



مروری بر استفاده از نانوذرات سیلیکا در بهبود خواص رنگ و پوشش

آرمین حاجی بابا

دکترای مهندسی پلیمر، مدیرفنی کارخانجات چسب و رنگ بهسازان برنا انرژی پارس (بپکو)، تهران، ایران، صندوق پستی: ۳۷۳۸۱۱۷۶۵۹.

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۱ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۷/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۰۱ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۷/۰۵/۰۳

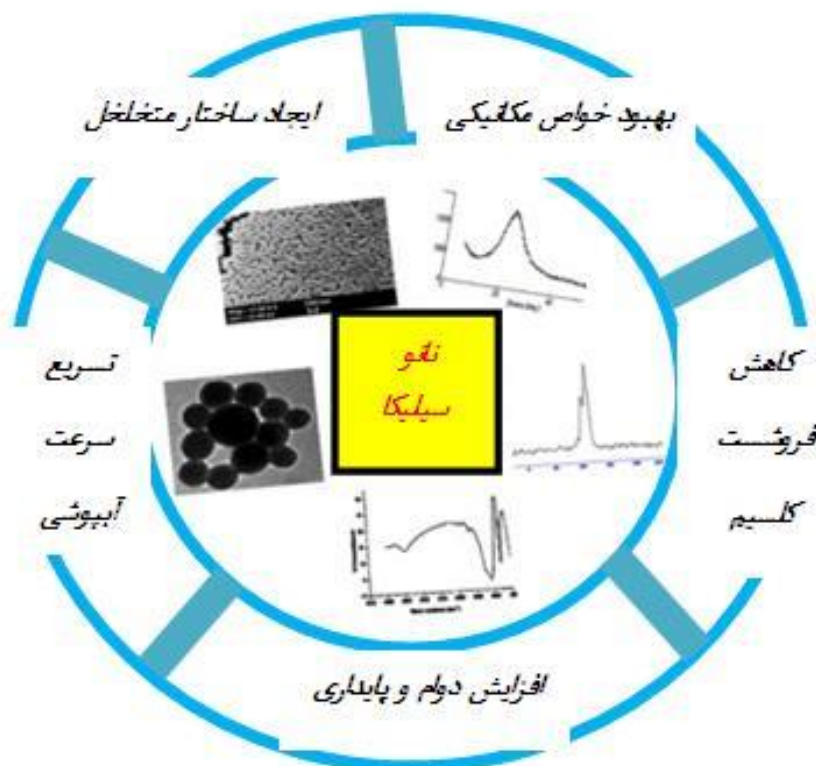
چکیده

از آنجایی که استفاده از نانوذرات سیلیکا در صنایع مختلف رو به افزایش است، در این مقاله به مطالعه تاثیر و کاربرد این نانوذرات در رنگ‌ها و پوشش‌ها پرداخته خواهد شد. نانو ذرات سیلیکا در حالات مختلف سیلیکای رسوبی، ژل‌های سیلیکا، کلئوئیدهای سیلیکا، فیوم سیلیکا و پودر نانوسیلیکا در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صنایع رنگ آب پایه، معمولا از سیلیکای کلئوئیدی استفاده می‌گردد. سیلیکای کلئوئیدی یک دیسپرسیون شیری رنگ از نانوذرات سیلیکا در آب یا اتانل است. استفاده از نانوذرات سیلیکا در رنگ و پوشش سبب افزایش خواصی چون سختی، مقاومت سایشی، افزایش ویسکوزیته، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر نفوذ آب و گرد و غبار می‌شود. ممانعت از نفوذ آب و گرد و غبار نیز سبب ایجاد خاصیت خودتمیزشوندگی در رنگ و لاک می‌شود. همچنین نانوذرات سیلیکا سبب بهبود رفتار کندسوزی در پوشش‌های مقاوم در برابر حریق می‌شوند.

واژه‌های کلیدی

نانوذرات، سیلیکا، پوشش‌های کندسوز، رنگ‌های خودتمیز شونده.

چکیده تصویری





Review on the Using of Silica Nano Particles in Paints and Coatings

Armin Hajibaba

Behsazan Borna Energy Pars Company (BEPco), P. O. Box: 3738117659 Tehran, Iran.

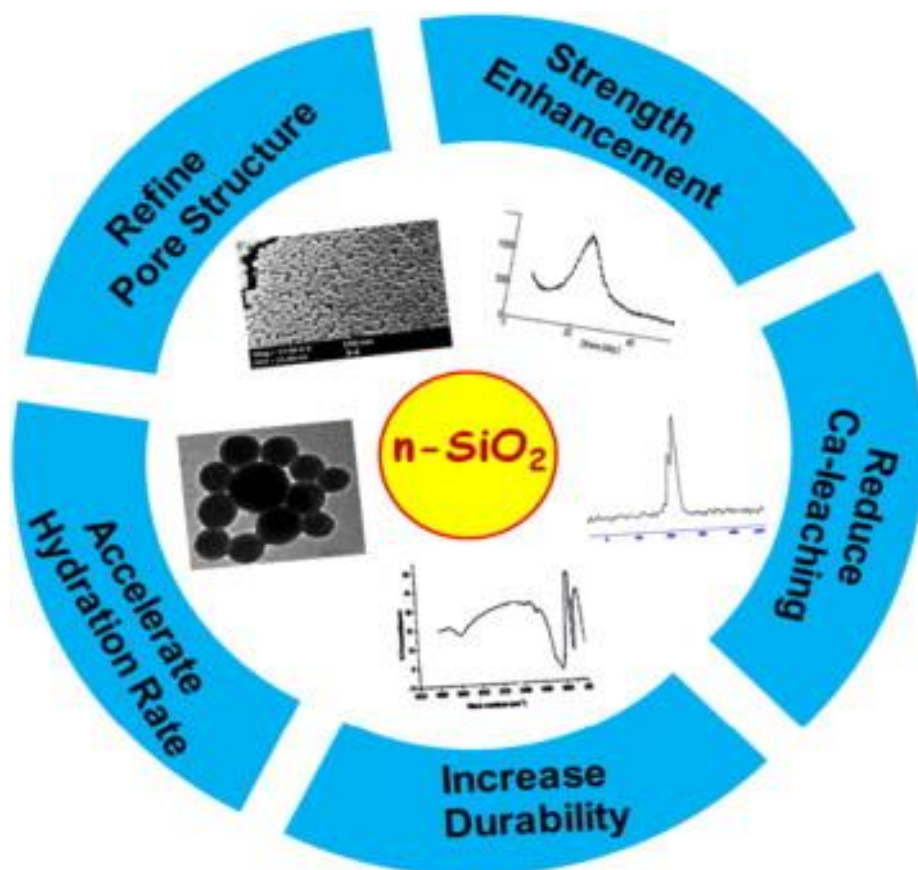
Abstract

Due to increasing the consumption of silica nano particles (nano silicon dioxide) in different industries, the effect and application of silica nano particles in paints and coatings will be discussed, in this article. There are several forms of silica nano particles on the market such as precipitated silica, silica gel, colloidal silica, fumed silica and silica powder. Colloidal silica is usually used in water-based coatings. Colloidal silica is a milky dispersion of discrete SiO_2 -particles stabilized in the water or ethanol. The using of silica nano particles in paints and coatings can improve the hardness, abrasion resistance, increasing of viscosity, thermal stability and dirt and water repellent. Dirt and water repellency results in self- cleaning behavior in paints and lacquers. Silica nano particles can improve the fire retardancy behavior in fire retardant coatings, as well.

Keywords

Nano Particles, Silica, Fire Retardant Coatings, Self- Cleaning Paints.

Graphical abstract



۱- مقدمه

دی‌اکسید تیتانیوم سبب ایجاد مقاومت UV و خاصیت خودتمیزشوندگی و نانوذرات سیلیکا سبب افزایش مقاومت سایشی و پایداری حرارتی می‌گردند [۵-۷]. جدول ۱ به طور خلاصه ویژگی و عملکرد نانوذرات رایج در صنایع رنگ و پوشش را نشان می‌دهد [۱].

به دلیل مصرف بیشتر و روزافزون نانوذرات سیلیکا نسبت به نانوذرات دیگر در صنعت پوشش، در ادامه به مطالعات انجام گرفته بر تاثیر نانوذرات سیلیکا در انواع پوشش‌ها پرداخته خواهد شد.

۲- نانو سیلیکا چیست؟

سیلیکا یا سیلیس با فرمول شیمیایی SiO_2 ، فراوان‌ترین ترکیب اکسیدی موجود در پوسته زمین است. نام سیلیس برای کلیه کانی‌هایی با فرمول عمومی SiO_2 به کار برده می‌شود [۸]. نانوذرات به موادی اطلاق می‌شود که یک، دو یا سه بعد آن‌ها در اندازه نانومتری باشد [۹]. نانوسیلیکا ذراتی گلوله‌ای شکل با قطر معمولاً کمتر از ۱۰۰ nm هستند. این نانوذرات با توجه به ثبات و پایداری، سختی بالا، سمیت پایین و قابلیت عامل‌دار شدن با گروه‌های عاملی مختلف مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. سیلیکا به دو حالت بلوری و بی‌شکل وجود دارد که هر دو نوع می‌توانند سنتزی یا طبیعی باشند [۸]. ذرات سیلیکای سنتزی به حالت‌های مختلف سیلیکای رسوبی، ژل‌های سیلیکا، کلونیدهای سیلیکا، فیوم^۷ سیلیکا و پودر نانوسیلیکا قابل ارائه هستند [۸]. سیلیکای کلونیدی ماده‌ای متشکل از ذرات سیلیکا با ابعاد ۳ تا ۱۰۰ nm هستند که در محیطی مثل آب یا اتانل کاملاً پایدار شده‌اند.

سیلیکا نام دیگر اکسید سیلیکون است که رایج‌ترین نوع آنها SiO_2 می‌باشد. در طبیعت دسته دیگری از سیلیکاهای بی‌شکل (آمورف) وجود دارد که به طور صنعتی در فرم‌های متفاوتی (سیلیکای رسوبی^۱، کلونیدی^۲، سدیم سیلیکات و غیره) ساخته می‌شود. سیلیس کلونیدی در بین سایر سیلیکاهای بیشترین مساحت سطح را داشته و اندازه توده آن می‌تواند به کوچکی اندازه واقعی ذره اولیه باشد. مقدار pH این نوع سیلیکا در محدوده اسیدی می‌باشد. از طرفی سدیم سیلیکات‌ها، محلول‌هایی قلیایی با pH حدود ۱۲ تا ۱۳ هستند. سدیم سیلیکات‌ها از مونومرهای سیلیکاتی ساخته شده که در مقابل سیلیکای کلونیدی از سیلیکات‌های پلیمری تشکیل شده است. همچنین گرانروی محلول سدیم سیلیکات به مراتب از سیلیکای کلونیدی بالاتر است. نسبت SiO_2 به Na_2O در سیلیکات سدیم تقریباً ۳/۴ است، که این نسبت در سیلیکای کلونیدی بیش از ۵۰ می‌باشد [۱].

امروزه استفاده از نانوذرات در رنگ و پوشش به منظور بهبود خواص یا ایجاد عملکردی ویژه، از موضوعات مهم به شمار می‌رود. استفاده از نانوذرات مختلف در رنگ‌ها سبب بهبود مقاومت UV، مقاومت سایشی، افزایش گرانروی، پایداری حرارتی و ایجاد ویژگی‌های مقاومت در برابر حریق، خودتمیزشوندگی^۳ و خاصیت ضدباکتری^۴ می‌گردد [۱]. نانوذرات مختلف با اندازه، شکل و نسبت وجوه^۵ گوناگون، سبب ایجاد خواص متفاوت در رنگ و پوشش می‌شوند [۴-۲]. برای مثال نانوذرات نقره سبب ایجاد خاصیت ضدباکتری، نانوذرات

⁶ Gel

⁷ Fumed or Pyrogenic

¹ Precipitated

² Sol or Colloidal

³ Self-Cleaning

⁴ Anti- Bacterial

⁵ Aspect Ratio

جدول ۱- ویژگی و عملکرد نانوذرات مرسوم در رنگ‌ها [۱].

ویژگی و عملکرد	نام ذره		
	دی‌اکسید تیتانیوم روتایل (TiO_2)	دی‌اکسید تیتانیوم آناتاز (TiO_2)	سیلیکا (SiO_2)
ضد باکتری ^۸	✓	✓	✓
تاخیر انداز حریق ^۹	✓	✓	✓
پایداری حرارتی ^{۱۰}	✓	✓	✓
مقاومت در برابر UV ^{۱۱}	✓	✓	✓
ممانعت از نفوذ آب ^{۱۲}	✓	✓	✓
مقاومت سایشی ^{۱۳}	✓	✓	✓

⁸ Anti-bacteria

⁹ Fire retardant

¹⁰ Thermal stability

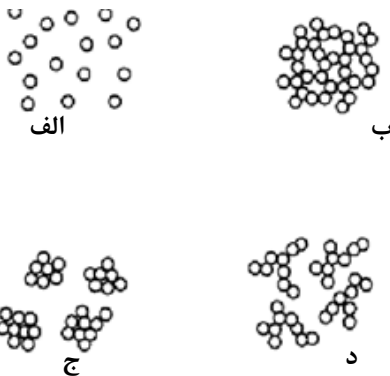
¹¹ UV-resistance

¹² Resistance to water penetration

¹³ Abrasion resistance

مقاله

نانوذرات سیلیس اصلاح‌شده با دی‌متیل‌دی‌کلروسیلان سبب افزایش سختی و کاهش عمق خراش در لاک‌های پلی‌یورتانی می‌شود. نانوذرات سیلیکا از طرفی سبب بهبود مقاومت در برابر خراش^۴ لاک‌های پلی‌یورتانی شده‌اند؛ اما از سوی دیگر سبب افزایش حالت مه‌گونی و کدر شدن این لاک‌ها می‌شوند. جدول ۲ نتایج حاصل از آزمون سختی و خراش برای لاک‌های پلی‌یورتانی فاقد نانوسیلیکا و شامل نانوسیلیکای اصلاح‌شده را نشان می‌دهد [۱۰]. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با افزودن ۳٪ وزنی نانوسیلیکا به لاک پلی‌یورتان، مدول الاستیک، سختی و نیروی لازم جهت خراش افزایش یافته است. همچنین میزان فرورفتگی در اثر اعمال نیرو (خش‌پذیری) و تغییر شکل لاک پلی‌یورتان حاوی نانوسیلیکا، کاهش یافته است [۱۰].



شکل ۱- حالات مختلف نانوذرات سیلیکا، الف) کلئیدی، ب) ژل، ج) رسوبی، د) فیوم سیلیکا [۸].

از سیلیکای کلئیدی بیشتر در رنگ، پوشش و لاک‌های پایه آبی استفاده می‌شود. سیلیکای رسوبی متشکل از ذراتی با ابعاد ۵ تا ۱۰۰ nm بوده که کلوخه‌هایی^۱ با قطر ۰/۱ تا ۲۵۰ میکرون را تشکیل می‌دهند. ژل سیلیکا نیز از پلیمریزاسیون ذرات سیلیکا کلئیدی تشکیل شده است. ساختار ژل سیلیکا مشابه سیلیکای کلئیدی بوده اما زبری و خلل و فرج کلوخه‌های ژل سیلیکا نسبت به سیلیکای کلئیدی یکنواخت‌تر است. فیوم سیلیکا کلوخه‌هایی از سیلیکا با ابعاد ۵ تا ۱۰۰ nm هستند که پس از متورم شدن می‌توانند به ابعاد حدود ۱۰۰ میکرون برسند [۸]. از فیوم سیلیکا^۲ بیشتر به عنوان غلظت‌دهنده در رنگ و پوشش استفاده می‌شود. شکل ۱ حالات مختلف نانوذرات سیلیکا را نشان می‌دهد.

فیوم سیلیکا از ذرات اولیه‌ی زبر کروی (۵۰-۵ نانومتر) تشکیل شده که این ذرات بصورت دسته‌هایی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این دسته‌ها می‌توانند بصورت تجمعی از ذرات اولیه (۵۰۰-۱۰۰ نانومتر) باشند که به یکدیگر پیوسته‌اند. افزودن فیوم سیلیکا سبب افزایش ویسکوزیته پوشش‌ها می‌گردد. افزایش محتوی سیلیکا باعث افزایش در تعداد برهم‌کنش‌های بین ذرات سیلیکا شده و بنابراین ویسکوزیته بیشتر افزایش می‌یابد. توانایی سیلیکا برای تشکیل یک شبکه بر اساس این برهم‌کنش‌ها یک خاصیت تیکسوتروپیک^۳ را در رزین به وجود می‌آورد [۸].

۳- استفاده و ویژگی نانو سیلیکا در رنگ‌ها و پوشش‌ها

نانوذرات سیلیکا در شکل‌ها و حالات مختلف، کاربرد زیادی در صنایع رنگ آب پایه و حلال پایه دارد. نیک‌نام و همکارانش [۱۰] به بررسی تاثیر نانو سیلیکا در لاک‌های پلی‌یورتان دوجزئی پرداختند. این دانشمندان در تحقیقات خود نشان دادند که استفاده از ۳٪ وزنی

⁴ Scratch Resistance

¹ Aggregate
² Fumed Silica
³ Thixotropic

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون سختی و خراش برای لاک‌های پلی‌یورتانی فاقد نانوسیلیکا و شامل نانوسیلیکای اصلاح‌شده [۱۰].

لاک شامل نانوسیلیکا	لاک فاقد نانوسیلیکا	ویژگی
۵/۴	۴/۷	مدول الاستیک ^۵ (GPa)
۱۴۴/۲	۱۴۰	نیروی لازم جهت ایجاد خراش ۴ میکرونی ^۶ (μN)
۲۲۴	۲۶۴	میزان فرورفتگی در اثر اعمال نیروی ۲۵۰ میکرونیوتنی ^۷ (nm)
۰/۳۲	۰/۲۸	سختی ^۸ (GPA)
۲۱۸	۲۳۰	تغییر شکل کلی ^۹ nm

⁵ Elastic modulus

⁶ Force for 4 micron scratch

⁷ Indentation caused by 250 μN force

⁸ Hardness

⁹ Ultimate elongation

مکانیکی^۷ (DMTA) نسبت به دما حاصل از آزمون دینامیکی - مکانیکی^۸ (DMTA) برای پوشش‌های مختلف را نشان می‌دهد [۱۲]. در شکل ۲ مشخص است که در پوشش‌های اکریلیکی فاقد نانوسیلیکا، با افزایش غلظت حجمی رنگدانه^۹ (PVC)، مدول ذخیره پوشش به‌عنوان معیاری از خواص مکانیکی افزایش می‌یابد. در این تصویر مشخص است که پوشش اکریلیکی شامل نانوسیلیکا بیشترین میزان مدول ذخیره را از خود نشان می‌دهد. موضوع مهم دیگر آن‌که با افزایش غلظت حجمی رنگدانه و افزودن نانوسیلیکا، دمای افت مدول ذخیره افزایش و میزان افت مدول ذخیره کاهش می‌یابد. این موضوع نیز نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات سیلیکا به پوشش‌های اکریلیکی خواص مکانیکی پوشش افزایش یافته اما انعطاف‌پذیری^{۱۰} آن کاهش می‌یابد [۱۲].

در سال ۲۰۱۷ فلاح و همکارانش [۱۳] روی بهبود خواص مکانیکی پوشش‌های پایه آبی نیتروسولوز توسط نانو ذرات سیلیکا تحقیق و بررسی نمودند. این محققین نشان دادند که استفاده از ۲٪ وزنی نانوسیلیکا در پوشش‌های نیتروسولوز پایه آبی، سبب افزایش ۹۱/۱ درصدی مدول یانگ، افزایش ۴۶/۶ درصدی استحکام کششی و افزایش ۱۲/۷ درصدی ازدیاد طول در شکست می‌شود. شکل ۳ نمودار تنش- کرنش پوشش نیتروسولوز فاقد نانوسیلیکا و پوشش‌های شامل ۱ و ۲٪ وزنی نانوسیلیکا را نشان می‌دهد. همچنین این دانشمندان بیان کردند که با افزودن ۲٪ وزنی نانوسیلیکا به پوشش‌های نیتروسولوز پایه آبی، دمای انتقال شیشه‌ای^{۱۱} (T_g) از $7/3^\circ\text{C}$ به $6/8^\circ\text{C}$ و سختی پاندولی^{۱۲} از ۳۱ به ۴۰ افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۶ لوتر^۱ و همکارانش [۱۱] نشان دادند که استفاده از نانوذرات سیلیکا در حالا کلونیدی پخش بهتر و یکنواخت‌تری در رنگ‌ها و پوشش‌های آب‌پایه دارد. این محققان نشان دادند که استفاده از نانوذرات سیلیکای کلونیدی در پوشش‌های آب‌پایه سبب بهبود مقاومت در برابر خراش و افزایش سختی پوشش می‌گردد. همچنین این محققان بیان کردند که اصلاح سطح نانوذرات سیلیکا با غلظت‌های بالا از گروه‌های قطبی سیلانل، سبب ایجاد خاصیت خود تمیز شونده‌گی پوشش می‌شود. این ویژگی در لاک‌های آب‌پایه که روی نمای ساختمان‌ها و بناها اعمال می‌شود، بسیار حائز اهمیت است.

در سال ۲۰۱۱ کابرا^۲ و همکارانش [۱۲] روی تهیه نانوکامپوزیت‌هایی از رزین پلی‌اکریلیک و نانوذرات سیلیکا تحقیق و مطالعه به عمل آوردند. این دانشمندان بیان کردند که به دلیل ماهیت آب‌گریزی^۳ شبکه‌های نانوسیلیکا، جدا شدن و بلند شدن قطرات آب^۴ از روی سطح این پوشش‌ها راحت‌تر و با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد. این موضوع سبب ایجاد مقاومت بیشتر این پوشش در برابر آب و عوامل جوی می‌گردد. یکی از موضوعات مهم دیگری که این محققین به آن پرداختند، بحث پایداری رنگ^۵ است. این ویژگی به نوعی به معنای مقاومت در برابر رنگ‌پریدگی می‌باشد. نتایج مطالعات آنها نشان داد که پوشش تهیه شده از رزین اکریلیک و نانوذرات سیلیکا پس از قرارگیری در معرض رطوبت ۹۵٪ و شستشو با آب، پایداری رنگ به مراتب بیشتری نسبت به پوشش اکریلیک فاقد نانوسیلیکا نشان می‌دهد. همچنین استفاده از نانو سیلیکا در پوشش‌های اکریلیکی سبب بهبود خواص مکانیکی پوشش می‌شود. شکل ۲ نمودار مدول ذخیره^۶ نسبت به دما حاصل از آزمون دینامیکی -

⁷ Dynamic Mechanical Thermal Analysis

⁸ Dynamic Mechanical Thermal Analysis

⁹ Pigment Volume Concentration

¹⁰ Elasticity

¹¹ Glass Transition

¹² Pendulum Hardness

¹ Luther

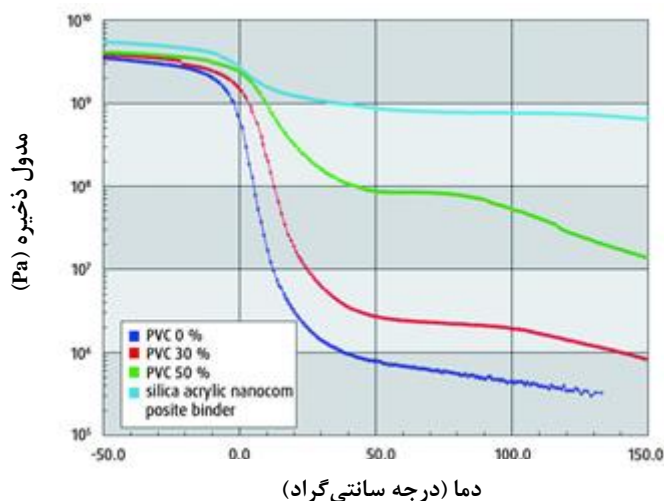
² Cabrera

³ Hydrophobic

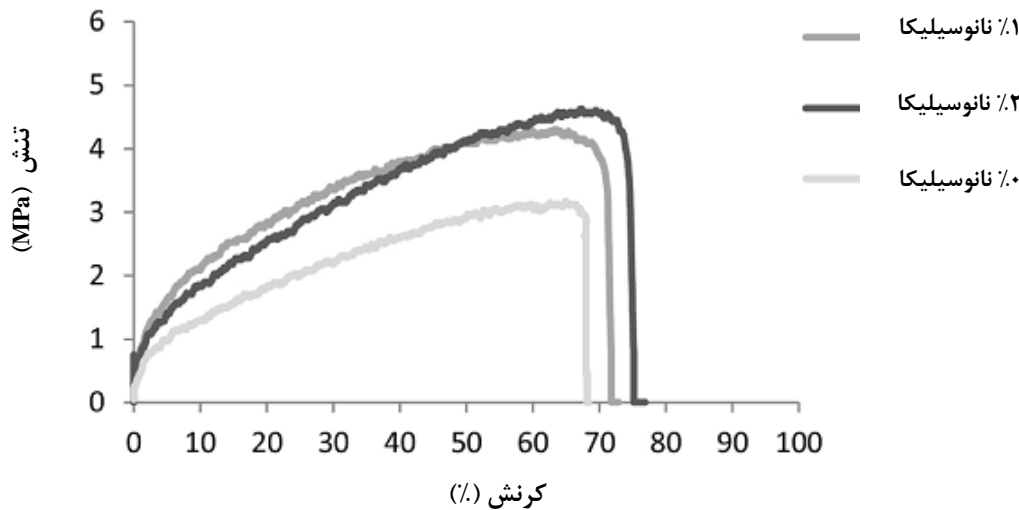
⁴ Water up-take

⁵ Color retention

⁶ Storage modulus



شکل ۲- نمودار مدول ذخیره نسبت به دما حاصل از آزمون دینامیکی - مکانیکی برای پوشش‌های فاقد نانوسیلیکا و شامل نانوسیلیکا [۱۲].



شکل ۳- نمودار تنش- کرنش پوشش نیتروسولوز فاقد نانوسیلیکا و پوشش‌های شامل ۱ و ۲٪ وزنی نانوسیلیکا [۱۳]

این موضوع می‌تواند نشان از برهم‌کنش قوی بین نانوذرات سیلیکا و پوشش اپوکسی باشد. همچنین این دانشمندان توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری^۶ (TEM)، پخش یکنواخت نانوذرات سیلیکا در بستر اپوکسی را به خوبی نشان دادند (شکل ۵) [۱۵].

۴- سنتز نانوسیلیکا

مطالعات و تحقیقات متعددی بر روی سنتز نانو سیلیکا انجام شده است. روش‌های هم‌رسوبی و سل-ژل از جمله روش‌های مرسوم در سنتز نانوسیلیکا هستند. محمدی و همکارانش [۱۶] به سنتز نانوسیلیکا به روش رسوب گذاری با کاربرد عوامل فعال‌کننده سطحی پرداختند. سیلیکای رسوبی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تقویت ویژگی‌های استحکامی لاستیک دارد. همچنین، به عنوان پرکننده در بتن بکار می‌رود. البته موارد کاربرد سیلیکا در صنعت بسیار گسترده است. در تحقیقات، از سیلیکات سدیم، اسید سولفوریک، آب مقطر و همچنین سدیم دودسیل سولفات و پلی وینیل پیرولیدون به عنوان ماده فعال سطح استفاده شده است. اثر غلظت اجزا محلول و همچنین اثر افزودن ماده فعال سطح بر اندازه، شکل و توزیع اندازه ذرات بررسی شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهند که امکان تهیه نانو سیلیکای رسوبی با کنترل شرایط واکنش و با استفاده از مواد اولیه صنعتی وجود دارد. سیلیکای رسوبی تولید شده می‌تواند در کاربردهای گوناگون از قبیل کاتالیزور، جاذب گاز، جاذب یون‌های سنگین فلزی، حمل‌کننده مواد معدنی، نیمه‌رسانا و همچنین به عنوان پرکننده در تقویت لاستیک استفاده شود. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوسیلیکای سنتز شده به روش هم‌رسوبی را نشان می‌دهد.

این محققین بهبود خواص مکانیکی پوشش‌های نیتروسولوز را به پخش خوب نانوذرات سیلیکا در ماتریس پلیمری و برهم‌کنش قوی بین نانوذرات سیلیکا و نیتروسولوز ارتباط دادند.

پوشش‌های نیتروسولوزی معمولا در صنایعی به کار می‌رود که براقیت سطح پوشش دارای اهمیت می‌باشد. بررسی‌های این محققین نشان داد که استفاده از ۱ و ۲٪ وزنی نانوسیلیکا، سبب کاهش اندکی در براقیت پوشش‌های نیتروسولوزی می‌شود. این موضوع احتمالا به دلیل افزایش زبری و ایجاد خلل و فرج‌های سطحی سطح پوشش در اثر افزودن نانوذرات سیلیکا است که منجر به کاهش یکنواختی نوری^۱ سطح پوشش می‌شود [۱۴].

الله‌وردی و همکارانش [۱۵] تاثیر نانوذرات سیلیکا روی خواص مکانیکی، حرارتی و شکل پوشش‌های اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. به‌منظور پخش بهتر نانوذرات سیلیکا در پوشش‌های اپوکسی، پس از اختلاط مکانیکی از روش اولتراسونیک^۲ استفاده شد. این دانشمندان نشان دادند که با افزودن ۵٪ وزنی نانوسیلیکا به پوشش‌های اپوکسی، سختی و مدول الاستیک پوشش به ترتیب ۲۶ و ۲۱ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین نتایج آنالیز دینامیکی- مکانیکی حاکی از افزایش دمای انتقال شیشه‌ای پوشش، در اثر افزودن نانوسیلیکا بود. نتایج آنالیز تجزیه حرارتی^۳ (TGA) نشان داد که با افزودن ۵٪ وزنی نانوسیلیکا به پوشش‌های اپوکسی، دمای تجزیه حرارتی و پایداری افزایش یافته است. افزایش پایداری حرارتی به بهبود رفتار کندسوزی و مقاومت در برابر حریق کمک شایانی می‌کند. این محققین توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ (SEM) نشان دادند که در نمونه‌های شامل نانوسیلیکا، سطح شکست نمونه‌ها کاملا زبر^۵ است (شکل ۴).

¹ Optical Uniformity

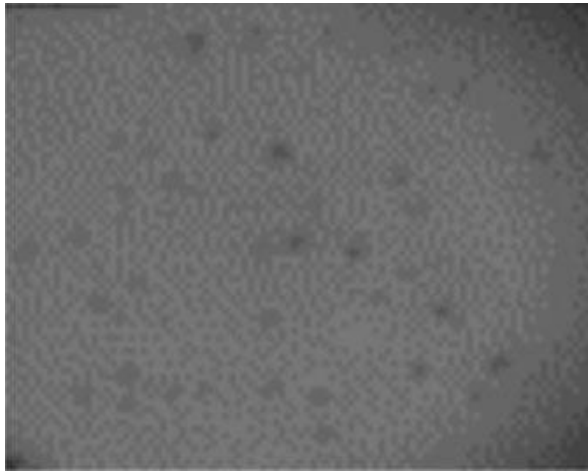
² Ultrasound

³ Thermal Gravimetry Analysis

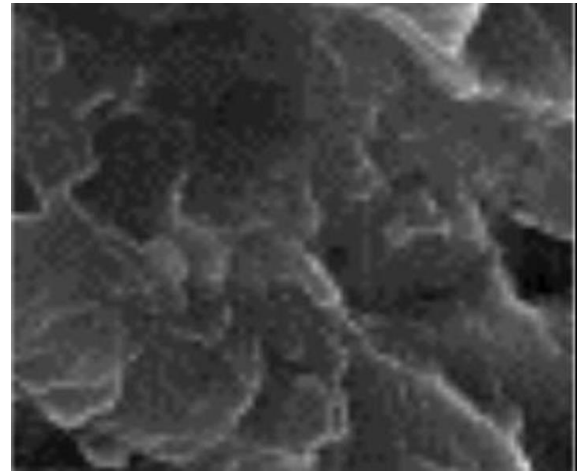
⁴ Scanning Electron Microscopy

⁵ Rough

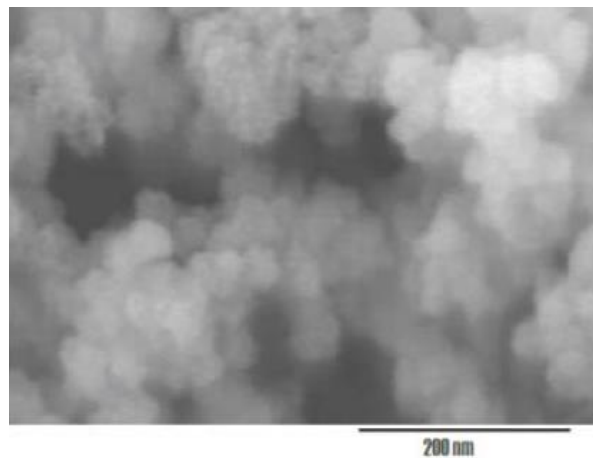
⁶ Transition Electron Microscopy



شکل ۵- تصویر TEM از رزین اپوکسی شامل ۵٪ وزنی نانوسیلیکا [۱۵].



شکل ۴- تصویر SEM از رزین اپوکسی شامل ۵٪ وزنی نانوسیلیکا [۱۵].



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوسیلیکای سنتز شده به روش هم‌رسوبی [۱۶].

اکریلیکی، سبب افزایش مقاومت در برابر آب و جذب گرد و غبار و بهبود پایداری رنگ می‌شود. همچنین استفاده از نانوذرات سیلیکا در لاک‌های پلی‌یورتانی، سبب بهبود مقاومت در برابر خراش و افزایش مقاومت سایشی این لاک‌ها شده است. با توجه به پایداری حرارتی بالای این نانوذرات، پوشش‌های اپوکسی شامل نانوذرات سیلیکا، دمای تجزیه حرارتی و پایداری حرارتی بالاتری از خود نشان می‌دهند. یکی از ویژگی‌ها مهم فیوم سیلیکا، افزایش گرانیوی سیستم و ایجاد رفتار تیکستروپیک می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر نانوذرات سیلیکا روی خواص مکانیکی، ریختی و حرارتی رنگ و پوشش مورد مطالعه قرار گرفت. این نانوذرات به دو گروه طبیعی و سنتزی طبقه‌بندی می‌شوند؛ که نوع سنتزی آن می‌تواند به صورت رسوبی، کلونیدی، ژل و پودری استفاده شود. محققین نشان دادند که استفاده از نانوذرات سیلیکا سبب بهبود خواص مکانیکی پوشش‌های اکریلیکی، نیتروسولولز و اپوکسی می‌شود. همچنین استفاده از این نانوذرات در پوشش‌های

۶- مراجع

1. C. Steinbach, "Nanoparticles in paints", Nanopartikel.info, <https://www.nanopartikel.info/en/nanoinfo/cross-cutting/2021-nanoparticles-in-paints#literatur>, viewed 2018.
2. F. A. van Broekhuizen, J. C. van Broekhuizen, "Nano products in European construction industry-State of the art 2009", Germany, FIEC-EFBWW report, 2009.
3. W. Zheng, L. He, J. Y. Liang, G. Chang, N. Wang,

"Preparation and properties of core-shell nano silica/poly(methyl methacrylate-butyl acrylate-2,2,2-trifluoroethyl methacrylate) latex", J. Appl. Polym. Sci. 120, 1152-1161, 2011.

۴. م. حسنی، م. مهدویان، ح. یاری، ب. رمضانزاده، "بهبود پایداری نوری پوشش‌های سطح به کمک فناوری نانو"، نشریه مطالعات در دنیای

- رنگ، ۶، ۶۱-۳۷، ۱۳۹۵.
5. I. Hincapie, T. Künniger, R. Hischer, D. Cervellati, B. Nowack, C. Som, "Nanoparticles in facade coatings: a survey of industrial experts on functional and environmental benefits and challenges", *J. Nanopart Res.* 17, 1-12, **2015**.
 6. A. Al-Kattan, A. Wichser, R. Vonbank, S. Brunner, A. Ulrich, S. Zuin, Y. Arroyo, L. Golanski, B. Nowack, "Characterization of materials released into water from paint containing nano-SiO₂", *Chemosphere.* 119, 1314-1321, **2015**.
 7. A. Al-Kattan, A. Wichser, S. Zuin, Y. Arroyo, L. Golanski, A. Ulrich, B. Nowack, "Behavior of TiO₂ released from nano-TiO₂-containing paint and comparison to pristine nano-TiO₂", *Environ. Sci. Technol.* 48, 6710-6718, **2014**.
 8. C. Liljenström, D. Lazarevic, G. Finnveden, "*Silicon-based nanomaterials in a life-cycle perspective, including a case study on selfcleaning coatings*", Sweden, KTH - Royal Institute of Technology, **2013**.
 9. G. Lövestam, H. Rauscher, G. Roebben, B. Sokull Klüttgen, N. Gibson, J.P. Putaud, S. Hermann, "*Considerations on a definition of nanomaterial for regulatory purposes*", Luxemburg, Joint Research Centre of the European Commission, **2010**.
 ۱۰. م. نیک‌نام، ز. رنجبر، س. باغشاهی، "اثر حضور انواع نانوسیلیکا بر برخی خواص لاک ی پلیورتان دو جزئی"، نشریه علوم و فناوری رنگ، ۳، ۱-۸، ۱۳۸۸.
 11. W. Luther, A. Zweck, "*Innovationsbegleitung Nanotechnologie: Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen*", Dusseldorf, Zukünftige Technologien, **2006**.
 12. I. Cabrera, B. Lohmeijer, E. Jahns, "Nano keeps water and dirt at bay", *Europ. Coat. J.* 3, 1-7, **2011**.
 13. F. Fallah, M. Khorasani, M. Ebrahimi, "Improving the mechanical properties of waterborne nitrocellulose coating using nano-silica particles", *Prog. Org. Coat.* 109, 110-116, **2017**.
 14. A. Dashtizadeha, M. Abdoussa, H. Mahdavi, M. Khorassania, "Acrylic coatings exhibiting improved hardness, solvent resistance and glossiness by using silica nanocomposites", *Appl. Surf. Sci.* 257, 2118-2125, **2010**.
 15. A. Allahverdi, M. Ehsani, H. Janpour, S. Ahmadi, "The effect of nano silica on mechanical, thermal and morphological properties of epoxy coating", *Prog. Org. Coat.* 75, 543-548, **2012**.
 ۱۶. م. محمدی، ح. خرسند، سنتز نانوسیلیکا به روش رسوب گذاری با کاربرد عوامل فعال کننده سطحی، مجله مواد نوین، ۳، ۷۳-۶۳، ۱۳۹۰.