

Saeed\_s\_jahromi@sina.kntu.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۷ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۸/۴)

دهه‌های اخیر، راه‌های متعددی برای تعیین فاز هم به صورت عملی و هم شبیه سازی ارائه شده است که در این میان می‌توان به روش لایه‌های مرجع و یا روش تغییر زیر لایه اشاره کرد [۴ و ۱]. بازتابسنجی نوترونی را هم به وسیله نوترون‌های قطبیده و هم نوترون‌های غیر قطبیده می‌توان انجام داد. با این وجود استفاده از نوترون‌های قطبیده در تعیین فاز منجر به سهولت اندازه‌گیری‌ها در آزمایش‌های تجربی می‌شود. به طور مثال در تعیین فاز به روش تغییر زیر لایه، به جای استفاده از دو زیر لایه متفاوت می‌توان از یک زیر لایه مغناطیسی و نوترون‌های قطبیده استفاده کرد و با اندازه‌گیری شدت و قطبش نوترون‌های بازتابیده، فاز ضریب بازتاب را اندازه گرفت [۳].

در روش‌های شبیه سازی بازتابسنجی تلاش می‌شود تا با در نظر گرفتن پارامترهایی از جمله نرمی و زبری پتانسیل بین

بازتاب آینه‌ای نوترون‌های سرد و ابرسرد از لایه‌های نازک، اطلاعات مفیدی را در مورد ساختار فیزیکی و شیمیایی آنها فراهم می‌کند و ابزار مفیدی برای مطالعه ساختار سطوح می‌باشد. با اندازه‌گیری شدت نوترون‌هایی که به صورت آینه‌ای از نمونه مورد نظر بازتابیده شده‌اند و تعیین چگالی طول پراکندگی (SLD) نمونه به صورت تابعی از عمق لایه، می‌توان نوع و ضخامت لایه را تشخیص داد. اندازه‌گیری شدت نوترون‌های بازتابیده به تنهایی منجر به یافتن یک جواب یکتا برای چگالی طول پراکندگی نمونه نخواهد شد، چرا که ممکن است چندین SLD یافت شود که با یک منحنی بازتابندگی خاص تطابق داشته باشد. برای رفع این مشکل، تعیین فاز ضریب بازتاب (قسمت حقیقی و موهومی ضریب بازتاب) ضروری می‌باشد [۲]. در

لایه مغناطیسی معلوم قرار دارد، تشکیل شده باشد، ضریب بازتاب،  $r_{\pm}(q)$ ، برای چنین نمونه‌ای با استفاده از ماتریس انتقال که عناصر آن  $A(q), B(q), C(q), D(q)$  از حل مستقیم معادله (۱) به دست می‌آید، محاسبه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ ih_{\pm} \end{pmatrix} t_{\pm} e^{ih_{\pm}qL} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1+r_{\pm} \\ i(1-r_{\pm}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $t_{\pm}(q)$  ضریب عبور و  $h_{\pm}$  ضریب شکست زیر لایه می‌باشند [۱].

با استفاده از رابطه (۲)، برای ضریب بازتاب لایه‌ای که بر روی یک زیر لایه مغناطیسی با چگالی طول پراکندگی  $\rho_+$  و  $\rho_-$  (مغناطش مثبت و منفی) قرار دارد، خواهیم داشت:

$$r_{\pm}(q) = \frac{\beta_{\pm} - \alpha_{\pm} - 2i\gamma_{\pm}}{\beta_{\pm} + \alpha_{\pm} + 2} \quad (3)$$

که پارامترهای  $\alpha_{\pm}, \beta_{\pm}, \gamma_{\pm}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \alpha_{\pm} &= h_{\pm}A^{\pm} + h_{\pm}^{-1}C^{\pm} \\ \beta_{\pm} &= h_{\pm}B^{\pm} + h_{\pm}^{-1}D^{\pm} \\ \gamma_{\pm} &= h_{\pm}AB + h_{\pm}^{-1}CD \\ h_{\pm} &= (1 - 4\pi\rho_{\pm}/q^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

برای تعیین این سه پارامتر، از قطبش نوترون‌های بازتابیده از نمونه استفاده می‌کنیم.

قطبش نوترون‌های بازتابیده از نمونه بر حسب ضریب بازتاب به صورت زیر نشان داده می‌شود [۳ و ۹]:

$$P_x + iP_y = \frac{2r_+^* r_-}{R_+ + R_-}, \quad P_z = \frac{R_+ - R_-}{R_+ + R_-} \quad (5)$$

که  $R_{\pm}(q) = |r_{\pm}(q)|^2$  معرف بازتابندگی است و بر حسب کمیت جدید  $\Sigma(q)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Sigma_{\pm}(q) = 2 \frac{1+R_{\pm}}{1-R_{\pm}} = \beta_{\pm} + \alpha_{\pm} \quad (6)$$

با استفاده از فرمول‌های (۳-۶) برای قطبش نوترون‌های بازتابیده بر حسب پارامتر  $\Sigma$  خواهیم داشت [۳]:

$$P_x = 1 - 2 \frac{(h_+ - h_-)^2}{h_+ h_-} \frac{1}{\sum_+ \sum_-^{-4}}, \quad (7)$$

$$P_y = 2 \frac{(h_+^x - h_-^x)}{h_+ h_-} \frac{\tilde{\gamma}}{\sum_+ \sum_-^{-4}}, \quad (8)$$

سطوح، نتایج حاصل از شبیه سازی به نتایج تجربی نزدیک تر شود چرا که تغییرات نرم پتانسیل در مرزها موجب بروز تغییراتی در نتایج خواهد شد. در این مقاله با معرفی روش تعیین فاز به روش تغییر زیر لایه، اثرات نرمی پتانسیل بین سطوح را بر روی بازتابندگی و قطبش نوترون‌های بازتابیده از نمونه با استفاده از سه تابع نرم تغییر خطی، اکارت و تابع خطا بررسی کرده‌ایم.

برهم کنش نوترون با مواد در بازتاب آینه‌ای نوترون‌ها توسط معادله شرودینگر یک بعدی زیر توصیف می‌شود:

$$\left( \partial_z^2 + (q^2 - 4\pi\rho(z)) \right) \Psi(q, z) = 0, \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی طول پراکندگی نوترون (SLD) است که برای جامدات آمورف و مایعات کمیتی ثابت می‌باشد،  $z$  راستای عمود بر سطح نمونه و  $q$  عدد موج نوترون در راستای  $z$  است. پتانسیل اپتیکی توصیف کننده برهم کنش نوترون با نمونه به صورت  $v(z) = 2\pi\hbar^2\rho(z)/m$  نشان داده می‌شود [۲ و ۱].

برای یک لایه مغناطیسی هنگامی که مغناطش در صفحه فیلم باشد، چگالی طول پراکندگی به صورت  $(\rho_{\pm} = \rho(z) \pm \mu \cdot B)$  تعریف می‌شود که در آن  $B$  میدان مغناطیسی حاصل از مغناطش نمونه و  $\mu$  گشتاور مغناطیسی نوترون‌های فرودی است. علامت مثبت و منفی در رابطه به ترتیب مربوط به قطبش نوترون‌های فرودی در جهت موازی و پاد موازی با جهت مغناطش لایه مغناطیسی است. بنا بر این اگر نمونه ما یک لایه مغناطیسی با چگالی طول پراکندگی  $\rho(z)$  برای حالت غیر مغناطیده باشد، می‌توان با تغییر جهت قطبش نوترون‌های فرودی، بدون تغییر در خواص فیزیک و شیمیایی نمونه، SLD لایه را تغییر داد.  $\rho_+$  برای نوترون‌های فرودی در جهت موازی با مغناطش لایه و  $\rho_-$  برای نوترون‌های فرودی در جهت پاد موازی با مغناطش لایه در نظر گرفته می‌شود. ضریب بازتاب برای چنین نمونه‌ای به صورت  $r_{\pm}(q)$  نشان داده می‌شود [۳].

فرض می‌کنیم نمونه ما از یک لایه مجهول که بر روی یک زیر

جدید داشت. استفاده از نوترون‌های قطبیده و مواد مغناطیسی به عنوان زیر لایه این امکان را برای ما فراهم می‌کند تا بتوان بازتابسنجی به روش تغییر زیر لایه را بدون نیاز به تغییر محیط خروجی، و تنها بر اساس برهم‌کنش گشتاور مغناطیسی نوترون‌های قطبیده با میدان مغناطیسی ناشی از مغناطش لایه مغناطیسی، انجام داد.

در این روش پتانسیل بین دو لایه مجاور با ضخامت‌های  $d_1$  و  $d_2$ ، به صورت پیوسته و خطی در نظر گرفته می‌شود. این پتانسیل خطی از  $\alpha d_1$  قبل از مرز مشترک با مقدار  $\rho_1$  شروع شده و تا  $\alpha d_2$  بعد از مرز مشترک به پتانسیل  $\rho_2$  می‌رسد. میزان نرمی پتانسیل توسط پارامتر  $\alpha$  که یک کمیت مثبت و کوچکتر از یک است، تعیین می‌گردد. هر چه  $\alpha$  بزرگتر باشد، میزان نرمی نیز بیشتر خواهد بود. صفر در نظر گرفتن  $\alpha$  به معنی محاسبات بدون نرمی می‌باشد [۷].

در این روش پتانسیل در مرزها به صورت نرم از لایه اول به چگالی طول پراکندگی  $\rho_1$  به لایه دوم با چگالی طول پراکندگی  $\rho_2$  تغییر می‌کند. نحوه تغییر نرم SLD در مرز لایه‌ها مطابق با تابع زیر است:

$$\rho(z) = \rho_1(z) + \frac{\rho_2(z) - \rho_1(z)}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z-h}{\sqrt{2} \sigma} \right) \right] \quad (15)$$

که در آن  $h$  پارامتر نرمی و  $\sigma$  نقطه عطف منحنی تابع خطا است [۵ و ۸].

در این روش نرمی پتانسیل بین دو لایه توسط یک تابع نمایی که به پتانسیل اکارت معروف است، نشان داده می‌شود:

$$\rho(z) = \rho_1(z) + [\rho_2(z) - \rho_1(z)] / \left[ 1 + \exp \left( \frac{z-b}{\Delta} \right) \right] \quad (16)$$

که در آن  $\Delta$  پارامتر نرمی و  $b$  نقطه عطف منحنی پتانسیل اکارت است [۶].

$$P_z = \frac{\sum_+ - \sum_-}{\sum_+ \sum_- - 4} \quad (9)$$

با استفاده از فرمول‌های (۷) و (۸) برای پارامتر  $\tilde{\gamma}$  بر حسب  $P_x$  و  $P_y$  خواهیم داشت:

$$\tilde{\gamma} = \frac{(h_+ - h_-) P_y}{(h_+ + h_-) (1 - P_x)} \quad (10)$$

علامت مد بر روی  $\gamma$  به معنی تعیین این پارامتر برای تصویر آینه‌ای نمونه است که از جابه‌جایی عناصر قطری  $A$  و  $D$  به دست می‌آید [۱].

دو پارامتر دیگر را می‌توان با استفاده از  $\sum_+$  و  $\sum_-$  محاسبه نمود. را با استفاده از فرمول‌های (۸) و (۱۰) حل معادله درجه ۲ زیر می‌توان تعیین کرد:

$$\sum_{\pm}^2 \pm m \sum_{\pm} = \left( 4 - \frac{2m}{P_z} \right), \quad m = \frac{P_z (h_+ - h_-)^2}{(P_x - 1) (h_+ h_-)} \quad (11)$$

این معادله دیفرانسیل دو جواب مختلف دارد که بر اساس شرایط فیزیکی جوابی قابل قبول است که  $\sum_{\pm} \geq 2$  باشد [۱]. پس از اینکه شرایط فیزیکی معادله (۱۱) تعیین شد خواهیم داشت:

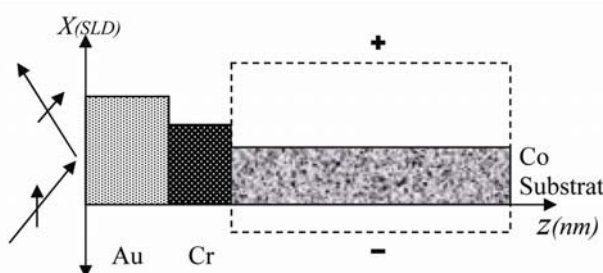
$$\tilde{\alpha} = h_+ h_- \frac{h_+ \sum_- - h_- \sum_+}{h_+^2 - h_-^2} \quad (12)$$

$$\tilde{\beta} = \frac{h_+ \sum_+ - h_- \sum_-}{h_+^2 - h_-^2} \quad (13)$$

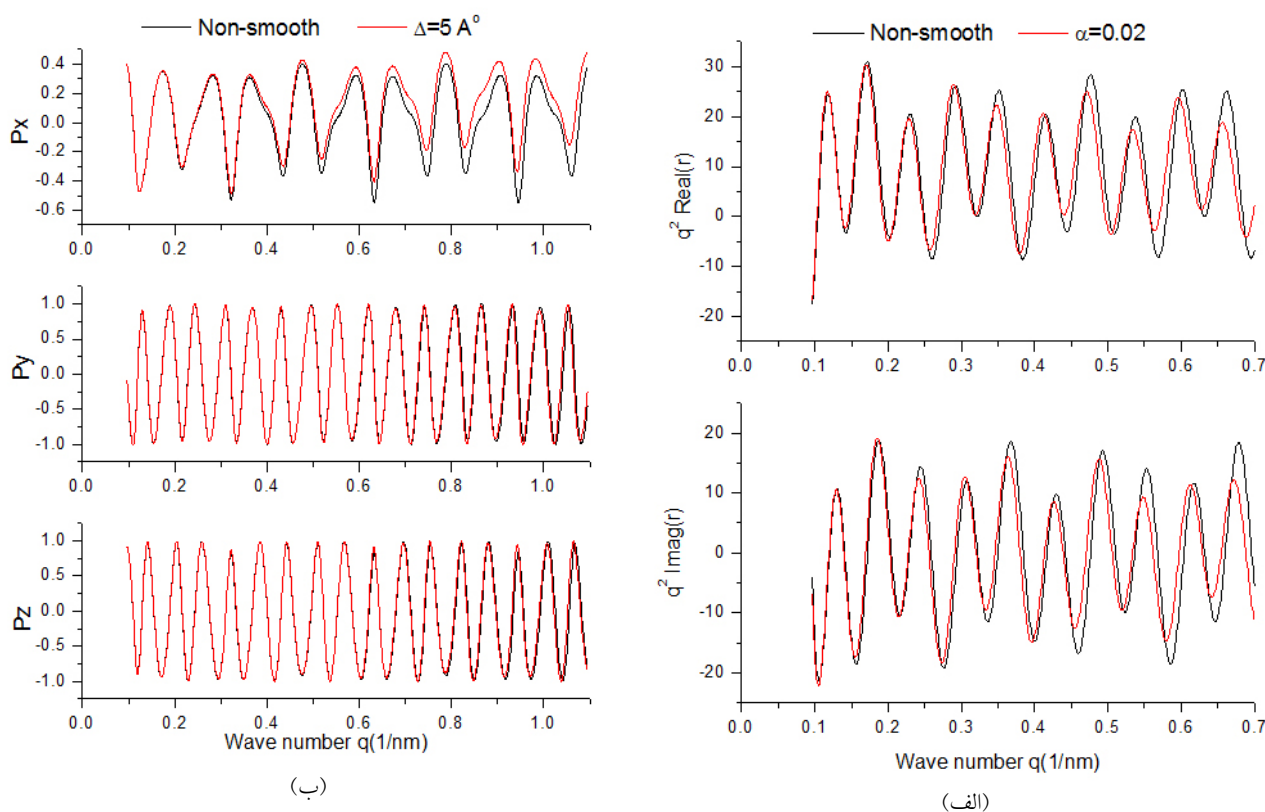
در نهایت پس از تعیین  $\tilde{\alpha}$ ،  $\tilde{\beta}$ ،  $\tilde{\gamma}$ ، ضریب بازتاب برای تصویر آینه‌ای نمونه مجهول به دست می‌آید و فاز ضریب بازتاب از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۱].

$$\varphi = \operatorname{Arc tan} \left( \frac{\operatorname{Im} r(q)}{\operatorname{Re} r(q)} \right) \quad (14)$$

تعیین ضریب بازتاب به روش تغییر زیر لایه توسط نوترون‌های غیر قطبیده [۴] نیز امکان پذیر است اما در آزمایش‌های تجربی تغییر دادن زیر لایه کار بسیار دشواری است و در همه موارد کاربرد ندارد. به طور مثال از این روش تنها در مواردی می‌توان استفاده کرد که محیط زیر لایه آنها گاز یا مایع باشد تا بتوان با تغییر نوع سیال، یک زیر لایه



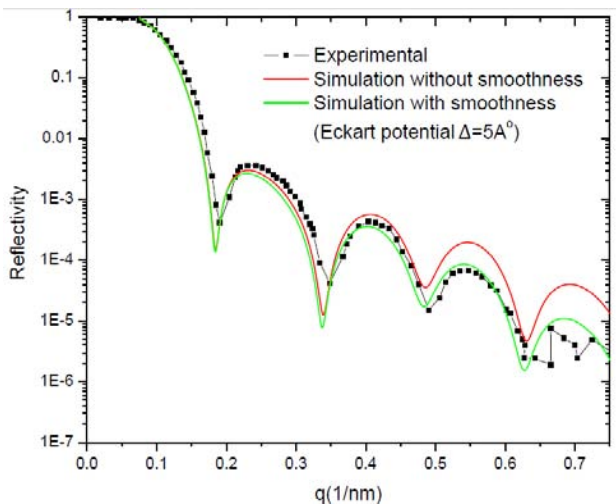
شکل ۱. نمونه دو لایه‌ای طلا - کروم بر روی زیر لایه مغناطیسی کبالت - نقاط خط چین SLD موثری است که توسط نوترون‌های قطبیده در جهت موازی و یاد موازی میدان مغناطیسی حاصل از مغناطش زیر لایه، تجربه می‌شود.



شکل ۲. الف) قسمت حقیقی و موهومی ضریب بازتاب برای پتانسیل خطی با پارامتر نرمی  $\alpha=0.02$  برای تصویر آینه‌ای نمونه شکل ۱. ب) نمودار قطبش نوترون‌های بازتابی در جهات  $x$  و  $y$  و  $z$  برای پتانسیل اکارت با پارامتر نرمی  $\Delta$  ی ۵ آنگسترم.

به منظور بررسی اثرات نرمی پتانسیل بر روی بازتابندگی و قطبش نوترون‌های بازتابیده، یک نمونه دولایه‌ای طلا-کروم با چگالی طول پراکندگی  $4/46 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$  و ضخامت  $30$  نانومتر برای طلا و چگالی طول پراکندگی  $3/03 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$  و ضخامت  $20$  نانومتر برای کروم که بر روی یک زیر لایه مغناطیسی از جنس کبالت با چگالی طول پراکندگی

$6/64 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$  و  $1/98 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$  به ترتیب برای مغناطش مثبت و منفی قرار دارد، در نظر گرفته شد (شکل ۱). سپس پارامترهای  $\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}$  برای قطبش نوترون فرودی در جهت  $x$  با اعمال نرمی محاسبه گردید. نتایج محاسبات برای قطبش نوترون‌های بازتابیده برای پتانسیل اکارت با پارامتر نرمی  $\Delta=5$  آنگسترم (شکل ۲-الف)، نمودار قسمت حقیقی و موهومی ضریب بازتاب تصویر آینه‌ای نمونه برای پتانسیل خطی با



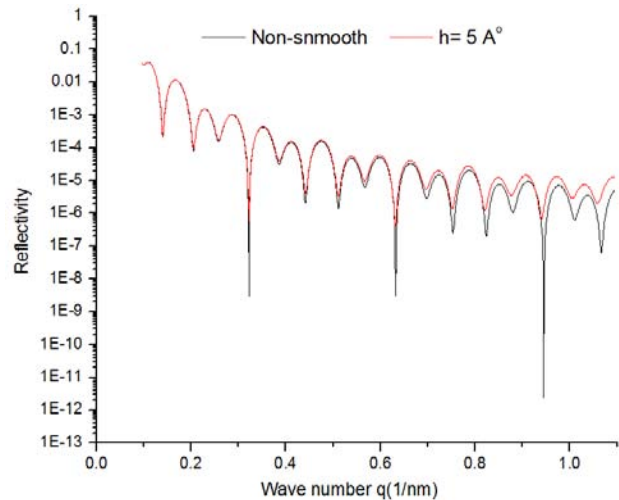
شکل ۴. مقایسه نمودار بازتابندگی تجربی و شبیه سازی شده. نمودار سبز رنگ، بازتابندگی شبیه سازی شده در حضور نرمی است و نسبت به حالت غیر نرم (نمودار قرمز رنگ)، تطابق بیشتری با نمودار تجربی دارد.

نسبت به حالت غیر نرم نشان می‌دهند اما با افزایش  $\Delta$ ، تغییرات آنها نیز به ویژه در محدوده اعداد موج بزرگ قابل مشاهده خواهد بود.

شکل ۳ نمودار بازتابندگی نوترون‌ها از نمونه را برای تابع خطا با پارامتر نرمی  $h=5\text{\AA}$  که معادل ناحیه‌ای به ضخامت ۵ آنگسترم است را نشان می‌دهد. در این شکل نیز مانند دو شکل قبل اثرات نرمی پتانسیل در اعداد موج بزرگ به خوبی قابل رؤیت است.

هدف از اعمال نرمی پتانسیل در مرزها در شبیه سازی‌های کامپیوتری، ایجاد تطابق بیشتر بین نتایج تجربی و شبیه سازی است؛ بر همین اساس نمودار بازتابندگی تجربی برای نمونه  $(Al_4O_7(6\text{ nm})/FeCo(2\text{ nm})/GaAs)$  از مرجع [۱۰]، با استفاده از شبیه سازی، هم در غیاب نرمی و هم در حضور نرمی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی (شکل ۴) نشان می‌دهد که اعمال نرمی در روابط شبیه سازی شده موجب تطابق بیشتر داده‌های شبیه سازی با داده‌های تجربی می‌شود.

به منظور بازخوانی چگالی طول پراکندگی نمونه مورد مطالعه، اطلاعات بازتابندگی نوترون‌ها از نمونه به عنوان ورودی در

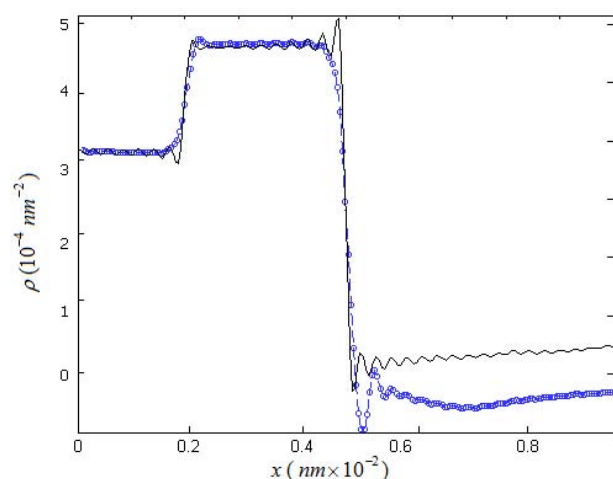


شکل ۳. نمودار بازتابندگی برای تابع خطا با پارامتر نرمی  $h$  برابر با ۵ آنگسترم برای تصویر آینه‌ای نمونه شکل ۱.

پارامتر  $\alpha=0/02$  (شکل ۲-ب) و نمودار بازتابندگی تصویر آینه‌ای نمونه برای تابع خطا با پارامتر نرمی  $h=5$  آنگسترم (شکل ۳) بر حسب عدد موج نوترون‌های فرودی، رسم شد.

همان‌طور که در هر سه نمودار مشاهده می‌شود اثرات نرمی بر روی نتایج به ویژه در اعداد موج بزرگ به وضوح قابل رویت است. در بررسی نرمی بین لایه‌ها با استفاده از پتانسیل خطی، پارامتر  $\alpha$  میزان شیب پتانسیل را مشخص می‌کند و هر چه  $\alpha$  ی بزرگتری استفاده شود، پهنای ناحیه‌ای که پتانسیل در آن به نرمی تغییر می‌کند بیشتر می‌شود و تغییرات در نتایج نسبت به حالت غیر نرم نیز بیشتر خواهد بود. در شکل ۲-الف،  $\alpha=0/02$  معادل تغییرات خطی پتانسیل در ناحیه‌ای به ضخامت ۱ nm می‌باشد [۷]. در این شکل تغییرات در قسمت حقیقی و موهومی ضریب بازتاب در اعداد موج بزرگ به خوبی نمایان است اما در اعداد موج کوچک با داده‌های غیر نرم تطابق کامل دارد.

شکل ۲-ب، اثرات نرمی را بر روی قطبش نوترون‌های بازتابیده از نمونه برای پتانسیل اکارت برای  $\Delta=5\text{\AA}$  نشان می‌دهد که معادل تغییرات نرم پتانسیل در ناحیه‌ای به ضخامت ۵ آنگسترم است. تغییرات در قطبش نوترون‌های بازتابیده به ویژه برای  $P_x$  و در محدوده اعداد موج بزرگ به خوبی قابل رؤیت است. برای پهنای نرمی ۵ آنگسترم،  $P_z$  و  $P_y$  تغییرات کمتری را

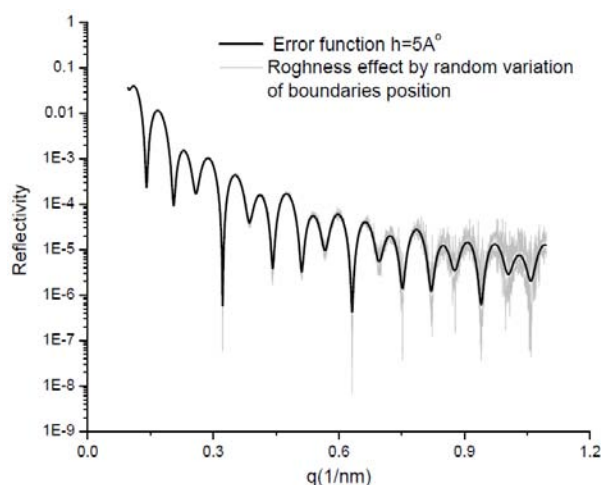


شکل ۶. چگالی طول پراکندگی بازخوانی شده برای تصویر آینه‌ای نمونه شکل ۱، نمودار دایره‌ای با در نظر گرفتن نوفه و نمودار خط تیره، بدون در نظر گرفتن اثرات نوفه. ضخامت و چگالی طول پراکندگی هر یک از لایه‌ها در شکل قابل تشخیص است.

خطا در حضور نوفه نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، اثرات نوفه به ویژه در اعداد موج بزرگ به خوبی قابل رؤیت است.

چگالی طول پراکندگی بازخوانی شده برای نمونه شکل ۱ پس از اعمال نرمی و نوفه در شکل ۶ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که نمودار بازخوانی شده SLD برای حالت نرم و در حضور نوفه، همچنان با نمودار بازخوانی شده برای حالت غیر نرم تطابق مناسبی دارد. چنانچه دیده می‌شود، چگالی طول پراکندگی هر لایه و ضخامت آن برای تصویر آینه‌ای نمونه قابل تشخیص است.

در بسیاری از روش‌های شبیه سازی در بازتاب سنجی نوترونی، پتانسیل در مرز لایه‌های به صورت ناپیوسته و تیز در نظر گرفته می‌شود که به واسطه تیز در نظر گرفتن پتانسیل، نتایج حاصل با داده‌های تجربی اختلاف خواهد داشت؛ از این رو در این روش‌ها نرمی را به عنوان یک پارامتر خطا وارد محاسبات شبیه سازی می‌کنند تا پایداری روش در برابر این اختلافات بررسی شود. در این مقاله با معرفی روش تعیین فاز به روش تغییر زیر لایه با استفاده از نوترون‌های قطبیده، اثرات نرمی پتانسیل بر



شکل ۵. بازتابندگی از نمونه مورد بررسی شکل ۱، برای تابع خطا پس از اعمال نوفه.

کدهای شبیه سازی شده‌ای از جمله کد Sacks [۱۱] مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بازخوانی SLD، از طریق کد Sacks تنها داده‌های بازتابندگی تا محدوده اعداد موج  $0.6 \text{ nm}^{-1}$  مورد نیاز است و می‌توان از داده‌های مربوط به محدوده اعداد موج بزرگتر چشم پوشی کرد.

در آزمایش‌های تجربی، داده‌های بازتابندگی اندازه‌گیری شده از نمونه داری نوفه می‌باشد که به عنوان مثال می‌توان به نوفه وابسته به خطا و دقت ابزارهای آزمایشگاهی اشاره کرد. این نوفه‌ها در محدوده اعداد موج بزرگ قابل رویت است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نمودار بازتابندگی نمونه معرفی شده در شکل ۱، عاری از هر گونه نوفه است. به منظور مشاهده اثرات نوفه بر روی داده‌های شبیه سازی شده، اضافه کردن پارامتر جدیدی بر روش مورد بررسی الزامی است. به عنوان مثال در بازتابسنجی نوترونی، نوفه‌های وابسته به خطا و زبری سطوح با استفاده از اعداد کاتوره‌ای با تابع توزیع نرمال اعمال می‌شود [۱۲].

به منظور مشاهده این نوفه‌ها و سپس استفاده از داده‌های بازتابندگی در حضور نوفه و نرمی برای بازخوانی SLD، اثرات نوفه بر روی نمودار بازتابندگی شکل ۳ اعمال شده و سپس داده‌های تا محدوده اعداد موج  $0.6 \text{ nm}^{-1}$ ، برای بازخوانی چگالی طول پراکندگی در کد Sacks مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۵ نمودار بازتابندگی از نمونه مورد بررسی را برای تابع

نتایج حاصل با نتایج محاسبات غیر نرم تطابق بسیار خوبی دارد. به منظور بازخوانی چگالی طول پراکندگی، اثرات نوفه در داده‌های بازتابندگی اعمال شد و سپس از این داده‌ها برای بازخوانی چگالی طول پراکندگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بازخوانی SLD با اعمال اثرات نوفه همچنان امکان پذیر است و SLD بازخوانی شده در حالت پتانسیل نرم همراه با اثرات نوفه، با نمودار SLD غیر نرم تطابق بسیار خوبی دارد.

روی بازتابندگی، فاز ضریب بازتاب و قطبش نوترون‌های بازتابیده از نمونه را با سه پتانسیل خطی، اکارت و تابع خطا بررسی کردیم. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با توجه به محدوده عدد موج نوترون‌های مورد استفاده در بازتاب سنجی، در نظر گرفتن نرمی بین لایه‌های به ویژه در اعداد موج بزرگتر از  $0.6 \text{ nm}^{-1}$  از اهمیت بالایی برخوردار است اما چنانچه از نوترون‌های با اعداد موج کوچکتر از  $0.6$  استفاده می‌کنیم، می‌توان از اثرات نرمی بر روی نتایج چشم پوشی کرد، چرا که

- نرمی پتانسیل بین سطوح بر روی تشخیص مواد چگال در بازتاب سنجی نوترونی "نهمین کنفرانس ماد چگال ایران- دانشگاه شهید چمران، اهواز، بهمن (۱۳۸۷).
۹. سید فرهاد مسعودی، علی پذیرنده، "تعیین قطبش نوترون‌های بازتابی از لایه‌های مغناطیسی با استفاده از بازتاب سنجی نوترونی"، دهمین گردهمایی فیزیکدانان و متخصصان هسته‌ای کشور، اسفند ماه، دانشگاه اراک (۱۳۸۲).
10. Yimei Zhu, "Application of polarized neutron reflectometry to studies of artificially structured magnetic materials", Springer US (2005).
11. D T Aktosun, P Sacks, *Inverse Probl.* **14** (1998) 211; T Aktosun, P Sacks, *SIAM (Soc. Ind. Appl. Math.) J. Appl. Math.* **60** (2000) 1340; T Aktosun, P Sacks, *Inverse Probl.* **16** (2000) 821.
12. H Leeb, J Kasper, R Lipperheide, *Phys. Lett. A* **239** (1998) 147.

1. C F Majkrzak, N F Berk, and U A Perez-Salas, *Langmuir*, **19** (2003) 7796-7810.
2. Xiao-Lin Zhou, Sow-Hsin Chem, *Phys. Rep.* **257** (1995) 223-348.
3. S Farhad Masoudi, Ali Pazirandeh, *Physica B: Condensed Matter*, **362** (2005) 153-157
4. C F Majkrzak and N F Berk, *Phys. Rev B* **58** (1998) 23-15.
5. D A Korneev, V K Ignatovich, S P Yaradaykin, *Physica B* **364** (2005) 99-110
6. M R Fitzsimmons, Los Alamos National Laboratory, C F Majkrzak, National Institute of Standards and Technology, "Application of polarized neutron reflectometry to studies of artificially structured magnetic materials".
۷. سید سعید سیوف جهرمی، سید فرهاد مسعودی، "بررسی اثر نرمی پتانسیل اپتیکی نوترون در مرز سطوح بر روی بازتابندگی نوترون‌های سرد" کنفرانس هسته‌ای ایران، یزد، اسفند (۱۳۸۶).
۸. سید سعید سیوف جهرمی، سید فرهاد مسعودی، "اثرات