مهندسی شیمیِ سطح در سامانه‌های نانومدوله دوبعدی در مهار زوال اکسایشی-نوری قیر: مروری بر شکاف‌های پژوهشی و چارچوبی برای طراحی منطقی روسازی‌های پایدار

فاطمه رزاق زاده[1]، رضا فرورد[2]

۱- فاطمه رزاق زاده، دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته شیمی گرایش تجزیه

fatemehrazaghzadeh1380@outlook.com

۲- رضا فرورد، کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه

rezafarvard1372@gmail.com

چکیده

زوال اُکسایشی- نوری قیر بعبارتی پیری قیر، یکی از عوامل اصلی کاهش طول عمر روسازی‌های آسفالتی و افزایش هزینه‌های نگهداری راه‌ها محسوب می‌شود [1]. در سال‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های دوبعدی با ساختار لایه‌ای و نسبت سطح به حجم بالا، به‌عنوان راهکاری نوین برای مهار این پدیده مطرح شده‌اند[2]. بااین‌حال، مرور نظام‌مند پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که اغلب مطالعات حوزه‌ی مهندسی عمران، صرفاً بر بهبود پارامترهای مکانیکی از جمله افزایش مدول برجهندگی، مقاومت مارشال و عمر خستگی متمرکز بوده و کمتر به سازوکارهای شیمیایی حاکم بر این بهبود پرداخته‌اند. همچنین، طیف‌سنجی FTIR در بیشتر این پژوهش‌ها صرفاً به‌عنوان ابزاری برای شناسایی تغییرات شیمیایی (نظیر تأیید حضور نانومواد یا محاسبه‌ی ساده‌ی شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید[1] به‌کار رفته است، در حالی که تحلیل عمیق سطحی با استفاده از این تکنیک و روش‌های مکمل مانند XPS و AFM، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی سازوکارهای شیمیایی و پایداری آب‌گریزی در شرایط زوال و غوطه‌وری ارائه دهد[3] . به‌ویژه، ارتباط میان شیمی سطح نانومواد و مقاومت در برابر رطوبت هنوز به‌خوبی تبیین نشده و به‌عنوان یک شکاف پژوهشی جدی مطرح است. مقاله‌ی حاضر با رویکردی میان‌رشته‌ای در مهندسی عمران و شیمی تجزیه، به تحلیل اثر سدکُنندگی[2] نانوکامپوزیت‌های دوبعدی در برابر مهاجرت اکسیژن و کاهش نرخ تشکیل گروه‌های کربونیل و سولفوکسید می‌پردازد. بررسی تطبیقی نانومواد مختلف نشان می‌دهد که اکسید گرافِن (GO) با کاهش شاخص کربونیل از ۰.۴۵ به ۰.۲۸ پس از زوال PAV[3] [4]، مؤثرترین عملکرد را در مهار زوال اکسایشی داشته است. در پایان، چارچوبی مفهومی برای طراحی سامانه‌های نانومدوله با هدف **مقاوم‌سازی چندبعدی** ارائه می‌شود که راهکاری عملی برای توسعه‌ی روسازی‌های ماندگارتر با نیاز به نگهداری کمتر فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت دوبعدی، اثر سدکُنندگی، زوال اکسایشی-نوری قیر، طیف‌سنجی FTIR، شاخص کربونیل، شیمی سطح، مقاومت در برابر رطوبت، تحلیل عمیق سطحی، اکسید گرافِن، سامانه‌های نانومدوله، روسازی پایدار، طراحی منطقی.

---

[1] پیک‌های هر یک از این شاخص‌ها بیانگر میزان اُکسایش قیر است.

2 Barrier Effect

۳ به فرآیند پیری شتاب‌یافته‌ی قیر تحت فشار و دمای بالا در آزمایشگاه گفته میشود که برای شبیه‌سازی ۵ تا ۱۰ سال پیری طبیعی روسازی در شرایط جاده استفاده می‌شود.

۱) مقدمه: بیان مسأله و شکاف‌های پژوهشی

زوال اکسایشی-نوری قیر، فرآیندی اجتناب‌ناپذیر است که طی آن ترکیبات سبک قیر تبخیر شده، ترکیبات سنگین (آسفالتن‌ها) افزایش یافته و گروه‌های عاملی قطبی مانند کربونیل (C=O) و سولفوکسید (S=O) بر اثر اکسایش تشکیل می‌شوند[5]. این تغییرات شیمیایی، منجر به افزایش سختی و شکنندگی قیر و در نتیجه کاهش عمر خستگی، افزایش ترک‌خوردگی و کاهش مقاومت در برابر رطوبت روسازی می‌شود. مطالعات نشان داده است که زوال اکسایشی می‌تواند عمر مفید روسازی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد[1]. طراحی منطقی نانومواد دوبعدی در قیر، با هدف افزایش مسیر نفوذ[1] و کاهش نفوذپذیری اکسیژن در ماتریس، پارامتری است که در مطالعات پیشین به درستی کمی‌سازی نشده است [4].

در این پژوهش، از مفهوم سامانه‌های نانومدوله[2] به عنوان یک پارادایم نوین در مهندسی قیر استفاده شده است. برخلاف رویکردهای کلاسیک که تنها بر حضور فیزیکی نانوذرات به عنوان پرکننده[3] تکیه دارند، سامانه‌های نانومدوله به آن دسته از قیرهای اصلاح‌شده‌ای اطلاق می‌شود که در آن‌ها نانوفازهای دوبعدی، به‌طور هدفمند برای تعدیل ریزساختار، تغییر مسیر نفوذ عوامل مخرب، و مهندسی شیمیِ فصل‌مشترک قیر-نانو طراحی شده‌اند. در این سامانه‌ها، نانوماده به‌مثابه‌ی یک عامل تنظیمی[4] عمل کرده و با ایجاد یک شبکه سدکننده چندبعدی، واکنش‌های اکسایشی و فرابنفش را نه تنها به تأخیر می‌اندازد، بلکه مسیرهای تخریب زنجیره‌ای را در سطح مولکولی سرکوب می‌کند[6].

نانومواد دوبعدی مانند گرافِن، اکسید گرافِن، نانورس‌های آلی و کامپوزیت‌های هیبریدی، به‌دلیل ساختار لایه‌ای و نسبت سطح به حجم بسیار بالا، پتانسیل چشم‌گیری در مهار زوال قیر دارند [2]. بااین‌حال، شکاف‌های پژوهشی جدی در این حوزه وجود دارد که این مقاله به‌صراحت به آن‌ها می‌پردازد.

۱-۱) اکتفا به بهبود مکانیکی، نه سازوکار شیمیایی

اغلب پژوهش‌های عمرانی، صرفاً به گزارش افزایش مقاومت فشاری، مدول برجهندگی، مقاومت مارشال یا عمر خستگی اکتفا کرده و کمتر به سازوکار شیمیایی حاکم بر این بهبود پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، در حالی که افزایش مدول برجهندگی قیر اصلاح‌شده با نانورس به‌وضوح گزارش شده است، کمتر به این پرسش پاسخ داده شده که آیا این افزایش ناشی از تشکیل شبکه شیمیایی جدید است یا صرفاً یک اثر فیزیکی مانند اثر ممانعت فضایی[5].

یافته‌های Yang و Yu (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که اگرچه گرافِن و قیر سازگاری عالی دارند و واکنش شیمیایی بین آن‌ها رخ نمی‌دهد، اما سه نوع برهم‌کنش شامل درهم‌تنیدگی مکانیکی، نیروی واندروالس و برهم‌نهش حلقه‌های بنزنی (π-π Stacking) در فصل مشترک وجود دارد که همگی به بهبود عملکرد مکانیکی کمک می‌کنند[6]. برهم‌کُنش از نوع برهم‌نِهش π-π یکی از قوی‌ترین برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی در سامانه‌های نانومدوله است که نقش کلیدی در تثبیت ساختار و افزایش چسبندگی دارد.

---

[1] Tortuosity
[2] Nano modulated Systems
سامانه نانومدوله، سامانه‌ای است که در آن نانوفاز، صرفاً نقش پرکننده ندارد، بلکه به عنوان عامل تنظیم‌کننده خواص شیمیایی و فیزیکی عمل می‌کند.
3 Filler
4 Modulator
5 Steric Hindrance Effect

۲-۱) کاربرد سطحی FTIR، نه تحلیل عمیق سطحی

طیف‌سنجی FTIR[۱] در بیشتر مطالعات، صرفاً به‌عنوان ابزاری جهت شناسایی (مثلاً تأیید حضور نانومواد یا محاسبه ساده شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید) استفاده شده است، در حالیکه تحلیل عمیق‌تر سطحی با استفاده از این تکنیک (مانند تحلیل دکانولوشن پیک‌ها برای شناسایی نوع برهم‌کنش‌های شیمیایی) یا تکنیک‌های مکمل مانند XPS[۲] و AFM[3]، می‌تواند اطلاعات بسیار بیشتری در مورد سازوکارهای شیمیایی ارائه دهد . به‌عبارت دقیق‌تر، FTIR تغییرات عامل‌های قطبی را ردیابی می‌کند، XPS اطلاعاتی از وضعیت اکسیداسیون سطحی نانومواد و AFM تغییرات مورفولوژی فازهای قیری در مقیاس نانو را ارائه می‌دهد. عدم استفاده از دکانولوشن پیک‌ها، منجر به از دست رفتن اطلاعات کلیدی درباره نرخ اکسیداسیون در سایت‌های فعالِ خاص[٤] در ساختار مولکولی قیر می‌شود.
Liu و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که اکسید گرافن به‌طور قابل‌توجهی محتوای گروه‌های آمید را در قیر پایه افزایش می‌دهد که به نوبه خود چسبندگی و چقرمگی قیر را افزایش داده و شکنندگی آن را کاهش می‌دهد[3].

۳-۱) کم‌توجهی به پایداری آب‌گریزی پس از زوال و غوطه‌ور

پایداری آب‌گریزی[٥] پس از فرآیندهای زوال و غوطه‌وری در آب، یکی از مهم‌ترین چالش‌های قیرهای نانومدوله است که به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. زوال اکسایشی، با افزایش گروه‌های قطبی بر روی سطح قیر، باعث افزایش انرژی سطحیِ قطبی[٦] و کاهش زاویه تماس با آب می‌شود که نتیجه آن، افزایش تمایل به جذب آب[٧] و در نتیجه کاهش چسبندگی به سنگدانه و افزایش حساسیت به رطوبت است. تخریب هم‌افزای اُکسایشی و رطوبتی، یک حلقه بازخورد منفی ایجاد می‌کند که در آن زوال حرارتی، زمینه را برای شکستِ پیوند قیر-سنگدانه در برابر آب فراهم می‌کند. نانومواد می‌توانند این روند را تعدیل کنند، اما پایداری این اثر در طولانی‌مدت و در شرایط غوطه‌وری، هنوز به‌خوبی شناخته نشده است.

۴-۱) فقدان اجماع مکانیکی در ارتباط شیمی سطح و مقاومت به رطوبت

اگرچه اثرات کلی نانومواد بر افزایش مقاومت در برابر رطوبت[٨] گزارش شده است، اما ارتباط دقیق میان **شیمیِ سطح** (مانند نوع و تراکم گروه‌های عاملی سطحی) و **پایداری بلندمدت در برابر آب** هنوز به‌خوبی تبیین نشده و نتایج موجود در ادبیات فنی، فاقد یک اِجماع مکانیکی است. این پراکندگی در یافته‌ها نشان‌دهنده نیاز به پژوهش‌های سیستماتیک است تا مشخص شود چگونه تغییرات در ساختار سطحی نانومواد، انرژی آزاد سطحیِ قیر را برای مقابله با نیروی جداکنندگی آب تغییر می‌دهد.

---

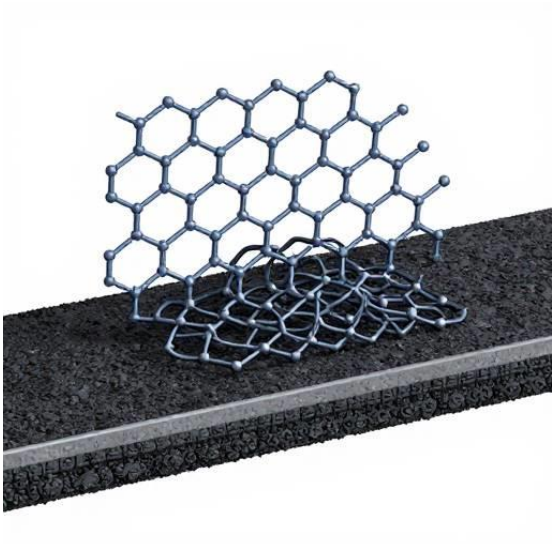
۱ این طیف سنجی، یک تکنیک تحلیلی غیرمخرب است که با شناسایی ارتعاشات پیوندهای شیمیایی، گروه‌های عاملی موجود در قیر را شناسایی کرده و تغییرات آن‌ها در اثر زوال را کمی می‌کند.
XPS۲ : طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه‌ی ایکس که برای تعیین نوع و حالت شیمیایی عناصر سطحی (عمق ۲ تا ۱۰ نانومتر) استفاده می‌شود.
AFM3 : تکنیکی است جهت نقشه‌برداریِ توپوگرافیِ سطح در مقیاس نانومتری و اندازه گیری.

4 Specific Active Sites
5 Stable Hydrophobicity
6 Polar Surface Energy component
7 Moisture Affinity
8 Moisture Resistance

۵-۱) پتانسیل بومی‌سازی در ایران

ایران با داشتن منابع غنی نانورس در استان‌های سمنان و خراسان و همچنین تولید سالانه بیش از ۲.۵ میلیون تن شلتوک برنج که پوسته آن منبعی عالی برای تولید نانوسیلیس است، پتانسیل بالایی برای تولید انبوه نانومواد اصلاح‌کننده قیر دارد. با توجه به تردد بالای وسایل نقلیه در جاده‌های اصلی کشور و تنوع اقلیمی (از مناطق گرم و خشک تا سردسیر)، نیاز به افزایش طول عمر روسازی‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری، این فناوری را به‌ویژه برای ایران ارزشمند می‌سازد. بر اساس آمار سازمان راهداری، سالانه بیش از ۱۵۰۰ کیلومتر روسازی آسفالتی در کشور نیاز به مرمت اساسی دارند که با استفاده از قیرهای نانومدوله می‌توان عمر مفید آن‌ها را تا ۳۰-۴۰ درصد افزایش داد.

۲) تحلیل تطبیقی عملکرد نانومواد دوبعدی بر اساس شواهد طیف‌سنجی و رئولوژیکی



شکل ۱- سازوکار نانو مدوله

۱-۲) مفهوم سدکُنندگی و پیامدهای عمرانی آن

نانومواد دوبعدی به‌دلیل ساختار صفحه‌ای خود، می‌توانند به‌عنوان یک سپر فیزیکی-شیمیایی در برابر نفوذ مولکول‌های اکسیژن عمل کنند (شکل ۱). این صفحات، با ایجاد مسیرهای پرپیچ‌وخم برای نفوذ گازها و همچنین جذب سطحی مولکول‌های قطبی، از واکنش آن‌ها با زنجیره‌های هیدروکربنی قیر جلوگیری می‌کنند. مدل مسیر پرپیچ‌وخم توجیه‌گر اصلی کاهش نفوذپذیری در حضور نانوصفحات دوبعدی است.

از منظر مهندسی عمران، این اثر سدکُنندگی به‌طور مستقیم به افزایش عمر خستگی و کاهش ترک‌خوردگی روسازی منجر می‌شود. به‌عنوان مثال، نانوصفحات اکسید گرافِن با پراکنش مناسب در بستر قیر، یک شبکه سدکننده ایجاد می‌کنند که نه‌تنها نفوذ اکسیژن را کاهش می‌دهد، بلکه با جذب رادیکال‌های آزاد ناشی از اکسایش، فرآیند زوال را به‌طور مؤثری

به‌تأخیر می‌اندازد. در مطالعه‌ای بر روی قیر اصلاح‌شده با GO/SBS، مشاهده شد که مقاومت در برابر خستگی (با استفاده از آزمایش DSR) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته که این بهبود، مستقیماً به کاهش سرعت زوال نسبت داده شده است [2].

جدول ۱- تحلیل تطبیقی نانومواد دوبعدی

نانو ماده	مکانیسم اصلی اثر	تأثیر بر شاخص کربونیل	تأثیر بر شاخص سولفوکسید	تأثیر بر مقاومت خستگی	مزایا	معایب	مراجع
اکسید گرافِن (GO)	سدکُنندگی + جذب رادیکال‌های آزاد + افزایش گروه‌های آمید	کاهش از ۰.۴۵ به ۰.۲۸ (۳۸درصد) پس از PAV	کاهش ۴۲ درصدی	افزایش ۳۵ درصدی	بهبود چسبندگی، کاهش شکنندگی، مقاومت به زوال عالی	افت جزئی عملکرد در دمای پایین	Liuو همکاران، ۲۰۲۴
کامپوزیت GO/SBS	سدکُنندگی + شبکه پلیمری سه‌بعدی	کاهش ۴۱ درصدی	کاهش ۴۳ درصدی	افزایش ۴۰ تا ۴۵ درصدی	پایداری حرارتی بالا، مقاومت عالی در برابر شیارشدگی	هزینه بالاتر، پیچیدگی فرآیند تولید	Xieو همکاران، ۲۰۲۴
نانورس آلی (OMMT)	ایجاد ساختار درهم‌آمیخته + سدکُنندگی نفوذ گاز	کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی	کاهش ۲۰ تا ۲۵ درصدی	افزایش ۲۰ تا ۲۵ درصدی	افزایش مقاومت در برابر خزش و ترک‌های حرارتی	اثربخشی کمتر در برابر زوال فرابنفش	Huangو همکاران، ۲۰۲۴
نانوسیلیس	پیوند هیدروژنی + افزایش ویسکوزیته	کاهش ۱۵تا ۲۰ درصدی	کاهش ۱۵تا ۲۰ درصدی	افزایش ۱۵تا ۲۰ درصدی	بهبود مقاومت به شیارشدگی	پراکنش دشوار	مطالعات متعدد

شرایط تست: قیر با گرید PG 64-22، پیری با PAV به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲.۱ مگاپاسکال.

۲-۲) روش‌های تحلیل پیشرفته FTIR: از شناسایی تا تحلیل عمیق سطحی

تحلیل دکانولوشن پیک‌ها[1]: یکی از روش‌های پیشرفته FTIR، تحلیل دکانولوشن پیک‌ها است که امکان تفکیک پیک‌های همپوشان در ناحیه ۱۶۰۰-۱۸۰۰ سانتی‌متر$^{-1}$ را فراهم می‌کند. استفاده از مدل‌های برازش ریاضی مانند توابع گاوسی/لورنتزی برای دکانولوشن پیک‌ها، امکان محاسبه دقیق نسبت سطحی زیر پیک را فراهم می‌کند که معیاری بسیار دقیق‌تر از شدت پیک برای تعیین میزان اکسایش است[3]. این روش می‌تواند:

۱ **تحلیل دکانولوشن:** روشی ریاضی برای جداسازی پیک‌های همپوشان در طیف FTIR جهت محاسبه دقیق مساحت زیر هر پیک است.

۱) نوع برهم‌کنش‌های شیمیایی را شناسایی کند: با تفکیک پیک مربوط به پیوند هیدروژنی (حدود ۳۴۰۰ سانتی‌متر$^{-1}$) از پیک مربوط به برهم‌نهش π-π (حدود ۱۶۰۰ سانتی‌متر$^{-1}$)، می‌توان نوع غالب برهم‌کنش بین نانومواد و قیر را تعیین کرد.
۲) تغییرات گروه‌های عاملی را به‌طور مجزا پایش کند: به‌عنوان مثال، افزایش شدت پیک ۱۷۲۰ سانتی‌متر$^{-1}$ (C=O) می‌تواند به‌طور مجزا از پیک ۱۶۰۰ سانتی‌متر$^{-1}$ (C=C) آروماتیک اندازه‌گیری شود.
نقشه‌برداری شیمیایی: ترکیب FTIR با میکروسکوپ (FTIR-Microscopy) امکان ایجاد نقشه توزیع گروه‌های عاملی در سطح نمونه را فراهم می‌کند. این تکنیک می‌تواند:

- توزیع ناهمگن نانومواد را در سطح قیر آشکار کند.
- نقاط شروع تخریب شیمیایی را شناسایی کند.
- اثر سدکُنندگی نانومواد را در نقاط مختلف سطح نشان دهد [4].

۳-۲) تحلیل عمیق سطحی و نقش شیمی سطح در پایداری آب‌گریزی

بسیاری از پژوهش‌های عمرانی، اثر نانومواد را صرفاً از طریق تغییرات شاخص‌های FTIR و بهبود خواص مکانیکی ارزیابی کرده‌اند. بااین‌حال، تحلیل عمیق‌تر سطحی با استفاده از طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس(XPS) یا میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) می‌تواند اطلاعات بسیار بیشتری در مورد سازوکارهای شیمیایی ارائه دهد.
Yang و Yu (۲۰۲۳)، با استفاده از شبیه‌سازی نظریه DFT[1] نشان دادند که گرافِن و قیر، سازگاری عالی دارند و واکنش شیمیایی بین آن‌ها رخ نمی‌دهد، اما سه نوع برهم‌کنش اصلی در فصل مشترک وجود دارد: درهم‌تنیدگی مکانیکی، نیروی واندروالس، و برهم‌نهش حلقه‌های بنزنی، سد برشی گرافِن در فصل مشترک، مقدار ۲۴۸.۹۳ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است که نشان‌دهنده استحکام بالای این برهم‌کنش‌هاست[6].

۳) چالش‌های پژوهشی و اجرایی

۳-۱) چالش پراکنش نانومواد و راهکارهای بهبود آن

یکی از مهم‌ترین چالش‌های عملی در کاربرد نانومواد، ایجاد پراکنش همگن و پایدار در بستر قیر است. تحقیقات نشان داده است که پراکنش نامناسب نانومواد، اثر سدکُنندگی آن‌ها را به شدت کاهش می‌دهد [2]. راهکارهای بهبود پراکنش عبارت‌اند از:
اصلاح سطحی نانومواد: استفاده از سورفکتانت‌ها یا عوامل سیلانی برای افزایش سازگاری با قیر.
استفاده از التراسونیک: اعمال امواج فراصوت برای شکستن تجمعات نانومواد.
استفاده از حلال‌های کمکی: در مقیاس آزمایشگاهی، استفاده از حلال‌های کمکی می‌تواند به بهبود پراکنش کمک کند، اما در مقیاس صنعتی، تمرکز باید بر روش‌های اختلاط با بُرش بالا یا استفاده از پراکنش‌سازی با کمک سورفکتانت باشد تا اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی حلال‌ها مدیریت شود[8].

---

1 **نظریه تابعی چگالی:** یک روش محاسباتی کوانتومی است که برای بررسی ساختار الکترونی و برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی در سامانه‌های نانومقیاس به‌کار می‌رود. در این روش، به‌جای محاسبه تابع موج چندالکترونی، از چگالی الکترونی به‌عنوان کمیت اصلی استفاده می‌شود که منجر به کاهش چشم‌گیر هزینه محاسباتی می‌گردد.

هم‌افزایی با پلیمرها: مانند SBS که با نانومواد برهم‌کنش داشته و پراکنش آن‌ها را بهبود می‌بخشد[4].

۲-۳) تحلیل اقتصادی کاربرد نانومواد در روسازی‌های ایران

اگرچه هزینه اولیه تولید و اصلاح قیر با نانومواد (به‌ویژه نانومواد کربنی) بالاست، اما تحلیل چرخه حیات نشان می‌دهد که در بلندمدت، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش طول عمر روسازی، این هزینه را توجیه‌پذیر می‌سازد[9].

بر اساس تحلیل فنی-اقتصادی اولیه:

- هزینه اضافی هر تُن قیر اصلاح‌شده با اکسید گرافِن: حدوداً بیش از ۱۵ میلیون تومان؛
- صرفه‌جویی سالانه در هزینه‌های مرمت: حدوداً بیش از ۴۰ میلیون تومان به ازای هر کیلومتر روسازی؛
- دوره بازگشت سرمایه: ۴ تا ۵ سال

۴) نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل تطبیقی ارائه‌شده در این مقاله، شواهد طیف‌سنجی و رئولوژیکی به‌وضوح نشان می‌دهد که نانومواد دوبعدی، به‌ویژه اکسید گرافِن و کامپوزیتGO/SBS، عملکرد برجسته‌ای در مهار زوال اکسایشی-نوری قیر دارند [1, 3, 4]. نتایج به‌دست‌آمده مبنی بر کاهش ۳۸ تا ۴۱ درصدی شاخص کربونیل و افزایش ۳۵ تا ۴۵ درصدی مقاومت خستگی، مؤید تشکیل یک شبکه سدکننده مؤثر در برابر نفوذ اکسیژن و بهبود تعاملات بین‌سطحی در ماتریس آسفالت است[1, 4, 5]. بااین‌حال، آنچه یک مقاله‌ی مروریِ صرفاً فنی از کنار آن به‌سادگی می‌گذرد، پرسش کلیدی توجیه‌پذیری صنعتی این فناوری در شرایط خاص کشورهایی مانند ایران است[2, 9].

در پاسخ به پرسش محوری این پژوهش: "با وجود عملکرد برتر اکسید گرافِن، آیا تولید صنعتی آن در ایران با توجه به تحریم‌ها و هزینه‌های بالا، واقعاً توجیه‌پذیر است؟" باید به سه سطح تحلیل جداگانه ذیل توجه کرد:

سطح اول) توجیه‌پذیری فنی: از منظر علمی، پاسخ مثبت است. داده‌های جدول (۱) نشان می‌دهد که حتی نانورس آلی (OMMT) با هزینه‌ای بسیار کمتر از اکسید گرافِن، می‌تواند ۲۵ تا ۳۰ درصد شاخص کربونیل را کاهش دهد. بنابراین، از منظر بهترین عملکرد، اکسید گرافِن برنده است، اما از منظر مناسب‌ترین فناوری برای شرایط تحریمی، شاید ترکیب نانورس داخلی با منابع غنی در استان‌های سمنان و خراسان با درصد کمی اکسید گرافِن یا حتی نانوسیلیس حاصل از پوسته برنج، راهبردی هوشمندانه‌تر باشد. این مقاله پیشنهاد می‌کند که صرفاً به‌جای تمرکز بر روی اکسید گرافِن، پژوهش‌های آتی بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی با پایه نانورس/سیلیس بومی متمرکز شوند که هم اثر سدکُنندگی قابل‌قبولی دارند و هم وابستگی به واردات مواد اولیه را کاهش می‌دهند[6, 9].

سطح دوم) توجیه‌پذیری اقتصادی: تحلیل اولیه چرخه حیات نشان داد که با وجود هزینه اضافی حداقل ۱۵ میلیون تومانی برای هر تن قیر اصلاح‌شده با اکسید گرافِن، صرفه‌جویی ناشی از کاهش تعمیرات (بیش از ۴۰ میلیون تومان به ازای هر کیلومتر در سال) می‌تواند سرمایه‌گذاری را طی ۴ تا ۵ سال بازگرداند. اما این محاسبه، دو متغیر تحریمی را نادیده گرفته است:

۱) نوسان شدید نرخ ارز و قیمت دلاری اکسید گرافِن که برنامه‌ریزی بلندمدت را با مخاطره مواجه می‌کند.

۲) هزینه‌های بالای اختلاط با برش بالا و مصرف انرژی در کارخانه‌های آسفالت، که در صورت تحریم نبودن تأمین قطعات تجهیزات، ممکن است به‌مراتب گران‌تر از برآورد اولیه تمام شود.

بنابراین، توجیه‌پذیری اقتصادی اکسید گرافِن در ایران، مشروط است به:
دستیابی به دانش فنی مرتبط با تولید داخلی اکسید گرافِن با کیفیت قابل‌رقابت (که نمونه‌هایی از آن در برخی دانشگاه‌های کشور در حال توسعه است) و یافتن روش‌های اختلاط کم‌هزینه‌تر مانند استفاده از مَستربچ‌های نانویی[۱].
سطح سوم) توجیه‌پذیری راهبردی: در شرایط تحریم، هر فناوری که وابستگی به سایر کشورها را کاهش دهد و از مواد اولیه داخلی استفاده کند، دارای ارزش راهبردی فراتر از محاسبات اقتصادی صِرف است. ایران با تولید سالانه بیش از ۲.۵ میلیون تن شلتوک برنج و ذخایر غنی نانورس، می‌تواند به‌طور کامل از نانوسیلیس و نانورس اصلاح‌شده داخلی برای اصلاح قیر استفاده کند و تنها در پروژه‌های بسیار حساس (مانند فرودگاه‌ها و بزرگراه‌های شریانی) از اکسید گرافِن به‌صورت محدود و هدفمند بهره گیرد. این رویکردِ مقاوم‌سازیِ چندبعدی که در جدول (۲) پیشنهاد شده است، در واقع یک راهبرد تطبیقی با شرایط تحریمی است.
بنابراین مقاله‌ی حاضر با ارائه‌ی شواهد علمی، تأیید می‌کند که اکسید گرافِن از نظر عملکرد، بهترین گزینه برای مهار زوال قیر است؛ اما پاسخ به پرسش توجیه‌پذیری صنعتی آن در ایران، مثبتِ بی‌قیدوشرط نیست؛ بلکه یک بله‌ی دارای شرط است، و شرط آن، حرکت از رویکرد بهترین ماده به رویکرد مناسب‌ترین سامانه با تکیه بر مواد بومی، توسعه‌ی دانش فنی داخلی، و انجام مطالعات پایلوت در مقیاس واقعی جاده‌هاست تا داده‌های اقتصادی دقیق‌تری تحت شرایط عملیاتی ایران جمع‌آوری شود. پیشنهادهای پژوهشی بخش (۵)، دقیقاً جهت پر نمودن همین شکاف بین دانش آزمایشگاهی و عملکرد صنعتی تدوین شده‌اند[1, 3, 4].

جدول۲- چارچوب پیشنهادی برای انتخاب نانومواد و روش‌های ارزیابی در روسازی‌های آسفالتی

هدف عملکردی (عمرانی)	نانوماده پیشنهادی	سازوکار شیمیایی اصلی	روش ارزیابی توصیه‌شده
کاهش نرخ زوال (افزایش عمر خستگی)	کامپوزیت GO/SBS	سدکُنندگی + شبکه پلیمری سه‌بعدی + افزایش گروه‌های آمید	FTIR پیشرفته + تحلیل دکانولوشن DSR + TGA [۳, ۴]
حفظ چسبندگی و مقاومت به رطوبت	GO اصلاح‌شده سطحی	کاهش تشکیل گروه‌های قطبی سطحی + افزایش چسبندگی	اندازه‌گیری زاویه تماس پویا + XPS + آزمایش مویچگی [6, 8]
مقاوم‌سازی چندبعدی	GO/SBS یا GO/نانورس هیبریدی	ترکیب اثر سدکُنندگی با خواص پلیمری	FTIR + XPS + AFM + DSR + آزمایشات مکانیکی [6, 9]

۱ **مَستربَچ قیر اصلاح‌شده** یک محصول پیش‌مخلوط غلیظ است که برای ساده‌تر کردن فرآیند اصلاح قیر در محل پروژه به کار می‌رود که پراکَنش یکنواخت‌تری ایجاد کرده و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.

۵) پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی

۵-۱) بررسی سیستماتیک رابطه میان نوع و تراکم گروه‌های عاملی سطحی نانومواد با استفاده از XPS و پایداری آب‌گریزی قیرهای نانومدوله پس از زوال‌های شتاب‌یافته و چرخه‌های تر-خشک (برطرف نمودن شکاف‌های سوم و چهارم).
۵-۲) توسعه روش‌های تحلیل عمیق FTIR (مانند تحلیل دکانولوشن پیک‌ها و نقشه‌برداری شیمیایی) برای شناسایی نوع برهم‌کنش‌های شیمیایی بین نانومواد و قیر و تغییرات آن در طول زوال (برطرف نمودن شکاف دوم).
۵-۳) طراحی کامپوزیت‌های هیبریدی هدفمند با گروه‌های عاملی سطحی کنترل‌شده که هم‌زمان به بهبود مقاومت در برابر زوال، رطوبت و شیارشدگی بپردازند و پایداری آب‌گریزی آن‌ها در شرایط مختلف زوال و غوطه‌وری ارزیابی شود (برطرف نمودن شکاف اول و سوم).
۵-۴) بهره‌گیری از دینامیک مولکولی[1] برای پیش‌بینی ضریب نفوذ اکسیژن در حضور نانومواد مختلف و ارتباط آن با داده‌های تجربی. ترکیب داده‌های تجربی با شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نشان‌دهنده یک رویکرد جامع در مقالات مروری مدرن می‌باشد.

۶) مراجع

1. Chen, X., Wang, Y., Wen, Y., Cheng, H., & Hao, G. (2025). Oxygen Diffusion Coefficients of Asphalt Mixtures and Their Impacts on Mixture Aging. Transportation Research Record.
2. Huang, H., Wang, Y., Wu, X., Zhang, J., & Huang, X. (2024). Nanomaterials for Modified Asphalt and Their Effects on Viscosity Characteristics: A Comprehensive Review. Nanomaterials, 14(18), 1503.
3. Liu, K., Jiang, K., Li, T., & Li, Q. (2025). Fourier Transform Infrared Spectroscopy Characterization of Aging Properties of Graphene Oxide Modified Asphalt Binder. International Journal of Adhesion and Adhesives
4. Xie, H., Jia, Y., Liu, W., Huang, Z., Wang, H., Li, Z., & Zhu, C. (2024). The Effects of Aging on Microstructures and Rheological Properties of Modified Asphalt with GO/SBS Composite. Polymers, 16(11), 1504.
5. S Ren, X Liu, P Lin, R Jing, S Erkens.(2023).Toward the long-term aging influence and novel reaction kinetics models of bitumen. International Journal of Pavement Engineering.
6. Yang, Q., & Yu, C. (۲۰۲۳). Multiscale Interfacial Interactions in Graphene-Asphalt Nanocomposites: Implications for Asphalt Pavement Material Applications. ACS Applied Nano Materials.

[1] Molecular Dynamics - MD

۷. قلی‌زاده، ع. (۱۴۰۲).” مروری بر تأثیر نانو ذرات بر خصوصیات آسفالت”، هفتمین همایش افق‌های نوین در مهندسی عمران.
8. Terayama, Y., Khajornrungruang, P., Seo, J., Hamada, S., Wada, Y., & Hiyama, H. (2024). Detachment Energy Evaluation in Nano-Particle Cleaning Using Lateral Force Microscopy. Applied Sciences, 14(18), 8145.
9. Yao, H., et al. (2025). Review of Nanomaterials in Pavement Engineering. ACS Applied Nano Materials.