



# Arızlı (Afyon-Şuhut) ofiyolitik melanjında krizotil oluşumlarının mineralojik, petrografik ve jeokimyasal karakterizasyonu

## Mineralogical, petrographical and geochemical characterization of chrysotile in the Arızlı ophiolitic mélange (Afyon-Şuhut, Türkiye)

Cihan Yalçın<sup>1,\*</sup> , Mustafa Kaya<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> SRG Mühendislik Danışmanlık LTD ŞTİ, 20100, Denizli, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34100, İstanbul, Türkiye

### Öz

Bu çalışma, Afyonkarahisar ili Şuhut ilçesi Arızlı mevkiindeki ofiyolitik melanj birimleri içerisinde yer alan krizotil (lifsli serpantin) mineralizasyonunun mineralojik, petrografik ve jeokimyasal özelliklerini incelemektedir. Altı farklı örnek üzerinde Raman spektroskopisi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımı spektroskopisi (SEM-EDS) ve X-ışını floresans (XRF) analizleri yapılmıştır. Raman analizlerinde krizotile ait karakteristik bantlar (686, 521, 376 ve 230  $\text{cm}^{-1}$ ) net şekilde gözlenmiş; bazı örneklerde lizardit (687, 458, 377  $\text{cm}^{-1}$ ) ve antigorit spektral izleri de tespit edilmiştir. FTIR spektrumlarında, OH bağlarını gösteren 3682  $\text{cm}^{-1}$ , Si-O-Mg ve Si-O-Si gerilme titreşimlerine karşılık gelen 943 ve 602  $\text{cm}^{-1}$  bantları gözlenmiştir. SEM görüntülerinde, liflerin 5–200  $\mu\text{m}$  arasında değişen uzunluklarda olduğu ve tipik sarmal yapılar geliştirdiği belirlenmiştir. EDS analizleri Mg (%43.6  $\text{MgO}$ 'ya kadar), Si (%43.4  $\text{SiO}_2$ 'ye kadar) ve düşük miktarda Fe ile krizotilin teorik bileşimiyle uyumludur. XRF analizlerinde  $\text{MgO}$  %35.34–39.21 ve  $\text{SiO}_2$  %35.34–40.52 aralığında,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  %6.39–7.31, Ni 1186–1588 ppm,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  %0.21–0.36 oranlarında belirlenmiş olup bu değerler serpantinleşmiş ultramafik kayalara işaret etmektedir. Özellikle yüksek Ni ve Cr içerikleri, mineralizasyonun ultramafik kayaç kökenli olduğunu düşündürmektedir. Elde edilen tüm veriler, Arızlı'daki krizotil mineralizasyonunun Türkiye'deki Sivas, Tekirova ve Karaçam gibi benzer ofiyolitik ortamlarda tanımlanan doğal serpantin oluşumları ile mineralojik ve jeokimyasal açıdan benzerlik taşıdığını ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Krizotil, Ofiyolitik melanj, FTIR, SEM-EDS, Jeokimya

### 1 Giriş

Serpantin mineralleri özellikle yüksek ısıya, kimyasallara ve gerilmeye karşı dayanıklılığı nedeniyle 20. yüzyıl boyunca birçok endüstriyel uygulamada kullanılmıştır [1]. Bu minerallerin en yaygın formu olan krizotil ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) ise özellikle ultramafik kayaçların serpantinleşmesi süreciyle gelişir [2-3]. Krizotilin lifsli yapısı

### Abstract

This research examines the mineralogical, geochemical, and microscopic properties of chrysotile (fibrous serpentine) mineralization in the ophiolitic mélange units of the Arızlı locality in Şuhut, Afyonkarahisar, Türkiye. A comprehensive assessment of six distinct rock samples was conducted using Raman spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS), and X-ray fluorescence (XRF) examination. Raman spectra exhibited specific bands indicative of chrysotile (686, 521, 376, and 230  $\text{cm}^{-1}$ ), with some samples also displaying peaks for lizardite (687, 458, 377  $\text{cm}^{-1}$ ) and antigorite. FTIR spectra exhibited significant absorption bands at 3682  $\text{cm}^{-1}$  (O-H), 943  $\text{cm}^{-1}$ , and 602  $\text{cm}^{-1}$ , corresponding to Si-O-Mg and Si-O-Si stretching vibrations. SEM examinations verified the existence of fibrous morphologies between 5 and 200  $\mu\text{m}$  in length, exhibiting distinctive spiral and elongated shapes. EDS examination revealed elevated concentrations of Mg and Si, aligning with the optimal chrysotile composition (up to 43.6%  $\text{MgO}$  and 43.4%  $\text{SiO}_2$ ). XRF analysis revealed  $\text{MgO}$  concentrations ranging from 35.34% to 39.21%,  $\text{SiO}_2$  from 35.34% to 40.52%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  from 6.39% to 7.31%, and Ni levels between 1186 and 1588 ppm. The  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  concentration varied from 0.21% to 0.36%, suggesting an ultramafic origin. Elevated amounts of Ni and Cr indicate a potential origin from olivine-rich protoliths. The findings suggest that the chrysotile deposit in Arızlı has mineralogical and geochemical similarities to naturally occurring serpentine described in other Turkish ophiolitic regions, including Sivas, Tekirova, and Karaçam.

**Keywords:** Chrysotile, Ophiolitic mélange, FTIR, SEM-EDS, Geochemistry

ve elastik özellikleri, onu hem ekonomik hem de çevresel yönden dikkat çekici kılmaktadır [4]. Krizotil lifleri, sıklıkla damarlar boyunca uzanan “cross-fiber” ve “slip-fiber” tiplerinde gelişim gösterir [5].

Serpantin grubu minerallerin oluşumu; sıcaklık, basınç, akışkan bileşimi ve deformasyon gibi etkenlerin karmaşık etkileşimiyle belirlenmektedir [6]. Bu minerallerin lifsli

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cihan.yalcin@sanayi.gov.tr (C. Yalçın)

Geliş / Received: 09.04.2025 Kabul / Accepted: 28.05.2025 Yayınlanma / Published: 15.07.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1672453

morfolojilerinin tespiti ve ayrımı, optik mikroskopi (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve Raman spektroskopisi gibi çeşitli ileri analiz teknikleriyle sağlanmaktadır [7-8]. Literatürde, krizotil ve diğer serpantin polimorflarının mikro-yapısal ayrımı üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar, bu liflerin morfolojik özelliklerinin tespiti ve sağlık risklerinin değerlendirilmesinde büyük katkı sağlamaktadır [9-10].

Türkiye’de asbest oluşumları, genellikle ofiyolitik kuşaklarla ilişkilidir. Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesi, Neotetis okyanusunun kapanma evrelerine bağlı olarak gelişmiş İzmir-Ankara-Erzincan Bindirme Zonu (İAEBZ) içerisinde yer almakta ve ofiyolitik melanj yapısıyla karakterize edilmektedir [11].

Bölgede gözlenen krizotil mineralizasyonu, ultramafik-serpantinitik kayalar içerisindeki hidrotermal ve tektonik süreçlerin bir ürünüdür [12]. Bu tür oluşumların benzerleri, Tekirova, Sivas ve Karacım (Eskişehir) gibi Türkiye’nin farklı ofiyolitik kuşaklarında da tanımlanmıştır [13-14].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, krizotilin jeokimyasal iz bileşenlerinin izlenmesi ve çok değişkenli istatistiksel analizler ile liflerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesine odaklanmıştır [2,15]. Bununla birlikte, asbest minerallerinin “zararlı element içeriği”, termal davranışı ve çevresel risk değerlendirmeleri konularında çoklu analitik yaklaşım önerilmektedir [4,7]. Ricchiuti ve ark. [7] tarafından İtalya’daki tremolit asbestleri üzerinde yapılan kapsamlı çalışma, benzer lifli minerallerin ağır metal içeriğine işaret ederken; Upadhyay [10] tarafından 2025’te yapılan çalışmada, asbestin endüstriyel mineral potansiyelini yeniden değerlendirerek ekonomik potansiyelini ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın amacı, Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesinde ofiyolitik melanj birimleri içerisinde gelişmiş krizotil mineralizasyonunun mineralojik, mikroskobik, jeokimyasal ve spektroskopik yöntemlerle detaylı bir şekilde karakterize edilerek, bu oluşumun Türkiye’deki diğer ofiyolitik serpantin sahalarıyla benzerliğini ortaya koymaktır.

## 2 Materyal ve metod

Bu çalışmada, Afyonkarahisar-Şuhut yöresinde yer alan Arızlı ofiyolitik melanj birimindeki serpantinlerden toplam altı adet kayaç örneği arazi çalışmaları sırasında el örneklemesi yöntemiyle temin edilmiştir. Numunelerin toplanmasında özellikle serpantinleşmiş ultramafik birimlerin yüzeylenme alanlarına ve gözle ayırtılabilir lifsi doku özelliklerine dikkat edilmiştir.

Laboratuvar analizlerinden önce tüm örnekler homojenize edilmek amacıyla öğütülmüştür. Öğütme işlemi, tungsten karbür içeren öğütme haznesine sahip RETSCH RS-200 model dairesel öğütücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jeokimyasal analizler İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Jeokimya Araştırma Laboratuvarı’nda yürütülmüş olup, başlıca oksit içerikleri (SiO<sub>2</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, vb.), BRUKER S8 TIGER model X-Işını Floresans (XRF) cihazı ile 0.01–12 µm dalga boyu aralığında tespit edilmiştir. Analizlerde, cihazların kalibrasyonları uluslararası

standartlara göre yapılmış ve sonuçlar yüksek doğrulukla elde edilmiştir.

Mineralojik ve dokusal özelliklerin belirlenmesi amacıyla Raman spektroskopisi, FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) ve SEM-EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu–Enerji Dağılımlı Spektroskopisi) tekniklerinden yararlanılmıştır. Raman analizleri, 633 nm dalga boyunda çalışan lazer kaynağına sahip Horiba Jobin-Yvon marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler sırasında örnek yüzeyine odaklama, 10X, 50X ve 100X uzun odaklı objektiflerle gerçekleştirilmiş; bu objektifler sırasıyla 65 mm ve 13 mm çalışma mesafesiyle 5 µm ve 2 µm yanal çözünürlük sağlamıştır. Spektral veriler, LabSpec 4.02 yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiş, başlangıçta teorik mod konumlarına göre taban çizgisi çıkarılarak, pik ayrımları Gaussian-Lorentzian karışım fonksiyonlarıyla yapılmıştır.

FTIR analizleriyle mineralin fonksiyonel gruplarına ait karakteristik absorpsiyon bantları belirlenmiştir. Bu analizler, özellikle Si-O, Mg-OH ve su içerikleri gibi karakteristik bağlanmaların yorumlanmasında kullanılmıştır. Elde edilen spektrumlar, önceden tanımlanmış krizotil minerali verileriyle karşılaştırılmıştır.

Mikroskobik ve morfolojik tanımlamalar için SEM-EDS analizleri Ankara Üniversitesi YEBİM laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ince kesitleri üzerine yapılan spot analizler ve yüzey haritalamaları ile minerallerin hem yapısal hem de kimyasal özellikleri belirlenmiştir. 200x, 3000x, 10000x gibi farklı büyütme oranlarında gerçekleştirilen görüntüleme işlemleri sayesinde krizotil liflerinin yönelme, yoğunluk ve boyutsal dağılım karakteristikleri detaylı biçimde incelenmiştir. EDS sistemi, yüzeyden yayılan karakteristik X-ışınlarının tespiti yoluyla, lokal element dağılımını ortaya koymuştur.

Tüm analizler uluslararası standartlara uygun olarak yürütülmüş olup, elde edilen veriler, krizotil mineralizasyonunun niteliksel ve niceliksel değerlendirilmesine temel teşkil etmiştir.

### 2.1 Jeolojik özellikler ve arazi gözlemleri

Çalışma alanı, Batı Anadolu ofiyolitik kuşağı üzerinde yer alan ve Neotetis Okyanusu’nun kapanma süreciyle ilişkili olarak şekillenmiş Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesini kapsamaktadır. Bu bölge, İzmir-Ankara-Erzincan Bindirme Zonu (İAEBZ) içerisinde yer almakta olup, karmaşık tektonik yapısı ve ofiyolitik birlikleri ile dikkat çekmektedir [11, 12].

İnceleme alanında Mesozoik yaşlı karbonat platformları, Jura-Kretase istifleri, ofiyolitik melanj ve Tersiyer yaşlı [16] karasal çökeller yüzlek verir (Şekil 1).

Stratigrafik olarak en yaşlı birim, Orta Triyas–Üst Triyas yaşlı kireçtaşları olup bu birim, gri ve koyu gri renkli, kalın tabakalı, sert ve yer yer dolomitik özellikte kalsit içeren karbonat kayalardan oluşur. Üzerinde yer alan Jura-Kretase yaşlı kireçtaşları, açık gri renkli, daha ince tabakalanmalı ve fosilli yapısıyla ayırt edilebilen karbonat fasiyesindedir (Şekil 1). Stratigrafik istifin bir üst seviyesinde, Kretase yaşlı kireçtaşları gözlenmektedir. Bu birim, kırık ve faylanmış yapıda olup yer yer masif, yer yer tabakalanmış görünüm

sunar. Söz konusu karbonat kayaçları, bölgesel tektonik etkinlikler sonucu metamorfizmaya kısmen maruz kalmıştır. Kireçtaşlarının üzerine uyumsuz olarak gelen Üst Kretase yaşlı ofiyolitik melanj birimi, çalışma alanının en dikkat çekici ve önemli jeolojik bileşenidir. Bu birim, serpantin, harzburjit, gabro parçaları ve radyolarit bloklarını içeren, matrisi genellikle serpantinleşmiş peridotit olan heterojen yapıya sahip bir birimdir. Bu melanj içinde yer alan ultramafik kayaçlarda krizotil tipi serpantin mineralizasyonu gelişmiştir (Şekil 2).

Kuzeybatı-güneydoğu uzanımlı sağ yönlü doğrultu atımlı fay, ofiyolitik birimlerin şekillenmesinde ve krizotil liflerinin lokalizasyonunda kritik rol oynamaktadır. Fay zonları boyunca gelişen kırık ve çatlak sistemleri, hem hidrotermal akışkanların dolaşımına olanak tanımış hem de lifli serpantin minerallerinin oluşumuna uygun mikro-ortamlar yaratmıştır.

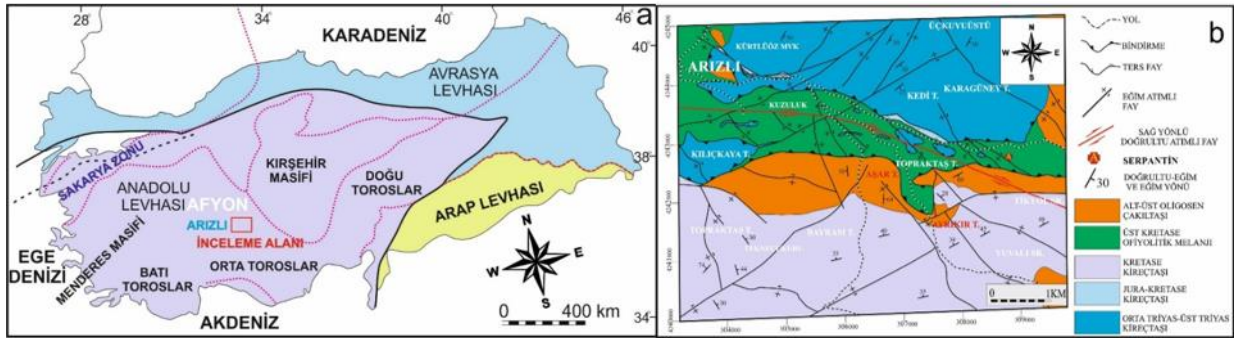
Çalışma alanında yapılan detaylı jeolojik haritalama ve gözlemler sonucunda, krizotil (lifsi serpantin) yalnızca Üst Kretase yaşlı ofiyolitik melanj birimi içerisinde, özellikle serpantin ve kısmen tektonize harzburjit seviyelerinde geliştiği tespit edilmiştir. İncelenen örneklerde krizotil tanımlaması, öncelikle lifsi morfolojisine ilişkin

mikroskobik gözlemlerle yapılmış; bu tanımlama daha sonra spektroskopik bulgularla desteklenmiştir

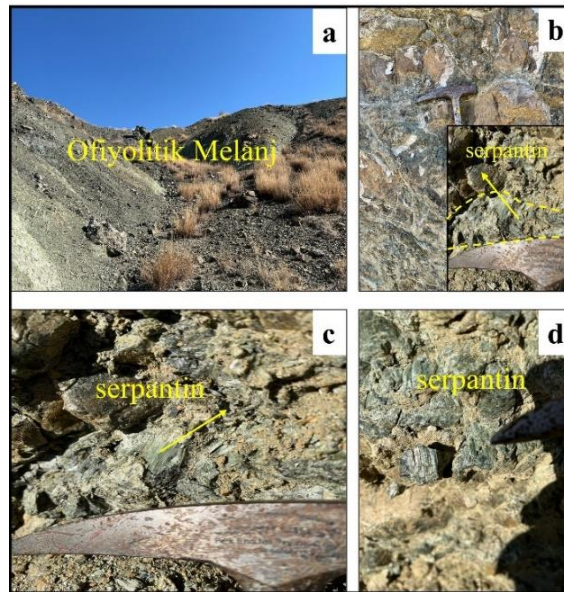
Krizotil damarları, genellikle fay zonlarına paralel ya da çatlak dolgusu şeklinde gözlenmiş, kısmen boşlukları doldurur tarzda bantlı yapı oluşturmuştur.

Saha gözlemlerinde, ofiyolitik melanj biriminin yeşilimsi-gri renkte, yüksek derecede ayrılmış ve parçalanmış yapıda olduğu belirlenmiştir (Şekil 2a). Bu birim içerisinde, yer yer birkaç santimetre kalınlığında krizotil damarlarına rastlanmakta, bu damarlar belirgin şekilde yeşilimsi lifsi morfolojisi ile kolayca ayırt edilebilmektedir (Şekil 2b-2d). Krizotil lifleri, genel olarak zonal bir dağılım göstermez; ancak yerel olarak kırık-zayıflık zonları boyunca yoğunlaşma eğilimindedir.

Krizotil liflerinin kristallenme tarzı, kayaçların mikrotektonik yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Lifler, damar duvarlarına dik doğrultuda gelişim göstererek klasik “cross-fiber” yapılarını oluşturmuştur. Bu yönelim, bölgedeki gerilme rejimiyle uyumlu olarak tektonik zayıflık zonları boyunca yoğunlaşmıştır. Bu yapı, krizotilin tipik damar içi kristallenme alışkanlığıyla örtüşmektedir.



Şekil 1. (a) İnceleme alanının tektonik konumu, (b) İnceleme alanının 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası (MTA, [16] paftasından değiştirilmiştir).

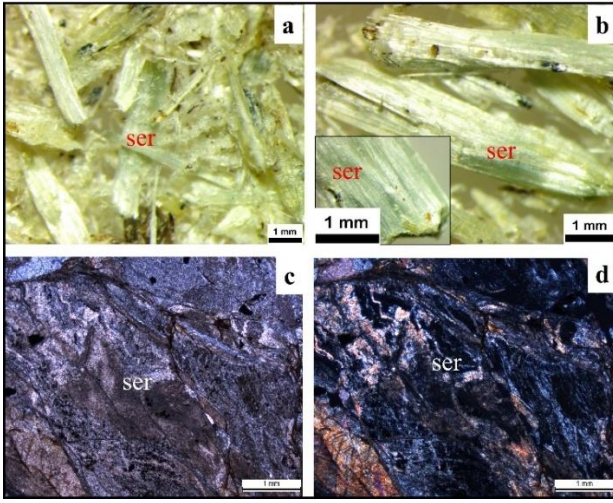


Şekil 2. İnceleme alanının genel görünümü, (a) Ofiyolitik melanj birimleri, (b-c-d) serpantin yüzlekleri.



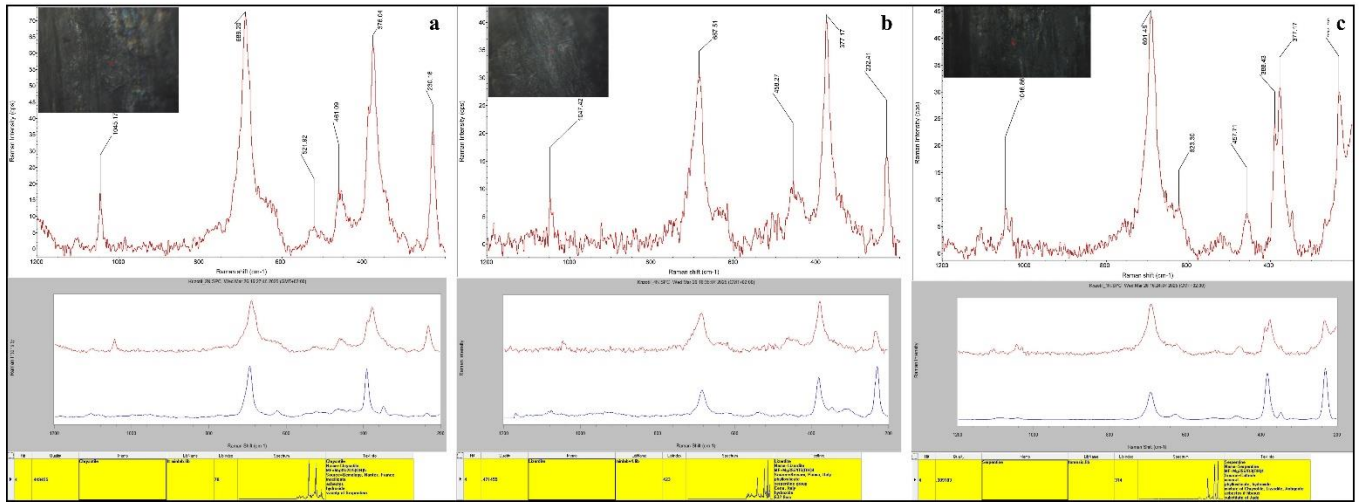
### 3 Bulgular

Binoküler mikroskop altında yapılan incelemelerde (Şekil 3a-b), örneklerde uzunlukları birkaç milimetreye ulaşan, lifsi yapıda, iğnemi formda gelişmiş beyazımsı-yeşilimsi mineraller gözlenmiştir. Bu lifsi yapıların genellikle dağınık halde bulundukları ve bir kısmının paralel dizilim gösterdiği dikkati çekmektedir. Polarizan mikroskop kesitlerinde (Şekil 3c-d), serpantin grubu minerallerin elek dokuları net olarak ayırt edilmiştir. Raman spektroskopik analizler üç farklı örnek üzerinde gerçekleştirilmiş olup, her biri karakteristik titreşim bantları ile serpantin grubu minerallerin varlığını doğrulamıştır



Şekil 3. (a), (b) Serpantin örneklerinin binoküler mikroskop görünümü; (c) (d) Serpantin örneklerinin polarizan mikroskop görüntüsü, kısaltma (ser): serpantin

(Şekil 4a-c). Örneğin,  $686\text{ cm}^{-1}$ ,  $521\text{ cm}^{-1}$ ,  $376\text{ cm}^{-1}$  ve  $230\text{ cm}^{-1}$  bantları krizotilin ayırt edici Raman pikleri olarak



Şekil 4. Temsili Raman spektroskopi sonuçları. (a) Krizotil mineraline ait belirgin Raman bantları:  $686\text{ cm}^{-1}$ ,  $521\text{ cm}^{-1}$ ,  $376\text{ cm}^{-1}$  ve  $230\text{ cm}^{-1}$ . (b) Lizardit minerali ile uyumlu  $687\text{ cm}^{-1}$ ,  $458\text{ cm}^{-1}$  ve  $377\text{ cm}^{-1}$  bölgelerinde spektral yoğunluklar gözlenmektedir. (c) Üçüncü örnekte hem krizotil hem lizardit hem de genel serpantin mineralizasyonuna ait karma spektrumlar tanımlanmıştır

yorumlanmaktadır [17-18]. Şekil 4a'daki örnekte krizotil mineraline ait karakteristik bantlar net şekilde gözlenmiştir. Şekil 4b'de lizardit ile ilişkili  $687\text{ cm}^{-1}$ ,  $458\text{ cm}^{-1}$  ve  $377\text{ cm}^{-1}$  civarındaki bantlar belirgin olup, bazı spektrumlarda zayıf serpantin spektral izleri de tespit edilmiştir. Şekil 4c'de ise hem krizotil hem lizardit hem de serpantin genel yapısı spektral eşleşmelerle doğrulanmıştır.

Şekil 5'te sunulan FTIR spektrumu,  $3682\text{ cm}^{-1}$  bölgesindeki güçlü absorpsiyon piki ile serpantin grubuna ait OH titreşimlerinin varlığını göstermektedir. Bu zirve özellikle krizotil ve antigoritin tanımlanmasında önemli bir göstergedir [19-20]. Ayrıca  $943\text{ cm}^{-1}$  ve  $602\text{ cm}^{-1}$ 'deki absorpsiyon bantları, Si-O-Mg ve Si-O-Si gerilme titreşimlerine karşılık gelmekte olup tipik serpantin spektrumu ile uyumludur. Bu veriler, Raman spektroskopisi ile elde edilen bulguları destekler niteliktedir.

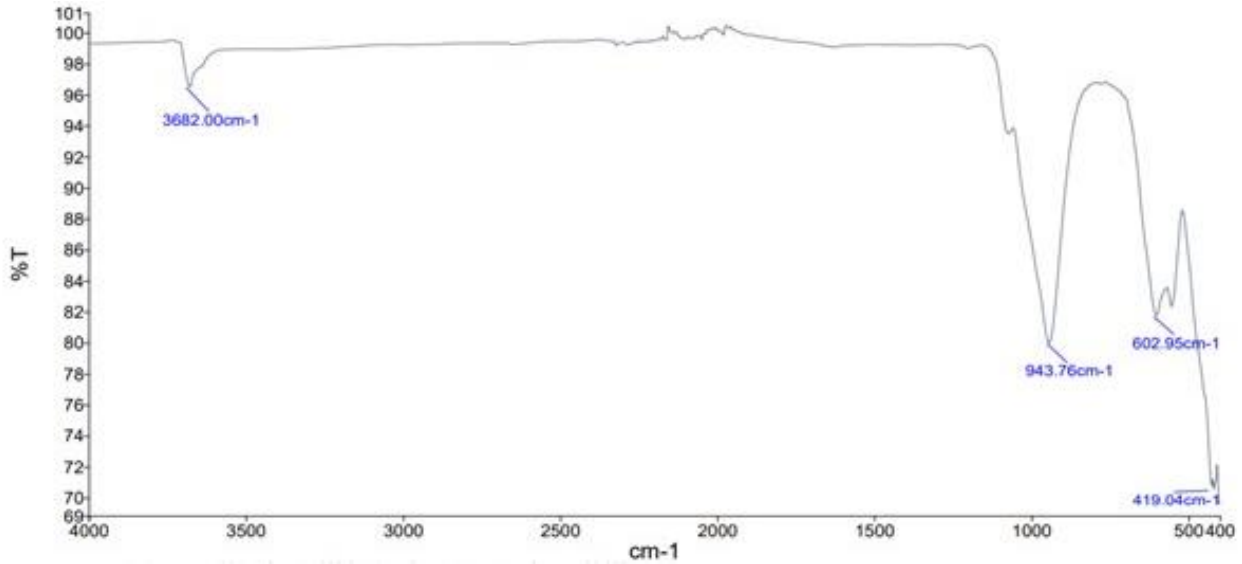
Taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri, analiz edilen örneklerde lifsi yapının baskın olduğunu ve krizotil liflerinin genellikle paralel dizilişli olarak geliştiğini göstermektedir (Şekil 6a-d). a, b ve c görsellerinde liflerin çoğu, görüntü alanının dışına taşacak şekilde uzamaktadır; d görselinde ise mikron altı düzeyde daha ince fibriller belirlenmiştir. Görsellerde kullanılan ölçek çubukları  $200\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$  aralığında değişse de liflerin bazı örneklerde bu değerlerin üzerinde uzunluklara sahip olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle lif boyutlarının belirli bir aralıkta sınırlandırılması yerine, maksimum uzunlukların tam olarak ölçülemediği, ancak genel olarak yüksek boy/en oranına sahip liflerin gözlenmiştir. Liflerin yüzey morfolojisi düzgün olup, bazı yerlerde ince parçalanma izleri mevcuttur. EDS analizlerinde Mg, Si ve düşük miktarda Fe öne çıkmaktadır; bu dağılım, krizotilin tipik kimyasal yapısı olan  $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  ile uyumludur [21-22].

XRF analiz sonuçları Tablo 1’de özetlenmiştir. Tüm örneklerde MgO oranları %35.34–39.21 aralığında değişmekte olup, bu değerler serpantinleşmiş ultramafik kayaların magnezyumca zengin karakterini yansıtmaktadır. Bu oranlar, ideal krizotil mineralindeki teorik MgO içeriği (%43.63 MgO) ile karşılaştırıldığında daha düşüktür; bu durum analizlerin tek bir minerale değil, tüm kayaç matrisine (çoğunlukla serpantin ve harzburgit) ait bileşimi yansıtmışından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde SiO<sub>2</sub> oranları da %35.34–40.52 aralığındadır ve ultramafik kökenli silikat bileşenlerinin varlığını göstermektedir [23].

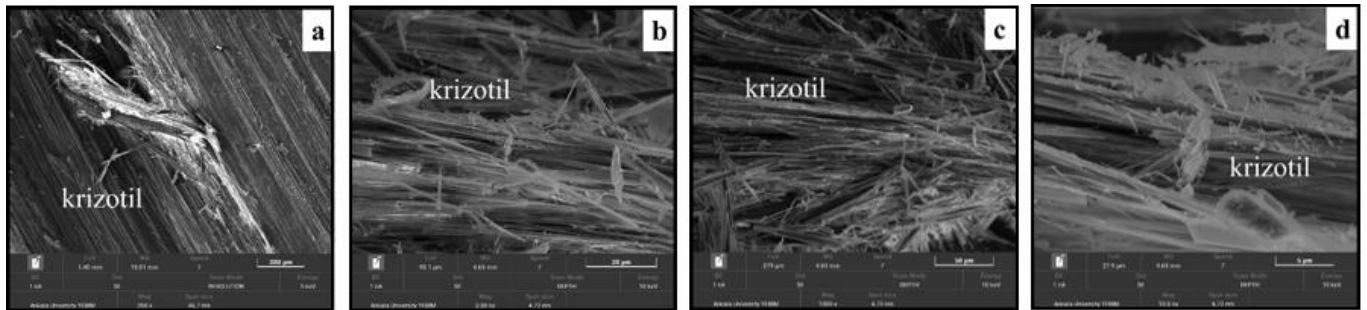
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikleri %6.39–7.31 arasında değişmekte olup, bu durum serpentinizasyon sürecinde primer mineraller olan olivin ve piroksenin bozunmasıyla sisteme katılan demir miktarını yansıtmaktadır. Bununla birlikte, bu demirin bir kısmı amorf demir oksit/hidroksit fazlarında veya ikincil minerallerde (örneğin manyetit) bulunuyor olabilir.

Ni konsantrasyonları ise 1186–1588 ppm aralığındadır. Bu değerler, tipik olarak olivin minerallerinde tutulan nikelin serpantinleşme sırasında açığa çıkmasıyla açıklanabilir. Bununla birlikte, ofiyolitik birimlerin derin kesimlerinde millerit (NiS) gibi sülfür minerallerinin de bulunabileceği göz önünde bulundurulmalı ve bu elementin kaynağına katkıda bulunabileceği düşünülmelidir. Bu nedenle, tespit edilen Ni içerikleri yalnızca olivin kökenli değil, aynı zamanda potansiyel ikincil sülfür fazlarıyla da ilişkili olabilir [23].

Sr, Cr ve Co gibi iz element içerikleri de ofiyolitik kayalarla uyumludur. Özellikle Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerlerinin %0,21–0.36 arasında olması, krom açısından zengin ultramafik kaynaklara işaret etmektedir [24].



**Şekil 5.** FTIR (Fourier Transform Infrared) spektroskopi sonucu. Serpantin grubunun tanımlanmasında kullanılan spektrumda; 3682 cm<sup>-1</sup>'deki güçlü absorpsiyon bandı OH bağlarının varlığını işaret etmekte olup, bu zirve özellikle krizotil ve antigoritin tanımlanmasında ayırt edici niteliktedir. Ayrıca 943 ve 602 cm<sup>-1</sup>'deki pikler Si-O-Mg ve Si-O-Si bağlarına karşılık gelmektedir. 419 cm<sup>-1</sup> civarındaki düşük dalga sayılı pik, magnezyum silikat yapıların deformasyon modlarıyla ilişkilendirilir. Bu sonuçlar, Raman analizlerini destekler niteliktedir.



**Şekil 6.** Krizotil liflerinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri. (a) Düşük büyütmede (200×), uzunluğu 200 µm'yi aşan liflerin paralel dizilimli olarak yüzey boyunca geliştiği gözlenmektedir. (b) 3000× büyütmede, krizotil liflerinin tipik sarmal ve ince yapıları detaylı şekilde belirlenmiştir. (c) 1000× büyütmede, liflerin yüzeyde birbirine sıkıca bağlı ve doğrusal yapıda olduğu görülmektedir. (d) 10.000× büyütmede, en ince krizotil liflerinin boyutsal morfolojisi ortaya konmuş olup, yüzeydeki bazı liflerin uçlarının bölünmüş ve dallanmış olduğu dikkat çekmektedir.

**Tablo 1.** Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesindeki serpantinleşmiş ofiyolitik kayaç örneklerine ait XRF analiz sonuçları.

| ÖRNEK                          |     | AS-1    | AS-2    | AS-3    | AS-4    | AS-5    | AS-6    |
|--------------------------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Na <sub>2</sub> O              | %   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.02   | <0.03   |
| MgO                            | %   | 39.21   | 38.13   | 38.67   | 35.34   | 37.01   | 36.17   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %   | 0.30    | 0.30    | 0.30    | 0.24    | 0.27    | 0.26    |
| SiO <sub>2</sub>               | %   | 40.52   | 39.63   | 40.08   | 35.34   | 37.71   | 36.52   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | %   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.01   |
| K <sub>2</sub> O               | %   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.01   | <0.01   |
| CaO                            | %   | 0.82    | 1.93    | 1.38    | 5.65    | 3.51    | 4.58    |
| TiO <sub>2</sub>               | %   | 0.01    | 0.02    | 0.02    | 0.01    | 0.01    | 0.01    |
| MnO                            | %   | 0.10    | 0.10    | 0.10    | 0.14    | 0.12    | 0.13    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %   | 6.39    | 7.18    | 6.79    | 7.31    | 7.05    | 7.18    |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %   | 0.21    | 0.28    | 0.25    | 0.36    | 0.30    | 0.33    |
| SO <sub>3</sub>                | %   | 0.03    | 0.02    | 0.03    | 0.02    | 0.02    | 0.02    |
| Cl                             | %   | 0.03    | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.02    |
| LOI                            | %   | 12.23   | 12.23   | 12.23   | 15.37   | 13.80   | 14.59   |
| Sc                             | ppm | 10.00   | 7.00    | 16.00   | 11.00   | 11.33   | 12.78   |
| V                              | ppm | 26.00   | 24.00   | 49.00   | 33.00   | 35.33   | 39.11   |
| Co                             | ppm | 117.00  | 87.00   | 88.00   | 97.33   | 90.78   | 92.04   |
| Ni                             | ppm | 1588.00 | 1186.00 | 1227.00 | 1333.67 | 1248.89 | 1269.85 |
| Cu                             | ppm | 4.00    | 2.00    | 2.00    | 2.67    | 2.22    | 2.30    |
| Zn                             | ppm | 23.00   | 21.00   | 21.00   | 21.67   | 21.22   | 21.30   |
| As                             | ppm | 16.00   | 14.00   | 14.00   | 14.67   | 14.22   | 14.30   |
| Sr                             | ppm | 103.00  | 15.00   | 17.00   | 45.00   | 25.67   | 29.22   |
| Zr                             | ppm | 14.00   | 14.00   | 13.00   | 13.67   | 13.56   | 13.41   |
| Nb                             | ppm | 2.00    | 1.00    | 2.00    | 1.67    | 1.56    | 1.74    |
| Mo                             | ppm | 2.00    | 2.00    | 2.00    | 2.00    | 2.00    | 2.00    |
| Ba                             | ppm | 18.00   | 14.00   | 13.00   | 15.00   | 14.00   | 14.00   |
| Pb                             | ppm | <1      | <1      | <1      | <1      | <1      | <1      |

#### 4 Tartışma

Bu çalışmada Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesindeki krizotil içeren serpantin kayaçları çok yönlü olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular hem mineralojik hem de jeokimyasal açıdan literatürle tutarlıdır.

SEM-EDS, Raman ve FTIR gibi analitik tekniklerin birlikte kullanılması, krizotil tipi minerallerin tanımlanmasında etkin bir yaklaşımdır [25]. Şimşek vd. [26] benzer şekilde çoklu analiz yöntemlerini kullanarak farklı kültürel materyallerde detaylı karakterizasyon sağlamıştır. Arızlı'daki örneklerde de bu çoklu analiz yaklaşımı, krizotil ile lizartit ve antigoritin ayırt edilmesini kolaylaştırmıştır.

Raman analizlerinde belirlenen 686 ve 521 cm<sup>-1</sup> gibi bantlar, tipik krizotil titreşimleriyle örtüşmektedir [17-18]. Ayrıca FTIR sonuçlarındaki 3682 cm<sup>-1</sup> bandı, serpantin grubunun OH bağlarını göstermekte olup krizotil varlığını desteklemektedir [19]. Kim vd. [27] çalışmalarında bu titreşimlerin, krizotilin ısıya karşı davranışlarını da yansıttığını belirtmektedir.

SEM görüntülerinde belirgin lifsi yapıların varlığı, serpantin minerali olan krizotilin morfolojik tanısını pekiştirmiştir [21]. Özellikle 10.000× büyütmeye gözlenen lif uzamaları ve dallanmaları, Arızlı'daki oluşumların doğrudan serpantinleşme süreçleriyle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Bu gözlemler Yada [22] ve Langer [5] tarafından yapılan klasik tanımlamalarla da uyumludur. XRF sonuçları krizotil açısından belirleyici olan yüksek MgO ve SiO<sub>2</sub> değerlerini ortaya koymuştur. Ni ve Cr gibi elementlerin belirgin varlığı, olivin ve diğer ultramafik bileşenlerin alterasyonu ile ilişkili olarak açıklanabilir [23-24]. Bu kimyasal bileşim, Sivas ve Tekirova ofiyolitlerinde daha önce bildirilen serpantin türleriyle karşılaştırıldığında benzer özellikler göstermektedir [13, 28].

Krizotil, literatürde en yaygın kullanılan serpantin tipi olarak tanımlanmakta ve sanayide hala sınırlı da olsa kullanılmaktadır. Ancak sağlık riskleri nedeniyle birçok ülkede yasaklanmıştır [29-30]. Bloise vd. [31] doğal olarak oluşan krizotil içeren kayaçların kesilmesi ve işlenmesi sırasında liflerin havaya karışabileceğini vurgulamıştır. Bu



nedenle Arızlı bölgesindeki doğal oluşumların da çevresel açıdan değerlendirilmesi gerekir.

Sonuç olarak, Arızlı ofiyolitik melanjındaki krizotil mineralizasyonu, Raman, FTIR, SEM-EDS ve XRF verileri ile değerlendirildiğinde, tanımlanabilir, çevresel açıdan dikkat gerektiren bir yapı sunmaktadır. Bu tür çalışmalar, doğal krizotilin yayılım alanlarını belirlemek ve riskleri önceden yönetebilmek açısından önemlidir [32].

Arızlı bölgesindeki krizotil oluşumu, Türkiye'nin farklı bölgelerinde belgelenmiş diğer ofiyolitik serpantin yataklarıyla benzerlik göstermektedir. Örneğin, Sivas çevresindeki ofiyolitik birimlerde, benzer şekilde lifsi serpantin mineralleri ve yüksek MgO-SiO<sub>2</sub> içerikleri rapor edilmiştir [13]. Tekirova (Antalya) ofiyolitlerinde de antigorit ve krizotil ayrımı, FTIR ve XRD verileriyle desteklenmiş, bu birimlerdeki mineral paragenesi Arızlı ile örtüşmüştür [28].

Karaçam (Eskişehir) yöresindeki altere ultramafik kayalarda da krizotil benzeri lifli yapılar belirlenmiş ve bu oluşumlar serpantinleşme derecesiyle ilişkilendirilmiştir [14]. Jeokimyasal olarak bu yataklarda da MgO ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriklerinin yüksekliği dikkat çekmiştir. Arızlı'daki veriler bu örneklerle karşılaştırıldığında, serpantinleşme kaynaklı krizotil oluşumlarının Türkiye genelinde benzer tektonik ortamlarda geliştiği söylenebilir.

Doğal asbestin (NOA – Naturally Occurring Asbestos) bulunduğu alanlarda tozuma, yerleşim alanlarına yakınlık ve yol yapım çalışmaları gibi faktörler önemli çevresel riskler yaratmaktadır [31]. Arızlı'da belirlenen krizotil liflerinin boyutları, WHO kriterlerine göre solunabilir asbest sınıfına girmektedir. Bu durum kontrolsüz kazı veya inşaat çalışmalarında potansiyel tehlike oluşturabilir.

Serpantin lifleri, özellikle havayla taşınabilir formda olduklarında mezotelyoma ve akciğer hastalıklarına yol açabilmektedir [29]. Bu bağlamda, Arızlı gibi doğal krizotil içeren alanlarda, sağlık risk değerlendirmesinin yanı sıra mühendislik önlemleri de planlanmalıdır. Marzini vd. [32], hiperspektral görüntüleme yöntemleriyle yüzeydeki lifli mineral dağılımını haritalayarak bu tür risk alanlarının yönetimine katkı sağlamıştır.

Bu çalışmanın önerdiği yöntem seti (SEM-EDS, Raman, FTIR, XRF) çevresel mineralojide kullanılabilecek güçlü bir araçtır. Hem jeolojik hem de çevresel planlama süreçlerinde bu yaklaşım yaygınlaştırılmalıdır [33].

Bu çalışmada tespit edilen krizotil, lifsi morfolojisiyle diğer serpantin minerallerinden (lizardit, antigorit) ayrılmaktadır. SEM görüntülerinde, tipik olarak damar duvarlarına dik uzanan ve genellikle damar genişliğini kapsayacak uzunlukta gelişen ince fibril kümeleri gözlenmiştir. Bu yapı, Atkinson vd. [34] tarafından tanımlanan klasik "çapraz lifli" krizotil damar oluşumları ile uyumludur. Liflerin yüksek boy/en oranı, kıvrımlı spiral şekli ve paralel yönelimi, bu minerali plaka formunda kristallenen lizardit ve daha masif-dikensel yapıdaki antigoritten ayırmaktadır. Ayrıca, krizotile özgü Raman bantları (686, 521, 376 cm<sup>-1</sup>) ve FTIR spektral zirveleri (özellikle 3682 cm<sup>-1</sup> OH bağı) ile kimlik doğrulaması yapılmış, bu yönüyle hem morfolojik hem de spektroskopik olarak ayrımı sağlanmıştır.

## 5 Sonuçlar

Saha gözlemleri, polarizan mikroskop görüntüleri ve SEM analizleri, serpantin grubuna ait minerallerin hem elektriksel hem de lifsi morfolojide geliştiğini ortaya koymuştur. Raman analizlerinde krizotil, lizardit ve serpantin minerallerine özgü bantların tespiti; FTIR verilerinde ise karakteristik OH-gerilme titreşimlerinin gözlemlenmesi, lifsi yapının kristal yapısı ile uyumlu olduğunu doğrulamıştır. XRF analizleri, yüksek MgO (%38–42) ve SiO<sub>2</sub> (%39–43) içerikleriyle serpantinleşmiş ultramafik kökenli bir mineralizasyonun göstergesi olmuştur. Ayrıca Ni, Cr ve Fe içerikleri, bu birimlerin olivin ve piroksen gibi primer minerallerden türediğini desteklemektedir.

Elde edilen veriler, Arızlı'daki krizotil oluşumunun, Türkiye'nin diğer ofiyolitik sahalarında (örneğin Sivas, Tekirova, Karaçam) görülen serpantinler ile jeokimyasal ve mineralojik açıdan büyük benzerlikler taşıdığını göstermektedir. Bu yönüyle Arızlı sahası, bölgesel serpantinleşme süreçlerinin ve krizotil oluşum mekanizmalarının anlaşılmasında önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Öneriler:

- Arızlı bölgesinde belirlenen krizotil mineralizasyonunun sağlık ve çevre açısından risk taşıyabileceği dikkate alınarak, bu sahada yapılacak kazı, yol yapımı ve inşaat faaliyetlerinde mutlaka serpantin güvenliği standartlarına uyulmalıdır.
- Geniş çaplı yüzey haritalamaları ve hiperspektral görüntüleme çalışmaları ile bölgedeki krizotil yayılım alanı detaylandırılmalı, risk haritaları oluşturulmalıdır.
- Bu çalışmada kullanılan Raman-FTIR-SEM-EDS-XRF entegrasyonu, benzer jeolojik ortamlarda serpantin tanınmasında standartlaştırılabilir ve çevresel mineralojide yaygınlaştırılmalıdır.
- Bölgedeki mineralojik süreçlerin daha iyi anlaşılması için ileri düzey kristalografi, termal ayrışım testleri ve izotopik analizler gibi tamamlayıcı çalışmalar önerilmektedir.

Sonuç olarak, Arızlı ofiyolitik melanjında belirlenen krizotil oluşumu hem akademik araştırmalar hem de kamu sağlığı açısından önemli bulgular sunmaktadır. Bu tür doğal krizotil içeren alanların bilimsel yöntemlerle tespit edilmesi ve düzenli izlenmesi, sürdürülebilir çevre yönetimi için gereklidir.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## Benzerlik oranı (iThenticate): %8

## Kaynaklar

- [1] R. L. Virta, Asbestos: Geology, mineralogy, mining, and uses. US Department of the Interior, US Geological Survey, Open File Report 02-149, 2002.
- [2] S. Singh, A. Das, P. Sharma, A. K. Sudheer, M. Gaddam and R. Ranjan, Spatiotemporal variations, sources, pollution status and health risk assessment of dissolved trace elements in a major Arabian Sea draining river: insights from multivariate statistical and

- machine learning approaches. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(4), 130, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01885-9>.
- [3] T. A. Sporn, Mineralogy of asbestos. Malignant Mesothelioma, 1–11, 2011. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10862-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10862-4_1).
- [4] A. Bloise, D. Miriello, L. Gaggero, G. Lanzafame and R. Punturo, Multi-analytical approach for asbestos minerals and their non-asbestiform analogues: Inferences from host rock textural constraints. *Fibers*, 7(5), 42, 2019. <https://doi.org/10.3390/fib7050042>.
- [5] A. M. Langer, Identification and enumeration of asbestos fibers in the mining environment: Mission and modification to the Federal Asbestos Standard. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S207–S217, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2008.01.007>.
- [6] S. Nasir, K. N. Khankahdani and A. R. Nasir, Geochemical and petrological characterization of listwaenite from Oman and Iran ophiolites: implications for hydrothermal carbonation and silicification alteration processes. *Arabian Journal of Geosciences*, 18(4), 98, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12517-025-12244-y>.
- [7] C. Ricchiuti, D. Pereira, R. Punturo, E. Giorno, D. Miriello and A. Bloise, Hazardous elements in asbestos tremolite from the Basilicata region, southern Italy: A first step. *Fibers*, 9(8), 47, 2021. <https://doi.org/10.3390/fib9080047>.
- [8] G. M. Militello, A. Bloise, L. Gaggero, G. Lanzafame and R. Punturo, Multi-analytical approach for asbestos minerals and their non-asbestiform analogues: Inferences from host rock textural constraints. *Fibers*, 7(5), 42, 2019. <https://doi.org/10.3390/fib7050042>.
- [9] A. Şaşmaz, A. D. Kılıç and N. Konakçı, Chemical and thermal changes in  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  polymorph minerals and importance as an industrial material. *Applied Sciences*, 14(22), 2024. <https://doi.org/10.3390/app142210298>.
- [10] R. K. Upadhyay, Non-metallic minerals and their deposits. In: *Geology and Mineral Resources*, Springer Nature Singapore, pp. 563–652, 2025. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-0598-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-96-0598-9_9).
- [11] Y. Dilek and H. Furnes, Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123(5–6), 387–411, 2011. <https://doi.org/10.1130/B30446.1>.
- [12] O. Parlak, T. Rızaoğlu, U. Bağcı, F. Karaoğlu and V. Höck, Tectonic significance of the geochemistry and petrology of ophiolites along the İzmir-Ankara-Erzincan Suture Zone in northeastern Anatolia. *Geological Society London Special Publications*, 372, 5–105, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.08.002>.
- [13] Z. Başbüyük, H. Yalçın and Ö. Bozkaya, Sivas bölgesi ofiyolitleri ile ilişkili asbest yataklarının mineralojisi. 14. Ulusal Kil Sempozyumu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2009.
- [14] B. Serin, Karaçam (Sivrihisar, Eskişehir) ve çevresindeki demir, nikel zenginleşmelerinin mineralojisi, petrografisi ve jeokimyası. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, 2020.
- [15] J. S. Schapira, R. Bolhar, S. Master and A. H. Wilson, Mineralogical, petrological and geochemical characterisation of chrysotile, amosite and crocidolite asbestos mine waste from southern Africa in context of risk assessment and rehabilitation. *Minerals*, 13(10), 1352, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13101352>.
- [16] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), 1:25.000 ölçekli Afyon L25 B4 paftası jeoloji haritası. MTA Yayınları, Ankara, 2023.
- [17] V. Hizhnyakov ve I. Tehver, Resonant light scattering and luminescence in multimode vibronic systems: time-dependent representation. *Journal of Raman Spectroscopy*, 32 (6–7), 591–597, 2001. <https://doi.org/10.1002/jrs.714>.
- [18] C. Rinaudo, D. Gastaldi ve E. Belluso, Characterization of chrysotile, antigorite and lizardite by FT-Raman spectroscopy. *The Canadian Mineralogist*, 41 (4), 883–890, 2003. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.883>.
- [19] V. C. Farmer (Ed.), The infrared spectra of minerals, Cilt 4, s. 51–67. Mineralogical Society, London, 1974.
- [20] A. Cavallo ve B. Rimoldi, Chrysotile asbestos in serpentinite quarries: a case study in Valmalenco, Central Alps, Northern Italy. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15 (7), 1341–1350, 2013. <https://doi.org/10.1039/C3EM00193H>.
- [21] A. Broström, H. Harboe, A. S. Fonseca, M. Frederiksen, P. Kines, W. Bührmann, ... ve K. A. Jensen, Asbestos fiber levels from remediation work. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, 100552, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100552>.
- [22] K. Yada, Study of microstructure of chrysotile asbestos by high-resolution electron microscopy. *Foundations of Crystallography*, 27 (6), 659–664, 1971. <https://doi.org/10.1107/S0567739471001402>.
- [23] L. W. Zelazny, P. J. Thomas ve C. L. Lawrence, Pyrophyllite–Talc minerals. In: J. B. Dixon ve D. G. Schulze (Eds.), *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, Cilt 7, s. 415–430. Soil Science Society of America, Madison, 2002. <https://doi.org/10.2136/sssabookser7.c13>.
- [24] L. Butjosa, A. Cambeses, J. A. Proenza, S. Agostini, M. Iturralde-Vinent, L. Bernal-Rodríguez ve A. Garcia-Casco, Relict abyssal mantle in a Caribbean forearc ophiolite (Villa Clara, central Cuba): Petrogenetic and geodynamic implications. *International Geology Review*, 66 (1), 196–227, 2024. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2179229>.
- [25] G. Wille, D. Lahondère, and W. Kloppmann, Coupled SEM-EDS-RAMAN: A complimentary approach for characterisation–Application to geomaterials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1324, No. 1, p. 012012). IOP Publishing, 2025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1324/1/012012>.



- [26] O. Şimşek, F. Özbaş, E. Kaygisiz, G. Yaşayan, and G. Ö. Ildız, Multianalytical characterization of Byzantine wall paintings by SEM-EDX,  $\mu$ -XRD, Raman and FTIR techniques. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 34(2), 246–262, 2025. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1957>.
- [27] C. Kim, Y. Kim, and Y. Roh, Thermal decomposition and phase transformation of chrysotile in asbestos-containing waste. *Minerals*, 15(4), 344, 2025. <https://doi.org/10.3390/min15040344>.
- [28] H. Yalçın, Ö. Bozkaya, ve C. Yılmaz, Tekirova (Antalya) Ofiyolit Napı kayaçlarının alterasyon mineralojisi ve jeokimyası. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58(1), 63–89, 2015.
- [29] J. R. Petriglieri, D. Bersani, C. Laporte-Magoni, M. Tribaudino, A. Cavallo, E. Salvioli-Mariani, and F. Turci, Portable Raman spectrometer for in situ analysis of asbestos and fibrous minerals. *Applied Sciences*, 11(1), 287, 2020. <https://doi.org/10.3390/app11010287>.
- [30] C. P. Giroto, de S. D. Campos, and É. A. de Campos, Chrysotile asbestos treated with phosphoric acid as an adsorbent for ammonia nitrogen. *Heliyon*, 6(2), e03337, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03397>.
- [31] A. Bloise, F. Parisi, M. F. La Russa, C. Apollaro, N. Godbert, I. Aiello, ... and D. Pereira, Evaluation of asbestos dispersion during laser ablation of rocks containing naturally occurring asbestos (NOA). *Heliyon*, 10(21), e18652, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39624>.
- [32] L. Marzini, I. Osticioli, D. Ciofini, J. Agresti, S. Bellagamba, F. Paglietti, ... & S. Siano, Identification, mapping, and quantification of asbestos minerals in ACM and NOA using NIR-SWIR hyperspectral scan imaging: Preliminary study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 125893, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125893>.
- [33] A. A. Kamnev, Recent developments in analytical molecular and biomolecular spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 126164, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126164>.
- [34] A. W. Atkinson, R. B. Gettins, A. L. Rickards, Estimation of fibril lengths in chrysotile asbestos fibres. *Nature*, 1970, 226(5249), 937–938. <https://doi.org/10.1038/226937a0>.

