

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir Journal of Color Science and Technology, 18, 4(2025), 309-324 Article type: Research article Open access

www.jcst.icrc.ac.ii

Prediction of BYK-mac-i Results for Assessing Graininess Characteristics in Metallic Coatings Using Scanner and Texture Analysis Methods

Fatemeh Malekpour, Saeideh Gorji Kandi*, Mohsen Mohseni

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

ARTICLE INFO

Article history: Received: 02-03-2025 Accepted: 21-05-2025 Available online: 24-05-2025 Print ISSN: 1735-8779 Online ISSN: 2383-2169

DOI:10.30509/jcst.2025.167480.1253

Keywords: Metallic coatings Graininess Texture analysis BYK-mac-i gonio-spectrophotometer.

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 goniospectrophotometer. 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.

*Corresponding author: * S.gorji@aut.ac.ir

9 0



www.icst.icrc.ac.i

دسترسی آنلاین: www.jcst.icrc.ac.ir نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۸، (۱۴۰۳)۴، ۳۲۹_۳۰۹ نوع مقاله: پژوهشی دسترسی آزاد

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

فاطمه ملک پور^۱، سعیده گرجی کندی^۴»، محسن محسنی^۳ ۱ ـ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷–۱۵۸۷۵ ۲ ـ دانشیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳–۱۵۸۷۵ ۳ ـ استاد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳–۱۵۸۷۵

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲٫۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲٫۳۱ در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۳٫۳ شاپا چاپی: ۸۷۷۹–۱۷۳۵ شاپا الکترونیکی: ۲۱۶۹–۲۳۸۳

DOI: 10.30509/jcst.2025.167480.1253

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

چکیدہ

پوششهای متالیک به دلیل ویژگیهای دیداری جذاب، در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی و دکوراسیون مورد استفاده قرار میگیرند. ارزیابی دانه ای 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 بسامد لبه وابسته به فاصله، برای کمیسازی دانه ای شدن بافت پوششهای متالیک بررسی شدند. دادههای به دست آمده از تحلیل بافتار، با نتایج گونیواسپکتروفوتومتر i-BYK مقایسه شدند دادههای میزان همبستگی آنها محاسبه شد. نتایج نشان داد که تمامی روشها ارتباط معناداری با تایج دستگاهی دارند. از میان این روشها، ویژگی همگنی به دست آمده از ماترس هموقوعی، بالاترین دقت را در کمیسازی دانه ای شدن بافتار نشان داد و با ضریب هموقوعی، بالاترین دقت را در کمیسازی دانه ای شدن بافتار نشان داد و با ضریب همپیتی ۸۸٫۰۰، تطابق بالایی با نتایج حاصل از گونیواسپکتروفوتومتر داده و دار ماتریس همچنین، ویژگیهای میانگین دامنه طیف فوریه و انرژی موجک در کانال قطری در حوزه بسامد، به همراه ویژگیهای انـرژی و همبستگی ماتریس هموقوعی و روش بسامد لبه وابسته در حوزه مکان، با ضرایب همبستگی بالاتر از ۲۸٫۰ نتایج قابل قبل دارند.

^{*}Corresponding author: * S.gorji@aut.ac.ir

۱_ مقدمه

پوشش های متالیک به دلیل جذابیت دیداری 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 هندسه تابش/ مشاهده است و تغییر در زاویه مشاهده و یا منبع نوری موجب تغییرات ظاهری این یوشش ها شده و بر رنگ و بافتار آن ها تأثیر قابل توجهی می گذارد (۲-۱). مطالعات اولیه در زمینه ظاهر این پوششها توسط مـککمی (انجام شد. او ویژگیهای ظاهری این پوششها را به دو دسته ماکرو (قابل مشاهده از چندمتری) و میکرو (قابل مشاهده در فواصل نزدیک) تقسیم کرد و بافتار را به عنوان عامل کلیدی در جلوه ظاهری این یوششها معرفی کرد (۴،۵). مطابق استاندارد ASTM E284، بافتار بهعنوان «ساختار سطحی قابل مشاهده که به اندازه و سازماندهی اجزای کوچک وابسته است» تعریف می شود (۶). به طور کلی، بافتار به دو نوع فیزیکی و دیداری تقسیم میشود: بافتار فیزیکی که به پستی و بلندی سطح مربوط است و به صورت زبری احساس می شود و بافتار دیداری که ناشی از تغییرات در سه بعد رنگ و یا شدت آنها است و شامل ویژگیهایی مانند درخشندگی نسبی، ظرافت، ابلقي شدن أو غيره است (٧).

در سال ۲۰۰۷، کرشنر^۵ و همکارانش دو ویژگی « رخشه^۶ » و «دانهای شدن^۷ » را به عنوان مؤلفههای اصلی بافتار دیداری پوششهای متالیک معرفی کردند. رخشه، به شکل نقاط نورانی کوچکی ظاهر میشود که در یک پس زمینه تیره توزیع شدهاند و به طرز چشم گیری از اطراف خود روشن تر هستند. این ویژگی وابستگی زیادی به زاویه مشاهده و شرایط نوری دارد و فقط در روشنایی شدید و تکجهتی مشاهده میشود (۱۰–۷). با تغییر منبع نوری از حالت تکجهتی به نور پراکنده، این نقاط درخشان کاهش مؤلفه دوم بافتار دیداری که به دانهای شدن یا زبری پراکنده^۸معروف است، ظاهر میشود (۷). مطابق با استاندارد 134-138 میشود که است، ظاهر می شود (۷). مطابق با ستاندارد ما32-434 موانه دوم بافتار دیداری که به دانهای شدن یا زبری پراکنده موانه دوم بافتار دیداری که به دانه ای شدن یا زبری پراکنده موانه دوم بافتار دیداری که به دانه ای شدن یا زبری پراکنده موانه دوم بافتار دیداری که به دانه ای شدن یا زبری پراکنده می دون ماهره دوم بافتار دیداری که به دانه ای شدن یا زبری پراکنده موانه دوم بافتار دیداری که به دانه ای شدن یا زبری پراکنده می دانه می شود که است، ظاهر می شود (۱). مطابق می استاندارد ما33-434

1- McCamy

سطح نمونه قابل مشاهده است (۱۳، ۱۲). این ویژگی به عوامل فیزیکی از جمله اندازه، جهتگیری و غلظت رنگدانههای متالیک وابسته است. مطالعات نشان دادهاند که رنگدانههای بزرگتر باعث افزایش دانهایشدن میشوند، درحالیکه افزایش غلظت رنگدانهها این ویژگی را کاهش میدهد (۱۴–۱۲).

با توجه به اهمیت ویژگیهای بافتاری در پوششهای متالیک، کمّیسازی آنها برای کنترل کیفیت و بهینهسازی فرمول بندی ضروری است. در حال حاضر روشهای دیداری و دستگاهی مختلفی برای اندازه گیری دانه ای شدن وجود دارد. ابزارهای صنعتی مانند گونیواسپکتروفوتومتر i-BYK-mac و MA-T12 با بررسی طیفی و آنالیز تصویر، شاخصهای بافتاری مانند دانه ای شدن و رخشه را تعیین می کنند (۱۵، ۱۲، ۱۱). 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 راستا مطالعات متعددی مدل هایی برای تبدیل نتایج دستگاهی حاصل از گونیواسپکتروفوتومتر i-BYK-mac به شاخصهای دیداری ارائه داده اند. نتایج به دست آمده از این مطالعات بیانگر همبستگی بالای (در حدود ۹٫۰) میان نتایج حاصل از اندازه گیریهای این

در سالهای اخیر روشهای پردازش تصویر به عنوان ابزارهای مؤثر برای پیشبینی و کمیسازی دانهای شدن پوششهای متالیک مطرح شدهاند. کیتاگوچی^۹و همکارانش نخستین مدل کمیسازی دانهای شدن را براساس انرژی فوریه در کانال روشنایی تصویر و توابع حساسیت تباین ارائه دادند (۱۸). دکر 'و همکارانش با تحلیل ارزیابیهای دیداری و نتایج دستگاهی، مدلی برای تخمین اختلاف ظاهر کلی پیشنهاد کردند (۹). فررو (و همکارانش با استفاده از تبدیل فوریه، چگالی طیفی توان فوریه را به عنوان واریانس دانهای شدن معرفی کردند و بر این اساس مدلی را برای کمیسازی ویژگیدانهایشدن معرفی کردند (۱۶). آنها در پژوهشی دیگر، مـدل اولیه را با دادههای اسیکتروفوتومترها بهینهسازی کردند که منجر به همبستگی بالاتری با نتایج دیداری شد (۱۹). در ادامه، فیلیپ^۲ و همكارانش همبستكي نتايج كونيواس يكتروفوتومترها، ارزيابي هاي دیداری و مدل بهبودیافتهی فررو را بررسی کردند. آنها دریافتند که مدل ارائه شده در برخی نمونهها عملکرد مطلوبی ندارد (۲۰). آموخت و همکارانش با بررسی روشهای مختلف تحلیل بافتار، نشان دادند که تابع خودهمبستگی و تبدیل موجک، مؤثرترین ابزارها برای

²⁻Brilliance

³⁻ Fineness

⁴⁻ Mottling

⁵⁻ Kirchner

⁶⁻ Sparkle

⁷⁻ Graininess

⁸⁻ Diffuse Coarseness

⁹⁻ Kitaguchi

¹⁰⁻ Dekker

¹¹⁻ Ferrero

¹²⁻ Filip

کمی سازی دانه ای شدن هستند (۲۱). در مطالعه ای دیگر، آن ها تأثیر اندازه پر کهای رنگدانه ای بر بافت ار پوشش های متالیک را بررسی کردند و دریافتند که تغییر رنگ و اندازه ی ذرات تأثیر مستقیمی بر بافتار دیداری دارد. همچنین، میان اختلاف بافت ار (حاصل از تابع خودهمبستگی و بعد فرکت ال) و اختلاف رنگ ادراکی همبستگی بالایی مشاهده کردند (۲۲). آن ها در پژوهش دیگری نیز نشان دادند که شاخص فلاپ ⁽به شدت با اندازه رنگدانه ها مرتبط است و همبستگی بالایی با گرادیان بسامد لبه دارد (۲۳).

با وجود پیشرفتهای صورت گرفته در کمیسازی دانهای شدن، چالشهایی مانند هزینه بالا و دسترسی محدود به دستگاههای اندازه گیری، نیاز به روشهای مقرون به صرفه را افزایش داده است. در این پژوهش، رویکردی جدید مبتنی بر پردازش تصویر معرفی می شود که با استفاده از سیستمهای تصویر برداری ارزان قیمت مانند اسکنر، دانهای شدن پوششهای متالیک را با دقت بالا و همبستگی مناسب با نتایج دستگاهی اندازه گیری می کند. این روش نه تنها هزینهی تجهیزات را کاهش می دهد، بلکه امکان به کار گیری آن در محیطهای صنعتی و آزمایشگاهی را نیز تسهیل می کند.

۲_ بخش تجربی ۲_1_ آمادهسازی نمونهها

در این پژوهش، نمونههای پوشش متالیک با هدف ایجاد دامنه متنوعی از بافتارهای دانهای طراحی و تهیه شدند، به گونهای که امکان تمایز در ویژگی دانهای شدن پوشش فراهم گردد. برای این منظور، در مرحله مقدماتی، نسبتهای مختلفی از رنگدانه متالیک به فام پایه مورد آزمایش قرار گرفت و بر اساس نتایج حاصل، دو نسبت ۳۰ و ۵۰ درصد به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند تا تمایز مناسبی بین شدت دانهای شدن در نمونهها حاصل شود. انتخاب نوع و اندازه رنگدانهها نیز به صورت هدفمند و با تمرکز بر ایجاد تنوع ساختاری صورت گرفت. شش نوع خمیر آلومینیم با اشکال و اندازههای متفاوت

(پرک ذرت و سکه نقرهای در اندازههای ریز، متوسط و درشت) انتخاب شدند تا طیف متنوع و کنترل شدهای از بافتارها بهدست آید. جدول ۱ مشخصات خمیرهای آلومینیم غیربالاگرا مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد.

با استفاده از این خمیرها، شش بن پوشه ^{*}متالیک با فرمول بندی یکسان تهیه شد، به گونه ای که هر بن پوشه شامل تنها یک نوع رنگدانه آلومینیمی با غلظت ثابت ۵ درصد وزنی بود. سپس این بن پوشههای متالیک، یکبار به صورت خالص (۱۰۰ درصد) برای تهیه نمونه های نقره ای و بار دیگر با نسبتهای ۳۰ و ۵۰ درصد با چهار بن پوشه رنگی (قرمز، سبز، آبی و مشکی) ترکیب شدند. در نهایت، بن پوشه های حاصل به روش پاشش روی صفحات فولادی با ابعاد بن پوشههای حاصل به روش پاشش روی صفحات فولادی با ابعاد مفید رنگ، اعمال شدند. فرایند نمونه سازی برای نمونه های هر دسته از فامها در یک نوبت پیوسته و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شد تا از یکنواختی و تکرار پذیری نمونه ها اطمینان حاصل شود. با توجه به هدف اصلی این پژوهش که ارزیابی الگوریتم در شرایط واقعی و بدون نیاز به ایده آل سازی کامل است، حفظ تنوع طبیعی میان نمونه ها در کنار کنترل کیفیت فرایند، منطق اصلی طراحی میان نمونه ها در ایت کنار کنترل کیفیت فرایند، منطق اصلی طراحی

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

1- Flop

2- Cornflake

3- Silver dollar

4- Base coat

The second se				
Number	Sample Name	Size (D50)	Shape	Effect
1	S10 — E	10 µm	Silver Dollar	Fine
2	S20 — E	20 µm	Silver Dollar	Coarse
3	С25 — Е	25 µm	Cornflake	Coarse
4	S28 — E	28 µm	Silver Dollar	Very Coarse
5	С34 — Е	34 µm	Cornflake	Very Coarse
6	С54 — Н	$54 \ \mu m$	Cornflake	Very Coarse

جدول ۱: مشخصات خمیرهای آلومینیم. **Table 1:** Specifications of Aluminum pastes.



شکل ۱: نمودار درختی نمونههای مورد استفاده در این پژوهش. Figure 1: A tree diagram of samples utilized in this study.

۲_۲_اندازهگیری دانهایشدن به روش دستگاهی

اندازه گیری دانه ای شدن نمونه ها با استفاده از دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i تحت منبع نوری شبیه ساز CIED65 با نور پراکنده و شدت کم انجام شد. نمونه ها در زاویه تابش ۴۵^۵ و زاویه ی تصویربرداری ۰۰ (صفر درجه) نسبت به سطح نرمال، اندازه گیری شدند. برای افزایش قابلیت اطمینان نتایج، از هر نمونه در سه نقطه متفاوت اندازه گیری صورت گرفت و داده ها به صورت میانگین تحلیل شدند.

۲_۳_ تهیه تصاویر نمونهها

تصاویر نمونهها با استفاده از اسکنر EPSON Perfection V550 که دارای لامپ فلورسنت کاتدی سفید است، ثبت شدند. تصاویر در حالت ۲۴ بیت و در رزولوشنهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و dpi ۱۲۰۰ اسکن و با فرمت TIFF ذخیره شدند. برای انتخاب بهترین رزولوشن، همبستگی نتایج ویژگیهای حاصل از روشهای مختلف تحلیل بافتار با نتایج دستگاه iBYK-mac در رزولوشنهای گوناگون بررسی شد. در نهایت، تفکیک پذیری BYK اسکار با بالاترین میزان همبستگی، بهعنوان مقدار بهینه انتخاب گردید.

۲_۴_ پیش پردازش تصاویر

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

- ۱ـ حذف نویز با فیلتر میانگین غیرمحلی! از تابع imnImfilt برای اعمال فیلتر میانگین غیرمحلی استفاده شد. عوامل این فیلتر شامل درجه هموارسازی ۱۱٫۵^۲ ، اندازه پنجره جستجو ۲۱^۴ و اندازه پنجره مقایسه[†]۵ 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 می کند (۲۴).
- ۲ کاهش بیشتر نویز با فیلتر میانه سهبعدی: برای کهش نویزهای باقیمانده، از تابع medfilt3 با همسایگی [۹, ۳, ۳] 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

¹⁻ Non-Local Means (NLM)

²⁻ Degree of smoothing

³⁻ Search window size

⁴⁻ ComparisonWindow Size

716

ساختارهای بافتاری تصویر حفظ شوند. این فیلتر یک روش پردازش غیرخطی سیگنال است که مقدار میانه پیکسـلهای یـک ناحیـه را جایگزین مقدار پیکسل مرکزی آن ناحیه میکند. به این ترتیب، اثر نویزهای ناگهانی کاهش یافته و تصویر هموارتر میشود (۲۶، ۲۵).

۳- برجستهسازی لبهها با فیلتر سه بعدی Isobel در نهایت، برای برجستهسازی لبهها، از فیلتر Sobel سهبعدی در جهت x استفاده شد. این فیلتر با استفاده از تابع ('x', 'Sobel') تولید شد که شد. این فیلتر با استفاده از تابع ('x', 'sobel') و حالت خروجی 'same' یک هسته ۳×۳×۳ را ایجاد می کند. سپس، با استفاده از تابع imfilter و تنظیمات مرزی 'replicate' و حالت خروجی 'same'، فیلتر روی تصویر اعمال می گردد. این فرایند گرادیان شدت تصویر را در جهت x محاسبه کرده و لبههای افقی را برجسته می کند. 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 می گردند که این فرایند موجب تفکیک بهتر الگوهای بافتاری Sobel میشود (۲۷). هیچ آستانه گذاری مستقیمی روی خروجی اعماده اعمال نشد، زیرا گرادیانها مستقیماً برای تحلیل بافتار استفاده شدند.

پس از انجام مراحل پیش پردازش، تصاویر RGB به تصاویر سطح خاکستری تبدیل شدند و در ادامه روش های مختلف تحلیل بافتار، برای آنالیز تصاویر و استخراج ویژگی های بافتار استفاده شد. تمامی مراحل محاسبات پیش پردازش تصویر و تحلیل بافتار در محیط نرمافزار MATLAB R2022b انجام شد.

۲_۵_ تحلیل بافتار

تحلیل بافتار یکی از روش های ریاضی است که با بررسی تغییرات مکانی یک تصویر، اطلاعات ارزشمندی از ساختار آن استخراج می کند. در این پژوهش، برای تحلیل بافتار تصاویر اسکنشده نمونه های متالیک، از روش های مبتنی بر حوزهی بسامد و حوزه مکانی استفاده شد. در حوزه بسامد، تبدیل فوریه و تبدیل موجک^۲ هموقوعی و بسامد لبه وابسته به فاصله ⁴برای استخراج ویژگی دانه ای شدن بهره گرفته شد. لازم به ذکر است که برای تحلیل بافتار تصاویر، از تصویر کامل هر نمونه استفاده شده است؛ از آن جایی که در این روش تصویر کل پوشش تحلیل می شود، نتایج تحلیل های بافتاری به طور کامل تکرارپذیر هستند و اجرای مکرر الگوریتمهای

پردازش تصویر بر یک تصویر ثابت، منجـر بـه نتـایج کـاملاً یکسـان میگردد.

۲_۵_۱_ تبدیل فوریه

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

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

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

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

$$\phi(u,v) = \tan^{-1} \left(\frac{I(u,v)}{R(u,v)} \right) \tag{(7)}$$

در روابط فوق (I(u,v) و R(u,v) به ترتیب قسمتهای موهومی و حقیقی تبدیل فوریه را نشان میدهند (۲۹). یکی از روش های رایج تفسیر اطلاعات موجود در حوزه بسامد، استفاده از تابع چگالی طیفی توان است. چگالی طیفی توان، توزیع مقادیر توان را به عنوان تابعی از بسامد نشان میدهد و بیانگر توان یک سیگنال در یک بسامد مشخص است (۳۰). این تابع از رابطه ۴ به دست میآید.

$$PSD(u,v) = |F(u,v)|^{2} = R^{2}(u,v) + I^{2}(u,v)$$
(*)

مطالعات نشان داده است که چگالی طیفی توان به تباین شدت روشنایی در یک تصویر مربوط است (۱۹، ۱۹) و میتواند معیار مناسبی از میزان دانهای شدن بافتار پوشش های متالیک باشد. علاوه بر چگالی طیفی توان، میانگین دامنه طیف فوریه نیز میتواند بیانگر ویژگی های مربوط به بافتار تصویر باشد. در این پژوهش نیز به منظور کمی سازی دانهای شدن بافتار پوشش های متالیک با استفاده از روش تبدیل فوریه، ابتدا جهت حذف جزء جریان مستقیم، مقدار میانگین از مقدار هر پیکسل تصویر کم شد. در مرحله بعد تبدیل فوریه بر روی تصاویر بدون

^{1 -} Fourier Transform

²⁻ Wavelet Transform

³⁻ Co-Occurrence Matrix (COM)

⁴⁻ Distance-Dependent Edge Frequency

⁵⁻ Power Spectral Density (PSD)

چگالی طیفی توان به عنـوان معیـاری از دانهایشـدن بافتـار، محاسـبه شدند.

۲_۵_۲_ تبدیل موجک

تابع تبدیل موجک گسسته برای یک تصویر از حوزه مکان (f(x,y به حوزه مکان- بسامد، به صورت رابطه ۵ است:

$$\begin{split} & W^{i}_{\psi}(j,m,n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \ \psi^{I}_{j,m,n}(x,y) \\ & i = \{H,V,D\}, \quad j = 0, 1, 2, ..., J - 1, \quad m = n = 0, 1, 2, ..., 2^{j} - 1 \end{split}$$

در رابطه فوق f(x,y) بیانگر تصویر اولیه در حوزه مکان، $\Psi_{j,m,n}^{i}$ بانگر تصویر اولیه در حوزه مکان، $W_{\psi}^{i}(j,m,n)$ تابع موجک پایه و $W_{\psi}^{i}(j,m,n)$ ضرایبی هستند که جزئیات (x,y) استخراج شده از تصویر را در جهتهای افقی، عمودی و قطری تصویر نشان میدهند. اندیسهای i و i 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 پایین گذر مطابقت دارد که با اعمال فیلترهای موجک بر روی سیگنال تصویر اصلی، آن را به تصاویر فرعی تقسیم می کند 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 می شود و در نتیجه چهار تصویر فرعی ایجاد می شود. تصویر فرعی پایین گذر ((j,m,n) که تقریبی از تصویر اصلی است و تصاویر فرعی بالاگذر ((j,m,n)، ((j,m,n) سی و قطری نشان می دهند (۲۹). سپس تجزیه و تحلیل بر روی این بخش ها به صورت جداگانه انجام می شود. نشان داده شده است تصویر دارای بافتار، انرژی موجک بالایی در بسامدهای متوسط و پایین نشان داده است. توصیفگر انرژی هر تصویر فرعی را می توان با

$$C_{n} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |W(x,y)|$$
(9)

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، به عنوان تابع پایه 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 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 متداول ترین روشهای توصیف بافتار یک تصویر در حوزه مکان است. این روش بافتار تصویر با استفاده از آمار مرتبه دوم و ارتباط فضایی میان پیکسلها اندازه گیری می شود. ماتریس هموقوعی (آر) ۲۵۹ ماتریسی مربعی است که ابعاد آن برابر با تعداد سطوح شدت روشنایی موجود در تصویر است. هر درایه از این ماتریس تعداد دفعاتی را نشان می دهد که دو پیکسل با شدتهای روشنایی i و j در فاصله b و در امتداد جهت θ از یکدیگر قرار گرفته-اند. فاصله b بر حسب پیکسل بیان می شود و جهت θ می تواند °۰۰ ۵۳٫۰ °۰۰ یا °۳۵۱ باشد (۳۵–۳۳).

هارالیک^۲چهارده 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،^۲همگنی،⁵ همبستگی و تباین ^تکاربرد 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 رابطه ۷ بدست میآید (۳۴):

Energy=
$$\sum_{i} \sum_{j} P(i,j)^2$$
 (V)

Homogeneity=
$$\sum_{i} \sum_{j} \frac{P(i,j)}{1+(i-j)^2}$$
 (A)

 همبستگی میزان رابط ۹ 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=
$$\sum_{i} \sum_{j} \frac{(i-\mu_{x})(j-\mu_{y})P(i,j)}{\sigma_{x}\sigma_{y}}$$
 (9)

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

¹⁻ Haar

²⁻ Haralick

³⁻ Energy

⁴⁻ Homogeneity

⁵⁻ Correlation

⁶⁻ Contrast

 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).

$$Contrast = \sum_{i} \sum_{j} (i-j)^2 P(i,j)$$
 (1.1)

در پژوهش حاضر، جهت تشکیل ماتریس هموقوعی، پس از بررسی جهات و فواصل همسایگی مختلف، فاصله همسایگی ۵۵ = b پیکسل و جهت ۰۰ = 6 به عنوان بهترین همسایگی انتخاب شد و ویژگیهای معرفی شده برای ارزیابی بافتار محاسبه شدند.

۲_۵_۴_ بسامد لبه وابسته به فاصله

بسامد لبه وابسته به فاصله یکی از این روشهایی است که براساس 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) و چهار همسایگی مجاور به فاصله d، با استفاده از رابطه ۱۱ به دست میآید.

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

$$(1)$$

این روش اطلاعات بسیار مفیدی درباره ویژگیهای بافتار یک تصویر ارائه میکند و به عنوان معیاری برای درشتی (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 برای کمیسازی دانهایشدن بافتار، میانگین گرادیان لبهها نیز در فواصل همسایگی مختلف ۱، ۵، ۱۰ ۱۰ و ۲۰ پیکسل، محاسبه گردید.

۲_۶_ محدودیتها و ملاحظات روشها

علی رغم دقت بالای برخی روشهای تحلیل بافتار در پیش بینی 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 بسامدی بدون

تفکیک مکانی فراهم میسازد. تبدیل موجک، در حالی که تحلیل همزمان مکان و بسامد را امکان پذیر میسازد، به شدت به انتخاب تابع پایه و تعداد سطوح تجزیه وابسته است. در روش ماتریس هموقوع (GLCM)، تنظیم عواملی مانند فاصله و جهت میتواند تأثیر قابل توجهی بر نتایج داشته باشد و در بافتارهای غیرهمگن، پایداری روش کاهش یابد. همچنین روش بسامد 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 بایـد بـا توجـه بـه ویژگیهـای پوشش، کیفیت تصاویر، و هدف نهایی تحلیل صورت گیرد.

۳_ نتایج و بحث

۳ـ۱- دانهای شدن بافتار اندازه گیری شده با دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i

نتایج دانهای شدن بافتار پوشش های متالیک بدست آمده از دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر برای پوشش های متالیک نقرهای و پوشش های متالیک رنگی حاوی ۵۰ و ۳۰ درصد بن پوشه متالیک، در فامها و اندازه ذرات مختلف، به ترتیب در شکل ۲ و ۳ آورده شده است.

مقایسه 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، در حالی که در پوششهای مشکی، دانهای شدن به طور قابل توجهی کمتر است. دلیل این کاهش آن است که رنگدانههای مشکی برخلاف سایر رنگدانههای جذبی که تنها بخشی از طیف مرئی را جذب می کنند، تمامی طول موجهای نور مرئی را جذب مینمایند. این جذب گسترده باعث می شود 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 می شوند. در نتیجه، میزان دانهای شدن بافتار در حضور رنگدانههای مشکی به طور محسوسی کاهش پیدا می کند.

۲_۲_ نتایج تحلیل بافتار

پس از کمیسازی دانهای شدن بافتار پوشش های متالیک با استفاده از روش های مختلف تحلیل بافتار، نتایج آن ها با نتایج گونیواسپکتروفوتومتر 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 ای شدن بافتار پوشش های متالیک با استفاده

آمده از دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر در قسمتهای a و b شـکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۲: نمودار میلهای نتایج BYK-mac-i برای پوششهای حاوی ۵۰ درصد بن پوشه 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 پوشش های حاوی ۳۰ درصد بن پوشه 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.



شکل ۴: پراکندگی میان دانهای شدن بافتار کمی شده با تبدیل فوریه و نتایج (a ،BYK-mac-i) 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 a ۴، میانگین دامنه طیف استخراج شده از تبدیل فوریه رابطهای خطی با دادههای گونیواسیکتروفوتومتر دارد و مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین این دو ویژگی برابر ۰٫۸۳ است. همچنین، مطابق با نمودار شکل b ، رابطه میان چگالی طیفی توان و مقادیر دانهای شدن اندازه گیری شده به صورت یک رابطه خطے توصيف مي شود و مقدار ضريب همبستگي پيرسون براي آن ۲۹.۰ است. از منظر تحلیل آماری، مقادیر P-value برای هر دو ویژگی، با سطح اطمینان ۰٫۹۵، کمتر از ۰٫۰۰۰۱ بهدست آمد که نشان دهنده معناداری قوی ارتباط میان ویژگیهای استخراجشده از تبدیل فوریه و دادههای گونیواسپکتروفوتومتر است. با توجه به ضرایب همبستگی بهدستآمده، هر دو ویژگی معرفی شده توانایی مناسبی در کمی سازی دانهای شدن بافتار دارند. بااین حال، ویژگی میانگین دامنه طیف در مقایسه با چگالی طیفی توان، عملکرد مطلوبتری را ارائه میدهد. نتایج بهدست آمده از کمیسازی دانهای شدن بافتار پوششهای متالیک با روش تبدیل فوریه، شباهت زیادی با یافتههای مراجع ییشین دارد (۱۸، ۱۹، ۲۱).

نتایج بدست آمده از تبدیل فوریه نشان میدهد که پوششهای متالیک حاوی رنگدانههای درشت تر، مقادیر بالاتری از میانگین دامنه طیف و چگالی طیفی توان را نشان میدهند. تصاویر با بافتار ریزتر معمولاً انرژی بیشتری در بسامدهای بالا دارند، در حالی که بافتارهای درشت تر در بسامدهای پایین غالب هستند. این مسئله را میتوان با در نظر گرفتن نحوه توزیع بازتاب نور در سطح پوشش توضیح داد. در نمونههایی با رنگدانههای درشت تر، تغییرات شدت روشنایی در مقیاسهای فضایی بزرگ تر (فواصل بزرگ تر بین نواحی روشن و

تاریک) رخ میدهد، زیرا ذرات بزرگتر، بافتار درشتتری ایجاد میکنند. بهعلاوه، سطح مقطع مؤثر (مساحت ظاهری ذرات از دید نور ورودی) در رنگدانههای درشتتر به دلیل اندازه بزرگتر ذرات، افزایش میابد. این افزایش سطح مقطع مؤثر باعث میشود که نور بیشتری از سطح پوشش بازتاب شود، که منجر به روشن تر شدن نواحی روشن و تاریکتر شدن نواحی تاریک در تصویر میشود. در این نمونهها افزایش میابد. این عوامل منجر به افزایش دامنه کلی این نمونهها افزایش میابد. این عوامل منجر به افزایش دامنه کلی طیف فوریه میشوند. بهعبارتدیگر، اگرچه در بافتارهای ریز، اطلاعات تصویر بیشتر در بسامدهای بالا متمرکز است، اما شدت تغییرات (تباین بین نواحی روشن و تاریک) در زمانه مای دارای درنگدانههای درشت ر بیشتر بوده و تأثیر بیشتری بر دامنه طیف فوریه دارد. بنابراین، افزایش مقادیر ویژگیهای تبدیل فوریه در نمونههای دارای ذرات درشت ر نهتنها ناشی از توزیع بسامدی اطلاعات، بلکه دارای ذرات درشت ر نامی از بازتاب نور در این پوششها نیز است.

۳_۲_۲_ تبدیل موجک

برای ارزیابی عملکرد تبدیل موجک در کمیسازی ویژگی دانهای شدن بافتار، این تبدیل با شش سطح تجزیه بر تصاویر پیش پردازش شده اعمال شد و مقادیر انرژی موجک در چهار کانال تقریب، افقی، عمودی و قطری محاسبه شد. سپس همبستگی بین انرژی موجک در هر کانال و مقادیر دانهای شدن اندازه گیری شده توسط دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر بررسی شد. ضرایب همبستگی به دست آمده در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵: پراکندگی میان انرژی موجک و نتایج گونیواسپکتروفوتومتر BYK-mac-i در کانال های، 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.

خاص، مقادیر دانهای شدن به دست آمده از تحلیل بافتار به طور با توجه به نتایج ارائهشده در شکل ۵، ضرایب همبستگی پیرسون بین

مقادیر انرژی موجک و دادههای گونیواسیکتروفوتومتر در کانالهای مختلف بهترتیب برابر ۰٫۷۹ (تقریب)، ۰٫۷۹ (افقی)، ۰٫۷۸ (عمودی) و ۰٫۸۳ (قطری) است. این مقادیر نشاندهنده عملکرد مناسب تبدیل موجبک در کمی سازی دانه ای 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 می تواند به حساسیت بیشتر این کانال نسبت به ویژگی های دانهای شدن مرتبط باشد. این نتایج با یافته های آموخت و همکارانش (۲۱) هم خوانی دارد، با این تفاوت که در پژوهش آن ها هم بستگی کانال تقریب پایین تر بوده و از تنها یک سطح تجزیه در تحلیل موجک استفاده شده است.

با بررسی دقیقتر شکل ۵، مشاهده می شود که در دو نمونه

قابل توجهى بالاتر از مقادير ثبت شده توسط گونيواسـ پكتروفوتومتر است. این اختلاف بهویژه در کانالهای تقریب و افقی مشهودتر بوده و در کانالهای عمودی و قطری کاهش یافته است. بررسی بیشتر این نمونهها نشان می دهد که این انحراف عمدتاً مربوط به یوشش های نقرهای با رنگدانههای درشت تر است. از آنجایی که در تبدیل موجک، کانال تقریب اطلاعات مربوط به بسامدهای یایین را حفظ کرده و اطلاعات مربوط به بسامدهای بالاتر را در کانالهای جهتدار (افقی، عمودی و قطری) توزیع می کند، نتایج بهدست آمده حاکی از آن است که در این نمونهها، بخش عمدهای از اطلاعات بافتاری در بسامدهای یایین قرار دارد. این مسئله میتواند دلیل تخمین بیش از حد مدل در این نمونهها باشد، زیرا دانهایشدن بالا در ایـن یوشـش.ها موجـب افزایش شدت تباین و تمرکز انرژی در بسامدهای پایینتر شده و در

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۸ (۱٤۰۳)٤، ۳۰۹–۳۰۹

نتیجه، مقادیر استخراجشده از تحلیل موجک افزایش یافته است. همچنین مشاهده می شود که همبستگی ویژگیهای استخراجشده در کانالهای تقریب و افقی با شاخص دستگاهی در نمونههای با دانهای شدن پایین، قوی تر است. این موضوع می تواند به تفاوت ساختار انرژی بافتار در سطوح پایین دانهای شدن مرتبط باشد. با آن که بررسی دقیق این رفتار در محدوده هدف این مقاله نبوده است، می توان آن را به عنوان زمینهای برای توسعه های آینده در تحلیل های موجک در نظر گرفت.

۳_۲_۳_ ماتریس هموقوعی

برای کمیسازی ویژگی دانهایشدن با استفاده از ماتریس هموقوعی،

چهار ویژگی تباین، همبستگی، انرژی و همگنی مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله اول، برای تعیین بهترین زاویه و فاصله همسایگی، این ویژگیها در چهار زاویه ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه و فواصل ۱، ۵، ۱۰، ۱۰ و ۲۰ پیکسل محاسبه شدند. نتایج نشان داد که بهجز فاصله همسایگی ۱ پیکسل، تفاوت معناداری بین همسایگیهای مختلف وجود ندارد. با این حال، بیشترین ضرایب همبستگی میان ویژگیهای استخراجشده و دادههای گونیواسپکتروفوتومتر در فاصله ۱۵ پیکسل و زاویه صفر درجه بهدست آمد. بنابراین، این مقادیر بهعنوان عوامل بهینه در محاسبه ماتریس هموقوعی انتخاب شدند. نتایج ضرایب همبستگی پیرسون میان ویژگیهای ماتریس هموقوعی و مقادیر گونیواسپکتروفوتومتر در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶: پراکندگی میان ویژگیهای ماتریس هموقوعی و نتایج a ،BYK-mac-i) 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.

نتایج ضرایب همبستگی پیرسون میان نتایج دو روش، برای ویژگیهای تباین، همبستگی، انرژی و همگنی به ترتیب برابر ۲،۰۰۹ ۸۴،۰،۸۴ - و ۸۸،۰- به دست آمد، که نشان دهنده 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، درحالی که سه ویژگی همبستگی، انرژی و همگنی ابا ضرایب همبستگی بالاتر ۸، عملکرد بسیار مطلوبی نشان دادند. از نظر آماری نیز ارتباط بین دانهای شدن اندازه گیری شده با گونیواسپکترفوتومتر و ویژگیهای بهدست آمده از ماتریس هموقوعی با سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بود (۲۰۰۰ - p-value). بررسی ارتباط میان ویژگیهای ماتریس هموقوعی و نتایج اندازه گیری شده شامل موارد زیر است:

- تباین معیاری از میزان تغییرات شدت روشنایی در تصویر است. از آنجایی که در پوششهای متالیک، رنگدانههای آلومینیمی 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 جهتداربودن 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 می گیرد.
- انرژی معیاری از یکنواختی کلی تصویر است و مجموع مربعات مقادیر ماتریس هموقوعی را محاسبه میکند. برای تصاویر کاملاً یکنواخت (بدون تغییر شدت روشنایی)، انـرژی برابـر ۱ است. با افزایش دانهای شدن (ناهمواری بافتار)، تغییرات شـدت روشـنایی

بیشتر شده و انرژی کاهش مییابد، زیرا مقادیر ماتریس هموقوعی پراکندهتر میشوند. ارتباط معکوس این ویژگی با دانهایشدن 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 حساس تر است. این ویژگی با وزندهی معکوس به اختلاف شدتهای خاکستری محاسبه میشود. با افزایش اندازه ذرات و دانهای شدن بافتار، تغییرات شدت روشنایی نایکنواخت تر شده و همگنی کاهش می ابد. در دادههای این مطالعه، بالاترین میزان همبستگی در میان ویژگیهای بررسی شده مربوط به همگنی (ا۰۸۸/ ۰-) است که نشان می دهد این ویژگی دقت بالایی در توصیف دانهای شدن پوشش های متالیک دارد.

۲_۲_۴ بسامد لبه وابسته به فاصله

برای کمی سازی ویژگی دانهای شدن بافت ار پوشش های متالیک با استفاده از روش بسامد لبه وابسته به فاصله، میانگین گرادیان لبههای تصاویر نمونه ها در همسایگی های مختلف محاسبه شد. به منظور بررسی تأثیر فاصله همسایگی بر دقت این روش، گرادیان لبه ها در پنج فاصله مختلف (۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ پیکسل) اندازه گیری و میزان همبستگی آن ها با مقادیر دانه ای شدن ثبت شده توسط گونیواسپکتروفوتومتر محاسبه شد. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی در شکل a ۷ ارائه شده است. تحلیل ها نشان داد که تغییر فاصله همسایگی تأثیر قابل توجهی بر دانه ای شدن محاسبه شده ندارد، اما در فاصله ۱۰ پیکسل، بالاترین میزان همبستگی با دانه ای شدن اندازه گیری شده به دست آمد. بنابراین، این مقدار به عنوان فاصله بهینه اندازه گیری شده است.



شكل ∀: پراكندگى ميان بسامد لبه وابسته به فاصله و نتايج گونيواسپكتروفوتومتر، a) فواصل مختلف، d = 10 (b، فواصل مختلف، d) Figure 7: Distance-dependent edge frequency versus BYK-mac-i graininess, a) different distances, b) d = 10.

مطابق شکل b ۷، افزایش دانهای شدن اندازه گیری شده توسط گونیواسپکتروفوتومتر و افـزایش انـدازه ذرات رنگدانـههای متالیک، منجر به افزایش مقدار میانگین گرادیان لبههای تصویر شده است. همچنین مقدار ضریب همبستگی پیرسون در فاصله همسایگی ۱۰ پیکسل، برابر با ۸۵,۰ به دست آمد که نشاندهنده ارتباط قـوی بـین ایـن ویژگـی و دانهایشـدن اندازه گیریشـده است. عـلاوه بـر ایـن، بررسیهای آماری نیز معناداری این ارتباط را در سطح اطمینـان ۹۵ درصد (۲۰۰۰۱ – p-value) تأیید کرد.

نتایج این مطالعه نشان داد که تمامی روشهای تحلیل بافتار شامل تبدیل فوریه، تبدیل موجک، ماتریس هموقوعی و بسامد لبه وابسته به فاصله، ضرایب همبستگی قابل توجهی با دادههای دانهایشدن اندازهگیریشده توسط گونیواسپکتروفوتومتر داشتند. بهطور 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 دانهایشدن پوششهای متالیک، میتوان ویژگیهای زیر را بهعنوان شـاخصهای برتر در نظر گرفت:

- حوزه بسامد: میانگین دامنه طیف فوریه و انرژی موجـک در کانال قطری،
- حـوزه مکـان: ویژگیهـای همبسـتگی، انـرژی و همگنـی
 استخراجشده از ماتریس هموقوعی و میانگین گرادیان لبهها.

تمامی این ویژگیها ضرایب همبستگی بالاتر از ۸۲,۰ را ارائه کردند. همچنین، در میان روشهای مورد بررسی، ویژگی همگنی با ضریب همبستگی بیشتر از ۰۲,۸۷ بالاترین دقت و عملکرد را نشان داد و میتواند بهعنوان شاخص برتر برای توصیف ویژگی دانهایشدن پوششهای متالیک در نظر گرفته شود.

با توجه به نتایج بهدست آمده و قابلیت پیادهسازی روش پیشنهادی، بررسی جنبههای کاربردی این روش در محیطهای صنعتی نیز حائز اهمیت است. در شرایطی که دسترسی به تجهیزات گرانقیمت مانند گونیواسپکتروفوتومترها محدود باشد، روش مقرون به مبتنی بر اسکنر و تحلیل بافتار میتواند به عنوان ابزاری مقرون به صرفه، تکرارپذیر و قابل پیاده سازی در محیطهای صنعتی یا فرایندهای رنگ آمیزی که کنترل کیفی سریع و غیرمخرب اهمیت دارد، این روش میتواند مکملی برای ارزیابی دیداری انسان یا جایگزینی برای ابزارهای پرهزینه باشد. با این حال، لازم به ذکر است که پیاده سازی صنعتی این روش مستلزم بررسی ویژگیهای دستگاه اسکنر مورد استفاده (نظیر وضوح، دقت رنگی، دقت نوری و یکنواختی روشنایی) و انجام تنظیم مجدد عوامل الگوریتم بر اساس شرایط

تصویربرداری است، تا دقت و تکرارپذیری نتایج حفظ شود.

۴_ نتیجهگیری

در این پژوهش، چهار روش مختلف تحلیل بافتار شامل تبدیل فوریه، تبدیل موجک، ماتریس هموقوعی و بسامد لبه وابسته به فاصله برای کمیسازی ویژگی دانهایشدن پوششهای متالیک مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بهدستآمده از این روشها با دادههای اندازه گیریشده توسط گونیواسپکتروفوتومتر مقایسه شد و میزان همبستگی بین این ویژگیها تحلیل گردید.

- ۱ نتایج تبدیل فوریه نشان داد که ویژگیهای میانگین دامنه طیف و چگالی طیفی توان ارتباط قوی و معناداری با دانهای شدن دارند و از میان آنها، میانگین دامنه طیف با ضریب همبستگی ۸۴.۰۰ عملکرد بهتری ارائه داد.
- ۲ تحلیل تبدیل موجک بیانگر آن بود که انرژی موجک در کانالهای مختلف، بهویژه در کانال قطری، بهطور مؤثری قادر به شبیهسازی ویژگی دانهای شدن بافتار بوده و از دقت خوبی برخوردار است (۲۸۳ = ۲).
- ۳- ویژگیهای بهدست آمده از ماتریس هموقوعی نشان دادند که انرژی، همبستگی و همگنی با ضریب همبستگی (۸۲, < r) بالاترین میزان همبستگی را با دانهای شدن دارند، درحالی که تباین با ضریب همبستگی حدودا ۲٫۷۹کمترین میزان ارتباط را در مقایسه با سایر ویژگیهای استخراج شده از ماتریس هموقوعی نشان داد.
- ۴ـ روش بسامد لبه وابسته به فاصله نیز عملکرد مطلوبی در کمیسازی دانهایشدن داشت و مقدار میانگین گرادیان لبهها در فاصله ۱۰ پیکسل با ضریب همبستگی تقریباً ۰٫۸۸ با نتایج گونیواسپکتروفوتومتر ارتباط معنادار نشان داد.

در میان این روشها، ویژگی همگنی ماتریس هموقوعی با ضریب همبستگی ۸۸, ۰-، بالاترین دقت را در توصیف دانهای 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 بسامدی (به صورت مدل های خطی یا غیر خطی) می تواند به عنوان گامی در توسعه های بعدی این پژوهش در نظر گرفته شود.

تشکر و قدردانی

از همکاری ارزشمند شرکت رنگ و رزین خوش در تأمین خمیرهای آلومینیم و کلیه مواد مورد نیاز و همچنین آمادهسازی نمونهها، نهایت تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از شرکت محترم ایرانخودرو برای تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

ارائه دستگاه گونیواسپکتروفوتومتر برای انجام آزمونهای اندازهگیری دانهایشدن بافتار، و شرکت محترم کالاکار بـه خـاطر تـأمین خمیـر آلومینیم، صمیمانه سپاسگزاریم.

- Buxbaum G, editor. Industrial inorganic pigments. 2nd ed. John Wiley & Sons; 2008.
- Maile FJ, Pfaff G, Reynders P. Effect pigments-past, present and future. Prog Org Coat. 2005;54(3):150-163. https://doi. org/10.1016/j.porgcoat.2005.07.003.
- Streitberger HJ. Automotive paints and coatings. 2nd ed. Germany: Wiley; 2008.
- 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-COL4>3.0.CO;2-L.
- 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.
- American Society for Testing and Materials. ASTM E284-13a. Standard Terminology of Appearance. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2013.
- 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.
- American Society for Testing and Materials. ASTM E284-17. Standard Terminology of Appearance. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017.
- 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.
- Ferrero A, Bayón S. The measurement of sparkle. Metrologia. 2015;52(2):317. https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/2/317.
- American Society for Testing and Materials. ASTM Standard E284-13b. Standard Terminology of Appearance. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2013.
- 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.
- Perales E, Micó-Vicent B, Huraibat K, Viqueira V. Evaluating the Graininess Attribute by Visual Scaling for Coatings with Special-Effect Pigm Coat. 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.

۵_ مراجع

- 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 highresolution gonioreflectometer 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.

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۸ (۱٤۰۳)٤، ۳۲۴–۳۰۹

- 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, Sediyono E, Prasetyo SYJ, Huizen RR. GLCM-Based feature combination for extraction

model optimization in object detection using machine learning. J Ilm Tek Elektro Komput Dan Inform. 2024;9(4): 1196–1205. 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. 4309 314.
- 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.1972.2235 72.
- 37.Haralick RM. Statistical and structural approaches to texture. Proc. IEEE. 1979;67(5):786-804. https://doi.org/10.1109/ PROC. 1979.11328.

How to cite this article:

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;18(4):309-324. https://doi.org/ 10.30509/jcst.2025.167480.1253 [In Persian].