده از راهنماییهای این قسمت از برنامه می‌توانید به سادگی شیب نمونه خود را تصحیح کنید.

برای تهیه یک تصویر خوب، شیب نمونه باید به حداقل ممکن و در حدود چند ده نانومتر یا کمتر در فاصله 50 میکرومتری باشد.

جهت اطمینان از تصحیح کامل و درست شیب نمونه در جهت X دوباره یک تصویر توپوگرافی از سطح بگیرید. برای تصحیح شیب در جهت محور Y لازم است پیچ جلویی پایه را به اندازه نیم دور در جهت عقربه‌های ساعت بچرخانید. بعد از رسیدن به حالت مطلوب در توپوگرافی می‌توانید اندازه گیریهای MFM را شروع کنید (شکل 8).



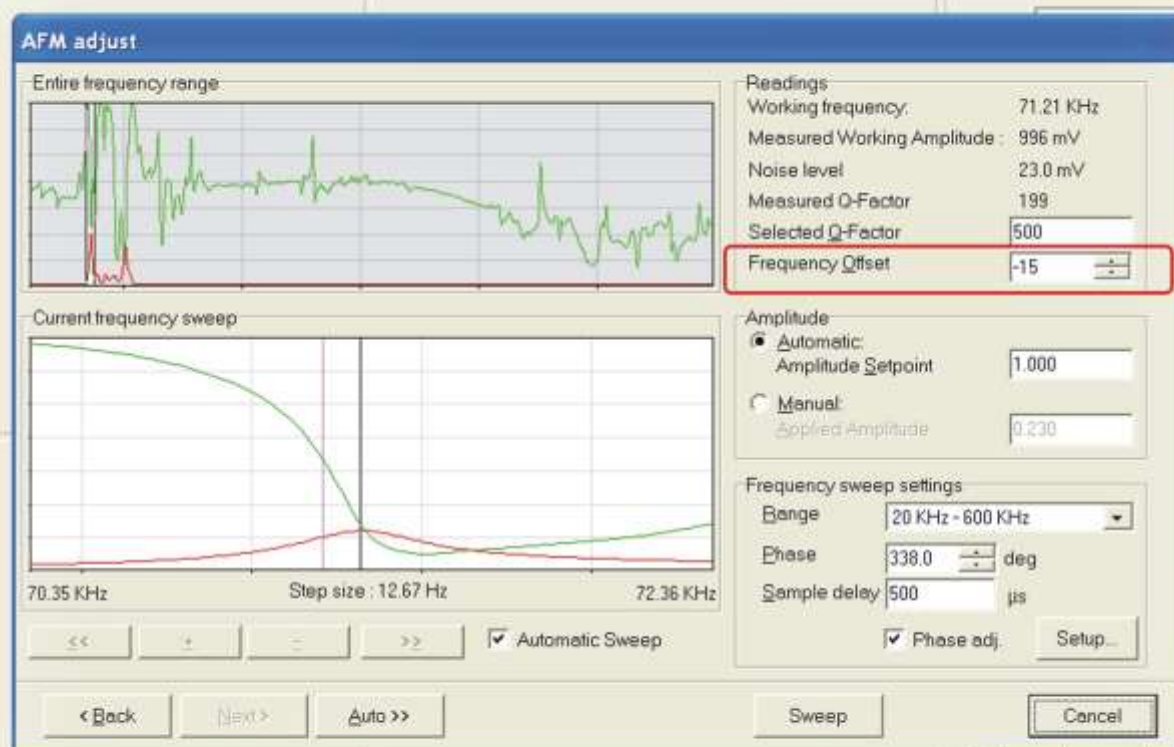
شکل 8: تصویر توپوگرافی در قاب شماره 1، تصویر قبل از تصحیح شیب و تصویر توپوگرافی قاب شماره 3 تصویر بعد از تصحیح شیب می‌باشد. در قاب شماره 2 پروفایل مقایسه شیب این دو تصویر را می‌بینید.

شما می‌توانید با همان پروب MFM هم در حالت DC و هم در حالت AC کار کنید. معمولاً در حالت AC نتیجه بهتری حاصل می‌گردد (به دلیل اینکه نویزهای محیطی بر روی حالت AC تأثیر کمتری دارند).

5-2. تنظیمات مربوط به حالت‌های AC , DC

در حالت AC در طول انجام مراحل *AFM Adjust* در قسمتی که دستگاه فرکانس رزونانس کانتی‌لیور را محاسبه می‌کند باید گزینه *Frequency offset* را از عدد 9- به عدد 15- برای تهیه تصویر MFM تغییر دهید (شکل 9).

برای تهیه تصویر MFM حتماً باید *second image* فعال باشد. اگر از حالت DC استفاده می‌کنید تصویر دوم را باید *Error signal* انتخاب کنید و اگر از حالت AC استفاده می‌کنید تصویر دوم را باید یکی از حالت‌های *Error Signal*, *Phase* یا *Amplitude* انتخاب کنید.



شکل 9: در این قسمت *Frequency Offset* را برای حالت MFM تنظیم می‌کنید.

در حالت AC باید تنظیم فاصله و نیرو را برای هر یک از حالت‌های *Amplitude* و *Error Signal*, *Phase* انجام دهید تا به نتیجه مطلوب برسید، البته در اکثر موارد تنظیمات مشابه هستند. (معمولاً بهترین تصویر را در حالت *Phase* می‌توان دید).

در حالت AC بهتر است نیرو را بین 0/15 تا 0/28 نانونیوتن و در حالت DC نیرو را بین 10 تا 40 نانونیوتن تنظیم نمایید. تا تصویر MFM به وضوح مشخص شود.

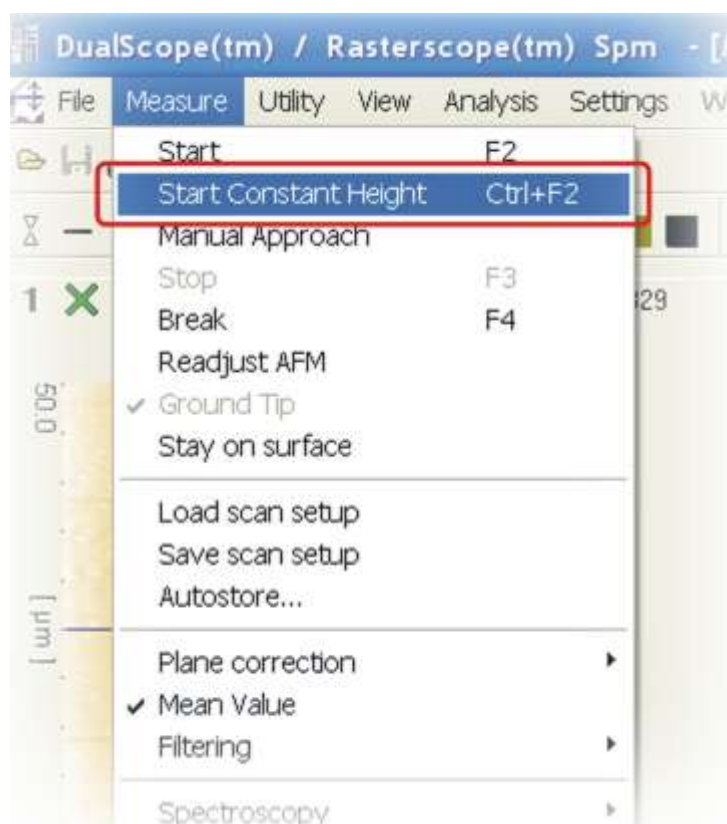
بهتر است در حالت DC برای تهیه تصویر توپوگرافی از نیرویی در حدود 30 تا 60 نانونیوتن استفاده کنید و سپس برای تهیه تصویر MFM این نیرو را کاهش دهید.



2-6. شروع به تصویرسازی از نیروهای مغناطیسی

پس از انجام تنظیمات معمول اسکنر مانند محدوده روبش، سرعت، نیرو و غیره، در قسمت *constant height* (شکل 3) فاصله روبش را مشخص می‌کنید، بطور نرمال بهتر است از فاصله 400 نانومتر استفاده کنید و در روبش‌های بعدی این فاصله را با محدوده‌های مثلاً 50 تایی کم یا زیاد کنید. حال پس از اتمام کامل این تنظیمات می‌توانید روبش را در فاصله تنظیم شده شروع کنید. توجه داشته باشید که برای این کار از دکمه *start scan* یا کلید F_2 استفاده نکنید، بلکه به منوی *Measure* رفته و گزینه *Start Constant height* را انتخاب می‌کنید و یا می‌توانید از کلیدهای ترکیبی *Ctrl* به همراه F_2 استفاده کنید (شکل 10).

حال دستگاه شروع به تهیه تصویر در فاصله‌ای که تعیین کرده‌اید می‌نماید و شما می‌توانید تصویری از نیروهای مغناطیسی سطح نمونه خود را ببینید.

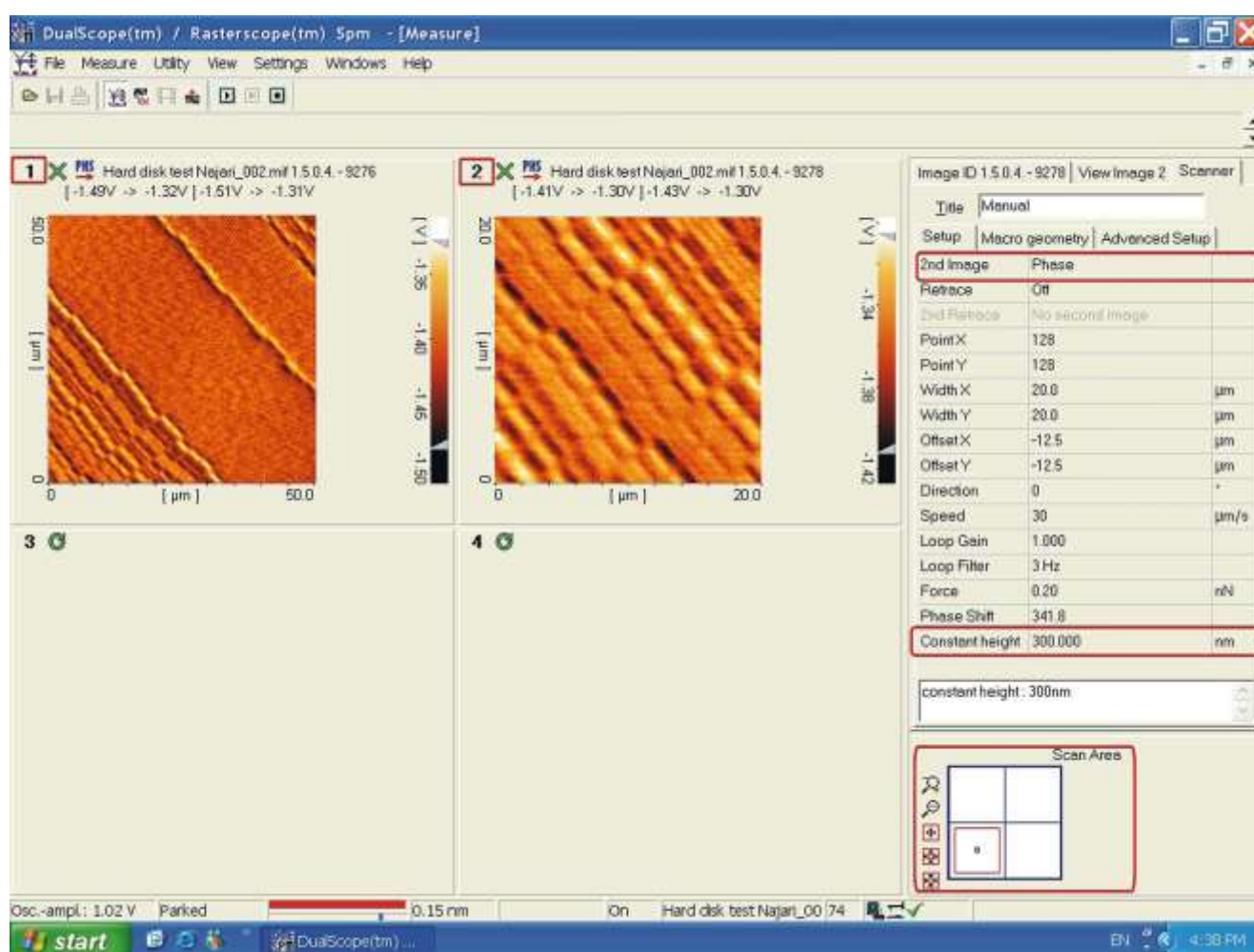


شکل 10: برای شروع کار، برای گرفتن یک تصویر MFM از این گزینه استفاده کنید.

2-7. نمونه تصاویر

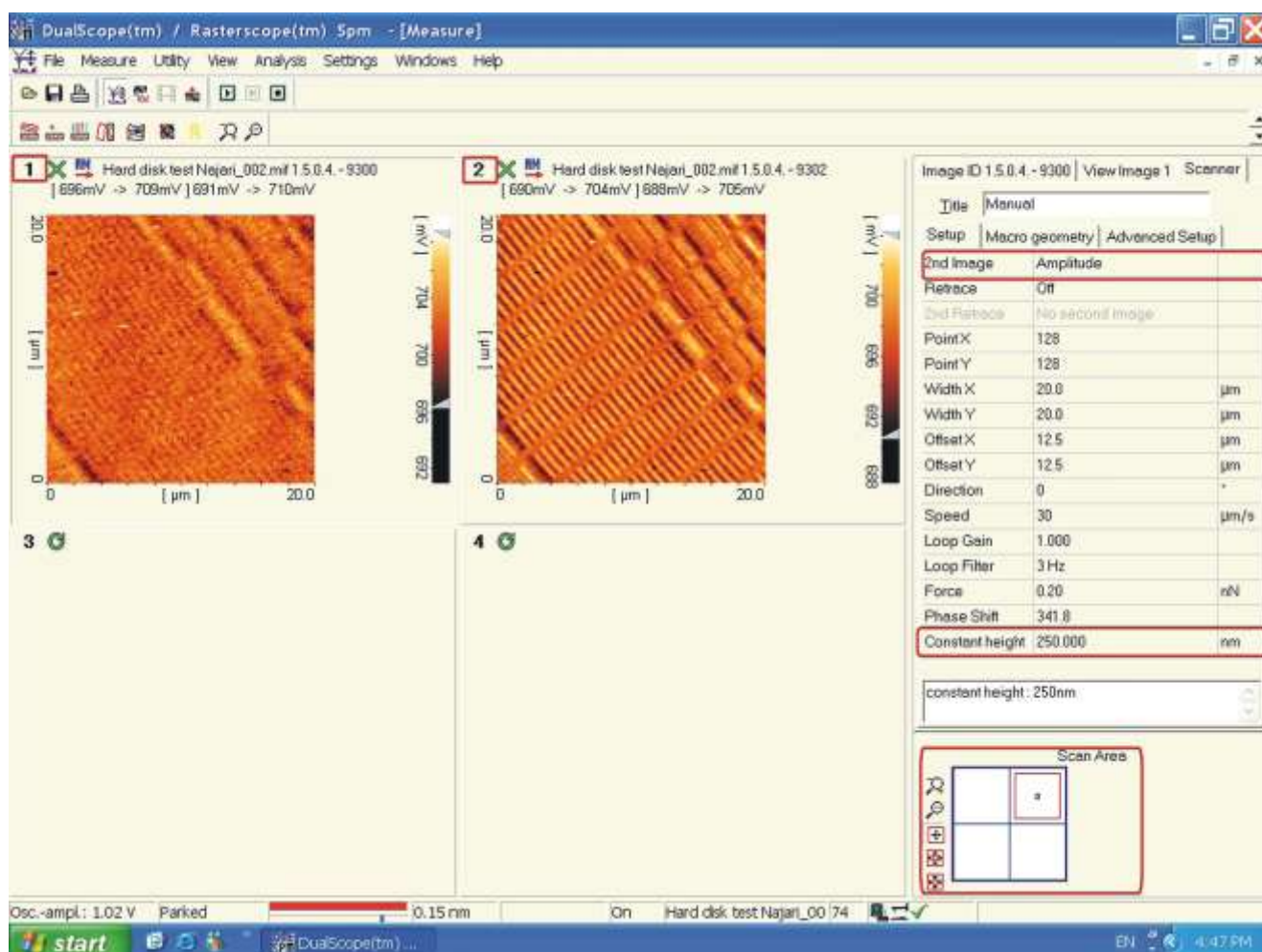
در ادامه، تصاویری از سطح هارد دیسک در حالت AC که با تصاویرهای دوم (Second Image) مختلف گرفته شده‌اند را مشاهده خواهید کرد (شکلهای 11، 12 و 13).

به طور معمول، تصویر دومین روبش (تصاویر پی در پی بدون توقف روبش)، کیفیت به مراتب بهتری نسبت به اولین تصویر دارد.



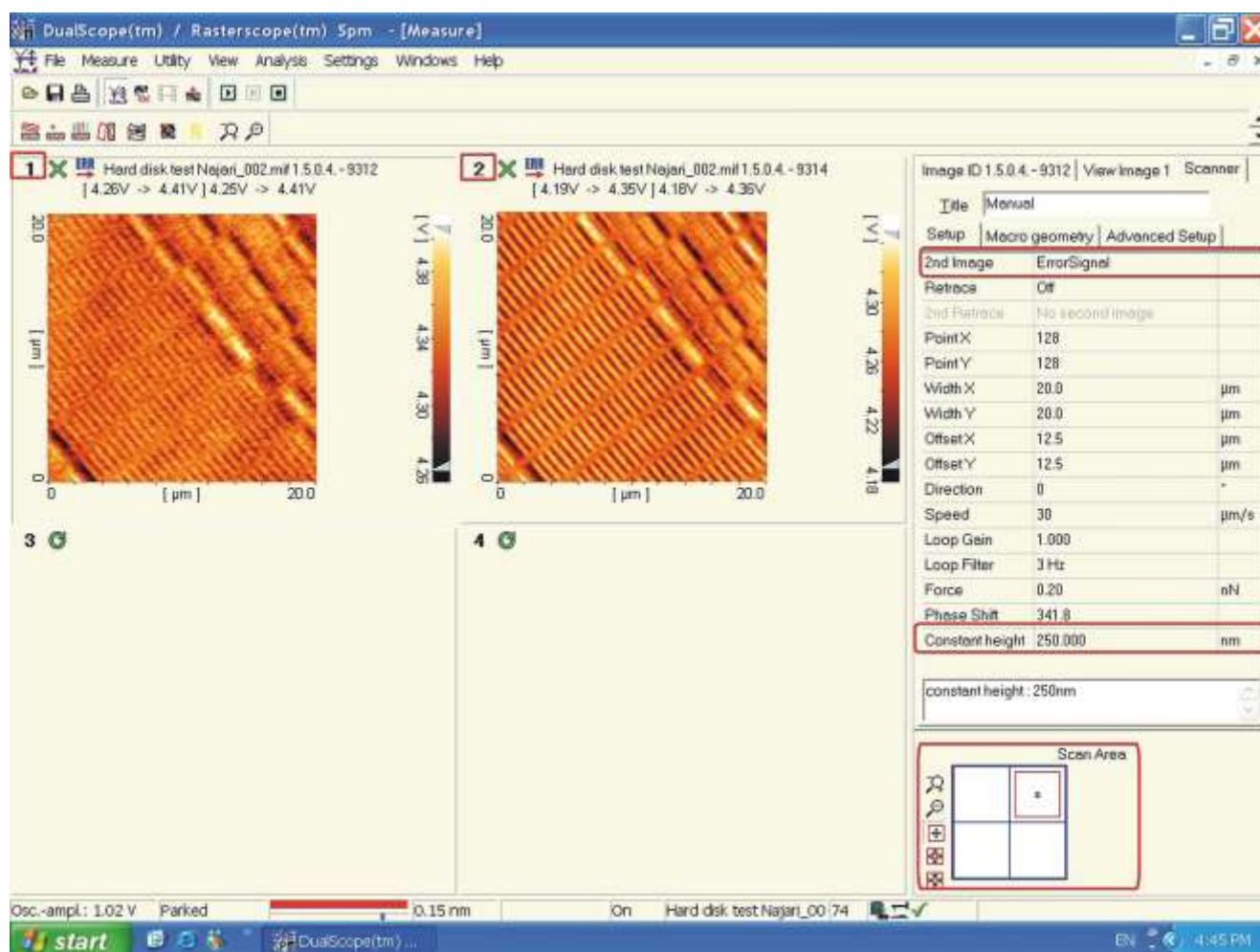
شکل 11: تصویر گرفته شده در حالت Phase.

تصویر قاب شماره 2 یک $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ Offset از تصویر قاب شماره 1 می‌باشد.



شکل 12: تصویر گرفته شده در حالت *Amplitude*.

تصویر قاب شماره 1 تصویر اولین روبش انجام شده و تصویر قاب شماره 2 تصویر دومین روبش می باشد.



شکل 13: تصویر گرفته شده در حالت *Error Signal*.

تصویر قاب شماره 1 تصویر اولین روبش انجام شده و تصویر قاب شماره 2 تصویر دومین روبش می باشد.

3. نکته های قابل توجه

3-1. برخی از پارامترهای موثر در تشکیل تصویر MFM

1. فاصله (Constant Height): بدست آوردن یک فاصله مناسب بین سوزن و نمونه مهمترین پارامتر برای رسیدن به یک نتیجه مطلوب می باشد.
 2. نیرو: در تشکیل تصویر MFM در حالت AC تغییرات کوچک نیرو (حتی 0/02 nN) تاثیر بسزایی در نتیجه حاصل شده دارد.
 3. سرعت روبش: معمولاً سرعت روبش کمتر، کیفیت بهتری را موجب می شود.
- #### 3-2. در هر زمان که نمونه را در زیر اسکنر جابجا می کنید، تهیه یک تصویر توپوگرافی ساده الزامی است.
- #### 3-3. تنظیم شیب در دو محور X و Y که در قسمت های قبل توضیح داده شده است.
- #### 3-4. گرفتن دو یا چند تصویر پیاپی از یک ناحیه، بدون توقف روبش، باعث افزایش کیفیت تصویر می گردد.