

Standardization of Nishapur Turquoise with the Help of Artificial Intelligence and Advanced Gemmology Methods

Morteza Razmara¹, Mina Kariznoee²

¹Assistant Professor in Applied Gemmology and Industrial Minerals at Ferdowsi University of Mashhad

²M.Sc., in Applied Gemmology and Industrial Minerals, University of Ferdowsi, Mashhad

Abstract

An innovative method was developed to evaluate the feasibility of combining artificial intelligence (AI) and advanced methods to standardize high-quality turquoise from the Neyshabur mine. Initially, conventional methods in gem identification and artificial intelligence were used to identify turquoise, then advanced gemological methods were used for standardization.

The gemological characteristics of turquoise were determined with the help of digital image analysis and artificial intelligence (AI). This method relies on image processing by artificial intelligence (AI). 1600 digital image series of 18 samples from different areas of the Neyshabur turquoise mine were prepared and transferred to the database. The accuracy of turquoise gemstone identification using this method was 94%. With the help of XRD analyses, mineral identification, crystal structure determination, phase determination, and crystal particle size determination were possible. The average particle size of lower quality turquoise was 201.2 °Å and gem quality turquoise was 137.9 °Å calculated by Debye-Scherrer formula. The identified Raman peaks are in the ranges of 200 cm⁻¹, 400 cm⁻¹ and 1000 cm⁻¹. The peaks at 1031 cm⁻¹ and 1036 cm⁻¹ are related to phosphate vibrations, but the peaks in the range of 1-200 cm⁻¹ are probably related to water or hydroxyl vibrations in the structure. Turquoise samples examined by SEM showed that low quality turquoises contain Si and Ca elements in addition to their main elements.

Comparison of RAMAN, XRF, XRD and SEM analyses of turquoise from Neyshabur mine with turquoise from other regions of the world showed that turquoise from Neyshabur mine has its own unique XRD pattern that is significantly different from that of turquoise from other regions of the world. These differences are also clearly visible in RAMAN, XRF and SEM data analyses. This research showed that the turquoise gemstone from the Neyshabur mine (of gem quality) should be introduced as the world's standard turquoise reference.

Keywords: Reference standard turquoise, Neyshabur turquoise, artificial intelligence (AI), RAMAN, XRF, XRD and SEM.

استاندارد سازی فیروزه نیشابور با کمک هوش مصنوعی و روش‌های پیشرفته گهرشناسی

مرتضی رزم آرا^۱، مینا کاریز نویی^۲

^۱دانشیار گهرشناسی کاربردی و کانیه‌های صنعتی دانشگاه فردوسی مشهد

^۲کارشناس ارشد گهرشناسی کاربردی و کانیه‌های صنعتی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

یک روش نوآورانه برای امکان‌سنجی تلفیق هوش مصنوعی (AI) و روش‌های پیشرفته جهت استاندارد سازی فیروزه‌های با کیفیت بالای معدن نیشابور ابداع گردید. در ابتدا از روش‌های های معمول در شناسایی گهرسنگ ها و هوش مصنوعی، جهت شناسایی فیروزه استفاده شد، سپس از روش‌های پیشرفته گهرشناسی جهت استاندارد سازی اقدام گردید.

گهرسنگ فیروزه با کمک تجزیه و تحلیل تصاویر دیجیتال و هوش مصنوعی (AI) از ویژگی‌های گهرشناسی مشخص شد. این روش بر پردازش تصاویر توسط هوش مصنوعی (AI) متکی است. ۱۶۰۰ سری تصویر دیجیتال از ۱۸ نمونه از مناطق مختلف معدن فیروزه نیشابور تهیه و به پایگاه داده منتقل شد. دقت شناسایی گهرسنگ فیروزه با استفاده از این روش ۹۴٪ بود. با کمک آنالیزهای XRD، شناسایی کانی، تعیین ساختار بلوری، تعیین فازها و اندازه ذرات بلوری، امکان پذیر گردید. میانگین اندازه ذرات فیروزه با کیفیت کمتر، $201/2 \text{ \AA}$ و فیروزه‌های با کیفیت گوه‌ری $137/9 \text{ \AA}$ توسط فرمول دبای شرر محاسبه شدند. پیک های رامان شناسایی شده در محدوده های 200 cm^{-1} ، 400 cm^{-1} و 1000 cm^{-1} می‌باشند. پیک 1031 cm^{-1} و 1036 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات فسفات است، اما پیک‌های محدوده 200 cm^{-1} احتمالاً مربوط به ارتعاشات آب یا هیدروکسیل در ساختار است. نمونه‌های فیروزه بررسی شده توسط SEM نشان داد که فیروزه‌های نامرغوب علاوه بر عناصر اصلی خود، حاوی عناصر Si و Ca نیز می‌باشند. مقایسه آنالیزهای XRD، XRF، Raman و SEM فیروزه معدن نیشابور با فیروزه‌های سایر مناطق دنیا نشان داد که فیروزه معدن نیشابور دارای الگوی XRD ویژه منحصر به فرد خود است که با الگو فیروزه‌های دیگر مناطق دنیا، تفاوت قابل توجهی نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها در آنالیزهای Raman، XRF و SEM نیز به صورت بارزی، مشخص می‌باشند. این پژوهش نشان داد که گهرسنگ فیروزه معدن نیشابور (با کیفیت گوه‌ری)، باید به عنوان فیروزه استاندارد مرجع دنیا معرفی گردد.

کلمات کلیدی: فیروزه استاندارد مرجع، فیروزه نیشابور، هوش مصنوعی (AI)، XRD، XRF، Raman و SEM.

روشهای سنتی شناسایی گوهرسنگها در پرداختن به نیازهای تحقیقاتی علوم گوهرشناسی (به عنوان مثال، تعیین منشأ، آنالیزهای دلایل پیدایش رنگ) و تحولات دیجیتال صنعت گوهرسنگ، به دلایل محدودیت های مهم، ناکارآمد شده اند: (۱) عدم وجود داده های استاندارد، فقدان مجموعه داده های بنیادی و قابلیت ضعیف تبادل داده ها (Zhang and Shi, 2025). در عصر کنونی داده های بزرگ، تکنیک های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی مبتنی بر پایگاه های داده سنگ های قیمتی به عنوان یک حوزه پیشرفته گوهرشناسی ظهور کرده اند. این پایگاه داده جدید که با فناوری کلان داده (کلان داده) پشتیبانی می شود، تحقیقات گوهرشناسی، احراز هویت جواهرات، معاملات بازار و فعالیتهای آموزشی را متحول خواهد کرد و نوآوری را در تحقیقات دانشگاهی و کاربردهای عملی تقویت خواهد نمود (Zhang and Shi, 2025).

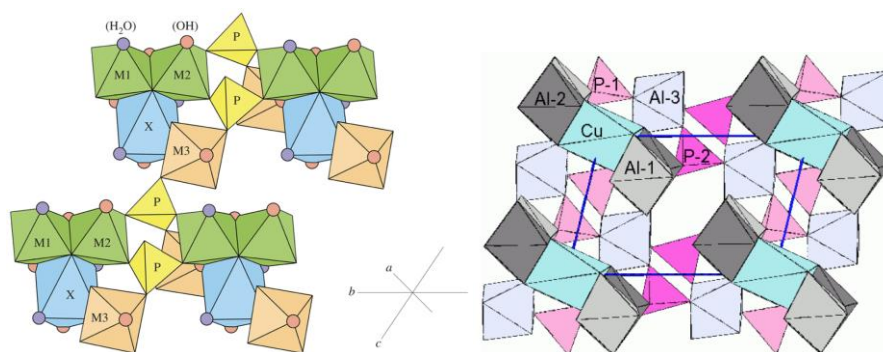
فیروزه در طبیعت در نتیجه فرآیندهای پیچیده بین سنگ میزبان حاوی فسفات آلومینیوم و مس و در اثر نفوذ آب های جوی از میان سنگ های غنی از آلومینیوم در حضور مس، اغلب در یک محیط خشک، تولید می شود (King 2002). تجزیه و تحلیل های شیمیایی نشان داده اند که عناصر اصلی تشکیل دهنده فیروزه CuO ، Al_2O_3 ، P_2O_5 ، Fe_2O_3 هستند (Kolitsch, 2000) و همچنین حاوی مقادیر کمی از Zn ، Ca ، Ba ، Sr ، Ti ، Si ، Mg ، As و Mn و S به عنوان عناصر ناخالصی هستند (Mousavipak, 2020, Xueding, 2020).

کانی های گروه فیروزه، فسفات های آبدار با فرمول شیمیایی $\text{A}_{0-1}\text{B}_6(\text{PO}_4)_{4-x}(\text{PO}_3\text{OH})_x(\text{OH})_{8-4x}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ هستند. عناصری مانند Cu^{2+} ، Ca^{2+} ، Zn^{2+} ، Fe^{2+} در موقعیت A و عناصر V^{3+} ، Fe^{3+} ، Al^{3+} ، Cr^{3+} در موقعیت B جایگزین می شوند. اگر عنصر Cu به جای A و عنصر Al به جای B جایگزین شود، فیروزه با ترکیب شیمیایی $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_{8-4x}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ تشکیل می شود (Jagannatha et al. 2006). جابجایی هر یک از عناصر در فرمول شیمیایی فیروزه باعث تغییر در خواص فیزیکی و حتی تغییر نوع کانی فیروزه می شود.

در ساختار فیروزه با فرمول شیمیایی $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_{8-4x}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ، چهاروجهی های $[\text{PO}_4]^{3-}$ و هشت وجهی های Al با به اشتراک گذاشتن پیوندهای O-H به هم متصل شده اند، در حالی که یون های Cu^{2+} در مکان های بینابینی ساختار بلوری قرار دارند و توسط چهار گروه (OH) و دو مولکول H_2O هماهنگ شده اند (شکل ۱). در ساختار بلوری فیروزه، کاتیون های Al^{3+} می تواند تا حدی توسط کاتیون های Fe^{3+} از طریق جایگزینی کامل ایزومورف جایگزین شود. عضو انتهایی غنی از آلومینیوم، فیروزه نامیده می شود، در حالی که عضو انتهایی غنی از آهن، پلانریت می باشد (Liu et al., 2018).

عوامل داخلی اصلی مؤثر بر رنگ فیروزه، ترکیب شیمیایی، فشردگی ساختار و میزان آب جذب شده آن است (Guoq, 2014). آب جذب شده رنگ را تیره می کند (Webster, 1983). تخلخل بالا، سختی و رنگ را کاهش می دهد. ترکیب شیمیایی بسته به نوع و درصد عنصر، بر رنگ و حتی وزن مخصوص نیز تأثیر می گذارد.

مرغوب ترین فیروزه های جهان (به دلیل کیفیت رنگ، جلاپذیری و سایر ویژگی های گوهرشناسی)، از معدن فیروزه نیشابور استخراج می شود، این معدن با داشتن فیروزه هایی با رنگ آبی ایرانی (Persian blue) از مشهورترین و بزرگترین معادن فیروزه جهان است. در این مطالعه، ساختار میکروکریستالی فیروزه های طبیعی با تلفیق تکنیک های ترکیبی هوش مصنوعی (AI) و نانومقیاس و روش های پیشرفته مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱) ساختار بلوری فیروزه: متشکل از زنجیره‌های زیگزاگی هشت‌وجهی در جهت محوری با یک چهاروجهی مشترک با چهار هشت‌وجهی آلومینیومی $[AlO_6]$ متصل به چهاروجهی $[PO_4]$ و هشت‌وجهی $[CuO_6]$ (Abdu et al., 2011).

مواد و روش‌ها

نمونه‌های فیروزه با کیفیت گوه‌ری عالی و نیز فیروزه‌های با کیفیت‌های مختلف (خوب، متوسط و پایین) از معدن فیروزه نیشابور انتخاب شدند (شکل ۲). ابتدا با کمک روش‌های متداول شامل وزن مخصوص (SG) و میکروسکوپ گوه‌رشناسی نمونه‌های فیروزه مورد بررسی قرار گرفتند. در گام بعدی، از روش‌های پیشرفته آنالیز، ساختار فیروزه به کمک XRD، ترکیب شیمیایی آن با روش‌های XRF و ICP، از SEM جهت بررسی مورفولوژی و از طیف‌سنجی رامان (RAMAN) جهت تشخیص بلورینگی کانی‌ها، تمایز بین پلی‌مورف‌ها، تشخیص ناخالصی‌های یونی (مانند آهن) و نیز مطالعه پاراژنز کانی‌ها استفاده گردید.

نمونه‌های فیروزه نیشابور با دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) آزمایشگاه مرکزی فردوسی مشهد، مدل Explorer ساخت شرکت GNR ایتالیا، با دقت اندازه‌گیری ۰.۵٪ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نمونه‌ها در زاویه 2θ بین ۱۰ تا ۶۰ درجه اندازه‌گیری شدند. میانگین اندازه ذرات با فرمول دبای-شرر محاسبه شد.

علاوه بر این، نمونه‌ها، با میکروسکوپ کانفوکال رامان آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد مورد شناسایی قرار گرفتند. این دستگاه دارای سه طول موج (۴۵۷، ۵۳۲، ۷۸۵) و مجهز به آنالیزور نگاشت (mapping)، به منظور شناخت سریع نمونه‌ها بدون تخریب، براساس پیوندهای بین مولکولی انجام گردید. در این مطالعه از لیزر با طول موج ۷۸۵ استفاده شد. نمونه‌های فیروزه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و سیستم تفکیک انرژی (EDS) نیز مورد آنالیز قرار گرفتند.



شکل ۲) تصاویری از نمونه‌های فیروزه‌های نیشابور بررسی شده در این تحقیق.

نتایج و بحث

کانی‌های گروه فیروزه دارای بنیان‌های فسفاتی آبدار با فرمول $A_{0-1}B_6(PO_4)_4 \cdot x(PO_3OH)_x(OH)_8 \cdot 4H_2O$ مشخص می‌شوند. عناصری همچون Fe^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} در جایگاه A و عناصر Fe^{3+} , Al^{3+} , V^{3+} , Cr^{3+} در جایگاه B جایگزین می‌شوند. اگر به جای A عنصر Cu و به جای B عنصر Al بنشینند، فیروزه با ترکیب شیمیایی $CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$ تشکیل می‌شود (Jagannatha. et al., 2006). جابجایی هرکدام از عناصر در فرمول شیمیایی فیروزه، سبب تغییر خصوصیات فیزیکی و حتی تغییر کانی فیروزه می‌شود (جدول ۱). عنصر مس باعث رنگ آبی می‌شود. مقدار آب نیز بر رنگ آبی آن تأثیر گذار می‌باشد. آهن ممکن است جایگزین مقداری آلومینیوم شود که باعث رنگ سبز فیروزه می‌شود. ترکیب شیمیایی فیروزه با فرمول ایده آل $(CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O)$ با فیروزه نیشابور و فیروزه آمریکا در جدول ۲ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

جدول ۲) کانی‌های گروه فیروزه (King, 2002)

ترکیب شیمیایی	نام کانی
$(Fe^{2+}, Zn)Al_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$	آهلیت (Aheylite)
$Cu^{2+}Fe_6^{3+}(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$	کالکوسیدریت (Chalcosidrite)
$(Ca, Cu^{2+})Al_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4-5H_2O$	کور یولیولاکتیت (<u>Coeruleolactite</u>)
$(Zn, Cu^{2+})Al_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$	فائوستیت (Faustite)
$Al_6(PO_4)_2(PO_3OH)_2(OH)_8 \cdot 4H_2O$	پلانریت (Planerite)
$Cu^{2+}Al_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$	فیروزه (Turquoise)

جدول ۲) مقایسه ترکیب شیمیایی فیروزه نیشابور با فیروزه های آمریکا و فیروزه ایده آل $(\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$

فیروزه نیشابور	فیروزه با فرمول ایده آل (Foord and Taggart, 1998)	فیروزه آمریکا، ویرجینیا (Palache et al., 1951)	
	۳۴/۹۰	۳۴/۱۳	P_2O_5
	۳۷/۶۰	۳۶/۵۰	Al_2O_3
	-	۰/۲۱	Fe_2O_3
	۹/۷۸	۹/۰۰	CuO
	۱۷/۷۲	۲۰/۱۲	H_2O
	۱۰۰/۰۰	۹۹/۹۶	Total

^{1, 2}Mineral Data Publishing, 2005

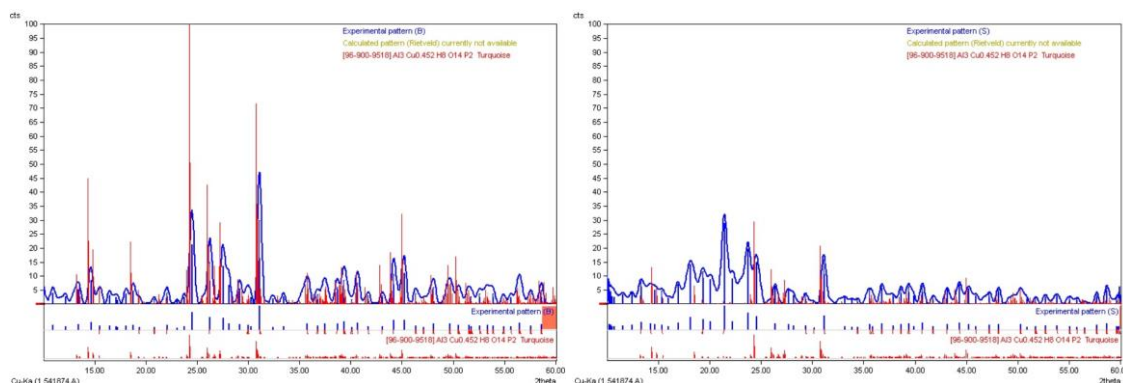
فیروزه در سیستم تریکلینیک، رده پیناکوئیدال و گروه فضایی $\text{P}\bar{1}$ متبلور می شود (Schaller, 1912 & Graham, 1948). معمولاً به صورت نهان بلور، توده ای (Massive)، گرهکی (nodular)، وجود دارد اما به ندرت، بلورهای ریز به وجود می آیند. به دلیل تخلخل یا قرار گرفتن در معرض هوازدگی سختی آن بین ۵ تا ۶ ممکن است متغیر باشد. چگالی آن هم 2.86، ولی در صورت توده ای بودن، کمتر می باشد. از آنجایی که فیروزه مات و نهان بلورین است، خصوصیات نوری آن را نمی توان با آزمایش های معمول گوهرشناسی اثبات کرد اما بلورهای آن دو محوره، مثبت هستند. رنگ آبی آسمانی فیروزه ای (مطلوب ترین رنگ عنوان گوهرسنگ)، محسوب می شود اما رنگ های آبی روشن، سبز مایل به آبی، آبی-سبز، سبز، سبز کم رنگ، سبز سیبی، سبز مایل به زرد؛ اغلب با ماتریس قهوه ای، سبز-خاکستری، خاکستری یا سیاه و با رنگ پس زمینه به عنوان تار عنکبوتی، نیز دیده می شود. ابعاد سلول واحد فیروزه های فیروزه نیشابور و فیروزه آمریکا در در جدول ۳ مورد مقایسه قرار گرفته اند.

با کمک آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD)، شناسایی کانی، تعیین ساختار بلوری، تعیین فازها و اندازه ذرات بلوری، امکان پذیر گردید. پیک های آن در شکل ۳ نشان داده شده اند. میانگین اندازه ذرات فیروزه با کیفیت کمتر از $201/2 \text{ \AA}$ و فیروزه با کیفیت گوهری $137/9 \text{ \AA}$ توسط فرمول دبای شرر محاسبه شدند.

جدول ۳) مقایسه ابعاد سلول واحد فیروزه های فیروزه نیشابور و فیروزه آمریکا.

مقادیر در فیروزه آمریکا	مقادیر در فیروزه سبزرنگ نیشابور	مقادیر در فیروزه آبی رنگ نیشابور	مقادیر در فیروزه ایده آل	پارامتر
			7.409 Å	a
			9.914 Å	b
			7.635 Å	c
			111.356°	α
			114.973°	β
			69.532°	γ

Mineral Data Publishing (2005)



شکل ۳) مقایسه الگوی پراش پرتوی X نمونه با کیفیت گوهری فیروزه نیشابور، با الگوی پراش پرتوی X نمونه نامرغوب فیروزه نیشابور.

در جدول های ۴ و ۵، مقدار فاصله صفحات، زاویه پراش و شدت پراش پیروزه های مرغوب، نامرغوب و استاندارد، مورد مقایسه قرار گرفته اند. فیروزه مرغوب نیشابور به علت نظم ساختاری بیشتر و تخلخل کمتر، فاصله صفحاتش اندکی کمتر است، در حالی که در فیروزه استاندارد فاصله صفحات بلوری بیشتر است.

جدول ۴) مقایسه نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه های فیروزه نیشابور.

فیروزه ۳			فیروزه ۲			فیروزه ۱			فیروزه نیشابور با کیفیت گوهری		
I/I_0	2θ	d	I/I_0	2θ	d	I/I_0	2θ	d	I/I_0	2θ	D
100	24.16	3.68	100	24.03	3.70	100	24.03	3.70	100	21.46	3.14
80	30.69	2.91	100	30.53	2.92	60	26.74	3.33	68	23.75	3.74
70	14.34	6.17	70	26.91	3.31	60	30.55	2.92	53	31.13	2.87

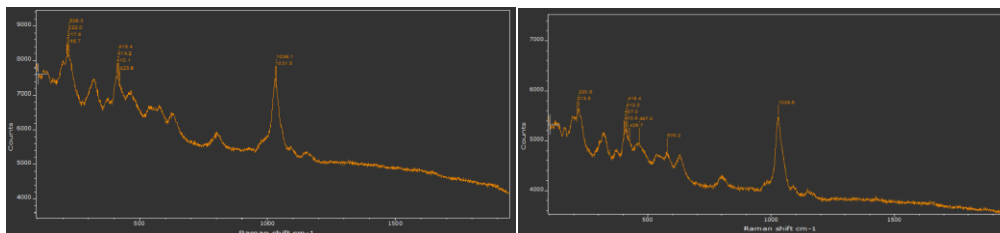
جدول ۵) مقایسه داده های XRD فیروزه نیشابور با استاندارد معرفی شده

فیروزه استاندارد			فیروزه گچی با کیفیت پایین			فیروزه با کیفیت گوهری بالا			XRD
I/I_0	2θ	d	I/I_0	2θ	d	I/I_0	2θ	d	
100	24.16	3.68	100	31.12	2.87	100	31.21	2.86	
80	30.69	2.91	71	24.52	3.63	89	24.66	3.61	
70	14.34	6.17	49	26.28	3.39	42	26.39	3.37	

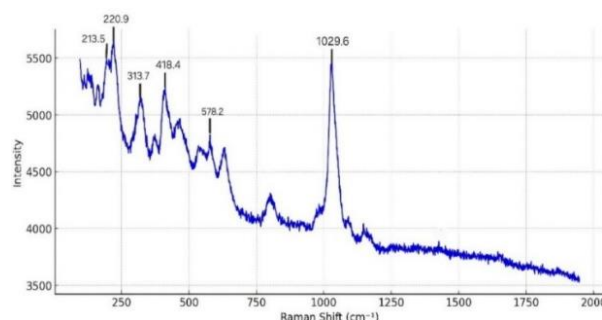
نتایج آنالیز XRD، ۳ نوع فیروزه اصلی را نشان داد (شکل ۲): ۱) نمونه های رنگ آبی به عنوان فیروزه با کیفیت بالا، ۲) نمونه های رنگ سبز به عنوان فیروزه فرین و ۳) نمونه های رنگ روشن تا سفید به عنوان فیروزه گچی شناسایی شدند (جدول ۱). ترکیب

نمونه‌های رنگ آبی مشابه است و فرمول شیمیایی آن $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ است. ترکیب نمونه‌های رنگ سبز نیز مشابه است (با جایگزینی Fe). اما در نمونه‌های رنگ روشن تا سفید ۳ فاز شناسایی شد.

در مطالعه رامان، از لیزری با طول موج ۷۸۵ استفاده شد. پیک‌های شناسایی شده در محدوده‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ هستند. پیک‌های 1031 cm^{-1} و 1036 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات فسفات هستند، پیک‌های محدوده 200 cm^{-1} احتمالاً مربوط به ارتعاشات آب یا هیدروکسیل در ساختار هستند. پیک‌های 314 cm^{-1} – 412 cm^{-1} بیشتر مربوط به ارتعاشات ساختاری مانند خمش و کشش گروه‌های فلز-اکسیژن (مثلاً Cu-O، Al-O، OH و یا مولکول‌های آب هستند) (شکل ۴). (شکل ۵).

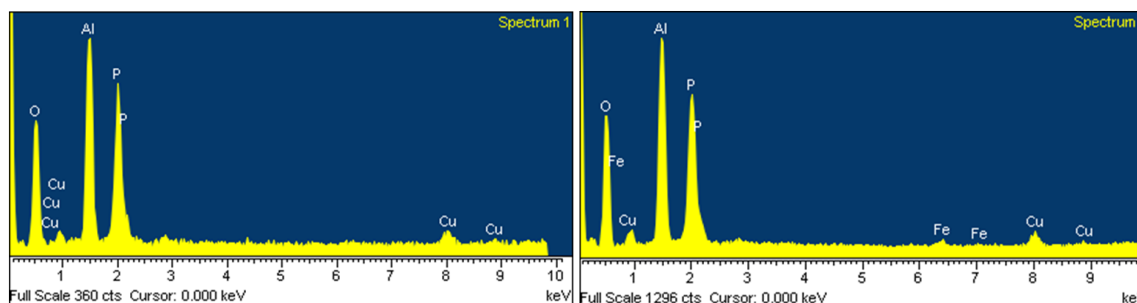


شکل ۴) مقایسه طیف های رامان فیروزه نیشابور با کیفیت گوهری با طیف رامان فیروزه نامرغوب نیشابور.



شکل ۵) مقایسه طیف‌های رامان فیروزه نیشابور و طیف رامان استاندارد

نمونه‌های فیروزه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و سیستم تفکیک انرژی (EDS) آنالیز شدند. فیروزه نامرغوب علاوه بر عناصر اصلی خود، حاوی Si و Ca نیز می‌باشد (شکل ۶). Si می‌تواند از پلاژیوکلازهای موجود در سنگ منشا فیروزه (آندزیت) باشد. کلسیم نیز ممکن است یک ناخالصی باشد که سبب کمرنگ شدن و نامرغوب شدن فیروزه شده است، پس برای رسیدن به فیروزه مرغوب، عنصر کلسیم باید از ساختار آن حذف گردد. بررسی‌های ریزساختاری SEM نشان داد که پیروزیهای مرغوب نیشابور دارای بافت متراکم، تخلخل کم و چیدمان منظم‌تر بلورها هستند، درحالی‌که نمونه‌های نامرغوب، تخلخل زیاد، شکستگی‌های ریز، حفرات میکرومتری و حضور قابل توجهی از مواد ثانویه را نشان می‌دهند. داده‌های EDS (شکل ۶) نیز به‌خوبی این تفاوت را تایید کرده و غلظت بالاتر عناصر Cu، Al و P را در نمونه‌های مرغوب و افزایش عناصر فرعی مانند Ca، Si و Mg را در نمونه‌های گچی و کم‌کیفیت نشان داد. وجود این عناصر فرعی و تخلخل بالا، دلیل اصلی کاهش جلاپذیری، افت کیفیت رنگ و شکنندگی نمونه‌های نامرغوب است.



شکل ۶) نتایج EDS مربوط به فیروزه نامرغوب (راست) و فیروزه مرغوب با کیفیت گوهری (چپ)

نتایج ICP نیز اختلاف قابل توجهی در غلظت عناصر اصلی و فرعی بین نمونه‌های مرغوب و نامرغوب نشان داد. مقادیر بالاتر P_2O_5 و Al_2O_3 ، CuO در نمونه‌های با کیفیت گوهری، نشان‌دهنده خلوص بیشتر فاز پیروزه بوده، در پیروزه‌های آبی رنگ غلظت عنصر اصلی فسفر و عنصر ناخالص روی و در پیروزه‌های سبز رنگ غلظت عنصر فرعی آهن بیشتر است؛ همچنین با افزایش مقدار آلومینیوم، رنگ پیروزه کاهش می‌یابد. این نتایج کاملاً با مشاهدات XRD و SEM-EDS سازگار بود. مقایسه‌ی الگوهای رامان و XRD فیروزه نیشابور با داده‌های منتشر شده از فیروزه استاندارد نشان داد که فیروزه نیشابور دارای الگوی کانی‌شناسی منحصر به فرد و قابل تشخیصی است (جدول ۶).

جدول ۶) مقایسه داده‌های XRD و Raman فیروزه نیشابور با فیروزه استاندارد.

Method		Blue	Chalky	Standard
XRD	d_{100}	2.86	2.87	2.68
	d_{80}	3.61	3.63	2.91
	d_{70}	3.37	3.39	6.17
	200	220.9	222	223.4
Raman	300	313.7	326.3	324.2
	400	418.4	412.2	413.4
	1000	1029.6	1029.6	1035.8

نتیجه گیری

مقایسه‌ی الگوهای رامان XRD، SEM و XRF فیروزه نیشابور با داده‌های منتشر شده از فیروزه‌های مصری، آمریکایی و چینی نشان داد که فیروزه نیشابور دارای الگوی کانی‌شناسی منحصر به فرد و قابل تشخیصی است و می‌تواند به عنوان یک مرجع استاندارد جهانی مورد استفاده قرار گیرد. این ویژگی‌ها، همراه با بافت متراکم، رنگ آبی جذاب ایرانی و قدمت معدن فیروزه نیشابور، دلیل شهرت جهانی فیروزه نیشابور است. در مجموع، نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که فیروزه نیشابور از نظر ترکیب، ساختار و ریزساختار ویژگی‌های متمایزی دارد و می‌تواند به عنوان مدل استاندارد فیروزه طبیعی در جهان معرفی شود.

مقایسه آنالیزهای RAMAN, XRF, XRD و SEM فیروزه معدن نیشابور با فیروزه های سایر مناطق دنیا نشان داد که فیروزه معدن نیشابور دارای الگوی XRD ویژه خود است که با الگو فیروزه های دیگر مناطق دنیا، تفاوت قابل توجهی نشان می دهد. این تفاوت ها در آنالیزهای RAMAN, XRF و SEM نیز به صورت بارزی، مشخص می باشند. این پژوهش نشان داد که فیروزه با کیفیت گوهری معدن نیشابور، باید به عنوان مرجع استاندارد فیروزه دنیا معرفی گردد.

References

- Abdu, Y. A.; Hull, S. H.; Fayek, M. And Hawthorne, F. C. (2011) The turquoise-chalcosiderite $\text{Cu}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ solid-solution series: A Mössbauer spectroscopy, XRD, EMPA, and FTIR study. *American Mineralogist*, Volume 96, pages 1433–1442.
- Cid-Dressner, H. (1965) Determination and refinement of the crystal structure of turquoise, $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. *Zeits. Krist.*, 121, 87–113.
- Foord, E.E. and J.E. Taggart, Jr. (1998) A reexamination of the turquoise group: the mineral aheylite, planerite (redefined), turquoise and coeruleolactite. *Mineral. Mag.*, 62, 93–111.
- King, J. R (2002) Mineral explained, Turquoise. *Geology Today*, Vol. 18, No. 3.
- Kolitsch, U. and Giester, G. (2000) The crystal structure of faustite and its copper analogue turquoise.
- Jagannatha Reddy .B, Ray L. Frost, Matt L. Weier and Wayde N. Martens (2006) Ultraviolet-visible, near infrared and mid infrared reflectance spectroscopy of turquoise.
- Liu, X.; Lin, C.; Li, D.; Zhu, L.; Song, S.; Liu, Y.; Shen, C. (2018) Study on Mineralogical and Spectroscopic Characteristics of Turquoise from Hami, Xinjiang. *Spectrosc. Spectr. Anal.* 38, 1231–1239.
- Mousavipak, N. (2020) Physico-chemical characterization of Iranian turquoise: a tentative to trace middle-eastern turquoise-bearing artifacts.
- Palache, C., H. Berman, and C. Frondel (1951) *Dana's system of mineralogy*, (7th edition), v. II, 946–951.
- Schaller W.T. (1912) Crystallized Turquoise from Virginia.
- Xueding Wang and Ying Guo (2020) The impact of trace metal cations and absorbed water on colour transition of turquoise.
- Zhang, Y.; Shi, G. (2025) Big Data and AI-Enabled Construction of a Novel Gemstone Database: Challenges, Methodologies, and Future Perspectives. *Minerals*, 15, 1149.