MİNERALOJİKSEL VE JEOKİMYASAL PERPEKTİFLERDEN BAKILARAK TURKUVAZ MINERALİNİN KEMOMETRİK KARAKTERİZASYONLARI

YL Öğrencisi Sadık Can OKYAY
Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doğal Yapı Taşları ve Süstaşları Anabilim Dalı 35370 Buca-İzmir / TÜRKİYE
ORCID ID: 0009-0004-9273-1114
Prof. Dr. Murat HATİPOĞLU
Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksekokulu, El Sanatları Bölümü, Kuyumculuk ve Takı Tasarımı Programı Buca-İzmir / TÜRKİYE
Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doğal Yapı Taşları ve Süstaşları Anabilim Dalı Buca-İzmir / TÜRKİYE
ORCID ID: 0000-0002-4345-9052

ÖZET
Turkuaz (Türkiz, Firuze) $CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$, karakteristik mavi ile yeşilimsi-mavi renkleri ve görece kolay işlenebilmesi nedeniyle binlerce yıldır süs ve mücevher taşı olarak kullanılan bir mineraldir. Bu çalışmada, turkuaz taşının kökeni, jeolojik oluşumu, mineralojik-kristalografik, jeokimyasal, fiziko-mekaniksel ve gemolojik özellikleri kemometrik (çok boyutlu karmaşık verileri özetleme) açıdan bütüncül bir yaklaşımla özetlenmiştir. Anadolu coğrafyasında bugüne kadar doğal turkuaz yatağı bulunmamasına karşın, İran ve Çin kaynaklı taşların İpek Yolu üzerinden Avrupa'ya taşınması turkuvaz isminin Anadolu Türkistan'ıyla ilişkilendirerek Fransızlarca ortaya atılan bir söylemden doğmuştur, İngilizler bu ismi "Türkiz", İranlılara ise "Firuze" olarak telaffuz ederek literatüre katmışlardır. Ancak dünya süs ve mücevher taşı ticaretinde en baskın ismi hala turkuazdır. Bununla beraber günümüz ticaretinde arz-talep dengesindeki bozukluklara bağlı olarak turkuvaz taşının yeterince madensel üretiminin arzı karşılayamaması yüzünde öncelikle dünyanın İran, Çin, Kuzey ve Orta Amerika bölgeleri dışında diğer bölgelerinde de bu taşın yatakları aranmış ancak sadece 2020'li yıllarda Ermenistan'da bulunmuştur. Ancak bu süreçte, takı sektöründe turkuaz taşına olan talebi karşılayabilmek için turkuaz muadilleri / taklitleri piyasaya sürülmüştür. Bunlar arasında en yaygınları; planerit veya turkuaz-planerit ara bileşimindeki malzemelerdir. Ancak turkuaza kimyasal bakımdan benzeyen bazı bakır ve fosfat mineralleri de ilave kimyasal işlemler sonucu takı pazarına arz edilmeye hatta tümüyle kimyasal üretim kompozeler bile doğal turkuvaz olarak sunulmaya çalışılmaktadır. Bu yüzden turkuvaz minerali dışında sunulan tüm benzeri doğal-ve taklit malzemelerin, tahripsiz yöntemlerle kesin belirlenmesinde fiziko-kimyasal yöntemler olan XRD, Mikro-Raman, FT-IR, LA-ICP-MS ve XRF gibi çoklu analitik yöntemlerin birlikte kullanılmasının ortaya çıkarttığı tanımsal veriler bu çalışmada sunulmuştur.
Anahtar kelimeler: Turkuaz (Türkiz, Firuze), mineraloji-jeokimya, gemoloji-mücevher, kemometri

CHEMOMETRIC CHARACTERIZATION OF THE TURQUOISE MINERAL FROM MINERALOGICAL AND GEMOLOGICAL PERSPECTIVES

ABSTRACT
Turquoise (also well-known as *Türkiz* or *Firuze*)—chemically $CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$—is a mineral that has been used for millennia as a gems and jewelry stone due to its characteristic blue to greenish-blue colors and its relative ease of workability. This study provides a

comprehensive overview of turquoise—covering its origin, geological formation, and mineralogical-crystallographic, geochemical, physico-mechanical, and gemological properties—using a chemometric approach (summarizing complex, multidimensional data). Although no natural turquoise deposits have been discovered in Anatolia to date, the name "turquoise" originated from a term coined by the French—associating the stone with Anatolia and Turkestan—as stones from Iran and China were transported to Europe via the Silk Road; the British adopted the name as "Turkiz," while the Iranians used "Firuze." Nevertheless, "turquoise" remains the dominant name in the global ornamental stone and jewelry trade. However, due to supply-demand imbalances in the modern market—specifically the inability of mining production to meet demand—prospectors searched for deposits in regions beyond the traditional sources of Iran, China, and North and Central America; a new deposit was eventually discovered in Armenia in the 2020s. Meanwhile, to meet the jewelry sector's demand for turquoise, market alternatives resembling the stone were introduced. The most common among these are materials consisting of planerite or intermediate compositions of turquoise and planerite. However, certain copper and phosphate minerals that are chemically similar to turquoise are being introduced to the jewelry market following additional chemical treatments; furthermore, entirely synthetic composite materials are sometimes passed off as natural turquoise. Consequently, this study presents diagnostic data obtained through the combined use of multiple physicochemical analytical techniques—specifically XRD, Micro-Raman, LA-ICP-MS, FT-IR, and XRF—to definitively identify, via non-destructive methods, all such natural and imitation materials that resemble the turquoise mineral.

Keywords: Turquoise (Turkiz, Firuze), mineralogy-geochemistry, gemology-jewelry, chemometrics

1. GİRİŞ

Süs ve mücevher taşları, yalnızca ekonomik ve estetik değerleriyle değil, aynı zamanda antik ve güncel toplumların kültürel ve sembolik dünyalarını yansıtması bakımından da büyük bir araştırma potansiyeline sahiptir. Bunlar arasında turkuaz (bilinen diğer yaygın adlarıyla türkiz, firuze) (Académie Française, 2024), özgün rengi ve görece kolay işlenebilir yapısı sayesinde, Neolitik dönemlerden (yaklaşık 8.000 yıl dan beri) itibaren başlayıp (Poque, 1915; Caley ve Richards, 1956; Rapp, 2009) günümüzde dahi popülaritesini kaybetmeksizin (Khazeni, 2014) takı, muska, törensel nesne ve mimari bezede (Dubin, 1995; Dasen, 2014) en çok tercih edilen materyallerden biri olmuştur. Tarihsel ve arkeolojik bulgular (Queffelec, 2020) turkuaz kullanımının küresel ölçekteki köklülüğünü ortaya koymaktadır (Hull vd. 2008; Shirdam, 2021).

•**İran / Orta Doğu (Mısır-Ürdün):** Deh Luran Ovası kazılarında MÖ 7.000–6.500 yıllarına tarihlenen turkuaz boncuk ve süs eşyaları belgelenmiştir. Nişabur bölgesi tarih boyunca en kaliteli homojen mavi turkuazların (Persian Turquoise) ana kaynağı olmuştur (Geissel, 1900; Gübelin, 1966; Ouskouian, 1972; Beale, 1973; Fayaz ve Forghani, 1975; Khorassani ve Abedini, 1976; Carò, vd. 2021).

•**Çin:** Xinjiang (Tianhu East, Heishanling) ve Hubei (Zhushan) bölgelerinde MÖ 7.000 yıllık geçmişe sahip antik madencilik galerileri tespit edilmiştir (Qin vd. 2015; Xian vd. 2023; Liu vd. 2024; Yang vd. 2025).

•**Kuzey-Orta-Güney Amerika:** MÖ 200 – MS 1.500 arasında Anasazi, Zuni ve Navaho kabileleri turkuazı kutsal sayarak Aztek ve Maya kültürleriyle geniş ticaret ağları kurmuşlardır (Geissel, 1900; Evans ve Southward, 1914; Weigand vd. 1977; Thibodeau vd. 2018; Goodsuhm, 2025; Lynch ve Lynch, 2025).

Bunlar haricinde çok yakın geçmişte Ermenistan'da da önemeli sayılabilecek gerçek turkuvaz

madeni Teghout Cu-Mo madeninde keşfedilerek dünyaya duyurulmuştur (Štubňa ve Andrášiová, 2021; Shirdam vd. 2026). Son yıllarda Dünya gemoloji piyasasında turkuvaz taşının popüleritesi / ticari eğilimi oldukça artmaya başlamıştır (Khazeni, 2014; GlobalInfoResearch, 2026; LP Information, Inc., 2026). Özellikle Türkiye'de adından ve özgün mavimsi ve yeşilimsi-mavi renginden dolayı hem Osmanlı da hem de modern Türkiye'de adeta milli ve simgesel bir değer kazanmıştır (Yardım, 2023). Böylece Türk sanatında turkuvaz taşının yeri yadsınamaz hale gelmiştir (Zygulski, 1995; The Metropolitan Museum of Art, 2022).

Turkuaz taşı, ticari piyasalarda sıklıkla taklit ve iyileştirilmiş ürünlerle (Bernardino vd. 2016) karıştırılmaktadır. Bu yüzden turkuvaz minerali dışında sunulan tüm benzeri doğal-ve taklit malzemelerin, tahripsiz yöntemlerle kesin belirlenmesinde temel gemolojik incelemeler yanında ileri fiziko-kimyasal yöntemlerin de birlikte kullanılmasının (kemometri) ortaya çıkarttığı mineralojik tanımsal veriler büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışma; turkuazın mineralojik-kristalografik, jeokimyasal, spektroskopik ve gemolojik özelliklerini bütüncül bir kemometrik yaklaşımla ele alarak, hem benzer minerallerden hem de yapay taklitlerden ayırt edilmesini sağlayacak güncel bir literatür derlemesi sunmayı amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOTLAR

Bu çalışmada anlatılmak istenen ana materyal, turkuvaz mineralidir. Bununla beraber hem görünüşsel hem de jeokimyasal benzerliği nedeniyle doğal yandaş mineraller ile taklit sayılabilecek kompoze materyallerden de bahsedilmektedir. Turkuaz mineralinin jeolojik oluşumu ve bulunuşundan kaynaklı nispeten nadir üretimi arz talep dengesinde arzın kısıtlılığını oluşturduğundan, talep bakımından takı piyasasında birçok turkuvaz muadillerinin dolaşımına rastlanılmaktadır. Bu yüzden taşının turkuvaz tam ve güvenilir bir biçimde mineralojik olarak kimliklendirilmesi (tanımlanması) için çok disiplinli ve aşamalı bir fiziko-kimyasal verileri elde etmeye yönelik analitik metodoloji uygulanmalıdır (Gemological Institute of America-GIA, 2026). Yalnızca renk ve dış görünüşe dayalı değerlendirmeler yanıltıcı olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, küresel gemoloji piyasasında baskın olan turkuaz minerali ve muadillerinin fiziko-kimyasal ayrımını inceleyen, 1900 ile 2026 yılları arasında uluslararası endekslerde (Web of Science, Scopus) yayımlanmış 50'den fazla öncül araştırma kemometrik bir yaklaşımla sistematik olarak taranmıştır. İncelenen makalelerdeki spektral (Raman, FT-IR) ve elementel (XRF, LA-ICP-MS) verilerin çok değişkenli istatistiksel yöntemlerle anlamlandırılma süreçleri derlenmiştir.

Önerilen aşamalı analitik iş akışı şu adımlardan oluşmaktadır.

1. Makroskopik-Gemolojik İnceleme: Özgül ağırlık (2.6–2.8 g/cm³), Mohs sertliği (5–6), kırılma indisi (n ≈ 1.61–1.65 opak olduğu için sadece spot metoduyla bulunabilir) değerleri tespit edildikten sonra, basit mikroskop/büyüteç gözlemleri ve Uzun (365 nm) ve kısa dalga boylu (266 nm) UV ışık altında fotolüminesans tepkisi değerlendirilir (U.S. Geological Survey, 1995; Webmineral, 2026).

2. Spektroskopik Tarama (Mikro-Raman, FT-IR ve CL): Mikro-Raman tahribatsız moleküler bağ analizidir (Čejka vd. 2015; Sabbaghi, 2018). Raman spektroskopisi PO_4^{3-} fosfat gruplarının iç titreşim, eğilme ve bükülme modlarını belirlerken ve de FT-IR spektroskopisi (Frost vd. 2013; Lind vd. 2015) OH/H_2O bantlarını ve yapıya emdirilmiş polimer/reçine/mum gibi organik maddelere ait C-H gerilme emilimlerini kesin olarak tespit eder. Kathadolüminesans grafikleri de (Belik ve Çiftçi, 2008) özellikle elektromanyetik tayfın radyasyon bölgesindeki özgün ışınsal tepkimelerle turkuvazın karakteristiğini belirlemeye yardımcı olur.

3. Kristal Yapı Doğrulaması (XRD): X-Işını Toz Saçınımı (XRD), turkuazın triklinik kristal fazını doğrular ve kuvars, jarosit, götit gibi eşlik eden ikincil mineral fazlarını saptar (Lind vd. 1983).

4. Kimyasal ve Elementel Analizler (XRF / ED-XRF, EPMA, EPR, EAS, SEM-EDS): XRF ile ana/iz elementler (Cu, Al, P, Fe, Zn, K, Si) taranır. Mössbauer Spectroskopik verileri, EPMA ve SEM-EDS ile mikro-ölçekte kalitatif/kantitatif elementel dağılım ve katı çözelti oranları belirlenir (Sharma, 1988; Carò vd. 2021).

5. İleri Analizler, Coğrafik Köken Bölgesi (Provenans) Belirleme / Eser Element Analizleri (LA-ICP-MS ve İzotoplar): Lazer Ablasyon ICP-MS (Tong vd. 2023), Cu-H veya Pb-Sr izotop oranları (Hull vd. 2008) ile nadir toprak elementi (REE) desenleri kullanılarak çok değişkenli istatistiksel/kemometrik yöntemlerle coğrafi köken ve yatak ayrımı gerçekleştirilir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Turkuvaz isminin kökeni Fransızca "turques/turquois" sözcüklerinden gelmekte olup "Türk" veya "Türk Taşı" anlamındadır (Back ve Mandarino, 2008; Académie Française, 2024). Turkuaz minerali aslında Anadolu coğrafyasında jeolojik bir yatak olarak henüz bulunmamaktadır. Bu yüzden isimlendirme, taşın çıkarıldığı kaynak ülkeyi değil, uzak ve yakın doğu Asya ülkelerinden (İran, Mısır, Çin gibi) çıkartılan taşların tarihsel İpek Yolu ve Osmanlı coğrafyası üzerinden Avrupa'ya ulaştırıldığı ticaret güzergâhını yansıtmaktadır (Poque, 1915; Beale, 1973; Branson, 1975). Farsça kökenli adı "Piruzeh" olup Osmanlıca'ya "Firuze" olarak geçmiştir (Ebu'r-Reyhan Muhammed b. Ahmed el-Biruni, 1229).

Jeolojik olarak turkuaz minerali, bakır, alüminyum ve fosfor bakımından zengin kayaçların yüzeye yakın kesimlerinde (süperjen/oksidasyon zonlarında) meteorik suların etkisiyle düşük sıcaklık ve uygun pH-Eh koşullarında çökelmesiyle oluşur (Penfield, 1900; Webmineral, 2026). Yan kayaçlarda nodüler, kütlesel, damar veya boşluk dolgusu şeklinde mikro-kriptokristalin agregalar olarak gözlenir. Nişabur'da breşleşmiş trakit ve volkanikler (Giessel, 1900; Gübelin, 1966; Shirdam vd. 2024), Xinjiang'da kuvarsit ve siyah şeyller (Xian vd. 2023; Shirdam vd. 2024), Teghout'ta ise porfiri bakır süperjen zonları (Štubňa ve Andrášiová, 2021; Shirdam vd. 2026) ana yan kayaçları oluşturur.

Turkuaz grubunun kristal yapısı özgün olup (Cid-Dresdner, 1965), ideal kimyasal formülü $CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$ dır (Penfield, 1900). Mineralojik yapı bakımından triklinik kristal sisteminde yer alır. Bununla beraber, jeokimyasal oluşum sürecinde kristal yapısında gerçekleşen katyonik yer değiştirmeler tam bir katı çözelti serisi oluşturur (Rossi vd. 2017; Shirdam vd. 2024). Bunların en başlıcaları;

•**Turkuaz – Kalkosiderit Serisi:** Oktahedral konumdaki Al^{3+} yerini Fe^{3+} aldıkça mineral Kalkosiderit $[CuFe^{3+}_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O]$ yönüne kayar ve renk maviden zeytin yeşiline dönüşür (Abdu vd. 2011; Frost vd. 2013).

•**Turkuaz – Planerit Serisi:** Yapısal Cu^{2+} konumunda eksiklik (vakans) oluştuğunda yük dengesi protonlaşma ile sağlanır ve Planerit $[Al_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O]$ bileşimi ortaya çıkar. Piyasada "turkuaz" olarak satılan birçok taş aslında turkuaz-planerit ara bileşimindedir (Foord vd. 1998).

•**Faustit ve Aheylit:** Cu^{2+} yerini Zn^{2+} aldığında faustit, Fe^{2+} aldığında ise aheylit minerali meydana gelir.

Renk oluşumunda temel kromofor Cu^{2+} iyonu olup canlı mavi rengi sağlar. Fe^{3+} varlığı rengi yeşile kaydırırken, kahverengi/siyah limonit-götit damarları estetik "örümcek ağı" (spiderweb) matris desenlerini oluşturur (Liu vd. 2024). Bazı durumlarda ağaç yapılarında ornatmalarla oluşabilen odunsu yapıdaki türlemelere de rastlanır (Reiche vd. 2000). Ancak bunların yaygın isimlendirilmesi "Odontolit" olarak belirlenmiştir.

Turkuazın mineral yapısı bakımından yüksek porozitesi (gözenekliliği), onu fiziksel/kimyasal müdahalelere son derece açık hale getirmektedir. Bu yüzden de çok sayıda taklitleri türetilebilmektedir. Tablo 1'de yaygın iyileştirmeler ile taklit türleri; Tablo 2'de ise bunları ayırt etmede kullanılan bazı önemli analitik kemometrik yöntemler özetlenmiştir.

Tablo 1. Turkuaza uygulanan renk iyileştirme işlemleri ve taklit malzemelerinin belirlenmesi (Han vd. 2015; Fritsch, 1999; Bernardino vd. 2016; Liu vd. 2021; Huang vd. 2022; Diella vd. 2023).

Renk İyileştirme (Tedavi) İşlemleri	**Taklit (İmitasyon) Malzemeler**
Mumlama / Yağlama (Waxing / Oiling)	Boyalı Havlit Minerali [$Ca_2B_3SiO_9(OH)_5$]
Polimer / Reçine Emdirme (Stabilizasyon)	Boyalı Manyezit Minerali [$MgCO_3$]
Kimyasal Boyama (Dyeing)	Sentetik Camsı Kompozeler / Poroselenize Yapılar
Zachery İyileştirmesi (Potasyum Tuz Cillası)	Renkli Plastik ve Reçine Türevleri / Odontolit

Tablo 2. Turkuaz ve muadillerinin teşhisinde kullanılan önemli analitik/kemometrik yöntemler (Lind vd. 1983; Sabbaghi, 2018; Carò vd. 2021; Liu vd. 2024).

Analitik Yöntem	**Teşhis ve Analiz Amacı**	**Belirleyici Parametreler / Çıktılar**
XRD Analizi	Kristal faz tanımı ve ikincil faz tespiti	Triklinik turkuaz yapısı; kuvars, götit, jarosit fazları
Mikro-Raman Analizi	Tahribatsız mineralojik doğrulama	PO_4^{3-} iç titreşim eğilme/bükülme modları ve OH bantları
FT-IR Analizi	Organik polimer ve reçine tespiti	Reçine/mum emdirilmiş yapılarda C-H bağ absorbsiyonları
EPMA / SEM-EDS / XRF	Nicel elementel analiz & Zachery tespiti	Cu, Al, P, Fe oranları; Zachery işleminde yüksek K tespiti

Günümüzde antik dönemlerden buyana geçen sürede çeşitli uygarlıkların kullandıkları turkuaz taşlı takıların incelenmesinde, coğrafik köken (provenans) belirleme çalışmaları gittikçe hız kazanmaya başlamıştır (Queffelec, 2020; Tong vd. 2023; Xian vd. 2023; Yang vd. 2025). Bunun başlıca nedeni turkuvaz taşının ticari hareketliliğinin delilsel verilerle belirlenmesidir. Çok değişkenli kemometrik algoritmaların teşhisteki rolü yönüyle bakıldığında, turkuazın elementel (LA-ICP-MS) ve spektroskopik verileri oldukça karmaşık ve çok boyutludur. Literatürde bu verilerin özetlenmesi ve coğrafi köken (provenans) ayrımının keskinleştirilmesi için Temel Bileşen Analizi (PCA) gibi gözetimsiz; Doğrusal Diskriminant Analizi (LDA) ve Rastgele Orman (RF) gibi gözetimli makine öğrenmesi algoritmaları sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle LA-ICP-MS ile elde edilen iz element matrislerine uygulanan Fisher diskriminant modelleri, Çin, İran ve ABD yataklarından elde edilen doğal turkuazları %99.5'e varan bir doğruluk oranıyla sınıflandırabilmektedir. Bu durum, kemometrinin sadece bir özetleme aracı değil, aynı zamanda adli gemolojide (forensic gemmology) sahteciliği önleyen bir sertifikasyon altyapısı olduğunu kanıtlamaktadır.

Günümüz turkuvaz Dünya ticaretinde üretim bakımından İran birinci sırayı almaktadır. Çin ve A.B.D. ikinci ve üçüncü sıralarda ve en nihayetinde Ermenistan da bu yarışa katılarak dördüncü sırayı almaktadır (Beale, 1973; Khazeni, 2014; LP Information, Inc, 2026; U.S. GlobalInfoResearch, 2026; Geological Survey, 2026).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Türkiye sınırları dahilinde MTA ve üniversitelerce doğrulanmış ekonomik bir doğal turkuaz yatağı henüz bulunmamaktadır. Yerli olduğu iddia edilen örneklerin analitik olarak doğrulanması yapılmadığından bunların bilimsel anlamı yoktur. Bununla beraber halen işletilen ve yeni bulunacak tüm bakır yatakları turkuvaz içerimi bakımından tekrar kontrol edilmelidir.
2. Turkuazın kimliklendirilmesinde yalnızca renk ve dış görünüş yetersizdir. En anlamlı tabiriyle XRD + Mikro-Raman + FT-IR + ED-XRF kombinasyonundan oluşan standart bir analitik doğrulama protokolü uygulanmalıdır.
3. Piyasada satılan turkuvaz ve muadili ürünlerin "doğal", "stabilize", "boyalı", "kompoze" veya "taklit" kategorilerinde etiketlenmesi için standart sertifikasyon sistemi geliştirilmelidir.
4. Gelecekteki çalışmalarda, taşınabilir (handheld) XRF ve Mikro-Raman cihazlarının kemometrik yazılımlarla entegre edilmesi sayesinde, müzelerdeki tarihi turkuaz eserlerin tahribatsız olarak saniyeler içinde coğrafi köken (provenans) doğrulamalarının sahada yapılmasına odaklanılmalıdır.

KAYNAKLAR

Abdu, Y. A., Hull, S. K., Fayek, M., & Hawthorne, F. C. (2011). The turquoise-chalcosiderite $Cu(Al,Fe^{3+})_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$ solid-solution series: A Mössbauer spectroscopy, XRD, EMPA, and FTIR study. *American Mineralogist, 96*(10), 1433–1442. https://doi.org/10.2138/am.2011.3658

Académie Française. (2024). Turquoise. Dictionnaire de l'Académie française, 9e édition. https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9T2745

Back, M. & Mandarino, J. (2008). *Fleischer's Glossary of Mineral Species*. 10th Ed., The Mineral Record Inc.

Beale, T. W. (1973). Early trade in highland Iran: A view from a source area. *World Archaeology, 5*(2), 133–148. https://doi.org/10.1080/00438243.1973.9979561

Belik, H. G., & Çiftçi, M. (2008). Cathodoluminescence properties of turquoise. *Celal Bayar University Journal of Science, 4*(2), 195–200.

Bernardino, N. D., Izumi, C. M. S., & de Faria, D. L. A. (2016). Fake turquoises investigated by Raman microscopy. *Forensic Science International, 262*, 196–200. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.03.041

Branson, O. T. (1975). Turquoise, The Gem of The Venturies. Treasure Chest Publications.

Caley, E.R. & Richards, J.C. (1956). *Theophrastus on Stones*, A Modern Edition with Greek Text, Translation, Introduction, and Commentary. Ohio State University.

Čejka, J., Sejkora, J., Macek, I., Malíková, R., Wang, L., Scholz, R., & Frost, R. L. (2015). Raman and infrared spectroscopic study of turquoise minerals. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 149*, 173–182. https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.04.029

Cid-Dresdner, H. (1965). Determination and refinement of the crystal structure of turquois, $CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$. *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials, 121*(1–6), 87–113. https://doi.org/10.1524/zkri.1965.121.16.87

Carò, F., Schorsch, D., Smieska, L., & Santarelli, B. (2021). Non-invasive XRF analysis of ancient Egyptian and Near Eastern turquoise: A pilot study. *Journal of Archaeological Science: Reports, 36*, 102893. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102893

Dasen, V. (2014). Healing Images, Gems and Medicine. *Oxford Journal of Archaeology*, 33(2), 177–191. https://doi.org/10.1111/ojoa.12033

Diella, V., Cantaluppi, M., Bocchio, R., Possenti, E., Adamo, I., Della Ventura, G., Mancini, L., & Marinoni, N. (2023). Characterization and comparison of natural and Zachery-treated

turquoise: New data. *Physics and Chemistry of Minerals, 50*(2), 12–25. https://doi.org/10.1007/s00269-023-01241-w

Dubin, L. S. (1995). *The History of Beads: From 30,000 B.C. to the Present*. H. N. Abrams, Tames and Hudson-London.

Ebu'r-Reyhan Muhammed b. Ahmed el-Biruni (1229), Çev:Özcan, E.S., (2017). Kıymetli Taşlar ve Metaller Kitabı (el-Cemahir fi Ma'rifeti'ı-Cevahir). Türk Tarih Kurumu.

Evans, O. H., & Southward, J. (1914). A further note on the occurrence of turquoise at Indio Muerto, northern Chile. *Man, 14*, 37–39. https://doi.org/10.2307/2788948

Fayaz, H., & Forghani, A. H. (1975). The turquoise of Iran. *Rocks & Minerals, 59*(9), 526–528.

Foord, E. E., & Taggart, J. E., Jr. (1998). A reexamination of the turquoise group: The mineral aheylite, planerite (redefined), turquoise and coeruleolactite. *Mineralogical Magazine, 62*(1), 93–111. https://doi.org/10.1180/002646198547495

Fritsch, E., McClure, S. F., Ostrooumov, M., Andres, Y., Moses, T., Koivula, J. I., & Kammerling, R. C. (1999). The identification of Zachery-treated turquoise. *Gems & Gemology, 35*(1), 4–16.

Frost, R. L., Xi, Y., Scholz, R., & Ribeiro, C. A. (2013). The molecular structure of the phosphate mineral chalcosiderite: A vibrational spectroscopic study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 111*, 24–30.

Geissel, H. L. (1900). Turquoise mines of Persia. *Scientific American, 82*(16), 246.

Gemological Institute of America-GIA). (2026). Turquoise quality factors. Erişim tarihi: 12 Mart 2026, https://www.gia.edu/turquoise-quality-factor.

GlobalInfoResearch. (2026). Global turquoise rough stone market 2026 by manufacturers, regions, type and application, forecast to 2032 [Pazar Araştırma Raporu]. MarketResearch.com.

Goodsuhm, A. A. (2025). An evaluation of turquoise from the Mona Lisa Mine in Arkansas. *Gems & Gemology, 61*(4), 374–391.

Gübelin, E. J. (1966). The turquoise occurrences in Persia. *Gems & Gemology, 13*(1), 3–13.

Han, W., Lu, T., Dai, H., Su, J., & Dai, H. (2015). Impregnated and dyed turquoise. *Gems & Gemology, 51*(3).

Hull, S. K., Fayek, M., Mathien, F. J., Shelley, P., & Durand, K. R. (2008). A new approach to determining the geological provenance of turquoise artifacts using hydrogen and copper stable isotopes. *Journal of Archaeological Science, 35*(5), 1355–1369. https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.10.001

Huang, L., Chen, Q., Li, Y., Yin, Z., Xu, F., Gao, X., & Du, Y. (2022). Composition and spectral characteristics of porcelain-treated turquoise. *Gems & Gemology, 58*(4), 438–457.

Khazeni, A. (2014). *Sky Blue Stone: The Turquoise Trade in World History*. University of California Press.

Khorassani, A., & Abedini, M. (1976). A new study of turquoise from Iran. *Mineralogical Magazine, 40*(314), 640–642.

Lind, T., Schmetzer, K., & Bank, H. (1983). The identification of turquoise by infrared spectroscopy and X-ray powder diffraction. *Gems & Gemology, 19*(3), 164–168.

Liu, L., Yang, M., Li, Y., Di, J., Chen, R., Liu, J., & He, C. (2021). Technical Evolution and Identification of Resin-Filled Turquoise. Gems & Gemology, 57(1). https://www.gia.edu/gems-gemology/spring-21-technical-evolution-identification-resin-filled-turquoise

Liu, L., Yang, M., Li, Q., Tang, Y., Wen, H., Yuan, Y., Li, Y., & Liu, J. (2024). Mineralogy and geochemistry of turquoise from Tianhu East, Xinjiang, China. *Gems & Gemology, 60*(1), 2–25.

LP Information, Inc. (2026). *Global Turquoise Rough Stone Market Growth 2026–2032*. MarketResearch.com.

Lynch, D. R., & Lynch, B. (2025). *Turquoise: Identifying and collecting the Southwest's iconic gemstone*. Adventure Publications.
Ouskouian, A. (1972). Persian turquoise. *Lapidary Journal, 26*(9), 1339–1340
Penfield, S. L. (1900). On the chemical composition of turquoise. *American Journal of Science, 160*(59), 346–350.
Pogue, J. E. (1915). *The Turquoise: A Study of Its History, Mineralogy, Geology, Ethnology, Archaeology, Mythology, Folklore, and Technology*. Memoirs of the National Academy of Sciences, Vol. XII.
Qin, Y., Xu, Y. Y., Li, H. M., Li, S. X., & Xi, Q. F. (2015). Turquoise mine and artefact correlation for some Bronze Age archaeological sites in Hubei Province, China. *Archaeometry, 57*(5), 788–802. https://doi.org/10.1111/arcm.12126
Queffelec, A. (2020). Provenancing turquoise: A difficult task. *ArcheoSciences, 44*, 163–177.
Rapp, G. (2009). *Archaeomineralogy*. 2nd Ed., (Editors; Herrmann, B., Wagner, G. A.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
Reiche, I., Vignaud, C., & Menu, M. (2000). Heat induced transformation of fossil mastodon ivory into turquoise "odontolite": Structural and elemental characterisation. *Solid State Sciences, 2*(6), 625–636. https://doi.org/10.1016/S1293-2558(00)01067-0
Rossi, M., Rizzi, R., Vergara, A., Capitelli, F., Altomare, A., Bellatreccia, F., Saviano, M., & Ghiara, R. (2017). Compositional variation of turquoise-group minerals from the historical collection of the Real Museo Mineralogico of the University of Naples. *Mineralogical Magazine, 81*(6), 1405–1429. https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.055
Sabbaghi, H. (2018). A combinative technique to recognise and discriminate turquoise stone. *Vibrational Spectroscopy, 99*, 93–99. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2018.09.002
Sharma, K. B. (1988). EPR and electronic absorption spectra of copper bearing turquoise mineral. *Physics Letters A. 132, 293-297*. https://doi.org/10.1016/0375-9601(88)90570-1
Shirdam, B., Shen, A. H., Yang, M., Mokhtari, Z., & Fazliani, H. (2021). Persian turquoise: The ancient treasure of Neyshabur. *Gems & Gemology, 57*(3), 240–257. https://doi.org/10.5741/GEMS.57.3.240
Shirdam, B., Yang, M., Liu, J., Liu, L., & Shen, A. H. (2024). Characterizing the provenance signatures and geochemical behaviors of turquoise in copper deposits: Comparative case studies of Meiduk, Iran, and Tongling, China. *Journal of Gems & Gemmology, 26*, 71–74.
Shirdam, B., Yang, M., Meliksetian, K., Grigoryan, E., Yang, Y., Zheng, Y., Wan, X., & Jiang, Y. (2026). Mineralogical and geochemical provenance reference for turquoise from the Teghout Cu–Mo deposit in Armenia. *Scientific Reports, 16*, 27540. https://doi.org/10.1038/s41598-026-59932-7
Štubňa, J., & Andrášiová, A. (2021). Turquoise from Armenia. *Journal of Gemmology, 37*(5), 454–456.
Thibodeau, A. M., López-Luján, L., Killick, D. J., Berdan, F. F., & Ruiz, J. (2018). Was Aztec and Mixtec turquoise mined in the American Southwest? *Science Advances, 4*(6), eaas9370.
The Metropolitan Museum of Art. (2022). *Pendant, late 18th century, Object No. 2022.463.2*. Department of Islamic Art, The Metropolitan Museum of Art.
Tong, S., Chen, G., Hu, W., Pan, S., et al. (2023). Determination of geographic origin of turquoise by combining laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis and chemometrics. *Minerals, 13*(10), 1338. https://doi.org/10.3390/min13101338
U.S. Geological Survey. (1995). Gemstones—Turquoise. Mineral Information Archive, U.S. Geological Survey. https://apps.usgs.gov/minerals-information-archives/gemstones/sp14-95/turquoise.html
U.S. Geological Survey. (2026). *Iran: Mineral industry production data – Gemstones,*

turquoise (kilograms), 2020–2024. National Minerals Information Center.
Webmineral (2026). Turquoise Mineral Data. (erişim tarihi 18.09.2026). https://webmineral.com/data/Turquoise.shtml
Weigand, P. C., Harbottle, G., & Sayre, E. V. (1977). Turquoise sources and source analysis: Mesoamerica and the southwestern USA.
Xian, Y., Liang, Y., Yu, C., Yang, L., & Wu, Y. (2023). A method to characterize turquoise deposits in China using sedimentary environment sensitive elements. *Heritage Science, 11*, 236. https://doi.org/10.1186/s40494-023-01080-6
Yang, J., Luo, W., Han, H., & Chen, D. (2025). On-site analysis of the turquoise artifacts excavated from the Xingong site in Beijing. *Journal of Archaeological Science: Reports, 61*, 104981.
Yardım, G. (2023). Bir sultanın mücevherleri: Ayşe Sultan'ın cihaz (çeyiz) defteri. *Turcology Research, 77*, 183–197. https://doi.org/10.5152/JTRI.2023.2255177
Zygulski Jr., Z. (1995). Turquoise in Turkish art. *9. Milletlerarası Türk Sanatları Kongresi Bildirileri*, Cilt III, 567–575. T.C. Kültür Bakanlığı.