

مطالعه ترکیب سفال کلینکی دوره اشکانی منطقه همدان با استفاده از سه روش: XRF، PIXE و XRD با هدف تعیین میزان تشابه و تمایز

یعقوب محمدی فر

دانشیار گروه باستان‌شناسی - دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

Mohamadifar@basu.ac.ir

احمدعلی عرب

دانش آوخته‌ی کارشناسی ارشد باستان‌شناسی - دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۸، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۴/۲۵

(از ص ۵۷ تا ۷۶)

چکیده

در این مقاله تعداد ۱۶ قطعه سفال کلینکی شاخص دوره‌ی اشکانی در نیمه غربی مرزهای کنونی ایران با استفاده از سه روش: XRF، PIXE و XRD مورد مطالعه قرار گرفته است. این سفال‌های کلینکی از هشت محوطه اشکانی در منطقه همدان که یکی از منطقه‌های توزیع این‌گونه سفال در بخش شرقی زاگرس مرکزی بوده، در طی بررسی‌های میدانی جمع‌آوری شده و مورد مطالعه قرار گرفت. آنالیز و بررسی ترکیب سفال کلینکی با استفاده از روش‌های سه‌گانه فوق‌تبارج قابل توجهی در ارتباط با نوع ترکیب و درصد عناصر موجود در آن، نحوه و تکنیک پخت و میزان حرارت مورد نیاز کوره در فرآیند تولید این‌گونه سفال در اختیار ما می‌گذارد. وجود سه ترکیب CaO ، Al_2O_3 ، SiO_2 دلیلی بر استفاده از خاک‌های آهکی و خاک‌های حاصل از سنگ‌های دگرگونی است که با زون ساختاری (زون ساختاری سنندج - سیرجان و زون ساختاری ایران مرکزی) منطقه مورد مطالعه قابل مقایسه بوده و شاید بتوان آن‌ها را به منطقه مذکور متعلق دانست. با توجه به تشابه میان ترکیبات زون ساختاری سنندج - سیرجان و ترکیب سفال‌های مورد مطالعه می‌توان احتمال داد که این داده‌های سفالین به‌صورت بومی (محلی) و با استفاده از گل حاصل از خاک موجود در منطقه تهیه گردیده‌اند. وجود CaO در نتایج حاصل از آزمایشات خود عامل محرزی بر وجود کلسیت ($CaCO_3$) است. با توجه به این‌که تجزیه کلسیت و حصول CaO از آن به دمایی ما بین ۶۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد می‌توان دمای مورد نیاز برای پخت سفال کلینکی را از دمای ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد دانست. وجود ترکیباتی چون هماتیت (Fe_2O_3) در ارتباط با عمل اکسیداسیون و هم‌چنین فازهای وستیت (FeO)، مگنتیت و آنورتیت در رابطه با ایجاد شرایط احیا به‌خوبی تأثیر احیا و اکسیداسیون را در نحوه‌ی پخت سفال کلینکی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: سفال کلینکی، دوره‌ی اشکانی، روش PIXE، روش XRD، روش XRF.

مقدمه

دوره اشکانی یکی از دوره‌های تاریخی سرزمین کهن ایران است. این دوران با بهار ۲۴۷ ق.م شروع می‌شود، اما با اطمینان نمی‌توان گفت که این دوران به کدام مبدأ و به کدام رویداد باز می‌گردد (شیپمان، ۱۳۸۴: ۲۶). دوران اشکانی از فراز و نشیب‌های فراوانی برخوردار است که اشاره به آن‌ها از حوصله بحث خارج است. در اواخر این دوران بحرانی، با وجود هرج و مرج داخلی و تهدید شدید روم از خارج یک‌بار دیگر برای تاج و تخت، دو مدعی پیدا شد (محمدی‌فر، ۱۳۸۷: ۴۳). در طول مبارزه ارشک‌ها با یک‌دیگر، اردشیر شاهزاده ساسانی به پادشاهی پارس رسید و پیوسته قدرت خود را افزایش داد تا اندازه‌ای که توانست سرور خود را سرنگون سازد. اردشیر پس از متحد شدن با پادشاهان هدیبا و کرکوک، در نبرد بزرگی که در حدود ۲۲۴ میلادی در گرفت، اردوان پنجم پارتی را شکست داد و به قتل رسانید (محمدی‌فر، ۱۳۸۷: ۴۳).

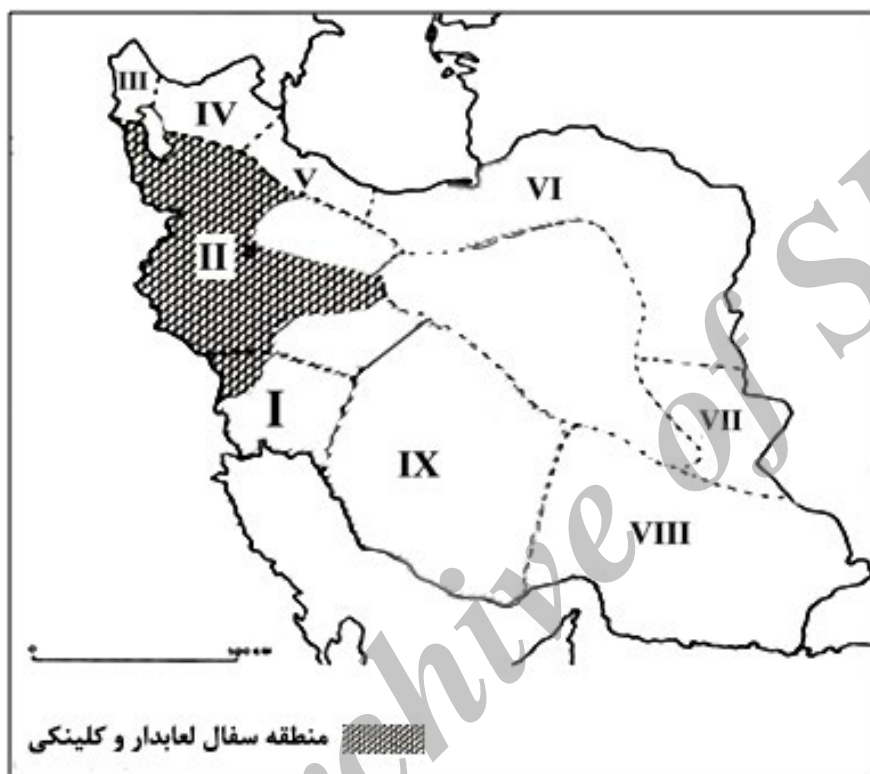
این دوره نیز همانند سایر ادوار باستانی ویژگی‌های فرهنگی، سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، هنری و ... مختص به‌خود را دارد. از جمله ویژگی‌های فرهنگی و هنری در این دوره صنعت سفال‌گری و سفال است. سفال به‌واسطه اطلاعات مفیدی که در زمینه شیوه معیشت، موقعیت سیاسی، اقتصادی، فرهنگی و صنعتی در دوران باستان از آن حاصل می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کسب این اطلاعات از طریق مطالعه مشخصات ظاهری سفال‌ها و مقایسه نمونه‌های مختلف با یک‌دیگر به‌دست می‌آید. این آگاهی‌ها، بی‌شک با پی بردن به ترکیب شیمیایی سفال‌ها دو چندان خواهد شد. این داده باستانی همواره به‌واسطه دوام و سلامت مورد توجه باستان‌شناسان و دیگر محققین بوده است. به‌نظر می‌رسد این صنعت در دوره اشکانی تحت تأثیر ساختار سیاسی حکومتی (فتوئدالی) بوده چرا که سنت سفال‌گری در مناطق مختلف با یک‌دیگر متفاوت است. در برخی از مناطق سفال‌هایی با ویژگی‌های منحصر به‌فرد وجود دارد که در بسیاری از مطالعات مینا قرار می‌گیرند. از جمله این نمونه سفال‌ها، سفال کلینکی است. این‌گونه سفال شاخصه دوره اشکانی در غرب ایران است. (پژوهش‌ها و فعالیت‌های میدانی مهدی رهبر در خوره، کلایس در نوشیجان، منطقه بین ملایر و همدان، غرب بروجرد، بیستون، شاه‌آباد، تپه عظیم‌ا در سرپل‌ذهاب، گوجرقلعه و قلعه ضحاک، کامبخش‌فرد در تپه ازنا، نورآباد و تپه مصلا، دره‌های اسدآباد و کنگاور، یانگ در صحنه و گودین‌تپه، مورتسن در دره‌ی هولیلان، لوین در ماهیدشت، کیل در قلعه یزدگرد، سوئینی در کردستان مرکزی و شمالی و آذربایجان جنوبی و اشنایدر در تخت سلیمان سهم به‌سزایی در شناسایی و معرفی سفال کلینکی داشته است (محمدی‌فر، ۱۳۸۷: ۲۷۷). با توجه به اهمیت و ویژگی‌های خاص این سفال شناسایی و بررسی ترکیب آن می‌تواند اطلاعات سودمندی در رابطه با هنر و فرهنگ در اختیار علاقه‌مندان قرار دهد. تلفیق باستان‌شناسی با علمی چون فیزیک، شیمی، جغرافیا، علوم انسانی، زیست‌شناسی و ... پس از ۱۹۶۰م. سبب پیدایش علوم میان‌رشته‌ای گردید که دستاوردهای قابل توجهی به‌همراه داشت. از جمله رشته‌هایی که روش‌های مرتبط با آن در تعیین مشخصات داده‌های باستان‌شناسی بسیار مورد استفاده قرار گرفت، فیزیک است. امروزه روش‌های گوناگونی به‌منظور شناسایی و آنالیز ترکیب

مواد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از این تکنیک‌ها بر پایه گسیل اشعه X استوارند. از جمله روش‌هایی که براساس گسیل این اشعه ابداع گردید عبارتند از: XRF، PIXE و XRD. این سه روش هر کدام ویژگی‌های خود را دارا هستند. هر سه روش بسیار سودمند و در عین حال غیرمخرب هستند و از آن‌ها در گستره‌ای وسیع در آزمایشگاه‌های سراسر دنیا استفاده می‌شود. در این پژوهش سعی گردیده است با به‌کارگیری سه روش مذکور به شناسایی ترکیبات و عناصر به‌کار رفته در گل مورد استفاده در ساخت سفال کلینکی منطقه‌همدان پرداخته شود. چنان‌چه دستیابی به این اطلاعات و فهم تشابه و یا تفاوت میان آن‌ها می‌تواند در شناسایی هر چه بیشتر این‌گونه سفال مفید واقع شود. بی‌شک آنالیز ترکیبات شیمیایی و عناصر موجود در سفال‌های مورد مطالعه و تغییرات به‌وجود آمده در حین پخت می‌تواند داده‌های قابل توجهی در ارتباط با درجه حرارت کوره و هم‌چنین نحوه پخت آن‌ها ارائه دهد.

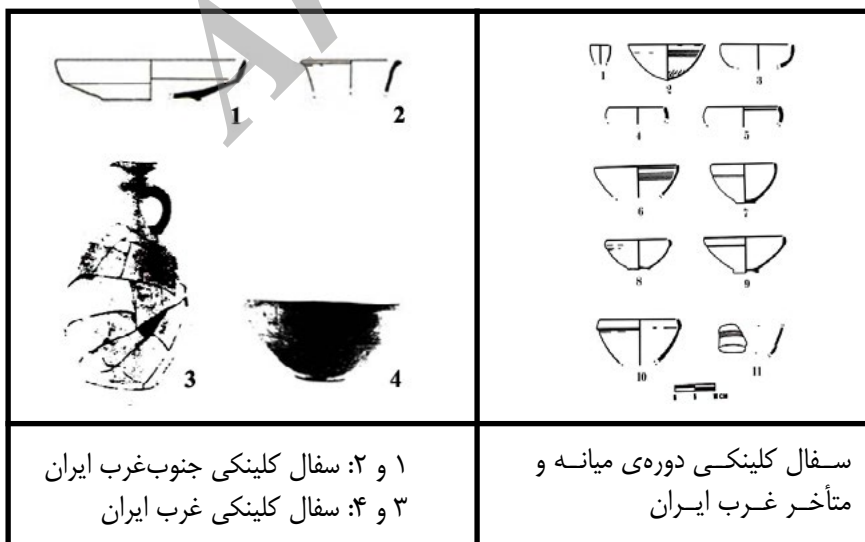
سفال کلینکی

تا کورا آداجی در تقسیم‌بندی خود از سفال اشکانی به نقل از هرینگ به پنج گونه سفال ظریف در این دوره اشاره می‌کند که عبارتند از: سفال کلینکی، سفال منقوش، سفال سبک اردبیل، سفال مثلثی و سفال لکه‌دار (Adachi, 2005: 27-30). از جمله این سفال‌ها که در این تحقیق نیز مد نظر است سفال کلینکی است. این سفال در گذشته «دارچینی» نامیده می‌شد. پس از آن اولین بار واژه کلینکی را «کایلریانگ» و پس از آن «دیوید استروناخ» شناسایی و به‌کار بردند (هرینگ، ۱۳۷۶: ۱۱۵). دلیل نام‌گذاری سفال کلینکی یا جلینگی را می‌توان ایجاد نوعی صدای زنگ مانند به‌هنگام برخورد با زمین دانست که با نوع جنس این‌گونه سفال در ارتباط است. شاموت آن‌ها به‌دلیل پخت خوب معمولاً قابل شناسایی نیست اما اغلب ذرات مواد معدنی و گاه خرده‌های آهک ریز را می‌توان تشخیص داد. بافت سفال محکم و محل شکستگی تکه سفال‌ها صاف و هموار و دارای خط‌های مستقیم است. مغز خمیره به رنگ خاکستری و خاکستری تیره است که به‌طرف سطح رنگ آن به نارنجی، خاکستری قهوه‌ای یا قهوه‌ای تغییر می‌یابد و بدنه حالت ساندویچی پیدا می‌کند. در برخی ظروف ظریف، رنگ بدنه یکنواخت است. رنگ بدنه به رنگ‌های مختلف نارنجی تا قهوه‌ای خاکستری یا قهوه‌ای است. به‌طور کلی لبه‌ها دارای اثر چرخش یا اثر صیقل با چوب می‌باشند که شیارهای آن قابل مشاهده است. تزیین این سفال محدود به نقش کنده است. سفال کلینکی احتمالاً در سده سوم میلادی از رواج افتاده است. محدوده گسترش سفال کلینکی از غرب روی مسیر قصر شیرین (تپه عظیم، قلعه یزدگرد)، مراغه (قلعه گوجر)، در سمت جنوب در شاه آباد تا دره‌هیلان و منطقه بروجرد (قلعه نو و باغ نور) و الیگودرز (تپه ازنا)، از شرق تا حدود خورهه و از سمت شمال تا حدود میانه (قلعه ضحاک) و تا زنجان قرار گرفته است (هرینگ، ۱۳۷۶: ۱۱۵)، (نقشه شماره ۱). از جمله فرم‌ها و اشکال این‌گونه سفال می‌توان به پیاله‌ها و کاسه با لبه‌های ضخیم برگشته به‌طرف خارج، ظروف با بدنه کشتی، ظروف پخت (دیزی، کوزه، خمره، آب‌خوری، قمقمه مسافرتی) اشاره کرد (جدول شماره ۱)،

(هرینگ، ۱۳۷۶: ۱۱۷). با توجه به کاوش‌های قلعه‌یزدگرد می‌توان گفت در دوره متأخر هم در غرب سفال کلینکی رواج داشته است (هرینگ، ۱۳۷۶: ۱۲۱). معیارشناسایی و بررسی‌های یانگ، گاف، لوین، سوئینی، مورتسن، کلایس و هاول در منطقه غرب سفال کلینکی بود. احتمالاً شروع ساخت سفال کلینکی و سفال لعاب‌دار از حدود اواخر دوره اولیه اشکانی در این منطقه بوده است (هرینگ، ۱۳۷۶: ۱۱۱). سفال‌های منطقه غرب با سفال کلینکی در سده دوم پ.م تا سده سوم میلادی مشخص می‌شوند (هرینگ، ۱۳۷۶: ۱۲۴).



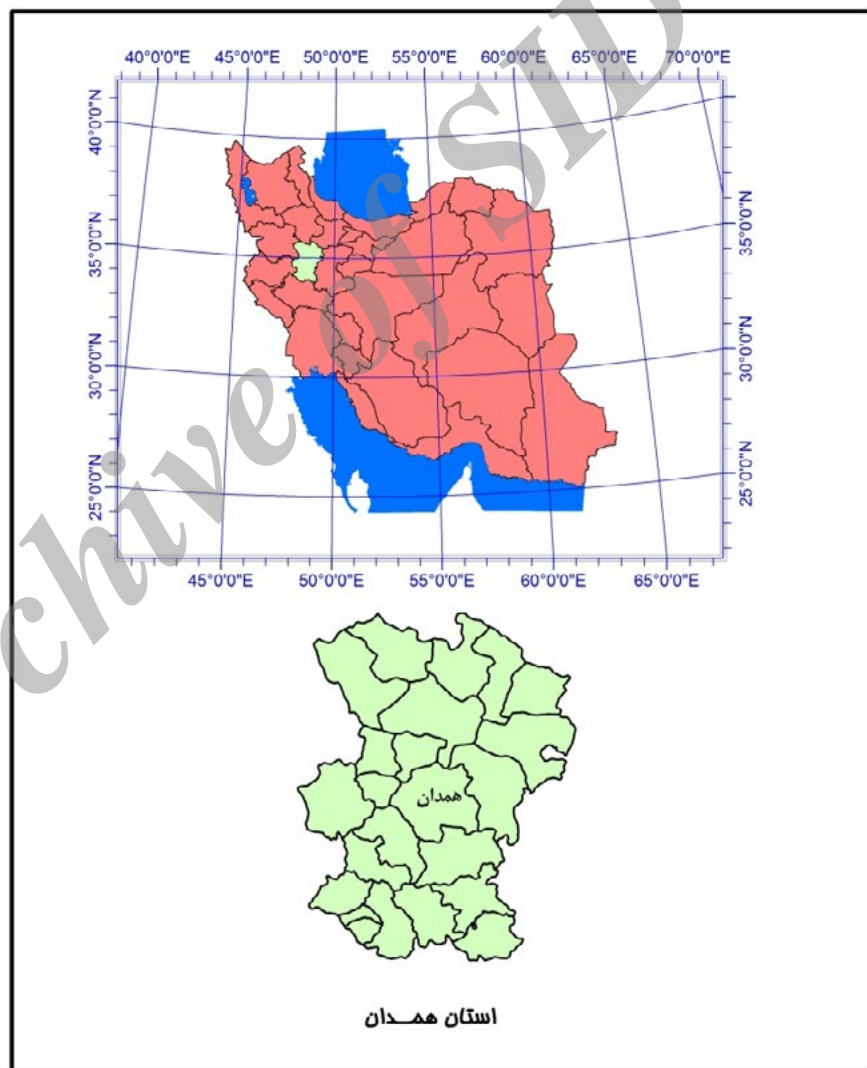
نقشه ۱: گسترش و توزیع سفال لعاب‌دار و سفال کلینکی (هرینگ، ۱۳۷۶: ۲۶۱)



جدول ۱: نمونه‌ای از طرح‌های سفال‌های کلینکی مکشوفه در غرب و جنوب غربی ایران (هرینگ، ۱۳۷۶: ۴۹، ۱۱۶ و ۱۱۸)

منطقه مورد مطالعه

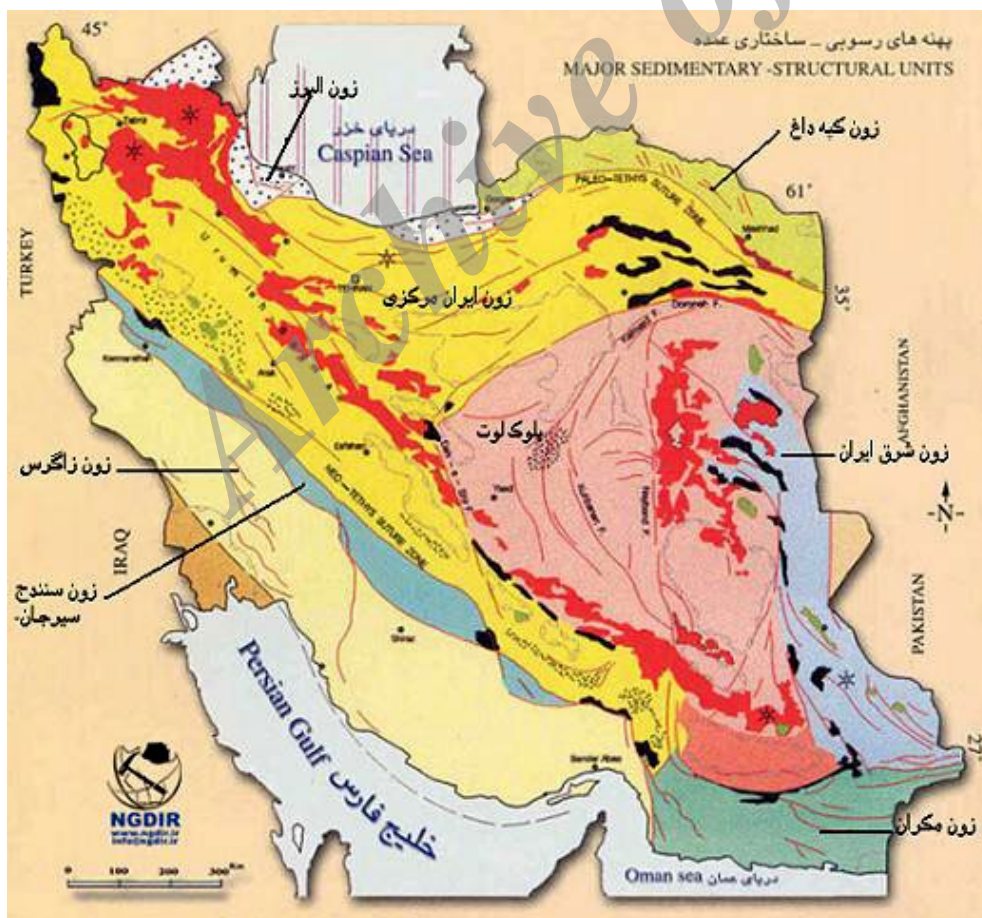
استان همدان با مساحت ۱۹۵۴۶/۸۱۸ کیلومترمربع در منطقه کوهستانی غرب کشور در میان ارتفاعات زاگرس و ایران مرکزی واقع شده و از جانب شرق به ارتفاعات و بیابان‌های ایران مرکزی و از سوی غرب پس از طی دیواره عظیم زاگرس به جلگه بین‌النهرین محدود می‌گردد (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۸۰: ۱۲)، (نقشه ۲). استان مذکور از استان‌های ناهموار و مرتفع ایران محسوب می‌شود و بلندترین نقطه آن قله الوند (۳۵۷۴ متر) و پست‌ترین نقطه استان در اطراف رودخانه قره‌چای در اراضی عمرآباد در بخش شراء و پیشخوار واقع شده است (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۸۰: ۲) و (حیدریان، ۱۳۷۳: ۴).



نقشه ۲: نقشه و موقعیت استان و شهرستان همدان (نگارنده‌گان، طراحی نقشه در محیط: Arc Map)

استان همدان منطقه‌ای است که بیشتر کوه‌های آن از تخت سنگ‌های خاریتی تشکیل یافته که جزو رشته کوه‌های غربی و مرکزی ایران می‌باشند (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۸۰: ۱۹).

محدوده‌ی مورد مطالعه در این پروژه عمدتاً در نیمه شمالی و شرقی استان قرار دارد که به صورت هلالی در جبهه شرقی دیواره الوند واقع شده است. شاید این محوطه‌ها تراکم لازم برای دستیابی به یک نتیجه قطعی را فراهم نمایند ولی در واقع این‌ها تنها محوطه‌های واجد شرایط برای انجام این تحقیق را دارا بوده‌اند. ناحیه همدان از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری ایران در پهنه زون سنندج - سیرجان واقع شده است. این زون در واقع جزئی از منطقه ساختاری ایران مرکزی است که در حاشیه جنوب‌غربی آن قرار دارد و بحث برانگیزترین زون ساختاری ایران است که حوادث مهمی را پشت سر گذاشته است (لاهوری، ۱۳۸۶: ۲۲). بخش بیشتر استان همدان متعلق به قسمت شمال‌غربی ایالت زمین‌ساختی - رسوبی موسوم به سنندج - سیرجان است که در یک روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق بلندی‌های پیرامون شهر همدان را تشکیل می‌دهد (لاهوری، ۱۳۸۶: ۲۳). قسمت شمال‌شرقی استان همدان نواحی دشت گونه است که به‌طور عمده با نهشته‌های آب‌رفتی جوان پوشیده شده است. رخنمون‌های سنگی این بخش از نوع سنگ‌های کربناتی - ولکانیکی کرتاسه پایین، خصوصاً سنگ آهک‌های اولیگوسن - میوسن سازند قم هستند که در یک روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق در جنوب شهرستان رزن برونزد دارند. مرز بین زون سنندج - سیرجان و دشت رزن چندان روشن نیست (لاهوری، ۱۳۸۶: ۱۳)، (نقشه ۳).

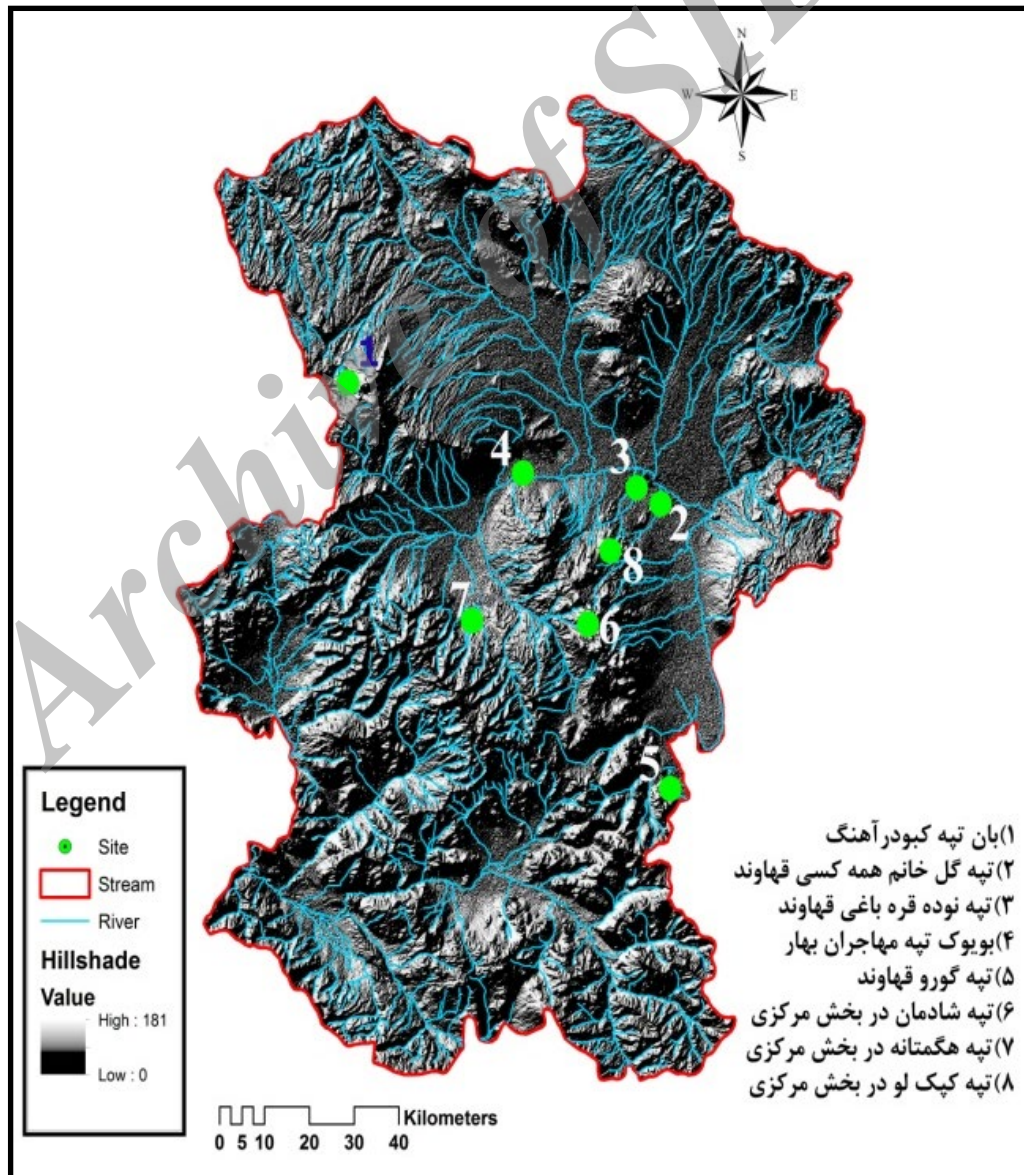


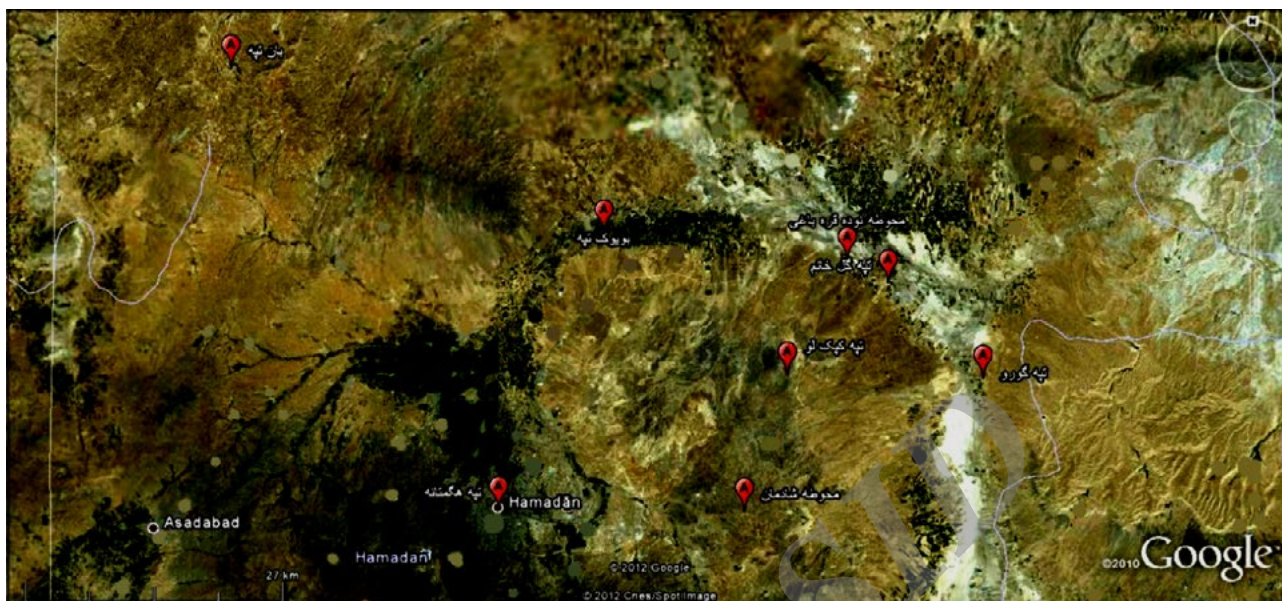
نقشه ۳: نقشه و موقعیت زونهای ساختاری سنندج - سیرجان و زون ایران مرکزی و انطباق آن‌ها با منطقه مورد مطالعه (سایت پایگاه ملی داده‌های علوم زمین).

محوطه‌های مورد مطالعه

تعداد ۸ محوطه که تمامی آن‌ها در منطقه همدان واقع شده‌اند در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند. این محوطه‌ها عبارتند از: تپه بان در منطقه کبودرآهنگ (مختصات جغرافیایی: $E245453, 19$, $N3900885, 02$), تپه گل خانم در همه کسی قهاوند (مختصات جغرافیایی: $N3877373$ و $E314273$), تپه نوده قره باغی در منطقه قهاوند (مختصات جغرافیایی: $E310000$, $N3879813, 81$), بویوک تپه مهاجران در منطقه بهار (مختصات جغرافیایی: $E284380, 82$, $N3883051, 87$), تپه گورو در منطقه قهاوند (مختصات جغرافیایی: $E32434, 97$, $N3867195, 59$), تپه شادمان (مختصات جغرافیایی: $E298721, 04$, $N3853682, 44$), تپه هگمتانه (مختصات جغرافیایی: $E272822, 61$, $N3854176, 16$) و تپه کپک‌لو (مختصات جغرافیایی: $E303472, 87$, $N3867851$) در بخش مرکزی همدان (نقشه ۴), (تصویر ۱).

نقشه ۴: موقعیت محوطه‌هایی که داده‌های مورد نیاز جهت انجام پروژه از آن‌ها فراهم آمد (نگارنده‌گان، طراحی نقشه در محیط: Arc Map).





تصویر ۱: عکس هوایی موقعیت محوطه‌های مورد مطالعه منطقه همدان (Google Earth: 2007).

در انتخاب این محوطه‌ها چند نکته مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این نکات عبارتند از:

(الف) محوطه منحصراً متعلق به دوران اشکانی بوده و یا این دوره به وضوح در آن قابل تشخیص است.

(ب) پراکندگی محوطه‌ها به گونه‌ای است که حتی‌المقدور مساحت بیشتری از حوزه فرهنگی شمال و شرق کوه الوند را در بر گرفته باشد.

(ج) داده‌هایی به دست آمده از هر یک از محوطه‌ها مشخصه‌های لازم برای انجام آزمایشات را دارا باشند.

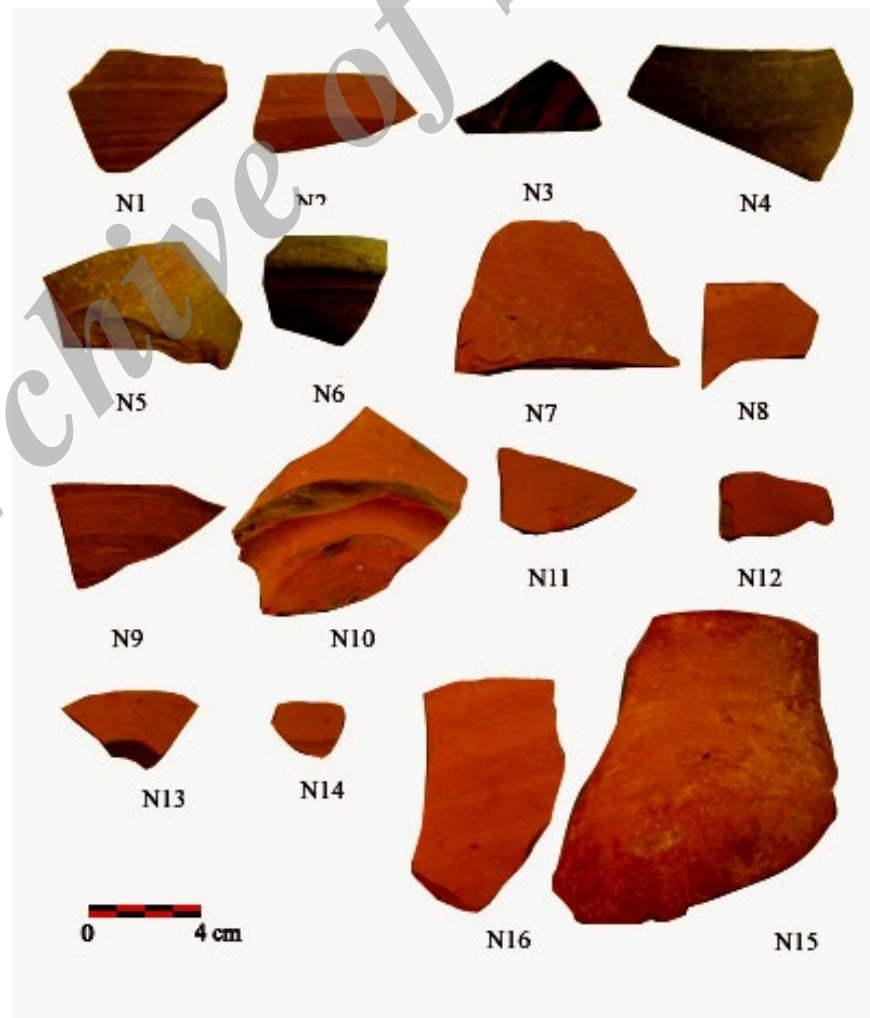
پس از انتخاب و بررسی محوطه‌ها تعداد ۱۶ قطعه سفال کلینکی که شرایط انجام آزمایشات را دارا بودند، از میان سفال‌های جمع‌آوری شده از سطح محوطه‌ها انتخاب و به آزمایشگاه فرستاده شد. از این تعداد ۳ قطعه متعلق به بان تپه (شماره‌های ۱-۳)، ۳ قطعه متعلق به گل خانم همه کسی (شماره‌های ۴-۶)، یک قطعه نوده قره‌باغی (شماره ۷)، ۲ قطعه بویوک تپه مهاجران (شماره‌های ۸ و ۹)، یک قطعه تپه گورو (شماره ۱۰)، ۲ قطعه تپه شادمان (شماره‌های ۱۱ و ۱۲)، ۲ قطعه تپه‌هگمتانه (شماره‌های ۱۳ و ۱۴) و ۲ قطعه متعلق به تپه کپک‌لو (شماره‌های ۱۵ و ۱۶) است (جدول ۲)، (تصویر ۲).

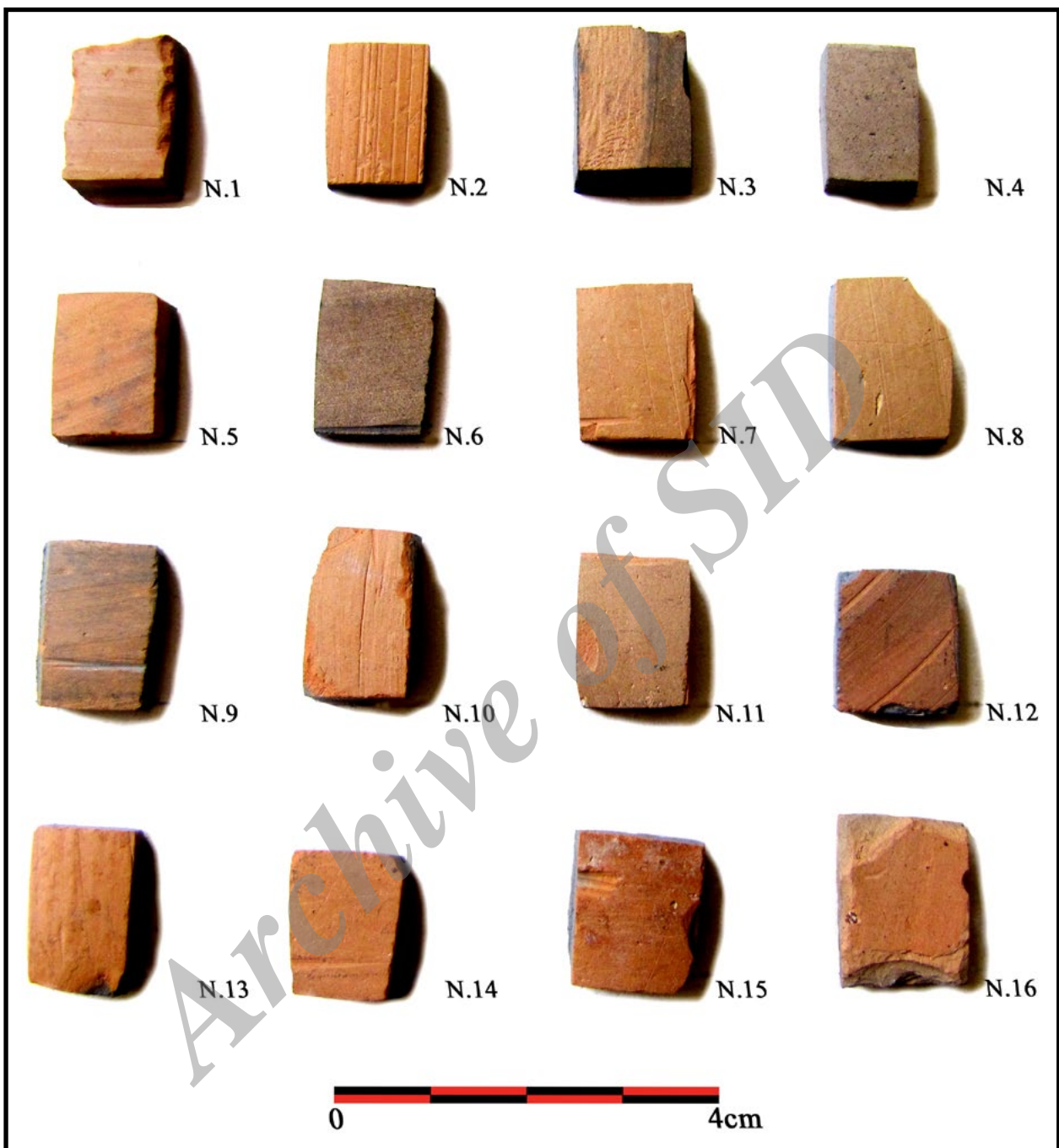
سفال‌های مورد مطالعه در این تحقیق تمام ویژگی‌های ظاهری سفال کلینکی را دارا هستند. نمونه سفال‌های مذکور از لحاظ ریخت‌شناسی کاملاً با سفال کلینکی غرب ایران مشابه و قابل مقایسه است. (تصویر ۳) سفال‌های کلینکی و سطحی که از آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفته، نشان داده شده است. به‌منظور انجام آزمایش، داده‌های پس از شستشو و پاک‌سازی از گرد و غبار در ابعاد تقریبی $1/5 \times 1$ سانتی‌متر بریده شد. در انتخاب نمونه‌ها سعی گردید از مسطح‌ترین و هموارترین بخش سفال استفاده شود.

جدول ۲: مشخصات داده‌های مورد آزمایش.

ردیف	نام محوطه	مختصات جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	تعداد قطعات مورد آزمایش	کد قطعات مورد آزمایش
۱	بان تپه کیودرآهنگ	E245453.19 N3900885.02	۲۱۱۸	۳	1,2,3
۲	تپه گل خانم همه کسی قهاوند	N3877373 E 314273	۱۶۲۰	۳	4,5,6
۳	تپه نوده قره باغی قهاوند	E310000 N3879813.81	۱۶۲۳	۱	7
۴	بویوک تپه مهاجران بهار	E284380.82 N3883051.87	۱۶۷۰	۲	8,9
۵	تپه گورو قهاوند	E32434.97 N3867195.59	۱۶۱۰	۱	10
۶	تپه شادمان در بخش مرکزی	E298721.04 N3853682.44	۲۰۸۴	۲	11,12
۷	تپه هگمتانه در بخش مرکزی	E272882.61 N3854176.16	۱۸۰۴	۲	13,14
۸	تپه کیک لو در بخش مرکزی	E303472.87 N3867851	۱۷۹۶	۲	15,16

تصویر ۲: سفال‌هایی که که پس از بررسی شرایط آزمایش از سایر سفالینه‌ها انتخاب شدند (نگارنده گان، ۱۳۹۱).





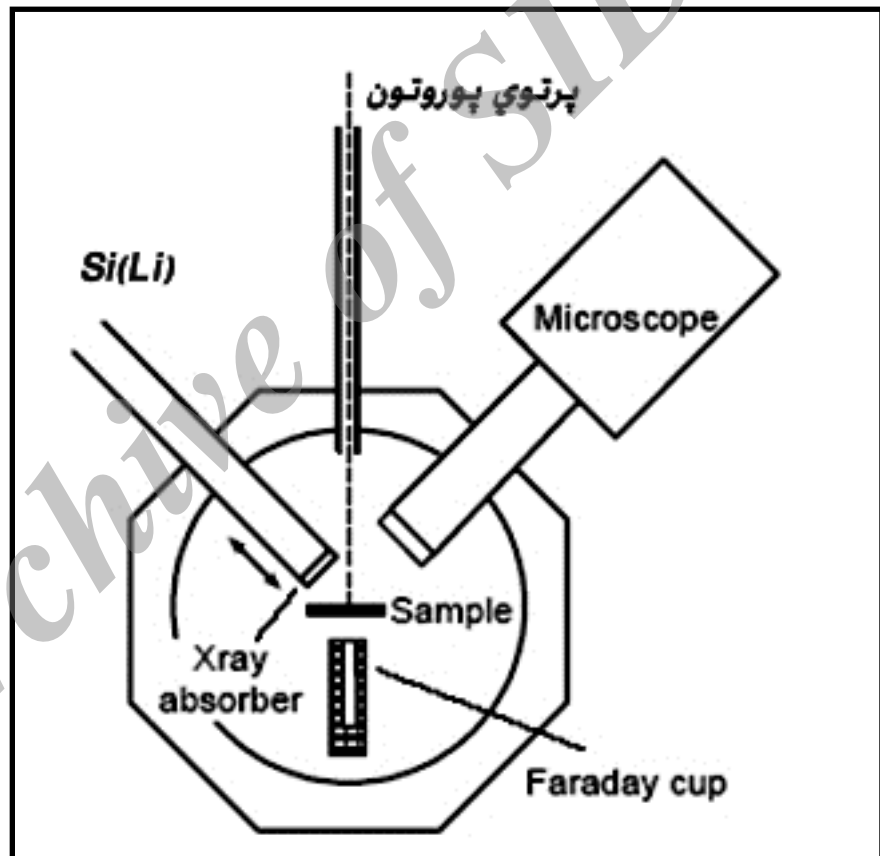
انجام آزمایشات و نتایج

تصویر ۳: نمونه سفال‌های کلینکی مورد آزمایش پس از برش و آماده سازی (نگارنده‌گان، ۱۳۹۱).

آزمایش PIXE

روش PIXE یک تکنیک آنالیز بسیار حساس است. از این روش برای هم‌کاری با مطالعات دانشمندان در علومی چون بیولوژی (زیست‌شناسی)، باستان‌شناسی، جرم‌شناسی، علم مواد، آنالیز آلودگی، آنالیز شیمیایی نمونه‌ها و آنالیز نمونه‌های معدنی به‌منظور مشخص کردن درصد عناصر ریز و درشت در نمونه‌ها استفاده

می‌شود (Verma, 2007:76). روش پیکسی در سال ۱۹۷۰ کشف شد. استفاده از روش‌های آنالیز هسته‌ای در باستان‌سنجی در آزمایشگاه واندوگراف از سال ۱۳۷۰ آغاز شد و به تدریج با هم‌کاری باستان‌شناسان توسعه یافت (آذرنوش، ۱۳۸۱: ۷۶). آنالیز به روش PIXE یکی از دقیق‌ترین روش‌های آنالیز برای اندازه‌گیری عناصر کم مقدار می‌باشد که مستلزم دقت و توجه زیادی در حین آزمایش می‌باشد. با این روش می‌توان آنالیز کمی عناصر با $Z < 13$ را با دقت ppm اندازه‌گیری کرد. آنالیز به روش PIXE بر مبنای تحریک اتم‌های نمونه توسط ذرات باردار (ذرات آلفا، پروتون و یا یون‌های سنگین) شتاب گرفته، توسط شتاب‌دهنده و آنالیز طیف پرتو ایکس مشخصه گسیل شده از نمونه استوار است. در اثر بمباران ترازهای اتمی توسط پروتون، اتم نمونه تحریک شده و پرتو ایکس مشخصه از آن ساطع می‌گردد (قیاسی، ۱۳۸۵، ۳۳)، (شکل ۱).



شکل شماره ۱: طرح کلی سیستم آنالیز روش PIXE (قیاسی، ۱۳۸۵: ۷۵).

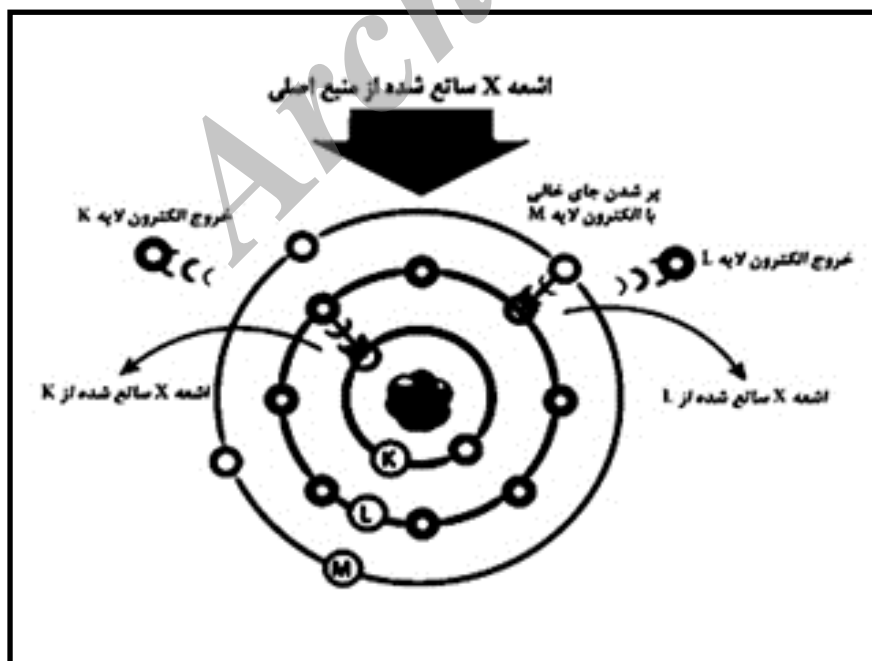
نتایج آزمایش PIXE

آزمایش در آزمایشگاه واندوگراف واقع در سازمان انرژی اتمی کشور انجام شد. در این آزمایش پرتوهای پروتون 2 MeV با شدت جریان 2-3 nA برای بمباران نمونه‌ها استفاده شد. قطر پرتو روی نمونه 2mm^2 بود. اشعه ایکس گسیل شده از نمونه‌ها توسط آشکار ساز (SiLi) با توان تفکیک 170 eV و تحت زاویه ۴۵ درجه آشکار سازی می‌شود. برای ایجاد خلاء در محفظه از یک پمپ دیفیوژن و یک

پمپ چرخشی استفاده نموده و خلاء محفظه را تا 2×10^{-5} Torr تأمین می‌کند. هر نمونه تقریباً ۲ دقیقه در معرض پرتوی پروتون قرار می‌گیرد. پس از این که اطلاعات مربوط به کلیه نمونه‌ها با فرمت File name.MCA ذخیره شد، آن‌ها را به‌وسیله کد SPEDAC تبدیل به فرمتی می‌کنیم که برای برنامه GUPIX و Excel (یا Origin) قابل خواندن باشد. جدول شماره ۳ درصد ترکیبات موجود در نمونه‌های آنالیز شده به روش PIXE را نشان می‌دهد.

آزمایش XRF

روش فلورسانس پرتو XRF (X) یا طیف سنجی پرتو X یکی از روش‌های آنالیز عنصری است که امروزه از آن به‌طور وسیعی در صنعت و مراکز پژوهشی استفاده می‌شود (گلستانی‌فرد، ۱۳۸۳: ۹۳). روش XRF در یک گستره متنوع در زمینه‌های آنالیز کمی و کیفی، اکتشافات استخراج معدن و پردازش جنس و مواد معدنی، استخراج و ذوب فلزات و قوانین مربوط به آن‌ها به‌کار گرفته می‌شود (Verma, 2007: 89). مزیت این روش نسبت به پیکسی این است که با انتخاب مناسب هدف اولیه، عناصر خاصی را می‌توان ترجیحاً در نمونه تشخیص داد (آذرنوش، ۱۳۸۱: ۸۰). در این روش پرتو X به نمونه مجهول تابیده و در اثر برانگیختن اتم‌ها باعث پدید آمدن پرتو X ثانویه می‌شود. سپس با تعیین طول موج یا انرژی پرتو X ثانویه، عنصرهای موردنظر را می‌توان شناسایی کرد. پرتو خروجی از لوله پدید آورنده پرتو X به نمونه می‌تابد و در اثر بمباران، الکترون‌های موجود در مدارهای داخلی اتم خارج شده و جایگزینی این الکترون‌ها از مدارهای بالایی، سبب پدید آمدن پرتو X (پرتو مشخصه) خواهد شد (شکل ۲). اساس این پدیده مانند حالتی است که نمونه، توسط الکترون بمباران می‌شود (گلستانی‌فرد، ۱۳۸۳: ۹۳).



شکل ۲: اساس کار فلورانس پرتو X (نگارنده گان، Photo-shop).

نتایج آزمایش XRF

به‌منظور انجام آزمایش نمونه سفال‌های مورد نظر به آزمایشگاه XRF دانشگاه تربیت مدرس تهران فرستاده شد. دستگاه مورد استفاده در این پروژه ساخت کمپانی فیلیپس (Philips Company) و مدل PW 2404 است. آشکار سازی این دستگاه به $1 \pm$ ppm محدود می‌شود. جدول ۳ درصد ترکیبات موجود در نمونه‌های آنالیز شده به روش XRF را نشان می‌دهد. به‌دلیل این‌که در سفال‌های مورد مطالعه ترکیب اکسیژن وجود داشته، به‌جای نمایش عنصری از نمایش ترکیبی استفاده شده است. اینکار به‌واسطه قابلیت نرم افزار مورد استفاده که سهم اکسیژن ترکیب شده را ارایه می‌دهد، صورت پذیرفته است (جدول ۴).

جدول ۳: درصد ترکیبات موجود در نمونه‌های آنالیز شده به روش PIXE.

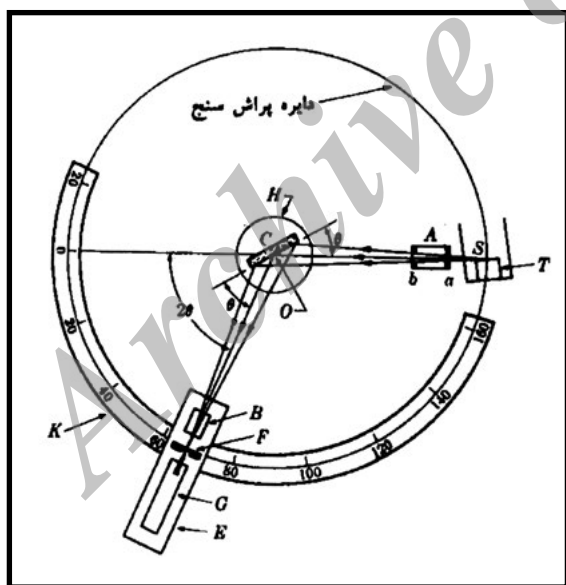
نمونه	نام اثر	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Ti ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	Other
1	بان تپه	17.08	45.81	0.67	-	7.51	12.57	2.07	0.07	0.13	13.98	ZnO: 0.11
2	بان تپه	19.18	48.71	-	-	3.79	11.02	2.23	0.10	-	14.97	-
3	بان تپه	19.54	46.45	-	-	4.25	14.12	2.24	0.07	0.07	13.26	-
4	تپه گل خاتم	17.70	42.68	-	-	2.20	17.02	2.66	0.06	0.30	17.38	-
5	تپه گل خاتم	21.38	44.92	-	-	4.07	12.12	2.55	0.08	0.10	14.78	-
6	تپه گل خاتم	19.79	45.95	-	-	3.28	17.12	2.02	-	0.12	11.72	-
7	تپه نوده قره باغی	17.60	45.59	-	-	3.50	16.99	2.43	-	0.28	13.61	-
8	بویوک تپه	17.80	46.78	-	-	4.21	16.37	1.98	-	0.10	12.76	-
9	بویوک تپه	19.01	46.85	-	-	5.10	13.20	2.20	0.05	0.13	13.40	Cu ₂ O: 0.06
10	تپه گورو	18.37	47.75	-	-	3.73	15.63	2.01	0.09	0.10	12.32	-
11	تپه شادمان	15.95	45.43	-	-	2.60	20.90	1.97	-	0.12	13.03	-
12	تپه شادمان	20.50	47.18	-	-	3.72	11.75	2.36	0.12	0.05	14.32	-
13	تپه هگمتانه	19.02	47.85	-	0.13	4.45	11.60	2.49	0.09	0.06	14.31	-
14	تپه هگمتانه	20.31	49.24	-	-	3.94	9.46	2.22	0.06	0.15	14.62	-
15	تپه کیک لو	8.59	28.54	0.88	0.17	2.76	43.50	2.25	-	0.27	12.71	SrO: 0.33
16	تپه کیک لو	19.00	46.53	-	-	3.90	15.55	2.09	0.04	0.13	12.76	-

جدول ۴: درصد ترکیبات موجود در نمونه‌های آنالیز شده به روش XRF.

نمونه	نام اثر	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Rb	Sr	Zr
1	بان تپه	0.24	0.87	16.82	43.82	0.25	0.45	7.90	12.67	2.16	14.61	0.02	0.08	0.05
2	بان تپه	0.2	0.89	19.93	47.13	0.22	0.12	4.67	10.07	2.22	14.35	0.02	0.07	0.04
3	بان تپه	0.26	0.92	18.14	41.60	0.20	0.11	5.37	15.57	2.45	15.15	0.03	0.09	0.05
4	تپه گل خاتم	-	1.26	15.80	42.87	0.27	0.10	2.81	18.42	2.39	15.88	-	0.11	0.05
5	تپه گل خاتم	-	1.00	20.11	41.78	0.15	0.13	4.36	13.70	2.50	16.01	0.03	0.12	0.06
6	تپه گل خاتم	-	0.93	16.61	40.99	0.36	0.08	3.79	18.98	2.26	13.75	0.02	0.12	0.05
7	تپه نوده قره باغی	-	1.32	17.61	41.02	0.29	0.23	3.55	19.30	2.34	14.04	0.03	0.15	0.06
8	بویوک تپه	0.19	1.15	16.46	43.81	0.23	0.32	4.36	16.98	2.09	14.14	0.03	0.14	0.05
9	بویوک تپه	-	0.95	18.58	46.49	0.20	0.23	5.21	14.06	1.87	12.22	-	0.10	0.05
10	تپه گورو	-	1.09	17.79	44.88	0.30	0.34	3.60	15.89	2.19	13.68	-	0.14	0.05
11	تپه شادمان	-	1.05	16.14	41.85	0.29	0.16	3.24	20.76	1.99	14.34	-	0.09	0.05
12	تپه شادمان	-	1.10	19.52	47.98	0.27	0.19	3.84	12.49	2.31	12.06	-	0.12	0.06
13	تپه هگمتانه	-	0.82	19.41	46.28	0.76	0.19	5.00	10.92	2.34	14.04	0.03	0.11	0.05
14	تپه هگمتانه	-	0.79	18.33	43.28	0.17	0.25	3.79	15.07	2.55	15.55	-	0.12	0.07
15	تپه کیک لو	-	0.74	9.78	26.47	0.45	0.93	3.11	39.81	2.27	16.18	-	0.14	0.06
16	تپه کیک لو	0.18	0.83	19.25	44.21	0.30	0.23	4.34	13.75	2.16	14.51	0.02	0.12	0.05

آزمایش XRD

روش پراش پرتو X، از آن جهت که روش مستقیمی برای تعیین نوع فازها و ساختار بلورین مواد است، بسیار اهمیت دارد. در واقع پیشرفت چند دهه اخیر شناسایی فازی، کانی‌شناسی و بلورشناسی، در گرو کشف این روش می‌باشد. پراش پرتو X که توسط مجموعه اتم‌ها پدید می‌آید، ناشی از تقویت پرتو پراکنده شده در جهت‌های ویژه فضایی است. پس از برخورد پرتو X به الکترون‌های ماده، آن‌ها را به نوسان وادار می‌کند و این الکترون‌ها نیز باعث پراکندگی پرتو X در فضای اطراف خود، با همان بسامد پرتو ابتدایی خواهند شد (گلستانی‌فرد، ۱۳۸۳: ۷۵). بنابراین در حالت‌های ویژه‌ای که دامنه پرتوها با هم جمع شوند، پرتو تابیده از مجموع اتم‌ها، تقویت می‌شود و به آن پراش گویند (گلستانی‌فرد، ۱۳۸۳: ۷۶). دستگاه پراش از یک دایره فلزی به نام دایره پراش تشکیل شده است که لوله پدید آورنده پرتو X و آشکارساز بر روی محیط آن و نمونه مجهول در مرکز آن قرار دارند (شکل ۳). نمونه مجهول در مرکز دایره و بر روی یک سکوی قابل چرخش قرار می‌گیرد. این سکو می‌تواند نمونه را به دور یک محور در برابر پرتو بچرخاند، بنابراین نمونه مجهول زاویه‌های گوناگونی نسبت به پرتو اختیار می‌کند (گلستانی‌فرد، ۱۳۸۳: ۷۹). از آن‌جا که شدت پیک در الگوی پراش پرتو X، متناسب با مقدار فازهای موجود در نمونه است، می‌توان به کمک این روش، آنالیز کمی نیز انجام داد (گلستانی‌فرد، ۱۳۸۳: ۹۲).



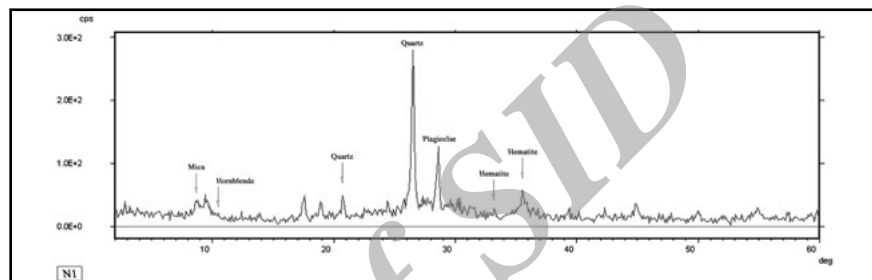
شکل ۳: نمایش پراش پرتو X (نگارنده‌گان، Photoshop).

نتایج آزمایش XRD

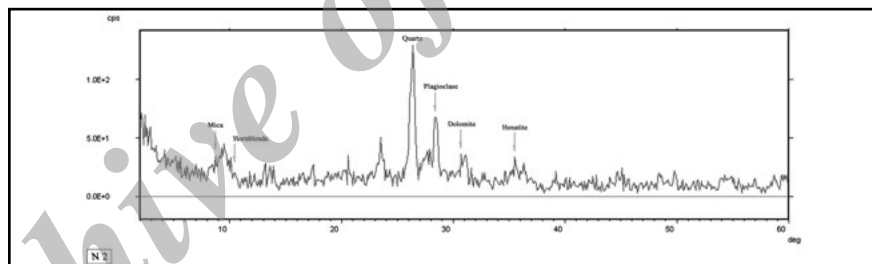
آزمایش XRD نمونه سفال‌های مورد مطالعه در آزمایشگاه فیزیک دانشگاه بوعلی‌سینا- همدان انجام شد. دستگاه XRD استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت ITALSTRUCTURE ایتالیا مدل ADP2000 می‌باشد. این دستگاه به یک بلور گرافیت مجهز است. طول موج پرتو ایکس ۱/۵۴۰۵ انگستروم می‌باشد. الگوی پراش نمونه را در محدوده 2θ (۶۰-۰) با سرعت پیمایش $(\text{min}/2)$ ثبت

شده است. نمونه‌ها روی یک صفحه تخت فلزی درون محفظه دستگاه XRD قرار می‌گیرند. با شروع آزمایش اشعه ایکس به نمونه‌ها می‌تابد هم‌زمان آشکار ساز شروع به حرکت می‌کند و در زوایای مختلف نسبت به سطح نمونه قرار می‌گیرد تا شدت پرتوهای پراش یافته در هر زاویه را ثبت کند. در واقع دستگاه پراش اشعه ایکس شدت پرتوهای پراش یافته را تعیین می‌کند در مواد بلوری این شدت‌ها به صورت پیک تیزی مشخص می‌شوند ولی در مواد آمورف پیک‌ها به صورت پهن هستند (جاسمی، ۱۳۹۰: ۵۲). نمودار های شماره ۱-۱۶ طیف XRF مربوط به نمونه‌های شماره ۱ تا ۱۶ را نشان می‌دهند.

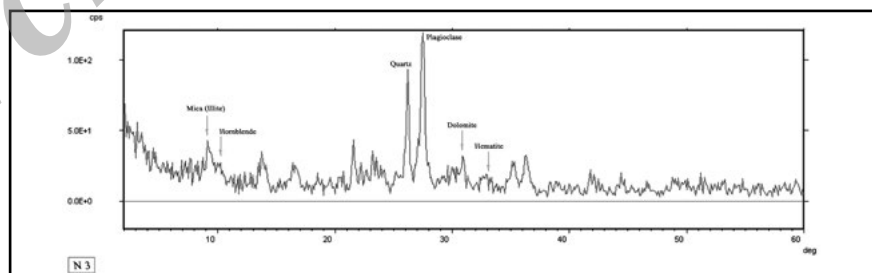
نمودار ۱: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱.



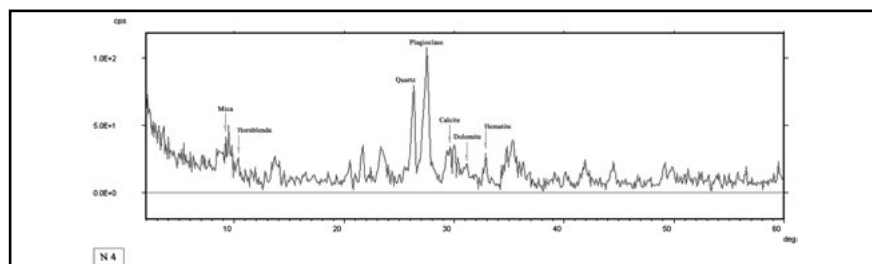
نمودار ۲: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۲.

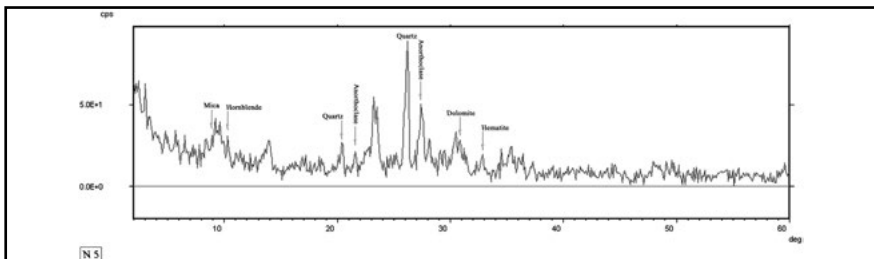


نمودار ۳: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۳.

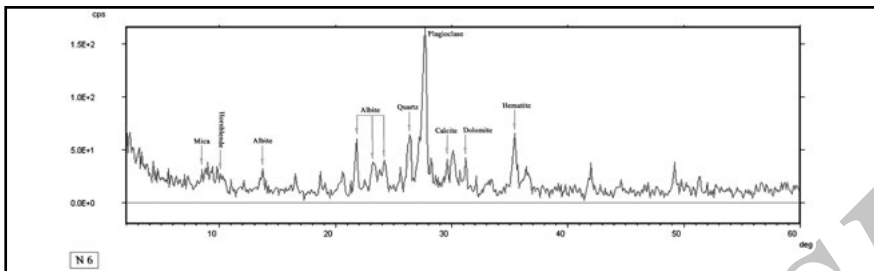


نمودار ۴: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۴.

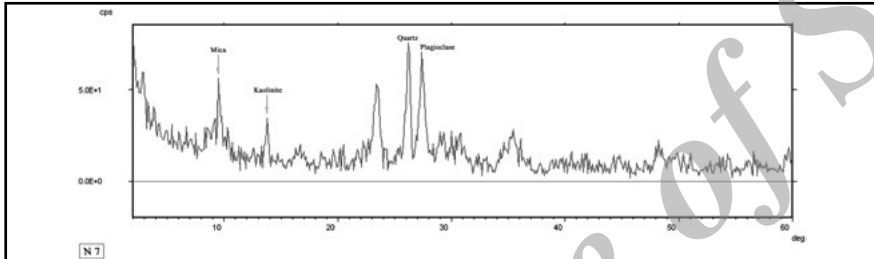




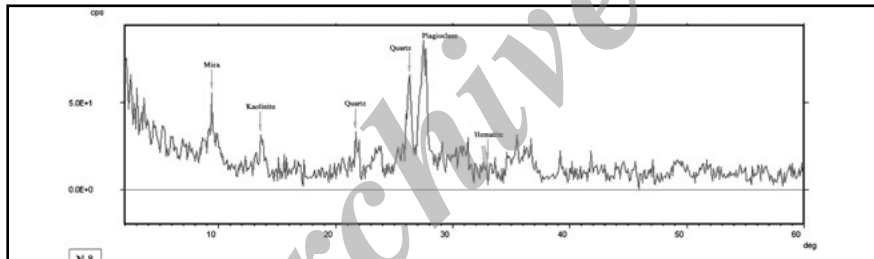
نمودار ۵: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۵.



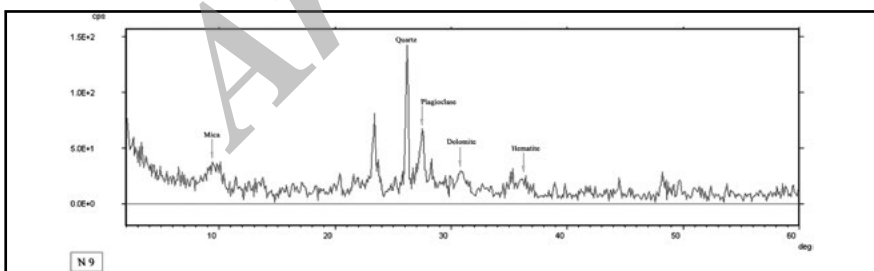
نمودار ۶: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۶.



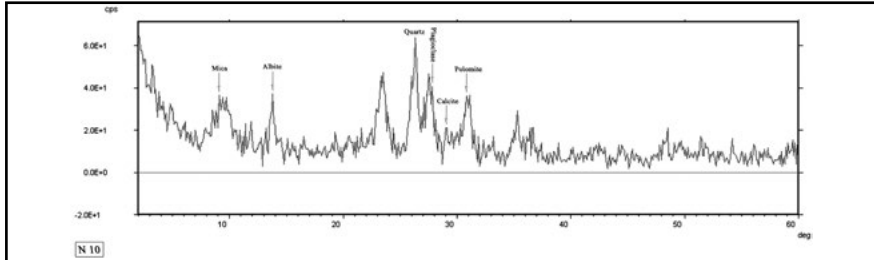
نمودار ۷: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۷.



نمودار ۸: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۸.



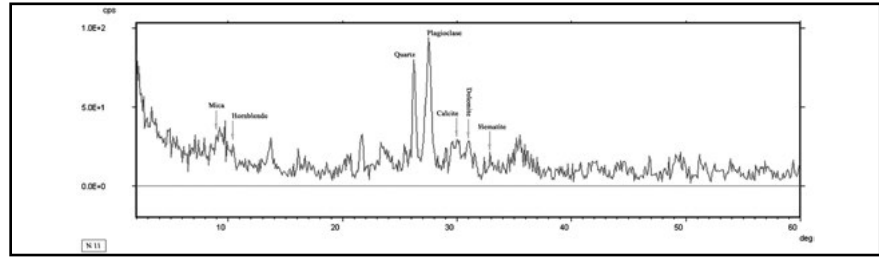
نمودار ۹: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۹.



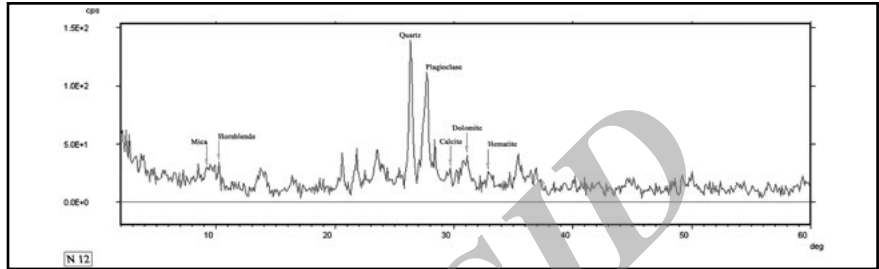
نمودار ۱۰: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱۰.

Archive of SID

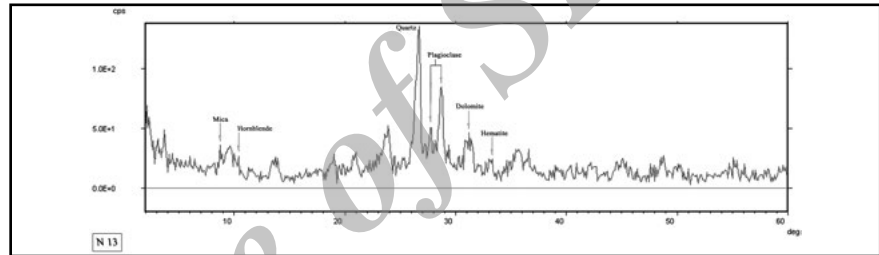
نمودار ۱۱: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱۱.



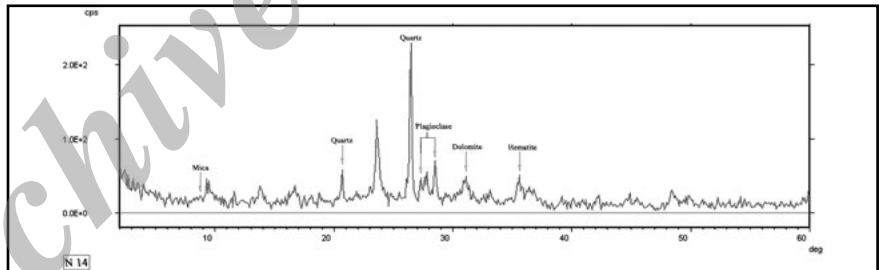
نمودار ۱۲: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱۲.



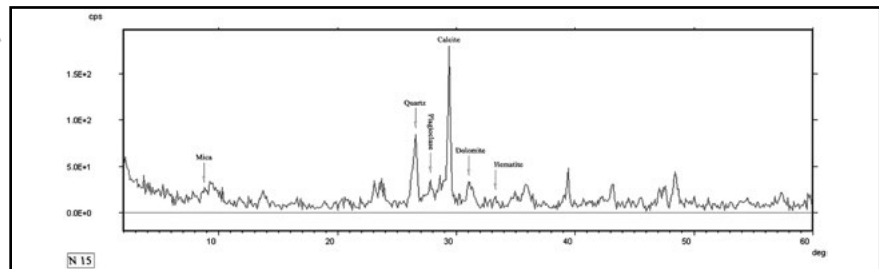
نمودار ۱۳: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱۳.



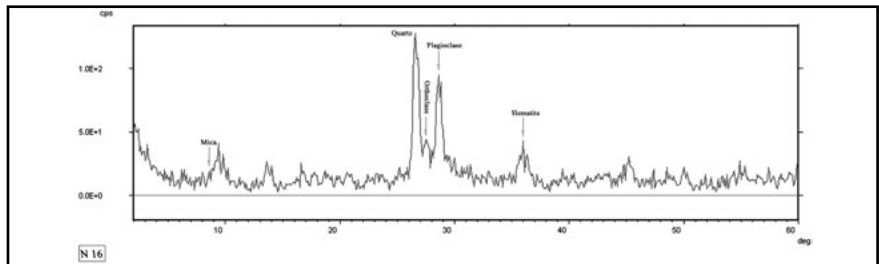
نمودار ۱۴: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱۴.



نمودار ۱۵: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱۵.



نمودار ۱۶: طیف XRD مربوط به نمونه شماره ۱۶.



نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از سه آزمایش XRD, PIXE, XRF می‌توان تشابه و یکسانی ترکیبات داده‌هایی مورد آزمایش را مشاهده نمود. این موضوع در درجه اول تأییدی بر صحت نتایج آزمایشات صورت پذیرفته است. این مورد را می‌توان در نزدیکی میزان درصد غلظت عناصر و ترکیبات در هر سه روش مشاهده نمود. سه ترکیب CaO ، Al_2O_3 ، SiO_2 بخش عمده ترکیبات نمونه سفال‌های مورد آزمایش را شامل می‌شوند. این ترکیبات نشان می‌دهند که در خاک مورد استفاده در ساخت سفال‌های مذکور علاوه بر وجود خاک‌های آهکی (Al_2O_3)، CaO)، سهمی از آن مربوط به خاک‌های حاصل از سنگ‌های دگرگونی (SiO_2) است. وجود دو ناحیه ساختاری سندنچ - سیرجان متشکل از سنگ‌های دگرگونه و ناحیه ساختاری ایران مرکزی با برون‌زدی از سنگ‌های آهکی الیگوسن - میوسن در جنوب شهرستان رزن نوعی انطباق را بین نوع خاک مورد استفاده در ساخت سفال‌ها و خاک‌های منطقه ایجاد می‌کند. با این حال نمی‌توان به قطع منشا خاک مورد استفاده برای ساخت سفال‌های مورد مطالعه را در این منطقه دانست چرا که حوزه گسترش ناحیه ساختاری مذکور بسیار وسیع است.

وجود CaO در نتایج آنالیز دو روش PIXE و XRF وجود کربنات کلسیم را محرز می‌نماید. کانی اصلی تشکیل دهنده سنگ آهک کربنات کلسیم یا کلسیت ($CaCO_3$) است. سنگ آهک ممکن است ناخالصی‌هایی چون سیلیس (SiO_2)، اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسید منیزیم (MgO) و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) نیز داشته باشد. با توجه به این که تمامی ترکیبات مذکور در نتایج آنالیز سفال‌ها قابل رویت است می‌توان خاک به‌کار رفته در ساخت سفال‌ها حاصل از سنگ‌های آهکی دانست.

آهک زنده (CaO) از حرارت‌دهی سنگ آهک در درجه حرارت ۶۰۰-۱۰۰۰ سانتی‌گراد استحصال می‌شود. $CaCO_3 + Q = CaO + CO_2$

با توجه به وجود ترکیب CaO در آنالیز سفال‌ها می‌توان میزان حرارت کوره‌های پخت سفال‌های مورد مطالعه را ۶۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفت. وجود پیک کلسیت در نمونه شماره ۱۵ نشان می‌دهد که این نمونه در دمایی کم‌تر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دیده است، چرا که این ترکیب در دمایی بیش از دمایی مذکور تجزیه می‌شود.

وجود Illite، Fe_2O_3 (هماتیت)، SiO_2 (کوارتز) و پلاژیوکلازها (آلیت، آنورتیت ...) عاملی بر تشابه نوع خاک مورد استفاده و نحوه پخت سفال‌هاست. وجود هماتیت (Fe_2O_3) در آنالیز نشان از عمل اکسیداسیون در قشر نارنجی رنگ سفال‌های مورد مطالعه دارد. همچنین وجود ترکیب مذکور دلیلی است بر وجود وستیت (FeO) در بخش خاکستری سفال‌ها که به روشنی از تشکیل شرایط احیاء خبر می‌دهد. در این نمونه‌ها نیز وجود فازهای وستیت (FeO) و مگنتیت (Fe_3O_4) همراه با فاز آنورتیت ($\{Ca\}Al_2Si_2O_8$) در لایه خاکستری به‌خوبی مشخص کننده شرایط پخت احیاء می‌باشد. به‌نظر می‌رسد در این نمونه‌ها سفال ابتدا تحت شرایط احیاء پخت شده و سپس در شرایط اکسایش قرار گرفته است. همان‌طور که در ابتدای این مقاله اشاره شد یکی از اهداف مورد توجه تعیین

و تبیین محلی بودن و یا غیر محلی بودن سفال‌های کلینکی منطقه همدان است. با توجه به عدم انجام پروژه مشابه به تحقیق فوق در منطقه‌ای خارج از محدوده‌ی همدان و همچنین نبود منبعی برای مقایسه اظهار نظر در رابطه با این موضوع نمی‌تواند با یقین همراه باشد. اما آنچه محرز است تشابه ترکیب ماده‌ی اولیه (گل) ساخت سفال کلینکی منطقه همدان با ترکیبات زون‌های ساختاری سنندج - سیرجان و ایران مرکزی است که خود می‌تواند مدرکی دال بر محلی بودن سفال مورد بحث و آشنایی مردمان اشکانی با نحوه و تکنیک پخت آن به صورت منطقه‌ای و بومی باشد. با این وجود گستردگی زون‌های مذکور و محدوده‌ی پراکندگی سفال کلینکی (سنندج تا اصفهان) قطعیت تولید این گونه سفال را در منطقه همدان به احتمال بدل می‌سازد. بعید نیست که سفال‌های کلینکی مورد مطالعه در هر جایی از این زون‌های ساختاری ساخته شده و به همدان راه یافته باشند. پس به طور کلی باید چنین گفت که مردمان دوره‌ی اشکانی ساکن در محدوده‌ی این زون ساختاری با نحوه و تکنیک پخت سفال کلینکی آشنایی داشته‌اند. این مردمان در محدوده‌ی مکانی سنندج تا اصفهان یعنی آخرین جایی در زون ساختاری سنندج - سیرجان که از آن سفال کلینکی یافت شده است، به پخت این گونه سفال مشغول بوده‌اند که منطقه همدان نیز یکی از این مناطق محسوب می‌شود. لذا می‌توان سفال‌های کلینکی مورد مطالعه را به احتمال متعلق به خود منطقه همدان دانست.

منابع

- آذرنوش، مسعود، ۱۳۸۱، مجموعه مقالات نخستین همایش باستان سنجی در ایران: نقش علوم پایه در باستان‌شناسی، سازمان میراث فرهنگی کشور، پژوهشکده باستان‌شناسی، تهران.
- جاسمی، فاضل، ۱۳۹۰، تهیه نانو ذرات Au/TiO_2 و بررسی خواص فیزیکی آن، پایان نامه برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد در رشته فیزیک (گرایش اتمی و مولکولی)، گروه آموزشی فیزیک دانشکده علوم پایه دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- حیدریان، معصومه، معصومه مجیدی، ۱۳۷۳، بررسی پتروژنوپتروگرافی سنگ‌های دگرگونی مجاورتی همدان، پایان نامه برای اخذ مدرک کارشناسی ارشد گروه زمین‌شناسی.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۸۰، فرهنگ جغرافیایی شهرستان‌های کشور (شهرستان همدان)، انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران. سایت پایگاه ملی داده‌های علوم زمین: اطلاعات علوم زمین (زمین‌شناسی ایران). (www.ngdir.com)
- شیپمان، کلاوس، ۱۳۸۴، مبانی تاریخ پارتمان؛ ترجمه هوشنگ صادقی، مجموعه مطالعات ایران باستان، تهران، نشر فرزاد روز، چاپ اول.
- قیاسی، کی‌آرش، ۱۳۸۵، مروری بر روش‌های فتوالکترونیک و برهم‌کنش ذرات باردار به منظور آنالیز سکه‌های باستانی دوره ساسانی به روش XRF و PIXE، پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک.
- گلستانی‌فرد، فرهاد، ۱۳۸۳، روش‌های شناسایی و آنالیز مواد/ فرهاد گلستانی

فرد، اسماعیل صلاحی، محمدعلی بهره‌ور، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
 - لاهونی، آصف، ۱۳۸۶، بررسی محوطه‌های اشکانی دامنه‌های شمالی الوند
 (همدان)، پایان‌نامه برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد در رشته باستان‌شناسی
 دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر.

- محمدی‌فر، یعقوب، ۱۳۸۷، باستان‌شناسی و هنر اشکانی، سازمان مطالعه و
 تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت)، مرکز تحقیق و توسعه علوم انسانی،
 تهران.

- هرینگ، ارنی، ۱۳۷۶، سفال ایران در دوره اشکانی، ترجمه حمیده چوبک، سازمان
 میراث فرهنگی کشور.

- Adachi, Takora, 2005, CONSIDERIKG THE REGIOKAL DIF-
 FERENCES IK THE PARTHIAN FINE POTTERY, AL-RAFIDAK, Vol
 XXVI, pp. 25-36.

- Verma, H.R, 2007, Atomic and Nuclear Analytical methods, XRF,
 Mossbauer, XRF, NAA and Ion- Beam spectroscopic techniques, springer,
 verlag Berlin Heidelberg.

Archive of SID