پوشش‌دهی سطوح با نانوکامپوزیت‌های پیشرفته: کاربردهای فوتوکاتالیستی در تخریب آلاینده‌های محیط زیستی برای محیط‌های شهری

اسماعیل فرمانی قشلاقی[۱]، فریبرز رشیدی[۲]، مجید عبدوس[۳،*]

۱- مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، efarmani@aut.ac.ir
۲- مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران،rashidi@aut.ac.ir
۳- شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، phdabdouss44@aut.ac.ir

چکیده

در این مقاله چالش شدید آلودگی هوا در کلان‌شهرهایی از جمله تهران و نیاز به استفاده از پوشش‌دهی پیشرفته سطوح ساختمانی و شهری به منظور کاهش آلاینده‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. پوشش‌دهی سطوح با نانوکامپوزیت‌های پیشرفته و کاربردهای فوتوکاتالیستی آن‌ها در تخریب آلاینده‌های محیط زیستی به‌طور جامع تحلیل شده است. نانوکامپوزیت‌ها با ترکیب مواد مختلف، به‌ویژه اکسیدهای فلزی نیمه‌رسانا مانند TiO_2، ZnO و g-C3N4، قابلیت بالایی برای تجزیه میکروآلاینده‌ها و آلاینده‌های محیطی تحت تابش نور دارند. در این راستا، روش‌های مختلف پوشش‌دهی شامل اسپری کردن، الکتروفورتیک و الکتروریسی بررسی شده‌اند که هرکدام بسته به نیازهای خاص و شرایط محیطی، مزایای منحصر به‌فردی ارائه می‌دهند. علاوه بر این، ترکیب نانوذرات با دیگر مواد نوظهور مانند گرافن یا مکسین‌ها موجب بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی، افزایش مقاومت در برابر خورندگی و پایداری طولانی‌مدت پوشش‌ها شده است و کارایی این پوشش‌ها رو بهبود بخشیده‌اند. همچنین، استفاده از تکنیک‌های نوآورانه نظیر فناوری پلاسما و الکتروشیمیایی در سنتز نانوکامپوزیت‌ها نقش مهمی در ارتقای کارایی این پوشش‌ها در تصفیه هوا و آب ایفا کرده است. بهره‌گیری از ویژگی‌های فوتوکاتالیستی این مواد با استفاده از انرژی خورشیدی و دیگر منابع تجدیدپذیر، به‌ویژه در محیط‌های شهری، می تواند به کاهش آلودگی هوا و ارتقای کیفیت زندگی در شهرها کمک شایانی کند.

کلمات کلیدی

پوشش دهی سطوح ساختمان، مهندسی مواد پیشرفته، میکروآلاینده، فوتوکاتالیست، انرژی تجدیدپذیر

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

سلامت و ایمنی هوا از نیازهای اولیه و اساسی انسان در زندگی شهری است. در سال‌های اخیر آلودگی هوا، به ویژه در کلان‌شهرهایی مانند تهران، به یک معضل جدی و تهدیدکننده سلامت عمومی تبدیل شده است. سرمایش هوا و افزایش استفاده از وسایل گرمایشی در زمستان، ترافیک سنگین و فعالیت‌های صنعتی از عوامل اصلی افزایش آلاینده‌ها در هوا هستند. این آلودگی پیامدهای منفی بسیاری از جمله بیماری‌های تنفسی، قلبی عروقی و حتی افزایش مرگ و میر را در پی دارد. برای مقابله با این چالش، اقدامات پیشگیرانه و کنترلی جدی و همه جانبه‌ای ضروری است. حل مشکل آلودگی هوا در تهران و دیگر کلان‌شهرهای ایران نیازمند یک رویکرد جامع، بلندمدت و مشارکتی است که با همکاری همه ارگان‌ها و شهروندان قابل دستیابی است[۱, ۲]. ساختمان‌ها به‌عنوان بخشی حیاتی از محیط شهری، نقشی مهم در کاهش یا افزایش آلودگی‌های محیط زیستی ایفا می‌کنند[۳, ۴]. پوشش‌دهی سطوح ساختمان‌ها با مواد پیشرفته، رویکردی نوآورانه است که می‌تواند به کاهش آلودگی‌های محیطی، حفظ زیبایی و افزایش عمر مفید سازه‌ها کمک کند. این فناوری همچنین اثرات مثبتی بر کیفیت هوای شهری و محیط زیست می‌گذارد[۳, ۵, ۶]. از طرفی طبق گزارش EPA[1] ، بیش از ۹۰ درصد زمان انسان‌ها در محیط‌های داخلی سپری می‌شود و سطوح آلودگی در فضاهای داخلی اغلب بالاتر از فضاهای باز است. آلاینده‌های هوا در محیط داخلی می‌توانند باعث مشکلاتی مانند سندرم ساختمان بیمار، بیماری‌های مرتبط با ساختمان و در موارد شدیدتر، حتی سرطان شوند[۷].

روش‌های کنونی کنترل آلودگی داخلی مانند کنترل منبع، تهویه و تصفیه با فیلترها یا جاذب‌ها محدودیت‌های خود را دارند[۲, ۸, ۹]. این محدودیت‌ها ضرورت توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر برای تصفیه هوا، از جمله روش‌های فوتوکاتالیستی، را برجسته می‌کند[۱۰, ۱۱]. پوشش‌های فوتوکاتالیستی، که معمولاً از مواد نیمه‌هادی مانند دی‌اکسید تیتانیوم ارتقا یافته با مواد پیشرفته تشکیل شده‌اند، توانایی تخریب آلاینده‌های گازی میکروآلاینده‌های خطرناک را دارند و آن‌ها را به موادی بی‌ضرر تبدیل می‌کنند. همچنین، این پوشش‌ها قادرند ترکیبات آلی فرار را جذب کرده و تجزیه کنند که این امر به کاهش آلاینده‌های مضر در هوا کمک می‌کند[۱۲-۱۴].

یکی از ویژگی‌های برجسته این پوشش‌ها، خاصیت خودتمیزشوندگی[2] است. این خاصیت با جلوگیری از جذب گرد و غبار، آلودگی و ذرات معلق بر روی سطوح ساختمان‌ها، نیاز به شستشو و نگهداری مداوم را کاهش می‌دهد. این امر باعث صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی می‌شود و هزینه‌های نگهداری را به حداقل می‌رساند[۳, ۱۵]. پوشش‌های بازتاب‌دهنده نور خورشید می‌توانند جذب حرارت در ساختمان‌ها را کاهش دهند و اثرات گرمای شهری را کنترل کنند. این پوشش‌ها همچنین به کاهش دمای داخلی ساختمان کمک کرده و مصرف انرژی برای سرمایش را به حداقل می‌رسانند، که این امر به کاهش هزینه‌ها و حفظ منابع انرژی منجر می‌شود[۱۶, ۱۷].

پوشش‌های ضدآب و مقاوم در برابر عوامل شیمیایی محیطی، از مصالح ساختمانی در برابر رطوبت، خوردگی و اسیدهای ناشی از آلودگی هوا محافظت می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث افزایش عمر مفید ساختمان‌ها شده و از تخریب ناشی از شرایط محیطی جلوگیری می‌کنند[۱۸-۲۰]. استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی در نمای ساختمان‌ها،سطوح داخلی و زیرساخت‌های شهری می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آلودگی ایفا کند. این پوشش‌ها علاوه بر پاکسازی غیرمستقیم هوا، از تجمع آلاینده‌ها بر روی سطوح جلوگیری کرده و به بهبود کیفیت محیط زیست شهری کمک می‌کنند[۵, ۲۱].

در کنار فناوری فوتوکاتالیستی، روش‌هایی مانند فیلتراسیون زیستی و اکسیداسیون کاتالیستی نیز برای حذف آلاینده‌های آلی فرار و گازهای سمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فیلتراسیون زیستی، از میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه آلاینده‌ها استفاده می‌شود، در حالی که اکسیداسیون کاتالیستی عمدتاً در دماهای بالا و با استفاده از فلزات نجیب صورت می‌گیرد. پوشش‌دهی سطوح ساختمان‌ها با استفاده از فناوری‌های نانوکامپوزیت فوتوکاتالیستی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای مقابله با آلودگی‌های محیط زیستی در شهرها مورد استفاده قرار گیرد. این روش به دلیل عملکرد در دمای محیط، قابلیت اعمال مستقیم بر سطوح شهری، و فعال‌سازی با نور خورشید، گزینه‌ای مناسب برای استفاده در شهرهای هوشمند و مناطق با منابع محدود هستند[۲۲, ۲۳]. این فناوری با ارائه قابلیت‌هایی نظیر کاهش آلودگی هوا، حفاظت از سازه‌ها و کاهش مصرف انرژی، به ایجاد محیط‌های سالم‌تر و کاهش اثرات مخرب آلودگی بر سلامت انسان و محیط زیست کمک می‌کند. این فناوری نوین، با گسترش استفاده در محیط‌های شهری، می‌تواند گامی مهم در جهت توسعه پایدار و حفظ محیط زیست باشد. نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی موادی هستند که در آن یک کاتالیست، با استفاده از نور (معمولاً نور فرابنفش

[1] Environmental Protection Agency
[2] Self-cleaning

ACCEPTED MANUSCRIPT

یا مرئی) واکنش‌های شیمیایی را در سطح خود تسریع می‌کند. این نانوکامپوزیت‌ها با جذب نور و ایجاد جفت الکترون-حفره واکنش‌های اکسیداسیون و احیای قدرتمندی را آغاز می‌کنند[۲۴-۲۷]. هرچند مواد نیمه‌هادی مانند دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل فعالیت فوتوکاتالیستی بالا و پایداری شیمیایی مورد توجه هستند، این مواد محدودیت‌هایی نیز دارند[۷]. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به جذب محدود نور در ناحیه فرابنفش و بازده پایین در نور مرئی اشاره کرد. علاوه بر این، نرخ ترکیب مجدد الکترون-حفره نیز می‌تواند کارایی فرآیند را کاهش دهد[۲۸, ۲۹]. بنابراین نانوکامپوزیت‌ها به‌عنوان نسل جدیدی از مواد پیشرفته، توانسته‌اند محدودیت‌های فوتوکاتالیست‌های سنتی را برطرف کنند. این مواد از ترکیب دو یا چند ماده در مقیاس نانو تشکیل شده‌اند که خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها را بهینه می‌کند. در فرآیند فوتوکاتالیستی، نانوکامپوزیت‌ها مزایای گوناگونی را ایجاد می‌کنند[۳۰, ۳۱].

با ترکیب نیمه‌هادی‌های مختلف یا افزودن مواد رنگ‌زا، نانوکامپوزیت‌ها توانایی جذب نور در ناحیه مرئی را افزایش می‌دهند. مواد نانوکامپوزیتی به دلیل طراحی ویژه، مسیرهایی را برای انتقال بار الکتریکی فراهم می‌کنند که نرخ ترکیب مجدد را کاهش می‌دهد و فعالیت فوتوکاتالیستی را افزایش می‌دهد[۳۲-۳۴]. ساختار نانویی نانوکامپوزیت‌ها دارای سطح تماس بالا با آلاینده‌ها است و واکنش‌های شیمیایی را تسریع می‌کند. بنابراین نانوکامپوزیت‌ها، به دلیل کارایی بالا و انعطاف‌پذیری در طراحی، آینده‌ای روشن در زمینه کاربردهای فوتوکاتالیستی دارند و می‌توانند گامی مؤثر در جهت توسعه فناوری‌های پایدار برای حفظ محیط زیست باشند[۳۵, ۳۶].

هدف اصلی این مقاله مروری، بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه استفاده از نانوکامپوزیت‌ها برای پوشش‌دهی سطوح به‌منظور تخریب فوتوکاتالیستی آلاینده‌های زیست محیطی است. این مقاله مزایا و قابلیت‌های مواد نانوکامپوزیتی در بهبود فرآیندهای فوتوکاتالیستی برجسته می‌کند و نقش این مواد در کاهش آلودگی هوا بررسی می‌کند. به‌ویژه، بر خواص کلیدی این مواد مانند افزایش سطح فعال، بهبود جذب نور مرئی و کاهش نرخ ترکیب مجدد الکترون-حفره تأکید خواهد شد. همچنین، کاربردهای این فناوری در تصفیه محیط‌های بسته و باز و چشم‌انداز توسعه آن برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی بررسی می‌شود.

ساختار مقاله به‌گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا به معرفی اصول فوتوکاتالیستی و نقش نانوکامپوزیت‌ها در این فرآیند پرداخته شود. در ادامه، انواع پوشش‌های نانوکامپوزیتی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بررسی خواهد شد. سپس، کاربردهای عملی این فناوری در حوزه‌های مختلف از جمله تصفیه هوا، آب و خودتمیزشوندگی سطوح تحلیل می‌شود. در پایان، چالش‌ها و محدودیت‌های موجود و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه می‌گردد تا زمینه‌ای برای توسعه بیشتر این حوزه فراهم شود.

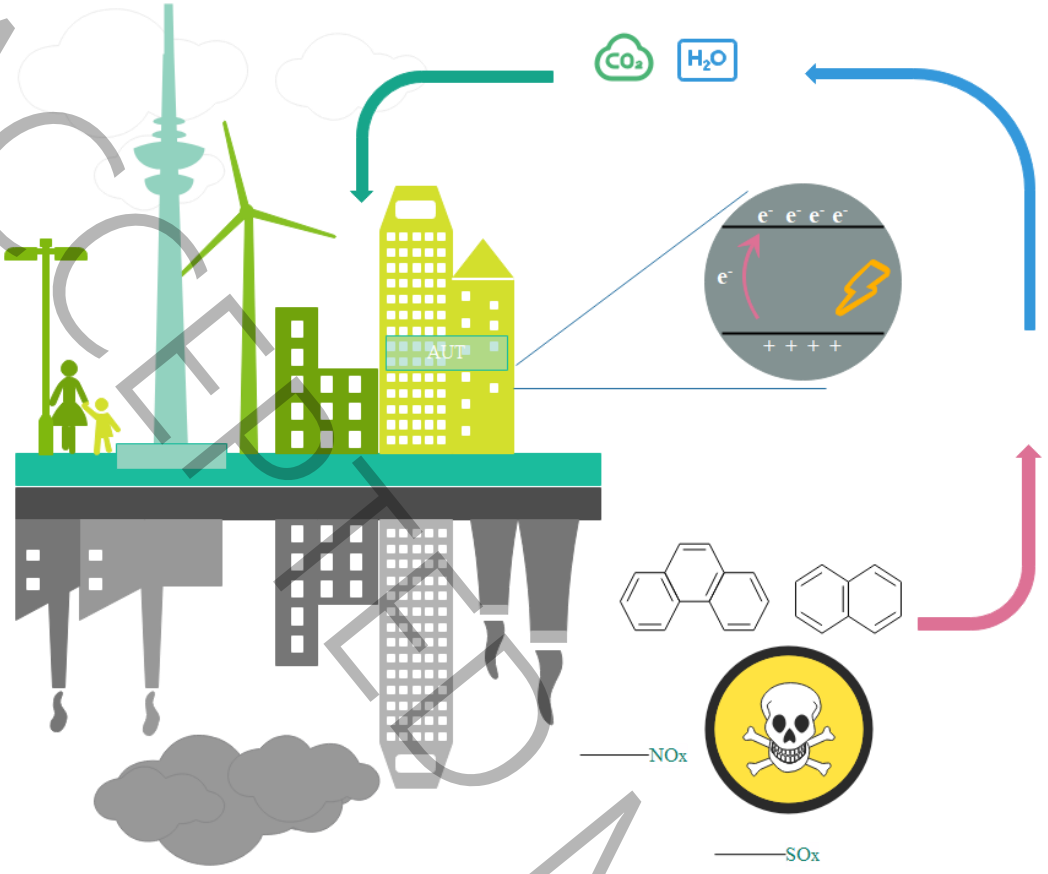
۲- مبانی نظری و اصول عملکردی

با توجه به شکل ۱ فرآیند فوتوکاتالیستی با جذب نور توسط یک ماده نیمه‌هادی مانند دی‌اکسید تیتانیوم یا اکسید روی آغاز می‌شود. این مواد دارای یک نوار هدایت و یک نوار ظرفیت هستند که بین آن‌ها یک فاصله انرژی یا گاف انرژی وجود دارد[۳۷]. هنگامی که فوتون‌هایی با انرژی برابر یا بیشتر از گاف انرژی به نیمه‌هادی تابیده می‌شوند، الکترون‌های موجود در نوار ظرفیت تحریک شده و به نوار هدایت منتقل می‌شوند[۳۸, ۳۹]. این انتقال باعث تشکیل یک حفره مثبت در نوار ظرفیت و یک الکترون آزاد در نوار هدایت می‌شود. جفت الکترون-حفره تولید شده، اساس واکنش‌های فوتوکاتالیستی است که به تخریب آلاینده‌ها کمک می‌کند[۴۰, ۴۱]. پس از تولید جفت الکترون-حفره، این ذرات با مواد موجود در محیط واکنش نشان می‌دهند. الکترون‌ها می‌توانند با مولکول‌های اکسیژن (O_2) موجود در هوا یا آب واکنش داده و آن‌ها را به سوپراکسید آنیون‌ها (O_2^-) تبدیل کنند. از طرف دیگر، حفره‌های مثبت می‌توانند با مولکول‌های آب یا هیدروکسیل‌ها (OH^-) واکنش داده و رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH\bullet$) تولید کنند. این رادیکال‌ها و گونه‌های فعال اکسیژن[1] به دلیل انرژی واکنش‌پذیری بالا، نقش کلیدی در تخریب آلاینده‌های آلی و معدنی ایفا می‌کنند[۴۰, ۴۲, ۴۳].

رادیکال‌های تولید شده در فرآیند فوتوکاتالیستی قادرند ساختارهای پیچیده ترکیبات آلی و معدنی را تجزیه کنند. این تخریب ممکن است به صورت مستقیم (واکنش آلاینده با حفره‌ها یا الکترون‌ها) یا غیرمستقیم (از طریق واکنش با رادیکال‌ها) انجام شود. به‌عنوان مثال، ترکیبات آلی پیچیده می‌توانند به دی‌اکسید کربن و آب تجزیه شوند، در حالی که آلاینده‌های معدنی به یون‌های بی‌ضرر تبدیل می‌شوند . این مکانیزم‌ها، اساس فناوری‌های نوین در تصفیه آب و هوا، حذف ترکیبات آلی فرار و خودتمیزشوندگی سطوح را تشکیل می‌دهند[۴۴, ۴۵].

[1] Reactive oxygen species

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱ پوشش‌های فوتوکاتالیستی پیشرفته با کاربردهای شهری

Figure 1 Advanced photocatalytic coatings with urban applications

دی‌اکسید تیتانیوم از پرکاربردترین نیمه‌هادی‌ها در فناوری‌های فوتوکاتالیستی است[۴۶]. گاف انرژی مناسب (۳/۲eV برای فاز آناتاز)، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا و هزینه تولید کم، این ماده مورد توجه قرار گرفته است[۳۸]. دی‌اکسید تیتانیوم با جذب پرتو فوتون می تواند جفت الکترون-حفره تولید کرده و با ایجاد رادیکال هیدروکسیل به تخریب آلاینده‌ها کمک کند. محدودیت اصلی دی‌اکسید تیتانیوم عدم جذب نور مرئی است که استفاده از آن را در کاربردهای مرتبط با انرژی خورشیدی محدود می‌کند. با وجود مطالعات گسترده برای یافتن مواد جدید جایگزین دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان یک فوتوکاتالیست پاک‌کننده هوا، هنوز جایگزین‌های عملی موفقیت چندانی نداشته‌اند[۴۷]. از این رو، انتظار می‌رود که فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر دی‌اکسید تیتانیوم همچنان به عنوان ماده اصلی در این زمینه باقی بمانند. برای حل کاستی‌های این دسته از فوتوکاتالیست‌ها، روش‌هایی مانند دوپینگ با فلزات و غیرفلزات و ترکیب با سایر مواد نیمه‌هادی پیشنهاد شده‌اند[۴۸]. اکسید روی یکی دیگر از نیمه‌هادی‌های پرکاربرد در نانوکامپوزیت‌ها است. این ماده دارای گاف انرژی مشابه دی‌اکسید تیتانیوم مقداری معادل ۳/۳eV دارد. اکسید روی به دلیل خواص نوری، الکترونیکی و ضدباکتریایی مطلوب، در حذف آلاینده‌ها و تصفیه آب و هوا کاربرد دارد[۴۹, ۵۰]. همچنین، اکسید روی قابلیت سنتز در اشکال مختلف نانوساختاری مانند نانومیله‌ها، نانوسیم‌ها و نانوذرات را دارد که این امر می‌تواند سطح فعال بیشتری فراهم کند. محدودیت‌های جذب نور مرئی در اکسید روی نیز وجود دارد، اما ترکیب آن با سایر مواد و دوپینگ می‌تواند عملکرد آن را بهبود بخشد[۵۱, ۵۲]. در کنار این مواد، گرافیت کربن نیترید (g-C_3N_4) یک ماده نیمه‌هادی جدید با گاف انرژی کوچک‌تر ۲/۷eV است که امکان جذب نور مرئی را فراهم می‌کند. این ماده به دلیل ساختار لایه‌ای، پایداری شیمیایی و سازگاری زیست‌محیطی به‌عنوان گزینه‌ای نویدبخش برای فوتوکاتالیست‌های نسل جدید شناخته می شود[۵۳]. یکی از ویژگی‌های بارز g-C_3N_4 توانایی ترکیب با سایر نیمه‌هادی‌ها برای تشکیل نانوکامپوزیت‌های با کارایی بالاتر است. این ترکیبات می‌توانند نرخ ترکیب مجدد الکترون-حفره را کاهش داده و فرآیند فوتوکاتالیستی را تقویت کنند[۵۴, ۵۵]. پیشرفت‌های اخیر

ACCEPTED MANUSCRIPT

در استفاده از فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر نیترید کربن پلیمری (PCN[1]) نشان می‌دهند ساختارهای لایه‌ای و قابلیت تنظیم موقعیت نوارها می‌توانند آلاینده‌های هوا را به مواد کم‌ضرر یا ارزشمند تبدیل کنند[۵۶].این سه ماده به‌عنوان پایه‌های اصلی در نانوکامپوزیت‌ها، طیف وسیعی از کاربردهای زیست‌محیطی را پشتیبانی می‌کنند و با بهینه‌سازی ترکیب و ساختار آن‌ها، می‌توان به عملکرد بهتری در تخریب آلاینده‌ها دست یافت.

مواد پیشرفته جدیدی معرفی شده‌اند که عملکرد بالاتری در انتقال الکترون از خود نشان داده‌اند. کاربید فلزات مختلف خاصیت و عملکردی مشابه فلزات نجیب دارند که با توسعه آن‌ها از جمله مواد پر مصرف از این دسته مواد پیشرفته، مواد دو بعدی مکسین[2] هستند که به دلیل ساختار منحصربه‌فرد، هدایت الکتریکی بالا و سطح فعال زیاد، به‌عنوان تقویت‌کننده‌های مؤثر در نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی شناخته می‌شوند. ترکیب مکسین با نیمه‌هادی‌هایی مانند دی‌اکسید تیتانیوم و $g\text{-}C_3N_4$ می‌تواند نرخ ترکیب مجدد الکترون-حفره را کاهش دهد و بهره‌وری فرایند فوتوکاتالیستی را افزایش دهد[۵۷]. همچنین خواص نوری بهبود یافته ناشی از مکسین ها امکان جذب نور مرئی بیشتر را فراهم می‌کند که این ویژگی برای کاربرد در حضور نور مرئی و حذف آلاینده‌ها بسیار مطلوب است[۵۸, ۵۹].

ساختار دوبعدی گرافن نیز به دلیل انتقال بار بالا، از دیگر تقویت‌کننده‌های مؤثر در نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی است. این ماده می‌تواند به‌عنوان یک مسیر انتقال الکترون عمل کند و احتمال ترکیب مجدد الکترون-حفره را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. همچنین گرافن دارای سطح فعال بسیار زیاد است که به افزایش تعامل بین فوتوکاتالیست و آلاینده‌ها کمک می‌کند. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن و نیمه‌هادی‌ها می‌توانند در طیف وسیعی از کاربردهای زیست‌محیطی، از جمله تصفیه آب و هوا، عملکرد بالایی از خود نشان دهند[۲۷, ۶۰, ۶۱] این تقویت‌کننده‌ها با بهبود خواص نوری، الکتریکی و سطحی نانوکامپوزیت‌ها، فرصت‌هایی نویدبخش برای توسعه مواد پیشرفته با عملکرد بالا در فرایندهای فوتوکاتالیستی فراهم می‌کنند.

۳- روش‌های ساخت و پوشش‌دهی سطوح

روش‌های پوشش‌دهی، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، امکان تولید پوشش‌های یکنواخت و ویژگی‌های بهبودیافته برای کاربردهای مختلف زیست‌محیطی و صنعتی، نقش کلیدی در توسعه نانوکامپوزیت‌های پیشرفته دارند. نوع سطح تأثیر قابل‌توجهی بر چسبندگی و عملکرد پوشش‌های نانوکامپوزیتی دارد[۶۲-۶۴]. سطوح بتنی و سیمانی به دلیل تخلخل بالا و زبری سطح، امکان چسبندگی قوی‌تری را فراهم می‌کنند و پوشش‌ها می‌توانند به‌خوبی در حفره‌های سطحی نفوذ کرده و پایدارتر شوند. این ویژگی باعث می‌شود که این سطوح برای کاربردهایی مانند تخریب آلاینده‌ها در محیط‌های باز شهری ایده‌آل باشند[۴۷, ۶۵, ۶۶]. در مقابل، سطوح فلزی با داشتن ساختار متراکم و صاف، به آماده‌سازی اولیه (مانند زبر کردن یا اعمال پوشش‌های اولیه) نیاز دارند تا چسبندگی پوشش نانوکامپوزیتی بهبود یابد و از مشکلاتی مانند خوردگی و پوسته‌شدن جلوگیری شود[۶۷, ۶۸]. خواص سطح زیرلایه بر واکنش‌های فوتوکاتالیستی و سایر ویژگی‌های عملکردی پوشش تأثیر مستقیم دارد. برای مثال، سطوح شیشه‌ای به دلیل شفافیت و بازتاب کم، در پوشش‌های فوتوکاتالیستی که نیاز به جذب نور دارند، مناسب‌تر هستند. از سوی دیگر، سطوح سرامیکی به دلیل مقاومت حرارتی بالا، برای کاربردهایی که با دماهای بالا در تماس‌اند، انتخابی ایده‌آل محسوب می‌شوند. در نهایت، نوع سطح می‌تواند میزان مقاومت در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت، تغییرات دما و شرایط شیمیایی را تحت تأثیر قرار دهد، که باید در طراحی و انتخاب پوشش‌های نانوکامپوزیتی متناسب با کاربرد نهایی در نظر گرفته شود[۶۷-۶۹]. روش اسپری یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها برای اعمال پوشش‌های نانوکامپوزیتی است. پوشش‌های تیتانیایی تهیه‌شده با روش اسپری حرارتی از پودرهای آناتاز و روتیل، فعالیت فوتوکاتالیستی نشان داده و عملکرد آن‌ها به ترکیب فازی، ریزساختار، مورفولوژی سطح، ضخامت و میزان هیدروکسیلاسیون سطح وابسته است[۷۸].

روش‌های الکتروشیمیایی هم به دلیل تکرارپذیری و دقت بالا بسیار پرکاربرد هستند. این روش‌ها به انواع مختلفی قابل اجرا هستند. در روش الکتروفورتیک، نانوذرات معلق در یک محلول به کمک یک میدان الکتریکی بر روی سطح رسوب داده می‌شوند. این تکنیک به دلیل کنترل دقیق بر ضخامت و یکنواختی پوشش و توانایی پوشش‌دهی سطوح پیچیده مورد توجه قرار گرفته است[۸۰, ۸۱]. روش الکتروفورتیک به‌ویژه برای اعمال پوشش‌های سرامیکی یا کامپوزیتی بر روی سطوح فلزی در کاربردهای زیست‌محیطی و صنعتی بسیار

[1] polymeric carbon nitride
[2] MXene

ACCEPTED MANUSCRIPT

مناسب است[۸۲, ۸۳]. پلاسما سرد یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های پوشش‌دهی است که در آن از گازهای یونیزه‌شده در دمای پایین برای اعمال نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود[۸۵]. این روش به دلیل ویژگی‌هایی نظیر چسبندگی بالا، امکان اصلاح سطح همزمان با پوشش‌دهی و استفاده در شرایط بدون حلال، در صنایع مختلف به کار گرفته می‌شود. همچنین پلاسما سرد قابلیت پوشش‌دهی انواع مواد روی سطوح حساس مانند پلیمرها را دارد[۸۶]. در جدول ۱ مزایا و کاربردهای روش‌های پوشش‌دهی سطوح داخلی و خارجی گردآوری شده است.

Table ۱ Surface coating methods for photocatalytic nanocomposites

جدول ۱- روش‌های پوشش دهی سطوح

روش پوشش‌دهی	شرح	مزایا	کاربردها	منبع
اسپری	پاشیدن محلول نانوکامپوزیتی به صورت ذرات ریز روی سطح با نازل	سرعت بالا، یکنواختی پوشش، امکان استفاده روی سطوح بزرگ، اسپری حرارتی (افزایش چسبندگی)	پوشش‌های تیتانیایی (فعالیت فوتوکاتالیستی)، پوشش دهی سطوح بزرگ	[۷۰, ۷۱]
الکتروریسی	الکتروریسی: ریسیدن محلول نانوکامپوزیتی با میدان الکتریکی و رسوب به صورت الیاف نازک	الکتروریسی: سطح بالا و تخلخل مناسب	الکتروریسی: تصفیه هوا/آب، سنسورهای زیست‌محیطی	[۷۲]
پلاسما سرد	استفاده از گازهای یونیزه‌شده در دمای پایین برای اعمال نانوکامپوزیت‌ها	چسبندگی بالا، اصلاح سطح همزمان با پوشش‌دهی، استفاده بدون حلال، پوشش مواد روی سطوح حساس (پلیمرها)	نانوکامپوزیت‌های پلاسمونیک ZnO-Au (بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی)، اصلاح نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی $NiZnFe_2O_4$ (بهبود خواص مغناطیسی و فعالیت فوتوکاتالیستی)	[۷۳, ۷۴, ۷۵]

برای ارزیابی عملکرد و ساختار پوشش‌های نانوکامپوزیتی، از تکنیک‌های مختلف مشخصه‌یابی استفاده می‌شود. این تکنیک‌ها اطلاعات ارزشمندی در مورد خواص نوری، ساختاری، سطحی و ترکیبات شیمیایی پوشش ارائه می‌دهند. طیف‌سنجی انعکاس پخشی فرابنفش-مرئی برای مطالعه خواص نوری و تعیین پهنای نوار شکاف[1] پوشش‌ها به کار می‌رود. با استفاده از روش می‌توان توانایی جذب نور و بازده فوتوکاتالیستی پوشش را بررسی کرد. تغییرات در گاف انرژی ناشی از استفاده از نانوذرات یا دوپینگ مواد، به وضوح توسط این تکنیک قابل شناسایی است[۷۶-۷۸]. تکنیک طیف‌سنجی فتولومینسانس برای تحلیل بازترکیب الکترون-حفره در فرآیندهای فوتوکاتالیستی به کار می‌رود. شدت تابش فتولومینسانس می‌تواند نشان‌دهنده بازده بازترکیب باشد؛ شدت کمتر نشان‌دهنده بازترکیب کمتر و در نتیجه عملکرد بهتر فوتوکاتالیستی است[۷۶]. میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی مورفولوژی و ساختار سطحی پوشش استفاده می‌شود . این روش اطلاعاتی در مورد زبری، یکنواختی و ساختار نانومقیاس پوشش ارائه می‌دهد. همچنین، تصاویر این روش می‌توانند توزیع ذرات در پوشش و اندازه ذرات را به‌طور دقیق نشان دهند[۷۹, ۸۰]. پراش پرتو ایکس برای شناسایی فازهای بلوری و تعیین ساختار کریستالی مواد استفاده می‌شود. این تکنیک فاز مواد تشکیل‌دهنده پوشش و ساختار بلوری را مشخص می‌کند[۸۱, ۸۲].

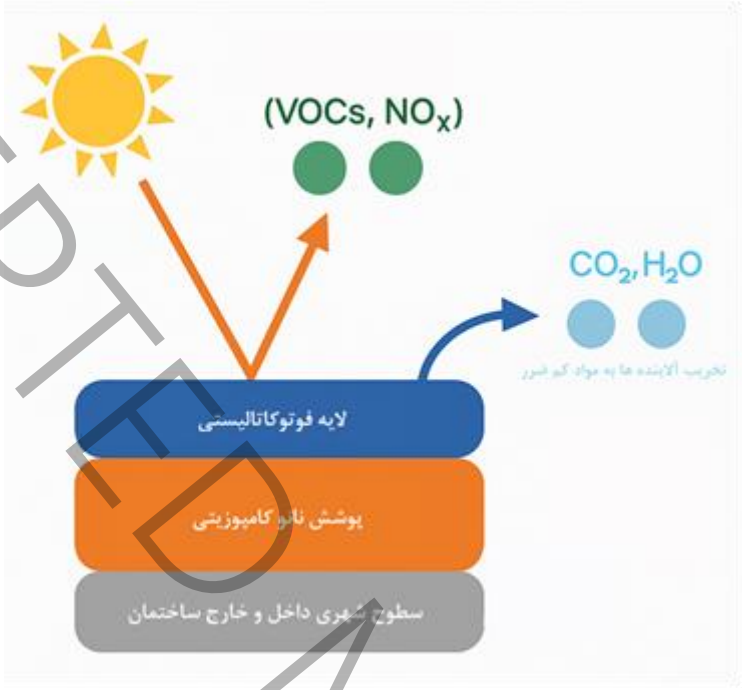
۴- کاربردهای شهری فوتوکاتالیست‌های پوشش دهی شده

کیفیت هوا در مناطق شهری به دلیل افزایش فعالیت‌های صنعتی، حمل‌ونقل، و گسترش ساخت‌وساز به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی تبدیل شده است. در این میان، ساختمان‌ها به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر از محیط شهری، پتانسیل بالایی برای کمک به کاهش آلودگی هوا دارند. سطوحی مانند دیوارهای بیرونی ساختمان‌ها، کاشی‌های پیاده‌رو، سطوح آسفالت یا تابلوها مستعد تجمع آلاینده‌ها هستند. پوشش‌های فوتوکاتالیستی به‌ویژه برای سطوحی که در تماس مستقیم با هوا و آلودگی‌های شهری قرار دارند (مانند نماهای ساختمانی، جداول، پل‌ها و فضاهای عمومی)، کاربردی و مؤثر هستند.

[1] Band Gap

ACCEPTED MANUSCRIPT

استفاده از پوشش‌های فعال، به‌ویژه پوشش‌های نانوکامپوزیتی و فوتوکاتالیستی با توجه به شکل ۲، برای کاهش آلاینده‌های هوا از طریق جذب و تخریب ترکیبات مضر مانند اکسیدهای نیتروژن (NOx)، اکسیدهای گوگرد (SOx) و ترکیبات آلی فرار است. این فناوری‌ها علاوه بر تأثیر مستقیم در کاهش آلودگی هوا، می‌توانند با بهره‌گیری از خواص خودتمیزشوندگی و بازتاب‌دهی حرارت، به کاهش مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی ساختمان‌ها کمک کنند.



شکل ۲ حذف آلاینده های شهری با فوتوکاتالیست‌های پیشرفته

Figure۲ Removal of urban pollutants using advanced photocatalysts

فرآیندهای توسعه مواد پیشرفته منجر به تولید مواد پیشرفته‌ای می‌شود که راهکارهای مناسبی و پایدار برای مشکلات ارائه می‌دهند[۸۳, ۸۴]. استفاده گسترده از پوشش‌های فعال بر روی سطوح ساختمان‌ها با توجه به مزایای محافظتی اشاره شده در شکل ۳، می‌تواند به ایجاد شهرهای پاک‌تر و کاهش آلودگی هوای محیط کمک کند. با توجه به رشد سریع شهرنشینی و افزایش آلاینده‌ها، این فناوری می تواند به‌عنوان راه‌حلی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای بهبود کیفیت هوای شهری به‌کار گرفته شود. سرمایه‌گذاری در توسعه و استفاده از این پوشش‌ها می‌تواند گامی موثر در جهت حفظ محیط زیست و سلامت عمومی باشد[۲۱, ۸۵].

فناوری استفاده از نور برای پاکسازی هوا، که فرآیندهای طبیعی را شبیه‌سازی می‌کند، به عنوان یکی از تکنولوژی‌های ایده‌آل برای تصفیه هوا با پتانسیل بالا مطرح است. با این حال، تحقق کامل این فناوری نیازمند پیشرفت‌های اساسی در چندین حوزه است. اگرچه تحقیقات آکادمیک عمدتاً بر توسعه مواد متمرکز بوده است، مهندسی برای تجاری‌سازی نیازمند بررسی عمیق‌تر مسائل عملی مانند جلوگیری از غیرفعال شدن یا آلودگی فوتوکاتالیست‌ها، تثبیت ساده و در دمای پایین فوتوکاتالیست‌ها بر روی سطوح پشتیبان و طراحی اقتصادی و کارآمد راکتورها است[۱۱, ۱۴, ۸۶]. پوشش‌های نانوکامپوزیتی قادرند ترکیبات آلی فرار را جذب کرده و از طریق واکنش‌های فوتوکاتالیستی آن‌ها را به آب و دی‌اکسید کربن تبدیل کنند. این ویژگی به‌ویژه در کاهش بوهای نامطبوع و آلودگی‌های شیمیایی در محیط‌های شهری موثر است[۹۵, ۹۶]. پوشش سیمان با نانوکامپوزیت گرافن/دی‌اکسید تیتانیوم کارایی بالایی در خودتمیزشوندگی و تصفیه هوای ساختمان‌ها تحت تابش خورشید دارد[۸۷]. زیرساخت‌های فوتوکاتالیستی مبتنی بر نانوساختارهای اکسید روی قادر به معدنی‌سازی ترکیبات آلی سمی و بهبود کیفیت هوای شهری هستند و به کاهش آلودگی هوا کمک می‌کنند[۸۸]. پوشش‌های ساختمانی فوتوکاتالیستی به کار رفته در نمای شهری برای کاهش آلودگی هوا به‌صورت غیرفعال با استفاده از مواد فوتوکاتالیستی مانند دی‌اکسید تیتانیوم می‌توانند آلودگی هوا را در لندن بین۳/۵ تا ۸/۹ درصد در زمستان و ۱۸ تا ۳۷/۵ درصد در تابستان کاهش دهند[۲۱]. تحقیقات آینده باید به طور جدی مسائل عملی شامل جلوگیری از کاهش کارایی فوتوکاتالیست، توسعه روش‌های تثبیت آسان و با مصرف انرژی

ACCEPTED MANUSCRIPT

پایین و بهبود طراحی راکتورهای مؤثر و اقتصادی است. توجه بیشتر به این موضوعات می‌تواند مسیر تجاری‌سازی و بهره‌برداری از این فناوری را تسریع بخشد[۸۹]. کاهش فعالیت فوتوکاتالیستی با افزایش زمان عمل‌آوری مشاهده شد، اما شست‌وشوی سطح با آب این عملکرد را بازیابی کرد مواد فوتوکاتالیستی آنتاز-سیلیکا می‌توانند جایگزین ۱۵ درصد سیمان در ملات‌های سیمانی شده و بتن‌های دانه‌ریز خودتمیزشونده با قابلیت بالای خودتمیزشوندگی تولید کنند[۶۵, ۹۰]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که پیش‌بینی عمق کربناسیون در سازه‌های بتنی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند به افزایش دوام مصالح در محیط‌های شهری کمک کند، که این موضوع مکمل توسعه پوشش‌های نانوکامپوزیتی فوتوکاتالیستی به‌منظور محافظت از سطوح و کاهش آلاینده‌ها است[۹۱]. معیارهایی نظیر بازده فوتونی و کوانتومی برای ارزیابی کارایی استفاده شده است. رنگ‌های پایه آب به دلیل انتشار کمتر ترکیبات آلی فرار، دوستدار محیط زیست بوده و دوام طولانی‌مدت عملکرد فوتوکاتالیستی آن‌ها تحت اشعه فرابنفش تأیید شده است. این فناوری راه‌حلی پایدار برای بهبود کیفیت هوا محسوب می‌شود[۹۲]. پوشش‌های بازتابنده نور خورشید می‌توانند دمای ساختمان‌ها را کاهش دهند و نیاز به انرژی برای سرمایش را کم کنند. این کاهش مصرف انرژی به‌طور غیرمستقیم منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود[۲۳, ۹۳]. همچنین، سطوح پوشش‌داده‌شده با این مواد می‌توانند اثر جزیره گرمایی شهری را که از افزایش دمای مناطق شهری ناشی می‌شود، کاهش دهند[۹۴, ۹۵].

شکل ۳ نقش پوشش‌های فوتوکاتالیست

Figure ۳ Role of photocatalyst coatings in environmental remediation

با تمرکز بر کاربردهای این فناوری، در این مقاله به بررسی نقش پوشش‌دهی سطوح ساختمانی در تصفیه هوای شهری و فضای داخلی، و همچنین ویژگی‌های زیست‌محیطی این پوشش‌ها می‌پردازد. پوشش‌های فوتوکاتالیستی، با استفاده از نور مرئی یا فرابنفش، آلاینده‌های گازی و ذرات معلق را به ترکیبات بی‌ضرری تبدیل کرده و بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری را ممکن می‌سازند. این پژوهش همچنین بر مواد نوآورانه، طراحی سیستم‌های پایدار، و چالش‌های عملی این فناوری در مسیر تجاری‌سازی متمرکز است. درجدول ۲ مکانسیم عملکردی و مواد استفاده شده گردآوری شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۲ مکانسیم عملکرد و پوشش‌های پیشرفته به همراه کاربردهای ویژه

Table۲ Functional mechanisms and applications of advanced photocatalytic coatings

نوع پوشش	مکانیسم عملکرد	مواد تشکیل‌دهنده	مزایا	کاربردها	منبع
پوشش‌های فوتوکاتالیستی	جذب و تخریب گازهای مضر (NOx، SOx) و ترکیبات آلی فرار (VOCs) از طریق واکنش‌های شیمیایی با نور	دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی (ZnO)، بیسموت (Bi)	کاهش آلودگی هوا، حذف بوهای نامطبوع، خودتمیزشوندگی	پوشش نمای ساختمان‌ها، رنگ‌های فوتوکاتالیستی، پوشش سیمان با نانوکامپوزیت گرافن/دی‌اکسید تیتانیوم	[۸۵, ۹۶, ۹۷]
پوشش‌های بازتاب‌دهنده خورشیدی	کاهش جذب حرارت خورشید توسط ساختمان و کاهش دمای سطحی	مواد با بازتاب بالا ترکیبی با مواد فوتوکاتالیستی، مواد ترموکرومیک (مانند VO_2)	کاهش مصرف انرژی سرمایشی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش اثر جزیره گرمایی شهری	پوشش نمای ساختمان‌ها، پنجره‌های انرژی‌کارا	[۹۸-۱۰۰]
پوشش‌های خودتمیزشونده	جلوگیری از تجمع ذرات معلق و آلاینده‌ها روی سطوح و شستشوی آن‌ها توسط آب باران	مواد آب‌گریز، مواد فوتوکاتالیستی	کاهش آلودگی هوا، صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش نیاز به شستشو	پوشش نمای ساختمان‌ها	[۲۳, ۱۰۱]
پوشش‌های ترکیبی	ترکیب ویژگی‌های چند نوع پوشش (مثلاً فوتوکاتالیستی و ترموکرومیک)	ترکیب مواد مختلف مانند TiO_2 و VO_2	افزایش کارایی در تصفیه هوا، تنظیم انرژی خورشیدی و انتقال نور مرئی	پوشش‌های چندمنظوره برای نمای ساختمان‌ها و پنجره‌ها	[۹۹, ۱۰۲]
پوشش‌های مبتنی بر مواد جایگزین	استفاده از مواد ارزان‌تر و در دسترس‌تر	خاکستر بادی، کربنات سدیم، فوتوکاتالیست‌های بیسموتی (Bi_2O_3، $Bi_2O_2CO_3$، BiOI، $BiVO_4$، $BiPO_4$)	کاهش هزینه‌ها، استفاده از مواد بازیافتی	پوشش بتن	[۲۲]
کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف طبیعی	افزایش استحکام و پایداری و قابلیت تصفیه هوا	سیمان سرباره-خاکستر بادی، فیبر نی یا ذرت، SiO_2/BiO_x	استحکام مکانیکی بالا، جذب آب کم، پایداری ابعادی، تصفیه فرمالدهید	دیوارهای داخلی	[۶۶, ۱۰۳]

۵- چالش‌ها و دورنمای آینده

افزایش آلودگی ناشی از فعالیت‌های شهری، صنعتی و احتراق سوخت‌ها منجر به گسترش آلاینده‌هایی همچون ترکیبات آلی فرار (VOCs)در هوا شده است که تأثیرات منفی بر سلامت عمومی دارند، به‌ویژه در فضاهای بسته که آلودگی آن‌ها می‌تواند ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر از محیط‌های باز باشد. در این میان، فناوری پوشش‌دهی نانوکامپوزیتی با خاصیت فوتوکاتالیستی به عنوان راهکاری نوین برای کاهش آلاینده‌ها مطرح است؛ با این حال، چالش‌هایی جدی پیش‌روی توسعه و کاربرد گسترده آن قرار دارد.

یکی از چالش‌های اصلی، کاهش پایداری عملکرد فوتوکاتالیست‌ها در شرایط محیطی واقعی نظیر رطوبت بالا، تابش فرابنفش، آلودگی‌های شیمیایی و دمای متغیر است که می‌تواند منجر به افت بازده یا انسداد سطح فعال شود[۱۰۴-۱۰۶] .همچنین، هزینه بالای سنتز نانوکامپوزیت‌ها، به‌ویژه با استفاده از مواد با خلوص بالا و تجهیزات تخصصی، مانعی جدی در مسیر تجاری‌سازی این فناوری است [۱۰۷, ۱۰۸]. اجرای این پوشش‌ها در مقیاس بزرگ نیز به دلیل نیاز به تکنیک‌های صنعتی و پیچیده، در بسیاری از کشورها از منظر اقتصادی

ACCEPTED MANUSCRIPT

با محدودیت مواجه است[۱۰۹, ۱۱۰]. برای نمونه، نمای خارجی ساختمان "Musée du quai Branly" در پاریس و بزرگراه‌های توکیو با پوشش‌های TiO_2 پوشش داده شده‌اند که کاهش قابل توجهی در غلظت NOx نشان داده‌اند [۱۰۳]. این نمونه‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری در مقیاس شهری کاملاً قابل پیاده‌سازی است.

از منظر عملکرد، نرخ پایین تخریب برخی آلاینده‌ها همچنان یکی از محدودیت‌های مهم است. در این راستا، رویکردهای ترکیبی مانند تلفیق فوتوکاتالیز با فناوری‌های جذب، فوتوترمال یا پلاسما پیشنهاد شده‌اند که می‌توانند زمان واکنش و راندمان حذف را بهبود دهند، اما برای دستیابی به کارایی بهینه، نیاز به مطالعات عمیق‌تری دارند[۸۹].

برای دورنمای توسعه، تمرکز پژوهش‌ها باید بر چند محور اصلی باشد:

- توسعه مواد نیمه‌رسانای جدید با شکاف انرژی مناسب برای جذب نور مرئی مانند TiO_2/graphene و استفاده از مواد زیست‌سازگار و ارزان‌قیمت به‌عنوان جایگزین.
- افزایش دوام پوشش‌ها از طریق طراحی لایه‌های محافظ یا افزودنی‌های پایدارکننده برای حفظ کارایی در طول زمان و در شرایط سخت محیطی.
- بهینه‌سازی روش‌های سنتز و پوشش‌دهی با تکیه بر تکنیک‌هایی مانند لایه‌نشانی کم‌هزینه، به‌منظور تسهیل تولید صنعتی.
- ارزیابی میدانی در مقیاس بزرگ برای سنجش عملکرد واقعی در محیط‌های شهری، صنعتی و بسته، که لازمه تحقق تجاری سازی پایدار است.

برخی پوشش‌های فعلی به دلیل وابستگی به نور فرابنفش، در محیط‌های کم‌نور یا داخلی عملکرد محدودی دارند و بر روی سطوح خاص مانند بتن متخلخل یا زیرلایه‌های ناهمگن بهینه عمل نمی‌کنند. این موارد لزوم فرمولاسیون‌های تطبیق‌پذیرتر و توسعه فوتوکاتالیست‌های فعال در نور مرئی را دوچندان می‌کند. توجه به این چالش‌ها می‌تواند زمینه‌ساز گسترش کاربردی و پایدار این فناوری در معماری و زیر ساخت‌های شهری آینده باشد. در جدول ۳ چالش‌ها و راهکارهای پیشنهادی برای توسعه و کاربرد گسترده پوشش‌های نانوکامپوزیتی فوتوکاتالیستی در محیط‌های شهری ارائه شده است.

جدول ۳ چالش‌ها و راهکارهای پیشنهادی برای توسعه و کاربرد گسترده پوشش‌های نانوکامپوزیتی فوتوکاتالیستی در محیط‌های شهری

Table۳ Challenges and solutions for large-scale application of photocatalytic coatings

چالش	توضیح	راهکار پیشنهادی
پایداری پایین در شرایط محیطی واقعی	کاهش عملکرد در برابر UV، رطوبت، حرارت و آلودگی‌های سطحی	طراحی پوشش‌های محافظ، استفاده از افزودنی‌های مقاوم، بهینه‌سازی ساختار سطحی
هزینه بالای سنتز و اجرای پوشش‌ها	استفاده از مواد خالص و تجهیزات پیشرفته برای اعمال پوشش	بهره‌گیری از مواد جایگزین ارزان‌قیمت (مثلاً بیوپلاستیک‌ها)، توسعه روش‌های سنتز ساده و مقیاس‌پذیر
عملکرد محدود در نور مرئی	بسیاری از فوتوکاتالیست‌ها فقط با UV فعال می‌شوند	استفاده از نانوکامپوزیت‌های فعال در نور مرئی مانند TiO_2/MXene، TiO_2/g-C_3N_4
کاهش بازده با گذر زمان	افت عملکرد به‌واسطه انسداد سطح، آلودگی	طراحی نانوپوشش‌های مقاوم، افزودن بازدارنده‌ها، پایدارسازی نوری-شیمیایی
راندمان پایین حذف آلاینده‌ها در زمان کوتاه	زمان واکنش طولانی برای حذف ترکیبات مقاوم مانند VOCها	تلفیق با فناوری‌های مکمل مانند جذب، فوتوترمال، یا پلاسما برای افزایش راندمان
پیچیدگی و هزینه روش‌های صنعتی پوشش‌دهی	نیاز به دستگاه‌های دقیق و شرایط کنترلی برای اجرای پوشش بر سطوح گسترده	استفاده از روش‌های صنعتی ساده‌تر مانند اسپری، غوطه‌وری و roll-coating
نبود داده‌های عملکردی در شرایط واقعی	بیشتر داده‌ها در محیط‌های آزمایشگاهی حاصل شده‌اند	انجام مطالعات میدانی در مقیاس شهری و صنعتی برای ارزیابی واقعی
عملکرد ضعیف بر سطوح خاص (بتن متخلخل، شیشه، فلزات زبر)	ناسازگاری پوشش با جنس یا بافت زیرلایه	انتخاب دقیق ترکیب پوشش بر اساس نوع زیرلایه

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به مرور پیشـــرفت‌های اخیر در زمینه پوشـــش‌دهی ســـطوح با نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیســـتی برای حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی، به‌ویژه در محیط‌های شهری، اختصاص داشت. نانوکامپوزیت‌هایی مبتنی بر نیمه‌هادی‌هایی چون TiO_2 و ZnO به دلیل توانایی تجزیه آلاینده‌ها تحت تابش نور، گزینه‌هایی مؤثر برای تصفیه هوا، آب و سطوح آلوده در فضاهای شهری و صنعتی محسوب می‌شـوند. به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف پوشـش‌دهی نظیر اسـپری، الکتروفورتیک و الکتروریسـی، و همچنین افزودن ترکیباتی چون گرافن، مکسین و سیلیکات‌ها، عملکرد فوتوکاتالیستی، پایداری و سازگاری این پوشش‌ها را بهبود می‌بخشد.

با توجه به بحران آلودگی در شـــهرها و نیاز به راهکارهای پایدار، این پوشـــش‌ها می‌توانند نقش مؤثری در بهبود کیفیت هوا، کاهش اثر جزیره گرمایی و افزایش عمر مفید ســـازه‌ها ایفا کنند. اســـتفاده از انرژی خورشـــیدی در فعال‌ســـازی این پوشـــش‌ها نیز، راه را برای به‌کارگیری آن‌ها در پروژه‌های کم‌مصرف و دوستدار محیط زیست هموار می‌سازد.

با این حال، چالش‌هایی همچون کاهش عملکرد در شـــرایط واقعی، هزینه‌های بالای تولید و پیچیدگی فرآیندهای پوشـــش‌دهی مانع از تجاری سازی گسترده این فناوری شده‌اند. بنابراین، تمرکز آینده باید بر توسعه مواد جدید فعال در نور مرئی، روش‌های پوشش‌دهی ساده و مقیاس‌پذیر، و بهینه‌سازی فرمولاسیون‌ها برای استفاده بر سطوح متنوع باشد. پوشش‌های نانوکامپوزیتی فوتوکاتالیستی، با توجه به قابلیت تصفیه غیرفعال هوا و آب، مزیت‌های زیست‌محیطی قابل توجه و امکان ترکیب با فناوری‌های هوشمند ساختمانی، پتانسیل بالایی برای تبدیل شدن به بخشی جدایی‌ناپذیر از زیرساخت‌های شهرهای پایدار آینده دارند.

۷- منابع و مراجع

[1] A. Rabajczyk, M. Zielecka, W. Klapsa, A. Dziechciarz, Self-Cleaning Coatings and Surfaces of Modern Building Materials for the Removal of Some Air Pollutants, Materials, 14 (2021).

[2] T. Mata, A. Martins, C. Calheiros, F. Villanueva, N. Alonso-Cuevilla, M. Gabriel, G. Silva, Indoor Air Quality: A Review of Cleaning Technologies, Environments, (2022).

[3] J. Bersch, I. Flores-Colen, A. Masuero, D.D. Molin, Photocatalytic TiO2-Based Coatings for Mortars on Facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability, Buildings, (2023).

[4] B. Wu, C. Liu, Impacts of Building Environment and Urban Green Space Features on Urban Air Quality: Focusing on Interaction Effects and Nonlinearity, Buildings, (2023).

[5] U.A. Mandi, U. Meda, K. Vora, Y. Athreya, Pollution Control Applications of Nano Titanium Dioxide in the Construction Industry, ECS Transactions, (2022).

[6] J. Jonasson, C. Faith-Ell, I. Carlman, O. Englund, The environmental performance of zero-emission buildings in a fossil-free energy system, Energy Efficiency, (2024).

[7] P. Haghighi, F. Haghighat, TiO2-based photocatalytic oxidation process for indoor air VOCs removal: A comprehensive review, Building and Environment, 249 (2024) 111108.

[8] B. Gandu, A. Rao, R. Cahan, Air pollution control by using different types of techniques and sorbents, (2021) 575-594.

[9] X. Wu, Y. Zhang, F. Hou, H. Wang, J. Zhou, W. Yu, The energy and time saving coordinated control methods of CO2, VOCs, and PM2.5 in office buildings, PLoS ONE, 17 (2022).

[10] A.H. Mamaghani, F. Haghighat, C.-S. Lee, Hydrothermal/solvothermal synthesis and treatment of TiO2 for photocatalytic degradation of air pollutants: Preparation, characterization, properties, and performance, Chemosphere, 219 (2019) 804-825.

[11] J. Martínez-Montelongo, I. Medina-Ramírez, Y. Romo-Lozano, J. Zapien, Development of a sustainable photocatalytic process for air purification, Chemosphere, 257 (2020) 127236.

[12] P. Truong, A. Kidanemariam, J. Park, A critical innovation of photocatalytic degradation for toxic chemicals and pathogens in air, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 100 (2021) 19-39.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[13] V. Bui, T.N. Nguyen, V. Van Tran, J. Hur, I. Kim, D. Park, Y.-C. Lee, Photocatalytic materials for indoor air purification systems: An updated mini-review, Environmental Technology and Innovation, 22 (2021) 101471.
[14] F. He, W.-G. Jeon, W. Choi, Photocatalytic air purification mimicking the self-cleaning process of the atmosphere, Nature Communications, 12 (2021).
[15] M. Saeli, C. Piccirillo, D. Tobaldi, R. Binions, P. Castro, R. Pullar, A sustainable replacement for TiO2 in photocatalyst construction materials: Hydroxyapatite-based photocatalytic additives, made from the valorisation of food wastes of marine origin, Journal of Cleaner Production, (2018).
[16] J. Wang, S. Liu, X. Meng, W. Gao, J. Yuan, Application of retro-reflective materials in urban buildings: A comprehensive review, Energy and Buildings, 247 (2021) 111137.
[17] H. Teixeira, M. Gomes, M. Rodrigues, J. Pereira, Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films, Building and Environment, 168 (2020) 106474.
[18] A. Velazquez-Palenzuela, K. Dam-Johansen, J. Christensen, Benchmarking of photocatalytic coatings performance and their activation towards pollutants degradation, Progress in Organic Coatings, 147 (2020) 105856.
[19] T. Zhu, Y. Cheng, J. Huang, J. Xiong, M. Ge, J. Mao, Z. Liu, X. Dong, Z. Chen, Y. Lai, A transparent superhydrophobic coating with mechanochemical robustness for anti-icing, photocatalysis and self-cleaning, Chemical Engineering Journal, (2020).
[20] S. Tian, Y. Feng, Z. Zheng, Z. He, TiO2-Based Photocatalytic Coatings on Glass Substrates for Environmental Applications, Coatings, (2023).
[21] Y. Sakthivel, Urban Facades: Photocatalytic Building Envelope for Passive Remediation of Air Pollution, (2019).
[22] E. Luévano-Hipólito, L. Torres-Martínez, L.V.F. Cantú-Castro, Self-cleaning coatings based on fly ash and bismuth-photocatalysts: Bi2O3, Bi2O2CO3, BiOI, BiVO4, BiPO4, Construction and Building Materials, (2019).
[23] In-situ Construction of TiO2/Ag Heterojunction Coating for Forming a Photocatalytic Self-cleaning Surface of Concrete, Global NEST: the international Journal, (2024).
[24] N. Aghababaei, M. Abdouss, H. Hosseini-Monfared, F. Ghanbari, Enhanced photo-degradation of diclofenac using a new and effective composite (O-g-C3N4/TiO2/α-Fe2O3): Degradation pathway, toxicity evaluation and application for real matrix, Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(5) (2023) 110477.
[25] R. Ghasemzadeh, K. Akhbari, S. Kawata, rGO/MUT-15 nanocomposite as a Fenton-like photocatalyst for the degradation of Acid Yellow 73 under visible light, Dalton transactions, (2024).
[26] M. Zoric, P. Basera, L. Palmer, A. Aitbekova, N. Powers-Riggs, H. Lim, W. Hu, A. Garcia-Esparza, H. Sarker, F. Abild-Pedersen, H. Atwater, S. Cushing, M. Bajdich, A. Cordones, Oxidizing Role of Cu Cocatalysts in Unassisted Photocatalytic CO2 Reduction Using p-GaN/Al2O3/Au/Cu Heterostructures, ACS Nano, 18 (2024) 19538-19548.
[27] S. Gupta, R. Kumar, Enhanced photocatalytic performance of the N-rGO/g-C3N4 nanocomposite for efficient solar-driven water remediation, Nanoscale, (2024).
[28] G. Petcu, E. Anghel, I. Atkinson, D. Culiță, N. Apostol, A. Kuncser, F. Papa, A. Baran, J. Blin, V. Parvulescu, Composite Photocatalysts with Fe, Co, and Ni Oxides on Supports with Tetracoordinated Ti Embedded into Aluminosilicate Gel during Zeolite Y Synthesis, Gels, 10 (2024).
[29] S. Ali, P.M. Ismail, M. Khan, A. Dang, S. Ali, A. Zada, F. Raziq, I. Khan, M. Khan, M. Ateeq, W. Khan, S.H. Bakhtiar, H. Ali, X. Wu, M.I.A. Shah, A. Vinu, J. Yi, P. Xia, L. Qiao, Charge transfer in TiO2-based photocatalysis: fundamental mechanisms to material strategies, Nanoscale, (2024).
[30] G.S. Bisht, A. Singh, Hydrothermally Synthesized TiO2 Nanowires and Potential Application in Catalytic Degradation of p-Nitrophenol, Journal of Cluster Science, (2024) 1-17.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[31] J. Rodrigues, T. Hatami, J.M. Rosa, E.B. Tambourgi, Photocatalytic degradation of Reactive Blue 21 dye using ZnO nanoparticles: experiment, modelling, and sensitivity analysis, Environmental technology, 42(23) (2021) 3675-3687.
[32] M. Faisal, M. Rashed, J. Ahmed, M. Alsaiari, M. Jalalah, S. Alsareii, F. Harraz, Au nanoparticles decorated polypyrrole-carbon black/g-C3N4 nanocomposite as ultrafast and efficient visible light photocatalyst, Chemosphere, 287 Pt 1 (2021) 131984.
[33] A.H. Monfared, M. Jamshidi, Synthesis of polyaniline/titanium dioxide nanocomposite (PAni/TiO2) and its application as photocatalyst in acrylic pseudo paint for benzene removal under UV/VIS lights, Progress in Organic Coatings, (2019).
[34] M. Alenizi, R. Kumar, M. Aslam, F. Alseroury, M. Barakat, Construction of a ternary g-C3N4/TiO2@polyaniline nanocomposite for the enhanced photocatalytic activity under solar light, Scientific Reports, 9 (2019).
[35] T. Parangi, CNT/TiO2 nanocomposite for environmental remediation, International Journal of Materials Research, 115 (2024) 487-497.
[36] N. Sarkar, S. Mishra, V. Gadore, B. Panigrahi, M. Ahmaruzzaman, Nanocosmos of catalysis: a voyage through synthesis, properties, and enhanced photocatalytic degradation in nickel sulfide nanocomposites, Nanoscale Advances, 6 (2024) 2741-2765.
[37] B. De La Fuente, D. Khurana, P. Vereecken, A. Hubin, T. Hauffman, Nano-TiO2/TiN Systems for Electrocatalysis: Mapping the Changes in Energy Band Diagram across the Semiconductor|Current Collector Interface and the Study of Effects of TiO2 Electrochemical Reduction Using UV Photoelectron Spectroscopy, ACS applied materials & interfaces, (2024).
[38] R. Ghamarpoor, A. Fallah, M. Jamshidi, A Review of Synthesis Methods, Modifications, and Mechanisms of ZnO/TiO2-Based Photocatalysts for Photodegradation of Contaminants, ACS Omega, 9 (2024) 25457-25492.
[39] P. Thuy, B.T.C. Hue, N.X. Sang, L.P. Lieu, L.T.T. Thuy, Synthesis of ZnO-TiO2-WO3 tertiary heterojunction for improved photocatalytic degradation of dyes using visible light, Materials Research Express, (2024).
[40] L. Wen, B. Liu, Kinetic pathways of sub-bandgap induced electron transfer in Ag/TiO2 and the effect on isopropanol dehydrogenation under gaseous conditions, Physical chemistry chemical physics : PCCP, (2024).
[41] A. Esbergenova, M. Hojamberdiev, S. Mamatkulov, R. Jalolov, D. Kong, O. Ruzimuradov, U. Shaislamov, Correlating Cu dopant concentration, optoelectronic properties, and photocatalytic activity of ZnO nanostructures: experimental and theoretical insights, Nanotechnology, (2024).
[42] Y. K, Role of Nanoparticle Size in the Photocatalytic Degradation of Pollutants, Journal of Chemistry, (2024).
[43] K. Ni, Y. Chen, R. Xu, Y. Zhao, M. Guo, Mapping Photogenerated Electron‑Hole Behavior of Graphene Oxide: Insight into a New Mechanism of Photosensitive Pollutant Degradation, Molecules, 29 (2024).
[44] L. Wang, J. Deng, S. Bai, Y. Wu, W. Zhu, Enhanced Photocatalytic Degradation Performance by Micropore-Confined Charge Transfer in Hydrogen-Bonded Organic Framework-Like Cocrystals, Small, (2024).
[45] A.A. Miad, S.P. Saikat, M.K. Alam, M.S. Hossain, N. Bahadur, S. Ahmed, Metal oxide-based photocatalysts for the efficient degradation of organic pollutants for a sustainable environment: a review, Nanoscale Advances, 6 (2024) 4781-4803.
[46] C.-Y. Hsu, Z.H. Mahmoud, S. Abdullaev, F.K. Ali, Y. Ali Naeem, R. Mzahim Mizher, M. Morad Karim, A.S. Abdulwahid, Z. Ahmadi, S. Habibzadeh, E. kianfar, Nano titanium oxide (nano-TiO2): A review of synthesis methods, properties, and applications, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 9 (2024) 100626.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[47] C.B. Anucha, I. Altin, E. Bacaksiz, V.N. Stathopoulos, Titanium dioxide (TiO_2)-based photocatalyst materials activity enhancement for contaminants of emerging concern (CECs) degradation: In the light of modification strategies, Chemical Engineering Journal Advances, 10 (2022) 100262.
[48] Y. Wei, H. Meng, Q. Wu, X. Bai, Y. Zhang, TiO2-Based Photocatalytic Building Material for Air Purification in Sustainable and Low-Carbon Cities: A Review, Catalysts, 13(12) (2023) 1466.
[49] L. Hamza, S. Laouini, H. Mohammed, S. Meneceur, C. Salmi, F. Alharthi, S. Legmairi, J.A.A. Abdullah, Biosynthesis of ZnO/Ag nanocomposites heterostructure for efficient photocatalytic degradation of antibiotics and synthetic dyes, Zeitschrift für Physikalische Chemie, 0 (2024).
[50] O. Saber, M. Osama, A. Alshoaibi, N. Shaalan, Osama, Designing inorganic‐magnetic‐organic nanohybrids for producing effective photocatalysts for the purification of water, RSC Advances, 12 (2022) 18282-18295.
[51] S. Hamood, M. Khalaf, F. Mohammed, Synthesis, structural, and optical characterizations of zinc oxide: silver oxide nanoparticles conjunction with polymer polyvinylpyrrolidone, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, (2024).
[52] J. Chang, C. Saint, C. Chow, D. Bahnemann, M.N. Chong, Recent innovations in engineering Zinc Oxide (ZnO) nanostructures for water and wastewater treatment: Pushing the boundaries of multifunctional photocatalytic and advanced biotechnological applications, International Materials Reviews, (2024).
[53] W. Xia, X. Li, M. Cheng, W. Xiong, B. Song, Y. Liu, Y. Yang, W. Wang, S. Chen, G. Zeng, C. Zhou, Recent Advances in Constructing Three-Dimensional Graphitic Carbon Nitride Based Materials and Their Applications in Environmental Photocatalysis, Photo-Electrochemistry, and Electrochemistry, Journal of Environmental Informatics, (2024).
[54] D. Zhou, D. Li, Z. Chen, Recent advances in ternary Z-scheme photocatalysis on graphitic carbon nitride based photocatalysts, Frontiers in Chemistry, 12 (2024).
[55] M. Ahmed, S. Mahmoud, A. Mohamed, Unveiling the photocatalytic potential of graphitic carbon nitride (g-C3N4): a state-of-the-art review, RSC Advances, 14 (2024) 25629-25662.
[56] M. Zhou, H. Ou, S. Li, X. Qin, Y. Fang, S.-C. Lee, X. Wang, W. Ho, Photocatalytic Air Purification Using Functional Polymeric Carbon Nitrides, Advanced Science, 8 (2021).
[57] N. Subha, L.R. Nagappagari, R. Sankar, A review on recent advances in g-C3N4-MXene nanocomposites for photocatalytic applications, Nanotechnology, (2024).
[58] Z. Yang, J. Wang, Highly Efficient Photocatalytic H2O2 Production over a Zn0.3Cd0.7S/MXene Photocatalyst for Degradation of Emerging Pollutants under Visible-Light Irradiation, Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids, (2024).
[59] Y. Li, F. Chen, W. Yang, S. Ke, A wide angle broadband solar absorber with a horizontal multi-cylinder structure based on an MXene material, Physical chemistry chemical physics : PCCP, (2024).
[60] Z. Wang, Q. Gao, H. Luo, H. Fan, Y. Chen, J. Xiang, In situ synthesis of reduced graphene oxide/SnIn4S8 nanocomposites with enhanced photocatalytic performance for pollutant degradation, Nanotechnology Reviews, 13 (2024).
[61] A. Kadian, V. Manikandan, C. Chen, C. Dong, S. Annapoorni, Synergistically enhanced photocatalytic properties of Co3O4-G/GO nanocomposites: unravelling their interactions and charge-transfer dynamics using XAS, Dalton transactions, (2024).
[62] L. Yang, C. Chen, Y. Hu, F. Wei, J. Cui, Y. Zhao, X. Xu, X. Chen, D. Sun, Three-dimensional bacterial cellulose/polydopamine/TiO2 nanocomposite membrane with enhanced adsorption and photocatalytic degradation for dyes under ultraviolet-visible irradiation, Journal of colloid and interface science, 562 (2019) 21-28.
[63] H. Zhang, M. Li, W. Wang, G. Zhang, Q. Tang, J. Cao, Designing 3D porous BiOI/Ti3C2 nanocomposite as a superior coating photocatalyst for photodegradation RhB and photoreduction Cr (VI), Separation and Purification Technology, 272 (2021) 118911.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[64] M. Dell' Edera, C. Lo Porto, I. De Pasquale, F. Petronella, M. Curri, A. Agostiano, R. Comparelli, Photocatalytic TiO2-based coatings for environmental applications, Catalysis Today, (2021).
[65] M. Janus, J. Strzałkowski, K. Zając, E. Kusiak-Nejman, Cement Clinker Modified by Photocatalyst−Selected Mechanical Properties and Photocatalytic Activity during NO and BTEX Decomposition, Applied Sciences, (2024).
[66] L. Xiao, T. Lei, Y. Wang, Z. Duan, M. Gao, D. Jiang, Preparation and properties study of straw fiber cement-based composite boards with efficient formaldehyde purification function, Journal of Reinforced Plastics and Composites, (2024).
[67] T. Ovari, B. Trufán, G. Katona, G. Szabó, L. Muresan, Correlations between the anti-corrosion properties and the photocatalytic behavior of epoxy coatings incorporating modified graphene oxide deposited on a zinc substrate, RSC Advances, 14 (2024) 10826-10841.
[68] Z. Wang, X. Zhou, Y. Shang, B. Wang, K. Lu, W. Gan, H. Lai, J. Wang, C. Huang, Z. Chen, C. Hao, E. Feng, J. Li, Synthesis and Characterization of Superhydrophobic Epoxy Resin Coating with SiO2@CuO/HDTMS for Enhanced Self-Cleaning, Photocatalytic, and Corrosion-Resistant Properties, Materials, 17 (2024).
[69] A. Bernal-Díaz, A. Hernández-Gordillo, J.C. Alonso, S. Rodil, M. Bizarro, Strong thickness dependence in thin film photocatalytic heterojunctions: the ZnO-Bi2O3 case study, Dalton transactions, (2024).
[70] H.N. Le, H.D. Nguyen, M. Hieu, T.M.H. Nguyen, T.D. Nguyen, T.B.T. Dao, D. Dinh, C. Thuc, Melt processing of graphene-coated polylactide granules for producing biodegradable nanocomposite with higher mechanical strength, Polymer-Plastics Technology and Materials, 63 (2024) 1421-1437.
[71] P. Chaudhary, U. Gaur, A.P. Mobarsa, K. Chaudhary, Thermal Spray Coating Applications in Tribology: Recent Case Studies, Journal of Thermal Spray and Engineering, (2024).
[72] S. Lederer, S. Benfer, J. Bloh, R. Javed, A. Pashkova, W. Fuerbeth, Development of Photocatalytically Active Anodized Layers by a Modified Phosphoric Acid Anodizing Process for Air Purification, Corrosion and Materials Degradation, (2022).
[73] M.A. Busharat, S. Shukrullah, M.Y. Naz, Y. Khan, A. Ibrahim, A. Al-Arainy, M. Shoaib, Study of Cation Distribution and Photocatalytic Activity of Nonthermal Plasma-Modified NiZnFe2O4 Magnetic Nanocomposites, ACS Omega, 9 (2024) 14791-14804.
[74] E. Abdel-Fattah, Plasmonic ZnO-Au Nanocomposites: A Synergistic Approach to Enhanced Photocatalytic Activity through Nonthermal Plasma-Assisted Synthesis, Crystals, (2024).
[75] A. Al Hunaiti, M. Hamideh, R. Al-Shawabkeh, Magnetic nanoparticles of TiO2-NiFe2O4-Chitosan for photocatalytic degradation: synthesis, characterization, methyl blue dye-VOCs wastewater treatment, kinetic experimental, and theoretical studies, Emergent Materials, (2024) 1-16.
[76] R. Rega, A. Fioravanti, H. Hejazi, M. Shahrezaei, Š. Kment, P. Maddalena, A. Naldoni, S. Lettieri, Charge carrier recombination processes, intragap defect states, and photoluminescence mechanisms in stoichiometric and reduced TiO2 brookite nanorods: an interpretation scheme through in situ photoluminescence excitation spectroscopy in controlled environment, Nanoscale, (2024).
[77] P. George, P. Chowdhury, Complex dielectric transformation of UV-vis diffuse reflectance spectra for estimating optical band-gap energies and materials classification, The Analyst, 144 9 (2019) 3005-3012.
[78] M. Zhu, C. Zhai, S. Kim, M. Fujitsuka, T. Majima, Monitoring Transport Behavior of Charge Carriers in a Single CdS@CuS Nanowire via In Situ Single-Particle Photoluminescence Spectroscopy, The journal of physical chemistry letters, (2019) 4017-4024.
[79] Q. Sun, Y. Zhao, F. Qin, J. Zhang, B. Wang, H. Ye, J. Sheng, Crystallinity and photocatalytic properties of BiVO4/halloysite nanotubes hybrid catalysts for sunlight-driven decomposition of dyes from aqueous solution, Nanotechnology, 32 (2020).

ACCEPTED MANUSCRIPT

[80] E. Gomes, L. Gracia, A. Santiago, R. Tranquilin, F. Motta, R. Amoresi, E. Longo, M. Bomio, J. Andrés, Structure, electronic properties, morphology evolution, and photocatalytic activity in PbMoO4 and Pb1-2xCaxSrxMoO4 (x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5) solid solutions, Physical chemistry chemical physics : PCCP, (2020).
[81] E. Karacaoglu, O. Yildirim, T. Ozturk, M. Gul, Effect of lanthanum doping on structural, optical, and photocatalytic properties of YVO4, Journal of Materials Research, 38 (2023) 3536-3547.
[82] V.-A. Surdu, R. Győrgy, X-ray Diffraction Data Analysis by Machine Learning Methods−A Review, Applied Sciences, (2023).
[83] A. Tiwari, Advancement of Materials to Sustainable & Green World, Advanced Materials Letters, (2023).
[84] D. Vadivel, S. Suryakumar, C. Casella, A. Speltini, D. Dondi, Advancements in Materials Science and Photocatalysts for Sustainable Development, Catalysts, (2024).
[85] D.G. Rivas, K.-H. Kim, O.-K. Im, C. Wu, A Photocatalytic Building Façade for Improving Urban Air Quality, Empower, (2022).
[86] Q. Geng, H. Wang, R. Chen, L. Chen, K. Li, F. Dong, Advances and challenges of photocatalytic technology for air purification, National Science Open, (2022).
[87] C. Pei, J.-H. Zhu, F. Xing, Photocatalytic property of cement mortars coated with graphene/TiO2 nanocomposites synthesized via sol‑gel assisted electrospray method, Journal of Cleaner Production, (2021).
[88] M. Pivert, O. Kerivel, B. Zerelli, Y. Leprince-Wang, ZnO nanostructures based innovative photocatalytic road for air purification, Journal of Cleaner Production, 318 (2021) 128447.
[89] F. He, W. Jeon, W. Choi, Photocatalytic air purification mimicking the self-cleaning process of the atmosphere, Nature Communications, 12(1) (2021) 2528.
[90] C. Ayappan, S.K. Kannan, T. Ochiai, X. Zhang, R. Xing, S. Liu, A. Fujishima, Commercialization aspects for TiO₂-based indoor air purification, Trends in Chemistry, 7(3) (2025) 134-148.
[91] S. Mansouri, A. Rahai, S.H. Rashedi, F. Moghadas Nejad, Predicting Concrete Carbonation Depth and Investigating the Influencing Factors through Machine Learning Approaches and Optimization, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 56(12) (2025) 1583-1604.
[92] F. Salvadores, M. Reli, O.M. Alfano, K. Kočí, M.d.l.M. Ballari, Efficiencies Evaluation of Photocatalytic Paints Under Indoor and Outdoor Air Conditions, Frontiers in Chemistry, 8 (2020).
[93] Y. Wu, P. Krishnan, M.-H. Zhang, L. Yu, Using photocatalytic coating to maintain solar reflectance and lower cooling energy consumption of buildings, Energy and Buildings, 164 (2018) 176-186.
[94] J. Yang, D.L.M. Kumar, A. Pyrgou, A. Chong, M. Santamouris, D. Kolokotsa, S. Lee, Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate, Solar Energy, (2018).
[95] A.M.M. Irfeey, H. Chau, M. Sumaiya, C.Y. Wai, N. Muttil, E. Jamei, Sustainable Mitigation Strategies for Urban Heat Island Effects in Urban Areas, Sustainability, (2023).
[96] D. Kotzias, Photo-Induced Degradation of Priority Air Pollutants on TiO2-Based Coatings in Indoor and Outdoor Environments−A Mechanistic View of the Processes at the Air/Catalyst Interface, Crystals, (2024).
[97] D.M. Degefu, Z. Liao, Photocatalytic degradation of volatile organic compounds using nanocomposite of P-type and N-type transition metal semiconductors, Journal of Sol-Gel Science and Technology, 98 (2021) 605-614.
[98] Y. Yang, T. Ji, Y. Lin, W. Su, Effect of adhesive on photocatalytic NOx removal and stability over polymeric carbon nitride coated cement mortars, Journal of Cleaner Production, 295 (2021) 126458.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[99] Y. Ji, A. Mattsson, G. Niklasson, C. Granqvist, L. Österlund, Synergistic TiO2/VO2 Window Coating with Thermochromism, Enhanced Luminous Transmittance, and Photocatalytic Activity, Joule, (2019).
[100] I. Hernández-Pérez, Influence of Traditional and Solar Reflective Coatings on the Heat Transfer of Building Roofs in Mexico, Applied Sciences, 11 (2021) 3263.
[101] Q. Maqbool, O. Favoni, T. Wicht, N. Lasemi, S. Sabbatini, M. Stöger-Pollach, M. Ruello, F. Tittarelli, G. Rupprechter, Highly Stable Self-Cleaning Paints Based on Waste-Valorized PNC-Doped TiO2 Nanoparticles, ACS Catalysis, 14 (2024) 4820-4834.
[102] M. Hassnain, A. Ali, M.R. Azhar, A. Abutaleb, M. Mubashir, Challenges and Perspectives on Photocatalytic Membrane Reactors for Volatile Organic Compounds Degradation and Nitrogen Oxides Treatment, Global Challenges, 9(5) (2025) 2500035.
[103] J. Yu, Y. Xuan, SiO2‐TiO2 Nanoparticle Aqueous Foam for Volatile Organic Compounds' Suppression, Toxics, 12 (2024).
[104] A. Ghaffar, I.A. Channa, A. Chandio, Mitigating UV-Induced Degradation in Solar Panels through ZnO Nanocomposite Coatings, Sustainability, (2024).
[105] M. Li, C. Qiu, S. Dogel, P. Chen, D. Perovic, J. Howe, Microstructure-Dependent Thermal Stability of Super-Tetragonal Nanocomposite Films through In Situ TEM/EELS Study, ACS applied materials & interfaces, (2022).
[106] A. Fadl, M. Abdou, M. Hamza, S. Sadeek, Corrosion-inhibiting, self-healing, mechanical-resistant, chemically and UV stable PDMAS/TiO2 epoxy hybrid nanocomposite coating for steel petroleum tanker trucks, Progress in Organic Coatings, 146 (2020) 105715.
[107] C. Liu, W. Wang, Analysis of degradation effect of carbon nitride nanomaterials in pollutant treatment, Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, (2024).
[108] M. Ghanbari, M. Salavati-Niasari, Copper iodide decorated graphitic carbon nitride sheets with enhanced visible-light response for photocatalytic organic pollutant removal and antibacterial activities, Ecotoxicology and environmental safety, 208 (2021) 111712.
[109] M. Ghodrati, M. Mousavi-Kamazani, Z. Bahrami, Synthesis of superhydrophobic coatings based on silica nanostructure modified with organosilane compounds by sol‐gel method for glass surfaces, Scientific Reports, 13(1) (2023) 548.
[110] C. Chang, S. Rad, L. Gan, Z. Li, J. Dai, A. Shahab, Review of the sol‐gel method in preparing nano TiO2 for advanced oxidation process, Nanotechnology Reviews, 12(1) (2023).

ACCEPTED MANUSCRIPT

Surface Coating with Advanced Nanocomposites: Photocatalytic Applications in Degradation of Environmental Pollutants for Urban Environments

Esmaeil Farmani Gheshlaghi[1], **Fariborz Rashidi**[2], **Majid Abdous**[3]*
[1] Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, efarmani@aut.ac.ir
[2] Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, rashidi@aut.ac.ir
[3] Chemistry, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, phdabdouss44@aut.ac.ir

Abstract

This study addresses the critical issue of air pollution in major metropolitan areas, including Tehran, and emphasizes the need for advanced surface coating technologies to reduce environmental contaminants in urban settings. The paper provides a comprehensive analysis of surface coating with advanced nanocomposites and their photocatalytic applications for the degradation of environmental pollutants. Nanocomposites composed of various materials, particularly semiconductor metal oxides such as TiO_2, ZnO, and g-C_3N_4,demonstrate high efficiency in decomposing micro-pollutants and atmospheric contaminants under light irradiation. Several coating techniques, including spray coating, electrophoretic deposition, and electrospinning, are reviewed, each offering distinct advantages depending on specific environmental conditions and surface requirements. Moreover, the integration of nanomaterials with emerging components such as graphene and MXenes enhances photocatalytic performance, corrosion resistance, and long-term stability of the coatings. Innovative synthesis techniques, such as plasma-based and electrochemical methods, also play a significant role in improving the efficiency of these coatings for air and water purification. Harnessing the photocatalytic properties of these materials using solar and other renewable energy sources, particularly in urban environments, offers a promising pathway for reducing air pollution and improving urban living standards.

KEYWORDS
Building Surface Coating, Advanced Materials Engineering, Micro-pollutants, Photocatalyst, Renewable Energy

ACCEPTED MANUSCRIPT