

Interdependence of Lightness and Geometric Attributes in Metallic Color Systems

Helma Vakili**¹, Narges Mortaji², Siamak Moradian³, Farhad Ameri*²

1- School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, P.O. Box: 57131-14399, Tehran, Iran

2- Department of Color Physics, Institute for Color, Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

3- Department of polymer and color, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 159163-4311, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10-06-2025

Accepted: 24-09-2025

Available online: 09-11-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167569.1261

Keywords:

Metallic Paints

Gloss

Lightness

DOI

ABSTRACT

Metallic coatings are highly attractive due to their visual appeal and widespread use in various industries, particularly in automotive applications. However, their complex angle-dependent optical behavior poses challenges for accurate characterization. In this study, 308 Pantone metallic samples were systematically evaluated using a spectrophotometer, a goniospectrophotometer, a goniophotometer, and a gloss meter at various angles. The results revealed that specular gloss and Reflected Specular Peak (RSPEC) exert the most significant influence on lightness, while the distinctness of the image showed weak correlation in semi-matte samples. Overall, the findings highlight that combining geometrical attributes with lightness parameters offers a reliable approach for understanding and predicting the appearance of metallic coatings in industrial applications.

*Corresponding author: * fameri@icrc.ac.ir

** vakili.helma@ut.ac.ir



بررسی ارتباط روشنایی رنگ‌های متالیک با دیگر خواص هندسی

هلما وکیلی^{۱*}، نرگس مرتجی^۲، سیامک مرادیان^۳، فرهاد عامری^۴

۱- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۵۷۱۳۱-۱۴۳۹۹

۲- دکترا، گروه پژوهشی دوباره تولید رنگ و کنترل رنگ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۳- استاد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۹۱۶۳-۴۳۱۱

۴- دانشیار، گروه پژوهشی دوباره تولید رنگ و کنترل رنگ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

چکیده

رنگ‌های متالیک به دلیل جذابیت دیداری و کاربردهای گسترده در صنایع مختلف، به‌ویژه خودروسازی، همواره مورد توجه بوده‌اند. با این حال، رفتار نوری پیچیده و وابسته به زاویه این پوشش‌ها، ارزیابی خواص آن‌ها را با چالش همراه می‌سازد. در این پژوهش، ۳۰۸ نمونه رنگ متالیک سامانه پنتون با استفاده از ابزارهای مختلف شامل طیف‌سنجی، طیف‌سنجی گونیو، گونیوفوتومتر و براقیت‌سنج در زوایای گوناگون مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که براقیت آینه‌ای و بازتابه مشخصه بیشترین تأثیر را بر روشنایی نمونه‌ها دارند، در حالی که وضوح تصویر در نمونه‌های نیمه‌مات همبستگی قابل توجهی با روشنایی نشان نداد. یافته‌ها بیانگر آن است که ترکیب داده‌های هندسی گونیوفوتومتري با شاخص‌های روشنایی می‌تواند ابزار مناسبی برای درک و پیش‌بینی ظاهر رنگ‌های متالیک در کاربردهای صنعتی فراهم کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167569.1261

واژه‌های کلیدی:

رنگ‌های متالیک

براقیت

روشنایی

وضوح تصویر

*Corresponding author: * fameri@icrc.ac.ir

** vakili.helma@ut.ac.ir



۱- مقدمه

رنگ‌های متالیک به دلیل جذابیت دیداری و جلوه درخشانی که در اثر بازتاب نور از آن‌ها ایجاد می‌شود، کاربرد فراوانی در صنایع اتومبیل‌سازی، پوشش‌های تزئینی، بسته‌بندی‌ها و صنایع تجملی و غیره دارند (۱). بنابراین اندازه‌گیری و ارزیابی دقیق ویژگی‌های ظاهری آن‌ها از اهمیت فراوانی برخوردار است. اما به دلیل رفتار پیچیده آن‌ها در برابر نور و وابستگی بسیار بالای رفتار این سیستم‌ها به خواص هندسی، این ارزیابی با چالش‌های فراوانی روبه‌رو است (۲-۴).

بررسی رابطه میان خواص نوری هندسی مانند براقیت در زوایای مختلف و روشی نمونه‌های متالیک از چند جنبه دارای اهمیت است. از دیدگاه علمی، روشی یکی از عوامل بنیادین ادراک دیداری رنگ و ظاهر است و تغییرات آن می‌تواند نشانگر تغییر در بازتاب و پراکندگی نور توسط ساختار پوشش باشد. از سوی دیگر، خواص نوری هندسی نمایانگر نحوه تعامل نور با سطح و توزیع زاویه‌ای بازتاب هستند. بنابراین، مطالعه ارتباط میان این دو دسته ویژگی، درک عمیق‌تری از سازوکارهای نوری در پوشش‌های متالیک فراهم می‌کند.

از نظر کاربردی، این رابطه برای صنایع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در صنعت خودرو، طراحی رنگ و پوشش بدنه به گونه‌ای انجام می‌شود که ترکیبی از درخشندگی بالا و یکنواختی ظاهری حاصل شود؛ در غیر این صورت تفاوت در زوایای دید مختلف، موجب کاهش کیفیت دیداری محصول خواهد شد. در بسته‌بندی و لوازم خانگی نیز، کنترل هم‌زمان روشی و خواص نوری هندسی نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد جذابیت و ارزش افزوده برای محصول دارد. به همین دلیل، ارائه یک تحلیل نظام‌مند از رابطه میان این خواص می‌تواند راهنمایی عملی برای فرمول‌بندی پوشش‌ها و انتخاب رنگ در کاربردهای صنعتی باشد.

رنگ‌های متالیک در واقع با تغییر زاویه دید یا تابش نور، دچار تغییر خواص نوری ظاهری می‌شوند. در واقع، تغییر در یک یا همه خواص ظاهری رنگ نمونه، در اثر تغییر شرایط زاویه‌ای تابش یا مشاهده، بدون تغییر در منبع نوری و مشاهده‌کننده رخ می‌دهد (۵). به منظور درک بهتر اصطلاحات مرتبط با مشخصه‌های مورد بررسی، در ابتدا این مشخصه‌ها به صورت زیر تعریف شده و سپس به بررسی ارتباط آن‌ها پرداخته خواهد شد (۶).

• براقیت^۱ - شاخص شدت انعکاس آینه‌ای

• وضوح تصویر - شاخص کیفیت بازتاب تصویر

• بازتابه مشخصه: معیاری برای سنجش شدت نور بازتابی از سطح رنگ تحت زاویه مشخص نسبت به نور تابشی

• تاری^۲: معرف میزان پراکندگی نور بازتابی که باعث کاهش وضوح تصویر می‌شود

• شاخص تغییر رنگ زاویه‌ای^۳: معیاری برای سنجش میزان تغییر رنگ و درخشندگی یک رنگ متالیک هنگام مشاهده از زوایای مختلف. براقیت طبق تعریف CIE میزان شار نور منعکس شده از سطح را نشان می‌دهد (۷). براقیت، مطابق تعریف استاندارد PSA عبارتست از خواص انعکاسی مستقیم سطح، با اثر نشان دادن انعکاس روشنی به درجات بیشتر یا کمتر است (۸). براقیت آینه‌ای^۴ یا ویژه مهم‌ترین نوع آن است که در مورد پوشش‌ها بیشتر به کار می‌رود. اجسامی که دارای براقیت زیاد هستند، در واقع توانایی آن را دارند که میزان زیادی از پرتوها را در جهت و زاویه خاصی که برابر با زاویه تابش است، نسبت به خط عمود، بازتاب نمایند. اجسام با براقیت پایین، پرتوهای نوری تابیده شده را در جهات مختلف بازتاب می‌نمایند. در مقایسه براقیت، در واقع میزان پرتوهای نوری بازتابیده شده در زاویه خاص، نسبت به پرتوهای بازتابیده شده در دیگر جهات با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند (۹). براقیت آینه‌ای یا ویژه بنا به تعریف CIE عبارتست از روشی دریافت شده از سطح که با انعکاس آینه‌ای نور از سطح همراه است (۱۰). در استاندارد ASTM، براقیت آینه‌ای را به صورت فاکتور انعکاس روشنی نسبی یک نمونه در راستای آینه‌ای تعریف کرده‌اند (۶). این کمیت را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد، بلکه تنها می‌توان پرتو بازتابش شده از سطح را در زاویه خاصی اندازه‌گیری کرد. براقیت آینه‌ای را در واقع در زوایای ۲۰ و ۶۰ درجه اندازه‌گیری می‌کنند. براقیت خاصیت بسیار مهمی در موادی مانند پوشش‌ها، پلاستیک‌ها، کاغذ و الیاف است (۱۱). میزان انعکاس آینه‌ای از رابطه فرزنل^۵ (رابطه‌های ۱ و ۲) پیروی می‌کند و به زاویه تابش θ ، ضریب شکست دو محیط در تماس با هم n_1 و n_2 و درجه قطبش نور تابیده شده، وابسته است (۱۲).

$$\rho_d = \left\{ \frac{\cos \varepsilon - \left[(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]^{1/2}}{\cos \varepsilon + \left[(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]^{1/2}} \right\} \quad (1)$$

$$\rho_s = \left\{ \frac{(n_2/n_1)^{1/2} \cos \varepsilon - \left[(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]^{1/2}}{(n_2/n_1)^{1/2} \cos \varepsilon + \left[(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]^{1/2}} \right\} \quad (2)$$

در رابطه بالا، ρ_d نشانگر پرتوهای موازی با سطح و ρ_s نشانگر پرتوهای عمود بر سطح است، که برای پرتوهای غیرقطبی مقدار

2. Haze
3. Flop Index
4. Specular Gloss
5. Fresnel Reflection

1. Gloss

انعکاس از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (۱۲).

$$\rho = \frac{\rho_s + \rho_d}{2} \quad (3)$$

برای پرتوهای معمولی که دارای زاویه تابش صفر هستند، میزان انعکاس آینه‌ای از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (۱۲).

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (4)$$

یک فاکتور تعیین کننده در ارزیابی ظاهر هر محصولی، براقیت رویه نهایی آن است (۱۳). رویه‌های براق اغلب محصولات را از نظر دیداری جذاب می‌سازند. هرچند براقیت به‌تنهایی نمی‌تواند تمام ویژگی‌های دیداری و نوری نمونه‌ها را توصیف کند، اما همراهی آن با سایر مشخصه‌های نوری و عوامل هندسی وابسته به زاویه، خصوصاً در رنگ‌های متالیک، امکان تحلیل جامع‌تری را فراهم می‌سازد. براقیت را می‌توان به صورت دیداری، با مقایسه سطوح با شدت براقیت مشابه، یا با استفاده از ابزار سنجش اندازه‌گیری کرد. دقت مقادیر اندازه‌گیری شده به شرایط مشاهده، یعنی هندسه اندازه‌گیری، بستگی دارد (۱۴).

براقیت‌سنج‌ها وسایل مناسبی برای اندازه‌گیری میزان وضوح تصویر نیستند. بنا به تعریف استاندارد ASTM وضوح تصویر عبارت است از ظاهر براقی که با وضوح تصویر شکل تشکیل شده توسط انعکاس در آن سطح شناخته می‌شود (۶). در استاندارد PSA فرانسه این عامل به این ترتیب تعریف شده است: صافی تصویر منعکس شده که با تغییرات میکروسکوپی سطح ایجاد می‌شود (۱۵). روش اندازه‌گیری وضوح تصویر در استاندارد PSA فرانسه، تاباندن دو اشعه نور عمود بر سطح و ثبت تصویر منعکس شده توسط یک دوربین است. این تصویر با شبیه‌سازی و توسط یک کابل به بخش مرکزی منتقل شده، سپس دیجیتالی می‌شود و نهایتاً توسط الگوریتم محاسباتی مورد نظر، مورد تحلیل قرار می‌گیرد (۱۵). میزان وضوح تصویر بنابر استاندارد ASTM D5767-95 طبق رابطه ۵ به دست می‌آید (۱۶).

$$DOI = \left[1 - \left(\frac{R_{os}}{R_s} \right) \right] * 100 \quad (5)$$

که در آن R_s برابر میزان انعکاس آینه‌ای و R_{os} میزان براقیت آینه‌ای در 0.2° تا 0.4° کمتر یا بیشتر از زاویه انعکاس آینه‌ای است (۱۲). در دستگاه‌های جدید میزان دانسیته نوری اندازه‌گیری می‌شود که نسبت به برآوردهای دیداری روش مناسب‌تری است. در سری جدید وسایل از یک سری دیود که در یک خط قرار دارند استفاده می‌شود. در این وسایل سطح به وسیله حرکت دستگاه اسکن شده و

میزان وضوح تصویر آن اندازه‌گیری می‌شود (۱۷).

عواملی چون براقیت، وضوح تصویر، مشخصه بازتابی و تاری می‌توانند مبین ویژگی‌های نوری یک رنگ متالیک باشند. بازتابه مشخصه پیک براقیت یک سطح را در زوایای بسیار نزدیک به آینه‌ای به‌دست می‌دهد (۱۸). وضوح تصویر قابلیت یک سطح با براقیتی بالاست تا یک تصویر واضح تشکیل دهد (مثل آینه) و بر اساس وضوح یا صراحت تصویر درباره آن قضاوت شود. تاری بیانگر وجود هاله‌ای شیری رنگ مجاور تصویر انعکاسی است. تاری سطح می‌تواند در بیشتر پوشش‌ها از جمله پوشش‌های اتومبیل، پوشش‌های پودری و سایر پوشش‌های براق مساله ساز باشد. دیده می‌شود پوشش‌های بدون تاری، انعکاس عمیق و تباین انعکاسی بالایی دارند. پوشش‌های تار که انعکاس کمتری دارند، ظاهر شیری رنگی روی سطح به نمایش می‌گذارند (۱۹).

پوست پرتقالی شدن^۲، موج‌دار شدن^۳، سوزنی شدن^۴ و موارد مشابه می‌توانند در بسیاری پوشش‌های با براقیت بالا مانند پوشش‌های اتومبیل، پوشش‌های پودری و هر صنعت دیگر که سطح باید صاف و یکنواخت باشد، ایجاد مشکل نماید. همه این موارد با گونیوفتومتر قابل اندازه‌گیری است.

مطالعات پیشین اغلب تاثیر یک یا چند عامل محدود را بررسی کرده و روی روابط بین عوامل مختلف کمتر متمرکز شده‌اند (۲۱، ۲۰). حال آن که بررسی روابط همبستگی بین این عوامل می‌تواند منجر به درک عمیق‌تری از رفتار نوری پوشش‌های متالیک شود (۲۲). در این پژوهش، با استفاده از یک پایگاه گسترده و صنعتی داده شامل ۳۰۸ نمونه متالیک پنتون به بررسی هم‌زمان و زاویه‌ای عوامل براقیت، تاری، انعکاس آینه‌ای، وضوح و مختصات رنگ پرداخته شد.

در این پژوهش، دستگاه‌های متعددی برای اندازه‌گیری خواص نوری وابسته به زاویه در رنگ‌های متالیک استفاده شد که به اساسی‌ترین آن‌ها پرداخته می‌شود.

طیف‌سنجی در استاندارد ASTM، اندازه‌گیری کمی خواص انعکاسی یا عبوری به عنوان تابعی از طول موج می‌باشد (۶). نتیجه طیف‌سنجی نمودارهای انعکاس یا عبور برحسب طول موج خواهد بود. با داشتن این منحنی، اطلاعات زیادی در مورد فام و روشنایی نمونه قابل استخراج می‌باشد.

در پوشش‌های حاوی رنگدانه‌های با جلوه‌های ویژه دیداری مانند رنگدانه‌های متالیک و صدفی^۵، در اثر تغییر شرایط زاویه‌ای تابش و مشاهده، بدون تغییر در منبع نوری و مشاهده‌کننده، یک یا همه خواص ظاهری رنگ نمونه، ممکن است تغییر کند (۶). پیچیدگی

2. Orange peel effect

3. Waviness

4. Needle-like texture

5. Pearlescent

1. Diode

روان‌فیزیکی برای ارزیابی براقیت پوشش‌های متالیک با رنگ‌ها و بافت‌های متفاوت انجام دادند. داده‌های براقیت مقیاس‌شده به صورت دیداری با اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی و مقادیر براقیت آینه‌ای ابزاری در هندسه‌های مختلف را با هم مقایسه کردند. در نهایت، با به‌کارگیری ضرایب وزنی متفاوت برای اندازه‌گیری‌ها در هر هندسه، بسته به سطح براقیت، مدلی پیشنهاد دادند که براقیت سطحی دیداری پوشش‌های متالیک را به‌طور جامع و از طریق یک شاخص عملی برپایه اندازه‌گیری‌های وابسته به هندسه توصیف کند. بدین ترتیب، هر نمونه دارای یک مقدار براقیت کلی یکتا خواهد بود که همبستگی بالایی با ارزیابی ادراکی آن در کل دامنه براقیت دارد (۲۹). تیم حاضر در پژوهش‌های قبلی، با هدف بررسی جنبه‌های هندسی ظاهر پوشش‌های خودروبی با استفاده از سه ویژگی مهم ظاهری هندسی، یعنی براقیت آینه‌ای، وضوح تصویر و پوست پرتقالی برای مجموعه‌ای از پوشش‌های خودروبی بی‌فام، نشان دادند همبستگی شگفت‌انگیزی میان براقیت آینه‌ای، وضوح تصویر و عامل موج‌های بلند (LW) دستگاه اسکن موج^۱ که به‌صورت ابزاری اندازه‌گیری شده بودند و مقادیر متناظر ارزیابی‌شده دیداری در چهار سطح آکروماتیک مورد بررسی وجود دارد (۳۰). در پژوهش دیگر، تیم حاضر با هدف بررسی اثر رنگ بر ویژگی‌های هندسی منتخب در پوشش‌های ساده غیرمتالیک، با استفاده از سه مقیاس، شامل براقیت، وضوح تصویر و پوست پرتقالی برای سه نمونه خنثی (مشکی، خاکستری و سفید) و چهار نمونه رنگی^۲ (قرمز، سبز، آبی و زرد) هرکدام در سطوح مختلف، نشان دادند ویژگی‌های رنگی ظاهر اثر معنادار نامطلوبی بر ویژگی‌های اصلی هندسی ظاهر در پوشش‌های ساده غیرمتالیک ندارند (۳۱). تیم حاضر در پژوهش اخیر، یک بررسی آزمایشی در زمینه برآورد براقیت آینه‌ای براساس داده‌های رنگ‌سنجی ارائه کرد. با انتخاب نمونه‌هایی دارای ترکیب‌های متفاوتی از روشنایی و سطوح براقیت، همبستگی و رابطه میان روشنایی در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری با مقادیر براقیت آینه‌ای اندازه‌گیری‌شده در زوایای مختلف برای نمونه‌ها، با استفاده از رگرسیون خطی و رگرسیون چندجمله‌ای مرتبه دوم ارزیابی و تحلیل شد (۳۲).

تاکنون مطالعات و تحقیقات بسیاری در زمینه پوشش‌های متالیک صورت گرفته و براقیت آنها از جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال، همان‌طور که ذکر شد، در مورد پوشش‌های متالیک بیشتر تمرکز روی براقیت آن‌ها و عوامل مرتبط با آرایش یافتگی رنگدانه‌های سطح است. بنابراین، در زمینه براقیت و ابعاد مختلف آن، تحقیقات فراوانی انجام شده و تمرکز چندانی روی

رفتار تداخل و انعکاس نور در این نوع رنگدانه‌ها موجب خواص ظاهری پیچیده پوشش‌های حاوی آن‌ها می‌شود. بررسی رفتار انتشار این‌گونه پوشش‌ها و مدل‌سازی آن بسیار پیچیده است (۲۳). در این پوشش‌ها با تغییر در هندسه اندازه‌گیری، شاهد تغییر شکل نمودارهای انعکاسی یا عبوری طیفی و در نتیجه تغییر رنگ و خواص ظاهری نمونه هستیم. در واقع، با تغییرات فام، روشنایی و اشباع مواجهیم و در اثر چرخش نمونه از بیننده و دور شدن از حالت عمود، صفحات رنگدانه‌های مسطح در لبه قرار می‌گیرند، بنابراین رنگدانه‌های جذبی موجود در پوشش اثر بیشتری از خود نشان می‌دهند (۲۴). طیف‌سنجی گونیو را اندازه‌گیری طیف در زوایای مختلف تابش و بازتابش تعریف کرده‌اند (۲۵). در حقیقت، طیف‌سنج گونیو بنا به تعریف ASTM طیف‌سنجی است که توانایی اندازه‌گیری با تغییر زاویه تابش و مشاهده را دارد و از هندسه دوسویی^۱ استفاده می‌کند و به‌عنوان طیف‌سنجی چندزاویه‌ای^۲ نیز شناخته شده است (۶). این وسیله می‌تواند، نور را در یک یا چند جهت به سطح نمونه بتاباند و نور بازگشتی را نیز با حس‌گرهایی که در مکان‌های مختلف دارد، در یک یا چند زاویه دریافت کند. بدین ترتیب، می‌توان رابطه زاویه تابش و بازتابش را با رنگ و خواص ظاهری نمونه به دست آورد. تلاش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است، به عنوان مثال، آلمن^۳ ۳۶ نمونه پوشش متالیک را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسید که روشنایی بیش از فام و خلوص در اثر تغییر زاویه تغییر می‌کند. او این تغییرات را با یک معادله درجه دوم مدل کرد. او از یک زاویه تابش یکسان (۴۵°) و سه زاویه بازتابش استفاده کرد: یک زاویه نزدیک آینه‌ای (۱۵°)، یک زاویه دور از آینه‌ای (۱۱۰°)، یک زاویه میانی (۴۵°) استفاده کرد (۲۶). سپس، گرلینگر با انجام طیف‌سنجی گونیو برای پوشش‌های متالیک نتیجه گرفت زوایای بازتابش ۲۵°، ۴۵° و ۷۰° برای تعیین خواص ظاهری کافی‌اند (۲۷). کارهای دیگری در این زمینه انجام گرفته و هر یک به نوعی مبین لزوم استفاده از زوایای مختلف در طیف‌سنجی نمونه‌های حاوی رنگدانه‌های دارای جلوه ویژه است. ندل نیز اشاره کرد که استفاده از هندسه سه زاویه‌ای برای بررسی خواص ظاهری رنگ‌های متالیک کافی است ولی برای ارزیابی خواص ظاهری رنگ‌های صدفی نیاز به استفاده از سه زاویه تابش ۱۵°، ۴۵° و ۶۵° و پنج زاویه بازتابش ۱۵°، ۳۵°، ۴۵°، ۷۰° و ۸۵° می‌باشد (۲۸). وو و همکارانش تلاش کردند تا اندازه‌گیری‌ها در سه هندسه ۲۰°، ۶۰° و ۸۵° در پوشش‌های متالیک را به صورت پیوسته و یکنواخت به هم مرتبط کنند و در عین حال دقت تخمین براقیت دیداری را نیز بهبود دهند. یک آزمایش

5. Achromatic
6. Wave Scan
7. Chromatic

1. Bidirectional geometry
2. Multi-angle Spectrophotometer
3. Alman
4. Wu

با استفاده از طیف‌سنج Macbeth Color-Eye 7000A، دو سری اندازه‌گیری یکی بدون استفاده از تله نوری با ساختار (SPIN) و در حالت دیگر با قرار دادن تله نوری با ساختار (SPEX) انجام شده و از اطلاعات انعکاس آینه‌ای، مولفه‌های XYZ محاسبه شده و اختلاف روشنایی با عامل ΔY از رابطه $Y_{in} - Y_{ex}$ محاسبه گشت. Y_{in} معرف روشنایی در حالت اولیه (بدون تله نوری) و Y_{ex} معرف روشنایی در حالت ثانویه (با استفاده از تله نوری) است. عامل Y در واقع نگاشتی ریاضی از طیف انعکاس، توزیع انرژی طیفی منبع نوری و توابع رنگ‌همانندی است. بدیهی است که مقدار آن در دو حالت SPIN (شامل مؤلفه بازتاب آینه‌ای) و SPEX (بدون مؤلفه بازتاب آینه‌ای) به دلیل حضور یا حذف بازتاب آینه‌ای تفاوت خواهد داشت. این تفاوت در استانداردها و منابع معتبر گزارش شده و اغلب به‌عنوان شاخصی از سهم براقیت در روشنایی ادراک‌شده در نظر گرفته می‌شود (۳۳، ۳۴).

با استفاده از آزمون براقیت‌سنجی توسط براقیت‌سنج Micro-TRI براقیت تحت زوایای 20° و 60° و 85° (شکل ۳) به دست آمد (۳۵).



شکل ۱: سیستم متالیک پنتون.

Figure 1: Pantone Metallic Color System.



شکل ۲: دستگاه Novo-Gloss IQ.

Figure 2: Novo-Gloss IQ Device.

روشنایی آن‌ها وجود ندارد. به همین علت، بر آن شدیم تا چنین مطالعاتی را روی روشنایی که از این منظر به آن پرداخته نشده، انجام دهیم. علاوه بر این، چنین پایگاه اطلاعاتی گسترده‌ای در هیچ یک مطالعات مشابه مورد بررسی قرار نگرفته است. بدیهی است که بانک اطلاعاتی حاصل از این اندازه‌گیری‌های گسترده، می‌تواند پایه بسیاری از تحقیقات آینده خصوصاً در زمینه هوش مصنوعی باشد. در واقع، این پژوهش با بررسی چنین گستره‌ای از نمونه‌های متالیک، به دنبال پاسخ به این سؤال است که کدام یک از عوامل نوری نقش تعیین‌کننده‌تری در روشنایی دیداری سطوح متالیک دارند. در حقیقت، بررسی رابطه میان روشنایی و خواص نوری هندسی نمونه‌های متالیک از اهمیت بالایی برخوردار است. روشنایی از مهم‌ترین و شاخص‌ترین عوامل است که توسط ناظر درک می‌شود و می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای تفسیر و پیش‌بینی رفتار خواص نوری هندسی مورد استفاده قرار گیرد. از دیدگاه کاربردی، طراحی رنگ‌ها و پوشش‌ها در صنایع خودرو، بسته‌بندی و لوازم خانگی معمولاً با هدف ایجاد روشنایی مطلوب آغاز می‌شود و سپس این روشنایی با خواص نوری هندسی هم‌خوانی داده می‌شود تا ظاهر محصول یکنواخت، جذاب و با کیفیت دیداری بالا حاصل شود.

در این پژوهش سعی نمودیم بین خواص هندسی حاصل از گونیوفوتومتر شامل تاری، انعکاس آینه‌ای، وضوح تصویر و بازتابه مشخصه با روشنایی به‌دست آمده از طیف‌سنج و طیف‌سنج گونیو در نمونه‌های متالیک سیستم پنتون رابطه‌ای بیابیم.

۲- بخش تجربی

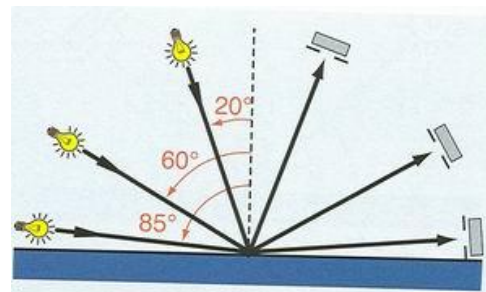
نمونه‌های سیستم متالیک پنتون که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای انجام اندازه‌گیری‌ها انتخاب شدند. این نمونه‌ها از شرکت پنتون تهیه شده و شامل ۳۰۸ نمونه کدگذاری شده بودند، که برای بررسی مشخصه‌های نوری به کار گرفته شدند. آزمون طیف‌سنج گونیو توسط دستگاه Macbeth Color-Eye 740 GL در یک زاویه تابش ثابت 45° و چهار زاویه مشاهده متفاوت 20° و 45° و 75° و 110° انجام شده و نمودارهای انعکاس طیفی در زوایای مختلف و عوامل $L^*a^*b^*$ CIE به‌دست آمد. آزمون طیف‌سنج گونیو با استفاده از دستگاه Novo-Gloss IQ (شکل ۲)، با هدف به دست آوردن عوامل براقیت، تاری، مشخصه بازتابه و وضوح تصویر تحت زوایای 20° و 60° انجام شد. گونیوفوتومتر مورد استفاده در این پژوهش، از یک آرایه دیودی به منظور اندازه‌گیری توزیع نور منعکس شده در $6^\circ \pm$ اطراف زاویه انعکاس آینه استفاده کرده و هر اندازه‌گیری شامل برش عرضی ۲۵۶ نقطه از نور منعکس شده است. با استفاده از این اطلاعات این وسیله براقیت، مشخصه بازتابه، وضوح تصویر و تاری محاسبه شد.

1. Specular Included
2. Specular Excluded

روی داده‌ها بررسی شد. منظور از مدل تک عامل این است که محور عمودی Y و محور افقی AX_1+B باشد. بدین صورت رابطه خطی بین Y و X_1 بررسی خواهد شد. در مدل دو عامل، محور عمودی Y و محور افقی AX_1+BX_2+C بوده و رابطه بین Y با ترکیب X_1 و X_2 مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل سه عامل، محور عمودی Y و محور افقی $AX_1+BX_2+CX_3+D$ بوده و رابطه بین Y با ترکیب X_1 ، X_2 و X_3 مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در نهایت در مدل چهار عامل، محور عمودی Y و محور افقی $AX_1+BX_2+CX_3+DX_4+E$ بوده و رابطه بین Y با ترکیب X_1 ، X_2 ، X_3 و X_4 بررسی قرار می‌شود. در تحلیل‌ها از R^2 به عنوان معیار اصلی مقایسه استفاده شده، زیرا در این نوع مطالعات که به بررسی رابطه خطی می‌پردازد، R^2 شاخص پذیرفته شده و متداولی برای نشان دادن کیفیت برازش مدل با داده‌های تجربی است. در واقع، R^2 نشان می‌دهد چه سهمی از تغییرات داده‌ها توسط مدل توضیح داده می‌شود و بنابراین می‌تواند معیار کافی و مناسبی برای مقایسه کارایی مدل‌ها در این پژوهش باشد.

برخلاف انتظار، با بررسی R^2 هیچ رابطه خطی بین مشخصه‌های آرایش‌یافتگی رنگدانه‌های سطح و عوامل براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر حاصل از گونیوفوتومتر و همچنین براقیت به دست آمده از دستگاه براقیت‌سنج حاصل نشد. چون برای همه نمونه‌ها نتیجه مطلوبی حاصل نشد، احتمال دادیم این مساله به دلیل گستردگی نمونه‌ها از نظر سطح روشنایی باشد. بنابراین، نمونه‌ها را بر مبنای سطح روشنایی‌شان به سه سطح کم، متوسط و بالا تقسیم کرده و در هر سطح به طور جداگانه، برازش داده‌ها بررسی شد که باز هم نتیجه‌ای به دست نیامد.

با توجه به تاثیر قابل توجه روشنایی، در مرحله بعد روشنایی را هم به عنوان عامل پنجم جدید وارد کرده و در مدل پنج متغیری، محور عمودی Y و محور افقی $AX_1+BX_2+CX_3+DX_4+EX_5+F$ بوده و رابطه بین Y با ترکیب X_1 ، X_2 ، X_3 و X_4 بررسی شد. هرچند، مانند قبل باز هم R^2 قابل قبولی حاصل نشد. علت این امر را می‌توان به براقیت پایین نمونه‌ها نسبت داد، با این که نمونه‌ها متالیک هستند اما تحت زاویه 60° توسط براقیت‌سنج، محدوده $(58,8 < \text{براقیت} < 23,6)$ را نشان دادند و در نتیجه جزو نیمه‌مات طبقه‌بندی می‌شوند. در صورتی که معیارهای FI و Λ برای نمونه‌های براق مناسبند و طبیعی است که در محدوده مات و نیمه‌مات نتایج ضعیفی حاصل شود (منظور از نتایج ضعیف پایین بودن مقادیر R^2 است). لذا ورود عوامل FI و Λ موجب عدم دستیابی به رابطه خطی خواهد شد. لذا، این نتایج نشان می‌دهد اگرچه پوشش‌های مورد بررسی همگی متالیک هستند، اما مشخصه مرتبط با آرایش‌یافتگی رنگدانه‌های متالیک لزوماً در همه متالیک‌ها با عوامل هندسی رابطه خطی ندارد و لازم است مشخصه دیگری مورد بررسی قرار گیرد. شاید مشخصه جلا که به تغییر روشنایی با زاویه مربوط است، بتواند این



شکل ۳: زوایای 20° و 60° و 85° در اندازه‌گیری براقیت آینه‌ای.

Figure 3: Angles of 20, 60, and 85 degrees in specular gloss measurement.

۳- بحث و نتایج

شاخص تغییر رنگ زاویه‌ای به عنوان یکی از عوامل که آرایش‌یافتگی پیگمنت‌های مسطح را نشان می‌دهد، با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد (۲۴، ۳۶):

$$F.I = \frac{2.69 (L_1 - L_3)^{1.11}}{L_2^{0.86}} \quad (6)$$

که در رابطه ۶، L_1 : روشنایی حاصل از گونیواسپکتروفوتومتر در زاویه 20° ، L_2 : روشنایی حاصل از گونیواسپکتروفوتومتر در زاویه 45° و L_3 : روشنایی حاصل از گونیواسپکتروفوتومتر در زاویه 110° می‌باشد. درحقیقت، برای محاسبه این عامل لازم است از نمونه در سه زاویه مختلف طیف‌سنجی کرده و نتایج روشنایی را در زوایای نزدیک به آینه‌ای (مثلاً 20°)، دور از آینه‌ای (مثلاً 110°) و زاویه بین این دو (مثلاً 45°) اندازه‌گیری نموده و براساس رابطه ۶ محاسبه کرد. مقادیر این عامل از صفر برای رنگ‌های جامد شروع شده و تا حدود ده برای رنگ‌های متالیک کاملاً جهت یافته، ادامه می‌یابد (۲۴).

نسبت روشنایی یا Λ نیز برای تشریح آرایش‌یافتگی رنگدانه‌های متالیک به کار می‌رود. این عامل از نسبت روشنایی در دو زاویه که یکی خیلی نزدیک به نرمال سطح و دیگری دور از این زاویه است، با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد (۳۷).

$$\Lambda = \frac{L_1}{L_3} \quad (7)$$

رابطه‌ای بین عوامل (شاخص تغییر رنگ زاویه‌ای و نسبت روشنایی) با داده‌های به دست آمده از گونیوفوتومتر و براقیت‌سنج در هر دو زاویه 20° و 60° بررسی شد. بدین منظور نمودارهای Λ و FI برحسب عوامل براقیت، تاری، مشخصه بازتابه و وضوح تصویر حاصل از گونیوفوتومتر و همچنین براقیت به دست آمده از دستگاه براقیت‌سنج رسم شد. نمودار FI و Λ برحسب تک متغیرهای ذکر شده، ترکیبی از دو تای آنها، ترکیب سه‌تایی و در نهایت چهارتایی آنها رسم شده و توسط نرم‌افزار data fit تمام مدل‌های خطی موجود

1. Solid Paints

FI و Δ و افزایش چشمگیر R^2 ثابت می‌کند که براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر از عوامل مؤثر در روشنایی هستند.

در واقع نتایج نشان داد R^2 به دست آمده، در بررسی رابطه روشنایی با براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر نسبت به R^2 به دست آمده، در بررسی رابطه FI و Δ با براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر از شرایط بهتری برخوردار است. اگرچه هنوز در محدوده قابل قبول برای برقراری رابطه خطی ($R^2 > 0.9$) نمی‌گنجد. هرچند به علت عدم دستیابی به R^2 مناسب، این داده‌ها گزارش نشده و تنها به مساله جهت‌دهی به انتخاب ادامه مسیر کمک می‌کند.

به نظر می‌رسد با تغییر مقیاس و جایگزینی Y ، روشنایی در سیستم CIE، به جای L^* ، روشنایی در سیستم $L^*a^*b^*$ ، CIE، شاید بتوان به نتایج بهتری رسید. بنابراین؛ در قدم بعدی رابطه معیار روشنایی Y در دو حالت شامل، حذف و اختلاف این دو روشنایی (ΔY) با براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از برازش اختلاف روشنایی با براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر به صورت ترکیب‌های تکی، دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی به ترتیب در جداول ۱ تا ۴ نشان داده شده است. مانند قبل در تک عامل وضوح تصویر همچنان رابطه ضعیف با ΔY نشان می‌دهد و تاری دارای بهترین رابطه است. در دو متغیرها همچنان براقیت و مشخصه بازتابه بهترین نتیجه را دارند و باز هم با ورود متغیر وضوح تصویر، مقادیر R^2 کاهش می‌یابد. همان‌طور که در دو جدول فوق مشخص است، اغلب سه عامل و همه چهار عامل در نمودارهای مربوط به ΔY و داده‌های طیف‌سنج گونیو R^2 بالای ۰/۹ دارند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های گونیوفوتومتر شامل براقیت، تاری، مشخصه بازتابه و وضوح تصویر می‌توانند با روشنایی رابطه خطی داشته باشند و در صورتی که روشنایی با عامل ΔY بیان شود، بهترین R^2 را حاصل خواهد نمود.

1. Luster
2. Include
3. Excluded

نقش را ایفا کند، اما چون این نمونه‌ها جلا نداشتند، معیار شاخص تغییر رنگ زاویه‌ای جوابگو نیست. به نظر می‌رسد مشخصه روشنایی مولفه مناسبی برای این هدف باشد.

بنابراین، در قدم بعدی به جای دو پارامتر FI و Δ ، معیار روشنایی (L^*)، را وارد کرده و تمام روابط فوق‌الذکر مورد بررسی قرار گرفت. منظور از روشنایی، تمامی معیارهایی است که به روشنایی مرتبط است. به طور دقیق، روشنایی حاصل از طیف‌سنج گونیو در تمامی زوایای ۲۰، ۴۵، ۷۵ و ۱۱۰ درجه، روشنایی حاصل از طیف‌سنج در دو حالت شامل Δ و حذف Δ اختلاف این دو روشنایی، به جای Y در معادلات فوق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در بررسی تک متغیری از داده‌های طیف‌سنج گونیو (L_{20} , L_{45} , L_{75} , L_{110}) بهترین R^2 متعلق به رابطه بین تاری و روشنایی بود.

در بررسی تک‌متغیرها از داده‌های طیف‌سنج (L_{in} , L_{ex} , ΔL) برخلاف روشنایی به دست آمده از طیف‌سنج گونیو، بهترین R^2 مربوط به تاری نبود و این عامل بعد از براقیت و مشخصه بازتابه جای داشت. اما باید این نکته را مد نظر داشت که مقادیر به دست آمده برای R^2 این نمودارها زیاد با هم متفاوت نبوده و تاری هم از عوامل مهم و تأثیر گذار بوده و می‌تواند رابطه خطی نسبتاً خوبی با روشنایی داشته باشد.

در مقایسه دو متغیرها با یکدیگر بهترین نتایج مربوط به داده‌های براقیت و بازتابه مشخصه بود. با افزایش تعداد عوامل از دو به سه و چهار، تفاوت آنچنان محسوسی در مقدار R^2 مشاهده نشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که این دو عامل بیشترین تأثیر را در روشنایی دارند و سایر عوامل به اندازه آنها مؤثر نیستند.

در نمودارهای رسم شده با یک عامل، وضوح تصویر رابطه بسیار ضعیفی با روشنایی نشان داد و در نمودارهای رسم شده با دو عامل، با ورود آن در همه موارد کاهش شدید R^2 مشاهده شد. نتیجه‌ای که می‌توان گرفت این است که روشنایی در این نمونه‌ها وابسته به وضوح تصویر نیست، زیرا وضوح تصویر معیار مناسبی برای نمونه‌هایی با براقیت بالا است. نمودارهای رسم شده از عوامل به دست آمده از گونیوفوتومتر و روشنایی در مقایسه با رسم نمودارهای همین عوامل با

جدول ۱: نتایج حاصل از برازش ΔY با تک پارامترهای گونیوفوتومتري در ۲۰ درجه.

Table 1: Fitting ΔY with single goniophotometric parameters at 20°.

Y	X (IN 20°)	R^2
DELTA Y	Haze	0.9
DELTA Y	RSPEC	0.85
DELTA Y	gloss by glossmeter	0.81
DELTA Y	Gloss	0.78
DELTA Y	DOI	0.02

جدول ۲: نتایج حاصل از برازش ΔY با ترکیب دوتایی عوامل گونیوفوتومتري در ۲۰ درجه.

Table 2: Fitting ΔY with the double combination of goniophotometric parameters at 20°.

Y	X (IN 20°)	R ²
DELTA Y	gloss/RSPEC	0.95
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze	0.9
DELTA Y	Haze/ RSPEC	0.9
DELTA Y	gloss/Haze	0.9
DELTA Y	Haze/ DOI	0.87
DELTA Y	gloss by glossmeter/ RSPEC	0.85
DELTA Y	DOI/ RSPEC	0.85
DELTA Y	gloss by glossmeter/ DOI	0.81
DELTA Y	gloss/DOI	0.78

جدول ۳: نتایج حاصل از برازش ΔY با ترکیب سه‌تایی عوامل گونیوفوتومتري در ۲۰ درجه.

Table 3: Fitting ΔY with the triple combination of goniophotometric parameters at 20°.

Y	X (IN 20°)	R ²
DELTA Y	gloss/DOI/ RSPEC	0.95
DELTA Y	gloss/haze/RSPEC	0.95
DELTA Y	gloss/Haze/ DOI	0.91
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ DOI	0.9
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ RSPEC	0.9
DELTA Y	Haze/ DOI/ RSPEC	0.9
DELTA Y	gloss by glossmeter/DOI/RSPEC	0.85

جدول ۴: نتایج حاصل از برازش ΔY با ترکیب چهارتایی عوامل گونیوفوتومتري در ۲۰ درجه.

Table 4: Fitting ΔY with the quadric combination of goniophotometric parameters at 20°.

Y	X (IN 20°)	R ²
DELTA Y	gloss/Haze/RSPEC/DOI	0.95
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/RSPEC/DOI	0.9

$L^*a^*b^*$ در ۲۰ درجه با عوامل براقیت، تاري، مشخصه بازتابه و وضوح تصویر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از برازش روشنایی حاصل از طیف‌سنج در ۲۰ درجه با براقیت، تاري، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر به صورت ترکیب‌های تکی، دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی به ترتیب در جداول ۵ تا ۸ نشان داده شده است.

نتایج نشان داد برخلاف حالتی که همه فام‌ها با هم مقایسه می‌شدند، در یک فام ثابت، R^2 به دست آمده، در بررسی رابطه روشنایی سیستم $L^*a^*b^*$ با عوامل براقیت، تاري، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر به محدوده قابل قبول برای برقراری رابطه خطی ($R^2 > 0.9$) بسیار نزدیک‌تر بوده و با افزایش تعداد عوامل مدل به ۰/۹۹ همگرا تر می‌شود.

با جداسازی نمونه‌های دارای روشنایی تقریباً یکسان (معیار L^* در ۶۰° در نظر گرفته شد) و بررسی رابطه تمامی معیارهای روشنایی حاصل از هر دو دستگاه طیف‌سنج گونیو و طیف‌سنج، با عوامل براقیت، تاري، مشخصه بازتابه و وضوح تصویر حاصل از گونیوفوتومتر، R^2 های مناسبی حاصل نشد.

مطلب دیگر مورد بررسی در این پژوهش، بررسی اثر فام و روشنایی روی تطابق عوامل است. با هدف بررسی تاثیر فام، برای نمونه‌هایی با فام تقریباً یکسان (کمترین میزان اختلاف بین a^* و b^*) و روشنایی متغیر، چند کارت پنتون (به شماره‌های ۱۳ c، ۱۴ c، ۲۳ c، ۲۴ c و ۲۸ c) انتخاب و رابطه روشنایی با سایر خواص هندسی روی آن‌ها بررسی شد. در ابتدا رابطه روشنایی در سیستم،

است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بررسی رابطه اختلاف روشنایی نیز مانند بررسی مقدار روشنایی در ۲۰ درجه، این بار نیز اغلب R^2 های قابل قبولی به دست آمد و با افزایش تعداد عوامل روابط کاملاً خطی شد.

سپس رابطه روشنایی در سیستم CIE در ۲۰ درجه با عوامل براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از برازش اختلاف روشنایی با براقیت، تاری، بازتابه مشخصه و وضوح تصویر به صورت ترکیب‌های تکی، دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی به ترتیب در جداول ۹ تا ۱۲ نشان داده شده

جدول ۵: نتایج حاصل از برازش L با تک عامل گونیوفتومتری در ۲۰ درجه در فام ثابت.

Table 5: Fitting Lightness with single goniophotometric parameters at 20°at constant hue.

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
L20	gloss by glossmeter	0.91	0.95	0.99	0.88	0.8	0.67
L20	gloss	0.88	0.94	0.99	0.88	0.79	0.57
L20	Haze	0.95	0.97	0.99	0.89	0.87	0.82
L20	RSPEC	0.92	0.96	0.99	0.88	0.83	0.69
L20	DOI	0.33	0.02	0.12	0.03	0.002	0.66

جدول ۶: نتایج حاصل از برازش L با ترکیب دوتایی عوامل گونیوفتومتری در ۲۰ درجه در فام ثابت.

Table 6: Fitting Lightness with double combination of goniophotometric parameters at 20°at constant hue.

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
L20	gloss by glossmeter/ Haze	0.96	0.98	0.99	0.89	0.94	0.97
L20	gloss by glossmeter/ DOI	0.97	0.94	0.99	0.96	0.89	0.7
L20	gloss by glossmeter/ RSPEC	0.92	0.98	0.99	0.89	0.87	0.75
L20	Haze/ DOI	0.99	0.98	0.99	0.95	0.94	0.82
L20	Haze/ RSPEC	0.99	0.98	0.99	0.95	0.98	0.98
L20	gloss/Haze	0.98	0.98	0.99	0.94	0.99	0.98
L20	DOI/ RSPEC	0.98	0.96	0.99	0.94	0.92	0.72
L20	gloss/DOI	0.97	0.94	0.99	0.94	0.89	0.66
L20	gloss/RSPEC	0.98	0.98	0.99	0.9	0.99	0.97

جدول ۷: نتایج حاصل از برازش L با ترکیب سه تایی پارامترهای گونیوفتومتری در ۲۰ درجه در فام ثابت.

Table 7: Fitting Lightness with triple combination of goniophotometric parameters at 20°at constant hue.

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
L20	gloss by glossmeter/ Haze/ DOI	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.97
L20	gloss by glossmeter/ Haze/ RSPEC	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99	0.98
L20	Haze/ DOI/ RSPEC	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99
L20	gloss/Haze/ DOI	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99
L20	gloss/DOI/ RSPEC	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99
L20	gloss/Haze/RSPEC	0.99	0.96	0.99	0.96	0.99	0.99
L20	gloss by glossmeter/DOI/RSPEC	0.98	0.97	0.99	0.99	0.98	0.77

جدول ۸: نتایج حاصل از برازش L با ترکیب چهارتایی عوامل گونیوفوتومتري در ۲۰ درجه در فام ثابت.

Table 8: Fitting Lightness with quadric combination of goniophotometric parameters at 20° at constant hue.

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
L20	gloss by glossmeter/ Haze/ RSPEC/DOI	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
L20	gloss/Haze/RSPEC/ DOI	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99

جدول ۹: نتایج حاصل از تغییرات Y با تک عامل گونیوفوتومتري در فام ثابت.

Table 9: Fitting DeltaY with single goniophotometric parameters at constant hue.

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
DELTA Y	gloss by glossmeter	0.95	0.96	0.99	0.99	0.61	0.91
DELTA Y	gloss	0.94	0.94	0.99	0.99	0.61	0.84
DELTA Y	Haze	0.99	0.98	0.99	0.99	0.71	0.98
DELTA Y	RSPEC	0.96	0.96	0.99	0.99	0.66	0.93
DELTA Y	DOI	0.25	0.003	0.14	0.003	0.0006	0.79

جدول ۱۰: نتایج حاصل از برازش تغییرات Y با ترکیب دوتایی عوامل گونیوفوتومتري در فام ثابت.

Table 10: Fitting DeltaY with the double combination of goniophotometric parameters at constant hue

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze	0.99	0.99	0.99	0.99	0.96	0.99
DELTA Y	gloss by glossmeter/ DOI	0.98	0.95	0.99	0.99	0.67	0.92
DELTA Y	gloss by glossmeter/ RSPEC	0.97	0.99	0.99	0.99	0.85	0.94
DELTA Y	Haze/ DOI	0.99	0.98	0.99	0.99	0.76	0.99
DELTA Y	Haze/ RSPEC	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss/Haze	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99
DELTA Y	DOI/ RSPEC	0.99	0.97	0.99	0.99	0.72	0.93
DELTA Y	gloss/DOI	0.98	0.95	0.99	0.99	0.7	0.87
DELTA Y	gloss/RSPEC	0.99	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99

جدول ۱۱: نتایج حاصل از برازش تغییرات Y با ترکیب سه تایی عوامل گونیوفوتومتري در فام ثابت.

Table 11: Fitting DeltaY with the triple goniophotometric parameters at constant hue.

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ DOI	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ RSPEC	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	Haze/ DOI/ RSPEC	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss/Haze/ DOI	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss/DOI/ RSPEC	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss/haze/RSPEC	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss by glossmeter/DOI/RSPEC	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99	0.94

جدول ۱۲: نتایج حاصل از برازش تغییرات Y با ترکیب چهارتایی عوامل گونیوفوتومتري در فام ثابت.

Table 12: Fitting DeltaY with the quadric combination of goniophotometric parameters at constant hue.

Y	X (IN 20)	R ² (13C)	R ² (14C)	R ² (23C)	R ² (24C)	R ² (26C)	R ² (28C)
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ RSPEC/DOI	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss/Haze/RSPEC/ DOI	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

همبستگی عوامل با روشنایی است. نتایج نشان داد که زوایای اندازه‌گیری نقش مهمی در حساسیت عوامل نوری دارند، به‌ویژه زمانی که زاویه مشاهده از زاویه تابش فاصله بیشتری دارد. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی بهینه آزمایش‌ها و انتخاب هندسه اندازه‌گیری مناسب برای ارزیابی رنگ‌های متالیک در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرند.

همچنین مشخص شد که رابطه بین روشنایی و عوامل نوری، در مواردی که فام نمونه‌ها تقریباً یکسان باشد، از وضوح و دقت بیشتری برخوردار است. این موضوع نشان می‌دهد که برای تحلیل دقیق‌تر، کنترل فام می‌تواند به کاهش خطای ناشی از تغییرات رنگی کمک کند. با این حال، حتی در نمونه‌هایی با تغییرات قابل توجه در فام، در صورتی که تفاوت در عامل روشنایی زیاد باشد، همچنان امکان استخراج روابط معنادار وجود دارد.

در نهایت، یافته‌های این تحقیق می‌توانند مبنایی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی روشنایی و درخشش رنگ‌های متالیک در طراحی و کنترل کیفیت پوشش‌ها در صنایع خودروسازی، لوازم خانگی و بسته‌بندی فراهم آورند. نتایج حاکی از آن است که تلفیق داده‌های حاصل از گونیوفوتومتر با شاخص Y از سیستم XYZ می‌تواند دقت بالاتری نسبت به روش‌های متداول در پیش‌بینی جلوه دیداری پوشش‌ها ارائه دهد.

علت استفاده از ΔY بدست آمده از طیف‌سنج و L20 طیف‌سنج گونیو به‌عنوان معیار روشنایی این بود که بهترین تطابق را با داده‌های گونیوفوتومتر برای کل نمونه‌ها نشان دادند و در نهایت نتیجه گرفته شد که برای کارت‌هایی با فام تقریباً ثابت نتایج خوب است. برای اطمینان از صحت کار خود چند کارت به طور تصادفی انتخاب شد به‌طوری که اختلاف زیادی در a^* و b^* داشته باشند. به عنوان نمونه کارت‌های (۷، ۳۲ و ۴۶) انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش اختلاف روشنایی با عوامل حاصل از گونیوفوتومتر در نمونه‌های تصادفی در جداول ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده است.

هرچند که اغلب تطابق داده‌ها با مدل خطی خوب بود، اما برای کارت‌های هم فام R^2 های بالاتری حاصل شد. هر چه تعداد عوامل افزوده می‌شود، R^2 ها بالاتری به دست می‌آید. به این شکل که برای مدل‌های سه و چهار عاملی اکثراً $R^2=0.99$ به دست آمد.

یافته‌های این مطالعه نه تنها بر رابطه خطی روشنایی با مشخصه‌های هندسی نمونه‌های متالیک تأکید دارند، بلکه نشان می‌دهند که شاخص‌هایی نظیر وضوح تصویر که معمولاً در نمونه‌های بسیار براق مؤثر هستند، در پوشش‌های مورد بررسی عملکرد قابل اتکایی ندارند. این موضوع حاکی از آن است که تحلیل رفتار نوری سطوح متالیک باید با در نظر گرفتن سطح براقیت انجام شود و انتخاب شاخص‌ها باید متناسب با رده‌بندی براقیت صورت پذیرد. از دیگر نکات قابل توجه، نقش کلیدی زاویه اندازه‌گیری در بهبود

جدول ۱۳: نتایج حاصل از برازش تغییرات Y با تک عامل گونیوفوتومتري در نمونه‌های تصادفی.

Table 13: Fitting DeltaY with single goniophotometric parameters in random samples.

Y	X (IN 20)	R ² (7C)	R ² (32C)	R ² (46C)
DELTA Y	gloss by glossmeter	0.83	0.89	0.42
DELTA Y	Gloss	0.86	0.85	0.49
DELTA Y	Haze	0.97	0.93	0.74
DELTA Y	RSPEC	0.92	0.89	0.59
DELTA Y	DOI	0.03	0.45	0.58

جدول ۱۴: نتایج حاصل از برازش تغییرات Y با ترکیب دوتایی عوامل گونیوفوتومتري در نمونه‌های تصادفی.

Table 14: Fitting DeltaY with the double combination of goniophotometric parameters in random samples.

Y	X (IN 20)	R ² (7C)	R ² (32C)	R ² (46C)
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze	0.99	0.95	0.84
DELTA Y	gloss by glossmeter/ DOI	0.84	0.89	0.71
DELTA Y	gloss by glossmeter/ RSPEC	0.94	0.89	0.81
DELTA Y	Haze/ DOI	0.97	0.93	0.89
DELTA Y	Haze/ RSPEC	0.99	0.99	0.84
DELTA Y	gloss/Haze	0.99	0.99	0.86
DELTA Y	DOI/ RSPEC	0.93	0.89	0.8
DELTA Y	gloss/DOI	0.87	0.85	0.75
DELTA Y	gloss/RSPEC	0.99	0.99	0.9

جدول ۱۵: نتایج حاصل از برازش تغییرات Y با ترکیب سه‌تایی عوامل گونیوفوتومتري در نمونه‌های تصادفی.

Table 15: Fitting DeltaY with the triple combination of goniophotometric parameters in random samples.

Y	X (IN 20)	R ² (7C)	R ² (32C)	R ² (46C)
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ DOI	0.99	0.95	0.98
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ RSPEC	0.99	0.99	0.98
DELTA Y	Haze/ DOI/ RSPEC	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss/Haze/ DOI	0.99	0.99	0.99
DELTA Y	gloss/DOI/ RSPEC	0.99	0.99	0.91
DELTA Y	gloss/Haze/RSPEC	0.99	0.99	0.98
DELTA Y	gloss by glossmeter/DOI/RSPEC	0.86	0.89	0.96

جدول ۱۶: نتایج حاصل از برازش تغییرات Y با ترکیب چهارتایی عامل گونیوفوتومتري در نمونه‌های تصادفی.

Table 16: Fitting DeltaY with the quadric combination of goniophotometric parameters in random samples.

Y	X (IN 20)	R ² (7C)	R ² (32C)	R ² (46C)
DELTA Y	gloss by glossmeter/ Haze/ RSPEC/DOI	0.99	0.99	0.76
DELTA Y	gloss/Haze/RSPEC/ DOI	0.99	0.99	0.78

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف بررسی ارتباط میان خواص نوری و هندسی در رنگ‌های متالیک، ۳۰۸ نمونه از سیستم رنگی پنتون با استفاده از دستگاه‌های پیشرفته طیف‌سنج گونیو، طیف‌سنج، گونیوفوتومتر و براقیت‌سنج، در زوایای مختلف مورد آزمون قرار گرفتند. تحلیل نتایج نشان داد که در میان عوامل اندازه‌گیری‌شده، براقیت و مشخصه بازتابه نقش تعیین‌کننده‌ای در درک روشنایی نمونه‌های متالیک ایفا می‌کنند. همچنین، مشخص گردید که عامل وضوح تصویر به عنوان شاخص وضوح تصویر، در نمونه‌های نیمه‌مات کارایی بالایی نداشته و

همبستگی ضعیفی با روشنایی از خود نشان داده است. با افزایش تعداد عوامل وارد شده به مدل‌های آماری از یک تا چهار، بهبود قابل ملاحظه‌ای در ضریب تعیین (R^2) مشاهده شد، به‌ویژه در زمانی که روشنایی با عامل Y سیستم XYZ بیان گردید که منجر به دقت بالاتر در پیش‌بینی شد. تحلیل اثر فام نیز نشان داد که در صورت یکنواخت بودن روشنایی، تأثیر فام در تطابق عوامل کاهش می‌یابد. اما با افزایش اختلاف روشنایی، همبستگی‌ها معنادارتر می‌شوند و می‌توانند جهت تحلیل‌های پیش‌بینی به کار گرفته شوند. در مجموع، یافته‌ها بیانگر آن است که خواص نوری نظیر براقیت و بازتابه مشخصه

پوشش‌ها حاصل گردد.

تشکر و قدردانی

از سرکار خانم مهندس خلیلی، کارشناس آزمایشگاه فیزیک رنگ پژوهشگاه رنگ، به دلیل همکاری ارزشمندشان، صمیمانه قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های قابل اعتماد جهت تخمین روشنایی ظاهری سطوح متالیک مورد استفاده قرار گیرند، به‌ویژه زمانی که از داده‌های گونیوفوتومتري بهره گرفته شود. استفاده از عامل Y نیز به‌عنوان جایگزینی دقیق‌تر برای L* توصیه می‌شود. با توجه به محدودیت موجود در طیف براقیت نمونه‌ها (اکثراً نیمه‌مات)، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، نمونه‌هایی با طیف وسیع‌تری از میزان براقیت بررسی شده و از روش‌های پیشرفته‌تر مدل‌سازی مانند رگرسیون چندمتغیره غیرخطی یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین بهره گرفته شود تا درک جامع‌تری از رفتار بصری و نوری این دسته از

۵- مراجع

- Ferguson RL, Koleske JV. Metallic pigments. In: Paint and coating testing manual: 15th ed. Gardner-Sward handbook. Philadelphia: ASTM International; 2012.
- Kirchner E, Houweling J. Measuring flake orientation for metallic coatings. Prog Org Coat. 2009;64(2):287-93. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.023>.
- Pelicon P, Klanjšek-Gunde M, Kunaver M, Simčič J, Budnar M, et al. Analysis of metallic pigments by ion microbeam. Nucl Instrum Methods Phys Res B. 2002;190(1):370-4. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)01213-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01213-7).
- Ciobanu RC, Aradoaei M, Caramitu AR, Lungu MV, Schreiner OD, Ion I. Composite paints with high content of metallic microparticles for electromagnetic shielding purposes. Coat. 2024;14:874. <https://doi.org/10.3390/coatings14070874>.
- 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](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6378(199608)21:4<292:AID-COL4>3.0.CO;2-L).
- ASTM. ASTM E284-49A. Standard terminology of appearance. West Conshohocken (PA): ASTM International; 1949.
- Bukshtab M. Methods of photometric and radiometric measurements. In: Applied photometry, radiometry, and measurements of optical losses. Dordrecht: Springer; 2012. p.49-128. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7745-6>.
- PSA. PSA D25 1413. Paint coatings – Rubbers and plastics – Measurement of gloss. Paris: PSA; 2013.
- Kiyatkin Y, Mikhailov A. Color control of interference pigments dispersed in translucent media. Color Res Appl. 2002; 27(2):83-7. <https://doi.org/10.1002/col.10032>.
- CIE. CIE 038-1977. Radiometric and photometric characteristics of materials and their measurement. Vienna: Central Bureau of the CIE; 1977.
- Hunter S, Harold RW. The measurement of appearance. 2nd ed. New York: Wiley; 1987.
- Wyszecki G, Stiles WS. Color science. 2nd ed. New York: Wiley; 1988.
- Ji W, Pointer MR, Luo RM, Dakin J. Gloss as an aspect of the measurement of appearance. J Opt Soc Am A. 2006;23(1):22-33. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.23.000022>.
- Živković V. Gloss and gloss measurement. Color Res Appl. 2004;29(3):145-50.
- PSA Peugeot-Citroën. Revêtements de peintures: Mesure de peau d'orange et de netteté d'image. Paris: PSA; 2002.
- ASTM International. (1995). ASTM D5767-95: Standard Practice for Instrumental Measurement of Distinctness-of-Image Gloss of High-Gloss Surfaces. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Lamborn J. Paint and surface coatings. New York: Wiley; 1988. <https://doi.org/10.1002/pol.1988.140260505>.
- Nadal M, Early E. Color measurements for pearlescent coatings. Color Res Appl. 2004;29(1):38-42. <https://doi.org/10.1002/col.10210>.
- Gabel P, Pfaff G. Characterisation of pearlescent pigments and special effect pigments. In: Colour technology of coatings. Hannover: Vincentz Network; 2016.202-23. <https://doi.org/10.1515/9783748600282-029>.
- Đuriković R, Mihálik A. Metallic paint appearance measurement and rendering. J Appl Math Stat Inform. 2014; 9:25-39. <https://doi.org/10.2478/jamsi-2013-0010>.
- Germer T, Nadal M. Modeling the appearance of special effect pigment coatings. Proc SPIE Int Soc Opt Eng. 2001;4447:1-10. <https://doi.org/10.1117/12.446721>.
- Eiseman L, Recker K. Pantone: The twentieth century in color. San Francisco: Chronicle Books; 2011.
- Bunda T, Simizu S, Haruki K, Isogai H, Shinada N, Sasaki Y, et al. Method in use to measure the metallic appearance. J Jpn Soc Colour Mater. 2012;43:375. <https://doi.org/10.4011/shikizai.1937.43.375>.
- McCamy CS. Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part I. Macro appearance. Color Res Appl. 1996;21(4):292-303.
- David H. Alman. Meeting Report: Symposium on Color and Appearance Instrumentation, sponsored by the Federation of Societies for Coatings Technology, Cleveland, Ohio. April 25-26, 1990.
- Kirchner E, Houweling J. Measuring flake orientation for metallic coatings. Prog Org Coat. 2009;64:287-93. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.023>.
- Gerlinger H, et al. Farbmetrische Qualitätssicherung an metallic-Lackierungen in der Automobilindustrie. Qual Zuverl. 1987;32:1-5.
- Nadal ME, Edward A, Early E. Color measurements for pearlescent coatings. Color Res Appl. 2004;29(1):38-42. <https://doi.org/10.1002/col.10210>.
- Wu M, Xu H, Wang Z, Li H. Towards a practical metric of surface gloss for metallic coatings from automotive industry. J Coat Technol Res. 2016;13(3):469-77. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9771-3>.
- Mirjalili F, Moradian S, Ameri F. Derivation of an instrumentally based geometric appearance index for the automotive industry. J Coat Technol Res. 2014;11(6):853-64. <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9608-5>.
- Mohammadalizadeh A, et al. Effect of color on some geometric

- attributes of visual appearance of non-effect coatings. *J Coat Technol Res.* 2020;17(4):949-61. <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00315-1>.
32. Safi M, Ameri F, Ansari K. Specular gloss estimation by measuring the colorimetric data produced by a reflection measurement at 8° of incidence. *Phys Scr.* 2024;99(1):1-10. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad108a>.
33. ASTM. ASTM E1164. Standard practice for obtaining spectrometric data for object-color evaluation. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017.
34. CIE. CIE Publication 15:2004. Colorimetry. Vienna: Central Bureau of the CIE; 2018.
35. PSA. PSA D25 1413. Paint coatings-rubbers and plastics-gloss measurement. Paris: PSA; 2013.
36. Hunter DH. Proc. of ISCC Williamsburg Conf. on Appearance. Williamsburg (VA); 1978.
37. Vaclave S, et al. The preparation and characteristics of pigments based on mica coated with metal oxides. *Dyes Pigments.* 2003;53:239-44. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(03\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(03)00086-X).

How to cite this article:

Vakili H, Mortaji N, Moradian S, Ameri F. Interdependence of Lightness and Geometric Attributes in Metallic Color Systems. *J Color Sci Tech.* 2025;19(2):147-161. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167569.1261> [In Persian].