

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۶/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۱۰/۲۸)

نمونه‌ها، که با روش میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۵</sup> به دست آمده) تحلیل فراکتالی استاندارد و تقریب‌های مراحل عرضی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹-۱۱]. از سوی دیگر، پراکندگی پخشی حاصل از این سطوح نیز به عنوان روشی برای شناخت ناهمواری سطح و نیز شناخت مورفولوژی سطح چند لایه به کار می‌رود [۱۲]. با اندازه‌گیری بازتاب‌های آینه‌ای، ضخامت و چگالی الکترونی لایه‌ها، به دست آمده و با میانگین‌گیری روی تمام جهت‌های میدان داخلی<sup>۶</sup>، می‌توان انحراف از معیار را محاسبه نمود [۱۳ و ۱۴]. بازتاب‌های پخشی حاوی اطلاعات تابع همبستگی ناهمواری و یا تبدیل فوریه تابع چگالی احتمال

سطح یک جسم به عنوان اولین مشخصه یک جسم نقش بسیار مهمی در برهم‌کنش بین جسم و محیط دارد [۱-۳]. ساختار توپوگرافیکی یک سطح در حالت کلی توسط خواص شیمیایی و فیزیکی سطح مشخص می‌شود. بنابراین اثرات ناهمواری را می‌توان با شیوه‌های وسیعی چون حسگرها<sup>۱</sup> [۴]، اجسام خودتمیز<sup>۲</sup> [۵]، چسبندگی<sup>۳</sup> [۶]، میدان انتشار یافته<sup>۴</sup> [۷] و نور پراکنده شده [۸] مورد بررسی قرار داد. برای مطالعه توپوگرافی

۱. Sensors

۲. Self-cleaning materials

۳. Adhesion

۴. Field emission devices

۵. Atomic force microscopy

۶. In plane

مطالعه قرار گرفته است.

برای استفاده از این تقریب فرض ما بر این است که نمونه مورد آزمایش هموژن در مقیاس سطح است. بدین ترتیب می توان از ساختار اتمی صرف نظر کرده و در نتیجه تقریب بورن معتبر خواهد بود. این تقریب تا زمانی معتبر است که  $qa \ll 1$  که در آن  $q = \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda}$  عدد موج انتقالی و  $a$  شاخص مقیاس طولی برای هر سطح جامد غیر همگن است ( $2\theta$  زاویه پراکندگی و  $\lambda$  طول موج پرتو تابشی است).

پارامترهایی که بر میزان سطح مقطع پخششی تأثیر می گذارند عبارتند از: انحراف از معیار، نمای هارست و طول موج مؤثر قطع که در ادامه تعریف خواهند شد. برای هر سطح ناهموار اگر ارتفاع در موقعیت های مختلف را با  $h(x)$  نمایش دهیم، انحراف از معیار سطح به صورت  $\sigma = \sqrt{\langle (h - \bar{h})^2 \rangle}$  است. اندازه گیری نمای ناهمواری یک سطح ناهموار به مرتبه دوم تکانه تابع اختلاف ارتفاع آنها وابسته است که در آن تابع ساختار سطح به صورت زیر است [۸]:

$$S^2(R) = \left\langle |h(x+R) - h(x)|^2 \right\rangle. \quad (1)$$

تابع همبستگی  $C(x, y)$  برای سطح همسانگرد با مقیاس محدود طولی به صورت  $C(x, y) = \sigma^2 \exp\left(-\left(\frac{R}{\zeta}\right)^H\right)$  است که در آن  $H$  نمای هارست بوده و در بازه  $0 \leq H \leq 1$  تغییر می کند و  $\zeta$  طول موج مؤثر قطع و یا طول همبستگی سطح است. نوع وابستگی سطح مقطع پخششی به پارامترهای بیان شده در تقریب اول بورن به صورت زیر است [۱۹]:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{diff} = \frac{2\pi N^2 b^2}{q_z^2} \exp\left(-q_z^2 \sigma^2\right) \int_0^\infty dR R \left[ \exp\left(-q_z^2 \sigma^2 e^{-(R/\zeta)^H}\right) - 1 \right] J_0(q_r R), \quad (2)$$

که در آن  $N$  چگالی ذرات پراکنده شده و  $b$  شاخص طولی پراکندگی است. در معادله فوق  $q_z$  مولفه آینه ای بردار موج انتقالی است.

برای بررسی اثرات تشکیل سایه روی سطح در رابطه (۲)،

ارتفاع سطح می باشد [۸]. به عبارت دیگر اندازه گیری بازتاب های پخششی منجر به یافتن جزئیات ساختاری عرضی سطوح می شود [۱۶ و ۱۵].

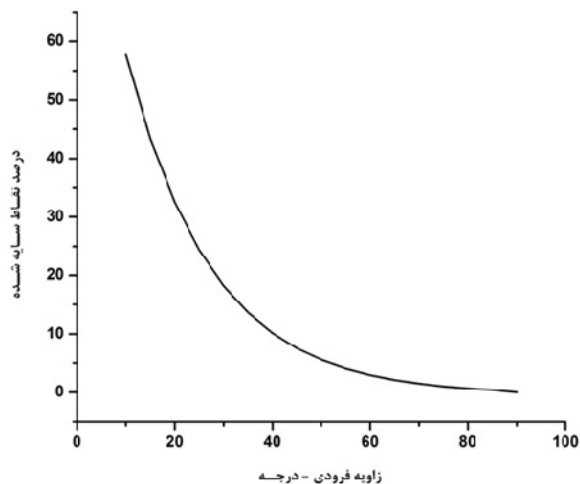
در این مقاله ضمن تعریف پارامترهای مشخص کننده سطح که در سطح مقطع پخششی نقش دارند، چگونگی وابستگی این سطح مقطع به پارامترهای سطح با استفاده از تقریب بورن بیان خواهد شد. سپس با بررسی اثرات سایه تشکیل شده بر روی سطح، چگونگی تغییر پارامترهای مشخص کننده سطح با توجه به میزان سایه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت برای یک نمونه تجربی، اثرات سایه بررسی شده و چگونگی تغییرات سطح مقطع پخششی بر حسب زاویه فرودی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

در حالت کلی میزان سطح مقطع پخششی به مشخصه های سطح مورد بررسی بستگی خواهد داشت. برای بررسی این اثرات، بروس شرایطی که تابع سایه هندسی در آن معتبر است را محاسبه کرد و به طور مستقیم در معادلات پراکندگی وارد کرد [۱۷]. فرض تابع هندسی بر این اساس استوار است که نقاط مرزی تیزی که پرتوی فرودی روی آن نقاط تاریک و خاموش است، ناحیه سایه<sup>۱</sup> را به وجود می آورد. باس و فاکس نیز محدوده سایه هندسی را در حالت حدی فرمول بندی کردند [۱۸]. آنان نشان دادند که با توجه به مشخصات سطوح مثل زبری و طول همبستگی، طول موج و زاویه تابش چه موقع اثرات سایه اهمیت می یابد. ایده اصلی این مقاله آن است که به جای اندازه گیری مستقیم سهم سایه در مسئله پراکندگی، مشخصات سطحی که در زاویه خاص مشاهده می شود، نه سطحی که میکروسکوپ نیروی اتمی به صورت عمودی اندازه می گیرد، بررسی شود. به عبارتی از آنجا که مشخصات سطح مشاهده شده تابع زاویه فرودی است، اثرات سایه تشکیل شده بر روی سطح مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که نوع وابستگی سطح مقطع پخششی به مشخصه های سطح، در محدوده اعتبار تقریب بورن مورد

۱. Shadow zone

جدول ۱. مشخصات سطح مورد بررسی بدون در نظر گرفتن اثرات سایه.

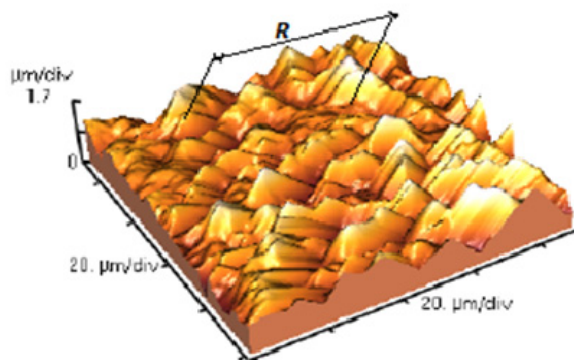
نمای زبری	طول همبستگی	زبری	دقت یا اندازه پیکسل	ابعاد سطح/پیکسل
۰٫۷۱	۵۰۰ nm	۴۷۰ nm	۳۵۲ nm	۲۶۵×۲۵۶



شکل ۲. درصد نقاطی از سطح که در زوایای مختلف در سایه قرار گرفتند.

واضح است که در صورت ثابت بودن آشکارساز و تغییر زاویه پرتو فرودی، در شرایطی که زاویه پرتو فرودی هم راستا با جهت گیری مکان قرارگیری آشکارساز باشد مشاهده سطح بدون سایه صورت می گیرد. در شکل ۲، درصد نقاط سایه شده در سطح مورد بررسی در این مقاله ارائه شده است. در این محاسبه، آشکارساز در حالت عمودی نسبت به سطح قرار داشته و چنانکه مشاهده می شود برای پرتوهای تابشی عمودی درصد سایه صفر است.

برای محاسبه اثرات سایه بر پارامتر هارست سطح ناهموار، از رسم منحنی تغییرات لگاریتم تابع ساختار بر حسب بعد سطح استفاده شده است. شکل ۳ نمونه ای از این محاسبات را برای سطح شکل ۱ و برای زاویه فرودی ۸۵ درجه (نسبت به افق) نشان می دهد. شیب این نمودار، چنانکه در شکل ۳ مشخص است، اندازه پارامتر هارست را مشخص می کند. این سطح دارای نمای هارست ۰٫۷۲ می باشد، اما با محاسبات مشابهی که برای زوایای مختلف انجام شده، در هر زاویه نمای هارست مشاهده شده تغییر یافته و تابع زاویه می باشد. شکل ۴ نتایج این

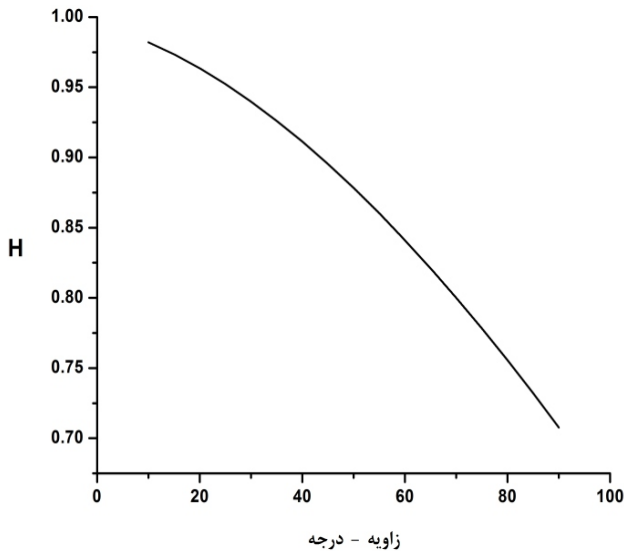


شکل ۱. سطح ناهموار مورد استفاده در مقاله که با داده های AFM به دست آمده است.

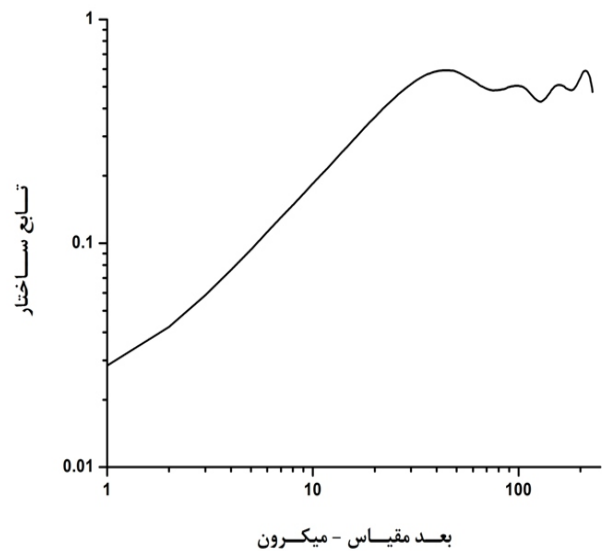
داده های سطح ناهمواری که با روش میکروسکوپ نیروی اتمی از یک لیزر Nd:YAG به دست آمده را به عنوان نمونه مورد مطالعه قرار می دهیم. عکس مربوط به این سطح را در شکل ۱ می توان مشاهده نمود.

این نمونه و یفرهای سیلیکونی نوع n (۱۰۰) است که در اثر خوردگی توسط یک لیزر پالسی Nd:YAG ناهموار شده است. در تحلیل توپولوژی نمونه از مدل Park Scientific Instruments Auto probe CP model استفاده شده است. عکس گزارش شده در یک مد با نیروی ثابت حاصل شده است که در آن ۲۵۶×۲۵۶ پیکسل با فرکانس ۰٫۶ هرتز مختصه یابی شده<sup>۱</sup> و دقت به کار رفته یا اندازه پیکسل برابر ۹۰ به ۲۵۶ میکرون یا ۳۵۲ نانومتر است. مشخصات این سطح در جدول ۱ خلاصه شده است.

برای بررسی اثرات سایه بر روی خواص مشخص کننده سطح مورد استفاده در این مقاله (شکل ۱)، ابتدا بر اساس ارتفاع سطح در هر نقطه،  $h(x)$  و زاویه تابشی فرودی مقدار سایه در هر منطقه از سطح محاسبه شده و بر اساس آن تغییرات مشخصه های سطح شبیه سازی می شود. در این شبیه سازی



شکل ۴. نمای هارست به دست آمده بر حسب زاویه پرتو فرودی از نمای سطح واقعی ۰٫۷.



شکل ۳. نمودار لگاریتمی تابع ساختار بر حسب بعد مقیاس.

بازتاب آینه‌ای متمرکزتر می‌شود. در نتیجه سهم بازتاب آینه‌ای افزایش و سهم پراکندگی پخشی کاهش می‌یابد.

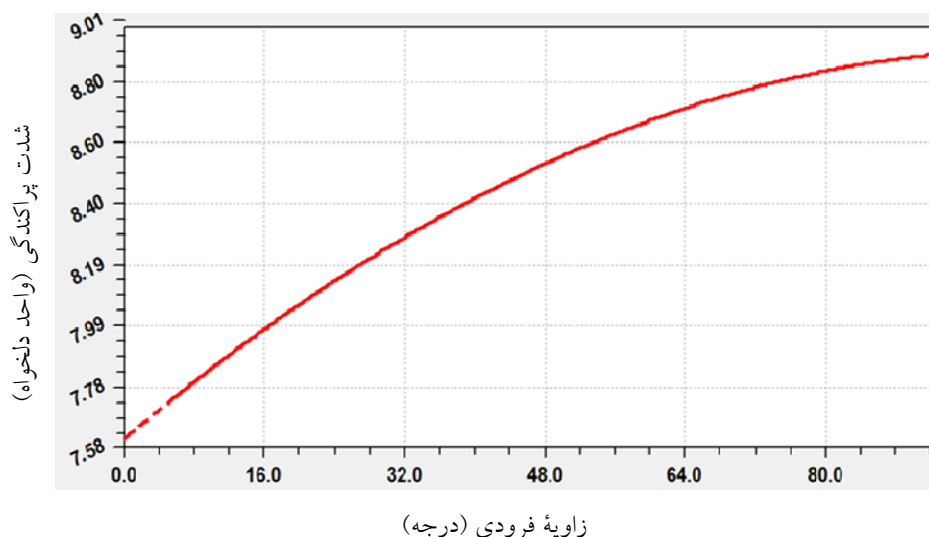
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شدت در زاویه‌های نزدیک به قائم به بیشینه مقدار خود می‌رسد و نمودار نیز به طور اکید صعودی است. این نتیجه با آنچه که در مورد شکل ۳ بیان شد کاملاً توافق دارد. با افزایش زاویه پرتو فرودی، زاویه استرادیان رشد کرده و زبری سطح، کاملتر دیده می‌شود و در نتیجه شدت نیز افزایش پیدا خواهد کرد. در شکل ۵، برای زوایای نزدیک به صفر تابعی که رفتار شدت پراکندگی را توصیف کند، برون یابی شده است (نقاط خط چین). تابعیت رفتار آن را می‌توان به صورت  $\gamma = a\theta^2 + 0.024\theta + 0.61$  تقریب زد که در آن  $a = -0.00011$  است.

در این مقاله اثرات سایه بر پارامترهای مشخص کننده یک سطح مورد بررسی قرار گرفت. سطح مورد نظر که به صورت عمودی و با استفاده از داده‌های میکروسکوپ نیروی اتمی گزارش شده است، تحت تأثیر تابش‌های فرودی با زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای هر زاویه فرودی و در تقریب برون شدت موج پراکندگی بر حسب زاویه فرودی محاسبه

محاسبات را به صورت تغییرات نمای هارست بر حسب زاویه فرودی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نمای مشاهده شده در زاویه ۹۰ درجه با نمای اصلی گزارش شده میکروسکوپ نیروی اتمی یکسان است و در زوایای مایل‌تر، نمای هارست مؤثر مشاهده شده افزایش می‌یابد.

چنانکه از شکل ۴ مشخص است، برای زوایای کوچک پارامتر هارست به سمت عدد یک میل پیدا می‌کند. علت این امر بواسطه آن است که در زوایای کوچک، موج فرودی زبری سطح را مشاهده نکرده و از روی آن عبور می‌کند، بنابراین سطح به صورت هموار مشاهده شود و در نتیجه  $H \rightarrow 1$ . همچنین در زوایای نزدیک به قائم (جایی که آشکار ساز را قرار دادیم) زبری سطحی که سایه‌های آن را شبیه سازی کردیم با زبری سطح ناهموار اولیه برابر می‌شود.

محاسبات مشابهی برای پارامترهای دیگر مشخص کننده سطح انجام شده و در هر زاویه فرودی اندازه آنها محاسبه شد. در نهایت تمامی این پارامترها در رابطه (۲) جایگذاری شده و سطح مقطع دیفرانسیلی یا شدت موج پراکنده شده از سطح ناهموار برای هر زاویه فرودی محاسبه شد. نتایج این محاسبات در شکل ۵ ارائه شده است که در آن عدد موج انتقالی  $q_z = 0.01 \text{ nm}^{-1}$  در نظر گرفته شده و شدت بر حسب واحد دلخواه بیان شده است. در واقع با مایل‌تر شدن تابش فرودی به سطح شدت پراکندگی حول



شکل ۵. نمودار شدت پراکندگی در زوایای مختلف پرتو فرودی.

نخواهد شد در این صورت زبری کاهش و نمای هارست افزایش (سطح مشاهده شده) یافته در نتیجه شدت پراکندگی حول بازتاب آینه متمرکزتر خواهد شد. بدین ترتیب شدت پراکنده شده مستقیماً تحت تأثیر اثرات سایه بوده و طیف پراکندگی حاصله، دارای اطلاعات اثرات سایه خواهد بود.

گردید. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه فرودی، اثرات سایه کمتر شده و زبری سطح بیشتر مشاهده می شود به قسمی که نمای هارست در زوایای کوچک افزایش یافته و به سمت ۱ میل می کند. نتایج حاکی از آن است که با مایل تر شدن زاویه فرود به علت سهم سایه تمام افت و خیزهای سطح مشاهده

10. G R Jafari, M S Movahed, S M Fazeli, and M R Rahimi Tabar, *J. Stat. Mech.* **2006** (2006) 6008.
11. M Vahabi, GR Jafari, N Mansour, R Karimzadeh, and J Zamiranvari, *J. Stat. Mech: Theory & Experiment* **2008** (2008) 3003.
12. S Singh, and S Basu, *J. Phys. Cond. Matt.* **21** (2009) 055010.
13. R M Osgood, and S K Sinha, *J Magnetism and Magnetic Materials* **198** (1999) 689.
14. F G Bass, and I M Fuks, "Wave scattering from statistically Rough surfaces," Pergamon, Oxford (1979).
15. A G Voronovich, "Wave scattering from rough surfaces", Springer, Berlin (1994).
16. C F Majkrzak, and J W Cable, *Phys. Rev. Lett.* **56** (1986) 2700.
17. N C Bruce, *Waves Random Media* **14** (2004) 1.
18. F G Bass, and I M Fuks, "Wave scattering from statistically Rough surfaces", Pergamon, Oxford (1979).
19. S K Sinha, and E B Sirota, *Phys. Rev. B* **38** (1988) 2297.
1. M Pwilet, P Poncharal, and A Zahab, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 186801.
2. Y Yaish, J-Y Park, S Rosenblatt, V Sazonova, M Brink, and P L McEuen, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 046401.
3. G R Jafari, S M Fazeli, F Ghasemi, S M Vaez Allaei, M R Rahimi Tabar, A Irajizad, and G Kavei, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 226101.
4. M Suche, S Christoulakis, K Moschovis, N Katsarakis, and G Kiriakidis, *Thin Solid Films* **515** (2006) 551.
5. J Bico, C Marzolin, and D Quere, *Europhys. Lett.* **47** (1999) 220.
6. B N J Persson, O Albohr, U Tartaglino, A I Volokitin, and E Tosatti, *J. Phys. Condens. Matter* **17** (2005) 1.
7. A V Karabutov, and V D Frolor, *Appl. Phys. A* **76** (2003) 76413.
8. J A Oglivy, "Theory of wave scattering from Random Rough Surfaces", Taylor & Francis (1991).
9. G R Jafari, M R Rahimi Tabar, A Irajizad, and G Kavei, *Physica A* **375** (2007) 239.