Journal of Research on
Archaeometry

DOI: 10.29252/jra.3.2.45 URL: http://jra-tabriziau.ir/

Original Paper

Preparation of Thin Sections of Porous Materials for Polarizing Microscope Investigation in Archaeometry

Mehdi Razani*[1], Feli Martinez Conejero[2], Mahin Mansori Isfahani[3], Hakimeh Afsharinezhad[4]

[1] *Assistant Professor, Faculty of Applied Arts, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN*
[2] *Lecturer, Petrology Laboratory, Department of Geosciences and Environment University of Alicante, SPAIN*
[3] *Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, Dep. Mine Engineering, Industrial University of Isfahan, IRAN*
[4] *M.Sc. in Archaeometry, Faculty of Applied Arts, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN*

Received: 26/02/2016 **Accepted: 03/05/2016**

Abstract

Thin section petrography is a knowledge based on a study of stones and minerals with polarizing light of a transmitting optical microscope, that is a standard scientific method for mineralogy, petrology, geology and etc. Researchers with this method can gain supplementary or fundamental information. Thin section making technique was developed by geologists for the study of rocks. Using the thin section for the study of cultural heritage has more than one century old. Thin sections take into consideration from a basic analysis for use to examine a wide variety of Archaeometry-archaeological survey and also conservation and of historical materials for characterization, determining sources and provenance, pathology and evaluation of the conservation treatment effect on inorganic materials (such as: rocks, historical slags, mud brick, plaster, pottery and ancient mortars).Thin sections use for petrological and mineralogical survey are made in different sizes by using different techniques for curing, polishing and staining small slabs of a rock sample,normally thin sections made by reducing the thickness of small fragments of materials that attaching the flat surface of glass microscope slide (with size of 47×26 mm) by sawing and grinding to standardthickness (25-30µm),at this thickness most mineral s (e.g. silicatestypically quartz is used as the reference to determine standard thickness as it is one of the most abundant minerals) becomes more or less transparent and can then be observed by a microscope using transmitted light and then using the Michel-Lévy interference color chart to recognizing the minerals and their structural aspects (cleavage, fractures, mineral zoning).On one hand when the ordinary methods of making thin sections applied to other materials that are soft, heat sensitive, and/or water sensitive, thin section preparation presents considerable challenges for the technician and On the other hand, according to the limitation of sampling in the case of the cultural heritage of artworks and historical objects, as we know the Archaeometry researcher most be using the minimum sample for answer the questions, Since due to the importance of saving the small and also weak samples from cultural heritage a description of preparing thin sections to Petroghraphic microscopy investigation in Archaeometry is the main purpose of this paper. Samples for this study were a kind of weak Tufa from the regions near the Alcala Del Jucar city of

* Corresponding author: m.razani@tabriziau.ac.ir

Valencia /Spain and also from the powdered surface of rock-hewn architecture in Kandovan Historical village from Northwest of Iran. All process for preparing the thin sections were in the petrology Lab of Geosciences and environment department from the university of Alicante/SPAIN and petrology laboratory in earth and environmental sciences department from Università degli Studi DI Milano-Bicocca, Italy. This article has been prepared in 6 essential steps, including by: 1) sampling strategy and specimen preparation, 2) preparing the samples for cutting process, 3) cutting of the fragments (consist of: hard, soft and powder materials) and making the slide, 4) impregnation techniques with a resin, and attach the slide to glass, 5) reduce the thickness of slide till standard size with sawing and grinding methods in three phase from cm to μm, and finally 6) decision making to add the protective cover for slide in the stone face plus preserve of thin section, equipments of petrography lab. the results of this study with emphasize to soft materials specialty in cultural heritage and Archaeometry demonstrated that: some steps like sampling and impregnation is very important to make high quality thin sections; consolidation and saturation of fragments with vacuum methods in two steps before any cutting can be a suitable way for materials like soft stone, weathered stone, fragile potteries and historical mortars to preparing a thin sections.

Keywords: Archaeometry, Thin Section Preparation, Mortars, Pottery, Soft & Weathered Rock.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهه باستان‌سنجی ۱۳۹۶؛ ۳(۲): ۴۵-۶۰

پژوهه باستان‌سنجی (علمی-پژوهشی)

DOI: 10.29252/jra.3.2.45

URL: http://jra-tabriziau.ir/

مقاله پژوهشی

آماده‌سازی مقاطع نازک از مواد متخلخل برای مطالعات با میکروسکوپ پلاریزان در باستان‌سنجی

مهدی رازانی[۱]*، فِلی مارتینز گونیخرو[۲]، مهین منصوری اصفهانی[۳]، حکیمه افشاری‌نژاد[۴]

۱. استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

۲. مربی، دانشکده زمین‌شناسی و علوم محیطی، دانشگاه آلیکانته، والنسیا، اسپانیا

۳. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد باستان‌سنجی، دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۲/۱۳

چکیده

مقاطع نازک با کاهش دادن ضخامت قطعات کوچک نمونه‌هایی که بر روی سطح شیشه لام میکروسکوپی چسبانده شده‌اند توسط ماشین‌های برش و سایش، جهت رسیدن به ضخامت استاندارد (۳۰-۲۵μm) برای میکروسکوپ پلاریزان ساخته می‌شوند. هنگامی که روش‌های معمول ساخت مقطع نازک برای دیگر مواد نرم، حساس به حرارت و یا آب به کار گرفته می‌شود، تهیه مقطع نازک به چالش قابل ملاحظه‌ای برای آزمایشگرها تبدیل می‌گردد. ازاین‌رو با هدف تشریح فرآیند تهیه مقاطع نازک برای مطالعات میکروسکوپی در بررسی‌های باستان‌سنجی مقاله حاضر در ۶ مرحله شامل: ۱) راهبرد نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها، ۲) آماده‌سازی نمونه‌ها برای عملیات برش ۳) بریدن قطعه و تهیه بیسکویت نمونه(انواع مقاوم، پودری و سست)، ۴) روش‌های اشباع با رزین و اتصال بیسکویت نمونه به لام شیشه‌ای، ۵) نازک‌کاری بیسکویت تا رسیدن به اندازه استاندارد، و در نهایت ۶) نگهداری از مقاطع نازک و تجهیزات آزمایشگاه و اضافه کردن پوشش محافظ بر سطح مقطع ارائه شده است. نمونه‌های این تحقیق مربوط به سنگ توف‌های اسپانیایی و سنگ توف از روستای کندوان هستند که هر دو گونه دارای ساختاری پودری و ترد بودند که با روش‌های معمول در طی فرآیند کار به کلی از دست می‌رفتند. نتایج حاصل از یافته‌های تحقیق نشان‌دهنده آن است که استحکام‌بخشی و اشباع دو مرحله‌ای به روش خلأ می‌تواند در موارد بسیاری راهگشای نمونه‌های سست برای تهیه مقاطع نازک باشد.

واژگان کلیدی: باستان‌سنجی، تهیه مقطع نازک، ملات‌های پودری، سفال تاریخی، سنگ نرم و هوازده.

* مسئول مکاتبات: تبریز، بلوار آزادی، میدان حکیم نظامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، دانشکده هنرهای کاربردی، کد پستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳۱.

پست الکترونیکی: m.razani@tabriziau.ac.ir

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

۱. مقدمه

زمین شناسان روش ساخت مقاطع نازک برای مطالعه‌ی سنگ‌ها را ابداع نمودند، اما بیش از یک قرن است که از مقاطع نازک در مطالعات میراث فرهنگی استفاده می‌شود. مطالعات بر روی مقاطع نازک به‌عنوان یک روش آنالیز پایه برای بررسی طیف وسیعی از بررسی‌های باستان‌شناسی- باستان‌سنجی و همچنین حفاظت و مرمت مواد تاریخی کاربرد دارد. هدف از مطالعات پتروگرافی با استفاده از مقاطع نازک تعیین خصوصیات (کانی‌شناسی و بافت)، توصیف و طبقه‌بندی کانی‌های نمونه مطالعاتی، اندازه‌گیری درجه هوازدگی و دگرسانی، مطالعه ریزترک‌ها و تخلخل، تعیین مقادیر نسبی کانی‌ها و اجزا اصلی نمونه، مقایسه خصوصیات نمونه با دیگر نمونه‌های گرفته شده از یک یا چند منبع، با سوابق و شناسنامه‌ی مشخص است[1,2].

امروزه آنالیز پتروگرافی در مطالعات علمی میراث فرهنگی جهت شناسایی مواد معدنی، تعیین منشأ اصلی مواد، شناسایی اشیایی که از یک منشأ ساخته شده‌اند، مطالعه آسیب‌شناسی و بررسی تأثیر درمان‌های حفاظتی و تأثیرات استحکام‌بخش‌ها، در آثار سنگی، سفال و سرامیک، آجر و موادی نظیر اندودها، سرباره‌ها و ملات‌ها در کنار دیگر آنالیزها استفاده می‌شود. از داده‌های به‌دست‌آمده از مطالعه‌ی مقطع نازک می‌توان در آنالیزهای آماری و تبدیل آن‌ها به داده‌های قابل ارزیابی محاسباتی و نتیجه‌گیری کمی استفاده نمود[3]. مطالعه مقاطع نازک مورد استفاده توسط میکروسکوپ پلاریزان درواقع یک لایه بسیار نازک از مواد معدنی صیقل یافته هستند که به‌وسیله رزین بر شیشه لام چسبیده شده‌اند. ضخامت این لایه نازک به‌صورت استاندارد و قراردادی ۳۰μm (برابر با ۰/۰۳mm) است که این ضخامت استاندارد باعث می‌شود تا ویژگی‌های رنگی و نوری کانی‌ها توسط نور پلاریزه مشخص گردد و بتوان آن‌ها را با جداول استاندارد تشخیصی (همچون مرجع رنگ میشل- لاوی) مقایسه نمود. ازآنجاکه پژوهشگران حوزه میراث فرهنگی خصوصاً آن‌هایی که با پیشینه‌ای به غیر از زمین‌شناسی و کانی‌شناسی وارد این حوزه می‌شوند در بسیاری مواقع، به سبب عدم تشریح فرآیند نمونه‌سازی و تهیه مقطع نازک به‌ویژه در ارتباط با نمونه‌هایی با شرایط خاص مانند سفال‌های متخلخل، ملات‌های پودری، سنگ‌های نرم و هوازده با مشکل مواجه می‌شوند. هدف این نوشته، بیان فرآیند ساخت مقاطع نازک از این قبیل نمونه‌های ترد و شکننده با زبانی آموزشی و به‌صورت مرحله‌ای برای متخصصین باستان‌سنجی است. این در حالی است که پژوهشگران در بسیاری مواقع، به سبب عدم تشریح فرآیند نمونه‌سازی و تهیه مقطع نازک به‌خصوص در رابطه با نمونه‌هایی با شرایط خاص مانند سفال‌های متخلخل، ملات‌های پودری، سنگ‌های نرم و هوازده، با مشکل مواجه می‌شوند. هدف این نوشته بیان فرآیند ساخت مقاطع از این نمونه‌های ترد و شکننده به‌صورت مرحله‌ای است.

۲. پیشینه تحقیق

هنری کلیفتون سربی (۱۸۲۶- ۱۹۰۸) اولین بار در سال ۱۸۴۹.م نخستین مقطع نازک میکروسکوپی (شکل ۱- Fig; 1) را از سنگ آهکی تهیه نمود و در سال ۱۸۸۲.م روش آماده‌سازی مقطع نازک را که خود توسعه داده بود شرح داد[4]. تاریخچه تکامل روش مقطع نازک توسط هولمز[5] و جانسن[6] شرح داده شده است. چندی نگذشت که این روش در مطالعات مربوط به میراث فرهنگی به کار گرفته شد.گئورگ ریچارد لپسیوس (George Richard Lepsius) زمین‌شناس آلمانی از نخستین افرادی بود که از تکنیک مقطع نازک در سال

شکل۱: طرح شماتیک از یک مقطع نازک استاندارد با تمامی لایه‌های متصل شده به شیشه لام توسط اپوکسی با سطح پوشش داده شده [14]
Fig; 1: A schematic diagram of standard thin section with all layers attached to the slide with epoxy resin and covered by slip [14]

۱۸۹۰.م برای آنالیز مواد باستان‌شناسی استفاده کرد. وی که برای تهیه نقشه زمین‌شناسی از منطقه آتیکا (Attica) از یونان به این کشور سفر کرده بود (۱۸۸۹-۱۸۸۷.م) در طول مشاهداتش تعداد ۴۰۹ نمونه سنگ مرمر از مجسمه‌ها و معادن آن ناحیه جمع‌آوری کرد و با استفاده از مقاطع نازک به دسته‌بندی و تفکیک گونه‌های مرمر بر اساس مشاهدات برآمده از جزئیات میکروسکوپی همانند رنگ و اندازه دانه‌ها و ادخال‌های (Inclusion) آن‌ها پرداخت. گرچه نتایج مطالعات متأخر برخی از این نتایج را نقض نمود اما بررسی‌های وی به‌عنوان یکی از نخستین اقدامات بخش مهمی از تاریخ مطالعات پتروگرافی در میراث فرهنگی را تشکیل می‌دهد[7,8]. به‌صورت واضح و مشخص استفاده از مقطع نازک در مطالعات مربوط به سفال‌های تاریخی به سال ۱۹۴۲.م برمی‌گردد زمانی که محققانی همانند شپرد[9]، فِلتس [10]، و ماتسون[11] نتایج آنالیزهای پتروگرافی بر روی برخی آثار سفالی را منتشر نمودند و این آنالیز را به مثابه گامی ارزشمند در تحلیل نتایج باستان‌شناسی به‌عنوان روشی تکمیلی در بررسی منشأ و پی بردن به تکنولوژی ساخت آثار تفسیر کردند[8]. از مهم‌ترین آثار انتشار یافته در رابطه با روش‌های ساخت مقاطع نازک کتاب *آماده‌سازی مقاطع نازک سنگ‌ها، کانی‌ها و سرامیک‌ها* است که در ۱۹۹۲ توسط هامفرایز از طریق دانشگاه آکسفورد منتشر شده است[12]. همچنین کوئین[13] در کتاب خود عنوان «پتروگرافی سرامیک: تفسیر سفال‌های باستانی و آثار وابسته در مقطع نازک» به شرح مختصر و مفیدی از روش مقطع زنی سفال‌های تاریخی به همراه مشکلات و اشتباهات ممکنی که در روند ساخت پیش می‌آیند، پرداخته است.

۳. روش تحقیق

تحقیق پیش رو به روش تحلیلی - تجربی و بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای، برداشت میدانی نمونه‌ها از منطقه الکاله دل خوکا (Alcala Del Jucar) اسپانیا و روستای کندوان در آذربایجان شرقی و همچنین ثبت تجربه‌های عملی فرآیند ساخت مقاطع نازک انجام گرفته است. به نحوی که از انجام مطالعات کتابخانه‌ای در قالب پیشینه استفاده شده، و با حضور در آزمایشگاه‌های پترولوژی، دانشکده زمین‌شناسی و علوم محیطی، دانشگاه آلیکانته، والنسیا، اسپانیا و آزمایشگاه پتروگرافیِ دانشکده علوم زمین دانشگاه بیکوکا (میلان) ایتالیا و انجام مصاحبه، ثبت و ضبط مشاهدات و همچنین ساخت مقاطع نازک به تعداد ۲۸ عدد از نمونه‌های ترد سنگ‌های توف هوازده از نمونه‌های سنگ توفای اسپانیایی و سنگ توف آتشفشانی روستای تاریخی کندوان انجام شده است.

۴. مرحله ۱) راهبردهای نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها برای تهیه مقطع نازک

نمونه‌برداری نخستین اقدام و شاید مهم‌ترین بخش مطالعات علمی به‌خصوص در مواجهه با میراث فرهنگی برای انجام بررسی‌های باستان‌سنجی است. در نمونه‌برداری برای ساخت مقطع نازک ویژگی‌های هنری، تاریخی، معماری و فرهنگی به‌علاوه راهنمایی متخصصین باتجربه در امر مطالعات میکروسکوپی، فرآیند تهیه مقطع نازک را بایستی مدنظر قرار داد. ازاین‌رو به‌عنوان یک اصل اولیه در نمونه‌برداری و تحقیقات میدانی، نمونه‌هایی مناسب هستند که به سؤالات و فرضیات مطرح شده‌ی بیشتری پاسخ می‌دهند. در همین راستا پرسش‌هایی از این قبیل می‌توانند بسیار به پژوهشگر برای انتخاب نمونه صحیح کمک کنند، مانند: نمونه به چه سؤال یا سؤال‌هایی باید پاسخ دهد؟ برای پاسخ به این سؤالات چه محل‌هایی برای نمونه‌برداری مناسب هستند؟ از کدام جهت یا سطح، مقطع نازک و به چه تعدادی باید تهیه شود؟ با چه روشی مقطع باید ساخته شود؟ چگونه نمونه را نگهداری کنیم تا اطلاعات از بین نروند؟

از طرف دیگر اشخاصی که می‌خواهند از نمونه، مقطع نازک تهیه کند احتمالاً چنین سؤالاتی را در هنگام مشاهده اولیه نمونه از خود می‌پرسند: آیا نمونه سخت است یا نرم و پودری؟ آیا نمونه متخلخل یا ترد است؟ میزان این تخلخل و تردی چقدر است؟ آیا نمونه ذرات کوچک و با اهمیت دارد که باید در مقطع باشند؟

پاسخ‌گویی به این سؤالات درواقع متضمن به‌کارگیری و یا حذف برخی مراحل در ساخت مقطع نازک است.

نکته قابل توجه دیگر در این مرحله برای پژوهشگر مستندنگاری محل قرارگیری نمونه از اشیاء و یا محوطه‌ها و توصیف شرایط آن در زمان برداشت است. عمدتاً پیشنهاد می‌شود که نمونه‌برداری توسط متخصصین مربوطه و یا تحت نظر و مشاوره آن‌ها و کسی که مطالعه میکروسکوپی را انجام می‌دهد؛ صورت پذیرد. مثلاً؛ برای نمونه‌برداری از ملات در طی مطالعات میدانی بایستی اطلاعات مربوط به بنا و بستری که ملات در آن قرار دارد یادداشت شوند. برخی اطلاعات مهم در این زمینه عبارت‌اند از: ۱-کاربرد محل نمونه‌برداری در ساختار معماریی که نمونه مطالعاتی ازآنجا برداشته می‌شود، ۲- گونه ملات (اندود بیرونی، اندود درونی، ملات بندکشی یا ملات دیوار چینی) همچنین، ۳- شرایط قرارگیری ملات باید توصیف شود. اطلاعاتی از این قبیل در تحلیل نتایج بسیار سودمند خواهد بود. محل نمونه‌گیری از ملات (جهت دیوار، ارتفاع)، مکان قرارگیری ملات و فاصله محل نمونه‌برداری از ناودان‌ها و منبع گرمایش بنا، تاریخچه تعمیرات و قدمت ملات در صورت وجود اطلاعات، همچنین اطلاعات مربوط به تاریخچه و ساختار بنا یا اتفاقات خاص مانند مجاورت با آتش یا آسیب ناشی از باد و غیره مفید هستند که بایستی به وسیله عکاسی و یادداشت‌برداری ثبت و ضبط شوند[15]. همچنین بررسی‌های میکروسکوپی مقطع نازک برای نمونه‌هایی که قبلاً به‌منظور ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آزموده شده‌اند، در مقایسه با نمونه‌های آزموده نشده، مناسب‌تر هستند[1]. برنامه نمونه‌گیری معمولاً شامل یک یا دو نوع (یا ترکیبی از هر دو) نمونه‌برداری است. در گونه‌ی نخست نمونه‌های اتفاقی و تصادفی برای دانستن محتوا و چیستی نمونه مادر و به‌دست آوردن دیدی کلی از آن تهیه می‌گردند. گونه دوم نمونه‌برداری هدف‌گرا است و برای دستیابی به یک هدف اختصاصی مانند نکته‌ای که در مقطع نخستین در مورد آن شکی پدید آمده، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. عمده نمونه‌برداری‌ها از میراث فرهنگی به علت عدم امکان برداشت چندین نمونه از اشیا مطالعاتی هدف‌گرا هستند. روش نمونه‌برداری نیز به حجم نمونه مورد نیاز برای بررسی‌های پتروگرافی، گونه‌ی مصالحی که باید مورد مطالعه قرار گیرد و هدف مطالعات وابسته است. اندازه مقاطع نازک بیشتر متمایل به نمونه‌های کوچک (۷۵×۲۵ mm) و متوسط (۷۵×۵۰ mm) است تا نمونه‌های بزرگ (۷۵×۱۰۰ mm). این در حالی است که اندازه مقاطع وابستگی زیادی به اندازه دانه‌های موادی دارد که از آن‌ها مقطع تهیه می‌شود. اندازه‌های کوچک اسلاید تنها برای مطالعه سنگ‌های ریزدانه و ملات‌های رقیق (Grouts) مناسب است. اما بسیاری از مواد و مصالح ازجمله نمونه‌های بتن، نیازمند استفاده از اسلایدهای متوسط و بزرگ هستند[16]. آن‌چنان‌که ذکر شد تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای مطالعه به هدف بررسی/ آزمون، اندازه نمونه مادر و نتایجی که قرار است از مطالعات گرفته شود وابسته است. مثلاً در رابطه با ملات‌های تاریخی، اندازه‌ی نمونه بستگی به آن دارد که چه مقدار می‌توان نمونه برداشت که به جنبه‌های حفاظتی و زیبایی‌شناسی اثر آسیب وارد نکند. همچنین در رابطه با تعداد نیز حداقل سه نمونه پیشنهاد می‌شود تا نتایج بتوانند بیشتر قابل اعتماد و استناد شوند اما وابسته به هدف مطالعه که تمرکز بر روی پرکننده، بست دهنده و یا تخلخل و غیره باشد این تعداد قابل تغییر است[15]. نکته مهم در نمونه‌برداری از میراث فرهنگی محدودیت نمونه‌برداری است و غالباً نمی‌توان حجم بسیاری نمونه در اختیار داشت[3] ازاین‌رو بایستی با کمترین میزان نمونه به بیشترین سؤالات پاسخ داده شود.

۵. مرحله ۲: آماده‌سازی تجهیزات و نمونه‌ها

چرخ‌های صیقل زنی و بعضی از ورقه‌های سمباده‌ای که فلزی عمدتاً فولادی هستند دچار زنگ‌زدگی می‌شوند. در این رابطه توصیه جدی آن است که در ابتدا آن‌ها را تمیز کرده و زنگ‌ها زدوده شوند. در بسیاری موارد اجتناب از این کار باعث می‌شود. روی نمونه‌ها در مقطع برش خورده ردّی از زنگ آهن پدید آید که زدودن آن به واسطه نفوذ در تخلخل موجود در نهایت کار بسیار دشواری است و به سادگی امکان‌پذیر نیست. ازاین‌رو، اگر قصد انجام آنالیز دیگری در آن ناحیه وجود دارد این بخش درواقع بلااستفاده می‌گردد. در عمل تمیزکاری با

دستمال‌کاغذی انجام می‌شود به‌نحوی‌که درحالی‌که کمی آب خالص روی چرخ ریخته شده است با دستمال‌کاغذی، پارچه یا اسفنج و یا کاغذی ضخیم یا هر دو می‌توان زنگ‌زدگی سطح را برطرف نمود. در این مرحله بایستی نمونه‌های سنگ و سفال توسط آون در دمای ۱۰۵ °C حداقل برای دو ساعت خشک شود (که برای نمونه‌های حساس به حرارت درجه آون مانند نمونه‌های ملات باید کمتر از ۶۰°C و بالاتر از ۴۵°C بوده و مدت زمان بیشتری این روند ادامه یابد[15]. خشک بودن نمونه از آن جهت اهمیت دارد که رزین بتواند در آن بیشتر نفوذ کند زیرا باید بتوان با خارج کردن حباب‌های هوا از درون نمونه، آن‌ها را با رزین جایگزین کرد و آن را تماماً اشباع نمود.

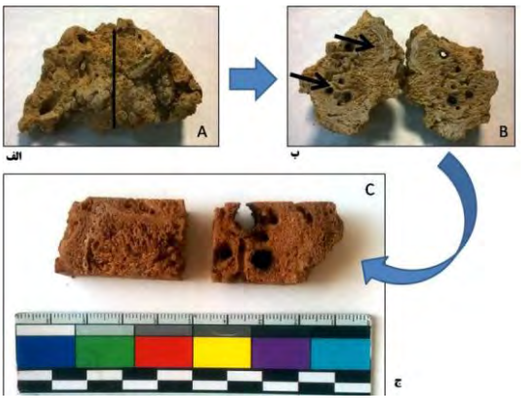
در این مرحله باید تصمیم گرفت کدام محل نمونه و از چه جهتی بایستی برش خورده و از آن مقطع تهیه شود. زیرا بایستی دقیقاً بر همان محلی در نمونه دستی تمرکز گردد که به سؤالات پژوهشگر پاسخ می‌دهد. در این رابطه بهتر است محقق کاملاً محل را با علامت رنگی مشخص نماید (شکل ۲-Fig; 2). احتمال دارد در مواقعی که نمونه برای ساخت مقطع به آزمایشگاه‌های پترولوژی و یا کارگاه‌ها انتقال داده می‌شوند از جهت و محل دیگری که مدنظر پژوهشگر نیست، مقطع تهیه شود،این نکته به‌ویژه در نمونه‌هایی که دارای بافت هستند اهمیت دارد. زیرا عموماً نمونه بایستی از محلی برش داده شود که تمامی بافتِ آن قابل دید باشد. اما ممکن است برای اهداف و پاسخگویی به سؤالات ویژه از دیگر جهات نیز نمونه تهیه گردد. از طرفی غالباً جهت برش نمونه نیز اهمیت دارد به‌نحوی‌که در فرآیند برش، نمونه‌ای بایست تولید شود که تمامی ویژگی‌های اثر در آن موجود باشد. برای مثال در نمونه‌های سنگی که از طریق پتروگرافی مورد مطالعات هوازدگی و شناسایی عمق تخریب قرار می‌گیرند، مقاطع باید تغییرات را از سطح به درون نشان دهند ازاین‌رو مقاطع بایستی موازی با سطح در اعماق مختلف و تا عمق مورد نظر پژوهشگر از بیرونی‌ترین سطح به درون تهیه شوند. در سفال‌های تاریخی مقاطع عموماً از مغز سفال مقطع تهیه می‌شود چراکه از این طریق می‌توان مقداری از لایه تزئینی و پوشش بیرونی، محتوای میانی و شاید لعاب درونی را مشاهده نمود[3]. این امر در کاشی‌ها نیز می‌تواند با تهیه مقطع به‌صورت عرضی جهت محاسبه ضخامت لعاب‌های سطحی و مطالعه آن‌ها همراه با بستر صورت گیرد. لازم به ذکر است در عمل تهیه مقطعی که کلیه‌ی ویژگی‌های مورد سؤال را دارا باشد غیرممکن و یا بسیار نادر است به‌نحوی‌که برش‌های طولی و عرضی در سفال‌های تاریخی هر کدام برای پاسخگویی به سؤالات متفاوتی تهیه می‌شوند.

۶-مرحله ۳ : بریدن قطعه و تهیه بیسکویت نمونه

برای اینکه مقطع نازک میکروسکوپی تهیه کنیم نخست باید بتوانیم نمونه‌های غیر منتظم را به‌صورت منتظم و در اندازه تقریبی ۳cm×۲×۱-۰/۸ بر اساس استانداردهای بین‌المللی برش بزنیم- البته لازم به ذکر است این مرحله به‌ویژه در رابطه با نمونه‌های تاریخی کوچک ضرورتی ندارد- که محصول خروجی از این مرحله به سبب شباهت آن به قطعه مکعب مستطیلی بیسکویت به «بیسکویت نمونه» معروف است. در این حالت با دو گونه نمونه مواجه هستیم. الف) نمونه‌های قابل برش (نمونه‌های معمولی مانند سنگ‌ها آذرین عمده، سنگ‌های دگرگونی و رسوبیِ بادوام، نمونه‌های سفال، آجر و کاشی مقاوم) (شکل ۲-Fig; 2)، و ب) نمونه‌های نرم، متخلخل و حساس به آب (سنگ‌های نرم و هوازده، ملات‌های پودری و قطعات سفال ترد) که نیازمند تقویت ساختار برای برش و تهیه بیسکویت هستند.

۶-۱. نمونه‌های مقاوم و قابل برش

عمده سنگ‌های بکری که برای تهیه مقطع نازک به آزمایشگاه تحویل داده می‌شوند، قابلیت برش‌های اولیه را دارند ازاین‌رو روند کار به‌صورت معمول انجام می‌گیرد، وابسته به ابعاد نمونه (قطر و ارتفاع آن) با ماشین‌های برش بزرگ‌تر و در ادامه با ماشین‌های برش کوچک‌تر، نمونه آماده‌سازی می‌شود. در طی این مرحله بایستی به‌وسیله تیغه‌ی الماسهٔ ماشین‌های برش، دقیقاً در محلی که قبلاً بر روی نمونه علامت‌گذاری شده، برش انجام



شکل ۲: نمونه‌ای بسیار متخلخل از توف رسوبی موسوم به توفای اسپانیایی: الف) خط برش سنگ برای تهیه مقطع. ب) مقطع درونی سنگ و محل‌هایی مورد نظر جهت تهیه مقطع نازک. ج) بخش‌های منتخب که به‌صورت مکعب مستطیل‌های استاندارد برش داده شده‌اند.

Fig; 2: The sample of sedimentary tuff called Spanish Tufa with a high porosity: a) cutting line of the rock for making thin sections. B) The inner section of the rock and the areas desired for the thin section. C) Selected segments cut in standard cubic rectangles

شود. عمده ماشین‌های برش، بخشی برای قرار دادن نمونه دارند که در این محل به‌وسیله گیره‌هایی نمونه محکم شده و به طرف تیغه برش به‌صورت موازی حرکت داده می‌شود و قلوه‌سنگ یا قطعه نامتوازن به اندازه استاندارد بیسکویت نمونه درمی‌آید. برش‌ها در این مرحله بایستی در صورت امکان موازی باشند و نکات ایمنی مانند بستن درب دستگاه (در صورت وجود)، استفاده از عینک محافظ چشم و دستکش، کاهش‌دهنده‌های حجم صدا برای گوش‌ها پیشنهاد می‌شود.

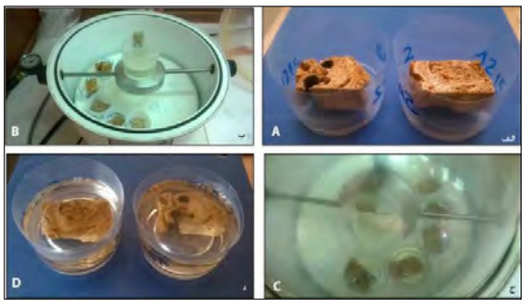
۶-۲. نمونه‌های پودری، سست و متخلخل

نمونه‌های نرم و متخلخل و حساس به آب درواقع بخشی از نمونه‌های مربوط به میراث فرهنگی در پژوهش‌های باستان‌سنجی را در بر می‌گیرند. ماشین‌های برش متعددی برای استفاده‌های مختلف وجود دارد اما تقریباً تمامی ماشین‌های برش برای خنک شدن تیغه‌ها و تسهیل در برش نمونه با آب کار می‌کنند. برای برخی نمونه‌های حساس به آب می‌توان میزان آب ورودی به سطح تیغه‌ی برش را کاهش داد، در مواردی چون ملات‌های تاریخی نیز می‌توان روغن را جایگزین آب نمود. اما عمده سازندگان مقاطع نازک این کار را نمی‌کنند. برای حل مشکل نمونه‌های فوق، در صورت وخامت حالت پودری، تخلخل، سستی و حساسیت به آب که امکان برش آن مانند نمونه‌هایی سخت وجود نداشته باشد، در ابتدا آن را با رزین اشباع می‌کنند و در ادامه، آن را به حالت بیسکویت درمی‌آورند.

۶-۳. اشباع نمونه‌های پودری، سست و متخلخل

تقویت ساختار نمونه برای برش در مواردی که با مواد بسیار ترد و پودری مواجه هستیم مانند قطعات سفال ترد و بسیار متخلخل یا نمونه‌های ترک‌خورده و هوازده[3] و ملات‌های پودری تاریخی[17] که در تماس با آتش و یا مواجهه با اسید آسیب دیده‌اند، بسیار مهم است[15]. ازاین‌رو از روش اشباع نمونه‌ها با رزین اپوکسی یا دیگر مواد برای به دست آوردن ثبات کافی جهت برش‌ها و سایش‌های بعدی استفاده می‌شود. در ابتدای این مرحله نیز نمونه‌ها بایستی کاملاً خشک شوند. برای برخی مواد همانند ملات‌ها و اندودها معمولاً نمونه‌ها را در دمای ۴۰°C تا ۵۰ در آون خشک می‌کنند تا رطوبت موجود قبل از اشباع با اپوکسی خارج شود مواد فوق ممکن است در دماهای بالاتر از این طیف دچار ترک و تغییراتی ناخواسته در کانی‌ها شوند همانند کلسیت و ژیپس[13].

روش اشباع نمونه بر دو پایه اصلی استوار است. نخست، رزین مورد استفاده و دیگر روش اشباع با خلأ که در ادامه شرح آن دو و روش کار با آن‌ها آمده است. تجربیات گذشته نشان داده‌اند که رزین‌های نامرغوب ممکن است باعث از دست دادن نمونه در فرآیند آماده‌سازی و یا به وجود آوردن مشکلات پیش‌بینی نشده گردند. زیرا بعد از اعمال رزین امکان زدودن آن از روی نمونه بسیار کم و یا با از دست رفتن بخش عمده‌ی نمونه همراه است. رزین ایده‌آل برای این کار دارای شاخص انکسار (Refractive Index) کم نوری (در حدود ۱/۵۴ برابر با ضریب شکست نوری کوارتز) است. اگرچه در طی بیش از یک قرن گذشته از مواد و رزین‌های بسیاری استفاده شده است. کانادا بالزام (Canada Balsam) ازجمله معروف‌ترین این مواد است که به‌واسطه ایجاد یک لایه زرد رنگ و



شکل ۳: استفاده از محفظه‌های خلأ برای اشباع پلیمری نمونه‌های ترد و متخلخل، الف و ب) قرار دادن نمونه‌ها در درون قالب و نهادن در داخل دسیکاتور، ج) ریختن رزین در داخل قالب در شرایط خلأ، د) نمونه‌های آماده شده بعد از ۱۰ دقیقه طی نمودن شرایط خلأ

Fig; 3: Using vacuum containers for solymer saturation of brittle and porous samples. A and B - Insert the samples into the mold and place them inside the desiccator. C) Pour the resin inside the mold under vacuum conditions. D) Prepared samples after 10 minutes of vacuuming.

همچنین احتمال ترک، امروزه به‌عنوان رزین مقطع سازی پیشنهاد نمی‌شود و عمدتاً از رزین‌های اپوکسی دوجزئی (شامل رزین و عامل سخت‌کننده) استفاده می‌شود. برای ایجاد سیستم خلأ و همچنین بیرون کشیدن محتوای هوای داخلِ خلل و فرجِ باز نمونه، وابسته به اینکه روش اشباع یک مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای باشد از وکیوم با محفظه خلأ و یا بدون آن استفاده می‌شود. در فرآیند یک مرحله‌ای اشباع برای ساخت بیسکویت نمونه، استفاده از وکیوم برای اشباع، قطعاتی است که تا حدی مقاومت اندکی دارند و می‌توان آن‌ها را برش اولیه داد و به شکل بیسکویت درآورد (همانند بسیاری از قطعات سفال‌های تاریخی پخت شده) اما قابلیت ادامه روند را به سبب سستی و تردی ندارند. امروزه در حالت آیده‌آل برای اشباع یک مرحله‌ای قطعات از وکیوم‌های محفظه‌دار با قابلیت رزین‌ریزی بر روی قالب نمونه‌ها در شرایط خلأ استفاده می‌کنند. به‌نحوی‌که رزین آماده شده، و قالب‌های کوچک حاوی نمونه‌ها، در داخل محل‌هایی از پیش تعیین شده در درون محفظه‌ی خلأ دسیکاتور مانند وکیوم قرار می‌گیرند (شکل ۳ °الف–Fig; 3A) و در ادامه با بستن در محفظه و روشن نمودن پمپ خلأ، درحالی‌که هوای موجود در رزین و هوای موجود در منافذ نمونه‌ها خارج می‌شوند رزین در قالب‌های حاوی نمونه ریخته می‌شود (شکل ۳ °ج– Fig; 3B). وابسته به ویسکوزیته، رزین می‌تواند به راحتی تقریباً بعد از ۱۰ دقیقه در منافذ سنگ نفوذ نماید و جایگزین هوا شود (شکل ۳ °د–Fig; 3D). در ادامه با مشاهده حباب‌های تجمع یافته بر روی سطح رزین باید فشار به آرامی کاهش یابد. با پایین آمدن فشار درپوش محفظه خلأ را باز کرده و نمونه‌ها را خارج می‌کنند و با چوب بستنی (نازک) حباب‌های هوای موجود در سطح را خارج می‌کنند. در این روند می‌توان از قالب‌های استاندارد و یا از لیوان‌های یک بار مصرف استفاده کرد. لازم به ذکر است که نباید درپوش محفظه خلأ را درحالی‌که فشارسنج بالای محفظه پایین نیامده باز نمود و در ابتدا بایست فشار به حالت اولیه در زمان روشن کردن برسد و بعد درپوش را برداشت.در صورت باز کردن درپوش محفظه بدون عادی شدن فشار، کلیه رزین‌ها و نمونه‌ها به طرف بالا پرتاب می‌شوند. در انتهای این بخش و بعد از خشک شدن رزین (عموماً ۸ ساعت بعد) با نمونه‌های اشباع شده در داخل قالب که آماده برش به‌صورت بیسکویت هستند مواجه هستیم. بعد از اشباع‌سازی از این طریق می‌توان کلیه‌ی نمونه را در چهار جهت طولی، عرضی، شعاعی و مماسی برش داد (شکل ۴–Fig; 4). برای ملات‌های پودری و خاک‌ها این روش بسیار مفید است و فرآیند همانند آنچه قبلاً ذکر شد انجام می‌گیرد.

اما روش دو مرحله‌ای برای توده‌های ملات و سنگ‌های هوازده، بسیار نرم و پودری و ملات‌های تاریخی است که حتی در زمان لمس کردن قطعات و

شکل ۴: برش بیسکویت‌های اشباع شده با رزین اپوکسی از طریق سیستم خلأ

Fig; 4: Cutting the standard biscuits saturated with epoxy resin through the vacuum system

ذرات آن‌ها جدا می‌شوند. در مواجهه با این قبیل نمونه‌ها در ابتدا باید کلیه توده را در رزین اشباع کرد. نکته قابل توجه آن است که در این قبیل نمونه‌ها حتی با وجود تخلخل بسیار بالا رزین نمی‌تواند در بهترین حالت بیش از ۲cm نفوذ کند ازاین‌رو در مرحله نخست با نفوذ دادن رزین در لایه‌های سطحی نمونه از پودر شدن و از دست رفتن نمونه جلوگیری می‌گردد. در این حالت قطعه میزان مقاومت و چسبندگی محسوسی به‌دست آورده که بتوان از آن برش‌هایی تهیه کرد و در ادامه بعد از خشک شدن رزین با برش آن در قالب قطعات کوچک‌تر مرحله بعد را پیگیری نمود، در این صورت عموماً مشاهده می‌گردد که تا عمقی که رزین نفوذ نکرده حالت پودری در حد زیادی هنوز باقی است. ازاین‌رو بعد از تهیه برش‌ها، بایستی مجدداً قطعات را در محل‌هایی که غیر مقاوم و پودری هستند به کمک رزین اشباع یا استحکام‌بخشی سطحی نمود تا بتوان از محل مناسب بیسکویت نمونه را تهیه نمود. در شکل ۵ فرآیند چندمرحله‌ای تهیه بیسکویت از قطعه سنگ توف آتشفشانی بسیار ترد و پودری و همچنین حساس به آب متعلق به روستای تاریخی کندوان آمده است. در این نمونه موردی قطعه با غوطه‌ورسازی در رزین اپوکسی شفاف و مکش هوای داخل پاکت از طریق وکیوم به مدت ۱ ساعت اشباع شد، ۲۴ ساعت بعد نمونه اشباع سطحی شده در حالت خشک از پاکت جدا گردید (شکل ۵- الف °ج-Fig; 5A-C). سپس نمونه اشباع شده با توجه به اینکه رزین اولیه تا حدی مانع از هم پاشیدگی کلی سنگ شده بود در فواصل مورد نظر برش خورد ازآنجاکه این قطعات در بخش‌های میانی نیز دچار عدم انسجام و حالت پودری بودند در ادامه بار دیگر اسلایدهای برش خورده برای تثبیت کلیه سطوح و تهیه مقطع نازک همانند آنچه در دو نمونه آخر سمت چپ شکل ۵-د آمده است با فویل آلمینیومی قالب‌گیری شده و رزین بر سطح ریخته شد که بعد از چند بار تمدید رزین نفوذ متوقف شد. بعد از خشک شدن دو سطح اسلاید استحکام لازم را برای برش به دست آوردند که به‌صورت بیسکویت نمونه در ابعاد استاندارد برش داده شد.

در ادامه این مرحله بیسکویت نمونه برای زدودن باقی‌مانده‌های رزین تمیزکاری می‌شود. اگر نهایتاً نمونه آماده است دیگر موارد مانند دانه‌ها و روغن‌های ریخته شده را از روی نمونه‌ها بایست زدود و آن‌ها را خشک کرد در این روند از الکل برای تسریع فرآیند و یا به‌صورت معمولی با استفاده از کاغذهای جاذب آب که عموماً ۱۶ ساعت طول می‌کشد استفاده می‌گردد. در این مرحله

شکل ۵: الف-ج) روند تهیه بیسکویت نمونه از توف آتشفشانی بسیار ترد و پودری روستای تاریخی کندوان
Fig; 5: A to d) The process of preparing chip from the very wake and powdered sample of volcanic tuff belong to the Kandovan historical village

یادداشت نام نمونه بر روی کاغذ جاذب در نزدیک‌ترین محل به نمونه ضرورت دارد زیرا به سادگی نمونه‌ها می‌توانند با هم مخلوط شوند و فراموش شود کدام نمونه مربوط به کدام قطعه و مطالعه است و در ادامه وقتی نمونه خشک شد بایستی شماره و بارکد روی خود نمونه یادداشت نمود.

۷. مرحله ۴: اتصال بیسکویت نمونه به لام شیشه‌ای

۷-۱. پولیش دادن سطح نمونه

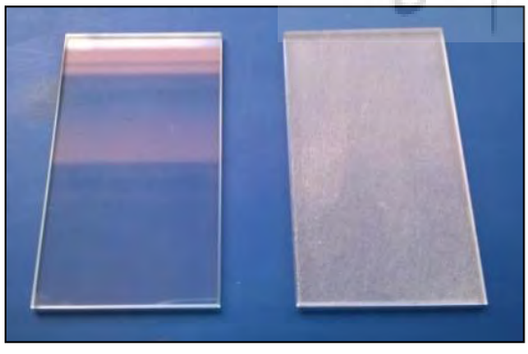
بعد از برش دادن قطعات اشباع شده در مراحل قبل، بیسکویت نمونه آماده است تا بتوان آن را برای چسباندن بر روی لام پولیش داد. ماشین پولیش عبارت است از چند دیسک با شماره‌ها و دانه‌بندی‌های مختلف سطحی که بعد از چسباندن بر روی صفحه چرخان، سطح بیسکویت نمونه را برای چسبیدن لام شیشه‌ای آماده می‌کنند. مهم‌ترین دیسکی که استفاده می‌شود عبارت‌اند از: شماره‌های ۲۲۰ و ۶۰۰ و ۱۲۰۰ که در ساخت نمونه‌های صیقلی مطالعات متالوگرافی نیز مرسوم هستند. ازآنجاکه در مرحله قبل، رزین به اندازه کافی نفوذ کرده و جای نگرانی در مورد تخریب نمونه‌های پودری با آب وجود ندارد در این مرحله تنها رزین روی سطح برداشته می‌شود تا کانی‌ها مشخص شوند.

۷-۲. آماده‌سازی لام شیشه‌ای برای اتصال به بیسکویت

برای چسباندن لام شیشه‌ای بر روی بیسکویت آماده‌شده‌ی نمونه، نیاز است که قبلاً لام آماده‌سازی شود، این آماده‌سازی برای آن است که اتصال بهتری میان سطح شیشه لام و سطح صیقل خوردهٔ بیسکویت نمونه به‌وسیله رزین ایجاد کنیم. بدین معنی که یکی از سطوح لام شیشه‌ای را باید کمی مات نمود که این اقدام با زبر کردن سطح انجام می‌گیرد. اگر برای پولیش از ورقه‌های سمباده‌ای فلزی استفاده می‌شود شماره دانه‌بندی ۲۴۰ مناسب است، همچنین پیشنهاد می‌شود بعد از چند چرخش با دیدن حالت کدری و مات شدگی بر روی شیشه روند را متوقف نموده و چرخ و شیشه تمیز شوند[14]. در حالت دیگر، اگر این مرحله بر روی صفحه گردان دستگاه ساب انجام می‌شود می‌توان مقدار کمی پودر کاربراندوم در ابعاد ذرات به شماره ۴۰۰ بر روی صفحه گردان ریخت و سطح شیشه را با گرفتن یک سمت شیشه بر روی چرخ کاملاً مات کرد. همچنین اگر اقدام بدون استفاده از چرخ‌های ساینده و یا صفحات گردان انجام می‌شود بایستی تا زمانی که یک سطح شیشه لام کاملاً مات شود عمل سایش به‌صورت دستی ادامه یابد. نکته مهم در این مرحله استفاده از آب در هنگام کار با چرخ سمباده گردان و با پودر کاربراندوم است که بایستی سطح کاملاً خیس باشد و در روند سایش از آب استفاده شود. البته این کار را می‌توان با استفاده از بخش نازک کننده ماشین برش نیز انجام داد که شرح آن در بخش نازک‌کاری آمده است. در هر صورت باید اطمینان حاصل کرد که کلیه سطح شیشه به‌صورت یکنواخت زبر و مات شده است و آماده چسباندن قطعه است. در ادامه شیشه باید بار دیگر تمیز و خشک شود که پیشنهاد می‌شود با الکل و پارچه تنظیف تمیزکاری انجام شود (شکل ۶-Fig; 6).

۷-۳. علامت‌گذاری و بارکد زنی نمونه‌ها

در تمام طول مراحل، بارکدگذاری بر روی نمونه بیسکویت و شیشه لام ضروری است. ازآنجاکه می‌توان بر روی لام با قلم فلزی – که سختی‌اش بیشتر از سختی شیشه است- خط انداخت، پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از عدم تکرار و اشتباهاتی که ممکن است در

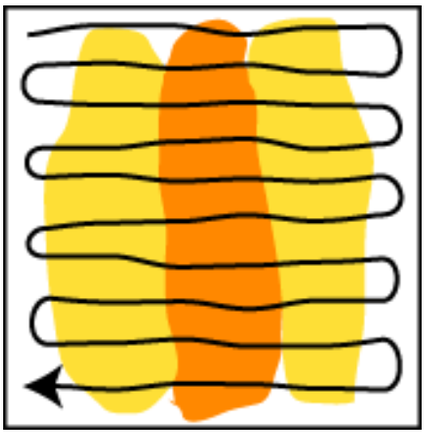


شکل۶: شیشه لام مات شده در مقابل شیشه معمولی
Fig; 6: The normal slide (left) and the slide that completely frosted

این روند پیش آید به جای مداد یـا وسـایل دیگـر رنـگ‌زا به‌وسیله قلم فلزی مشخصات بر روی نمونه حـک شـوند. در مواردی نیز آزمایشگرهـای آزمایشـگاهی تهیـه مقطـع نازک، ترجیح مـی‌دهنـد مشخصـات نمونـه را بـا مـداد و وسایل رنگ‌زای دیگر بر روی تیغه لام نوشـته و پوشـش رزینی بر آن‌ها بکشند. نکته مهم در این مرحلـه آن اسـت که باید بر لام شیشه‌ای جهت و راسـتای مقطـع از نمونـه مادر (بخصوص در رابطه با توده‌های سنگ) نیز مشـخص گردد، که در عمده موارد از فلـش‌هـای عمـودی و افقـی برای نشـان دادن مقـاطع تهیـه شـده از جهـت طـولی و عرضی استفاده می‌شود.

۷-۴. چسباندن لام بر روی بیسکویت نمونه‌ها

در این مرحله لام مات شده بر روی بخش برش داده شده و صیقل خوردهٔ بیسکویت نمونه که همیشه کوچـک‌تـر از شیشه لام است؛ چسبانده می‌شود. برخی نویسندگان برای این مرحله پیشنهاد می‌کنند از حمام التراسونیک به همـراه حلال وایت اسپریت برای نمونه و سطح شیشه مات شـده استفاده شود[15] تا هیچ‌گونه آلودگی بـر روی سـطح و در فاصله میان تماس شیشـه و قطعـه بـاقی نمانـد. در ایـن مرحله بایستی بیسکویت نمونه و همچنین لام مات شـده خشک باشند. بهترین حالت اتصال زمانی اتفـاق مـی‌افتـد که نمونه خشک و رزین نیز تا حدی حرارت دیده باشد. در همین راستا تیغه‌های لام آمـاده شـده و بیسـکویت‌هـای نمونه را بر روی صفحه هیتر آزمایشگاهی قرار می‌دهند تا هر دو داغ و خشک شوند. همان‌طور کـه ذکـر شـد بهتـر است قبل از آغاز این مرحله شماره بارکـد نمونـه بـر روی شیشـه لام یـا خـراش شیشـه یادداشـت شـود. در ادامـه مقداری از رزین اپوکسی که به‌صورت مناسـبی مخلـوط و آمـاده شـده اسـت (بسـته بـه تعـداد نمونـه‌هـا رزیـن بـا سخت‌کننده مخلوط می‌شود بهترین حالت استفاده از ترازو برای میزان ترکیب است که در این صورت میزان ترکیـب عموماً دو به یک از رزین به سخت‌کننده است. باید دقـت شود در هنگام ترکیب حباب زیادی تولید نشـود) بـر روی بخش صیقل‌خورده نمونه زده شده بـه‌نحـوی‌کـه تمـامی سطح را پوشش دهد و در ادامـه بایـد دقـت شـود حبـاب کمتـری در فرآینـد اخـتلاط رزیـن تولیـد شـود. بـرای



شکل ۷: الگوی پیشنهادی در روند مخلوط کردن رزین و سخت‌کننده برای کاهش تولید حباب [14]

Fig; 7: Suggestion pattern for mixing resin and hardener to reduce bauble during the process

دست‌یابی به چنین حالتی پیشنهاد داویـد هـریش (2012) آن است که رزین همان‌گونه که در تصور آمده (شکل ۷- Fig; 7)، با کشیدن هـم‌زن چـوبی (مـثلا: چـوب بسـتنی) به‌صورت الگوی موجی در ابتدا در یک جهـت و در ادامـه در جهت مخالف ۹۰ درجه رزیـن مخلـوط شـود. در ایـن حالت هنگامی که اپوکسـی بـه‌صـورت مناسـب مخلـوط گردید آن را بر روی سطح پولیش خورده بیسکویت نمونـه (همان بخشی که بر روی هیتر تا حدی گرم شـده اسـت) مالیده می‌شود.

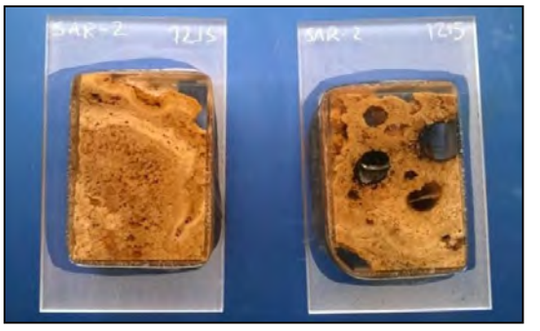
بعد از پخش کردن رزین بر روی نمونه باید اجازه داد تا رزین کاملاً در نمونه نفوذ کند که این نفوذ در حـدود ۵ دقیقه طول خواهد کشید و در ادامه مقداری دیگر اپوکسی اضافه می‌گردد. این عمـل را تـا زمـانی کـه دیگـر رزیـن اپوکسی در سنگ نفوذ نکنـد، بایـد تکـرار کـرد. در ادامـه بخش مات شده شیشه لام را بر روی رزین اپوکسی قـرار داده با انگشت اسلاید را حرکت می‌دهند، تا بـه اصـطلاح رزین «حباب‌گیری» شود به‌نحوی‌که با انگشت تیغـه لام را بر سطح صیقلی بیسکویت بـه‌صـورت حرکـات جلـو و عقب و چرخشی حرکت می‌دهند تا حباب‌های هـوا خـارج شوند. بعد از آن نمونـه را ۱۰-۵ دقیقـه بـرای اطمینـان از اینکه اسلاید بـر روی رزیـن لغزشـی نداشـته اسـت بایـد کنترل کرد. در صـورت اطمینـان از اینکـه رزیـن حرکـت نخواهد کرد و در زیر بیسکویت حبابی وجود نـدارد بعـد از چند ساعت که البته بستگی به میزان سخت‌کننده مخلوط

شکل ۸: استفاده از پرس بر روی مقاطع در حال آماده شدن برای نفوذ رزین و حباب‌گیری بر روی هیتر مسطح
Fig; 8: Slide Chip coated with epoxy on the top of frosted slide put it on the flat heaters to penetrate resin and more connect the slide and chip to remove the babble

شده به رزین دارد می‌توان از نمونه برای مرحله بعدی استفاده کرد. باید توجه داشت که با افزایش میزان سخت‌کننده مقاومت رزین کاهش می‌یابد. در مواردی آزمایشگرها برای اطمینان بیشتر از نفوذ رزین در نمونه و خشک شدن آن از اقدامات تکمیلی استفاده می‌کنند به‌نحوی‌که بعد از حباب‌گیری دستی از دستگاه پرس بر روی هیتر استفاده می‌کنند (شکل ۸–Fig; 8). دمای بیشینه هیتر در این حالت نباید بالاتر از ۶۰°C باشد چرا که باعث تخریب رزین می‌گردد. در این حالت برای خشک شدن رزین ۲ ساعت کمینه و ۸ ساعت بیشینه کافی است. بعد از عمل چسباندن رزین باید بیسکویت چسبیده به لام و سرد شده را برش داد و مقطع را نازک‌کاری نمود (شکل ۹–Fig; 9).

۸. مرحله ۵ : نازک‌کاری تا رسیدن به اندازه استاندارد

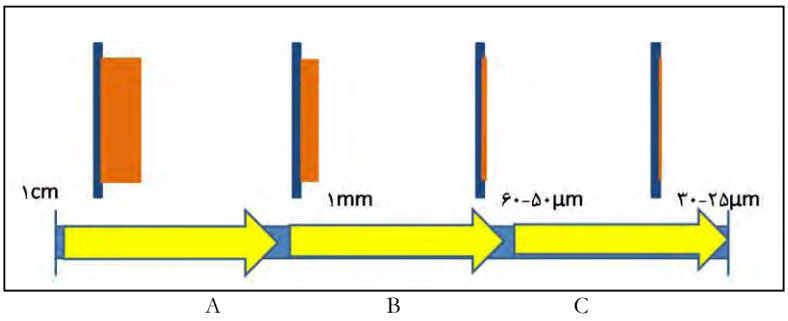
مرحله ۵ ساخت مقطع شامل سه فاز: الف) نازک نمودن مقطع از سانتیمتر تا میلی‌متر، ب): نازک نمودن مقطع از میلی‌متر تا میکرون، ج): نازک نمودن مقطع تا ضخامت استاندارد است که در طرح شماتیک روند کار آمده است (شکل ۱۰–Fig; 10).



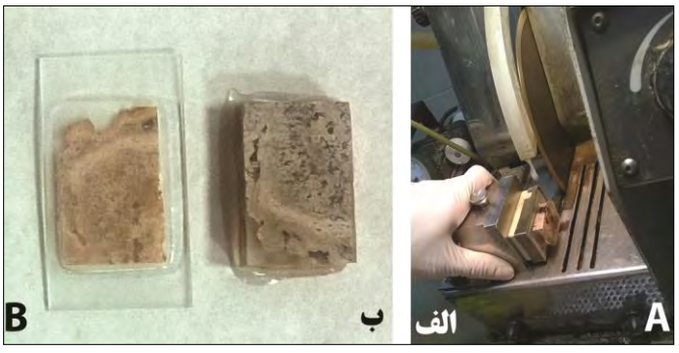
شکل ۹: بیسکویت‌های آماده بعد از اتصال به لام شیشه‌ای با استفاده از پرس بر روی هیتر گرم
Fig; 9: Prepare biscuits after attachment to slide by using press on a hot heater

الف) نازک نمودن مقطع از سانتی‌متر تا میلی‌متر

در این مرحله حجمی در حدود ۱cm از بیسکویت نمونه بر روی لام چسبیده است که برای تهیه مقطع نازک بایستی این ضخامت به حدود ۱mm تبدیل شود. برای تسهیل در کار ماشین می‌توان از آب برای برش استفاده نمود در نمونه‌های متخلخل و پودری به‌واسطه اشباع نمونه دیگر حساسیت به آب در این زمان اندک برش مطرح نیست و در نمونه‌های اشباع نشده رزین در تلاقی بین شیشه و سطح صیقل‌خورده بیسکویت به اندازه کافی نفوذ کرده و نمونه با برش از طریق تزریق آب به ماشین مشکلی نخواهد داشت. در مواردی که از ماشین وکیوم دار برش استفاده نمی‌شود نمونه با هر دو دست (شیشه لام در یک دست و قطعه در دست دیگر) به طرف تیغه چرخان حرکت داده شده و برش انجام می‌شود. در روش دستی، به غیر از مسئله خطری که ممکن است برای آزمایشگر و افراد در اثر شکستن قطعه و شیشه پیش آید، در برخی مواقع مشکل عدم ضخامت یکسان در برش پیش می‌آید، که در مراحل بعدی رسیدن به ضخامت استاندارد در همه



شکل ۱۰: فرآیند سه مرحله ای نازک‌کاری بیسکویت نمونه تا رسیدن به ضخامت استاندارد
Fig; 10: Three-step process thinning the sample up to standard thickness

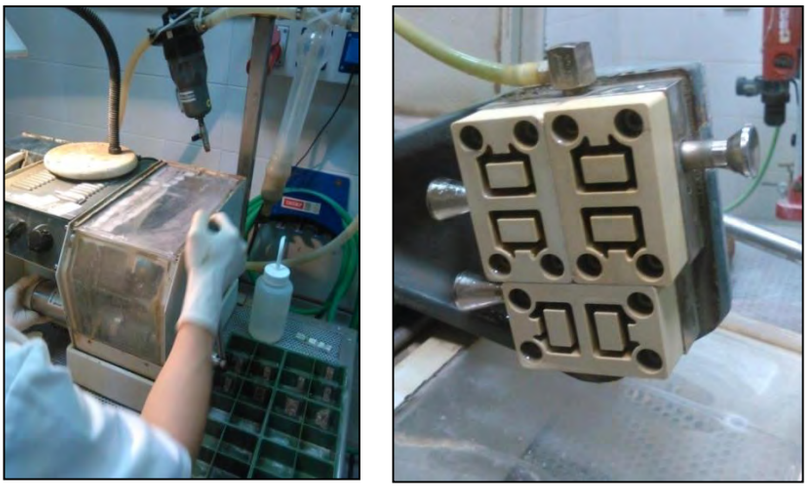


شکل ۱۱: الف) نصب لام شیشه‌ای در بخش نگهدارنده برای برش اولیه ب) دو تکه سنگ توف قبل و بعد برش اولیه
Fig; 11: A) Setup of the slide with a small chip mounted in cut-off saw on the holder for first cut. B) Two samples of Tufa stone before and after first cutting

قسمت‌های مقطع را مشکل می‌کند. ازاین‌رو بیش از دو دهه است که از ماشین‌های برش با گیره‌های وکیومی (Vacuum Chuck) که با مکیدن هوا از طریق پمپ باعث نگه داشتن نمونه می‌گردند، برای برش دقیق استفاده می‌شود. به نحوی که بخش خالی لام به سری وکیوم‌دار ماشین برش متصل می‌شود و با روشن شدن وکیوم، نمونه بدون حرکت و ثابت به سری وکیوم می‌چسبد و با حرکت دادن گیره وکیوم‌دار به طرف تیغه چرخان (شکل ۱۱-الف-Fig;11-A) با برش بخش نمونه از روی لام انجام می‌شود (شکل ۱۱-ب-Fig; 11-B). بهتر است بخش اضافه بیسکویت سنگی با بارکدگذاری نگهداری شود که در صورت بروز مشکل برای نمونه در روند سایش و آماده‌سازی بتوان دوباره از آن بخش نمونه دیگری تهیه نمود. در مرحله برش و نازک‌کاری نمونه ملات‌های تاریخی از طریق ماشین برش در منابع استفاده از روغن برای جلوگیری از تخریب کانی‌های حساس به آب گزارش و پیشنهاد شده است[15].

ب) نازک نمودن مقطع از میلی‌متر تا میکرون

در این مرحله اسلاید (سطح نمونه‌ی نازک شده بر روی لام) حدود ۱ میلی‌متری باید به ضخامتی در حدود ۶۰µm برسد که این عمل به‌صورت دستی و با سایش نمونه با پودرهای ساینده روی شیشه انجام می‌گیرد. اما با توجه به اینکه در عمده کارگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها صفحات گردان وجود دارد می‌توان این روند را سریع‌تر انجام داد بدین نحو که اسلاید را از سمتی که باقی‌مانده بیسکویت بر روی آن مانده بعد از خیس نمودن و ریختن مقداری پودر سیلیکون کارباید (SiC) یا کاربراندوم با شماره ۴۰۰-۲۰۰ روی صفحه حرکت می‌دهیم تا مقطع به ضخامت مورد نظر برسد. مواردی که در آزمایشگاه ماشین‌های برش چندکاره و وکیوم‌دار وجود دارد می‌توان در قسمت ویژه این ماشین‌های برش اقدام نازک سازی نمود. در این فرآیند، بخش خالی اسلاید شیشه‌ای روی وکیوم نصب می‌شود و بعد از باز نمودن شیر آب و روشن نمودن بخش ساینده ماشین برش، با حرکت دادن جلو و عقب دستگیره مقطع روی دیسک چرخان هدایت‌کننده شده و نازک می‌گردد. این حرکت بایستی به‌صورت آرام و کنترل‌شده اعمال شود و در هنگام اتصال باید دستگیره محکم گرفته شود. زیرا فشار زیاد بر روی نمونه باعث از بین رفتن لایه نازک باقی‌مانده بر روی اسلاید می‌شود. این مرحله تا زمانی ادامه می‌یابد که مقطع به ضخامت دلخواه برسد. زمان مناسب برای رسیدن به ضخامت ۵۰-۶۰µm در این مرحله بسته به سرعت حرکت دادن دستگیره، نوع نمونه و تجربه آزمایشگر تغییر می‌کند (شکل ۱۲-Fig; 12) بعد از اتمام کار باید اسلاید را از وکیوم جدا نمود که در این مرحله می‌توان برخی کانی‌ها را بر روی اسلاید در زیر میکروسکوپ مشاهده نمود. بسیاری از اسلایدها بخصوص در این مرحله به خاطر اینکه متخصص با سرعت زیادی کار نازک‌سازی و سایش را انجام می‌دهند از دست می‌روند. اگر در زمان بیرون آمدن مقطع مشاهده کردید که تمامی کانی‌ها شکسته شده است و یا اینکه لبه‌های مقطع نازک شده و مرکز آن ضخیم است باید



شکل ۱۲: مرحله نازک‌کاری مقطع با استفاده از ماشین برش: راست) نگه‌دارنده اسلاید به‌وسیله نیروی وکیوم. چپ) حرکت آرام عقب به جلو نازک‌کاری تا نزدیک ضخامت استاندارد

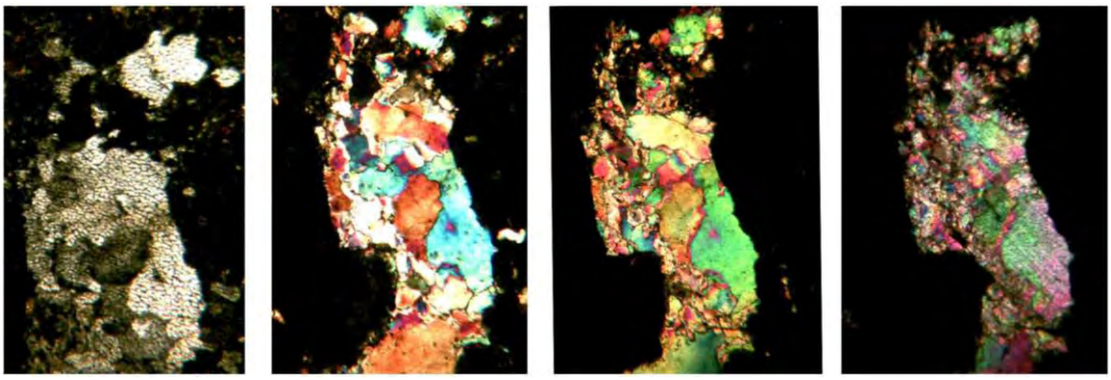
Fig; 12: The reducing the thickness phase with cutting machine. Right) Slide holder with vacuum power. Left) slow moving (back & forward) across grinding wheel while advancing control to close to the standard thickness.

دانست که روند سایش بسیار سریع بوده است[14]. برخی مواقع چرخ ساینده صدایی از خود در موقع برخورد با اسلاید متصاعد می‌کند که نشان‌دهنده آن است که مقطع زدوده شده است. ازاین‌رو بهتر است افراد در تجربه‌های نخستین نمونه‌های با ارزش را از این طریق نازک‌کاری نکنند.

ج) نازک نمودن مقاطع تا ضخامت استاندارد

به دست آوردن ضخامت استاندارد در تمامی سطح نمونه مهم‌ترین بخش تهیه مقطع نازک است. در این مرحله کنترل میکروسکوپی الزامی است و کلیه اقدامات به‌وسیله دست باید انجام شود. به‌نحوی‌که اسلایدی که در مرحله قبل به ضخامت حدود ۵۰–۶۰µm رسیده است در این مرحله به ضخامت استاندارد یعنی ۳۰µm می‌رسد. در همین راستا بهتر است این مرحله را به دو فاز اولیه و ثانویه تقسیم کرد که در هر دو فاز پولیش دادن مقطع با پودرهای سیلیکون کارباید (Silicon Carbide)، یا پودرهای ساینده الماسه و یا با کاغذهای سمباده[3] انجام شود. در فاز نخست بایستی از پودر حداکثر با اندازه ۳۲۰ به‌صورت کنترل‌شده استفاده کرد. ضخامت مورد نظر در این مرحله درواقع بر اساس رنگ کانی کوارتز که اغلب در اکثر نمونه‌ها وجود دارد، تعیین می‌شود به‌نحوی‌که باید کوارتز به‌عنوان یک کانی شاخص در زیر میکروسکوپ کنترل شود. در حالت ایده‌آل کانی کوارتز در انتهای این مرحله تقریباً بنفش است و در انتهای این فاز به رنگ زرد خفیف درمی‌آید. در فاز دوم که با دقت بیشتری همراه است با پودر شماره ۶۰۰ کار را باید ادامه داد تا کوارتز به رنگ شیری و خاکستری مرجع بر اساس جدول میشل–لوی برسد (شکل ۱۳–Fig; 13).

نکته قابل توجه در این بخش آن است که به‌صورت نادر برخی نمونه‌ها حاوی کانی کوارتز نیستند. ازاین‌رو در چنین مواقعی تشخیص زمان متوقف نمودن فرآیند به تجربه کافی نیاز دارد. در این رابطه متخصصین با توجه به تغییرات رنگی مواد و کانی‌ها ضخامت مناسب را تشخیص می‌دهند. از مهم‌ترین نکات کلیدی در تشخیص ضخامت مناسب این قبیل نمونه‌ها مربوط به اطلاعات اولیه‌ای است، اطلاعاتی همانند: ویژگی‌های زمین‌شناسی توده سنگ یا نمونه، نتایج دیگر آنالیزهای مرتبط از این نمونه و یا نمونه‌های مشابه و دیگر اطلاعات تکمیلی مفید که بایستی در اختیار اپراتور تهیه مقطع قرار داده شود. با دانستن اینکه چه کانی‌هایی احتمالاً در نمونه خواهند بود و با مقایسه کانی‌ها در زیر میکروسکوپ با تصاویر کاتالوگ‌ها و بروشورهای مرجع که کانی‌ها را در ضخامت ۳۰µm ثبت و ضبط کرده‌اند ضخامت مناسب نمونه‌ها



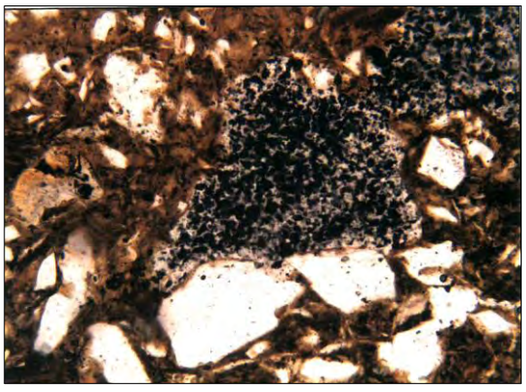
شکل ۱۳: فرآیند نازک سازی مقطع با استفاده از کانی شاخص کوارتز از راست به چپ- الف) کوارتز با ضخامت بالا، ب) کوارتز ضخیم، ج) کوارتز تا حدی ضخیم، چ) کوارتز بسیار نازک شده[14]،

Fig; 13: A) Quartz in a thin section, way too thick. B) Quartz in a thin section, still fairly thick. C) Quartz in a thin a section, still a bit thick. D) Quartz in a thin section, now too thin

بدون وجود کوارتز قابل تشخیص است. پودر کاربراندوم با دو شماره ۴۰۰ و ۶۰۰ و شیشه تخت تنها تجهیزات این مرحله هستند- لازم به ذکر است این شیشه‌ها قبلاً در فرآیندی مشابه سطح اسلاید زبر شده‌اند و سمباده خورده‌اند -فرآیند سایش به‌صورت خیس انجام می‌شود به‌نحوی‌که با ریختن آب و پودر بر روی شیشه و مخلوط آن‌ها اقدام به ساییدن بخش باقی‌مانده از نمونه بر روی اسلاید می‌کنیم، توصیه می‌شود برای هر پودر ساینده از شیشه‌ای منفک و اختصاصی استفاده شود که قبلاً با همان شماره‌ی پودر ساینده مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس استاندارد این آب بایستی آب مقطر و یا آب دیونیزه باشد که به همراه پودرهای ساینده به‌صورت دوغاب در آمده و عمل سایش با آن انجام شود. در موارد حساس به آب مانند: ملات‌ها و ژیپس‌ها مرحله سایش بایستی با استفاده از روغن و یا نفت به جای آب انجام گیرد؛ برای مثال: ازآنجاکه ژیپس می‌تواند در آب حل شود پس برای مطالعه فرآیند تخریب آن ممکن است نیاز باشد از روغن در روند سایش و نازک‌کاری برای حفظ فرآورده‌های هوازدگی ژیپس استفاده شود. همچنین برخی کربنات‌های حساس به آب در طی این فرآیند رسوب می‌کنند. از طرف دیگر با توجه به آنکه کانی‌های رسی در مجاورت با آب دچار تورم می‌شوند ازاین‌رو برای جلوگیری از این تغییر در مواد سرامیکی که به سادگی به قطعات ریزتر تبدیل می‌شوند در فرآیند آماده‌سازی دیگربار سایش با روغن پیشنهاد می‌شود[3]. نکته قابل تأمل در این مرحله آن است که نباید سعی شود فشار چندانی بر روی نمونه اعمال شود زیرا با فشار زیاد نمونه به سرعت تخریب می‌شود بدین منظور با فشار به روی چهار طرف سطح نمونه و چرخش و حرکت زیگزاگی و پاپیونی همانند عدد 8 لاتین کار انجام می‌شود (شکل ۱۴-Fig; 14) باید دقت شود ضخامت استاندارد در تمامی سطح مقطع اعمال شود. پس از آنکه نمونه به ضخامت استاندارد رسید بایستی تمیزکاری شود تا رسوبات باقی‌مانده کربوراندوم زدوده شوند چرا که در مواردی این مواد باعث ایجاد خطا

شکل ۱۴: سایش و نازک کاری نمونه بر روی شیشه تخت با استفاده از دوغاب کربوراندوم و آب

Fig; 14: Polishing the chip on a glass plate in slurry of Carborundum grit and water. This will provide a smooth, flat surface for bonding to the



شکل ۱۵: دانه‌های کاربوراندم که به داخل حفرات یک مقطع نازک سفالِ پیش از تاریخی در روند نازک‌کاری و پولیش نفوذ نموده‌اند و قبل از الصاق پوشش به سطح، از آن جدا نشده‌اند[13].

Fig; 15: Carborundum grit particles that have accumulated in voids during polishing and were not removed before cover slipping [13].

در تفسیر نمونه‌ها، با رسوب در حفرات مقطع می‌گردند (شکل ۱۵–Fig; 15). ازاین‌رو استفاده از آب پر فشار در طی مراحل نازک‌کاری و استفاده از حمام التراسونیک آب یا الکل تقلیبی (Denatured alcohol) بعد انجام نازک‌کاری[13] و تمیزکاری آن با پارچه تنظیف، برای زودن چرکی‌ها و چربی‌ها و قطعات پودری پیشنهاد می‌گردد.

۹. مرحله ۶: پوشش دادن سطح مقاطع جهت نگهداری طولانی

برای افزایش وضوح بیشتر در زیر میکروسکوپ و محافظت در مقابل آسیبِ نمونه‌ها[3] و هنگامی که پژوهشگر تشخیص می‌دهد دیگر نیازی به آزمایش‌های تکمیلی نیست، از پوشش‌های محافظ که شامل یک قطعه شیشه یا طلق[13,14] برای حفاظت از سطح مقاطع استفاده می‌کنند، که این لایه دوم نیز با رزین به سطح دیگر سنگ می‌چسبد. در این مرحله در ابتدا باید مطمئن شد که سطح کاملاً تمیز است و هیچ‌گونه ذره یا چرکی بر روی آن نیست.ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود مقطع با الکل تمیز شود. روش معمول در این مرحله آن است که مقطع را بر روی صفحه داغ قرار می‌دهند و رزین را با سخت‌کننده آن مخلوط نموده و به میزان یک قطره کوچک بر روی مقطع می‌ریزند و طلق یا پوشش محافظ را بر روی رزین می‌گذارند و حرکت می‌دهند تا حباب‌های هوا از آن خارج گردند. ممکن است مقداری از رزین به بیرون از طلق حرکت کند که با دقت و با تیغ می‌توان آن را برداشت. برخی آزمایشگاه‌ها برای تسریع در این فرآیند از اشعه ماورا بنفش استفاده می‌کنند به‌نحوی‌که با اعمال رزین بر روی نمونه و حباب‌گیری آن مقطع را ۲۰ ثانیه تحت تابش فرابنفش قرار می‌دهند، و در ادامه بعد از تمیزکاری رزین از لبه‌های مقطع با الکل بار دیگر به مدت دو دقیقه مقطع را تخت تابش اشعه فرابنفش قرار می‌دهند تا رزین کاملاً خشک شود. همچنین امروزه برای سهولت کار از لاک‌های پوششی (Protection lacquer) استفاده می‌کنند.در رابطه با زمان پوشش دهی تصمیم‌گیرنده محقق است و وی بایستی بداند که چه زمانی کارش با نمونه پایان یافته که در نهایت پوشش محافظ را بر روی آن اعمال کند، اما عموماً پیشنهاد می‌شود.نمونه‌های مطالعاتی را پوشش دهی نکنند زیرا برای برخی آزمایش‌های تکمیلی مبتنی بر آنالیزهای سطح می‌توان از آن‌ها استفاده نمود به‌نحوی‌که سطح مقطع می‌تواند برای دیگر اهداف از قبیل استفاده در میکروسکوپ انعکاسی، آزمون سختی سنجی و آنالیزهای شیمیایی پولیش داده شود[3]رای آنالیزهای شیمیایی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDX)، میکروپروب و یا میکروسکوپ نیرویی اتمی (AFM) می‌توان از مقطع پوشش داده نشده استفاده کرد که در چنین حالتی ورقه پوشش موقت و با اتصالی ضعیف با گلیسیرین بر روی آن‌ها نصب می‌شود.

۱۰. نتیجه‌گیری

امروزه آنالیزهای مبتنی بر ساخت مقاطع نازک میکروسکوپی در باستان‌سنجی و میراث فرهنگی بسیار رواج یافته و اطلاعات با ارزشی را در اختیار متخصصین قرار می‌دهد. از مزیت‌های این روش آن است که به مقدار نمونه زیادی نیاز ندارد و از یک قطعه کوچک یا حتی مقداری پودر نیز می‌توان مقطع تهیه نمود و اثر را مورد بررسی قرار داد. ازآنجاکه در بخش عمده‌ای از مطالعات میراث فرهنگی با ساختارهای هوازده و سست، مواد نرم یا

حساس به آب مواجه است آگاهی از چالش‌ها و روش‌های تهیه مقطع نازک از این قبیل میراث فرهنگی برای افرادی که خود می‌خواهند مقاطع را تهیه کنند، ضرورت دارد. از طرفی این نوشته برای اینکه جایگزین دیگر تجربه‌ها و دستورالعمل‌ها شود پیشنهاد نشده است و برخی نکات آن ممکن است در مواردی به دلایل مختلف از جمله نبود امکانات و نبود زمان کافی و شرایط متفاوت قابل اجرا نباشند. ازاین‌رو نکات و ترتیب بیان شده را نبایستی بدون در نظر گرفتن بسیاری از جنبه‌های منحصربه‌فرد پژوهش و نمونه دستورالعملی نهایی دانست. نکته دیگر آن است که معرفی و توضیحات مختصر برخی ابزار و مواد تنها با هدف آگاهی و پیشنهاد در جهت تسریع و بالا بردن استانداردهای کار بیان شده‌اند که وابسته به امکانات موجود می‌توانند تغییر و یا جایگزین شوند.

سپاسگزاری

تحقیق فوق با حضور در آزمایشگاه‌های پترولوژی، دانشکده زمین‌شناسی و علوم محیطی، دانشگاه آلیکانته و آزمایشگاه پتروگرافیِ دانشکده علوم زمین دانشگاه بیکوکا (میلان) ایتالیا انجام شده که از متصدیان آن مجموعه‌های علمی و همکاری‌شان سپاسگزاری می‌گردد.

References

[1] ASTM. Standard guide for petroghraphic examination of dimension stone. Stand ASTM C1721 – 09 2009.
[2] ISRM. Suggested method for petrographic description of rocks, rock characterization, testing and monitoring. Int Soc Rock Mech suggest methods pergamon, Oxford 1981:75–6.
[3] Reedy CL. Thin-section petrography of stone and ceramic cultural materials. Archetype; 2008.
[4] Worley N. Henry Clifton Sorby (1826 1908) and the development of thin section petrography in Sheffield. Interpret silent artefacts petrol approaches to archaeological ceramics 2009:1.
[5] Holmes A. Petrographic methods and calculations, 3 vols 1923.
[6] Johannsen A. Manual of petrographic methods. McGraw-Hill book company, Incorporated; 1918.
[7] Lepsius R. Griechische marmorstudien. Könige. Akademie der Wissenschaften.; 1890.
[8] Betancourt PP, Peterson SE. Thin-section petrography of ceramic materials. Inst aegean Prehistory, archaeol excav Man 2009;2.
[9] Shepard AO. Rio grande glaze paint ware: a study illustrating the place of ceramic technological analysis in archaeological research. na; 1942.
[10] Felts WM. A petrographic examination of potsherds from ancient Troy. American Journal of archaeology 1942;46:237–44. doi: https://doi.org/10.2307/499386
[11] Matson FR. Technological ceramic studies. Coll Art J 1942;1:25–8. doi: https://doi.org/10.2307/773399
[12] Humphries DW. The preparation of thin sections of rocks, minerals, and ceramics 1992.
[13] Quinn PS. Ceramic petrography: the interpretation of archaeological pottery & related artefacts in thin section. Archaeopress; 2013.
[14] Hirsch D. How to make a thin section (Dave's methods at WWU Geology 2012.
[15] Leslie AB, Eden M. Code of practice for the petrographic examination of mortars, Plasters, Renders and Related Materials. Applied Petrography Group, UK, UK 2008:1–24.
[16] Schnabel L. Geomaterials under the microscope, A colour guide: Building stone, roofing slate, aggregate, concrete, mortar, plaster, bricks, ceramics, and bituminous mixtures 2011.
[17] Yaseen IAB, Al-Amoush H, Al-Farajat M, Mayyas A. Petrography and mineralogy of Roman mortars from buildings of the ancient city of Jerash, Jordan. Construction and building materials 2013;38:465–71. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.022