



پوشش‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک: از تئوری تا کاربرد

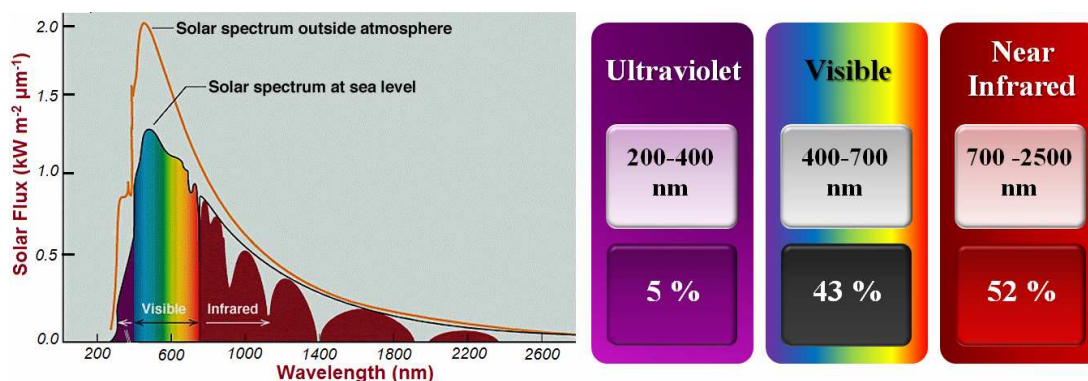
- حمیدرضا هدایتی^۱، علی اصغر صباغ الوانی^{۳*}، حسن سامعی^۴، شیما موسی‌خانی^۴، رضا سلیمی^۴، فرزانه طباطبائی^۵، علی امیری زرنندی^۲
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۳- دانشیار، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۴- دانشجوی دکتری، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۵- کارشناس ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۳ تاریخ بازبینی: ۹۲/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۴ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۳/۱۲/۶

چکیده

رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک از جمله رنگدانه‌هایی هستند که در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی به آنها اختصاص یافته است. پوشش‌های حاوی این رنگدانه‌ها با کاهش میزان جذب امواج خورشید در محدوده زیرقرمز نزدیک، بخش اعظمی از امواج گرم‌ساز نور خورشید را بازتاب می‌دهند به همین جهت کمتر گرم می‌شوند. بنابراین در محیط‌هایی مانند ساختمان‌ها، خودروها و دیگر تجهیزات شهری که از این پوشش‌ها استفاده شده است، نیاز برای مصرف انرژی به منظور خنک کردن این محیط‌ها کاهش می‌یابد. در این مقاله ابتدا عوامل موثر بر میزان انعکاس در محدوده زیرقرمز نزدیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک از نظر شیمیایی بررسی شده و روش‌های ساخت آنها معرفی می‌گردد و در پایان به کاربردهای عملی این رنگدانه‌ها پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی

رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک، رنگدانه‌های رنگی معدنی مخلوط، روش‌های ساخت شیمی تر، پوشش‌های خنک، استتار.



*Corresponding author: sabbagh_alvani@aut.ac.ir

Review of NIR reflective coatings: from theory to application, H. R. Hedayati, A. A. Sabbagh Alvani, H. Sameie, S. Moosakhani, R. Salimi, F. Tabatabaee, A. Amiri Zarandi

۱- مقدمه

جسم برحسب زبری سطح می‌تواند به دو صورت انعکاس آینه‌ای^۴ برای نمونه‌های کاملاً صاف و انعکاس پراکنده^۵ برای نمونه‌های زبرتر صورت گیرد [۶]. نوری که دچار انعکاس سطحی نشده است، پس از شکست وارد جسم می‌شود. بخشی از این نور ممکن است به‌وسیله ذرات درون جسم پشت‌پوش (مثلاً رنگدانه درون محمل) جذب شود که اگر طول موج این نور در محدوده مرئی باشد، رنگی دیده می‌شود. نور جذب نشده نیز بسته به عواملی نظیر طول موج، ضریب شکست و اندازه ذرات می‌تواند دچار انتشار شده و سبب پشت‌پوشی جسم گردد. در نهایت، نور منتشر شده از سطح خارج می‌شود و به همراه انعکاس سطحی، انعکاس کلی جسم را تعیین می‌کند. بنابراین افزایش میزان انتشار نور درون پوشش سبب افزایش میزان انعکاس نور از سطح جسم می‌گردد [۵]. برخی از بزرگترین تولیدکنندگان مواد اولیه رنگ و پوشش اقدام به تولید تجاری رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک کرده‌اند. در این میان می‌توان به شرکت‌هایی چون بی‌ای اس اف^۶، آکزونوبل^۷، هئوباخ^۸ و آلتیریس^۹ اشاره کرد که بازار تولید این محصول را در دست دارند. این شرکت‌ها انواع مختلفی از رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز را برای استفاده در کاربردهایی همچون آجرها و پوشش‌های ساختمانی، پوشش‌های خودرویی، پوشش‌های استتاری، جوهرهای امنیتی، و بطور کلی تمامی تجهیزاتی که در معرض خورشید امکان گرم‌شدن آنها وجود دارد به بازار عرضه کرده‌اند. علاوه بر این کاربردها می‌توان فیلم نازکی از این مواد بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک تهیه و بر روی شیشه‌های مورد استفاده در پنجره خودروها، ساختمان‌ها و گلخانه‌ها اعمال نمود تا ضمن شفافیت بالا در محدوده مرئی، سهم زیادی از امواج گرم‌گامای خورشید را بازتاب داده و مانع بالا رفتن درجه حرارت در این محیط‌ها گردد.

⁴ Specular reflectance

⁵ Diffuse reflectance

⁶ BASF

⁷ Akzonobel

⁸ Heubach

⁹ Altiris

رنگدانه‌ها یکی از اجزای پوشش‌ها هستند که با انتشار یا جذب نور، سهم موثری بر ظاهر رنگی پوشش‌ها داشته علاوه بر این نقش ویژه‌ای در بهبود خواص مکانیکی، نوری، ضدخوردگی، حرارتی و غیره ایفا می‌کنند [۱]. رنگدانه‌های رنگی بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک^۱، از جمله رنگدانه‌هایی هستند که بخشی از امواج برخوردی نور خورشید را در محدوده مرئی جذب می‌کنند از این رو رنگی دیده می‌شوند. از سوی دیگر در محدوده زیرقرمز نزدیک جذب بسیار کمی دارند بنابراین بخش عمده‌ای از امواج زیرقرمز که باعث ایجاد گرما در جسم می‌شود را بازتاب می‌دهند [۲]. شکل ۱ توزیع انرژی طیفی نور خورشید^۲ در خارج از جو و همچنین در سطح زمین را نشان می‌دهد. کاهش چشمگیر در شدت امواج خورشیدی در سطح زمین در مقایسه با بیرون جو، به دلیل جذب نور توسط اجزای موجود در جو می‌باشد [۳]. مطابق شکل ۱، انرژی نور رسیده به زمین در سه محدوده کلی قابل طبقه‌بندی است. ۵٪ از انرژی خورشید به محدوده فرابنفش، ۴۳٪ به محدوده مرئی و ۵۲٪ به محدوده زیرقرمز نزدیک اختصاص دارد. جذب امواج در محدوده زیرقرمز نزدیک توسط یک جسم باعث ایجاد گرما در آن می‌شود [۴]. انرژی تابشی خورشید در برخورد به یک پوشش می‌تواند جذب، منتقل یا منعکس شود. هنگامی که نور با یک جسم پشت‌پوش برخورد می‌کند، قسمتی از نور از اولین لایه‌های سطح جسم دچار انعکاس سطحی شده که مقدار این انعکاس به زاویه تابش نور و ضریب شکست پوشش بستگی دارد که برای زاویه تابش عمود میزان انعکاس سطحی از رابطه فرسnel^۳ محاسبه می‌شود (رابطه ۱) [۵].

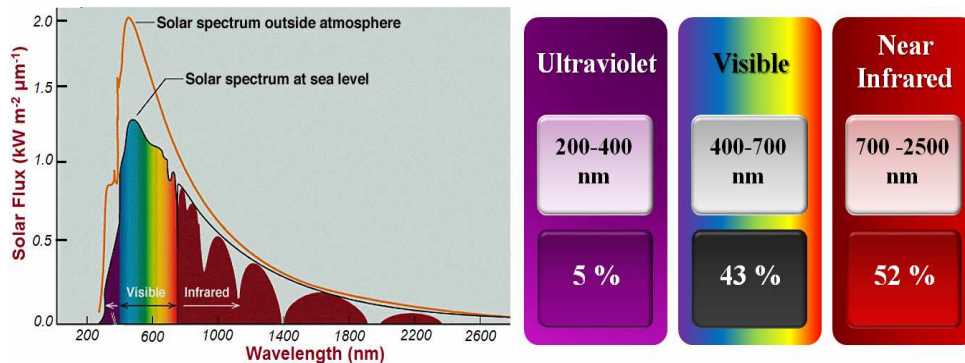
$$\rho = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (1)$$

در رابطه ۱، n_1 ضریب شکست محیط اول، n_2 ضریب شکست محیط دوم و ρ میزان نور بازتاب یافته از سطح پوشش است انعکاس از سطح یک

¹ Near infrared reflective (NIR reflective)

² Solar spectral energy distribution

³ Fresnel law



شکل ۱- توزیع انرژی طیفی نور خورشید [۳].

یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین عمر مفید پوشش‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک، مقاومت این پوشش‌ها در برابر هوازدگی^۱ می‌باشد. سه عامل اساسی در هوازدگی عبارتند از پرتوی نور خورشید، دما و رطوبت. البته در کنار این عوامل، اثرات ثانویه‌ای همچون آلاینده‌های محیطی، باران‌های اسیدی و پدیده‌های بیولوژیکی در وقوع پدیده هوازدگی موثر هستند. بنابراین پوشش‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک برای حفظ کارایی خود لازم است در برابر این عوامل محیطی بخصوص پرتوهای نور خورشید مقاومت‌های مطلوبی از خود نشان دهد. استفاده از رنگدانه‌های رنگی معدنی مختلط که در بخش ۳ معرفی می‌شوند به دلیل جذب بالای امواج پرتوی فرابنفش خورشید مانع از تخریب نوری این پوشش‌ها می‌گردد. از سوی دیگر بسیاری از واکنش‌های فوتوشیمیایی و شیمیایی - حرارتی که منجر به تخریب پوشش می‌شود در دماهای بالا صورت می‌گیرند. جذب امواج گرمای خورشید (امواج زیرقرمز) توسط پوشش دمای سطح را به شدت افزایش داده و امکان وقوع پدیده هوازدگی تقویت می‌گردد. همچنین بالا رفتن دمای سطح پوشش بر روی سرعت رشد قارچ‌ها و دیگر عوامل بیولوژیکی موثر در تخریب پوشش تاثیر می‌گذارد [۷]. بنابراین استفاده از رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک باعث بهبود مقاومت نوری پوشش می‌شود. در پایان می‌توان گفت نفوذ رطوبت و سایر آلودگی‌های محیطی سبب تغییر در رفتار انعکاسی پوشش شده و می‌تواند باعث افزایش دمای پوشش تحت تابش خورشید گردد [۸].

۲- عوامل موثر بر انعکاس یک پوشش

مهم‌ترین عاملی که خواص انعکاسی و شکل طیف انعکاسی یک ساختار شیمیایی را مشخص می‌کند میزان جذب آن در طول موج‌های مختلف است. جذب نور یا امواج الکترومغناطیس در دو سطح مطرح است. یکی در سطح الکترونی، که مولفه الکتریکی امواج الکترومغناطیس می‌تواند با الکترون‌های یک ماده برهم‌کنش داشته باشد. در یک ماده معدنی جذب امواج الکترومغناطیس می‌تواند اثرات الکترونی مختلفی در پی داشته باشد که می‌توان به اثر شکاف انرژی^۲، جهش‌های الکترونی^۳ و انتقال بار^۴ اشاره نمود. یک ماده معدنی می‌تواند طول موجی از امواج الکترومغناطیس را که معادل شکاف انرژی‌اش می‌باشد، جذب کند. همچنین جذب امواج الکترومغناطیس می‌تواند به جهش‌های الکترونی و تهییج الکترون‌ها از یک تراز به ترازهای انرژی برانگیخته منجر شود. میزان انرژی این جهش‌ها به میدان بلوری شبکه وابسته است. علاوه بر این دو مورد، بر اثر جذب امواج الکترومغناطیس، امکان انتقال بار از کاتیون فلزی به لیگاند، لیگاند به کاتیون فلزی و همچنین کاتیون فلزی به کاتیون فلزی دیگر وجود دارد. این طول موج معمولاً در محدوده فرابنفش، مرئی و زیرقرمز نزدیک است. این نوع جذب امواج

$$d = \frac{\lambda}{K} \quad (2)$$

$$K = \frac{0.90(m^2 + 2)}{n\pi(m^2 - 1)} \quad (3)$$

در رابطه ۳، n ضریب شکست رزین در پوشش است. علاوه بر ضریب شکست رنگدانه می‌توان به اندازه ذرات آن اشاره کرد. میزان انتشار نور با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد که این افزایش به یک مقدار بهینه می‌رسد. این مقدار بهینه اندازه‌ای در حدود نصف طول موج نور برخوردی

⁵ Scattering power

⁶ Hiding power

⁷ Polyvinylidene fluoride

¹ Weathering

² Band gap

³ Electronic transition

⁴ Charge transfer

آورد [۱۵]. ویشنو^{۱۰} و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۱۱ مجموعه‌ای از رنگدانه‌های معدنی بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک را معرفی کرد. در این مطالعه از ایتیریم سرات^{۱۱} به‌عنوان ساختار میزبان استفاده شد و اثر تلقیح یون‌های Mo^{6+} و Pr^{4+} بر فام (شکل ۲-a)، خواص انعکاسی در محدوده مرئی (شکل ۲-b) و همچنین در محدوده زیرقرمز نزدیک (شکل ۲-c) مورد بررسی قرار گرفت. ماده میزبان در محدوده زیرقرمز نزدیک انعکاسی در حدود ۹۳/۵٪ داشت. با توجه به شکل ۲، بر اثر تلقیح یون Mo^{6+} به جای یون Ce^{4+} در ساختار میزبان، ضمن تغییر فام نمونه از سفید عاجی به زرد، خواص انعکاسی بالایی در ناحیه زیرقرمز نزدیک (بالای ۹۰٪) به دست آمد. تلقیح یون Pr^{4+} به جای یون Ce^{4+} منجر به تغییر فام ساختار میزبان به قرمز آجری (در غلظت‌های کم) و قهوه‌ای مایل به قرمز (در غلظت‌های زیاد) می‌شود. رنگدانه قهوه‌ای حاصل، انعکاسی در حدود ۴۶٪ در ناحیه زیرقرمز نزدیک دارد که دارای ظرفیت لازم برای استفاده در پوشش‌های تیره‌رنگ بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز می‌باشد.

۴- فرآیند ساخت رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک

برای ساخت رنگدانه‌های رنگی معدنی مختلط از دو روش کلی سرامیکی [۱۶-۲۳] و شیمی تر [۲۴-۳۰] استفاده می‌شود. در روش سرامیکی، اکسید فلزات مختلف به کمک آسیاب با یکدیگر مخلوط شده، پودر حاصل تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرد که طی آن در دماهای بسیار بالا و زمان‌های بسیار طولانی مواد اولیه تجزیه شده و با یکدیگر واکنش شیمیایی می‌دهند تا یون‌های موجود در ترکیب به یک آرایش بلوری پایدار دست یابند [۳۱].

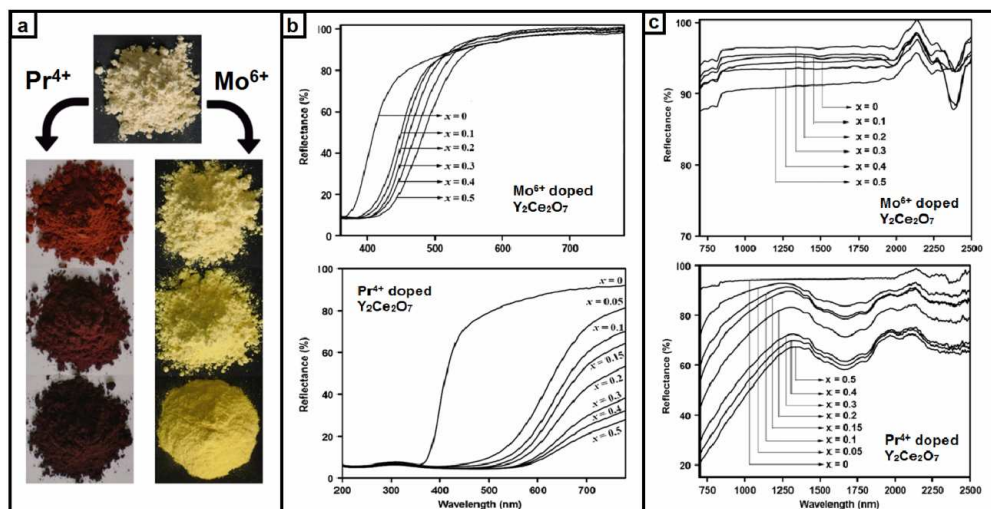
است. با کوچکتر شدن اندازه ذرات از این مقدار بهینه، میزان انتشار نور کاهش می‌یابد [۱۱]. وانگ^۱ [۱۲] و جیوانادام^۲ [۶] تاثیر ضریب شکست و اندازه ذرات را بر میزان انعکاس زیرقرمز مورد مطالعه قرار داده‌اند. ژی^۳ و همکارانش [۱۳] با ساخت نانوذرات اکسید آنتیموان به روش هیدروترمال به کمک ماده فعال سطح CTAB^۴ به ریزساختاری خود آراسته شبیه گل^۵ دست پیدا کرد که انعکاس بالاتری نسبت به ریزساختارهای سیمی^۶ و کروی^۷ از خود نشان می‌دهد.

۳- ساختار شیمیایی رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک

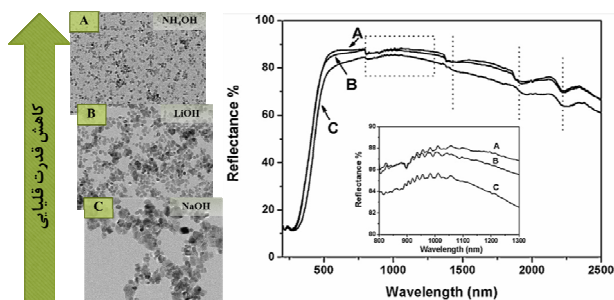
از جمله رنگدانه‌های معدنی مورد استفاده در پوشش‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک، رنگدانه‌های رنگی معدنی مختلط^۸ می‌باشد. در این رنگدانه‌ها دو یا چند اکسید یا نمک فلزی به روش‌های مختلف که در ادامه اشاره خواهد شد، با هم ترکیب می‌شوند [۱۴]. عملیات حرارتی تکمیلی^۹ در دماهای بالا، سبب تغییر آرایش یون‌های اکسیژن و کاتیون‌های فلزی به یک ساختار بلوری پایدار می‌شود. مقاومت شیمیایی و حرارتی بالا، جذب پرتوهای فرابنفش و قدرت پوشاندگی بالا از ویژگی‌های رنگدانه‌های رنگی معدنی مختلط می‌باشند. این رنگدانه‌ها اگرچه قدرت رنگی کمتری در مقایسه با رنگدانه‌های معمولی دارند، اما با انتخاب مناسب اجزای تشکیل‌دهنده رنگدانه رنگی معدنی مختلط، می‌توان خواص انعکاسی مطلوبی در محدوده زیرقرمز نزدیک به دست

- 1 Wang
- 2 Jeevanadam
- 3 Ge
- 4 Cetyl trimethyl ammonium bromide
- 5 Self-assembled flower-like morphology
- 6 Nanowire
- 7 Spherical
- 8 Complex Inorganic Color Pigments (CICPs)
- 9 Calcination

¹⁰ Vishnu
¹¹ $Y_2Ce_2O_7$



شکل ۲- اثر تلقیح یون‌های Pr^{4+} و Mo^{6+} بر فام (a) و خواص انعکاسی $Y_2Ce_2O_7$ در محدوده مرئی (b) و زیرقرمز (c) [۱۶]



شکل ۳- بهبود خواص انعکاسی بر اثر کاهش قدرت قلیایی محیط [۲۴].

در پژوهشی دیگر، وانگ^۷ و همکارانش [۲۵] نانورنگدانه نیکل تیتانات را به روش تجزیه حرارتی پیش‌ساز پلیمری^۸ تهیه کردند. در این روش، اکریلیک اسید در محیط آبی در حضور پیش‌سازهای کاتیونی و به کمک شروع کننده آمونیوم پرسولفات پلیمریزه می‌شود و مطابق شکل ۴-ا پلیمری با توزیع تصادفی و یکنواختی از کاتیون‌ها در طول زنجیره‌هایش ایجاد می‌شود. حرارت دهی این پیش‌ساز پلیمری منجر به تجزیه حرارتی آن شده و پودر نیکل تیتانات به دست می‌آید. به منظور بهبود بلورینگی پودر بدست آمده، عملیات حرارتی تکمیلی در دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ °C انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای عملیات حرارتی، خلوص بلورهای رنگدانه و همچنین اندازه بلورک‌های آن افزایش می‌یابد (۴-ب). رفتار انعکاسی رنگدانه تهیه شده در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود. انعکاس کلی نور خورشید در محدوده زیرقرمز نزدیک برای رنگدانه‌های تهیه شده در دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ °C به ترتیب ۶۲/۱ و ۵۸/۸٪ گزارش شده که این نانورنگدانه در مقایسه با رنگدانه‌های تجاری موجود که در این محدوده که انعکاسی در حدود ۳۰ تا ۴۵٪ دارند عملکردی بهتری از خود نشان می‌دهد.

⁷ Wang

⁸ Polymer pyrolysis

در این روش به دلیل ایجاد محصولات جانبی، خلوص محصول مطلوب نسبتاً پایین است. علاوه بر این دمای بالا و زمان طولانی مورد نیاز برای انجام واکنش هزینه زیادی را برای تهیه رنگدانه تحمیل می‌کند. به‌منظور غلبه بر این معایب تمایل به استفاده از روش‌های شیمی تر گسترش یافت. در این روش‌ها که می‌توان به روش‌هایی نظیر هم‌رسوبی^۱، سل-ژل^۲، پیش‌ساز پلیمری^۳، هیدروترمال^۴، احتراقی^۵ و غیره اشاره کرد، به دلیل استفاده از یک محیط مایع، اجزای تشکیل دهنده در مقیاس مولکولی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. بنابراین احتیاجی به دماهای بالا برای تشکیل فاز بلوری نخواهد بود. رنگدانه به دست آمده از این روش‌ها خلوص بلوری بالاتر، یکنواختی بیشتر و اندازه ذرات کوچکتری خواهد داشت [۳۲]. اما عمده‌ترین مزیت روش‌های ساخت شیمی تر استفاده از متغیرهای فرآیندی نظیر دما، فشار، pH، زمان، استفاده از مواد کمکی مانند فعال سطح‌ها، نوع و غلظت مواد کمکی و غیره به عنوان ابزاری برای کنترل کیفیت محصول دلخواه می‌باشد. با تغییر این متغیرهای فرآیندی می‌توان به اندازه و شکل دلخواهی از ذرات و بلورک‌ها دست پیدا کرد. در پژوهشی که توسط لیو^۶ و همکارانش صورت گرفت [۲۴] تغییر pH بر خواص انعکاسی نانوذرات بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش نانوذرات اکسید قلع به روش سل-ژل به کمک استفاده از قلیاهایی با قدرت قلیایی مختلف تهیه شدند. با کاهش قدرت قلیایی، سرعت هسته‌گذاری کاهش یافته و اندازه بلورک‌ها کوچک‌تر می‌شود. بنابراین تعداد انعکاس‌ها از مرز میان دانه‌ها افزایش یافته، عمق نفوذ نور به درون دانه‌ها و در نتیجه میزان جذب نور کاهش می‌یابد. در نهایت می‌توان گفت کاهش در اندازه بلورک‌ها منجر به کاهش در سهم جذب شده نور و افزایش در سهم بازتاب یافته نور می‌گردد [۶]. افزایش میزان انعکاس نور در محدوده زیرقرمز با کاهش قدرت قلیایی در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

¹ Co-precipitation

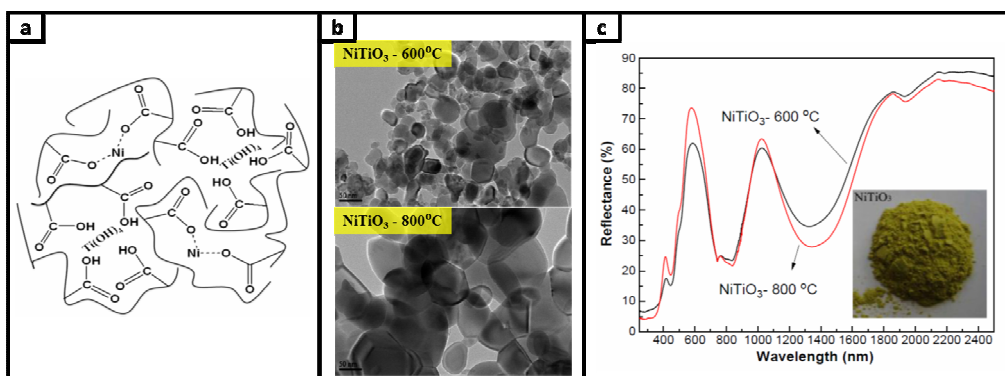
² Sol-Gel

³ Polymeric precursor

⁴ Hydrothermal

⁵ Combustion

⁶ Liu



شکل ۴- تهیه پیش‌ساز پلیمری برای تهیه نانورنگدانه نیکل تیتانات (a) و تاثیر دمای عملیات حرارتی بر اندازه بلورک‌ها (b) و خواص انعکاسی رنگدانه (c) [۲۵].

۵- کاربرد رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک

۱- پوشش‌های خنک

همرفت باعث گرم شدن محیط می‌شود. از این رو با افزایش میزان انعکاس نور از سطح جسم و همچنین افزایش سهم تابش حرارتی، گرمای منتقل شده به درون ساختمان کاهش می‌یابد. طبق تحقیقات صورت گرفته، استفاده از پوشش بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز با $TSR = 29\%$ در مقایسه با پوشش معمولی با $TSR = 12\%$ برای رنگ‌آمیزی سقف یک ساختمان با مساحت حدود ۱۰۰۰۰ متر مربع سالانه چیزی حدود ۱۵ هزار دلار در هزینه‌های انرژی برای خنک کردن ساختمان صرفه‌جویی می‌کند [۳۴]. عملکرد این پوشش‌ها در فصول گرم سال حائز اهمیت می‌باشد. چرا که در فصول سرد سال به دلیل فاصله گرفتن زاویه تابش خورشید از حالت عمود، انرژی تابشی خورشید به حداقل می‌رسد و با توجه به دمای پایین محیط، این انرژی تابشی دیگر توانایی گرم کردن ساختمان را نخواهد داشت.

کنترل ضریب تابش حرارتی وابسته به رزین مورد استفاده در پوشش است که به دلیل بالا بودن ضریب تابش حرارتی عمده رزین‌های آلی [۱۱]، بهبود این ضریب به منظور ارتقای کیفیت پوشش‌های آلی، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابراین با انتخاب پیگمنتی با قابلیت بالای انعکاس کلی نور خورشید، ضمن بهینه‌سازی عوامل فرآیندی و ساختاری در فرآیند ساخت، می‌توان پوشش‌های خنک با کارایی مطلوب به دست آورد. در شکل ۴ پوشش قهوه‌ای خنک با یک نمونه پوشش قهوه‌ای استاندارد مقایسه شده است [۳۵]. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، میزان بازتاب کلی نور خورشید برای نمونه خنک ۲۷٪ و برای نمونه استاندارد ۸٪ است که همین امر موجب شده تا در شرایط مشابه، پوشش خنک دمای سطحی کمتری (36°C) در مقایسه با نمونه استاندارد (45°C) داشته باشد. علاوه بر این به دلیل استفاده از یک نوع رزین در پوشش، ضریب تابش حرارتی برای هر دو نمونه یکسان است.

اثر جزیره گرمایی^۱ پدیده‌ای است که در مراکز شهرهای شلوغ رخ می‌دهد که طی آن امواج تابشی خورشید توسط ساختمان‌ها و تجهیزات شهری جذب شده و منجر به افزایش دمای شهرها و نهایتاً افزایش دمای کره زمین می‌شود. افزایش دمای شهری همچنین تقاضا برای مصرف انرژی به منظور خنک کردن فضای درون ساختمان‌ها را افزایش داده که علاوه بر تحمیل هزینه‌های بالای انرژی اثرات مخرب زیست محیطی را به دنبال خواهد داشت. استفاده از پوشش‌های خنک^۲، از مناسب‌ترین راهکارها برای کاهش اثر جزیره گرمایی است [۳۳]. مشخصه پوشش‌های خنک بالا بودن انعکاس کلی نور خورشید^۳ در محدوده زیرقرمز نزدیک و همچنین بالا بودن ضریب تابش حرارتی (TSR)^۴ می‌باشد. انعکاس کلی نور خورشید، توانایی یک سطح برای بازتاب امواج خورشید است که بیان می‌کند یک سطح چه مقدار از انرژی خورشیدی را بازتاب می‌کند [۳۳] و از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$TSR = \frac{\sum_{\lambda} \rho_{\lambda} E_{\lambda}}{\sum_{\lambda} E_{\lambda}} = \frac{\int \rho_{\lambda} E_{\lambda}}{\int E_{\lambda}} \quad (4)$$

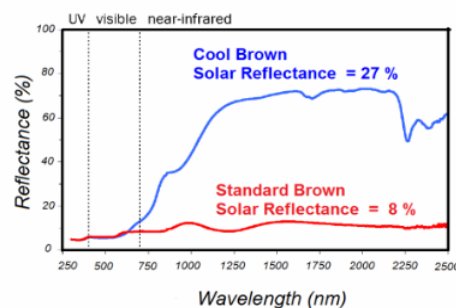
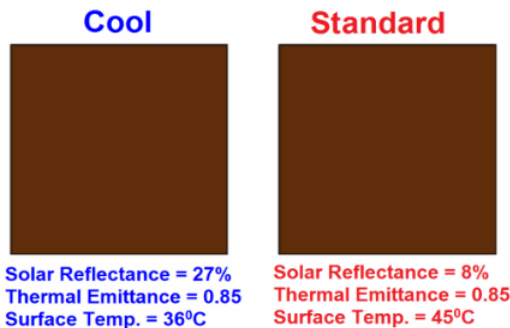
در این رابطه، E_{λ} توزیع انرژی طیفی خورشید است که در شکل ۱ به آن اشاره شد و ρ_{λ} میزان نور بازتاب یافته از سطح به ازای طول موج λ است. چنین پوشش‌هایی علاوه بر بازتاب کلی بالای نور خورشید، لازم است ضریب تابش حرارتی بالایی داشته باشند. ضریب تابش حرارتی که با ε نشان داده می‌شود، مشخصه‌ای است که نشان می‌دهد یک سطح در مقایسه با یک جسم سیاه ایده‌آل با دمای مشابه، چه میزان از انرژی جذب شده را از طریق تابش از دست می‌دهد که مقدار آن بین ۰ تا ۱ می‌باشد [۳۴]. انرژی برخوردی نور خورشید به پوشش‌های ساختمانی در صورت عدم انعکاس و یا عدم تابش حرارتی، از طریق هدایت حرارتی و یا

¹ Heat Island Effect

² Cool Paints

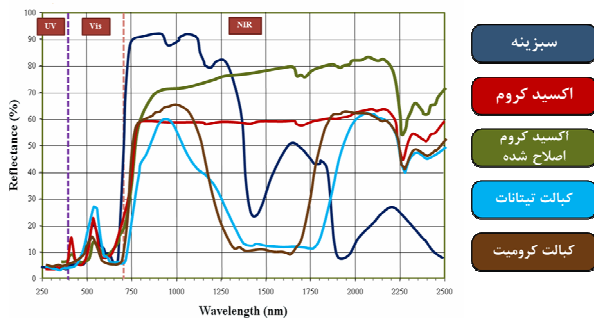
³ Total Solar Reflectance

⁴ Emittance



شکل ۵- بهبود خواص انعکاسی و کاهش دمای سطحی پوشش‌های خنک در مقایسه با پوشش‌های معمولی با فام مشابه [۳۵]

کبالت تینانات راهکار دیگری برای تهیه رنگدانه‌های سبز بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک است که خواص انعکاسی مشابه با سبزینه دارد [۳۴].



شکل ۶- مقایسه طیف انعکاسی رنگدانه‌های سبز با رنگدانه سبزینه [۳۴].

۶- نتیجه‌گیری و چشم انداز

به دلیل قیمت بالای انرژی لازم برای خنک‌کردن محیط‌های ساختمانی، مطالعات روزافزونی در زمینه تهیه رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک صورت گرفته است. از دیگر کاربردها این رنگدانه‌ها می‌توان به پوشش‌های استتاری که خواص انعکاسی مشابهی چه در محدوده زیرقرمز و چه در محدوده مرئی با محیط پس زمینه فراهم می‌آورد، اشاره نمود. در این مطالعه، اصول فیزیکی موثر بر خواص انعکاسی پوشش‌ها بویژه در محدوده زیرقرمز نزدیک، مورد بررسی قرار گرفت. میزان انعکاس پرتوهای زیرقرمز از سطح یک پوشش با تنظیم اندازه ذرات و ضریب شکست، قابل کنترل است. علاوه بر این، انتخاب مناسب مواد اولیه در تهیه رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از روش‌های شیمی تر منجر به ساخت رنگدانه‌هایی با خلوص بالاتر، یکنواختی بیشتر و اندازه ذرات کوچک‌تر می‌گردد. امید است با انتخاب روش مناسب ساخت، همچنین بهبود عوامل فرآیندی و ساختاری، شاهد پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه تولید صنعتی رنگدانه‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک باشیم.

۲- پوشش‌های استتار

یکی دیگر از کاربردهای پوشش‌های بازتاب‌دهنده امواج زیرقرمز نزدیک، پوشش‌های مورد استفاده به منظور استتار^۱ به ویژه در تجهیزات نظامی است. استتار، هنر فریب‌دادن مشاهده‌کننده در آشکارسازی، شناسایی و تمییز اشیا در محیط‌های مختلف است. استتاری موفق است که با انتخاب رنگدانه‌هایی مناسب علاوه بر رنگ همانندی در محدوده مرئی امواج الکترومغناطیس، رفتار انعکاسی مشابهی در محدوده زیرقرمز نزدیک با محیط پس زمینه پدید آید. چنانچه امواج زیرقرمز نزدیک توسط پوشش جذب شود، انرژی درونی آن افزایش یافته و موجب افزایش تابش حرارتی پوشش در محدوده زیرقرمز حرارتی می‌گردد. از آنجایی که حسگرهای حرارتی، رفتار تابشی اشیا در محدوده زیرقرمز حرارتی را آشکارسازی می‌کنند، از این رو اشیا می‌توانند توسط حسگرهای حرارتی شناسایی شوند. بنابراین با افزایش میزان بازتاب در محدوده زیرقرمز نزدیک جسم کمتر گرم شده و امکان تشخیص جسم توسط حسگرهای حرارتی کاهش می‌یابد [۳۶، ۳۷]. پوشش‌های مورد استفاده در مناطق جنگلی می‌بایست خواص انعکاسی مشابه با سبزینه^۲ داشته باشند. سبزینه ماده رنگزای سبزی است که عامل ایجاد رنگ سبز در گیاهان است. همچنین این ماده رنگزا، انعکاس بالایی در ناحیه زیرقرمز نزدیک دارد. به همین دلیل مناطق پوشیده شده با درخت عموماً خنک‌تر از نواحی مجاور است [۳۷]. بسیاری از رنگدانه‌های سبز، رنگی مشابه سبزینه در پوشش ایجاد می‌کند اما جذب قوی امواج الکترومغناطیس در محدوده زیرقرمز نزدیک برای این رنگدانه‌ها، استفاده از آنها را برای کاربردهای استتاری محدود کرده است. شکل ۵ طیف انعکاسی سبزینه را با تعدادی از رنگدانه‌های سبز مقایسه می‌کند. اکسید کروم متداول‌ترین رنگدانه سبز در کاربردهای نظامی است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، اکسید کروم اگرچه انعکاس بالایی در ناحیه زیرقرمز نزدیک دارد، اما اختلاف آن با طیف انعکاسی سبزینه نسبتاً قابل توجه است که با اصلاحاتی بر روی اکسید کروم (استفاده از اکسید آلومینیم و تیتانیوم و دیگر اکسیدهای فلزی) می‌توان انعکاس رنگدانه را به انعکاس سبزینه نزدیک کرد. استفاده از رنگدانه‌های اسپینل کبالت کرومیت و

¹ Camouflage

² Chlorophyll

۷- مراجع

1. A. Bendiganavale, V. Malshe, "Infrared reflective inorganic pigments", Recent Pat. on Chem. Eng. 1, 67-79, 2008.
2. G. M. Revel, M. Martarelli, M. A. Bengochea, A. Gozalbo, M. Orts, A. Gaki, M. Gregou, M. Taxiarchou, A. Bianchin, M. Emiliani, "Nanobased coatings with improved NIR reflecting properties for building envelope materials: Development and natural aging effect measurement", Cement Concrete Comp. 36, 128-135, 2013.
3. D. R. Myers, "Solar radiation resource assessment for renewable energy conversion", Comprehensive Renewable Energy, Volume 1: Photovolt. Sol. Energy. 1, 213-237, 2012.
4. R. Levinson, P. Berdahl, H. Akbari, "Solar spectral optical properties of Pigments-part I: Model for Deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and Reflectance measurements", Sol. Energ. Mat. Sol. C. 89, 319-349, 2005.
5. R. McDonald, "Colour Physics for Industry". 2nd Ed., Society of Dyers and Colourists, Bradford, 1997.
6. P. Jeevanandam, R. Mulukutla, M. Phillips, S. Chaudhuri, L. Erickson, K. Klabunde, "Near infrared reflectance properties of metal oxide nanoparticles", J. Phys. Chem. C. 111, 1912-1918, 2007.
7. س. م. کثیریه، ف. رضایی، "هوازدگی رنگ‌ها و پوشش‌ها"، انجمن خوردگی ایران، تهران، ۱۳۸۸.
8. A. Synnefa, M. Santamouris, I. Livada, "A study of the Thermal performance of Reflective coatings for the Urban environment", Sol. Energy. 80, 968-981, 2008.
9. K. Nassau, "The physics and chemistry of color: The fifteen causes of color", 2nd Ed., Wiley-Interscience, 2001.

10. J. Huheey, E. Keiter, R. Keiter "Inorganic chemistry principles of Structure and Reactivity", 4th ed, Vol 2, USA, Harper Collins College Publishers, **1993**.
11. R. Brady, V. Wake, "Principles and formulations for organic coatings with tailored infrared properties", *Prog. Org. Coat.* 20, 1-25, **1992**.
12. Z. Wang, J. Liu, F. Wang, X. Yu, "A facial one-pot route synthesis and characterization of Y-Stabilized Sb₂O₃ solar reflective thermal insulating coatings", *Mater. Chem. Phys.* 130, 466-470, **2011**.
13. S. Ge, X. Yang, Q. Shao, Q. Liu, T. Wang, L. Wang, X. Wang, "Self-Assembled flower-like antimony trioxide microstructures with High infrared reflectance performance", *J. Solid State Chem.* 200, 136-142, **2013**.
14. M. Zubielewicz, E. Tarnawska, A. Iusarczy, E. Langer, "Prediction of heat build-up of solar reflecting coatings based on physico-chemical properties of complex inorganic colour pigments (CICPs)", *Prog. Org. Coat.* 72, 65-72, **2011**.
15. J. White. "Complex inorganic color pigments: An overview in E. B. Faulkner, R. J. Schwartz (Eds.), *High Performance pigments*", Wiley-VCH, **2009**.
16. V. Vishnu, M. Reddy, "Near-Infrared reflecting inorganic pigments based on molybdenum and praseodymium doped yttrium cerate: synthesis, characterization and optical properties", *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 95, 2685-2692, **2011**.
17. G. George, V. Vishnu, M. Reddy, "The synthesis, characterization and optical properties of silicon and praseodymium doped Y₆MoO₁₂ compounds: environmentally benign inorganic pigments with high NIR reflectance", *Dyes Pigments.* 88, 109-115, **2011**.
18. S. Sangeetha, R. Basha, K. J. Sreerama, S. N. Sangilimuthu, B. U. Nair, "Functional pigments from chromium (III) oxide nanoparticles". *Dyes Pigments.* 94, 548-552, **2012**.
19. K. J. Sreeram, C. P. Aby, B. U. Nair, T. Ramasami, "Colored cool colorants based on rare earth metal ions", *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 92, 1462-1467, **2008**.
20. T. Thongkanluang, T. Kittiauchawal, P. Limsuwan, "Preparation and characterization of Cr₂O₃-TiO₂-Al₂O₃-V₂O₅ green pigment", *Ceram. Int.* 37, 543-548, **2011**.
21. T. Thongkanluang, P. Limsuwan, T. Kittiauchawal, "Preparation and application of high near-infrared reflective green pigment for ceramic tile roofs", *Int. J. Appl. Ceram. Tec.* 8(6), 451-458, **2011**.
22. T. Thongkanluang, N. Chirakanphaisam, P. Limsuwan, "Preparation of NIR reflective brown pigment", *Procedia Eng.* 32, 895-901, **2012**.
23. T. R. Sliwinski, R. A. Pipoly, R. P. Blonski, "Infrared reflective color pigment". US Patent No. 6, 454, 848 (B.2), **2002**.
24. J. Liu, Y. Lu, J. Liu, X. Yang, X. Yu, "Investigation of near infrared reflectance by tuning the shape of SnO₂ nanoparticles", *J. Alloy Compd.* 496, 261-264, **2010**.
25. J. Wang, Y. Byon, S. Mei, "Synthesis and characterization of NiTiO₃ yellow nano pigment with high solar radiation reflection efficiency", *Powder Technol.* 235, 303-306, **2013**.
26. Y. Li, S. Mei, Y. Byon, J. Wang, G. Zhang, "Highly solar radiation reflective Cr₂O₃-3TiO₂ orange nanopigment prepared by a polymer-pyrolysis method", *ACS sustainable chem. Eng.* 2 (2), 318-321, **2014**.
27. A. Han, M. Zhao, M. Ye, J. Liao, Z. Zhang, N. Li, "Crystal structure and optical properties of YMnO₃ compound with high near-infrared reflectance", *Sol. Energy.* 91, 32-36, **2013**.
28. A. Han, M. Ye, M. Zhao, J. Liao, T. Wu, "Crystal structure, chromatic and Near-Infrared reflective properties of Iron doped YMnO₃ compounds as colored cool pigments", *Dyes Pigments.* 99, 527-530, **2013**.
29. L. Yuan, X. Weng, W. Du, J. Xie, L. Deng, "Optical and magnetic properties of Al/Fe₃O₄ core-shell low infrared emissivity pigments", *J. Alloy Compd.* 583, 492-497, **2014**.
30. M. Zhao, A. Han, M. Ye, T. Wu, "Preparation and characterization of Fe³⁺ doped Y₂Ce₂O₇ pigments with high near-infrared reflectance", *Sol. Energy.* 97, 350-355, **2013**.
31. M. N. Rahaman, "Ceramic processing and Sintering". 2nd Ed., Marcel Dekker Inc, **2003**.
32. Q. Pham, C. Bohnke, M. Crosnier-Lopez, O. Bohnke, "Synthesis and characterization of nanostructured fast ionic conductor Li_{0.30}La_{0.56}TiO₃", *Chem. Mater.* 18, 4385-4392, **2006**.
33. M. Santamouris, A. Synnefa, T. Karlessi, "Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions", *Sol. Energy.* 85, 3085-3102, **2011**.
34. T. Dettrrie, D. Swiler, "Infrared reflecting complex inorganic color pigments in E. B. Faulkner, R. J. Schwartz (Eds.), *High performance pigments*", Wiley-VCH, **2009**.
35. A. Synnefa, M. Santamouris, K. Apostolakis, "On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment", *Sol. Energy.* 81, 488-497, **2007**.
36. L. V. Wake, R. F. Brady, "Formulating infrared coatings for defence applications", DSTO Materials Research Laboratory, **1993**.
37. K. Gupta, A. Nishkam, N. Kasturiya, "Camouflage in the non-visible region", *J. Ind. Text.* 31, 27-42, **2001**.