

()

dariani@physics.queensu.ca :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۴/۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۴/۵)

(BD)

fcc

تخلخل بالا و سطح مؤثر بزرگ، باعث شده لایه‌های نازک با چنین ساختارهایی علاوه بر کاربردهای مغناطیسی و الکتریکی، کاربردهای شیمیایی، پزشکی و بیولوژیکی نیز داشته باشند [۲]، ۴ و ۵]. اما شرایط لایه نشانی از قبیل زاویه فرود ذرات روی زیرلایه، جنس ذرات، نوع و دمای زیرلایه، روی ریخت شناسی ساختار تأثیر فراوانی دارد. بنابراین کنترل شرایط لایه نشانی در تعیین نوع کاربرد ساختار اثر گذار است. یکی از روش‌های کنترل ریخت شناسی ساختار، به کار بردن روش رونشست زاویه‌ای^۴ (GLAD) است. روش GLAD یک روش زاویه‌ی مایل است که در آن کنترل دقیقی بر هندسه منبع و

لایه نشانی زاویه مایل^۱ براساس روش رونشست بخار فیزیکی (PVD)^۲ است که در آن شار ذرات فرودی تحت زاویه‌ای مشخص نسبت به عمود بر سطح به سمت زیرلایه فرود می‌آیند. دو عامل فیزیکی الف) خود سایه اندازی^۳ و ب) محدودیت در تحرک پذیری ذرات فرودی، باعث ایجاد ساختارهایی به صورت ستون‌های مجزا با اشکال مختلف و در جهت فرود ذرات شده‌اند [۳-۱]. بعضی از خواص این ساختارهای ستونی، به خصوص

۱. oblique angle deposition

۲. Physical Vapor Deposition

۳. self-shadowing

۴. Glancing Angle Deposition

صافی‌های تداخلی لایه نازک که با تکنیک GLAD ساخته شده است را شبیه سازی نموده و از نتایج این شبیه سازی در راستای کم کردن اختلاف بین طراحی فیلترها و پاسخ اپتیکی آنها استفاده کرده‌اند [۱۱]. برخی از روش‌های جدید به صورت ترکیبی استفاده می‌شود به طور مثال روش جدید ترکیب MD و SGCMC^۶ برای بررسی عامل پخش انرژی آزاد خوشه‌ها^۷ استفاده می‌شود [۱۲].

در این تحقیق سعی شده با استفاده از روش رونشست زاویه مایل و گام‌های تصادفی مونت کارلو به شبیه سازی ساختار ستونی پردازیم. مدل رشد به کار رفته رونشست بالستیک می‌باشد. ذره در حال رونشست اتم مس، با شبکه بلوری fcc، در نظر گرفته شده است. پتانسیل ذرات در مرحله هسته‌بندی پتانسیل لنارد- جونز می‌باشد که برای ساختار شبیه سازی شده برخی پارامترها از جمله زاویه ستون‌ها، مورفولوژی ساختار، چگالی و ناهمواری سطح را بررسی می‌نماییم. اتم مس به دلیل داشتن شبکه fcc (که این ساختار یکی از اهداف اصلی برنامه می‌باشد) و همچنین به دلیل قابلیت استفاده از پتانسیل لنارد- جونز با تقریب خوب برای آن، برای شبیه سازی انتخاب شد.

فیزیک مدل ارائه شده، براساس شبیه سازی مونت کارلو و تولید اعداد تصادفی می‌باشد و مدل رشد به صورت رونشست بالستیک^۸ انتخاب شده است. جزئیات مدل شبیه سازی در یک مقاله^۹ معتبر در مرجع ۱۳ بیان شده است. رونشست بالستیک با فرود مایل در رشد سه بعدی اجازه معلق شدن^۹ به ساختار را می‌دهد. این مدل یک شبکه بلوری مکعبی مرکز سطحی با اندازه $L \times L \times L$ و با شرایط مرزی دوره‌ای برای صفحه $x-y$ ، را در بر دارد و رشد ساختار در راستای محور Z

زیرلایه صورت می‌گیرد [۶]. این کنترل با چرخش زیرلایه حول دو محور، یکی در راستای سطح زیرلایه و عمود بر شار ذرات فرودی و دیگری عمود بر سطح زیرلایه، انجام می‌گیرد. به این ترتیب که چرخش حول محور اول زاویه ذرات فرودی را کنترل می‌کند و چرخش زیرلایه حول محور دوم با سرعتی معین تأثیر در تغییر ساختار خواهد داشت. تغییر زاویه فرود و همچنین چرخش و عدم چرخش زیرلایه در روش GLAD منجر به تشکیل ساختارهای متفاوتی از جمله زیگ-زاگ^۱، مارپیچ^۲، ستونی^۳، خمیده^۴ می‌شود [۷]. این تنوع و تفاوت در ساختار فیزیکی باعث تفاوت در خواص آنها نیز می‌شود. برای اینکه ساختار را برای کاربرد خاصی بهینه کنیم، لازم است که بتوانیم اثرات شرایط رونشست در ساختار رشد یافته را پیش‌بینی کنیم. یک روش مناسب برای این منظور شبیه سازی کامپیوتری ساختار می‌باشد. در برخی از شبیه سازها از روش‌های گسسته مانند KMC^۵ استفاده می‌شود، که در آنها می‌توان تمام فرآیندهای تصادفی که منجر به ستونی شدن ساختار می‌شوند را مستقیماً شبیه‌سازی کرد [۸]. یکی از این شبیه سازها، که برپایه روش KMC با مسیرهای بالستیک برای اتم‌ها طراحی شده است، SIMBAD می‌باشد [۹]. برای مثال از این شبیه ساز برای بررسی هدایت گرمایی در ساختارهای ستونی با اشکال متفاوت استفاده شده است. آنالیز و بهینه سازی پوشش‌های حرارتی که با تکنیک GLAD ساخته شده‌اند، یکی دیگر از کاربردهای این شبیه ساز است [۱۰]. یکی دیگر از شبیه سازهای سه بعدی VFIS است که در این روش، ساختار طی دو مرحله فرود ذرات (که یک فرآیند رونشست بالستیک مونت کارلو است) و پخش سطحی، رشد می‌یابد. از این شبیه ساز برای بررسی مساحت سطح مؤثر و اثر تغییرات فوتوکاتالیست براساس تغییر شکل ستون‌ها در لایه‌های TiO_2 استفاده شده است [۷]. همچنین با استفاده از این شبیه ساز

۱. zig-zag

۲. helical

۳. pillars

۴. chevron

۵. kinetic Monte Carlo

۶. semi grand canonical Monte Carlo

۷. clusters

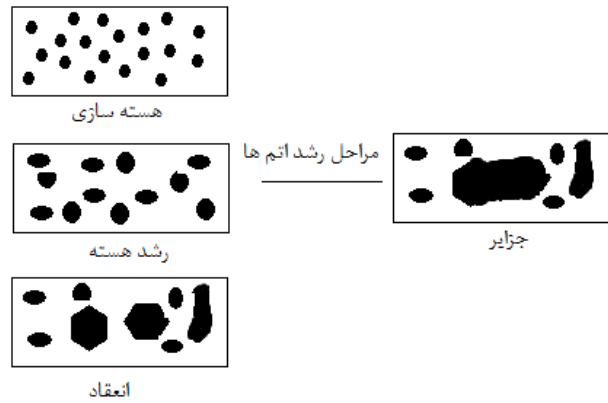
۸. ballistic Deposition

۹. overhang

ورودی ذرات و به اندازه سد که آن هم به سطح زیرلایه و ماده فیلم و هندسه موضعی سطح، بستگی دارد. برای هر اتم بخار که به زیرلایه می‌رسد سه احتمال ممکن است اتفاق بیفتد: (۱) به سرعت بازتابیده شود، (۲) در حالت جذب فیزیکی روی زیرلایه برای مدت محدود حرکت کند (پخش) و سپس در حالت مقید به طور دائمی روی سطح ساکن شود و (۳) ذره می‌تواند در حالت جذب فیزیکی روی زیرلایه برای مدت محدودی حرکت کند و سپس از روی سطح بازتابیده شود. در مدت زمانی که ذرات در حالت جذب فیزیکی روی سطح زیرلایه در حال پخش هستند، به ذره دیگری برخورد و با تعداد کمی از ذرات یک هسته تشکیل می‌دهند. هسته‌های کوچک، نسبت سطح به حجم کوچکی دارند، در نتیجه احتمال بازتبخیر زیادی خواهند داشت [۱۵]. وقتی اندازه هسته‌ها افزایش یابد احتمال بازتبخیر از سطح کاهش می‌یابد و هسته‌ها در حالت اندازه بحرانی تمایل بیشتری به روی سطح ماندن دارند. یکی از پدیده‌های مهم در مرحله هسته‌بندی بهم چسبیدن ذرات^۱ (انعقاد) و تشکیل جزایر می‌باشد (شکل ۱). با پوشیده شدن سطح با هسته‌های بحرانی بزرگ، لایه نازک زیرین تشکیل می‌گردد [۱۶].

در مرحله هسته‌بندی فرض می‌کنیم، پتانسیل لنارد-جونز برهم‌کنش بین ذرات را توصیف می‌کند و ارتفاع ساختار در این مرحله تا ۵ لایه در نظر گرفته شده است. ضرایب پتانسیل لنارد-جونز [۳] برای اتم مس به صورت $\epsilon = 0.4 \text{ eV}$ و $\sigma = 2.3 \text{ \AA}$ می‌باشد. شکل ۲ مورفولوژی مرحله هسته‌بندی در این قسمت می‌باشد، قسمت (الف) با نرم‌افزار VMD Version ۱.۹ و قسمت (ب) که قسمت کوچکی از یک لایه (الف) می‌باشد و با نرم‌افزار ۳dmax رسم شده است. Fcc بودن ساختار در (ب) نمایان است. این شکل در ابعاد 100×100 و طول پخش $d=10$ اجرا و رسم شده است.

بعد از مرحله هسته‌بندی رشد حجمی ساختار شروع می‌شود. دو پدیده مهم که در این مرحله تأثیر می‌گذارد، اثر سایه اندازی



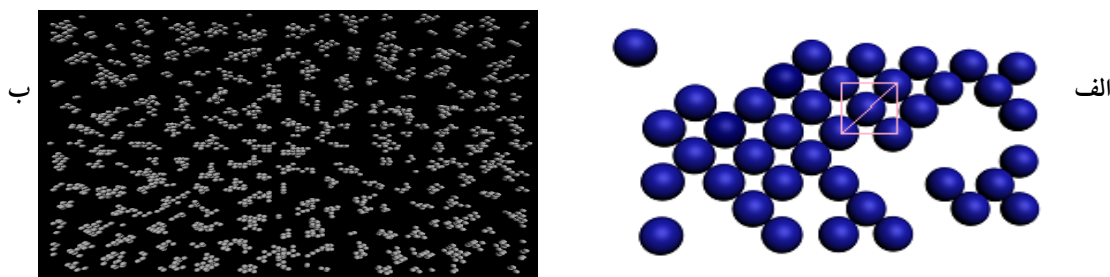
شکل ۱. ساختمان و مراحل مختلف رشد یک لایه [۱۵].

می‌باشد. هر مکان شبکه ممکن است توسط ذرات، اشغال شده یا اشغال نشده باشد. حضور دو ذره در یک مکان به صورت اشتراکی مجاز نیست، پس هر ذره می‌تواند به یک مکان اشغال نشده برود یا بنشیند. زیرلایه کاملاً صاف و هموار فرض می‌شود و هیچ‌گونه ناهمواری ندارد. ذرات به صورت تصادفی خلق و از ارتفاع h (سه خانه بالاتر از زیرلایه) به سمت زیرلایه فرستاده می‌شوند. فرض می‌شود که ذرات در مسیر خود، تا زمان رسیدن به ساختار در حال رشد، هیچ برخوردی با اتم‌ها در جهت بخار فرودی نداشته باشد. در این مدل پدیده پخش سطحی وجود دارد و ذرات با گام‌های تصادفی که گام مونت کارلو نامیده می‌شود شروع به پخش می‌کنند تا به اولین همسایگی رسیده یا تعداد گام‌های مجاز تعریف شده به پایان برسد. معادله (۱) رابطه پخش استفاده شده در این مقاله می‌باشد:

$$\chi = \frac{2a}{\sqrt{3}} d \quad (1)$$

رشد لایه نازک وقتی که اولین ذرات به سطح زیرلایه وارد و ساکن می‌شوند، شروع می‌شود. وقتی ذرات ورودی به زیرلایه می‌رسند در ابتدا به صورت جذب فیزیکی در طول سطح، پخش می‌شوند. اگر ذرات انرژی کافی برای غلبه بر سد پتانسیل را داشته باشند، با سطح زیرلایه پیوند شیمیایی برقرار کرده و ساکن می‌شوند. احتمال عبور ذرات از سطح پتانسیل به انرژی شار

۱. coalescence



شکل ۲. نمای بالایی به دست آمده برای مرحله هسته‌بندی در ابعاد 100×100 و طول پخش $d=10$. (الف) با نرم‌افزار VMD Version 1.8 و (ب) که قسمت کوچکی از یک لایه (الف) می‌باشد و با نرم‌افزار 3dmax رسم شده و در آن fcc بودن ساختار نمایان است.

رابطه زاویه فرود α و زاویه ستون‌های β طبق معادله تانژانت (معادله (۲)) برای زاویه‌های کوچک‌تر از 60° و معادله تیت (معادله (۳)) برای زاویه‌های بزرگ‌تر از 60° برقرار می‌باشد [۱۰]:

$$\tan \beta = \tan \alpha, \quad (2)$$

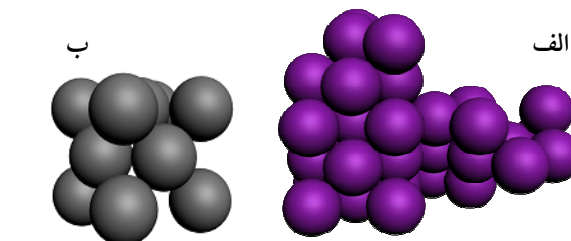
$$\beta = \alpha - \sin^{-1} \left[\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right]. \quad (3)$$

برای به دست آوردن مقادیر β در هر زاویه فرود، برنامه را 50° بار اجرا کرده و میانگین آنها را محاسبه نمودیم. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای زاویه 70° ، 80° و 82° به ترتیب مقادیر 46° ، 50° و 55° می‌باشد. همچنین برای لایه نازک واقعی Ta_2O_5 در زاویه‌های 70° و 82° زاویه ستون‌ها به ترتیب 43° و 53° β به دست می‌آید. همچنین برای TiO_2 در زاویه 70° ، 80° و 82° β به دست می‌آید [۱۵]. در نتیجه β به دست آمده با مقادیر تجربی، به خصوص اکسیدها در توافق است. همچنین نمودار معادله‌های ۲، ۳ و مقادیر به دست آمده از این شبیه‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده است.

قابل توجه است، که نقاط به دست آمده با زاویه بزرگ‌تر از 60° (70° و 80° و 82°) از معادله تیت و نقاط با زاویه کوچک‌تر از 60° (50° و 60°) از معادله تانژانت پیروی می‌کنند. که این کاملاً با بحث ارائه شده در توافق می‌باشد. یکی دیگر از کمیت‌های محاسبه شده برای این قسمت رابطه چگالی می‌باشد

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + a \tan \alpha}. \quad (4)$$

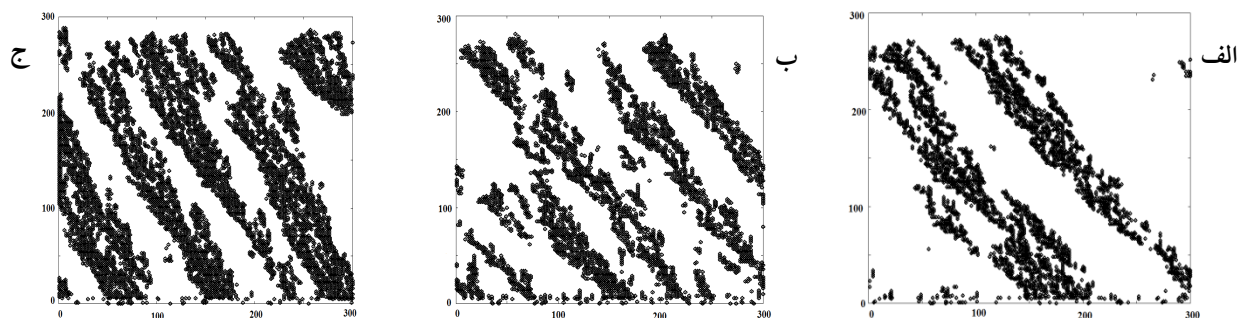
در این معادله ρ_0 چگالی فیلم در زاویه صفر درجه و ثابت a



شکل ۳. الف) ساختار شبیه‌سازی شده مرحله رشد حجمی. ب) قسمت کوچکی از (الف) که ساختار fcc را نشان می‌دهد.

و پخش ذرات می‌باشد. پخش ذرات به دو صورت پخش سطحی و پخش حجمی تعریف می‌شود. پخش حجمی به صورت برانگیختگی مواد رنشت شده فیلم بر روی زیر لایه گرم تعریف می‌شود که قابل چشم‌پوشی است. پخش سطحی حرکت ذرات روی سطح فیلم در حالت جذب فیزیکی می‌باشد. در شکل ۳ قسمتی از ساختار شبیه‌سازی شده در مرحله رشد حجمی با نرم‌افزار 3dmax رسم و نشان داده شده است. قسمت (ب) بخش کوچکی از (الف) می‌باشد که ساختار fcc را به وضوح نشان می‌دهد.

برش عرضی ساختار به دست آمده برای زاویه‌های 70° و 80° و 82° در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که نمایان است، ستون‌ها در راستای شار ذرات ورودی مایل رشد کرده‌اند. در زاویه 70° ستون‌های بیشتر و منسجم‌تری داریم و با افزایش زاویه، ستون‌های کمتر و با فضای خالی بیشتری به دست آمده است که این تفاوت به میزان سایه اندازی ساختار وابسته است. یعنی در زاویه‌های بالاتر میزان سایه اندازی بیشتر و میزان تخلخل افزایش می‌یابد.



شکل ۴. برش عرضی ساختار شبیه سازی شده در ابعاد $300 \times 300 \times 300$ (الف) زاویه فرود 70° (ب) زاویه فرود 80° (ج) زاویه فرود 82° .

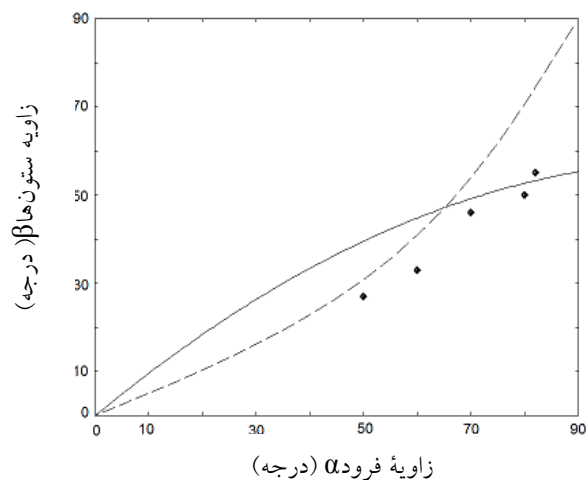
سطحی که از یکسری ذره تشکیل شده در نظر بگیرید، هر مکان سطح ارتفاع معینی دارد. به طور کلی سطح رشد یافته سطحی ناهموار است. محاسبه ناهمواری سطح یکی از کمیت‌های مهم برای یک مدل شبیه سازی می‌باشد. برای این مدل در زمان‌های خیلی بزرگ که سطح اشباع شده است، ناهمواری بررسی شد. با استفاده از رابطه زیر می‌توان این ناهمواری را به دست آورد [۱۸]:

$$\bar{h}(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L h(i,t), \quad (5)$$

$$W(L,t) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (h(i,t) - \bar{h}(t))^2}. \quad (6)$$

در این قسمت، ناهمواری فصل مشترک برحسب تغییرات زاویه فرود از 0° تا 60° بررسی می‌شود. شکل ۷ تغییرات ناهمواری W برحسب زاویه α را نشان می‌دهد [۱۹].

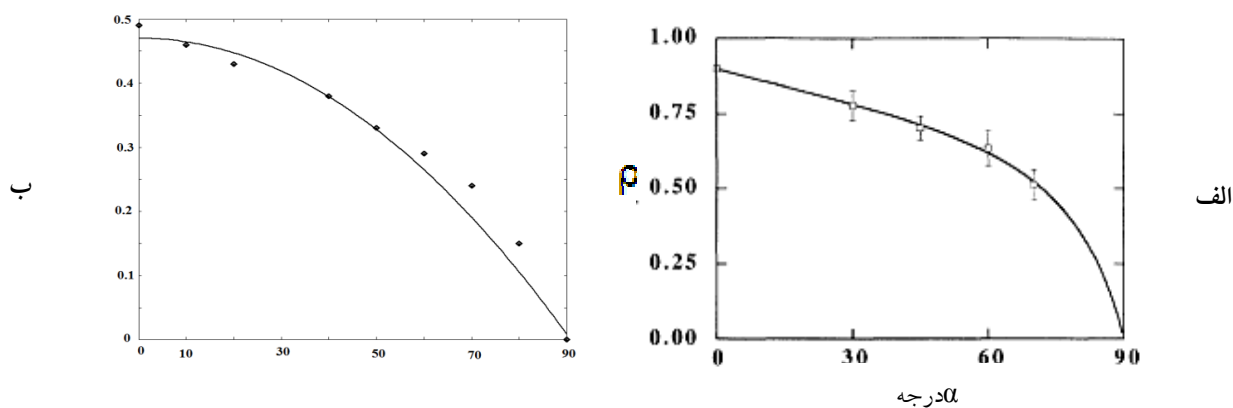
شکل ۷ (الف) با استفاده از معادله (۶) و محاسبه ناهمواری برای مدل شبیه سازی به دست آمده است. شکل ۷ (ب) به دست آمده از مرجع [۲۰] می‌باشد، که شبیه سازی چندلایه‌ای مس بر زیرلایه نیکل برای دو حالت زیرلایه ثابت و زیرلایه چرخان می‌باشد. زیرلایه ثابت با نقاط مربعی توخالی و زیرلایه چرخان با نقاط دایروی توپر نشان داده شده است. البته نمودار عمودی سمت چپ یعنی پارامتر r_1 (در مقاله مرجع [۲۰] پارامتر ناهمواری r_1 که به صورت میانگین نسبت سختی ظاهری سطح تعریف می‌شود) با زیرلایه ثابت (که خط نمودار بالایی در این شکل)، قابل مقایسه با شکل ۷ (الف) می‌باشد. شکل ۷ (ج) از مقاله مرجع [۲۱] انتخاب شده است. در این مقاله با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو جنبشی، نمودار ناهمواری



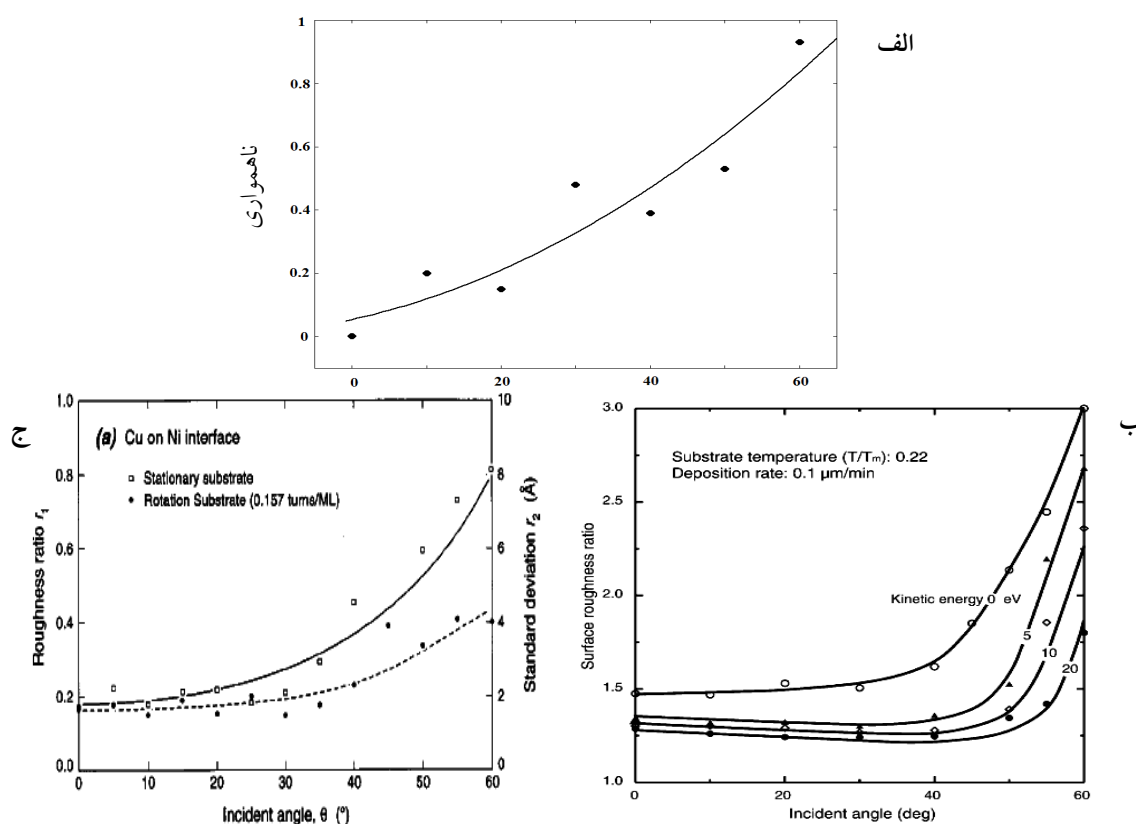
شکل ۵. نمودار معادله‌های (۲)، (۳) و مقادیر به دست آمده از شبیه سازی. نمودار خط چین معادله تانژانت و نمودار خط پررنگ معادله تیت و پنج نقطه پررنگ مقادیر به دست آمده از شبیه سازی می‌باشد.

نسبت ارتفاع سایه اندازی به ضخامت ستون‌ها می‌باشد. در اینجا براساس نسبت تعداد ذرات بر حجم ساختار، مقدار چگالی اولیه $\rho_0 = 0.49 \left[\frac{\text{atom}}{u^3} \right]$ و ثابت a هم نسبت طول سایه به ضخامت ساختار، یعنی $a = 0.39$ به دست آمد. هر واحد شبکه (1.805 \AA) را برابر مقدار فرضی u در نظر می‌گیریم. با جاگذاری این مقادیر در معادله (۴)، شکل ۶ (الف) به دست می‌آید.

از مقایسه این دو نمودار می‌بینیم که مقدار بیشینه در (الف) تقریباً $0.5 \left[\frac{\text{atom}}{u^3} \right]$ و در مرجع [۱۱] (ب) $0.9 \left[\frac{\text{atom}}{u^3} \right]$ می‌باشد. ولی این دو نمودار به طور کلی شکل و رفتار یکسانی داشته و با هم در توافق هستند.



شکل ۶. نمودار چگالی برحسب تغییرات زاویه فرود α . (الف) نمودار به دست آمده از شبیه سازی ما، (ب) مرجع [۱۷].

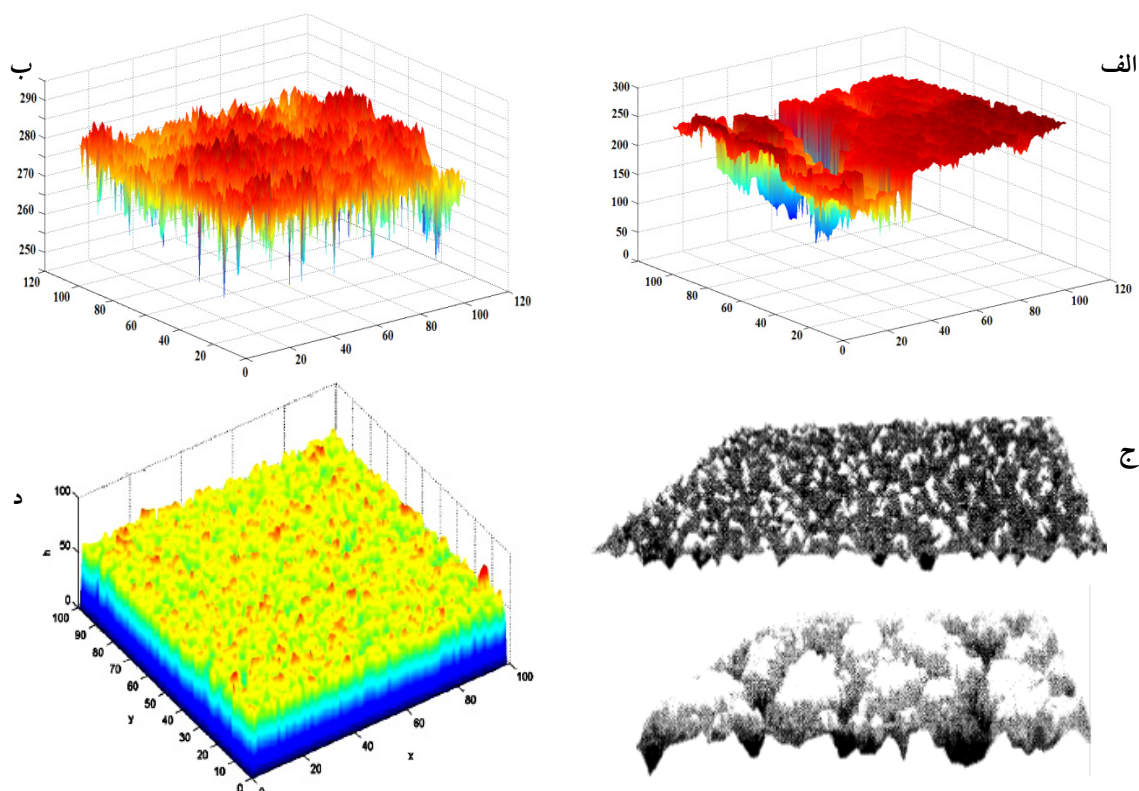


شکل ۷. نمودار تغییرات ناهمواری برحسب زاویه فرود α (الف) نمودار به دست آمده از معادله (۶) برای این مدل شبیه سازی، (ب) نمودار به دست آمده از مرجع [۲۰]، برای شبیه سازی چندلایه‌ای مس بر پایه نیکل. (ج) نمودار به دست آمده از مرجع [۲۱]، برای شبیه سازی مونت کارلوی نیکل.

۸. MATLAB Version ۷.۸ ترسیم نمودیم (شکل ۸ (الف) و (ب)).

این شکل‌ها نیز با توجه به مقیاس رسم شده، نشان دهنده افزایش ناهمواری با افزایش زاویه فرود می‌باشند. در مقالات و مراجع دیگر نیز از روش‌های مشابه برای ترسیم ناهمواری شبیه سازی شده استفاده می‌شود، که برای نمونه در شکل ۸ (ج) و (د) نشان داده شده است.

برحسب تغییرات α برای انرژی جنبشی‌های مختلف رسم شده است (شکل ۷). همان‌طور که می‌بینیم در هر سه نمودار با افزایش زاویه α میزان ناهمواری افزایش می‌یابد. البته قسمت (الف) از لحاظ مقداری به قسمت (ب) بسیار نزدیک‌تر می‌باشد. همچنین برای نمایش بهتر ناهمواری‌های زاویه 20° و 60° درجه را با استفاده از نرم‌افزار



شکل ۸. شکل ناهمواری به دست آمده از نرم افزار MATLAB (الف) زاویه 20° و (ب) زاویه 60° . (ج) سطح ناهموار شبیه سازی شده در مرجع [۲۲] (د) سطوح ناهموار شبیه سازی شده در مرجع [۲۳].

فضاهای خالی جدا از هم در جهت فرود ذرات تشکیل شود. با افزایش زاویه فرود پدیده سایه اندازی و تخلخل ساختار افزایش می یابد. زاویه ستون های رشد یافته در این ساختار با زاویه فرود ذرات در زاویه های کمتر از 60° از رابطه تانژانت و در زاویه های بزرگتر از 60° از رابطه تیت پیروی می کند. چگالی ساختار با افزایش زاویه فرود ذرات افزایش می یابد. ناهمواری فصل مشترک با افزایش زاویه فرود افزایش یافته که شکل های به دست آمده از MATLAB نیز گویای این مطلب می باشد.

این کار توسط دانشگاه الزهرا حمایت مالی شده است.

با استفاده از روش رونشست زاویه مایل ساختاری سه بعدی از شبکه fcc اتم مس شبیه سازی نمودیم. در این مدل همچنین از گام های تصادفی مونت کارلو استفاده شده است. نحوه چسبیدن ذرات از روش رونشست بالستیک پیروی می کند. شار ذرات تحت زاویه ای مایل نسبت به عمود بر سطح به سمت زیرلایه صاف و هموار فرود می آید. دو مرحله هسته بندی و رشد حجمی در رشد سطح داریم. پتانسیل مورد نظر در مرحله هسته بندی پتانسیل لنارد- جونز می باشد. دو عامل فیزیکی یکی خود سایه اندازی و دیگری محدودیت در تحرک پذیری در مرحله رشد حجمی باعث شده ساختارهایی به صورت ستون های مجزا با

۴. م رجبی، س مینائی فرد، و ر ثابت داریانی، کنفرانس سالانه

فیزیک ایران (۱۳۸۷) ۲۱.

5. P A Sanchez, T Sintes, O Piro, and J H E Cartwright, *Proc. R. Soc. A* **465** (2009) 3875.

1. H Huang, G H Gilmer, and T D de la Rubia, *J. Appl. Phys.* **84**, 7 (1998) 3636.
2. M Suzuki and Y Taga, *J. Appl. Phys.* **90**, 11 (2001) 5599.
3. H Savaloni, S M Afzali, and M G Shahraki, *J. Sci. I. A. U.* **63**, 17 (2007) 20.

- کاربردهای آن"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۱).
16. K Robbie, "Glancing Angle Deposition" Ph.D. Thesis, University of Alberta, Canada (1998).
 17. S M Paik, S Kim, and I K Schuller, *Physical Review B* **4** (1991) 18436.
 ۱۸. آل باراباسی و اچ ای استانلی "مفاهیم فراکتالی در رشد سطح" ب تخم چی و ع افشارنیا، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۸۲).
 19. S KhadivianAzar and R S Dariani, *International Congress on Nanoscience and Nanotechnology, ICNN* (2012) 1030.
 20. X W Zhou and H N G Wadley, *J. Appl. Phys.* **87** (2000) 8487.
 21. T Karabacak, G C Wang, and T M Lu, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **859** (2005) 951.
 22. D Ni and P D Christofides, *Chemical Engineering Science* **60** (2005) 1603.
 23. D P Landau and S Pal, *Thin Solid Films* **272** (1996) 184.
 6. J Shao-Ji, Y Meng-Ying, W Yu-Wei, and T Ji-Jia, *China Phys. Lett.* **25**, 12 (2008) 4456.
 7. K Robbi, G Beydaghyan, T Brown, C Dean, J Adams, and C Buzea, *Review of Scientific Instruments* **75**, 4 (2004) 1089.
 8. V Borovikov, Y Shim, and J G Amar, *Phys. Rev. B* **76** (2007) 24140.
 9. S K Dew, T Smy, and M J Brett, *IEEE Trans. Electron Devices* **39**, 7 (1992) 1599.
 10. K Kaminska, M Suzuki, K Kimura, Y Taga, and K Robbi, *J. Appl. Phys.* **95**, 6 (2004) 3055.
 11. T Smy, D Walkey, K D Harris, and M J Brett, *Thin Solid Films* **391** (2001) 88.
 12. A Harjunmaa, K Nordlund, and A Stukowski, *Computational Materials Science* **50** (2011) 1504.
 13. R S Dariani, S Minaeifard, and M Rajabi, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* **14**, 11-12 (2012) 890.
۱۴. ص خدیویان آذر، م عبدلهی، و ر ثابت داریانی، کنفرانس سالانه فیزیک ایران (۱۳۹۰) ۲۴۱۷.
۱۵. ک میرعباسزاده و پ نایی، "تکنولوژی ساخت لایه‌های نازک و