

مشخصه‌یابی سنگ لاجورد با استفاده از روش‌های مکمل آبیبل و میکروپیکسی

طاهره نیکبخت، امیدرضا کاکویی، محمد لامعی رشتی و محمد صداقتی بورخانی

پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

پست الکترونیکی: tnikbakht@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۸/۲۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۸/۳)

چکیده

مطالعه لومینسانس یون-القایی (آبیبل) روشی سودمند برای شناسایی پیوندهای شیمیایی مواد است. با توجه به قلمرو کاوش، این روش سریع و غیر مخرب مکمل مناسبی برای روش شناخته شده میکروپیکسی به شمار می‌آید. به دلیل لومینسان بودن اکثر سنگ‌های معدنی، استفاده از روش مشخصه‌یابی آبیبل در کانی‌شناسی بسیار مناسب است. در این کار پژوهشی از باریکه پروتون 2.7 MeV ، به منظور مشخصه‌یابی نمونه‌ای از سنگ لاجورد با استفاده از روش‌های میکروپیکسی و آبیبل، استفاده شده است. پس از جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل نتایج حاصل از دو روش مکمل مذکور و ترکیب آنها با یکدیگر، تصویر توزیع عنصری نمونه تشکیل شد. مقایسه نتایج حاصله با سایر نتایج موجود، دقت و توانمندی حاصل از ترکیب دو روش میکروپیکسی و آبیبل به منظور مشخصه‌یابی کانی‌ها و اشیاء با ارزش تاریخی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: لومینسانس یون-القایی، میکروپیکسی، تصویر برداری شیمیایی، لاجورد

۱. مقدمه

باریکه یونی تا حد میکرومتر امکان تعیین نقشه عنصری نمونه را فراهم می‌کند (میکروپیکسی). لازم به ذکر است که فرایندهای فیزیکی درگیر در پیکسی در لایه‌های الکترونی درونی اتم رخ می‌دهند، بنابراین پرتوهای ایکس گسیلی تنها حاوی اطلاعات مربوط به نوع و غلظت عنصری نمونه بوده و ترکیبات شیمیایی نمونه را مشخص نمی‌کنند. همچنین شناسایی دقیق مقادیر اندک خاک‌های نادر موجود در نمونه، با استفاده از تجهیزات متداول موجود در آزمایشگاه‌ها، تقریباً غیر ممکن است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، از روش نسبتاً

اساس روش‌های مشخصه‌یابی با استفاده از باریکه یونی^۱ بر مبنای این اصل است که بمباران نمونه با یون‌های پر انرژی منجر به گسیل محصولات برهم‌کنش مختلفی می‌شود که با مطالعه آنها می‌توان نمونه را مشخصه‌یابی نمود. یکی از مهم‌ترین انواع این محصولات، پرتوهای ایکس مشخصه هستند که در مشخصه‌یابی به روش پیکسی^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. در روش اندازه‌گیری پیکسی، کاهش ابعاد

۱. Ion Beam Analysis (IBA)

۲. Particle Induced X-ray Emission (PIXE)

نادر عناصر ذاتی نمونه لومینسان هستند و اغلب اجزای لومینسان به صورت آلاینده‌های جایگزین شونده کاتیون‌های ذاتی نمونه، اگر شعاع و بار به حد کافی نزدیک به یکدیگر داشته باشند، وجود دارند [۱۳]. یکی از مهم‌ترین کانی‌های مورد مطالعه در کانی‌شناسی، سنگ لاجورد^۴ است که برای مدت بیش از ۷۰۰۰ سال برای ساخت اشیاء گران‌بها و جواهرات استفاده شده است. مشخصه‌یابی این سنگ، با توجه به خواص لومینسانس آن، به خوبی با روش آیبیل امکان‌پذیر است. به طور مثال با استفاده از ترکیب دو روش میکروآیبیل و میکروپیکسی، لاجورد موجود در گنجینه Tòd کشور مصر که متعلق به سده بیستم قبل از میلاد بوده و در موزه لوور پاریس نگهداری می‌شود، مشخصه‌یابی و در سال ۲۰۱۴ گزارش شده است [۱۴]. مشخصه‌یابی این سنگ امکان تشخیص منشأ جغرافیایی آن را فراهم می‌سازد، بنابراین می‌تواند به منظور مطالعه جامع کاربردها و داد و ستد بین فرهنگ‌ها و اقوام مختلف، جهت تعیین سیر فرهنگی، مفید باشد [۱۵].

در این مقاله با استفاده از باریکه پروتون‌های ۲٫۷ MeV، نمونه سنگ لاجورد با سطح صاف و هموار، مشخصه‌یابی شد. بدین ترتیب که ابتدا با استفاده از باریکه پهن^۵ پروتون، طیف تمام رنگ^۶ نمونه جمع‌آوری شد. در ادامه با استفاده از باریکه میکرونی، مشخصه‌یابی به روش میکروپیکسی جهت تعیین نقشه عنصری نمونه انجام شد. در نهایت با تحلیل داده‌ها و مقایسه نتایج حاصل از این دو روش، که به عنوان روش‌های مکمل یکدیگر شناخته می‌شوند، پارامترهای مهم در مشخصه‌یابی سنگ لاجورد تعیین و گزارش شده است.

۲. ابزار و روش

برای انجام آزمایش از خط میکرو باریکه شتابدهنده واندوگراف استفاده شد (شکل ۱-الف)). نمونه مورد استفاده برای انجام این کار پژوهشی قطعه‌ای از سنگ لاجورد، با سطحی صاف و هموار است (شکل ۱-ب)). نمونه

جدید آیبیل^۱، به عنوان مکملی برای روش پیکسی، استفاده می‌شود [۲ و ۳] در آیبیل، لومینسانس گسیلی حاصل از بمباران نمونه حاوی اجزای لومینسان^۲ با باریکه یونی پر انرژی، مطالعه می‌شود. آیبیل از برهم‌کنش بین باریکه یونی و الکترون‌های لایه‌های خارجی ناشی شده و بنابراین حاوی اطلاعاتی در مورد پیوندهای شیمیایی و نقایص شبکه است [۴-۶]. این روش نسبت به حضور عناصر خاصی چون خاک‌های نادر و یون‌های فلزات واسطه با تراز ظرفیت^۳ حساس است. به طور کلی روش‌های لومینسانس از جمله آیبیل نسبت به انواع نواقص، آلاینده‌ها و تغییرات آنها بسیار حساس هستند، به طوری که آشکارسازی آنها تا حد کم‌تر از ۱ ppm امکان‌پذیر است. آیبیل تا کنون به منظور مطالعه نمونه‌های مختلفی از بلورهای عایق، شیشه‌ها و لایه‌های نازک تا نانوذرات به کار گرفته شده است [۷-۱۰]. لازم به ذکر است که تحلیل داده‌های بدست آمده از این روش حساس و قدرتمند، با توجه به محدود بودن اطلاعات موجود در این زمینه و پیچیدگی فیزیک آن، کار نسبتاً مشکلی است. بنابراین علی‌رغم ارزان و در دسترس بودن تجهیزات مورد نیاز این روش، در حال حاضر گروه‌های تحقیقاتی معدودی در این زمینه مشغول به کار هستند [۸]. بنابراین ضمن تأکید بر سودمندی استفاده از دو روش مکمل جهت دست‌یابی به نتایج دقیق، اساس این کار پژوهشی حول روش آیبیل، کاربردها و توانمندی‌های آن محوریت یافته است.

با توجه به لومینسان بودن اکثر نمونه‌های معدنی و همچنین عمق کاوش قابل توجه باریکه یونی، استفاده از آیبیل در کانی‌شناسی بسیار سودمند است. آیبیل قادر به شناسایی مواد معدنی، توزیع فازی موجود در سنگ‌ها و تحلیل ساختار جامدات (شامل نقایص، رشد ناحیه‌ای، عناصر کم مقدار و ظرفیت شیمیایی آنها) است. همچنین امکان تشخیص منشأ نمونه‌ها با استفاده از طیف لومینسانس و عناصر کم مقدار موجود در آنها وجود دارد [۱۱، ۱۲]. در مورد کانی‌ها در مواردی

۴. Lapis lazuli

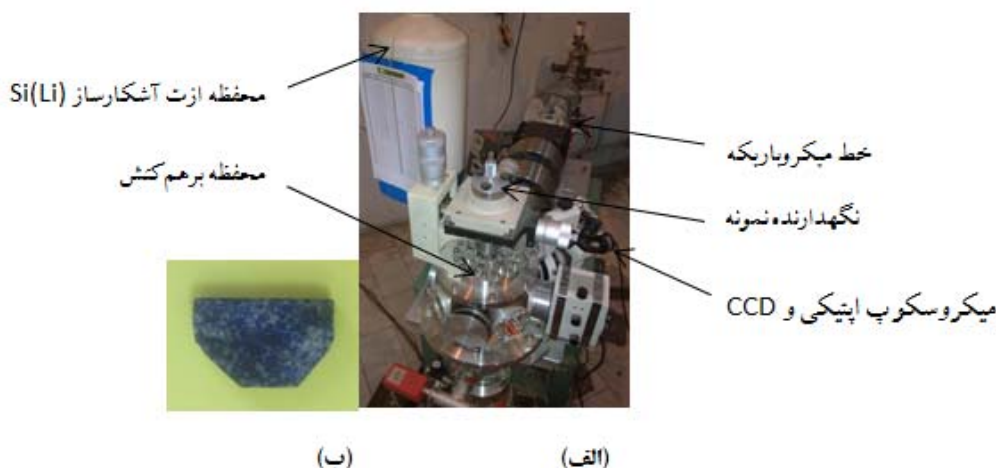
۵. Broad beam

۶. Panchromatic

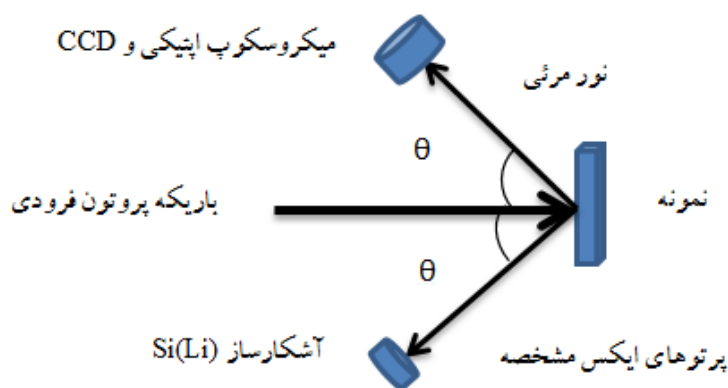
۱. Ion Beam Induced Luminescence (IBIL)

۲. Luminescent

۳. D-transition metal ions



شکل ۱. (الف) خط میکروباریکه شتابدهنده که به محفظه برهم‌کنش منتهی می‌شود. محل آشکارسازهای Si(Li) و CCD در شکل مشخص شده است. (ب) نمونه سنگ لاجورد.



شکل ۲. طرحی از ابزارآرایی و نحوه جمع‌آوری داده‌های آزمایش آبیبل ($\theta=45^\circ$). باریکه پروتون فرودی با انرژی ۲٫۷ MeV، پهنای از مرتبه ۱ keV و جریان حدود ۱ nA است که به سطحی به ابعاد $2 \times 2 \text{ mm}^2$ روی نمونه برخورد می‌کند.

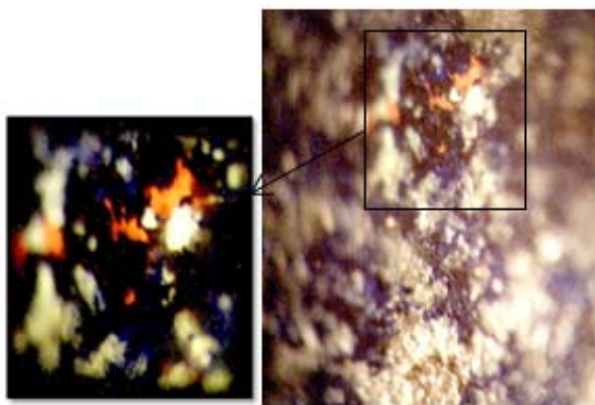
در شکل ۲ طرح ساده‌ای از چیدمان و نحوه جمع‌آوری داده‌های آزمایش نشان داده شده است.

۳. نتایج و بحث

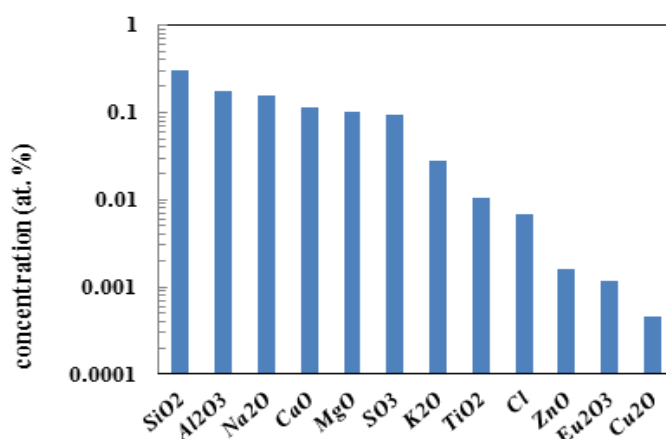
در شکل ۳ تصویر نمونه و همچنین لومینسانس تمام رنگ ناشی از برخورد باریکه پهن پروتون بر آن، در محفظه برهم‌کنش که با نور لامپ روشن شده، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که قسمت‌های مختلف نمونه در نور لامپ رنگ‌های متفاوتی دارند که نشان دهنده وجود فازهای مختلف موجود در آن است. استفاده از باریکه پهن در روش آبیبل، احتمال درهم‌آمیختن اطلاعات متناظر با قسمت‌های مختلف نمونه را از بین می‌برد. نتایج حاصل از آزمایش پیکسی، شامل نوع و غلظت نسبی

پس از نصب روی نگهدارنده در محفظه برهم‌کنش قرار داده می‌شود. برای انجام آزمایش آبیبل از باریکه پروتون با ابعاد $2 \times 2 \text{ mm}^2$ و انرژی ۲٫۷ MeV استفاده شده است. پهنای انرژی از مرتبه ۱ keV و جریان باریکه حدود ۱ nA است. تصویر آبیبل قسمت‌های مورد نظر نمونه با استفاده از میکروسکوپ اپتیکی و CCD^۱ ثبت شد. در مورد روش میکروپیکسی از باریکه پروتونی با ابعاد چند میکرومتر مربع، انرژی ۲٫۷ MeV و جریان چند ده پیکوآمپر استفاده شد. آشکارساز Si(Li) نیز برای جمع‌آوری طیف پرتوی ایکس مشخصه نمونه بکار گرفته شده است. از نرم افزارهای GUPIXWIN و OM-DAQ برای تحلیل نتایج حاصل از آزمایش میکروپیکسی استفاده شده است [۱۶].

^۱ . charge-coupled device



شکل ۳. تصویر نمونه در محفظه برهم کنش روشن. قسمتی از نمونه که در اثر برخورد باریکه پروتون گسیل لومینسانس دارد (با ابعاد حدود $2 \times 2 \text{ mm}^2$)، نشان داده شده است.



شکل ۴. ترکیب عناصر موجود در نمونه لاجورد و غلظت نسبی آنها.

بنابراین برای تمیز دادن فازهای مختلف با توجه به نقشه‌های عنصری، باید این نکته را در نظر گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده از روش‌های مشخصه‌یابی با استفاده از باریکه یونی روی نمونه سنگ لاجورد، انتظار می‌رود که این نمونه حاوی کانی‌های لازوریت^۲، دایپساید^۳، کلسیت^۴ و فلدسپار^۵ باشد که شرح آنها به ترتیب آمده است.

ترکیب شیمیایی لازوریت: $\text{Na}_6\text{Ca}_7\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}[(\text{SO}_4)]_2$; $[\text{S}; \text{Cl}; (\text{OH})]_2$ است. لازوریت در نور مرئی به رنگ آبی و یا مشتقات آن است. در شکل ۵ نقشه‌های عنصری عناصر موجود در لازوریت، که با استفاده از روش میکروپیکسی بدست

عناصر موجود در نمونه، در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که عناصر موجود در نمونه می‌توانند در طبیعت به صورت ترکیبات اکسیدی مختلفی ظاهر شوند که برای تحلیل نتایج سعی بر آن بوده که از محتمل‌ترین شکل اکسیدی آنها استفاده شود.

با استفاده از تصویر لومینسانس تمام رنگ، امکان تشخیص فازهای مختلف و چگونگی توزیع آنها در نمونه وجود دارد. اگر رنگ لومینسانس هر فاز معدنی^۱ در منابع کتابخانه‌ای موجود باشد، داده‌های آنالیز آبیبل به تنهایی برای شناخت آن کافی است، در غیر این صورت بهتر است از روش مکمل پیکسی استفاده شود. در این حالت باید توجه داشت که یک عنصر خاص می‌تواند در چندین فاز مختلف حضور داشته باشد،

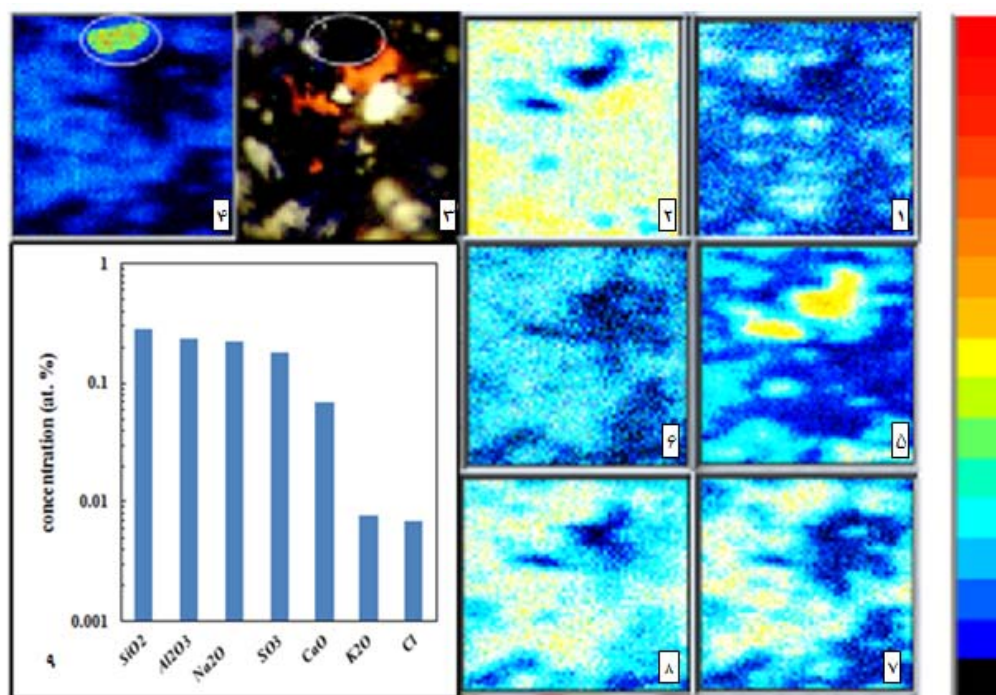
۱. Mineralogical phase

۲. Lazurite

۳. Diopside

۴. Calcite

۵. Feldspar



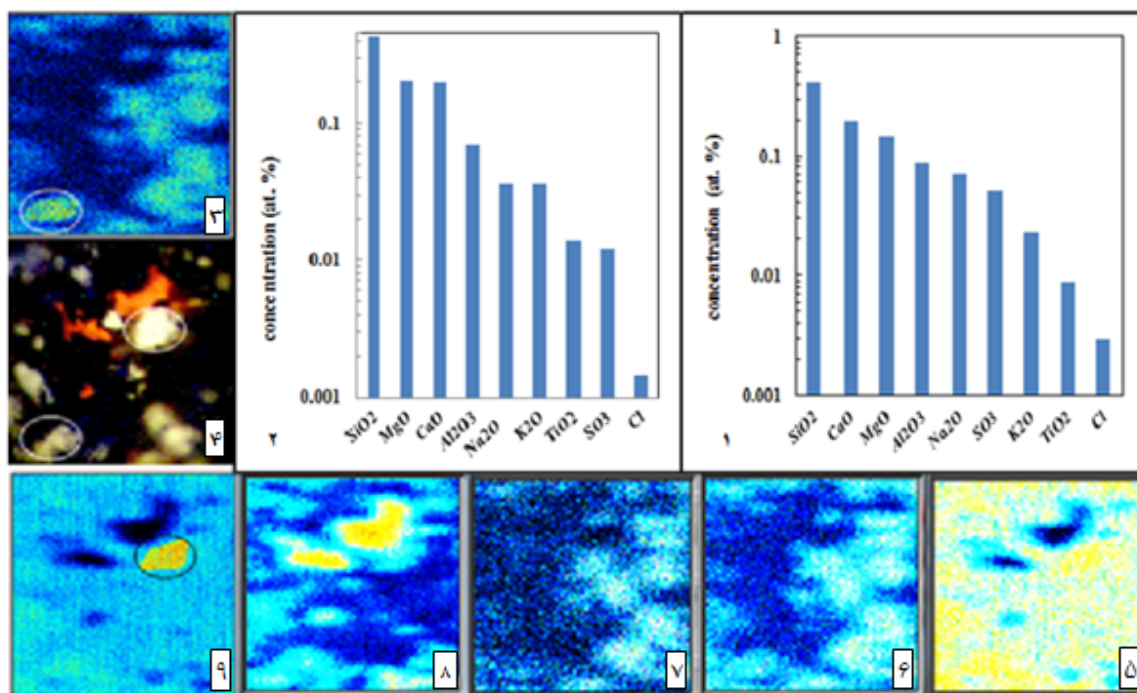
شکل ۵. نقشه‌های عنصری عناصر موجود در لازوریت (۱:Cl, ۲:Si, ۳:Ca, ۴:Na, ۵:S, ۶:Al, ۷:Fe, ۸:Mn, ۹:K). قسمت مشخص شده در طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه (۳) و در نقشه عنصری فسفر (۴)، حاوی لازوریت است. نمودار ۹ توزیع نسبی عناصر موجود در لازوریت ناحیه مشخص شده روی نقشه ۴ را نشان می‌دهد. نوار سمت راست از پایین به بالا متناظر با افزایش غلظت نسبی عناصر در نقشه‌ها است.

کاملاً با عناصر موجود در لازوریت، با توجه به فرمول شیمیایی آن، مطابقت دارد. لازم به ذکر است که H در میکروپیکسی قابل آشکارسازی نیست، بنابراین در طیف حضور ندارد. عنصری مانند K نیز که به مقدار اندک در طیف وجود دارد به عنوان آلاینده در نظر گرفته می‌شود.

کانی دایپساید با فرمول $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ در نور مری می‌تواند به رنگ‌های مختلف سبز تیره تا روشن، آبی، قهوه‌ای، بدون رنگ، سفید و خاکستری وجود داشته باشد. در شکل ۶ نقشه‌های عنصری عناصر و آلاینده‌های مهم موجود در دایپساید و طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه آورده شده است. اشتراک این نقشه‌های عنصری، توزیع دایپساید را در نمونه می‌دهد. مقایسه نقشه‌های عنصری عناصر موجود در دایپساید و طیف تمام رنگ لومینسانس، نشان می‌دهد که گسیل لومینسانس زرد و زرد مایل به سبز را باید ناشی از حضور این کانی در نمونه دانست. بنابراین با انتخاب دو قسمت زرد و زرد مایل به سبز روی طیف تمام رنگ و نواحی متناظر آنها روی نقشه‌های عنصری به ترتیب کلسیم و تیتانیوم، عناصر موجود در این نواحی بررسی

آمده‌اند، به همراه طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه آورده شده است. نوار سمت راست، از پایین به بالا نسبت افزایش غلظت با تغییر رنگ را در نقشه‌های عنصری نشان می‌دهد، بدین ترتیب که رنگ‌های گرم‌تر متناظر با غلظت‌های بالاتر هستند. اشتراک نقشه‌های عناصر موجود در لازوریت، توزیع این کانی را در نمونه می‌دهد. مقایسه نقشه‌های عنصری و طیف تمام رنگ نشان دهنده آن است که لازوریت در محدوده طیف مرئی گسیل لومینسانس ندارد. بنابراین نواحی سیاه رنگ موجود در طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه، ناشی از حضور کانی لازوریت هستند.

برای بررسی دقیق‌تر این امر قسمتی از نقشه عنصری فسفر که متناسب با ناحیه سیاه رنگ طیف لومینسانس تمام رنگ است انتخاب و طیف میکروپیکسی متناظر تحلیل شده است. لازم به ذکر است که ناحیه مورد نظر را می‌توان به دلخواه روی هر یک از نقشه‌های عنصری انتخاب نمود. نتایج حاصل از تحلیل طیف میکروپیکسی این قسمت در شکل (قسمت ۹) آورده شده است. مشاهده می‌شود که عناصر موجود در طیف میکروپیکسی



شکل ۶. نقشه‌های عنصری عناصر و آلاینده‌های اصلی مهم موجود در دایپساید (۵:Si, ۶:Ti, ۷:Mg, ۸:Ca). قسمت‌های مشخص شده در طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه ۴ و در نقشه‌های عنصری تیتانیم ۳ و کلسیم ۹، حاوی دایپساید هستند. نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب توزیع نسبی عناصر موجود در قسمت‌های زرد مایل به سبز و زرد رنگ نواحی مشخص شده روی نقشه‌های به ترتیب ۳ و ۹ را نشان می‌دهد.

غلظت‌های نسبی عناصر موجود در دو قسمت مشخص شده در طیف تمام رنگ، گسیل لومینسانس با دو رنگ زرد و زرد مایل به سبز رنگ توسط یک کانی قابل توجه است [۱۳ و ۱۵].

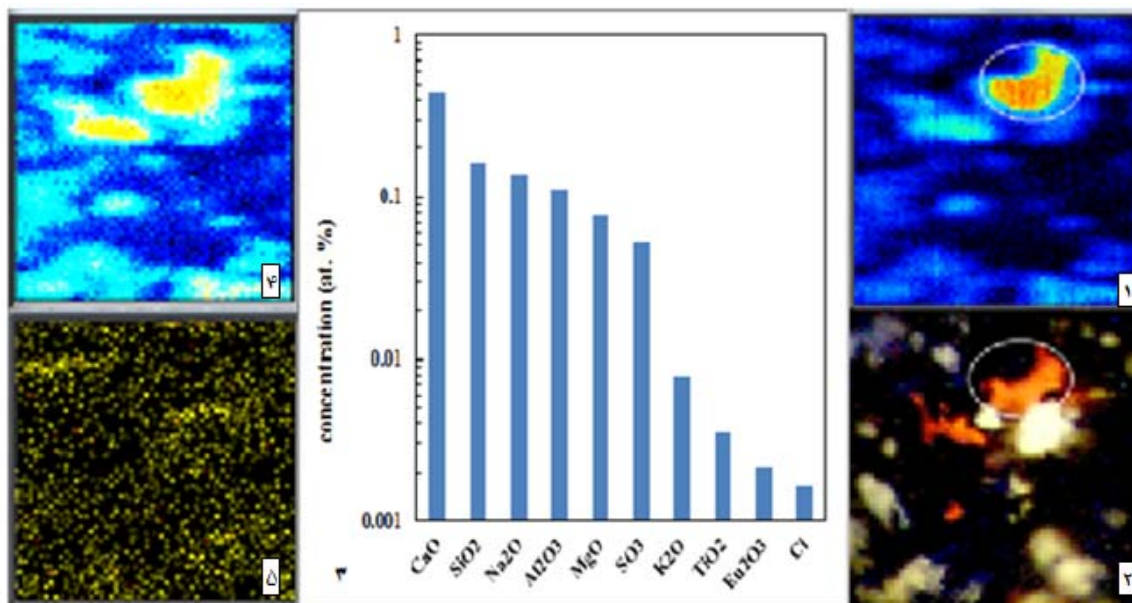
کلسیت، با ترکیب شیمیایی CaCO_3 ، در نور مرئی می‌تواند به رنگ‌های سفید، خاکستری، زرد، سبز و یا بدون رنگ ظاهر شود. در شکل ۷ نقشه‌های عنصری عناصر و آلاینده‌های مهم موجود در کلسیت، و طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه آورده شده است. لازم به ذکر است که اشتراک این نقشه‌ها توزیع کلسیت را در نمونه می‌دهد.

فراوانی نسبی عنصر میزبان Ca در کانی کلسیت به‌وضوح قابل مشاهده است. به دلیل نزدیکی مقادیر بار و شعاع یونی، خاک‌های نادر دو و سه ظرفیتی از مهم‌ترین مراکز لومینسانس جایگزین Ca^{2+} هستند. بنابراین در حالت کلی مشاهده شباهت طیف لومینسانس تمام رنگ کانی‌ها و نقشه توزیع عنصری کلسیم در آن‌ها، دور از انتظار نیست.

آلاینده Eu یکی از عناصری است که می‌توان توسط آن

شد. در شکل ۶ نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب غلظت نسبی عناصر موجود در نواحی زرد و زرد مایل به سبز را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که علاوه بر عناصر موجود در دایپساید، عناصر Al, Na, Ti, K, S, Cl نیز به عنوان آلاینده در دایپساید حضور دارند.

از میان آلاینده‌های موجود در دایپساید، عنصر تیتانیم نقش مهمی در گسیل لومینسانس دارد. در واقع خوشه‌های $n[\text{TiO}_6]$ متداول‌ترین فعال کننده این کانی لومینسان هستند. لازم به ذکر است که طول موج لومینسانس گسیلی توسط یک آلاینده لومینسان به ساختار میزبان آن بستگی دارد. بدین صورت که یک آلاینده می‌تواند در ساختارهای شبکه و محیط‌های شیمیایی مختلف، طول موج‌های گسیل نور متفاوتی داشته باشد. همچنین احتمال گسیل ضعیف لومینسانس توسط برخی دیگر از آلاینده‌های موجود در دایپساید، با توجه به غلظت نسبی عنصر و ساختار شبکه میزبان، نیز وجود دارد که می‌تواند در لومینسانس کلی مشاهده شده تأثیر گذار باشد. بنابراین با توجه به تفاوت



شکل ۷. نقشه‌های عنصری عناصر و آلاینده‌های مهم موجود در کلسیت (Ca : ۴، Eu : ۵). قسمت مشخص شده در طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه (۲) و در نقشه عنصری کلسیم (۱)، حاوی کلسیت است. نمودار ۳ توزیع نسبی عناصر موجود در کلسیت ناحیه مشخص شده روی نقشه ۱ را نشان می‌دهد.

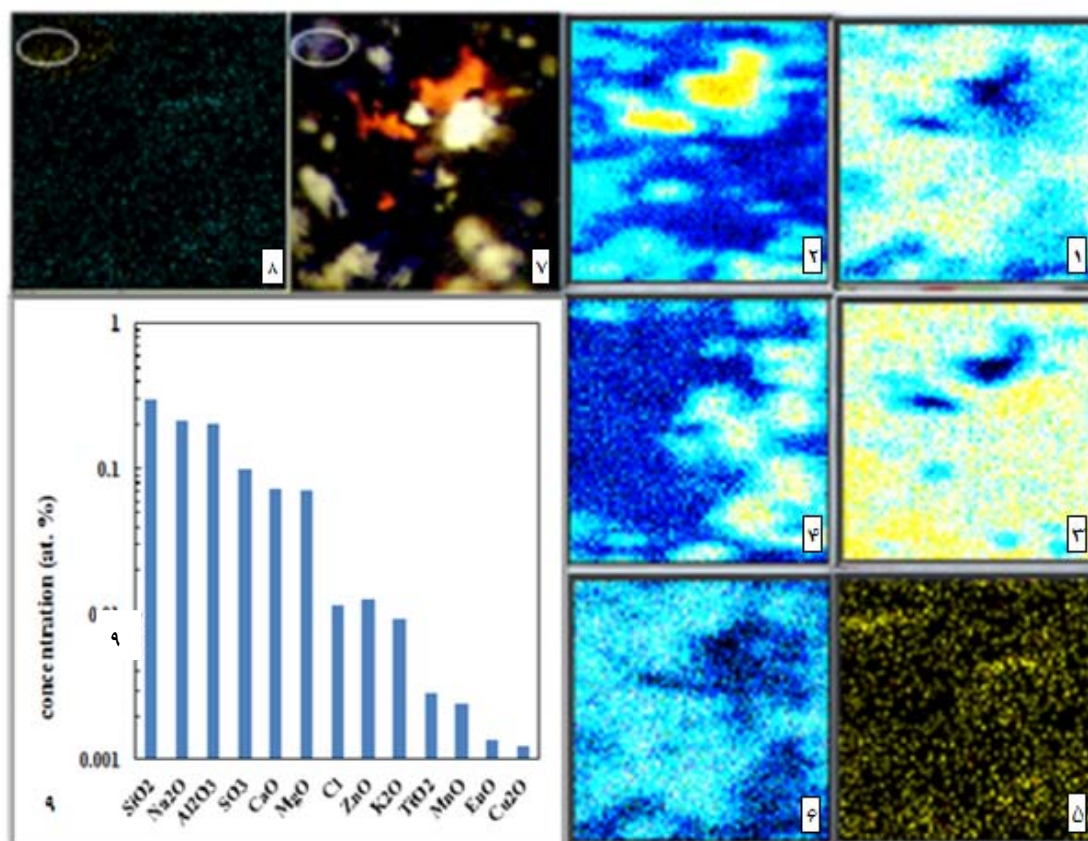
شبکه آنها توسط کاتیون‌های K^+ ، Na^+ و Ca^{2+} اشغال شده است، با فرمول‌های شیمیایی KAlSi_3O_8 ، $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ و $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ نیز در لاجورد وجود دارند. این کانی در نور مرئی می‌تواند به رنگ‌های سفید، صورتی- نارنجی و یا صورتی روشن وجود داشته باشد. در شکل ۸ نقشه‌های توزیع عنصری عناصر موجود در فلدسپار، و طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه آورده شده است. لازم به ذکر است که اشتراک این نقشه‌ها توزیع فلدسپار را در نمونه می‌دهد.

آلاینده‌های Eu^{2+} ، Eu^{3+} و Mn^{2+} از مراکز گسیل لومینسانس در فلدسپار هستند. با توجه به مقدار نسبی طول موج لومینسانس گسیلی از این کانی، نتایج میکروپیکسی این ناحیه و مقایسه با نتایج موجود در مورد لومینسانس گسیلی از این کانی، رنگ آبی روشن موجود در طیف را می‌توان به Eu^{2+} نسبت داد [۱۷]. کم مقدار بودن این آلاینده در نمونه می‌تواند دلیل ظهور مقادیر ناچیز رنگ آبی در طیف لومینسانس باشد. لازم به ذکر است که با توجه به مقدار بسیار کم منگنز موجود در نمونه، این عنصر در مشخصه‌یابی پیکسی کل سطح قابل شناسایی نبوده و بنابراین نقشه عنصری آن نیز نامشخص می‌باشد (شکل ۴).

اطلاعات بسیاری در کانی‌شناسی بدست آورد. همچنین هر دو حالت اکسیداسیون این عنصر، Eu^{2+} و Eu^{3+} ، لومینسان هستند. در کانی کلسیت Eu^{3+} یکی از فعال کننده‌های لومینسانس است که می‌توان گسیل لومینسانس نارنجی رنگ نمونه را به آن نسبت داد [۱۳، ۱۵ و ۱۷].

برای دست‌یابی به اطلاعات دقیق‌تر، قسمتی از نقشه توزیع عنصری کلسیم که متناظر با ناحیه نارنجی طیف تمام رنگ نمونه است، انتخاب و عناصر موجود در آن بررسی شدند. نمودار ۳ عناصر موجود در این ناحیه و غلظت نسبی آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، عنصر کلسیم به مقدار بسیار زیاد در این ناحیه وجود دارد. باید توجه داشت که وجود مقدار اندک آلاینده Eu در نمونه، با توجه به نمودار ۳ برای گسیل لومینسانس کافی است. لازم به ذکر است که حضور سایر آلاینده‌های موجود در کلسیت نیز می‌تواند در گسیل لومینسانس نقش داشته باشد ولی با توجه به عدم اطمینان کافی در این زمینه، در اینجا تنها به ذکر عوامل اصلی مؤثر در این پدیده بسنده شد.

کانی‌های فلدسپار که حفره‌های بزرگ و نامنظم موجود در



شکل ۸. نقشه‌های عنصری عناصر و آلاینده‌های مهم موجود در فلدسپار (۱:Al, ۲:Ca, ۳:Si, ۴:K, ۵:Eu, ۶:Na). قسمت مشخص شده در طیف لومینسانس تمام رنگ نمونه ۷ و در نقشه عنصری یوروپوم ۸ حاوی فلدسپار است. نمودار ۹ توزیع نسبی عناصر موجود در ناحیه مشخص شده روی نقشه ۸ را نشان می‌دهد.

عنوان یک خاموش‌گر عمل نموده و بنابراین از شدت لومینسانس گسیلی می‌کاهد. همان گونه که ذکر شد سنگ لاجورد و کانی‌های موجود در آن، با توجه به اهمیت تاریخی و فرهنگی، تاکنون با روش‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱ و ۱۳]. لازم به ذکر است که نتایج مشخصه‌یابی انواع مختلف سنگ لاجورد، با توجه به منشأ آن، همواره تفاوت‌هایی در جزئیات داشته که این امر خود می‌تواند منجر به کسب اطلاعات تاریخی و باستان‌شناسی مهمی گردد. در نهایت باید اشاره نمود که نتایج بدست آمده در این کار پژوهشی به خوبی با سایر نتایج موجود مطابقت دارد که این امر توانمندی روش مشخصه‌یابی ترکیبی به کار گرفته شده را نشان می‌دهد.

همچنین دودی شکل بودن لومینسانس آبی رنگ را می‌توان به آسیب ناشی از تابش‌دهی حاصل از تلاشی K-۴۰ نسبت داد. مشاهده این پدیده در طیف لومینسانس پتاسیم-فلدسپار متداول است [۱۳ و ۱۵].

برای دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر در این خصوص، قسمتی از نقشه توزیع عنصری Eu که متناظر با ناحیه آبی طیف تمام رنگ است انتخاب و عناصر موجود در آن مورد بررسی قرار گرفتند. نمودار ۹ غلظت نسبی عناصر موجود در این ناحیه را می‌دهد. مشاهده می‌شود که علاوه بر عناصر ذاتی فلدسپار، آلاینده‌های مختلفی نیز در این ناحیه وجود دارند که می‌توانند در فرایند گسیل لومینسانس مؤثر باشند. به عنوان مثال می‌توان دلیل دیگر شدت کم لومینسانس این ناحیه را به حضور عنصر مس نسبت داد. این عنصر غالباً در کانی‌ها به

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله از ترکیب روش‌های آبیبل با باریکه یونی پهن و میکروپیکسی برای مطالعه نمونه لاجورد استفاده شده است. با استفاده از روش میکروپیکسی نوع و غلظت عناصر موجود در نواحی مختلف نمونه تعیین شد. ساختار کانی‌ها و نیز عناصر کم مقدار موجود در آن‌ها، که در روش تحلیل عنصری پیکسی با دقت کافی قابل مشاهده نیستند، با روش آبیبل به صورت کیفی شناسایی و تحلیل شد. نتایج این اندازه‌گیری نشان می‌دهد که نمونه لاجورد ارزیابی شده از کانی‌های لازوریت، دایپساید، کلسیت و فلدسپار تشکیل شده که سه مورد آخر، به دلیل دارا بودن خاک‌های نادر با مقادیر ناچیز، لومینسان هستند.

لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده به خوبی در توافق با نتایج سایر مطالعات موجود روی سنگ لاجورد است. با این حال انتظار می‌رود که با فراهم نمودن امکان استفاده از سایر روش‌های مشخصه‌یابی با استفاده از باریکه یونی، به صورت همزمان با روش‌های موجود، بتوان به دامنه وسیع‌تری از

مراجع

اطلاعات در مورد نمونه‌ها دست یافت و همچنین دقت تحلیل نتایج را بهبود بخشید.

تکامل روش آبیبل به لحاظ ابزاری و نیز توسعه دانش جهت استفاده از ظرفیت‌های این روش، در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در حال انجام است. با توجه به محدودیت‌های موجود، نتایج مشخصه‌یابی آبیبل تنها به صورت کیفی ارائه شده است. استفاده از ابزارهای مکملی چون اسپکترومتر می‌تواند زمینه تحلیل کمی نتایج را نیز فراهم سازد. مقدار دقیق طول موج‌های گسیل شده، عناصر لومینسان متناظر با هر طول موج، شدت طول موج‌های گسیلی و رابطه آن با غلظت عناصر موجود در نمونه، از مواردی هستند که در تحلیل کمی نتایج آبیبل قابل دست‌یابی هستند.

قدردانی

لازم است که از کارکنان محترم آزمایشگاه که طی انجام آزمایش‌ها صبورانه با ما همکاری نمودند تشکر کنیم.

- Journal of Physics Research* **13** (2013) 235.
11. A Lo Giudice, A Rse, D Angelici, S Calusi, N Gelli, L Giuntini, M Massi, and G Pratesi, *Anal. Bioanal. Chem.* **404** (2012) 277.
 12. J L Ruvalcaba-Sil, L Manzanilla, E Melgar, and R Lozano Santa Cruz, *X-Ray Spectrom.* **37** (2008) 96.
 13. M Gaft, R Reisfeld, and G Panczer, "Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials", Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2005).
 14. T Calligaro, Y Coquinot, L Pichon, G Pierrat-Bonnefois, P de Campos, A Re, and D Angelici, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **318** (2014) 139.
 15. A Lo Giudice, A Re, D Angelici, S Calusi, N Gelli, L Giuntini, M Massi, and G Pratesi, *Anal. Bioanal. Chem.* **404** (2012) 277.
 16. J L Campbell, "GUPIXWIN, PIXE Spectra Analysis Computer Package", University of Guelph, Canada (2008).
 17. <http://www.csiro.au/luminescence>.

1. Y Q Wang and M Nastasi, *Material Research Society (MRS)*, Warrendale, Pennsylvania (2009).
2. K G Malmqvist, M Elfman, G Remond, and C Yang, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **109/110** (1996) 227.
3. N P -O Homman, C Yang, and K G Malmqvist, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **353** (1994) 610.
4. W Kada, A Yokoyama, M Koka, T Satoh, and T Kamiya, *Int. J. PIXE* **21** (2011) 1.
5. J R Huddle, P G Grant, A R Ludington, and R L Foster, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **261** (2007) 475.
6. C Yang, N. P -O Larsson, E Swietlicki, K G Malmqvist, D N Jamieson, and C G Ryan, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **77** (1993) 188.
7. T Calderon, *Revista Mexicana de Fisica* **S 54** (2008) 21.
8. P D Townsend, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **286** (2012) 35.
9. P D Townsend, M Khanlary, and D E Hole, *Surf. Coat. Tech.* **201** (2007) 8160.
10. F Torkzadeh, S S Amini, M Fugger, *Iranian*