

آنالیز عنصری لباس نقاشی شده متعلق به دوره زندیه با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون

داوود آقاعلی گل^۱، نسرين جاويدنيا^۲، پروين اوليائي^۱، علي باقي زاده^۱، مرضيه خطيب زاده^۲، فرح شكوهي^۱، مهناز عبدالله خان گرجي^۱، محمد لامعي رشتي^۱

چکیده

در این مقاله، آنالیز کمی قسمت‌های مختلفی از یک لباس قدیمی نقاشی شده مربوط به دوره زندیه با استفاده از روش میکرو-پیکسی بررسی شده است. هدف از این آنالیز مشخص کردن عناصر کم مقدار به کار رفته در رنگ آمیزی این لباس قدیمی است. در این لباس نقاشی شده رنگ‌های مختلفی مانند رنگ قرمز، مشکی، طلایی، بنفش، آبی و کرم به کار رفته است. با استفاده از نتایج این آنالیزها می‌توان نوع رنگ‌های به کار رفته در لباس را مشخص و قسمتهایی از لباس را که دچار آسیب شده است مرمت کرد. نتایج به دست آمده از آنالیز عنصری نشان می‌دهد که رنگ قرمز از عناصر گوگرد (S) و جیوه (Hg)، رنگ مشکی از عناصر سیلیسیم (Si)، کلسیم (Ca) و پتاسیم (K)، رنگ بنفش از عناصر گوگرد و جیوه و رنگ آبی از عناصر آلومینیم (Al) و کلسیم تشکیل شده است. همچنین نتایج به دست آمده از آنالیز میکروپیکسی با نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از این مقایسه نشان می‌دهد که میکروسکوپ روبشی پروتون ابزاری بسیار توانمند برای آنالیز عنصری و بسیار کاراتر از میکروسکوپ الکترونی است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز عنصری، میکروسکوپ روبشی پروتون، مرمت، لباس قدیمی، میکروسکوپ الکترونی

درآمد

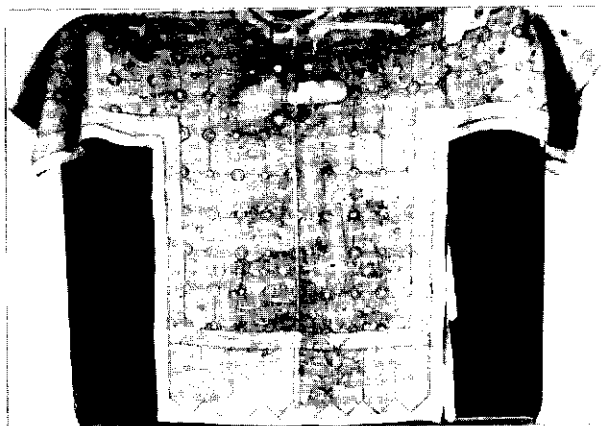
پیراهن حاجات، پیراهن آیینی است که به علت تحول عمیق

افکار و اعتقادات مردم پس از ظهور اسلام و خصوصاً رسمی شدن مذهب شیعه در دوره صفویه، در شکل‌های متفاوت تهیه شده است (کریم‌زاده تبریزی ۱۳۷۰). موارد مصرف این گونه البسه بنا بر آیات و ادعیه‌ای که بر آن نوشته می‌شود مشخص می‌شود (فلسفی ۱۳۷۱). کتیبه سنه موجود در این اثر تاریخی نشان می‌دهد که این پیراهن، مربوط به دوره زندیه (۱۱۸۵ هجری قمری) همزمان با سلطنت کریم‌خان زند است. در این لباس تزئیناتی به صورت نقاشی و نوشتاری به سبک خطاطی به این صورت وجود دارد: تمام سطح پیراهن شامل جدول کشی‌هایی به صورت مربع و پنج ضلعی، حاوی صد و چهارده سوره قرآن کریم است. همچنین جدول کشی‌ها در محیط اطراف آیات، نواری را ایجاد کرده‌اند که در آن اسماء مبارک پروردگار، و در پس زمینه آن دعای جوشن کبیر شکل گرفته است. همچنین کلمه «یا علی» که آن نیز یکی از نامهای خداوند است در سراسر لباس، در میان دوایری هم‌مرکز، بیش از دویست بار، به‌طور منظم تکرار شده است. نحوه کاربرد رنگها در این اثر تاریخی، زیبایی آن را دو چندان کرده است. این رنگ‌ها شامل: مرکب سیاه که کلیه متن قرآن با آن نوشته شده، رنگ طلایی به‌طور گسترده در اسماء خداوند، رنگ قرمز در متن کامل دعای جوشن کبیر، بخشی از ذکر «یا علی» با رنگ آبی و به‌صورت محدودی در برخی از نقوش از رنگ ارغوانی استفاده شده است. این رنگ‌ها در سایر تزئینات نیز تکرار می‌شود (جاوید نیا ۱۳۸۴). تصویری از این پیراهن‌حاجات که نمونه‌های آنالیز شده از قسمت‌های مختلف آن انتخاب شده است در شکل (۱) نشان داده شده است. مراحل حفاظت و مرمت این اثر در سال ۱۳۸۴



کرد و توزیع عناصر مربوط به هر نقطه را به دست آورد (Bird and Williams 1989). به این ترتیب تصویری از توزیع هر عنصر در نمونه به دست می‌آید. از این روست که این دستگاه را میکروسکوپ روبشی پروتون نامیده‌اند.

برای ایجاد باریکه میکرونی، توسط یک دیافراگم شی و یک دیافراگم هم‌راستاگر، قطر باریکه را به کمتر از 0.9 میلیمتر کاهش می‌دهیم. سپس باریکه حاصل توسط سه عدسی از نوع چهارقطبی مغناطیسی به قطری کمتر از 10 میکرون تبدیل می‌شود. همچنین برای روبش سطح نمونه توسط باریکه میکرونی در دو راستای X و Y از سیم‌پیچهای الکترو مغناطیسی که قبل از عدسی‌های کانونی کننده قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. برای نمایش توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونه به صورت یک تصویر دو بعدی، بازه مناسبی از انرژی را، که متناظر با عنصری خاص است، در طیف حاصل از آنالیز انتخاب می‌کنیم. سپس

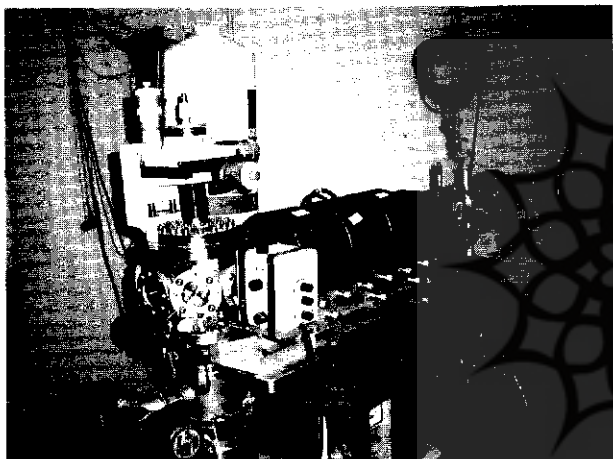


شکل (۱). تصویری از پیراهن حاجات که نمونه‌های آنالیز شده از قسمت‌های مختلف آن انتخاب شده است.

در بخش حفاظت و مرمت موزه ملی ایران انجام، و جهت نگهداری به انبار بخش اسلامی موزه ملی انتقال داده شد. مرمت و بازسازی این اثر تاریخی به آنالیز عنصری رنگ‌های به کار رفته در نمونه نیاز داشت که تمام آنالیز عنصری مربوط به این پروژه در آزمایشگاه واندوگراف سازمان انرژی اتمی ایران با استفاده از روش آنالیز میکروپیکسی انجام شده است.

روش میکروپیکسی

آنالیز عنصری به روش پیکسی یکی از روش‌های متداول در آنالیز عنصری مواد است. پیکسی یا «گسیل پرتو X بر اثر تابش پروتون» روش توان‌مندی برای آنالیز غیرمخرب، سریع و بس عنصری نمونه‌های مختلف، از جمله نمونه‌های باستان‌شناسی است (Johansson 1995). در این روش آنالیز، نمونه مورد بررسی تحت تابش پروتون با انرژی $2-3\text{ MeV}$ قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با الکترونهای اتم‌های هدف، پرتوهای X مشخصه‌ای گسیل می‌شود که انرژی پرتوهای X، نوع عناصر موجود در نمونه را مشخص می‌کند و تعداد پرتوهای X با انرژی معین، غلظت عناصر موجود در نمونه را مشخص می‌کند. باریکه مورد استفاده در پیکسی متداول، ابعادی در حدود 2×2 میلیمتر مربع دارد. اما با استفاده از عدسی‌های الکترو مغناطیسی می‌توان قطر باریکه مورد استفاده در آنالیز را به کمتر از چند میکرون رساند. با استفاده از باریکه میکرونی از پروتون می‌توان توانایی‌ها و قابلیت‌های آنالیز عنصری روش پیکسی را به میزان زیادی افزایش داد. آنالیز مواد با استفاده از باریکه یونی میکرونی، روش میکروپیکسی نامیده می‌شود. با توجه به اندازه کوچک باریکه پروتون، با این روش آنالیز می‌توان فقط یک نقطه از نمونه را آنالیز کرد. همچنین می‌توان سطح نمونه را توسط باریکه میکرونی پروتون جاروب (اسکن)



شکل (۲). عکس دستگاه تولید باریکه میکرونی پروتون و آشکارساز اندازه گیری پرتو X.

باریکه کانونی شده سطح نمونه را در راستای X و Y جاروب می‌کند. مکان اشعه X مشخصه گسیل شده از نمونه، توسط آشکارساز بصورت تابعی از مکان باریکه در روی نمونه ثبت می‌شود و تصویر توزیع عنصری را ایجاد می‌کند (Bird and Williams 1989). تصویر کلی از قسمت‌های مختلف سیستم باریکه میکرونی در شکل (۲) نشان داده شده است.

شرایط آزمایش

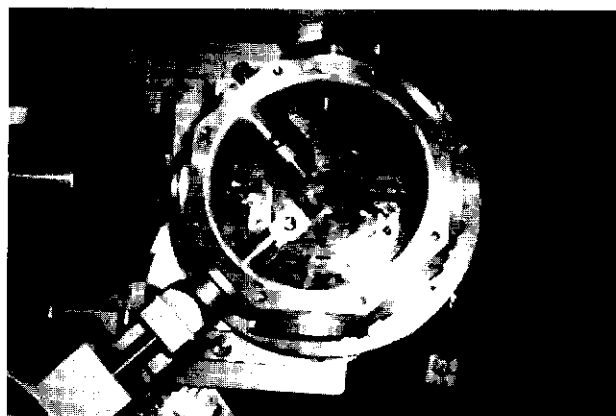
در این پژوهش از باریکه پروتون با انرژی 2 MeV و MeV $2/2$ و جریان باریکه‌ای در حدود $30-50\text{ pA}$ استفاده شده است که توسط شتاب دهنده واندوگراف 3 MV آزمایشگاه واندوگراف

همچنین آشکارساز سد سطحی که در پشت نمونه قرار داده شده است، پروتون‌هایی را که از نمونه عبور کرده‌اند آشکار می‌کند و ضخامت نمونه و ساختار آن را از نظر چگالی مشخص می‌سازد.

نتایج تجربی

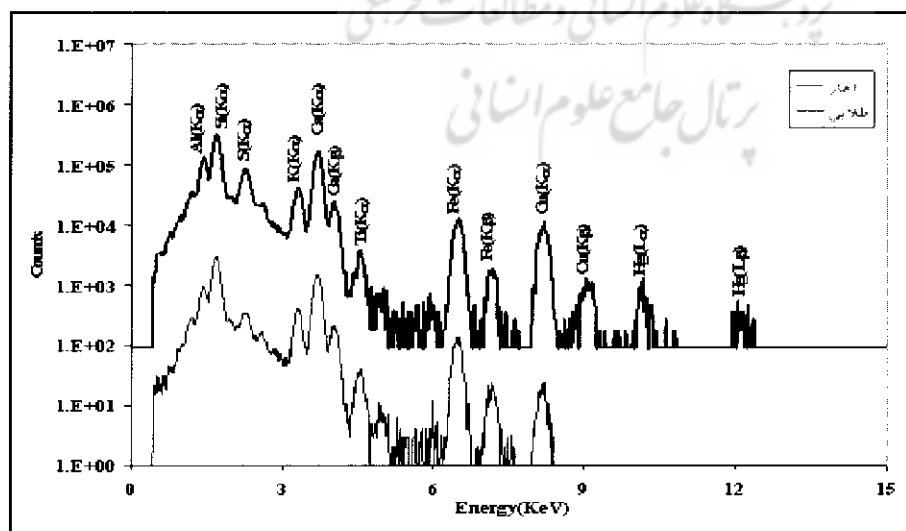
در این پژوهش از قسمت‌های مختلف این لباس قدیمی برای آنالیز عنصری نمونه‌برداری شده است. نمونه‌برداری به گونه‌ای انجام گرفته که رنگ‌های مختلفی که در تزئین این لباس به کار رفته‌اند آنالیز شوند. در این جا برخی از نتایج به دست آمده از آنالیز عنصری این نمونه‌ها با استفاده از روش میکروپیکسی ارائه شده است. در شکل (۴) توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در نمونه شماره ۱ برای ناحیه‌ای که با مربع مشخص شده است نشان داده شده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده $2/5 \times 2/5$ میلیمتر است. همچنین تصویر ایجاد شده توسط ذرات عبوری از این نمونه نیز در این شکل نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که سمت چپ تصاویر ایجاد شده در توزیع عناصر، مربوط به رنگ قرمز پارچه و سمت راست این تصاویر مربوط به رنگ مشکی است.

همان طور که در شکل (۴) دیده می‌شود رنگ قرمز پارچه از عناصر گوگرد (S) و جیوه (Hg) تشکیل شده است، زیرا تنها در قسمتی از ناحیه آنالیز که رنگ قرمز وجود دارد عنصر جیوه و گوگرد به مقدار فراوان دیده می‌شود. همچنین در قسمتی از ناحیه آنالیز که رنگ مشکی وجود دارد عناصری مانند سیلیسیم (Si)، کلسیم (Ca) و پتاسیم (K) مقادیر بیشتری نسبت به دیگر نواحی آنالیز دارند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مرکب مشکی از عناصری مانند سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم تشکیل شده است. در شکل (۵) نیز توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در



شکل (۳). تصویری از قسمت‌های مختلف محفظه آزمایش سیستم میکروپیکسی در این شکل نشان داده شده است: ۱- چهار قطبی مغناطیسی؛ ۲- محل ورود باریکه به محفظه آزمایش؛ ۳- آشکارساز Si(Li) برای آشکارسازی X- مشخصه؛ ۴- آشکارساز سد سطحی برای آشکارسازی ذرات برگشتی از نمونه؛ ۵- آشکارساز سد سطحی برای آشکارسازی ذرات عبوری از نمونه؛ ۶- میکروسکوپ اپتیکی؛ ۷- محل قرار گرفتن نمونه

سازمان انرژی اتمی ایران تولید می‌شود. قطر باریکه پروتون در این آزمایش در حدود ۱۰ میکرون است. برای آشکارسازی اشعه X از آشکارساز Si(Li) که در زاویه 135° درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته است و دارای قدرت تفکیک 150eV برای Fe(K) است، استفاده شده است. همچنین برای آشکارسازی ذرات عبوری از نمونه نیز از آشکارساز سد سطحی که پشت نمونه در زاویه 20° درجه نسبت به باریکه قرار گرفته است استفاده شده است. نمایی از اتافک آزمایش میکروپیکسی در شکل (۳) نشان داده شده است که تجهیزات مختلف استفاده شده در آن مشخص شده‌اند. به این ترتیب، آشکارساز Si(Li)، پرتوهای X گسیلی از نمونه را آشکار و عناصر تشکیل دهنده آن را مشخص می‌کند.

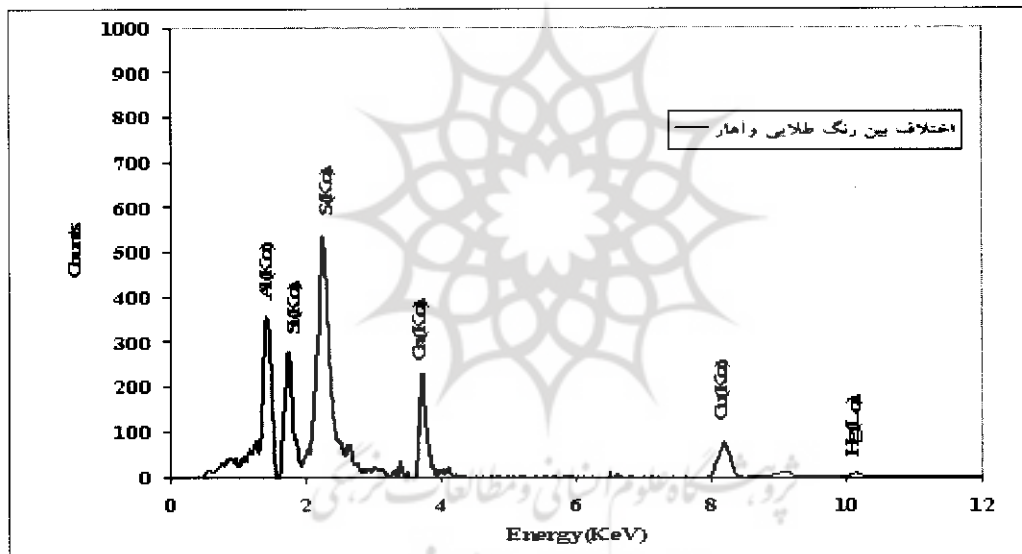


شکل ۶ (الف)

شکل (۶). الف: مقایسه طیف‌های به دست آمده از آهار (بدون رنگ) و ناحیه دارای رنگ طلایی مربوط به نمونه شماره ۵ در این شکل نشان داده شده است. ب: اختلاف موجود در عناصر بین رنگ طلایی و آهار هم در قسمت (ب) نشان داده شده است.

عناصر	رنگ مشکی	رنگ قرمز	رنگ بنفش	رنگ کرم	رنگ آبی	رنگ طلایی	آहार
Mg	۲۸/۴	۵/۳۸	۶/۲۶	۳/۴۱	۴۳	۹/۴۱	۵/۳۰
Al	۷/۱۱۶	۱/۱۵۴	۹/۱۳۹	۱۵۴	۱/۲۲۳	۱/۱۶۷	۸/۱۰۶
Si	۹/۳۸۰	۳/۴۹۱	۳۴۷	۲/۳۸۱	۵/۴۶۵	۱/۳۸۵	۷/۳۵۳
S	۱/۵۱	۴/۱۸۳۴	۴/۱۰۵۹	۲/۴۹	۴/۱۰۴	۵/۱۱۰	۸/۳۳
Cl	۱/۱۵	-	۳/۳۴	۲/۲۵	۱/۱۳	۲/۲۰	۸/۱۲
K	۵/۱۰۷	۶/۱۰۷	۵/۱۰۷	۵/۱۰۷	۵/۱۰۷	۵/۱۰۷	۵/۱۰۷
Ca	۲/۵۵۸	۶۱۲	۶/۵۸۰	۲/۴۵۷	۳/۱۳۹۷	۴/۵۸۵	۵/۵۱۱
Ti	۲/۲۴	-	۳/۱۵	۲/۱۶	۲/۲۱	۶/۱۹	۱/۲۳
Mn	-	-	-	-	۹/۸	-	-
Fe	۲/۲۵۷	۸/۲۸۹	۲/۱۹۶	۲۲۵	۶/۲۶۴	۹/۲۲۰	۷/۲۲۷
Cu	۶/۱۱۹	۷/۳۹۱	۸/۹۰	۳/۱۰۸	۵/۵۱	۶/۳۴۷	۷۱
Hg	-	۹/۲۵۲۷۵	۴/۱۲۴۵۴	-	۵/۱۵۳	۸/۱۸۷	-

جدول (۱). نتایج به دست آمده از آنالیز کمی نسبی رنگ‌های مختلف در این جدول ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در اینجا نسبت به مقدار پتاسیم که در تمام نمونه‌ها تقریباً یکسان بوده است، سنجیده شده است.



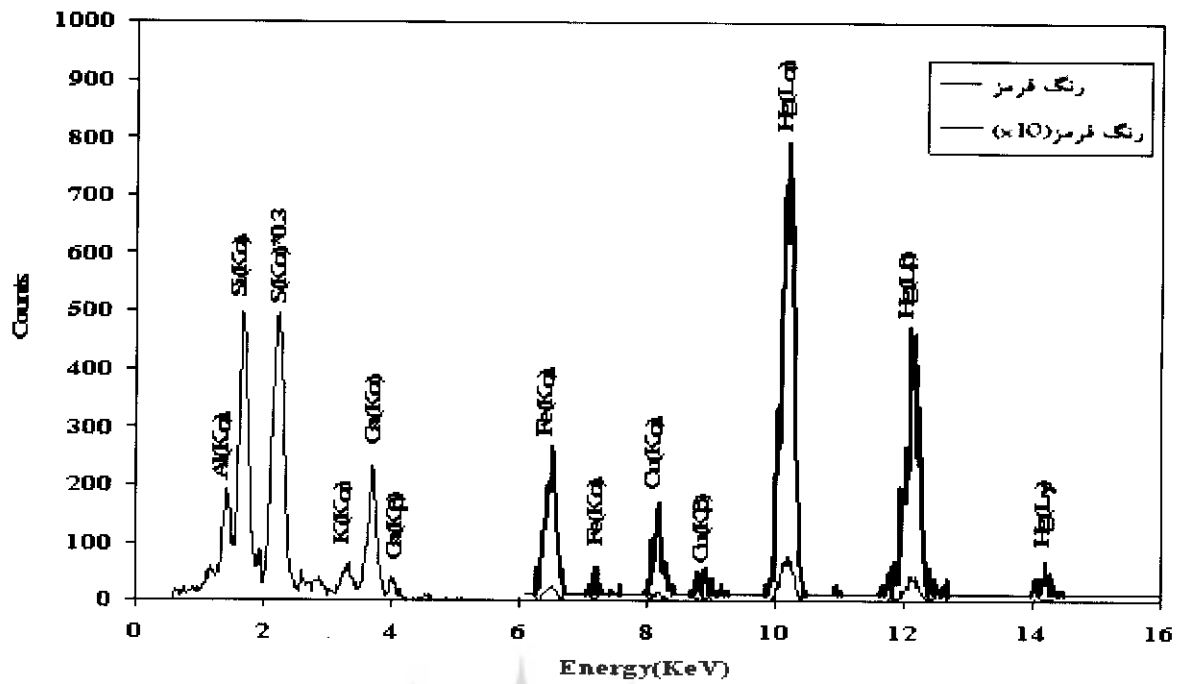
شکل ۶ (ب)

مس و جیوه عنصری هستند که رنگ طلایی به‌طور عمده از آن‌ها تشکیل شده است. همچنین مقایسه عناصر موجود در آहार و رنگ طلایی در شکل (۶) نمایش داده شده است که نشان می‌دهد رنگ طلایی علاوه بر عناصر ذکر شده شامل عناصر دیگری مانند آلومینیم، سیلیسیم و کلسیم نیز می‌باشد.

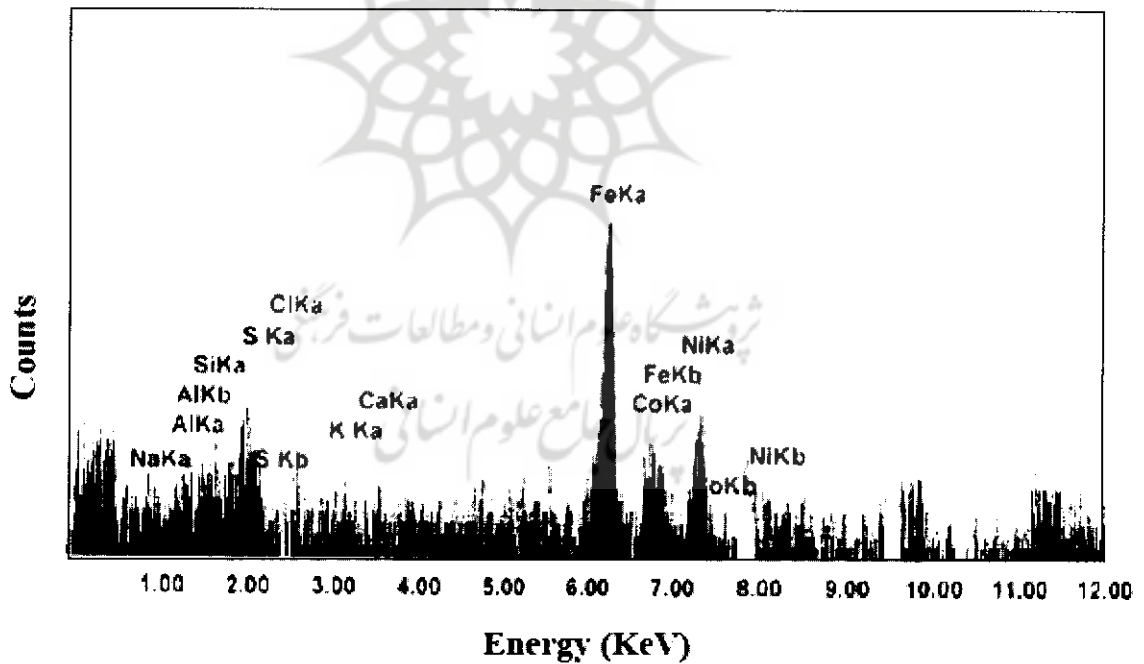
در شکل (۷) نیز نتایج به دست آمده از روش آنالیز میکروپیکسی و میکروسکوپ روبشی الکترون (SEM) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل (۷ الف) طیف به دست آمده از قسمت قرمز رنگ نمونه شماره ۱ نشان داده شده است. در این شکل برای وضوح بیشتر

نمونه شماره ۵ که دارای رنگ طلایی است، نشان داده شده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده $2/5 \times 2/5$ میلی‌متر است. همچنین تصویر ایجاد شده توسط ذرات عبوری از این نمونه نیز در این شکل نشان داده شده است که بافت پارچه را به خوبی نشان می‌دهد و از روی این شکل یکسان نبودن ضخامت الیاف به کار رفته به خوبی دیده می‌شود.

در شکل (۶ الف) طیف‌های به دست آمده از رنگ طلایی پارچه با پارچه بدون رنگ (آहार) مقایسه شده است. همان‌طور که از مقایسه این طیف‌ها دیده می‌شود، عنصری مانند گوگرد،



شکل ۷ الف)



شکل ۷ ب)

شکل ۷ الف): طیف به دست آمده از آنالیز نمونه شماره ۱ با رنگ قرمز با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون که بخش انرژی بیشتر از 6KeV طیف به منظور وضوح بیشتر در ۱۰ ضرب شده است. ب: طیف به دست آمده از آنالیز نمونه شماره ۱ با رنگ قرمز با استفاده از میکروسکوپ روبشی الکترون.

در نشان دادن عناصری مانند آهن، مس و جیوه طیف به دست آمده را در عدد ۱۰ ضرب کرده‌ایم. همچنین در شکل (۷ ب) طیف به دست آمده از این نمونه با استفاده از میکروسکوپ روبشی الکترون نشان داده شده است.

همان‌طور که از مقایسه شکل‌ها مشخص است، در آنالیز با میکروسکوپ الکترونی به هیچ وجه عناصری مانند آلومینیم، سیلیسیم، گوگرد، پتاسیم و کلسیم دیده نشده است. در حالی که با میکروسکوپ روبشی پروتون تمام عناصر مذکور به وضوح مشخص و اندازه‌گیری شده است. همچنین طیف به دست آمده از این نمونه برای عناصر سنگین‌تر نیز نشان می‌دهد که این عناصر نیز با دقت بسیار خوبی در مقایسه با روش میکروسکوپ روبشی الکترون اندازه‌گیری شده‌اند.

نتیجه

با استفاده از این روش آنالیز، قسمت‌های مختلفی از لباس که دارای رنگ‌های مختلفی بودند، آنالیز شدند. این رنگ‌ها عبارت‌اند از: قرمز، مشکی، طلایی، بنفش، آبی و کرم. عناصر تشکیل دهنده هر کدام از این رنگ‌ها با استفاده از نرم‌افزار (Maxwell, et al 1989 GUPIX) به صورت کمی محاسبه شده‌اند که نتایج به دست آمده، در جدول (۱) نشان داده شده است. مقدار فراوانی عناصر، به صورت کمی ولی نسبی در هر رنگ ارائه شده است و برای این که مقایسه بین رنگ‌ها امکان پذیر شود، فراوانی پتاسیم که تقریباً در همه نمونه‌ها یکسان بوده مقدار ثابتی

فرض شده و فراوانی بقیه عناصر با آن سنجیده شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، رنگ قرمز از عناصر گوگرد و جیوه تشکیل شده است زیرا مقادیر این عناصر در مقایسه با مقادیر آنها در آهار (پارچه بدون رنگ) اختلاف بسیار زیادی دارند. رنگ طلایی نیز از عناصر گوگرد، مس و جیوه تشکیل شده است. همچنین رنگ بنفش نیز دارای عناصری مانند گوگرد، کلسیم و جیوه است. بنابراین با توجه به عناصر موجود در هر یک از رنگ‌ها، می‌توان نوع ماده‌ای که در نقاشی پارچه از آن استفاده شده است را مشخص کرد. به عنوان مثال مشخص می‌شود که برای تهیه رنگ قرمز از ماده‌ای به نام شن‌گرف که ترکیب سولفید جیوه (HgS) است (جتنتز و استات ۱۳۷۸، وولف ۱۳۷۲) استفاده شده است. از این نتایج در مرمت و بازسازی قسمت‌هایی از لباس که دچار آسیب شده بود استفاده زیادی شده است. همچنین این نتایج نشان دادند که آنالیز با روش میکروپیکسی می‌تواند روش بسیار توانمندی در این زمینه باشد که قادر است عناصر تشکیل دهنده این گونه از نمونه‌ها را با دقت بسیار بالایی تعیین نماید.

سپاسگزاری

لازم است که در پایان از آقای دکتر سید علی موسوی بهبهانی، رئیس بخش فیزیک هسته‌ای و همچنین تکنیسین‌های آزمایشگاه واندوگراف آقایان بیژن موحد، محمد فرمehینی فراهانی و محمود مرادی که در طول راه‌اندازی سیستم میکروپیکسی و انجام آزمایش‌ها کمال همکاری را با ما داشته‌اند، تشکر و قدردانی کنیم.

کتابنامه

- کریم زاده تبریزی، محمد علی
۱۳۷۰ احوال و آثار نقاشان قدیم ایران و برخی از مشاهیر نگارگر هند و عثمانی، جلد سوم، انتشارات ساتراپ، لندن.
هانس ای، وولف
۱۳۷۲ صنایع دستی کهن ایران، ترجمه: سیروس ابراهیم زاده، انتشارات و آموزش انقلاب اسلامی، تهران.

الف) فارسی:

- جاوید نیا، نسرین
۱۳۸۴ حفاظت پیراهن منسوب به نادعلی متعلق به دوره صفویه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان، دانشکده مرمت.
جتنتز، آر. جی و استات، جی. ال
۱۳۷۸ فرهنگ فشرده رنگدانه‌های هنری، ترجمه: حمید فرهمند بروجنی، فلسفی، نصرالله
۱۳۷۱ زندگانی شاه عباس اول، جلد سوم، چاپ پنجم، انتشارات علمی.

ب) غیر فارسی:

- Bird, J.R. and Williams, J.S.
1989 *Ion Beam For Materials Analysis* Academic Press Australia
Johansson, E.S.
1995 *Particle Induced X-Ray Emission Spectrometry (PIXE)* John Wiley and Sons Inc.

- Maxwell, J.A., Campbell, L.A. and Teesdle, W
1989 *Nucl. Instr. And Meth.* B 43, p.218.

