

مقاله پذیرفته شده

عنوان مقاله: پیش‌بینی نتایج BYK-mac-i در اندازه‌گیری ویژگی دانه‌ای شدن در پوشش‌های متالیک با استفاده از اسکنر و روش‌های تحلیل بافتار

نویسندگان: فاطمه ملک‌پور، سعیده گرجی کندی، محسن محسنی

JCST-2503-1253

شماره مقاله:

۱۴۰۳-۱۲-۱۲

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴-۰۲-۱۲

تاریخ اصلاح:

۱۴۰۴-۰۲-۳۱

تاریخ پذیرش:

این فایل pdf مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکت مقاله توسط دفتر نشریه علوم و فناوری رنگ تهیه شده و قبل از چاپ برای ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می‌شود.

Accepted Manuscript

Title: Prediction of BYK-mac-i results for assessing graininess characteristics in metallic coatings using scanner and texture analysis methods.

Authors: Fatemeh Malekpour, Saeideh Gorji Kandi, Mohsen Mohseni

To appear in: Journal of Color Science and Technology

Receives date: 02-03-2025

Revises date: 02-05-2025

Accepted date: 21-05-2025

Please cite this article as:

Malekpour F, Gorji Kandi S, Mohseni M. Prediction of BYK-mac-i results for assessing graininess characteristics in metallic coatings using scanner and texture analysis methods. J Color Sci Tech. (2025): JCST-2503-1253.

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form.



پیش‌بینی نتایج BYK-mac-i در اندازه‌گیری ویژگی دانه‌ای شدن در پوشش‌های متالیک با استفاده از اسکنر و روش‌های تحلیل بافتار

فاطمه ملک‌پور^۱، سعیده گرجی‌کندی^{۲*}، محسن محسنی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳.

۳- استاد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳.

چکیده

پوشش‌های متالیک به دلیل ویژگی‌های بصری جذاب، در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی و دکوراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. ارزیابی دانه‌ای شدن بافتار این پوشش‌ها نقش مهمی در کنترل کیفیت آن‌ها دارد. در این پژوهش، روش‌های مختلف پردازش تصویر شامل تبدیل فوریه، تبدیل موجک، ماتریس هم‌وقوعی و فرکانس لبه وابسته به فاصله، برای کمی‌سازی دانه‌ای شدن بافت پوشش‌های متالیک بررسی شدند. داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل بافتار، با نتایج گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i مقایسه شدند و میزان همبستگی آن‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که تمامی روش‌ها ارتباط معناداری با نتایج دستگاهی دارند. از میان این روش‌ها، ویژگی همگنی بدست آمده از ماتریس هم‌وقوعی، بالاترین دقت را در کمی‌سازی دانه‌ای شدن بافتار نشان داد و با ضریب همبستگی ۰/۸۸، تطابق بالایی با نتایج حاصل از گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i داشت. همچنین، ویژگی‌های میانگین دامنه طیف فوریه و انرژی موجک در کانال قطری در حوزه فرکانس، به همراه ویژگی‌های انرژی و همبستگی ماتریس هم‌وقوعی و روش فرکانس لبه وابسته در حوزه مکان، با ضرایب همبستگی بالاتر از ۰/۸۲ نتایج قابل قبولی ارائه دادند.

واژه‌های کلیدی: پوشش‌های متالیک، دانه‌ای شدن، تحلیل بافتار، گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i.

Prediction of BYK-mac-i results for assessing graininess characteristics in metallic coatings using scanner and texture analysis methods.

Fatemeh Malekpour¹, Saeideh Gorji Kandi^{2*}, Mohsen Mohseni³

Department of Polymer and Color Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

Abstract

Metallic coatings are widely used in various manufacturing industries, including automotive and decoration, due to their visually appealing characteristics. Evaluating the texture graininess of these coatings plays a crucial role in quality control. This study investigated various image processing methods including Fourier transform, wavelet transform, co-occurrence matrix, and distance-dependent edge frequency to quantify the graininess attribute of metallic coatings. The texture analysis obtained data were compared with the BYK-mac-i gonio-spectrophotometer graininess, and the correlation between them was calculated. The results showed that all methods correlated significantly with the measured graininess data. Among these methods, the homogeneity derived from the co-occurrence matrix demonstrated the highest accuracy in quantifying texture graininess, with a correlation coefficient of 0.88. This result aligns closely with the findings obtained from the BYK-mac-i gonio-spectrophotometer. Additionally, the Fourier spectrum means and wavelet energy in the diagonal channel in the frequency domain, and the energy and correlation features from the co-occurrence matrix and distance-dependent edge frequency method in the spatial domain, provided acceptable results with correlation coefficients above 0.82.

Keywords: Metallic coatings, graininess, texture analysis, BYK-mac-i gonio-spectrophotometer.

۱- مقدمه

پوشش‌های متالیک به دلیل جذابیت بصری و بافتار چشم‌نواز، در صنایعی مانند خودروسازی، لوازم آرایشی، جوهرها، کفپوش‌ها، منسوجات و دکوراسیون کاربرد گسترده‌ای دارند. ویژگی‌های ظاهری این پوشش‌ها به شدت وابسته به هندسه‌ی تابش/مشاهده است و تغییر در زاویه مشاهده و یا منبع نوری موجب تغییرات ظاهری این پوشش‌ها شده و بر رنگ و بافتار آن‌ها تأثیر قابل توجهی می‌گذارد.

مقاله پذیرفته شده

(۳-۱). مطالعات اولیه در زمینه ظاهر این پوشش‌ها توسط مک‌کمی^۱ انجام شد. او ویژگی‌های ظاهری این پوشش‌ها را به دو دسته ماکرو (قابل مشاهده از چند متری) و میکرو (قابل مشاهده در فواصل نزدیک) تقسیم کرد و بافتار را به عنوان عامل کلیدی در جلوه ظاهری این پوشش‌ها معرفی کرد (۴، ۵). مطابق استاندارد ASTM E284، بافتار به‌عنوان «ساختار سطحی قابل مشاهده که به اندازه و سازماندهی اجزای کوچک وابسته است» تعریف می‌شود (۶). به طور کلی، بافتار به دو نوع فیزیکی و بصری تقسیم می‌شود: بافتار فیزیکی که به پستی و بلندی سطح مربوط است و به صورت زبری احساس می‌شود، و بافتار بصری که ناشی از تغییرات در سه بُعد رنگ و یا شدت آن‌ها است و شامل ویژگی‌هایی مانند درخشندگی نسبی،^۲ ظرافت،^۳ ابلقی شدن^۴ و... می‌باشد (۷).

در سال ۲۰۰۷، کرشنر^۵ و همکاران دو ویژگی «رخشه» و «دانه‌ای شدن» را به عنوان مؤلفه‌های اصلی بافتار بصری پوشش‌های متالیک معرفی کردند. رخشه، به شکل نقاط نورانی کوچکی ظاهر می‌شود که در یک پس‌زمینه‌ی تیره توزیع شده‌اند و به طرز چشمگیری از اطراف خود روشن‌تر هستند. این ویژگی وابستگی زیادی به زاویه‌ی مشاهده و شرایط نوری دارد و فقط در روشنایی شدید و تک‌جهتی مشاهده می‌شود (۷-۱۰). با تغییر منبع نوری از حالت تک‌جهتی به نور پراکنده، این نقاط درخشان کاهش یافته و در شرایط نوری کاملاً پراکنده، به کلی ناپدید می‌شوند و مؤلفه دوم بافتار بصری که به دانه‌ای شدن یا زبری پراکنده^۶ معروف است، ظاهر می‌شود (۷). مطابق با استاندارد ASTM E284-13b، دانه‌ای شدن به عنوان تباین روشنی و تاریکی تعریف می‌شود که زمانی که نمونه‌ی متالیک تحت نور پراکنده قرار می‌گیرد، الگوی نامنظمی از روشنایی و تاریکی ایجاد می‌کند (۱۱). دانه‌ای شدن معمولاً مستقل از زاویه مشاهده بوده و تنها در فواصل نزدیک به سطح نمونه قابل مشاهده است (۱۲، ۱۳). این ویژگی به عوامل فیزیکی از جمله اندازه، جهت‌گیری و غلظت رنگدانه‌های متالیک وابسته است. مطالعات نشان داده‌اند که رنگدانه‌های بزرگ‌تر باعث افزایش دانه‌ای شدن می‌شوند، درحالی‌که افزایش غلظت رنگدانه‌ها این ویژگی را کاهش می‌دهد (۱۲-۱۴).

با توجه به اهمیت ویژگی‌های بافتاری در پوشش‌های متالیک، کمی‌سازی آن‌ها جهت کنترل کیفیت و بهینه‌سازی فرمولاسیون ضروری است. در حال حاضر روش‌های بصری و دستگاهی مختلفی برای اندازه‌گیری دانه‌ای شدن وجود دارد. ابزارهای صنعتی مانند گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i و MA-T12 با بررسی طیفی و آنالیز تصویر، شاخص‌های بافتاری مانند دانه‌ای شدن و رخشه را تعیین می‌کنند (۱۱، ۱۲، ۱۵). با این حال، به دلیل نبود استاندارد واحد، نتایج این ابزارها بسته به شرایط آزمایش ممکن است متغیر باشد (۱۶). یکی از چالش‌های کلیدی در این زمینه، میزان همبستگی میان نتایج دستگاهی و ادراک بصری انسان است. در این راستا مطالعات متعددی مدل‌هایی جهت تبدیل نتایج دستگاهی حاصل از گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i به شاخص‌های بصری ارائه داده‌اند. نتایج بدست آمده از این مطالعات بیانگر همبستگی بالای (در حدود ۰/۹) میان نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های این دستگاه و ارزیابی‌های بصری می‌باشد (۱۲، ۱۷).

در سال‌های اخیر روش‌های پردازش تصویر به عنوان ابزارهای مؤثر برای پیش‌بینی و کمی‌سازی دانه‌ای شدن پوشش‌های متالیک مطرح شده‌اند. کیتاگوچی^۹ و همکاران نخستین مدل کمی‌سازی دانه‌ای شدن را بر اساس انرژی فوری در کانال روشنایی تصویر و توابع حساسیت تباین ارائه دادند (۱۸). دیگر^{۱۰} و همکاران با تحلیل ارزیابی‌های بصری و نتایج دستگاهی، مدلی برای تخمین اختلاف ظاهر کلی پیشنهاد کردند (۹). فررو^{۱۱} و همکاران با استفاده از تبدیل فوری، چگالی طیفی توان فوری را به عنوان واریانس دانه‌ای

^۱ McCamy

^۲ Brilliance

^۳ fineness

^۴ Mottling

^۵ Kirchner

^۶ Sparkle

^۷ Graininess

^۸ Diffuse Coarseness

^۹ Kitaguchi

^{۱۰} Dekker

^{۱۱} Ferrero

مقاله پذیرفته شده

شدن معرفی کردند و بر این اساس مدلی را جهت کمی سازی ویژگی دانه های شدن معرفی کردند (۱۶). آن ها در پژوهشی دیگر، مدل اولیه را با داده های اسپکتروفوتومترها بهینه سازی کردند که منجر به همبستگی بالاتری با نتایج بصری شد (۱۹). در ادامه، فیلیپ^{۱۲} و همکاران همبستگی نتایج گونیواسپکتروفوتومترها، ارزیابی های بصری و مدل بهبودیافته ی فرو را بررسی کردند. آن ها دریافتند که مدل ارائه شده در برخی نمونه ها عملکرد مطلوبی ندارد (۲۰). آموخت و همکاران با بررسی روش های مختلف تحلیل بافتار، نشان دادند که تابع خودهمبستگی و تبدیل موجک، مؤثرترین ابزارها برای کمی سازی دانه های شدن هستند (۲۱). در مطالعه ای دیگر، آن ها تأثیر اندازه ی پرک های رنگدانه ای بر بافتار پوشش های متالیک را بررسی کردند و دریافتند که تغییر رنگ و اندازه ی ذرات تأثیر مستقیمی بر بافتار بصری دارد. همچنین، میان اختلاف بافتار (حاصل از تابع خودهمبستگی و بعد فرکتال) و اختلاف رنگ ادراکی همبستگی بالایی مشاهده کردند (۲۲). آن ها در پژوهش دیگری نیز نشان دادند که شاخص فلاپ به شدت با اندازه ی رنگدانه ها مرتبط است و همبستگی بالایی با گرادیان فرکانس لبه دارد (۲۳).

با وجود پیشرفت های صورت گرفته در کمی سازی دانه های شدن، چالش هایی مانند هزینه ی بالا و دسترسی محدود به دستگاه های اندازه گیری، نیاز به روش های مقرون به صرفه را افزایش داده است. در این پژوهش، رویکردی جدید مبتنی بر پردازش تصویر معرفی می شود که با استفاده از سیستم های تصویربرداری ارزان قیمت مانند اسکنر، دانه های شدن پوشش های متالیک را با دقت بالا و همبستگی مناسب با نتایج دستگاهی اندازه گیری می کند. این روش نه تنها هزینه ی تجهیزات را کاهش می دهد، بلکه امکان به کارگیری آن در محیط های صنعتی و آزمایشگاهی را نیز تسهیل می کند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- آماده سازی نمونه ها

در این پژوهش، نمونه های پوشش متالیک با هدف ایجاد دامنه ی متنوعی از بافتارهای دانه ای طراحی و تهیه شدند، به گونه ای که امکان تمایز در ویژگی دانه ای شدن پوشش فراهم گردد. برای این منظور، در مرحله ی مقدماتی، نسبت های مختلفی از رنگدانه متالیک به فام پایه مورد آزمایش قرار گرفت و بر اساس نتایج حاصل، دو نسبت ۳۰٪ و ۵۰٪ به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند تا تمایز مناسبی بین شدت دانه ای شدن در نمونه ها حاصل شود. انتخاب نوع و اندازه رنگدانه ها نیز به صورت هدفمند و با تمرکز بر ایجاد تنوع ساختاری صورت گرفت. شش نوع خمیر آلومینیوم با اشکال و اندازه های متفاوت (cornflake و silver dollar در اندازه های ریز، متوسط و درشت) انتخاب شدند تا طیف متنوع و کنترل شده ای از بافتارها به دست آید. جدول ۱ مشخصات خمیرهای آلومینیوم غیربالاگرا مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات خمیرهای آلومینیوم.

Table 1: Specifications of Aluminum pastes.

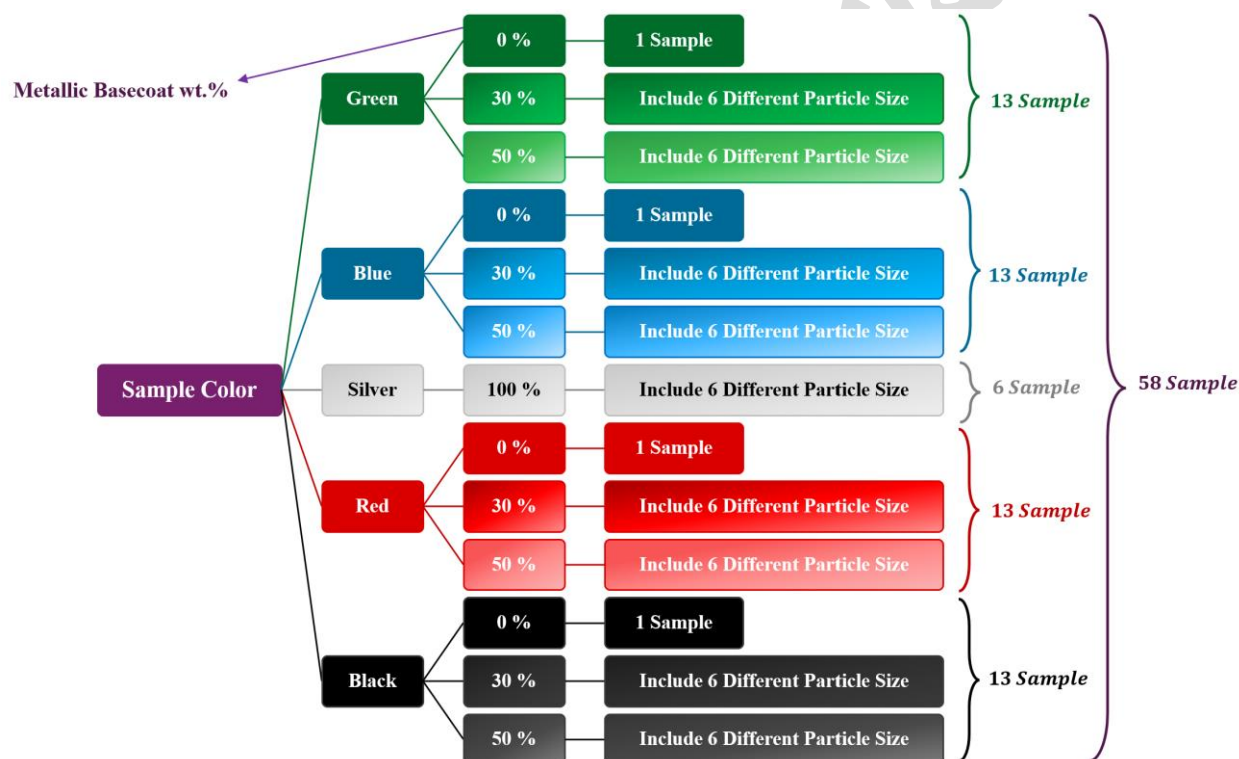
Number	Sample Name	Size (D50)	Shape	Effect
1	S10 – E	10 μm	Silver Dollar	Fine
2	S20 – E	20 μm	Silver Dollar	Coarse
3	C25 – E	25 μm	Cornflake	Coarse
4	S28 – E	28 μm	Silver Dollar	Very Coarse
5	C34 – E	34 μm	Cornflake	Very Coarse
6	C54 – H	54 μm	Cornflake	Very Coarse

^{۱۲}Filip

مقاله پذیرفته شده

با استفاده از این خمیرها، شش بن پوشه متالیک با فرمولاسیون یکسان تهیه شد، به گونه‌ای که هر بن پوشه شامل تنها یک نوع رنگدانه آلومینیومی با غلظت ثابت ۵٪ وزنی بود. سپس این بن پوشه‌های متالیک، یکبار به صورت خالص (۱۰۰٪) برای تهیه نمونه‌های نقره‌ای و بار دیگر با نسبت‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ با چهار بن پوشه رنگی (قرمز، سبز، آبی و مشکی) ترکیب شدند. در نهایت، بن پوشه‌های حاصل به روش پاشش روی صفحات فولادی با ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی‌متر، دارای لایه‌های فسفات، الکتروپوشانش و آستر سفید رنگ، اعمال شدند. فرآیند نمونه‌سازی برای نمونه‌های هر دسته از فام‌ها در یک نوبت پیوسته و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شد تا از یکنواختی و تکرارپذیری نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. با توجه به هدف اصلی این پژوهش که ارزیابی الگوریتم در شرایط واقعی و بدون نیاز به ایده‌آل‌سازی کامل است، حفظ تنوع طبیعی میان نمونه‌ها در کنار کنترل کیفیت فرآیند، منطق اصلی طراحی مجموعه داده را تشکیل داده است.

در مجموع ۵۸ نمونه جهت ارزیابی در این پژوهش، تهیه شد. پنج مجموعه نمونه با فام‌های قرمز، سبز، آبی، مشکی و نقره‌ای تهیه شد. مجموعه‌های رنگی (به جز فام نقره‌ای) شامل سه دسته پوشش بودند: پوشش‌های متالیک حاوی ۵۰٪ و ۳۰٪ بن پوشه‌ی متالیک و یک نمونه پوشش معمولی بدون رنگدانه متالیک. نمونه‌های نقره‌ای نیز حاوی ۱۰۰٪ بن پوشه متالیک بودند (نمودار درختی مربوط به نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ آورده شده است).



شکل ۱: نمودار درختی نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش.

Figure 1: A tree diagram of samples utilized in this study.

۲-۲- اندازه‌گیری دانه‌ای شدن به روش دستگاهی

اندازه‌گیری دانه‌ای شدن نمونه‌ها با استفاده از دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i تحت منبع نوری شبیه‌ساز CIED65 با نور پراکنده و شدت کم انجام شد. نمونه‌ها در زاویه‌ی تابش ۴۵° و زاویه‌ی تصویربرداری ۰° (صفر درجه) نسبت به نرمال سطح، اندازه‌گیری شدند. برای افزایش قابلیت اطمینان نتایج، از هر نمونه در سه نقطه‌ی متفاوت اندازه‌گیری صورت گرفت و داده‌ها به صورت میانگین تحلیل شدند.

۲-۳- تهیه‌ی تصاویر نمونه‌ها

تصاویر نمونه‌ها با استفاده از اسکنر EPSON Perfection V550 که دارای لامپ فلئورسنت کاتدی سفید است، ثبت شدند. تصاویر در حالت ۲۴ بیت و در رزولوشن‌های ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ dpi اسکن و با فرمت TIFF ذخیره شدند. برای انتخاب بهترین رزولوشن، همبستگی نتایج ویژگی‌های حاصل از روش‌های مختلف تحلیل بافتار با نتایج دستگاه BYK-mac-i در رزولوشن‌های گوناگون بررسی شد. در نهایت، رزولوشن ۳۰۰ dpi با بالاترین میزان همبستگی، به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب گردید.

۲-۴- پیش‌پردازش تصاویر

برای بهبود کیفیت تصاویر و کاهش نویزهای احتمالی، چندین مرحله پیش‌پردازش بر روی تصاویر انجام شد:

(۱) **حذف نویز با فیلتر میانگین غیرمحلی^۱**: از تابع `imnlmfilt` برای اعمال فیلتر میانگین غیرمحلی استفاده شد. پارامترهای این فیلتر شامل درجه هموارسازی (`DegreeOfSmoothing = 11.5`)، اندازه پنجره جستجو (`SearchWindowSize = 21`)، و اندازه پنجره مقایسه (`ComparisonWindowSize = 5`) بودند. درجه هموارسازی به‌صورت تجربی تنظیم شد تا تعادل مناسبی بین حذف نویز و حفظ جزئیات لبه‌ها ایجاد شود. این روش با اختصاص وزن‌های بیشتر به پیکسل‌های مشابه در ناحیه جستجو، نویز را کاهش داده و لبه‌ها و جزئیات بافتاری را حفظ می‌کند (۲۴).

(۲) **کاهش بیشتر نویز با فیلتر میانه سه‌بعدی**: برای کاهش نویزهای باقی‌مانده، از تابع `medfilt3` با همسایگی [۳، ۳، ۹] استفاده شد. این ابعاد به‌ترتیب نشان‌دهنده ارتفاع، عرض، و عمق ناحیه همسایگی هستند. انتخاب این ابعاد بر اساس تحلیل تجربی انجام شد تا نویزهای ناگهانی (مانند نویز نمک و فلفل) حذف شوند، در حالی که ساختارهای بافتاری تصویر حفظ شوند. این فیلتر یک روش پردازش غیرخطی سیگنال است که مقدار میانه‌ی پیکسل‌های یک ناحیه را جایگزین مقدار پیکسل مرکزی آن ناحیه می‌کند. به این ترتیب، اثر نویزهای ناگهانی کاهش یافته و تصویر هموارتر می‌شود (۲۵، ۲۶).

(۳) **برجسته‌سازی لبه‌ها با فیلتر سه‌بعدی Sobel**: در نهایت، برای برجسته‌سازی لبه‌ها، از فیلتر `Sobel` سه‌بعدی در جهت x استفاده شد. این فیلتر با استفاده از تابع `fspecial3('sobel', 'x')` تولید شد که یک هسته $3 \times 3 \times 3$ را ایجاد می‌کند. سپس، با استفاده از تابع `imfilter` و تنظیمات مرزی `'replicate'` و حالت خروجی `'same'`، فیلتر روی تصویر اعمال می‌گردد. این فرآیند گرادیان شدت تصویر را در جهت x محاسبه کرده و لبه‌های افقی را برجسته می‌کند. لبه‌های تصویر در نقاطی رخ می‌دهند که ناپیوستگی یا تغییرات شدید در گرادیان شدت تصویر مشاهده شود. بنابراین در این روش، با محاسبه مشتق شدت در سراسر تصویر و شناسایی نقاطی که در آن‌ها مشتق بیشترین مقدار را دارد، لبه‌های تصویر مشخص می‌گردند این فرآیند موجب تفکیک بهتر الگوهای بافتاری می‌شود (۲۷). هیچ آستانه‌گذاری مستقیمی روی خروجی `Sobel` اعمال نشد، زیرا گرادیان‌ها مستقیماً برای تحلیل بافتار استفاده شدند.

پس از انجام مراحل پیش‌پردازش، تصاویر RGB به تصاویر سطح خاکستری تبدیل شدند و در ادامه روش‌های مختلف تحلیل بافتار، جهت آنالیز تصاویر و استخراج ویژگی‌های بافتار استفاده شد. تمامی مراحل محاسبات پیش‌پردازش تصویر و تحلیل بافتار در محیط نرم‌افزار MATLAB R2022b انجام شد.

۲-۵- تحلیل بافتار

تحلیل بافتار یکی از روش‌های ریاضی است که با بررسی تغییرات مکانی یک تصویر، اطلاعات ارزشمندی از ساختار آن استخراج می‌کند. در این پژوهش، برای تحلیل بافتار تصاویر اسکن‌شده‌ی نمونه‌های متالیک، از روش‌های مبتنی بر حوزه‌ی فرکانس و حوزه‌ی مکانی استفاده شد. در حوزه‌ی فرکانس، تبدیل فوریه^۴ و تبدیل موجک^۵ به‌کار گرفته شدند، در حالی که در حوزه‌ی مکانی، از

^۱Non-Local Means (NLM)

^۲Fourier Transform

^۳Wavelet Transform

مقاله پذیرفته شده

روش‌های ماتریس هم‌وقوعی^۷ و فرکانس لبه وابسته به فاصله^۸ برای استخراج ویژگی دانه‌ای شدن بهره گرفته شد. لازم به ذکر است که برای تحلیل بافتار تصاویر، از تصویر کامل هر نمونه استفاده شده است؛ از آنجایی که در این روش تصویر کل پوشش تحلیل می‌شود، نتایج تحلیل‌های بافتاری به‌طور کامل تکرارپذیر هستند و اجرای مکرر الگوریتم‌های پردازش تصویر بر یک تصویر ثابت، منجر به نتایج کاملاً یکسان می‌گردد.

۲-۵-۱- تبدیل فوریه

روش تبدیل فوریه یکی از بنیادی‌ترین روش‌های پردازش تصویر در حوزه‌ی فرکانس فضایی است که از توابع سینوسی و کسینوسی برای انتقال تصویر از حوزه‌ی مکانی با مختصات $f(x, y)$ به حوزه‌ی فرکانس فضایی با مختصات $F(u, v)$ استفاده می‌کند. تبدیل فوریه دو بعدی برای یک تصویر با معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$F(u, v) = \frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} f(x, y) e^{-2\pi i \left(\frac{xu}{X} + \frac{yv}{Y} \right)} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱) پارامترهای u و v فرکانس‌های فضایی، x و y مختصات مکانی پیکسل‌های تصویر و X و Y ابعاد تصویر را برحسب تعداد پیکسل‌های موجود در هر بُعد نشان می‌دهند (۲۸). دامنه طیف و زاویه‌ی فاز مربوط به تبدیل فوریه تصویر به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) قابل محاسبه است:

$$|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{1/2} \quad (2)$$

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \left(\frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right) \quad (3)$$

در روابط فوق $I(u, v)$ و $R(u, v)$ به ترتیب قسمت‌های موهومی و حقیقی تبدیل فوریه را نشان می‌دهند (۲۹). یکی از روش‌های رایج تفسیر اطلاعات موجود در حوزه فرکانس، استفاده از تابع چگالی طیفی توان^۹ است. چگالی طیفی توان، توزیع مقادیر توان را به عنوان تابعی از فرکانس نشان می‌دهد و بیانگر توان یک سیگنال در یک فرکانس مشخص است (۳۰). این تابع از معادله (۴) بدست می‌آید:

$$PSD(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v) \quad (4)$$

مطالعات نشان داده است که چگالی طیفی توان به تباین شدت روشنایی در یک تصویر مربوط است (۱۴، ۱۹) و می‌تواند معیار مناسبی از میزان دانه‌ای شدن بافتار پوشش‌های متالیک باشد. علاوه بر چگالی طیفی توان، میانگین دامنه طیف فوریه نیز می‌تواند بیانگر ویژگی‌های مربوط به بافتار تصویر باشد. در این پژوهش نیز به منظور کمی‌سازی دانه‌ای شدن بافتار پوشش‌های متالیک با استفاده از روش تبدیل فوریه، ابتدا جهت حذف جزء جریان مستقیم، مقدار میانگین از مقدار هر پیکسل تصویر کم شد. در مرحله‌ی بعد تبدیل فوریه بر روی تصاویر بدون جریان مستقیم اعمال شد و ویژگی‌های میانگین دامنه‌ی طیف فوریه و چگالی طیفی توان به عنوان معیاری از دانه‌ای شدن بافتار، محاسبه شدند.

۲-۵-۲- تبدیل موجک

تابع تبدیل موجک گسسته برای یک تصویر از حوزه‌ی مکان $F(x, y)$ به حوزه‌ی مکان-فرکانس، به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

$$W_{\psi}^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j,m,n}^i(x, y) \quad (5)$$

$$i = \{H, V, D\}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, J-1, \quad m = n = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$$

^۷Co-Occurrence Matrix (COM)

^۸Distance-Dependent Edge Frequency

^۹Power Spectral Density (PSD)

در رابطه‌ی فوق $f(x, y)$ بیانگر تصویر اولیه در حوزه‌ی مکان، $\psi_{j,m,n}^i(x, y)$ تابع موجک پایه و $W_{\psi}^i(j, m, n)$ ضرایبی هستند که جزئیات استخراج شده از تصویر را در جهت‌های افقی، عمودی و قطری تصویر نشان می‌دهند. اندیس‌های i و j نیز به ترتیب جهت موجک‌ها و مقیاسی از تصویر را که موجک بر روی آن اعمال شده است، نشان می‌دهند (۳۱).

هر موجک با یک فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر مطابقت دارد که با اعمال فیلترهای موجک بر روی سیگنال تصویر اصلی، آن را به تصاویر فرعی تقسیم می‌کند که هر یک شامل جزئیات خاصی از سیگنال اصلی هستند (۳۲). برای گسترش تبدیل موجک به دو بعد، باید موجک در دو جهت افقی و عمودی بر روی تصویر اصلی اعمال شود و آن را فیلتر کند. این کار به صورت متوالی در امتداد جهت افقی و عمودی انجام می‌شود و در نتیجه چهار تصویر فرعی ایجاد می‌شود. تصویر فرعی پایین‌گذر $W_{\psi}(j, m, n)$ که تقریبی از تصویر اصلی است و تصاویر فرعی بالاگذر $W_{\psi}^H(j, m, n)$ ، $W_{\psi}^V(j, m, n)$ و $W_{\psi}^D(j, m, n)$ که به ترتیب جزئیات تصویر را در فرکانس‌های افقی، عمودی و قطری نشان می‌دهند (۲۹). سپس تجزیه و تحلیل بر روی این بخش‌ها به صورت جداگانه انجام می‌شود. نشان داده شده است که تصاویر دارای بافتار، انرژی موجک بالایی در فرکانس‌های متوسط و پایین دارند. توصیفگر انرژی هر تصویر فرعی را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۶) محاسبه کرد.

$$C_n = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |W(x, y)| \quad (6)$$

در این رابطه M و N ابعاد تصویر فرعی هستند که عموماً با یکدیگر برابرند و $W(x, y)$ نیز ضریب موجک مربوط به آن است (۳۲). در این پژوهش از تابع موجک هار^۱ به عنوان تابع پایه‌ی تبدیل موجک استفاده شد. همچنین پس از بررسی تعداد سطوح تجزیه مختلف، در نهایت تعداد ۶ سطح تجزیه به عنوان تعداد سطوح بهینه انتخاب شد و و مقادیر انرژی موجک، برای چهار کانال افقی، عمودی، قطری و تقریب، به عنوان معیاری از دانه‌ای شدن بافتار محاسبه شد.

۲-۵-۳- ماتریس هم‌وقوعی

ماتریس هم‌وقوعی یکی از متداول‌ترین روش‌های توصیف بافتار یک تصویر در حوزه‌ی مکان است. این روش بافتار تصویر با استفاده از آمار مرتبه‌ی دوم و ارتباط فضایی میان پیکسل‌ها اندازه‌گیری می‌شود. ماتریس هم‌وقوعی $P_{d\theta}(i, j)$ ماتریسی مربعی است که ابعاد آن برابر با تعداد سطوح شدت روشنایی موجود در تصویر می‌باشد. هر درایه از این ماتریس تعداد دفعاتی را نشان می‌دهد که دو پیکسل با شدت‌های روشنایی i و j در فاصله‌ی d و در امتداد جهت θ از یکدیگر قرار گرفته‌اند. فاصله‌ی d بر حسب پیکسل بیان می‌شود و جهت θ می‌تواند 0° ، 45° ، 90° یا 135° باشد (۳۳-۳۵).

هارالیک^۲ چهارده ویژگی بافتاری را که از ماتریس هم‌وقوعی اندازه‌گیری می‌شوند برای استخراج ویژگی‌های آماری بافتار تصاویر تعریف کرده است که از میان آن‌ها چهار ویژگی انرژی^۳، همگنی^۴، همبستگی^۵ و تباین^۶ گاربرد بیشتری دارند (۳۵).

- انرژی معیاری از یکنواختی اعضای ماتریس هم‌وقوعی است. اگر توزیع مقادیر در ماتریس هم‌وقوعی بسیار متمرکز و یکنواخت باشد، انرژی مقدار بالایی خواهد داشت. این ویژگی با استفاده از رابطه‌ی (۷) بدست می‌آید (۳۴):

$$Energy = \sum_i \sum_j P(i, j)^2 \quad (7)$$

- همگنی معیاری از مشابهت پیکسل‌های همجوار در تصویر است و به عبارتی بیانگر میزان یکنواختی سطوح روشنایی در تصویر است. همگنی با استفاده از رابطه‌ی (۸) بدست می‌آید (۳۴):

$$Homogeneity = \sum_i \sum_j \frac{P(i, j)}{1 + (i - j)^2} \quad (8)$$

^۱Haar

^۲Haralick

^۳Energy

^۴Homogeneity

^۵Correlation

^۶Contrast

- همبستگی میزان رابطه بین دو پیکسل را توصیف می‌کند و نشان‌دهنده میزان تغییر هماهنگ بین مقادیر پیکسل‌های همجوار است. همبستگی بالا نشان‌دهنده وابستگی شدید بین دو پیکسل و جهت‌دار بودن بافتار است و از رابطه (۹) قابل محاسبه است (۳۴):

$$Correlation = \sum_i \sum_j \frac{(i - \mu_x)(j - \mu_y) P(i, j)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (9)$$

در رابطه فوق μ_x و μ_y به ترتیب مقادیر میانگین سطرها و ستون‌های ماتریس هم‌وقوعی هستند. پارامترهای σ_x و σ_y نیز به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر انحراف معیار سطرها و ستون‌های ماتریس هم‌وقوعی می‌باشند.

- تباین معیاری است که درجه تغییر شدت روشنایی پیکسل‌های مختلف در یک تصویر را توصیف می‌کند. تباین بالا به این معنی است که تغییرات زیادی در شدت روشنایی پیکسل وجود دارد و بالعکس. تباین را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه کرد (۳۴):

$$Contrast = \sum_i \sum_j (i - j)^2 P(i, j) \quad (10)$$

در پژوهش حاضر، جهت تشکیل ماتریس هم‌وقوعی، پس از بررسی جهات و فواصل همسایگی مختلف، فاصله‌ی همسایگی $d = 15$ پیکسل و جهت $\theta = 0^\circ$ به عنوان بهترین همسایگی انتخاب شد و ویژگی‌های معرفی شده جهت ارزیابی بافتار محاسبه شدند.

۲-۵-۴- فرکانس لبه وابسته به فاصله

فرکانس لبه وابسته به فاصله یکی از این روش‌هایی است که بر اساس تعداد لبه‌ها در واحد سطح، بافتار یک تصویر را ارزیابی می‌کند. در این روش فرض می‌شود که گرادیان روشنایی میان پیکسل‌های مختلف، تابعی از فاصله بین پیکسل‌ها است و با استفاده از میانگین گرادیان روشنایی یک پیکسل مرجع با چهار پیکسل مجاور موجود در تصویر، لبه‌ها را شناسایی می‌کند. بنابراین میانگین گرادیان روشنایی برای یک پیکسل مرجع با شدت روشنایی $I(i, j)$ و چهار همسایگی مجاور به فاصله d ، با استفاده از رابطه (۱۱) بدست می‌آید:

$$g(d) = (\sum_{i,j} |I(i, j) - I(i + d, j)| + |I(i, j) - I(i - d, j)| + |I(i, j) - I(i, j + d)| + |I(i, j) - I(i, j - d)|) / (i \times j) \quad (11)$$

این روش اطلاعات بسیار مفیدی درباره‌ی ویژگی‌های بافتار یک تصویر ارائه می‌کند و به عنوان معیاری برای درستی (بزرگ بودن) یا پیچیدگی بافتار استفاده می‌شود (۳۶). هر چقدر میانگین گرادیان روشنایی بدست آمده در فواصل کوچکتر، بیشتر باشد، نشان‌دهنده پیچیدگی بافتار و نایک‌نواختی‌های تصویر در فواصل کمتر است؛ به عبارتی دیگر بافتار تصویر ریزتر است (۳۷). در این مطالعه جهت کمی‌سازی دانه‌ای شدن بافتار، میانگین گرادیان لبه‌ها نیز در فواصل همسایگی مختلف ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ پیکسل، محاسبه گردید.

۲-۶- محدودیت‌ها و ملاحظات روش‌ها

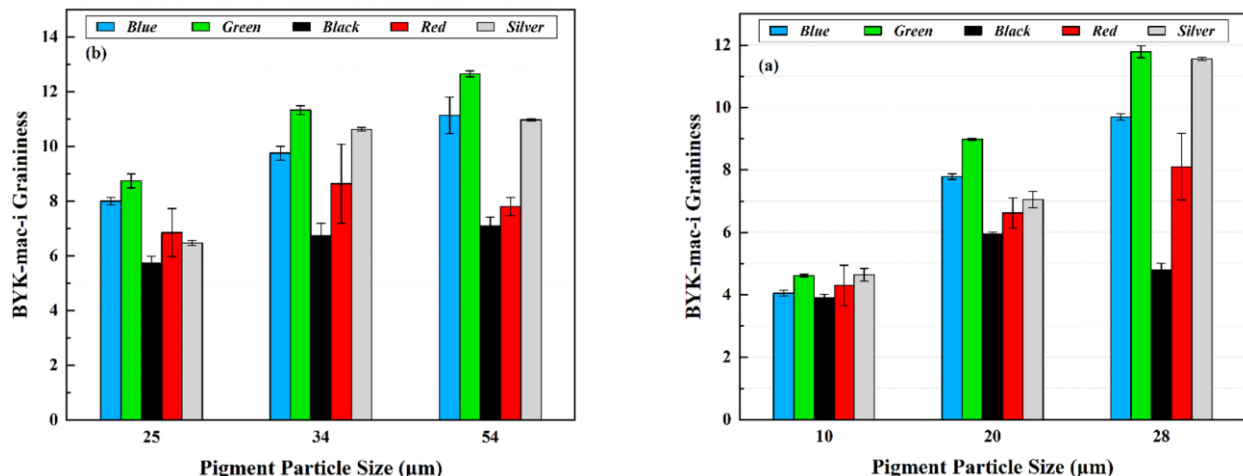
علی‌رغم دقت بالای برخی روش‌های تحلیل بافتار در پیش‌بینی داده‌های دستگاهی، در کاربردهای عملی باید به محدودیت‌ها و حساسیت‌های هر روش نیز توجه داشت. روش تبدیل فوریه نسبت به نویزهای محلی حساس بوده و صرفاً اطلاعات کلی فرکانسی بدون تفکیک مکانی فراهم می‌سازد. تبدیل موجک، در حالی که تحلیل هم‌زمان مکان و فرکانس را امکان‌پذیر می‌سازد، به شدت به انتخاب تابع پایه و تعداد سطوح تجزیه وابسته است. در روش ماتریس هم‌وقوع (GLCM)، تنظیم پارامترهایی مانند فاصله و جهت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نتایج داشته باشد و در بافتارهای غیرهمگن، پایداری روش کاهش یابد. همچنین روش فرکانس لبه وابسته به فاصله، به نویز و تباین تصویر حساس بوده و ممکن است در تصاویر با بافتار یکنواخت یا کم‌تفاوت عملکرد ضعیف‌تری ارائه دهد.

در مجموع، انتخاب روش مناسب باید با توجه به ویژگی‌های پوشش، کیفیت تصاویر، و هدف نهایی تحلیل صورت گیرد.

۳- بحث و نتایج

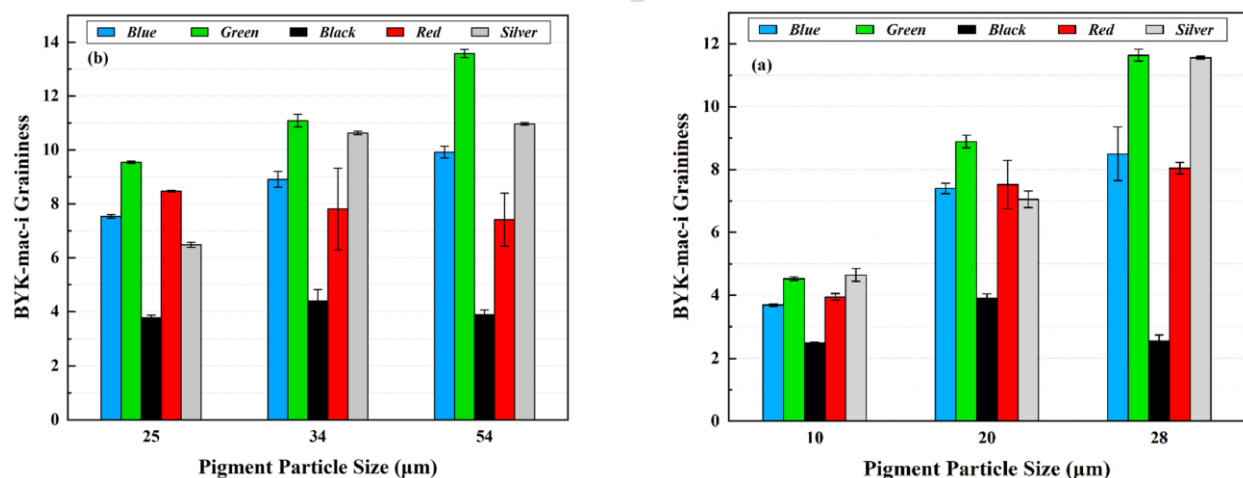
۳-۱- دانه‌ای شدن بافتار اندازه‌گیری شده با دستگاه گونیواسپکتروفتومتر BYK-mac-i

نتایج دانه‌ای شدن بافتار پوشش‌های متالیک بدست آمده از دستگاه گونیواسپکتروفتومتر BYK-mac-i برای پوشش‌های متالیک نقره‌ای و پوشش‌های متالیک رنگی حاوی ۵۰٪ و ۳۰٪ بن‌پوشه متالیک، در فام‌ها و اندازه ذرات مختلف، به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۲: نمودار میله‌ای نتایج BYK-mac-i برای پوشش‌های حاوی ۵۰٪ بن‌پوشه متالیک با رنگدانه‌های، (a) سکه نقره‌ای و (b) پرک ذرت.

Figure 2: BYK-mac-i Graininess bar chart for coatings with 50% metallic basecoat, a) Silver dollar, and b) cornflake shape.



شکل ۳: نمودار میله‌ای نتایج BYK-mac-i برای پوشش‌های حاوی ۳۰٪ بن‌پوشه متالیک با رنگدانه‌های، (a) سکه نقره‌ای و (b) پرک ذرت.

Figure 3: BYK-mac-i Graininess bar chart for coatings with 30% metallic basecoat, a) Silver dollar, and b) cornflake shape.

مقایسه‌ی دانه‌ای شدن در پوشش‌های متالیک با فام‌های مختلف نشان می‌دهد که مقدار این ویژگی در پوشش‌های سبز بیش از سایر فام‌هاست. از سوی دیگر، پوشش‌های متالیک قرمز، آبی و نقره‌ای مقادیر دانه‌ای شدن مشابهی دارند، درحالی‌که در پوشش‌های مشکی، دانه‌ای شدن به‌طور قابل توجهی کمتر است. دلیل این کاهش آن است که رنگدانه‌های مشکی برخلاف سایر رنگدانه‌های جذبی که تنها بخشی از طیف مرئی را جذب می‌کنند، تمامی طول موج‌های نور مرئی را جذب می‌نمایند. این جذب گسترده باعث می‌شود که حتی نور بازتابی از سطح رنگدانه‌های متالیک نیز، بر اثر برخورد با رنگدانه‌های جذبی موجود در اطراف خود تا حد زیادی جذب شده و مانع از بازتاب نور از سطح رنگدانه متالیک می‌شوند. در نتیجه، میزان دانه‌ای شدن بافتار در حضور رنگدانه‌های مشکی به‌طور محسوسی

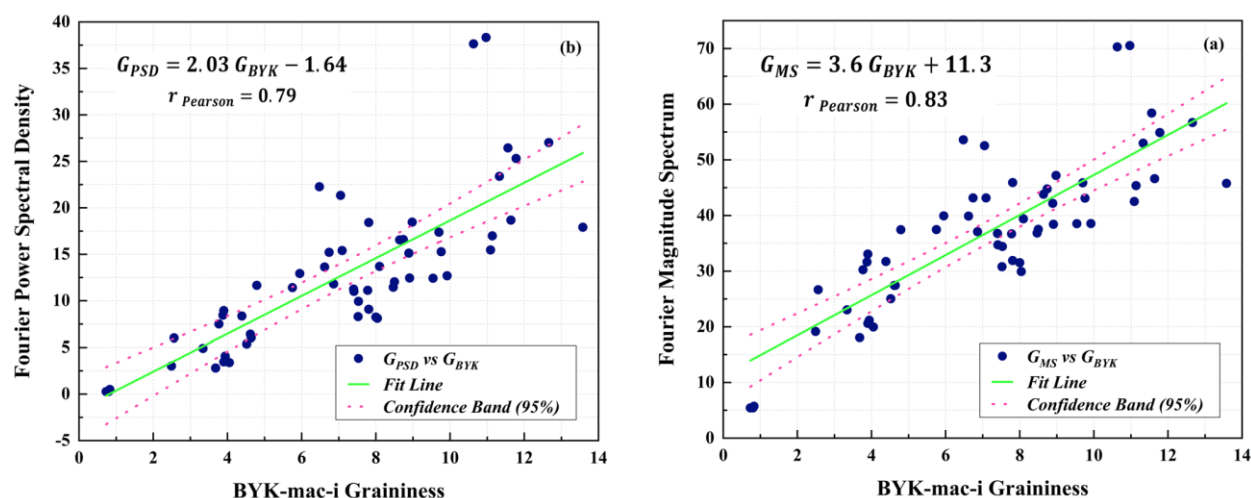
کاهش پیدا می کند.

۳-۲- نتایج تحلیل بافتار

پس از کمی سازی دانه های شدن بافتار پوشش های متالیک با استفاده از روش های مختلف تحلیل بافتار، نتایج آن ها با نتایج گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i مقایسه شد و میزان همبستگی آن ها با یکدیگر، به عنوان معیاری از عملکرد روش محاسبه گردید.

۳-۲-۱- تبدیل فوریه

به منظور کمی سازی دانه های شدن بافتار پوشش های متالیک با استفاده از روش تبدیل فوریه، ویژگی های میانگین دامنه طیف و چگالی طیفی توان، از سیگنال فوریه تصاویر استخراج شدند. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی میان این ویژگی ها و مقادیر دانه های شدن بدست آمده از دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i در قسمت های a و b شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: پراکندگی میان دانه های شدن بافتار کمی شده با تبدیل فوریه و نتایج BYK-mac-i، (a) میانگین دامنه طیف و (b) چگالی طیفی توان.

Figure 4: Fourier transform extracted texture graininess versus BYK-mac-i graininess, a) Magnitude Spectrum Mean, and b) Power Spectral Density.

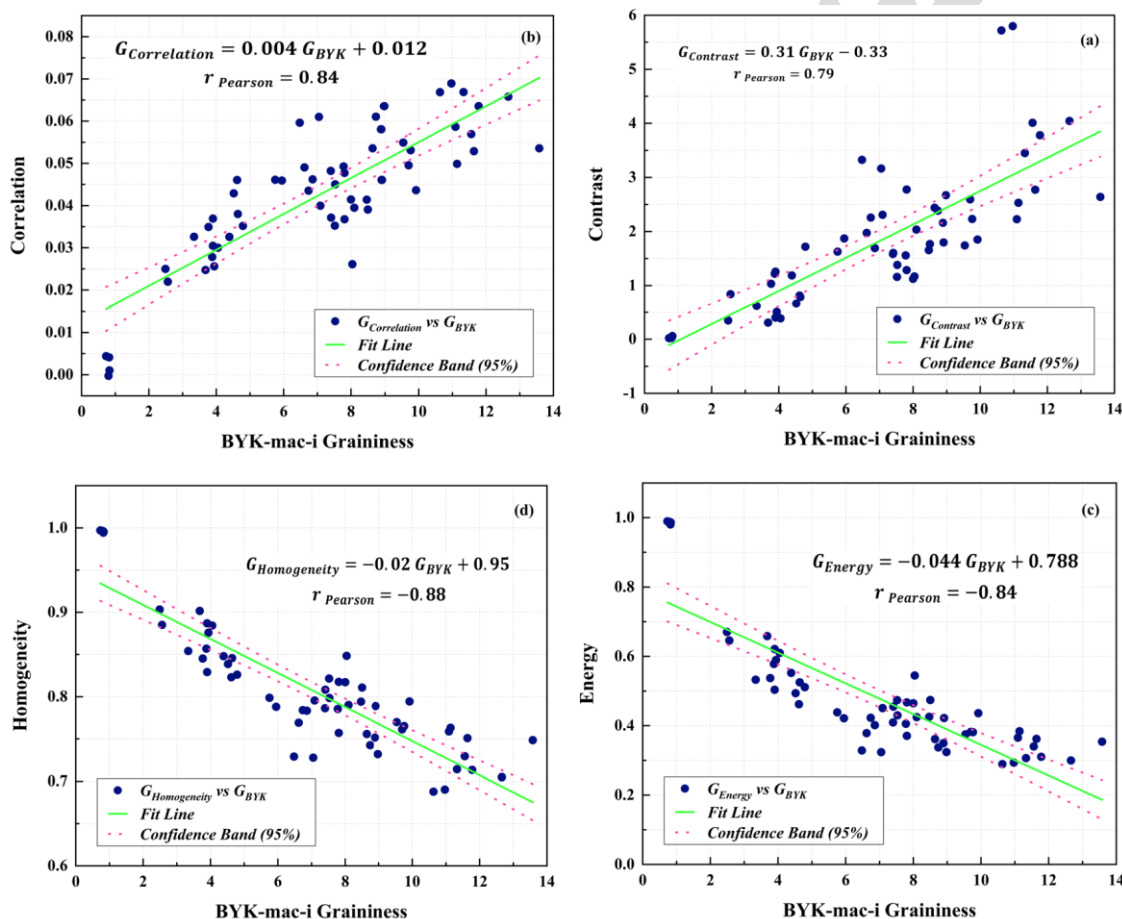
بر اساس نمودار شکل ۴-ا، میانگین دامنه طیف استخراج شده از تبدیل فوریه رابطه ای خطی با داده های گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i دارد و مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین این دو ویژگی برابر ۰/۸۳ است. همچنین، مطابق با نمودار شکل ۴-ب، رابطه ی میان چگالی طیفی توان و مقادیر دانه های شدن اندازه گیری شده به صورت یک رابطه ی خطی توصیف می شود و مقدار ضریب همبستگی پیرسون برای آن ۰/۷۹ است. از منظر تحلیل آماری، مقادیر P-value برای هر دو ویژگی، با سطح اطمینان ۰/۹۵، کمتر از ۰/۰۰۱ به دست آمد که نشان دهنده ی معناداری قوی ارتباط میان ویژگی های استخراج شده از تبدیل فوریه و داده های گونیواسپکتروفوتومتر است. با توجه به ضرایب همبستگی به دست آمده، هر دو ویژگی معرفی شده توانایی مناسبی در کمی سازی دانه های شدن بافتار دارند. با این حال، ویژگی میانگین دامنه طیف در مقایسه با چگالی طیفی توان، عملکرد مطلوب تری را ارائه می دهد. نتایج به دست آمده از کمی سازی دانه های شدن بافتار پوشش های متالیک با روش تبدیل فوریه، شباهت زیادی با یافته های مراجع پیشین دارد (۱۸، ۱۹، ۲۱).

نتایج بدست آمده از تبدیل فوریه نشان می دهد که پوشش های متالیک حاوی رنگدانه های درشت تر، مقادیر بالاتری از میانگین دامنه طیف و چگالی طیفی توان را نشان می دهند. تصاویر با بافتار ریزتر معمولاً انرژی بیشتری در فرکانس های بالا دارند، در حالی که بافتارهای درشت تر در فرکانس های پایین غالب هستند. این مسئله را می توان با در نظر گرفتن نحوه ی توزیع بازتاب نور در سطح پوشش توضیح داد. در نمونه هایی با رنگدانه های درشت تر، تغییرات شدت روشنایی در مقیاس های فضایی بزرگ تر (فواصل بزرگ تر بین نواحی روشن و تاریک) رخ می دهد، زیرا ذرات بزرگ تر، بافتار درشت تری ایجاد می کنند. به علاوه، سطح مقطع مؤثر (مساحت

ظاهری ذرات از دید نور ورودی) در رنگدانه‌های درشت‌تر به دلیل اندازه بزرگ‌تر ذرات، افزایش می‌یابد. این افزایش سطح مقطع مؤثر باعث می‌شود که نور بیشتری از سطح پوشش بازتاب شود، که منجر به روشن‌تر شدن نواحی روشن و تاریک‌تر شدن نواحی تاریک در تصویر می‌شود. در نتیجه، تباین (اختلاف شدت روشنایی بین نواحی روشن و تاریک) در این نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این عوامل منجر به افزایش دامنه کلی طیف فوری می‌شوند. به عبارت دیگر، اگرچه در بافتارهای ریز، اطلاعات تصویر بیشتر در فرکانس‌های بالا متمرکز است، اما شدت تغییرات (تباین بین نواحی روشن و تاریک) در پوشش‌های دارای رنگدانه‌های درشت‌تر بیشتر بوده و تأثیر بیشتری بر دامنه‌ی طیف فوری دارد. بنابراین، افزایش مقادیر ویژگی‌های تبدیل فوری در نمونه‌های دارای ذرات درشت‌تر نه تنها ناشی از توزیع فرکانسی اطلاعات، بلکه نتیجه‌ی افزایش تباین ناشی از بازتاب نور در این پوشش‌ها نیز می‌باشد.

۳-۲-۲- تبدیل موجک

جهت ارزیابی عملکرد تبدیل موجک در کمی‌سازی ویژگی دانه‌ای شدن بافتار، این تبدیل با شش سطح تجزیه بر تصاویر پیش‌پردازش‌شده اعمال شد و مقادیر انرژی موجک در چهار کانال تقریب، افقی، عمودی و قطری محاسبه گردید. سپس همبستگی بین انرژی موجک در هر کانال و مقادیر دانه‌ای شدن اندازه‌گیری‌شده توسط دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i بررسی شد. ضرایب همبستگی بدست آمده در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵: پراکندگی میان انرژی موجک و نتایج گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i در کانال‌های، (a) تقریب، (b) افقی، (c) عمودی و (d) قطری.

Figure 5: Wavelet Energy versus BYK-mac-i graininess in, a) approximation, b) horizontal, c) vertical, and d) diagonal channels.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در نمودارهای شکل ۵، ضرایب همبستگی پیرسون بین مقادیر انرژی موجک و داده‌های گونیواسپکتروفوتومتر

مقاله پذیرفته شده

BYK-mac-i در کانال‌های مختلف به ترتیب برابر 0.79 (تقریب)، 0.79 (افقی)، 0.78 (عمودی) و 0.83 (قطری) است. این مقادیر نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب تبدیل موجک در کمی‌سازی دانه‌ای شدن بافتار هستند. در حالی که همبستگی در کانال‌های تقریب، افقی و عمودی تفاوت قابل توجهی ندارد، کانال قطری بالاترین میزان همبستگی را نشان می‌دهد که می‌تواند به حساسیت بیشتر این کانال نسبت به ویژگی‌های دانه‌ای شدن مرتبط باشد. این نتایج با یافته‌های آموخت و همکاران (۲۱) همخوانی دارد، با این تفاوت که در پژوهش آن‌ها همبستگی کانال تقریب پایین‌تر بوده و از تنها یک سطح تجزیه در تحلیل موجک استفاده شده است. با بررسی دقیق‌تر نمودارهای شکل ۵، مشاهده می‌شود که در دو نمونه خاص، مقادیر دانه‌ای شدن به دست آمده از تحلیل بافتار به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر ثبت شده توسط گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i است. این اختلاف به ویژه در کانال‌های تقریب و افقی مشهودتر بوده و در کانال‌های عمودی و قطری کاهش یافته است. بررسی بیشتر این نمونه‌ها نشان می‌دهد که این انحراف عمدتاً مربوط به پوشش‌های نقره‌ای با رنگدانه‌های درشت‌تر است. از آنجایی که در تبدیل موجک، کانال تقریب اطلاعات مربوط به فرکانس‌های پایین را حفظ کرده و اطلاعات مربوط به فرکانس‌های بالاتر را در کانال‌های جهت‌دار (افقی، عمودی و قطری) توزیع می‌کند، نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در این نمونه‌ها، بخش عمده‌ای از اطلاعات بافتاری در فرکانس‌های پایین قرار دارد. این مسئله می‌تواند دلیل تخمین بیش از حد مدل در این نمونه‌ها باشد، زیرا دانه‌ای شدن بالا در این پوشش‌ها موجب افزایش شدت تباین و تمرکز انرژی در فرکانس‌های پایین‌تر شده و در نتیجه، مقادیر استخراج شده از تحلیل موجک افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که همبستگی ویژگی‌های استخراج شده در کانال‌های تقریب و افقی با شاخص دستگامی در نمونه‌های با دانه‌ای شدن پایین، قوی‌تر است. این موضوع می‌تواند به تفاوت ساختار انرژی بافتار در سطوح پایین دانه‌ای شدن مرتبط باشد. آن‌که بررسی دقیق این رفتار در محدوده هدف این مقاله نبوده است، می‌توان آن را به عنوان زمینه‌ای برای توسعه‌های آینده در تحلیل‌های موجک در نظر گرفت.

۳-۲-۳- ماتریس هم‌وقوعی

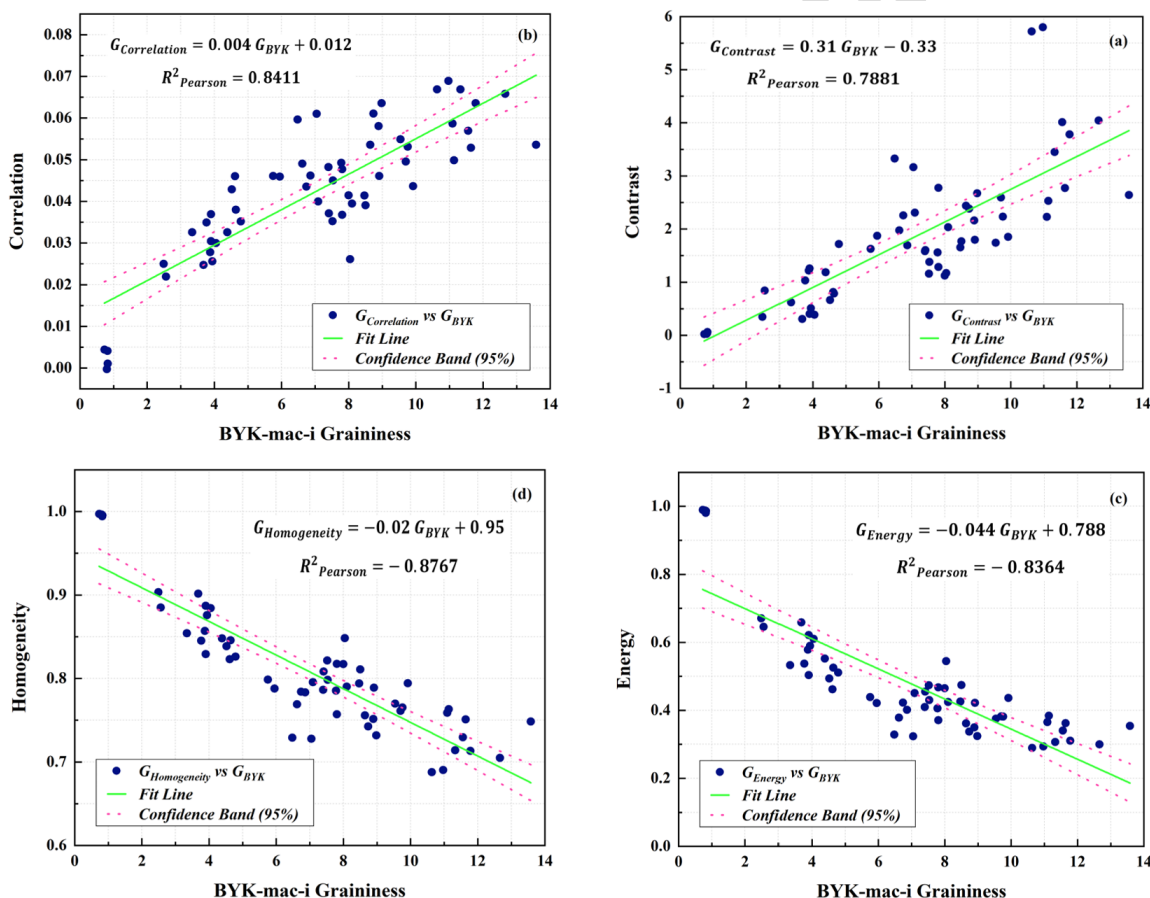
برای کمی‌سازی ویژگی دانه‌ای شدن با استفاده از ماتریس هم‌وقوعی، چهار ویژگی تباین، همبستگی، انرژی و همگنی مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله‌ی اول، جهت تعیین بهترین زاویه و فاصله‌ی همسایگی، این ویژگی‌ها در چهار زاویه‌ی 0° ، 45° ، 90° و 135° درجه و فواصل 1 ، 5 ، 10 ، 15 و 20 پیکسل محاسبه شدند. نتایج نشان داد که به جز فاصله‌ی همسایگی 1 پیکسل، تفاوت معناداری بین همسایگی‌های مختلف وجود ندارد. با این حال، بیشترین ضرایب همبستگی میان ویژگی‌های استخراج شده و داده‌های گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i در فاصله‌ی 15 پیکسل و زاویه‌ی 0° درجه به دست آمد. بنابراین، این مقادیر به عنوان پارامترهای بهینه در محاسبه‌ی ماتریس هم‌وقوعی انتخاب شدند. نتایج ضرایب همبستگی پیرسون میان ویژگی‌های ماتریس هم‌وقوعی و مقادیر گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i در شکل ۶ ارائه شده است.

نتایج ضرایب همبستگی پیرسون میان نتایج دو روش، برای ویژگی‌های تباین، همبستگی، انرژی و همگنی به ترتیب برابر 0.79 ، 0.84 ، 0.84 و 0.88 - بدست آمد، که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بسیار خوب این روش در کمی‌سازی ویژگی دانه‌ای شدن در پوشش‌های متالیک است. در میان ویژگی‌های استخراج شده، ویژگی تباین کمترین همبستگی را داشت، درحالی‌که سه ویژگی همبستگی، انرژی و همگنی با ضرایب همبستگی بالاتر 0.8 عملکرد بسیار مطلوبی نشان دادند. از نظر آماری نیز ارتباط بین دانه‌ای شدن اندازه‌گیری شده با گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i و ویژگی‌های بدست آمده از ماتریس هم‌وقوعی با سطح اطمینان 95% درصد معنادار بود ($p\text{-value} < 0.001$).

بررسی ارتباط میان ویژگی‌های ماتریس هم‌وقوعی و نتایج اندازه‌گیری شده:

- تباین معیاری از میزان تغییرات شدت روشنایی در تصویر است. از آنجایی که در پوشش‌های متالیک، رنگدانه‌های آلومینیومی بازتاب نور بیشتری نسبت به نواحی اطراف دارند، اختلاف شدت روشنایی در این نواحی قابل توجه است. افزایش دانه‌ای شدن باعث تشدید این تغییرات شده و در نتیجه تباین افزایش می‌یابد، که این ارتباط مستقیم را توجیه می‌کند.

- همبستگی معیاری از ارتباط میان پیکسل‌ها و جهت‌دار بودن بافتار است. ضریب همبستگی مثبت میان این ویژگی و دانه‌ای شدن نشان می‌دهد که با افزایش دانه‌ای شدن، وابستگی مقادیر شدت روشنایی در پیکسل‌های مجاور بیشتر شده و الگوهای تصویری منظم‌تر و هم‌راستاتری (جهت‌دارتر) در تصویر شکل می‌گیرد.
- انرژی معیاری از یکنواختی کلی تصویر است و مجموع مربعات مقادیر ماتریس هم‌وقوعی را محاسبه می‌کند. برای تصاویر کاملاً یکنواخت (بدون تغییر شدت روشنایی)، انرژی برابر ۱ است. با افزایش دانه‌ای شدن (ناهمواری بافتار)، تغییرات شدت روشنایی بیشتر شده و انرژی کاهش می‌یابد، زیرا مقادیر ماتریس هم‌وقوعی پراکنده‌تر می‌شوند. ارتباط معکوس این ویژگی با دانه‌ای شدن نشان می‌دهد که هرچه سطح ناهموارتر و زبرتر شود، یکنواختی کاهش یافته و مقدار انرژی کمتر می‌شود.
- همگنی نیز بیانگر یکنواختی محلی شدت روشنایی است و به تغییرات تدریجی شدت‌ها در نواحی نزدیک به هم حساس‌تر است. این ویژگی با وزن‌دهی معکوس به اختلاف شدت‌های خاکستری محاسبه می‌شود. با افزایش اندازه ذرات و دانه‌ای شدن بافتار، تغییرات شدت روشنایی نایک‌نواخت‌تر شده و همگنی کاهش می‌یابد. در داده‌های این مطالعه، بالاترین میزان همبستگی در میان ویژگی‌های بررسی‌شده مربوط به همگنی ($|-0.88|$) است که نشان می‌دهد این ویژگی دقت بالایی در توصیف دانه‌ای شدن پوشش‌های متالیک دارد.

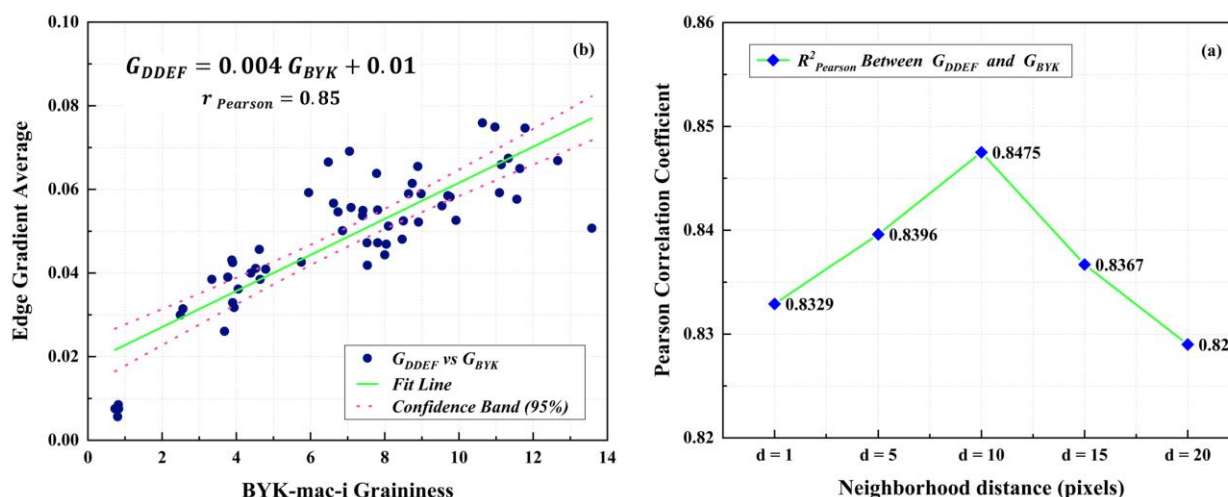


شکل ۶: پراکندگی میان ویژگی‌های ماتریس هم‌وقوعی و نتایج BYK-mac-i، (a) تباین، (b) همبستگی، (c) انرژی و (d) همگنی.

Figure 6: GLCM properties versus BYK-mac-i graininess, a) contrast, b) correlation, c) energy, and d) homogeneity.

۳-۲-۴- فرکانس لبه وابسته به فاصله

برای کمی‌سازی ویژگی دانه‌ای شدن بافتار پوشش‌های متالیک با استفاده از روش فرکانس لبه وابسته به فاصله، میانگین گرادیان لبه‌های تصاویر نمونه‌ها در همسایگی‌های مختلف محاسبه شد. به منظور بررسی تأثیر فاصله‌ی همسایگی بر دقت این روش، گرادیان لبه‌ها در پنج فاصله‌ی مختلف (۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ پیکسل) اندازه‌گیری و میزان همبستگی آن‌ها با مقادیر دانه‌ای شدن ثبت شده توسط گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i محاسبه شد. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی در شکل ۷-a ارائه شده است. تحلیل‌ها نشان داد که تغییر فاصله‌ی همسایگی تأثیر قابل توجهی بر دانه‌ای شدن محاسبه شده ندارد، اما در فاصله‌ی ۱۰ پیکسل، بالاترین میزان همبستگی با دانه‌ای شدن اندازه‌گیری شده به دست آمد. بنابراین، این مقدار به عنوان فاصله‌ی بهینه انتخاب شد و نتایج مربوط به آن در شکل ۷-b ارائه شده است.



شکل ۷: پراکندگی میان فرکانس لبه وابسته به فاصله و نتایج گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i، (a) فواصل مختلف، (b) $d = 10$

Figure 7: Distance-dependent edge frequency versus BYK-mac-i graininess, a) different distances, b) $d = 10$.

مطابق شکل ۷-b، افزایش دانه‌ای شدن اندازه‌گیری شده توسط BYK-mac-i و افزایش اندازه‌ی ذرات رنگدانه‌های متالیک، منجر به افزایش مقدار میانگین گرادیان لبه‌های تصویر شده است. همچنین مقدار ضریب همبستگی پیرسون در فاصله‌ی همسایگی ۱۰ پیکسل، برابر با ۰/۸۵ بدست آمد که نشان‌دهنده‌ی ارتباط قوی بین این ویژگی و دانه‌ای شدن اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، بررسی‌های آماری نیز معناداری این ارتباط را در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p\text{-value} < 0.001$) تأیید کرد.

نتایج این مطالعه نشان داد که تمامی روش‌های تحلیل بافتار شامل تبدیل فوری، تبدیل موجک، ماتریس هم‌وقوعی و فرکانس لبه وابسته به فاصله، ضرایب همبستگی قابل توجهی با داده‌های دانه‌ای شدن اندازه‌گیری شده توسط گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i داشتند. به طور کلی، هر یک از این روش‌ها بسته به رویکرد خود، قادر به استخراج اطلاعات معناداری از دانه‌ای شدن پوشش‌های متالیک هستند.

برای شناسایی مناسب‌ترین روش‌ها در کمی‌سازی دانه‌ای شدن پوشش‌های متالیک، می‌توان ویژگی‌های زیر را به عنوان شاخص‌های برتر در نظر گرفت:

- حوزه‌ی فرکانس: میانگین دامنه‌ی طیف فوری و انرژی موجک در کانال قطری،
 - حوزه‌ی مکان: ویژگی‌های همبستگی، انرژی و همگنی استخراج شده از ماتریس هم‌وقوعی و میانگین گرادیان لبه‌ها.
- تمامی این ویژگی‌ها ضرایب همبستگی بالاتر از ۰/۸۲ را ارائه کردند. همچنین، در میان روش‌های مورد بررسی، ویژگی همگنی با ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۸۷، بالاترین دقت و عملکرد را نشان داد و می‌تواند به عنوان شاخص برتر برای توصیف ویژگی دانه‌ای شدن پوشش‌های متالیک در نظر گرفته شود.

با توجه به نتایج به دست آمده و قابلیت پیاده سازی روش پیشنهادی، بررسی جنبه های کاربردی این روش در محیط های صنعتی نیز حائز اهمیت است. در شرایطی که دسترسی به تجهیزات گران قیمت مانند گونیواسپکتروفوتومترها محدود باشد، روش پیشنهادی مبتنی بر اسکنر و تحلیل بافتار می تواند به عنوان ابزاری مقرون به صرفه، تکرارپذیر و قابل پیاده سازی در محیط های صنعتی یا دانشگاهی مورد استفاده قرار گیرد. به ویژه در خطوط تولید یا پایش فرایندهای رنگ آمیزی که کنترل کیفی سریع و غیرمخرب اهمیت دارد، این روش می تواند مکملی برای ارزیابی بصری انسان یا جایگزینی برای ابزارهای پرهزینه باشد. با این حال، لازم به ذکر است که پیاده سازی صنعتی این روش مستلزم بررسی ویژگی های دستگاه اسکنر مورد استفاده (نظیر رزولوشن، دقت رنگی، دقت نوری و یکنواختی روشنایی) و انجام تنظیم مجدد پارامترهای الگوریتم بر اساس شرایط تصویربرداری است، تا دقت و تکرارپذیری نتایج حفظ شود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، چهار روش مختلف تحلیل بافتار شامل تبدیل فوریه، تبدیل موجک، ماتریس هموقوعی و فرکانس لبه وابسته به فاصله برای کمی سازی ویژگی دانه های شدن پوشش های متالیک مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از این روش ها با داده های اندازه گیری شده توسط گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i مقایسه شد و میزان همبستگی بین این ویژگی ها تحلیل گردید.

- نتایج تبدیل فوریه نشان داد که ویژگی های میانگین دامنه طیف و چگالی طیفی توان ارتباط قوی و معناداری با دانه های شدن دارند و از میان آن ها، میانگین دامنه طیف با ضریب همبستگی $0/84$ ، عملکرد بهتری ارائه داد.
- تحلیل تبدیل موجک بیانگر آن بود که انرژی موجک در کانال های مختلف، به ویژه در کانال قطری، به طور مؤثری قادر به شبیه سازی ویژگی دانه های شدن بافتار بوده و از دقت خوبی برخوردار است ($r = 0/83$).
- ویژگی های بدست آمده از ماتریس هموقوعی نشان دادند که انرژی، همبستگی و همگنی با ضریب همبستگی ($r > 0/82$) بالاترین میزان همبستگی را با دانه های شدن دارند، در حالی که تباین با ضریب همبستگی حدوداً $0/79$ کمترین میزان ارتباط را در مقایسه با سایر ویژگی های استخراج شده از ماتریس هموقوعی نشان داد.
- روش فرکانس لبه وابسته به فاصله نیز عملکرد مطلوبی در کمی سازی دانه های شدن داشت و مقدار میانگین گرادیان لبه ها در فاصله ی 10 پیکسل با ضریب همبستگی تقریباً $0/88$ با نتایج گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i ارتباط معنادار نشان داد.

در میان این روش ها، ویژگی همگنی ماتریس هموقوعی با ضریب همبستگی $0/88$ ، بالاترین دقت را در توصیف دانه های شدن ارائه داد. نتایج این پژوهش می تواند به توسعه روش های دقیق تر در کنترل کیفیت پوشش های متالیک و بهبود ارزیابی کمی ویژگی های بافتار این پوشش ها کمک کند. همچنین، بررسی امکان بهبود همبستگی از طریق ترکیب ویژگی های مکانی و فرکانسی (به صورت مدل های خطی یا غیرخطی) می تواند به عنوان گامی در توسعه های بعدی این پژوهش در نظر گرفته شود.

تعارض منافع

در این مقاله هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تقدیر و تشکر

از همکاری ارزشمند شرکت رنگ و رزین خوش در تأمین خمیرهای آلومینیوم و کلیه مواد مورد نیاز و همچنین آماده سازی نمونه ها، نهایت تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از شرکت محترم ایران خودرو جهت ارائه دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i برای انجام تست های اندازه گیری دانه های شدن بافتار، و شرکت محترم کالاکار به خاطر تأمین خمیر آلومینیوم، صمیمانه سپاس گزاریم.

۵- مراجع

1. Buxbaum G, editor. Industrial inorganic pigments. 2nd ed. John Wiley & Sons; 2008.
2. Maile FJ, Pfaff G, Reynnders P. Effect pigments—past, present and future. Prog. Org. Coat. 2005;54(3):150-63. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.07.003>.
3. Streitberger HJ. Automotive paints and coatings. 2nd ed. Germany: Wiley; 2008.
4. McCamy CS. Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part I. Macro appearance. Color Res. Appl. 1996;21(4):292-304. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6378\(199608\)21:4<292::AID-](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6378(199608)21:4<292::AID-Color Res. Appl. 1996;21(4):292-304)

- [COL4>3.0.CO;2-L.](#)
5. McCamy CS. Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part II. Micro appearance. Color Res. Appl. 1998 ;23(6):362-73. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6378\(199812\)23:6<362::AID-COL4>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6378(199812)23:6<362::AID-COL4>3.0.CO;2-5).
 6. American Society for Testing and Materials. ASTM E284-13a. Standard Terminology of Appearance. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2013.
 7. Kirchner E, Van Den Kieboom GJ, Njo L, Super R, Gottenbos R. Observation of visual texture of metallic and pearlescent materials. Color Res. Appl. 2007;32(4):256-66. <https://doi.org/10.1002/col.20328>.
 8. American Society for Testing and Materials. ASTM E284-17. Standard Terminology of Appearance. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017.
 9. Dekker N, Kirchner EJ, Super R, Van Den Kieboom GJ, Gottenbos R. Total appearance differences for metallic and pearlescent materials: contributions from color and texture. Color Res. Appl. 2011;36(1):4-14. <https://doi.org/10.1002/col.20586>.
 10. Ferrero A, Bayón S. The measurement of sparkle. Metrologia. 2015;52(2):317. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/2/317>.
 11. American Society for Testing and Materials. ASTM Standard E284-13b. Standard Terminology of Appearance. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2013.
 12. Perales E, Burgos FJ, Vilaseca M, Viqueira V, Martínez-Verdú FM. Graininess characterization by multidimensional scaling. J. Mod. Opt. 2019;66(9):929-38. <https://doi.org/10.1080/09500340.2019.1589006>.
 13. Perales E, Micó-Vicent B, Huraibat K, Viqueira V. Evaluating the Graininess Attribute by Visual Scaling for Coatings with Special-Effect Pigments. Coatings. 2020;10(4):316. <https://doi.org/10.3390/coatings10040316>.
 14. Ferrero A, Velázquez JL, Perales E, Campos J, Martínez Verdú FM. Definition of a measurement scale of graininess from reflectance and visual measurements. Opt. express. 2018;26(23):30116-27. <https://doi.org/10.1364/OE.26.030116>.
 15. Huang MJ, Chen HS, Luo R, Sun PL. Assessing appearance and emotional attributes of coloured metallic paints. Color. Technol. 2018;134(1):59-70. <https://doi.org/10.1111/cote.12317>.
 16. Ferrero A, Basic N, Campos J, Pastuschek M, Perales E, Porrovecchio G, et al. An insight into the present capabilities of national metrology institutes for measuring sparkle. Metrologia. 2020;57(6):065029. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/abb0a3>.
 17. Winston Wang Z, Ronnier Luo M. Looking into special surface effects: diffuse coarseness and glint impression. Color. Technol. 2016;132(2):153-61. <https://doi.org/10.1111/cote.12203>.
 18. Kitaguchi S, Luo MR, Kirchner EJ, Van Den Kieboom GJ. Computational model for perceptual coarseness prediction. Proceedings of the Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision; 2006 Jan; UK: Society of Imaging Science and Technology; 2006.278-282.
 19. Ferrero A, Perales E, Basic N, Pastuschek M, Porrovecchio G, Schirmacher A, et al. Preliminary measurement scales for sparkle and graininess. Opt. Express. 2021;29(5):7589-600. <https://doi.org/10.1364/OE.411953>.
 20. Filip J, Vávra R, Kolafová M, Maile FJ. Assessment of sparkle and graininess in effect coatings using a high-resolution gonireflectometer and psychophysical studies. J. Coat. Technol. Res. 2021;18:1511-30. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00518-5>.
 21. Amookht S, Kandi SG, Mahdavian M. Quantification of perceptual coarseness of metallic coatings containing aluminum flakes using texture analysis and visual assessment methods. Prog. Org. Coat. 2019; 137:105375. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105375>.
 22. Amookht S, Kandi SG, Mahdavian M. Effect of surface texture on color appearance of metallic coatings. Prog. Org. Coat. 2014;77(7):1221-5. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.02.010>.
 23. Amookht S, Kandi SG. Investigation of Flop Index by Variation in Size of Aluminum Flake and its Relation with the Surface Texture Quantified by Edge Frequency Method. Proceedings of the AIC 2017 Jeju. 2017:168.
 24. Buades A, Coll B, Morel J-M, editors. A non-local algorithm for image denoising. Proceedings of the conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05); IEEE computer society; 2005; 2:60-65.
 25. Zhu Y, Huang C. An improved median filtering algorithm for image noise reduction. Phys. Procedia. 2012; 25:609-16. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.133>.
 26. Shrestha S. Image denoising using new adaptive based median filters. arXiv:1410.2175. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.2175>.
 27. Vincent OR, Folorunso O. A descriptive algorithm for sobel image edge detection. Proceedings of informing

- science & IT education conference (InSITE); 2009.
28. Cristóbal G, Schelkens P, Thienpont H. Optical and digital image processing. fundamentals and applications: John Wiley & Sons; 2013.
 29. Gonzales RC, Wintz P. Digital image processing. 2nd ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.; 1987.
 30. Russ JC. The image processing handbook. 6th ed. CRC press; 2006.
 31. Livens S, Scheunders P, Van de Wouwer G, Van Dyck D. Wavelets for texture analysis, an overview. Proceedings of the 6th International Conference on Image Processing and its Applications; 1997 Jul 14; London UK: IEE. 1997. 581-585.
 32. Materka A, Strzelecki M. Texture analysis methods—a review. Technical university of lodz, institute of electronics, COST B11 report, Brussels. 1998;10(1.97):4968.
 33. Mirjalili F, Hardeberg JY. On the quantification of visual texture complexity. J. Imaging. 2022;8(9):248. <https://doi.org/10.3390/jimaging8090248>.
 34. Kurniati FT, Manongga DH, Sedyono E, Prasetyo SYJ, Huizen RR. GLCM-Based Feature Combination for Extraction Model Optimization in Object Detection Using Machine Learning. arXiv:240404578. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.04578>.
 35. Haralick RM, Shanmugam K, Dinstein IH. Textural features for image classification. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 1973(6):610-21. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>.
 36. Sutton RN, Hall EL. Texture measures for automatic classification of pulmonary disease. IEEE Trans. Comput. 1972;100(7):667-76. <https://doi.org/10.1109/T-C.1972.223572>.
 37. Haralick RM. Statistical and structural approaches to texture. Proc. IEEE. 1979;67(5):786-804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>.