

مروری بر کاربرد طیف‌نمایی تبدیل فوریه مادون قرمز در آنالیز و شناسایی اثر افزودنی‌ها بر سیمان پرتلند

علی الهوردی^{*}، شیما پورزاده فلاح

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات سیمان

پیام نگار: ali.allahverdi@iust.ac.ir

چکیده

سیمان‌ها در هنگام فرایند هیدراتاسیون (آبپوشی) رفتارهای متفاوت از خود نشان می‌دهند. این رفتارها که گاهی غیر قابل پیش بینی‌اند، می‌توانند منشأ برخی مشکلات در خواص کاربردی محصولات پایه سیمان شوند. بنابراین یک روش سریع و دقیق لازم است تا رفتار آبپوشی مواد سیمانی بررسی و مشخص شود. همچنین در برخی مخلوط‌های سیمانی لازم است که وجود مواد افزودنی تشکیل‌دهنده مخلوط سیمانی، چه کم چه زیاد، دقیقاً تعیین گردد. طیف‌نمایی تبدیل فوریه مادون قرمز این امکانات را به سادگی فراهم می‌کند. با این تکنیک آزمایشگاهی می‌توان به بررسی تأثیر کلینکر و مواد افزودنی بر رفتار آبپوشی و خواص سیمان پرداخت.

کلمات کلیدی: طیف‌نمایی تبدیل فوریه مادون قرمز، سیمان پرتلند، آبپوشی

۱- مقدمه

سیمان به‌عنوان یک چسباننده معدنی از مدت‌ها پیش در ساخت و ساز کاربرد داشته است. اما با پیشرفت فناوری و افزایش نیاز بشر، مواد سیمانی جدید با خصوصیات و مشخصات بهتر و کاربردی‌تر ساخته شدند. استفاده از مواد معدنی افزودنی نظیر خاکستر ناشی از سوختن زغال سنگ، پوزولان‌های طبیعی، سرباره کوره آهن گدازی و همچنین افزودنی‌های شیمیایی نظیر ابر روان‌سازها و دیگر افزودنی‌های شیمیایی در بهبود و یا تغییر خواص مواد سیمانی تأثیر دارد [۱ و ۳]. بنابراین بایستی یک روش دقیق برای شناسایی مواد سیمانی، بعد از استفاده از این افزودنی‌ها، وجود داشته باشد که خصوصیات محصول به‌دست آمده را به خوبی تعیین کند. روش طیف‌نمایی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)^۱، این امکان را فراهم

می‌آورد که ترکیب شیمیایی مواد سیمانی، سریع و دقیق تعیین شود. سرعت، حساسیت و کیفیت این روش بسیار بالا است. معمولاً این روش طیف‌نمایی در آنالیز کیفی مواد، مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما در آنالیز کمی و تعیین ترکیب شیمیایی مواد سیمانی نیز کاربرد دارد [۴].

در این مقاله تأثیر مواد افزودنی از جمله؛ زئولیت طبیعی، پرکننده‌های سنگ آهکی، خاکستر لجن، ابر روان‌ساز، خاکستر بادی و کاتالیزگر غیرفعال شده، در آبپوشی سیمان پرتلند و سایر خواص آن توسط روش طیف‌نمایی FTIR بررسی شده است.

۲- تأثیر زئولیت طبیعی در آبپوشی سیمان پرتلند

پراکی^۲ و همکارانش، تأثیر استفاده از زئولیت هئولندایت نوع II^۳ را

2. Th. Perraki
3. Heulandite TypeII

1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy

۲۰۰۷، گائو^۱ و دیگران برای مطالعه حمله سولفاتی، آزمون‌های منشوری شکل ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی به علاوه ۳۰٪ جرمی از نرمه سنگ آهک را در محلول‌های سولفاتی و در دماهای مختلف به مدت ۱ سال قرار دادند. بعد از ۱ سال از سطح آزمون‌ها نمونه‌هایی از خمیر سخت شده برداشته شد و با طیف نمایی FTIR آنالیز گردید. سیمان‌ها و بتن‌هایی که حاوی نرمه سنگ آهک هستند پس از مدتی مورد حمله سولفاتی قرار می‌گیرند و طی آن تامازایت^۲ تشکیل می‌شود. تامازایت، یک ماده معدنی سیلیکاتی با فرمول شیمیایی $(CaSiO_3 \cdot CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15H_2O)$ است.

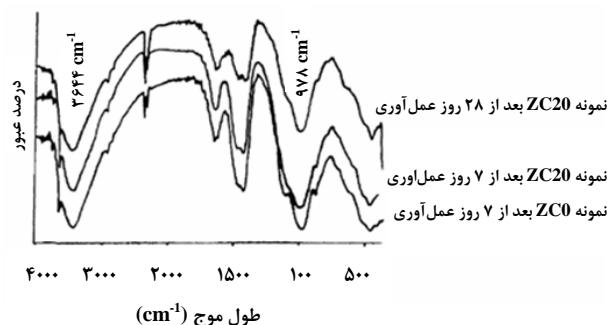
جدول ۱- محلول‌های سولفاتی مختلف و دماهای ماند [۶]

نام محلول	نمک سولفات استفاده شده	درصد وزنی	دما (°C)
(M-1)	سولفات منیزیم	۲	۵
(M-2)	سولفات منیزیم	۲	۲۰
(M-3)	سولفات منیزیم	۲	۵-۲۰
(N-1)	سولفات سدیم	۲	۵
(N-2)	سولفات سدیم	۲	۵-۲۰
(M+N)	سولفات سدیم	۲	۵
	سولفات منیزیم	۲	

آزمون‌ها در دو نوع محلول سولفاتی یکی سولفات منیزیم و دیگری سولفات سدیم قرار گرفتند. نسبت آب به سیمان ۰/۶ و نسبت سیمان به پرکننده سنگ آهکی به شن برابر (۲/۲ : ۰/۳ : ۱) بود. نمونه‌ها در ابعاد (۴۰×۴۰×۴۶۰ mm) قالب‌گیری شدند و به مدت ۲۴ ساعت در یک اتاقچه مرطوب قرار گرفتند. سپس از قالب خارج شدند و به مدت ۲۷ روز در دمای اتاق ($20 \pm 2^\circ C$) و در زیر آب قرار گرفتند. بعد از آن آزمون‌ها در سه نوع مختلف از محلول سولفات (۱) محلول ۲٪ سولفات منیزیم (۲) ۲٪ سولفات سدیم و (۳) ۲٪ سولفات سدیم + ۲٪ سولفات منیزیم و دو دمای مختلف $5^\circ C$ و $20^\circ C$ و متناوباً ۳ روز در $5^\circ C$ و ۳ روز در $20^\circ C$ قرار گرفتند. بنابراین شش نوع محیط سولفاتی به وجود آمد. محلول‌های سولفاتی هر ۲ ماه یکبار تعویض شدند و نسبت حجمی محلول به نمونه‌ها (۲:۱) نگه داشته شد.

1. X J Gao
2. Thaumasite

در آبیوشی سیمان پرتلند، آزمایش کردند. مخلوط‌های ZC0، ZC10، ZC20 و ZC30 که شامل ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ وزنی از نرمه زئولیت بودند، آماده شده و در دمای $20^\circ C$ و به مدت ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روز عمل آوری شدند. نسبت آب به سیمان در تمام نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۴ در نظر گرفته شد. بعد از آزمایش مشخص شد که زئولیت به مصرف هیدروکسید کلسیم که در طی آبیوشی تشکیل شده است، کمک می‌کند. هم چنین این واکنش منجر به تشکیل محصولات آبیوشی می‌شود. شکل (۱) نتیجه طیف‌نمایی FTIR نمونه‌های ZC20، بعد از ۷ و ۲۸ روز و ZC0 را بعد از ۷ روز نشان می‌دهد. شدت ارتعاشی که در 978 cm^{-1} بوده با افزایش زمان آبیوشی رفته رفته کاهش می‌یابد و به سمت عدد موج‌های بالاتر می‌رود. این به دلیل آبیوشی اجزای سیلیکات کلسیمی سیمان و بسپارش SiO_4^{4-} است. ارتعاش پیوند (O-H) در 3644 cm^{-1} نشان‌دهنده حضور هیدروکسید کلسیم است. کاهش این پیک بعد از گذشت ۲۸ روز از آبیوشی، نشان‌دهنده شرکت کردن زئولیت در واکنش پوزولانی است.



شکل ۱- نتیجه طیف نمایی FTIR برای نمونه‌های ZC0 و ZC20 بعد از ۷ روز و نمونه ZC20 بعد از ۲۸ روز [۵]

بنابراین آنالیز FTIR نشان می‌دهد که زئولیت طبیعی مطالعه شده، خاصیت پوزولانی دارد که با هیدروکسید کلسیم حاصل از آبیوشی سیمان پرتلند واکنش می‌دهد و محصولات شبیه سیمان هیدرات شده تولید می‌کند [۵].

۳- حمله سولفاتی به مواد پایه سیمان با پرکننده‌های سنگ آهکی

استفاده از سنگ آهک در سیمان و بتن می‌تواند فوایدی به دنبال داشته باشد. از جمله کاهش آب مورد نیاز و فواید اقتصادی. در سال

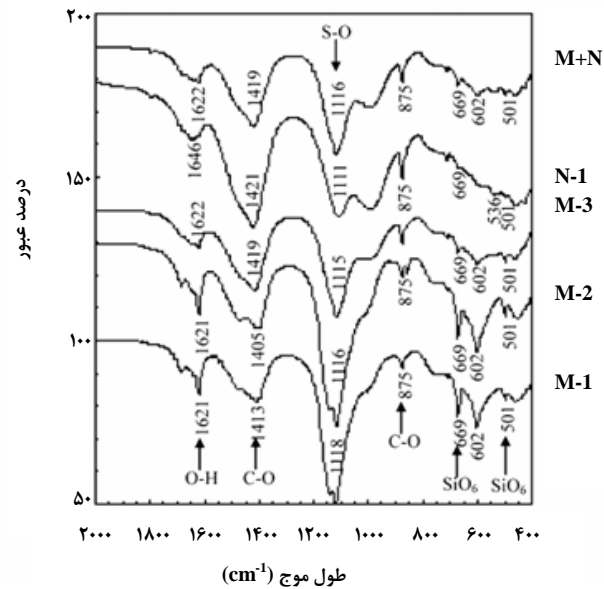
هیدروکربن دارد که برای محیط زیست خطرناک است. اگر این هیدروکربن‌ها خارج شوند، خاکستر باقی‌مانده حاوی سیلیس و سایر مواد پوزولانی است که می‌تواند به‌عنوان مادهٔ سیمانی مصرف شود. در سال ۲۰۰۲ سایکیا^۱ و همکارانش، تأثیر افزودن مخلوط تکلیس‌شدهٔ متاکائولن و خاکستر لجن خروجی از واحد تصفیه فاضلاب پتروشیمی را بر روی آبیوشی سیمان پرتلند بررسی کردند [۷].

جدول ۲- ترکیب مخلوط تکلیس‌شدهٔ کائولن - لجن و مخلوط‌های سیمانی [۷]

نام مخلوط	ترکیب شیمیایی مخلوطها
کنترل	سیمان پرتلند معمولی
CM	۲۰٪ متاکائولن در سیمان پرتلند معمولی
CMS1	۲۰٪ مخلوط تکلیس‌شده (شامل کائولن و
	۱۰٪ لجن پتروشیمی) در سیمان پرتلند معمولی
CMS2	۲۰٪ مخلوط تکلیس‌شده (شامل کائولن و
	۲۰٪ لجن پتروشیمی) در سیمان پرتلند معمولی
CMS3	۲۰٪ مخلوط تکلیس‌شده (شامل کائولن و
	۳۰٪ لجن پتروشیمی) در سیمان پرتلند معمولی
CMS4	۲۰٪ مخلوط تکلیس‌شده (شامل کائولن و
	۴۰٪ لجن پتروشیمی) در سیمان پرتلند معمولی
CS	۲۰٪ لجن پتروشیمی در سیمان پرتلند معمولی

لجن پس از خشک شدن در دمای $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ با متاکائولن به نسبت (۱:۹۰)، (۲۰:۸۰)، (۳۰:۷۰) و (۴۰:۶۰) مخلوط و سپس تکلیس شد. ترکیب نمونه‌ها در جدول (۱) آمده است. نمونه‌ها به نسبت (w/v) (۱:۲) با آب مخلوط شدند تا آبیوشی انجام شود. سپس از آن‌ها آزمون FTIR گرفته شد.

نتایج طیف نمایی FTIR در شکل (۲) آمده است. پیکی که در 501 cm^{-1} و 696 cm^{-1} در محلول‌های حاوی سولفات منیزیم مشاهده می‌شود، مربوط به حضور پیوندهای SiO_6 است. این دو پیک نشان‌دهندهٔ تشکیل تامازایت در نمونه‌ها است. در نمونه‌هایی که در محلول سولفات سدیم غوطه ور بودند، مقدار کم‌تری تامازایت تشکیل شده است.



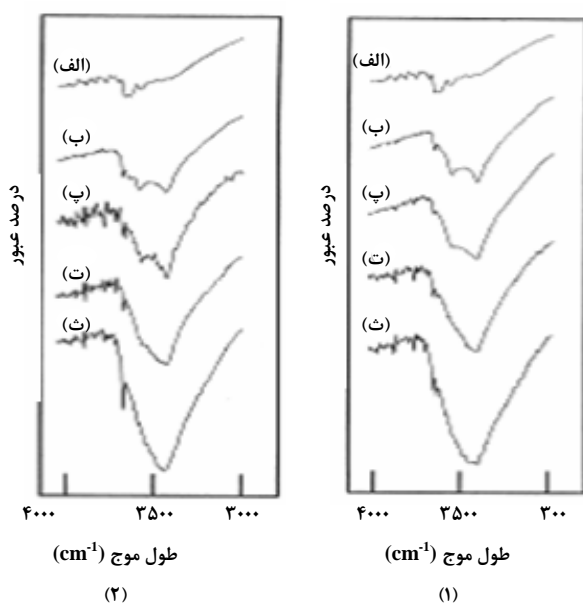
شکل ۲- نتیجهٔ طیف نمایی FTIR برای ملات‌های سیمانی با پرکننده‌های سنگ آهکی در محلول‌های سولفاتی بعد از ۱ سال [۶]

پیک‌های قوی که در نزدیکی 1110 cm^{-1} ظاهر شده‌اند، نشان‌دهندهٔ پیوند (S-O) موجود در مواد حاوی سولفات است که در تمام نمونه‌ها شکل گرفته است. پیک (S-O) در ملات‌هایی که با محلول سولفات منیزیم در تماس بودند، قوی‌تر است و نشان می‌دهد که این ملات‌ها بیشتر مورد حملهٔ سولفاتی قرار گرفتند. بنابراین با توجه به نتایج طیف نمایی FTIR می‌توان ادعا کرد که در نمونه‌هایی که با سولفات منیزیم در تماس بودند، تامازایت بیشتری شکل گرفته است. پس می‌توان گفت حملهٔ سولفات منیزیم مخرب‌تر از تهاجم سولفات سدیم است [۶].

۴- خواص سیمانی مخلوط (متاکائولن - سیمان پرتلند) در حضور لجن پتروشیمی

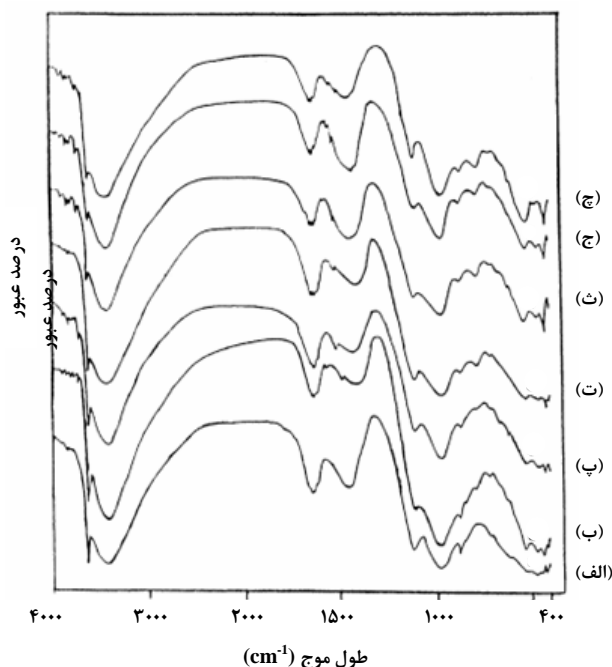
لجن خروجی از واحد تصفیه فاضلاب پتروشیمی مقدار زیادی

پراکنده‌کننده دارند و افزودن مقادیر کمی از آنها به سیمان و بتن از چسبیدن دانه‌های سیمان به هم جلوگیری می‌کند. با تأثیر قابل ملاحظه این مواد، سیلان بتن افزایش یافته و لذا به مقدار آب کم‌تری برای ایجاد کارپذیری کافی نیاز خواهد بود. با کاهش آب مصرفی در بتن مقاومت و کارایی آن افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۹، مولاها^۱ و دیگران تاثیر استفاده از مواد فوق روان‌ساز^۲ را بر روی آبیوشی سیمان پرتلند بررسی کردند. روان‌ساز استفاده شده در این تحقیق سدیم لیگنین سولفونات^۳ بود. با استفاده از تکنیک طیف نمایی FTIR اثر استفاده از فوق‌روان‌ساز، روی آبیوشی اولیه سیمان بررسی شد. دو نوع نمونه یکی بدون ابر روان‌ساز و دیگری با ابر روان‌ساز آماده شدند. نسبت آب به سیمان در تمام حالات ثابت و برابر ۰/۴ بوده و نمونه‌ها با تکنیک FTIR آنالیز شدند.



شکل ۴- نتیجه طیف نمایی FTIR در ناحیه کششی آب:
 (الف) بدون ابر روان‌ساز؛ (ب) با افزودن ابر روان‌ساز
 (الف) سیمان خشک، (ب) ۲ دقیقه، (پ) ۱ ساعت، (ت) ۹ ساعت،
 (ث) ۲۴ ساعت [۱]

در محصولات آبیوشی ۲۸ روزه نمونه کنترل یک باند در 3640 cm^{-1} دارد که نشان‌دهنده وجود هیدروکسید کلسیم است. شدت این باند در مخلوطی که حاوی متاکائولن است کم‌تر شده و در سیمان‌های مرکب هم که حاوی مخلوط کائولن و لجن تکلیس شده هستند، رفته رفته کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۳) طیف مربوط به سیمان مرکبی که ۳۰٪ لجن تکلیس شده داشت، فقط یک شانه در 3640 cm^{-1} نشان داده است. در واقع هیدروکسید کلسیم که با آبیوشی کلینکر وارد مخلوط شده است، توسط پوزولانی که در اثر تکلیس مخلوط کائولن و لجن پتروشیمی (۳۰٪) تولید شده است، مصرف می‌شود. بنابراین کائولن تکلیس شده در حضور مقدار محدودی خاکستر لجن واحد تصفیه فاضلاب پتروشیمی وقتی به‌عنوان یک مخلوط معدنی استفاده می‌شود، سرعت آبیوشی سیمان را افزایش می‌دهد [۷].



شکل ۳- نتیجه طیف نمایی FTIR برای محصولات آبیوشی بعد از ۲۸ روز. (الف) کنترل، (ب) CM، (پ) CMS1، (ت) CMS2، (ث) CMS3، (ج) CMS4، (چ) CS [۷]

۵- تأثیر سدیم لیگنین سولفونات در آبیوشی سیمان پرتلند

روان‌سازها و فوق روان‌سازها مواد شیمیایی‌ای هستند که سیلان و نرمینگی سیمان و بتن را افزایش می‌دهند. این مواد خاصیت

1. M. Y. A Mullaha
 2. Superplasticizer
 3. Lignosulfonate

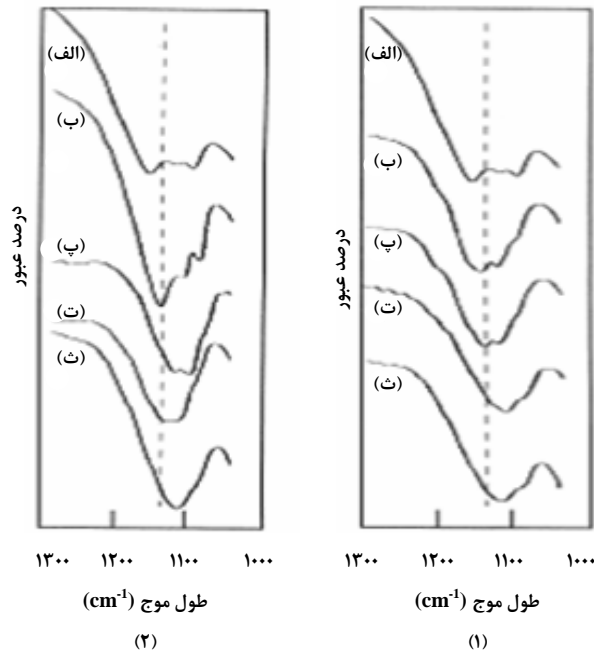
۶- آبیوشی سیمان های حاوی خاکستر بادی کم کلسیم، سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی

در سال ۲۰۰۷، ایلماز^۲ و همکارانش در مورد اثر خاکستر بادی با کلسیم کم (FA)، سنگ آهک (LS)، و سنگ آهک دولومیتی (DLS) در خواص سیمان تحقیق کردند [۲]. استفاده از خاکستر بادی یک روش سودمند برای بهبود خواص بتن خصوصاً کاهش انبساط حجمی آن است. در این تحقیق از سه نوع سیمان مخلوط و مرکب شامل، مخلوط سیمان پرتلند با خاکستر بادی (FA)، مخلوط سیمان پرتلند با خاکستر بادی و سنگ آهک (LS) و مخلوط سیمان پرتلند با خاکستر بادی و سنگ آهک دولومیتی (DLS) استفاده شده است. در هر مورد محققین مقدار خاکستر بادی، سنگ آهک، و سنگ آهک دولومیتی را تغییر داده و تأثیر آن را بر محصولات آبیوشی بررسی کردند. ترکیب شیمیایی نمونه‌های مطالعه شده در جدول (۲) آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خاکستر بادی مورد مطالعه از نوع کم کلسیم است.

قبل از اختلاط مشخص شد که مقدار بهینه گچ موجود در کلینکر ۵٪ وزنی است. خمیرها با آب یون زدوده در یک همزن مخلوط شدند و سپس به شکل آزمون‌های منشوری به ابعاد mm (۱۰×۱۰×۱۰) در آمدند. آزمون‌ها در دمای °C (۲۰±۲) در رطوبت نسبی (۴۰±۲) قالب‌گیری شده و در آب یون زدوده به مدت ۲، ۷ و ۲۰ روز قرار گرفتند، تا واکنش‌های آبیوشی انجام شوند. در زمان‌های مورد نظر فرایند آبیوشی با استفاده از استون متوقف شد و آزمون‌ها در °C ۶۵ خشک شدند.

نتیجه طیف نمایی FTIR بر روی سیمان هیدراته بعد از ۲۸ روز در شکل (۶) آمده است. از هر دسته از مخلوط‌های سیمانی با درصد‌های مختلف گچ، خاکستر بادی، سنگ آهک، سنگ‌آهک دولومیتی و سیمان پرتلند معمولی یک نمونه برای طیف نمایی تبدیل فوریه مادون قرمز انتخاب شدند.

یک ارتعاش کششی شدید پیوند (Si-O) در 961 cm^{-1} و یک ارتعاش خمشی ضعیف (Si-O) در 457 cm^{-1} در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود. شدت این ارتعاش بعد از گذشت ۲۸ روز در سیمان پرتلند ساده از بقیه نمونه‌ها کم‌تر است، چون خاکستر بادی شامل مقدار زیادی SiO_2 است. باندهای ظاهر شده در $617-623\text{ cm}^{-1}$ ، نشان‌دهنده وجود اترینگایت است. یک پیک کوچک ولی مشخص



شکل ۵- نتیجه طیف نمایی FTIR در ناحیه کششی سولفات: (الف) بدون ابر روان‌ساز (ب) با افزودن ابر روان‌ساز (الف) سیمان خشک، (ب) ۲ دقیقه، (پ) ۱ ساعت، (ت) ۹ ساعت، (ث) ۲۴ ساعت [۱]

در ناحیه آب ($>1600\text{ cm}^{-1}$) با توجه به شکل (۴) با گذشت زمان، باندی که مربوط به ارتعاش کششی آب در $3440-3460\text{ cm}^{-1}$ بوده پهن‌تر گشته است. همچنین کاملاً مشخص است که باند مربوط به هیدروکسید کلسیم در 3645 cm^{-1} قوی‌تر شده است. با مقایسه طیف گرفته شده بعد از ۲۸ روز در نمونه‌ای که در هوا بوده و نمونه‌ای که به آن ابر روان‌ساز اضافه شده بود، (شکل (۴)-(۱)-(ث)) و (۴)-(۲)-(ث)) متوجه می‌شویم که باند مربوط به هیدروکسید کلسیم در 3645 cm^{-1} قوی‌تر شده است. پس افزودن ابر روان‌ساز به تسریع واکنش‌های آبیوشی کمک می‌کند. در ناحیه سولفات ($1150-1100\text{ cm}^{-1}$) سه باندی که در طیف گرفته شده بعد از ۲ دقیقه مشاهده می‌شوند (شکل (۵)) شبیه طیف مربوط به سیمان هیدراته نشده‌اند و با گذشت زمان ناپدید می‌گردند و تبدیل به یک باند پهن با یک شانه کوچک می‌شوند. جابه‌جایی تدریجی باند قوی سولفات به سمت عدد موج‌های کم‌تر به دلیل تشکیل اترینگایت^۱ است. همان‌طور که از شکل (۵)-(۲)-(ث)) مشخص است، این باند قوی‌تر است. بنابراین استفاده از ابر روان‌ساز به تشکیل اترینگایت کمک می‌کند [۱].

۷- اندازه‌گیری فعالیت پوزولانی کاتالیزگر غیرفعال شده شکست کاتالیزی

در سال ۲۰۰۹، علی‌اله وردی^۱ و همکارانش، روی فعالیت پوزولانی کاتالیزگر فرایند شکست کاتالیزی بستر سیال باقیمانده نفتی^۲، تحقیقاتی انجام دادند. طبق مطالعات انجام شده این کاتالیزگر، حاوی مقدار زیادی آلومینیوم و سیلیس است که باعث افزایش خاصیت پوزولانی سیمان می‌گردد، از طرفی آلوده به فلزات سنگین نیز می‌باشد که در صورت دفع در محیط زیست منجر به آلودگی‌های بسیاری می‌شود. استفاده از این کاتالیز، به‌عنوان ماده پوزولانی نه تنها می‌تواند روشی مفید برای از بین بردن و دفع آن باشد، بلکه باعث بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان نیز می‌گردد.

اجزای اصلی کاتالیزگر غیرفعال شده، سیلیس و آلومینیوم هستند. این مواد سیلیکات آلومینیومی با هیدروکسید کلسیم وارد واکنش می‌شوند و محصول اصلی آن گهلائیت هیدراته^۳ است. محصولات دیگر، سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته است. این هیدرات‌ها محصولات اصلی آبیوشی سیمان هستند [۸].

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع II و کاتالیزگر غیرفعال شده استفاده شده است. کاتالیزگر برای رسیدن به اندازه مطلوب به مدت ۱۰۵ دقیقه در آسیاب گلوله‌ای آسیاب شده، سپس به نسبت (۱:۱) با سیمان پرتلند نوع II مخلوط گشته و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است. از مخلوط آماده شده بعد از گذشت ۷ و ۲۸ روز آزمون FTIR گرفته شد.

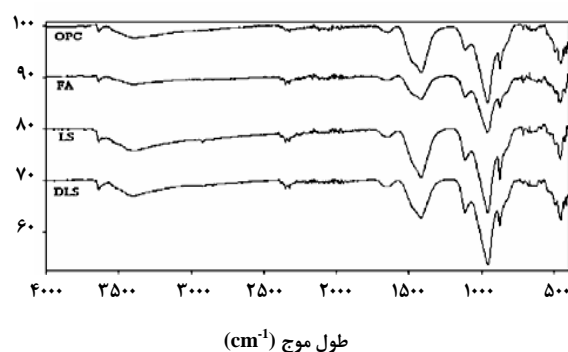
در شکل (۷) نتیجه طیف نمایی FTIR برای خمیر (۱:۱) (لایم: RFCC) با زمان ماند ۷ و ۲۷ روز نمایش داده شده است. پیک‌های مهم عبارتند از: (الف) در 3640 cm^{-1} برای OH- گروه هیدروکسید کلسیم؛ (ب) در $1417-1366\text{ cm}^{-1}$ برای کربنات (از ناخالصی‌های آهک)؛ (پ) در 1100 cm^{-1} برای ارتعاش کششی (Si-O(Al)-O)؛ (ت) در 970 cm^{-1} برای سیلیکات کلسیم هیدراته و (ث) در 420 cm^{-1} برای آلومینات کلسیم و آلومینو سیلیکات هیدراته.

بنابراین RFCC خاصیت پوزولانی دارد و محصولات آبیوشی شامل سیلیکات کلسیم هیدراته، آلومینات کلسیم هیدراته و

در $3637-3641\text{ cm}^{-1}$ وجود دارد که نشان‌دهنده وجود باند OH- در هیدروکسید کلسیم است. این پیک در نمونه خاکستر بادی از هر نمونه دیگر کم‌تر است. بنابراین در نمونه مخلوط خاکستر بادی و سیمان پرتلند معمولی آبیوشی بهتری انجام گرفته است و استفاده از خاکستر بادی به پیشرفت آبیوشی کمک کرده است [۲].

جدول ۳- ترکیب مخلوط‌های سیمانی آماده شده [۲]

نام مخلوط	مخلوط سیمانی
OPC	۵٪ گچ + ۹۵٪ سیمان پرتلند
FA ₁	۵٪ گچ + ۵٪ خاکستر بادی + ۹۰٪ سیمان پرتلند
FA ₂	۵٪ گچ + ۱۰٪ خاکستر بادی + ۸۵٪ سیمان پرتلند
FA ₃	۵٪ گچ + ۲۰٪ خاکستر بادی + ۷۵٪ سیمان پرتلند
FA ₄	۵٪ گچ + ۴۰٪ خاکستر بادی + ۵۵٪ سیمان پرتلند
LS ₁	۵٪ گچ + ۱۵٪ خاکستر بادی + ۵٪ سنگ آهک + ۷۵٪ سیمان پرتلند
LS ₂	۵٪ گچ + ۱۰٪ خاکستر بادی + ۱۰٪ سنگ آهک + ۷۵٪ سیمان پرتلند
LS ₃	۵٪ گچ + ۵٪ خاکستر بادی + ۱۵٪ سنگ آهک + ۷۵٪ سیمان پرتلند
DLS ₁	۵٪ گچ + ۱۵٪ خاکستر بادی + ۵٪ سنگ آهک دولومیتی + ۷۵٪ سیمان پرتلند
DLS ₂	۵٪ گچ + ۱۰٪ خاکستر بادی + ۱۰٪ سنگ آهک دولومیتی + ۷۵٪ سیمان پرتلند
DLS ₃	۵٪ گچ + ۵٪ خاکستر بادی + ۱۵٪ سنگ آهک دولومیتی + ۷۵٪ سیمان پرتلند



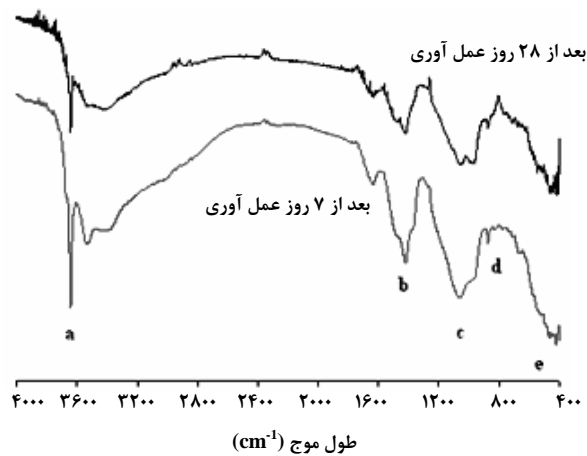
شکل ۶- نتیجه طیف نمایی FTIR برای سیمان‌های پرتلند ساده، مخلوط، و مرکب بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری [۲]

1. A. Allahverdi
2. Resid Fluidized Catalytic Cracking (RFCC)
3. Hydrated Gehlenite (Calcium Alumino-silicate Hydrate)

مراجع

- [1] M. Y. A. Mollah et al "A Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 267–273, (2000).
- [2] B. Yilmaz et al, "Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 194–201, (2008).
- [3] J. R. Pan et al, "Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement", *waste management*, vol. 28, pp. 1138-1128, (2007).
- [4] Ph. Fletcher et al, T. Jones and S. Pelham, "Determining Cement Composition by Fourier Transform Infrared Spectroscopy", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 2, pp. 91-104, (1995).
- [5] Th. Perraki et al, "The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement", *Microporous and Mesoporous Materials*. Vol. 61, pp. 205–212, (2003).
- [6] X. Gao et al, "Sulfate attack of cement-based material with limestone filler exposed to different environments", *JMEPEG*. Vol. 17, pp. 543–549, (2008).
- [7] N. J. Saikia et al, "Cementitious properties of metakaolin-normal portland cement mixture in the presence of petroleum effluent treatment plant sludge", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1717–1724, (2002).
- [8] J. Paya et al, "Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R–lime pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1085–1091, (2003).
- [9] A. Allahverdi et al, "Sulfate Resistance of Portland Cement Blended with Spent RFCC Catalyst", 17th IBAUSIL Conference, Weimar, Germany, 23-25 September, (2009).

آلومینو سیلیکات کلسیم هیدراته تولید می‌کند. از طرفی می‌دانیم پیک (a) در شکل (۷) در اثر واکنش پوزولانی کاهش می‌یابد. با این حال مقدار کم کاهش نشان داده شده، در اثر نسبت زیاد آهک در خمیر آماده شده است [۹].



شکل ۷- نتیجه طیف نمایی FTIR برای خمیر کاتالیزگر و سیمان پرتلند به نسبت (۱:۱) بعد از گذشت ۷ و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری [۹]

۸- بحث و نتیجه‌گیری

روش طیف نمایی تبدیل فوریه مادون قرمز یک روش مفید در شناسایی و آنالیز مواد سیمانی است و در بسیاری از موارد که روش‌های دیگر نمی‌توانند پاسخگو باشند، کمک زیادی به تعیین مشخصات مخلوط سیمانی می‌کند. با این روش می‌توان اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط سیمانی را چه کم و چه زیاد، شناسایی کرد. پیک‌های ایجاد شده در هر طول موج، مشخص‌کننده یک ماده سیمانی است. به‌عنوان مثال ایجاد و افزایش پیک مربوط به پیوندهای (Si-O) در سیلیکات کلسیم هیدراته و (Al-O) در آلومینات کلسیم هیدراته و کاهش شدت باند مربوط به پیوند (O-H) در هیدروکسید کلسیم، نشان‌دهنده انجام گرفتن واکنش پوزولانی است.