

تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه: مروری بر مطالعات اخیر و پیشنهاد چارچوب

بهبینه‌ی ارزیابی

زهرا مختاری^۱، مهدیه رافعی^{۲*}، علیرضا علیزاده مقدم^۳، مصطفی ستوده^۴

^۱ استادیار گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

Zahra.mokhtari@neyshabur.ac.ir

^۲ و ^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد گوهرشناسی کاربرد و کانی‌های صنعتی، گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فراوری مواد معدنی، دانشکده

فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

چکیده

فیروزه، یکی از گوهرسنگ‌های ارزشمند و متخلخل، به‌طور طبیعی دارای ریزترک‌ها، خلل و فرج و ناپایداری رنگ است که دوام، سختی و کیفیت ظاهری آن را محدود می‌کند. به همین دلیل، بهسازی با استفاده از فیلرها شامل مواد طبیعی، رزین‌های پلیمری، پلیمرهای نفوذی و ترکیبات پیشرفته، به‌منظور افزایش استحکام، بهبود رنگ و جلای فیروزه، و افزایش مقاومت آن در برابر عوامل محیطی، به‌طور گسترده به کار گرفته می‌شود. شناخت و شناسایی نوع فیلرها برای تشخیص اصالت، تعیین ارزش، گزارش‌دهی آزمایشگاهی، انتخاب روش نگهداری و جلوگیری از تقلب ضروری است. در این مطالعه، انواع فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه و روش‌های شناسایی آن‌ها مرور شد. بررسی‌ها نشان داد که روش‌های کلاسیک مانند میکروسکوپ نوری، UV و اندازه‌گیری وزن مخصوص، صرفاً نشانه‌های اولیه ارائه می‌دهند و برای تعیین نوع فیلر ناکافی هستند. از سوی دیگر، روش‌های طیف‌سنجی پیشرفته شامل FTIR، رامان، UV-Vi، فلورسانس و XR، امکان شناسایی دقیق و تفکیک انواع فیلرهای آلی و معدنی را فراهم می‌کنند. تحلیل محدودیت‌های روش‌ها و چالش‌های ناشی از حضور متشابهات فیروزه و فیلرهای پیشرفته، ضرورت یک چارچوب چندمرحله‌ای و یکپارچه را نشان داد. چارچوب پیشنهادی شامل: غربالگری اولیه، تشخیص ساختاری و شیمیایی، آزمون‌های تکمیلی و تفسیر یکپارچه داده‌ها است و با تلفیق روش‌های کلاسیک و پیشرفته، دقت تشخیص، استانداردسازی فرآیندها و شفافیت گزارش‌دهی در آزمایشگاه‌ها و بازار گوهرسنگ‌ها را افزایش می‌دهد. این رویکرد امکان ارزیابی علمی و کاربردی فیروزه‌های بهسازی‌شده و ارتقای اعتماد در بازار جهانی گوهرسنگ‌ها را فراهم می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: بهسازی، طیف سنجی FTIR، فیلر، گوهرسنگ فیروزه

Identification of Fillers Used in Turquoise Treatment: A Review of Recent Studies and Proposed Optimal Evaluation Framework

Zahra Mokhtari¹; Mahdiah Rafeie^{2*}; Alireza Alizadeh Moghaddam³; Mostafa Sotoudeh⁴

¹. Assistant Professor, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabour, Neyshabour, Iran

Zahra.mokhtari@neyshabur.ac.ir

^{2,3,4}. Master's student in Applied Gemology and Industrial Minerals, Department of Natural Products and Mineral Processing Technology, Faculty of Novel Interdisciplinary Technologies, University of Neyshabour, Neyshabour, Iran.

Abstract

Turquoise is a valuable and porous gemstone, naturally exhibits microfractures, porosity, and color instability, which limit its durability, hardness, and overall aesthetic quality. Therefore, treatment using fillers—including natural materials, polymeric resins, penetrating polymers, and advanced compounds—has been widely applied to enhance strength, color, luster, and environmental resistance. Accurate identification of these fillers is essential for authenticity verification, valuation, laboratory reporting, conservation strategies, and fraud prevention. This study reviews the types of fillers commonly used in turquoise treatment and their detection methods. The findings indicate that conventional techniques, such as optical microscopy, UV inspection, and specific gravity

measurements, provide only preliminary indications and are insufficient for precise filler characterization. In contrast, advanced spectroscopic methods, including FTIR, Raman, UV-Vis, fluorescence, and X-ray analysis, enable accurate identification and differentiation of both organic and inorganic fillers. Furthermore, the analysis of methodological limitations and challenges posed by turquoise simulants and advanced fillers underscores the need for a multi-step, integrated framework. The proposed workflow—comprising initial screening, structural and chemical identification, confirmatory tests, and integrated data interpretation—enhances diagnostic accuracy, standardizes laboratory procedures, and improves reporting transparency. This approach facilitates scientific and practical evaluation of treated turquoise and strengthens confidence in the global gemstone market.

Keywords: Treatment, FTIR spectroscopy, filler, turquoise gemstone

۱- مقدمه

فیروزه یک کانی ثانویه کیمیا از گروه فسفات‌ها است که به صورت یک ترکیب پیچیده ی هیدروفسفات مس و آلومینیوم تشکیل می‌شود و فرمول شیمیایی ایده‌آل آن به صورت $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ بیان می‌گردد. این گوهرسنگ به دلیل رنگ منحصر به فرد، پیشینه فرهنگی و جایگاه ویژه در تاریخ هنر و گوهرشناسی، همواره مورد توجه بوده است. به باور بسیاری از گوهرشناسان و بر اساس گزارش‌های منتشرشده از سوی مؤسسه گوهرشناسی آمریکا (GIA)، مرغوب‌ترین و شناخته‌شده‌ترین نوع فیروزه جهان متعلق به ایران و به ویژه معدن فیروزه نیشابور است که از نظر کیفیت رنگ، یکنواختی و شهرت تاریخی جایگاهی ممتاز دارد. فیروزه از نظر ساختاری یک گوهر متخلخل محسوب می‌شود و به طور طبیعی دارای ریزترک‌ها، حفره‌های میکروسکوپی و ناپایداری رنگ در برابر چربی، نور و عوامل محیطی است (Han et al., 2015 & Frontiere, 2023). این ویژگی‌ها سبب کاهش دوام مکانیکی و افت کیفیت ظاهری فیروزه خام می‌شوند. از این رو، در دهه‌های اخیر روش‌های مختلف بهسازی، پایداری‌سازی و پر کردن تخلخل‌ها با استفاده از فیلرهای طبیعی و به ویژه مواد پلیمری به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف از این فرآیندها افزایش استحکام، بهبود رنگ، کاهش تخلخل و در نهایت ارتقای قابلیت مصرف تجاری فیروزه است. شناخت نوع فیلر به کاررفته در بهسازی فیروزه از جنبه‌های مختلف اهمیت اساسی دارد؛ از جمله تشخیص اصالت گوهر، تعیین ارزش و قیمت‌گذاری، گزارش‌دهی دقیق آزمایشگاهی، ارزیابی دوام و پایداری، شناسایی روش‌های تقلب و جعل، انتخاب شیوه مناسب تمیزکاری و نگهداری، و همچنین کاربردهای آموزشی و پژوهشی در گوهرشناسی که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. اگرچه روش‌های کلاسیک مانند میکروسکوپ نوری، تابش فرابنفش (UV) و اندازه‌گیری وزن مخصوص می‌توانند سرنخ‌های اولیه‌ای در این زمینه ارائه دهند، اما این روش‌ها اغلب توان تفکیک دقیق نوع فیلر را ندارند (McClure & Smith, 2000). در مقابل، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) به دلیل توانایی بالا در شناسایی و تفکیک گروه‌های عاملی آلی، یکی از قابل اعتمادترین روش‌ها برای تشخیص فیلرها و مواد پلیمری در فیروزه محسوب می‌شود و در بسیاری از موارد، تنها ابزار مؤثر برای شناسایی بهسازی است (Lind et al., 1983). با این حال، تشخیص بهسازی در فیروزه در بسیاری موارد چالش برانگیز است و حتی گوهرشناسان آموزش‌دیده یا برخی آزمایشگاه‌های معتبر نیز همواره قادر به شناسایی آن نیستند. این موضوع باعث شکل‌گیری بحث‌هایی در خصوص ارزش‌گذاری و ضرورت بهسازی‌هایی شده است که پایدار و تقریباً غیرقابل تشخیص هستند. با این وجود، چنانچه هدف از بهسازی ارتقای کیفیت مواد کم‌ارزش و افزایش قابلیت استفاده آن‌ها باشد و اطلاعات مربوط به نوع بهسازی به طور شفاف در اختیار مصرف‌کننده قرار گیرد، این فرایند در چارچوب اصول علمی و اخلاقی صنعت گوهرسنگ قابل پذیرش خواهد بود. در مجموع، بهسازی بخشی اجتناب‌ناپذیر از چرخه تولید گوهرسنگ‌ها به شمار می‌رود و امکان بهره‌برداری مؤثرتر از منابع طبیعی محدود را فراهم می‌سازد (Read, 2005). از این رو، با توجه به گسترش روزافزون روش‌های بهسازی فیروزه و افزایش استفاده از فیلرهای متنوع و گاه پیچیده، ضرورت یک مرور نظام‌مند بر مطالعات اخیر و ارائه چارچوبی بهینه و کاربردی برای تشخیص و ارزیابی این فیلرها، انگیزه اصلی انجام این پژوهش را تشکیل می‌دهد.

۲- روش تحقیق

روش تحقیق این مطالعه مبتنی بر پژوهش کتابخانه‌ای و مروری است و بر گردآوری و تحلیل داده‌ها از منابع معتبر علمی استوار می‌باشد. بدین منظور، در گام نخست، منابع معتبر علمی شامل کتاب‌های تخصصی گوهرشناسی، مقالات منتشرشده در مجلات معتبر داخلی و

بین‌المللی، پایان‌نامه‌های دانشگاهی و استانداردهای مرتبط با بهسازی گوه‌سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز اصلی بر مطالعاتی بود که به روش‌های بهسازی فیروزه، انواع فیلرهای مورد استفاده و شیوه‌های تشخیص آن‌ها پرداخته‌اند. در ادامه، به‌منظور دسترسی به جدیدترین یافته‌ها و تکمیل داده‌ها، از پایگاه‌های اطلاعاتی علمی، وبسایت‌های معتبر پژوهشی و گزارش‌های آزمایشگاهی منتشرشده استفاده شد. داده‌های گردآوری‌شده با رویکرد تحلیل محتوایی تطبیقی بررسی و مقایسه گردیدند تا نقاط قوت، محدودیت‌ها و خلأهای موجود در روش‌های تشخیص فیلرها مشخص شود. همچنین، از ابزارهای نوین پردازش داده و سامانه‌های هوش مصنوعی صرفاً به‌عنوان ابزار کمکی برای دسته‌بندی، خلاصه‌سازی و یکپارچه‌سازی اطلاعات استخراج‌شده از منابع علمی استفاده گردید. تمامی تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌ها بر پایه قضاوت علمی نویسندگان و منابع معتبر انجام شده است. در نهایت، نتایج این تحلیل‌ها، مبنای ارائه یک چارچوب بهینه برای ارزیابی و تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه قرار گرفت.

۳- موقعیت و جایگاه فیروزه در ایران و جهان

فیروزه (Turquoise) کانی‌ای از گروه فسفات‌های آلومینیوم-مس است که به‌صورت ثانویه و در نتیجه‌ی تجزیه و تخریب سنگهای دارای سیلیکات و فسفات آلومینیوم واجد سولفور مس در طبیعت به وجود می‌آید. از میان تمامی ذخایر شناخته شده، فیروزه ایران به‌ویژه معدن تاریخی نیشابور برجسته‌ترین جایگاه را داراست. این معدن با قدمتی بیش از هفت هزار سال، بافت متراکم، سختی بالا، رنگ آبی یکنواخت و پایداری شیمیایی فیروزه را فراهم می‌کند؛ ویژگی‌هایی که فیروزه ایران را با عنوان Persian Turquoise به استاندارد جهانی کیفیت تبدیل کرده است (Shirdam et al., 2021). حضور رگه‌ها، ماتریکس کم، و رنگ از آبی آسمانی تا آبی لاجوردی، عوامل مؤثر در ارزش‌گذاری این سنگ در بازار جهانی هستند. در مقیاس جهانی، ذخایر مهم فیروزه در کشورهایی نظیر ایالات متحده آمریکا (آریزونا، نیومکزیکو، نوادا)، چین (هوبئی)، تبت، مصر (صحرای سینا)، مکزیک، شیلی و تاجیکستان گزارش شده‌اند. هرچند برخی از این ذخایر از نظر میزان تولید قابل توجه‌اند، اما اغلب آن‌ها از نظر کیفیت رنگ، میزان تخلخل، پایداری نوری و قابلیت پولیش، در سطحی پایین‌تر از فیروزه ایران قرار می‌گیرند. به همین دلیل، ایران از گذشته تاکنون نقش تعیین‌کننده‌ای در بازار جهانی داشته و همچنان به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین منابع فیروزه طبیعی مرغوب در جهان شناخته می‌شود. جایگاه برخی از معادن مهم فیروزه در جهان به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. ویژگی‌های زمین‌شناسی و اهمیت تاریخی معادن مهم فیروزه ایران و جهان نیز به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: نقشه شماتیک از موقعیت برخی از معادن فیروزه در سایر کشورهای جهان

MyRings On December 19, 2020

جدول ۱- پراکندگی و ویژگی‌های زمین‌شناسی ذخایر شاخص فیروزه در ایران و جهان

منبع: با استفاده از Sinkankas Schumann (2006) ، O'Donoghue (1997) (2013) و امامی (۱۳۸۸).

شهرت / اهمیت	ویژگی زمین‌شناسی	کشور / منطقه	رده
قدیمی‌ترین و با کیفیت‌ترین فیروزه جهان	زون اکسیداسیون کانسارهای مس در سنگ‌های ولکانیکی	نیشابور (خراسان رضوی)	ایران
تولید طیف سبز تا آبی	واحدهای ولکانیکی - رسوبی غنی از مس	دامغان (سمنان)	ایران
کیفیت متوسط تا خوب برداشت محدود	سنگ‌های آتشفشانی دارای مس محیط خشک با رسوبات مس‌دار	کردمان (شهریابک)	ایران
تنوع رنگ و استخراج پراکنده	زون‌های مس‌دار	آذربایجان شرقی و غربی (ورزقان، تخت سلیمان)	ایران
تولید بالا با کیفیت متغیر	ذخایر سطحی در مناطق خشک	چین (نینگ شیا، هبی)	جهان
اهمیت تاریخی بسیار بالا	کانسارهای باستانی مس	مصر (صحرای سینا)	جهان
رنگ متمایز آبی سیر	واحدهای کوهستانی غنی از مس	تبت	جهان
معادن سنتی با تنوع کیفیت	محیط ولکانیکی - رسوبی	افغانستان	جهان
تولید محدود	زون‌های مس‌دار	مکزیک	جهان

۴- انواع فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه

«فیلر» به هر ماده‌ای اطلاق می‌شود که برای پرکردن خلل و فرج، ترک‌ها، ریزحفره‌ها و ناپیوستگی‌های سطحی یا درونی فیروزه به کار می‌رود. استفاده از فیلر موجب افزایش استحکام مکانیکی، بهبود رنگ و جلای سطحی، و ارتقای مقاومت فیروزه در برابر عوامل مخرب محیطی نظیر چربی، عرق، مواد شیمیایی و فرآیند خشک‌شدن می‌شود. از آنجا که فیروزه ذاتاً کانی متخلخل است؛ بسیاری از نمونه‌های خام بدون انجام فرآیند پرکردن، شکننده و کم‌دوام باقی می‌مانند؛ به همین دلیل استفاده از فیلر یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌های بهسازی فیروزه محسوب می‌شود. در ادامه انواع فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه آورده شده است.

۴-۱- فیلرهای طبیعی

فیلرهای طبیعی از قدیمی‌ترین مواد مورد استفاده در بهسازی فیروزه به شمار می‌روند و معمولاً کم‌اثرترین نوع بهسازی را ایجاد می‌کنند. این گروه شامل موادی نظیر موم‌های طبیعی، روغن‌های گیاهی (مانند روغن گردو) و چربی‌های حیوانی است که عمدتاً با هدف براق کردن سطح و افزایش محدود استحکام مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، این مواد از پایداری کمی برخوردار بوده و در اثر گذشت زمان، افزایش دما یا تماس با مواد شوینده به تدریج از ساختار فیروزه خارج می‌شوند؛ از این‌رو، ارزش افزوده پایداری ایجاد نمی‌کنند.

۴-۲- فیلرهای پلیمری

فیلرهای پلیمری پرکاربردترین گروه در بازار امروزی فیروزه هستند و نقش مهمی در بهسازی‌های مدرن ایفا می‌کنند. از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به رزین‌های اپوکسی (Epoxy Resins) اشاره کرد که به دلیل پایداری بالا، دوام مناسب و افزایش سختی و انسجام ساختاری فیروزه، کاربرد گسترده‌ای دارند. این مواد معمولاً با روش‌هایی مانند طیف‌سنجی UV و FTIR قابل شناسایی هستند (Liu, Wang, &)

Zhang, 2021). رزین‌های پلی‌ایمید (Polyimide Resins) به دلیل مقاومت حرارتی بالا عمدتاً در کاربردهای صنعتی شناخته می‌شوند، اما در برخی بهسازی‌های پیشرفته فیروزه نیز گزارش شده‌اند (Zhang, Li, wang & chen, 2023). رزین‌های اکریلیک (Acrylic Resins) با ایجاد جلای سطحی بالا، بیشتر در فیروزه‌های تجاری و ارزان‌قیمت استفاده می‌شوند (Han, Lu, Dai & SU, 2015). همچنین استفاده از پلیمرها و پلاستیک‌های مایع (Liquid Plastics) برای پر کردن ترک‌ها و ریز حفره‌ها با هدف افزایش انسجام و دوام مکانیکی فیروزه گزارش شده است که معمولاً دوام متوسط داشته و از طریق طیف سنجی قابل شناسایی هستند (McClure & Smith, 2000).

۳-۴- فیلرهای شیمیایی تثبیت‌کننده

فیلرهای شیمیایی تثبیت‌کننده (Stabilizing Agents) علاوه بر نقش پرکنندگی، موجب افزایش انسجام ساختار فیروزه نیز می‌شوند. موادی نظیر سیلیکون‌ها (Silicone Fillers)، پلیمرهای نفوذی (Impregnation Polymers) و مواد سخت‌شونده ی حرارتی (Heat-hardening fillers) در این دسته قرار می‌گیرند. این فیلرها با افزایش چقرمگی، کاهش پوسته‌شدن و بهبود دوام بلندمدت فیروزه، به‌ویژه در نمونه‌های با تخلخل بالا، کاربرد دارند (Liu, Yang, He, & Cao, 2021).

۴-۴- فیلرهای رنگی

فیلرهای رنگی (Color Fillers / Dye + Resin) که در این روش، مواد رنگی همراه با فیلر به درون ساختار فیروزه نفوذ می‌کنند. نمونه‌هایی از این گروه شامل رزین‌های رنگی، روغن‌های رنگی و ترکیب رنگ با رزین‌های اپوکسی هستند. هدف اصلی این نوع بهسازی، یکنواخت کردن رنگ یا تبدیل رنگ‌های کم‌رنگ به آبی تیره‌تر است. از دیدگاه گوهرشناسی، این روش به‌عنوان بهسازی شدید طبقه‌بندی می‌شود و تأثیر مستقیمی بر ارزش‌گذاری سنگ دارد (Han, Lu, Dai & Su, 2015).

۵-۴- فیلرهای پیشرفته

فیلرهای پیشرفته یا (Advanced Fillers) عمدتاً در فیروزه‌های صادراتی یا صنعتی دیده می‌شوند و شامل نانوپلیمرهای نفوذی، ترکیبات سیلیکون-آلی و میکروکامپوزیت‌ها هستند. مزیت اصلی این مواد، نفوذ بالا و دشواری تشخیص آن‌ها با روش‌های کلاسیک است که همین امر، اهمیت استفاده از تکنیک‌های تحلیلی پیشرفته را دوچندان می‌کند.

۵- روش‌های طیف‌سنجی برای تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه

روش‌های طیف‌سنجی از مهم‌ترین و کارآمدترین ابزارها برای شناسایی فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه به شمار می‌روند. این روش‌ها امکان تشخیص ترکیبات آلی و معدنی را فراهم کرده و در بسیاری از موارد، تنها راه شناسایی بهسازی‌های پیشرفته محسوب می‌شوند.

۵-۱- طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌سنجی FTIR به‌عنوان اصلی‌ترین و قابل‌اعتمادترین روش تشخیص فیلر در فیروزه شناخته می‌شود. این روش توانایی بالایی در شناسایی انواع فیلرها دارد. از جمله، رزین‌ها (C=O، C-H stretch)، وکس و روغن (باند های CH₂ و CH₃)، سیلیکون باند (Si-O) (Si) و پلیمرهای قدیمی (پیک‌های PVC یا PVA) و نانوپلیمر (با حساسیت بالا). غیرمخرب بودن، عدم نیاز به آماده‌سازی پیچیده نمونه و وجود پیک‌های واضح و قابل تفسیر، FTIR را به یکی از مؤثرترین روش‌ها برای شناسایی مواد پلیمری و آلی در فیروزه بهسازی‌شده تبدیل کرده است (Liu, Yang, He, & Cao, 2021).

۵-۲- طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy)

طیف‌سنجی رامان یکی دیگر از روش‌های قدرتمند در شناسایی پلیمرها و فیلرهای سیلیکونی است. این روش امکان تشخیص باندهای مشخص $C-C$ و $C=C$ در ترکیبات پلیمری و باندهای $Si-O$ در سیلیکون‌ها را فراهم می‌کند و همچنین در تمایز فیروزه طبیعی از فیروزه‌های ترکیبی یا بازساخته، نقش مهمی دارد. با این حال، یکی از محدودیت‌های این روش آن است که در مواردی که مقدار فیلر بسیار کم باشد، پیک‌های قوی ساختار فیروزه می‌توانند بر سیگنال‌های مربوط به پلیمر غلبه کنند. اما، در نمونه‌هایی با بهسازی آشکار، مانند رزین‌ها و سیلیکون‌ها، رامان عملکرد بسیار مطلوبی دارد (Kiefert & Hanni, 2000).

۵-۳- طیف‌سنجی فرابنفش- مرئی (UV-Vis Spectroscopy)

طیف‌سنجی UV-Vis عمدتاً برای تشخیص فیروزه‌های رنگ‌شده کاربرد دارد. این روش امکان شناسایی حضور رنگ‌های آلی، بررسی یکنواختی رنگ و مقایسه تغییرات تون رنگ قبل و بعد از استفاده از فیلتر چلسی را فراهم می‌کند. با این حال، UV-Vis در شناسایی فیلرهایی مانند رزین‌ها، وکس‌ها و سیلیکون‌ها کارایی محدودی دارد و به‌تنهایی روش مناسبی برای تشخیص نوع فیلر محسوب نمی‌شود (Jin et al., 2024).

۵-۴- آزمون فلورسانس تحت نور فرابنفش (UV Light Test)

آزمون فلورسانس روشی کمکی و غیرقطعی در تشخیص بهسازی فیروزه است. بسیاری از رزین‌ها تحت نور فرابنفش بلند، فلورسانس آبی یا سبز از خود نشان می‌دهند، در حالی که فیروزه طبیعی معمولاً فاقد فلورسانس قابل توجه است. با این وجود، نتایج این آزمون باید همواره در کنار روش‌هایی مانند FTIR یا رامان تفسیر شوند و به‌تنهایی مبنای تشخیص قرار نگیرند (Liu, Yang, He, & Cao, 2021).

۵-۵- طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

روش XRF برای تعیین ترکیب شیمیایی عنصری کاربرد دارد، و به‌طور مستقیم برای شناسایی فیلرها مناسب نیست. کاربرد اصلی این روش در بررسی عناصر همراه مانند Al ، Cu و Fe و همچنین در تشخیص متشابهات فیروزه نظیر هولایت و مگنیزیت رنگ‌شده است. محدودیت اساسی XRF آن است که قادر به شناسایی فیلرهای آلی نظیر رزین‌ها، وکس‌ها و روغن‌ها نیست (Rigaku, 2025).

۶- مقایسه روش‌های تشخیص، محدودیت‌ها و شکاف‌های مطالعاتی

با وجود تنوع روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای تشخیص فیلرهای به‌کاررفته در بهسازی فیروزه، هیچ‌یک از این روش‌ها به‌تنهایی پاسخ‌گوی تمامی چالش‌های تشخیصی نیستند. روش‌های کلاسیک نظیر بررسی میکروسکوپی، آزمون فلورسانس و اندازه‌گیری وزن مخصوص، اگرچه می‌توانند نشانه‌های اولیه‌ای از بهسازی ارائه دهند، اما عموماً فاقد توان تفکیک دقیق نوع فیلر بوده و نتایج آن‌ها وابستگی زیادی به تجربه کارشناس دارد. از سوی دیگر، روش‌های عنصری مانند XRF اگرچه در تشخیص ترکیب شیمیایی و شناسایی متشابهات فیروزه مفید هستند، اما در شناسایی فیلرهای آلی و پلیمری کارایی محدودی دارند.

در میان روش‌های طیف‌سنجی، FTIR به دلیل توانایی بالا در شناسایی گروه‌های عاملی آلی و غیرمخرب بودن، جامع‌ترین ابزار برای تشخیص فیلرهای پلیمری، رزینی، سیلیکونی و مواد تثبیت‌کننده محسوب می‌شود (جدول ۲). مطالعات سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ (Breeding & Ahline, 2024) نشان داده‌اند که FTIR یکی از اصلی‌ترین و قابل اعتمادترین روش‌ها برای شناسایی فیلرهای اپوکسی، رزین‌های فنولی، پلی‌پورتان، موم/پارافین، پلی‌وینیل استات (PVA) و پلی‌استر در فیروزه‌های بهسازی شده است و با تشخیص قله‌های طیفی مشخص، تمایز بین فیروزه طبیعی و فیروزه‌ای بهسازی شده را ممکن می‌سازد. با این حال، تفسیر نتایج FTIR در نمونه‌هایی با میزان کم فیلر یا در حضور بهسازی‌های پیچیده و چندمرحله‌ای می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. طیف‌سنجی رامان به‌عنوان روش مکمل، به‌ویژه در تشخیص پلیمرها و تمایز فیروزه طبیعی از مواد ترکیبی نقش مهمی ایفا می‌کند، اما در مواردی که سیگنال فیلر ضعیف باشد، تحت تأثیر

پیک‌های غالب ساختار فیروزه قرار می‌گیرد. روش UV-Vis نیز بیشتر محدود به تشخیص رنگ‌شدگی است و قابلیت محدودی در شناسایی نوع فیله دارد. در جدول ۳ مقایسه‌ای کوتاه از انواع روش‌های طیف‌سنجی در شناسایی فیله‌های مورد استفاده در بهسازی آورده شده است. بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که یکی از شکاف‌های اصلی پژوهشی در حوزه تشخیص بهسازی فیروزه، نبود یک رویکرد نظام‌مند و چندروشی است که بتواند نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف را به صورت یکپارچه تفسیر کند. در بسیاری از گزارش‌ها، اتکا به یک روش منفرد منجر به عدم قطعیت یا حتی خطای تشخیص شده است؛ به‌ویژه در مواردی که فیله‌های پیشرفته، نانوپلیمرها یا ترکیبات سیلیکون-آلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. افزون بر این، شباهت برخی پاسخ‌های طیفی فیله‌ها با متشابهات فیروزه، تفسیر نتایج را پیچیده‌تر می‌سازد و بر ضرورت تحلیل تطبیقی داده‌ها تأکید می‌کند. بر این اساس، نیاز به ارائه یک چارچوب بهینه ارزیابی که بر پایه ترکیب هدفمند روش‌های کلاسیک، طیف‌سنجی و تحلیل‌های تکمیلی بنا شده باشد، بیش از پیش احساس می‌شود. چنین چارچوبی می‌تواند ضمن کاهش عدم قطعیت در تشخیص، به استاندارد سازی فرآیندهای آزمایشگاهی، افزایش شفافیت در گزارش‌دهی و بهبود اعتماد در بازار گوه‌رسنگ‌ها کمک کند؛ موضوعی که در بخش بعدی این مقاله به‌عنوان محور نوآورانه پژوهش ارائه خواهد شد.

جدول ۲: جدول شناسایی فیله‌ها و رزین‌ها براساس طیف FTIR (Lind et al., 1983)

توضیح تشخیصی	باند های FTIR شاخص (cm ⁻¹)	نوع فیله
حضور باند 1730cm ⁻¹ تقریباً ۱۰۰٪ نشان‌دهنده رزین است.	1740-1720 (C=O) 2925-2850 (C-H stretch) 1500-1450 (C-H bending) 1250-1150 (C-O-C)	رزین / پلیمرهای آلی (Epoxy, Acrylic, Polyester)
شدت بالاتر باندهای CH ₂ نسبت به رزین؛ باند C=O ندارد.	2915-2845 (CH ₂ , CH ₃ stretch) 1475-1460 (CH ₂ bending)	واکس / روغن (Wax / Oil)
باند Si-O-Si خیلی قوی است و از ساختار فیروزه قابل تفکیک است.	1100-1000 (Si-O-Si) 850-800 (Si-C)	سیلیکون‌ها / سیلوکسان (Silicone Siloxane)
پهن‌تر از رزین‌های مدرن، اغلب با باندهای CH قوی.	1440-1430 (CH ₂) 2915 (C-H) 1300-1250 (C-O)	پلی‌وینیل‌ها / PVC / PVA / Plastic Fillers)
قله‌ها ضعیف‌اند ولی همچنان حضور پلیمر را نشان می‌دهند.	1750-1730 (C=O) 2920-2850 (C-H) اما پیک‌ها کم شدت تر هستند.	نانوپلیمرها (Nano-polymer stabilization)
باندهای رنگ آلی معمولاً کم شدت اند؛ در کنار رزین دیده می‌شوند.	1650-1500 رنگ‌های آلی 1600 باندهای آروماتیک	نمونه‌های رنگ‌شده (Dyed Turquoise)

جدول ۳: جدول مقایسه روش‌های طیف‌سنجی در بهسازی فیروزه: رتبه‌بندی کارایی دستگاه‌ها بر اساس قدرت تفکیک پیوندهای آلی و معدنی طبق گزارش‌های مؤسسه GIA و استانداردهای بین‌المللی گوه‌رشناسی (The Journal of Gemmology, 1998)

مناسب برای	قدرت تشخیص فیله	روش طیف‌سنجی
رزین، واکس، روغن، سیلیکون، پلیمرها	قوی‌ترین	FTIR
رزین، سیلیکون، نانوپلیمر	بسیار خوب	Raman
نمونه‌های رنگ‌شده	متوسط	UV-Vis
رزین‌های دارای فلورسانس	مکمل	UV Fluorescence
شناسایی بدل‌ها، نه فیله	ضعیف	XRF

۷- پیشنهاد چارچوب بهینه ارزیابی و تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه

با توجه به تنوع بالای فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه و محدودیت‌های ذاتی هر یک از روش‌های تشخیصی، اتکا به یک آزمون منفرد نمی‌تواند پاسخ‌گوی نیازهای آزمایشگاهی و تجاری باشد. بر این اساس، در این پژوهش یک چارچوب بهینه، مرحله به مرحله و چندروشی برای ارزیابی و تشخیص فیلرهای مورد استفاده در بهسازی فیروزه پیشنهاد می‌شود که هدف آن کاهش عدم قطعیت تشخیص، افزایش دقت گزارش‌دهی و استانداردسازی فرآیند ارزیابی است.

۷-۱- مرحله غربالگری اولیه (Initial Screening)

در گام نخست، استفاده از روش‌های غیرمخرب و کم‌هزینه به‌عنوان ابزار غربالگری توصیه می‌شود. این مرحله شامل بررسی‌های چشمی و میکروسکوپ نوری به‌منظور شناسایی ریزترک‌ها، پرشدگی‌های غیرطبیعی، جلای غیرمعمول و تغییرات بافت سطحی است. آزمون فلورسانس تحت نور فرابنفش (UV) نیز می‌تواند به‌عنوان روشی مکمل، نشانه‌های اولیه‌ای از حضور رزین‌ها یا فیلرهای آلی ارائه دهد. در این مرحله، هدف دستیابی به تشخیص قطعی نیست، بلکه شناسایی نمونه‌های مشکوک برای بررسی‌های دقیق‌تر مدنظر است.

۷-۲- مرحله تشخیص ساختاری و شیمیایی (Core Analytical Stage)

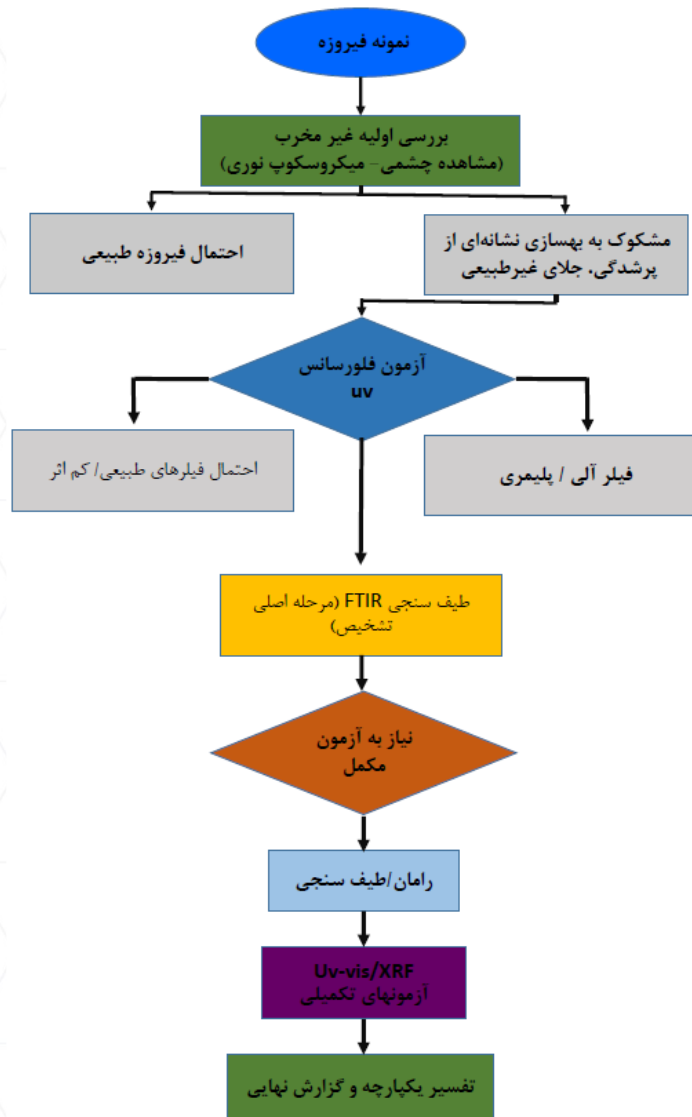
در مرحله دوم، طیف‌سنجی FTIR به‌عنوان ستون اصلی چارچوب پیشنهادی به کار گرفته می‌شود. این روش به دلیل توانایی بالا در شناسایی گروه‌های عاملی آلی و پلیمری، امکان تشخیص اغلب فیلرهای رایج از جمله رزین‌های اپوکسی، اکریلیک، سیلیکونی، وکس‌ها، روغن‌ها و پلیمرهای نفوذی را فراهم می‌کند. تفسیر طیف‌ها باید با توجه به شدت پیک‌ها، موقعیت باند‌ها و هم‌پوشانی احتمالی آن‌ها با پاسخ‌های ساختاری فیروزه انجام شود. در مواردی که نتایج FTIR با عدم قطعیت همراه باشد، استفاده هم‌زمان از طیف‌سنجی رامان به‌عنوان روش مکمل توصیه می‌شود، به‌ویژه برای تشخیص پلیمرها، سیلیکون‌ها و تمایز فیروزه طبیعی از نمونه‌های ترکیبی یا بازساخته.

۷-۳- مرحله آزمون‌های تکمیلی و کنترلی

در گام سوم، بسته به نوع پرسش تشخیصی، استفاده هدفمند از روش‌های تکمیلی پیشنهاد می‌شود. طیف‌سنجی UV-Vis عمدتاً برای بررسی رنگ‌شدگی و یکنواختی رنگ کاربرد دارد و می‌تواند در شناسایی فیلرهای رنگی نقش مؤثری ایفا کند. XRF نیز اگرچه برای تشخیص مستقیم فیلرها مناسب نیست، اما در بررسی ترکیب عنصری، کنترل اصالت فیروزه و تفکیک آن از متشابهاتی نظیر هولایت و مگنیزیت رنگ‌شده اهمیت دارد. این مرحله به‌ویژه در گزارش‌دهی آزمایشگاهی رسمی، نقش کنترلی و تأییدی ایفا می‌کند.

۷-۴- تفسیر یکپارچه و گزارش‌دهی استاندارد

آخرین و شاید مهم‌ترین بخش چارچوب پیشنهادی، تفسیر یکپارچه داده‌ها و ارائه گزارش شفاف است. در این مرحله، نتایج حاصل از تمامی آزمون‌ها به‌صورت تطبیقی تحلیل شده و نوع بهسازی، ماهیت فیلر (طبیعی، پلیمری، تثبیت‌کننده یا رنگی) و میزان قطعیت تشخیص به‌طور دقیق مشخص می‌شود. تأکید بر ذکر محدودیت‌ها، احتمال وجود فیلرهای پیشرفته یا بهسازی‌های چندمرحله‌ای، و استفاده از اصطلاحات استاندارد گوهرشناسی در گزارش نهایی، از ارکان اساسی این چارچوب به شمار می‌رود. چارچوب ارائه شده در این پژوهش با تلفیق منطقی روش‌های کلاسیک و پیشرفته، ضمن افزایش دقت تشخیص، امکان کاربرد عملی در آزمایشگاه‌های گوهرشناسی، مراکز آموزشی و بازار تجارت فیروزه را فراهم می‌کند (شکل ۳). این رویکرد چندروشی نه تنها از اتکای بیش‌ازحد به یک آزمون منفرد جلوگیری می‌کند، بلکه زمینه استانداردسازی فرآیند تشخیص فیلرها و افزایش شفافیت در ارزش‌گذاری فیروزه‌های بهسازی‌شده را نیز مهیا می‌سازد (شکل ۳).



شکل ۲ فلوجارت پیشنهادی جهت بررسی، تفسیر یکپارچه و گزارش‌دهی استاندارد در مطالعه فیروزه

۸- نتیجه گیری

فیروزه، به عنوان یک گوهر ارزشمند و متخلخل، به‌طور طبیعی با ریزحفره‌ها و ترک‌های میکروسکوپی همراه است که دوام و کیفیت ظاهری آن را محدود می‌کند. این ویژگی‌ها ضرورت استفاده از فیله‌ها برای بهسازی و ارتقای خواص مکانیکی، رنگ و جلای سنگ را آشکار می‌سازد. بررسی انواع فیله‌های مورد استفاده نشان داد که از مواد طبیعی و سنتی مانند موم و روغن گرفته تا رزین‌های مدرن، پلیمرهای نفوذی و نانوکامپوزیت‌ها، هر یک ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاص خود را دارند. مطالعه روش‌های تشخیص فیله‌ها نیز مشخص کرد که هیچ روش منفردی نمی‌تواند تمامی انواع فیله‌ها را با قطعیت تشخیص دهد. در این راستا، طیف‌سنجی FTIR به‌عنوان ستون اصلی تشخیص، در کنار روش‌های مکمل مانند رامان، UV-Vis، فلورسانس و XRF، امکان شناسایی دقیق و یکپارچه فیله‌ها را فراهم می‌کند. بررسی محدودیت‌های روش‌ها و چالش‌های تشخیصی ناشی از حضور فیله‌های پیشرفته یا متشابهات، ضرورت طراحی یک چارچوب مرحله‌ای و چندروشی را روشن کرد. چارچوب پیشنهادی این مقاله با تلفیق غربالگری اولیه، تشخیص ساختاری و شیمیایی، آزمون‌های تکمیلی و تفسیر یکپارچه داده‌ها، ضمن کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت، قابلیت کاربرد عملی در آزمایشگاه‌های گوهرشناسی، آموزش

و بازار تجارت فیروزه را داراست. استفاده از این رویکرد می‌تواند علاوه بر استانداردسازی فرآیند تشخیص، موجب ارتقای شفافیت و اعتماد در بازار و بهبود ارزش‌گذاری فیروزه‌های بهسازی شده شود. در نهایت، این پژوهش نشان داد که ادغام روش‌های کلاسیک و پیشرفته همراه با چارچوب ارزیابی ساختاریافته، راهکاری مؤثر برای حل چالش‌های تشخیص فیلرهاست. مطالعات آینده می‌تواند بر بهسازی‌های چندمرحله‌ای پیچیده، استفاده از فناوری‌های طیف‌سنجی پیشرفته و پایگاه داده‌های مقایسه‌ای فیلرها تمرکز کند تا دقت تشخیص و قابلیت کاربرد در سطح بین‌المللی افزایش یابد.

۹- مراجع

- ۱- امامی، م.، مریدپور، م. (۱۳۹۱). گوهرشناسی (شناخت سنگ‌های قیمتی و نیمه‌قیمتی). انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور صفحات ۳۳-۴۵.
- 2- Jin, Y., Chen, Q., & Li, G. (2024). Discrimination of turquoise treatments using UV-Vis-NIR and FTIR spectroscopy. *Journal of Gemmology*, 39(1), pp. 45-58.
- 3- Read, P. G. (2005). *Gemmology*. 3rd ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 112-125.
- 4- Rigaku. (2025). *Handheld Raman Analyzers for Gemstone Identification*. Technical Report, Rigaku Analytical Devices, pp. 14-22.
- 5- O'Donoghue, M. (2006). *Gems: Their Sources, Descriptions and Identification*. 6th ed. Butterworth-Heinemann, pp. 210-223.
- 6- Liu, Y., Wang, L., & Zhang, Z. (2021). Characterization of fillers in turquoise by FTIR and Raman spectroscopy. *Journal of Gemmology*, 37(5), pp. 512-525.
- 7- Zhang, Y., Li, H., Wang, L., & Chen, X. (2023). Gemmological and Spectroscopic Characteristics of Natural, Treated, and Synthetic Turquoise. *Crystals*, 13(5), pp. 782-790.
- 8- Han, X., Lu, T., Dai, H., & Su, Y. (2015). Characterization of turquoise from Hubei Province, China. *Gems & Gemology*, 51(3), pp. 244-259.
- 9- Kiefert, L., Hänni, H. A., & Chalain, J. P. (2000). Identification of fillers in gemstones by FTIR and Raman spectroscopy. *Gems & Gemology*, 36(4), pp. 336-359.
- 10- Shirdam, M., et al. (2021).
- 11- The Journal of Gemmology. (1998). Standard spectroscopic methods for gem identification 112-120.
- 12- Lind, T., et al. (1983). FTIR studies for filler identification in turquoise. 45-52.