



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



**AIOUN EL ATROUSS METEORİTİNDEKİ ORGANİK VE  
İNORGANİK YAPILAR ÜZERİNE TİTREŞİMSSEL  
SPEKTROSKOPİK, KRİSTALOGRAFİK VE MİKROSKOBİK  
ARAŞTIRMA: ASTROBİYOLOJİK BİR DEĞERLENDİRME**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Irmak AYVAZ**

**Biyoteknoloji Anabilim Dalı**

**İzmir  
2022**



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**AIOUN EL ATROUSS METEORİTİNDEKİ ORGANİK VE  
İNORGANİK YAPILAR ÜZERİNE TİTREŞİMSSEL  
SPEKTROSKOPİK, KRİSTALOGRAFİK VE MİKROSKOBİK  
ARAŞTIRMA: ASTROBİYOLOJİK BİR DEĞERLENDİRME**

Irmak AYVAZ

Danışman: Doç. Dr. Ozan ÜNSALAN

Biyoteknoloji Anabilim Dalı  
Biyoteknoloji Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2022



## EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

### ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Aïoun El Atrouss Meteoritindeki Organik Ve İnorganik Yapılar Üzerine Titreşimsel Spektroskopik, Kristalografik Ve Mikroskobik Araştırma: Astrobiyolojik Bir Değerlendirme” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

23 / 09 / 2022

İmzası

Irmak AYVAZ



**ÖZET****AIOUN EL ATROUSS METEORİTİNDEKİ ORGANİK VE İNORGANİK YAPILAR ÜZERİNE TİTREŞİMSSEL SPEKTROSKOPİK, KRİSTALOGRAFİK VE MİKROSKOBİK ARAŞTIRMA: ASTROBİYOLOJİK BİR DEĞERLENDİRME**

AYVAZ, Irmak

Yüksek Lisans Tezi, Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ozan ÜNSALAN

23/09/2022, 122 sayfa

Bu yüksek lisans tezi kapsamında HED meteorit sınıfına ait diyojenit türü bir meteorit olan Aioun El Atrouss meteoriti FT-IR ve mikro-Raman spektroskopisi, mikro-XRF, XRD ve SEM-EDS yöntemleri ile analiz edilmiştir. Öncelikle meteorite ait toz örnek daha sonrasında ise örneğin tamamına ait kristal kısımlar ve yanık dış kabuğun da dahil olduğu çeşitli noktalar incelenmiştir. Aioun El Atrouss meteoritinin (4) Vesta asteroidi kökenli olduğu düşünülmektedir ve daha önceki çalışmalarda çoğunlukla ortopiroksen, kromit ve olivin minerallerinden oluştuğu kanıtlanmıştır. Titreşimsel spektroskopik, kristalografik ve mikroskopik analizler sonucunda Aioun El Atrouss meteoritinin yüksek oranda primer minerallerden olan piroksenden oluştuğu ortaya çıkarılmıştır. Piroksenin yanı sıra olivin ve plajiyoklaz varlığı da tespit edilmiştir. Ayrıca örnekte az da olsa magnetit, kamasit ve ilmenit mineralleri de belirlenmiştir. Bunlara ek olarak bazı titanyum oksit minerallerinin meteorit içeriğinde bulunduğu da Raman ve SEM-EDS analizleri ile ortaya çıkarılmıştır. Tüm bu bulgular ışığında meteoritin mineralojik içeriğinin belirlenmesi ile meteoritin bağlı olduğu ana gövde hakkında daha fazla bilgi elde edilmesi ve literatüre katkı yapılması amaçlanmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Diyojenit, HED, (4)Vesta, Aioun El Atrouss



**ABSTRACT****VIBRATIONAL SPECTROSCOPIC, CRYSTALLOGRAPHIC AND MICROSCOPIC INVESTIGATION ON THE ORGANIC AND INORGANIC STRUCTURES IN AIOUN EL ATROUSS METEORITE: AN ASTROBIOLOGIC EVALUATION**

AYVAZ, Irmak

M.Sc. in Biotechnology

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ozan ÜNSALAN

23/09/2022, 122 pages

Within the scope of this master's thesis, the Aion El Atrouss meteorite, a diogenite type meteorite belonging to the HED meteorite class, was analysed by FT-IR and micro-Raman spectroscopy, micro-XRF, XRD and SEM-EDS methods. First, the powder sample belonging to the meteorite and then various points of the whole sample including the crystal parts and the fusion crust were investigated. The Aion El Atrouss meteorite is thought to have originated from the (4) Vesta asteroid, and it has been proven in previous studies that it mostly consists of orthopyroxene, chromite, and olivine minerals. As a result of vibrational spectroscopic, crystallographic, and microscopic analysis, it was revealed that the Aion El Atrouss meteorite was mainly composed of pyroxene, which is a primary mineral in high proportion. The presence of olivine and plagioclase in addition to pyroxene was also determined. In addition, the presence of magnetite, kamacite, and ilmenite minerals, albeit a little, was detected in the sample. Furthermore, the presence of some titanium oxide minerals in the meteorite content was found by Raman and SEM-EDS analysis. Based on these findings, it is aimed to determine the mineralogical content of the meteorite and to give more information about the parent body to which the meteorite is connected and contribute to literature.

**Keywords:** Diogenite, HED, (4)Vesta, Aion El Atrouss



## ÖNSÖZ

21. yüzyılın başlangıcından bu yana gelişimine hızlı bir ivme ile devam eden uzay teknolojileri günümüzde yeni bir teknoloji çağını başlatması ile birlikte beraberinde birçok da soru getirmiştir. İnsanlığın varoluşundan itibaren kafasını kurcalayan en büyük çıkmazlardan biri olan “yaşamın başlangıcı” sorusu bilim başta olmak üzere birçok alanda cevaplanmaya çalışmış ve sonucunda çeşitli teoriler bulunmuştur. Bilim dünyasında en kabul gören hipotezlerden biri olan yaşamın ilkel dünyaya çarpan meteorlar ile ulaştığı hipotezi meteorlar hakkında daha ayrıntılı bilgi sahibi olunması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Meteorların yapısının anlaşılması, bağlı oldukları düşünülen olası ana/kaynak gövdelerin temellerine ve dolayısıyla Güneş sisteminin gelişimi ve yaşamın Dünyaya nasıl taşındığı konularına ışık tutmaktadır. Bu yüksek lisans tezinde bahsi geçen meteoritin araştırılması, yaşamın temellerine ulaşan kapıyı aralama denizinde küçük bir damla olmasına karşın benim gibi soru sormayı ve araştırmayı hiç bırakmayan genç bilim insanları için büyük bir adımdır. Bilime karşı tutkusunu ve merakını hiçbir zaman yitirmeyen genç bilim insanlarının yetişmesi dileğiyle.

İZMİR

Irmak AYVAZ

23/09/2022



**İÇİNDEKİLER**Sayfa

İÇ KAPAK .....	ii
KABUL ONAY SAYFASI .....	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	xi
ÖNSÖZ .....	xiii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xvii
TABLolar DİZİNİ.....	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxiii
1.GİRİŞ .....	1
2.GENEL BİLGİLER .....	3
2.1 Meteoritler .....	3
2.1.1 Meteoritlerin Sınıflandırılması .....	3
2.1.2 HED Meteoritleri .....	5
2.1.3 (4) VESTA Asteroidi.....	5

**İÇİNDEKİLER (DEVAM)**

	<u>Sayfa</u>
2.2 Aioun El Atrouss Meteoriti.....	6
2.2.1 Meteorit Hakkında Genel Bilgiler.....	6
2.2.2 Meteorite Ait Çalışmalar.....	6
3.GEREÇ VE YÖNTEM.....	8
3.1 İçten Toplam Yansımali Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektrometresi (ATR- FTIR).....	7
3.1.1 Teori ve Çalışma Prensibi.....	9
3.1.2 Deney düzeneği.....	10
3.1.3 Uygulamaları.....	13
3.2 Raman Spektroskopisi.....	16
3.2.1 Teori ve Çalışma Prensibi.....	16
3.2.2 Deney düzeneği.....	18
3.2.3 Uygulamaları.....	21
3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dispersif Spektrum (SEM-EDS) .....	20
3.3.1 Teori ve Çalışma Prensibi.....	21
3.3.2 Deney düzeneği.....	24
3.3.3 Uygulamaları.....	26

**İÇİNDEKİLER (DEVAM)**

	<u>Sayfa</u>
3.4 X-Işınları Floresan Spektroskopisi (XRF).....	26
3.4.1 Teori ve Çalışma Prensibi.....	26
3.4.2 Deney düzeneği .....	27
3.4.3 Uygulamaları .....	29
3.5 X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) .....	30
3.5.1 Teori ve Çalışma Prensibi.....	30
3.5.2 Deney düzeneği .....	31
3.5.3 Uygulamaları .....	32
4. BULGULAR.....	34
4.1 FT-IR Bulguları .....	34
4.2 Raman Bulguları.....	36
4.2.1 Kromit.....	49
4.2.2 Piroksen .....	50
4.2.3 Titanyum Oksit .....	51
4.2.4 Tanımlanamayan Bulgular.....	51
4.3 SEM-EDS Bulguları .....	53
4.4 XRF Bulguları .....	57

**İÇİNDEKİLER (DEVAM)**

	<u>Sayfa</u>
4.5 XRD Bulguları .....	66
5.TARTIŞMA .....	69
5.1 ATR-FTIR.....	69
5.2 Raman .....	71
5.3 SEM-EDS.....	72
5.4 XRF .....	74
5.5 XRD .....	75
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	79
TEŞEKKÜR.....	95
ÖZGEÇMİŞ .....	96

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Örneğe ait görseller .....	8
3.2 Elektromanyetik spektrum.....	10
3.3 IR spektroskopisi deney düzeneği .....	11
3.4 IR spektrometrede yer alan ATR kristali ve örnek ile olan etkileşimi... 15	
3.5 Raman ve Rayleigh saçılmaları .....	17
3.6 Raman spektrometresinin ana bileşenleri.....	19
3.7 Elektron ışını-numune etkileşimi ile oluşan sinyaller .....	23
3.8 SEM cihazı bileşenleri.....	24
3.9 X-ışınları floresan mekanizması.....	28
3.10 XRF spektrometresi bileşenleri .....	29
3.11 X-ışını kırınımının şeması .....	32
3.12 X-ışını kırınım sistemi.....	32
4.1 AAT-01'e ait optik mikroskop görüntüsü .....	35
4.2 AAT-01 örneklerinin FT-IR spektrumları.....	35
4.3 Örneğin çeşitli noktalarına ait Raman spektrumları .....	36
4.4 Raman spektrumu alınan noktalar .....	37
4.5 Haritalama yöntemi ile oluşan ortalama spektrum.....	37
4.6 Haritalama işlemi için seçilen bölge.....	38

**ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)**

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7 Siyah noktalara ait Raman spektrumları .....	39
4.8 Spektrum alınan siyah noktalar.....	39
4.9 Kristal noktalara ait Raman spektrumları .....	40
4.10 Spektrum alınan kristal noktalar .....	40
4.11 Dış yanık kabuk ait Raman spektrumları.....	41
4.12 Spektrum alınan dış yanık kabuk bölgeleri.....	41
4.13 Olivin kristaline ait Raman spektrumu .....	42
4.14 Spektrum alınan olivin kristali.....	42
4.15 Seçilen bölgeler için Raman spektrumları ve görseller .....	44
4.16 Kromit ile ilişkilendirilen spektrum.....	49
4.17 Enstatit ile ilişkilendirilen spektrum .....	50
4.18 Titanyum oksit ile ilişkilendirilen spektrum.....	51
4.19 Tanımlanamayan Raman spektrumları .....	52
4.20 Farklı büyütme ölçekleri kullanılarak çekilmiş SEM görüntüleri .....	53
4.21 Toz numuneye ait SEM görüntüsü .....	55
4.22 SEM-EDS sonucu oluşan elementel dağılım.....	55
4.23 Mg-Fe-Si elementlerinin örnek içinde dağılımı.....	56
4.24 Elementlerin örnek içinde dağılımlarını gösteren EDS spektrumu. ....	57

**ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.25 AAT-01 XRF incelemesi örneği .....	58
4.26 XRF haritalama için incelenen bölümler.....	58
4.27 İlk kısım (A) elementel dağılım.....	59
4.28 İlk kısım (A) için elementel dağılımı gösteren kompozit görüntü. ....	60
4.29 İkinci kısım (B) elementel dağılım .....	60
4.30 İkinci kısım (B) için elementel dağılımı gösteren kompozit görüntü.....	61
4.31 Üçüncü kısım (C) elementel dağılım .....	62
4.32 Üçüncü kısım (C) için elementel dağılımı gösteren kompozit görüntü..	63
4.33 Örneğin tamamına ait elementlerin dağılımı .....	64
4.34 Örneğin kenar kısmına ait elementlerin dağılımı .....	66
4.35 XRD incelemesi hazırlık .....	67
4.36 Örneğe ait XRD spektrumu .....	68
4.37 Data collector programına ait mineral dağılımı analizi.....	68

**TABLULAR DİZİNİ**

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Meteoritlerin sınıflandırılması .....	4
2.2 Aioun El Atrouss meteoridine ait literatür çalışmaları .....	7
3.1 Dağıtıcı ve dağıtıcı olmayan Raman spektrometrelerin özellikleri .....	20
4.1 Elementlerin örnek içinde kütlece ve atomik yüzdeler dağılımları .....	56
4.2 İlk kısım (A) yüzdeler elementel dağılım .....	59
4.3 İkinci kısım (B) yüzdeler elementel dağılım.....	61
4.4 Üçüncü kısım (C) yüzdeler elementel dağılım .....	62
4.5 Örneğin tamamına ait yüzdeler elementel dağılım .....	63
4.6 Örneğin kenar kısmına ait yüzdeler elementel dağılım .....	65
4.7 Match! programına ait mineral analizi.....	68

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\lambda$	Dalga boyu
$\bar{\nu}$	Dalga sayısı
$\nu$	Frekans
$\Delta E$	Enerji farkı
$m, n$	Temel ve 1. Uyarılmış titreşim enerji seviyeleri
m	Metre
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\nu_0$	Gelen frekans
$\nu_m$	Titreşim frekansı
keV	Kilo elektron Volt
kV	Kilo Volt
nA	Nano Amper
eV	Elektron Volt
$n\lambda$	Yol farkı
d	Düzlemler arası mesafe
$k_0$	Gelen vektör

$k_h$  Kırınımına uğrayan vektör

S Saçılma vektörü

° Derece

g gram

km/s Kilometre/s

s Saniye

mm Milimetre

Pa Pascal

### Kısaltmalar

IR İnfared

FT-IR Fourier Transform Infrared

ATR Zayıflatılmış toplam yansıma

SNR Signal to noise ratio

CAI Calcium-Aluminium Inclusion

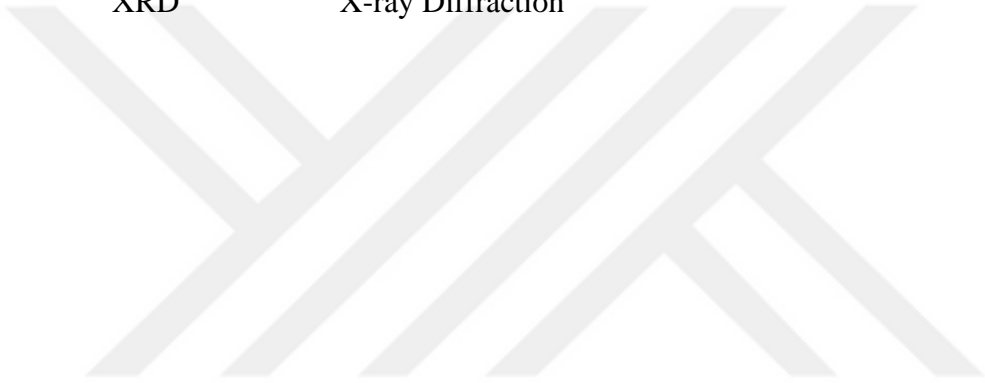
HED Hovardit-Ökrit-Diyojenit

SNC Shergottites, Nakhrites, Chassigny

SEM Taramalı elektron mikroskobu

EDS Energy Dispersive X-ray Spektroskopisi

BSE	Back scattered electrons
ATR	Zayıflatılmış Toplam Yansıma
DTGS	Döteryum triglisit sülfid
AAT-01	Aioun El Atrouss
XRF	X-ray Fluorescence
XRD	X-ray Diffraction





## 1. GİRİŞ

Gezegenlerin, asteroitlerin ve Güneş'in yörüngesindeki diğer nesnelere gerek uzaktan gerekse yerinde incelenmeleri, gezegenlerin oluşum ve gelişim süreçlerinin anlaşılması için önemli veriler sağlamaktadır. Güneş sistemi ile ilgili jeokimyasal ve jeolojik bilgilerin çoğu, doğrudan kayaların ve bunlardan kaynaklanan diğer malzemelerin incelenmesinden gelmektedir. Bu sebeple meteoritler, gezegenlerin içindeki ve yüzeylerindeki geçmiş koşullar hakkında bilgi sağlayan ve bir gezegenin evrimini etkileyen önemli olayların belirlenmesinde kritik rol oynayan dünya dışı malzemelerdir. Çoğu meteoritin asteroit kuşağına ait olduğu bilinmekle beraber Dünya'da bulunan birkaç nadir meteorit ise Mars veya Ay'dan geldiklerini düşündürten kimyasal imzalara sahiptir. Dünya dışı malzemelerin incelenmesi, bağlı olduğu düşünülen ana gövdenin kökeninin bileşimini, çarpma sırasında ulaşılan sıcaklığı ve basıncı, su varlığının belirtilerini ve daha ayrıntılı bilgilere ışık tutarak bu malzemelerin tarihsel süreçleri hakkında ipuçları vermektedir (Huidobro et al., 2021). Meteorit örneklerinin spektroskopik ve mikroskopik analizleri meteoritlerin kimyasal içerikleri ve yüzey morfolojileri gibi çok çeşitli alanlarda veri sağlayabilmektedir. Meteoritlerin yoğunluğu, yapısı ve dokusunun ayırt edilmesi içeriğindeki organik ve inorganik madde miktarının belirlenmesine olanak sağlar ve bu tür parametreler biyoişaretçiler olarak değerlendirilebilirler. Bu tür biyoişaretçilerin tespit edilmesi sayesinde Mars gibi bünyesinde yaşam bulundurabilme potansiyeline sahip gezegenlerde yaşam bulma olasılığı artmış ve araştırmalara katkı sağlamıştır. Aynı zamanda meteoritlerde bulunan elementlerin açığa çıkarılması bağlı olduğu asteroit ve güneş sisteminin oluşumu ve evrimi/gelişimi hakkında bilgi verirken, geçirmiş olduğu kimyasal süreçlere de ışık tutmaktadır. Buna ek olarak henüz sınıflandırılmamış meteoritlerin incelenmesi ile veri tabanlarına girişi sağlanır ve literatüre de katkı yapılmış olur. Örneğin 2019 yılında yapılan bir çalışmada Hindistan'a düşen karbonlu Mukundpura meteoritinde tespit edilen uç çevresel koşullara dayanıklı bir bakteri türünün de henüz keşfedilmiş olması (Thombre et al., 2019) bu açıdan önemlidir. Biyoteknolojik açıdan bu tür örneklerin de incelenmesi, hayatta kalma koşullarının modellenmesi ve hatta biyoteknolojik olarak bu tür canlıların nasıl kendilerini bu

ekstrem koşullara adapte ettiklerinin anlaşılması için ileride tasarlanacak sistemlerin ve ortamların da önünün açılabilmesi bağlamında bu yüksek lisans tezinin önem arz ettiği düşünölmektedir. Ayrıca, meteor çarpmaları ve çarpma kraterlerinin incelenmesinin hayatın kökeni hakkındaki astrobiyolojik ve biyoteknolojik yeni açıklamaların/teorilerin/senaryoların üretilmesindeki önemi de açıkça ortadadır. Bu yüksek lisans tezinde, 1974 yılında Moritanya'ya düşen ve diyojenit türü bir meteorit olan Aïoun el Atrouss meteoriti (AAT-01) üzerine, spektroskopik ve mikroskopik analizler gerçekleştirilmiş ve bu meteorit içeriğindeki organik ve inorganik yapılar tespit edilmiş, bu ender tür meteorite ait olası ana gövde/asteroidi hakkında astrojeobiyolojik açıdan değerlendirmeler yapılmıştır.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Meteoritler

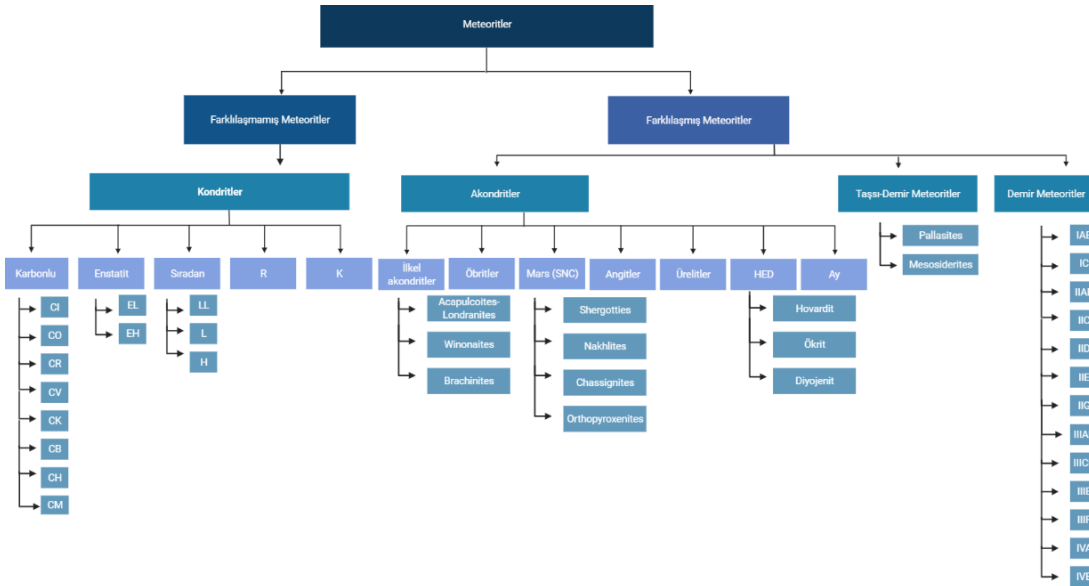
Gezegenler arası toz parçacıkları ve meteoritlerin çoğunlukla kuyruklu yıldızlardan ve asteroitlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Meteoritlerin Güneş sistemindeki dağılımlarını, dinamik davranışlarını ve özelliklerinin anlaşılması, Güneş sisteminin mevcut durumuna ve dinamik davranışına da ışık tutmaktadır. Bir asteroit yüzeyi (regolit) veya kuyruklu yıldız yüzeyinden koptuğu düşünülen ve büyüklükleri  $\mu\text{m}$ 'den m mertebelerine kadar değişebilen meteorit olarak adlandırılan parçalar, zaman içinde muhtelif etkilerle uzun zaman içinde Dünyanın çekim etkisiyle Dünya atmosferine girer ve meteor olarak adlandırılırlar. Meteorlar atmosferik giriş sırasında yüksek hızlarından ( $\sim 11-75$  km/s) dolayı yüksek sürtünme kuvvetlerine maruz kalırlar ve kütlelerinin yaklaşık %90'lı kısımlarını kaybederler. Meteorların atmosferik giriş sırasındaki çetin koşullardan sağ kalarak yeryüzüne düşen parçalarına meteorit denir ve meteoritler eliptik bir saçılma alanı oluştururlar. Buna ek olarak,  $10 \mu\text{m}$  ile  $2 \text{ mm}$  büyüklüğündeki meteoritler ise mikrometeoroid olarak adlandırılmaktadır (Koschny et al., 2019; Rubin and Grossman, 2010). Düşüklerine tanık olunan olaylara düşme, düştükten sonra bulunan meteoritlere ise bulma/buluntu denir.

#### 2.1.1 Meteoritlerin Sınıflandırılması

Meteoritlerde sınıflandırma, mineralojik ve petrolojik özelliklerin yanı sıra kimyasal ve izotopik bileşimlere göre yapılmaktadır (Tablo 2.1). Kökenleri ve evrimleri göz önüne alındığında, meteoritler geniş bir perspektifte "farklılaşmış" ve "farklılaşmamış" olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Tüm kondritik kayalar farklılaşmamış meteoritlere ait olurken, farklılaşmış meteoritler (metal bakımından fakir) akondritleri ve ayrıca taşsı-demir ve demir meteoritlerini içermektedir. Kondritler tipik olarak, kondrül adı verilen küçük ( $1-2 \text{ mm}$ ) küresel yapılar içeren meteoritler olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklıktaki bulutsu gazın yoğunlaşmasıyla oluşan Ca ve Al açısından zengin kapaenimler (CIA'ler) içermektedirler. CIA'lerine esas olarak refrakter oksitler ve silikatlardan oluştuğu

bilinmektedir (Koschny et al., 2019). Akondritik meteoritler ise kondritik dokulardan yoksundur ve kondritik öncü asteroitlerin veya Mars ve Ay gibi daha büyük gezegen cisimlerinin kısmen veya tamamen erimesi ve gezegensel farklılaşmasıyla oluşmaktadır. Dolayısıyla, akondritik meteoritlerin incelenmesi bu süreçleri dünya dışı cisimler üzerinde incelemek için eşsiz fırsatlar sunmaktadır. Katı form üzerinden elde edilen kimyasal ve oksijen izotopik bileşimlerine, mineralojisine, petrolojisine ve çeşitli kondritik bileşenlerin oranlarına dayalı olarak, 14 kondrit grubu tanınmıştır. Bu kondrit grupları karbonlu, enstatit, sıradan, Rumuruti-benzeri (R), ve Kakangari-benzeri (K) olarak 5 alt sınıfta toplanmıştır. Farklılaşmamış meteoritler ele alındığında ise taşsı-demir meteoritler (palazitler ve mezosideritler) ve demir meteoritler çıkarıldığında 7 adet ana akondrit grubu bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla, HED-meteoritler (hovardit, ökrit, diyojenit), aubritler, ureilitler, sıradan akondritler, angritler, Mars (SNC) (Shergottites, Nakhilites, Chassigny) ve Ay meteoritleridir (Bischoff, 2001).

Tablo 2.1. Meteoritlerin Sınıflandırılması.



### 2.1.2 HED Meteoritleri

Ökritler ve diyojenitler, sırasıyla, ortak bir asteroit ana gövdesi üzerindeki yüzeye yakın akışlardan kaynaklandığı düşünülen bazaltlar ve ortopiroksen kümülatlarıdır. Birçok HED meteoriti, darbe kaynaklı monomikt veya polimikt breşlerdir. Hovarditler ise ökritik ve diyojenitik bileşenler içeren polimikt breşlerdir. HED meteoritleri genellikle düşük kalsiyumlu klinopiroksen ve az miktarda silika, kromit, ilmenit, trolit, kamasit ile yüksek kalsiyumlu plajiyoklazdan (anortit) oluşurlar. Diyojenitlerin, ana gövdenin kabuğunda daha derinlerde bulunan magma boşluklarında fraksiyonel kristalleşme sırasında kümülatlar halinde oluştuğuna inanılmaktadır ve hacimce ~84-100% ortopiroksen ve az miktarda olivin, kromit, kalsiyumca zengin piroksen, kalsiyumca zengin plajiyoklaz, trolit, kamasit ve silika içerirler. Hovarditler ise, magnezyumca zengin ortopiroksen, kalsiyumca zengin piroksen ve kalsiyumca zengin plajiyoklaz ile az miktarda Ni bakımından fakir kamasit, kromit, ilmenit, trolit, silika ve olivinden oluşan polimikt breşlerdir. Hovarditlerin büyük olasılıkla ana gövdenin yüzeyine bir çarpma olayı sırasında oluştukları öngörülmektedir (Hanna and Sprague, 2009).

### 2.1.3 (4) VESTA Asteroidi

(4) Vesta, ortalama çapı 516 km olan üçüncü en büyük asteroittir. Bazaltik bir kabuğa sahip olduğu bilinen tek büyük asteroittir ve önemli ölçüde ısınma ve farklılaşma yaşamıştır. (4) VESTA asteroidi, en hacimli akondrit koleksiyonunun (HED) ana gövdesi olduğu teorisi sebebiyle Dawn uzay aracı görevi için cazip bir keşif hedefi oluşturmuştur (McCord et al., 1970). HED'lerin mineralojik bileşimlerindeki benzerlikler ve Dünya'dan ve Dawn uzay aracından görünmektedir ve yakın Kırmızıaltı spektroskopisi ile belirlenen asteroidin yüzey mineralojisi, evrensel olarak kabul edilmese de asteroit (4) Vesta'nın HED türü meteoritlerin kaynak asteroidi olduğu konusunda ikna edici bir durum ortaya koymuştur. Mevcut kanıtlar, Vesta'nın petrolojik karmaşıklığına, ayrıntılı spektroskopik özelliklerine, uzay havası maruziyetine, jeokimyasal bollukları ve nötron soğurma özelliklerine, krater gibi yüzey birimlerinin kronolojisini ve çarpma geçmişine, regolitte dış

kaynaklı karbonlu kondritik malzemelerin oluşumuna ve ilgili ana gövdenin çekirdeğinin boyutlarına ışık tutmaktadır (McSween Jr. et al., 2013).

## **2.2 Aioun El Atrouss Meteoriti**

### **2.2.1 Meteorite Ait Genel Bilgiler**

Aioun El Atrouss meteoriti, 1974 yılında Aioun El Atrouss, Hodh el Gharbi bölgesi, Moritanya'ya (16° 23'5 3"N., 9° 34'1 3"W.) düşmüştür. Düşme sırasında bir ateş topu gözlenmiştir ve bir ses patlaması duyulmuştur. Kabile üyeleri tarafından kumlu, çöl arazisindeki üç ayrı bölgeden meteoritik malzeme ele geçirilmiştir. Aioun El Atrouss 1979 yılında akondrit-hipersten ve 2000 yılında diyojenit olarak sınıflandırılmasının ardından 2006 yılında diyojenit-pm (polimikt bir breş olan diyojenit grubundan bir akondrit) olarak sınıflandırılmıştır (Lomena et al., 1976).

### **2.2.2 Meteorite Ait Çalışmalar**

AAT-01 esas olarak homojen ortopiroksenden ve kromitten oluşmuştur (Tablo 2.2). Analizler hacimce %95'ten fazla ortopiroksen, hacimce ~%1 klinopiroksen, hacimce ≤%1 kromit ve diğer fazlardan eser miktarda içeren bir meteorit olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, meteoritin %5-10'unu oluşturan bir ökritik klast, az miktarda ferroan pigeonit (demirli pijonit) ve ojit, silika, kromit, ilmenit ve metalik demirin eşlik ettiği bir piroksen-plajiyoklaz iç içe büyümesi ile daha alacalı bir mineralojiye sahip görünmektedir. ~12,5 milyon yıllık bir kozmik ışın maruziyet yaşı, diğer diyojenitlerden ve HED grubundaki diğer akondritlerden farklı değildir. Meteorite ait mineralleri içeren literatür çalışmaları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Aioun El Atrouss meteoritine ait literatür çalışmaları.

Mineral Sınıfı	Mineral Grubu	Alt Mineral	Kimyasal Formülü	Referans
Piroksen	Ortopiroksen	Enstatit	$Mg_2Si_2O_6$	(Lomena et al., 1976)
		Diopsit	$CaMgSi_2O_6$	
	Klinopiroksen	Öjit	$(Ca_xMg_yFe_z)(Mg_{y1}Fe_{z1})Si_2O_6$	(Duke, 1978)
		Pigeonite	$(Ca_xMg_yFe_z)(Mg_{y1}Fe_{z1})Si_2O_6$	(Lomena et al., 1976)
Feldspar	Plajiyoklaz	Anortit	$Ca(Al_2Si_2O_8)$	(Duke, 1978)
		Albite	$Na(AlSi_3O_8)$	
		Bytownite	$(Ca,Na)[Al(Al,Si)Si_2O_8]$	
Spinel	Oksispinel	Kromit	$Fe^{2+}Cr^{3+}_2O_4$	(Lomena et al., 1976)
İlmenit	-	İlmenit	$Fe^{2+}TiO_3$	(Lomena et al., 1976)
Pyrrhotite	-	Troilite	$FeS$	(Lomena et al., 1976)
Olivin	-	Fayalit	$Fe^{2+}_2SiO_4$	(Bowman et al., 1997)
		Forsterit	$Mg_2SiO_4$	(Bowman et al., 1997)

### 3. GEREÇ VE YÖNTEMLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında toplamda 59.36 g'lık AAT-01 örneği İnfrared, Raman, XRD, XRF ve SEM-EDS yöntemleri ile analiz edilmiştir. Tezin gereç ve yöntemler bölümünde bu analiz yöntemlerinin teori ve çalışma prensibi, deney düzeneği ve yöntemin meteorit çalışmalarındaki uygulamaları anlatılmaktadır. Analiz edilen örneğin çeşitli açılardan çekilmiş görselleri Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1. Örneğe ait görseller.

#### 3.1 İçten Toplam Yansımali Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektrometresi (ATR-FTIR)

Kırmızıaltı (infrared-IR) spektroskopisi incelenen malzeme üzerine gönderilen kırmızıaltı bölgedeki elektromanyetik ışınımın madde tarafından soğurulması prensibine dayanmaktadır. IR spektrumu bir molekülün “parmak izi” olarak tanımlanmakta ve moleküllerin tanımlanmasında önemli rol oynamaktadır. Fizik, kimya, biyoloji ve malzeme bilimleri gibi çeşitli alanlarda uygulamaları bulunan bu teknik sayesinde moleküllerin karakterizasyonu ve tanımlanması kolaylıkla yapılabilir.

### 3.1.1 Teori ve Çalışma Prensibi

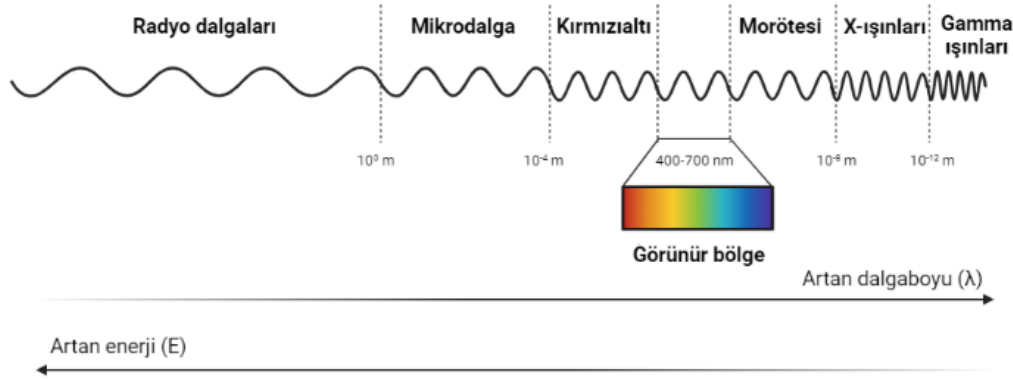
İnfrared spektroskopi, moleküllerin yapılarına özgü belirli frekansların soğurulması ilkesine dayanır. Bu soğurmalar rezonans frekansları olarak tanımlanır yani soğurulan ışınımın frekansı titreşen bağın veya grubun frekansıyla eşleşir. Elektromanyetik radyasyon kendisine ait dalga boyu ( $\lambda$ ), dalga sayısı ( $\bar{\nu}$ ) veya frekansı ( $\nu$ ) ile tanımlanabilir. Birimler arasındaki ilişki denklemde verilmiştir.

$$\bar{\nu}(cm^{-1}) = \frac{1}{\lambda(cm)} = \frac{10^4}{\lambda(\mu m)} = \frac{\nu(Hz)}{c(cm/sec)} \quad (1)$$

Bir molekülün titreşimlerinden herhangi birinin kırmızıaltı spektrumda aktif olması (yani spektrumda gözlenebilmesi şartı) molekülün moleküler eksen boyunca değişen net bir dipol momentini olması ile mümkündür. Heteronükleer iki atomlu bir molekül kırmızıaltı aktiftir. Çünkü, böyle bir molekülün titreşimi sırasında moleküler eksen boyunca değişen net dipol momentini sıfırdan farklıdır, yani bağ uzadıkça ve kısaldıkça değişir. Öte yandan, homonükleer iki atomlu bir molekül kırmızıaltı aktif değildir, çünkü bağ ne kadar uzun olursa olsun titreşim sırasında net dipol momentini sıfır kalır. Kırmızıaltı radyasyonun madde ile etkileşimleri, moleküler dipoldeki değişikliklerin titreşim ve dönme hareketleri açısından anlaşılabilir. İki atomlu bir molekül için, bağın gerilmesine ve sıkışmasına karşılık gelen yalnızca bir titreşim mümkündür. N adet atom içeren çok atomlu moleküller  $3N$  toplam serbestlik derecesi vardır. Bu derece lineer olan ve lineer olmayan moleküller için değişiklik gösterir. Herhangi bir lineer molekül  $3N-5$  titreşim serbestlik derecesine ve lineer olmayan molekül  $3N-6$  titreşim serbestlik derecesine sahiptir. Simetrik moleküller, asimetrik moleküllerden daha az kırmızıaltı aktif titreşime sahip olacaktır. Bunun sonucunda simetrik titreşimler genellikle asimetrik titreşimlerden daha zayıf oluşur, çünkü dipol momentinde bir değişikliğe yol açmaz (Stuart, 2005).

Elektromanyetik dalga spektrumu elektromanyetik radyasyonun en kısa dalga boyundan en uzun dalga boyuna olan kısmı kapsar. Dalga boyları spektrum içinde X-ışınları, mor üstü, görünür bölge ve kırmızıaltı olarak bölgelere ayrılmıştır (Şekil 3.2). Sınırlar kesin olmamak ile birlikte genellikle 100 nm ve daha düşük dalga boyları X-ışınları, 100-400 nm arası kırmızıaltı, 400-780 nm arası görünür bölge ve 780 nm ve daha yüksek dalga boyları kırmızıaltı bölge olarak isimlendirilmektedir.

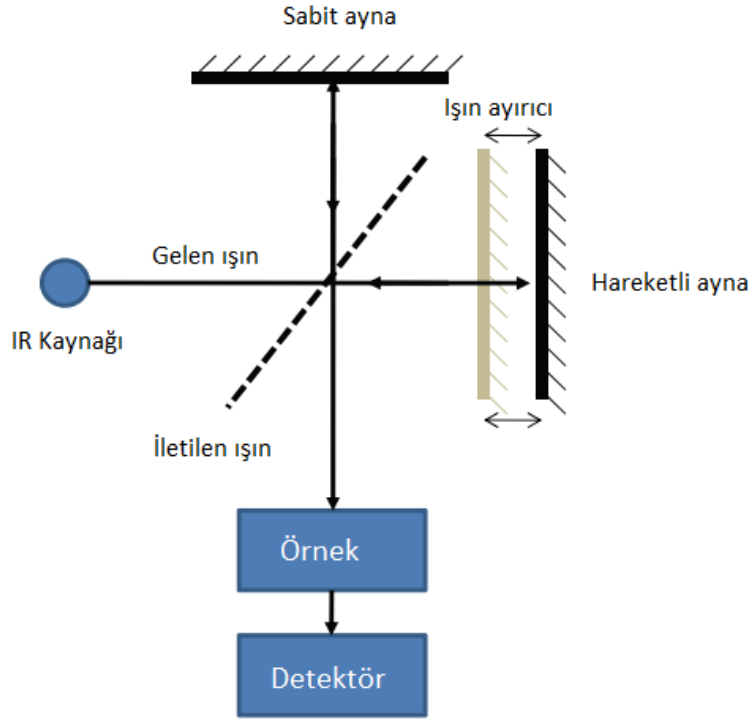
İnfrared bölge genellikle yakın (near-IR) ( $10.000-4000\text{ cm}^{-1}$ ), orta (mid-IR) ( $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ) ve uzak (far-IR) ( $400-40\text{ cm}^{-1}$ ) olarak üç bölüme ayrılmaktadır. Araştırmalarda sıklıkla kullanılan bölge orta IR bölgesidir. Orta IR bölgesi temel titreşimleri ve ilgili dönme-titreşim yapısını incelemek için kullanılmaktadır. Uzak IR bölgede ağır atomların düşük frekanslı titreşimleri ve bazı moleküler rotasyonlar incelenmektedir (Colthup, 2003).



Şekil 3.2. Elektromanyetik spektrum.

### 3.1.2 Deney düzeneği

Tipik bir IR spektrometresi IR kaynağı, örnek, monokromatör, detektör ve kaydedici olarak beş kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.3). IR kaynağı inceleme yapılacak alana uygun olarak geniş dalga boyu aralıklarında seçilebilmektedir. IR spektroskopisinde kullanılan radyasyon kaynakları sürekli kaynak veya hat kaynağı olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli kaynaklar, geniş bir dalga boyu aralığında kararlı ve sürekli bir yoğunlukta radyasyon yayar ve en yaygın kullanılan radyasyon kaynaklarıdır. Çizgi kaynakları ise ışığın yalnızca birkaç ayrı dalga boyunda yayar ve yayılan ışığın yoğunluğu farklı dalga boylarında değişir. Tungsten halojen lambaları düşük maliyetleri ve yüksek yoğunlukları nedeniyle en sık kullanılan sürekli kaynak çeşididir.



Şekil 3.3. IR spektroskopisi deney düzeneği (Allison, 2011).

IR spektroskopisinin en büyük kolaylıklarından biri çok çeşitli örneklerin özel zorluklar olmadan incelenebilmesidir. İnceleme sırasında genellikle, numuneyi desteklemek veya çevrelemek için NaCl, KBr, CsBr ve CsI gibi IR geçirgen malzemeye ihtiyaç vardır. Cam ve kuvars gibi malzemeler yakın IR bölgelerinde pencere olarak kullanılabilir. IR geçirgen malzemelerin düşük dalga sayısı iletim sınırları kesin olarak tanımlanmamak ile birlikte pencere kalınlığına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu malzemelerin dalga sayısı limitleri NaCl,  $600 \text{ cm}^{-1}$ ; KBr,  $350 \text{ cm}^{-1}$ ; CsBr,  $250 \text{ cm}^{-1}$ ; ve CsI,  $200 \text{ cm}^{-1}$  olarak belirlenmiştir ve tamamı suda çözünmektedir (Colthup, 2003).

Suda çözünmeyen malzemeler  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ , Irtran-2, AgCl ve KRS-5'tir. Katı numuneleri IR analizine hazırlamanın en yaygın yöntemi Mull yöntemidir. Mull yönteminde amaç partikülleri askıya alarak, oradan geçecek olan gelen radyasyonun dalga boyunun altına öğüterek sınırlı saçılma olmasını sağlamaktır. Bu küçük parçacıkları askıya almak için yaygın olarak Nujol olarak adlandırılan bir yağ kullanılır. Nujol yağı ile bir karışım elde etmek için havan ve tokmak kullanılabilir. Oluşan karışım inceleme için iki IR geçirgen pencere arasında sandviç olacak şekilde yayılır. Bu geçirgen pencerelere IR-şeffaf tuz plakaları örnek olarak verilebilir. Katı numunelerin analize hazırlanmasına alternatif olan diğer bir yöntem

ise Nujol yerine tuz kullanılmasıdır. Katı numune KBr veya CsI ile öğütülmesi ile numune incelenmeye hazır hale getirilir. Sıvı numuneler IR analizlerinde geçirgen iki plaka arasında kolayca sıkıştırılabilir ve böylece incelenebilir. Sıvı numunenin viskozitesi azaldıkça plakaları uygun aralıkta ayrı tutmak için aralayıcı eklenmesi gerekmektedir. Bu aralayıcı malzeme çözünmeyen bir polimerik film veya metal folyo olabilir. Gaz numunelerin incelenmesi için ise gaz hücreleri gereklidir. Hücre bir gaz taşıma sistemi ile doldurulur ve boşaltılır (Lin et al., 2009).

Radyasyon kaynağı değişken frekanslarda radyasyon yaymaktadır, ancak IR spektroskopisindeki numune yalnızca belirli frekanslarda soğurmaktadır. Bu nedenle, radyasyon kaynağından istenen frekansları seçmek ve diğerlerini reddetmek gereklidir. Bu seçim monokromatör yardımı ile tamamlanmaktadır. Monokromatör, geniş bir radyasyon spektrumunu dağıtmak ve belirlenebilir dalga boyu veya frekans aralığında sürekli kalibre edilmiş elektromanyetik enerji bantları serisi elde etmek için kullanılan bir gereçtir. Prizmalar veya kırınım ağıları, değişken yarık mekanizmaları, aynalar ve filtrelerle birlikte kullanılan dağıtıcı bileşenlerdir. Örneğin, bir kırınım ağı, mekanik bir yarık üzerinde dar bir frekans bandına odaklanmak için döner. Daha dar yarıklar, cihazın daha yakın aralıklı radyasyon frekanslarını daha iyi ayırt etmesini sağlayarak daha iyi çözünürlük sağlamaktadır. Daha geniş yarıklar, detektöre daha fazla ışığın ulaşmasını sağlar ve daha iyi sistem hassasiyeti sağlarlar (Colthup, 2003).

Tüm spektrometreler radyasyon enerjisini, bir spektrum elde etmek için büyütülebilen ve işlenebilen bir elektrik sinyaline dönüştüren bir detektöre ihtiyaç duymaktadırlar. Termal detektörler, radyasyonun ısıtma etkisini ölçer ve tüm dalga boylarına eşit yanıt verir. Termoçift, bolometre ve piroelektrik detektörleri bunlara örnek olarak verilebilir. Detektör materyalindeki bağlı elektronları serbest bırakmak için foton enerjisini kullanan detektörlere fotodetektörler denir. Fotodetektörler, termal dedektörlerin aksine, tüm dalga boylarına yanıt vermezler, ancak fotonun elektronları uyarmak için yetersiz enerjiye sahip olduğu uzun dalga boyu sınırına sahiptir (Colthup, 2003).

IR spektroskopisi ile elde edilen spektral verilerinin çeşitli yazılımlar kullanılarak işlenmesi ve analiz edilmesi gereklidir. IR spektroskopisinin ilk kullanılmaya başlandığı zamanlarda IR cihazlarını günümüzdekiler gibi veri analizi

yapabilecek programlar mevcut değildi. Fakat, mikroişlemcilerdeki gelişmeler sayesinde daha öncesinde çok daha uzun süren spektral veri analizleri saniyeler içinde tamamlanır hale gelmiştir. Günümüzde yazılımlar, IR spektral veri toplamanın yanı sıra istatistiksel analizler için de kullanılabilir. Bu yazılımlar, analiz için çeşitli istatistiksel ve analitik işlevler sunar. Gruplama, türev dönüşümleri, zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) düzeltmesi, normalleştirme, yumuşatma ve taban çizgisi düzeltmesi bu analizlere örnek olarak verilebilir (Lin et al., 2009).

### 3.1.3 Uygulamaları

IR spektrometresinin ana kullanım alanı nitel ve nicel ölçümlerin yapılmasıdır. Nitel ölçümlerin yapılması ile örnek içindeki bileşikler tanımlanmış olur. Bu tanımlanma grup frekanslarının anlaşılması ile yapılmaktadır. IR spektrumlarındaki belirli frekanslardaki bantlar, kimyasal yapılarda belirli fonksiyonel grupların varlığı ile ilişkilendirilmiştir. IR bölgesi, grup frekans bölgesi ve parmak izi bölgesi olarak ayrılmıştır. Grup frekans aralığı  $4000-1500\text{ cm}^{-1}$  iken parmak izi bölgesi  $1500-400\text{ cm}^{-1}$ 'dir. Grup frekans bölgesinde, farklı fonksiyonel gruplara karşılık gelen pikler gözlemlenebilir ve karşılık gelen piklere göre fonksiyonel grup belirlenebilir. Birçok fonksiyonel grubun yaklaşık frekansı atomik kütleler ve kuvvet sabitlerinden hesaplanabilir. Fonksiyonel grupların karşılık gelen frekans aralıkları literatürde belirtilmektedir. IR spektroskopisi aynı zamanda belirli bir organik madde örneğinin diğeriyle aynı olup olmadığını belirlemek için de kullanılır. Organik moleküllerin IR spektrumlarında çok fazla sayıda soğurma bandı içermektedir ve herhangi iki organik bileşiğin birebir spektrum oluşturma olasılığının neredeyse sıfır olması sebebiyle incelenen örneklerin aynı olup olmadığı kolaylıkla anlaşılabilir (Colthup, 2003).

IR spektrometresi endüstriden bilimsel araştırmalara kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride besinler ve içeriklerinin anlaşılmasında, içerdiği mikroorganizmaların belirlenmesinde ve gıda bozulmalarının anlaşılmasında IR spektroskopisi yönteminden yararlanılmaktadır (Capuano and van Ruth, 2016). Medikal alanlarda IR spektroskopisi kullanımı sayesinde insan doku ve sıvıları problemler yardımıyla incelenebilmekte ve böylece hastalığa yol açan

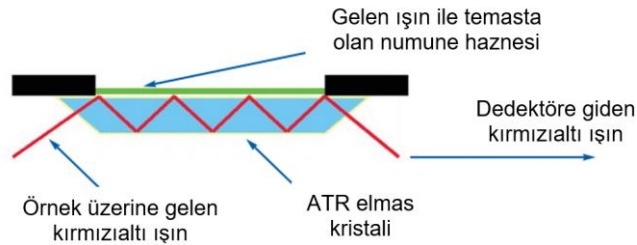
sebeplerin moleküler doğaları açığa çıkarılabilmektedir (Jackson and Mantsch, 1999).

IR spektrometresi astrobiyolojik öneme sahip araştırmalarda sıklıkla organik veya inorganik madde saptamak için de kullanılabilir. Buna bir örnek olarak biyoişaretçilerin IR spektrometre yardımıyla saptanması verilebilir. Örneğin dünyada yer alan ve Mars gezegenine analog olarak gösterilen çeşitli yerlerin IR spektrometre kullanılarak incelenmesi ile karasal analog bölgeler hakkında bilgi elde edilebilmektedir (Preston et al., 2020). Aynı zamanda Mars toprağı analogu örneklerin karakterize edilmesi için IR spektrometresi umut vaat edici sonuçlar vermiştir. Örneklerde bulunan moleküler etkileşimlerin saptanması ile Mars toprağı hakkında daha gerçekçi yorumlar yapılabilmektedir (Fornaro et al., 2020).

IR spektrometre meteorit örneklerinde büyük çoğunlukla organik ve inorganik maddeleri saptamak ve meteoritin içeriği ve yapısı hakkında daha fazla bilgi sahibi olunması için kullanılabilir. Örneğin, kalsiyum-alüminyum-zengini kapanımlar Yamato-793261 meteoritinde IR spektrometresi ile saptanmış olup, bu meteoritin ana gövdesinin önceki dönemlerde yüksek sıcaklık süreçlerine maruz kaldığını belirtmiştir ve günümüz Güneş sisteminin geçmiş zamanları hakkında bilgi vermektedir (Komatsu et al., 2018). Bunun yanı sıra, meteoritlerin içeriğinin belirlenmesi meteoritler ve ait oldukları olası ana/kaynak gövde/asteroitler hakkında bağlantı kurulmasına olanak sağlamaktadır. Meteoritlerde bulunan mineral içeriğinin anlaşılması aynı zamanda kaynak gövde hakkında önemli bilgiler sunar ve bu bilgiler Güneş sisteminin oluşumu ve evrimi hakkında çeşitli kanıtlar oluşturur. Meteoritlerin incelenmesi ile yeni asteroidlerin tanımlanması ve karakterizasyonu da mümkündür (Krämer Ruggiu et al., 2021). Buna verilebilecek örneklerden biri Didymos asteroididir. Meteoritlerden elde edilen bilgi sayesinde Didymos asteroidinin yüzey içeriği, granüler süreçleri ve uzay hava maruziyeti gibi çeşitli özellikler hakkında önemli veriler sağlar (Skulteti et al., 2020). Verilebilecek diğer bir örnek Hayabusa2 ve Osiris-REx uzay görevleridir. Fourier Transform IR (FT-IR) spektroskopisi ile incelenen dört adet karbonlu kondrit verileri sayesinde olası karbonlu meteoritlerin geldikleri düşünülen olası ana gövde karbonlu asteroidler hakkında daha fazla bilgi edinilebilmiştir (Dirri et al., 2017). Meteoritlerin IR spektroskopisi ile incelenmesinin diğer bir sebebi meteoritlerin içeriklerinde yer alan minerallerin tespit

edilebilmesidir. Örneğin, Tagish Lake göktaşının incelenmesi ile düzensiz makro moleküler karbonlu bileşenler bulunmuştur ve bu bileşenlerin yıldızlararası ortam hakkında ayrıntılı bilgiler de sağlamıştır (Matrajt et al., 2004). Son olarak Mars meteoritlerinde organik ve inorganik materyallerin saptanması ile Mars gibi çeşitli gezegenlerin çevreleri hakkında fikir elde edilmiştir (Nascimento-Dias et al., 2020).

ATR tekniği, numunenin yerleştirildiği yüzeyin altında bulunan elmas prizmadan geçerek örnek tarafından soğurulan ışınımdan elde edilen spektrumun incelenmesi ilkesine dayanır (Şekil 3.4) (Stuart, 2004). İncelenecek olan numunelerin titreşimsel spektrumları orta kırmızıaltı bölgede incelenebilmektedir.



Şekil 3.4. IR spektrometrede yer alan ATR kristali ve örnek ile olan etkileşimi (Perkin Elmer, 2019)

Mermer havanda öğütülmüş yaklaşık 1-2 g'lık numune, spektrometredeki numune haznesine yerleştirilerek % geçirgenliğe (%T-Transmission) (şiddet) karşı dalga sayısının ( $\text{cm}^{-1}$ ) spektrumu alınır. Spektrumlarda gözlenen titreşim dalga sayılarının (titreşim bantları) şiddet ve genişlik değerlerinden, ayrıca dalga sayılarının yüksek veya düşük değerlere kaymalarından yararlanılarak, bu değişimlere sebep olan parametreler (konsantrasyon, malzemenin içerdiği mineraller, malzemenin kimyasal yapısı vb.) araştırılabilmektedir.

## 3.2 Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi (RS), katı ve sıvı numunelerin "kimyasal parmak izlerini" araştırmak için kullanılan ve ışığın bir malzeme içindeki kimyasal bağlarla etkileşimine dayanan son derece güçlü bir tekniktir. Raman spektroskopisinin ve Raman görüntülemenin en büyük avantajları, az numune miktarı ile çalışabilme imkânı ve numune üzerindeki ışık yoğunluğunun hassasiyetinin ayarlanabilmesidir. Bu özellikler, RS'yi numunede tahribata yol açmayan ve bazen de kontrol edilebilir minimal tahribata yol açan bir teknik haline getirir (Adya and Canetta, 2014).

### 3.2.1 Teori ve Çalışma Prensibi

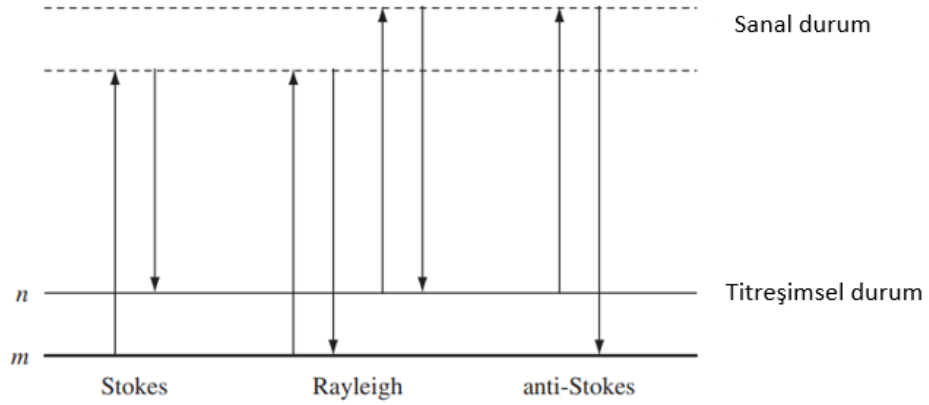
Işık madde ile etkileşime girdiğinde oluşabilecek çeşitli olasılıklar mevcuttur. Işığı oluşturan fotonlar madde tarafından emilebilir veya saçılabilir. Diğer bir olasılıkta ise ışık malzeme ile etkileşime girmez. Gelen bir fotonun enerjisi, bir molekülün temel durumu ile uyarılmış bir durum arasındaki enerji boşluğuna karşılık geliyorsa, foton emilebilir ve molekül daha yüksek enerjili uyarılmış duruma yükseltilebilir. Oluşan radyasyon enerjisinin kaybı absorpsiyon spektroskopisi ile ölçülebilmektedir. Ancak fotonun molekülle etkileşmesi ve ondan saçılması durumunda saçılan fotonlar, gelen ışık huzmesine bir açıyla ışık toplanarak gözlemlenebilir ("Introduction, Basic Theory and Principles", 2005). Radyasyonu tanımlayan dalga boyu ( $\lambda$ ), frekansı ( $\nu$ ) ve enerjisi ( $\Delta E$ ) arasındaki ilişki denklemde verilmiştir.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2)$$

$$\Delta E = h\nu$$

Raman spektroskopisinde numune, UV-görünür bölgede ( $\nu_0$ ) yoğun lazer ışınlarıyla ışınlanır ve saçılan ışık genellikle gelen ışına dik yönde gözlenir. Saçılan ışık Rayleigh ve Raman olarak iki türden oluşmaktadır. Rayleigh saçılması Raman saçılmasına göre güçlüdür ve gelen ışınla aynı frekansa sahiptir ( $\nu_0$ ). Raman saçılması ise çok daha zayıftır ve  $\nu_0 + \nu_m$  frekanslarına sahiptir, burada  $\nu_m$  bir molekülün titreşim frekansıdır. Raman saçılmasında, ışık molekül ile etkileşir ve

çekirdek etrafındaki elektron bulutunu bozar (polarize eder) ve bu, sanal durum (virtual state) adı verilen kısa ömürlü bir durum oluşturur. Bu durum kararlı değildir ve foton hızla yeniden yayılır.  $\nu_0 - \nu_m$  ve  $\nu_0 + \nu_m$  çizgileri sırasıyla Stokes ve anti-Stokes çizgileri olarak adlandırılır. Böylece Raman spektroskopisinde Raman kayması dalgasayısı cinsinden ölçülmüş olur (“Introduction and Scope”, 2005).



Şekil 3.5. Raman ve Rayleigh saçılmaları (“Introduction, Basic Theory and Principles”, 2005).

Şekil 3.5’te bir titreşimde meydana gelen süreçler gösterilmektedir. Moleküllerin çoğu oda sıcaklığında en düşük enerjili titreşim seviyesinde bulunur. Lazer elektronlar ile etkileşime girdiğinde ve polarizasyona sebep olduğunda molekül sanal duruma geçiş yapar. Bu durum Rayleigh süreci olarak tanımlanır ve çoğu foton bu şekilde dağılır. Bu süreçte herhangi bir enerji değişimi olmaz ve ışık aynı enerji durumuna geri döner. Buna karşılık Raman saçılmasında temel titreşim seviyesinde bulunan ( $m$ ) molekül enerjisi emer ve daha yüksek bir enerji uyarılmış titreşim durumuna ( $n$ ) yükselir. Bu yükselme Stokes saçılması olarak tanımlanır ve bu durumda bazı moleküller uyarılmış durumda bulunabilir. Anti-Stokes saçılmasında ise saçılan fotona enerji transferi mevcuttur ve temel durumlara saçılmaları içerir. Böylelikle, Stokes saçılması ile karşılaştırıldığında, anti-Stokes saçılması daha zayıftır ve uyarılmış titreşim durumlarının popülasyonunun azalması nedeniyle titreşim frekansı arttıkça zayıflamaktadır. Ayrıca, anti-Stokes saçılması, sıcaklık arttıkça Stokes saçılmasına göre artmaktadır (“Introduction, Basic Theory and Principles”, 2005).

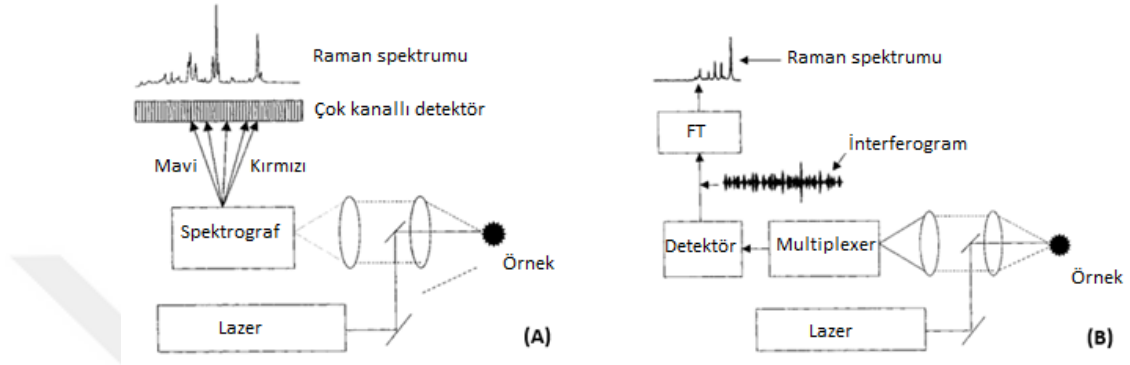
### 3.2.2 Deney düzeneği

Bazı durumlarda, deney düzeneği seçimleri tüm spektrometre tasarımı üzerinde büyük rol oynar. Örneğin, lazer dalga boyu spektrometre tipi (dağıtıcı veya dağılmayan), detektör (tek veya çok kanallı) ve maksimum ulaşılabilir sinyal-gürültü oranını (SNR) belirlenmesi tasarımda önemli bir yere sahiptir ve uygulama ve numune gereksinimlerine göre bu özellikler şekillenmektedir.

Chandrasekhara Venkata Raman 1928'de kendi adını taşıyan fenomeni keşfettiğinde, deney düzeneğinin ilk basit hali mevcuttu. Bu sistemde Raman, kaynak olarak güneş ışığını ve toplayıcı olarak bir teleskopu kullanmıştır. Zamanla, Raman enstrümantasyonunun çeşitli bileşenlerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. İlk araştırmalar, daha iyi uyarma kaynaklarının geliştirilmesine odaklanılmış ve böylelikle bizmut, çinko, helyum, kurşun gibi element lambaları geliştirilmiştir. Fakat yavaş yavaş bunların düşük ışık yoğunlukları nedeniyle yetersiz olduğu kanıtlanmıştır. Cıvalı lambaların tanıtılması ve kullanımının ilerlemesi ile birlikte 1948'de Hilger Co., tarafından Raman tüpünü çevreleyen dört lambadan oluşan Raman enstrümanı için ticari bir cıva uyarma kaynak sistemi geliştirilmiştir. 1962'de ise lazer kaynakları kullanılmak üzere geliştirilmeye başlaması ile Ar<sup>+</sup> ve Kr<sup>+</sup> lazerler kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmelere ek olarak, 1960'ların başında Raman enstrümantasyonunun optik dizisinde bırakım gelişmeler meydana gelmiştir. Tek bir monokromatörün ışığı çift monokromatörden daha verimli bir şekilde uzaklaştırdığının keşfedilmesinden sonra üçlü bir monokromatör kullanım için tanıtılmıştır. Son olarak, 1968'de holografik ızgaraların ortaya çıkması ticari Raman aletlerinde Raman saçılmasının toplanmasının verimliliğine katkıda bulunmuştur (Ferraro and Nakamoto, 1994).

Raman spektroskopisinde dağıtıcı ve dağıtıcı olmayan olarak iki tasarım bulunmaktadır (Şekil 3.6 (A) ve 3.6. (B)). Her iki tasarımda da amaç Raman yoğunluğunun (saniyedeki foton sayısı) ve Raman kaymasının (cm<sup>-1</sup> cinsinden) grafiğini oluşturmaktır fakat bu sistemler farklı prosedürler gerçekleştirir. Genellikle lazer ve örnekleme modülü her iki sistem için de benzerdir. Bu sistemlerin farkları incelenecek olursa, dağıtıcı sistemler, tek bir detektörde taranmak veya birçok paralel detektör tarafından izlenmek üzere dalga boylarını uzamsal olarak ayırır. Buna karşılık dağıtıcı olmayan sistemler farklı dalga

boylarını uzamsal olarak ayırmazlar, ancak genellikle onları her dalga boyunun karakteristik bir modülasyon frekansına sahip olacak şekilde modüle eder. Bileşik modüle edilmiş sinyal daha sonra tek bir detektör tarafından izlenir ve bir Fourier dönüşümü ile demodüle edilmektedir (“Instrumentation Overview and Spectrometer Performance”, 2000).



Şekil 3.6. Raman spektrometresinin ana bileşenleri (“Instrumentation Overview and Spectrometer Performance”, 2000)

Dağıtıcı ve dağıtıcı olmayan Raman spektrometrenin farkları Tablo 3.1’de verilmiştir. Her iki teknoloji arasındaki farklar, kullanılan lazer ve Raman saçılımının tespit edilip analiz edilme şeklidir. Her tekniğin kendine özgü avantajları vardır ve numuneye en uygun olan yöntem tercih edilmelidir (Vankeirsbilck et al., 2002).

Tablo 3.1. Dağıtıcı ve dağıtıcı olmayan Raman spektrometrelerin özellikleri.		
	Dağıtıcı Raman	Dağıtıcı olmayan (FT) Raman
<b>Kullanılan lazer</b>	Görünür bölge: 785, 633, 532 nm	Yakın IR bölge: 1064 nm
<b>Spektral analiz</b>	Kırınım ağı	İnterferometre
<b>Detektör tipi</b>	Silikon CCD detektör	Oda sıcaklığında indiyum galyum arsenit Sıvı nitrojen soğutmalı germanyum
<b>Avantajları</b>	Daha yüksek hassasiyet Mikroskopi uygulamaları için daha yüksek uzaysal çözünürlük Düşük lazer gücü	Sınırlı floresan Kütüphaneler ve analiz yazılımı ile maksimum uyumluluk
<b>Dezavantajları</b>	Spektral kapsama/çözünürlük değiş tokuşu Daha fazla floresan Çözünürlük spektruma göre değişir	Daha düşük SNR Genellikle yüksek lazer gücü Sabit çözünürlüklü tam spektral kapsama

Raman spektroskopisi genel olarak gerektirdiği minimum numune işleme ve hazırlama avantajlarıyla bilinmektedir. Raman spektroskopisi moleküler düzeyde bilgi sunmasının yanı sıra kaydedilen spektruma bağlı olarak incelenen numunelerin kimyasal bileşiminin tanımlanmasına da olanak sağlamaktadır. Yüksek saflıkta tozlar veya sulu çözeltilerdeki yüksek konsantrasyonlu kimyasallar gibi saf numuneler, önceden herhangi bir saflaştırma adımı olmadan doğrudan ölçülebilir. Ayrıca, Kırmızıaltı spektroskopinin aksine, suyun varlığı Raman spektroskopisinde herhangi bir sorun oluşturmaz (Jahn et al., 2020).

Tipik Raman aksesuarları, küvet tutucular, toz numune tutucular, düzensiz şekilli nesnelere için kısıkaçlar ve küçük sıvı numune tutuculardır. Birçok organik ve inorganik malzeme Raman spektroskopik analiz için uygundur. Buna katı, sıvı, polimer veya buhar numuneler örnek olarak verilebilmektedir. Endüstriyel laboratuvar numunelerinin çoğunluğu toz veya sıvıdır ve oda sıcaklığında doğrudan Raman spektroskopisi ile incelenebilir. Malzemelerin Raman spektroskopisi ile incelenmesi için aksesuarlar, çok çeşitli sıcaklık ve fiziksel formlarda mevcuttur. Raman spektroskopisi için numunelerle ilgili en büyük problemler floresan veya

yanmadan kaynaklanır. Bir kirlilikten kaynaklanan floresan, bazı durumlarda numuneyi yakabilmektedir (“The Raman Experiment – Raman Instrumentation, Sample Presentation, Data Handling and Practical Aspects of Interpretation”, 2004).

### 3.2.3 Uygulamaları

Raman spektroskopisi, gezegenlerin, uyduların ve asteroidlerin yüzeylerindeki malzemelerin karakterizasyonu için çok uygun bir yöntem olmasının yanı sıra, kaya oluşturan minerallerin çoğunun tanımlanması için kullanılabilir. Dünya dışı örneklerin moleküler bileşimleri, bu tür numunelerin geldikleri düşünülen kaynak gövdelerinin ve bu gövdelerin geçirdiği değişim/termal süreçleri anlamak için önemli bir rol oynar (Wang et al., 2000). Raman spektroskopisi kullanılarak Bjurböle L/LL4 kondritinde daha yüksek forsterit ve enstatit içeriği tespit edilmiştir (Maksimova and Oshtrakh, 2021). Benzer şekilde, Northwest Africa (NWA) 11273 meteoridinin Raman incelemelerinde Ay jeolojisiyle ilgili olan zirkon ve ilmenit gibi minör minerallerin varlığı da saptanmıştır (Huidobro et al., 2021). Raman spektroskopisi moleküler içeriğin tanımlanması haricinde şok olaylarının sıcaklık ve basınç değerlerinin tespitinde de kullanılabilir ve Dünya üzerindeki çarpma kraterlerini aramak için ipuçları da oluşturabilmektedir (Yin and Dai, 2020). Bunların yanı sıra  $Ce^{+3}$  gibi biyolojik işaretlerin tespit edilmesinde Raman spektroskopisinden yararlanılmaktadır (Shkolyar et al., 2021).

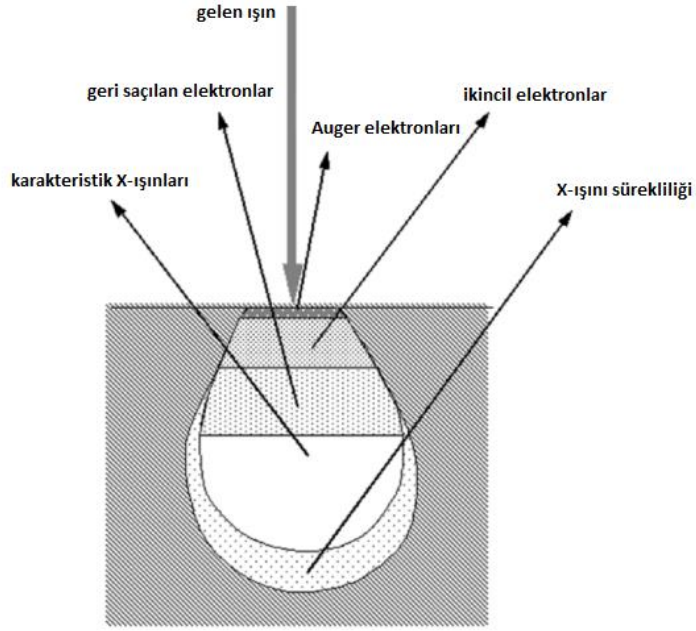
### 3.3 Taramalı Elektron Mikroskopu-Enerji Dispersif Spektroskopi (SEM-EDS)

Taramalı elektron mikroskopu (SEM), birçok disiplinde kullanılmakta olup organik ve inorganik malzemelerin nm’den  $\mu m$ ’ye kadar ölçekte analizinde en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilir. SEM, geniş bir malzeme yelpazesinden çok hassas görüntüler üretmede 300.000x’den 1000000x’e ulaşan yüksek bir büyütmede çalışmaktadır. Enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spektroskopisi-EDS) ise kalitatif ve yarı kantitatif sonuçlar sağlamak için SEM ile birlikte çalışır. Her iki teknik birlikte, taranan numunelerin

malzeme bileşimi hakkında temel bilgileri sunma potansiyeline sahiptir.

### 3.3.1 Teori ve çalışma prensibi

SEM'deki görüntü oluşumu, elektron ışını ve numune etkileşimlerinden sinyal üretilmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu etkileşimler elastik ve elastik olmayan etkileşimler olarak iki ana kategoride değerlendirilmektedir. Gelen elektronun numune atom çekirdeği veya benzer enerjiye sahip dış kabuk elektronları tarafından saptırılmasından kaynaklanan saçılmalar elastik saçılma olarak adlandırılırken 90°'den daha büyük bir açıyla elastik olarak saçılan elektronlar geri saçılan elektronlar (Back Scattered Electrons-BSE) olarak isimlendirilir ve numuneyi görüntülemek için faydalı bir sinyal verir. Elastik olmayan saçılma, gelen elektronlar ile numuneye ait elektronlar ve atomlar arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır ve birincil ışın elektronundan bu atoma enerji transferiyle sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak, numune atomlarının iyonizasyonu sırasında numune elektronlarının uyarılması, ikincil elektronların üretilmesine yol açar. İkincil elektronlar numuneyi görüntülemek veya analiz etmek için kullanılabilirler. Bu sinyaller bir görüntü oluşturmak için kullanılabilirler gibi bir elektron ışını bir numuneye çarptığında, karakteristik X-ışınları emisyonu, Auger elektronları ve katodoluminesans dahil olmak üzere çeşitli sinyaller de üretilmektedir (Zhou et al., 2006). Şekil 3.7'de bu numune atomuna ulaştıktan sonra oluşan sinyal çeşitleri verilmiştir.

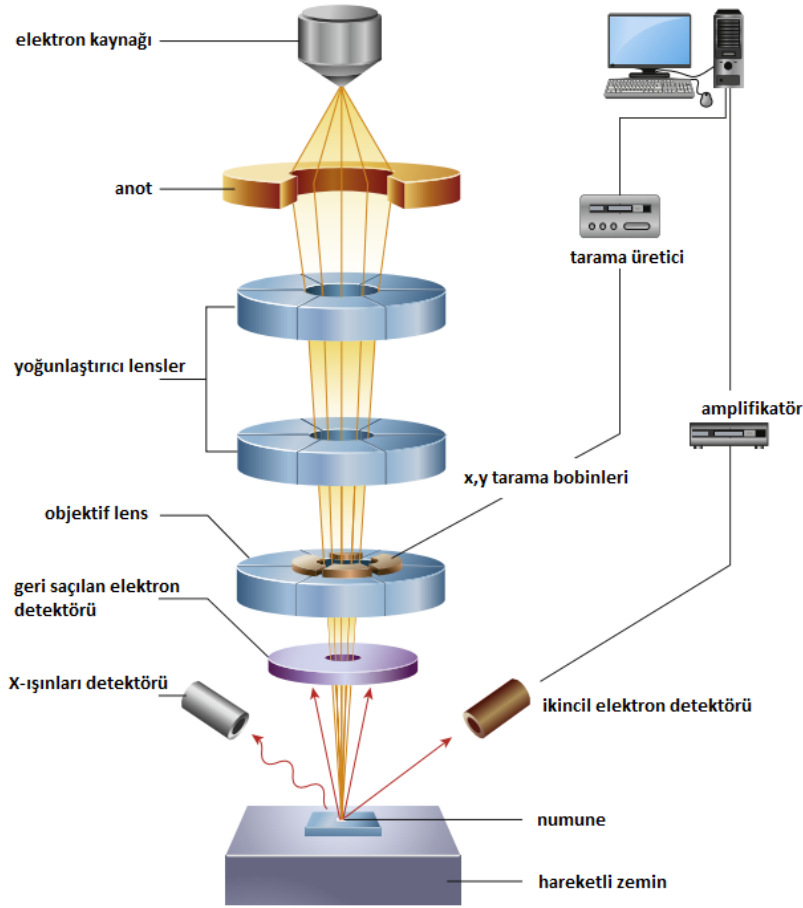


Şekil 3.7. Elektron ışını-numune etkileşimi ile oluşan sinyaller.

EDS ise X-ışınlarının enerjilerine göre sayılması ilkesine dayanmaktadır. EDS detektörleri, bireysel X-ışınlarını elektron deliği çiftlerine dönüştüren ve daha sonra bir elektronik akım oluşturan yarı iletken çiplere dayanmaktadır. Üretilen elektronik sinyal, gelen X-ışınının enerjisiyle orantılıdır. Bu şekilde, birkaç dakikalık bir toplama süresi boyunca, detektör, numune üzerinde seçilen bir konumda verilen enerjinin algılanan X-ışınlarının sayısını sayabilir (Inkson, 2016). X-ışınlarının emisyonu, gelen elektronlarla iç kabuğun uyarılmasıyla üretilen bir olgudur. Yani, bir iç kabuk elektronu yüksek enerji düzeyine geçtiğinde, boşluk yüksek enerji düzeyindeki bir elektron iç kabuktaki boşluğu doldurulur ve bu iki enerji düzeyi arasında enerjili karakteristik bir X-ışını emisyonu ile sonuçlanır. Karakteristik X-ışınları her elemente karşılık gelen spesifik enerjiye sahip olduğundan element, tepe enerjisinden tanımlanabilir ve bileşikteki elementin içeriği, tepe noktasının bütünleşmiş yoğunluğundan analiz edilebilir (Shindo and Oikawa, 2002).

### 3.3.2 Deney düzeneği

SEM, numune yüzeylerinin analizi için sıklıkla tercih edilen tekniktir. SEM cihazı bileşenleri elektron tabancası (elektron kaynağı ve anot), elektromanyetik lens, vakum odası ve detektörden oluşmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. SEM cihazı bileşenleri (Inkson, 2016).

Elektronlar kolonun tepesinde bulunan elektron tabancası tarafından üretilir ve oluşan elektronlar 0,1-30 keV enerji seviyesine kadar hızlandırılır. Tungsten veya lantan heksaborid tabancası tarafından üretilen elektron ışınının çapı, yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturamayacak kadar büyüktür. Bu nedenle, elektron demetini odaklamak ve tanımlamak ve numune üzerinde odaklanmış küçük bir elektron noktası oluşturmak için elektromanyetik mercekler ve açıklıklar kullanılır. Elektron ışınları, elektrostatik veya manyetik alan ile odaklanabilir. Genellikle SEM sisteminde sadece manyetik alan kullanılır. Bunun sebebi, manyetik alan

tarafından kontrol edilen elektron ışınının daha küçük sapmaya sahip olmasıdır. Manyetik alan oluşturmak için "elektromıknatıs" olarak bilinen tel bobinler kullanılır ve elektronların yörüngeleri bu bobinlere uygulanan akımla ayarlanabilir. Elektron lensleri, güçleri değişken olduğundan ve bu da değişken odak uzaklığı ile sonuçlandığından elektron demeti çapını büyütme veya küçültme için kullanılabilir. Bu işlem elektron kaynağının boyutunu gerekli son nokta boyutuna (1-100 nm) kadar küçültür. Elektronun hava tarafından saçılmadan hareket etmesine izin veren yüksek bir vakum ortamına ihtiyaç vardır. SEM odasının içindeki basınç genellikle düşük vakum  $0,1-10^{-4}$  Pa'dır. Numune aşaması, elektron ışını tarama bobinleri, sinyal algılama ve işleme sistemi, numune yüzeyinin gerçek zamanlı gözlemini ve görüntü kaydını sağlamaktadır (Zhou et al., 2006).

SEM-EDS cihazlarında ise EDS detektörü, numune içindeki çeşitli elementlerin X-ışını karakteristiğini enerji spektrumuna ayırma işlevini yerine getirir. Daha sonra spektrum, belirli elementin genişliğini belirlemek için EDS sistem yazılımı tarafından analiz edilir böylelikle foton enerjisi elektrik sinyallerine dönüştürülür. Son olarak, elementlerin kimyasal bileşim haritaları hem niteliksel hem de niceliksel olarak belirlenmektedir (Abdullah and Mohammed, 2019).

SEM değişken basınç odaları kullanarak çok çeşitte numunenin üç boyutlu görüntülenmesine izin verir. SEM'de görüntüleme sistemi, numunenin yeterince elektriksel olarak iletken olmasına bağlıdır. Görüntünün oluşumu, numune ile etkileşen yüksek enerji demetinin bir sonucu olarak saçılan farklı sinyallerin toplanmasına bağlıdır (Echlin, 2009). Bir SEM cihazının görüntüleyebileceği numune türleri basitçe üçe ayrılabilir. Bunlar, kurutulmuş ve iletken, kurutulmuş ve yalıtkan ve ıslak olanlar olarak ayrılmaktadır. Kurutulmuş ve iletken numuneler bir pim saplama montajına sabitlenebilir ve kolayca görüntülenebilir. Kurutulmuş ve yalıtkan numuneler, numuneyi aşırı ısınmadan korumak ve görüntü kalitesini iyileştirmek için iletken bir tabaka ile kaplanmalıdır. Bu numuneler için numuneyi ince bir altın tabakasıyla kaplamak için bir püskürtmeli kaplayıcı kullanılması gerekir. Bir püskürtme kaplayıcı, iletken bir altın kaplama üretmek için numunenin yüzeyini kaplamak için altın atomlarını altın plakadan çıkarmak için argon iyonlarını kullanır (Nguyen and Harbison, 2017).

### 3.3.3 Uygulamaları

SEM-EDS tekniği kullanılarak meteoritlerin mineralojik, organik ve fiziksel özellikleri aydınlatılmış olur. Paris meteoridinin SEM-EDS yardımıyla incelenmesi ile tanecikli yapısı ortaya çıkarılmış ve meteoritin sınıflandırılmasının yapılması sağlanmıştır (Merouane et al., 2011). Aynı zamanda, Çanakkale meteoriti de bu yöntemle incelenmiş ve kimyasal yapısı aydınlatılmıştır (Unsalan vd., 2012). Benzer şekilde Chelyabinsk meteoriti ve Santa Rosa de Viterbo meteoritlerini incelemek için de SEM-EDS tekniği kullanılmış, dokusal ve jeokimyasal yapısı belirlenmiştir (Voropaev et al., 2013; Bsdok et al., 2020). SEM-EDS tekniği ile meteoritlerin yalnızca kimyasal içerikleri değil üç boyutlu yapıları da anlaşılabilir. Örneğin, Nakhla meteoridinin incelenmesi Mars gezegeninde bulunan volkanik yüzeylerde yer alan akışkan yolların ayrıntılı resmedilmesine yardımcı olmuştur (Needham et al., 2013). Buna ek olarak Markovka meteoritinin SEM-EDS analizi ana gövdenin termal geçmişi hakkında çeşitli veriler sunmuştur (Voropaev et al., 2021).

### 3.4 X-Işınları Floresan Spektroskopisi (XRF)

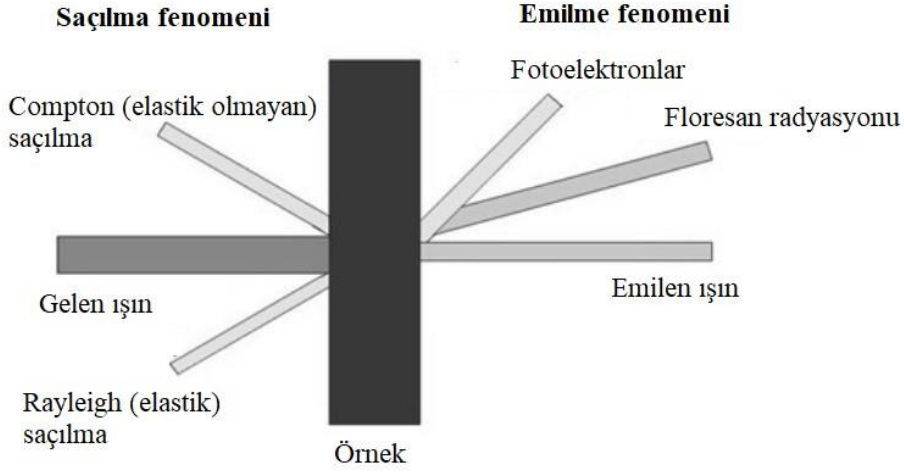
X-ışını floresan (XRF) spektroskopisi, endüstri dahil olmak üzere birçok alanda yer alan ve elementleri belirlemeleri için yaygın olarak kullanılan analitik bir tekniktir. XRF spektroskopisi, periyodik tablodaki neredeyse tüm elementleri (klor, fosfor, kükürt, brom ve iyot gibi elektronegatif elementler dahil olmak üzere) belirleme yeteneğine sahiptir. Bir atomik spektrometre tekniği için alışılmadık bir şekilde, numuneler çözelti yerine katı formda, örneğin, pelet olarak hazırlanan toz halinde malzeme veya cam diskler olarak analiz edilir. Bununla birlikte, sıvı formundaki yağlar, tuzlu sular ve diğer numuneler, vakum odasında bir helyum yıkaması tekniği kullanılarak doğrudan analiz edilebilir. XRF yöntemini diğer atomik spektrometre tekniklerinden ayıran en önemli özelliği doğası gereği olan yüksek ölçüm hassasiyetidir (Potts, 2005).

XRF'nin uygulanabilirliği, numune tipi ve konsantrasyon aralığı açısından neredeyse sınırsızdır, ancak büyük ölçüde seçilen tekniğe bağlıdır. Günümüzde, farklı analitik görevler için kullanılabilen farklı tipte X-ışını spektrometreleri bulunmaktadır. Floresan radyasyonun tespiti, en düşük seviyede bu radyasyonu

yayan elementlerin belirlenmesine, yani kalitatif bir analize izin verir. Her pikin pik şiddeti, analiz edilen hacimdeki bu elementin atom miktarına bağlıdır. Bu, mevcut elemanların ağırlık fraksiyonlarının hesaplanmasını sağlar. XRF'in kapsadığı ağırlık oranı aralığı, kullanılan yöntem ve incelenen ögeye bağlıdır (Haschke, 2014).

### 3.4.1 Teori ve çalışma prensibi

XRF temelde, iç kabuk elektronlarının iyonlaşmasına neden olan X-ışını foton kaynağı kullanılarak bir numunedeki atomların uyarılması prensibine dayanmaktadır. Bu kapsamda, bir hedef fotonlarla veya bağlı iç elektronların bağlanma enerjisini aşan enerjilere sahip yüklü parçacıklarla (elektronlar veya iyonlar) ışınlanırsa, hedef atomların iç yörüngelerinden bir elektron çıkarılabilir. Fotonun toplam enerjisi elektrona aktarılsa, bu etkileşime foto etki adı verilmektedir. Burada ortaya çıkan atom kararsızdır ve yüksek enerjili bir dış yörüngeden iç elektron kabuğundaki boşluğa bir elektron aktararak temel durumuna geri dönmektedir. Aktarılan elektronun ilk ve son enerji durumu arasındaki enerji farkı, foton olarak salınmaktadır. XRF spektroskopisinde fotonlar, numuneden karakteristik elementel X-ışınlarını uyarmak için kullanılmaktadır. Alternatif olarak, gelen fotonlar, iç kabuğun bir elektronunda tutarlı bir şekilde (Rayleigh saçılması) veya dış kabuğun bir elektronunda tutarsız bir şekilde (Compton saçılması) saçılabilir (Şekil 3.9). Bir numunenin XRF spektrumu, numunedeki atomlardan yayılan farklı karakteristik X-ışınlarının ve birincil radyasyon kaynağının uyumlu ve tutarsız saçılan bileşenlerinin bir karışımıdır. XRF spektrometrelerinin temel amacı, farklı spektral bileşenleri ayırmak, yoğunluklarını belirlemek ve buna dayanarak elementlerin hangi konsantrasyonlarda bulunduğunu hesaplamaktır (Kramar, 1999).

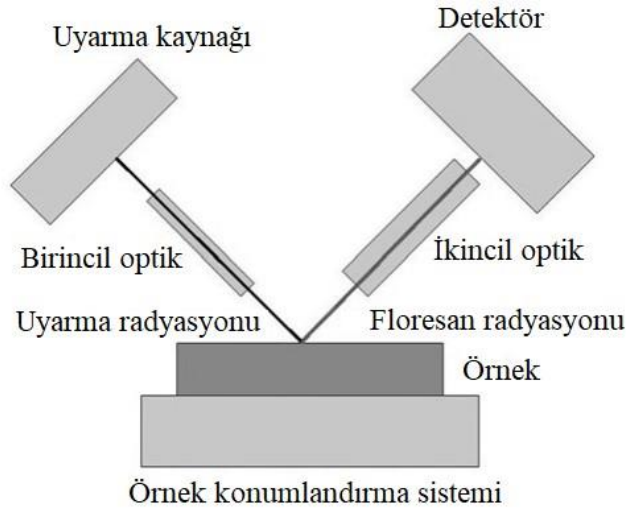


Şekil 3.9. X-ışınları floresan mekanizması (Haschke, 2014)

### 3.4.2 Deney Düzenegi

Tipik olarak, XRF spektrometreleri, ikincil X-ışınlarının uyarılması için bir foton kaynağı, bir numune desteği, bir X-ışını algılama birimi ve bir veri değerlendirme ünitesi içermektedir (Şekil 3.10). Uyarma kaynağı laboratuvar aletlerinde çoğunlukla bir X-ışını tüpü ile gerçekleştirilir. X-ışını akısı, akkor bir filamandan yayılan bir elektron demeti, bir potansiyel fark (genellikle 20-100 kV aralığında) ile hızlandırıldığında ve bir metalik anoda yönlendirildiğinde üretilir. Elektron ve anot arasındaki etkileşimler, anotun atomlarından iç yörünge elektronlarının iyonlaşmasıyla sonuçlanır ve emisyon karakteristik floresan X-ışınları ile sonuçlanır (Potts, 2005). Ancak, taşınabilir aletlerde radyoaktif kaynaklarla veya son derece karmaşık araştırmalar için sinkrotronlarla uyarım da yaygındır. Elektronlarla doğrudan uyarma, çoğunlukla elektron mikroskoplarında kullanılır. Birincil optikler, radyasyonun enerji dağılımını değiştirmek veya ışını şekillendirmek için kullanılır. Enerji dağılımındaki değişiklikler filtreler, ikincil hedefler veya monokromatörler yardımıyla sağlanmaktadır. Genellikle X-ışını optiği ile ışının hem şekli hem de enerji dağılımı etkilenmektedir. Örnek konumlandırma sistemi, ışının numune üzerinde tam olarak pozisyonlanacağı noktayı ayarlamak için bulunmaktadır. Geniş numune alanlarını analiz eden

spektrometreler için bu sistem genellikle sadece bir numune tepsisi ile konumlandırılacak bir numune kabıdır. Ancak, pozisyona duyarlı analiz için X ve Y'de manuel veya motorlu numune konumlandırma sistemleri de mümkündür. Daha sonra numune konumu genellikle bir optik mikroskop tarafından kontrol edilmektedir. İkincil optikler çözünürlüğü veya tepe-arka plan oranını iyileştiren bir ışın şekillendirici olarak gerekli olabilir fakat aynı zamanda monokromatör olarak kullanılan dağıtıcı bir optik de olabilmektedir (Haschke, 2014). Son olarak detektör numuneden gelen fotonların ölçülmesi için kullanılmaktadır. Kırılan radyasyonun yoğunluğu uygun bir detektör ile ölçülür. Enerji dağılımlı spektrometrelerde kırınım söz konusu değildir. Bu durumda detektör, sayımın yanı sıra dağılım da yapar. Dalga boyu dağılımlı spektrometreler, düşük atom numaralı elementlerle (Si, Al, Mg, Na) daha iyi çözünürlük ve daha kısa sayma süreleri sundukları için daha yaygın olarak kullanılmasına rağmen, enerji dağılımlı spektrometreler genellikle daha ucuzdur (Karathanasis and Hajek, 2018).



Şekil 3.10. XRF spektrometresi bileşenleri

### 3.4.3 Uygulamaları

XRF spektrometresi ucuz, hızlı ve yıkıcı olmayan bir analiz yöntemi olması sebebiyle madencilik, tıp, jeoloji, arkeolojik bulgular, çevresel analiz ve meteorit araştırmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Meteorit örneklerine uygulanan

XRF analizi sayesinde örneğe ait elementler açığa çıkmakta ve örneğin sınıflandırılması sağlanmaktadır. Buna örnek olarak içinde Campo del Cielo ve North Chile meteoritlerinin de bulunduğu bir grup demir meteoriti XRF spektrometresi ile incelenmiş ve içeriğindeki majör, minör ve iz elementlerinin açığa çıkarılması sağlanmıştır. Bu elementlerin belirlenmesi örnekte bulunan aksesuar minerallerin bulunmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle incelendiğinde demir meteoritlerin petrojenezi ve evrimi için kritik öneme sahip olan P ve S yığın içerikleri tahmin edilmiştir (Gemelli et al., 2015). Bir diğer örnek olarak, taşı ve demir meteoritlerinin XRF analizi sonuçları meteoritin içeriğindeki ağır metallerin ve nadir elementlerin varlığına ışık tutmuştur (“Study on Element Distribution in Meteorite Samples by XRF and ICP-MS”, 2018). XRF analizinin meteorit incelemelerinde kullanılmasına dair bir sebep henüz gruplandırılması yapılmamış meteoritlerin sınıflandırılmasının sağlanmasıdır. Meteorit içeriğindeki Ni ve Fe miktarlarının belirlenmesi ile meteoritlerinin sınıflandırılması başarı ile tamamlanmıştır (Niewodniczański et al., 1974). Aynı şekilde, henüz sınıflandırılmamış 18 meteorite ait XRF çalışmaları sonucunda taşı ve demir meteoritlerin sınıflandırılması sağlanmıştır (Allegretta et al., 2020). Son olarak XRF ile incelenen demirli meteoritlerde Fe, Ni ve Co miktarlarının belirlenmesi ile olası kontaminasyonlar saptanmış olur (Araújo et al., 2018).

### **3.5 X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD)**

X-ışını kırınımı (XRD) tekniği, kristal malzemelerin karakterizasyonu için kullanılan güçlü bir tekniktir. Bu yöntem sayesinde maddenin ince ölçekli yapısı hakkında çok çeşitli bilgiler sağlanabilir. XRD analizi ile tercih edilen kristal yönelimleri (doku), yapılar, fazlar ve ortalama tane boyutu, kristal kusurları kristallik ve gerinim gibi diğer yapısal parametreler hakkında bilgi sahibi olunur. Bir numunedeki her bir kafes düzlemi kümesinden belirli açılarda saçılan monokromatik X-ışınları demetinin yapıcı girişimi X-ışını kırınım piklerini oluşturmaktadır. Kafes içindeki atomların dağılımı pik yoğunluklarını belirlemektedir. Sonuç olarak, X-ışını kırınım modeli, belirli bir malzemedeki periyodik atomik düzenlemelerin parmak izidir. XRD tekniğinin yaygın olarak kullanılma sebepleri arasında, bilinmeyen bir mineralin güçlü ve hızlı bir şekilde tanımlanması, minimum numune hazırlığı gerektirmesi ve nispeten basit veri

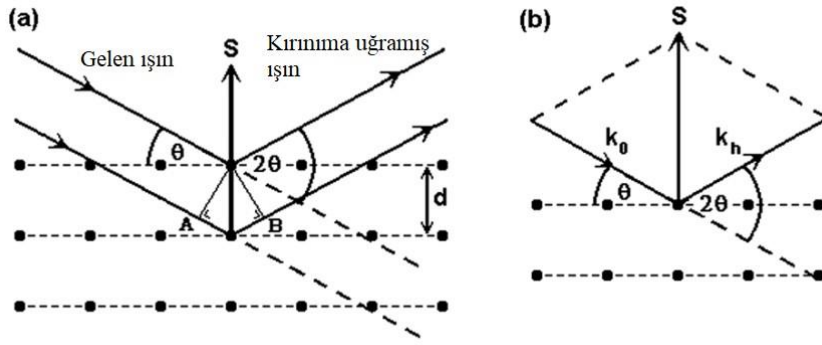
yorumlama özelliği örnek olarak verilebilir. XRD tekniğinin sınırlamaları ise homojen ve tek fazlı olmayan malzemelerin zor tanımlanmaları, inorganik bileşiklerin standart bir referans dosyasına erişim gerekliliği ve tepe katmanı oluşabilmesini içerir (Bunaciu et al., 2015).

### 3.5.1. Teori ve çalışma prensibi

X-ışını kırınımı, kristal kafes aralığına yakın bir dalga boyuna ( $\lambda$ ) sahip X-ışını radyasyonu ile bir kristalin araştırılmasını içerir. Dalgaların periyodik yapılarla etkileşimi, kristallerin dalga boyu ve periyodikliği benzer büyüklükteyse, kırınım etkileri üretir. Herhangi bir kırınım etkisi olmadan, bir numunenin üzerine gönderilen birincil X-ışını, tüm yönlerde saçılma üretecektir. Kırınım, tüm saçılma küresinden yoğunluğu farklı yönlere yeniden dağıtır. Bu nedenle, belirli yönlerde yoğunluk zirveleri ortaya çıkarken, zirveler arasındaki yönlerde yoğunluk büyük ölçüde azalır (Stanjek and Häusler, 2004). Bununla birlikte, küre üzerine entegre edilen yoğunluk, enerji korunumu nedeniyle sabit kalır. X-ışınları, kristaldeki her bir atomu çevreleyen elektron bulutu tarafından saçılır. Yol farkı ( $n\lambda$ )  $2d\sin\theta$ 'ya eşdeğer olduğunda saçılan X-ışınları arasında yapıcı girişim meydana gelir. Bu, kırınım meydana gelen atomların “düzlemleri” arasındaki mesafeyi ( $d$ ) gelen monokromatik ışının yapıcı girişim vermek için düzlemi araştırmak zorunda olduğu açıyla ( $\theta$ ) ilişkilendiren Bragg yasası (3) ile açıklanmaktadır;

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3)$$

Şekil 3.11, X-ışını kırınımının şemasını göstermektedir. (a) Bragg kırınımının meydana gelmesi için gerekli koşulların gösterimi ve (b) gelen ( $k_0$ ), kırınımına uğrayan ( $k_h$ ) ve saçılma ( $S$ ) vektörlerinin kristale göre ilişkisini göstermektedir.

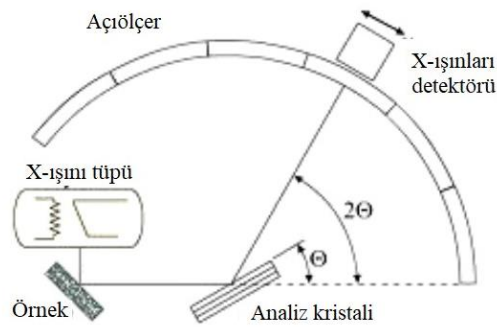


Şekil 3.11. X-ışını kırınımının şeması (Moram and Vickers, 2009)

Deneysel olarak  $2\theta$  açısı ölçülebilmektedir. Kristal, üç boyutlu bir kırınım ızgarası gibi davranır, böylece numune ve/veya detektör hareket ettirilirken, üç boyutlu kırınım dizisi araştırılabilir. Her bir kristal düzlem seti, bir kırınım noktası üretecek ve kırınım noktalarının konumları ve şekilleri, kristal düzlemlerinin aralıkları ve kristalitlerin boyutu ile ters orantılıdır (Moram and Vickers, 2009).

### 3.5.2 Deney Düzenegi

Toz kırınım ölçümleri için kullanılan XRD deney düzenegi, 1940'lardan itibaren büyük bir değişim göstermemiştir. Modern deney düzeneginde bulunan en önemli fark, mini bilgisayarın kontrol, veri toplama ve veri işleme için kullanılmasıdır. Temelde X-ışını difraktometreleri üç temel elemandan oluşmaktadır. Bunlar bir X-ışını tüpü, numunenin tutulmasını sağlayan bir yapı ve bir X-ışını detektörüdür (Bunaciu et al., 2015). X-ışını kırınım sistemi Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. X-ışını kırınım sistemi.

X-ışınları, bir vakum odası içine yerleştirilmiş iki metal elektrodun bulunduğu bir X-ışını tüpünde üretilir. Elektronlar ise, bir tungsten filaman katodunun ısıtılmasıyla üretilir. Katot yüksek bir negatif potansiyele sahiptir ve elektronlar normalde toprak potansiyeline sahip olan anoda doğru hızlandırılır. Çok yüksek bir hıza sahip olan elektronlar su soğutmalı anot ile çarpışır. Metal anoda çarpma nedeniyle elektronlar enerji kaybeder ve bu kayıp X-ışınları olarak kendini gösterir. Normalde elektron demetinin X-ışınlarına dönüşen yüzdesi oldukça küçüktür (%1'den az); çoğunluğu su soğutmalı metal anotta ısı olarak dağılır (Suryanarayana and Norton, 1998).

### 3.5.3 Uygulamaları

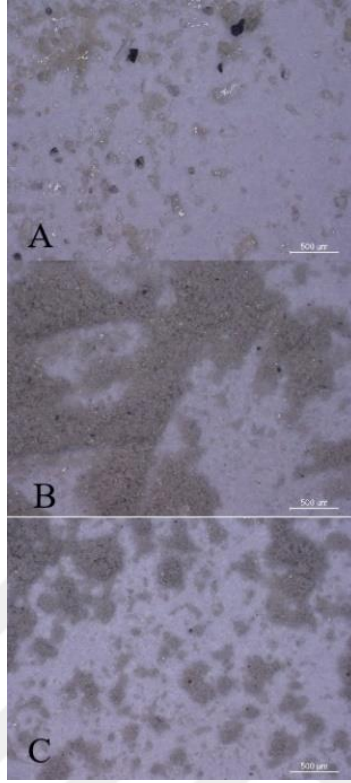
Meteorit araştırmalarında sıklıkla kullanılan XRD tekniği örneğin kristal yapısının anlaşılmasına ve kimyasal karakterinin ortaya çıkmasını sağlar. X-ışını kırınımı analizi ile meteoritlerin incelenmesi öncelikle henüz sınıflandırılmamış meteoritlerin sınıflandırılmasını sağlamasının yanı sıra, gezegen oluşum süreçlerini anlamada ve takip etmede önemli bir araç görevi görmekle birlikte solar nebula evrimine de ışık tutmaktadır (Seixas et al., 2012). Bunların yanı sıra meteoritlerin kristal yapısının ortaya çıkması meteoritlerinin kökeninin anlaşılmasını ve oluşum durumlarının açığa çıkmasını sağlar. Örneğin, NWA 859 meteoritine ait XRD analizinde Fe-Ni fazlarının belirlenmesi sayesinde meteoritin bağlı olduğu asteroide ait kozmokimyasal süreçlere ışık tutulmuştur (Shao et al., 2021). Bunlara ek olarak, meteoritlerin XRD tekniği ile incelenmesi sonucunda geçirdikleri değişimler belirlenmiş olur. Buna verilebilecek bir örnek Canyon Diablo meteoritlerinin XRD incelemeleri ile yeniden kristalleşme gibi değişime kanıt oluşturabilecek çeşitli özelliklerinin belirlenmesidir (Lipschutz, 1967). Son olarak, X-ışını kırınımı modellerinin açığa çıkarılması meteoritin maruz kaldığı şok basıncının anlaşılmasını sağlar. Piplia Kalan meteoritinin XRD analizi ile maruz kaldığı şok basıncı ve etkileri araştırılmıştır (Chandra et al., 2015).

## 4. BULGULAR

### 4.1 ATR-FTIR Bulguları

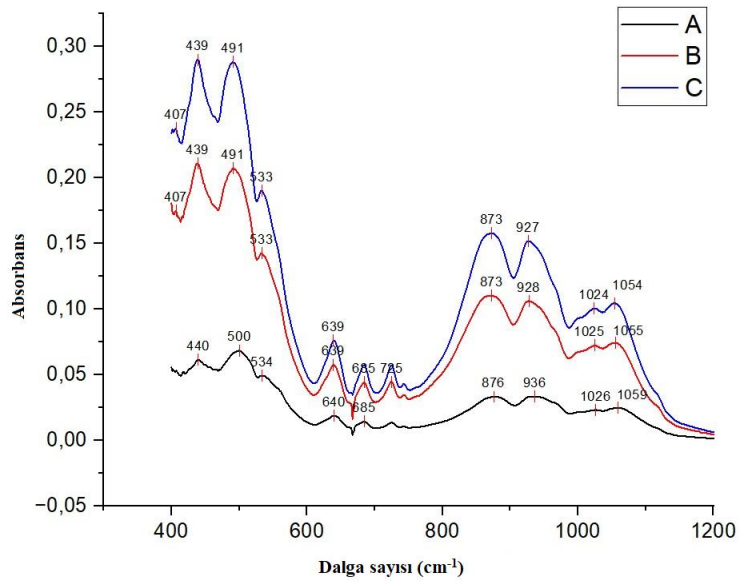
Toz meteorit örnekleri Perkin Elmer Spectrum Two Zayıflatılmış Toplam Yansıma (ATR) – Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi ile analiz edilmiştir. Cihazda döteryum triglisit sülfid (DTGS) detektör ve lazer diyot kullanılmıştır. Cihazın spektrum aralığı  $4000-600\text{ cm}^{-1}$ 'dir.

Toplam 75,9 mg Aioun El Atrouss numunesi AAT-01, çeşitli boyutlarda ayrı toz örnekleri hazırlamak için bir agat havanda öğütülmüş ve optik mikroskop altında görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.1). Toz haline getirilmiş numunedeki partiküllerin ortalama boyutları, ilk numune için  $\sim 199$  (Şekil 4.1A), ikinci numune için (Şekil 4.1B)  $\sim 50$  ve üçüncü numune için (Şekil 4.1C)  $\sim 21\ \mu\text{m}$ 'dir. Meteorit örneğinin tane boyutunu belirlemek için Leica MZ16 stereo mikroskobu kullanılmıştır. Toz numunelerin görüntülerini yakalamak için 3.2x büyütme kullanılmıştır. Görüntüler ImageJ programı ile ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Her kayıttan sonra yaklaşık 17,9 mg numune yeniden öğütülmüştür ve spektrometrenin ATR biriminin elmas kristali üzerine yerleştirilmiştir. Tüm spektrumlar, ortam sıcaklığında  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  arasındaki bölgede  $4\text{ cm}^{-1}$  çözünürlükte 64 tarama ile kaydedilmiştir. Deneye başlamadan önce, kalibrasyon amacıyla Perkin Elmer tarafından sağlanan Polistiren referans kartı kullanılmıştır. Kaydedilen spektrumlar, Spectragryph v1.2.15 (Menges, 2022) ile analiz edilmiştir. Elde edilen veriler OriginPro 2022b v.9.9.5.167 programında grafik haline getirilmiştir.



Şekil 4.1. AAT-01'e ait optik mikroskop görüntüsü.

Toz numunelerden elde edilen spektrumlar Şekil 4.2'de verilmiştir. Üç ayrı boyutta öğütülen AAT-01 örnekleri yaklaşık olarak 1050, 1024, 927, 873, 639, 491 ve 439  $\text{cm}^{-1}$  bölgelerinde pikler vermiştir. Şekilde A en az, B orta ve C en yüksek öğütmeye sahiptir.

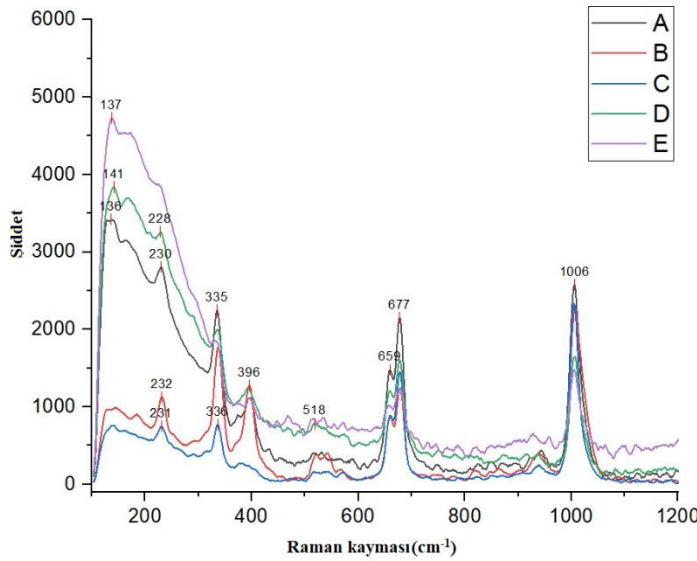


Şekil 4.2. AAT-01 örneklerinin FT-IR spektrumları.

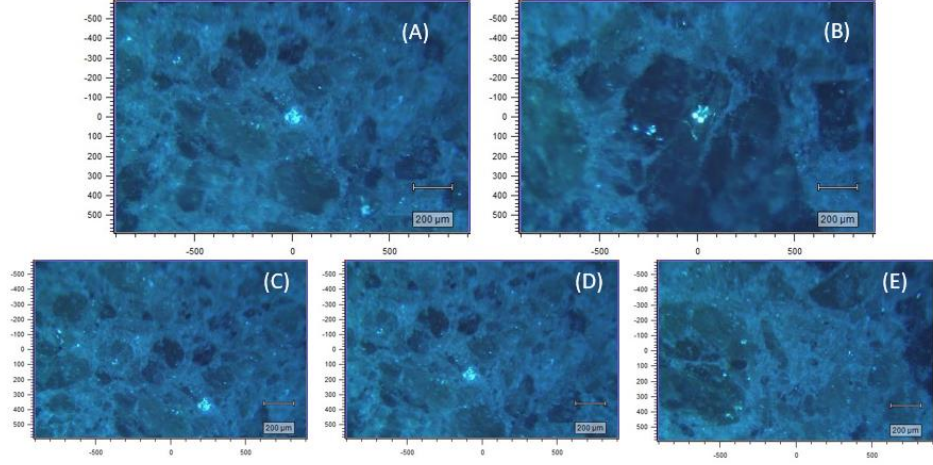
## 4.2 Raman Bulguları

AAT-01'e ait 59,36 g'lık örnek Kâtip Çelebi Üniversitesinde Renishaw inVia Raman Spektrometre ile incelenmiştir. Analizler 532 nm lazer ve 2400 çizgi/mm kırınım ağı kullanılarak tamamlanmıştır. Ölçümler 5x objektif, %50 lazer gücü ve 1s maruziyet süresi parametreleri kullanılarak alınmıştır. Elde edilen spektrumların analizi sırasında Renishaw Wire 4.2 ve Wiley KnowItAll Spectroscopy Edition programı (V:21.1.91.0) (John Wiley and Sons, Inc.) kullanmıştır. Ayrıca spektrumların yorumlanması ve mineral tayini yapılması için genel veri tabanlarından RRUFF (Lafuente et al., 2015) ve SSHADE (Schmitt et al., 2018) kütüphanelerinden yararlanılmıştır.

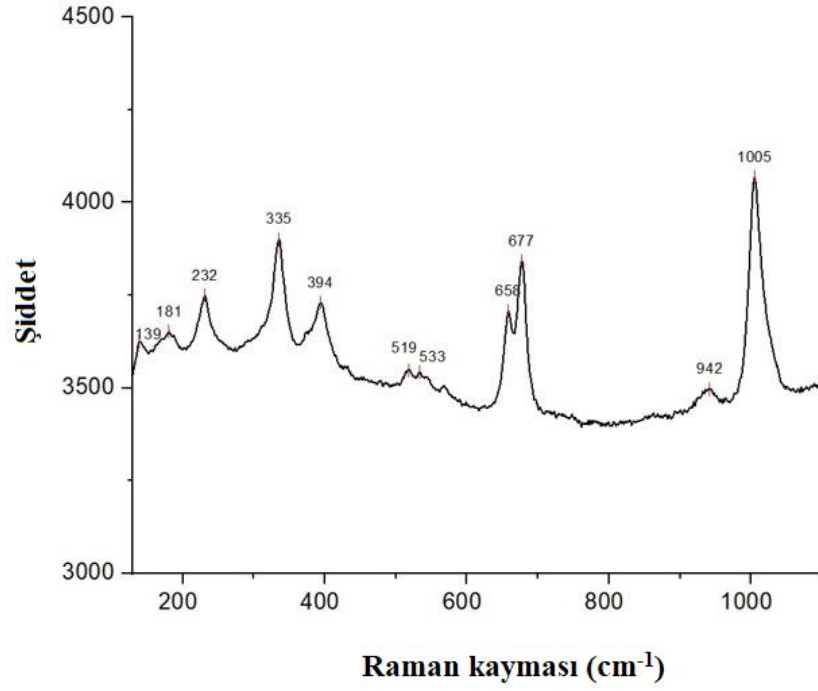
Örneğin incelemeleri sırasında öncelikle çıplak gözle bakıldığında kolaylıkla fark edilebilen açık ve koyu renk kapanımlar ve kristal yapılar incelenmiştir. Bu noktalara ait Raman spektrumları ve görseller Şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Örnek tekli noktalar halinde incelendikten sonra haritalama yöntemi ile 1152 noktadan ayrı spektrum alınarak analiz edilmiştir. Haritalama işlemine ait ortalama spektrum ve analiz edilen bölgeye ait görsel Şekil 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Haritalama işlemi için seçilen parametreler; 532 nm dalga boyu lazer, 15 s maruziyet süresi, %50 lazer gücü ve 5x objektif değerlerindedir.



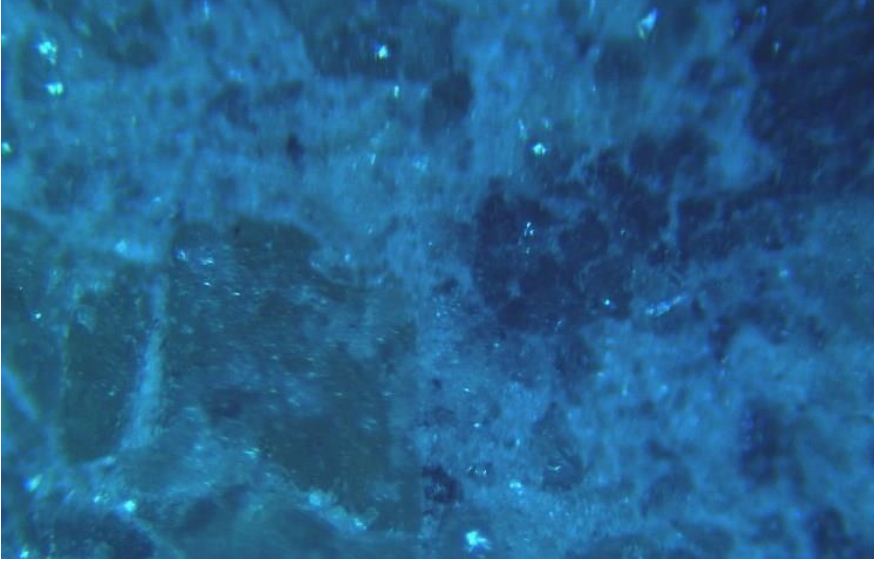
Şekil 4.3. Örneğin çeşitli noktalarına ait Raman spektrumları.



Şekil 4.4. Raman spektrumu alınan noktalar.



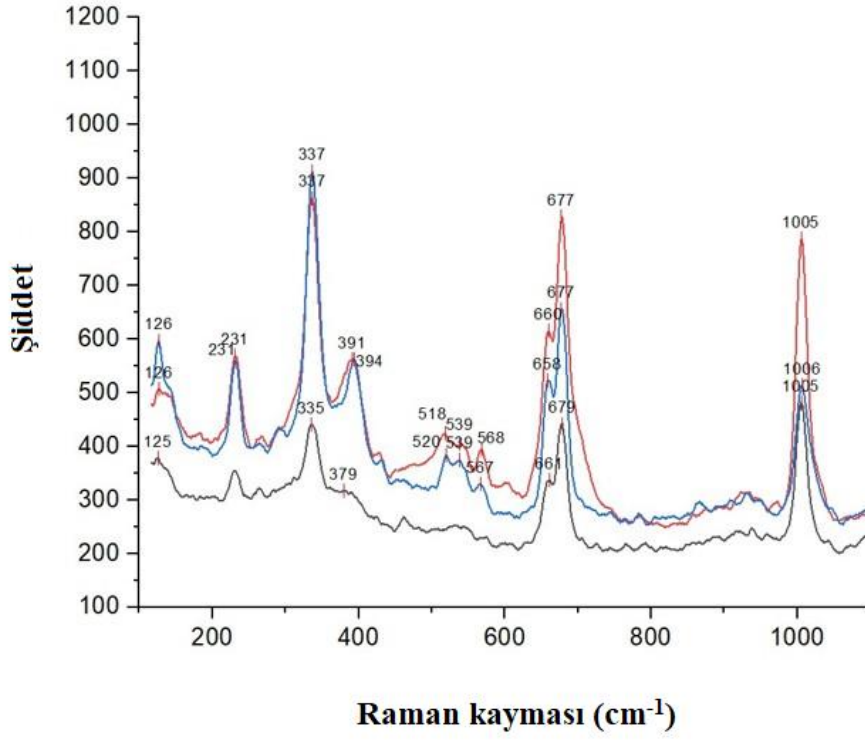
Şekil 4.5. Haritalama yöntemi ile oluşan ortalama spektrum.



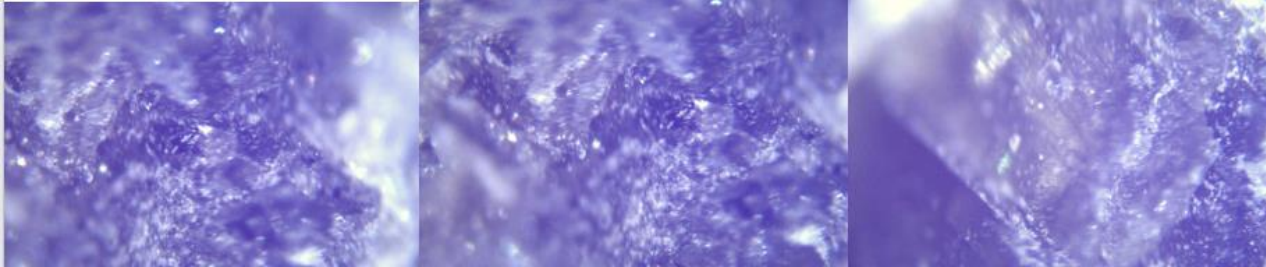
Şekil 4.6. Haritalama işlemi için seçilen bölge.

AAT-01'e ait bir diğer örnek ise İspanya, Bizkaia, University of Basque Country, Fen ve Teknoloji Fakültesi, Analitik Kimya Bölümü'nde, Prof. Dr. Kepa CASTRO gözetiminde Renishaw inVia Raman Spektrometre ile incelenmiştir. Cihazın kalibrasyonu için öncelikle silikon kullanılmış cihaz hem 532 nm (yeşil) hem de 785 nm (kırmızı) lazer için optimize edilmiştir. 532 ve 785 nm'lik lazerler için kullanılan kırınım ağları sırasıyla 1800 ve 1200 çizgi/mm'dir. Öncelikle AAT-01'e ait örnek 785 nm değerinde incelenmiştir. Örnek çıplak göz ile bakıldığında fark edilebilecek kapanımlar, koyu ve açık noktalar ve kristal içerikler olarak ayrılmış ve çeşitli lazer güçlerinde ve objektiflerde incelemeler yapılmıştır. Siyah noktalar üzerinden toplanan spektrumlar Şekil 4.7'de ve bu noktalara ait görseller Şekil 4.8'de verilmiştir.



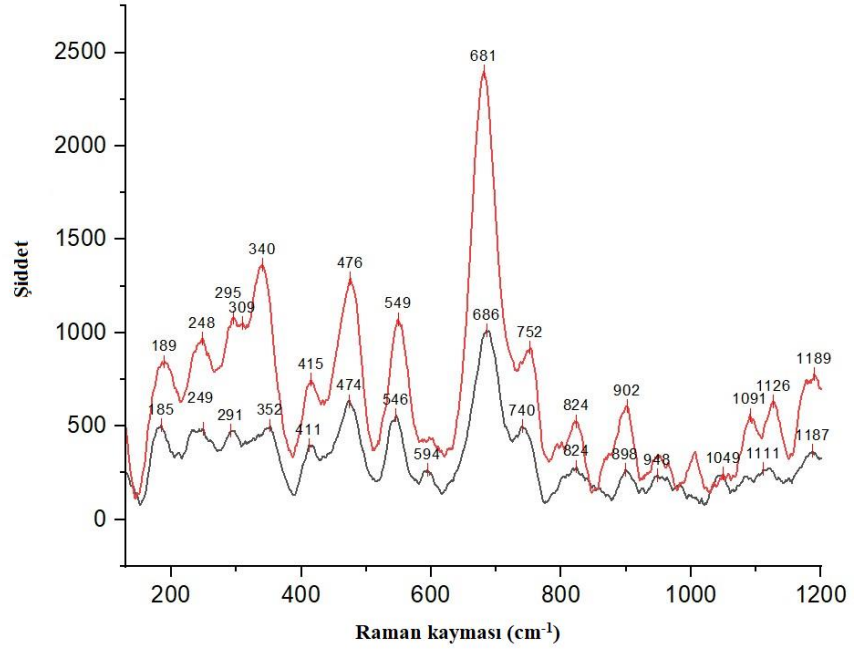


Şekil 4.9. Kristal noktalara ait Raman spektrumları.

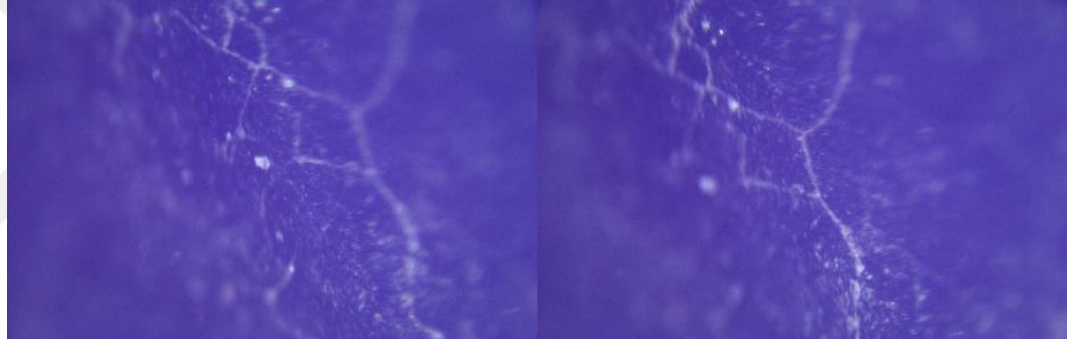


Şekil 4.10. Spektrum alınan kristal noktalar.

Örneğin kenar kısmına ait dış yanık kabuk (fusion crust) bölgesinden alınan Raman spektrumları Şekil 4.11'de ve bu bölgelere ait görseller Şekil 4.12'de verilmiştir.

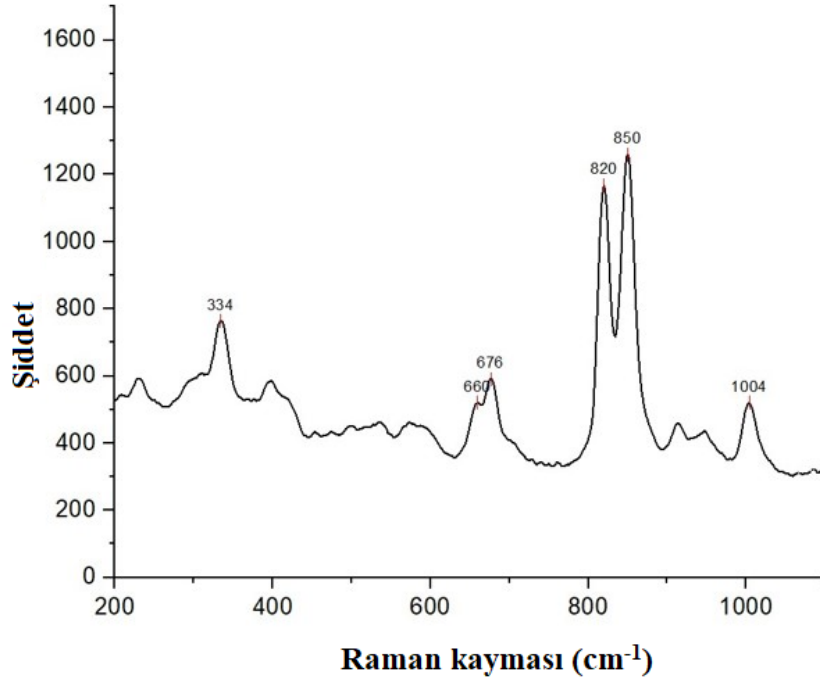


Şekil 4.11. Dış yanık kabuk bölgesine ait Raman spektrumları.

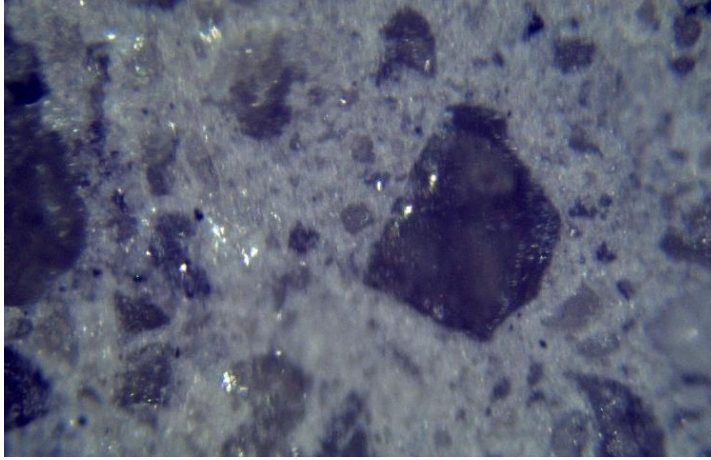


Şekil 4.12. Spektrum alınan dış yanık kabuk bölgeleri

Örnekte olivin kristali olabilecek bir bölgeden alınan spektrum Şekil 4.13'te ve bu bölgeye ait görsel Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Olivin kristaline ait Raman spektrumu.

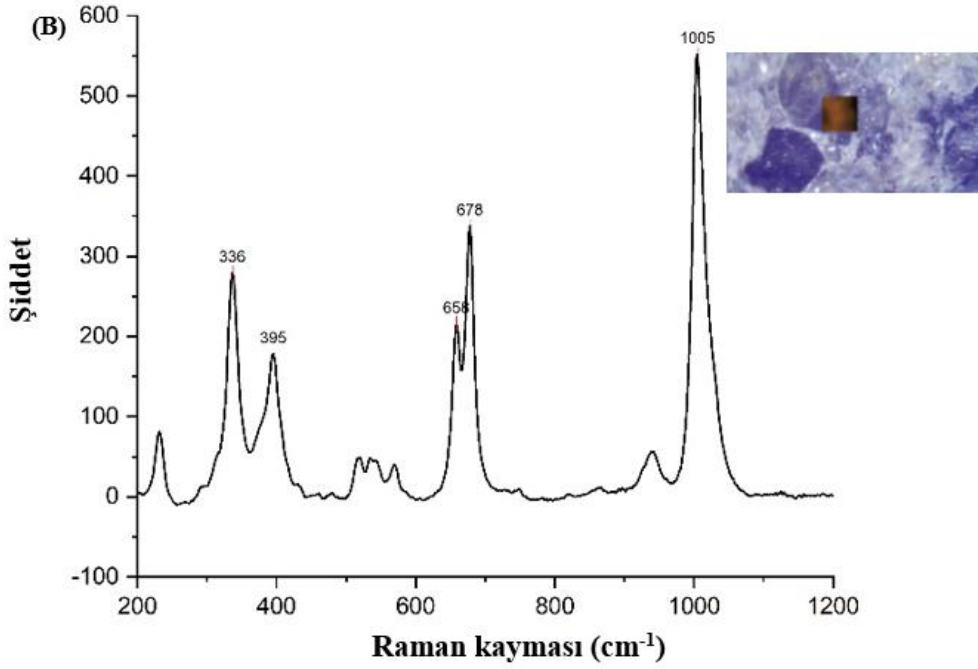
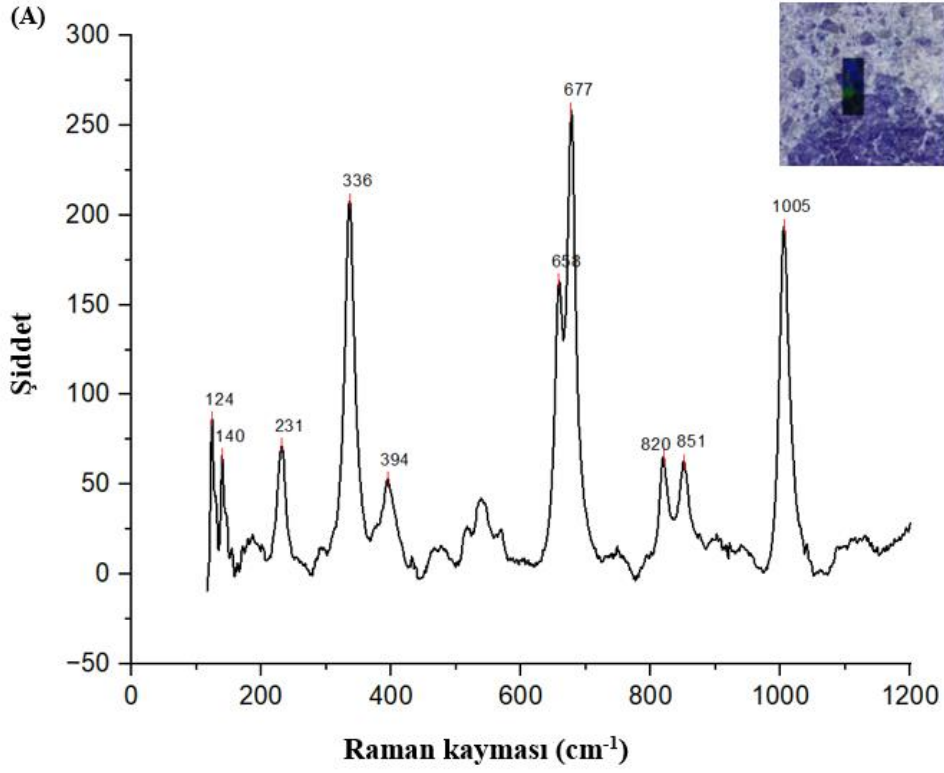


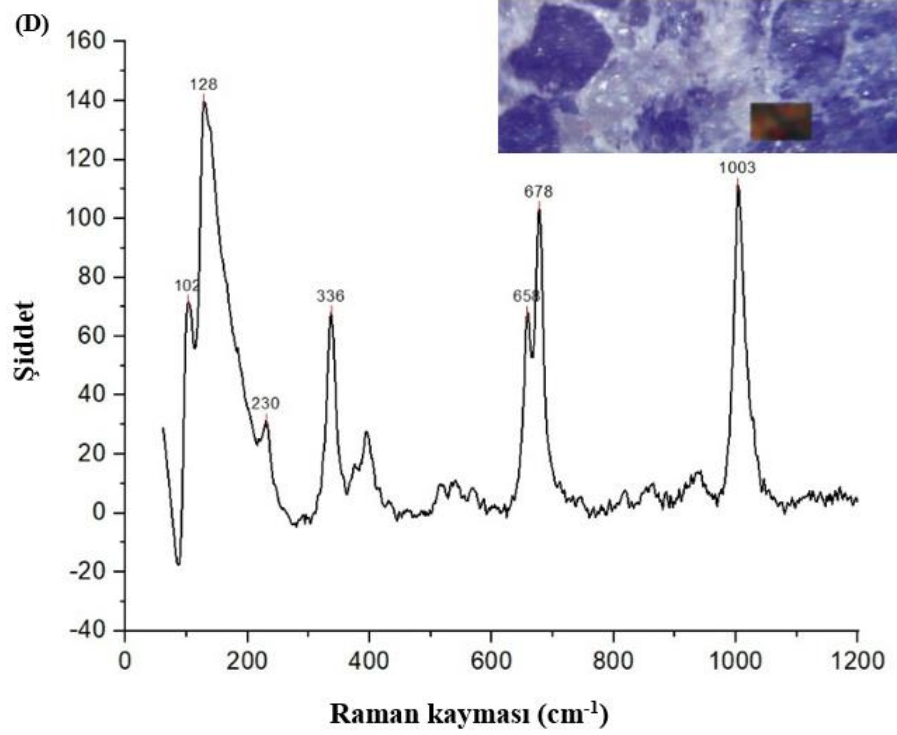
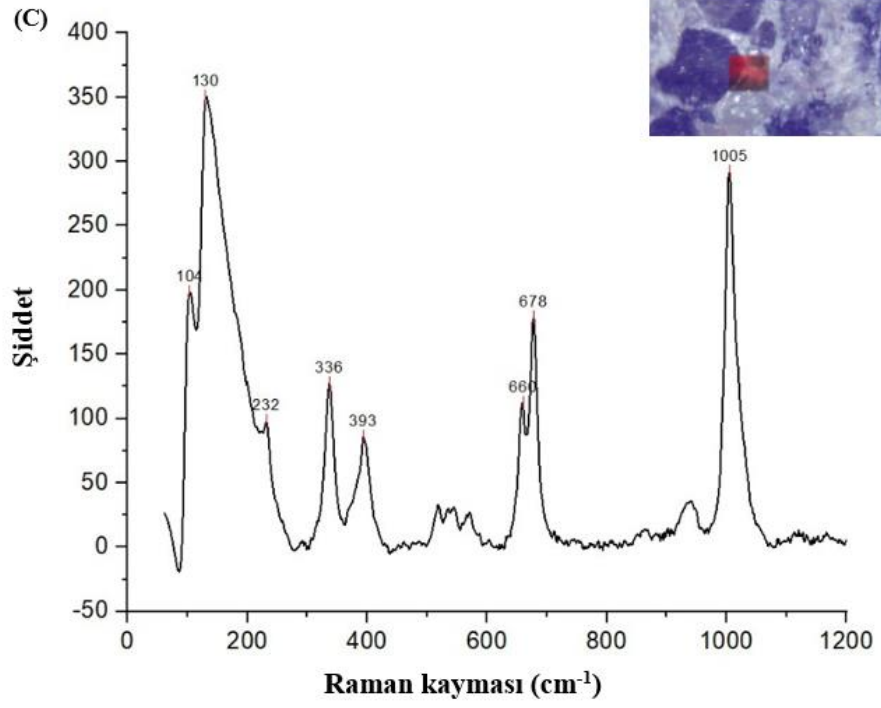
Şekil 4.14. Spektrum alınan olivin kristali.

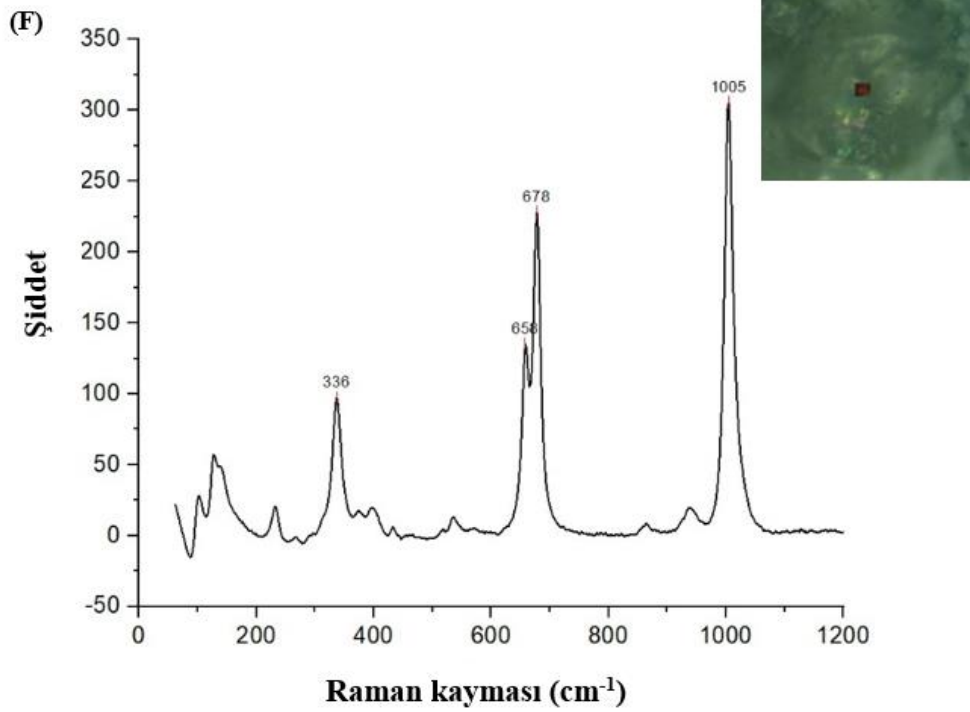
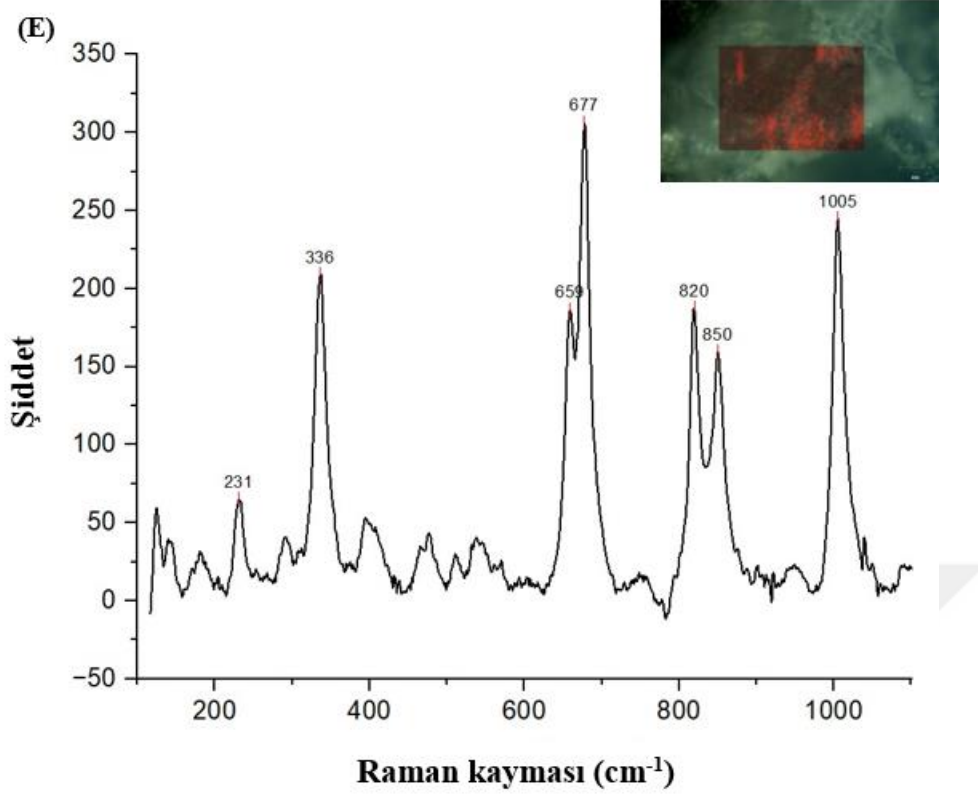
AAT-01 örneği haritalama analizleri 10 farklı alan seçilerek çeşitli dalga boyları ve objektifler kullanılarak tamamlanmıştır. Haritalama işlemine ait spektrumlar ve örnek üzerinde incelenen bölgeler Şekil 4.15'te (A-J) verilmiştir. Haritalama işlemi için seçilen parametreler sırasıyla (A) için; 785 nm dalga boyu lazer, 4s maruziyet süresi, %10 lazer gücü, 5x objektif, 2 accumulations, (B) için; 532 nm dalga boyu lazer, 5s maruziyet süresi, %5 lazer gücü, 20x objektif, (C); 532 nm dalga boyu lazer, 5s maruziyet süresi, %5 lazer gücü, 20x objektif, (D); 532 nm dalga boyu

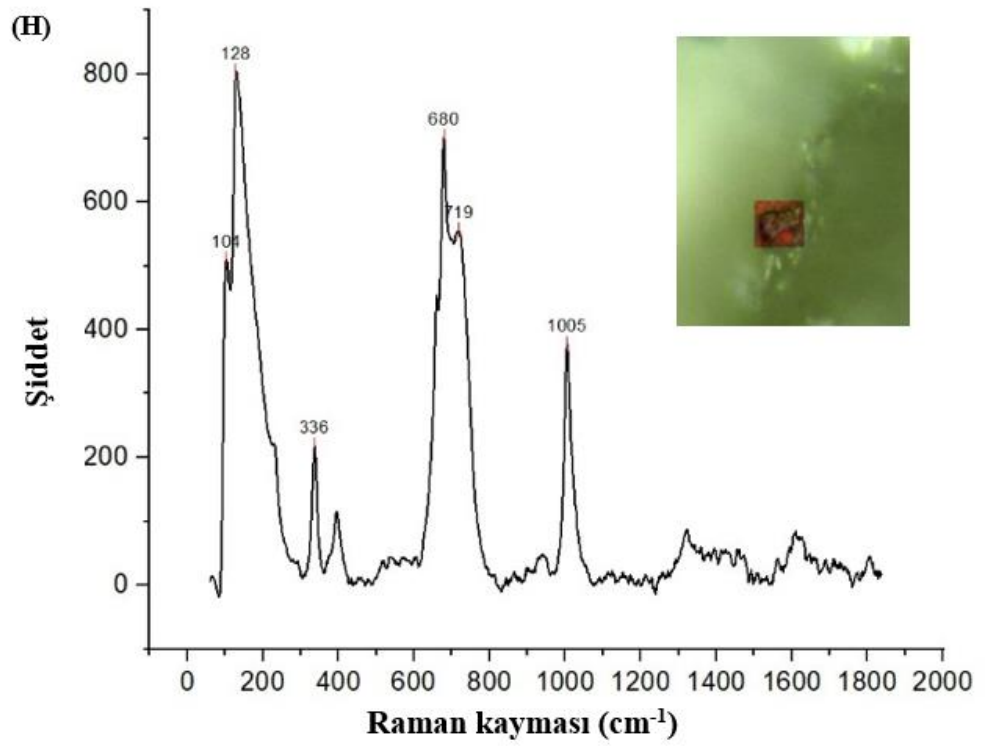
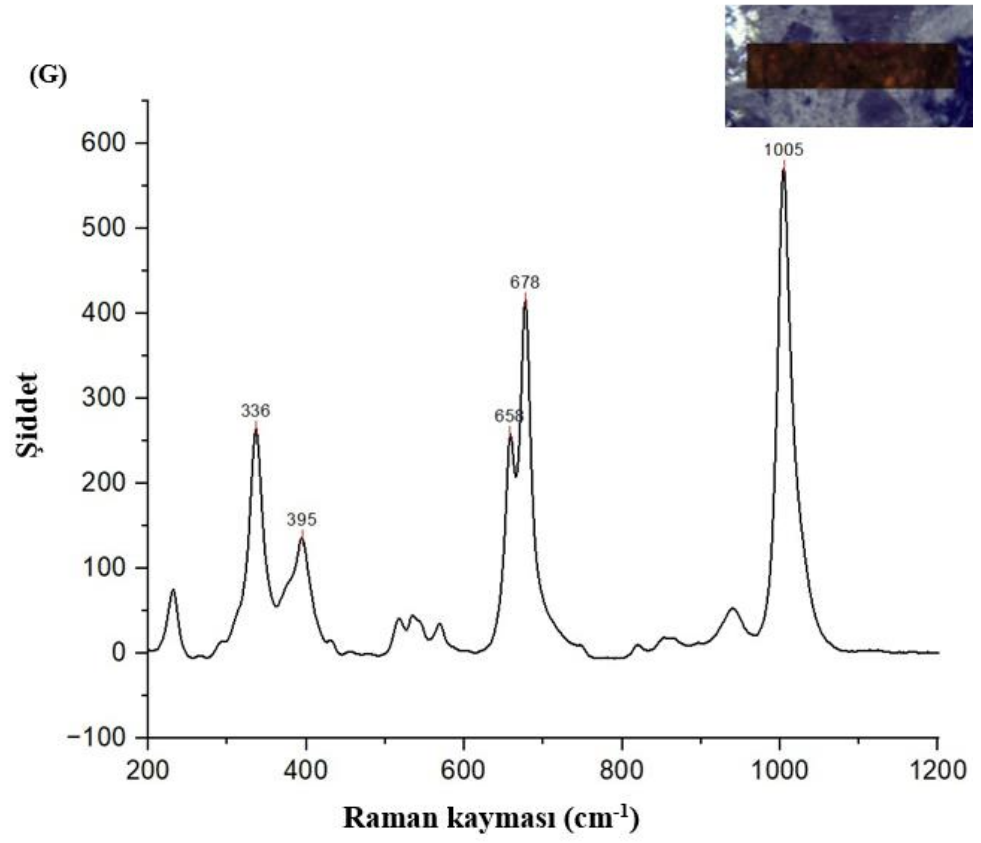
lazer, 5s maruziyet süresi, %5 lazer gücü, 20x objektif, (E); 785 nm dalga boyu lazer, 3s maruziyet süresi, %10 lazer gücü, 20x objektif, (F); 532 nm dalga boyu lazer, 3s maruziyet süresi, %5 lazer gücü, 20x objektif, (G); 532 nm dalga boyu lazer, 3s maruziyet süresi, %10 lazer gücü, 5x objektif, 3 accumulations, (H); 532 nm dalga boyu lazer, 3s maruziyet süresi, %5 lazer gücü, 50x objektif, 3 accumulations, (I); 532 nm dalga boyu lazer, 5s maruziyet süresi, %5 lazer gücü, 50x objektif, 2 accumulations ve (J); 532 nm dalga boyu lazer, 5s maruziyet süresi, %5 lazer gücü, 50x objektif, 2 accumulations değerlerindedir.

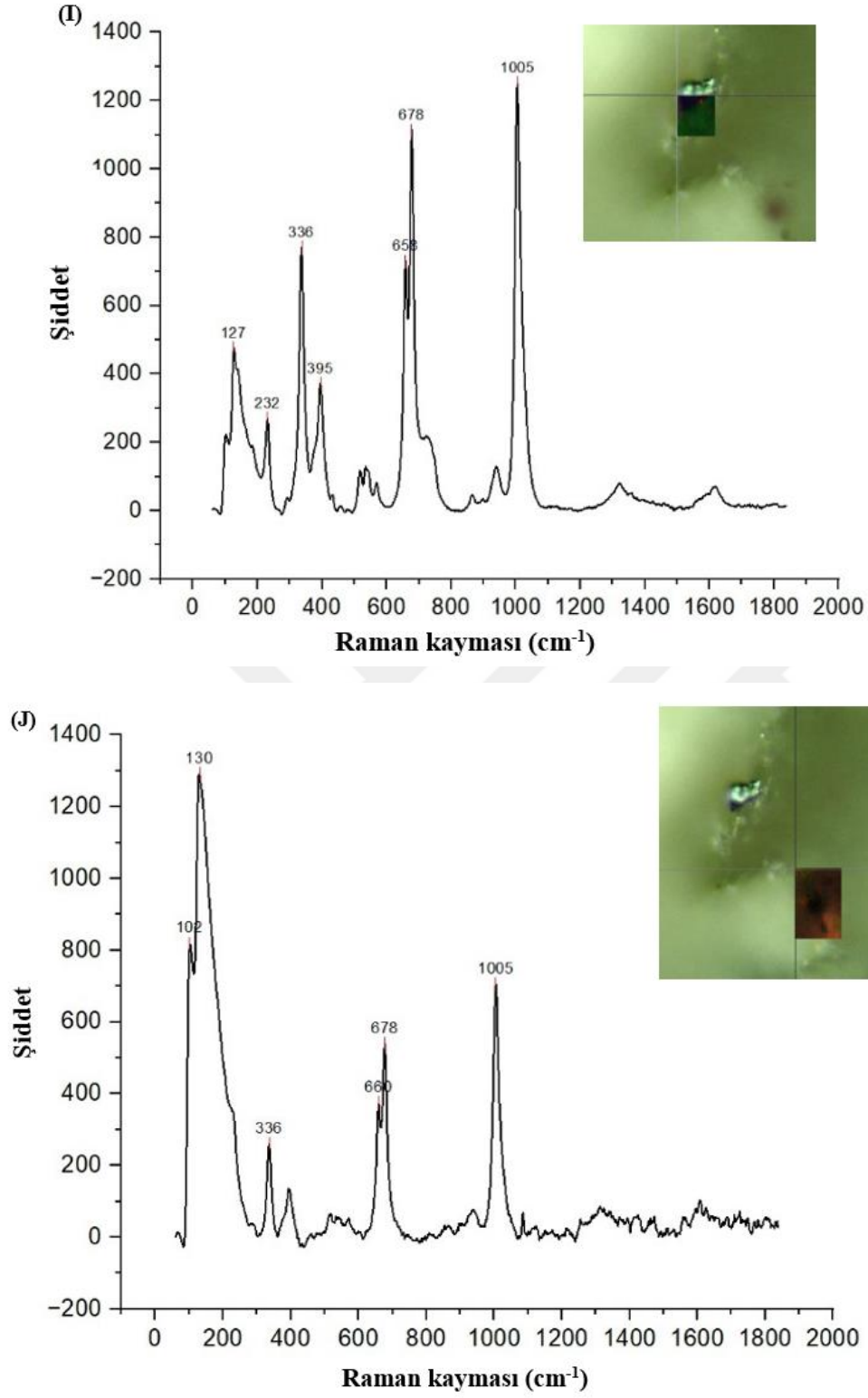








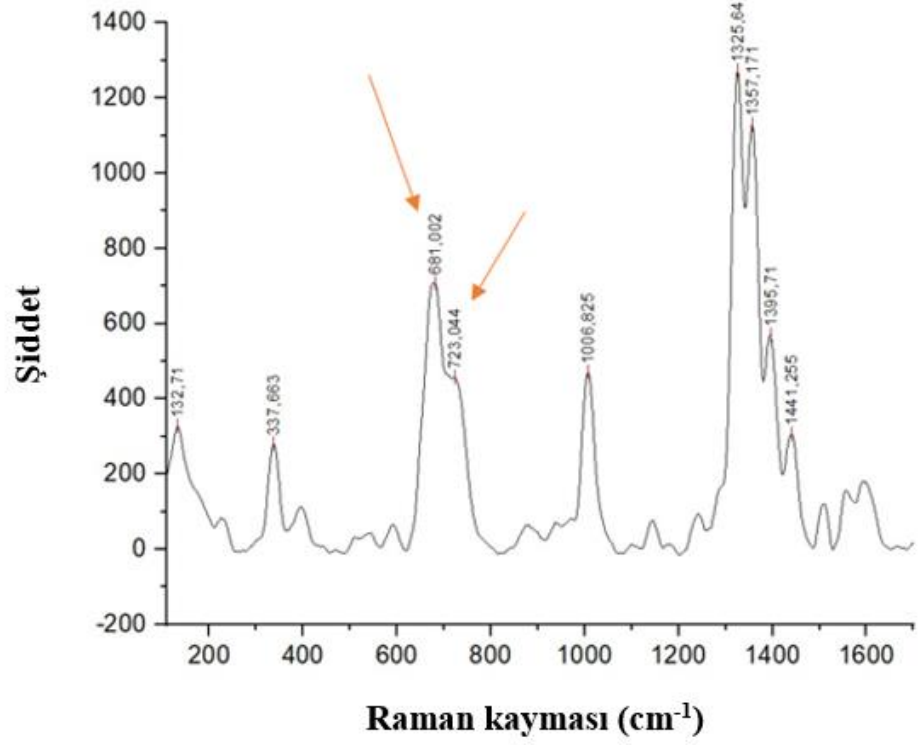




Şekil 4.15. Seçilen bölgeler için Raman spektrumları ve görseller.

### 4.2.1 Kromit

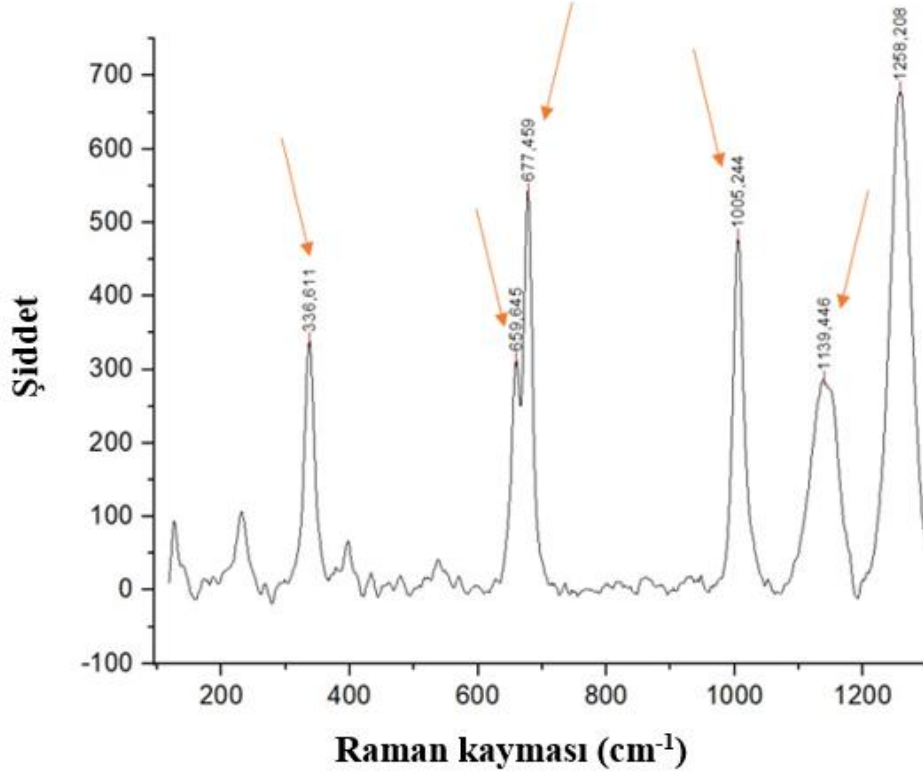
Örnek haritalama işlemi sırasında elde edilen spektrum Şekil 4.16'da verilmiştir. Spektrum karakteristik olarak  $681\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde yoğun bir pike ve ona eşlik eden  $723\text{ cm}^{-1}$  omuz pikine sahiptir. Ayrıca  $337$  ve  $1006\text{ cm}^{-1}$  değerlerinde de belirgin pikler gözlenmiştir.



Şekil 4.16. Kromit ile ilişkilendirilen spektrum.

## 4.2.2 Piroksen

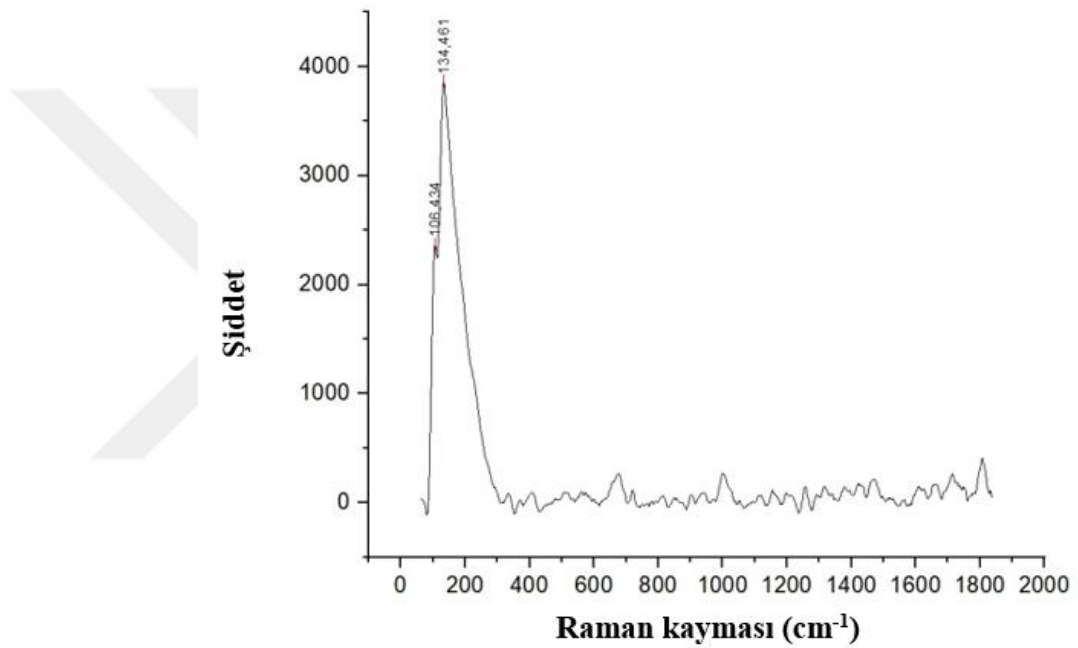
Örnek haritalama işlemi sırasında elde edilen bir diğer spektrum Şekil 4.17’de verilmiştir. Spektrum karakteristik olarak 336, 659, 677, 1005 ve 1139  $\text{cm}^{-1}$  bölgelerinde yoğun piklere sahiptir.



Şekil 4.17. Enstatit ile ilişkilendirilen spektrum.

### 4.2.3 Titanyum Oksit

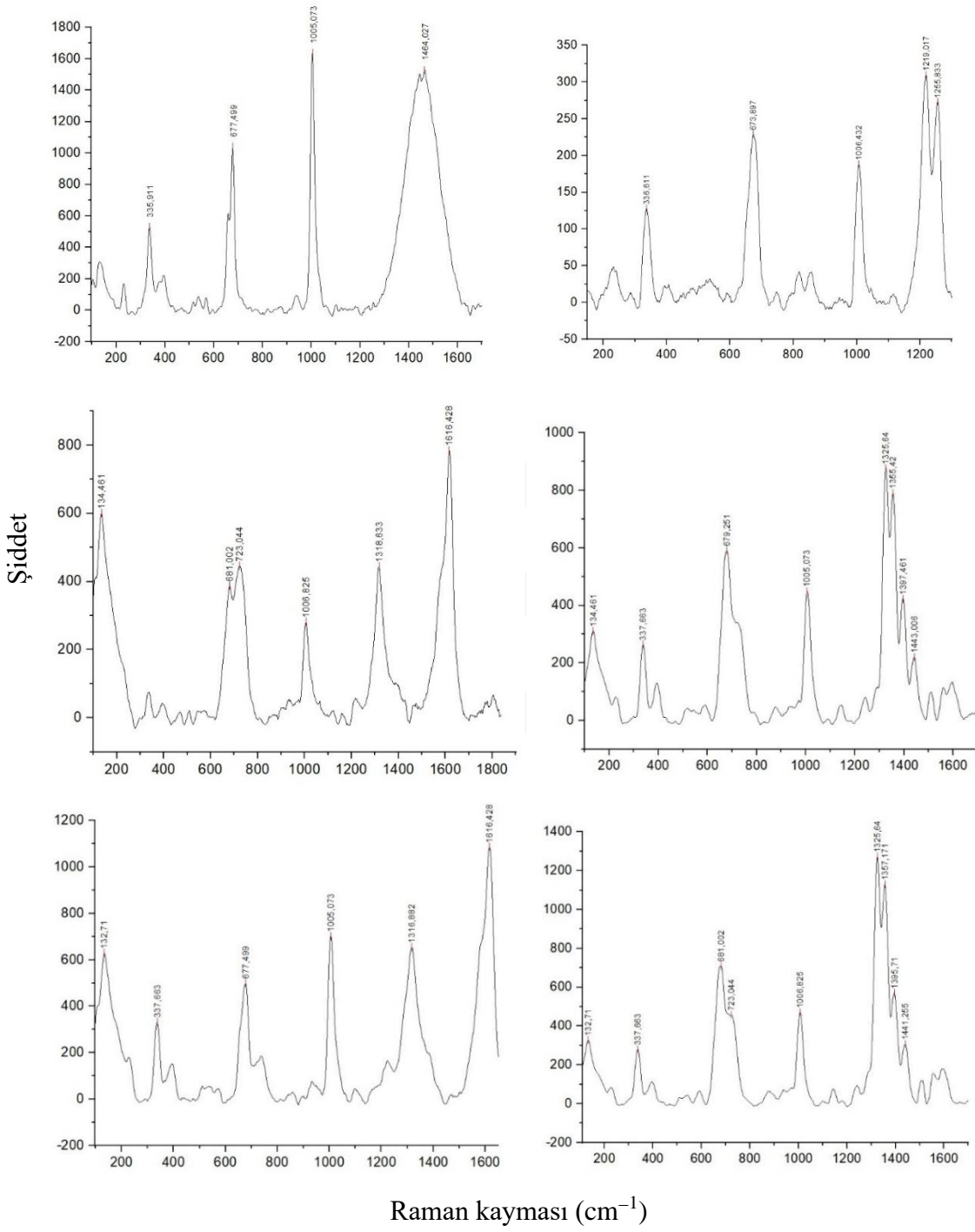
Örnek haritalama analizi ve tekli spektrumların birçoğunda elde edilen  $\sim 106,434 \text{ cm}^{-1}$  bölgelerindeki pikler Şekil 4.18'deki gibidir. Belirtilen pikler en yakın olarak titanyum oksit mineralleri ile eşleşme göstermektedir. Üç çeşit kristalik modifikasyonda bulunan (anataz, rutil ve brookite) titanyum oksit minerallerinin genellikle  $144 \text{ cm}^{-1}$  bölgelerinde yoğun pikler verdiği bilinmektedir (Balachandran and Eror, 1982).



Şekil 4.18. Titanyum oksit ile ilişkilendirilen spektrum.

### 4.2.4 Tanımlanamayan bulgular

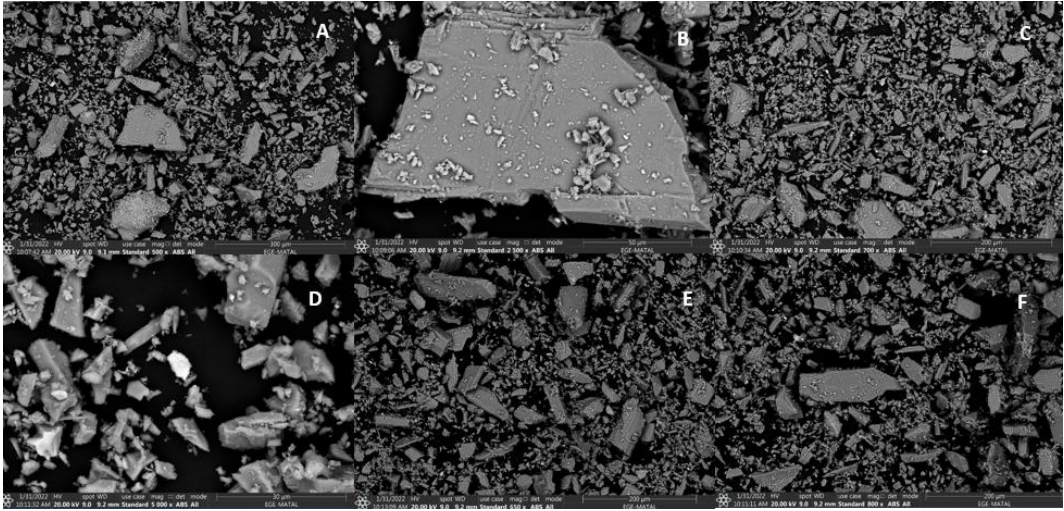
Raman haritalama analizleri sırasında ve tekli noktalardan alınan çeşitli spektrumlarda, özellikle  $1000 \text{ cm}^{-1}$  sonrası bölgede tanımlanamayan Raman pikleri bulunmaktadır. Bu piklerin bulunduğu spektrumlar Şekil 4.19'da sunulmuştur



Şekil 4.19. Tanımlanamayan Raman spektrumları.

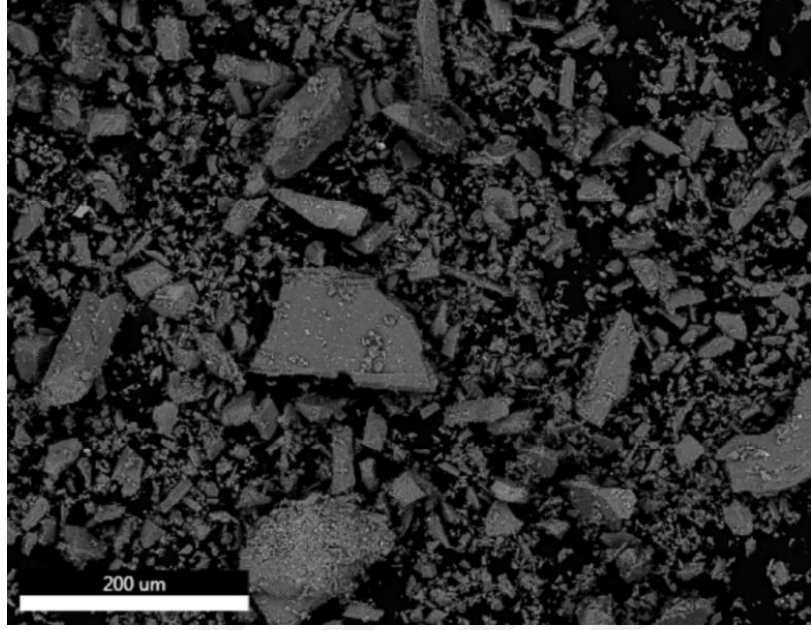
### 4.3. SEM-EDS BULGULARI

Toz numuneler SEM görüntüleme için iletken hale getirilmesi için 6 nm altın-paladyum ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi Leica EM ACE600 (Leica Microsystems, Almanya) püskürtmeli kaplayıcı kullanılarak vakum altında uygulanmıştır. Bu işlem argon gazı ile yaklaşık 10 dakika sürmüştür. Görüntüleme çözünürlüğü ve hızlanma voltajı sırasıyla 0,9 nm ve 1 kV'dir. SEM/EDS görüntüleme, Schottky Alan Emisyon Tabancası ile donatılmış Thermo Scientific Apreo S LoVac SEM (ThermoFisher Scientific, ABD) tarafından gerçekleştirilmiştir. Görüntüleri toplamak için yüksek vakum modu seçilmiştir. Ölçümler için 30 kV hızlanma potansiyeli ve maksimum 50 nA akım demeti kullanılmıştır. Deneylerde her hücreden elementel spektrumları analiz etmek için kullanılan EDS detektörü EDAX'tır (AMETEK, ABD). Numuneler için çalışma mesafesi 9.1 ve 9.2 mm ve spot büyüklüğü 9'dur. Farklı büyütme ölçeklerinde elde edilmiş SEM görüntüleri Şekil 4.20'de verilmiştir. Örneklerin büyütme ölçeği sırasıyla A; 500x, B; 2500x, C; 700x, D; 5000x, E; 650x ve F; 800x'dir.

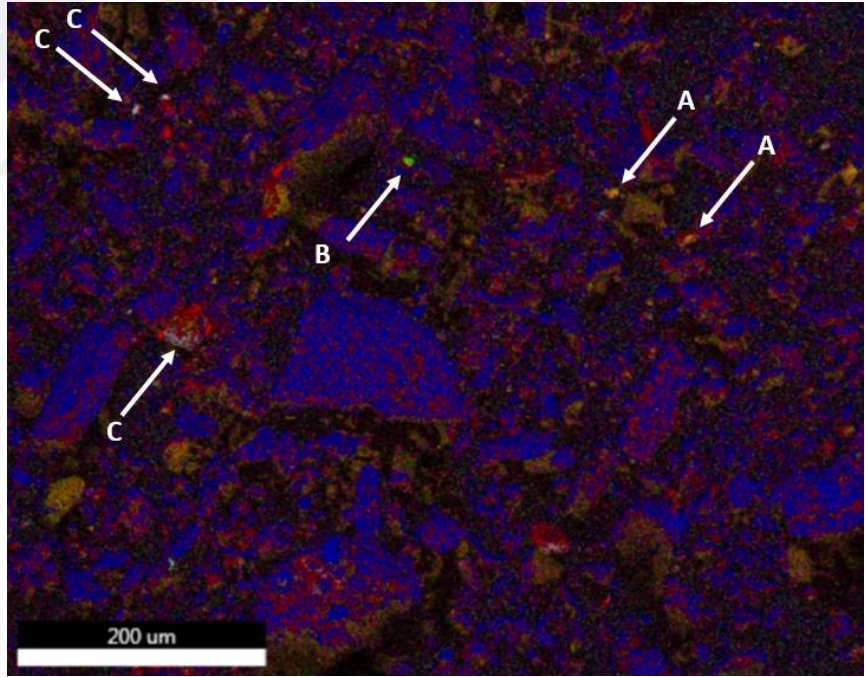


Şekil 4.20. Farklı büyütme ölçekleri kullanılarak çekilmiş genel SEM görüntüleri.

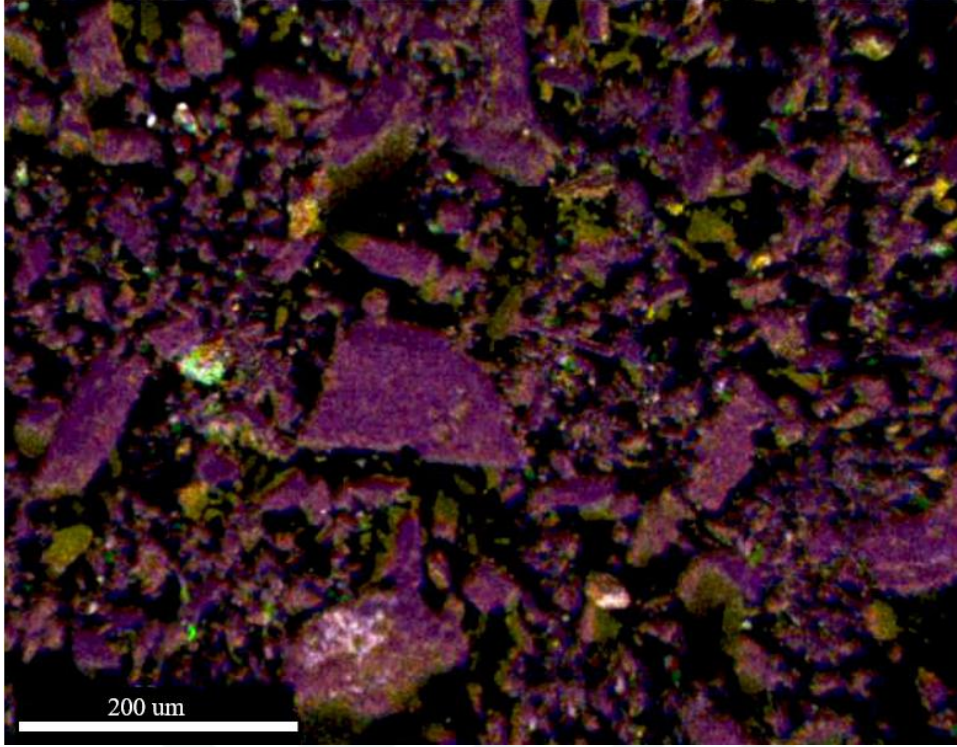
Toz numuneye ait EDS görüntüleri 500 ölçek büyütmede, 20 kV ve 125.1 eV çözünürlükte incelenmiştir. Kompozit görsellerin oluşturulması için ImageJ v.1.53s ve oluşturulan görsellerin işlenmesi için Adobe Photoshop v.21.1.3 programları kullanılmıştır. Görsellerin işlenmesi sürecinde parlaklık, tonlama, doygunluk ve kontrast ayarlamaları Adobe Photoshop programında tamamlanmıştır. Toz numuneye ait SEM görüntüsü Şekil 4.21'de (Şekil 4.20-a'daki görüntünün büyütülmüş hali) verilmiştir. EDS ile ortaya çıkan elementlerin örnek içinde dağılımı Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Şekilde her element farklı renk ile temsil edilmiştir ve renk yoğunluğu elementin örnek içindeki miktarı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Örneğin çoğunluğunu oluşturan başlıca elementlere ait yüzdeler Mg %16, Si %34 ve Fe %15'tir. Bu elementlere ait EDS görüntüsü Şekil 4.23'teki gibidir. Ayrıca her elementin örnek içinde kütlece ve yüzdelik dağılımları Tablo 4.1'de ve karşılık gelen EDS spektrumu ise Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.21. Toz numuneye ait SEM görüntüsü.



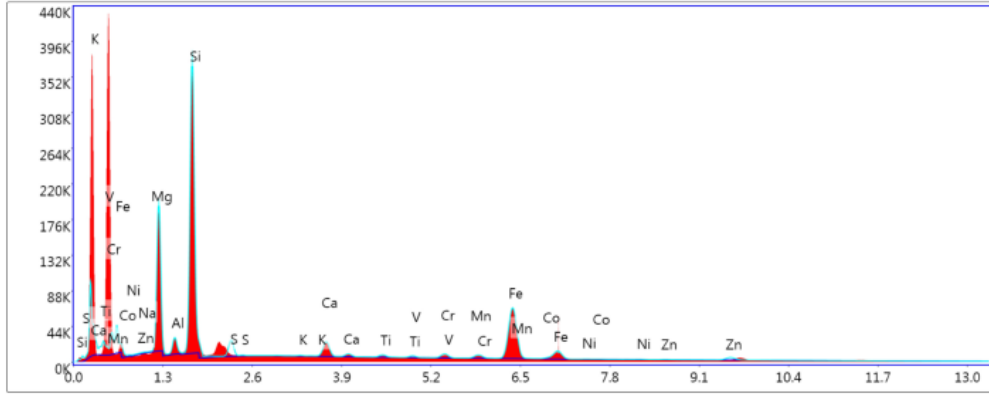
Şekil 4.22. SEM-EDS sonucu elementel dağılım (lacivert: Mg, kırmızı: Si, turuncu: Fe, yeşil: S).



Şekil 4.23. Mg-Fe-Si elementlerinin örnek içinde dağılımı (Mg-mavi, Fe-sarı, Si-kırmızı).

Tablo 4.1. Elementlerin örnek içinde kütlece ve atomik yüzdeler dağılımları.

Element	Kütlece yüzde	Atomik yüzde
NaK	0.07	0.10
MgK	20.25	27.36
AlK	2.29	2.79
SiK	38.00	44.44
S K	2.70	2.76
K K	0.12	0.10
CaK	3.59	2.94
TiK	0.69	0.48
V K	0.47	0.30
CrK	1.45	0.92
MnK	1.29	0.77
FeK	27.79	16.35
CoK	0.73	0.41
NiK	0.24	0.13
ZnK	0.32	0.16

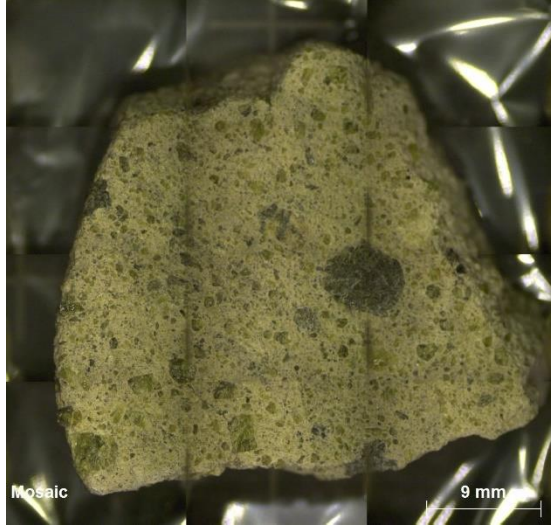


Şekil 4.24. Elementlerin örnek içinde dağılımlarını gösteren EDS spektrumu.

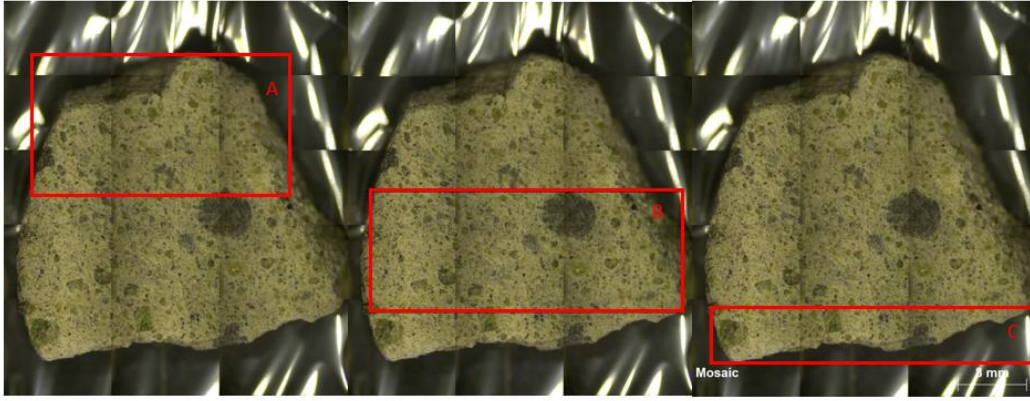
#### 4.4 XRF Bulguları

XRF analizleri İspanya, University of Basque Country 'de Bruker marka M4 TORNADO XRF cihazı kullanılarak tamamlanmıştır. Ölçümlerden önce cihazın kalibre edilmesi için zirkonyum örnek 20 µm spot size kullanılmıştır. Detektör tipi XFlash430'tir. Daha sonra örnek Mylar şeffaf zemin üzerine yerleştirilerek vakum yapılması sağlanmıştır. Mylar zemin kullanımı ile olası kontaminasyonlar engellenmiştir. 20 mbar vakum seviyesine indikten sonra analiz başlatılmıştır. Haritalama işlemi 40 keV ile 8 zaman/piksel (2,5 mm/s) ve 20 m spot ebatı kullanılarak 2 devirde tamamlanmıştır. Kompozit görsellerin oluşturulması için ImageJ v.1.53s ve oluşturulan görsellerin işlenmesi için Adobe Photoshop v.21.1.3 programları kullanılmıştır. Görsellerin işlenmesi sürecinde parlaklık, tonlama, doygunluk ve kontrast ayarlamalı Adobe Photoshop programında tamamlanmıştır.

Örnek haritalama işleminde örnek önce üç kısma bölünerek daha sonra da bütün olarak incelenmiştir. İncelenen örneğin tamamı Şekil 4.25'te ve incelenen kısımlar (A, B ve C) Şekil 4.26'da verilmiştir. Üç bölünerek incelenen kısımlar için çözünürlük 5x5 birim olarak seçilmiştir.

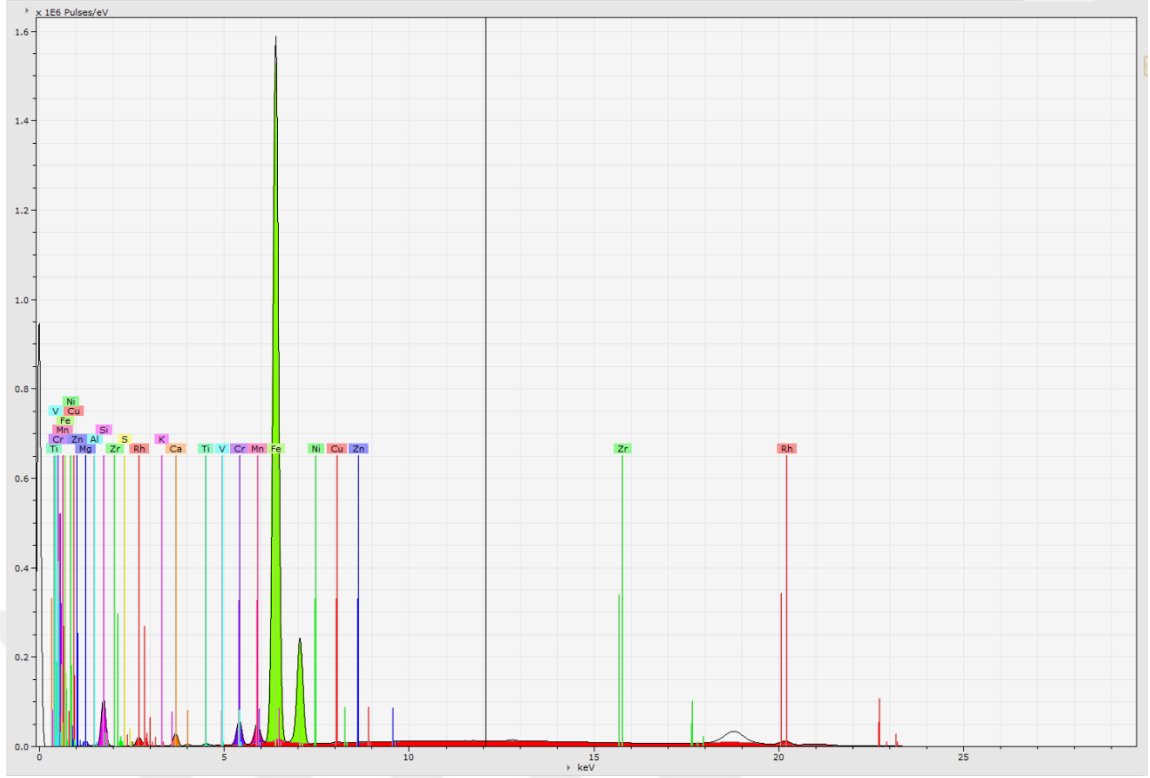


Şekil 4.25. AAT-01 XRF incelemesi örneği.



Şekil 4.26. XRF haritalama için incelenen bölümler.

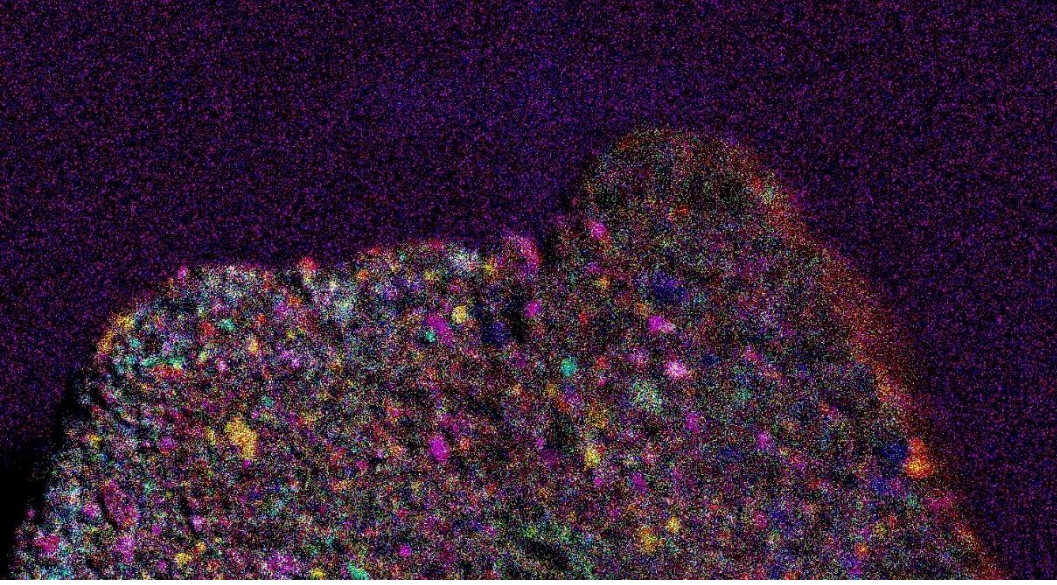
İncelenen ilk kısımda (A) bulunan elementlerin dağılımı grafiği Şekil 4.27’de ve yüzdelik dağılımları Tablo 4.2’de verilmiştir. Ayrıca her elemente ait dağılımlar Şekil 4.28’deki gibidir. Görselde her element farklı bir renk ile temsil edilmiştir (Cr: kırmızı, Cu: yeşil, K: mavi, Ni: fuşya, S: cam göbeği, Ti: sarı ve Al:gri) ve renk yoğunluğu elementin miktarı ile doğru orantılı artmaktadır.



Şekil 4.27. İlk kısım (A) elementel dağılımı .

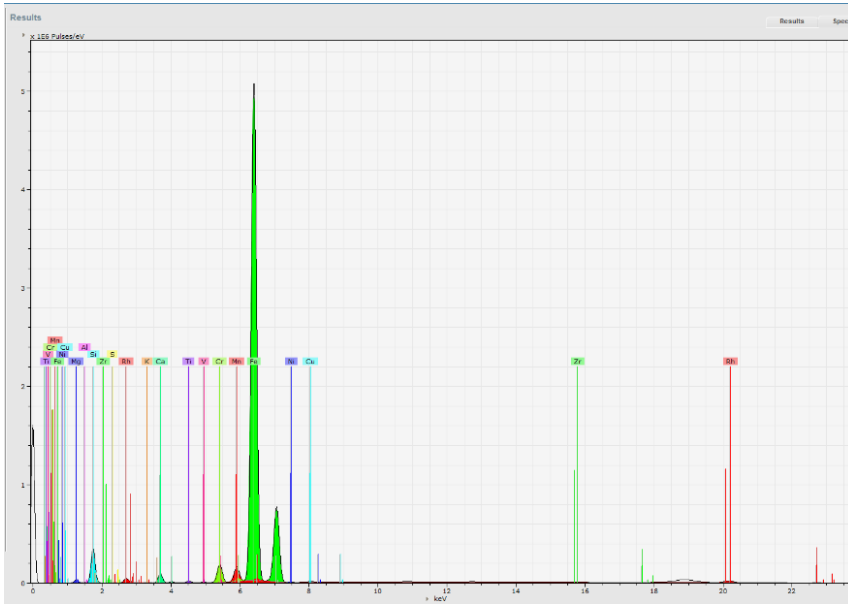
Tablo 4.2. İlk kısım (A) için yüzdelik elementel dağılımı.

Element	Atom Numarası	Kütlece %	Atomik %
Rh	45	0.00	0.00
Zr	40	0.00	0.00
Mg	12	23.03	32.05
Al	13	0.72	0.90
Si	14	34.05	40.99
S	16	0.08	0.08
Ca	20	1.63	1.37
Ti	22	0.16	0.12
Cr	24	1.22	0.79
Mn	25	1.01	0.62
Fe	26	37.94	22.97
Cu	29	0.10	0.05
Ni	28	0.01	0.00
Zn	30	0.01	0.01
V	23	0.02	0.01
K	19	0.03	0.02
Toplam		100.00	100.00



Şekil 4.28. İlk kısım (A) için elementel dağılımı gösteren kompozit görüntü.

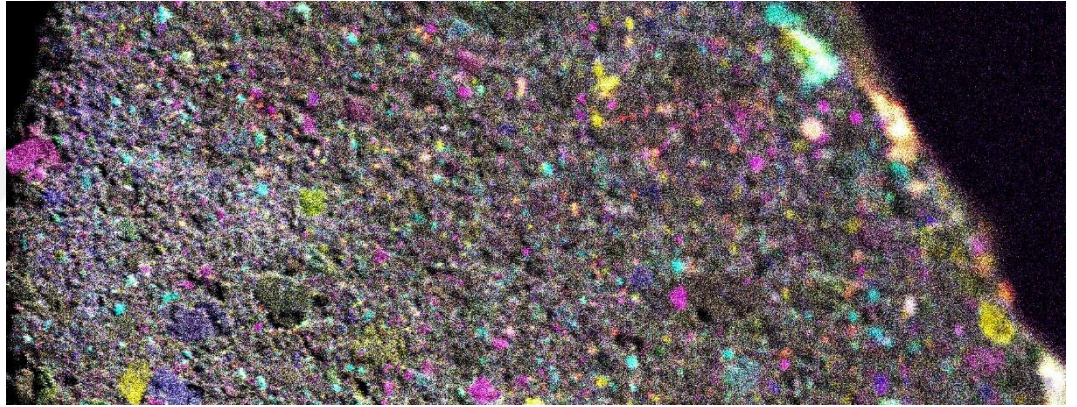
İncelenen ikinci kısımda (B) bulunan elementlerin dağılımı grafiği Şekil 4.29'da ve yüzdelik dağılımları Tablo 4.3'te verilmiştir. Ayrıca her elemente ait dağılımları gösteren kompozit görüntü Şekil 4.30'da verilmiştir. Görselde her element farklı bir renk ile temsil edilmiştir (Cr: kırmızı, Cu: yeşil, K: mavi, Ni: fuşya, V: cam göbeği, Ti: sarı ve Al: gri) ve renk yoğunluğu elementin miktarı ile doğru orantılı artmaktadır.



Şekil 4.29. İkinci kısım (B) için elementel dağılım.

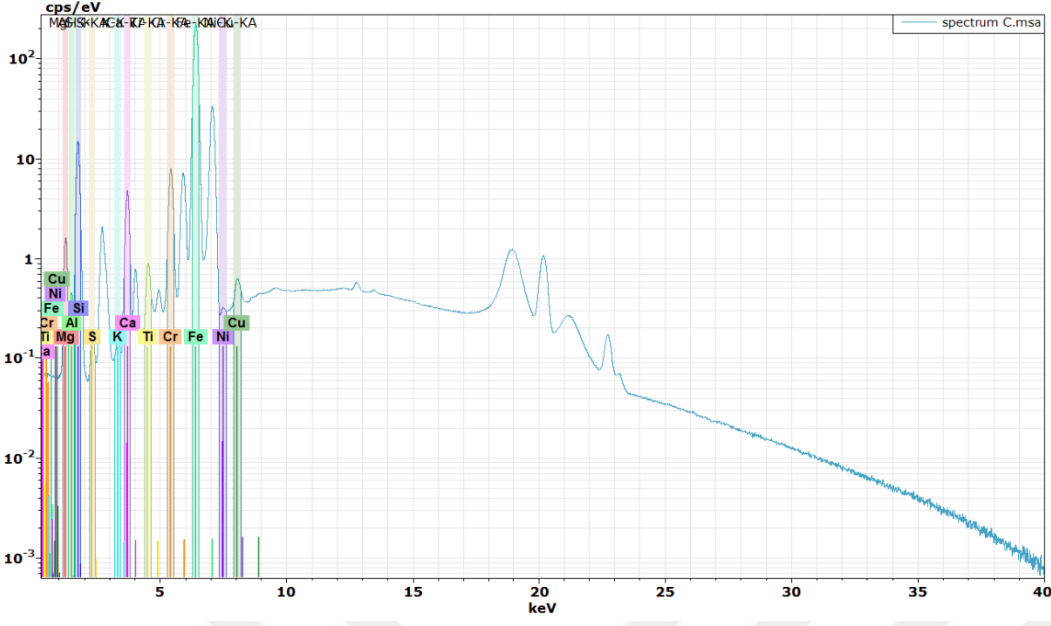
Tablo 4.3. İkinci kısım (B) yüzdelik elementel dağılım.

<i>Element</i>	<i>Atom Numarası</i>	<i>Kütlece %</i>	<i>Atomik %</i>
<i>Rh</i>	45	0.00	0.00
<i>Zr</i>	40	0.00	0.00
<i>Mg</i>	12	22.76	31.68
<i>Al</i>	13	0.86	1.07
<i>Si</i>	14	34.09	41.07
<i>S</i>	16	0.13	0.13
<i>Ca</i>	20	1.65	1.40
<i>Ti</i>	22	0.17	0.12
<i>Cr</i>	24	1.29	0.84
<i>Mn</i>	25	0.99	0.61
<i>Fe</i>	26	37.89	22.96
<i>Cu</i>	29	0.08	0.05
<i>Ni</i>	28	0.01	0.00
<i>V</i>	23	0.02	0.02
<i>K</i>	19	0.07	0.06
<b>Toplam</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>



Şekil 4.30. İkinci kısım (B) için elementel dağılımı gösteren kompozit görüntü.

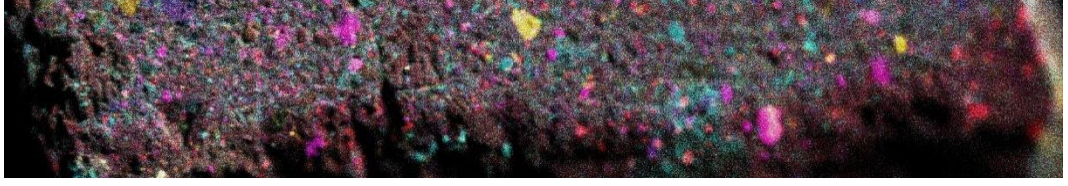
İncelenen üçüncü kısımda (C) bulunan elementlerin dağılımı grafiği Şekil 4.31’de ve yüzdelik dağılımları Tablo 4.4’te verilmiştir. Ayrıca her elemente ait dağılımlar Şekil 4.32’deki gibidir. Görselde her element farklı bir renk ile temsil edilmiştir (Cr: kırmızı, Cu: yeşil, K: mavi, V: fuşya, S: cam göbeği, Ti: sarı ve Al: gri) ve renk yoğunluğu elementin miktarı ile doğru orantılı artmaktadır.



Şekil 4.31. Üçüncü kısım (C) için elementel dağılım.

Tablo 4.4. Üçüncü kısım (C) yüzdelik elementel dağılım

<i>Element</i>	<i>Atom Numarası</i>	<i>Kütlece %</i>	<i>Atomik %</i>
<i>Rh</i>	45	0.00	0.00
<i>Zr</i>	40	0.00	0.00
<i>Mg</i>	12	23.23	31.09
<i>Al</i>	13	1.01	1.28
<i>Si</i>	14	33.75	40.86
<i>S</i>	16	0.07	0.08
<i>Ca</i>	20	1.94	1.65
<i>Ti</i>	22	0.17	0.12
<i>Cr</i>	24	1.23	0.81
<i>Mn</i>	25	1.00	0.62
<i>Fe</i>	26	38.46	23.41
<i>Cu</i>	29	0.08	0.04
<i>Zn</i>	30	0.01	0.00
<i>V</i>	23	0.03	0.02
<i>K</i>	19	0.03	0.02
<b>Toplam</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

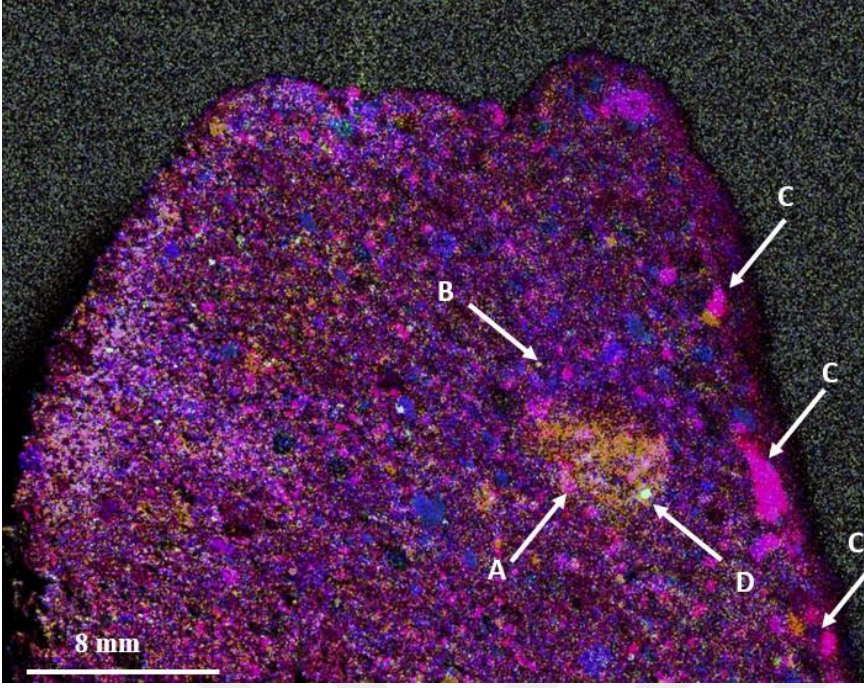


Şekil 4.32. Üçüncü kısım (C) için elementel dağılımı gösteren kompozit görüntü

Örnek haritalama işleminin devamı için örneğin tamamı ve örneğin kenar kısmını 50 keV ile 8 zaman/piksel ve 20  $\mu\text{m}$  spot ebatı kullanılarak tamamlanmıştır. Bu ölçümler için 9x9 birim çözünürlük seçilmiştir. Örneğin tamamına ait elementlerin yüzdelik dağılımları Tablo 4.5'te ve elementlere ait dağılımları Şekil 4.33'te verilmiştir. Görselde her element farklı bir renk ile temsil edilmiştir (Cr: kırmızı, Cu: yeşil, K: mavi, Ni: fuşya, S: sarı, Ti: fuşya ve Cl: cam göbeği) ve renk yoğunluğu elementin miktarı ile doğru orantılı artmaktadır.

Tablo 4.5. Örneğin tamamına ait yüzdelik elementel dağılım.

<i>Element</i>	<i>Atom Numarası</i>	<i>Kütlece %</i>	<i>Atomik %</i>
<i>Rh</i>	45	0.00	0.00
<i>Zn</i>	30	0.01	0.00
<i>Mg</i>	12	22.76	31.67
<i>Al</i>	13	0.89	1.12
<i>Si</i>	14	34.14	41.11
<i>S</i>	16	0.10	0.11
<i>Ca</i>	20	1.69	1.43
<i>Ti</i>	22	0.16	0.12
<i>Cr</i>	24	1.26	0.82
<i>Mn</i>	25	1.00	0.62
<i>Fe</i>	26	37.80	22.89
<i>Cu</i>	29	0.09	0.05
<i>Ni</i>	28	0.01	0.00
<i>V</i>	23	0.02	0.01
<i>K</i>	19	0.07	0.06
<b>Toplam</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

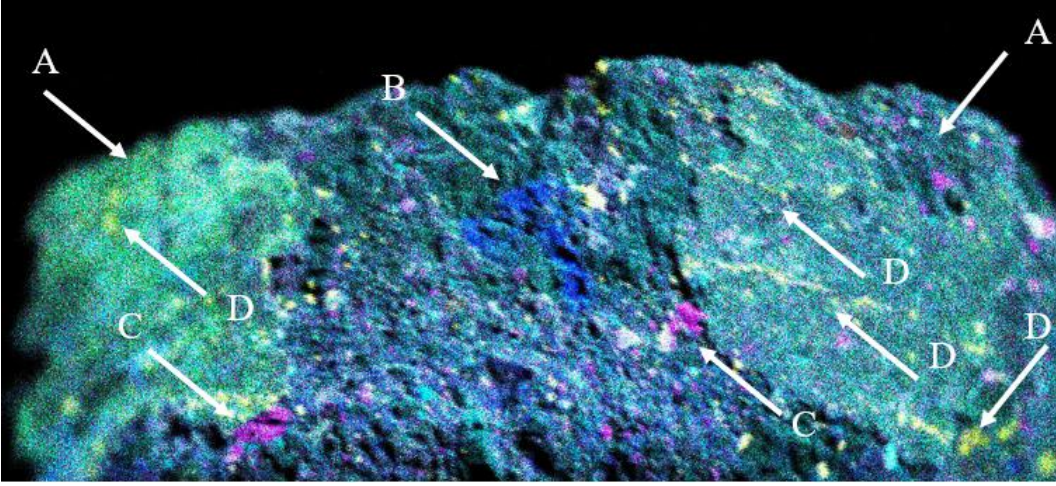


Şekil 4.33. Örneğin tamamına ait elementlerin dağılımı.

Örneğin dış yanık kabuk kısmı da dahil olan kenar kısmına ait elementlerin yüzdelik dağılımları Tablo 4.6’da ve elementlere ait dağılımları Şekil 4.34’te verilmiştir. Görselde her element farklı bir renk ile temsil edilmiştir (Cr: sarı, K: kırmızı, Ni: gri, S: mavi, Al: yeşil, Ti: cam göbeği ve V: fuşya) ve renk yoğunluğu elementin miktarı ile doğru orantılı artmaktadır.

Tablo 4.6. Örneğin kenar kısmına ait yüzdeler elementel dağılım

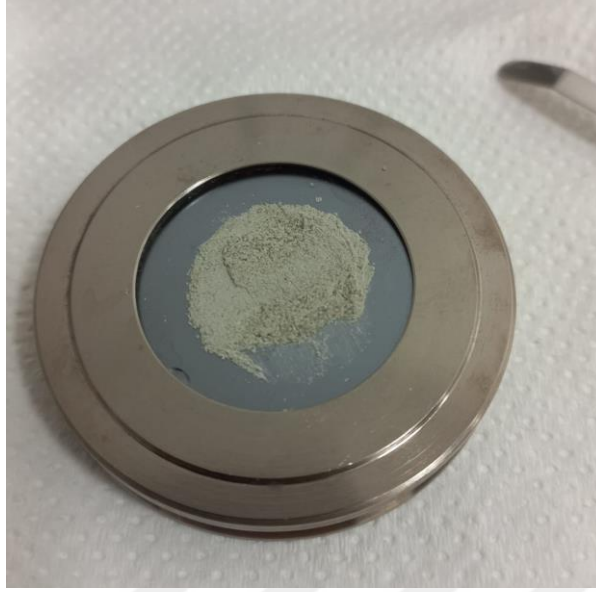
<i>Element</i>	<i>Atom Numarası</i>	<i>Kütlece %</i>	<i>Atomik %</i>
<i>Rh</i>	45	0.00	0.00
<i>Zr</i>	40	0.00	0.00
<i>Mg</i>	12	21.86	30.38
<i>Al</i>	13	1.53	1.92
<i>Si</i>	14	34.74	41.79
<i>S</i>	16	0.21	0.22
<i>Ca</i>	20	1.48	1.24
<i>Ti</i>	22	0.17	0.12
<i>Cr</i>	24	1.40	0.91
<i>Mn</i>	25	0.97	0.59
<i>Fe</i>	26	37.13	22.46
<i>Cu</i>	29	0.07	0.04
<i>Ni</i>	28	0.00	0.00
<i>V</i>	23	0.02	0.01
<i>K</i>	19	0.27	0.23
<i>Zn</i>	30	0.01	0.00
<i>Co</i>	27	0.14	0.08
<b>Toplam</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>



Şekil 4.34. Örneğin kenar kısmına ait elementlerin dağılımı.

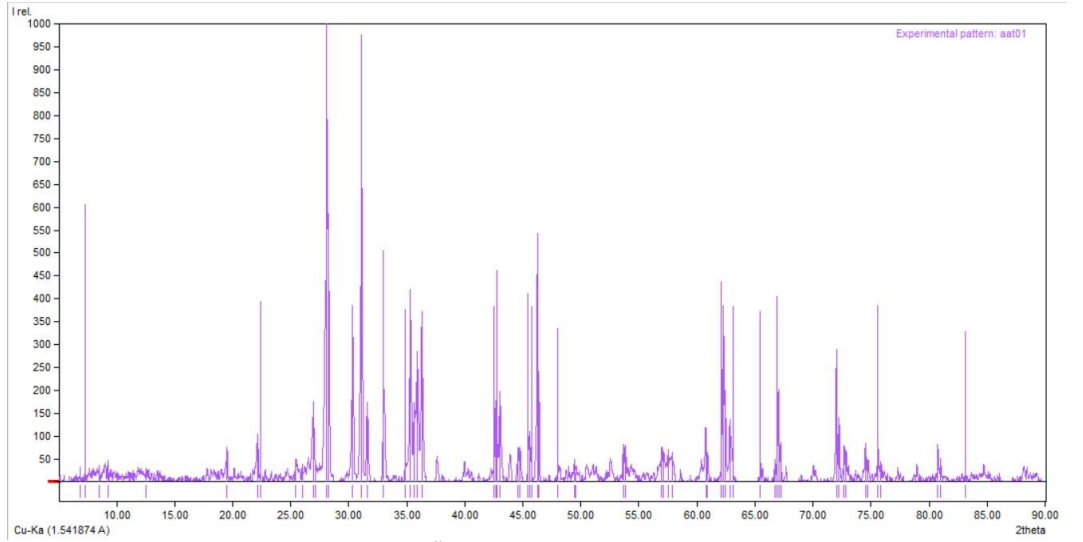
#### 4.5 XRD Bulguları

XRD deneyleri Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkez Laboratuvarları'nda Panalytical Empyrean XRD cihazında tamamlanmıştır. Ölçümler Cu X-ray anot kullanılarak 40 mA akım ve 45 kV voltaj ile ölçülmüştür. Ölçüm detaylarından  $2\theta$  47,5°, tarama aralığı 5-90° ve zaman/adım oranı 21.420 olarak belirlenmiştir. Toplamda 0.914 g örnek havanda toz haline getirilmiş ve Şekil 4.35'teki gibi disk üzerine yerleştirilmiştir. Bulgular Malvern Panalytical Data Collector programında ve Crystal Impact Match! V.3.8.2.148 programında analiz edilmiştir.



Şekil 4.35. XRD incelemesi hazırlık.

Match! programında elde edilen XRD spektrumu Şekil 4.36'da verilmiştir. Elde edilen XRD spektrumu daha sonrasında veri tabanlarında olası mineraller ile eşleşmesi için taranmıştır. Data collector programında eşleşen mineraller Şekil 4.37'de ve Match! Programında eşleşen mineraller Tablo 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.36. Örneğe ait XRD spektrumu.



## 5. TARTIŞMA

### 5.1 ATR-FTIR

AAT-01 örneğine ait ATR-FTIR sonuçları incelendiğinde örnekte öncelikle karakteristik piroksen pikleri göze çarpmaktadır. Literatürden bilindiği üzere diyojenit türü meteoritler çoğunlukla magnezyum-zengini ortopiroksenlerden oluşmaktadır ve bunlar genellikle ortorombik yapılar göstermektedir (Verma et al., 2009). Bowey ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, neredeyse tüm düşük-basınç silikatlarına ait spektrumlarında yaklaşık  $1000\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde güçlü bir Si-O gerilmesi ve yaklaşık  $500\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde O-Si-O bükülmesinin ortak olarak görüldüğü bunun sebebinin  $\text{SiO}_4$  tetrahedra yapısından kaynaklandığı ortaya çıkarılmıştır. Aynı zamanda yaklaşık  $450\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde metal kanyonlarından hareketleri sonucu oluşan ötelemeler oluştuğu bilinmektedir. Bununla birlikte zincir silikatların  $600\text{-}800\text{ cm}^{-1}$  aralığında silikat tetrahedra zincirlerinin bağlantılı oksijen atomlarındaki Si-O-Si bükülme modları nedeniyle zayıf bantlar sergilediği gösterilmiştir (Bowey et al., 2020). Aynı şekilde,  $\text{Fe}^{2+}$ , görünür ve yakın kırmızıaltı spektrumlarında baskın piroksen absorpsiyonlarından sorumludur fakat  $\text{Ca}^{2+}$  gibi diğer kanyonlarla değişimi kristal yapısını değiştirerek Fe kanyonlarının kristal alan ayırma enerjilerini değiştirmektedir (Klima et al., 2011). Şekil 4.2’de görüldüğü gibi AAT-01 örneklerinin ana pikleri  $\sim 1055, 1024, 928, 873, 725, 685, 640, 533, 491,$  ve  $438\text{ cm}^{-1}$  bölgelerinde bulunmaktadır ve düşük-basınç silikatlarına ait özellikleri barındırmaktadır. Örnekte görülen piroksen türlerinin kesin olarak tayin edilebilmesi (magnezyum-zengini veya demir-zengini piroksenler) için literatürde bulunan çeşitli parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan biri, örnekte Fe içeriğinin artması ile iki bandın daha yüksek frekanslara doğru kaymasıdır. Bu tanıma göre,  $862\text{-}893\text{ cm}^{-1}$  ve  $460\text{-}464\text{ cm}^{-1}$  frekans aralığındaki piklerin ikisinin birlikte kayması sadece magnezyum-zengini piroksenlerde olurken, yalnızca birinde kayma görülmesi demir-zengini piroksenlerde görülmektedir. Bu kapsamda, magnezyumun yerini kalsiyum veya demirin alması ile piklerin dalga boylarında artma olduğu gözlemlenmiştir (Bowey et al., 2020). Bir diğer dikkat edilmesi gereken parametre ise karakteristik piklerdir. Örneğin, magnezyum zengini piroksenler spesifik olarak  $515\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde spektral absorpsiyon göstermektedir (McCanta and Dyar, 2020). Tüm bu özellikler dikkate alındığında

ve AAT-01 örneğine ait spektrumlar incelendiğinde, 862-893  $\text{cm}^{-1}$  ve 460-464  $\text{cm}^{-1}$  bölgelerinden yalnızca 862-893  $\text{cm}^{-1}$  piklerinin bulunduğu görülmektedir ve örnekte demir zengini piroksen varlığı önerilmiştir. Bunu desteleyen bir diğer kanıt ise 515  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde pik eksikliğidir ve magnezyum zengini piroksen ile ilişkilendirilmektedir. Bu sebeple ATR-FTIR sonuçları AAT-01 örneğinde demir zengini piroksen varlığını doğrulamaktadır.

AAT-01 örneğine ait spektrumlar (Şekil 4.2) feldspar minerali varlığı açısından değerlendirildiğinde örnekte plajiyoklaz varlığı göze çarpmaktadır. Hanna ve Sprague'nin Johnstown diyogeniti üzerine uyguladıkları IR analizi sonuçları örnekte düşük miktarlarda da olsa (%3) plajiyoklaz bulunurluğunu ortaya çıkarmaktadır (Hanna and Sprague, 2009). Plajiyoklaz IR spektrumunda yaklaşık olarak 8.3-12  $\mu\text{m}$  ( $\sim 833$ -1204  $\text{cm}^{-1}$ ) arasında yansıma vermektedir ve bu değerler AAT-01 örneğinde bulunan pikler ile uyumluluk göstermektedir (Nash and Salisbury, 1991). Bu aralık ayrıntılı olarak incelendiğinde, 7-11  $\mu\text{m}$  (1428-909  $\text{cm}^{-1}$ ) aralığı Si-O ve Al-O gerilmesi, 11-14  $\mu\text{m}$  (909-714  $\text{cm}^{-1}$ ) aralığı Si-Si ve Si-Al gerilmesi, 14-20  $\mu\text{m}$  (714-500  $\text{cm}^{-1}$ ) aralığı O-Si-O ve O-Al-O bükülmesi, 20-40  $\mu\text{m}$  (500-250  $\text{cm}^{-1}$ ) aralığı O-Si-O ve M-O bükülmelerinin eşleşmesi gibi kompleks titreşimler ve son olarak 40  $\mu\text{m}$  (250  $\text{cm}^{-1}$ ) ve üzerindeki değerler Si-O-Si deformasyon ve burulmaları ile eşleşmektedir. Burada M metal katyonunu temsil etmektedir. Aynı zamanda 40  $\mu\text{m}$  ve altı bölgeler incelendiğinde plajiyoklaz feldspar mineralinde anortit konsantrasyonu azaldıkça ağır  $\text{Ca}^{2+}$  ve hafif  $\text{Na}^+$  miktarlarında artış ve tepe konumlarının daha kısa dalga boylarına doğru kaydığı gözlemlenmektedir (Chihara and Koike, 2017).

Bu tezde analiz edildiği gibi farklı oranlarda öğütülme içeren toz örneklerde tane büyüklüğünün IR spektrumuna etkisi bulunmaktadır. Parçacık boyutunun kaydedilen spektrumun spektral özelliklerinde önemli değişiklikler yarattığı çeşitli laboratuvar ölçümlerinde kanıtlanmıştır (Vernazza et al., 2010; Skulteti vd., 2020). Bu tezde ele alındığı gibi, meteorit numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar çalışmaları, mid-IR spektral özelliklerinin kontrastının ince tane boyutlarında büyük ölçüde azaldığını göstermiştir (Lim et al., 2005). Daha küçük taneciklerle karşılaştırıldığında, aynı malzemenin daha büyük taneleri genellikle tane yüzeylerinden daha az saçılma (yüzey saçılması) ve daha fazla hacim saçılması

sebebiyle daha derin absorpsiyon bantları (daha yüksek spektral kontrast) üretmektedir (Zhang and Cloutis, 2021). Bu özellik dikkate alındığında örnekte tam tersi şekilde Şekil 4.2'deki en çok öğütmeye (en düşük tane büyüklüğüne) sahip olan C spektrumu en şiddetli absorpsiyon bandına sahip olan spektrumdur. Tüm spektrumlar belirtilen parametreler ışığında değerlendirildiğinde örnekte piroksen ve feldspar türü mineral bulunurluğu kanıtlanmıştır.

## 5.2 Raman

Örneğe ait Raman spektrumları göze alındığında örnekte yüksek oranda piroksen türü mineral varlığı net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.3, 4.5, 4.7 ve 4.9'da belirtildiği gibi karakteristik piroksen pikleri AAT-01 örneğinde mevcuttur. Bu bulgu daha önceki çalışmalarda kanıtlanmış piroksen iç büyümleri ile uyum sağlamaktadır (Lomena et al., 1976). Pikler karakteristik olarak piroksen türü mineraller ile uyumlu olup özellikle enstatit minerali ile uygunluk göstermektedir. Örneğe ait spektrumun enstatit minerali ile eşleştiği KnowitAll yazılımı ile de doğrulanmıştır. Literatürde enstatit'in  $343\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde M-O gerilmesi,  $665\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde Si-O-Si gerilmesi,  $687\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde Si-O-Si gerilmesi,  $1014\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde Si-O gerilmesi ve  $1034\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde Si-O gerilmesi olduğu tanımlanmıştır (Zhang et al., 2018).

Titanyum oksit minerallerinden olan anatazın yüksek sıcaklıklarda ve basınç değerlerinde bir diğer polimorfu olan rutil'e dönüştüğü bilinmektedir. Çok yaygın olmamakla birlikte rutil varlığı çeşitli demirli meteoritlerde kanıtlanmıştır. Rutil, meteoritlerde çeşitli yapılarda bulunabilmektedir (El Goresy, 1971). Örneğin, kondritlerde rutil, ilmenit veya kromit içerisinde lameller şeklinde düzenli olarak bulunabilirken aynı zamanda matris içerisinde ayrı taneler olarak yayılmış halde de bulunabilmektedir (Buseck and Keil, 1966). Anataz ve rutil minerallerine ait Raman spektrumları birbiri ile benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla AAT-01 örneğine ait spektrumlardan titanyum oksit minerallerinin anataz veya rutil olarak ayırt edilmesi için ileri çalışmalar gerekmektedir.

Dış yanık kabuk bölgesinden elde edilen Raman spektrumları (Şekil 4.11) karakteristik piroksen ve kromite ait pikler içermektedir. Genge ve Grady'ye ait çalışmalarda dış yanık kabuk bölgesine ait çeşitli özellikler ortaya çıkarılmıştır. Bu

analizlerde diyojenit türü meteoritlerde dış yanık kabuk bölgesinde piroksen ve magnesiokromit baskınlığı ortaya çıkarılmıştır ve AAT-01 örneğine ait sonuçlar ile uyum göstermektedir (Genge and Grady, 1999). Örnekte yeşil kristaller olarak çıplak gözle bakıldığında fark edilebilen olivin minerallerine ait pikler karakteristik olivin dubleti halinde ( $820/850 \text{ cm}^{-1}$ ) Şekil 4.13'te verilmiştir. Diyojenit türü minerallerde sıklıkla görülen olivin kristalleri AAT-01 örneği içinde kümülatlar halinde dağılım göstermektedir.

Örnekte karakteristik kromit pikleri içeren spektrum Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu pikler AAT-01 örneğinin karakteristik kromit Raman piklerine  $681$  ve  $723 \text{ cm}^{-1}$  sahip olduğunu göstermekte olup literatür değerleriyle ( $\sim 684-729 \text{ cm}^{-1}$ ) de uyum içindedir (Lomena et al., 1976). Örneğe ait önceki analizler (Lomena et al., 1976) ve diyojenit türüne ait diğer meteoritlere yapılmış diğer analizler (Bowman et al., 1999) meteoritte kromit içeren kapanım varlığını doğrulamaktadır. Literatürde kromit mineralinin karakteristik olarak  $730, 560, 445 \text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen pikler genel olarak CrO gerilme titreşimleri olarak atanmaktadır ve  $730 \text{ cm}^{-1}$  piki simetrik gerilme titreşim modu olarak tanımlanmaktadır (Reddy and Frost, 2005).

Henüz tanımlanamayan spektrumları içeren görseller Şekil 4.19'da sunulmuştur. Spektrumlarda çoğunlukla  $\sim 1200, 1300$  ve  $1600 \text{ cm}^{-1}$  bölgelerinde yoğun pikler göze çarpmaktadır. Bu pikler organik mineral varlığına işaret ettiği gibi olası bir kontaminasyon göstergesi de olabilmektedir. Bunun belirlenebilmesi için ise daha fazla analize gereksinim vardır.

### 5.3 SEM-EDS

Toz numuneye ait SEM-EDS görüntüleri incelendiğinde örnekte çoğunlukla sırasıyla mavi ve kırmızı rengin temsil ettiği (Şekil 4.22) Mg ve Si elementleri göze çarpmaktadır. Ayrıca kütlece incelendiğinde Mg kütlece örneğin %20,25'ini ve Si kütlece örneğin %38'ini oluşturmaktadır. AAT-01 örneğinde ayrıca Mg ve Si elementlerine eşlik eden Fe elementi varlığı görülmektedir. Fe örnek genelinde dağılmış olmasına rağmen (örneğin kütlece %15'i) toz örneğin çeşitli noktalarında turuncu renk ile temsil edilen kümülatlar halinde

görülebilmektedir (Şekil 4.22.A). Diyojenit meteoritlerinin olivin ve piroksen zengini olduğu çeşitli çalışmalar ile kanıtlanmıştır. Bu çalışmalara bir örnek, NWA 6232 diyojenitine ait SEM-EDS analizi %71,8 oranında piroksen ve %25,7 oranında olivin içermektedir. Örneğin yüzdece küçük bir kısmı da kromit ve troilitten oluşmaktadır (sırasıyla %0,9 ve %1,2) (Carli et al., 2018). Bir diğer örnek ise Bowman ve arkadaşlarının çeşitli diyojenit türü meteoritleri SEM-EDS yöntemi ile analiz etmesi sonucunda örneklerde yüksek oranlarda ortopiroksen ve olivin ve az miktarlarda plagioclase, klinopiroksen, kromit ve SiO<sub>2</sub> bulmasıdır (Bowman et al., 1996). Bu sonuçlar dikkate alındığında AAT-01 örneğinde Mg, Si ve Fe elementlerinin yoğunluğu örnekte olivin ve piroksen varlığını doğrulamaktadır. Bunlara ek olarak, örnekte yeşil renk ile temsil edilmiş S elementi Şekil 4.22. B’de tek bir noktada görülmektedir. S elementi örneğin kütlece yalnızca %2,70’ini oluşturmaktadır ve troilit varlığını desteklemektedir. Son olarak toz örnekte açık pembe renk ile temsil edilmiş Ca elementi (Şekil 4.22.C) örneğin kütlece %3,59’unu oluşturmaktadır. Ca elementi çoğu zaman plajiyoklaz türü mineraller ile ilişkilendirilmektedir ve örnekte Na elementine oranla (%0,07) daha fazla miktarda bulunması AAT-01 örneğinde Ca zengini plajiyoklaz minerali olan anortit’in varlığını desteklemektedir. Ferrari ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan NWA 7490 diyojenitine ait analizler örnekte çoğunlukla Ca-plajiyoklaz ve Mg-olivin yoğunluğunun fazla olduğunu ve kromit ve troilit minerallerin düşük yoğunluklarda bulunduğunu kanıtlanmıştır (Ferrari et al., 2017). Bunlara ek olarak Tatahouine diyojenitine ait analizler Cr, Fe ve O’dan oluşan kapanımların gömülü olduğu Si, Fe, Mg ve O bakımından zengin, homojen olmayan bir yüzey göstermektedir (Maravilla et al., 2013). Tüm bu kanıtlar gözden geçirildiğinde AAT-01 örneğine ait SEM-EDS analizi örneğin genelinde olivin ve piroksen yoğunluklu olduğunu ve az miktarlarda plajiyoklaz ve kromit içerdiğini desteklemektedir fakat, ince kesit incelemelerinde açıklıkla görülebilen olivin ve piroksen kapanımları toz örnek çalışması sebebiyle net olarak görülememiştir.

## 5.4 XRF

XRF analizi sonucu elementlerin yüzdelik ve kütlece dağılımları örnek genelinde Mg, Si ve Fe elementlerinin baskın olduğunu göstermektedir. Görsellerde örneğin tamamında yüksek miktarlarda bulunan Ca, Fe, Al, Mg ve Si elementleri gösterilmemiştir. Örnek çıplak göz ile incelendiğinde öncelikle yüzeyinde soluk yeşil ve siyah kapanımlar göze çarpmaktadır. Yeşil kapanımlar olivin kristali ile bağlantılı olup örnek içinde neredeyse saf iri taneli yapılar olarak görülmektedir. Örnekte ayrı ayrı incelenen A, B ve C kısımlarında görüldüğü üzere elementler örnek geneline homojen olarak dağılmıştır. Örnek üzerinde sarı olarak belirtilen ve dikkat çeken noktalar Ti elementini temsil etmektedir ve piroksen kümülatları ile ilişkilendirilmektedir.

Örneğin tamamı dikkate alındığında yaklaşık 5 mm çapında sarı bir kapanımın (Şekil 4.33.A) çevresinde mavi noktalar içeren heterojen bir matris (Şekil 4.33.B) içerisinde yerleştiği göze çarpmaktadır. Görselde sarı renk ile temsil edilen S elementi iri taneli piroksen mineralleri içinde toplu bir yapı göstermektedir. Bu yapı diyojenit türü meteoritler için troilit-ortopiroksen iç büyümesi ile ilişkilendirilebilmektedir (Zhang et al., 2018). Bununla birlikte örnekte dış çeperele ilerledikçe Ti yoğunluğunda artış görülmektedir (Şekil 4.33.C). TiO<sub>2</sub> kristalleri meteoritlerde büyük çoğunlukla anataz minerali ile bağlantılı olmaktadır ve çeşitli meteorit çalışmalarında anataz mineralinin piroksen türü mineraller ile birlikte bulunduğu kanıtlanmıştır (Huidobro et al., 2021). Bu sebeple AAT-01 örneğinin anataz kristalleri içermesi olasıdır. Buna ek olarak yeşil ile gösterilen Ni elementi (Şekil 4.33.D) demir ve nikel alaşımı bir mineral olan ve diyojenit türü meteoritlerde az da olsa bulunabilen kamasit ile ifade edilebilmektedir (Hanna and Sprague, 2009).

Örneğin kenar kısmına ait XRF sonuçları incelendiğinde örnekte dış yanık kabuk bölümünde büyük çoğunlukla yeşil renk ile temsil edilen Al elementine kırmızı renk ile belirtilen K elementinin eşlik ettiği görülmektedir (Şekil 4.34.A). Al ve K varlığı feldspar bulunurluğunu desteklemektedir. Şekilde B olarak işaret edilen mavi kapanım S elementini temsil etmektedir ve örneğin kalanı ile uyumlu olarak troilit minerali olarak düşünülmektedir (Şekil 4.34.B). Buna ek olarak fuşya rengi ile ifade edilen V elementi örnek genelinde sıkıştırılmış kümülatlar şeklinde

görülmektedir (Şekil 4.34.C). Vanadyum elementi meteoritlerde çoğunlukla kromit minerali ile ilişkilendirilmektedir ve kromit içerisindeki varlığı kondrit meteoritlerde kanıtlanmıştır (E. Bunch et al., 1967). Ayrıca, diyojenit örneklerinde de vanadyum taşıyıcılarının saptanması Allen ve Mason tarafından tamamlanmıştır. Bu çalışmada, Johnstown diyojenitinde vanadyumun taşıyıcılarının kromit ve piroksen olduğu ortaya çıkarılmıştır (Allen and Mason, 1973). Bir başka çalışmada ise ana V taşıyıcılarının genellikle titanyumca zengin magnetit ( $\text{Fe}^{2+} (\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_4$ ), ulvospinel ( $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ ) ve ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ) olduğu belirlenmiştir (Mikulski et al., 2022). Bununla birlikte sarı renkli kümülatlar ve damarsı uzun yapılar olarak ortaya çıkan Cr elementi (Şekil 4.34.D) kromit minerali varlığını doğrulamaktadır.

## 5.5 XRD

Örneğe ait XRD sonuçları Şekil 4.36 ve 4.37’de sunulmuştur.  $d$  değerleri ve  $2\theta$  değerleri göz önüne alınarak eşleşen mineraller yüksek çoğunluk ile piroksen mineralleridir. Enstatit ve troilit ile yüksek oranda eşleşen örnek literatürde daha önce belirtilen veriler ile uyum göstermektedir (Lomena et al., 1976). Piroksen grubu mineraller haricinde olivin, ilmenit, magnetit ve kromit varlığı da XRD analizi sonucunda ortaya çıkarılmıştır. V ve Cr içeren mineral varlığı XRD yöntemi ile de kanıtlanmış olmasına rağmen kesin olarak hangi mineral olduğu tespit edilememiştir. Bunlara ek olarak genellikle demirli meteoritlerde görülen ve Widmanstätten yapılarının oluşmasından sorumlu olduğu düşünülen martensit minerali AAT-01 örneğinde çok az miktarda bulunmaktadır (Yang and Goldstein, 2005). Ayrıca örnekte düşük miktarlarda bulunan tetrataenit varlığı da belirlenmiştir. Mori ve Takeda’nın yaptığı araştırmada, Ibbenbüren diyojeniti üzerine XRD çalışması yapılmış ve ortopiroksen ile birlikte öjit varlığı da belirlenmiştir (Mori and Takeda, 1980). Benzer şekilde Antarktik diyojenit meteoritlerine ait kimyasal bileşimler XRD ile belirlenmiştir. Bu çalışmada, Yamato-74013, ALHA77256 ve Yamato-75032 diyojenitlerinin yüksek oranda  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  ve  $\text{MgO}$  içerdiği ortaya çıkarılmıştır ve ortopiroksen minerallerinin varlığı da belirlenmiştir (Takeda, 1979).

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde HED meteorit sınıfından bir diyojenit türü olan Aioun El Atrouss meteoriti spektroskopik, kristalografik ve mikroskobik yöntemleri ile incelenmiştir. FT-IR spektroskopisi ve SEM-EDS incelemelerinde toz numune ve Raman spektroskopisi, XRF ve XRD analizlerinde örneğin tamamı (katı formda) çeşitli noktalar seçilerek incelenmiştir. Bu analizler sonucunda Aioun El Atrouss diyojenit akondritinin yüksek oranda piroksen türü minerallerden oluştuğu ortaya çıkarılmıştır. Başlıca enstatit mineralinin görüldüğü birçok analizde piroksene eşlik eden plajiyoklaz ve az miktarda olivin varlığı saptanmıştır. Ayrıca kümülatlar ve damarsı yapılar halinde ortaya çıkan kromit minerali Raman spektrumlarında ve XRF analizinde açığa çıkmıştır. XRF ve SEM analizlerinde ortaya çıkan vanadyum elementinin genellikle kromit olan bölgelerde yoğunlaşması, genellikle vanadyum taşıyıcısının kromit minerali olduğunu gösteren diğer bulguları doğrulamaktadır (E. Bunch et al., 1967). Aynı zamanda diğer vanadyum taşıyıcılarının piroksen, magnetit, spinel ve ilmenit olduğu da daha önce rapor edilmiştir (Allen and Mason, 1973; Mikulski et al., 2022). Buna ek olarak bu tez çalışmasında troilit-ortopiroksen iç büyümesi XRF analizleri sırasında gösterilmiştir (Şekil 4.33). Öte yandan, diğer mineral türlerinden olan ilmenit ve magnetit varlığı yüzde az olsa da belirlenebilmiştir (Tablo 4.7). Titanyum oksit minerallerinden olan anataz ve rutil'e dair bulgular Raman ve XRF analizleri ile desteklenmiştir. Kesin olmamak ile birlikte Raman bulgularında genellikle 100-200  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde karşılaşılan pikler titanyum oksit mineralleri ile benzerlik göstermektedir. Fakat anataz rutil ayrımının kesin olarak yapılabilmesi için mikroskobik olarak birçok farklı noktadan farklı Raman spektrumları ve ayrıca yine bu ve başka noktalardan Raman haritalama yapılması gerekmektedir. Bu çalışmaların yakın gelecekte gerçekleştirilmesi planlanan olası bir makale/proje/doktora tez çalışması kapsamında yapılması planlanmıştır.

Meteorit örneğinde petrografik içeriğin kesin olarak ortaya çıkarılması için ince kesit veya parlak kesit üzerinden polarize ışık mikroskobu ile incelenmesi gerekmektedir. Örneğin kırılma gücünden dolayı ince kesit alınmadığı için SEM-EDS ve mikro-XRF analizleri zemini tamamen düz olmayan örnek üzerinden

yapılabilmiştir. Bu sebeple analizler sırasında çeşitli veri kaybı ve düzensiz veri akışı olmuştur. Örneğin yüksekliğinin her noktasında eşit olmaması sebebiyle örneğin her iki yüzü ayrıntılı incelenememiştir. İncelenen yüzlerde ise eğimden kaynaklı olarak bazı noktalar düşük çözünürlükte görüntülenebilmiştir. Daha kesinlik içeren analizler için ince kesit örnek alınması gerekmektedir. Son olarak Raman spektrumu ile elde edilen ve hangi minerale ait olduğu tespit edilemeyen spektrumların kesin olarak saptanması için ileri analizler gerektiği ortaya çıkarılmıştır.

Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında AAT-01 örneğinin büyük oranda primer minerallerden (magmanın soğuması sırasında ortaya çıkan mineraller) oluştuğu öngörülmektedir. Kalsit ve tremolit gibi primer minerallerin kimyasal değişimleri sonucu oluşan sekonder minerallerin varlığı bu tez çalışmasında tespit edilmemiştir. Elde edilen tüm verilerin HED meteoritleri hakkında daha ayrıntılı bilgi sahibi olmasının yanı sıra Güneş sisteminin ve Samanyolu galaksisinin geçmişi hakkında ayrıntılı fikir sunması ve biyoişaretçilerin varlığının saptanmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir. Meteoritlerdeki organik içeriğin açığa çıkarılması ve diğer Dünya dışı örneklerin analizi, organikleri erken Dünya'da üreten çeşitli süreçlerle ilgili önemli çıkarımlara sahip olabilmektedir. Yıldızlararası ortam, asteroidler ve meteoritlerin yaşam için gerekli organikleri barındırdığı çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Kuyruklu yıldızlar ve karbonlu meteoritlerin gezegenlere organik molekülleri ulaştırdığı ve yaşamın başlangıcı için gerekli bileşenleri Dünya'ya taşımış olduğu olasılığı mevcuttur. Karbonlu meteoritlerin kimyasal ve izotopik bileşimleri ve petrografik özelliklerinin analizi, dış gezegen sistemlerinin oluşumu ve evrimi hakkında süreçlerin aydınlatılmasını sağlar. Ayrıca bu süreçler hakkında daha fazla bilgi sahibi olunması organik maddelerin doğasının daha iyi tanımlanmasına yol açar. Buna ek olarak, Dünya'nın erken tarihinde kuyruklu yıldızlardan ve kondritlerden gelen malzemenin girişi, karbon, azot, kükürt ve fosfor (çoğunlukla çözünmüş tuz veya gaz halinde) ile birlikte hidrojen ve oksijen (çoğunlukla su) gibi uçucu elementler açısından zengin bir biyosferin (yaşamı ve çevresini içeren) oluşumuna yol açtığı düşünülmektedir. Öte yandan, meteoritlerin yaşamın ortaya çıkması için muhtemel bir gereklilik olan P taşıyan iyonlar pirofosfat ve trifosfat gibi modern yaşamdaki metabolizmanın temel bileşenleri gibi önemli bir reaktif fosfor kaynağı olmuş olabileceği

varsayılmaktadır. Meteoritler, yapısal olarak hem Dünyadaki mineralleri hem de Dünya'da bilinmeyen veya ilk kez meteorlarda tanımlanmış ve yalnızca biyosferin ekstrem koşullarında oluşan benzersiz mineralleri içerebilmektedir. Bu mineraller hem Güneş sistemine ait dünya dışı maddelerin hem de Dünyadaki maddelerin oluşumunun genel yasalarını açıkça yansıtmaktadır. 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra modern yöntemlerle meteorit incelemelerinde meydana gelen büyük ilerleme sayesinde ön gezegen bulutsuları ve ana gövde gibi çeşitli nesnelere katı bileşenin oluşumu sırasında devam eden çeşitli ve karmaşık süreçler hakkında daha fazla bilgi sahibi olunmuştur. Farklı tür ve sınıflardaki meteoritlerin mineralojisi, özel kritik koşullar altında oluşan benzersiz mineral birliklerinin keşfi, kimyasal ve izotop verileriyle birlikte, meteoritlerin geniş çeşitliliğini ve karasal nesnelere ilişkilerindeki sorunları göstermektedir (Hays, 2015; Domagal-Goldman et al., 2016).

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdullah, A., and Mohammed, A. (2019, Ocak 5). Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review.
- Adobe Inc. (2019). Adobe Photoshop. Retrieved from <https://www.adobe.com/products/photoshop.html>
- Adya, A. K., and Canetta, E. (2014). Nanotechnology and Its Applications to Animal Biotechnology. İçinde Animal Biotechnology (ss. 247-263). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416002-6.00014-6>
- Allegretta, I., Marangoni, B., Manzari, P., Porfido, C., Terzano, R., De Pascale, O., and Senesi, G. S. (2020). Macro-classification of meteorites by portable energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (pED-XRF), principal component analysis (PCA) and machine learning algorithms. *Talanta*, 212, 120785. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120785><https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120785>
- Allen, R. O., and Mason, B. (1973). Minor and trace elements in some meteoritic minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(6), 1435-1456. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90081-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90081-1)[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90081-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90081-1)
- Allison, G. G. (2011). Application of Fourier Transform Mid-Infrared Spectroscopy (FTIR) for Research into Biomass Feed-Stocks. İçinde G. Nikolic (Ed.), *Fourier Transforms*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/15785><https://doi.org/10.5772/15785>
- Araújo, Acácio José Silva, Rios, Débora Correia, Carvalho, Wilton Pinto de, and Pereira, Cristine de Almeida (2018). An evaluation of the hand held X-Ray fluorescence technique and applications in the study of iron meteorites. *Anuario do Instituto de Geociencias (Online)*, 41(3), 717-730.

- Balachandran, U., and Eror, N. G. (1982). Raman spectra of titanium dioxide. *Journal of Solid State Chemistry*, 42(3), 276-282.
- Bischoff, A. (2001). Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts. *Planetary and Space Science*, 49, 769-776. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(01\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(01)00026-5)
- Bowey, J. E., Hofmeister, A. M., and Keppel, E. (2020). Infrared spectra of pyroxenes (crystalline chain silicates) at room temperature. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(3), 3658-3673. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2227><https://doi.org/10.1093/mnras/staa2227>
- Bowman, L. E., Spilde, M. N., and Papike, J. J. (1996). Automated SEM Modal Analysis Applied to the Diogenites (s. 3). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996eiaf.conf....3B><https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996eiaf.conf....3B>
- Bowman, L. E., Spilde, M. N., and Papike, J. J. (1997). Automated energy dispersive spectrometer modal analysis applied to the diogenites. *Meteoritics and Planetary Science*, 32(6), 869-875. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01577.x>
- Bowman, L., Papike, J., and Spilde, M. (1999). Diogenites as asteroidal cumulates: Insights from spinel chemistry. *American Mineralogist*, 84, 1020-1026. <https://doi.org/10.2138/am-1999-7-803>
- Brusnitsyna, E. V., Badekha, K. A., Grokhovsky, V. I., and Muftakhetdinova, R. F. (t.y.). MARTENSITE MORPHOLOGY IN DIFFERENT TYPES OF METEORITES. 1.
- Bsdok, B., Altenberger, U., Concha-Perdomo, A. E., Wilke, F. D. H., and Gil-Rodríguez, J. G. (2020). The Santa Rosa de Viterbo meteorite, Colombia. New work on it's petrological, geochemical and economical characterization. *Journal of South American*

Earth Sciences, 104, 102779.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102779>

Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. gabriela, and Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289-299.  
<https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>

Buseck, P. R., and Keil, K. (1966). Meteoritic rutile. *AMERICAN MINERALOGIST*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19670049747>

Capuano, E., and van Ruth, S. M. (2016). Infrared Spectroscopy: Applications. În *B. Caballero, P. M. Finglas, and F. Toldrá (Ed.), Encyclopedia of Food and Health (ss. 424-431). Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00644-9>

Carli, C., Pratesi, G., Moggi-Cecchi, V., Zambon, F., Capaccioni, F., and Santoro, S. (2018). Northwest Africa 6232: Visible–near infrared reflectance spectra variability of an olivine diogenite. *Meteoritics and Planetary Science*, 53(10), 2228-2242.  
<https://doi.org/10.1111/maps.13056>  
<https://doi.org/10.1111/maps.13056>

Chandra, U., Pandey, K., Parthasarathy, G., and Sharma, S. (2015). High-pressure investigations on Piplia Kalan eucrite meteorite using in-situ X-ray diffraction and  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectroscopic technique up to 16 GPa. *Geosciences Frontiers*.

Chihara, H., and Koike, C. (2017). Infrared absorption spectra of plagioclase feldspar: Dependencies of composition and temperature. *Planetary and Space Science*, 149, 94-99.

Colthup, N. B. (2003). Infrared Spectroscopy. În *Encyclopedia of Physical Science and Technology (ss. 793-816). Elsevier*.  
<https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00340-9>

Dirri, F., Ferrari, M., Palomba, E., Longobardo, A., Stefani, S., Rotundi, A., Galiano, A., and Nardi, L. (2017). FT-IR and  $\mu$ -IR analysis of Carbonaceous Chondrite meteorites characterization as possible analogue of next sample returned materials. 2.

- Domagal-Goldman, S. D., Wright, K. E., Domagal-Goldman, S. D., Wright, K. E., Adamala, K., Arina de la Rubia, L., Bond, J., Dartnell, L. R., Goldman, A. D., Lynch, K., Naud, M.-E., Paulino-Lima, I. G., Singer, K., Walther-Antonio, M., Abrevaya, X. C., Anderson, R., Arney, G., Atri, D., Azúa-Bustos, A., ... Wong, T. (2016). The Astrobiology Primer v2.0. *Astrobiology*, 16(8), 561-653. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1460>
- Duke, M. B. (1978). Aion El Atrouss: Evidence for Thermal Recrystallization of a Eucrite Breccia. *Meteoritics*, 13, 443.
- E. Bunch, T., Keil, K., and Snetsinger, K. G. (1967). Chromite composition in relation to chemistry and texture of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(10), 1569-1582. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(67\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(67)90105-6)
- Echlin, P. (2009). *Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-85731-2>
- El Goresy, A. (1971). Meteoritic rutile: A niobium bearing mineral. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1-5), 359-361.
- F. Menges "Spectragryph - optical spectroscopy software", Version 1.2.15, 2022, <http://www.ffmpeg2.de/spectragryph/>
- Ferrari, M., Dirri, F., Palomba, E., Stefani, S., Longobardo, A., and Rotundi, A. (2017). FT-IR and SEM/EDS characterization of HED meteorites in relation to infrared spectra of Vesta-like asteroids.
- Ferraro, J. R., and Nakamoto, K. (1994). *Basic Theory*. İçinde *Introductory Raman Spectroscopy* (ss. 1-94). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-253990-9.50005-7>
- Fornaro, T., Brucato, J. R., Poggiali, G., Corazzi, M. A., Biczysko, M., Jaber, M., Foustoukos, D. I., Hazen, R. M., and Steele, A. (2020). UV Irradiation and Near Infrared Characterization of Laboratory

- Mars Soil Analog Samples. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 7, 91. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.539289>
- Gemelli, M., D'Orazio, M., and Folco, L. (2015). Chemical Analysis of Iron Meteorites Using a Hand-Held X-Ray Fluorescence Spectrometer. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 39(1), 55-69.
- Genge, M. J., and Grady, M. M. (1999). The fusion crusts of stony meteorites: Implications for the atmospheric reprocessing of extraterrestrial materials. *Meteoritics and Planetary Science*, 34(3), 341-356.
- Hanna, K. D., and Sprague, A. L. (2009). Vesta and the HED meteorites: Mid-infrared modeling of minerals and their abundances. *Meteoritics and Planetary Science*, 44(11), 1755-1770. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.tb01205.x>
- Haschke, M. (2014). XRF-Basics. İçinde M. Haschke, *Laboratory Micro-X-Ray Fluorescence Spectroscopy* (C. 55, ss. 1-17). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04864-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04864-2_1)
- Hays, L. E. (2015). *NASA Astrobiology Strategy 2015*. 256.
- Huidobro, J., Aramendia, J., Arana, G., and Madariaga, J. M. (2021). Geochemical Characterization of the NWA 11273 Lunar Meteorite Using Nondestructive Analytical Techniques: Original, Shocked, and Alteration Mineral Phases. *Acs Earth and Space Chemistry*, 5(6), 1333-1342. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00329>
- Hynes, A., Scott, D., Man, A., Singer, D., Sowa, M., and Liu, K.-Z. (2005). Molecular Mapping of Periodontal Tissues Using Infrared Microspectroscopy. *BMC medical imaging*, 5, 2. <https://doi.org/10.1186/1471-2342-5-2>
- Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials

characterization. İçinde *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* (ss. 17-43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>

Instrumentation Overview and Spectrometer Performance. (2000). İçinde *Raman Spectroscopy for Chemical Analysis* (ss. 73-94). John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0471721646.ch5>

Introduction and Scope. (2005). İçinde R. L. McCreery, *Raman Spectroscopy for Chemical Analysis* (ss. 1-14). John Wiley and Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471721646.ch1>

Introduction, Basic Theory and Principles. (2005). İçinde E. Smith and G. Dent, *Modern Raman Spectroscopy—A Practical Approach* (ss. 1-21). John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470011831.ch1>

Introduction. (2005). İçinde B. H. Stuart, *Analytical Techniques in the Sciences* (ss. 1-13). John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470011149.ch1>  
Introduction. (2004). İçinde *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications* (ss. 1-13). John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470011149.ch1>

Ivanov, A., Yaroshevskiy, A., and Ivanova, M. (2019). Meteorite Minerals. *Geochemistry International*, 57, 931-939. <https://doi.org/10.1134/S0016702919080056>

Jackson, M., and Mantsch, H. H. (1999). Medical Science Applications of IR\*. İçinde J. C. Lindon (Ed.), *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (Second Edition) (ss. 1494-1502). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374413-5.00200-1>

Jahn, I. J., Lehniger, L., Weber, K., Cialla-May, D., and Popp, J. (2020). Sample preparation for Raman microspectroscopy. *Physical Sciences Reviews*, 5(1), 20190018. <https://doi.org/10.1515/psr-2019-0018>

Karathanasis, A. D., and Hajek, B. F. (2018). Elemental Analysis by X-Ray Fluorescence Spectroscopy. İçinde D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, and M. E. Sumner (Ed.), SSSA Book Series (ss. 161-223). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.  
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c7>  
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c7>

Klima, R. L., Dyar, M. D., and Pieters, C. M. (2011). Near-infrared spectra of clinopyroxenes: Effects of calcium content and crystal structure: Near-infrared spectra of clinopyroxenes. *Meteoritics and Planetary Science*, 46(3), 379-395.  
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01158.x>  
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01158.x>

Komatsu, M., Fagan, T. J., Krot, A. N., Nagashima, K., Petaev, M. I., Kimura, M., and Yamaguchi, A. (2018). FIRst evidence for silica condensation within the solar protoplanetary disk. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(29), 7497-7502.

Koschny, D., Soja, R. H., Engrand, C., Flynn, G. J., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A.-C., Malaspina, D., Nakamura, T., Poppe, A. R., Sterken, V. J., and Trigo-Rodríguez, J. M. (2019). Interplanetary Dust, Meteoroids, Meteors and Meteorites. *Space Science Reviews*, 215(4), 34. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0597-7>

Kramar, U. (1999). X-Ray Fluorescence Spectrometers\*. İçinde *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (ss. 2989-2999). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374413-5.00314-6>  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374413-5.00314-6>

Krämer Ruggiu, L., Beck, P., Gattacceca, J., and Eschrig, J. (2021). Visible-infrared spectroscopy of ungrouped and rare meteorites brings further constraints on meteorite-asteroid connections.

Icarus, 362, 114393.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114393>

Lafuente B, Downs R T, Yang H, Stone N (2015) The power of databases: the RRUFF project. In: Highlights in Mineralogical Crystallography, T Armbruster and R M Danisi, eds. Berlin, Germany, W. De Gruyter, pp 1-30

Lim, L., McConnochie, T., Belliii, J., and Hayward, T. (2005). Thermal infrared (8-13 μm) spectra of 29 asteroids: The Cornell Mid-Infrared Asteroid Spectroscopy (MIDAS) Survey. *Icarus*, 173(2), 385-408. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.08.005>

Lin, M., A Rasco, B., G Cavinato, A., and Al-Holy, M. (2009). Infrared (IR) Spectroscopy—Near-Infrared Spectroscopy and Mid-Infrared Spectroscopy. *Içinde Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control* (ss. 119-143). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374136-3.00006-7>

Lipschutz, M. E. (1967). X-Ray diffraction analysis of cohenite from iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(4), 621-633. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(67\)90039-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(67)90039-7)  
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(67\)90039-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(67)90039-7)

Lomena, I. S. M., Touré, F., Gibson, E. K., Clanton, U. S., and Reid, A. M. (1976). AÏOUN EL ATROUSS: A NEW HYPERSTHENE ACHONDRITE WITH EUCRITIC INCLUSIONS. *Meteoritics*, 11(1), 51-57. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1976.tb00314.x>

Maksimova, A. A., and Oshtrakh, M. I. (2021). Applications of Mossbauer Spectroscopy in Meteoritical and Planetary Science, Part I: Undifferentiated Meteorites. *Minerals*, 11(6). <https://doi.org/ARTN 612 10.3390/min11060612>

Maravilla, D., Arenas-Alatorre, J., and Cañetas-Ortega, J. (2013). The Tatahouine Meteorite: A View from Micro to Nano Scale. *Journal*

of *Advanced Microscopy Research*, 8(4), 252-258.  
<https://doi.org/10.1166/jamr.2013.1166>  
<https://doi.org/10.1166/jamr.2013.1166>

Match! - Phase Analysis using Powder Diffraction, Version 3.x, Crystal Impact - Dr. H. Putz and Dr. K. Brandenburg GbR, Kreuzherrenstr. 102, 53227 Bonn, Germany, <https://www.crystalimpact.de/match>  
<https://www.crystalimpact.de/match>

Matrajt, G., Borg, J., Raynal, P. I., Djouadi, Z., d'Hendecourt, L., Flynn, G., and Deboffe, D. (2004). FTIR and Raman analyses of the Tagish Lake meteorite: Relationship with the aliphatic hydrocarbons observed in the Diffuse Interstellar Medium. *Astronomy and Astrophysics*, 416(3), 983-990.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034526>

McCanta, M. C., and Dyar, M. D. (2020). Effects of oxidation on pyroxene visible-near infrared and mid-infrared spectra. *Icarus*, 352, 113978.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113978>  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113978>

McCord, T. B., Adams, J. B., and Johnson, T. V. (1970). Asteroid vesta: Spectral reflectivity and compositional implications. *Science (New York, N.Y.)*, 168(3938), 1445-1447.  
<https://doi.org/10.1126/science.168.3938.1445>

McSween Jr., H. Y., Binzel, R. P., De Sanctis, M. C., Ammannito, E., Prettyman, T. H., Beck, A. W., Reddy, V., Le Corre, L., Gaffey, M. J., McCord, T. B., Raymond, C. A., Russell, C. T., and Team, the D. S. (2013). Dawn; the Vesta–HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites. *Meteoritics and Planetary Science*, 48(11), 2090-2104.  
<https://doi.org/10.1111/maps.12108>

Merouane, S., Djouadi, Z., Brunetto, R., Borg, J., and Dumas, P. (t.y.). Analyses of a few fragments from the Paris meteorite through SEM/EDX,  $\mu$ -FTIR and  $\mu$ -Raman spectroscopies. 2.

- Mikulski, S. Z., Sadłowska, K., Wiszniewska, J., and Małek, R. (2022). Vanadium and Cobalt Occurrence in the Fe-Ti-V Oxide Deposits Related to Mesoproterozoic AMCG Complex in NE Poland. *Applied Sciences*, 12(12), 6277. <https://doi.org/10.3390/app12126277>
- Mittlefehldt, D. W. (1994). The genesis of diogenites and HED parent body petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(5), 1537-1552. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90555-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90555-X)
- Moram, M. A., and Vickers, M. E. (2009). X-ray diffraction of III-nitrides. *Reports on Progress in Physics*, 72(3), 036502. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/3/036502><https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/3/036502>
- Mori, H., and Takeda, H. (1980). Thermal and Deformational History of Diogenites and a Lunar Norite, as Determined by Electron Microscopy and Crystallography. 743-745.
- Nascimento-Dias, B. L. do, Zucolotto, M. E., Belgo, H. C., Silva, T. V. F. da, and Anjos, V. de C. dos. (2020). Detection of organic or inorganic material in Martian meteorite Zagami by vibrational spectroscopy? *International Journal of Astrobiology*, 19(6), 438-445. <https://doi.org/10.1017/S147355042000021X>
- Nash, D. B., and Salisbury, J. W. (1991). Infrared reflectance spectra (2.2-15  $\mu\text{m}$ ) of plagioclase feldspars. *Geophysical Research Letters*, 18(6), 1151-1154. <https://doi.org/10.1029/91GL01008><https://doi.org/10.1029/91GL01008>
- Needham, A. W., Abel, R. L., Tomkinson, T., and Grady, M. M. (2013). Martian subsurface fluid pathways and 3D mineralogy of the Nakhla meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 116, 96-110. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.07.004>

- Nguyen, J. N. T., and Harbison, A. M. (2017). Scanning Electron Microscopy Sample Preparation and Imaging. İçinde V. Espina (Ed.), *Molecular Profiling* (C. 1606, ss. 71-84). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6990-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6990-6_5)
- Niewodniczański, J., Manecki, A., and Dominik, B. (1974). Non-destructive determination of nickel in iron meteorites. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 20(1), 71-76. <https://doi.org/10.1007/BF02515901><https://doi.org/10.1007/BF02515901>
- OriginPro, Version 2022b. OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA.
- Perkin Elmer. “FT-IR Spectroscopy (Attenuated Total Reflectance (ATR))”. Technical Note. [http://shop.perkinelmer.com/content/TechnicalInfo/TCH\\_FTIR\\_ATR.pdf](http://shop.perkinelmer.com/content/TechnicalInfo/TCH_FTIR_ATR.pdf)
- Potts, P. J. (2005). X-RAY FLUORESCENCE AND EMISSION | X-Ray Fluorescence Theory. İçinde *Encyclopedia of Analytical Science* (ss. 408-418). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00673-7><https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00673-7>
- Preston, L. J., Barcenilla, R., Dartnell, L. R., Kucukkilic-Stephens, E., and Olsson-Francis, K. (2020). Infrared Spectroscopic Detection of Biosignatures at Lake Tirez, Spain: Implications for Mars. *Astrobiology*. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2106>
- Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2018.
- Reddy, B. J., and Frost, R. L. (2005). Spectroscopic characterization of chromite from the Moa-Baracoa Ophiolitic Massif, Cuba. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 61(8), 1721-1728.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2004.07.002>  
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2004.07.002>

Rubin, A. E., and Grossman, J. N. (2010). Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science*, 45(1), 114-122. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x>

Rubin, A. E., and Ma, C. (2017). Meteoritic minerals and their origins. *Geochemistry*, 77(3), 325-385. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.01.005>

Schmitt, Bernard; Bollard, Philippe; Albert, Damien; Garenne, Alexandre; Gorbacheva, Maria; Bonal, Lydie; Volcke, Pierre, and the SSHADE partner's consortium (2018). SSHADE: "Solid Spectroscopy Hosting Architecture of Databases and Expertise" and its databases. OSUG Data Center. Service/Database Infrastructure. doi:10.26302/SSHADE

Seixas, T. M., Almeida, B., Mendes, M. H., da Silva, M. A. S., Santos, J. F., Almeida, F., Diogo, Z., Lopes, A. B., and Vieira, J. M. (2012). XRD, SEM and Petrologic Characterization of a L4-L5 Ordinary Chondrite Meteorite. *Materials Science Forum*, 730-732, 170-175. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.170>  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.170>

Shao, H., Isobe, H., Kitahara, G., Fukui, H., and Yoshiasa, A. (2021). XAFS and XRD study on Fe, Ni, and Ge in iron meteorite NWA 859. *Physics and Chemistry of Minerals*, 48(3), 11. <https://doi.org/10.1007/s00269-021-01136-8>  
<https://doi.org/10.1007/s00269-021-01136-8>

Shindo, D., and Oikawa, T. (2002). Energy Dispersive X-ray Spectroscopy. *Içinde D. Shindo and T. Oikawa, Analytical*

Electron Microscopy for Materials Science (ss. 81-102). Springer Japan. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-66988-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-4-431-66988-3_4)

Shkolyar, S., Lalla, E., Konstantindis, M., Cote, K., Daly, M. G., and Steele, A. (2021). Detecting Ce<sup>3+</sup> as a biosignature mimicker using UV time-resolved laser-induced fluorescence and Raman spectroscopy: Implications for planetary missions. *Icarus*, 354. <https://doi.org/ARTN 114093 10.1016/j.icarus.2020.114093>

Skulteti, A., Kereszturi, A., Szabo, M., Kereszty, Z., and Cipriani, F. (2020). Mid-infrared spectroscopic investigation of meteorites and perspectives for thermal infrared observations at the binary asteroid Didymos. *Planetary and Space Science*, 184, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104855>

Stanjek, H., and Häusler, W. (2004). Basics of X-ray Diffraction. *Hyperfine Interactions*, 154(1-4), 107-119. <https://doi.org/10.1023/B:HYPE.0000032028.60546.38>  
<https://doi.org/10.1023/B:HYPE.0000032028.60546.38>

Study on Element Distribution in Meteorite Samples by XRF and ICP-MS. (2018). *SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS*, 38(10), 3261. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2018\)10-3261-03](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2018)10-3261-03)  
[https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2018\)10-3261-03](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2018)10-3261-03)

Suryanarayana, C., and Norton, M. G. (1998). X-Rays and Diffraction. İçinde C. Suryanarayana and M. G. Norton, *X-Ray Diffraction* (ss. 3-19). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0148-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0148-4_1)  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0148-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0148-4_1)

Takeda, H. (1979). A layered-crust model of a Howardite parent body. *Icarus*, 40(3), 455-470. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(79\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(79)90039-3)

Thombre, R. S., Shivakarthik, E., Sivaraman, B., Vaishampayan, P. A., Seuylemezian, A., Meka, J. K., Vijayan, S., Kulkarni, P. P.,

- Pataskar, T., and Patil, B. S. (2019). Survival of Extremotolerant Bacteria from the Mukundpura Meteorite Impact Crater. *Astrobiology*, 19(6), 785-796. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1928>
- Unsalan, O., Yilmaz, A., Bolukbasi, O., Ozturk, B., Esenoglu, H. H., Ildiz, G. O., and Ornek, C. Y. (2012). Micro-Raman, FTIR, SEM-EDX and structural analysis of the Çanakkale meteorite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 92, 250-255. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.02.014>
- Vankeirsbilck, T., Vercauteren, A., Baeyens, W., Van der Weken, G., Verpoort, F., Vergote, G., and Remon, J. P. (2002). Applications of Raman spectroscopy in pharmaceutical analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 21(12), 869-877. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(02\)01208-6](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)01208-6)
- Verma, H. C., Tewari, V. C., Paliwal, B. S., and Tripathi, R. P. (2009). Preferential occupation of pyroxene sites by iron in diogenite meteorites. İçinde N. S. Gajbhiye and S. K. Date (Ed.), *ICAME 2007* (ss. 1063-1068). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-78697-9\\_146](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78697-9_146)[https://doi.org/10.1007/978-3-540-78697-9\\_146](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78697-9_146)
- Vernazza, P., Carry, B., Emery, J., Hora, J. L., Cruikshank, D., Binzel, R. P., Jackson, J., Helbert, J., and Maturilli, A. (2010). Mid-infrared spectral variability for compositionally similar asteroids: Implications for asteroid particle size distributions. *Icarus*, 207(2), 800-809. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.01.011>
- Voropaev, S. A., Sevast'yanov, V. S., Eliseev, A. A., and Petukhov, D. I. (2013). Raman identification of calcite grains in the Chelyabinsk meteorite. *Geochemistry International*, 51(7), 593-598. <https://doi.org/10.1134/S001670291307015X>

- Voropaev, S., Böttger, U., Pavlov, S. G., Hanke, F., and Petukhov, D. (2021). Raman spectra of the Markovka chondrite (H4). *Journal of Raman Spectroscopy*, jrs.6147. <https://doi.org/10.1002/jrs.6147>
- Wang, A., Jolliff, B., Haskin, L., and Kuebler, K. (2000). Characterization of Structures and Compositions of Quadrilateral Pyroxenes by Raman Spectroscopy—Implications for Future Planetary Exploration.
- Yang, J., and Goldstein, J. I. (2005). The formation of the Widmanstätten structure in meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 40(2), 239-253. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2005.tb00378.x><https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2005.tb00378.x>
- Yin, F., and Dai, D. Q. (2020). A Study of Shock-Metamorphic Features of Feldspars from the Xiuyan Impact Crater. *Minerals*, 10(3). <https://doi.org/ARTN 231 10.3390/min10030231>
- Zeng, X. J., Li, X. Y., Liu, J. Z., Mo, B., Yu, W., and Tang, H. (2020). Discerning Lunar Pyroclastic and Impact Glasses via Raman Spectroscopy. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 125(12). <https://doi.org/ARTN e2020JE006674 10.1029/2020JE006674>
- Zhang, A.-C., Bu, Y.-F., Pang, R.-L., Sakamoto, N., Yurimoto, H., Chen, L.-H., Gao, J.-F., Du, D.-H., Wang, X.-L., and Wang, R.-C. (2018). Origin and implications of troilite-orthopyroxene intergrowths in the brecciated diogenite Northwest Africa 7183. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220, 125-145. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.09.051>
- Zhang, B., Shieh, S. R., Withers, A. C., and Bouvier, A. (2018). Raman spectroscopy of shocked enstatite-rich meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 53(10), 2067-2077.

<https://doi.org/10.1111/maps.13106><https://doi.org/10.1111/maps.13106>

Zhang, X., and Cloutis, E. (2021). Near-infrared Spectra of Lunar Ferrous Mineral Mixtures. *Earth and Space Science*, 8(4), e2020EA001153.

<https://doi.org/10.1029/2020EA001153><https://doi.org/10.1029/2020EA001153>

Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., and Joy, D. (2006). Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM). İçinde W. Zhou and Z. L. Wang (Ed.), *Scanning Microscopy for Nanotechnology* (ss. 1-40). Springer New York.

[https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1)[https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1)

Zwinkels, J. (2015). Light, Electromagnetic Spectrum. İçinde R. Luo (Ed.), *Encyclopedia of Color Science and Technology* (ss. 1-8).

Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_2)

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince gerekli verilerin sağlanmasında yardımlarını esirgemeyen başta Dr. Çisem ALTUNAYAR ÜNSALAN olmak üzere tüm EGE MATAL çalışanlarına ve Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkez Laboratuvarları üyelerine, tezin biçimlenmesinde değerli katkılarını aldığım University of Basque Country üyeleri sayın Dr. Kepa CASTRO, Dr. Julene ARAMENDIA ve Jennifer HUIDOBRO'ya, meteorit örneğini hibe eden ve bilgi birikimiyle tez sürecine destek olan sayın Dr. Mike ZOLENSKY ve özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen sayın danışmanım Doç. Dr. Ozan ÜNSALAN'a ve manevi olarak bu süreçte bana destek olan ailem, arkadaşlarım ve sevdiklerime teşekkürlerimi sunarım.

23 / 09 / 2022

İmzası

Irmak AYVAZ