

Waterproofing Composite/Nanocomposite Coatings based on Cementitious/Emulsion Polymer: Introduction, Characteristic and Applications

Mohammad Shahin, Mostafa Jafari* and

Mohammad Hossein Noori Shamsi

Nanotechnology Research Group, Iranian Academic Center for Education, Culture and
Research (ACECR), Fars Branch, Postal code 7134814336, Shiraz, Iran

Received: 12 May 2018, Accepted: 18 August 2018

Abstract

Recently the use of acrylic-based polymers has attracted many industries specially construction, sealing and adhesives due to special and useful features. These polymers in combination with cement structures in form of composites and or nanocomposites could eliminate many existing defects of cement and concrete structures. In this study, a variety of cement-acrylic composites and nanocomposites and their properties are introduced and the bonding mechanism of hydrated cement with acrylic latex particles is presented. The results illustrate that using acrylic latex in cement mortar leads to modify the pore structure in cement and reduce water requirement. Mechanical properties like flexural strength and toughness have been dramatically improved. But it does not have a good effect on the compressive strength of the cement. Furthermore, corrosion resistance and weathering resistance have also been increased. Polyacrylics are resistant to discoloration and degradation due to low ultraviolet radiation absorption that leads to improvement of durability of the polyacrylic-cement composites. Addition of silica nanoparticles to acrylic-cement composites accelerates the hydration of the cement and reduces the amount of pores in the structure. However, because of the hydrophilic nature and the high surface area of the nanoparticles, the liquidity of the cement mortar decreases.

Key Words

waterproofing coating,
acrylic latex,
cement,
permeability,
hydration

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: m.jafari@acecr.ac.ir

پوشش‌های کامپوزیتی-نانوکامپوزیتی ضد آب بر پایه سیمان-پلیمر امولسیون: معرفی، ویژگی و کاربردها

محمد شاهین، مصطفی جعفری^{*}، محمدحسین نوری شمسی

شیراز، معاونت پژوهشی جهاد دانشگاهی فارس، گروه پژوهشی نانوتکنولوژی، کدپستی ۷۱۳۴۸۱۴۳۳۶

دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲۷

در سال‌های اخیر استفاده از پلیمرهای بر پایه آکرلیک، به دلیل داشتن خواص ویژه و اثرگذار، مورد توجه بسیاری از صنایع به‌ویژه ساختمانی و ضدآب‌سازی قرار گرفته‌اند. این پلیمرها در ترکیب با سازه‌های سیمانی به‌صورت کامپوزیتی یا نانوکامپوزیتی می‌توانند بسیاری از نقص‌های موجود در سازه‌های سیمانی و بتنی را بهبود بخشند. در این مطالعه، انواع کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های سیمان-آکرلیک و ویژگی‌های آن‌ها معرفی و سازوکار پیوند سیمان آبدار شده با ذرات لاتکس آکرلیک ارائه می‌شود. نتایج نشان داده است، استفاده از لاتکس آکرلیک در ملات سیمانی موجب اصلاح ساختار منافذ درون سیمان و کاهش مصرف آب می‌شود. خواص مکانیکی مانند استحکام خمشی و چقرمگی بهبود شایان توجهی می‌یابد، ولی اثر مطلوبی بر استحکام فشاری سیمان ندارد. افزون بر این، مقاومت‌های خوردگی و هوازگی نیز ارتقا می‌یابند. پلی‌آکرلیک‌ها به سبب جذب اندک تابش فرابنفش نور خورشید از مقاومت خوبی در برابر تغییر رنگ و تخریب ساختاری برخوردار هستند. در نتیجه این افزایش مقاومت، افزایش دوام کامپوزیت‌های سیمان-آکرلیک به وجود می‌آید. افزودن نانوذرات سیلیکا به کامپوزیت‌های سیمان-پلی‌آکرلیک موجب تسریع آبدار شدن سیمان و کاهش مقدار حفره‌ها در ساختار می‌شود. با وجود این، به دلیل ماهیت آبدوستی و مساحت سطح زیاد نانوذرات، روان‌یافتگی ملات سیمانی کاهش می‌یابد.

بسیار ش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال هشتم، شماره ۴

صفحه ۶۴-۵۲، ۱۳۹۷

ISSN: 2252-0449

چکیده



محمد شاهین



مصطفی جعفری



محمدحسین نوری شمسی

واژگان کلیدی

پوشش ضد آب،
لاتکس آکرلیک،
سیمان،
قابلیت نفوذپذیری،
آبدار شدن

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

m.jafari@acecr.ac.ir

مقدمه

نقش پلیمرها در سازه‌های کامپوزیتی سیمانی روزبه‌روز در حال افزایش است [۱]. پلیمرها در ترکیب با مخلوط سیمان-سنگ‌دانه یا به‌طور مستقل به‌عنوان اتصال‌دهنده استفاده می‌شوند. کامپوزیت‌های ساخته‌شده از پلیمر به همراه سیمان و سنگ‌دانه، ملات اصلاح‌شده پلیمری (polymer-modified mortar, PMM) یا بتن اصلاح‌شده پلیمری (polymer-modified concrete, PMC) و کامپوزیت‌های ساخته‌شده از پلیمر و سنگ‌دانه (بدون سیمان)، ملات پلیمری (polymer mortar, PM) یا بتن پلیمری (polymer concrete, PC) نامیده می‌شوند. در این میان، کامپوزیت‌های نوع PMC رایج‌ترین محصول مورد توجه هستند [۲]. با در نظر گرفتن نقص‌های سازه‌های سیمانی، جزء پلیمری می‌تواند باعث بهبود در خور توجه استحکام خمشی و کششی، چسبندگی، مقاومت‌های سایشی و شیمیایی و مقاومت به نفوذ دوام ملات شود [۳]. با توجه به خواص شایان توجه PMC، کاربردهای فراوانی در صنایع راه و ساختمان نظیر تعمیر و اصلاح سازه‌های ساختمانی و ضدآب‌سازی، کاربردهای تزئینی همچون پیاده‌روها، جاده‌ها، کف‌پوش‌های محافظ، بستر سیمانی لوله‌های نفتی و همچنین در دیواره‌های معادن و پل‌سازی برای این ماده رقم خورده‌است [۳،۴].

وقوع ترک، خوردگی و تخریب سازه‌های سیمانی به‌دلیل حمله اسیدها و سولفات‌ها مشکلات اصلی کاهش عمر سازه‌های سیمانی هستند. علت و منشأ اصلی در بروز چنین آسیب‌هایی به‌طور

عمده آب است. از این‌رو، به‌منظور جلوگیری از نشت و نفوذ آب به سازه‌های سیمانی، سامانه‌های ضدآب برای اعمال بر سطح سازه‌های بتنی پیشنهاد می‌شوند [۵].

لاتکس‌ها به‌دلیل قیمت کم، از رایج‌ترین و پرکاربردترین نوع اصلاح‌کننده‌های سازه‌های سیمانی محسوب می‌شوند. پژوهشگران با هدف دست‌یابی به PMC‌هایی با خواص برتر، لاتکس‌های متنوعی را مطالعه کرده‌اند. در این میان می‌توان به آکرلیک، استیرن آکرلیک، اپوکسی، اتیلن استات و غیره اشاره کرد [۵]. با وجود تنوع لاتکس‌های پلیمری، لاتکس‌های پایه آکرلیک به‌دلیل برخورداری از خواص فیزیکی و شیمیایی مطلوب، مقاومت به نفوذ زیاد، چسبندگی مناسب، مقاومت عالی به هوازدهی و چقرمگی بسیار خوب از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند [۶،۷]. پلیمرها و کوپلیمرهای متداول در اصلاح ملات‌های سیمانی و خواص آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در این مطالعه، انواع و ویژگی‌های مختلف پوشش‌های کامپوزیتی سیمان-آکرلیک بحث و بررسی شده‌است.

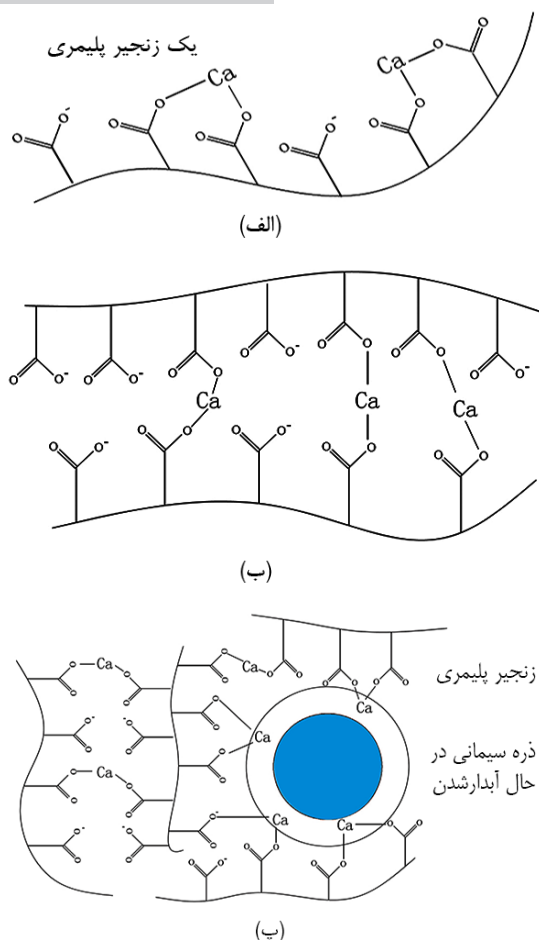
سیمان‌های اصلاح‌شده با لاتکس‌های آکرلیک

پلیمرهای آکرلیک از پلیمرشدن مشتقات آکرلیک و متاکرلیک اسید همچون بوتیل آکریلات و متیل متاکریلات حاصل می‌شوند. در شکل ۱ چهار نمونه از مهم‌ترین مشتقات این دسته از پلیمرها نشان داده شده‌است. به‌طور کلی، خواص آکرلیک‌ها تحت تأثیر

جدول ۱- خواص پلیمرها و کوپلیمرهای متداول در اصلاح ملات‌های سیمانی [۷-۱۱].

خواص لازم جهت ضدآب شدن			T _g (°C)	استحکام کششی (MPa)	کشش (%)	پلیمر-کوپلیمر
مقدار جامد (%)	گرانروی (mPa.s)	MFFT (°C)*				
پلی آکریلات						
۵۸-۶۱	۲۰۰-۲۵۰۰	۰	۹/۸	۹/۶	۷۵۰	متیل آکریلات [۷،۸]
			-۲۳	۰/۲۳	۱۸۰۰	اتیل آکریلات [۷،۸]
			-۵۳	۰/۰۲	۲۰۰۰	بوتیل آکریلات [۷،۸]
کوپلیمرها						
۴۸-۶۱	۴۰۰-۱۵۰۰	۰-۲۷	۲۰- تا ۲۳	۴	۵۴۰	متیل متاکریلات-n-بوتیل آکریلات [۷،۹،۱۰]
۵۰-۵۶	۱۵۰-۲۰۰۰	۰-۱۸	۱۱- تا ۲۷	۶۹	۶۸۳	پلی استیرن-n-بوتیل آکریلات [۷،۱۱]

* حداقل دمای تشکیل فیلم



پارامترهای متعدد است. از مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به وجود CH_3 یا H در کربن آلفا و طول زنجیر جانبی استری، اشاره کرد [۷]. زنجیرهای پلیمری آکریلات دارای آزادی چرخش بیشتری نسبت به متاکریلات هستند. جایگزینی CH_3 با H ، چرخش زنجیرهای پلیمری را محدود می‌کند. بدین ترتیب، پلیمری سخت‌تر با استحکام کششی بیشتر و ازدیاد طول کمتر به نسبت آکریلات فراهم می‌شود. همچنین، هر چه طول زنجیر بخش استری بلندتر باشد، باعث کاهش استحکام کششی و افزایش ازدیاد طول آکریلات می‌شود. البته امروزه غالب پلیمرهای آکریلیک موجود در بازار کوپلیمرهایی هستند که ترکیبی از استحکام، انعطاف‌پذیری و خواص مختلف را نتیجه می‌دهند [۷].

انواع مختلف سیمان در سه دسته سیمان‌های پرتلند، آلومینا و منبسط‌شونده قرار می‌گیرند. سیمان‌های پرتلند خود به دسته‌های گوناگون تقسیم می‌شوند. اجزای سیمان پرتلند معمولی (تیپ یک) و سیمان آلومینا به ترتیب در جدول ۲ ارائه شده است. از میان ترکیبات گفته‌شده کلسیم اکسید (CaO)، سیلیسیم دی‌اکسید (SiO_2)، آلومینیم اکسید (Al_2O_3) و آهن اکسید (III) نقش اساسی در پخت سیمان دارند. پخت سیمان به واسطه آب انجام می‌شود که این فرایند را آبدارشدن می‌نامند [۱۲].

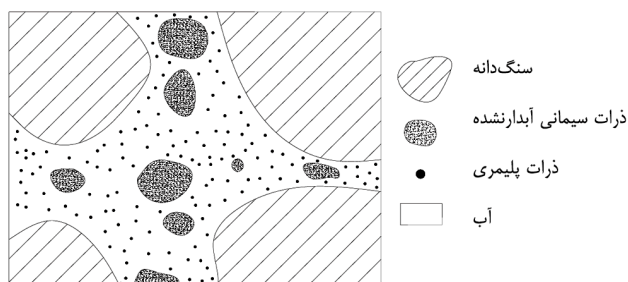
در مطالعات، سازوکارهای مختلفی برای واکنش میان محصولات حاصل از آبدارشدن سیمان و ذرات لاتکس آکریلیک ارائه شده

شکل ۲- نمایی از سه حالت واکنش زنجیرهای پلیمری آکریلیک در محلول آبدار و برقراری اتصال میان: (الف) یک زنجیر (نوع P)، (ب) دو زنجیر (نوع I) و (پ) زنجیر و ذرات در حال آبدارشدن (نوع C) [۱۵].

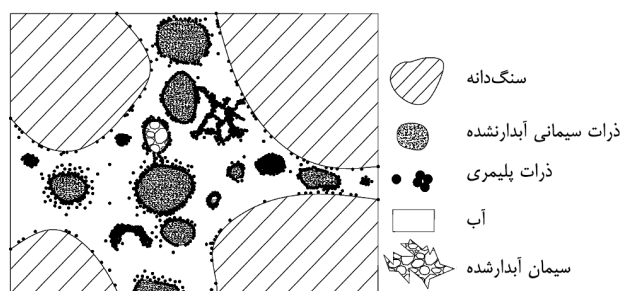
است. در تمام مطالعات انجام‌شده Ca^{2+} نقش ایجاد اتصالات عرضی را ایفا می‌کند. Tian و همکاران سه حالت اتصال را برای ترکیبات سیمانی و پلیمری معرفی کردند که در شکل ۲ آمده است. در حالت اول، زنجیر پلیمری به واسطه Ca^{2+} ، با خود وارد واکنش می‌شود که به آن اتصال درون‌زنجیری می‌گویند (نوع P). در حالت دوم، اتصالات عرضی با Ca^{2+} میان دو زنجیر پلیمری به‌وقوع می‌پیوندد

جدول ۲- ترکیبات سیمان پرتلند و سیمان آلومینا (درصد وزنی) [۱۴، ۱۳].

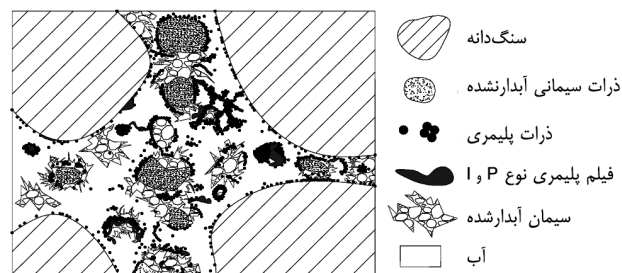
اجزای تشکیل‌دهنده سیمان (%)											انواع سیمان
FeO	TiO ₂	LOI	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	
—	—	۱/۷	۰/۳	۰/۷	۱/۸	۱/۱	۲/۹	۵/۱	۲۱/۳	۶۵/۱	پرتلند
۲/۷۷	۱/۵۹	۱/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۶۵	۱۳/۱۱	۳۸	۴/۲۳	۳۷/۹۵	آلومینا



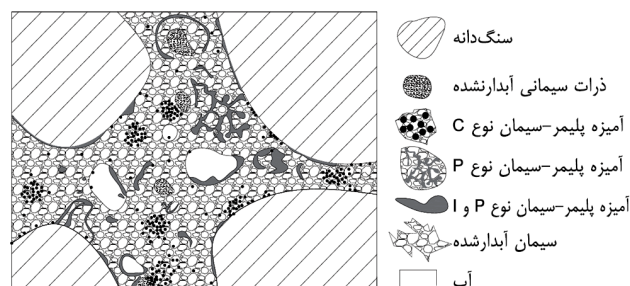
مرحله ۱: شروع انتشار ذرات پلیمری در مخلوط آمیزه



مرحله ۲: جذب و انعقاد ذرات پلیمری در آمیزه



مرحله ۳: پیشرفت آبدارشدن سیمان و شکل‌گیری فیلم پلیمری



مرحله ۴: شکل‌گیری میکروساختار نهایی ملات پلیمری اصلاح‌شده

شکل ۳- نمایشی از مراحل آبدارشدن و شکل‌گیری شبکه سیمان پلیمر [۱۵].

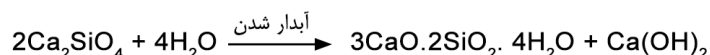
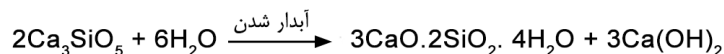
از گروه‌های کربوکسیل برای واکنش‌های بعدی فراهم می‌شوند. تشکیل این گروه‌های استری محیط قلیایی سامانه را تا حدودی کاهش می‌دهد. همچنین، با پیشرفت فرایند آبدارشدن سیمان، فاز آبی در محلول مصرف می‌شود. به‌طور هم‌زمان، محصولات حاصل از آبدارشدن همچنان به رشد خود ادامه می‌دهند یا در انبوه‌های پلیمری نشانه می‌شوند و ذرات پلیمری نزدیک به هم به‌شکل فیلم یا شبکه پلیمری به هم متصل می‌شوند.

که به آن اتصال بین‌زنجیری می‌گویند (نوع I). در حالت‌های اول و دوم، فیلم آکرلیک منسجمی درون ساختار سیمان شکل می‌گیرد که به افزایش چقرمگی به‌واسطه اتلاف تنش‌های واردشده منجر می‌شود. در حالت سوم، زنجیرهای پلیمری با ذرات سیمان یا هیدرات‌های سیمان وارد واکنش شیمیایی می‌شوند (نوع C) [۱۵]. بر اساس گزارش‌های Beeldens و همکاران، Ohama، همچنین Wang و همکاران، سازوکار واکنش شیمیایی میان ذرات لاتکس آکرلیک و محصولات آبدارشدن سیمان را می‌توان در چهار بند خلاصه کرد که به‌طور نمایشی در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۳، ۱۵].

در مرحله ۱، سیمان، آب، ذرات پلیمری و سایر اجزا (شن، ماسه و غیره) با هم مخلوط می‌شوند. در این مرحله، هیچ واکنش فیزیکی یا شیمیایی انجام نمی‌شود. پس از اختلاط، همان‌طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، ذرات پلیمری، سیمانی، شن، ماسه و سایر مواد به‌طور یکنواخت در مخلوط توزیع شده‌اند. به‌دلیل ماهیت کاتیونی سیمان و آنیونی لاتکس پلی‌آکریلات، برای پراکنش بهتر لاتکس درون محلول سیمانی از عامل پراکنش آنیونی قوی همچون تامول (نمک سدیم خشی آریل سولفونیک اسید) استفاده می‌شود.

در مرحله ۲، فرایند آبدارشدن سیمان به‌دلیل برخورد ذرات سیمان با آب آغاز می‌شود. یون‌های کلسیم و هیدرات‌های سیمان درون محلول رها شده و در اندک زمانی ذرات سیمان باردار می‌شوند. واکنش آبدارشدن سیمان مقدار زیادی کلسیم هیدروکسید $(Ca(OH)_2)$ تولید می‌کند که با قلیایی شدن محیط و گرمایی همراه است. شکل ۴ دو روش تشکیل $Ca(OH)_2$ در محلول آبدارشدن را نمایش می‌دهد. همچنین، گروه‌های استری زنجیرهای پلی‌آکریلات برای تولید گروه‌های کربوکسیل، آبکافت می‌شوند. آبکافت گروه‌های کربوکسیل در زنجیر پلی‌آکریلات سبب ایجاد بار منفی می‌شود. بار منفی ذرات پلی‌آکریلات را هیدرات‌های سیمانی با بار مثبت جذب می‌کنند که در شکل ۵ نشان داده شده است. بخشی از ذرات پلیمری به‌دلیل تشکیل پیوندهای شیمیایی و جاذبه الکتریکی، سطح ذرات سیمان یا هیدرات‌ها را احاطه می‌کنند. بخش دیگر ذرات پلیمری به یون‌های کلسیم متصل شده و تجمع خوشه‌ای تشکیل می‌دهند. همچنین، بخش بسیار کوچکی از ذرات پلیمری به‌طور فیزیکی به سایر افزودنی‌ها همچون شن و ماسه می‌چسبند.

در مرحله ۳، اگرچه ذرات پلیمری موجود در سطح ذرات سیمانی از فرایند آبدارشدن به‌طور چشمگیری جلوگیری می‌کنند، اما در نهایت، هیدرات‌های سیمانی با شکستن لایه پلیمری احاطه‌شده، واکنش آبدارشدن را پیش می‌برند. در ادامه این مرحله، مقدار زیادی

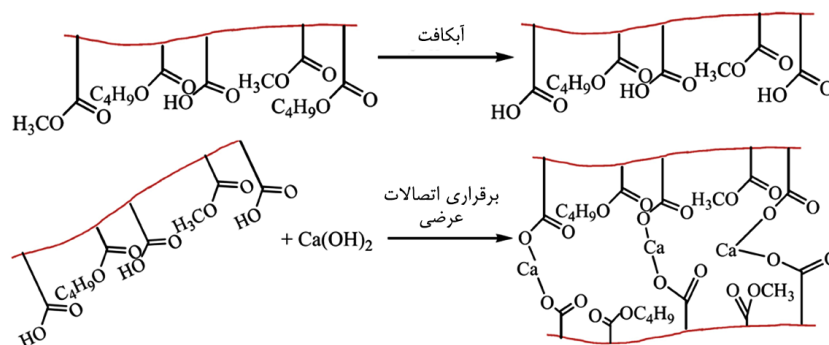


شکل ۴- دو روش تشکیل $\text{Ca}(\text{OH})_2$ در محلول آبدار [۱۲].

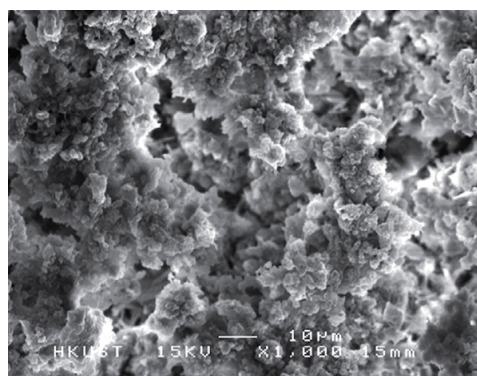
سیمانی به‌طور فیزیکی به یکدیگر متصل شده و نوع دیگری از ترکیبات سیمانی-پلیمری را تشکیل می‌دهند که از نوع P محسوب می‌شوند. تصویر SEM و نتایج تجزیه عنصری این ترکیبات در شکل ۶-ب نشان داده شده‌است. تجزیه عنصری نشان‌دهنده وجود کربن (۶۲/۶۶٪)، اکسیژن (۳۳/۴۵٪)، کلسیم (۰/۹۷٪) و سیلیکون (۲/۹۱٪) است.

ذرات پلی‌آکریلات جذب‌شده بر سطح هیدرات‌های سیمانی متراکم می‌شوند و در نهایت به‌شکل فیلم یا شبکه پلیمری تجمع می‌یابند که هیدرات‌های سیمانی را احاطه می‌کنند. فیلم‌های پلیمری نوع P و I درون حفره‌های ملات سیمانی جای می‌گیرند و موجب بازسازی ساختار حفره‌ای آن می‌شوند. افزون بر این، ذرات پلیمری تک یا بخش کوچکی از فیلم‌های پلیمری می‌توانند در هیدرات‌های سیمانی نشانه شوند. تصاویر SEM و نتایج تجزیه عنصری آن ذرات به‌ترتیب در شکل‌های ۶-پ و ت نشان داده شده‌است. تجزیه عنصری مربوط به شکل ۶-پ دلالت بر وجود ۶۷/۴۵٪ کربن و ۳۲/۵۵٪ اکسیژن دارد که نشانگر وجود ذرات پلی‌آکریلات است. تصویر SEM شکل ۶-ت بسیار شبیه به فیلم پلی‌آکریلات گزارش شده‌است. برطبق تجزیه عنصری آن، افزون بر کربن (۶۳/۷۵٪) و اکسیژن (۳۴/۶۴٪)، مقادیر کمی از کلسیم (۱/۵٪) نیز گزارش شده‌است. در نتیجه، انبوهه‌های پلیمری بر واکنش میان ذرات پلی‌آکریلات در لاتکس با یون‌های کلسیم دلالت دارد. در نهایت، توزیع تصادفی نحوه استقرار پلیمر در ملات سیمانی موجب می‌شود تا تشکیل شبکه فضایی کامل به جهت

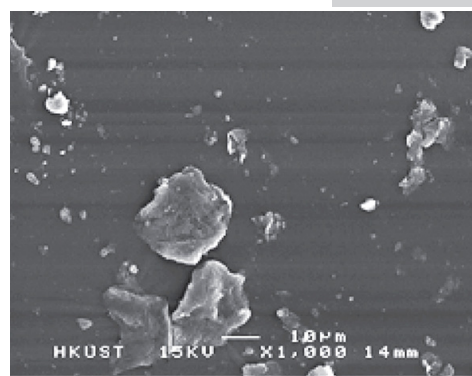
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، در مرحله ۴ روند آبدارشدن کندتر شده و میکروساختار ملات اصلاح‌شده پلیمری تشکیل می‌شود. همان‌طور که فاز آبی مصرف می‌شود، ذرات پلیمری نزدیک به هم کاملاً درون فیلم‌ها یا شبکه‌های پلیمری آمیخته می‌شوند. پلیمر در هیدرات‌های سیمانی با شکل‌شناسی‌های مختلف وجود دارد. بخشی از گروه‌های کربوکسیل ذرات لاتکس پلی‌آکریلات با هیدرات‌های سیمانی با پیوندهای شیمیایی جفت می‌شوند. در این حالت، ساختار شبکه‌ای از اتصالات عرضی میان ترکیبات سیمانی-پلیمری برای تولید $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ تشکیل می‌شود که از نوع C محسوب می‌شود. در این میان، یون Ca^{2+} نقطه عطف تبادل اتصالات عرضی در قالب شبکه منسجمی از زنجیرهای پلی‌آکریلات و سایر اجزای سیمان است. تصویر SEM و نتایج تجزیه عنصری این آمیزه سیمانی-پلیمری در شکل ۶-الف نشان داده شده‌است. تجزیه عنصری نشان‌دهنده وجود کربن (۱۹/۷۸٪)، اکسیژن (۵۵/۹۸٪)، کلسیم (۱۴/۷۲٪) و سیلیکون (۹/۵۹٪) است. پژوهشگران گزارش کردند، تجمعات پلی‌آکریلاتی تشکیل شده بیشتر شبیه به توزیع یا نفوذ در هیدرات‌های سیمانی است تا تشکیل شبکه پلیمری کامل که نمی‌تواند به‌طور فیزیکی در کنار یکدیگر نگه‌داشته شود. در حقیقت، پلی‌آکریلات به‌طور شیمیایی در میان هیدرات‌های سیمانی سوزنی‌شکل نشانه شده‌است. همچنین، انبوهه‌های پلیمری موجود، فیلم یا شبکه پلیمری به‌نسبت خالص حاوی مقادیر کمی از یون‌های کلسیم یا هیدرات سیمان را نیز تشکیل می‌دهند. این فیلم‌ها یا شبکه‌های پلیمری و هیدرات‌های



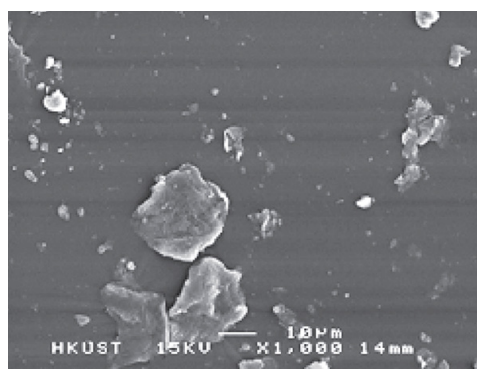
شکل ۵- نمایی از نحوه شکل‌گیری اتصالات عرضی در زنجیرهای پلیمری [۱۲].



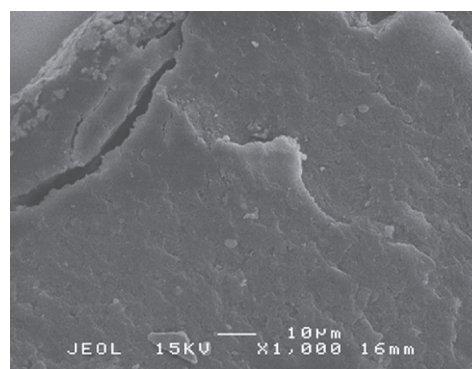
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

عنصر	الف	ب	پ	ت
کربن	۱۹/۷۸	۶۲/۶۶	۶۳/۷۵	۶۷/۴۵
اکسیژن	۵۵/۹۸	۳۳/۴۵	۳۴/۶۴	۳۲/۵۵
کلسیم	۱۴/۷۲	۰/۹۷	۱/۶۱	۰
سیلیکون	۹/۵۲	۲/۹۱	۰	۰

شکل ۶- تصویر SEM و تجزیه EDX از: (الف) آمیزه سیمان-لاتکس پلی‌آکریلات (نوع C)، (ب) آمیزه سیمان-لاتکس پلی‌آکریلات (نوع P)، (پ) ذرات پلیمری در سیمان و (ت) فیلم‌های کوچک پلیمری در سیمان [۱۵].

Kong و همکاران در سنتز لاتکس‌های آکریلیک از ماده ایزوپرنیل اکسی پلی‌اتیلن گلیکول (TPEG) استفاده کردند. از نتایج واکنش این ماده با سایر اجزای پلیمرشدن، تشکیل لایه نازکی از پلی‌اتیلن اکسید (PEO) بر سطح ذرات لاتکس است. بار مثبت موجود روی این ذرات باعث کاهش تراکم بارهای منفی روی سطح ذرات لاتکس می‌شود. در نتیجه این عملکرد، تجمع ذرات بر سطح سیمان آبدار شده تا حد قابل قبولی کاهش یافته و سرعت آبدار شدن نیز اندکی افزایش می‌یابد [۱۶].

Baueregger و همکاران با استفاده از کائولین و پلی‌وینیل الکل، سرعت آبدار شدن را تا حدودی بهبود بخشیدند. افزودن کائولین از تجمع و کلوخه‌ای شدن بیش از حد ذرات سیمان جلوگیری می‌کند. پلی‌وینیل الکل به عنوان محافظ کلوئیدی، انعقاد ذرات

بهبود یکپارچگی سامانه پلیمر-سیمان امکان‌پذیر نباشد. با این حال، پلیمرهای توزیع شده به عنوان گره‌های تقویتی توزیع شده در ملات‌های سیمانی عمل می‌کنند. در کل، پلیمر همچنان می‌تواند بر خواص ملات اثرگذار باشد.

ذرات لاتکس آکریلیک آنیونی هستند. این در حالی است که بخش اعظم سیمان را ذرات کاتیونی تشکیل می‌دهند. در چنین حالتی، ذرات لاتکس سطح ذرات سیمان را احاطه می‌کنند و مانع آبرسانی می‌شوند. در نتیجه، آبدار شدن ذرات سیمانی به تأخیر می‌افتد. در سایر حالات، پخت سیمان تکمیل نمی‌شود و خواص ملات به دست آمده به شدت کاهش می‌یابد [۱۳]. پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای رفع این مشکل به کار گرفتند که به چند نمونه از این روش‌ها اشاره می‌شود.

هوای حبس‌شده درون ساختار ملات پلیمری

با افزایش مقدار لاتکس به سیمان، مقدار هوای محبوس درون ساختار سیمان افزایش می‌یابد [۱۴]. مقدار مناسبی هوای محبوس موجب بهبود کارایی، مقاومت در برابر نفوذ، دوام زیاد سازه نهایی و کاهش مقدار آب مصرفی می‌شود. باید توجه داشت، با مقدار زیادتر هوای حبس‌شده اثر معکوس بر خواص مشاهده می‌شود. همچنین، درون ملات تخلخل‌های بزرگ ایجادشده و کاهش استحکام و افزایش نفوذپذیری را به همراه می‌آورد. از این جهت، دستیابی به مقدار بهینه هوای حبس‌شده بسیار ضروری به نظر می‌رسد [۲۰، ۲۲]. Zhenping و همکاران گزارش کردند، با افزایش مقدار لاتکس پلی‌آکرلیک از ۰ به ۸٪، مقدار هوای حبس‌شده از ۱۲٪ به ۳۳٪ می‌رسد [۲۱]. همچنین Wang و همکاران گزارش کردند، هنگامی که مقدار لاتکس استیرن آکرلیک از ۷٪ تا ۱۲٪ تغییر می‌کند، مقدار هوای حبس‌شده از ۱۵٪ به ۲۰٪ افزایش پیدا می‌کند، در حالی که در نمونه فاقد لاتکس ۴/۵٪ گزارش شده است [۲۱]. برای کاهش هوای حبس‌شده و همچنین کنترل این پارامتر درون ملات سیمانی به‌طور معمول از عوامل ضدحباب استفاده می‌شود [۲۲].

استحکام فشاری

از مهم‌ترین خواص مورد انتظار از ملات‌های سیمانی، مقاومت فشاری آن‌هاست. Ohama و همکاران گزارش کردند، افزودن لاتکس به ملات‌های سیمانی بهبود اندکی در مقاومت فشاری ایجاد کرده و در مواردی نیز بهبود نداشته است [۱]. Tian و همکاران در مطالعات خود به بررسی شکل‌گیری میکروساختار ملات سیمانی اصلاح‌شده با لاتکس آکریلات پرداختند. آن‌ها این نتیجه را گزارش کردند که در ۲۴ h اول، استحکام فشاری ملات‌های دارای ۵ و ۱۰٪ لاتکس پلی‌آکرلیات، کمتر از ملات اصلاح‌نشده (بدون لاتکس) است. با افزایش مقدار لاتکس از استحکام فشاری کاسته می‌شود. زیرا پیوندهای کووالانسی تشکیل‌شده بین یون‌های کلسیم در هیدرات سیمان و ذرات پلی‌آکرلیات، سبب به‌تعویق افتادن فرایند آبدارشدن سیمان می‌شوند.

در حین اختلاط، زمانی که ذرات سیمان یا هیدرات‌های سیمان با ذرات پلی‌آکرلیات احاطه شوند، انتقال یون‌ها متوقف می‌شود. اما پس از گذشت یک روز، استحکام فشاری ملات دارای ۵٪ لاتکس پلی‌آکرلیات بیش از ملات‌های بدون لاتکس و دارای ۱۰٪ لاتکس می‌شود. به‌طوری که پس از گذشت ۲۸ روز، مقاومت فشاری پوشش کامپوزیتی دارای ۵٪ لاتکس حدود ۶ MPa نسبت به ملات بدون لاتکس افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد، افزودن

لاتکس را به‌طور موقت به تأخیر می‌اندازد و سرعت آبدارشدن نیز تا حدودی بهبود می‌یابد [۱۷]. وجود لاتکس در ترکیب سیمان موجب کاهش Ca^{2+} می‌شود و در نتیجه، کاهش خواص و تأخیر در سرعت آبدارشدن را به همراه دارد. بدین سبب این پژوهشگران، سامانه سه‌جزئی متشکل از سیمان پرتلند، سیمان آلومینا و انیدریت را پیشنهاد دادند. در این سامانه، انیدریت، کاهش یون کلسیم را تا حد قابل قبولی جبران می‌کند. همچنین، مقدار زیاد آلومینیم اکسید در سیمان آلومینا موجب افزایش شتاب آبدارشدن می‌شود [۱۸]. آن‌ها از لیتیم کربنات (Li_2CO_3) نیز برای بهبود سرعت آبدارشدن استفاده کردند. در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است، یون لیتیم به‌طور مؤثری موجب بهبود سرعت آبدارشدن در سیمان آلومینا می‌شود [۱۸].

اثر لاتکس بر خواص سیمان اصلاح‌شده پلیمری

کاهش مقدار آب مصرفی

اصلاح ساختار منافذ درون ساختار سیمان به‌واسطه لاتکس، همچنین جذب یون‌های کلسیم با گروه‌های کربوکسیل موجب کاهش آب مصرفی طی آماده‌سازی ملات می‌شود [۵]. Saija گزارش کرد، با افزودن مقدار ۲۰٪ لاتکس بوتیل آکریلات به سیمان (با روان‌یافتگی ۱۵۰ mm)، مقدار مصرف آب حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد [۱۹]. Wang و همکاران بیان کردند، با افزایش نسبت لاتکس استیرن آکرلیک به سیمان (با روان‌یافتگی ۱۷۰ mm)، مقدار کاهش آب مصرفی به‌طور خطی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در نسبت ۲۰٪ لاتکس به سیمان مقدار کاهش آب مصرفی به ۴۰٪ رسیده است [۲۰]. همچنین Zhenping و همکاران گزارش کردند، در نسبت ۲۰٪ لاتکس پلی‌آکرلیات به سیمان (روان‌یافتگی ۱۹۵ mm)، مقدار آب مصرفی حدود ۲۳٪ کاهش می‌یابد [۲۱].

ذخیره آب درون ساختار ملات

حفظ آب درون ساختار ملات برای پیش‌روی آبدارشدن سیمان بسیار ضروری است. وجود آب سبب تکمیل فرایند آبدارشدن و افزایش خواص و سختی سازه‌ها می‌شود. در ملات‌های غیرپلیمری فراهم‌سازی چنین شرایطی بسیار سخت و هزینه‌بر است. Wang و همکاران در مطالعه خود گزارش کردند، با افزایش مقدار پلیمر به سیمان از ۱۰-۰٪ وزنی، مقدار آب حفظ‌شده (retention water) درون ساختار ملات از ۸۵٪ به بیش از ۹۸٪ افزایش می‌یابد و در نسبت‌های بیش از ۱۰٪ در مقدار ۹۹٪ ثابت باقی می‌ماند [۲۰].

سازگاری مطلوب دو پلیمر است، بلکه به دلیل ساختارکربناتی گروه‌های کربوکسیل در هر دو پلیمر است [۲۴].

استحکام خمشی

افزایش مقدار لاتکس در ترکیب لاتکس-سیمان تاثیر بیشتری بر استحکام خمشی در مقایسه با استحکام فشاری دارد [۲۲]. Saija گزارش کرد، استحکام خمشی پوشش کامپوزیتی اصلاح‌شده با بوتیل آکریلات با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، افزایش یافته‌است. به طوری که استحکام خمشی حاصل از افزودن ۱۰٪ لاتکس، MPa ۱۱ بوده‌است [۱۹]. Zhenping و همکاران در نتیجه مشابهی، استحکام خمشی حاصل از افزودن لاتکس آکریلات را MPa ۱۳ به دست آوردند [۲۱].

چقرمگی

نسبت استحکام فشاری به استحکام خمشی ملات اصلاح‌شده پلیمری برای ارزیابی چقرمگی آن استفاده می‌شود. هر چه این نسبت کمتر باشد، چقرمگی ملات پلیمری بیشتر می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهند، مقدار چقرمگی با افزایش بخش پلیمری (لاتکس استیرن-آکریلیک) در ملات اصلاح‌شده با پلیمر افزایش می‌یابد. با این حال، در مقایسه ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس استیرن آکریلیک و آکریلیک، لاتکس آکریلیک چقرمگی بهتری نشان می‌دهد [۲۰، ۲۱].

مقاومت هوازدگی

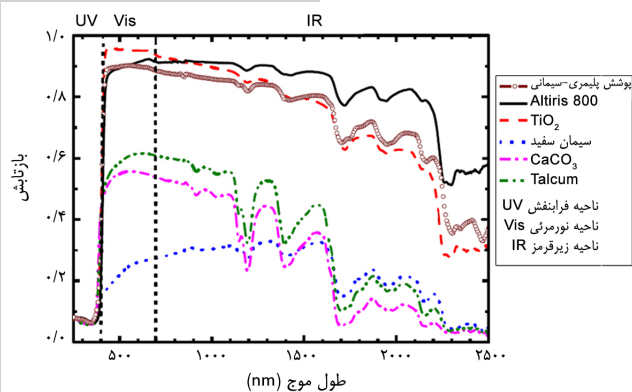
پلیمرهای آکریلیک به سبب جذب کم تابش فرابنفش (UV) در برابر تغییر رنگ و تخریب مقاوم هستند و در محدوده طیف ۳۰۰ nm تا ۳۵۰ nm، که منطقه فعال نورشیمیایی با نور خورشید محسوب می‌شود، عبورپذیری زیادی نشان می‌دهند. طیف عبوری UV برای پلیمر متیل متاکریلات در شکل ۷ نشان داده شده‌است که در محدوده اشاره‌شده عبورپذیری زیادی دارد و در طول موج‌های کمتر از ۳۰۰ nm با کاهش عبورپذیری همراه است. خاصیت گفته‌شده، موجب تقویت خواص و دوام پوشش‌های کامپوزیتی سیمان-آکریلات می‌شود. همچنین Lavelle نشان داد، خواص چسبندگی و استحکام خمشی ملات‌های سیمان پورتلند دارای پلیمرهای آکریلیکی که به مدت پنج سال در معرض حداقل ۷۰ چرخه انجماد و ذوب و ۱۲۷۰ mm باران در سال قرار گرفته، تخریب نمی‌شود. نتایج آزمون چسبندگی حاکی از شکست همچسبی (در بستر بتنی) برای نمونه‌های ملات حاوی لاتکس و شکست چسبندگی (در خط

مقدار مناسبی لاتکس سبب بهبود مقاومت فشاری ملات سیمانی می‌شود. پدیده مزبور با این واقعیت توجیه می‌شود که افزودن پلی آکریلات و تشکیل پیوندهای شیمیایی میان پلیمر و هیدرات‌های سیمانی سبب افزایش یکپارچگی و بازسازی ساختار حفره‌ای ملات سیمانی می‌شود. در ادامه با افزایش مقدار لاتکس تا ۱۰٪، مقاومت فشاری کاسته شده و به ترتیب حدود ۹ و MPa ۴ از ملات‌های دارای ۵٪ لاتکس و بدون آن کمتر می‌شود. زیرا، افزودن بیشتر لاتکس پلی آکریلات در ملات سیمانی سبب ایجاد تجمع ذرات پلی آکریلات و افزایش غلظت ذرات آزاد آن در حفره‌ها می‌شود. این ذرات بر بهبود مقاومت فشاری ملات سیمان موثر نیستند. همچنین، افزایش گرانشی سبب نفوذ هوای اضافی به ملات اصلاح‌شده با پلی آکریلات می‌شود. در نتیجه، افزایش مقادیر بیشتر پلی آکریلات نمی‌تواند سبب بهبود استحکام فشاری شود [۱۵].

Zhenping و همکاران، اثر جریان‌پذیری ملات پلیمری و مقدار نفوذ هوا را بر مقاومت فشاری بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند، در روان‌یافتگی کم ملات سیمانی، استحکام فشاری بیشتری حاصل می‌شود. همچنین، اختلاط لاتکس با ملات سیمانی به دلیل فعال‌کننده سطحی درون لاتکس، موجب نفوذ هوا می‌شود که با افزودن لاتکس نیز تشدید پیدا می‌کند. به طور کلی، افزایش هوای نفوذیافته موجب کاهش مقاومت فشاری سازه می‌شود. این گروه از پژوهشگران نشان دادند، مقدار هوای نفوذیافته را می‌توان با کنترل مقدار لاتکس و افزودن عوامل ضدکف نیز کنترل کرد [۲۱].

Wang و همکاران مشاهده کردند، در نسبت‌های کمتر از ۱۰٪ لاتکس در سیمان، استحکام فشاری ملات پلیمری پس از خشک‌شدن، با چگالی مرطوب آن پیش از خشک‌شدن رابطه مستقیم دارد. بدین ترتیب، چگالی مرطوب کمتر موجب ایجاد تخلخل بیشتر در ساختار و کاهش استحکام فشاری آمیزه می‌شود [۲۳].

برخی پژوهشگران برای اصلاح خواصی همچون مقاومت فشاری، آمیزه‌ای از پلیمرها را آزمودند. Chen و Zhong آمیزه‌ای از لاتکس‌های استیرن بوتادی‌ان و استیرن آکریلیک را برای اصلاح ملات سیمانی آزمودند. هنگامی که کسر وزنی استیرن آکریلیک در محدوده ۰/۴ تا ۱ باشد، ملات اصلاح‌شده نفوذ یون کلر کمتری را نشان می‌دهد. این نتیجه برای کاربردهای عملی بسیار مفید است. زیرا ملات اصلاح‌شده با لاتکس‌های استیرن بوتادی‌ان-استیرن آکریلیک با نسبت کسر وزنی بیشتر استیرن بوتادی‌ان، مقاومت فشاری بیشتری نشان می‌دهد. اثر خوب هم‌افزایی آمیزه استیرن بوتادی‌ان-استیرن آکریلیک در ملات اصلاح‌شده، نه تنها به دلیل

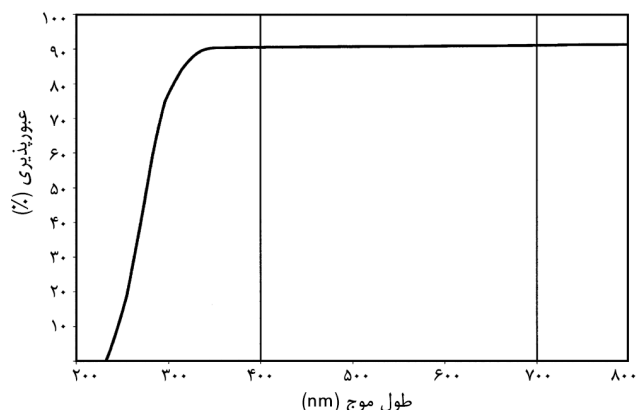


شکل ۹- منحنی طیف بازتابش برای پوشش‌های کامپوزیتی سیمان-استیرن بوتیل آکریلات با افزودنی‌های مختلف [۲۵].

استیرن آکریلات-سیمان شبیه به TiO_2 و Altiris® 800 نشانگر تسلط خواص نوری آن‌ها بر خواص نوری پوشش‌هاست. این دو رنگ‌دانه به‌طور مؤثر موجب کاهش جذب UV و انعکاس نور مرئی می‌شوند. وجود افزودنی‌های سیمان سفید، تالک و کلسیم کربنات بر شکل طیف بازتابش پوشش‌ها اثری نداشت [۲۵]. شکل ۹ مقدار بازتابش افزودنی‌های معمول استفاده‌شده در پوشش‌های کامپوزیتی سیمان آکریلیک در سه محدوده طول موج فرابنفش، نور مرئی و زیر قرمز را نمایش می‌دهد.

ممانعت از جذب و نفوذ آب و یون‌های مخرب

جذب و نفوذ آب، همچنین نفوذ یون‌های مخرب از عوامل اصلی تخریب سازه‌های سیمانی است. لاتکس با انسداد حفره‌ها و تخلخل‌های درون ساختار سیمان به کاهش جذب و نفوذپذیری منجر می‌شود [۵]. Wang و همکاران نفوذ آب به درون ملات خشک‌شده پلیمری را در فشار ۱/۵ MPa به مدت ۸ h آزمودند. هنگامی که نسبت پلیمر به سیمان بیش از ۱۵٪ وزنی باشد، نفوذ آب به صفر می‌رسد. همچنین آن‌ها گزارش کردند، جذب آب در ملات خشک‌شده پلیمری دارای ۱۰٪ وزنی لاتکس استیرن آکریلات حدود 0.2 kg/m^2 (در جریان‌پذیری ۱۷۰ mm) است. در حالی که این مقدار با افزودن نسبت لاتکس به سیمان تا ۲۰٪ همچنان ثابت باقی مانده است. مقدار نفوذپذیری برای ملات اصلاح‌نشده 4 kg/m^2 گزارش شده است [۲۰]. Saija نیز جذب آب در ملات خشک‌شده پلیمری آماده‌سازی شده با ۲۰٪ لاتکس پلی‌آکریلات را ۰/۵٪ (در جریان‌پذیری ۱۵۰ mm) گزارش کرد [۱۹]. جدول ۳ عمق نفوذ آب درون تخلخل‌های پوشش کامپوزیتی سیمان استیرن آکریلیک را پس از ۴۸ h نمایش می‌دهد.



شکل ۷- طیف UV پلیمر متیل متاکریلات [۲۵].

پیوند) برای ملات اصلاح‌نشده است.

همچنین مطالعات مشابه که Lavelle انجام داد حاکی از پیشرفت درخور توجه در استحکام کششی ملات سیمان پورتلند اصلاح‌شده با لاتکس آکریلیکی است. افزون بر این، پوشش سیمانی اصلاح‌شده با لاتکس آکریلیکی که به مدت ۱۸ سال در منطقه شمال شرقی ایالات متحده قرار گرفته است، فاقد تغییر رنگ، ترک‌خوردگی و پوسته‌پوسته شدن بود (شکل ۸). این در حالی است که نمونه کنترل اصلاح‌نشده در سه ماهه اول تخریب شد [۷]. Xue و همکاران، آثار رنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌های مختلف را روی جذب UV، نور مرئی و ناحیه IR نزدیک، در پوشش‌های خنک-سفید سقفی بر پایه کوپلیمر استیرن آکریلات-سیمان و دارای افزودنی‌های Altiris® 800، تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2)، سیمان سفید، تالک و کلسیم کربنات مطالعه کردند. نتایج نشانگر این بود که در ناحیه UV همه منحنی‌های بازتابش روی هم قرار دارند. در ناحیه نور مرئی و IR نزدیک، شکل طیف پوشش‌های بر پایه



(الف) (ب)

شکل ۸- پایداری پوشش سیمانی اصلاح‌شده با لاتکس آکریلیک پس از قرارگیری در فضای آزاد به مدت ۱۸ سال: (الف) پیش از شست‌وشو و (ب) پس از شست‌وشوی آلودگی‌های سطح پوشش [۷].

جدول ۳- عمق نفوذ آب درون پوشش کامپوزیتی سیمان آکرلیک پس از ۴۸ h [۲۳].

درصد وزنی پلیمر به سیمان	عمق نفوذ (mm)
۰	۴۰
۱	۳۱
۳	۲۳
۵	۱۵
۸	۴
۱۰	۰
۱۵	۰
۲۰	۰

خوردگی

خوردگی فولاد به کار رفته درون بتن بر اثر نفوذ یون کلر، از عوامل بسیار مهم در تخریب سازه‌های بتنی است [۲۶]. پوشش‌های پلیمری ضدآب تا مقدار درخور توجهی قابلیت جلوگیری از نفوذ یون کلر و در نتیجه کاهش خوردگی را دارند [۷]. مقدار یون کلر در سیمان‌های اصلاح شده پلیمری با لاتکس آکرلیک با افزایش درصد لاتکس، کاهش می‌یابد. Saija مشاهده کرد، با افزایش پلیمر آکرلیک به سیمان به مقدار ۲۰٪ وزنی، نفوذ یون کلر به صفر می‌رسد (جدول ۴). افزودن لاتکس به سیمان در نسبت‌های بیش از ۱۰٪ سبب کاهش ۴۰-۳۵٪ نیاز به آب می‌شود. کاهش نسبت آب به سیمان، سبب افزایش چگالی ملات شده و از نفوذ آب و محلول‌های نمکی جلوگیری می‌کند. در مقابل، افزودن لاتکس بر مقدار استحکام فشاری سیمان اثر مطلوبی ندارد. مقدار استحکام فشاری برای ملات دارای ۲۰٪ لاتکس برابر ۴۲/۵ MPa گزارش شده که بسیار نزدیک به ملات مرجع (۴۰ MPa) است [۱۹]. این نتایج را سایر پژوهشگران نیز به دست آورده‌اند [۷]. جدول ۴ نتیجه

جدول ۴- عمق نفوذ یون کلر درون پوشش کامپوزیتی سیمان آکرلیک پس از ۷ روز غوطه‌وری در محلول کلسیم کلرید ۰/۱ N [۱۹].

درصد وزنی پلیمر به سیمان	عمق نفوذ (mm)
۰	۳۰
۵	۷
۱۰	۴/۵
۱۵	۲
۲۰	۰

گزارش شده Saija را نمایش می‌دهد.

کاربرد نانو در پوشش‌های کامپوزیتی سیمان-آکرلیک

با وجود خواص درخور توجه پوشش‌های کامپوزیتی سیمان آکرلیک، نمی‌توان از نقص‌های این مواد همچون ایجاد تأخیر در آبدارشدن و کاهش استحکام فشاری چشم‌پوشی کرد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی درباره استفاده از نانوذرات در نمونه‌های بتنی به منظور تقویت خواص فیزیکی و مکانیکی، بهبود میکروساختار و ساختار حفره‌ای نمونه‌های بتنی منتشر شده که اغلب از نانوذرات SiO_2 استفاده شده‌است. افزون بر این، برخی از پژوهش‌ها نیز به استفاده از نانوذرات Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، TiO_2 و روی-آهن اکسید پرداخته‌اند.

نانوسیلیکا از جمله مواد پرکاربرد در صنعت ساختمانی است. پژوهشگران دریافته‌اند، نانوذرات SiO_2 می‌تواند سبب بهبود استحکام بتن و کمک به کنترل شوری و شست‌وشوی کلسیم شود. به طور کلی، افزودن نانوسیلیکا سبب بهبود ساختار حفره‌ای بتن می‌شود. از یک سو، نانوذرات SiO_2 به عنوان پرکننده در بهبود میکروساختار عمل می‌کند و با افزایش چگالی و کاهش مقدار حفره‌ها در بتن سبب می‌شود تا ماتریس بتنی همگن‌تر و فشرده‌تر شود. از سوی دیگر، به عنوان فعال‌کننده موجب تسریع آبدارشدن سیمان می‌شود که به علت مساحت سطح بزرگ و واکنش‌پذیری زیاد نانوذرات است. همچنین، به عنوان هسته در خمیر سیمان موجب کوچک‌تر شدن اندازه بلورهای Ca(OH)_2 می‌شود [۲۷].

Horszczaruk و همکاران گزارش کردند، افزودن نانوسیلیکا موجب تسریع آبدارشدن، کاهش نفوذپذیری بتن سخت شده، کوچک‌تر شدن فازهای آبدار (ژل C-S-H) و متراکم‌تر شدن میکروساختار می‌شود [۲۸]. در مقابل، نانوسیلیکا با وجود خواص و ظرفیت‌های کاربردی بسیار، به دلیل ماهیت آب‌دوستی و مساحت سطح به حجم زیاد موجب تقلیل روان‌یافتگی ملات سیمانی می‌شود. در واقع، رفتار آب‌دوستی سیلیکا موجب می‌شود، آب آزاد کمتری برای کارایی مناسب ملات سیمان در دسترس باشد و سبب ایجاد مشکلاتی در دستیابی به ترکیب مدنظر شود. با این حال، Lukowski و Czarnecki گزارش کردند، افزودن پلیمرها حتی در مقادیر کم اثر مثبت بر خواص رئولوژیکی کامپوزیت‌های سیمانی دارند و به نوبه خود از آثار منفی نانوسیلیکا بر مقدار روان‌یافتگی می‌کاهند [۲۹].

Sikora و همکاران در بررسی اثر نانوسیلیکا بر کامپوزیت‌های سیمان-آکرلیک گزارش کردند، افزودن ۳٪ نانوسیلیکا (۱۰۰ nm)

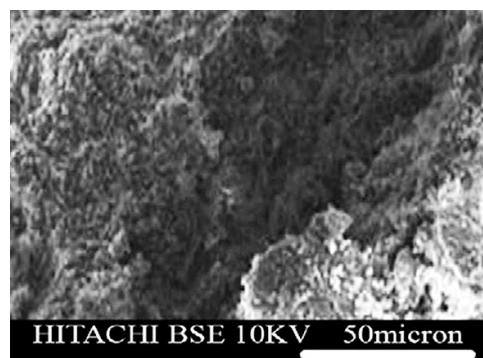
می‌دهد. پژوهشگران گزارش کردند، بتن دارای نانو SiO_2 ساختاری متراکم‌تر و فشرده‌تر از نمونه کنترل دارد. نانوذرات سیلیکا به عنوان نانوپرکننده عمل می‌کنند و به علت واکنش پذیری زیاد سبب تشکیل سریع‌تر محصولات آبدارشدن و تشکیل ژل C-S-H می‌شود. آغاز واکنش آبدارشدن و تشکیل محصولات آن سبب توزیع و پخش نانوذرات سیلیکا مانند هسته در خمیر بتنی می‌شود. در نهایت، مقدار بیشتر ژل C-S-H موجب حفره‌های کمتر و یکپارچگی میکروساختار می‌شود [۲۷].

نتیجه‌گیری

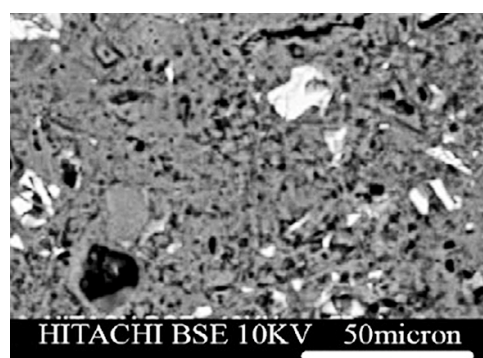
پوشش‌های کامپوزیتی یا نانوکامپوزیتی ضدآب برپایه سیمان-آکرلیک، که به عنوان مصالح ساختمانی به شمار می‌روند، از واکنش مستقیم محصولات آبدارشدن سیمان و زنجیرهای آکرلیک طی چهار مرحله انتشار، جذب و انعقاد ذرات پلیمری در آمیزه، پیش‌روی فرایند آبدارشدن سیمان و شکل‌گیری فیلم پلیمری و میکروساختار نهایی سیمان-پلیمر تولید می‌شوند. افزودن لاتکس پلیمری آکرلیک در ملات سیمانی موجب کاهش مصرف آب، بهبود رفتار خمشی، چقرمگی، مقاومت خوردگی و مقاومت به هوازگی می‌شود. در مقابل، بر مقاومت فشاری تاثیر مثبت ندارد. افزودن نانوذرات سیلیکا به کامپوزیت‌های سیمان-آکرلیک، موجب پیشرفت سریع‌تر واکنش آبدارشدن در سیمان و همچنین بهبود میکروساختار می‌شود. از طرف دیگر، از روان‌یافتگی ملات سیمانی کاسته می‌شود. این موضوع ناشی از ماهیت آب‌دوستی و مساحت سطح به حجم زیاد نانوذرات است.

مراجع

1. Ohama Y., *Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Process Technology*, William Andrew, New Jersey, 1st ed., 1-183, 1995.
2. Aggarwal L.K., Thapliyal P.C., and Karade S.R., Properties of Polymer-Modified Mortars Using Epoxy and Acrylic Emulsions, *Constr. Build. Mater.*, **21**, 379-383, 2007.
3. Kardon J.B., Polymer-Modified Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, **9**, 85-92, 1997.
4. Tukimat N.N.A., Sarbini N.N., Ibrahim I.S., Ma C.K., and



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- ریزنگاشت SEM بتن: (الف) دارای ۳٪ و (ب) فاقد نانوسیلیکا [۲۷].

موجب ۴٪ کاهش در روان‌یافتگی بتن به علت خاصیت آب‌دوستی نانوسیلیکا و کاهش آب آزاد در بتن، عدم تغییر در استحکام خمشی، ۱۲٪ افزایش مقاومت فشاری و همچنین افزایش سرعت آبدارشدن به علت واکنش‌پذیری زیاد نانوذرات ناشی از نسبت سطح به حجم زیاد شد [۳۰]. شکل ۱۰ ریزنگاشت میکروسکوپ الکترونی پوششی (SEM) از دو نمونه بتن دارای نانوسیلیکا و فاقد نانوسیلیکا را نشان

- Mutsumy K., Fresh and Hardened State of Polymer Modified Concrete and Mortars-A Review, *International Symposium on Civil and Environmental Engineering Conference*, Wuhan, 225-235, 20-21 December 2016.
5. Nair P.S. and Gettu R., Commercially Available Waterproofing Agents in India: A Review, *Indian Concr. J.*, **90**, 36-53, 2016.
6. Yu S., Zhou Y., Zhang T., and He M., Preparation and Characterization of Acrylate Copolymers Modified by Fluorine and

- Silicon for Application in Release Films, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **53**, 531–538, 2014.
7. Lavelle J.A., Acrylic Latex-Modified Portland Cement, *Mater. J.*, **85**, 41–48, 1988.
 8. Erbil Y.H., *Vinyl Acetate Emulsion Polymerization and Copolymerization with Acrylic Monomers*, CRC, Florida, 1st ed., 1-183, 2000.
 9. Hu L.M., Li Q.F., and Geng H.P., Properties of Polyacrylic Ester Emulsion Modified with Octa(nitrophenyl) silsesquioxane (ONPS), *Adv. Mater. Res.*, **11**, 319–322, 2006.
 10. Pei M., Wu Y., Kim W., Hyung W., and Soh Y., Effect of The Monomer Ratio on the Properties of Poly(methyl methacrylate butyl acrylate) Latex-Modified Mortars, *J. Appl. Polym. Sci.*, **93**, 2403–2409, 2004.
 11. Kan C.Y., Liu D.S., Kong X.Z., and Zhu X.L., Study on the Preparation and Properties of Styrene–Butyl Acrylate–Silicone Copolymer Latices, *J. Appl. Polym. Sci.*, **82**, 3194–3200, 2001.
 12. Wang R., Li J., Zhang T., and Czarnecki L., Chemical Interaction Between Polymer and Cement in Polymer-Cement Concrete, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, **64**, 785–792, 2016.
 13. Wang M., Wang R., Zheng S., Farhan S., Yao H., and Jiang H., Research on the Chemical Mechanism in the Polyacrylate Latex Modified Cement System, *Cem. Concr. Res.*, **76**, 62–69, 2015.
 14. Ukrainczyk N. and Rogina A., Styrene–Butadiene Latex Modified Calcium Aluminate Cement Mortar, *Cem. Concr. Compos.*, **41**, 16–23, 2013.
 15. Tian Y., Jin X., Jin N., Zhao R., Li Z., and Ma H., Research on the Microstructure Formation of Polyacrylate Latex Modified Mortars, *Constr. Build. Mater.*, **47**, 1381–1394, 2013.
 16. Lu Z., Kong X., Zhang C., Xing F., Cai Y., Jiang L., Zhang Y., and Dong B., Effect of Surface Modification of Colloidal Particles in Polymer Latexes on Cement Hydration, *Constr. Build. Mater.*, **155**, 1147–1157, 2017.
 17. Baueregger S., Perello M., and Plank J., Influence of Anti-Caking Agent Kaolin on Film Formation of Ethylene–Vinyl-acetate and Carboxylated Styrene–Butadiene Latex Polymers, *Cem. Concr. Res.*, **58**, 112–120, 2014.
 18. Baueregger S., Perello M., and Plank J., Impact of Carboxylated Styrene–Butadiene Copolymer on the Hydration Kinetics of OPC and OPC/CAC/AH: The Effect of Ca^{2+} Sequestration from Pore Solution, *Cem. Concr. Res.*, **73**, 184–189, 2015.
 19. Saija L.M., Waterproofing of Portland Cement Mortars with a Specially Designed Polyacrylic Latex, *Cem. Concr. Res.*, **25**, 503–509, 1995.
 20. Wang R. and Wang P., Function of Styrene-Acrylic Ester Copolymer Latex in Cement Mortar, *Mater. Struct.*, **43**, 443–451, 2010.
 21. Sun Z.P., Ye D.M., Fu L.F., Zheng B.C., Feng Z.J., and Chen M., Properties of Polyacrylic Ester Latex Modified Cement Mortar, *Adv. Mater. Res.*, **687**, 166–174, 2013.
 22. Assaad J.J., Development and Use of Polymer-Modified Cement for Adhesive and Repair Applications, *Constr. Build. Mater.*, **163**, 139–148, 2018.
 23. Wang R., Wang P.M. and Li X.G., Physical and Mechanical Properties of Styrene–Butadiene Rubber Emulsion Modified Cement Mortars, *Cem. Concr. Res.*, **35**, 900–906, 2005.
 24. Zhong S. and Chen Z., Properties of Latex Blends and its Modified Cement Mortars, *Cem. Concr. Res.*, **32**, 1515–1524, 2002.
 25. Xue X., Yang J., Zhang W., Jiang L., Qu J., Xu L., Zhang H., Song J., Zhang R., and Li Y., The Study of an Energy Efficient Cool White Roof Coating Based on Styrene Acrylate Copolymer and Cement for Waterproofing Purpose-Part I: Optical Properties, Estimated Cooling Effect and Relevant Properties After Dirt and Accelerated Exposures, *Constr. Build. Mater.*, **98**, 176–184, 2015.
 26. Collepardi M., Marcialis A., and Turriziani R., Penetration of Chloride Ions Into Cement Pastes and Concretes, *J. Am. Ceram. Soc.*, **55**, 534–535, 1972.
 27. Nazari A. and Riahi S., The Role of SiO_2 Nanoparticles and Ground Granulated Blast Furnace Slag Admixtures on Physical, Thermal and Mechanical Properties of Self Compacting Concrete, *Mater. Sci. Eng. A*, **528**, 2149–2157, 2011.
 28. Horszczaruk E., Mijowska E., Cendrowski K., Mijowska S., and Sikora P., The Influence of Nanosilica with Different Morphology on the Mechanical Properties of Cement Mortars, *Cem. Wapno Bet.*, **79**, 24–32, 2013.
 29. Czarnecki L. and Łukowski P., Polymer-Cement Concretes, *Cem. Wapno Bet.*, **5**, 243–258, 2010.
 30. Sikora P., Łukowski P., Cendrowski K., Horszczaruk E., and Mijowska E., The Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties of Polymer-Cement Composites (PCC), *Procedia Eng.*, **108**, 139–145, 2015.