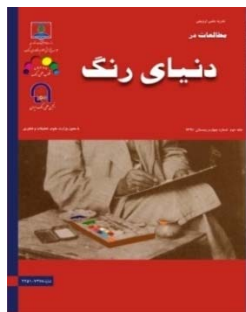


مقاله پذیرفته شده



مواد نورتاب طبیعی و مصنوعی: راهکاری نوین برای توسعه پایدار در صنعت رنگ و پوشش

آیسان وثاقي طاهر، زهرا رحمانی، مهدی صفی، بهزاد شیرکوند هداوند

مقاله مروری

JSCW-2604-1287

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵-۰۲-۰۸

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵-۰۴-۰۷

تاریخ پذیرش:

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

آ. وثاقي طاهر، ز. رحمانی، م. صفی، ب. شیرکوند هداوند "مواد نورتاب طبیعی و مصنوعی: راهکاری نوین برای توسعه پایدار در صنعت رنگ و پوشش"، نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ JSCW-2604-1287 این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. ماکت مقاله توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

مواد نورتاب طبیعی و مصنوعی: راهکاری نوین برای توسعه پایدار در صنعت رنگ و پوشش

آیسان وثاقي طاهر^۱، زهرا رحمانی^۲، مهدی صفی^{۳*}، بهزاد شیرکوند هداوند^{۴**}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه رزین و افزودنی‌ها، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵.

۲- دانشجوی دکترا، گروه رزین و افزودنی‌ها، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵.

۳- دانشیار، گروه نمایش رنگ و پردازش تصاویر رنگی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵.

۴- استاد، گروه رزین و افزودنی‌ها، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵.

* mahdisafi@icrc.ac.ir

**Shirkand@icrc.ac.ir

چکیده

مواد نورتاب طبیعی و زیست تخریب پذیر، جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای در صنعت رنگ و رزین هستند که با هدف توسعه پایدار و کاهش آثار زیست محیطی ارائه شده‌اند. این مواد از منابع طبیعی مانند گیاهان، موجودات زنده و کانی‌ها به دست می‌آیند و دارای قابلیت جذب و ذخیره انرژی نوری و انتشار آن در تاریکی می‌باشند. کاربردهای متنوع آنها شامل پوشش‌های ترافیکی هوشمند برای افزایش ایمنی جاده‌ها، حسگرهای تشخیص خوردگی در صنایع، بسته‌بندی‌های هوشمند غذایی، پوشش‌های ضدمیکروبی و همچنین مصارف تزئینی و معماری است. مهم‌ترین مزایای این مواد، کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش استفاده از ترکیبات آلی فرار و سازگاری با محیط زیست است. اگرچه مواد نورتاب مصنوعی از نظر بازده نوری و پایداری فیزیکی عملکرد قوی‌تری دارند، اما مواد طبیعی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند زیست سازگاری بالا، سمیت بسیار کم، تجزیه پذیری زیستی و هزینه تولید پایین‌تر، برای کاربردهای مرتبط با سلامت انسان و محیط زیست ارجحیت دارند. توسعه و به کارگیری این مواد هوشمند، گامی مؤثر در راستای تحقق اقتصاد چرخشی و اصول توسعه پایدار محسوب می‌شود و می‌تواند نقش مهمی در آینده صنایع پوشش‌دهی ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: مواد نورتاب طبیعی، زیست تخریب پذیر، پوشش‌های هوشمند، صنعت رنگ و رزین، رنگ‌های نورتاب.

چکیده تصویری



Natural and synthetic luminescent materials: A new solution for sustainable development in the paint and coating industry

Aysan Vesaghi-Taher¹, Zahra Rahmani¹, Mahdi Safi², Behzad Shirkvand Hadavand^{*1}

1- Resin and Additives Department, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran, PO Box: 65-16765.

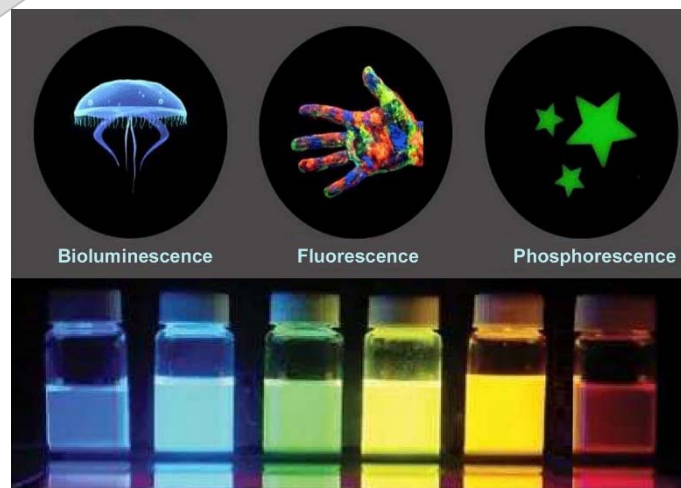
2-Associate Professor, Color Display and Color Image Processing Department, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran, PO Box: 65-16765.

Abstract

Natural and biodegradable luminescent materials are promising alternatives in the paint and resin industry, introduced for sustainable development and to reduce environmental impacts. Sourced from plants, living organisms, and minerals, they absorb, store, and emit light energy in darkness. Applications include smart traffic coatings for road safety, corrosion detection sensors, intelligent food packaging, antimicrobial coatings, and decorative uses. Key advantages are reduced energy consumption, lower greenhouse gas emissions, decreased volatile organic compounds, and environmental compatibility. Although synthetic luminescent materials offer superior optical efficiency and stability, natural materials are preferred for health and environmental applications due to high biocompatibility, very low toxicity, biodegradability, and lower production costs. The development and application of these smart materials represent an effective step towards a circular economy and sustainable development, and they can play a significant role in the future of coating industries.

Keywords: Natural luminescent materials, biodegradable, smart coatings, paint and resin industry, luminescent paints.

Graphical abstract



۱- مقدمه

مواد نورتاب^۱ موادی هستند که به هنگام روشنایی و قرارگیری در برابر منبع نوری، انرژی نشرشده از منبع را جذب کرده و به هنگام قطع منبع و تاریکی انرژی جذب شده را در طول موجی متفاوت بازتاب می‌کنند. این مواد جایگزین امیدوارکننده‌ای به منظور مصرف انرژی پایین و پایداری برای روشنایی‌های مصنوعی می‌باشند (۱). یکی از بارزترین ویژگی‌های این مواد توانایی بازتاب در مقادیر بالا است، که با دفع مقدار زیادی از تابش ورودی از طریق منبع نوری، به کاهش غیرفعال دمای سطوح هم کمک می‌کند. مواد نورتاب به دو دسته کلی فلورسانس و فسفرتابی تقسیم می‌شوند. مواد فلورسانس به محض جذب انرژی از منبع، انرژی دریافت شده را برمی‌گرداند ولی فسفرتابی‌ها نور و انرژی جذب شده را با سرعت خیلی کم و آرام نشر می‌دهند که این ویژگی دلیل درخشش آن‌ها در تاریکی است. این مواد به شدت وابسته به منبع نوری است و با قطع منبع نوری خاموش خواهند شد پس در اغلب موارد از آن‌ها در کاربردهای کوتاه مدت استفاده می‌شود (۲).

در سال‌های اخیر، مقالات مروری متعددی در زمینه مواد نورتاب، سازوکارهای نورتابی، روش‌های سنتز و کاربردهای عمومی این مواد منتشر شده است. با این حال، بیشتر این مطالعات بر جنبه‌های بنیادی، ساختار شیمیایی، خواص اپتیکی و بهبود عملکرد نوری مواد نورتاب تمرکز داشته‌اند (۳، ۱) در مقابل، مقاله حاضر علاوه بر مرور انواع مواد نورتاب طبیعی، معدنی و سنتزی، بر جنبه‌های کاربردی و صنعتی این مواد در صنعت رنگ و پوشش تأکید دارد. در این راستا، قابلیت‌های صنعتی، محدودیت‌های عملکردی، چالش‌های اقتصادی، هزینه تولید، موانع تجاری‌سازی و امکان توسعه در مقیاس صنعتی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تلاش شده است تا با مقایسه عملکرد، دوام، هزینه و قابلیت تولید مواد نورتاب مختلف، دیدگاهی کاربردمحور برای انتخاب مواد مناسب در صنایع رنگ، پوشش، علائم ایمنی و سامانه‌های روشنایی ارائه شود. از این منظر، تمرکز همزمان بر جنبه‌های فنی، صنعتی و اقتصادی، وجه تمایز اصلی این مقاله نسبت به بسیاری از مطالعات مروری پیشین محسوب می‌شود. (۴، ۳، ۱)

۲- اهمیت مواد نورتاب در صنعت رنگ و رزین

صنعت رنگ و رزین علاوه بر نقش حفاظت و زیبایی، به دلیل امکان تشکیل کامپوزیت‌ها این قابلیت را دارد که کاربردهای کلیدی با خواص ویژه را داشته باشد و در صنایع مختلف از جمله چاپ بر روی سطوح مختلف و فیلم‌های پلیمری با خواص ویژه بکار گرفته شود. پلیمرها به دلیل رفتار ویسکوالاستیک دارای انواع نرم و سخت با خصوصیات مختلف هستند و محدودیت استفاده در صنایع مختلف را ندارند (۳-۵).

در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی ناشی از شهرنشینی موجب افزایش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده و در نتیجه، توجه به مواد نورتاب به‌عنوان راهکاری مؤثر برای صرفه‌جویی انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی افزایش یافته است (۶، ۲). این مواد به‌طور گسترده در صنعت رنگ و رزین برای کاربردهای زیرساختی، پوششی، زیبایی‌شناختی، هشداردهنده و جاده‌ای استفاده می‌شوند و به دلیل قابلیت جذب نور و درخشش در تاریکی، نقش مهمی در پروژه‌های سازگار با محیط‌زیست ایفا می‌کنند (۶). فسفرهای نورتاب با خاصیت پس‌تاب بلندمدت، به‌عنوان گزینه‌ای دوست‌دار محیط‌زیست در علائم ایمنی و پوشش‌های پایدار مورد توجه قرار گرفته‌اند (۵).

ویژگی منحصربه‌فرد ذخیره و آزادسازی انرژی در این مواد، کاربرد آن‌ها را به حوزه‌هایی مانند تشخیص پرتوهای پرانرژی و پزشکی نیز گسترش داده است (۶). همچنین استفاده از مواد نورتاب در پوشش‌ها می‌تواند با نشر انرژی به شکل نور، به خنک‌سازی سطوح و کاهش اثر جزیره گرمایی شهری^۲ کمک کند (۷). پیشرفت در فرمول‌بندی این پوشش‌ها، علاوه بر گسترش

¹ Luminous materials

² Urban heat island effect

کاربردها، به بهبود دوام، پایداری و صرفه اقتصادی آن‌ها انجامیده و زمینه استفاده گسترده‌تر در محیط‌های روزمره، افزایش ایمنی، بهره‌وری انرژی و ارتقای کیفیت زندگی را در فیلم‌های پلیمری و چسب را فراهم کرده است (۹،۸).

مواد نورتاب طبیعی که از منابع گیاهی، پروتئین‌های فلورسانس، موجودات میکروسکوپی نورتاب و ترکیبات معدنی به دست می‌آیند، به‌عنوان گزینه‌هایی پایدار و زیست‌سازگار، جایگاه ویژه‌ای در صنایع رنگ و رزین یافته‌اند. این مواد با نشر پراکنده نور روز، کاهش نیاز به روشنایی مصنوعی و کمک به مدیریت انرژی خورشیدی، نقش مؤثری در بهبود کیفیت محیط داخلی و راحتی حرارتی ساختمان‌ها دارند. کاهش اثر جزیره گرمایی شهری از طریق جلوگیری، تعدیل و اتلاف گرما، یکی از مهم‌ترین مزایای این پوشش‌هاست. در این راستا، استفاده از مواد خنک‌کننده با نشر خورشیدی بالا و نشرندگی مناسب فروسرخ، به‌عنوان راهکاری کارآمد مطرح است. به‌طور کلی، بهره‌گیری از مواد هوشمند و فسفرسانس‌های بادوام در پوشش‌ها می‌تواند پاسخگوی نیازهای فنی و صرفه‌جویی انرژی در روشنایی باشد (۹).

در حوزه پوشش‌های ترافیکی، وضوح و دوام خط‌کشی جاده‌ها به‌ویژه در شرایط نوری و جوی نامناسب اهمیت بالایی دارد (۱۰،۱۱). پوشش‌های سنتی در تاریکی و شرایط جوی متغیر کارایی محدودی دارند و می‌توانند خطر آفرین باشند (۱۲). اگرچه استفاده از گوی‌های کوچک شیشه‌ای^۱ موجب بهبود نشر نور شده است، اما عملکرد آن‌ها در بارندگی کاهش می‌یابد. در مقابل، مواد نورتاب فعال با خاصیت پس‌تاب، به دلیل جذب نور خورشید، چراغ‌های خیابان و خودروها و نشر در تاریکی، عملکرد مناسب‌تری از خود نشان داده‌اند (۱۳). استفاده از این پوشش‌ها در حمل‌ونقل جاده‌ای ضمن کاهش مصرف انرژی، به بهبود دید، ایمنی و آسایش کمک می‌کند.

با وجود مزایای متعدد مواد نورتاب در رنگ‌های ترافیکی و پوشش‌های ایمنی، استفاده صنعتی از این مواد با محدودیت‌هایی نیز همراه است. عملکرد این پوشش‌ها وابسته به جذب و نشر مؤثر نور از سطح است؛ بنابراین تجمع گردوغبار، گل‌ولای، آلودگی‌های سطحی و سایش ناشی از تردد می‌تواند موجب کاهش شدید شدت نورتابی و حتی خاموشی کامل (Quenching) عملکرد آن‌ها شود. این موضوع به‌ویژه در خط‌کشی‌های جاده‌ای و پوشش‌های مورد استفاده در محیط‌های روباز اهمیت زیادی دارد. همچنین بسیاری از سامانه‌های نورتاب صنعتی برای دستیابی به شدت نشر و دوام مناسب، نیازمند استفاده از فسفرهای پیشرفته و فرآیندهای تولید کنترل‌شده هستند که موجب افزایش هزینه تولید و قیمت تمام‌شده محصول می‌شود. در نتیجه، هزینه اولیه بالا و محدودیت‌های اقتصادی از جمله عوامل مؤثر بر گسترش تجاری‌سازی این مواد در مقیاس وسیع صنعتی به شمار می‌روند (۲، ۱۳-۱۱).

در نهایت، پوشش‌های هوشمند حاوی مواد نورتاب به‌عنوان حسگرهای خوردگی، راهکاری نوین برای تشخیص زودهنگام و پایش این پدیده مخرب در صنایع مختلف محسوب می‌شوند. حسگرهای مبتنی بر فلورسانس، امکان شناسایی به‌موقع خوردگی را فراهم کرده و می‌توانند از خسارات گسترده و استفاده از مواد مضر زیست‌محیطی جلوگیری کنند (۱۴).

در سال‌های اخیر، مواد نورتاب به دلیل جذابیت چشمی و کارکردهای نوین، توجه گسترده‌ای در حوزه کاربردهای تزئینی و معماری به خود جلب کرده‌اند. این مواد با افزودن رنگدانه‌های نورتاب به بتن، رنگ‌های زینتی و موادی مانند سرامیک، پلاستیک، چسب و فلز، موجب ارتقای زیبایی زیرساخت‌های شهری می‌شوند (۱۵). با وجود ایجاد خاصیت شب‌تابی، محدودیت اصلی این پوشش‌ها لزوم استفاده در لایه‌های سطحی و در نتیجه کاهش دوام و طول عمر آن‌هاست.

پوشش‌های نورتاب همچنین پتانسیل بالایی در کاربردهای ضد میکروبی دارند. این پوشش‌ها در حضور نور با تولید گونه‌های فعال اکسیژن، قادر به از بین بردن موجودات ریز میکروسکوپی مضر بوده و هم‌زمان می‌توانند به‌عنوان نشانگرهای چشمی برای تشخیص آلودگی‌های میکروبی و تغییرات محیطی عمل کنند (۱۶).

در حوزه بسته‌بندی‌های هوشمند، استفاده از ترکیبات نورتاب طبیعی امکان پایش تازگی و کیفیت مواد غذایی را بدون نیاز به بازکردن بسته‌بندی فراهم می‌کند و در عین حال، با کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر، اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد (۱۷).

مزایای پوشش‌های نورتاب را می‌توان در سه دسته عملکردی، امنیتی و زیبایی‌شناختی طبقه‌بندی کرد. نورتابی بدون نیاز به انرژی الکتریکی، کاهش انتشار کرین و جایگزینی سیستم‌های روشنایی سنتی از مهم‌ترین مزایای عملکردی این مواد است (۱۸). در بخش ایمنی، استفاده از این پوشش‌ها در راه‌ها، تونل‌ها و علائم ترافیکی موجب کاهش حوادث و افزایش ایمنی می‌شود (۲۱-۱۹). از منظر زیبایی‌شناختی نیز این پوشش‌ها به بهبود دید شبانه و ارتقای کیفیت فضاهای عمومی کمک می‌کنند (۲۲). با وجود این مزایا، چالش‌هایی نظیر دوام، مقاومت و صرفه اقتصادی همچنان مطرح است.

از سوی دیگر، صنعت رنگ و رزین با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از پوشش‌های مبتنی بر مشتقات نفتی، به سمت استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر و کاهش ترکیبات آلی فرار (VOC) حرکت کرده است (۲۳-۲۵). قوانین سخت‌گیرانه بین‌المللی و تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات ایمن‌تر، توسعه پوشش‌های آب‌پایه و زیست‌پایه را تسریع کرده است. این رویکرد ضمن کاهش ردپای کربنی، به حفظ منابع طبیعی، افزایش بازیافت و بهبود پایداری محیط‌زیست منجر می‌شود. در مقابل، رنگ‌ها و پوشش‌های سنتی به دلیل منشاء نفتی، عدم تجدیدپذیری و آزادسازی VOCها، چالش‌های جدی زیست‌محیطی و سلامتی ایجاد می‌کنند؛ از آلودگی هوا و افزایش گازهای گلخانه‌ای گرفته تا تخریب زیستگاه‌ها و خوردگی سازه‌هایی مانند بتن (۲۶، ۲۷). از این‌رو، جایگزینی آن‌ها با پوشش‌های پایدار، زیست‌پایه و هوشمند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و ارتقای کیفیت زندگی مورد توجه قرار گرفته است.

از دیدگاه صنعتی، انتخاب یک ماده نورتاب تنها بر اساس شدت نشر نور انجام نمی‌شود، بلکه عواملی نظیر هزینه تولید، دوام عملکرد، قابلیت تولید در مقیاس انبوه، پایداری در شرایط محیطی و امکان تجاری‌سازی نیز اهمیت زیادی دارند. بسیاری از فسفرهای پیشرفته مبتنی بر عناصر خاکی کمیاب اگرچه عملکرد نوری مطلوبی دارند، اما هزینه تولید بالا و وابستگی به مواد اولیه خاص، استفاده گسترده از آن‌ها را با محدودیت‌هایی مواجه می‌سازد. از سوی دیگر، مواد طبیعی به دلیل دسترسی آسان‌تر و سازگاری زیست‌محیطی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، هرچند هنوز از نظر شدت نورتابی و دوام عملکرد با مواد معدنی پیشرفته فاصله دارند. بنابراین ارزیابی همزمان شاخص‌های فنی و اقتصادی برای توسعه موفق فناوری‌های نورتاب در مقیاس صنعتی ضروری است (۱۱-۱۳، ۲).

۳- سازوکارهای نورتابی و انواع آن

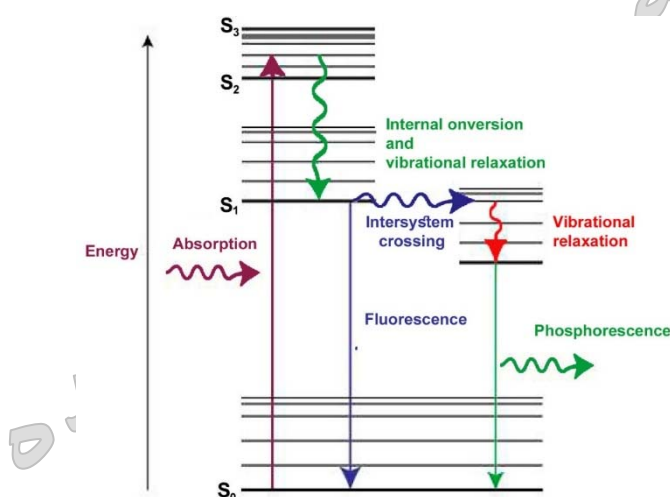
همانطور که در قبل اشاره کردیم نورتابی پدیده نشر نور از هر ماده‌ای می‌باشد که در حالت‌های برانگیخته الکترونی رخ می‌دهد. این پدیده شامل فلورسانس، فسفرتابی و زیست‌تابی است. که در این بخش به بررسی فلورسانس، فسفرتابی و زیست‌تابی می‌پردازیم.

۳-۱- فلورسانس

هنگامی که مولکولی نور جذب می‌کند یکی از الکترون‌ها به حالتی پر انرژی‌تر یا همان برانگیخته می‌رود و به همین سبب در مدار بالاتری قرار می‌گیرد. در پدیده فلورسانس این الکترون برانگیخته شده در مدت زمان خیلی کوتاهی حدود ۱۰ نانو ثانیه بعد به حالت اولیه یا همان پایه باز می‌گردد. در پی این اتفاق یک فوتون یا به زبان ساده‌تر یک نور آزاد می‌شود، که این فوتون آزاد شده را ما به شکل نوری که پدیده فلورسانس است، می‌بینیم. طبق نمودار جابلونسکی (شکل ۱)، فلورسانس زمانی اتفاق می‌افتد که الکترون در اوربیتال برانگیخته با الکترونی در حالت پایه جفت می‌شود و بازگشت سریع و مجاز را امکان‌پذیر می‌سازد.

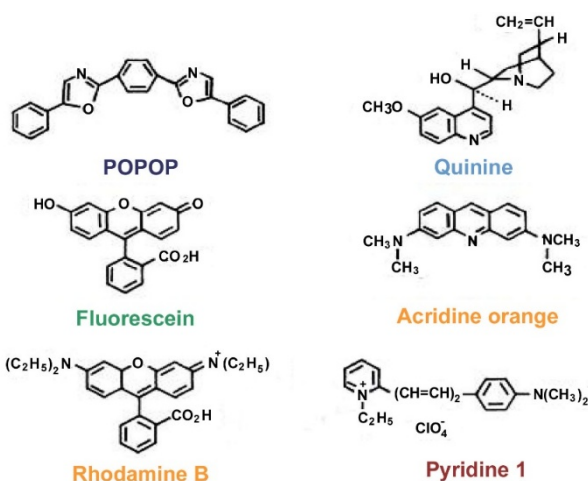
مقاله پذیرفته شده

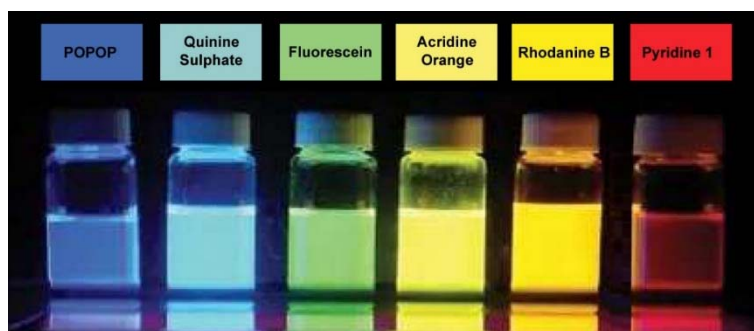
این پدیده عموماً از طریق مولکول‌های آروماتیک مانند فلوروفور کوپنین رخ می‌دهد. شکل ۲ مهم‌ترین عوامل در فلورسانس، بازده کوانتومی و مدت زمان تابش را نشان می‌دهد (۲۸). دلیل اصلی توانایی برگشت این الکترون به حالت پایه، به دلیل این است که هر دو الکترون که در چرخش باهم هم‌جهت می‌باشند و دلیل سرعت این پدیده نیز همین موضوع است. پس به طور دقیق‌تر و طبق نمودار جابلونسکی پدیده فلورسانس زمانی اتفاق می‌افتد که الکترون در اوربیتال برانگیخته، با الکترون دوم که در اوربیتال حالت پایه هست، جفت می‌شود و به همین علت بازگشت به حالت پایه را چرخش (اسپین) مجاز می‌سازد و به سرعت منجر به انتشار فوتون (نور) می‌شود که این انتشار از لحاظ عمر پس‌تاب عمر کوتاهی دارد. این پدیده عموماً از طریق مولکول‌های آروماتیک صورت می‌گیرد و یکی از فلوروفورهای مورد استفاده در این پدیده فلوروفورهای کوپنین است که ساختار آن در شکل ۲ قابل مشاهده است. مهم‌ترین عوامل در بحث فلورسانس بازده کوانتومی و مدت زمان روشنایی آن است. شدت تابش فلورسانس را به دلیل وجود عوامل گسترده‌ایی می‌توان تحت تاثیر قرار داد. خاموشی^۱ پدیده‌ای است که از طریق سازوکارهای مختلفی ممکن است ایجاد شود، هم عوامل گسترده یونی یا مولکولی می‌توانند این خاموشی را ایجاد کنند. پدیده فلورسانس نسبت به عوامل محیطی می‌تواند به شدت تحت تاثیر قرار بگیرد (۲۸). به عنوان مثال‌هایی برای فلورسانس می‌توان دید که در منابع گیاهی این پدیده در سلولزهای ناخالص وجود دارد، که طول موج‌های تحریک این مواد بین ۳۲۰ تا ۳۶۰ نانومتر است و طول موج انتشار این مواد در ۴۲۰ تا ۴۶۰ نانومتر قابل مشاهده است (۲۹).



شکل ۱: نمودار جابلونسکی (۲۸).

Figure 1. Jablonski Diagram (28).





شکل ۲: ساختارهای شیمیایی مواد فلورسانس و رنگ تولید شده از تابش آنها (۲۸).
Figure 2: Chemical structures of fluorescent materials and the color produced by their emission (28).

۳-۲- فسفرتابی

این پدیده نیز زیر مجموعه‌ای از مواد نورتاب است که در آن بعد از جذب نور، انرژی بسیار آهسته و در مدت طولانی‌تری نسبت به فلورسانس آزاد می‌شود. در فسفرتابی الکترون‌ها به سطحی از انرژی بالاتر می‌روند که برگشت الکترون رفته را به حالت اولیه کند می‌کند، دلیل این اتفاق آن است که این برگشت از لحاظ قوانین کوانتومی سخت و حتی ممنوع است. در نتیجه نور فوراً و سریع مثل فلورسانس تابش نمی‌کند و به آهستگی و در بازه زمانی طولانی‌تری این تابش اتفاق می‌افتد. این تابش ممکن است تا ثانیه‌های طولانی‌ایی به انجام برسد (۲۹). به بیان قوی‌تر فسفرتابی به معنای نشر نور از حالت‌های برانگیخته سه‌تایی که در آن الکترون موجود در اوربیتال برانگیخته، جهت چرخش یکسانی با الکترون حالت پایه دارد و به دلیل ممنوعیت یا سخت بودن این اتفاق است که طول عمر این مواد بالاتر است. از طرفی این پدیده تحت دو مرحله صورت می‌گیرد که شامل تهییج‌کننده‌های تکی از طریق عبور بین سیستمی به تهییج‌کننده‌های سه‌تایی با انرژی اوربیتال پایین‌تر مهاجرت می‌کنند و بعد از آن مرحله دوم اتفاق می‌افتد که تهییج‌کننده‌های سه‌تایی جدید از طریق تابش به حالت پایه مهاجرت می‌کنند. این پدیده عموماً در دمای پایین و محیط بسته اتفاق می‌افتد زیرا تهییج‌کننده‌های سه‌تایی، به راحتی توسط ارتعاشات تولید شده از طریق دما و اکسیژن موجود در هوا می‌توانند خاموش شوند (۳۰). به طور دقیق‌تر این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که یک ماده، طول موج خاصی را جذب می‌کند. فسفرتاب‌ها اگر به عنوان رنگدانه باشند از نظر اندازه ذره، دارای اندازه ذرات بزرگتری می‌باشند چرا که هرچه رنگدانه ریزتر باشد با کاهش فسفرتابی همراه خواهد بود (۳۱) در فسفرتاب‌ها نکات قابل توجه دیگری وجود دارد مثلاً این پدیده در دمای اتاق و مایعات قابل مشاهده نمی‌باشد چون فرایندهای دیگری ممکن است از تابش نور جلوگیری کنند. تشخیص و تمایز قائل شدن میان دو پدیده فسفرتابی و فلورسانس گاهی سخت است زیرا ممکن است طول عمر آن‌ها در برخی ترکیبات یکسان باشد. این ویژگی در اطراف ما و به وفور قابل مشاهده است (۲۹).

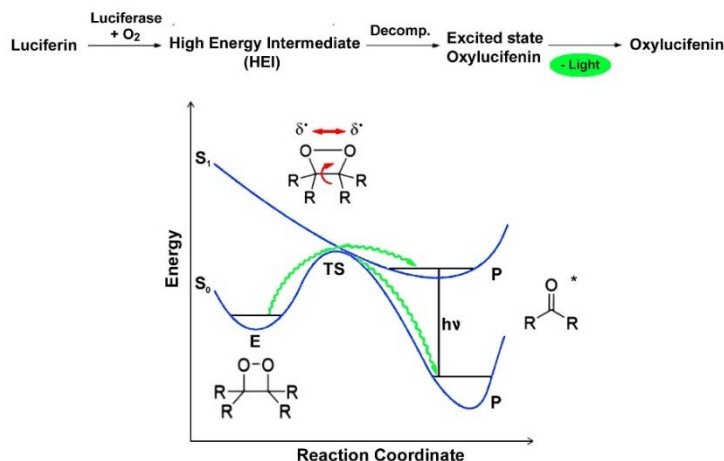
۳-۳- زیست‌تابی

زیست‌تابی^۱ به انتشار نور توسط موجودات زنده اشاره دارد. دلیل اصلی این پدیده، اکسیدشدن یک زیرلایه به نام لوسیفرین^۲ است که توسط آنزیم لوسیفراز^۳ کatalیز می‌شود. این واکنش زیست‌شیمیایی منجر به تشکیل گونه‌های برانگیخته و در نهایت نشر نور می‌گردد (شکل ۳) (۳۲). زیست‌تابی با فلورسانس و فسفرتابی متفاوت است، زیرا به منبع نور اولیه یا رنگدانه‌های خارجی برای نشر نور نیاز ندارد.

^۱ Bioluminescence

^۲ D-luciferin

^۳ Luciferase



شکل ۳: روند اکسید شدن لوسیفیرین و نمودار سطح انرژی پتانسیل برای تحریک شیمیایی در زیست تابی (۳۲).

Figure 3: Luciferin oxidation process and potential energy level diagram for chemiluminescence excitation (32).

تولید نور در این سیستم‌ها به عواملی همچون کوفاکتورها، آنزیم‌های تکمیلی، آدنوسین تری فسفات^۱ (ATP) که مولکول‌های حامل انرژی در سلول‌های زنده هستند. سازوکارهای مختلفی برای زیست تابی شناسایی شده‌اند که بر اساس نوع لوسیفیرین و لوسیفراز دسته‌بندی می‌شوند. از جمله آن‌ها می‌توان به سیستم‌های وابسته به لوسیفراز (نشرزد تا قرمز)، لوسیفراز کرم شب تاب (بازده کوانتومی بالا)، لوسیفراز سوسک کلیک^۲ (نشرسبز تا نارنجی)، سیستم‌های وابسته به کوالنترازین^۳ (نشرآبی، ۴۵۰-۵۰۰ نانومتر)، لوسیفراز رنیل^۴ (پایداری بالا)، لوسیفراز گواشا^۵ (در سخت پوستان دریایی)، لوسیفراز نانولوک^۶ (در میگوها)، سیستم مبتنی بر لوسیفیرین سپریدین^۷ (نشرآبی در صدف و ماهی)، زیست تابی باکتریایی (عمدتاً نشرآبی ~۴۹۰ نانومتر) و زیست تابی قارچی (نشرسبز) اشاره کرد (۳۲، ۳۳).

۳-۳-۱- مثال‌های موجود در طبیعت

نورتابی طبیعی یا زیست تابی، پدیده‌ای شگفت‌انگیز است که در موجودات، گیاهان و کانی‌ها با اهدافی مانند دفاع، شکار و ارتباطات تکامل یافته است.

۳-۳-۲- کرم‌های شب تاب، سوسک‌های نوری و قارچ‌ها

کرم‌های شب تاب برای جلب جفت، با واکنش لوسیفیرین و لوسیفراز در حضور اکسیژن، نور تولید می‌کنند. سازوکاری مشابه در سوسک‌های کلیک دیده می‌شود. در قارچ‌های زیست تاب (بیش از ۱۲۵ گونه)، نور سبز (۵۳۰-۵۰۰ نانومتر) برای جذب حشرات نشر می‌شود. مهم‌ترین مسیر، چرخه هیسپیدین^۸ است که در ۵ مرحله، هیسپیدین را به لوسیفیرین قارچی تبدیل کرده و با تشکیل یک ترکیب ناپایدار، نور، دی‌اکسید کربن و اکسی لوسیفیرین تولید می‌کند (۳۳).

۳-۳-۳- کرم‌های حلقوی، حلزون‌ها و عروس‌های دریایی

¹ Adenosine triphosphate

² Click Beetle

³ Covalenttrrazin

⁴ Renilla Luciferase

⁵ Guasha Luciferase

⁶ NanoLuc Luciferase

⁷ Siperiden Luciferase

⁸ Hispidin

حدود ۹۸ گونه کرم حلقوی، ماده لزج نورتاب زرد-سبز ترشح می کنند. حلزون های آب شیرین (تنها گونه آب شیرین زیست تاب) با طول موج حدود ۵۳۰ نانومتر می درخشند. سازوکار آن ها شامل یک کروموفور شبیه فلاوین است که انرژی را از اکسی لوسیفیرین برانگیخته می گیرد. در عروس های دریایی، واکنش کوالنترزین با اکسیژن و کلسیم، نور تولید می کند. تفاوت آن در اتصال کووالانسی لوسیفیرین به یک پروتئین است، بنابراین به آنزیم آزاد نیاز ندارد (۳۳).

۳-۴-۳- ماهی ها، موجودات دریایی و پستانداران

در اعماق دریا، زیست تابی از سه راه رخ می دهد: (۱) واکنش شیمیایی کوالنترزین، (۲) همزیستی با باکتری های نورتاب (مانند ماهی های چراغ قوه ای)، و (۳) لوسیفیرین ویژه ای به نام وارگولین. بسیاری از ماهی ها لوسیفیرین را از طریق تغذیه به دست می آورند. اگرچه نور آبی رایج است، گونه هایی مانند «ژدهای دریایی» نور قرمز یا فروسرخ برای شکار تولید می کنند (۳۳). در پستانداران خشکی زی، نورتابی (عمدتاً فلورسانس) در مو، خز و استخوان دیده می شود. متابولیت های تریپتوفان نور زرد-آبی در خز سفید ایجاد می کنند و مشتقات پورفیرین باعث درخشش قرمز-صورتی در خاریشت ها می شوند. جوندگان و صاریغ ها نیز تحت نور UV درخشش های آبی-سبز یا نارنجی نشان می دهند که احتمالاً در ارتباطات شبانه نقش دارد (۳۴).

۳-۵-۳- نور تابی در کانی ها و مواد معدنی

نورتابی در کانی ها به دلیل نقص های بلوری، ناخالصی های فعال کننده (مانند یون های فلزی) و ساختار شبکه است. نمونه ها عبارتند از: یاقوت و آپاتیت که به دلیل حضور عناصر خاکی کمیاب نور نشر می کنند (۳۵)، کوارتزهای آلفا که تابش آبی ناشی از مراکز نقص و یون های قلیایی خاکی دارند (۳۶)، و سایر سنگ های قیمتی مانند الماس، مروارید و گارنت که بسته به ناخالصی هایشان، طیف های نوری متنوعی نشان می دهند.

۳-۴-۴- عوامل تهییج و طول موج های تحریک و نشر در مواد نورتاب

انتخاب منبع تهییج مناسب، یکی از عوامل تعیین کننده در عملکرد مواد نورتاب است. بسته به ساختار ماده، منابع تهییج متفاوتی از جمله پرتو فرابنفش (UV)، نور مرئی و پرتوهای پرنرژی مورد استفاده قرار می گیرند که هر کدام طیف تحریک و نشر مشخصی ایجاد می کنند (۳۷،۲).

پرتو فرابنفش (UV) رایج ترین منبع تهییج برای اغلب مواد نورتاب است. فسفرهای معدنی مانند $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ در محدوده UV نزدیک (۳۲۰-۴۰۰ نانومتر) تهییج شده و نور سبز (~ 520 نانومتر) نشر می دهند. یون Ce^{3+} در شبکه YAG در محدوده ۴۳۰-۴۷۰ نانومتر تهییج می شود و نور زرد (~ 550 نانومتر) نشر می کند. مواد فلورسانس گیاهی مانند سلولز ناخالص در محدوده ۳۲۰-۳۶۰ نانومتر تهییج شده و نور آبی در ۴۲۰-۴۶۰ نانومتر نشر می دهند (۲۹،۳۸).

نور مرئی به عنوان منبع تهییج در برخی فسفرهای پیشرفته کاربرد دارد. یون Eu^{2+} در برخی شبکه های بلوری می تواند در محدوده ۴۵۰-۵۰۰ نانومتر (آبی) تهییج شده و نور قرمز تا نارنجی نشر دهد. این ویژگی آن ها را برای استفاده در LED های سفید که نور آبی دیود را به نور سفید تبدیل می کنند بسیار مناسب می سازد (۳۸،۳۷).

نور خورشید نیز به عنوان منبع تهییج در پوشش های ترفیکی و ایمنی اهمیت ویژه ای دارد. فسفرهای مورد استفاده در رنگ های جاده ای باید قادر باشند هم از بخش UV و هم از بخش مرئی نور خورشید (۳۰۰-۷۰۰ نانومتر) انرژی جذب کنند تا در شرایط روزانه شارژ شده و در تاریکی نور نشر دهند (۱۲،۲).

جدول ۱ خلاصه ای از عوامل تهییج و طول موج های تحریک و نشر مواد نورتاب پر کاربرد را نشان می دهد.

Figure 1: Excitation sources and excitation/emission wavelengths of commonly used luminescent materials.

Luminescent Material	Excitation Source	Excitation Wavelength (nm)	Emission Wavelength (nm)	Emission Color	Reference
SrAl ₂ O ₄ :Eu ²⁺ , Dy ³⁺	UV / Visible Light	320–400	~520	Green	(42, 44)
YAG:Ce ³⁺	Visible Light (Blue)	430–470	~550	Yellow	(44)
Eu ³⁺ in Oxides	UV	250–390	610–620	Red	(42)
Crude Cellulose (Plant-derived)	UV	320–360	420–460	Blue	(52)
Carbon Quantum Dots (CQDs)	UV / Visible Light	330–400	440–520	Blue–Green	(44)
Firefly Luciferin	Chemical (ATP)	—	550–570	Yellow–Green	(53)
Bacterial Bioluminescence	Chemical (FMNH ₂)	—	~490	Blue–Green	(53)

۴- انواع مواد نورتاب

۴-۱- مواد نورتاب در طبیعت

نورتابی فرایندی است که در آن یک ماده بدون وجود حرارت از خودش نور نشر می‌کند که به این امر درخشش سرد نیز گفته می‌شود، این فرایند شامل دو مرحله است، جذب انرژی اولیه که منجر به تحریک می‌شود و انتشار این انرژی به شکل نور مرئی یا گاهی نامرئی است. مواد نورتاب به دسته‌های نورتابناکی^۱ فلورسانس^۲ که در این نوع، ماده بلافاصله پس از جذب انرژی، نور نشر می‌کند و پس از قطع منبع انرژی، تابش فوراً متوقف می‌شود و در لامپ‌های فلورسانس و رنگ‌های امنیتی کاربرد دارند و نقاط کوانتومی هم در این دسته قرار می‌گیرند (۳۹، ۴۰). فسفرتابی^۳ که انتشار نور با تأخیر و ماندگاری طولانی‌تری همراه است (از چند ثانیه تا چند ساعت) این ویژگی ناشی از گیر افتادن الکترون‌ها در ترازهای انرژی متاپایدار است و در علائم شب‌نما، اسباب‌بازی‌ها، ساعت‌های شب‌تاب و غیره کاربرد دارند. زیست‌تابی^۴ تولید و انتشار نور توسط موجودات زنده که در اثر واکنش‌های شیمیایی در بدن آن‌ها صورت گرفته باشد گفته می‌شود. الکترونورتاب^۵ نور در اثر اعمال میدان الکتریکی در ماده منتشر می‌شود و در نمایشگرهای OLED و پنل‌های نورتاب بکار گرفته می‌شود. کاتدتابناکی^۶ نور ناشی از برخورد پرتوهای الکترونی با ماده است و در میکروسکوپ‌های الکترونی استفاده می‌شود. گرماتابناکی^۷ نوعی از تابش است که توسط مواد بلوری خاص، مانند برخی از مواد معدنی، به نمایش گذاشته می‌شود، زمانی که انرژی قبلاً جذب شده از تابش الکترومغناطیسی یا سایر تابش‌های یونیزه کننده، پس از گرم شدن ماده، به صورت نور دوباره نشر می‌شود و اصطلاحاً تابناکی^۸ پدیده‌ای است که در آن نور هنگامی تولید می‌شود که یک ماده به صورت مکانیکی کشیده، پاره، خراشیده، خرد یا مالش داده شود، تقسیم می‌شوند (۲).

در طبیعت عوامل نورتاب اعم از گیاهی، جانوری و مواد معدنی زیادی وجود دارد که به طور چشمگیری دارای این خاصیت می‌باشند. این منابع طبیعی به طور قابل توجهی زیاد و مختلف می‌باشند، به عنوان مثال در منابع جانوری بیش از ۲۰۰ گونه از موجودات روی زمین هستند که این قابلیت برای آن‌ها ثبت شده است. فارق از حیوانات، گیاهانی نیز با این خاصیت کشف شده است خانواده این گیاهان نیز به شدت گسترده است که گاهی از عصاره این گیاهان نیز خواص نورتابی گرفته شده است (۴۱). مواد معدنی نیز این خاصیت را به طور ذاتی از خود نشان داده‌اند که در این مواد نورتابی حاصل از عیوب ساختاری در شبکه بلوری و یا حتی وجود ناخالصی‌های اتمی در این مواد است (۴۲، ۴۳). این مواد به خاطر داشتن ویژگی‌های پیشرفته خود در

¹ Photoluminescence (PL)

² Fluorescence

³ Phosphorescence

⁴ Bioluminescence

⁵ Electroluminescence

⁶ Cathodoluminescence

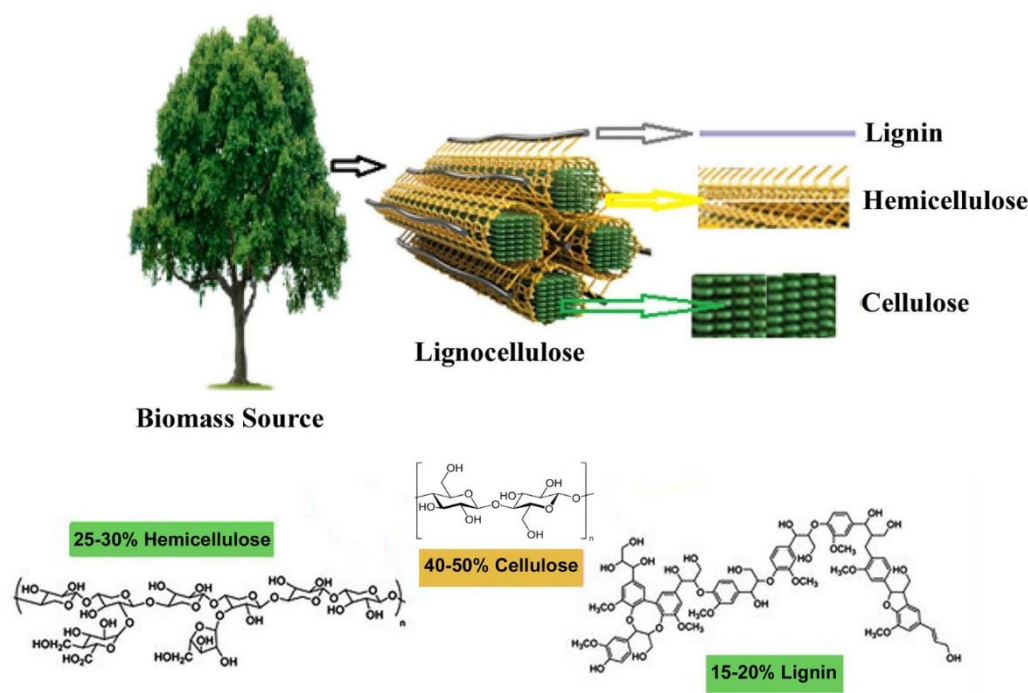
⁷ Thermoluminescent

⁸ Triboluminescence

بحث عملکردی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از دیگر ویژگی‌های آن‌ها خاصیت پاسخ‌دهی این مواد به منابع نوری مختلف است. این مواد در زمینه‌های متفاوت کاربردی، مثلاً کاربردهای نوری، مورد مصرف قرار می‌گیرند. هم چنین از این مواد می‌توان در بحث صرفه‌جویی انرژی و بهبود ایمنی در محیط‌های شهری هم بهره‌برد که منجر به افزایش وضوح دید هم می‌شود (۴۵)، (۴۴). در بررسی مواد نورتاب می‌توان به منابع گیاهی، حیوانی و معدنی اشاره نمود.

منابع گیاهی و زیست‌توده‌ها، جایگزین‌های پایداری برای تولید مواد نورتاب هستند که کاربردهای وسیعی در حوزه‌های پزشکی، تصویربرداری و کنترل آلودگی دارند. یکی از مهم‌ترین دستاوردها در این زمینه، تولید نقاط کوانتومی کربنی^۱ (CQDs) از منابع طبیعی مانند میوه‌ها، پوست میوه‌ها، برگ‌ها، سبزیجات و ادویه‌ها با روش‌های سبز مانند هیدروترمال و پیرولیز است. این نقاط کربنی نسبت به انواع دیگر نقاط کوانتومی، کارایی نوری برتر و خواص نورتابی متمایزی از خود نشان می‌دهند (۴۶).

زیست‌توده‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: لیگنوسلولزی^۲ (شامل سلولز، همی‌سلولز و لیگن) که فراوان‌ترین پلیمرهای زیستی هستند (شکل ۴) (۴۸)، و غیرلیگنوسلولزی (NLBC) مانند متابولیت‌های ثانویه شامل قلیاها، ترکیبات فنلی و ترپنها که ذاتاً خاصیت نورتابی دارند (شکل ۵) (۴۸). سازوکارهای انتشار نور در این منابع به دو نوع عمده تقسیم می‌شود: دسته اول، فلورسانس کلاسیک (ACQ) است که در آن، مواد در حالت تجمع، نورتابی خود را از دست می‌دهند. دسته دوم، انتشار القایی ناشی از تجمع (AIE) است که رفتاری معکوس دارد. در این سازوکار، مولکول‌ها در محلول رقیق به دلیل چرخش و حرکت آزاد، انرژی را به صورت حرارت از دست می‌دهند و فلورسانس ضعیفی دارند؛ اما در حالت جمعی، محدودیت حرکت مولکولی باعث مسدود شدن کانال‌های اتلاف انرژی غیرتابشی شده و آزادسازی انرژی به صورت فوتون‌های نوری را به شدت افزایش می‌دهد. این پدیده در موادی مانند لیگن و پلی‌فنل‌ها مشاهده می‌شود. در نهایت، این منابع گیاهی از طریق فرآیندهای پیشرفته‌ای مانند سنتز هیدرو/سووترمال خودآرا و محصورسازی مولکولی، به مواد نورتاب پایدار مانند نقاط کربنی و مواد فسفرتاب تبدیل می‌شوند (۳۰).

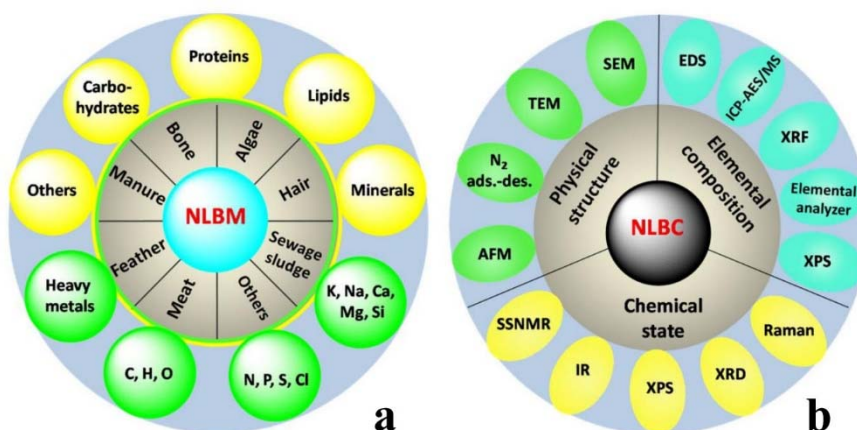


شکل ۴- لیگنوسلولزی و ساختار سلولز، همی‌سلولز و لیگن (۴۷).

Figure 4: Lignocellulose and the structure of cellulose, hemicellulose, and lignin (47).

¹ Carbon Quantum Dots (CQDs)

² Lignocellulose



شکل ۵- ترکیبات غیرلیگنوسلولزی (NLBC) (۴۸).

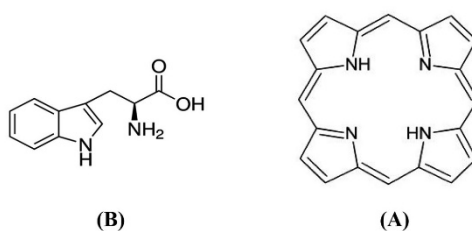
Figure 5: Components of typical NLBM, (b) characterization methods for NLBC analysis (48).

۲-۴- مواد نورتاب حیوانات

پدیده نورتابی (زیست تابی) در حوزه های زیست شناسی به جذب و نشر مجدد نور با طول موج بالاتر در موجودات زنده اشاره دارد. این پدیده در طیف گسترده ای از جانداران از مرجان ها و موجودات زنده ریز دریایی تا قارچ ها، دوزیستان، خزندگان و پستانداران مشاهده می شود. سازوکار آن مبتنی بر دو جزء اصلی لومی نوفرها (اتم های با نورتابی ذاتی) و فلوروفورها (کروموفورهای دارای خاصیت فسفرتابی) است که غالباً نوری در طیف آبی تا سبز نشر می کنند.

در پستانداران و جانوران خشکی، خاصیت نورتابی (با دوام ۲ تا ۲۵ ثانیه) در بافت هایی مانند پوست، مو، پر، ناخن و استخوان دیده می شود. دو عامل کلیدی تریپتوفان و پورفیرین ها در این پدیده نقش دارند. تریپتوفان یک اسید آمینه ضروری آروماتیک که از طریق رژیم غذایی جذب می شود و در پروتئین هایی مانند کراتین وجود دارد. این ماده عامل نورتابی در محدوده ۳۲۰ تا ۳۸۰ نانومتر در خز بسیاری از پستانداران است و شدت آن تحت تأثیر عواملی مانند هورمون ها و رژیم غذایی قرار می گیرد (شکل ۶) (۳۴). پورفیرین ها مولکول های هتروسیکلیکی که پیش ساز هموگلوبین و کلروفیل هستند. این ترکیبات می توانند رنگدانه های قرمز، صورتی یا سبز ایجاد کنند و در پوست برخی جانوران (مانند موش) نور قرمز تولید می کنند. پورفیرین ها در ۴۰۰ نانومتر جذب داشته و در مقایسه با تریپتوفان پایداری کمتری در برابر نور دارند (۳۴).

علاوه بر این، ملانین (به ویژه یوملانین و فتوملانین) و کراتین نقش مهمی در تنظیم ظاهر و نورتابی پوشش جانوران ایفا می کنند. ملانین با جذب قوی پرتو فرابنفش می تواند بازتاب نورتابی را کاهش دهد، در حالی که کراتین به عنوان یک پروتئین ساختاری، حاوی اسیدهای آمینه آروماتیک (تریپتوفان، تیروزین و فنیل آلانین) است که خود منشأ نورتابی هستند.



شکل ۶: ساختار تریپتوفان (A)، ساختار پورفیرین (B) (۳۴).

Figure 6: Structure of tryptophan (A), structure of porphyrin (B).

۵- مواد نورتاب در منابع معدنی

۵-۱- نورتابی در کانی‌ها و نقش یون‌های لانتانید

پدیده نورتابی در دنیای مواد معدنی و کانی‌ها به وضوح قابل مشاهده است. یکی از نمونه‌های شاخص، کانی کمیاب اگلریت است که تحت تابش پرتو فرابنفش، رنگ‌های صورتی کدر یا روشن نشر می‌کند. عامل اصلی این پدیده در اگلریت و کانی‌های مشابه، حضور یون‌های لانتانید است که به عنوان فعال‌کننده‌های نوری نورتاب با آرایشی پیچیده عمل می‌کنند (۳۷). در جدول ۳ انواع فعال‌کننده‌ها و یون‌های فلزی گزارش شده‌اند.

جدول ۳: انواع فعال‌کننده‌ها و یون‌های فلزی (۳۷).

Table 3: Types of activators and metal ions (37).

Activators	Metal Ions
Lanthanide Ions	Lanthanum, Cerium, Praseodymium, Neodymium, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutetium
Metal Ions	Alkali metal cations: Lithium, Potassium, Sodium
Alkaline earth cations	Magnesium, Calcium, Strontium
Transition metal cations	Multivalent ions such as Iron, Copper, etc.

۵-۲- سازوکار نورتابی در سنگ‌های قیمتی

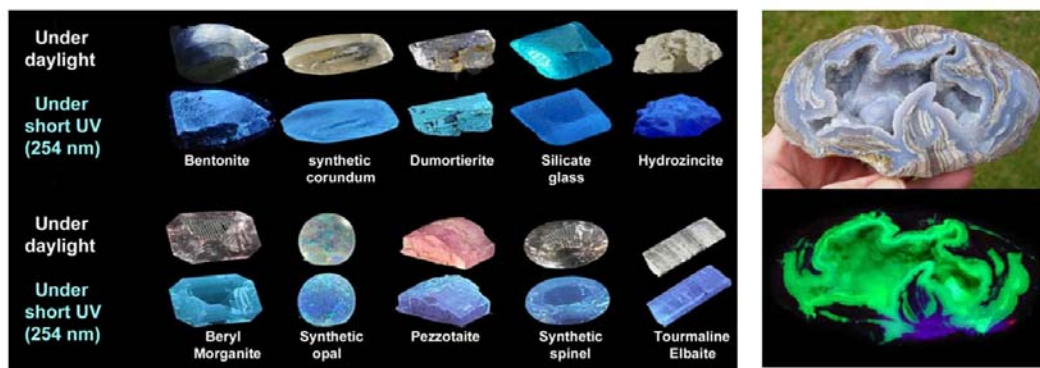
ساختار سنگ‌های معدنی به روش‌های مختلفی منجر به تولید نور می‌شود. در الماس به دلیل دارا بودن نقص‌های ساختاری گسترده، از گذارهای ویبرونیک (برهم‌کنش‌های ارتعاشی و الکترونیکی) بین باند ظرفیت، سطوح انرژی نقص و باند رسانش پشتیبانی می‌کند. این فرآیند زیربنای ویژگی‌های جذب و نورتابی در الماس است. در یاقوت، یاقوت کبود و زمرد، برانگیختگی الکترون‌های موجود در یون‌های فلزی یا عناصر کمیاب خاکی که در شبکه بلوری آن‌ها جای گرفته‌اند، منجر به ایجاد نورتابی می‌شود.

به طور کلی، سه عامل کلیدی مسبب پدیده نورتابی در سنگ‌های قیمتی و مواد معدنی هستند. فعال‌کننده‌ها^۱ یون‌هایی که مرکز تابش نور هستند. حساس‌کننده‌ها^۲ عواملی که جذب انرژی را تسهیل می‌کنند. و نقص‌های الکترونیکی^۳ که ناهنجاری‌های ساختاری در شبکه بلوری است. برخی کانی‌ها مانند کوراندوم فاقد نورتابی ذاتی هستند؛ اما زمانی که با عناصری مثل کرم ترکیب شوند، نورتابی قرمز رنگی از خود نشان می‌دهند (۴۹). شکل ۸ نورتابی در برخی از سنگ‌ها تحت تابش پرتو فرابنفش را نشان می‌دهد (۵۲).

¹ Activators

² Sensitizers

³ Electronic Defects



شکل ۸- نورتایی در سنگ‌ها تحت تابش پرتو فرابنفش (۵۲).

Figure 8: Luminescence in rocks under ultraviolet radiation (52).

۵-۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد نورتاب

خواص نوری مواد نورتاب به عوامل ساختاری مانند اندازه ذرات، بلوری بودن و گروه‌های سطحی بستگی دارد که تحت تأثیر ماده اولیه و روش سنتز هستند. در فسفرهای معدنی مانند پروسکایت‌ها، چیدمان بلوری، ساختار نوار الکترونیکی و دینامیک فوتون‌ها را کنترل می‌کند. برای بهینه‌سازی، از دوپینگ با یون‌های فلزی استفاده می‌شود تا انتشار فوتون در طول موج‌های خاص بهبود یابد. کیفیت نشر نوری نیز به عواملی مانند میدان بلوری و غلظت ناخالصی‌ها وابسته است (۳۸).

ویژگی‌های فیزیکی را، تغییر اندازه ذرات مواد نورتاب، انتقالات الکترونی و طیف نورتایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مواد اغلب ترکیبی از نواحی بلورین (تقویت‌کننده نشر) و بی‌شکل (ایجادکننده فسفرتابی) هستند. رنگ، طول موج نشر و پایداری نوری به گروه‌های عاملی سطحی و نقص‌های ساختاری وابسته است. گروه‌های عاملی بازده فسفرتابی را افزایش داده و طول موج را جابجا می‌کنند، درحالی‌که نقص‌ها با به دام انداختن فوتون‌ها، پایداری و فسفرتابی طولانی‌مدت ایجاد می‌کنند. بازده کوانتومی (نسبت فوتون نشری به جذب‌شده) معیار کیفیت است. عواملی مانند اصلاح سطح، دوپ‌شدن و گروه‌های عاملی پایدار این بازده را افزایش می‌دهند، در حالی‌که اکسیدشدن، نقص‌های زیاد و مراکز بازترکیب غیرتابشی آن را کاهش می‌دهند. در نانوذرات کربنی بر پایه زیستی، همین ویژگی‌های سطحی، عملکرد نوری آن‌ها را تعیین می‌کند (۳۷، ۳۸).

در خصوص ویژگی‌های شیمیایی، هسته مرکزی مواد نورتاب طبیعی اغلب از شبکه‌های کربنی با هیبریداسیون sp^2/sp تشکیل شده است. مناطق آروماتیک در هسته، سطوح انرژی و ترازهای الکترونی خاصی ایجاد می‌کنند که برای انتقال انرژی و بازترکیب تابشی حیاتی هستند. گروه‌های عاملی سطحی مانند کربوکسیل، هیدروکسیل، آمین و کربونیل، ضمن افزایش حلالیت و پایداری، مسیرهای انتقال انرژی را نیز تحت تأثیر قرار داده و بازده کوانتومی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. حساسیت این مواد به pH و یون‌های فلزی (مانند Fe, Cu, Hg) ناشی از واکنش گروه‌های عاملی سطحی است. تغییرات pH می‌تواند باعث جابجایی در طول موج نشر (رنگ) شود، و برهم‌کنش با یون‌های فلزی ممکن است منجر به خاموشی یا تقویت نورتابی گردد، ویژگی‌ای که آن‌ها را به حسگرهای شیمیایی مؤثر تبدیل کرده است (۳۵، ۳۸).

اصلاح سطح و دوپ‌کردن با عناصری مانند نیتروژن، گوگرد یا فسفر، با ایجاد ترازهای انرژی جدید، خواص نوری و بازده کوانتومی را بهبود می‌بخشند. نیتروژن انتقال بار را تسهیل می‌کند، گوگرد مراکز بازترکیب جدید ایجاد می‌کند و فسفر طیف نشر را اصلاح می‌نماید. همچنین، استفاده از پلیمرها یا لیگاندهای آلی برای پوشش سطحی می‌تواند از اکسیداسیون یا تجمع ذرات جلوگیری کرده و پایداری نوری و عملکرد زیستی مواد را در کاربردهای مختلف تضمین کند (۳۸-۵۳).

۶- مقایسه مواد نورتاب طبیعی با مواد نورتاب سنتزی

۶-۱- تفاوت بنیادین مواد نورتاب طبیعی و سنتزی

تفاوت اصلی بین مواد نورتاب طبیعی و سنتزی در منشأ، بازده نوری و قابلیت مهندسی آنهاست. مواد طبیعی عموماً بر پایه پروتئین‌های حاوی آمینواسیدهای آروماتیک مانند تریپتوفان^۱ هستند. این مواد به‌طور ذاتی از بازده کوانتومی پایین و ضریب خاموشی بالا رنج برده و حساسیت شدیدی به شرایط محیطی مانند pH نشان می‌دهند (۴۰). در مقابل، مواد سنتزی در محیط آزمایشگاهی با هدف دستیابی به پاسخ‌های نوری قوی و پایدار طراحی می‌شوند. مهندسی ساختار در این مواد امکان کنترل دقیق برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی و در نتیجه تنظیم میزان و پایداری نورتابی را فراهم می‌کند (۵۴).

با وجود مزایای زیست‌محیطی و زیست‌سازگاری بالای مواد نورتاب طبیعی، این مواد از نظر عملکرد نوری قابل مقایسه با فسفرهای معدنی و سنتزی پیشرفته نیستند. مواد معدنی دوپ‌شده با عناصر خاکی کمیاب نظیر Ce^{3+} ، Dy^{3+} ، Eu^{3+} ، Eu^{2+} دارای شدت نشر بالا، بازده کوانتومی زیاد، پایداری نوری طولانی‌مدت و قابلیت مهندسی دقیق طول موج نشر هستند. در مقابل، مواد طبیعی معمولاً از شدت نشر کمتر، پایداری محدودتر و حساسیت بیشتر نسبت به شرایط محیطی نظیر رطوبت، اکسیژن، pH و تابش فرابنفش برخوردارند. همچنین به دلیل وابستگی به منبع زیستی، کنترل دقیق و تکرارپذیر خواص نوری در آنها دشوارتر است. از این رو، مواد نورتاب طبیعی بیشتر در کاربردهای زیستی، پزشکی و حسگری مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که فسفرهای معدنی و سنتزی گزینه اصلی برای کاربردهای صنعتی، رنگ‌های ترافیکی، تابلوهای ایمنی، LEDها و پوشش‌های نورتاب با دوام بالا محسوب می‌شوند (۳۰، ۳۴، ۳۸، ۵۴، ۵۵).

۲-۶- روش‌های تولید و استخراج

استخراج مواد نورتاب طبیعی عمدتاً از پسماندهای زیستی مانند پوست میوه، تراشه‌های چوب و استخوان، با استفاده از روش‌های ساده، کم‌هزینه و سبز مانند هیدروترمال و میکروویو انجام می‌شود. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه و آلودگی، راهکاری برای تبدیل ضایعات به مواد باارزش محسوب می‌شود. این مواد خاصیت نورتابی ذاتی خود را از منبع زیستی به ارث می‌برند. در سوی دیگر، سنتز مواد صنعتی نیازمند فرآیندهای پیچیده، تخصصی و پر هزینه‌ای مانند اتم‌سازی یا سنتز در دمای بسیار بالا است تا به ساختاری کاملاً مهندسی‌شده با خلوص و یکنواختی بالا دست یابند (۳۰، ۳۴).

۳-۶- کنترل و بهینه‌سازی خواص نوری

مواد سنتزی، به‌ویژه فسفرهای معدنی با ساختار بلوری مشخص، بستر ایده‌آلی برای طراحی و کنترل دقیق خواص نوری فراهم می‌کنند. قابلیت دوپ‌شدن (آلایش) عنصری، نقطه قوت اصلی این مواد است. برای نمونه، در فسفر استرانسیم آلومینات (SrAl_2O_4)، آلایش با یون یوروپیم (Eu) منجر به نشر نور سبز با پایداری بسیار بالا می‌شود. به طور مشابه، در فسفرهای گارنت مانند YAG (ایتریم آلومینیم گارنت)، حضور یون‌های سریم (Ce^{3+}) از خانواده لاتانیدها به عنوان فعال‌کننده، موجب نشر نور زرد می‌گردد (۳۸، ۵۶). این توانایی در کنترل دقیق ترکیب شیمیایی و شرایط سنتز در آزمایشگاه، امکان بهینه‌سازی عالی شدت تابش، طول موج نشر و پایداری نوری را برای کاربردهای هدفمند مانند LEDها، حسگرها و نشانگرها فراهم می‌سازد. این سطح از کنترل و عملکرد قابل پیش‌بینی، در مواد طبیعی به دلیل تنوع ذاتی و ساختار پیچیده‌شان، با محدودیت‌های جدی مواجه است.

۳-۶-۱- مکانیزم نورتابی در فسفرهای معدنی دوپ‌شده: نقش میان‌ترازی عناصر فعال‌کننده

عملکرد برتر فسفرهای معدنی دوپ‌شده ریشه در ساختار ترازهای انرژی عناصر فعال‌کننده‌ای دارد که درون شبکه بلوری میزبان جای می‌گیرند. یون‌های خاکی کمیاب مانند Eu^{2+} ، Eu^{3+} ، Ce^{3+} و Dy^{3+} دارای ترازهای انرژی میانی (میان‌ترازی) هستند که نقشی کلیدی در فرایند جذب، ذخیره و نشر انرژی نوری ایفا می‌کنند (۵۰، ۳۷).

^۱ Tryptophan

در این فسفرها پس از جذب فوتون توسط شبکه میزبان یا مستقیماً توسط یون فعال کننده، الکترون ها به ترازهای برانگیخته بالاتر می روند. سپس از طریق آرامش غیرتابشی به پایین ترین تراز برانگیخته رسیده و در نهایت با نشر فوتون به تراز پایه بازمی گردند. آنچه رفتار این یون ها را از مواد آلی متمایز می کند، محافظت اوربیتال های 4f توسط لایه های بیرونی 5s و 5p است که باعث می شود ترازهای انرژی در برابر اغتشاشات میدان بلوری نسبتاً پایدار بمانند و گذارهای نوری با طول موج مشخص و تکرارپذیر رخ دهند (۳۷).

نقش میان ترازهای در سیستم های دارای نشر بلندمدت - مانند $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ حتی محوری تر است. در این ترکیبات، یون Dy^{3+} به عنوان تله کننده بار (trap) عمل می کند؛ الکترون های برانگیخته توسط Eu^{2+} در ترازهای میانی ایجاد شده توسط Dy^{3+} به دام می افتند و با انرژی گرمایی محیط در دمای اتاق به تدریج آزاد شده و نورتابی پایدار چندساعته ایجاد می کنند. عمق این تله های میانی تعیین کننده مدت زمان نشر است؛ تله های کم عمق تر، آزادسازی سریع تر و نشر کوتاه تر و تله های عمیق تر، نشر طولانی تر ایجاد می کنند (۳۷، ۳۸).

رفتار هر یون فعال کننده بسته به میدان بلوری شبکه میزبان متفاوت است؛ برای نمونه Eu^{2+} برخلاف Eu^{3+} دارای گذار $5d \rightarrow 4f$ است که به شدت به میدان بلوری وابسته بوده و با تغییر شبکه میزبان، طیف نشر آن از آبی تا قرمز قابل تنظیم است. این ویژگی مهندسی پذیری طیف نشر را که پیش تر در این بخش به آن اشاره شد، توضیح می دهد (۳۷، ۳۸).

۴-۶- بازده کوانتومی و شدت تابش

بازده کوانتومی (QY) اصلی ترین شاخص کارایی مواد نورتاب است که در منابع طبیعی معمولاً بین ۲ تا ۳۰ درصد است. این بازده پایین در مواد زیستی (مانند مشتقات لیگنن و سلولز) به دلیل عدم کنترل بر مراکز تابش و وجود مسیرهای بازترکیب غیرتابشی است. با این حال، حضور گروه های عاملی مانند فنل و کربونیل و انجام اصلاحات سطحی می توانند این بازده را بهبود بخشند. در مقابل، مواد معدنی طبیعی (مانند سیلیکات ها) به دلیل ساختار بلورین و حضور یون های فلزی فعال، با محدود کردن حالت های غیرتابشی، بازده نشر بالاتری نشان می دهند (۳۰، ۳۸). شدت نشر، که نشان دهنده نور خروجی در واحد زمان است، به ساختار الکترونی و عمق تله های انرژی بستگی دارد. در نانوذرات گیاهی، شدت نشر در محیط های اسیدی افزایش می یابد، اما در محیط های قلیایی یا در حضور یون های فلزی به دلیل تقویت مسیرهای غیرتابشی کاهش می یابد. در برخی مواد طبیعی و نقاط کوانتومی مشتق شده از زیست توده، وجود مراکز به دام اندازی بار می تواند موجب ایجاد نشر محدود شود، اما این عملکرد معمولاً از نظر شدت و مدت زمان نورتابی با فسفرهای معدنی دوپ شده قابل مقایسه نیست. (۳۰، ۳۸). در سوی مقابل، مواد نورتاب سنتزی بازده کوانتومی بسیار بالاتری (۵۰ تا ۹۰ درصد) دارند. این برتری ناشی از کنترل دقیق بر اندازه ذرات، ساختار بلوری و دوپ شدن مهندسی شده است. برای مثال، چارچوب های آلی-فلزی (MOFs) می توانند بازدهی بیش از ۶۰ درصد ایجاد کنند. در این مواد، با طراحی محیط های سخت اطراف کروموفورها، اثر خاموشی ناشی از آب کاهش یافته و شدت نشر حتی در محیط های آبی تقویت می شود. در مجموع، اگرچه مواد سنتزی بازده و پایداری بالاتری دارند، مواد طبیعی از نظر زیست سازگاری و صرفه اقتصادی گزینه های برتری هستند (۵۵).

۵-۶- پایداری و دوام نوری

پایداری نوری شامل مقاومت در برابر تخریب نوری و مدت زمان تداوم نور پس از قطع منبع تحریک است. مواد نورتاب طبیعی به دلیل دارا بودن ساختارهای آروماتیک و گروه های عاملی مانند کربونیل و آمین، پیوندهای $\pi-\pi^*$ و $n-\pi^*$ تشکیل می دهند که منشأ نشر هستند. با این حال، این مواد در برابر نور فرابنفش و اکسیژن آسیب پذیر بوده و ممکن است دچار تخریب فوتوشیمیایی یا خاموشی در طولانی مدت شوند. در مقابل، مواد معدنی طبیعی دوپ شده با عناصر خاکی کمیاب، به دلیل وجود تله های انرژی در ساختار بلوری، پایداری بسیار بالاتری دارند. این تله ها با حبس موقت الکترون ها و آزادسازی تدریجی آن ها، نشری ایجاد

مقاله پذیرفته شده

می‌کنند که تا چندین ساعت تداوم می‌یابد (۳۸، ۳۱). مواد نورتاب سنتزی به لطف مهندسی دقیق ساختار مولکولی، قادرند مسیرهای خاموشی غیرتابشی را مهار کنند. برای مثال، بارگذاری فسفرهای سنتزی درون ساختارهای پلیمری، از لرزش‌های مولکولی جلوگیری کرده و پایداری نوری بالایی را حتی در محیط‌های آبی فراهم می‌کند. این دستکاری‌های ساختاری با افزایش مسیرهای بازترکیب تابشی، نورتابی بادوامی تولید می‌کنند که نسبت به نمونه‌های طبیعی در برابر محرک‌های مخرب محیطی مقاوم‌تر است (۵۴). در نتیجه، مواد سنتزی به دلیل ساختارهای بلوری پایدار برای کاربردهای طولانی‌مدت ایده‌آل هستند، در حالی که مواد طبیعی حساس‌تر بوده و اغلب نیاز به پوشش‌های محافظ برای افزایش دوام دارند. این تفاوت، مرز میان کاربردهای کوتاه‌مدت زیستی و کاربردهای صنعتی بلندمدت را تعیین می‌کند.

۶-۶- مسیرهای بازترکیب تابشی و غیرتابشی

در مواد نورتاب طبیعی، سیستم‌های مزدوج π عامل اصلی انتقالات الکترونی $\pi-\pi^*$ و بروز نورتابی هستند. با این حال، مسیرهای بازترکیب غیرتابشی که منجر به اتلاف انرژی می‌شوند، به راحتی از طریق لرزش‌های مولکولی یا تماس گروه‌های عاملی سطحی (مانند هیدروکسیل) با آب و اکسیژن فعال می‌گردند. تحقیقات نشان می‌دهد نانوذرات طبیعی در محیط‌های اسیدی یا آلوده به سرعت به سمت این مسیرهای غیرتابشی سوق یافته و دچار خاموشی می‌شوند. همچنین طیف نشر در این مواد به طول موج تحریک وابسته است (۳۰). در مقابل، مواد نورتاب سنتزی به دلیل برخورداری از ساختار شبه‌بلوری، لرزش‌های مولکولی را مهار کرده و از مسیرهای خاموشی غیرتابشی جلوگیری می‌کنند که نتیجه آن، تداوم پس‌تابی حداقل تا یک ثانیه است. در این ساختارها، الکترون‌های برانگیخته در تله‌های انرژی محبوس شده و با آزادسازی تدریجی، پس‌تاب کنترل‌شده‌ای ایجاد می‌کنند. ماتریس‌های بلوری سنتزی با تسهیل انتقال انرژی بین کروموفورها و کاهش مسیرهای اتلاف، شدت نشر را به بیشینه می‌رسانند. برخلاف مواد طبیعی، حساسیت مواد سنتزی به pH، اکسیژن و UV در سطح کم تا متوسط است (۳۸، ۵۵). به طور کلی، در مواد طبیعی مسیر اصلی نشر از طریق مراکز و نقص‌های سطحی یا گروه‌های عاملی صورت می‌گیرد که به دلیل غیرخطی بودن بازتاب‌ها و تله‌های انرژی پراکنده، بازده پایینی دارند. اما در مواد سنتزی، این مسیرها از طریق انتقال انرژی دقیق بین یون‌های دوبنده و بخش بلوری کنترل می‌شوند. عامل کلیدی در افزایش پایداری و بازده نوری مواد سنتزی، وجود ساختارهای بدون نقص یا نقص‌های مهندسی‌شده است که اتلاف انرژی را به حداقل می‌رسانند (۳۰، ۳۸). در جدول ۴ مواد نورتاب طبیعی و مواد نورتاب سنتزی با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۴: مقایسه مواد نورتاب طبیعی و مواد نورتاب سنتزی.

Table 4: Comparative natural luminescent materials vs. synthetic luminescent materials.

Feature / Index	Natural Luminescent Materials	Synthetic Luminescent Materials	Reference (Source)
Origin / Production	Plant, animal, mineral sources; extracted from biological waste	Laboratory synthesis with precise structural control	(37, 38)
Quantum Yield (QY)	Low (2–30%)	High (50–90%)	(37, 44, 48)
Emission Intensity	Moderate; dependent on pH and metal ions	High; controllable and stable	(37, 44)
Optical Stability	Sensitive to UV and oxygen; may degrade	High; resistant to photodegradation	(44, 47, 49)
Control of Optical Properties	Limited; depends on natural source	High; allows structural engineering and doping	(44, 47)
Biocompatibility	Excellent; low toxicity, biodegradable	Generally low; may require coating	(50)
Key Applications	Biosensors, smart packaging, medical imaging	LEDs, displays, industrial coatings, safety signs	(50)

Cost & Scalability	Low-cost; based on waste biomass	High; requires complex processes and equipment	(37, 38)
Environmental Sensitivity	High (affected by pH, oxygen, metal ions)	Low to medium (can be designed for resistance)	(37, 48)
Common Examples	Carbon quantum dots (CQDs) from plants, fluorescent proteins	Doped inorganic phosphors (e.g., $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$), MOFs	(34, 44)

۷- زیست‌سازگاری

یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های مواد نورتاب طبیعی، سمیت بسیار پایین حتی در غلظت‌های بالا است که اغلب از آن به عنوان «سازوکار عدم سمیت» یاد می‌شود. این ویژگی ریشه در حضور گروه‌های عاملی طبیعی مانند هیدروکسیل و کربوکسیل دارد. این گروه‌ها به‌طور ذاتی تمایل به جذب سطحی داشته و با جلوگیری از برهم‌کنش‌های مخرب با پروتئین‌های بدن، ایمنی زیستی ماده را تضمین می‌کنند. علاوه بر این، فرآیند دفع زیستی در این مواد به‌طور مؤثری صورت می‌گیرد که از تجمع سمی آن‌ها در بافت‌های زنده جلوگیری می‌کند (۵۶).

۷-۱- کاربرد و قابلیت‌های استفاده

انتخاب بین مواد نورتاب طبیعی و سنتزی کاملاً وابسته به اولویت‌های کاربردی و هدف نهایی است. مواد نورتاب طبیعی به دلیل ویژگی‌های ممتازی چون عدم سمیت، زیست‌سازگاری بالا و تجزیه‌پذیری زیستی، بهترین گزینه برای محیط‌هایی هستند که تعامل با سیستم‌های زنده حیاتی است. این مواد به‌طور گسترده در تولید حسگرهای زیست‌تخریب‌پذیر، حسگرهای pH محیطی، نشانه‌گذاری‌های زیستی^۱، تصویربرداری غیرتهاجمی و بسته‌بندی‌های هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند (۵۶). در مقابل، مواد نورتاب سنتزی برای کاربردهایی طراحی شده‌اند که نیازمند بازده نوری بسیار بالا، شدت نشر قوی و کنترل دقیق بر طول‌موج نشر هستند. این مواد به دلیل پایداری نوری فوق‌العاده، ستون فناوری‌های نوری جدید هستند. کاربردهای شاخص آن‌ها شامل تولید LEDهای روشنایی، نمایشگرهای الکترونیکی با وضوح بالا، تابلوهای الکترونیکی نوری، ذخیره‌سازی انرژی نوری و ایجاد پستاب‌های طولانی‌مدت در تابلوهای هشدار و محیط‌های صنعتی است. به طور خلاصه، مواد نورتاب مشتق شده از منابع طبیعی با رویکردی "سبز" مسیرهای نوینی در پزشکی و کشاورزی باز کرده‌اند. از طرفی، مواد سنتزی با تکیه بر مهندسی دقیق و بازده کوانتومی بالا (تا ۹۰٪)، نیازهای فناوری و صنعت را پوشش می‌دهند. این مقایسه نشان می‌دهد که انتخاب میان این دو دسته، بر اساس تعادل میان "عملکرد نوری" و "زیست‌سازگاری" صورت می‌گیرد (۵۶).

۸- ارتباط ساختار مولکولی با نورتابی

درک رابطه بین ساختار مولکولی و خواص نوری، کلید تعیین کارایی مواد نورتاب است. پیکربندی فضایی اتم‌ها، پایداری شیمیایی و دینامیک برانگیختگی و بازگشت الکترون‌ها را کنترل می‌کند. در ساختارهای دارای پیوند دوگانه، چیدمان گروه‌های جانبی به صورت سیس (یک سمت) یا ترانس (دو سمت مقابل) است. ایزومر ترانس معمولاً متقارن‌تر و پایدارتر است. تحقیقات بر روی پلیمر پلی‌ایمین (شکل ۹) نشان می‌دهد که این تفاوت هندسی مستقیماً ترازهای انرژی و شکاف نوار را تغییر می‌دهد (۳۵). این تأثیر در طیف جذبی UV-Vis (شکل ۱۰) مشهود است؛ ایزومرهای ترانس به دلیل جفت‌شدگی بهتر، تمایل به جذب در طول‌موج‌های بلندتر دارند. تحلیل طیف‌ها نشان می‌دهد پیکربندی سیس پلی‌ایمین (poly(z)-PTI)، به دلیل هندسه خمیده و محدود کردن چرخش زنجیره، مسیرهای اتلاف انرژی ارتعاشی را کاهش می‌دهد. این امر منجر به تثبیت الکترون‌های برانگیخته

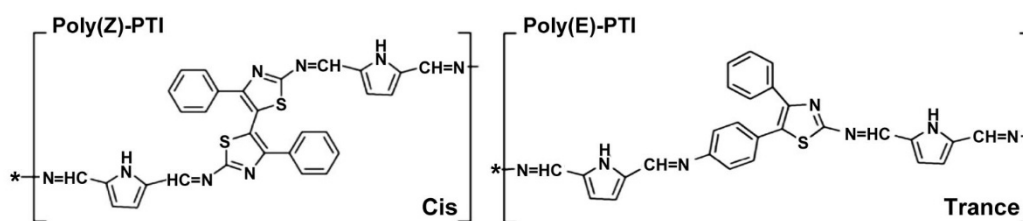
^۱ Bio-tagging

و افزایش طول عمر فسفرتابی می‌شود. اگرچه انرژی تابشی کمتری دارد، اما شدت نورتابی و بازده کوانتومی آن به مراتب بالاتر از ایزومر ترانس است (۳۵). جدول ۵ ویژگی‌های ساختاری و نوری ایزومرهای سیس و ترانس پلیمر پلی‌ایمین مقایسه شده است. در شکل ۱۱ نیز طیف نورتابی و نمودار فضا رنگ CIE این نمونه‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۵: مقایسه ویژگی‌های ساختاری و نوری ایزومرهای سیس و ترانس پلیمر پلی‌ایمین.

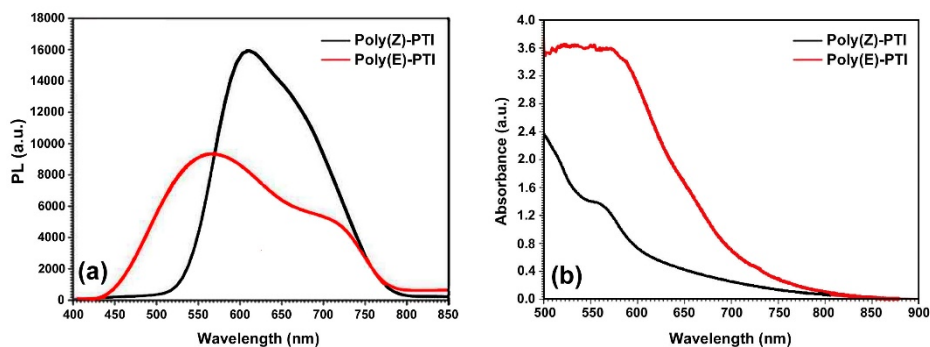
Table 5. Comparison of structural and optical properties of cis and trans isomers of polyimine polymer

Property	Trans Isomer	Cis Isomer
Molecular symmetry	Higher	Lower
Thermal stability	Higher	Usually, lower
Electronic coupling	More optimal (planar structure)	More limited (due to steric hindrance)
Absorption/Emission spectrum	Red shift	Blue shift



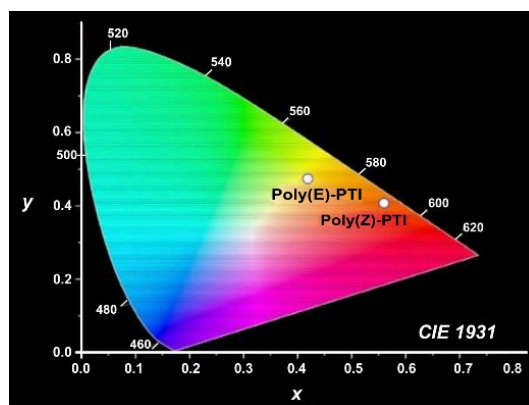
شکل ۹: پلیمر پلی‌ایمین در پیکربندی‌های فضایی متفاوت (۳۵).

Figure 9: Polyimine polymer in different spatial configurations (35).



شکل ۱۰: طیف جذبی (a) و UV-Vis (b) برای ساختارهای poly-PTI (۳۵).

Figure 10: PL (a) and UV-Vis (b) absorption spectra for poly-PTI structures (35).



شکل ۱: طیف نورتابی (A) و نمودار فضا رنگ CIE (B) (۳۶).

Figure 1: Luminance spectrum (A) and CIE color space diagram (B) (35).

۸-۱- پلیمرهای با آنتروپی بالا (HEP) و پدیده تجمع

پلیمرهای با آنتروپی بالا (HEP) از چندین مونومر مختلف تشکیل شده و به دلیل توزیع تصادفی اجزاء، رفتار نوری منحصر به فردی دارند. در سیستم‌های تک‌مونومری، تجمع مولکولی (مثل تجمع موازی π - π) معمولاً منجر به خاموشی نشر می‌شود. افزایش آنتروپی ساختاری در HEP ها از این تجمعات منظم جلوگیری کرده و با ایزوله کردن مراکز تابشی فعال، پدیده‌های مفیدی ایجاد می‌کند: جابجایی به آبی^۱ به دلیل افزایش فاصله بین مراکز تابشی و افزایش شدت نشر؛ به دلیل انتقال انرژی با کمترین اتلاف است. در نهایت، مهندسی آنتروپی در سطح مولکولی، ابزاری دقیق برای تنظیم هم شدت و هم طول موج نشر نور فراهم می‌سازد (۳۶).

۹- نتیجه‌گیری

مواد نورتاب به دلیل قابلیت جذب انرژی و نشر مجدد نور، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع رنگ و پوشش، علائم ایمنی، تجهیزات روشنایی، حسگرها و سامانه‌های زیستی پیدا کرده‌اند. در این مقاله، انواع مواد نورتاب طبیعی، معدنی و سنتزی از نظر منشأ، سازوکار نورتابی، ویژگی‌های نوری و کاربردهای صنعتی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که مواد نورتاب طبیعی به دلیل زیست‌سازگاری، سمیت پایین و سازگاری با محیط زیست، گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای زیستی، پزشکی و حسگری هستند؛ با این حال، از نظر شدت نشر، پایداری نوری، قابلیت کنترل خواص و تکرارپذیری عملکرد، معمولاً با فسفرهای معدنی و سنتزی پیشرفته قابل رقابت نیستند.

بررسی‌ها همچنین نشان داد که فسفرهای معدنی دوپ شده با عناصر خاکی کمیاب، به واسطه وجود میان‌ترازهای انرژی و تله‌های الکترونی کنترل شده، از شدت نورتابی و دوام بالاتری برخوردار بوده و همچنان مهم‌ترین گزینه برای کاربردهای صنعتی نظیر رنگ‌های ترافیکی، تابلوهای ایمنی و پوشش‌های شتاب محسوب می‌شوند. با این وجود، استفاده صنعتی از این مواد با چالش‌هایی از جمله هزینه بالای تولید، وابستگی به عناصر خاکی کمیاب، افت عملکرد در اثر آلودگی سطحی و محدودیت‌های اقتصادی تجاری‌سازی همراه است.

در مجموع، توسعه نسل جدید مواد نورتاب با هدف دستیابی همزمان به عملکرد نوری مطلوب، پایداری بالا، هزینه مناسب و سازگاری زیست‌محیطی، یکی از مهم‌ترین مسیرهای پژوهشی آینده در این حوزه خواهد بود. همچنین توجه به جنبه‌های صنعتی، اقتصادی و تجاری‌سازی در کنار ویژگی‌های فنی، می‌تواند نقش مهمی در گسترش کاربرد این مواد در صنایع مختلف ایفا کند.

مقاله پذیرفته شده

بررسی انجام شده نشان می‌دهد که موفقیت صنعتی مواد نورتاب تنها به ویژگی‌های نوری آن‌ها وابسته نیست و عوامل اقتصادی و تجاری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه این فناوری دارند. هزینه مواد اولیه، پیچیدگی فرآیند تولید، دوام عملکرد در شرایط واقعی بهره‌برداری و امکان تولید در مقیاس انبوه از جمله عوامل کلیدی در تجاری‌سازی این مواد محسوب می‌شوند. از این رو، توسعه نسل جدید مواد نورتاب باید علاوه بر بهبود ویژگی‌های اپتیکی، بر کاهش هزینه تولید، افزایش طول عمر و تسهیل فرآیندهای صنعتی نیز متمرکز باشد تا امکان استفاده گسترده‌تر از این فناوری در صنایع مختلف فراهم شود.

مقاله پذیرفته شده

- [1] Keçecioğlu Dağlı P, Dağlı S. Photoluminescent materials: a sustainable solution for eco-friendly design. *J Environ Earth Sci*. 2024;14(6):2224-3216. doi:10.7176/JEES/14-6-04.
- [2] Zheng M, Li X, Bai Y, Tang S, Li P, Zhu Q. Sunlight-activated long persistent luminescent coating for smart highways. *Coatings*. 2023;13(6):1050. doi:10.3390/coatings13061050.
- [3] Soleimani-Gorgani A, Goudarzi Z, Rahmani O, Avinc B, Shirkavand Hadavand B. Tailoring surface properties of cotton fabric with biodegradable polycarboxylic acids for high-performance inkjet-printed conductive patterns. *Prog Color Colorants Coat*. 2026;62:247-259. doi:10.30509/pccc.2025.167637.1437.
- [4] Rahmani Z, Shirkavand Hadavand B. An overview of adhesives and their evolving role in industry. *J Stud Color World*. 2025;15(2):115-135. doi:10.30509/jscw.2025.167402.1211.
- [5] Rahmani Z, Mousavi M, Shirkavand Hadavand B, Petru M, Vosáhl J, Rahimian Koloor SS. The role of urethane acrylate in improving the elasticity of nano chitosan UV-curable hydrogel nanocomposite. *Nano-Struct Nano-Objects*. 2024;39:101293. doi:10.1016/j.nanoso.2024.101293.
- [6] Abniki M, Rahmani Z, Soleimani-Gorgani A, Shirkavand Hadavand B. A review. *Polym Renew Resour*. 2025;16(4):209-224. doi:10.1177/20412479251345678.
- [7] Xiaoyan F, Yanan L, Yanfeng M, Hogwu ZH. Long afterglow green luminescence of Tb³⁺ ion in Ga₄GeO₈ through persistent energy transfer from host to Tb³⁺. *J Lumin*. 2021;237:118149. doi:10.1016/j.jlumin.2021.118149.
- [8] Santamouris M, Yun GY. Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. *Renew Energy*. 2020;161:792-807. doi:10.1016/j.renene.2020.07.109.
- [9] Soltani Mohammadi H, Rahmani Z, Shirkavand Hadavand B. Polymeric membranes and their role in the removal of dyes. *J Stud Color World*. 2023;13:253-267. doi:10.1001/1.22517278.1402.13.3.2.8.
- [10] Marchini F, Chiatti C, Fabiani C, Pisello AL. Development of an innovative translucent-photoluminescent coating for smart windows applications: An experimental and numerical investigation. *Renew Sustain Energy Rev*. 2023;184:113530. doi:10.1016/j.rser.2023.113530.
- [11] Dwyer C, Himes S. Investigation of inlaid pavement marker performance and safety effectiveness. *J Transp Res Board*. 2022;2677(1):981-994. doi:10.1177/03611981221103244.
- [12] Zheng M, Li X, Bai Y, Tang S, Li P, Zhu Q. Sunlight activated long persistent luminescent coating for smart highways. *Coatings*. 2023;13(6):1050. doi:10.3390/coatings13061050.
- [13] Zhang F, Zhao X, He Y, Xie Y. Research progress in application of strontium aluminate long after glow luminescent materials in road marking. *Buildings*. 2024;3:1-13. doi:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.03.001.

- [14] Caemen R, Tubio L, Garea B, Cruz D de V de Z, Lanceros-Mendez S, Bermudez V de Z. Environmentally friendly photoluminescent coatings for corrosion sensing. *Polymers*. 2025;17(3):389. doi:10.3390/polym17030389.
- [15] de T, Mateo Sanguino J, Redondo González MJ, Dávila Martín JM, Domínguez JML. Enhanced road safety with photoluminescent pedestrian crossings in urban contexts. *Infrastructures*. 2024;9(3):60. doi:10.3390/infrastructures9030060.
- [16] Suleymanova M, Maliukova M, Koryakina A. Architectural and decorative concrete with photoluminescent pigment. *Mater Sci Eng*. 2020;896:012025. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012025.
- [17] Martínez AH, López-Montero T, Miró R, Puig R. Photoluminescent applications for urban pavements. *Sustainability*. 2023;15(20):15078. doi:10.3390/su152015078.
- [18] Bonneel L, Geisler F, Létard JF, Villa C. Photoluminescent road marking for safe mobility at night. *Transp Res Procedia*. 2023;72:3754-3761. doi:10.1016/j.trpro.2023.11.514.
- [19] Zhao X, Zhang C, Ju Y, Li J, Bian Y, Ma J. Evaluation of tunnel retro-reflective arch in an extra-long tunnel based on the matter-element extension method. *Accid Anal Prev*. 2021;150:105913. doi:10.1016/j.aap.2020.105913.
- [20] Wang W, Wang S, Lu Z, Cheng Y, Zhao Y, Zhang Q. A comprehensive review on active self-luminous pavements: Materials, performance, and practical applications. *Mater Des*. 2026;262:115467. doi:10.1016/j.matdes.2026.115467.
- [21] Malik P, Sarkhel D. Advancements in bio-based materials and low-VOC formulations: Paving the way for sustainable innovation in the coatings industry. *J Coat Technol Innov*. 2024;2(2):34-38. doi:10.61577/jcti.2024.1000010.
- [22] Faccini M, Bautista L, Soldi L, Escobar AM, Altavilla M, Calve M, et al. Environmentally friendly anticorrosive polymeric coatings. *Appl Sci*. 2021;11:3446. doi:10.3390/app11083446.
- [23] Ong G, Kasi R, Subramaniam RT. A review on plant extracts as natural additives in coating applications. *Prog Org Coat*. 2020;151:106091. doi:10.1016/j.porgcoat.2020.106091.
- [24] Sarcinella A, Frigione M. Sustainable and bio-based coatings as actual or potential treatments to protect and preserve concrete. *Coatings*. 2023;13:44. doi:10.3390/coatings13010044.
- [25] Ulrika FS, Johansson H, Eaton-Magaña S, Towbin H, Myagkaya E. Glowing gems: Fluorescence and phosphorescence of diamonds, colored stones, and pearls. *Feature Article*. 2024;60(4):560-580. doi:10.5741/GEMS.60.4.560.
- [26] Abniki M, Rahmani Z, Yousefi-Limaei N, Shirkavand Hadavand B. Investigating the removal of toluene from textile industrial wastewater using integrated advanced oxidation-based Fenton and ultrasound process. 2025;77(20):93-104. doi:10.22075/chem.2025.38598.2382.
- [27] Reinhold LM, Rymer TL, Helgen KM, Wilson DT. Photoluminescence in mammal fur: 111 years of research. *J Mammal*. 2023;104(4):892-906. doi:10.1093/jmammal/gyad027.

- [28] Dunuweera AN, Dunuweera SP, Ranganathan K. A comprehensive exploration of bioluminescence systems, mechanisms, and advanced assays for versatile applications. *Biochem Res Int*. 2024;8273237:1-22. doi:10.1155/2024/8273237.
- [29] Weiß D, Schramm S. Bioluminescence – The vibrant glow of nature and its chemical mechanisms. *ChemBioChem*. 2024;25(9). doi:10.1002/cbic.202400106.
- [30] Letendre F, Twardowski M, Blackburn A, Poulin C, Latz M. A review of mechanically stimulated bioluminescence of marine plankton and its applications. *Front Mar Sci*. 2024;10:1299602. doi:10.3389/fmars.2023.1299602.
- [31] Liu H, Liao L, Pan X, Su K. Recent research progress of luminescent materials with apatite structure: A review. *Open Ceram*. 2022;10:100251. doi:10.1016/j.oceram.2022.100251.
- [32] Trukhin AN. Luminescence of natural α -quartz crystal with aluminum, alkali and noble ions impurities. *J Lumin*. 2019;214:116602. doi:10.1016/j.jlumin.2019.116602.
- [33] McNaught AD, Wilkinson A, editors. IUPAC Compendium of Chemical Terminology: The Gold Book. 2nd ed. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications; 1997.
- [34] Duchatelet L, Dupont S. Marine eukaryote bioluminescence: A review of species and their functional biology. *Mar Life Sci Technol*. 2025;7:366-381. doi:10.1007/s42995-024-00250-0.
- [35] Ghazy AR, Kenawy ER, Darwesh N, Shendy S, El-Shaer A, Ghazy R. Impact of molecular configuration on the photoluminescence and electrical characteristics of poly-pyrrol-thiazolimine polymers films. *Sci Rep*. 2024;14:28336. doi:10.1038/s41598-024-79758-5.
- [36] Huang YJ, Yeh JW, Yang CMA. Photonics of high-entropy polymers: Revealing molecular dispersion via polymer mixing. *ACS Nano*. 2024;18(47):32759-32768. doi:10.1021/acsnano.4c10585.
- [37] Rahman JUR, Khan S, Jain V, Rajiv A, Dasi S, Fawy KF, et al. Exploring inorganic phosphors: Basics, types, fabrications and their luminescence properties for LED/WLED/displays. *Rev Inorg Chem*. 2024;45(1):55-76. doi:10.1515/revic-2024-0044.
- [38] Singh P, Dan A, Kannan PP, Dhanka M, Bhatia D, Saha J, et al. Non-toxic fabrication of fluorescent carbon nanoparticles from medicinal plants/sources with their antioxidant assay. 2024:1-13. doi:10.48550/arXiv.2401.10673.
- [39] Madhi A, Shirkavand Hadavand B, Madhi MH, Rahmani Z. Fluorescent UV-curable polyurethane acrylate nanocomposite coatings strengthened with carbon quantum dots: Preparation and investigation of UV-blocking and anti-corrosive properties. *Appl Chem Today*. 2024;73:41-53. doi:10.22075/chem.2024.33360.2253.
- [40] Amoozadeh P, Sarrafi AHM, Shirkavand Hadavand B, Rahmani Z, Niazi A, Konož E. The elimination of environmental pollutants through the utilization of nanocomposites that rely on carbon quantum dots. *Int J Environ Sci Technol*. 2026;23(4):288. doi:10.1007/s13762-025-06927-y.
- [41] Tavella RA, da Silva Júnior FMR, Santos MA, Miraglia SGEK, Pereira Filho RD. A review of air pollution from petroleum refining and petrochemical industrial complexes: Sources, key pollutants, health impacts, and challenges. *Chem Eng*. 2025;9(1):13. doi:10.3390/chemengineering9010013.

- [42] Zhao J, Zheng X. Progress on exploring the luminescent properties of organic molecular aggregates by multiscale modeling. *Front Chem.* 2021;9:1-12. doi:10.3389/fchem.2021.808957.
- [43] Jose J, Rangaswamy M, Shamnamol GK, Greeshma KP. A short review on natural precursors-plant-based fluorescent carbon dots for the targeted detection of metal ions. *Sustain Chem Environ.* 2024;7:100114. doi:10.1016/j.scenv.2024.100114.
- [44] Ge M, Liu S, Li J, Li M, Li S, James TD, et al. Luminescent materials derived from biomass resources. *Coord Chem Rev.* 2023;477:214951. doi:10.1016/j.ccr.2022.214951.
- [45] Su Y, Wang G, Fu B, Piao X, Zhang K. A biomimetic phosphor that can build a rigid microenvironment for its long-lived afterglow in aqueous medium. *Commun Chem.* 2024;210:1-10. doi:10.1038/s42004-024-01347-4.
- [46] Collins SB, Bracken-Grissom HD. The language of light: A review of bioluminescence in deep-sea decapod shrimps. *Biol Rev.* 2024;99(5):1806-1830. doi:10.1111/bry.13093.
- [47] Hu M, Chen J, Yu Y, Liu Y. Peroxyacetic acid pretreatment: A potentially promising strategy towards lignocellulose biorefinery. *Molecules.* 2022;27(19):6359. doi:10.3390/molecules27196359.
- [48] Li DC, Jiang H. The thermochemical conversion of non-lignocellulosic biomass to form biochar: A review on characterizations and mechanism elucidation. *Bioresour Technol.* 2017;246:57-68. doi:10.1016/j.biortech.2017.07.029.
- [49] Czaja M, Lisiecki R. Luminescence of agrellite specimen from the Kipawa River locality. *Minerals.* 2019;9(12):752. doi:10.3390/min9120752.
- [50] Zhang H, Zhang H. Special issue: Rare earth luminescent materials. *Opto-Electron Sci.* 2022;1(260):1-3. doi:10.1038/s41377-022-00956-9.
- [51] Bliznyuk VN, Smith J, Guin T, Verst C, Folkert J, McDonald K, et al. Photoluminescence induced in mineral oil by ionizing radiation. *Lubricants.* 2023;11(7):287. doi:10.3390/lubricants11070287.
- [52] Vigier M, Fritsch E, Cavignac T, Latouche C, Jobic S. Shortwave UV blue luminescence of some minerals and gems due to titanate groups. *Minerals.* 2023;13(1):104. doi:10.3390/min13010104.
- [53] Gaurav S, Mansi M, Bhikhu M. Synthesis and applications of carbon dots from waste biomass. In: *Carbon Dots in Analytic Chemistry.* 2023. p. 319-328. doi:10.1016/B978-0-323-98350-1.00008-6.
- [54] Lakowicz JR. *Principles of Fluorescence Spectroscopy.* 3rd ed. Springer; 2006.
- [55] Zhai Y, Li J, Li S, James TD, Chen Z. Photoluminescent materials from woody biomass resources. *Trends Chem.* 2024;6:753-767. doi:10.1016/j.trechm.2024.6.753.
- [56] Samaei H, Salimi R, Sabbagh Alvani AA, Sarabi AA, Ayvaz Mohammadloo H. Colorimetry and characterization of sol-gel synthesized phosphor nanocrystals for use in light-emitting diodes. *J Color Sci Technol.* 2012;6(2):95-101. [In Persian].

[57] Kalyani NT, Jain A, Dhoble SJ. Persistent phosphors for luminous paints: A review. Luminescence. 2022;37(4):524-542. doi:10.1002/bio.4203.

مقاله پذیرفته شده