

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FULGURİT'İN SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERLE YAPISAL
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
AHMET KARADAĞ
1800004367

Anabilim Dalı: Fizik

Program: Fizik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gülce ÖĞRÜÇ İLDİZ

NİSAN 2022

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FULGURİT'İN SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERLE YAPISAL
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
AHMET KARADAĞ
1800004367

Anabilim Dalı: Fizik

Program: Fizik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gülce ÖĞRÜÇ İLDİZ

Jüri: Doç. Dr. Namık AYSAL

Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül FULYA YELKENCİ

NİSAN 2022



Bu Yüksek Lisans Tez Çalışması İstanbul Kültür Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin BAP2104 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamı, evreni daha iyi anlamamızı sağlayacak katkıları olacağını düşünüyorum ve gelecek nesillere ithaf ediyorum.

Nisan, 2022

AHMET KARADAĞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
KISALTMALAR.....	IV
TABLO LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
SİMGE LİSTESİ.....	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	-1-
2. GENEL KISIMLAR	-5-
2.1. FULGURİTLER'İN ÖZELLİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI	-5-
2.1.1. Morfolojik özellikler	-5-
2.1.2. Fulguritlerin Sınıflandırılması	-7-
2.1.3. Fulguritlerin Jeokimyasal Özellikleri	-7-
3. MATERYAL VE YÖNTEM	-10-
3.1. Çalışmada Kullanılan Fulgurit	-10-
3.2. Gobi Çölünden Alman Fulgurit'in Petrografik özellikleri	-12-
3.3. DeneySEL Yöntemler	-15-
3.3.1. Binoküler Mikroskop Çalışması	-15-
3.3.2. Polarizan Mikroskop Çalışması	-15-
3.3.3. X-Işını Kırınım	-16-
3.3.4. ICP-OES ve LA-ICP MS	-18-
3.3.5. Raman Spektroskopisi	-20-
3.3.6. Kırmızı-altı Spektroskopisi.....	-22-
3.3.7. Elektron Mikroskobu Çalışmaları (SEM-EDX)	-23-
3.4. Kemometrik Analiz Yöntemleri	-25-

4. BULGULAR	-26-
4.1. Petrografik Bulgular	-26-
4.2. XRD (X-Işını Kırınımı) Analizleri	-27-
4.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskopi) Analizleri	-32-
4.4. ICP-OES ve LA-ICPMS Analizleri	-35-
4.5. Raman Spektroskopik ve Kemometrik Analizler	-40-
4.5.1. Kireçli Fulgürit'in Raman Spektroskopik Analizi	-51-
4.6. Kırmızı-altı Spektroskopik Analizi	-52-
4.7. Fulgürit'in Çekirdek ve Kabuk Kısımlarının Mineralojik Bileşiminin Karşılaştırılması.....	-54-
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	-56-
KAYNAKLAR	-60-

KISALTMALAR

XRD : X-Işın Kırınımı (**X-Ray Diffraction**)

ICP-OES : İndüktif Eşleşmiş Plazma Atomik Emisyon Spektroskopisi (**Inductive Coupled Plasma-Optic Emission Spectrometer**)

LA-ICPMS : Lazer Aşındırma – İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (**Laser Ablation-Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometer**)

SEM : Taramalı Elektron Mikroskopisi (**Scanning Electron Microscopy**)

EDX : Enerji Dağılımlı X-Işını (**Energy Dispersive X-ray**)

K : Kuzey

D : Doğu

PCA : Temel Bileşen Analizi (**Principal Component Analysis**)

PLS-DA : Kısmi En Küçük Kareler Ayırıştırma Analizi (**Partial Least Squares Discriminant Analysis**)

LOI : Kızdırma Kaybı (**Loss On Ignition**)

BSE : Geri Saçılan Elektron (**Backscattered Electron**)

Q : Kuvars

B : Barit

H : Hematit

A : Albit

Kf : K-feldispat

IR : Kırmızı altı (Infrared)

ATR : Zayıflatılmış Toplam Yansıma (**Attenuated Total Reflection**)

MCR : Çok Değişkenli Eğri Çözünürlüğü (**Multivariate Curve Resolution**)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1	: Beş fulgurit tipinin jeokimyasal karakterizasyonu.....	-9-
Tablo 4.1	: Çalışılan fulgurit XRD analizinden elde edilen farklı minerallerinin çekirdek ve kabuktaki miktarsal yüzdeleri, ağırlıkça yüzdeleri ve özellikleri	-29-
Tablo 4.2	: Fulgurit ince kesitinde, üst kısımda seçilen noktalardan elde edilen SEM analizi sonuçları (* ile verilen noktalarda haritalama yapılarak ölçüm alınmıştır)	-34-
Tablo 4.3	: Fulgurit ince kesitinde, alt kısımda seçilen noktalardan elde edilen SEM analizi sonuçları (* ile verilen noktalarda haritalama yapılarak ölçüm alınmıştır)	-34-
Tablo 4.4	: Fulgurit ince kesitinde, seçilen noktalardan elde edilen LA-ICPMS analizi sonuçları.....	-37-
Tablo 4.5	: Fulgurit örneğinin iç ve dış kısmından elde edilen ICP-OES analizi sonuçları.....	-38-
Tablo 4.6	: Fulgurit örneğinden elde edilen iz element analizi sonuçları.....	-39-

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

- Şekil 2.1** : Bir fulguritin şematik diyagramı (A), Oregon fulguritinden bir parça ve morfolojisi (B) (Pasek,vd.,2012) -6-
- Şekil 3.1** : Fulgurit örneklerinin alındığı bölge (solda), örneklerin alındığı bölgenin genel jeolojik görünümü (sağda) -10-
- Şekil 3.2** : Çalışılan Fulgurit örneklerinin görünümü -11-
- Şekil 3.3** : Çalışılan Fulgurit örneğinin uzun eksenine dik kesitinden iç yapısının görünümü..... -11-
- Şekil 3.4** : Moğolistan fulguritine ait kalın enine kesit (solda), parlatılmış boyuna ince kesit (sağda)..... -11-
- Şekil 3.5** : Tez kapsamında çalışılan fulgurit parçalarından birisinin kalın enine kesit(A) ve tepeden görünümü (B), çalışılan fulguritlerle kıyaslama amaçlı görüntüsü alınan kireçli fulgurit örneğinin kalın enine kesit (C) ve tepeden görünümü(D)..... -12-
- Şekil 3.6** : Tez kapsamında çalışılan fulgurit örneklerinden birine ait uzun eksene dik alınan kesitte iç kısım ve dış kabuk morfolojisinin ayrıntılı görünümü -13-
- Şekil 3.7** : Tez kapsamında çalışılan başka bir fulgurit parçasına ait kesit öncesi morfolojik görünüm..... -13-
- Şekil 3.8** : Tez kapsamında ince kesiti hazırlanan bir örneğin çift nikol (A) ve tek nikol (B) birleştirilmiş görüntüsü..... -14-
- Şekil 3.9** : Tez kapsamında çalışılan bir başka fulgurit parçasının ince kesit görüntüleri, Kesit öncesi ana parça (A), Orta kısımdan yapılan iki farklı boyuna kesit(B-D), ana parçanın iki baş kısmından yapılan kesit(C)..... -14-
- Şekil 3.10** : Binoküler stereo mikroskop görüntüsü..... -15-
- Şekil 3.11** : Polarizan mikroskop görüntüsü..... -16-
- Şekil 3.12** : X-ışınlarının düzlemler arası yansıma şeması..... -17-

Şekil 3.13	: XRD cihazı (solda) dış görünümü, (sağda) gonyometre, x-ışını tüpü, dedektör ve numune tutucu.....	-18-
Şekil 3.14	: Perkin Elmer NexION 200B (MS cihazı) ESI NWR 213 (LA cihazı)...	-19-
Şekil 3.15	: Avio 2000 (OES cihazı).....	-20-
Şekil 3.16	: Stokes, Rayleigh ve Anti-Stokes saçılmalarının şematik gösterimi. Sağ tarafta gösterilen oklar gelen fotonu temsil etmektedir.....	-21-
Şekil 3.17	: Raman spektrometre cihazı ve mikroskobu.....	-22-
Şekil 3.18	: Raman spektrumu elde edilen noktalar (kabuk kısmından).....	-22-
Şekil 3.19	: Kırmızı-altı Spektrometresi.....	-23-
Şekil 3.20	: SEM-EDX cihaz görünümü.....	-25-
Şekil 4.1	: Fulgurit kesiti çift nikol görüntüsü A, kesit içerisindeki tane alanlarının hesaplandığı görüntü B.....	-26-
Şekil 4.2	: Farklı bir fulgurit parçasından hazırlanan kesitin çift nikol görüntüsü A, kesit içerisindeki tane alanlarının hesaplandığı görüntü B.....	-27-
Şekil 4.3	: Fulgurit örneğinin iç kısma ait XRD spektrumu; (Br: barit; Qz: kuvars; Mc: mikroklin; Hm: hematit; Ab: albit. Numunenin gözlenen kırınım grafiği, şeklin üst kısmında gösterilen kırmızı spektruma karşılık gelirken, numunede bulunan farklı minerallerin ayrı katkıları, alt alta farklı renklerdeki spektrumlarla gösterilmiştir.).....	-30-
Şekil 4.4	: Fulgurit örneğinin kabuk kısmına ait XRD spektrumu. (Qz: kuvars; Hm: hematit; Gth: götit; Ab: albit; Mc: mikroklin ve Or: ortoklaz. Numunenin gözlenen kırınım grafiği, şeklin üst kısmında gösterilen kırmızı spektruma karşılık gelirken, numunede bulunan farklı minerallerin ayrı katkıları, alt alta farklı renklerdeki spektrumlarla gösterilmiştir.)...	-31-
Şekil 4.5	: Fulgurit kesitinde SEM analizi yapılan bazı noktaların BSE görüntüleri.....	-32-
Şekil 4.6	: Fulgurit kesitinin çekirdek ve kabuk kısımlarından elde edilen SEM-BSE ve SEM-EDX görüntüleri.....	-33-
Şekil 4.7	: Fulgurit kesiti üzerinde LA-ICPMS ile analiz yapılan noktalar... ..	-36-
Şekil 4.8	: İncelenen demirce zengin fulguritin kesilmiş ince kesitinden Raman spektrumlarının elde edildiği noktalar. Sol: çekirdekten; Sağ: kabuktan	-40-
Şekil 4.9	: Demirce zengin fulguritin çekirdek kısmından elde edilen Raman spektrumların MCR analizinden elde edilen bileşen spektrumları (A) ve bileşen konsantrasyonları (B).....	-41-

Şekil 4.10	: Demirce zengin fulguritin kabuk kısmından elde edilen Raman spektrumların MCR analizinden elde edilen bileşen spektrumları (A) ve bileşen konsantrasyonları (B).....	-42-
Şekil 4.11	: MCR bileşen spektrumları (solda) Demir açısından zengin fulguritin çekirdek bölümünde tanımlanan minerallerin Raman spektrumları (sağda).....	-43-
Şekil 4.12	: İncelenen demir açısından zengin fulguritin çekirdek bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA skor grafikleri. Q: kuvars; B: barit; H: hematit; A: albit; Kf: K-feldispat (mikroklin). -44-	-44-
Şekil 4.13	: İncelenen demir açısından zengin fulguritin çekirdek bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA yüklemeleri.. -44-	-44-
Şekil 4.14	: MCR bileşen spektrumları (solda) Demir açısından zengin fulguritin kabuk bölümünde tanımlanan minerallerin Raman spektrumları (sağda).....	-45-
Şekil 4.15	: İncelenen demir açısından zengin fulgurit'in kabuk bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA skor grafikleri. Q: kuvars; B: barit; H: hematit; A: albit; Kf: K-feldispat (mikroklin).....	-46-
Şekil 4.16	: İncelenen demir açısından zengin fulguritin kabuk bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA yüklemeleri.....	-46-
Şekil 4.17	: Kuvarsın Raman spektrumunun işaretlemeleri.....	-48-
Şekil 4.18	: Albitin Raman spektrumunun işaretlemeleri.....	-48-
Şekil 4.19	: Mikroklinin Raman spektrumunun işaretlemeleri (mikroklinle benzerlik gösteren albitin işaretlemesiyle birlikte verilmiştir).....	-49-
Şekil 4.20	: Baritin Raman spektrumunun işaretlemeleri.....	-49-
Şekil 4.21	: Hematitin mikroklinin Raman spektrumunun işaretlemeleri.....	-50-
Şekil 4.22	: Ortoklazın Raman spektrumunun işaretlemeleri (albite benzerlik gösteren mikroklinin işaretlemesiyle birlikte verilmiştir).....	-50-
Şekil 4.23	: Götitin Raman spektrumunun işaretlemeleri.....	-51-
Şekil 4.24	: İncelenen kireç fulguriti için elde edilen Raman spektrumları.....	-52-
Şekil 4.25	: İncelenen demir açısından zengin fulguritin çekirdeğinin Kırmızı-altı spektrumunun işaretlemeleri.....	-53-
Şekil 4.26	: İncelenen demir açısından zengin fulguritin kabuğunun Kırmızı-altı spektrumunun işaretlemeleri.....	-53-
Şekil 4.27	: İncelenen kireçli fulguritin Kırmızı-altı spektrumunun işaretlemeleri.....	-54-

SİMGE LİSTESİ

θ : Tetha (gelen ve yansıyan ışın arasındaki açı)

λ : Lambda (kaynaktan gelen X-ışını dalga boyu)

K : Kelvin (sıcaklık)

kV : Kilovolt (anot ve katot uçları arasındaki gerilim)

n : Kırınım mertebesi

sin : Sinüs (trigonometrik fonksiyon)

Pa : Pascal (basınç)

d : Düzlemler arası mesafe

°C : Derece (celcius)

J : Joule (enerji)

cm² : Santimetre kare (alan)

Hz : Hertz (frekans)

ml : Mililitre (hacim)

dk : Dakika (zaman)

ÖZET

Fulguritler, buluttan yere yıldırım düşmesi sonucunda kaya, kum veya toprağın hızlı bir şekilde ısıtılmasıyla oluşan çoğunluğu camsı yapılardır ve isimlerini Latince yıldırım anlamına gelen fulgur (Arago, 1821) kelimesinden alırlar. Teorik olarak, fulguritler, yıldırımın çarptığı her yerde oluşabildikleri için, bileşimsel çeşitliliği fazla olan doğal cam yapılardır. Yıldırımlar küresel bir parlama hızı ile dünya üzerinde saniyede yaklaşık 45 kez gerçekleşen (Christian, vd., 2003), çoğunluğu (%75-90) buluttan kıtasal kara kütesine elektrik aktarımıyla meydana gelen doğa olaylarıdır. Hava yoluyla yıldırım düşmesinin kanal çapı tipik olarak iki ila beş santimetre arasındadır (Rakov ve Uman 2003).

Topraktan geçen yıldırımın özelliklerini doğrudan gözlemlemek zor olduğundan fulguritler, biriken enerji, yıldırım kanalı genişliği, tepe sıcaklıkları ve potansiyel olarak ısıtma ve soğutma hızları dahil olmak üzere yeraltında ilerleyen yıldırımın özelliklerine dair önemli ipuçları sağlar. Kum fulguritler, kaya fulguritler ve kil fulguritler dahil olmak üzere önceki çalışmalarda birkaç farklı fulgurit morfolojisi rapor edilmiştir (Pasek, vd., 2009; Pasek, vd., 2012). Fulguritler, içindeki farklı mineral bileşimleri ve çekirdekten kabuk bölgelerine geçişteki değişimi ile fulguritlerin oluşum mekanizması arasında farklı türde ilişkiler kurmayı amaçlayan çeşitli çalışmaların konusu olmuştur (Cristian, vd., 2003; Pasek, vd., 2012; Rakov, vd., 2003; Pasek, vd., 2009; Crespo, vd., 2009; Saikia, vd., 2015; Sponholz, vd., 1993; Elmi, vd., 2017). Bu çalışmalarda incelenen fulguritlerin morfolojilerinin sistematik olarak farklılık gösterdiği belirlenmiş ve fulgurit oluşturan yıldırım çarpmalarının özelliklerini belirlemek için morfolojik özelliklerin kullanılabileceği de öngörülmüş olmasına karşın, fulguritlerin yapısal incelenmesine ve oluşum mekanizmasıyla ilişkilendirilmesine yönelik az sayıda çalışma yer almaktadır. Fulgurit oluşumunun sıklığı ve morfolojik olarak incelenmesinin yıldırım mekanizmasının aydınlatılmasındaki rolü düşünüldüğünde yapısının tüm yönleriyle karakterize edilmesi büyük önem arz etmektedir. (Matthew A. Pasek vd., 2012; Pasek and Block

2009; Christian vd., 2003; Altaratz vd., 2003; Williams vd., 2004; Lay vd., 2007; Boccippio vd., 2000). Bu çalışmada Moğolistan'daki Gobi çölünden alınmış fulgurit örneklerinin petrografik ve spektroskopik karakterizasyonu ortaya konulmuştur. Çalışılmış olan fulguritlerin menşei açısından da bu çalışma bir ilk olma özelliğine sahiptir.

Örneklerin mineral içerikleri İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeoloji Mühendisliğindeki polarizan mikroskop ile incelenmiştir. Sonrasında, XRD (X-Ray Diffraction) cihazı ile mineral içerikleri net olarak belirlenmiştir. Jeokimya ve Jeokronoloji laboratuvarındaki ICP-OES (Inductive Coupled Plasma-Optic Emission Spectrometer) cihazı ile majör oksitleri hesaplanmıştır. Hazırlanmış ince kesitlerden İstanbul Kültür Üniversitesi bünyesindeki Raman Spektroskopi Laboratuvarı'ndaki Raman cihazı ile minerallerin raman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeokimya ve Jeokronoloji Laboratuvarında LA-ICPMS (Laser Ablation-Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometer) cihazı ile mineral kimyası hesaplamaları yapılmıştır.

Fulguritin çekirdeğinde kuvars, mikroklin, albit, hematit ve barit Raman spektroskopisi ve kemometrik analizlere dayalı olarak tanımlanmıştır. Buna karşılık, fulguritin kabuk bölmesinde, tespit edilen mineraller kuvars, K-feldispat ortoklaz, mikroklin, albit, hematit ve götit karışımı olarak belirlenmiştir. Raman spektroskopisi sonuçları, SEM-BSE ve SEM-EDX analizleri ile birlikte, iki fulgurit bölgesinin toz haline getirilmiş örneklerinin X-ışını kırınım analizi ve ayrıca Kırmızı-altı spektroskopik verileriyle doğrulanmıştır. İç ve dış kısımdaki mineral bileşimindeki farklılıklar, yıldırım düşmesi sırasındaki farklı difüzyon hızları, yıldırım düşmesi sonrasında fulguritin yüzeyindeki ve iç kısımdaki farklı soğuma hızları ve minerallerin spesifik özellikleri dikkate alınarak açıklanmıştır.

ABSTRACT

Fulgurites are glasses formed by the rapid heating of rock, sand, or soil by a cloud-to-ground lightning strike, and they take their name appropriately from the Latin term for lightning, fulgur (Arago 1821). Theoretically, fulgurites are natural structures with a high compositional diversity as they can be formed from anything struck by lightning. Lightnings are natural phenomena that occur at a global flash rate about 45 times per second on Earth (Christian, vd., 2003), mostly (%75-90) by transmission of electricity from the cloud to the continental land mass. The channel diameter of a lightning strike through air is typically between two to five centimeters (Rakov and Uman 2003).

As it is difficult to directly observe the properties of lightning passing through the soil, including the energy deposited, lightning channel width, peak temperatures, fulgurites are and potentially a source of data to investigate heating and cooling rates associated with lightening effects on the ground, providing important clues about the properties of lightning moving underground. Several different morphologies of fulgurites have been reported in previous studies, including sand fulgurites, rock fulgurites, and clay fulgurites (Pasek, vd., 2009; Pasek, vd., 2012). It was determined in those studies that the morphologies of the examined fulgurites may differ considerably, and morphological features have been used to evaluate some characteristics of lightning strikes that form the fulgurites. Fulgurites have been the subject of various studies aiming to establish different kinds of relationships between the different mineral compositions and the change in the transition from core to shell regions and the formation mechanism of fulgurites. Nevertheless, there is only a reduced number of studies focusing on the detailed structural analysis of fulgurites and on the establishment of relations between these properties and the fulgurites' formation mechanism (Matthew A. Pasek vd., 2012; Pasek and Block 2009; Christian vd., 2003; Altartz vd., 2003; Williams vd., 2004; Lay vd., 2007; Boccippio vd., 2000). In this

study the petrographic and spectroscopic characterizations of fulgurite samples from the Gobi desert in Mongolia were undertaken. This study is a first in terms of origin of the fulgurites subjected to analysis.

The mineral contents of the samples were first examined with a polarized-light microscope, in the Istanbul University-Cerrahpaşa Geological Engineering Department. Afterwards, the mineral contents were determined using X-ray diffraction (XRD) (Geochemistry and Geochronology Laboratory of the Istanbul University) as well as by Raman spectroscopy complemented by chemometrics (at the Raman Spectroscopy Laboratory of the Istanbul Kultur University). Inductive Coupled Plasma-Optic Emission Spectrometry (ICP-OES) was used to shed light on the fulgurites composition (Geochemistry and Geochronology Laboratory of the Istanbul University), which was also investigated using the Laser Ablation-Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry method (LA-ICPMS) (Istanbul University-Cerrahpaşa Geochemistry and Geochronology Laboratory). Quartz, microcline, albite, hematite and barite were identified in the core of fulgurite based on Raman spectroscopy and chemometric analysis. On the other hand, the minerals detected in the shell section of fulgurite were determined as a mixture of quartz, K-feldspar orthoclase and microcline, albite, hematite and goethite. Raman spectroscopy results were confirmed to together with SEM-BSE and SEM-EDX analyses, by X-ray diffraction analysis of powdered samples of the two fulgurite regions as well as IR spectroscopic data. The observed differences in the mineralogical composition of the core and shell regions of the studied fulgurite can be explained taking into account the effects of both the diffusion of the melted material to the periphery of the fulgurite following the lightening and the faster cooling at the external shell region, together with differential properties of the various minerals.

1. GİRİŞ

Fulguritler, genel olarak hava karışımı ile yer yüzeyi arasında kutuplanmış yük yoğunluğunun litosfer yüzeyine ark olması sonucu meydana gelen doğal ergiyik / yarı ergiyik ve çoğu zaman camı yapılarıdır. Yıldırımların buluttan yere düşmesi sonucu oluşan fulguritin esasında yıldırım olarak adlandırılan iyonik yük minimum enerji denge çevriminin birer ayak izi olabileceği dolayısıyla da iyon yüklerinin hareketi ve davranışları açısından bir fenomen olarak ortaya konulabileceği düşünülmektedir.

Yıldırımlar küresel bir parlama hızı ile dünya üzerinde saniyede yaklaşık 45 kez gerçekleşen (Christian, vd., 2003), çoğunluğu (%75-90) buluttan kıtasal kara kütlelerine elektrik aktarımıyla meydana gelen doğa olaylarıdır. (Altartatz, vd., 2003; Williams vd., 2004; Lay, vd., 2007). Fulguritler, buluttan yere yıldırım düşmesi sonucunda kaya, kum veya toprağın hızlı bir şekilde ısıtılmasıyla oluşan çoğunluğu camı yapılarıdır ve isimlerini Latince yıldırım anlamına gelen fulgur (Arago, 1821) kelimesinden alırlar. Teorik olarak, fulguritler, yıldırımın hidrosfer hariç çarptığı her yerde oluşabildikleri için, bileşimsel çeşitliliği fazla olan doğal cam yapılarıdır.

Doğal camlar çeşitli mekanizmalarla üretilebilir (O'Keefe, 1984). Takilit ve obsidiyen gibi volkanik camlar, erimiş kaya ve lavların hızlı soğumasıyla ilişkilidir. Sismik olaylar sırasında faylar boyunca yüksek sürtünme hareketi, psödotaliti oluşturan kayalar camlaştırabilir (Spray, 1995). Diğer doğal camlar, göktaşı çarpmaları gibi son derece yüksek enerji olaylarıyla bağlantılıdır. Doğal cam oluşumlarında kaynağın kesin olarak belirlenmesi güç olmasına karşın yapılan çalışmalarda tektit, bedaisit, moldavit ve Libya çöl camı gibi en bilinen doğal camların oluşum mekanizmalarının tümü büyük etkilerle ilişkilendirilmiştir.

Fulguritler genel kısımlarda detaylı anlatıldığı biçimde morfolojilerine göre; kum fulguritler, kil fulguritler, kalış (jeolojik bir oluşum) fulguritler, kaya fulguritler ve damlacık fulguritler olmak üzere beş sınıfa ayrılmaktadır.

Litratürde kum fulguritler, kaya fulguritler ve kil fulguritlerin morfolojilerinin incelenmesine ilişkin az sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalarda incelenen fulguritlerin morfolojilerinin sistematik olarak farklılık gösterdiği ve yıldırım çarpmalarının özelliklerini belirlemek için bu morfolojik özelliklerin kullanılabileceği belirtilmiştir (Matthew A. Pasek vd., 2012; Pasek and Block 2009; Christian vd., 2003; Altaratz vd., 2003; Williams vd., 2004; Lay vd., 2007; Boccippio vd., 2000). Fulguritler, içindeki farklı mineral bileşimleri ve çekirdekten kabuk bölgelerine geçişteki değişimi ile fulguritlerin oluşum mekanizması arasında farklı türde ilişkiler kurmayı amaçlayan çeşitli çalışmaların konusu olmuştur (Cristian, vd., 2003; Pasek, vd., 2012; Rakov, vd., 2003; Pasek, vd., 2009; Crespo, vd., 2009; Saikia, vd., 2015; Sponholz, vd., 1993; Elmi, vd., 2017).

Fulgurit oluşumunun sıklığı ve morfolojik olarak incelenmesinin yıldırım mekanizmasının aydınlatılmasındaki rolü düşünüldüğünde yapısının tüm yönleriyle karakterize edilmesi büyük önem arz etmektedir. Toprakten geçen yıldırımın özelliklerini doğrudan gözlemlemek zor olduğundan fulguritler, biriken enerji, yıldırım kanalı genişliği, tepe sıcaklıkları ve potansiyel olarak ısıtma ve soğutma hızları dahil olmak üzere yeraltında ilerleyen yıldırımın özelliklerine dair önemli ipuçları sağlar.

Bu çalışmada Moğolistan'ın Gobi çölünden alınmış demirce zengin ve kireçli fulgurit örneklerinin petrografik ve spektroskopik karakterizasyonu ortaya konulmuştur. İncelenen fulgurit örnekleri, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeoloji Mühendisliği Bölümü emekli öğretim üyesi Prof. Dr. Sinan Öngen tarafından 2018 yılında Moğolistan Devlet Üniversitesi'ne yaptığı gezi kapsamında Gobi Çölü'nden alınmıştır (***44.22747°K ve 103.2991°D Dalanzadgad şehrinin batısı, Tugrugün Shire-Gobi Çölü***). Çalışılmış olan fulguritlerin menşei açısından da bu çalışma bir ilk olma özelliğine sahiptir.

Fulgurit numunelerinin çekirdek ve kabuk bölümlerinin mineral içerikleri, Raman spektroskopisi, Kırmızı-altı spektroskopisi ve X-ışını toz kırınım yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Fulgurit örneklerinden ince kesitler hazırlanarak petrografik incelemeleri yapılmıştır. X-ışını Kırınımı (XRD) yöntemi ile yapılan mineral tayini için fulgurit iç ve dış (kabuk) olmak üzere iki kısma ayrılarak 150 mesh

boyutunda öğütölmüştür. XRD analizi sonucu örneğın iç kısmında; kuvars, mikroklin, albit, hematit ve barit mineralleri tespit edilmiştir. Fulguritin dış kısmında ise iç kısımdaki minerallere ek olarak götit ve ortoklaz mineralleri tespit edilmiş ancak barit bulunamamıştır. Götit minerali, hematit varlığında, ikincil olarak oluşan sulu demir minerali olduğundan çöl kumlarında alterasyon sonucu gelişen bir durumun varlığını açıklamaktadır. Çalışılan fulguritin menşeinin Gobi Çölü olduğu düşünöldüğünde, elde edilen bulgular bahsi geçen çöl kumunun içeriğıyle uyum içindedir.

Farklı kesit haritaları kullanılarak yapılan petrografik incelemeler kapsamında farklı örneklere ait kesitlerdeki seçili alanlarda tane ve matriks kısım oranları belirlenmiştir. Ölçümlerdeki farklılıklar, oluşum sırasında yıldırımın enerji boşaltmasının farklı deşarj kollarının varlığına işaret edebileceğı gibi, yıldırımın yere düştüğü anda dirençli malzemede ilerleme ya da ilerleyememe durumlarına da dikkat çekmektedir. Ayrıca incelenen farklı parçalar, birden fazla yıldırımın oluşturduğu farklı fulguritlere de ait olabilir.

ICP-OES cihazı ile tüm kayaç jeokimyası analizi yapılarak majör oksitleri hesaplanmış ve örneklerin yüksek kuvars içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. İç kısımda tanelerin çoğunluğu kuvars olduğundan dolayı dış kısma göre yüksek SiO₂ içeriğine sahip iken, dış kısım iç kısma göre daha yüksek Cr₂O₃ içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Fulgurit örneklerinden hazırlanan parlatılmış ince kesitte belirlenen mineraller üzerinde ve hamur kısmında yapılan SEM analizi sonucunda, iki farklı bölgede toplam 36 nokta üzerinde, matriks kısmında ortalama %77 civarında FeO tespit edilmiştir. Benzer biçimde aynı kesitler üzerinden yapılan LA-ICP MS analizler sonucunda matriks kısmında yüksek FeO içeriğı gözlenmiştir. Literatürdeki bulgular dikkate alındığında fulguritin oluşumu esnasında maruz kaldığı yüksek ısı sebebiyle ergimiş camsı bir matrikse sahip olması beklenirken, yüksek FeO oranına sahip olması hedef malzemenin içerdığı minerallerin bünyesindeki Fe elementinin hamura geçmiş olabileceğı ile ilişkilendirebilir. 5 tane mineralden yapılan ölçüm sonuçlarına göre bu minerallerin hepsi kuvars olarak belirlenmiştir.

Raman spektroskopik ölçümleri için demir açısından zengin fulguritten hazırlanmış ince kesitten polarize ışık altında kuvars kaması ile belirlenen kristal yapılarından çekirdekten 60 ve kabuk kısmından 60 nokta rastgele seçilerek bu noktalardan toplam 120 spektrum elde edilmiştir. Elde edilen Raman spektrumları Kemometrik yöntemlerden biri olan Çok Değişkenli Eğri Çözünürlüğü (MCR) (Tauler vd., 1996) ve Temel Bileşen Analizi (PCA) (Martens vd., 1989) kullanılarak analiz edilmiş XRD sonuçlarına benzer biçimde merkezi iç kısımda Kuvars, Mikroklin, Albit, Hematit, Barit, dış kısımda ise Kuvars, Mikroklin, Ortoklaz, Albit, Hematit ve Götite mineralleri tespit edilmiştir.

İç ve dış kısımdaki mineral bileşimindeki farklılıklar, yıldırım düşmesi sırasındaki farklı difüzyon hızları, yıldırım düşmesi sonrasında fulguritin yüzeyindeki ve iç kısımdaki farklı soğuma hızları ve minerallerin spesifik özellikleri dikkate alınarak açıklanmıştır. Toz haline getirilerek kaydedilmiş demir içerikli fulguritten kaydedilen Kırmızı-altı spektrumların analizi sonucu elde edilen bulgular, Raman spektroskopisi ile tanımlanan minerallerin fulguritlerin farklı bölgelerindeki varlığını doğrulamaktadır.

İncelenen kireçli fulgurit için gerçekleştirilen Raman spektroskopik analizleri ve XRD sonuçları bu fulguritin mineral bileşiminin, demir içerikliye kıyasla çok daha basit olduğunu ortaya koymuştur. Çekirdek ve kabuk bölmelerinde elde edilen Raman spektrumları, her iki bölgede de kireç fulguritinin mineralojik bileşiminin aynı olduğunu göstererek ana bileşenlerin kuvars ve kalsit olduğunu ayrıca albit ve ortoklaz ve mikroklin karışımı (ve muhtemelen, ayrıca biraz anortit) içerdiğini göstermiştir. Kırmızı-altı spektroskopisiyle elde edilen bulgulara Raman spektroskopik bulgularla uyum içindedir.

İstanbul Kültür Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeler Birimi tarafından desteklenen bu Yüksek Lisans tez çalışmasının sonuçları makaleye dönüştürülerek “*Micro-Raman Spectroscopy and X-ray Diffraction Analyses of the Core and Shell Compartments of an Iron-Rich Fulgurite*” başlığı ile SCI indekslerince taranan Molecules dergisinin “**Study of Minerals by Molecular Spectroscopy**” sayısında yayınlanmak üzere gönderilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

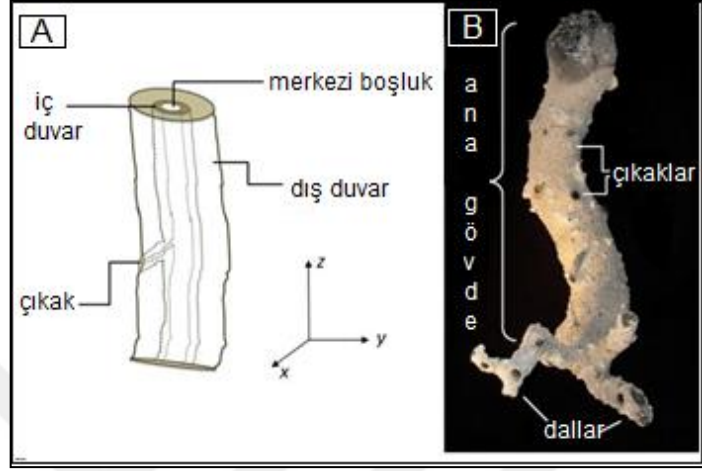
2.1. FULGURİTLERİN ÖZELLİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

Topraktan geçen yıldırımın özelliklerini doğrudan gözlemlemek zor olduğundan fulguritler, biriken enerji, yıldırım kanalı genişliği, tepe sıcaklıkları ve potansiyel olarak ısıtma ve soğutma hızları dahil olmak üzere yeraltında ilerleyen yıldırımın özelliklerine dair önemli ipuçları sağlar. Hava yoluyla yıldırım düşmesinin kanal çapı tipik olarak iki ila beş santimetre arasındadır (Rakov ve Uman 2003). Toprağın iletkenliği havaninkinden önemli ölçüde daha yüksek olduğundan, yıldırım topraktan geçerken ilerleme kanalının bir santimetreden çok daha küçük bir çapa daralması beklenir. Bir yıldırım darbesinin süresi yaklaşık 10 milisaniye'dir ve yıldırım çarpmasının enerjisi, bu kısa zaman ölçeğinde, dar bir kanal genişliği boyunca biriktirilir. Bu çarpmanın hemen yakınındaki ısıtma hızı son derece yüksektir (1,000 K/s). Fulgurit oluşumuyla ilişkili pik sıcaklıklar sıklıkla, fulgurit oluşumunda hedef malzemelerden biri olan ve yer kabuğunun %95'ini oluşturan silikatların çoğunun kaynama noktası olan yaklaşık 3.000 K'i aşar. 10.000–30.000 K arasında yüksek sıcaklıklara ulaştığı düşünülen bu pik sıcaklıklar silikatların tamamen buharlaştığı yıldırım ilerleme kanalında muhtemelen daha da yüksektir (Boccippio vd., 2000).

2.1.1. Morfolojik özellikler

Çoğu fulgurit, silindirik veya uzun koni şeklindedir. Birçoğunun merkezinde, oluşum sırasında buharlaşmış malzeme veya uçucuların kaçtığı, tek veya çok sayıda yakın aralıklı boşluk vardır. Bu boşluk, burada z eksenini olarak atanan mevcut hareket yönü boyunca hizalanır. Küçük boşluklar veya yan havalandırma delikleri, merkezi boşluktan radyal olarak uzanabilir. Fulgurit çok az malzeme kaybıyla oluşursa, bu merkezi boşluk genellikle numunenin uzunluğunu uzatan iç fulgurit çeperi ile çevrilidir. Bu çeper tipik olarak eriyik camdan oluşur, ancak oluşum sonrası süreçlerin bir sonucu olarak değişime uğramamış taneler gömülü olabilir. Dış fulgurit duvarı kısmen erimiş veya fırınlanmış bir malzemeden oluşmaktadır. Hafif değişmiş veya

değişmemiş hedef malzeme, dış fulgurit duvarına gevşek bir şekilde yapışabilir. (Pasek, vd., 2012). Şekil 2.1-A'da sıklıkla oluşan bir fulguritin şematik diyagramı, Şekil 2.1-B'de ABD Oregon eyaletinden alınmış bir fulguritin morfolojisi verilmektedir (Pasek, vd., 2012).



Şekil 2.1: Bir fulguritin şematik diyagramı (A), Oregon fulguritinden bir parça ve morfolojisi (B) (Pasek, vd., 2012).

Literatürde kum fulguritler, kaya fulguritler ve kil fulguritlerin morfolojilerinin incelenmesine ilişkin bazı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalarda incelenen fulguritlerin morfolojilerinin sistematik olarak farklılık gösterdiği belirlenmiş ve fulgurit oluşturan yıldırım çarpmalarının özelliklerini belirlemek için morfolojik özelliklerin kullanılabileceği de öngörülmüş olmasına karşın, fulguritlerin yapısal incelenmesine ve oluşum mekanizmasıyla ilişkilendirilmesine yönelik az sayıda çalışma yer almaktadır. (Matthew A. Pasek vd., 2012; Pasek and Block 2009; Christian vd., 2003; Altaratz vd., 2003; Williams vd., 2004; Lay vd., 2007; Boccippio vd., 2000). Fulgurit oluşumunun sıklığı ve morfolojik olarak incelenmesinin yıldırım mekanizmasının aydınlatılmasındaki rolü düşünüldüğünde yapısının tüm yönleriyle karakterize edilmesi büyük önem arz etmektedir.

2.1.2 Fulguritlerin Sınıflandırılması

Fulgurit yapılarının çeşitliliğine ve bolluğuna rağmen, Pasek'in çalışmalarına (Pasek, vd., 2012) kadar literatürde fulgurit türlerine ilişkin ayrıntılı bir sınıflandırma çalışması bulunmamaktadır.

Fulguritler beş ana gruba ayrılır (Pasek vd., 2012). Tip I fulguritler kuvars kumunda oluşur ve genellikle içi boş bir iç boşluğu çevreleyen ince camsı duvarlar içerir. Tip II fulguritler, killi topraklarda veya tipik olarak gri bir kabuğun büyük bir silindirik boşluğu çevrelediği lölşlerde oluşur. Tip III fulguritler kalışli ve/veya kireçli (jeolojik bir oluşum) topraklarda oluşur, ve karakteristik olarak kalın camsı duvarlara sahiptir, merkezi boşluk çok azdır veya hiç yoktur. Tip IV fulguritler kayada oluşur ve kimyasal olarak heterojendir ve merkezi boşlukta çok az veya hiç lechatelierit camı yoktur. Tip V fulguritler damlacıklar olarak bilinir ve fulgurit silindirinden fırlatıldıktan sonra hem ana hem de iniş materyal(ler)ini içerir.

Tip I : İnce, cam duvarlardan oluşan kum fulguritleridir.

Tip II : Kalın, eriyik açısından zengin duvarlardan oluşan kil fulguritlerdir

Tip III : Kalın, camdan oluşan kalış (jeolojik bir oluşum) fulguritleridir.

Tip IV : Erimemiş kayalardan oluşan camsı duvarlarla çevrili kaya fulguritleridir.

Tip V veya Damlacık : Morfolojik olarak diğer türlerden farklıdır, ancak yapısal olarak **tip II** veya **IV** fulguritlerle ilişkilidir. **Tip V** fulguritler damlacıklar olarak bilinir ve fulgurit silindirinden fırlatıldıktan sonra hem ana malzemeyi (malzemeleri) hem de iniş malzemesini içerir.

2.1.3 Fulguritlerin Jeokimyasal Özellikleri

Tip I fulgiritleri lechatelieriteden oluşan bir veya iki eriyik içerir. Eğer SiO_2 % 80'den daha fazla ise Fe veya Al yüksek konsantrasyonuna sahip bir matriks eriğı üretebilirler. Carter (2010b) ve Pasek ve Block (2009), **Tip II** fulgiritlerinde P

bakımından zengin Fe metal küreleri ve Ca-P-Si oksit bakımından zengin taneler içeren şok kuvarsları çalışmalarında belirtmişlerdir. Buna karşılık, **tip II** fulguritler, daha az lechatelierite eriyiği içerir ve **tip I** fulguritlere kıyasla daha yüksek cam genişliklerine sahiptirler. Tip II fulguritlerdeki matriks eriyiği, bileşimsel olarak daha çeşitlidir. **Tip II** fulguritlerdeki feldispat taneleri bazen mevcut olup, homojen bir cam bileşimi oluşturmak için eriyebilirler. Damlacık (**tip V**) fulguritler, **tip II** fulgurit eriyikleri ile ilişkilidir (Pasek vd., 2012). **Tip III** fulguritler lechatelierite ve feldispat camlarından oluşur, matriksi bu cam taneciklerini birbirine bağlayan kalsitten oluşmaktadır. **Tip IV** fulguritler kayada oluşur ve heterojen eriyikler üretir. Bu eriyikler illa lechatelierite taşımazlar veya oksit indirgemesi göstermeyebilirler ve ayrıca damlacık (Tip V) oluşumu ile de ilişkilidirler. **Tip V** damlacık fulguritleri tamamen karışmış ve homojen bir eriyike sahiptirler. **Tip V** damlacıklarında bulunan iki ana oksit, ortaya çıkan fulgurite göre SiO₂ ve K₂O bakımından zenginleştirilmiştir; diğer oksitler ise tükenmiştir (Pasek v.d, 2012). Küçük boyutu göz önüne alındığında, genel olarak fulgurit damlacıklarının bu oksitlere göre bileşimde sistematik olarak değişip değişmeyeceği açık değildir.

Pasek vd. (2012) tarafından beş fulgurit tipi için belirlenmiş jeokimyasal karakterizasyonlar Tablo 2.1’de verilmiştir.

Genel olarak, bir fulguritin bileşimi, hedef malzemenin bileşimini yansıtır. Bu özellikle kaya **fulguritleri (tip IV)** için geçerlidir. Kaya fulguritleri, uçucu hale gelen malzeme kaçış yolunda çok daha sınırlı olduğu için hedef malzemenin en az varyasyonu göstermelidir yalnızca merkezi boşluktan kaçabilir ve bu boşluk genellikle eriyik cam tarafından engellenir. Bunun tersine, diğer fulguritler için hedef ve sonuçta ortaya çıkan fulgurit arasında daha fazla varyasyon mümkündür, çünkü uçucu materyal, hedef materyalin artan gözenekliliği nedeniyle radyal yönlerde de kaçabilir. Bu nedenle, **tip I – III fulguritler**, kütle kaybı ve transfer olasılığına sahiptir ve kimyasal çıkarımlar duruma göre alınmalıdır.

Tablo 2.1: Beş fulgurit tipinin jeokimyasal karakterizasyonu

Tür	Yoğunluk (g/cm³)	Glass (%)	Hedef Matervial	Lechatelierite Yüzdesi	Matriks Yüzdesi	Matriks bileşimi	İndirgeme
I	0.7±0.2	95-100	Kuvars kumu	80-100	0-20	Öncelikle SiO ₂ ile minör Al ₂ O ₃ ve diğer oksitler	Nadiren/az
II	1.2±0.2	30-90	Konsolide edilmemiş=tamamen farklı toprak ve / veya Kaya	10-50	50-90	Çeşitli	Nadir=sıra dışı
III	2.1±0.5	0-10	Kuvars ve feldispat kumu ile yapıştırılmış kalsit	10-50	50-90	Kalsiyum karbonat	Hayır
IV	≈ kaynak	Merkez: 50-90	Birleştirilmiş /konsilde Kaya	0-50	50-100	Çeşitli	Hayır
Damlacık*	1.6±0.2	90-100	Toprak ve / veya kaya	0-20	80-100	Tip 2'ye göre veya 4, ama muhtemelen devamı SiO ₂ ve K ₂ O	Nadir=sıra dışı

* Tip V damlacık olarak adlandırılmıştır.

Fulgurit oluşumunun sıklığı ve morfolojik olarak incelenmesinin yıldırım mekanizmasının aydınlatılmasındaki rolü düşünüldüğünde yapısının tüm yönleriyle karakterize edilmesi büyük önem arz etmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışmada Kullanılan Fulgurit

Bu yüksek lisans tez projesi kapsamında incelenecek olan fulgurit örnekleri, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeoloji Mühendisliği Bölümü emekli öğretim üyesi Prof. Dr. Sinan Öngen tarafından 2018 yılında Moğolistan Devlet Üniversitesi'ne yaptığı gezi kapsamında Gobi Çölü'nden alınmıştır (*44.22747°K ve 103.2991°D Dalanzadgad şehrinin batısı, Tugrugün Shire-Gobi Çölü*). Gobi çölünde gevşek zeminde (genelde kumlu) bulunan örnekler daha önce literatürde çalışılmış örneklerle benzerlikler ve farklılıklar içermektedir. Şekil 3.1'de fulgurit örneklerinin alındığı bölge (solda), örneklerin alındığı bölgenin genel jeolojik görünümü (sağda) verilmiştir. Bu tez çerçevesinde çalışılan Moğolistan fulguritine ait örnek fotoğraflar ve morfolojik yapıları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te kalın enine kesit ve parlatılmış boyuna ince kesitleri şekil 3.4'te verilmiştir.



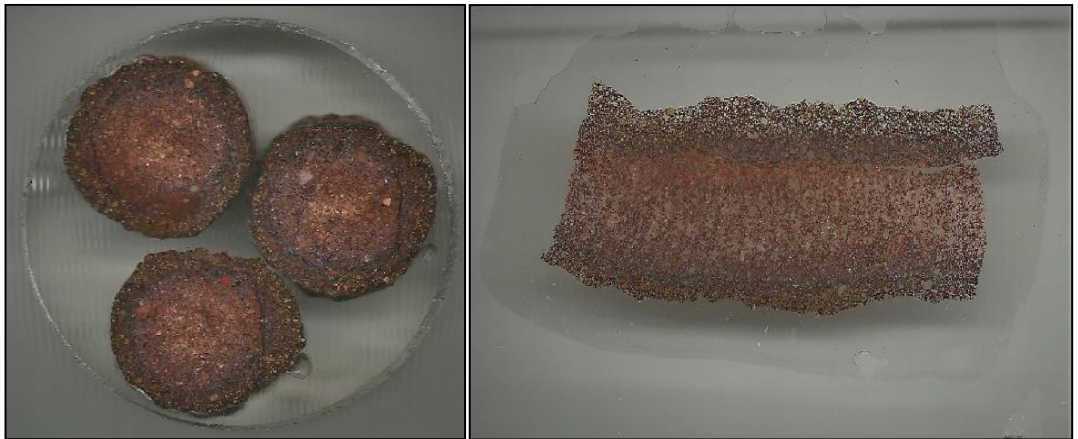
Şekil 3.1: Fulgurit örneklerinin alındığı bölge (solda), örneklerin alındığı bölgenin genel jeolojik görünümü (sağda).



Şekil 3.2: Çalışılan Fulgurit örneklerinin görünümü.



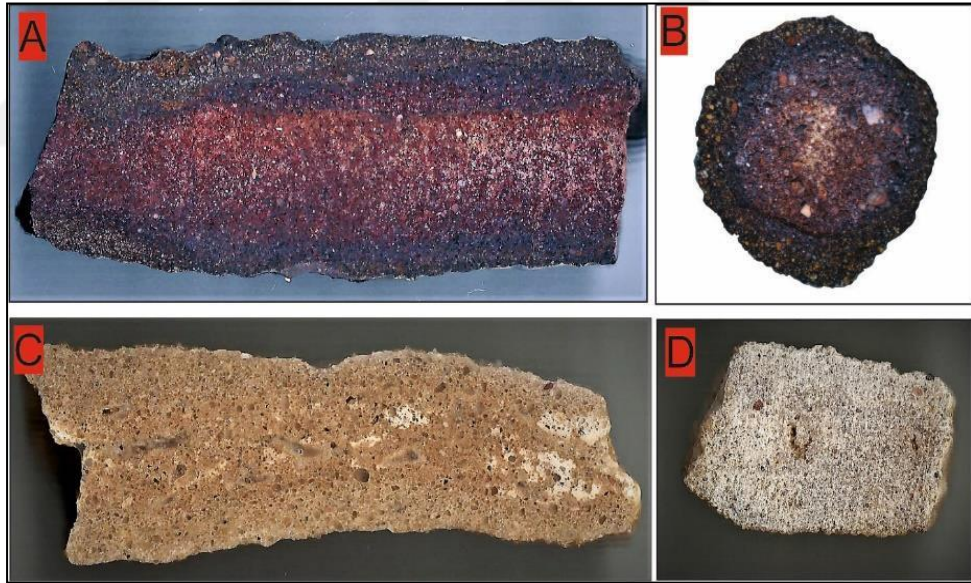
Şekil 3.3: Çalışılan fulgurit örneğinin uzun eksenine dik kesitinden iç yapısının görünümü.



Şekil 3.4: Moğolistan fulguritine ait kalın enine kesit (solda), parlatılmış boyuna ince kesit (sağda).

3.2. Gobi Çölünden Alınan Fulgurit'in Petrografik özellikleri

Tez çalışması kapsamında aynı bölgeden alınan farklı fulgurit parçalarından 7 adet parlatılmış ince kesit ve 1 adet kalın parlak kesit yaptırılmıştır. Kesiti yaptırılan örneklerden birisi aynı bölgeden alınmış kireçli bir fulgurit örneğidir. Bu örnek bu tez çalışması kapsamında detaylı incelenmemiştir. Ancak morfolojik kıyaslama için kesit görüntüsü Şekil 3.5-C ve 3.5-D ile verilmiştir. Hazırlanan ince kesitler 40 mikron kalınlıklı olup petrografik incelemelerde ve sonrasında LA-ICPMS ve SEM analizleri ile mineral kimyalarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Hazırlanan ince petrografik ince kesitler Şekil 3.5, 3.6, 3.8 ve 3.9 ile verilmiştir. Şekil 3.7' de ise el ile kırılmış hali gösterilmiştir.



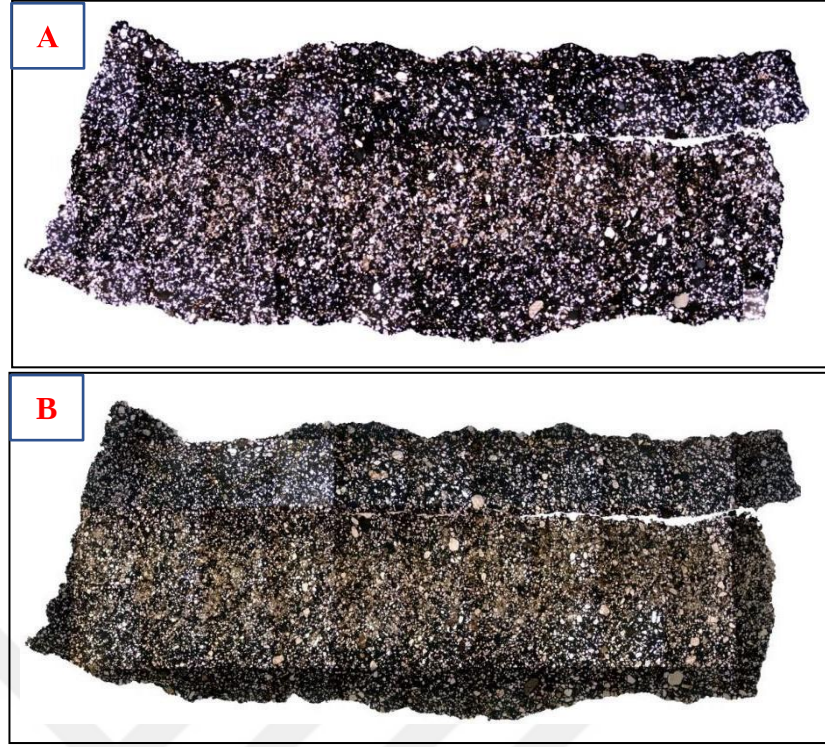
Şekil 3.5: Tez kapsamında çalışılan fulgurit parçalarından birisinin kalın boyuna kesit(A), tepeden görünümü (B), çalışılan fulguritlerle kıyaslama amaçlı görüntüsü alınan kireçli fulgurit örneğinin kalın boyuna kesit (C) ve tepeden görünümü (D).



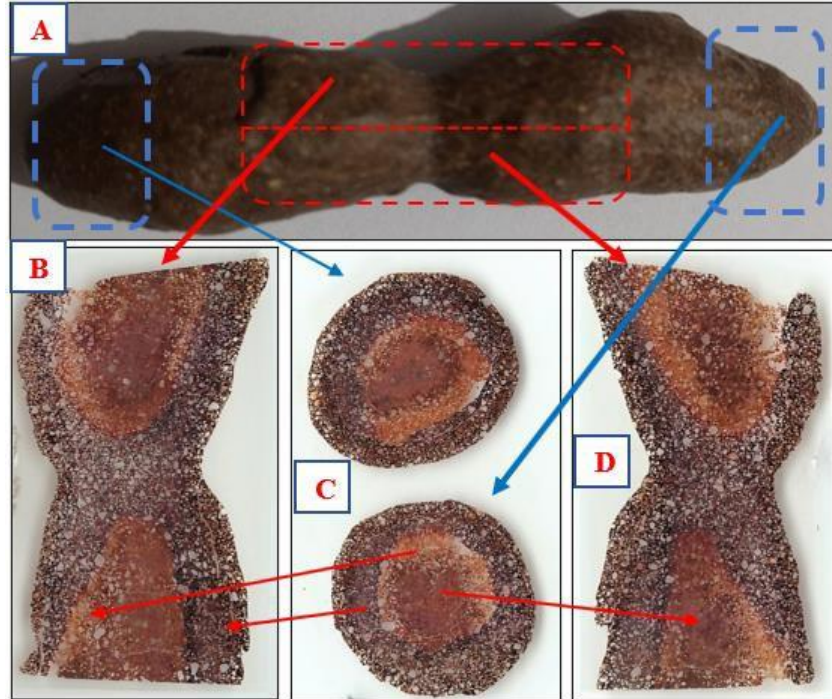
Şekil 3.6: Tez kapsamında çalışılan fulgurit örneklerinden birine ait uzun eksene dik alınan kesitte iç kısım ve dış kabuk morfolojisinin ayrıntılı görünümü.



Şekil 3.7: Tez kapsamında çalışılan başka bir fulgurit parçasına ait kesit öncesi morfolojik görünüm.



Şekil 3.8: Tez kapsamında ince kesiti hazırlanan bir örneğin çift nikol (A) ve tek nikol (B) birleştirilmiş görüntüsü.



Şekil 3.9: Tez kapsamında çalışılan aynı bölgeden bir başka fulgurit parçasının ince kesit görüntüleri: Kesit öncesi ana parça (A), Orta kısımdan yapılan iki farklı boyuna kesit (B-D), ana parçanın iki baş kısmından yapılan enine ince kesit (C).

3.3. Deneysel Yöntemler

3.3.1. Binoküler Mikroskop Çalışması

Bu incelemeye konu olan 7 tane fulgurit kesiti üzerinde, öncelikle mikroskop altında doku ve yapı incelemeleri yapılmıştır. Numuneler üzerinde çıplak gözle dahi görülebilen dış kabuk yüzeyden merkezi iç kısma doğru koyu kahverenginden açık kahverengiye tonu değişimi gözlenmiştir. Stereo mikroskop altında yapının dağılımı ara matrikste hamur şeklinde bir ergiyik ve bu dağılıma tutunan kristalleri öz şekilli / öz şekilsiz, yer yer çatlaklara sahip mineraller gözlenmiştir.

Binoküler mikroskop çalışmaları İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mineraloji-Petrografi Anabilim Dalı Optik Mineraloji Laboratuvarı'nda bulunan Leica S8APO binoküler mikroskop (Şekil 3.10) ve Leica Görüntü Analiz Sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10: Binoküler stereo mikroskop görüntüsü.

3.3.2. Polarizan Mikroskop Çalışması

Tez kapsamında çalışılan ince kesitler İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İnce kesit hazırlama laboratuvarında

hazırlanmıştır. Kesitler polarizan mikroskop (Şekil 3.11) çalışmaları İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mineroloji-Petrografi Anabilim Dalı Optik Mineroloji Laboratuvarı'nda bulunan Leitz Ortoplan polarizan mikroskop altında incelenerek, mineralleri ve yapıları belirlenmiştir.



Şekil 3.11: Polarizan mikroskop görüntüsü

3.3.3. X-Işını Kırınım

Evrimsel açıdan gözle görülemeyen X ışınları kaynak olarak kullanılarak kristal yapıların özelliklerini tayin etmede kullanılan bir yöntemdir (XRD). Uygun koşullarda malzemeyi tahrip etmemesi ve de görünür ışığa nazaran derine nüfuz edip daha derinden bilgi alabilmemizi sağlaması bu noktada kristalin yönelimi, kristal yapı, mevcut fazlar kusurlar, yüzey gerilmeleri gibi malzeme özellikleri tayin edilebilmesini sağlaması nedeniyle yaygın kullanılan bir yöntemdir.

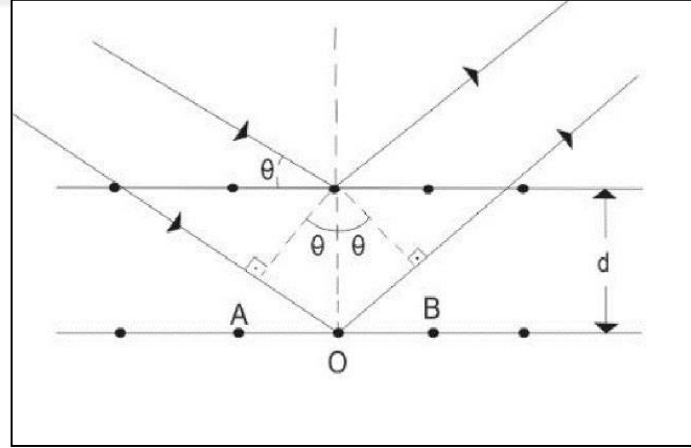
Kaynak olarak ışın tüpünde katot ucunda bulunan filaman, ki Coolidge tarafından icat edilen filaman tüpleri yaygın kullanılan modeldir veya gaz, elektrik kuvvetle ısıtılır ve buradan elektronlar salınır, ışınan bu elektronlar topraklanan anot uca doğru yüksek elektrik alan ile hızlandırılır ve nihayetinde bu yüksek kinetik enerjiye sahip elektronlar (~30-50 kV Potansiyel arasında) hedefteki metal malzeme

ile etkileşir bu esnada elektron demetlerine maruz kalan malzemedeki atomların enerji seviyelerinden λ dalga boylu ışımlar ve ısınmalar meydana gelir, buradan açığa çıkan fotonlar X ışınlarıdır, açığa çıkan ısı enerjisi ise genellikle sıvı soğutma ile uzaklaştırılır. Toplam enerjinin en çok %1 'i X ışını olup arda kalan enerji ısı enerjisine dönüşmektedir (Aydoğan, 2015).

Max Von Laue tarafından X-ışınlarının kristalden kırınımı bulunmuştur. X-ışını demetleri kristal örgülerden geçirilirse kırınım merkezleri atomlar olur ve sonuç olarak kristal yapıya özgü ve X-ışınlarının dalga boyuna bağlı olarak desenler oluşur. Bu noktada yapıcı girişimler Bragg yasası **(Denklem 3.1)** ile doğrulanır, yıkıcı girişimler ise sönmüldükleri için başlangıçta desen oluşturamazlar dolayısı ile gözlenemezler (Kaygısız,2018, Kittle,2014).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

Bragg denkleminde; n: kırınım mertebesi ($n=1,2,3\dots$), λ : X-ışın dalga boyu, d: düzlemler arası mesafe, θ : ışın düzlem arası açısı



Şekil 3.12: X-ışınlarının düzlemler arası yansıma şeması.

Bu analiz yönteminde, Bragg yasasının gerçekleştirilebilmesi yani yapıcı girişimlerin oluşabilmesi için kullanılan dalgaboyu $2d$ 'den küçük olması gerekir (Şekil 3.12). Kırınımına uğrayan ışınları ve şiddetini belirleyebilmek için örnek θ açısı kadar döndürülür buna mukabil dedektör iki katı kadar döndürülmesi gerekmektedir. Algıca

düşen ışınlar buradaki gazı iyonize edip elektriksel iletken hale getirir ve akım geçmesi sağlanır. Artan azalan ışın şiddetine mukabil dedektörden geçen akım miktarı da değişmektedir. Sabit hızla döndürülen dedektör ışının şiddetini ölçer ve 2θ 'ya bağlı bir spektrum dağılımı elde edilir. Spektrumdaki piklerin hangi açı değerine tekabül ettiği bulunur. Gelen ışının dalga boyu da bilindiği için bulunan açılara karşılık gelen d mesafesi hesaplanabilir. Daha evvel hesaplanmış kartelalarla d mesafelerinin hangi minerale ait olduğu saptanır. Bu sayede malzeme yapısı analiz edilmiş olur (Kaygısız, 2018 ; Kittle, 2014).

XRD analizi, fulgurit örneklerinin mineralojik bileşimlerinin daha detaylı incelenmesi için yapılmıştır. (Şekil 3.13). Ölçüm için yeteri miktarda örnekler agat havanda 150 mesh boyutuna ininceye kadar öğütülmüştür. Analizler İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, Mineraloji-Petrografi Anabilim Dalı X-Işınları laboratuvarındaki Philips Marka PW3020 model cihazda $\text{CuK}\alpha$ Radyasyonu ile 40kV potansiyel ve 30mA akım altında $2\theta=1^\circ/\text{dk}$ gonyometre hızı ile yapılmıştır. Ölçümler 5° ila 55° arasında alınmıştır. Örneklerdeki farklı minerallerin göreceli yüzdelерinin yarı kantitatif olarak hesaplanması Match! programındaki referans şiddet oranı (RIR) metodu kullanılarak yapılmıştır (Holger Putz, 2016; P. M. De Wolff, 1964).

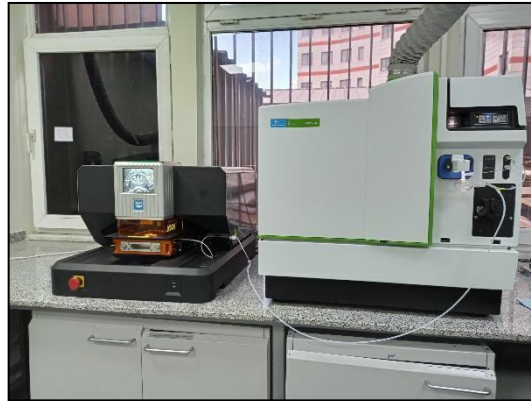


Şekil 3.13: XRD cihazı (solda) dış görünümü, (sağda) gonyometre, x-ışını tüpü, dedektör ve numune tutucu.

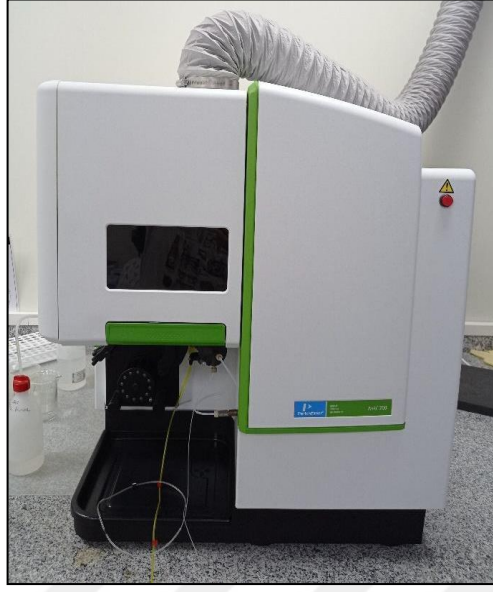
3.3.4. ICP-OES ve LA-ICP MS Analizi

Jeokimyasal analizler için, derlenen fulgurit numuneleri İstanbul Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Taş Kesme Laboratuvarı'nda kesilmiş ve kimyasal analize hazırlanmıştır. Bölüm bünyesindeki Kil Mineralojisi Laboratuvarı'nda Retsch marka agat

havan makinesiyle 15 dakikalık periyodlarla öğütülmüştür. Her farklı numune öğütme işleminden sonra agat havan, kuvars kumu ile 5 dakika boyunca çalıştırılmış ve daha sonra normal temizleme prosedürleri izlenerek temizlenmiştir. Öncelikle kızdırma kaybı (LOI: Loss On Ignition) hesaplaması için örnekler krezeler içerisine alınmış ve hassas terazi yardımıyla her bir krezeye konan numune miktarları not edilmiştir. Numuneler kül fırına numaralandırılarak yerleştirilmiştir. Kül fırını 900°C sıcaklığa ayarlanmış ve iki saat 900 °C sabit sıcaklıkta bekletilerek nem ve tüm uçucular uçurulduktan sonra numuneler desikatör içerisine alınarak nemden korunması sağlanmış ve desikatör içerisinden alınıp hassas terazide tartılarak, ısıtma sonrası değerleri kaydedilmiştir. Kızdırma kaybı değerlerinin hesaplanmasının ardından numuneler İÜC Jeokimya Örnek Hazırlama Laboratuvarı'nda hassas terazi vasıtasıyla 0,2 gr örnek numunesinin 1 gr lityum tetraborat ile karıştırılarak platin krezelere konmuştur. Krezeye içerisindeki karışımın homojenleşmesi amacıyla tahta çubuk ile karıştırılmış ve her numune toplamda 15 dakika süre kül fırınında 1100 °C'de ergitilmiştir. 15 dakika sonunda ergimiş haldeki numunelerden bir tanesi, kül fırından alınarak %5 derişimde hazırlanan HNO₃ içerisine aktarılmıştır. Çözelti haline getirilen numune içerisinden, Jeoloji Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Jeokronoloji ve Jeokimya Laboratuvarı'ndaki Perkin-Elmer Avio 200 model ICP-OES kullanılarak ana oksit değerleri analiz edilmiştir (Şekil 3.15). İz ve nadir toprak elementleri değerleri ise kül fırından çıkan diğer cam disk haline getirilen numuneler üzerinde ESI NWR213 model katı hal lazer aşındırma entegreli Perkin-Elmer NexION 2000B model ICP-MS ile analiz edilmiştir (Şekil 3.14). İz ve nadir Toprak Elementleri'nin analiz koşulları; tek hücre helyum atmosferinde (0.6mL/dk), 10 Hz frekansta 6.5 J/cm² olarak ayarlanmış ve nokta boyutu 100 µm olarak seçilmiştir (Bayhan, U.C. 2021).



Şekil 3.14: Perkin Elmer NexION 200B (MS cihazı) ESI NWR 213 (LA cihazı).



Şekil 3.15: Avio 2000 (OES cihazı).

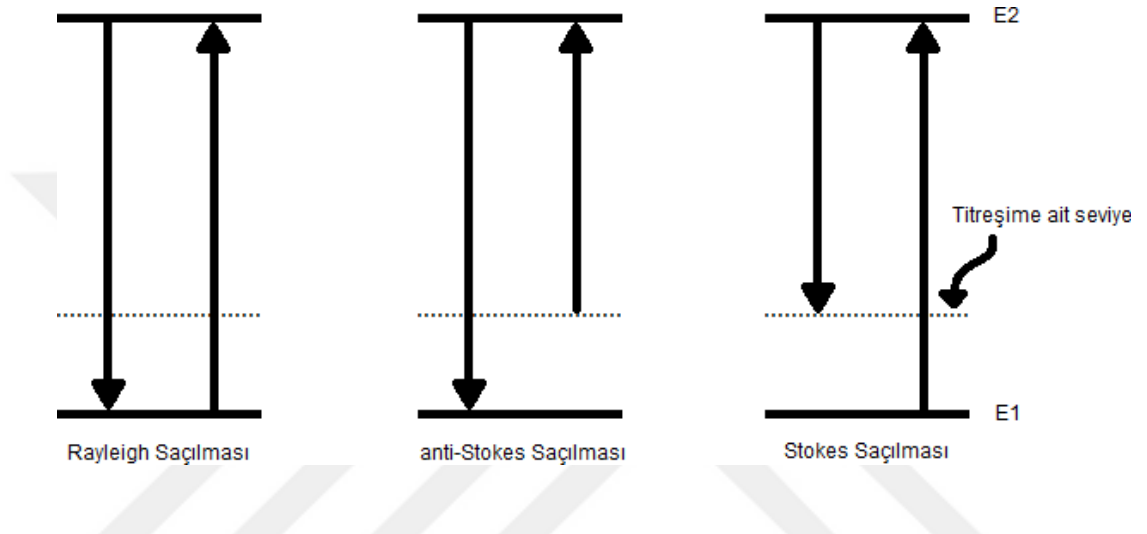
3.3.5. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi yakın Kırmızı-altı, görünür veya Mor-üstü bölgede örnek üzerine gönderilen tek dalga boylu ışının saçılmasının incelenmesi prensibine dayanır. Raman saçılması sırasında saçılan ışığın enerjisindeki değişim molekülün titreşim enerji düzeyleri arasındaki farka karşılık gelmektedir. Bu yüzden Raman saçılma bantları moleküllerin titreşim ve dönü düzeylerini açıklar ayrıca moleküllerin parmak izleri niteliğindedir. Ölçülen frekans değerleri daha sonra incelenen maddenin veya maddelerin yapısını belirlemek için kullanılır.

Fotonlar etkileştikleri atomlardan esnek ve esnek olmayacak şekilde saçılabilirler. Esnek olan saçılma, *Rayleigh* saçılması olarak adlandırılır. Bu tip saçılmada gönderilen foton numuneyle etkileşime girmez, saçılan fotonun frekansı gönderilen fotonunkine eşit olur. Esnek olmayan saçılma gerçekleşmesi durumunda molekül başlangıçta temel enerji düzeyinde ise saçılan fotonun frekansı gönderilen fotonun frekansından küçük olur ve Stokes saçılması olarak adlandırılır. Eğer molekül başlangıçta uyarılmış bir enerji düzeyinde ise saçılan fotonun frekansı gönderilenden

büyük olur ve anti-stokes saçılması olarak ifade edilir. Gönderilen ve saçılan foton arasındaki farklar Raman kayması olarak tanımlanır. Bu enerji düzeylerindeki değişim Şekil 3.16’da verilmiştir (Aydoğan,2014).

Şekil 3.17’de ölçüm yapılan taşınabilir Raman spektrometre cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.16: Stokes, Rayleigh ve Anti-Stokes saçılmalarının şematik gösterimi. Sağ tarafta gösterilen oklar gelen fotonu temsil etmektedir.

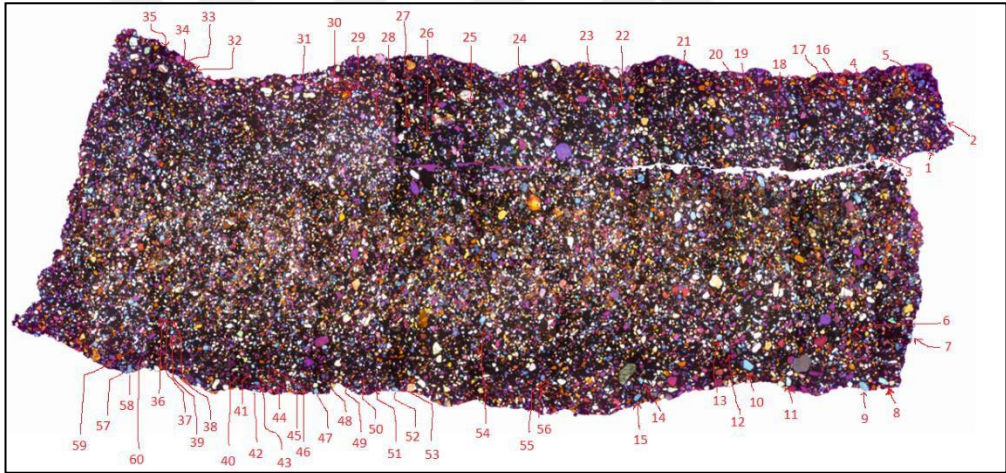
Tez kapsamında yapılan Raman ölçümleri ince kesit üzerinde rastgele seçilmiş noktalardan yapılmıştır. Kesit İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İnce Kesit Hazırlama Laboratuvarı’nda hazırlanmıştır. Kesitin Raman ölçümleri için polarizan mikroskop (Şekil 3.11) çalışması İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mineroloji-Petrografi Anabilim Dalı Optik Mineroloji Laboratuvarı’nda bulunan Leitz Ortoplan polarizan mikroskopunda kuvars kaması altında incelenerek, kristal yapılar belirlenmiştir.

Bu belirlenen kristal yapılarda rastgele çekirdek kısmından 60 ve kabuk kısmından 60 nokta seçilerek, bu noktaların Raman spektrumları İstanbul Kültür Üniversitesi Fizik Bölümü Raman Spektroskopisi Laboratuvarı’nda Şekil 3.17’ de gösterilen 785 nm dalga boyu lazerli, B&W-Tek i- Raman Plus-785 model Raman spektrometresi ile kaydedilmiştir. Her nokta için spektrumlar, $400-3000\text{ cm}^{-1}$

arasındaki spektral aralıkta, 30 saniye integrasyon zamanı ve 32 taramayla kaydedilmiştir. Şekil 3.18’ de kabuk kısmından ölçümü yapılan noktalar gösterilmiştir.



Şekil 3.17: Raman Spektrometre Cihazı ve Mikroskobu.



Şekil 3.18: Raman Spektrumu elde edilen noktalar (kabuk kısmından).

3.3.6. Kırmızı-altı Spektroskopisi

Kırmızı-altı spektroskopisi molekülleri titreşim enerjileri ve dalga sayıları belirlenmesinde kullanılan bir diğer titreşimsel spektroskopik yöntemdir. Çalışılacak Kırmızı-altı bölgedeki tüm frekanslarda ışın gönderilmiş bir bölgeye ait moleküllerin soğurduğu ve molekülün karakteristiği olduğu belirli frekanslarının ölçülmesi esasına dayalı bir tekniktir. N atom sayısına sahip bir molekülün $3N-6$ titreşim hareketi vardır ve bunlar titreşim kipleri olarak bilinir. Bir molekülün titreşim hareketlerinden birinin uyarılması durumunda iki titreşim enerji düzeyi arasındaki farka karşılık gelen

Kırmızı-altı bölgede frekans soğurur ve yayınlar. Kırmızı-altı spektroskopisi kullanılarak elde edilen, her bir molekül için imza niteliğinde karakteristik özellik taşıyan, soğurma spektrumu vasıtasıyla incelenen örneklerin yapısal analizleri gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışması çerçevesinde elde edilen spektrumlar temel titreşimleri içeren ($4000-400\text{ cm}^{-1}$) orta Kırmızı-altı bölgede Perkin Elmer Spektrum One spektrometresi ile Pike marka Glady Elmas ATR birimi kullanılarak, toz fulgurit örnekleri üzerinden, 2 cm^{-1} spektral çözünürlük ve ortalama 64 taramayla kaydedilmiştir. Şekil 3.19’da demirce zengin ve kireçli fulguritlerin Kırmızı-altı spektrumlarının kaydedilmesi için kullanılan spektrometre cihazı verilmektedir.



Şekil 3.19: Kırmızı-altı Spektrometresi

3.3.7. Elektron Mikroskobu Çalışmaları (SEM-EDX)

Taramalı elektron mikroskop temel olarak, bir elektron kaynağından elde edilen elektron demetlerinin malzeme ile etkileşimi sonucu malzemeden saçılan elektron ve foton demetlerinin dedektör algıcı ile tespit edilip çeşitli yazılımlar ile anlamlı görüntüler haline getirilmesi prensibi ile çalışır. Kaynak olarak tungsten veya volfram flaman tellerden fırlatılan elektronlar kullanılır. Uygulanan yüksek gerilim nedeniyle tel $\sim 2600\text{ K}$ sıcaklığa kadar ısınır ve elektronlar salınır. Uygulama sırasında yüksek gerilimin yanı sıra akımında arttırılması gerekir ve kullanılan flaman kalınlığı

ise ~ 0.125 mm olması gerekir. Anot plaka ile yönlendirilen elektronlar, elektromanyetik davranış gösteren merceklerden geçirilip örnek üzerine düşürülür. Ortam 10^{-4} Pa vakumda tutulmaktadır.

İvmelendirilen elektron demetleri, bilgi alınacak örneğin atomları ile elastik çarpışma yapıp yön değiştirerek geri saçılırlar. Diğer yandan inelastik etkileşimde olan demetler düşük enerjili Auger elektronları sayesinde numune yüzeyinden bilgi almamızı sağlar. Tüm etkileşim neticesinde yörüngelerden kopmuş ve enerji yitirmiş elektronlar ikincil elektronlar olup numunenin yüzeyden yaklaşık 10 nm altına kadar yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmesi sağlamış olurlar (Kaygısız, 2018; Erdin, 1987).

Görüntüleme yapılabilmesi bir yana EDX ise görüntüleme ile beraber elemental dağılımı belirlemek için kullanılır. Örneğe yüksek kinetik enerjilerde çarptırılan elektronlar ile yüzey ve yüzeye yakın kısımlardan koparılan elektronlar ile bilgi toplanır. İç yörüngelerden koparılmış ise bir elektron enerji seviyesi boş kalamayacağı için üst yörüngeden elektron aktarımı gerçekleşir. Daha yüksek enerjide olan dış yörünge elektronları alt yörüngeye geçişi sırasında fazla enerjiyi foton ışıyarak verirler. X-ışını olarak gerçekleşen bu ışıma karakteristik olup atom hakkında net bir bilgi verir. Işınan X-Işın fotonları dedektör ile tespit edilip bilgisayar birimine aktarılır ve buradan elde edilen bilgiler pikler halinde veriye dönüşmüş olur (Kaygısız, 2018; Hafner, 2017).

Bu kapsamda analizler SEM-EDX için İstanbul Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Alüminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezinde, Hitachi marka SU3500 T2 model SEM cihazı ile EDS analizi ise Oxford XACT marka ve model dedektör ile yapılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20: SEM-EDX cihaz görünümü.

3.4. Kemometrik Analiz Yöntemleri

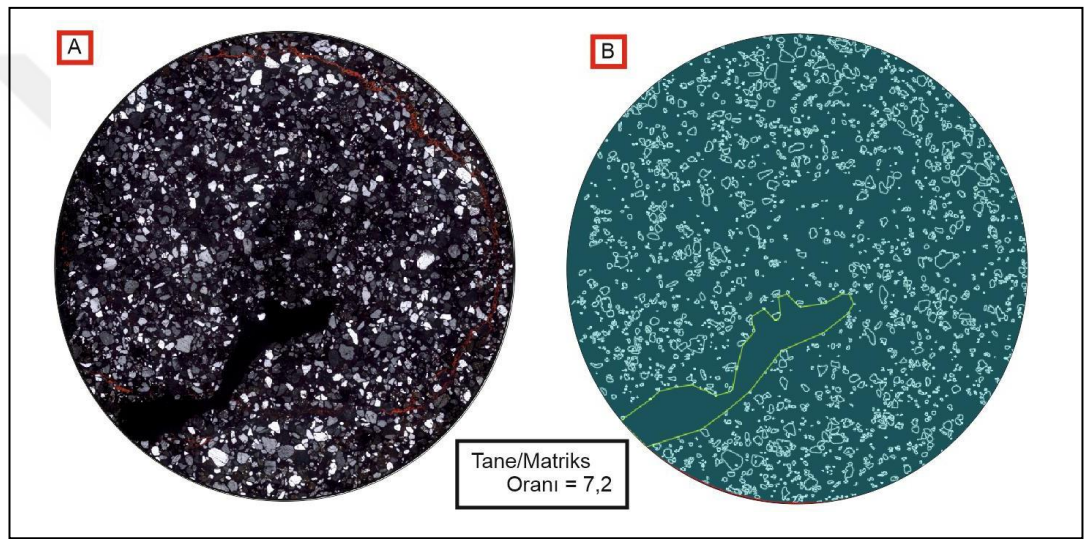
Fulguritin iç ve dış bölümlerinden elde edilen Raman spektrumları kemometrik analiz tabanlı yöntemlerden olan Çok Değişkenli Eğri Çözünürlüğü (MCR) ve Temel Bileşen Analizi (PCA) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Kemometri, istatistik ve matematik disiplinlerinin ortak çalışmasıyla oluşturulmuş, kimyasal verilerin analiz edilmesini sağlayan bir disiplindir. Kimyasal verilerden gerçek bilginin ayrıştırılarak açığa çıkarılması için kullanılmaktadır (Uyanık, 2012). Bu özellikleri nedeniyle de analitik kimyada özellikle spektroskopik verilerin analizlerinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Kemometrik yöntemler, veriler arasındaki ilişkiyi belirlemeye ve örnekler arasındaki istatistiksel benzerlikleri ve farkları bulmaya olanak sağlamaktadır. Bu tez çerçevesinde, kullanılan olan kemometrik analiz yöntemlerinden biri olan PCA (Temel Bileşenler Analizi) yönteminin temel hedefi değişkenler arasındaki korelasyonu belirlemektir. Bu teknikler incelenmek istenen spektrum bölgesindeki aralıkta çalışmamıza olanak sağlamaktadır. Mineral tanımlama analizi için kullanılacak spektral bölge $200-1100\text{ cm}^{-1}$ aralığında seçilmiştir (Martens H. ve Næs T., 1989; Tauler R. vd., 1996).

Bu analiz yöntemi aracılığıyla elde edilecek veri setlerinden fulguritlerin iç ve dış kesitlerindeki mineral dağılımları belirlenmiştir. Mevcut araştırmada tüm kemometrik analizler Unscrambler™ CAMO yazılımı (Sürüm 5.5) (Unscrambler, 1995) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

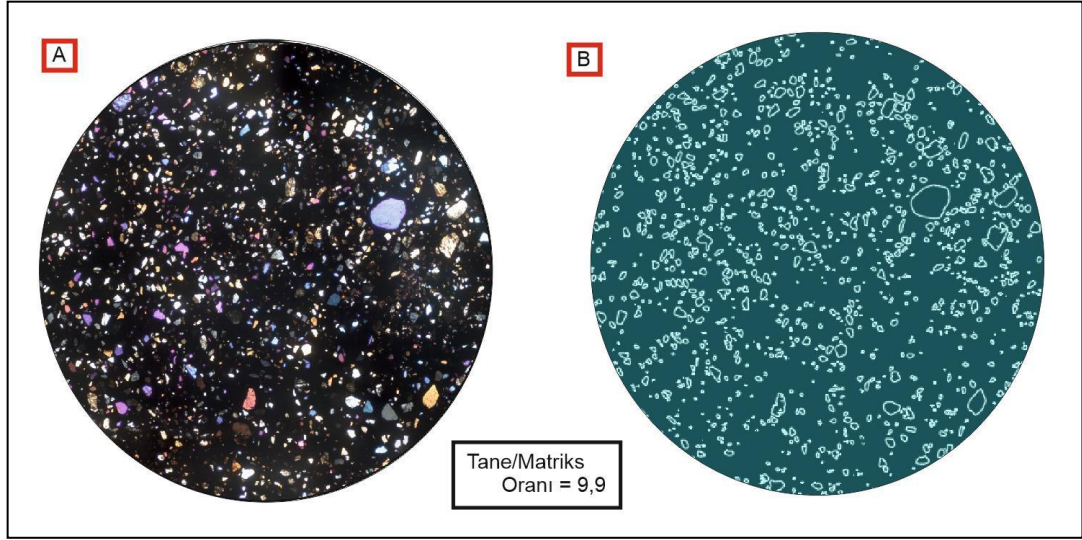
4.1. Petrografik Bulgular

Tez kapsamında incelenen farklı fulgurit parçalarından ince kesitler hazırlanmış ve petrografik incelemeler sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.1: Fulgurit Kesiti çift nikol görüntüsü A, kesit içerisindeki tane alanlarının hesaplandığı görüntü B.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere fulgurit kesitinde taneler ve taneler arasındaki matriks kısmın modal analizi yapılarak dağılımı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucuna göre bu fulgurit parçası için Tane/Matriks oranı 7,2 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.2: Farklı bir fulgurit parçasından hazırlanan kesitin çift nikol görüntüsü A, kesit içerisindeki tane alanlarının hesaplandığı görüntü B.

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere farklı bir fulgurit parçasından hazırlanan kesitte taneler ve taneler arasındaki matriks kısmın modal analizi yapılarak dağılım hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucuna göre bu fulgurit parçası için Tane/Matriks oranı 9,9 olarak bulunmuştur. Buna benzer şekilde, hazırlanan 10 farklı parçaya ait kesitte tane alanları ve matriks alanları hesaplanmış olup her kesitte farklı oranlar belirlenmiştir. Diğer oranlar; (9,1), (7,6), (3,1), (3,7), (5,4), (11,3), (8,9) ve (7,8)’dir. Bu oranların bu derece birbirinden farklı olmasının sebebi, fulgurit oluşumu sırasında tanelerin matriks içerisinde farklı şekilde yerleşmesi olabileceği gibi tane boyutlarının farklılığından kaynaklı da olabilir. Farklı tane boyutlarına sahip kesit alanlarının bir diğer göstergesi de incelenen fulguritlerin farklı yıldırımlarca oluşturulmuş olabileceğidir.

4.2. XRD (X-Işını Kırınımı) Analizleri

Fulgurit çekirdek ve kabuk bölümlerinden öğütülen toz malzemenin XRD kırınım desenleri sırasıyla Şekil 4.3 ve 4.4’te gösterilmektedir. XRD yöntemi ile fulguritin çekirdek kısmı için; kuvars, mikroklin, barit, hematit ve albit mineralleri ve kabuk kısmında ise kuvars, mikroklin, ortoklaz, albit, hematit ve götit mineralleri

belirlenmiştir. Çalışılan fulguritin alındığı yerin Gobi Çölü olduğu düşünüldüğünde, çöl kumları içerisindeki bol kuvars ve feldspat minerallerinin yanında hematit ve barit varlığıda olasıdır. Hematit kristalleri, toprakta ayrışma işlemleri sonrasında ikincil bir mineral olarak oluşabilirler. Barit mineralinin varlığı ise muhtemelen ortamda varsa kireç taşları içerisindeki damarlarda, sıcak kaynak yataklarında hematit cevheri ile birlikte oluştuğunun göstergesidir. Çalışma için, fulguritin alındığı ortamdan örnek bulunmadığından dolayı barit mineralinin varlığının asıl sebebi bu çalışma için kesin olarak belirlenememiştir. Öte yandan kuvars ve feldspat mineralleri (mikroklin, ortoklaz, albit) sedimanter ortamlarda, çöl kumlarında bolca bulunmaktadır.

Bölüm 4.5 ve 4.6’da görüleceği gibi, XRD analizi ile tespit edilen mineraller, Raman ve Kırmızı-altı spektroskopik analiz yöntemlerinden elde edilen mineral bulguları ile uyumludur. Örneklerdeki farklı minerallerin göreceli yüzdelерinin yarı kantitatif olarak hesaplanması Match! programındaki referans şiddet oranı (RIR) metodu kullanılarak yapılmıştır (Holger Putz, 2016; P. M. De Wolff, 1964). Mineral tespiti için her bir mineralin en şiddetli piki dikkate alınmıştır (kuvars: $2\theta = 26.639^\circ$, $d = 3.34363 \text{ \AA}$ (Young vd., 1977); mikroklin: $2\theta = 27.421^\circ$, $d = 3.25000 \text{ \AA}$ (Hanawalt vd, 1938); albit: $2\theta = 28.022^\circ$, $d = 3.18167 \text{ \AA}$ (Polytechna,1990) ;hematit: $2\theta = 35.640^\circ$, $d = 2.51710 \text{ \AA}$ (Antipin vd., 1985); barit: $2\theta = 25.856^\circ$, $d = 3.44305 \text{ \AA}$ (Jacobsen vd., 1998); ortoklaz: $2\theta = 26.914^\circ$, $d = 3.31000 \text{ \AA}$ (Nagelschmidt, 1936); götit: $2\theta = 21.223^\circ$, $d = 4.18300 \text{ \AA}$ (R. K. Harrison, 1975)). XRD analizinden elde edilen mineral bileşimleri (minerallere ait bazı ek bilgilerle birlikte) Tablo 4.1’de verilmiştir.

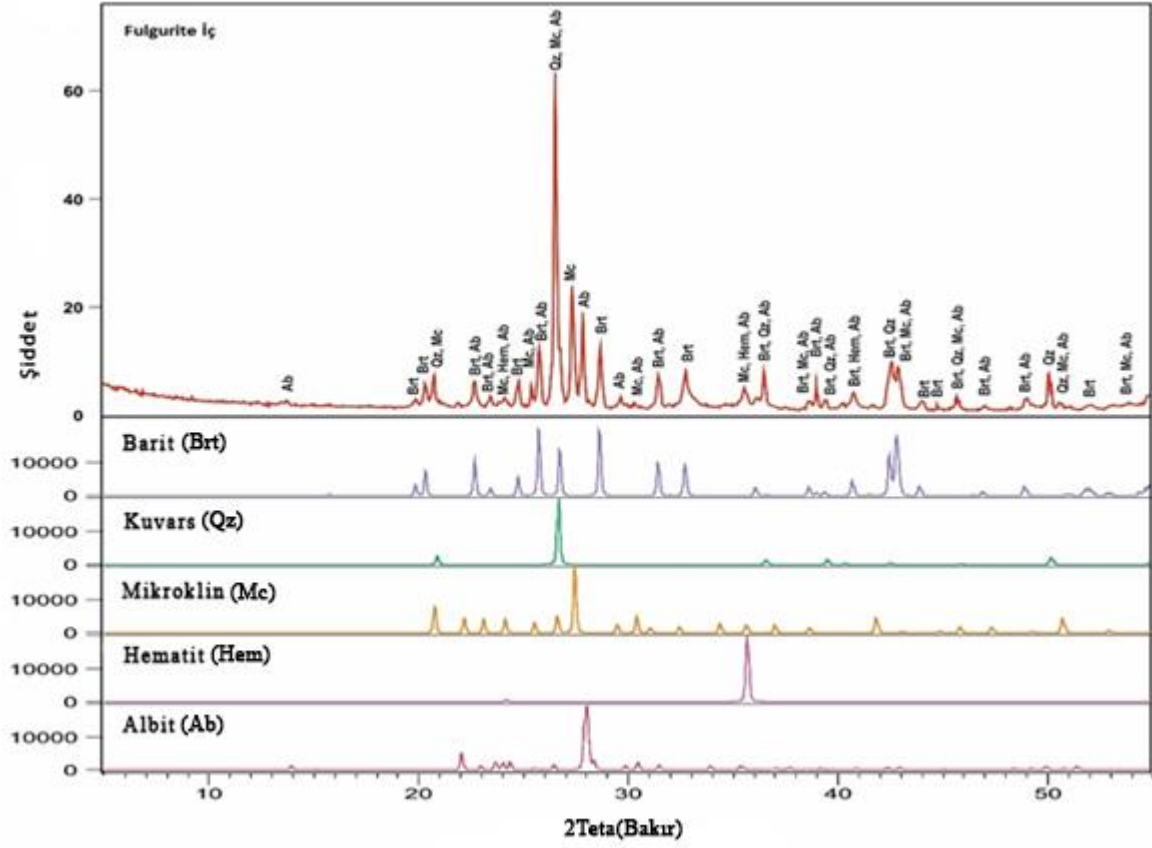
Çekirdekdeki minerallerin ağırlıkça yüzdeleri sırası ile kuvars, mikroklin, albit, hematit ve barit için; %21, %39, %19, %8 ve miktarsal yüzdeleri %13 ve %52, %22, %10, %8, %8 olarak belirlenirken kabuktaki minerallerin ağırlıkça yüzdeleri sırası ile kuvars, mikroklin, ortoklaz, albit, hematit ve götit için; %24, %17, %21, %30, %5, %3 ve miktarsal yüzdeleri sırasıyla %56, %9, %11, %15, %4, %5 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerin Raman deneylerinin sağladığı verilerle uyum içinde olduğu görülmüştür (bkz 4.5).

Tablo 4.1: Çalışılan fulguritin XRD analizinden elde edilen farklı minerallerinin çekirdek ve kabuktaki miktarsal yüzdeleri, ağırlıkça yüzdeleri ve özellikleri.

Mineral	Kimyasal Formül	Moleküler Ağırlık (g mol ⁻¹)	Şiddet	Kristali-zasyon sıcaklığı (°C)	Çekirdek		Kabuk	
					% (ağırlık)	% (miktar)	% (ağırlık)	% (miktar)
Kuvars	SiO ₂	60.08	2.65	573 ^a	21	52	24	56
Mikroklin	KAlSi ₃ O ₈	278.33	2.56	^b	39	22	17	9
Ortoklaz	KAlSi ₃ O ₈	278.33	2.55	1170	-	-	21	11
<i>Toplam K-feldispatlar</i>					39	22	38	20
Albit	NaAlSi ₃ O ₈	263.02	2.62	1100	19	10	30	15
Hematit	Fe ₂ O ₃	159.69	5.27	2849	8	8	5	4
Götite	FeO(OH)	88.85	4.37	^c	-	-	3	5
Barit	BaSO ₄	233.39	4.48	1580	13	8	-	-
Toplam					100	100	100	100

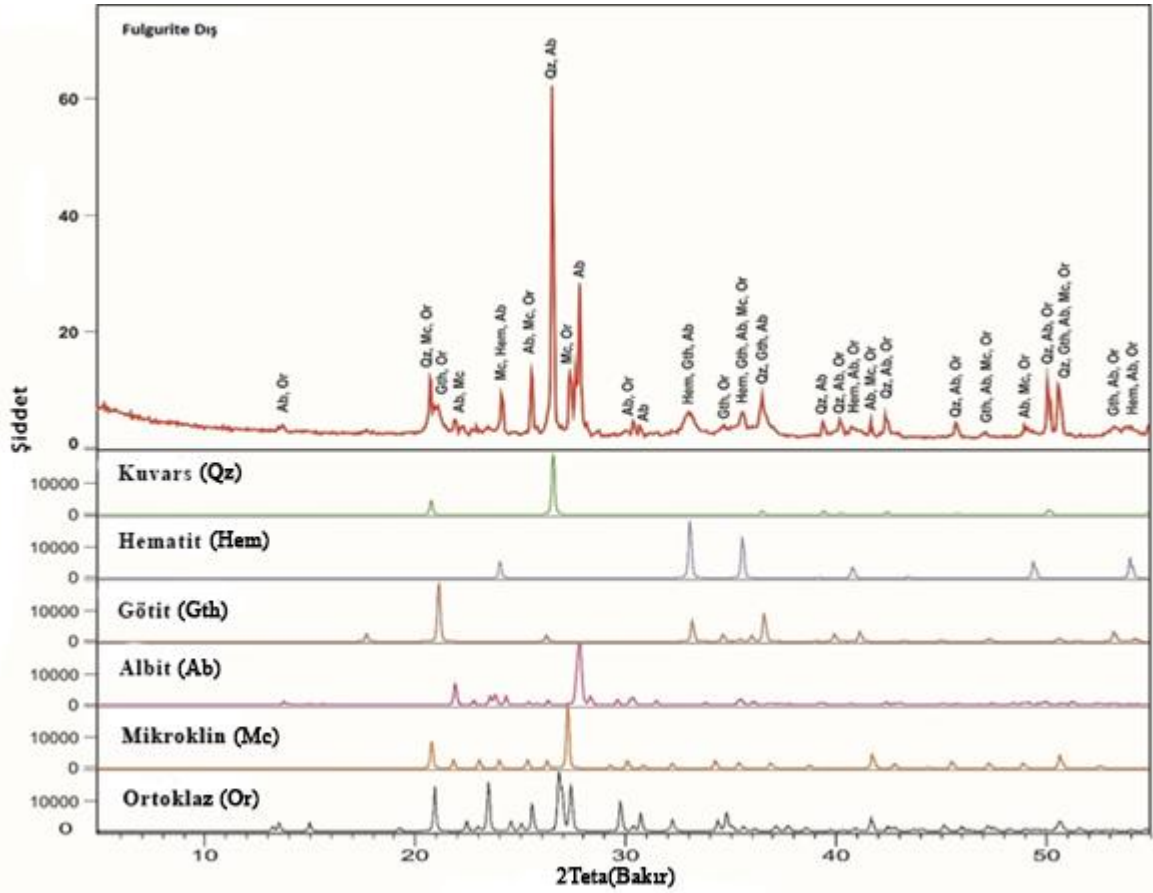
^a Düşük simetrlili kuvars; yüksek simetrideki kuvars, 573 °C üzerindeki bir sıcaklıkta, kendiliğinden düşük simetrlili kuvarsa dönüşür; ^b500°C'nin altında stabildir, ortoklazın düşük sıcaklık polimorfudur.

^c ~300 °C'de hematitin dehidrasyonu.



Şekil 4.3: Fulgurit örneğinin iç kısmına ait XRD spektrumu; (Brt: barit; Qz: kuvars; Mc: mikrokin; Hm: hematit; Ab: albit. Numunenin gözlenen kırınım grafiği, şeklin üst kısmında gösterilen kırmızı spektruma karşılık gelirken, numunede bulunan farklı minerallerin ayrı katkıları, alt alta farklı renklerdeki spektrumlarla gösterilmiştir.)

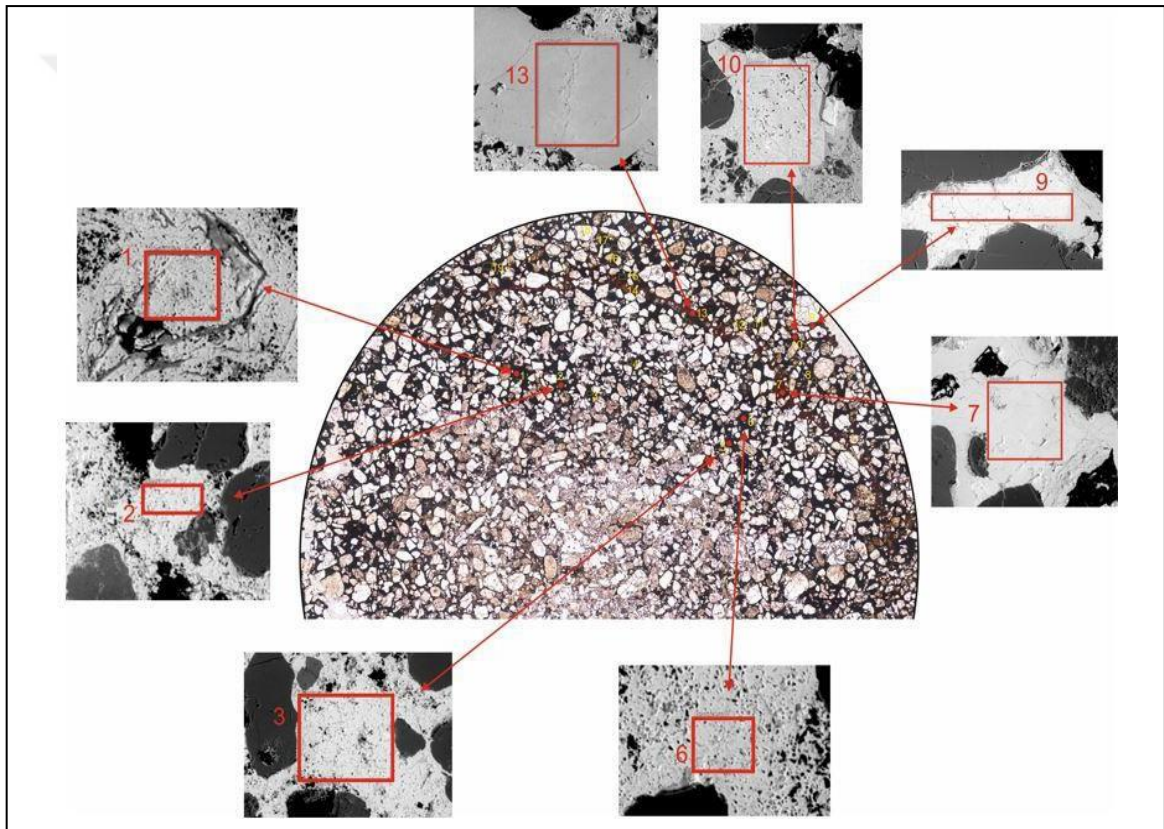
Götit minerali, toprakta ayrışma işlemleri sonrasında ikincil bir mineral olarak oluşabilir. Sarı- kahverengi renkli demir oksihidroksit mineralidir. Hematit varlığında ikincil olarak oluşan sulu demir mineralidir. Çöl kumlarında alterasyon sonucu gelişen bir durumu açıklamaktadır.



Şekil 4.4: Fulgurit örneğinin kabuk kısmına ait XRD spektrumu. (Qz: kuvars; Hm: hematit; Gth: götit; Ab: albit; Mc: mikroklin ve Or: ortoklaz. Numunenin gözlenen kırınım grafiği, şeklin üst kısmında gösterilen kırmızı spektruma karşılık gelirken, numunede bulunan farklı minerallerin ayrı katkıları, alt alta farklı renklerdeki spektrumlarla gösterilmiştir.)

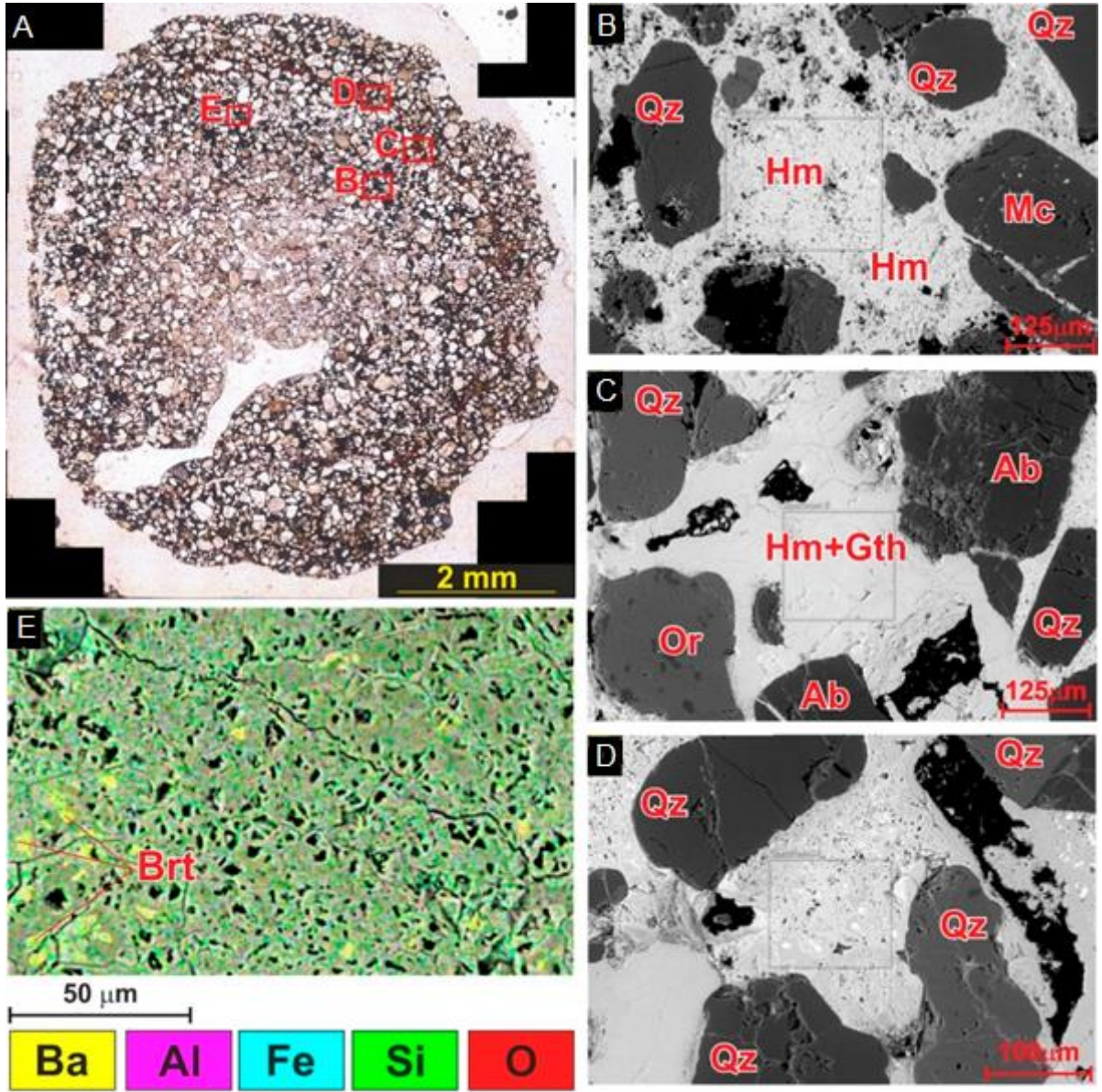
4.3. SEM(Taramalı Elektron Mikroskopisi) Analizleri

Fulgurit örneklerinden hazırlanan parlatılmış ince kesitte belirlenen mineraller üzerinde ve hamur kısmında analiz yapılmıştır. Analiz yapılan noktalardan bazıları ve o noktalara ait BSE görüntüleri Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Fulgurit ince kesitinde, üst ve alt kısımlarda seçilen noktalardan elde edilen SEM analizi sonuçları sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.5: Fulgurit kesitinde SEM analizi yapılan bazı noktaların BSE görüntüleri.

Fulgurit örneklerinin çekirdek ve kabuk bölümünde seçilen alanların BSE görüntüleri ve elementel haritalaması Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Şekil 4.6’da (A) fulgurit numunesi üzerindeki SEM-BSE ve SEM-EDX analiz konumu, (B) çekirdek ve (C,D) kabuk bölümlerinin SEM-BSE görüntüleri yanı sıra (E) fulguritin çekirdek bölümünden SEM-EDX konumları verilmiştir.



Şekil 4.6: Fulgurit kesitinin çekirdek ve kabuk kısımlarından elde edilen SEM-BSE ve SEM-EDX görüntüleri (Qz: kuvars, Ab: albit, Mc: mikroklin, Or: ortoklaz, Brt: barit.).

Tablo 4.2: Fulgurit ince kesitinde, üst kısımda seçilen noktalardan elde edilen SEM analizi sonuçları(* ile verilen noktalarda haritalama yapılarak ölçüm alınmıştır).

Üst Bölge	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	V ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	MgO	BaO	As ₂ O ₃	TiO ₂	Total
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	
1	17,44	77,54	2,86	0,79	0,7	0,68							100
2	19,24	76,43	2,88	0,29	0,67	0,49							100
3	49,65	25,78	9,82	2,14	1,23		4,76	2,16	1,85	1,37		0,77	99,54
4	20,41	75,17	2,73	0,37	0,79	0,53							100
5	17,36	77,39	2,84	0,39	0,74	0,47							99,18
6	17,93	77,94	2,58	0,4	0,64	0,51							100
7	18,65	76,94	2,7	0,59	0,63	0,48							100
8	17,33	78,42	2,62	0,69	0,33							0,62	100
9	22,43	75,36	1,24		0,5								100
10	17,96	77,7	2,72	0,89	0,32		0,41						100
11	17	77,05	2,77	0,76	0,61		0,64						100
12	17,52	75,98	2,6	0,83	0,64		1,03			1,39			100
13	15,77	77,81	2,15	0,43	1,08	0,62					2,13		100
14	19,43	77,43	1,48	0,29	0,79	0,58							100
15*	14,81	80,56		0,25	0,75	0,29	0,62			0,8			98,08
16*	15,54	80,58	2,25	0,5	0,5	0,29	0,34						100
17	18,34	78,59	1,85	0,26	0,53	0,43							100
18	20,11	76,62	1,93	0,4	0,51	0,42							100
19*	16,61	78,99	2,43	0,55	0,71	0,4	0,22						100

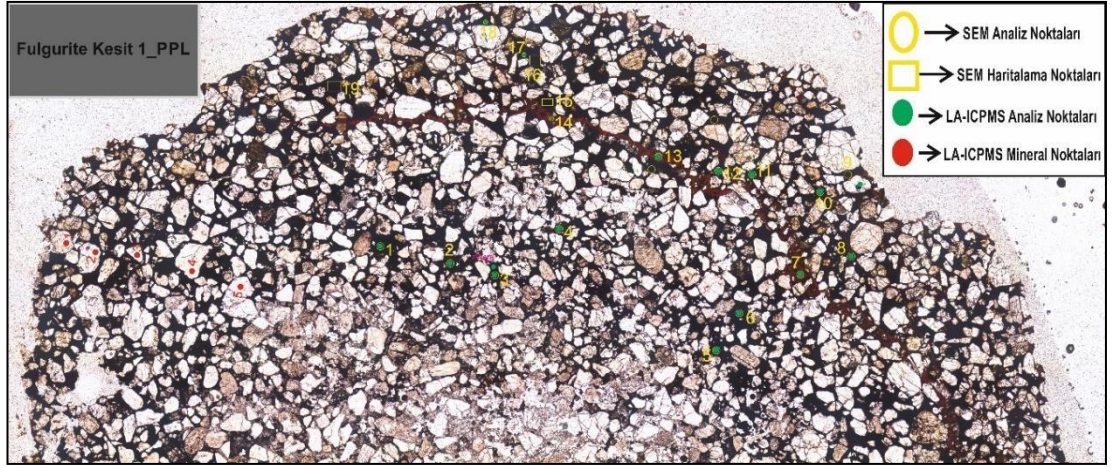
Tablo 4.3: Fulgurit ince kesitinde, alt kısımda seçilen noktalardan elde edilen SEM analizi sonuçları (* ile verilen noktalarda haritalama yapılarak ölçüm alınmıştır).

Alt Bölge	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	V ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	MgO	BaO	As ₂ O ₃	TiO ₂	Total
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	
1	16,74	81,35	1,44		0,46								100
2	18,62	77,55	2,67	0,49	0,67								100
3	18,15	78,27	2,52	0,26	0,79								100
4	17,39	78,4	2,89	0,67	0,65								100
5	18,64	78,59	1,11		0,39						1,26		100
6	16,97	77,06	3,77	0,61	0,69	0,47	0,43						100
7	18,69	75,11	2,35	0,44	0,86	0,58	0,76			1,21			100
8	17,62	77,79	2,82	0,77	0,43	0,57							100
9	17,97	77,45	2,47	0,91	0,62	0,58							100
10*	16,93	77,29	2,59	0,64	0,67	0,57					1,31		100
11	15,99	78,8	2,21	0,45	0,66	0,54	0,65			0,7			100
12*	15,26	82	1,71	0,22	0,51	0,3							100
13	19	76,47	2,86	0,34	0,65	0,68							100
14	19,64	75,42	1,96	0,39	0,62		0,75			1,21			100
15*	18,42	78,26	2,28	0,54	0,5								100
16*	17,6	78,32	2,51	0,43	0,58	0,56							100
17	13,65	83,28	2,11	0,47	0,5								100

Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te görüldüğü üzere fulgurit kesiti üzerinde petrografik incelemelerde barit mineraline rastlanmamıştır. Ancak XRD ve Raman verilerinin de ortaya koyduğu gibi, fulguritin çekirdeğinde barit bulunmaktadır. Baritin varlığı SEM analizleriyle Şekil 4.6'da açıkça gösterilmiştir. Ayrıca iki farklı bölgede toplam 36 nokta üzerinde yapılan SEM analizi sonucu, matriks kısmında ortalama %77 civarında FeO ve %20-25 minör kuvars, feldispat ve barit mineralleri tespit edilmiştir. Farklı fulgurit kesitlerinin tane-matriks oranları 3,1 ile 11,3 (ortalama 7,11) arasındadır. Benzer şekilde, SEM-BSE görüntüleri ve elementel haritalama sonuçları Şekil 4.6'da gösterildiği üzere petrografik, XRD ve Raman-IR analizlerinde elde edilen mineral içeriklerini doğrulamaktadır. Fulgurit matriksinin elementel haritalaması, matriksin %75-85 Fe oksitlerden oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Literatürdeki fulgurit sınıflamalarında incelenen türlere bakıldığında fulguritin oluşumu esnasında maruz kaldığı yüksek ısı sebebiyle ergimiş camsı bir matrikse sahip olması beklenirken, yüksek FeO oranına sahip olması ilginçtir. Bu durum, yıldırıma maruz kalan hedef malzemenin içerdiği minerallerin bünyesindeki Fe elementinin hamura geçmiş olabileceği düşünülmektedir. Kuvars taneleri ve diğer feldispat taneleri ölçüldüğünde de yüksek FeO oranı tespit edildiği görülmektedir. Fulguritin oluşumu esnasında tanelerin ve matriksi oluşturan malzemenin ergiyip yeniden kristallenme benzeri bir sürece maruz kalması sonucu FeO oranının fulguritin tamamına neredeyse homojen şekilde dağılmış olması olasıdır.

4.4. ICP-OES ve LA-ICPMS Analizleri

Tez kapsamında çalışılan fulgurit örneklerinden hazırlanan bir kesit üzerinde yukarıda anlatıldığı üzere SEM analizi yapıldıktan sonra, aynı noktalar işaretlenerek lazer eklentili kütle spektrometresi ile bu noktalar üzerinde mineral kimyası analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizi yapılan noktalardan ziyade 5 mineral tanesi üzerinde de ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm noktaları Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: Fulgurit kesiti üzerinde LA-ICP MS ile analiz yapılan noktalar.

Fulgurit ince kesitinde, seçilen noktalardan elde edilen LA-ICP MS analizi sonuçları Tablo 4.4’te verilmiştir. SEM analizinde ve LA-ICP MS ile ölçülen noktalar kesitin matriks kısmından olmakla birlikte bu noktalardan elde edilecek sonuçlarda, fulguritin oluşumu esnasında yüksek ısıdan kaynaklı ergimiş camsı bir faz beklentisi oluşmuştur. Ancak yapılan analizler sonucunda matriks kısmında yüksek FeO içeriği göze çarpmaktadır. Bu durum, fulgurit oluşum mekanizmasının belirlenmesinde dikkate alınması gereken ve üzerinde daha detaylı çalışmalar yapılması gereken bir noktadır. 5 tane mineralden yapılan ölçüm sonuçlarına göre bu minerallerin hepsi kuvars olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.4: Fulgurit ince kesitinde, seçilen noktalardan elde edilen LA-ICPMS analizi sonuçları.

	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	Total
Analiz Noktası	29	49	27	57	55	25	42	23	39	31	
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%
1.11	6,54	0,04	0,01	91,11	1,01	0,63	0,55	0,08	0,01	0,01	100,00
1.12	8,23	0,52	0,03	88,79	0,26	0,87	0,87	0,32	0,10	0,01	100,00
1.13	8,49	0,07	0,03	88,92	0,41	0,72	1,24	0,11	0,01	0,02	100,00
1.14	8,78	0,01	0,01	89,05	0,37	0,74	0,92	0,10	0,00	0,02	100,00
1.17	4,28	0,17	0,03	93,69	0,52	0,40	0,79	0,09	0,02	0,01	100,00
1.18	4,94	0,02	0,01	92,43	1,23	0,63	0,66	0,07	0,00	0,01	100,00
1.1	10,04	11,41	0,12	75,79	0,08	1,00	0,82	0,09	0,65	0,01	100,00
1.2	9,34	2,45	0,11	86,20	0,06	0,44	1,17	0,08	0,14	0,01	100,00
1.3	9,35	2,69	0,09	85,77	0,08	0,38	1,51	0,09	0,05	0,01	100,00
1.3.Tane	67,65	6,54	0,15	3,42	0,04	2,90	5,33	13,14	0,84	0,00	100,00
1.4	6,78	1,13	0,07	90,62	0,10	0,27	0,91	0,06	0,06	0,01	100,00
1.5	6,38	0,38	0,06	91,82	0,05	0,27	0,91	0,09	0,04	0,01	100,00
1.6	6,54	0,11	0,06	91,99	0,05	0,25	0,91	0,07	0,02	0,01	100,00
1.7	6,67	0,05	0,01	91,10	0,32	0,72	1,03	0,07	0,02	0,01	100,00
1.1	4,05	0,37	0,02	94,11	0,38	0,60	0,41	0,05	0,02	0,01	100,00
1.9	4,12	0,02	0,01	93,82	0,93	0,58	0,46	0,05	0,00	0,01	100,00
1.8	3,29	0,07	0,01	95,31	0,23	0,59	0,44	0,05	0,01	0,01	100,00
2.1	4,11	0,55	0,02	93,51	0,70	0,48	0,54	0,05	0,02	0,01	100,00
2.2	6,70	0,38	0,05	91,27	0,22	0,61	0,67	0,06	0,04	0,01	100,00
2.3	5,31	0,14	0,03	93,23	0,13	0,27	0,81	0,05	0,02	0,01	100,00
2.4	6,05	0,18	0,02	92,31	0,17	0,31	0,86	0,07	0,02	0,01	100,00
2.5	4,34	0,15	0,03	93,44	0,76	0,46	0,72	0,08	0,01	0,02	100,00
2.6	7,14	0,14	0,06	91,26	0,08	0,26	0,94	0,08	0,03	0,01	100,00
2.9	6,80	0,21	0,03	91,43	0,19	0,32	0,89	0,09	0,03	0,01	100,00
2.11	5,00	0,32	0,02	92,58	0,27	0,94	0,77	0,07	0,02	0,01	100,00
2.8	5,73	0,45	0,02	91,95	0,31	0,86	0,59	0,05	0,02	0,01	100,00
2.7	6,95	0,83	0,06	90,59	0,13	0,28	1,01	0,08	0,05	0,01	100,00
2.13	6,75	0,16	0,06	91,44	0,08	0,27	1,11	0,09	0,03	0,01	100,00
2.14	7,16	0,09	0,02	91,11	0,24	0,42	0,86	0,06	0,02	0,01	100,00
2.15	5,91	0,02	0,02	92,31	0,23	0,73	0,69	0,06	0,01	0,01	100,00
2.16	4,48	0,17	0,02	93,61	0,23	0,76	0,65	0,06	0,01	0,01	100,00
L-1	73,92	0,69	0,05	0,16	0,00	3,10	6,28	15,38	0,42	0,00	100,00
L-2	72,75	0,69	0,04	0,16	0,00	2,98	6,41	16,54	0,42	0,00	100,00
L-3	73,47	0,70	0,05	0,19	0,00	3,16	6,71	15,31	0,42	0,00	100,00
L-4	73,32	0,66	0,05	0,19	0,00	3,08	6,54	15,71	0,45	0,00	100,00
L-5	72,74	0,67	0,05	0,19	0,00	2,95	6,28	16,63	0,49	0,00	100,00

Fulgurit örneğinin iç ve dış kısmından elde edilen ICP-OES analizi sonuçları ise Tablo 4.5'te belirtilmiştir. Fulguritin ayrımlanan iç ve dış kısımları tüm kayac jeokimyası analizi için 150 mesh boyuta kadar öğütüldükten sonra, ICP-OES analiz metodu kısmında anlatıldığı şekilde analize hazırlanmıştır. Bu sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.4'te görüldüğü gibi yüksek kuvars içeriğine sahiptir. İç kısımda tanelerin çoğunluğu kuvars olduğundan dolayı dış kısma göre daha yüksek SiO₂ içeriğine sahiptir. İç kısımda tanelerin çoğunluğu kuvars olduğundan dolayı dış kısma göre daha yüksek SiO₂ içeriğine sahiptir. Ayrıca dış kısımda iç kısma göre daha yüksek Cr₂O₃ içeriğine sahiptir.

Tablo 4.5: Fulgurit örneğinin iç ve dış kısmından elde edilen ICP-OES analizi sonuçları.

Örnek	SiO ₂ (wt%)	TiO ₂ (wt%)	Al ₂ O ₃ (wt%)	FeO (wt%)	MnO (wt%)	MgO (wt%)	CaO (wt%)	Na ₂ O (wt%)	K ₂ O (wt%)	P ₂ O ₅ (wt%)	Cr ₂ O ₃ (wt%)	LOI	TOPLAM
Fulgurit İç	71,26	0,13	4,07	15,58	0,03	0,22	0,41	0,91	1,45	0,01	3,14	2,59	99,80
Fulgurit Dış	51,68	0,12	3,89	22,92	0,10	0,30	0,41	0,83	1,29	0,02	12,24	5,20	99,00

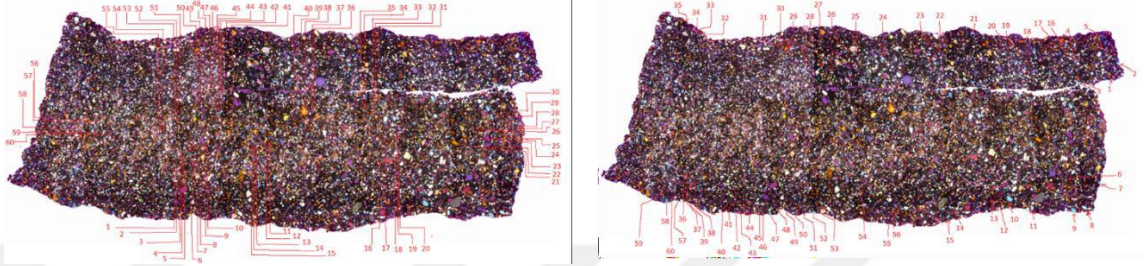
Fulgurit örneğinin ICP-MS iz ve nadir toprak element analizi sonuçları da Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6: Fulgurit örneğinden elde edilen iz element analizi sonuçları.

Sc	V	Cr	Co	Ni	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
45	51	53	59	62	71	72	85	88	89	90	93	133	137	139	140	141	146	147	151	157	159	163	165	167	169	173	175	178	181	208	232	238
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1.17	2270.14	148.58	35.17	11.99	13.75	10.83	0.13	328.91	30.29	1.96	0.05	0.03	288.94	15.09	56.77	3.35	15.69	3.62	1.07	4.46	0.72	4.75	1.03	2.87	0.38	2.04	0.30	0.00	0.01	682.02	0.22	363.29
0.72	2074.64	98.62	13.84	7.02	7.23	7.91	3.48	414.13	20.75	5.92	0.38	0.13	4355.57	10.35	42.81	2.00	9.94	2.32	0.72	3.05	0.51	3.57	0.70	1.78	0.29	1.94	0.17	0.29	0.02	245.77	0.66	491.32
0.45	4647.98	0.00	30.96	14.16	10.46	7.71	0.14	354.76	43.66	0.09	0.09	0.03	237.82	15.87	50.96	2.48	11.10	2.69	0.73	4.20	0.61	4.27	1.07	3.26	0.37	1.96	0.33	0.00	0.00	3.15	0.04	2758.63
0.64	4241.86	0.00	47.47	29.76	11.11	7.16	0.05	287.53	52.14	1.30	0.00	0.00	197.29	17.24	64.19	2.85	13.50	2.96	1.01	4.77	0.74	5.55	1.37	3.83	0.54	3.11	0.46	0.00	0.00	30.88	0.00	3063.70
0.87	2184.87	29.22	16.43	11.73	7.28	12.16	0.51	635.59	33.32	1.54	0.07	0.02	3193.56	27.22	77.64	6.33	26.07	6.55	1.66	6.55	0.94	6.23	1.24	2.82	0.51	2.49	0.37	0.10	0.03	360.03	1.31	806.15
0.80	2644.16	23.27	49.52	17.93	12.80	11.32	0.05	403.39	40.55	2.59	0.02	0.01	383.95	21.80	90.36	4.74	21.74	5.51	1.44	5.76	0.94	6.89	1.51	4.67	0.58	3.39	0.50	0.06	0.00	915.42	0.30	152.08
2.46	4286.50	56.82	11.31	29.66	9.23	91.64	63.93	580.11	44.19	9.37	3.82	6.64	537.32	36.58	28.84	7.42	31.89	6.54	1.88	8.05	1.49	10.12	2.27	6.32	0.86	5.06	0.78	0.18	0.34	20.23	1.80	532.21
3.41	5671.43	69.45	4.39	10.84	6.73	115.38	20.32	451.06	70.67	21.90	9.34	3.42	289.36	56.44	30.44	10.79	47.79	10.87	3.43	11.51	2.51	15.49	3.32	9.48	1.40	7.97	1.20	0.38	0.63	17.20	1.92	253.12
1.45	6121.75	52.82	3.66	6.00	6.23	120.32	0.94	1037.39	82.61	31.64	2.06	0.10	1421.64	64.81	34.51	12.36	57.82	11.21	3.86	14.75	2.46	18.35	4.03	10.63	1.66	10.25	1.14	0.51	0.36	19.21	2.51	201.68
5.81	133.43	330.45	77.11	147.52	8.95	1.22	47.10	159.35	9.96	88.35	20.62	5.95	1470.42	5.70	25.28	1.24	4.58	0.92	0.41	0.90	0.30	1.41	0.39	1.18	0.24	1.42	0.17	1.23	12.62	688.77	3.76	9.16
1.31	4251.20	35.01	3.74	6.63	6.78	80.50	2.25	402.04	47.81	12.82	1.24	0.27	873.88	40.29	82.70	8.28	33.38	7.16	21.4	8.34	1.48	10.18	2.17	6.63	0.83	4.74	0.85	0.16	0.11	23.15	1.97	365.55
1.01	3873.74	25.48	2.79	5.70	4.87	72.26	0.80	367.48	46.89	10.66	0.49	0.09	272.48	37.99	25.81	7.31	31.57	7.20	1.97	7.91	1.45	10.26	2.27	6.10	0.90	5.89	0.80	0.13	0.00	10.02	1.28	393.51
0.68	4272.48	21.12	3.52	3.42	4.97	84.83	0.18	476.96	56.80	10.37	0.30	0.02	308.38	43.89	38.87	8.11	37.78	8.01	2.36	9.48	1.84	11.57	2.78	7.08	0.97	6.22	0.80	0.08	0.01	12.34	0.61	202.13
0.33	4888.37	6.13	43.13	30.49	9.04	6.96	0.62	301.35	55.66	0.39	0.07	0.09	209.40	18.73	59.36	3.08	13.56	3.04	1.01	4.39	0.79	5.10	1.43	3.66	0.44	3.01	0.39	0.04	0.00	33.64	0.02	1944.19
0.61	1456.48	67.77	16.27	10.15	6.07	6.76	0.53	216.90	15.94	2.22	0.30	0.06	667.09	8.70	31.25	1.83	7.98	2.05	0.57	2.34	0.40	2.60	0.52	1.49	0.23	1.32	0.21	0.05	0.03	307.07	0.26	383.44
0.13	2644.03	23.36	51.59	23.94	17.06	6.35	0.02	307.43	40.44	2.08	0.04	0.00	277.10	19.49	75.61	3.71	17.13	4.09	1.37	4.94	0.84	6.14	1.39	3.80	0.55	2.94	0.45	0.07	0.01	1245.01	0.30	591.7
1.20	1678.27	588.12	12.92	10.66	7.09	3.45	0.09	271.26	25.17	9.75	0.20	0.00	260.57	18.57	60.51	3.56	15.16	3.63	1.04	3.87	0.61	4.54	1.11	2.65	0.40	2.94	0.35	0.13	0.02	356.30	0.80	208.86
1.03	2064.97	19.75	17.04	13.03	8.19	8.41	1.14	264.99	22.92	2.25	0.34	0.08	269.04	14.05	55.39	3.40	15.28	3.67	1.02	3.66	0.67	3.76	0.83	2.52	0.35	1.89	0.27	0.00	0.02	701.69	0.27	932.46
0.69	3122.91	9.62	6.36	5.39	7.90	33.84	1.22	301.86	43.61	1.61	0.34	0.12	180.74	42.96	111.93	7.51	35.15	6.56	2.00	7.78	1.25	8.81	1.82	4.97	0.75	4.05	0.60	0.08	0.05	7.54	0.45	51.29
0.69	2367.06	18.63	4.95	7.41	5.99	40.07	0.45	608.79	37.80	1.85	0.10	0.06	347.97	23.70	77.09	4.47	18.89	4.22	1.45	5.15	0.93	6.08	1.43	4.26	0.58	3.00	0.49	0.00	0.02	12.07	0.79	344.76
0.47	2351.32	12.18	6.50	5.82	6.25	41.39	0.69	501.92	38.50	1.99	0.29	0.06	384.79	22.98	67.34	4.03	17.91	4.46	1.44	4.71	0.97	5.77	1.31	3.70	0.54	2.99	0.47	0.00	0.04	14.38	0.58	744.49
0.64	3147.71	14.11	15.17	8.93	10.93	10.81	0.35	695.68	33.56	1.91	0.07	0.02	6975.39	25.25	73.26	5.99	26.97	6.04	1.74	7.12	1.22	6.59	1.45	3.81	0.47	2.62	0.49	0.27	0.01	417.30	0.15	485.29
0.86	4401.37	11.00	5.39	7.26	5.24	90.36	0.15	397.93	56.78	6.89	0.30	0.03	275.47	40.66	49.35	8.15	35.29	7.55	2.33	8.21	1.85	10.97	2.49	7.28	1.01	5.88	0.95	0.05	0.05	18.29	0.70	380.28
0.26	4047.94	5.14	5.29	2.87	8.12	62.56	0.31	974.82	56.41	1.33	0.06	0.00	772.95	40.54	119.42	7.27	33.44	6.58	2.23	8.92	1.50	9.73	2.19	6.43	0.77	4.76	0.69	0.02	0.01	11.07	0.33	112.71
1.05	2374.90	148.38	17.51	15.23	10.93	8.07	0.51	343.29	24.19	2.77	0.19	0.03	606.30	12.05	62.21	2.67	11.33	2.69	0.99	3.30	0.57	3.91	0.91	2.59	0.33	2.29	0.33	0.00	0.04	603.29	0.52	218.62
0.53	2012.74	125.80	17.09	9.84	9.84	7.84	0.78	241.65	19.01	2.90	0.37	0.06	199.38	7.84	38.11	1.59	7.12	1.96	0.55	2.39	0.41	2.64	0.66	1.53	0.24	1.30	0.25	0.09	0.07	604.33	0.52	157.16
1.01	3513.74	12.18	3.20	4.97	6.52	73.80	1.36	441.15	42.43	9.23	0.78	0.09	339.41	34.41	84.79	6.95	29.30	6.54	1.81	7.42	1.25	9.35	1.85	5.09	0.70	4.05	0.59	0.23	0.03	15.96	1.15	353.29
1.33	4371.32	14.54	3.11	5.54	5.71	84.46	0.29	410.96	50.45	9.63	0.44	0.04	254.20	38.77	44.06	8.17	35.28	7.58	2.34	8.65	1.61	11.31	2.35	6.83	0.91	6.06	0.68	0.17	0.01	20.09	1.11	320.00
0.14	3452.05	4.17	7.13	28.36	6.29	61.00	0.11	1076.72	62.65	0.71	0.13	0.02	5978.71	26.11	64.52	4.22	20.62	4.87	1.78	6.65	1.08	7.68	1.84	4.91	0.60	3.87	0.57	0.09	0.02	310.74	0.19	451.7
0.53	2632.75	1.47	8.32	3.99	6.70	29.09	0.23	486.64	36.89	0.67	0.06	0.03	3086.47	19.68	77.79	3.89	17.62	3.42	1.19	5.58	0.90	5.47	1.16	3.76	0.45	2.81	0.39	0.00	0.00	405.48	0.13	70.54
0.50	2263.00	47.04	14.43	8.62	8.33	13.51	0.16	383.80	27.66	1.60	0.05	0.02	420.70	17.13	79.53	3.38	15.92	3.58	1.22	3.60	0.72	4.35	1.03	2.81	0.41	2.40	0.33	0.00	0.05	539.00	0.29	175.57
2.64	4.20	11.61	0.45	3.69	1.61	0.12	16.74	49.58	2.12	28.18	0.78	0.40	101.78	2.55	4.45	0.48	2.23	0.46	0.08	0.16	0.05	0.27	0.09	0.19	0.04	0.35	0.04	0.68	0.08	5.80	0.78	0.49
2.22	3.96	4.29	0.55	1.54	1.79	0.36	16.70	50.70	2.06	27.38	0.68	0.45	103.21	2.28	4.53	0.52	1.66	0.26	0.09	0.10	0.06	0.27	0.06	0.00	0.05	0.20	0.04	0.43	0.09	5.62	0.55	0.56
2.06	4.20	1.76	0.34	1.76	1.92	0.98	17.01	54.93	1.95	30.89	0.73	0.41	99.93	2.36	4.51	0.43	1.51	0.28	0.07	0.22	0.06	0.21	0.11	0.17	0.01	0.46	0.03	1.21	0.17	6.65	0.80	0.44
2.81	4.32	15.00	0.55	0.06	1.71	0.00	19.21	51.28	2.48	27.41	0.95	0.45	112.11	2.24	5.11	0.45	1.73	0.36	0.07	0.18	0.09	0.16	0.08	0.13	0.05	0.17	0.03	0.76	0.12	6.07	0.66	0.51
2.67	3.91	0.00	0.44	2.81	1.55	1.22	18.51	50.95	2.05	27.81	0.79	0.56	106.53	2.35	4.92	0.58	1.80	0.25	0.11	0.39	0.05	0.26	0.09	0.31	0.05	0.12	0.03	0.86	0.04	5.62	0.70	0.54

4.5. Raman Spektroskopik ve Kemometrik Analizler

Demir açısından zengin fulguritin polarize ışık altında kuvars kaması ile belirlenen kristal yapılarından çekirdekten 60 ve kabuk kısmından 60 nokta rastgele seçilerek bu noktalardan toplam 120 spektrum elde edilmiştir (Şekil 4.8).

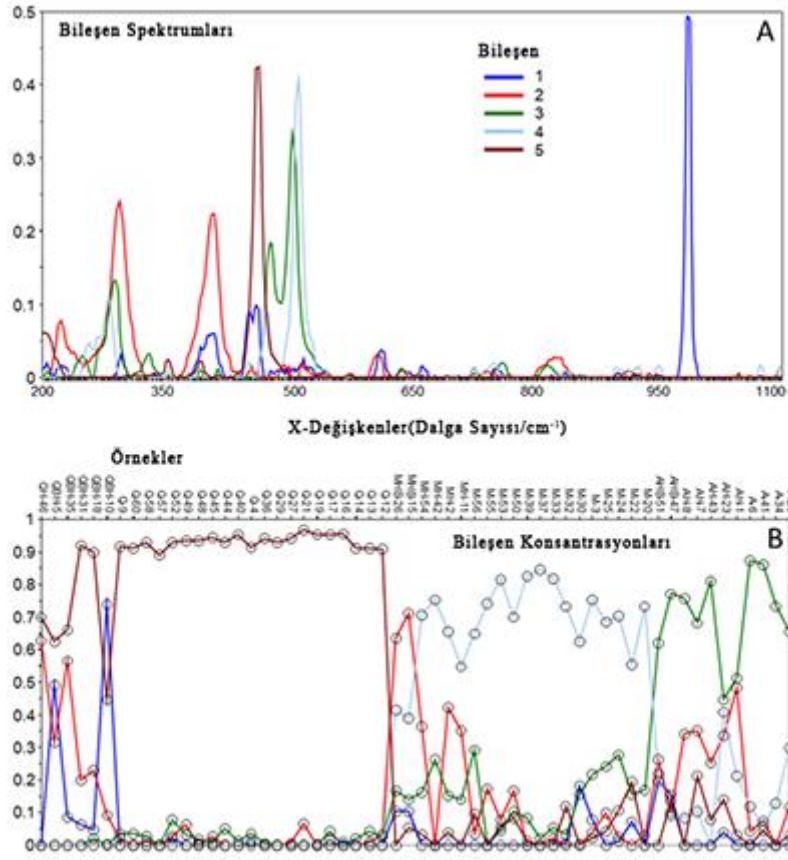


Şekil 4.8: İncelenen demirce zengin fulguritin kesilmiş ince kesitinden Raman spektrumlarının elde edildiği noktalar. Sol: çekirdekten; Sağ: kabuktan.

Elde edilen her bir spektrum grubuna (çekirdek ve kabuk) MCR uygulandı. İki örnek için bileşen spektrumları ve bileşen konsantrasyon grafikleri, Şekil 4.9 (çekirdek) ve Şekil 4.10'da (kabuk) gösterilmektedir.

Demir açısından zengin fulguritin çekirdeği için, MCR analizi, örneklerin 5 bileşene ayrılmasına olanak sağlamıştır (Şekil 4.9A). Bu bileşenler ağırlıklı katkının 3, 4 ve 5 numaralı bileşenden geldiği 3 ana sınıfa ayrılmaktadır. Her bir sınıf katkının 1 ve 2 numaralı bileşenden geldiği alt sınıflara ayrılmaktadır (Şekil 4.9B).

Bileşen spektrumlarının RRUFF veri tabanındaki minerallerin referans Raman spektrumları ile karşılaştırılması (Lafuente B. vd., 2015) 1'den 5'e kadar olan bileşenlerin barit (BaSO_4), hematit (Fe_2O_3), albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), mikroklin (KAlSi_3O_8) ve kuvars (SiO_2) olarak tanımlanmasına olanak sağlamıştır (Şekil 4.11).

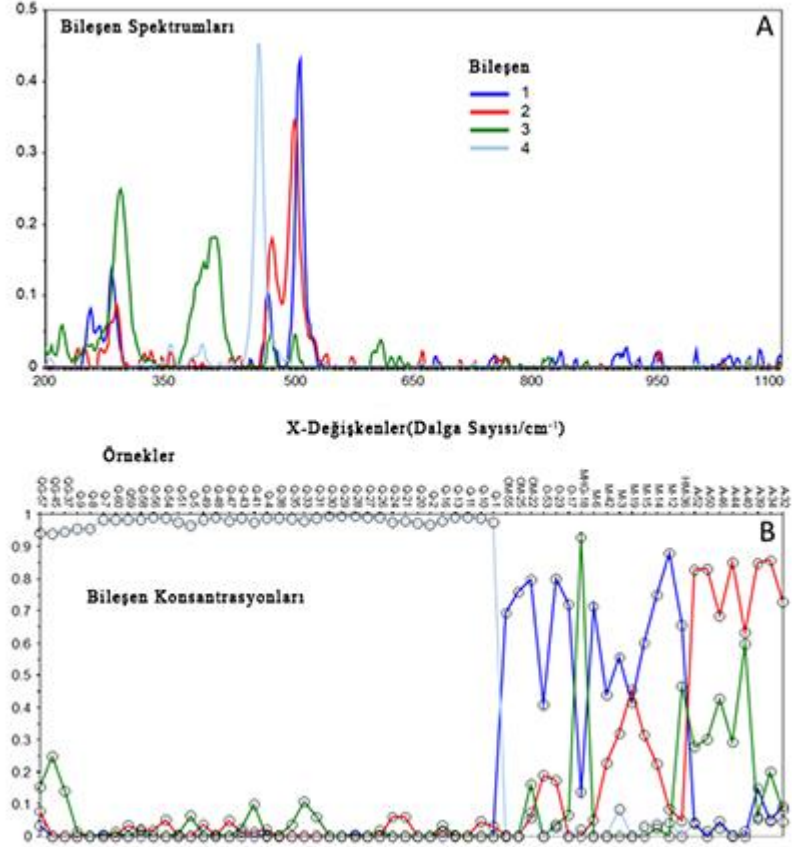


Şekil 4.9: Demirce zengin fulguritin çekirdek kısmından elde edilen Raman spektrumlarının MCR analizinden elde edilen bileşen spektrumları (A) ve bileşen konsantrasyonları (B).

PCA skor grafikleri incelenen demir açısından zengin fulguritin çekirdek kısmı için elde edilen spektrumların PC-1 eksenı boyunca, temel katkının kuvars ve iki tür feldispattan (Mikroclin, Ortoklaz, Albit) geldiği belirgin iki ana gruba ayrılmasına olanak sağlamıştır. Gruplardan ilki PC-1 eksenı boyunca pozitif değerler alırken ikinci grubun negatif değerler aldığı görölmektedir. (Şekil 4.12a-c; PC-1'e karşı PC-2 ve PC-3'ün skor grafikleri ve PC-1'e karşı PC2'ye karşı PC3'ü veren 3 boyutlu skor grafiklerini göstermektedir).

PC-2 boyunca, saf albit örnekleri ağırlıklı olarak orijin etrafında yoğunlaşırken, saf kuvars ve mikroclin örnekleri pozitif skor değerleri almakta ve yalnız hematit veya hematit götit içeren örnekler negatif PC-2 skor değerleri almaktadır (Şekil 4.12 a,b,d;

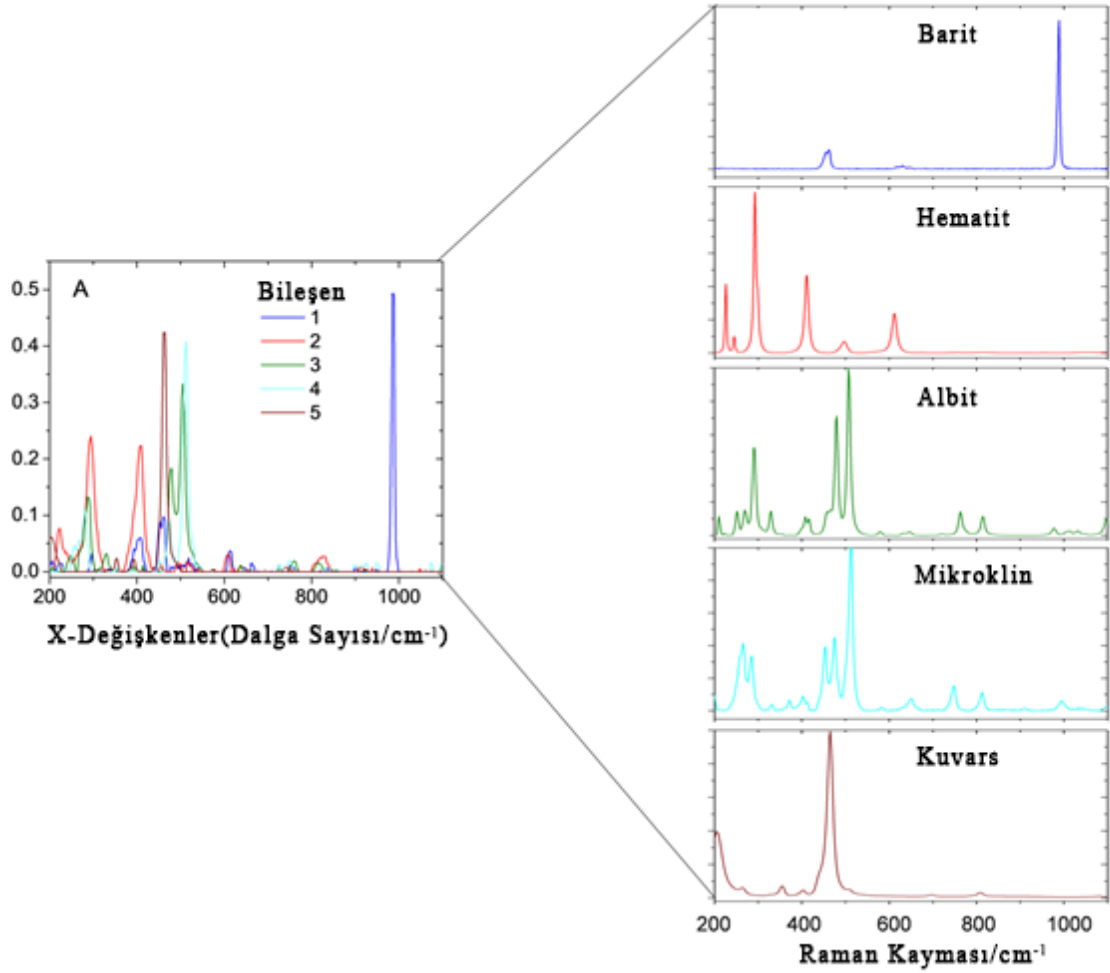
PC-1'e karşı PC-2 ve PC-3'ün skor grafikleri ve PC-1'e karşı PC2'ye karşı PC3'ü veren 3 boyutlu skor grafiklerini göstermektedir).



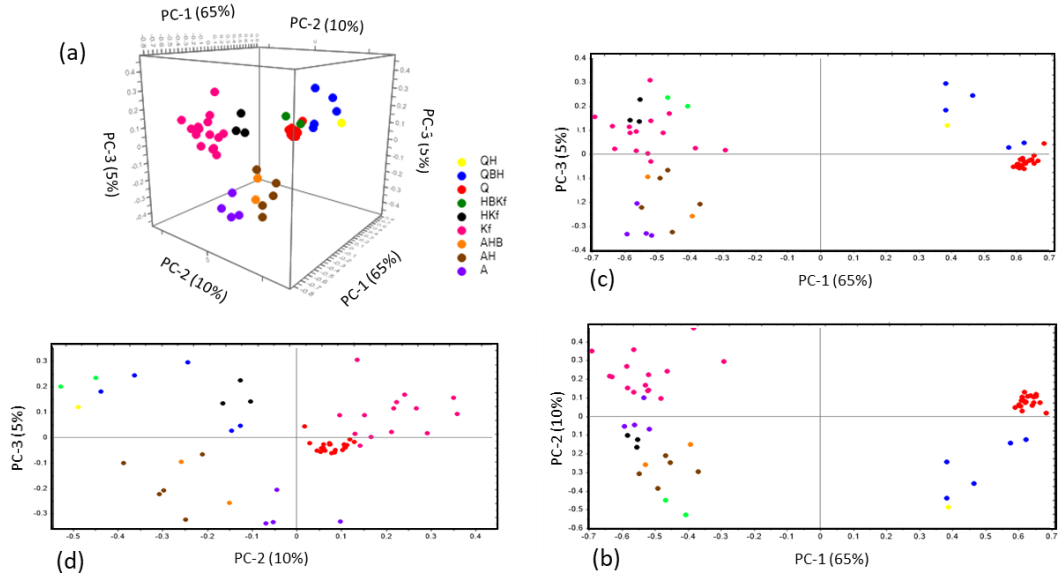
Şekil 4.10: Demirce zengin fulgürin kabuk kısmından elde edilen Raman spektrumlarının MCR analizinden elde edilen bileşen spektrumları (A) ve bileşen konsantrasyonları (B)

PC-3, mikroklin içeren numuneleri (pozitif skorla) albit içeren numunelerden (negatif puanla) iyi bir şekilde ayırmaktadır (Şekil 4.12 a,b,d'de PC-2'ye karşı PC-1 ve PC-3'ün puan grafikleri ve 3 boyutlu PC-1'e karşı PC2'ye karşı PC3 skor grafikleri verilmektedir).

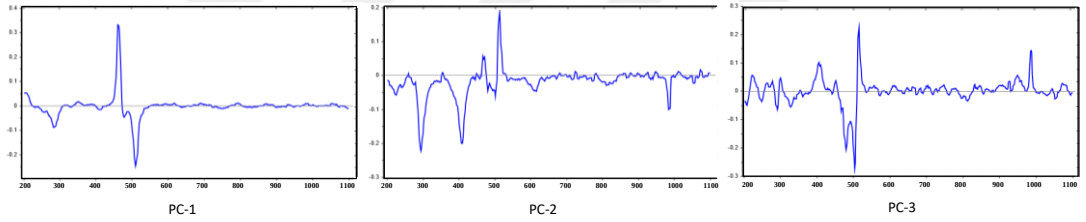
Skor grafiklerindeki farklı spektrum türlerinin konumları, PC-1, PC-2 ve PC-3 yükleme grafiklerine bakılarak bir kez daha kolaylıkla görülebilir (bkz. Şekil 4.13).



Şekil 4.11: MCR bileşen spektrumları (solda) Demir açısından zengin fulguritin çekirdek bölümünde tanımlanan minerallerin Raman spektrumları (sağda).



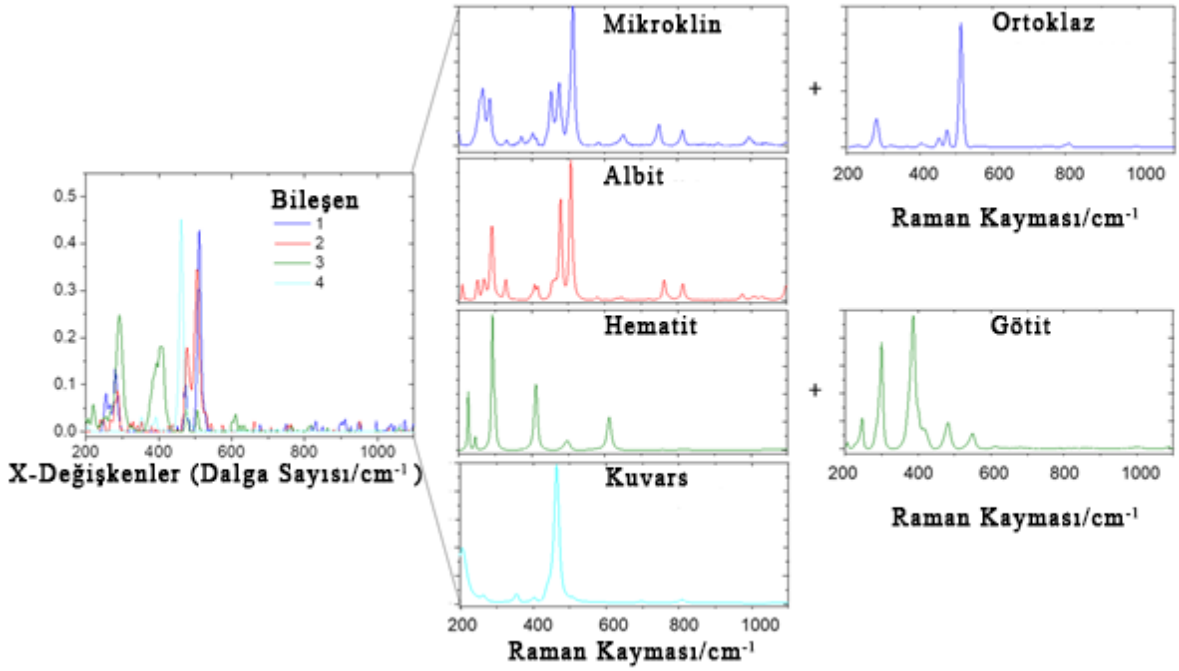
Şekil 4.12: İncelenen demir açısından zengin fulguritin çekirdek bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA skor grafikleri. Q: kuvars; B: barit; H: hematit; A: albit; Kf: K-feldispat (mikroklin).



Şekil 4.13: İncelenen demir açısından zengin fulguritin çekirdek bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA yüklemeleri.

Numunenin kabuk bölümü için, MCR ayrıştırması, numuneleri 1, 2 ve 4'ün baskın katkılarıyla tekrar 3 ana grupta sınıflandırmaya izin veren 4 bileşen tanımlamaktadır (Şekil 4.10-a), bileşen 3 sadece bir spektrumda büyük katkıya sahipken, diğer bileşenlerin baskın olduğu birkaç spektrumda da dikkate sayılır ölçüde katkıya sahiptir (Şekil 4.10-b).

Bileşen 2 ve 4 albit ve kuvars olarak tanımlanmaktadır (bkz. Şekil 4.14). Bileşen 3 ve 1 hematit ve götit ($\text{FeO}(\text{OH})$), mikroklin ve ortoklaz karışımı olarak tanımlanabilir (bu son mineral mikroklinin daha yüksek sıcaklıktaki polimorfudur), sırasıyla (bkz. Şekil 4.14).



Şekil 4.14: MCR bileşen spektrumları (solda) Demir açısından zengin fulguritin kabuk bölümünde tanımlanan minerallerin Raman spektrumları (sağda).

Kabuk PCA skor grafikleri, PC-1 boyunca kuvarsın pozitif skor değeri olarak ve iki feldispat türünün (albit ve K-feldispat mikroklin ve ortoklaz) negatif skor değeri olarak net biçimde ayrıldığını açıkça ortaya koymaktadır. (Şekil 4.15 a,b,d'de PC-2'ye karşı PC-1 ve PC-3'ün puan grafikleri ve 3 boyutlu PC-1'e karşı PC2'ye karşı PC3 skor grafikleri verilmektedir).

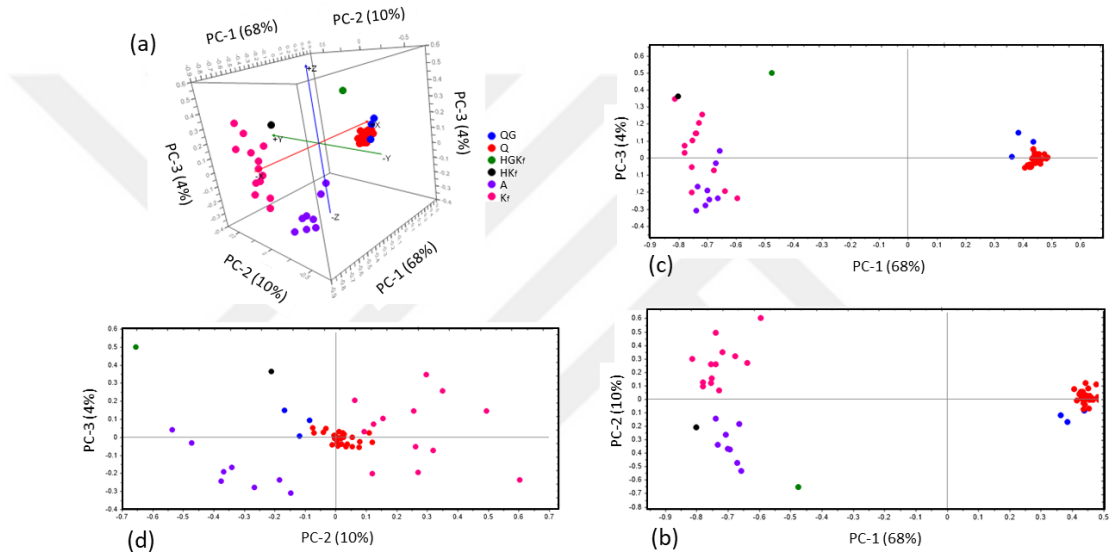
PC-2, saf kuvars numuneleri eksenin orijini civarında (çoğunlukla pozitif tarafta) skor değerlerine sahipken, albit numuneleri negatif ve K-feldispat numuneleri pozitif puanlara sahiptir.

Hematit veya götite örneklerde bulunması PC-2 puanlarının negatif olmasına yol açarken, mikroklin örnekleri pozitif skor değerleri alırlar. Bunun yanında saf albit veya tek başına hematit veya hematit ve barit içeren numunelerin spektrumları negatif puanlara sahiptir (Şekil 4.15 a,b,d'de PC-2'ye karşı PC-1 ve PC-3'ün puan grafikleri ve 3 boyutlu PC-1'e karşı PC2'ye karşı PC3 skor grafikleri verilmektedir).

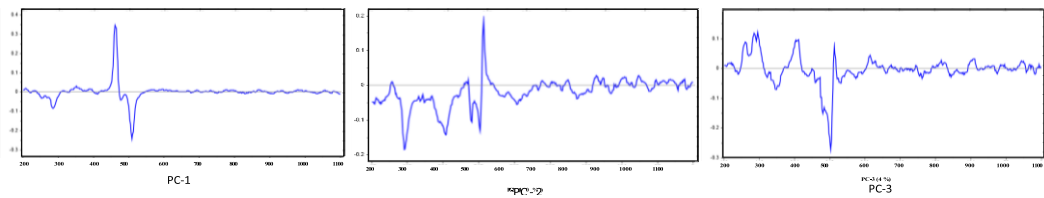
PC-3 boyunca hematit/götite içeren örnekler pozitif değerlere sahipken, albit içerenlerin çoğu negatif değerler almaktadır (Şekil 4.15 a,c,d'de PC-2'ye karşı PC-1

ve PC-3'ün puan grafikleri ve 3 boyutlu PC-1'e karşı PC-2'ye karşı PC-3 skor grafikleri verilmektedir).

PC-3 boyunca kuvars örnekleri orijine yakın konumlanırken ve K-feldispat örnekleri dağılım göstermektedir. İlginç bir şekilde, PC-2'ye karşı PC-3 puanları grafiği, farklı numune türleri arasında çok iyi bir ayrım olduğunu göstermektedir. Skor grafiklerindeki farklı spektrum türlerinin konumları, PC-1, PC-2 ve PC-3 yükleme grafiklerine bakılarak bir kez daha kolaylıkla görülebilir (bkz. Şekil 4.16).



Şekil 4.15: İncelenen demir açısından zengin fulguritin kabuk bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA skor grafikleri. Q: kuvars; B: barit; H: hematit; A: albit; Kf: K-feldispat (mikroklin).



Şekil 4.16: İncelenen demir açısından zengin fulguritin kabuk bölümünün Raman spektrumunun analizinden elde edilen PCA yüklemeleri.

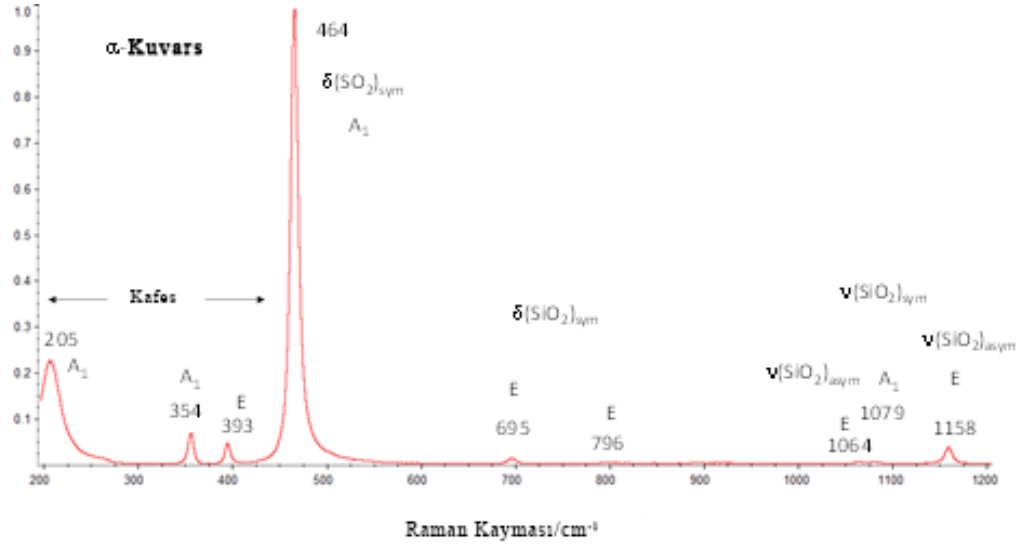
Özetle, Raman spektroskopisi, kemometrik analiz yöntemleriyle birlikte kullanılarak demirce zengin fulguritin çekirdeğinde kuvars, mikroklin, hematit, albit ve barit tayinine olanak sağladı. Bölüm 4.5 ile 4.6'da sunulan sonuçlarda, çalışılan fulguritin çekirdek ve kabuk bölgelerinin mineralojik bileşimindeki farklılıkları vurgulanmıştır. Farklı spektrumlardaki minerallerin ortaya çıkma sayısı bize çekirdek ve kabukta kuvarsın en yüksek miktarda bulunan mineral olduğunu göstermiştir. Bunu takiben çoktan aza sıralanacak şekilde çekirdekte mikroklin, albit, hematit ve barit mineralleri ve kabukta ortoklaz, mikroklin, albit, hematit ve götit tespit edilmiştir.

İncelenen fulguritin çekirdek ve kabuk bölgelerinin mineralojik bileşiminde gözlenen farklılıklar, fulguritin yıldırım düşmesine takiben erimiş malzemenin difüzyonu, hem de dış kabuk bölgesinde daha hızlı soğumanın etkileri, çeşitli minerallerin farklı özellikleri ile birlikte dikkate alınarak açıklanabilir. Daha ağır malzemeler daha yavaş yayılır, bu da hematit ve baritin fulguritin çekirdeğinde yoğunlaşmasına yol açar. Hematit, fulguritin kabuğundaki meteorik su nedeniyle sonradan götite dönüşür. Fulgurit yüzeyinin yakınında, kabukta, sülfat kaybı nedeniyle (SO_2 ve O_2 gazlı ürünler şeklinde) barit stabilize olamamaktadır.

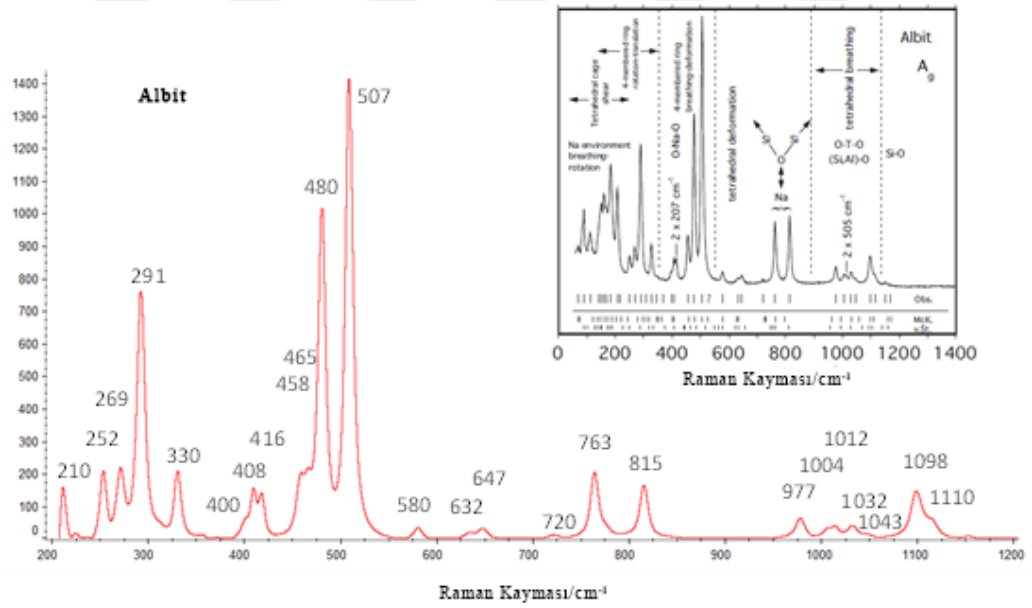
Yüzeyde, kabuktaki daha hızlı soğuma, kinetik olarak ortoklazı hapsederken, çekirdek alanındaki daha yavaş soğutma, mikroklin oluşumuna izin vermektedir. (ortoklaz, mikroklin'in daha yüksek bir sıcaklık polimorfudur). Mikroklinin çekirdekteki varlığı, çekirdek ve iki polimorfunun kabuktaki karışımı bu tespiti haklı çıkarmaktadır.

Albit ve K-feldispatların toplam yüzdeleri, kabuk ve çekirdekte önemli ölçüde değişmez. Öte yandan, kuvarsın miktarı kabukta artış göstermektedir, ancak bu esasen sırasıyla hematit ve baritin azalmış olmasını veya olmadığını gösterebilir.

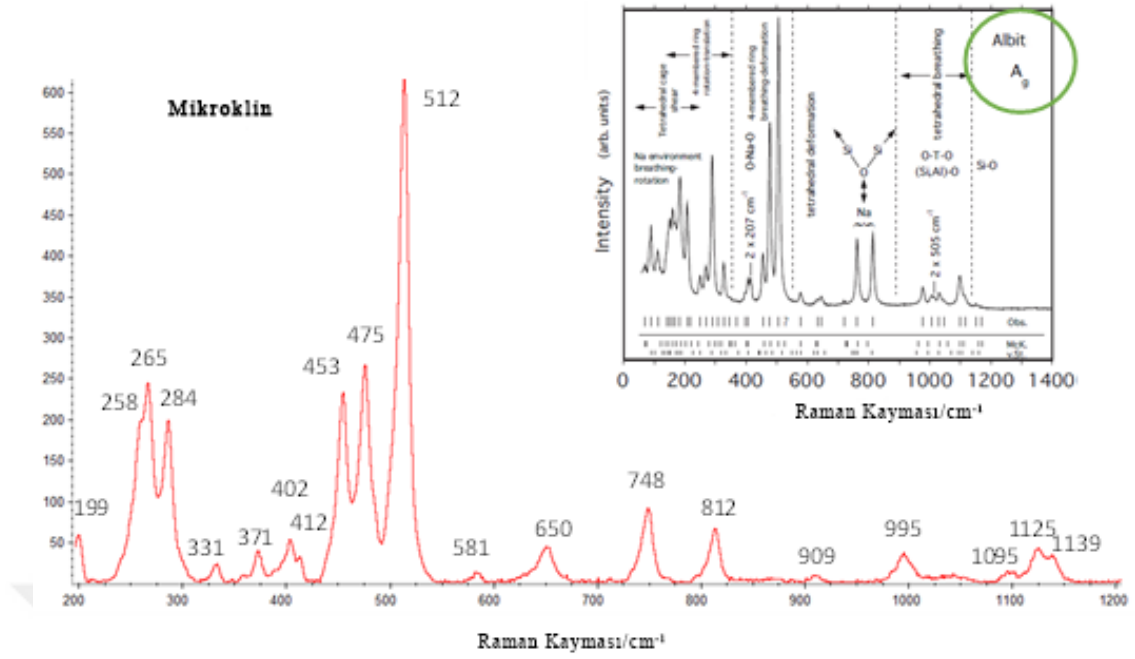
Demir açısından zengin fulguritte bulunan minerallerin Raman spektrumları Şekil 4.17-23'te verilmiştir, spektrumlardaki piklerin işaretlemeleri önceki literatüre dayandırılarak yapılmıştır ve bu çalışmada daha ayrıntılı olarak tartışılmayacaktır. (Carter vd. 2010)



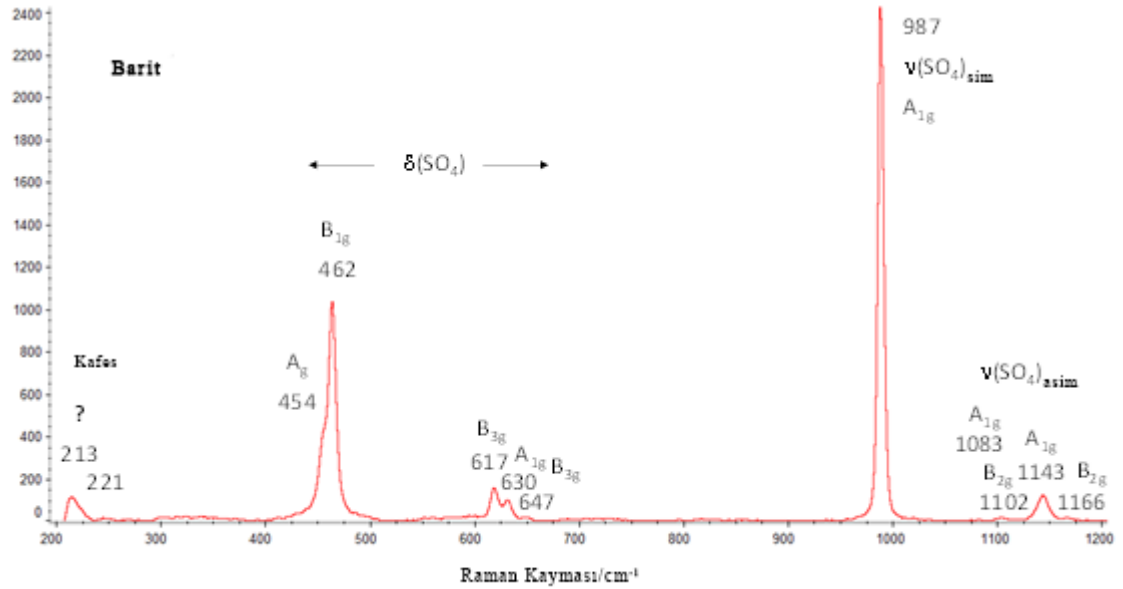
Şekil 4.17: Kuvarsın Raman spektrumunun işaretlemeleri.



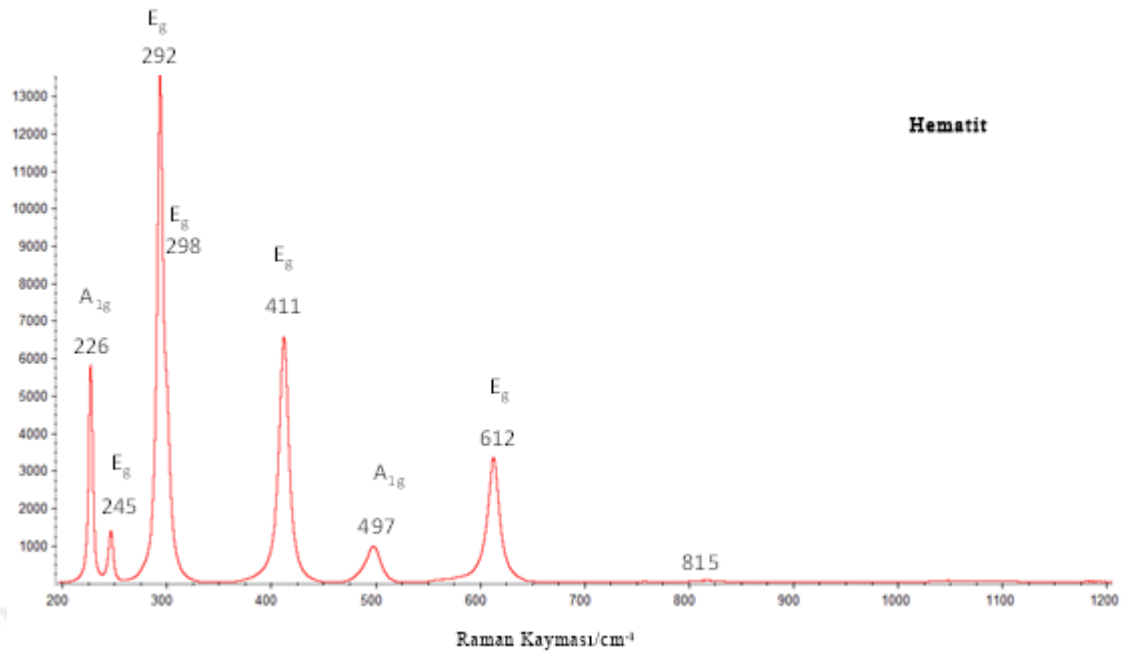
Şekil 4.18: Albitin Raman spektrumunun işaretlemeleri.



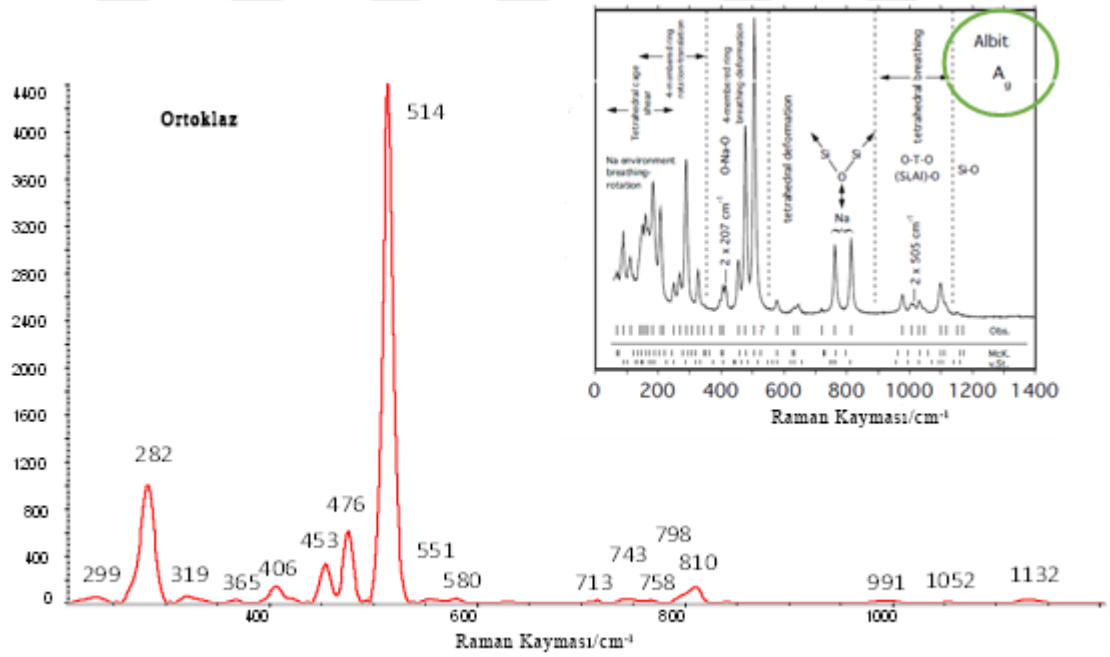
Şekil 4.19: Mikroklinin Raman spektrumunun işaretlemeleri (mikroklinle benzerlik gösteren albitin işaretlemesiyle birlikte verilmiştir).



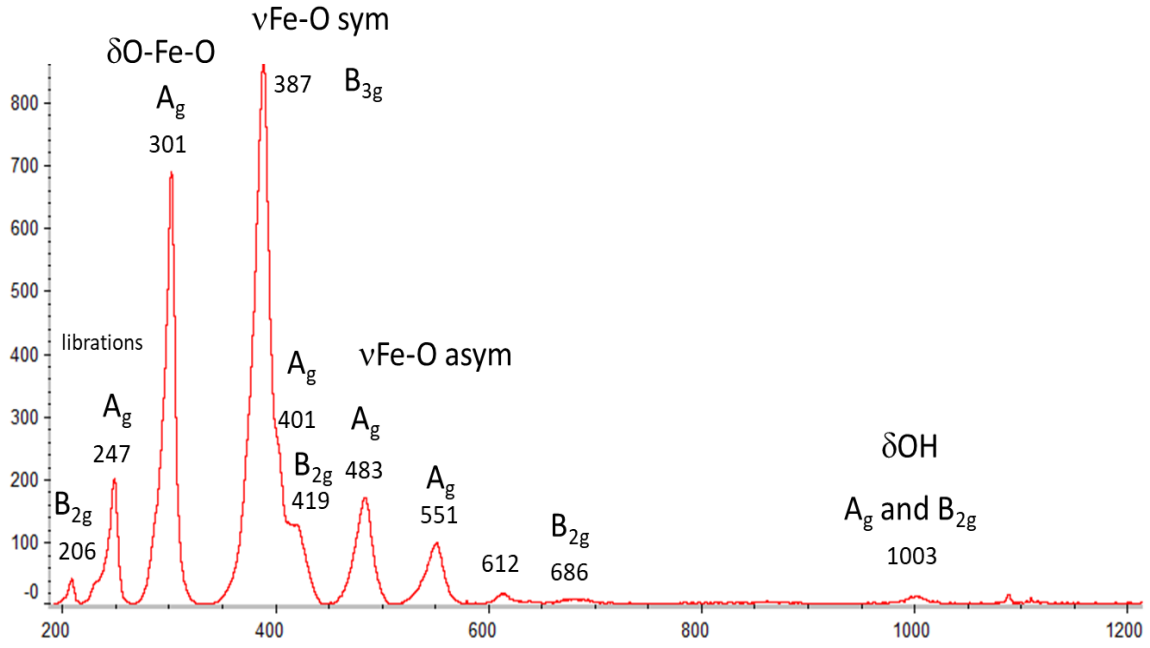
Şekil 4.20: Baritin Raman spektrumunun işaretlemeleri.



Şekil 4.21: Hematitin mikroklinin Raman spektrumunun işaretlemeleri.



Şekil 4.22: Ortoklazın Raman spektrumunun işaretlemeleri (albite benzerlik gösteren mikroklinin işaretlemesiyle birlikte verilmiştir).

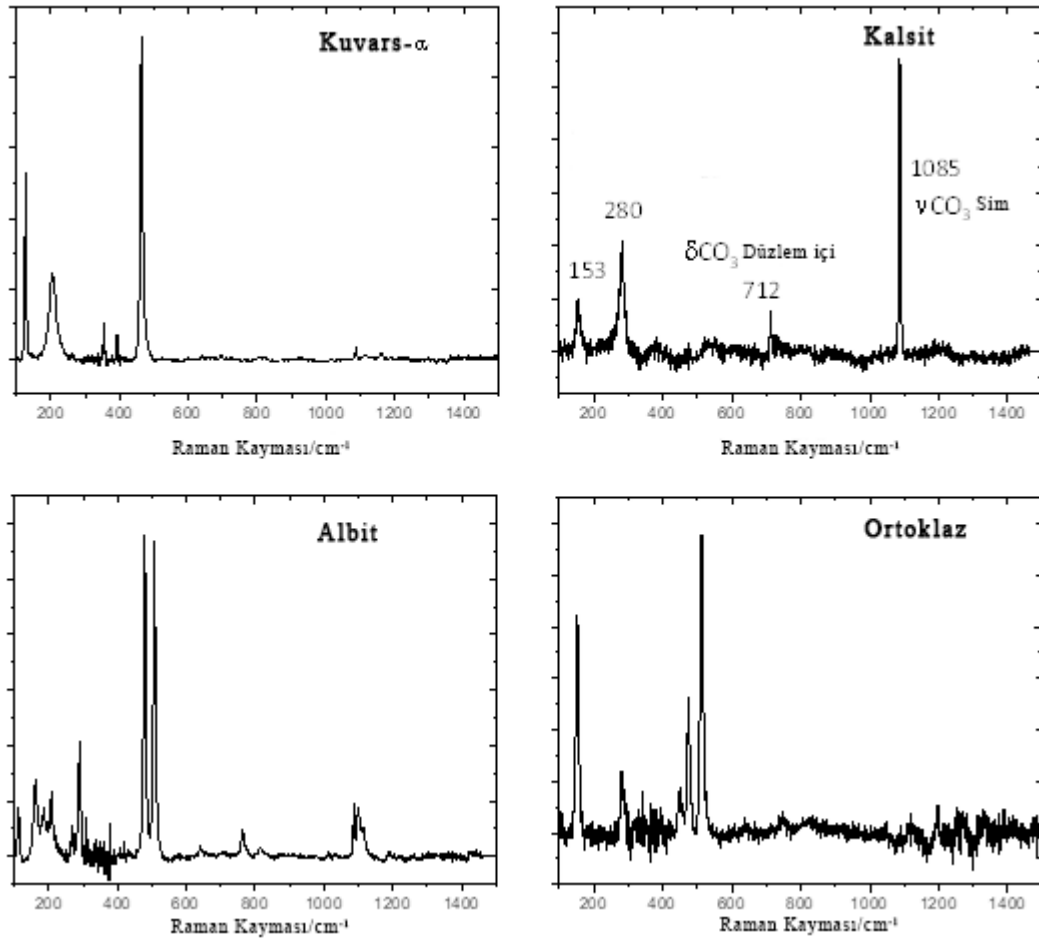


Şekil 4.23: Götitin Raman spektrumunun işaretlemeleri.

4.5.1. Kireçli Fulguritin Raman Spektroskopik Analizi

İncelenen kireç fulguriti için, Coimbra Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bir mikro-Raman sistemi kullanılarak malzemenin hızlı bir şekilde haritalanması yapılmıştır. Ayrıca XRD sonuçları, bu fulguritin mineral bileşiminin, demir içerikliye kıyasla çok daha basit olduğunu ortaya koymuştur.

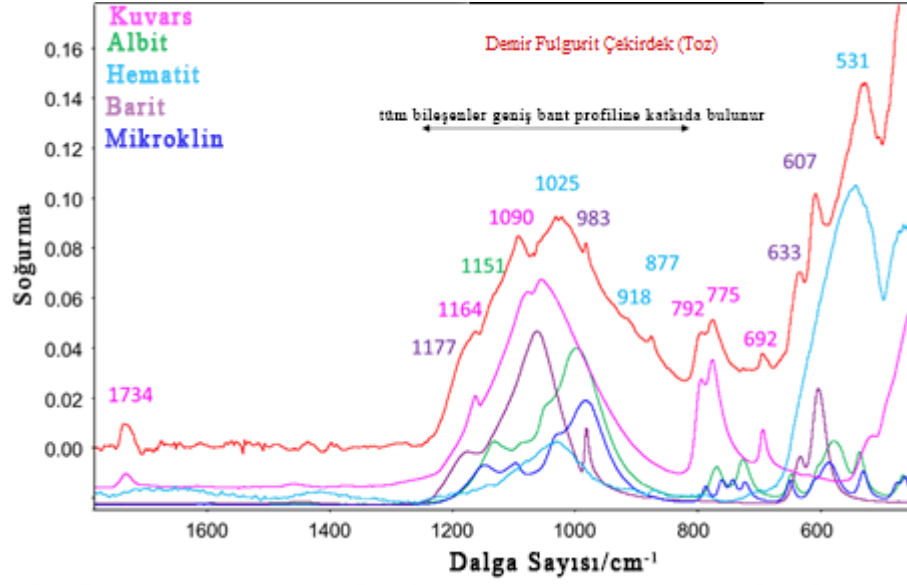
Çekirdek ve kabuk bölmelerinde elde edilen Raman spektrumları, her iki bölgede de kireç fulguritin mineralojik bileşiminin aynı olduğunu göstererek ana bileşenlerin kuvars ve kalsit olduğunu ayrıca albit ve ortoklaz ve mikroklin karışımı (ve muhtemelen, ayrıca biraz anortit) içerdiğini göstermiştir. Bu fulgurit için elde edilen Raman spektrumları ve literatür verilerine dayalı kalsit spektrumunun işaretlemeleri Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



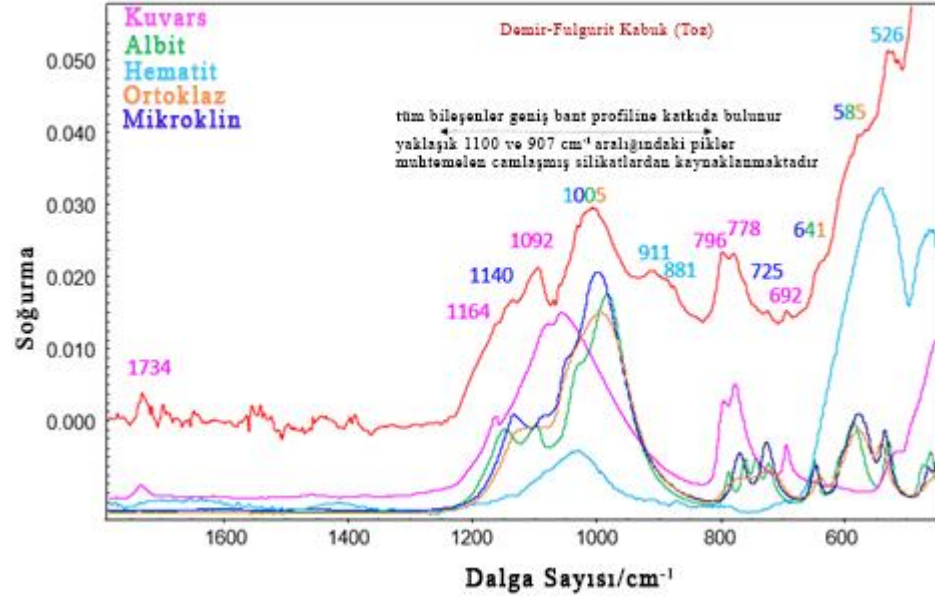
Şekil 4.24: İncelenen kireç fulguriti için elde edilen Raman spektrumları.

4.6. Kırmızı-altı Spektroskopik Analizi

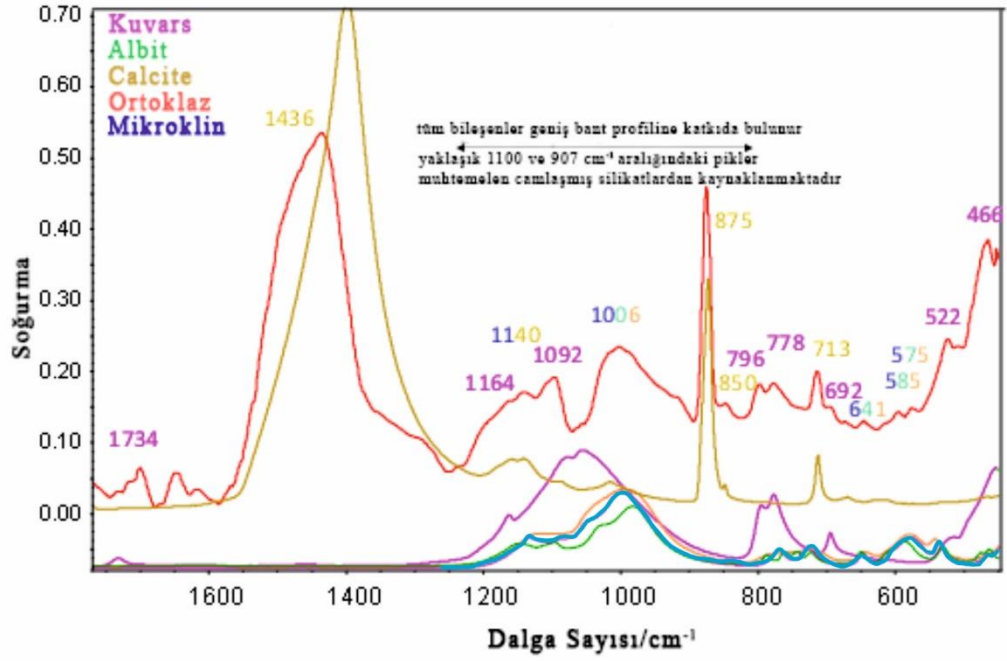
Demir içerikli ve kireçli fulguritlerin Kırmızı-altı spektrumları, RRUFF veri tabanındaki (Lafuente, vd., 2015) mineraller için verilen spektrumlarla birlikte Şekil 4.25-27'de gösterilmektedir. Şekilde çekirdek ve kabuk bölgelerinden elde edilen spektrumlar kırmızı ile gösterilirken diğer mineraller şeklin açıklama yazısında verildiği biçimde farklı renklerle gösterilmiştir. Elde edilen Kırmızı-altı spektrumlar, Raman spektroskopisi ile tanımlanan minerallerin, fulguritlerin farklı bölgelerindeki varlığını doğrulamaktadır. Spektrumlardaki bantlara büyük ölçüde katkıda bulunan birden fazla mineralin olduğu durumlarda dalga sayıları, spektrumlardaki renklere karşılık gelen renklerden kullanılmıştır.



Şekil 4.25: İncelenen demir açısından zengin fulgürütin çekirdeğinin Kırmızı-
altı spektrumunun işaretlemeleri.



Şekil 4.26: İncelenen demir açısından zengin fulgürütin kabuğunun Kırmızı-
altı spektrumunun İşaretlemeleri.



Şekil 4.27: İncelenen kireçli fulgürin Kırmızı-Altı spektrumunun işaretlemeleri.

4.7. Fulgürin'in Çekirdek ve Kabuk Kısımlarının Mineralojik Bileşiminin Karşılaştırılması

Bölüm 4.5 ile 4.6'da verilen sonuçlar, çalışılan fulgürin'in çekirdek ve kabuk bölgelerinin mineralojik bileşimindeki farklılıkları vurgulanmıştır. Bu farklılıklar, çeşitli minerallerin farklı özellikleri (yoğunluk, kristalleşme sıcaklığı, polimorfizm, kararlılık) ile birlikte, fulgürin'in yıldırım düşmesine takiben erimiş malzemenin difüzyonu ile dış kabuk bölgesinde daha hızlı soğumanın etkileri dikkate alınarak açıklanabilir.

Daha ağır malzemelerin daha yavaş yayılıyor olması hematit ve barit gibi fulgürin'in çekirdeğinde demir ve baryum içeren minerallerin artışına yol açar. Hematit mineralinin neme duyarlı olduğu bilinmektedir, bu nedenle kabukta meteorik su tarafından kısmi olarak götit mineraline dönüşümü nedeniyle fulgürin'in kabuğundaki görelî miktarı azalır (%8'den %4'e; bkz. Tablo 4.1) (Schwerman, 1971). Kabuktaki hesaplanan götit miktarı %5'tir. Bununla birlikte götit mineral formülünde sadece bir demir atomuna sahipken, hematit iki taneye sahiptir ve bu durumda, toplam demir miktarı aslında kabukta fulgürin'in çekirdeğinden yaklaşık olarak %10 daha küçüktür,

yani fulguritin kabuk bölmesindeki orijinal hematit miktarı, beklendiği gibi çekirdekten biraz daha küçüktür (yaklaşık %1,5). Öte yandan, fulguritin yüzeyine yakın kabukta barit, sülfat kaybı nedeniyle (SO_2 ve O_2 gaz formunda) (Holt vd., 1971) stabilize olamamaktadır, bu da bu bölmede bulunmamasını haklı çıkarmıştır.

Sonuçlar ayrıca, fulguritin yüzeyindeki hızlı soğumanın fulguritin kabuk bölgesinde ortoklazın kinetik olarak hapsedilmesine yol açarken, çekirdek bölmesindeki daha yavaş soğumanın, ortoklazın düşük sıcaklıktaki bir polimorfu olan mikroklin oluşumuna izin verdiğini göstermektedir. Bu durum, çekirdekte mikroklin mineralinin daha çok karşımıza çıkmasına, kabukta ise bu iki polimorfun karışımının gözlenmesine neden olmaktadır. Toplam K-feldispat yüzdesi, fulguritin çekirdeğinden kabuğa giderken sadece %22'den %20'ye düşer. Öte yandan, plajiyoklaz feldispat, albit ve kuvars, kabuk bölmesinde biraz daha büyük miktarlarda bulunur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Fulguritler, buluttan yere yıldırım düşmesi sonucunda kaya, kum veya toprağın hızlı bir şekilde ısıtılmasıyla oluşan çoğunluğu camsı yapılardır ve isimlerini Latince yıldırım anlamına gelen fulgur kelimesinden alırlar. Teorik olarak fulguritler, yıldırımın çarptığı her yerde oluşabildikleri için bileşimsel çeşitliliği fazla olan doğal cam yapılardır. Topraktan geçen yıldırımın özelliklerini doğrudan gözlemlemek zor olduğundan fulguritler, biriken enerji, yıldırım kanalı genişliği, tepe sıcaklıkları ve potansiyel olarak ısıtma ve soğutma hızları dahil olmak üzere yeraltında ilerleyen yıldırımın özelliklerine dair önemli ipuçları sağlar. Fulguritlerin, içindeki farklı mineral bileşimlerinin tespiti ve çekirdekten kabuk bölgelerine geçişteki değişimi fulguritlerin oluşum mekanizmasına ışık tutar. Bu çalışmada Moğolistan'ın Gobi çölünden alınmış fulgurit örneklerinin petrografik ve spektroskopik karakterizasyonu ortaya konulmuştur. Çalışılmış olan fulguritlerin menşei açısından da bu çalışma bir ilk olma özelliğine sahiptir.

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle fulgurit örneklerinden ince kesitler hazırlanmış ve bu kesitler üzerinde öncelikle petrografik incelemeler yapılmıştır. Bu petrografik incelemelerde kesitlerin tüm alanları X2.5 büyütme objektif kullanılarak hem tek nikol hem çift nikol olarak fotoğraflanmış ve bu fotoğraflar birleştirilerek diğer analizlerde kullanılmak üzere kesitlerin bir anlamda haritası oluşturulmuştur. Petrografik incelemeler kapsamında, hazırlanan kesit haritaları kullanılarak farklı örneklerle ait kesitlere belli bir alan seçilerek tane ve matriks kısım oranları incelenmiştir. Bu oranlar tüm parçalar için ayrı ayrı uygulanmıştır ve seçilen alan her kesitte aynı tutulmuştur. Bu hesaplamalar sonucunda çok farklı oranlar tespit edilmiştir. Bu farklılık, oluşum sırasında yıldırımın enerji boşaltmasının farklı deşarj kollarının varlığına işaret edebileceği gibi, yıldırımın yere düştüğü anda dirençli malzemede ilerleme ya da ilerleyememe durumlarını da akla getirmiştir.

Polarizan mikroskop altında yapılan tanımlamalarında belirlenemeyecek minerallerin belirlenebilmesi için fulguritin iç ve dış(kabuk) kısmı ayrımlanarak 150 mesh boyuta kadar ayrı ayrı öğütülerek X-Işını kırınımı yöntemi kullanılmıştır. XRD yöntemi ile fulguritin çekirdek kısmında; kuvars, mikroklin, barit, hematit ve albit mineralleri ve kabuk kısmında ise kuvars, mikroklin, ortoklaz, albit, hematit ve götit mineralleri belirlenmiştir. Örneklerdeki farklı minerallerin göreceli yüzdeleri, yarı kantitatif olarak Match! programındaki referans şiddet oranı (RIR) metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Çekirdekteki minerallerin ağırlıkça yüzdeleri sırası ile kuvars, mikroklin, albit, hematit ve barit için; %21, %39, %19, %8 ve miktarsal yüzdeleri %13 ve %52, %22, %10, %8, %8 olarak belirlenirken kabuktaki minerallerin ağırlıkça yüzdeleri sırası ile kuvars, mikroklin, ortoklaz, albit, hematit ve götit için; %24, %17, %21, %30, %5, %3 ve miktarsal yüzdeleri sırasıyla %56, %9, %11, %15, %4, %5 olarak tespit edilmiştir.

Daha sonra, ICP-OES cihazı ile tüm kayaç jeokimyası analizi yapılarak majör oksitleri hesaplanmıştır. Tüm kayaç jeokimyası analizleri sonucu örneklerin yüksek kuvars içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. İç kısımda tanelerin çoğunluğu kuvars olduğundan dolayı dış kısma göre yüksek SiO₂ içeriğine sahip iken, dış kısım iç kısma göre daha yüksek Cr₂O₃ içeriğine sahiptir. Sonrasında fulgurit örneklerinden hazırlanan parlatılmış ince kesitte belirlenen mineraller üzerinde ve hamur kısmında SEM analizi yapılmıştır. Fulgurit kesiti üzerinde iki farklı bölgede toplam 36 nokta üzerinde yapılan SEM analizi sonucu, matriks kısmında ortalama %77 civarında FeO tespit edilmiştir. Literatürdeki fulgurit sınıflamalarında incelenen türlere bakıldığında fulguritin oluşumu esnasında maruz kaldığı yüksek ısı sebebiyle ergimiş camsı bir matrikse sahip olması beklenirken, yüksek FeO oranına sahip olması ilginçtir. Bu durum, yıldırıma maruz kalan hedef malzemenin içerdiği minerallerin bünyesindeki Fe elementinin hamura geçmiş olabileceği düşünülmektedir. SEM analizi sonrasında aynı kesitler üzerinde LA-ICPMS ile ölçülen noktalar kesitin matriks kısmından olmakla birlikte bu noktalardan elde edilecek sonuçlarda, fulguritin oluşumu esnasında yüksek ısıdan kaynaklı ergimiş camsı bir faz beklentisi oluşmuştur. Ancak yapılan analizler sonucunda matriks kısmında yüksek FeO içeriği göze çarpmaktadır. Bu durum, fulgurit oluşum mekanizmasının belirlenmesinde dikkate alınması gereken ve üzerinde daha detaylı çalışmalar yapılması gereken bir noktadır. 5 tane mineralden

yapılan ölçüm sonuçlarına göre bu minerallerin hepsi kuvars olarak belirlenmiştir.

Demir içerikli fulguritten hazırlanmış ince kesitten Raman Spektroskopisi ile minerallerin Raman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Fulguritin iç ve dış bölümlerinden elde edilen Raman spektrumları kemometrik analiz tabanlı yöntemlerden Çok Değişkenli Eğri Çözünürlüğü (MCR) ve Temel Bileşen Analizi (PCA) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında çekirdekte kuvars, mikroklin, hematit, albit ve barit mineralleri belirlenmiştir. Minerallerin farklı spektrumlardaki oluşum sayıları göz önüne alındığında, kuvars ana bileşen olarak ortaya çıkmakta, bunu mikroklin ve hematit takip etmekte, albit ve barit ise daha küçük miktarlarda bulunmaktadır. Fulguritin kabuk bölgesinde tespit edilen mineraller; kuvars ana bileşen olarak ortaya çıkmakta ve bunu K-feldispat, ortoklaz ve mikroklin karışımı, albit az miktarda götit ve hematit takip etmektedir.

İncelenen fulguritin çekirdek ve kabuk bölgelerinin mineralojik bileşiminde gözlenen farklılıklar, fulguritin yıldırım düşmesine takiben erimiş malzemenin difüzyonu, hem de dış kabuk bölgesinde daha hızlı soğumanın etkileri, çeşitli minerallerin farklı özellikleri ile birlikte dikkate alınarak açıklanabilir. Daha ağır malzemeler daha yavaş yayılır, bu da hematit ve baritin fulguritin çekirdeğinde yoğunlaşmasına yol açar. Hematit, fulguritin kabuğundaki meteorik su nedeniyle sonradan götite dönüşür. Fulgurit yüzeyinin yakınında, kabukta, sülfat kaybı nedeniyle (SO_2 ve O_2 gazlı ürünler şeklinde) barit stabilize olamamaktadır. Yüzeyde, kabuktaki daha hızlı soğuma, kinetik olarak ortoklazı hapsederken, çekirdek alanındaki daha yavaş soğutma, mikroklin oluşumuna izin vermektedir. (ortoklaz, mikroklin'in daha yüksek bir sıcaklık polimorfudur). Mikroklinin çekirdekteki varlığı, çekirdek ve iki polimorfunun kabuktaki karışımı bu tespiti haklı çıkarmaktadır. Albit ve K-feldispatların toplam yüzdeleri, kabuk ve çekirdekte önemli ölçüde değişmez. Öte yandan, kuvarsın miktarı kabukta artış göstermektedir, ancak bu esasen sırasıyla hematit ve baritin azalmış olmasını veya olmadığını gösterebilir.

Raman spektroskopik analiz yöntemlerinden elde edilen mineral bulguları XRD analizi ile tespit edilen mineraller ile uyum içindedir.

Kireçli fulgurit için elde edilen micro Raman spektrumları XRD sonuçları ile birlikte, fulguritin mineral bileşiminin, demir içerikliye kıyasla çok daha basit olduğunu ortaya koymuştur. Çekirdek ve kabuk bölmelerinde elde edilen Raman spektrumları, her iki bölgede de kireç fulguritinin mineralolojik bileşiminin aynı olduğunu göstererek ana bileşenlerin kuvars ve kalsit olduğunu ayrıca albit ve ortoklaz ve mikroklin karışımı (muhtemelen ayrıca biraz anortit) içerdiğini göstermiştir.

Demir içerikli ve kireçli fulgurit için elde edilen Kırmızı-altı spektrumları, Raman spektroskopisi ile tanımlanan minerallerin fulguritlerin farklı bölgelerindeki varlığını doğrulamaktadır.



KAYNAKLAR

Altaratz O, Levin Z, Yair Y, Ziv B. 2003. "Lightning activity over land and sea on the eastern coast of the Mediterranean". Month Weath Rev 131:2060-2070.

Antipin M. Y., . Flugge V. GM. P, Gerr R. G., Struchkov Y. T. and Ozerov R. P. 1985. "Electron Density Distribution in Hematite, α -Fe₂O₃, from Precision X-ray Diffraction Data", *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **281**, 854–857.

Arago, M. 1821."A Perfect Glass". Annales de Chimie et de Physique, 19, pp 647-648.

Aydoğın Ş."Katıhal Fiziği". Ankara:Nobel, ISBN 978-605-133-975-7, 2014.

Aydoğın Ş." Katıhal Elektroniği". Ankara:Nobel, ISBN 978-605-320-345-2, 2015.

Bayhan, U.C. 2021. "İstranca masifinde Safaalan bölgesinin magmatik-metamorfik petrolojisi ve yapısal özellikleri". Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

Boccippio DJ, Cummins KL, Christian HJ, Goodman SJ. 2000. "Combined satellite- and surface- based estimation of the intracloud- cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States". Month Weath Rev 129:108-122.

Carter E. A., Hargreaves M. D. Kee T. P. , Pasek M. A. And Edwards H. 2010."A raman spectroscopic study of a fulgurite". The Royal Society. 368, 3087-3097.

Carter E. A., Pasek M. A., Smith T, Kee T, Hines P, Edwards H. 2010. "Rapid raman mapping of a fulgurite". Analytical and Bioanalytical Chemistry.397:2647-2658.

Christian HJ, Blakeslee RJ, Boccippio DJ, Boeck WL, Buechler DE, Driscoll KT, Goodman SJ, Hall JM, Koshak WJ, Mach DM, Stewart MF. 2003. "Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector". J Geophys Res 108:ACL 4-15.

Erđin, N.1987. "Taramalı elektron mikroskopunun temel prensipleri ve numune hazırlama".İ.Ü. Orman Fakóltesi Dergisi, B-36-2.

Fröhlich F., Poupeau G., Badou A., Le bourdonnec F. X., Sacquin Y., Dubernet S., Bardintzeff J. M.,Veran M.,Smith D. C., and Diemer E. 2013. "Libyan Desert Glass:New field and Fourier transform infrared data". Meteoritics & Planetary Science 48, Nr 12, 2517-2530.

Hafner, B. 2017. "Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM:A Primer, Characterization Facility". University of Minnesota.

Hanawalt J. D., Rinn H. W. and Frevel L. K. 1938. "Chemical Analysis by X-Ray Diffraction", Anal. Chem., 10, 475–512.

Harrison R. K., Aitkenhaed N., Young B. R. and Dagger P. F. 1975. "Goethite from Hindlow, Derbyshire", Bull. Geol. Surv. G. B., 52, 51–54.

Holt B. D. and EngelkemeirA . G. 1970. "Thermal Decomposition of Barium Sulfate to Sulfur Dioxide for Mass Spectrometric Analysis", Anal. Chem., 42, 1451–1453.

Kittle, C.2014. "Katı Hal Fiziğine Giriş".Ankara:Palme Yayıncılık, ISBN 6053552253.

Jacobsen S. D., Smyth J. R., Swope R. F. and Downs R. T.. 1998. "Rigid-body Character of the SO₄ Groups in Celestine, Anglesite and Barite", *Can. Mineral.*, **36** 1053–1060.

Kaygısız, E. 2018. Bazı Meteoritlerin Petrografik ve Elemtal Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 143, İstanbul.

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

Lay EH, Jacobson AR Holzworth RH, Rodger CJ, Dowden RL. 2007. “Local time variation in land/ocean lightning flash density as measured by the World Wide Ligthing Location Network”. J Geophys Res 112:D13111 1-9.

Martens H, and Naes T, 1989. “Multivariate Calibration”. John Wiley & Sons. Chichester. U.K.

Nagelschmidt G. 1936. “On the Lattice Shrinkage and Structure of Montmorillonite”, *Z. Kristallogr., Crystal. Mater.*, **93** 481–487.

O’Keefe, J. 1984. “Natural glass”. *Journal of Non Crystalline Solids*, 67, pp. 1-17, 1984. Doi.1016/0022-3093(84)90137-6.

Pasek M, Block K. 2009. “Lightning-induced reduction of phosphorus oxidation state”. *Nature geoscience*. Vol-2 , 553-556.

Pasek M, Block K, Pasek V. 2012. “ Fulgurite morphology: a classification scheme and clues to formation”. *Contributions to Minerology and Petrology*.164:477-492.

Putz H. 2016. “Match! Phase Identification from Powder Diffraction” (Version 2.4.7 Build 529),Crystal Impact, Bonn (Germany).

Rakov VA, Uman MA. 2003. “Lightning: Physics and effects”. Cambridge University Press, Cambridge.

Sanc, I., Polytechna, Foreign Trade Corporation, Panska, Czechoslovakia. ICDD Grant-in-Aid(1990).

Schwermann U. 1971. "Transformation of Hematite to Goethite in Soils", *Nature*, **232** 624–625.

Spray JG. 1995. "Pseudotachylyte controversy: fact or friction". *Geology* 23:1119-1122.

Tauler R. Lacorta S. Barcelo D. 1996. " Application of multivariate self-modeling curve resolution to the quantitation of trace levels of organophosphorus pesticides in natural waters from interlaboratory studies". *Journal of Chromatography A* 730(1-2): 177- 183.

The Unscrambler (Version 5.5). 1995. CAMO A/S, Trondheim, Norway.

Uyanık A. 2012. "Analitik kimyacılar için istatistik ve kemometri". Pegem Akademi Yayıncılık.

Williams E, Chan T, Boccippio D. 2004. "Islands as miniature continents: another look at the land-ocean lightning contrast". *J Geophys Res* 109:D16206 1-5.

Wolff, P. M. de and Visser J. W. 1964. "Absolute Intensities", Rep. 641.109, Technische Physische Dienst, Delft.

Young R.A., Mackie P. E. and von Dreele R. B. 1977. "Application of the Pattern-fitting Structure-Refinement Method of X-Ray Powder Diffractometer Patterns", *J. Appl. Crystallogr.*, **10**, 262–26.