

Research Paper

A Numerical Generation of Gaussian and Non-Gaussian Isotropic/Anisotropic Rough Surfaces¹

Zhaleh Ebrahiminenejad²

Received: 2023.12.22

Revised: 2024.03.23

Accepted: 2024.05.26

Abstract

In the present study, the computer simulation has been used to generate the (1+1) and (2+1) surfaces with two types of correlation function Gaussian and correlation function Exponential forms. For this aim, a random number generator is used to generate the surfaces with Gaussian height distribution with zero mean, and their correlation functions were assumed to have Gaussian and exponential formulas. The calculations have been done for isotropic and anisotropic surfaces. For monofractal evaluation of rough surfaces, skewness and kurtosis values have been calculated for these (1+1) and (2+1) dimensional surfaces. Moreover, these values have been analyzed by the behavior of probability distribution of height. Also, the Hurst exponents of surfaces have been evaluated to study the irregularity and jaggedness of produced surfaces. Furthermore, the fractal dimension of these rough surfaces has been obtained to describe the complexity of the irregular fractal surfaces.

Keywords: *Correlation Function, Exponential, Gaussian, Skewness, Kurtosis.*

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46054.1383>

² Assistant Professor, Department of Physics, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Email: zh1.ebrahimi@gmail.com



تولید سطوح ناهموار گاوسی و غیر گاوسی

همسانگرد/ناهمسانگرد^۱

ژاله ابراهیمی نژاد^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۷ - ۲۰

چکیده:

در پژوهش حاضر از شبیه‌سازی رایانه‌ای برای تولید سطوح $(1+1)$ و $(1+2)$ بعدی با دو نوع تابع همبستگی گاوسی و تابع همبستگی نمایی استفاده شده است. برای این منظور از یک مولد اعداد تصادفی برای تولید سطوح با توزیع ارتفاع گاوسی با میانگین صفر استفاده شد که توابع همبستگی آن‌ها دارای فرمول گاوسی و نمایی فرض شده است. محاسبات برای سطوح همسانگرد و همچنین سطوح ناهمسانگرد انجام شد. به منظور بررسی مونوفراکتالی سطوح ناهموار تولید شده، مقادیر چولگی و کشیدگی برای این سطوح $(1+1)$ و $(1+2)$ بعدی محاسبه شد. همچنین، مقادیر این کمیت‌ها با رفتار توزیع احتمال ارتفاع تطبیق داده و نتایج بررسی شد. سپس، برای بررسی بی‌نظمی و ناهمواری سطوح تولید شده، نماهای ناهمواری سطوح، مورد ارزیابی قرار گرفت. افزون بر این، برای این سطوح ناهموار، بعد فراکتال برای توصیف پیچیدگی سطوح فراکتال نامنظم بدست آمد.

واژگان کلیدی: تابع همبستگی، نمایی، گاوسی، چولگی، کشیدگی.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46054.1383>

^۲ استادیار، گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. Email: zhl.ebrahimi@gmail.com



۱. مقدمه

ناهمواری سطح نقش اساسی در پدیده‌های فیزیکی مختلف از جمله رسانایی الکتریکی، پراکندگی، اصطکاک، انتقال حرارت، چسبندگی، سایش و ظرفیت دارد [۴-۱]. در حقیقت، وجود ناهمواری در سطوح در مقایسه با ایده آل در نظر گرفتن سطوح، واقعی تر است، بنابراین در بسیاری از مطالعات تجربی و نظری تأثیر ناهمواری سطوح بررسی شده است. از طرف دیگر، مقدار بیان کمیت‌های ناهمواری کاملاً به ریخت‌شناسی سطوح بستگی دارد. ایجاد تغییرات کوچک در کمیت‌هایی چون توزیع ارتفاع و طول همبستگی ممکن است تأثیر قابل توجهی بر ریخت‌شناسی سطح داشته باشد [۵-۱۰]. در پژوهش‌های تجربی، در نظر گرفتن شرایط مختلف تولید سطح چون مواد زیرلايه، مدل رسوب سطح، دما و غیره در ویژگی‌های ریخت‌شناسی سطوح ناصاف تولید شده بسیار مؤثر است [۲-۸، ۱۱].

در شبیه‌سازی‌های عددی ناهمواری سطح، ورودی‌های سطوح ناهموار با ارتفاع‌ها و ویژگی‌های آماری مختلف مشخص می‌شوند و این روشی بهینه برای پیش‌بینی رفتار دستگاه‌های الکترونیکی است. ویژگی‌های آماری سطوح ناهموار را می‌توان از اطلاعات ریشه میانگین مربع (RMS)، طول همبستگی و نمای ناهمواری بدست آورد. توصیف توزیع آماری سطحی از راه دانش تابع همبستگی امکان‌پذیر است. بنابراین، یک الگوریتم خوب قادر به تولید سطوح ناهموار با پارامترهای مشخص شده است [۶-۱۰]. در دهه‌های کنونی، مطالعه در مورد ویژگی‌های تماس سطوح ناصاف به ویژه از نظر سه بعدی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با بررسی عملکرد سامانه‌های مختلف ثابت شده است که شبیه‌سازی عددی از سطوح ناهموار برای تولید سطوح ناهموار روشی کارآمد بوده که در آن ورودی‌ها با استفاده از کمیت‌های آماری ارتفاعی و مکانی متفاوت مشخص می‌شوند. در حقیقت، ساختار و ریخت‌شناسی سطوح ناهموار تولید شده به روش‌های مختلف، بر ویژگی‌های مکانیکی، نوری و الکتریکی مواد تأثیر گذارند و بیان دقیق این ساختارها را به یک هدف مهم تبدیل می‌کنند [۱۴-۱۲].

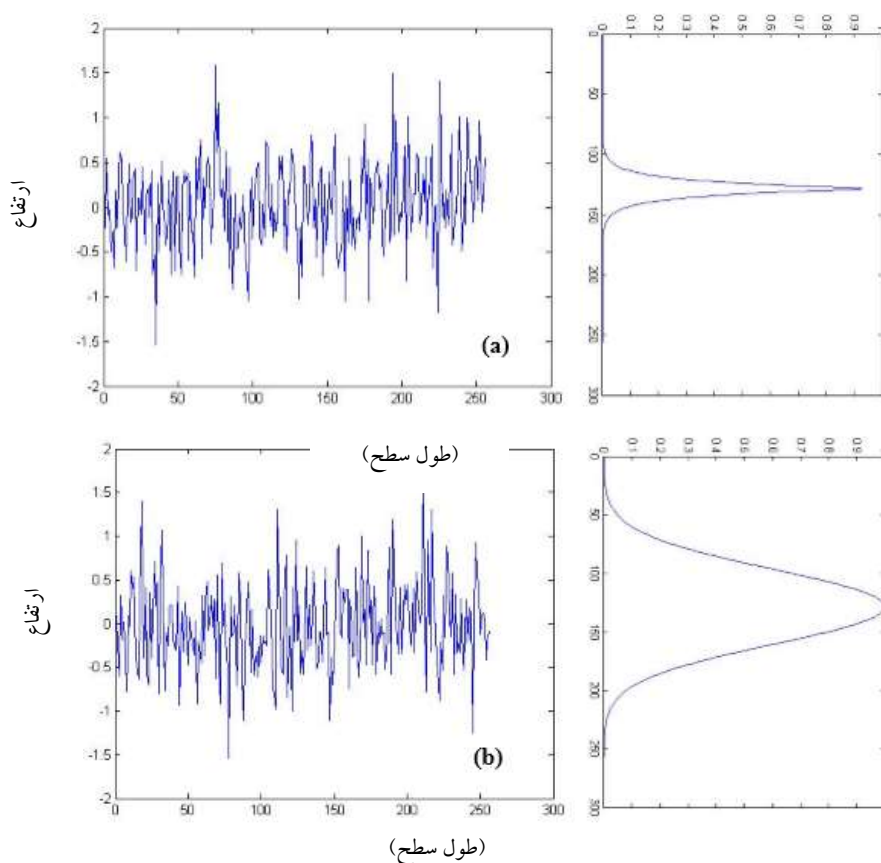
در کار حاضر، روشی ساده برای تولید توپوگرافی سطح ارائه شده است. مزیت اصلی این روش تولید توپوگرافی‌های سطحی با دو تابع همبستگی متفاوت است. در این کار، از کد فرترن و متلب برای شبیه‌سازی عددی مبتنی بر توصیف مناسب سطوح ناهموار به ویژه از نقطه نظر سه بعدی که می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد، استفاده شده است. در این مقاله، یک طرح عملی و ساده برای تولید سطوح ناهموار سه بعدی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های تماس توسعه داده شده است. به این ترتیب که الگوریتمی برای شبیه‌سازی رایانه‌ای برای تولید سطوح ناهموار (۱+۱) و (۱+۲) بعدی با



استفاده از یک مولد اعداد تصادفی ارائه شده است. سطوح رشد یافته دارای توزیع ارتفاع گاوسی با میانگین صفر هستند. توابع همبستگی در نظر گرفته شده برای سطوح دارای اشکال گاوسی و نمایی هستند. یک روش تبدیل فوریه سریع معکوس (FFT) برای ترکیب تابع همبستگی به داده‌های سطوح نمایی و گاوسی تولید شده استفاده شده است. در حالت کلی یک سطح ناهموار با استفاده از سه کمیت اصلی عرض ناهمواری، نمای ناهمواری و طول همبستگی مشخصه بندی می‌شوند. در کار حاضر، مقادیر ریشه میانگین مربع، طول همبستگی و نمای ناهمواری برای ارزیابی توابع همبستگی و توابع چگالی طیفی توان بررسی شده‌اند. همچنین، کلیه محاسبات برای سطوح همسانگرد و ناهمسانگرد انجام شده و مقادیر چولگی و کشیدگی سطوح ناهموار تولید شده گاوسی و نمایی محاسبه شده‌اند.

۲. شبیه‌سازی عددی سطوح ناهموار

توپوگرافی سطوح، نامنظم است و می‌توان آن را به خوبی با ویژگی‌های آماری سطوح مشخص کرد. برای تولید سطح ناهموار تصادفی یک بعدی با ۲۵۶ نقطه سطحی، در مرحله اول، توزیع سطح ناهموار تصادفی گاوسی ناهمبسته با میانگین صفر و مربع میانگین ریشه مشخص (σ) تولید شد. شکل (۱)، نمایه‌های سطح نمایی و سطح گاوسی را نشان می‌دهد. شکل (۱-a)، نمایه یک سطح ناهموار نمایی تولید شده با طول ۲۵۶ واحد (تعداد نقاط $N=256$)، که مقدار RMS آن معادل ۰.۵ واحد در نظر گرفته شده است، را نشان می‌دهد. در سمت راست نیز، تابع توزیع ارتفاع برای سطح نمایی بر حسب ارتفاع ترسیم شده است. شکل (۱-b)، با داده‌های مشابه برای یک سطح ناهموار گاوسی تولید شده رسم شده است.

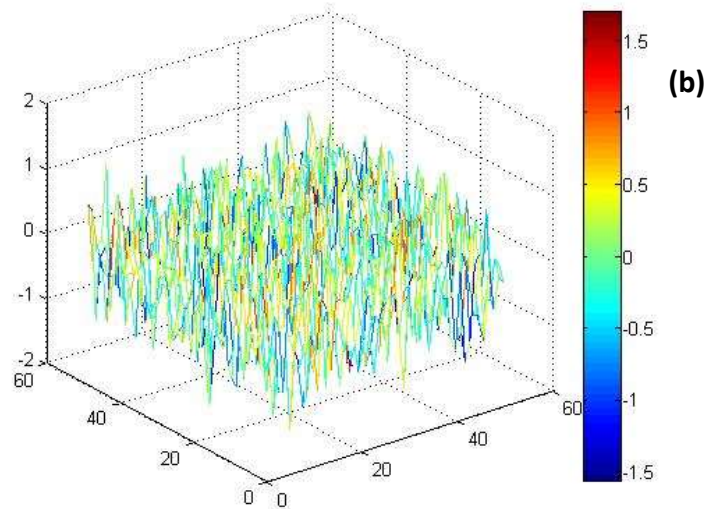
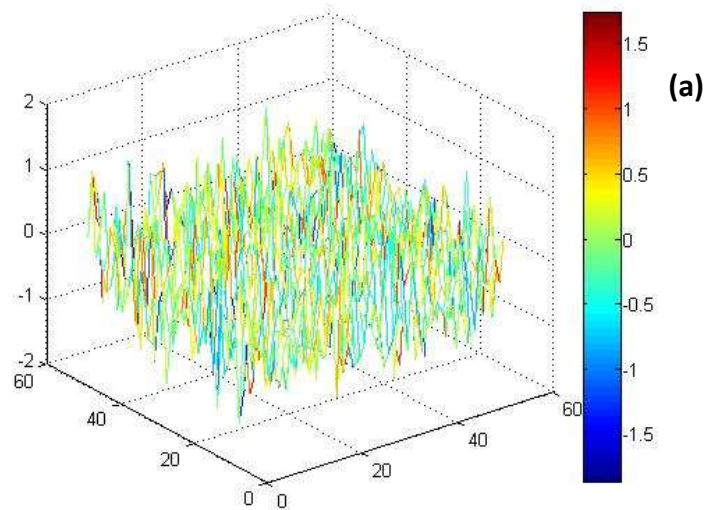


شکل ۱ پروفایل‌های سطوح ناهموار (الف) نمایی و (ب) گاوسی برای $\sigma=0.5$.

سپس پیش فاکتورهای عادی و یک FFT معکوس برای تولید سطح همبسته اعمال شد. همین مراحل برای تولید سطوح ناهموار تصادفی دو بعدی انجام شد. کمیت‌های ξ_x و ξ_y ، طول‌های همبستگی در جهت‌های X و Y هستند. مقادیر متفاوت و یکسان آن‌ها به ترتیب سطوح ناهموار غیرهمسانگرد و همسانگرد را نشان می‌دهد. ویژگی همسانگردی (ایزوتروپ) در شرایطی برقرار است که اندازه‌گیری در هر جهت فضایی، نتیجه‌ای یکسان داشته باشد. به عبارت دیگر، اگر آن کمیت در یک جهت از فضا اندازه‌گیری شود، همان مقدار برای آن در جهت دیگر نیز لحاظ گردد یا بدست آید. این امر در مورد ویژگی ناهمسانگردی برقرار نیست. سطوح ناهموار تصادفی یک بعدی و دو بعدی دارای توزیع ارتفاع گاوسی هستند، اما می‌توانند توابع همبستگی گاوسی یا نمایی داشته باشند. شکل‌های (۲) و (۳)، سطوح تصادفی (۱+۲) بعدی را نشان می‌دهند. تعداد نقاط روی

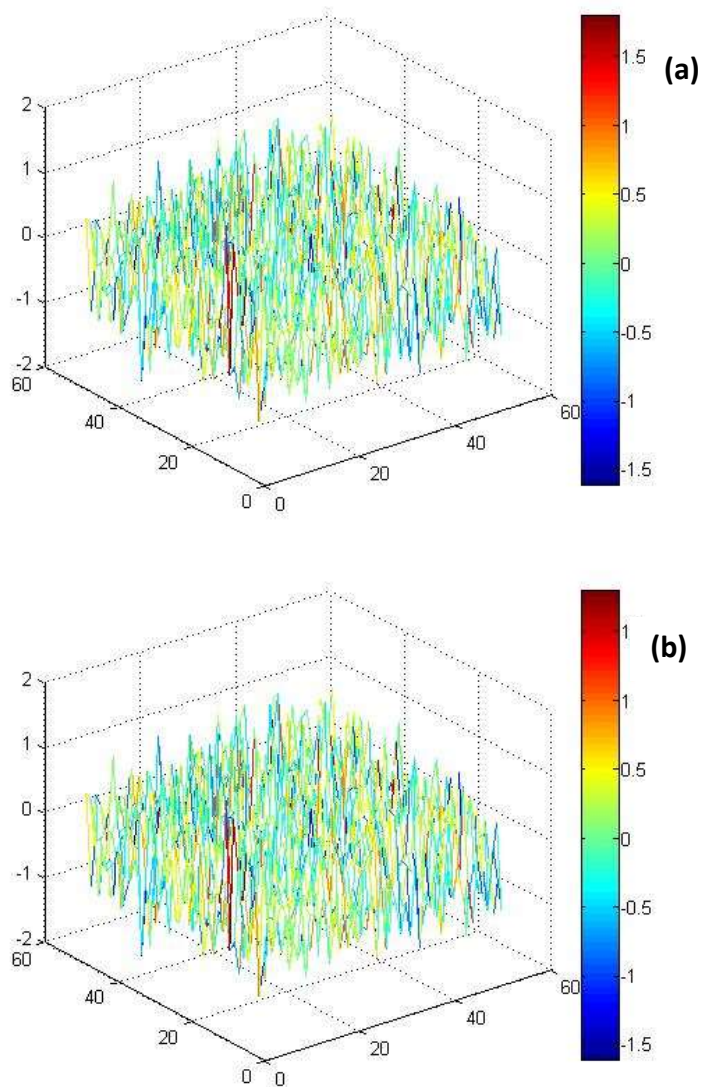


سطوح دوبعدی نشان داده شده ($N=50$) است. همچنین، همانطور که در محور عمودی مشخص است، مقدار $\sigma=0.5$ در نظر گرفته شده است تا تصادفی و ناهموار بودن سطوح تولید شده را برای (به عنوان مثال یک حالت) مقادیر طول همبستگی $\xi=5\text{nm}$ نشان دهد.



شکل ۲ سطوح ناهموار همسانگرد (الف) گاوسی و (ب) نمایی.

در شکل (۳)، تمامی مقادیر ناهمواری مشابه شکل (۲) در نظر گرفته شده است. اما در این جا، به منظور تولید سطوح ناهمسانگرد، مقادیر طول های همبستگی در محاسبات، متفاوت ($\xi_x = 5\text{nm}$ و $\xi_y = 7/5\text{nm}$) در نظر گرفته شده اند.



شکل ۳ سطوح ناهموار ناهمسانگرد (الف) گاوسی و (ب) نمایی.



توزیع ارتفاع به عنوان انحراف یا ارتفاع گسترش از سطح صفحه مرجع (صاف) شناخته می‌شود. برخی از داده‌های تغییرات ارتفاع را می‌توان با دانستن متوسط ناهمواری سطح یافت، اما RMS شامل دانش همه‌جانبه از سطوح ناهموار نمی‌شود. از این رو، برای داشتن داده‌های جامعی در مورد ناهمواری سطوح، تابع همبستگی $C(R)$ ارائه شده است. تابع $C(R)$ نحوه تغییر ارتفاع نقطه در طول سطح را بیان می‌کند. بر این اساس، $C(R)$ تغییرات و محدوده ارتفاع را در هر نقطه از سطح با ارتفاع در نقطه دیگر دورتر R تعریف می‌کند [۱۵]:

$$C(R) = \langle h(\chi_1)h(\chi_2) \rangle / \sigma^2, \quad (1)$$

که در آن، $R = |\chi_1 - \chi_2|$ است. افزون بر ارتفاع RMS، تابع همبستگی برای بیان ریخت‌شناسی سطح استفاده می‌شود، زیرا سطوح با مقادیر σ یکسان، ریخت‌شناسی‌های متفاوتی دارند. این تابع روش تغییرات ارتفاع از ویژگی همبستگی ارتفاعات سطح را در دو موقعیتی که نقطه R در امتداد سطوح ناهموار قرار دارند، تعریف می‌کند. بر اساس معادله (۱)، برای $(R \rightarrow \infty)$ ، $C(R) = 0$ خواهد بود.

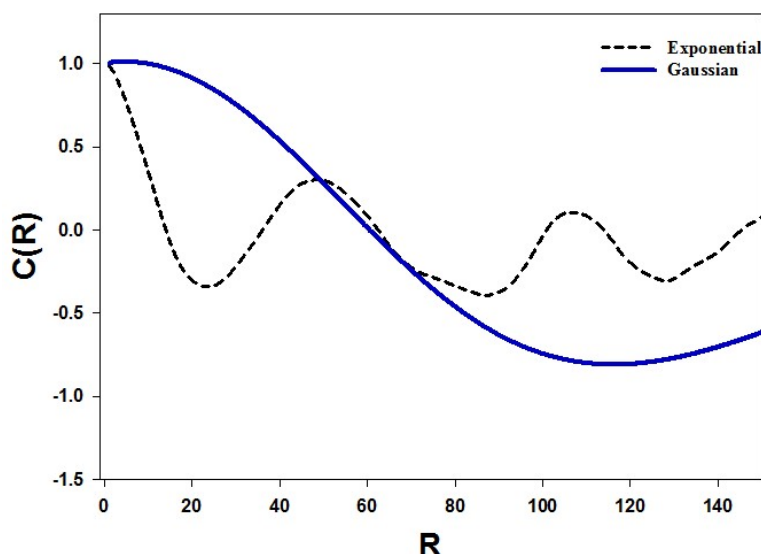
طول همبستگی (ξ) کمیت مهمی است که روش همبستگی در امتداد سطح ناهموار را مشخص می‌کند. همچنین در تعریفی دیگر، طول همبستگی فاصله‌ای است که تابع همبستگی $1/e$ از مقدار پیشینه خود را نشان می‌دهد [۱۵، ۱۶]. در ادامه تولید سطوح ناهموار با تابع همبستگی نمایی:

$$C(R) = e^{-|R|/\xi} \quad (2)$$

و تولید سطوح ناهموار با تابع همبستگی گاوسی نمایش داده می‌شود:

$$C(R) = e^{-R^2/\xi^2} \quad (3)$$

شکل (۴)، توابع همبستگی سطوح ناهموار نمایی و گاوسی بر حسب فاصله R را نشان می‌دهد.



شکل ۴ تابع همبستگی بر حسب فاصله R برای سطوح ناهموار گاوسی و نمایی تولید شده.

تابع $C(R)$ ، با افزایش فاصله جداسازی در هر دو مورد گاوسی و نمایی کاهش می‌یابد. همچنین، مطابق شکل (۴)، تصادفی بودن اما همبسته بودن سطوح در هر دو مدل مشخص است.

۱.۲ تجزیه و تحلیل توزیع ارتفاع

بر اساس بررسی مونوفرنکتال، توزیع ارتفاع و گشتاورهای مرتبه ۳ و ۴ بالاتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به ترتیب چولگی^۱ و کشیدگی^۲ نامیده می‌شوند. ممان سوم توزیع ارتفاع (رابطه (۴)) چولگی نام دارد. این کمیت برای اندازه‌گیری توزیع تقارن ارتفاع سطح بوده و می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد. مقادیر مثبت (منفی) به ترتیب توصیف می‌کنند که نقاط داده به سمت راست (چپ) میانگین داده‌ها انحراف دارند [۱۷].

$$Skewness = \frac{\langle (h-\bar{h})^3 \rangle}{\langle (h-\bar{h})^2 \rangle^{3/2}} \quad (4)$$

ممان مرتبه ۴ ارتفاع سطح به نام کشیدگی شناخته می‌شود. این پارامتر معیاری است که وضوح تابع توزیع ارتفاع را مشخص نموده و همچنین معیاری است برای چاقی $(K < 3)$ ، یا تیزی $(K > 3)$ قلّه احتمال و مقدار آن برای توزیع گاوسی معادل ۳ است [۱۷]:

¹ Skewness

² Kurtosis



$$Kurtosis = \frac{\langle (h-\bar{h})^4 \rangle}{\langle (h-\bar{h})^2 \rangle^2} \quad (5)$$

در جدول‌های ۱، ۲ و ۳، مقادیر اندازه‌گیری شده چولگی و کشیدگی ارائه شده است. نتایج برای حالت نمایی، وضوح و تیزی احتمال ($K > 3$) را نشان می‌دهد و برای توزیع گاوسی معادل ۳ است.

جدول ۱ مقادیر محاسبه شده کمیت‌های چولگی و کشیدگی سطوح گاوسی و نمایی (۱+۱) بُعدی.

	Kurtosis	Skewness
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (گاوسی)	۳/۰۰	-۰/۰۱۲
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (نمایی)	۳/۰۲	۰/۲۳

جدول ۲ مقادیر محاسبه شده کمیت‌های چولگی و کشیدگی سطوح همسانگرد گاوسی و نمایی (۱+۲) بُعدی.

	Kurtosis	Skewness
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (گاوسی)	۲/۹۹	۰/۰۰۲
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (نمایی)	۲/۹۸	-۰/۰۰۹

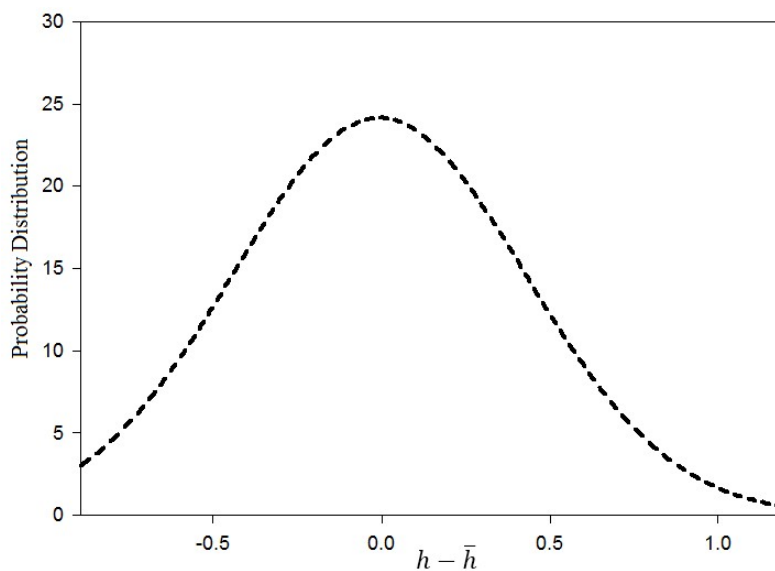
جدول ۳ مقادیر محاسبه شده کمیت‌های چولگی و کشیدگی سطوح ناهمسانگرد گاوسی و نمایی (۱+۲) بُعدی.

	Kurtosis	Skewness
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (گاوسی)	۲/۹۹	۰/۰۰۹
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (نمایی)	۲/۹۸	-۰/۰۱۸

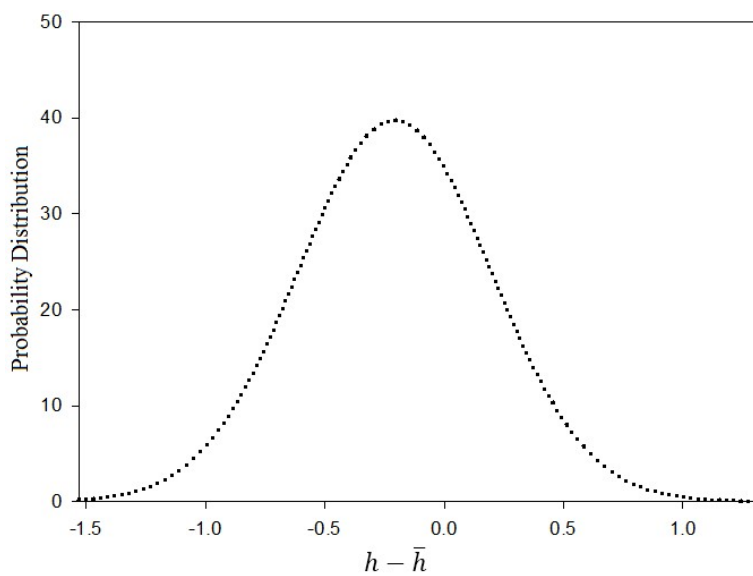
پروفایل‌هایی با قله‌های بلند (دره‌های کم عمق) و پروفایل‌هایی با دره‌های بزرگتر (نسبت به قله‌ها)، به ترتیب دارای مقادیر چولگی مثبت و منفی هستند [۱۰]. با تبدیل فوریه معادله (۱)، توزیع احتمال به صورت زیر نشان داده می‌شود [۹]:

$$P(k) = \frac{1}{2\pi} \int C(\ell) e^{ik \cdot \ell} d\ell \quad (6)$$

توزیع احتمال اندازه‌گیری است که نوع ارتفاع در امتداد سطح و گسترش ارتفاعات بالاتر از سطح متوسط را توصیف می‌کند. شکل طیف توان می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد ناهمواری پروفایل ارائه دهد (شکل‌های (۵) و (۶)). توزیع احتمال سطوح ناهموار با چولگی مثبت/منفی به ترتیب به سمت مثبت/منفی (ارتفاع نرمال شده) منحرف می‌شود [۹، ۱۶، ۱۷].



شکل ۵ توزیع احتمال ارتفاع سطح ناهموار نمایی (۱+۱) بُعدی.



شکل ۶ توزیع احتمال ارتفاع سطح ناهموار گاوسی (۱+۱) بُعدی.

نمایش ریاضی این شکل با گشتاوه‌های طیف توان در مورد سطح میانگین بدست می‌آید. بنابراین، توزیع ارتفاع نرمال شده $P(h)$ ارائه می‌شود [۹].



۲.۲ نمای ناهمواری^۱

سطوح رشد یافته ناصاف هستند و عرض سطوح زبری به صورت زیر بدست می آید:

$$w(L, t) = \sqrt{\langle (h(i, t) - \bar{h}(t))^2 \rangle} \quad (7)$$

در اینجا، $h(i, t)$ ارتفاع سطح در محل (i) و در زمان (t) و $\bar{h}(t)$ میانگین ارتفاع در زمان t است. در مدت زمان کافی طولانی، این سطوح اشباع می‌شوند، و سپس عرض زبری به اندازه زیرلایه به اندازه زیر وابسته خواهد بود [۱۱]:

$$w_L = L^H \quad (8)$$

L ، نشان‌دهنده طول زیرلایه و نمای ناهمواری H است که برای تجزیه و تحلیل رفتار (صافی یا نامنظمی) سطوح ناهموار اشباع شده استفاده می‌شود [۱۱]. مقادیر بدست آمده برای این نما در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴ نماهای ناهمواری (H) اندازه‌گیری شده برای سطوح ناهموار $(1+1)$ بُعدی.

سطح ناهموار گاوسی	۰/۹۷
سطح ناهموار نمایی	۰/۹۱

مقدار این نما بیانگر میزان بی‌نظمی سطوح است. برای یک نمایه خود متشابه، یک قسمت بزرگ‌نمایی شده از سطح از نظر آماری معادل کل نمایه است. برای سطوح ناهموار سطوح خود متشابه، این نما در محدوده $0 \leq H \leq 1$ است. همان‌طور که سطوح ناهموارتر و نامنظم‌تر می‌شوند، این نما مقدار کمتری دارد و برعکس [۱۶]. بر اساس نتایج جدول (۴)، سطوح دارای توابع همبستگی نمایی نامنظم‌تر (زبرتر) نسبت به سطوح گاوسی هستند.

۳.۲ بُعد فراکتال

توزیع بی‌نظمی سطوح فراکتال مشخصه مهمی است که می‌توان آن را با بُعد فراکتال سطح (df) نشان داد. نمای ناهمواری با بُعد فراکتال رابطه مستقیم دارد و همان‌طور که پیش از این بیان شد، از ویژگی‌های پیچیدگی سطح است. روش‌های مختلفی برای یافتن df وجود دارد [۱۱، ۱۷]. در اینجا

^۱ Hurst Exponent

از $df=D+1-H$ برای اندازه گیری بُعد فراکتال استفاده شده است [۱۷]. مقدار D به ترتیب برای پروفایل‌ها و سطوح ۱ و ۲ است. مقادیر df نمونه‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵ بُعد فراکتال (df) محاسبه شده برای سطوح ناهموار (۱+۱) بعدی.

سطح ناهموار گاوسی	۰/۲۳
سطح ناهموار نمایی	۰/۲۹

ویژگی‌ها یا رفتارهای مکانیکی، الکتریکی، نوری و سایر سطوح که در سطح تماس / سطح تماس ایجاد می‌شوند، زمانی که صحبت از ناهمواری باشد بیشتر به ریخت شناسی سطح بستگی دارند. بنابراین، مدل شبیه‌سازی عددی و توصیف سطوح ناهموار از اهمیت زیادی در کاربرد آنها برخوردار است [۲۰-۱۸].

۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تولید عددی سطوح ناهموار گاوسی و غیرگاوسی با بافت سطحی همسانگرد و ناهمسانگرد پیشنهاد شده است. توابع همبستگی سطوح رشد یافته دارای شکل‌های گاوسی و نمایی است. برای سطوح (۱+۲) بُعدی، طول همبستگی یکسان (متفاوت) بوده است تا سطوح همسانگرد (ناهمسانگرد) تولید شوند. دو نوع تابع همبستگی با مقادیر مشخصی از طول همبستگی و RMS ترسیم شده‌اند. تابع همبستگی در هر دو مدل برابر انتظار، با افزایش فاصله جداسازی کاهش می‌یابد. همچنین، بر اساس رفتار این توابع، تصادفی بودن اما همبسته بودن سطوح در هر دو مدل مشخص است. مقادیر محاسبه شده برای کمیت‌های چولگی و کشیدگی این سطوح ناهموار تولید شده، با رفتار تابع توزیع احتمال هماهنگی کامل دارد. بر اساس نمای ناهمواری و بُعد فراکتال محاسبه شده، ناهمواری سطوح تولید شده بررسی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، سطوح ناهموار با شکل‌های توابع همبستگی نمایی، بی‌نظمی و زبری بیشتری را نشان می‌دهند.



منابع

- [1] Podulka P., "Resolving Selected Problems in Surface Topography Analysis by Application of the Autocorrelation Function.", *Coatings*, 13(1), 74, 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13010074>.
- [2] Bussea A., and Jelly T. O., "Effect of high skewness and kurtosis on turbulent channel flow over irregular rough walls.", *Journal of Turbulence*, 24, 2023. <https://doi.org/10.1080/14685248.2023.2173761>.
- [3] Panjan P., Drnovše K., "Special Issue: Surface Topography Effects on the Functional Properties of PVD Coatings", *Coatings*, 12, 1796, 2022. <https://doi.org/10.3390/coatings12121796>.
- [4] Song X-F., Tang H., Zhang Y., and Zheng S-X., "Special Issue: Surface Topography Effects on the Functional Properties of PVD Coatings.", *Measurement*, 203, 111972, 2022, <https://doi.org/10.3390/coatings12121796>.
- [5] Yang D., Tang J., F., and Zhou W., "Rough Surface Characterization Parameter Set and Redundant Parameter Set for Surface Modeling and Performance Research.", *Materials (Basel)*, 15(17), 5971, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15175971>.
- [6] Pérez-Ràfols F., Almqvist A., "Generating randomly rough surfaces with given height probability distribution and power spectrum.", *Tribology International* 131, 591, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.11.020>.
- [7] Gong Y., Misture S. T., Gao P., and Mellott N. P., "Surface Roughness Measurements Using Power Spectrum Density Analysis with Enhanced Spatial Correlation Length.", *J. Phys. Chem. C*, 120, 39, 22358, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b06635>.
- [8] Sedlaček M., Podgornik B., Vižintin J., "Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces.", *Tribology International*, 48, 102-112, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.008>.
- [9] Yang G., Li B., Wang Y. and Hong J., "Numerical Simulation of 3D Rough Surfaces and Analysis of Interfacial Contact Characteristics", *CMES*, 103, 251-279, 2014. <https://doi.org/10.3970/cmcs.2014.103.251>.
- [10] Urzica A. and Cretu S., "Simulation of the non-gaussian roughness with specified values for the high order moments", *J. Balk. Tribol. Assoc.*, 19, 91-400, 2013.
- [11] Barabasi A. L., and Stanley H. E., "Fractal Concepts in Surface Growth.", *Cambridge University Press*, New York, 1995.
- [12] Persson B. N. J., "Surface Roughness-Induced Stress Concentration.", *Tribology Letters*, 71, 29, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11249-023-01741-4>.
- [13] Dalvi S., Gujrati A., Khanal S.R., Pastewka L., Dhinojwala A., "Linking energy loss in soft adhesion to surface roughness.", *Jacobs T.D. B., PNAS*, 116, 25484, 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913126116>.
- [14] Persson B.N.J., Biele J., "Heat transfer in granular media consisting of particles in humid air at low confining pressure.", *AIP Adv.*, 12, 105307, 2022. <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-023-00483-5>.
- [15] Ogilvy J. A., and Foster J. R., "Rough surfaces: gaussian or exponential statistics? ", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 22, 1243, 1989. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/22/9/001>.
- [16] Palasantzas G., Barnaś J., "Surface-roughness fractality effects in electrical conductivity of single metallic and semiconducting films.", *Phys. Rev. B*, 56, 7726-7731, 1997. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.7726>.
- [17] Zhao Y., Wang G-Ch., and Lu T-M., "Characterization of Amorphous and Crystalline Rough Surface: Principles and Applications", *Elsevier*, 2000.



- [18] Sanner A., N`ohring W. G., Thimons L. A., Jacobs T. D.B., Pastewka L., "Scale-dependent roughness parameters for topography analysis.", *Applied Surface Science Advances*, 7, 100190, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100190>.
- [19] Gujrati A., et.al, "Comprehensive topography characterization of polycrystalline diamond coatings.", *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 9, 014003, 2021. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/abe71f>.
- [20] Khanal S.R.,et.al, "Characterization of small-scale surface topography using transmission electron microscopy.", *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 6, 045004, 2018. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/aae5b3>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

