

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bursa Meteoritinin Termoluminesans Özelliklerinin
Belirlenmesi**

Murat KURTARAN

Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı

Kasım, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

**Bursa Meteoritinin Termolüminesans Özelliklerinin
Belirlenmesi**

Murat KURTARAN

Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı

Bu Yüksek Lisans Tezi 24/11/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Aysun AKYÜZ (Danışman)
: Prof. Dr. Hüseyin TOKTAMIŞ
: Doç. Dr. Sibel AKÇA ÖZALP

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.
Tez No:**

**Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü**

**Bu çalışma Ç.Ü. Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2024-17026**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VII
1. GİRİŞ	1
1.1. Meteoritlerin Oluşum Senaryosu	3
1.1.1. Kondritlerin Oluşumu	3
1.1.2. Kondritlerin Dokusal Özellikleri	4
1.1.3. Kondritlerde Termal Metamorfizma	5
1.1.4. Kondritlerde Şok Etkisi (Şok Metamorfizması)	6
1.2. Meteoritlerin Toplanması ve Sınıflandırılması.....	7
1.3. Sıradan Kondritlerin Özellikleri Ve Bursa Meteoriti.....	10
1.4. Bursa Meteoritinin Dokusal, Metamorfik Ve Şok Özellikleri Açısından Değerlendirilmesi	10
1.4.1. Dokusal Özellikler.....	10
1.4.2. Mineralojik Özellikler	10
1.4.3. Şok Özellikleri.....	11
1.5. Termolüminesansın Doğası ve Matematiksel Anlamı	11
1.5.1. Randall ve Wilkins Modeli (Birinci Mertebe Kinetik).....	12
1.5.2. Garlick ve Gibson Modeli (İkinci Mertebe Kinetik).....	12
1.5.3. Chen'in Genel Mertebe Kinetik Modeli	13
1.6. Meteoritler ve Termolüminesans	13
1.7. Meteoritlerde TL Yönteminin Kullanım Alanları.....	15
1.7.1. Karasal Yaş (Terrestrial Age) Tayini.....	15
1.7.2. Günberi (Perihelion) Uzaklığı ve Yörünge Bilgisi	15
1.7.3. Şok Derecesinin (S1-S6) Belirlenmesi	15
1.7.4. Metamorfizma Derecesi ve Mineralojik Dönüşümler	16
1.7.5. Meteorit Parçalarının Eşleştirilmesi	16
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	17
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Materyal ve Örneğin Hazırlanması	25
3.2. Deneysel Aşamalar ve Analitik Yöntemler.....	25
3.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) Sistemi.....	25
3.2.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Sistemi.....	26

3.2.3. TL Ölçüm Sistemi	28
3.3. Deneysel Uygulamalar	30
3.3.1. Tavlama (Annealing) Testi	31
3.3.2. Filtre Testi.....	31
3.3.3. Doz–Yanıt Deneyi	31
3.3.4. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyi.....	32
3.3.5. Farklı Isıtma Hızları Deneyi	32
3.3.6. Isısal Temizleme ve Başlangıç Artış (Initial Rise) Yöntemi	33
3.3.7. Bilgisayarlı Işıma Eğrisi Ayrıştırma Yöntemi	35
3.3.8. Sönüm (Fading) Deneyi.....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM-EDS) Analizi	37
4.1.1. Genel Morfoloji	37
4.1.2. Kimyasal İçerik.....	38
4.2. XRD Ölçümleri.....	40
4.3. Termoluminesans Karakterizasyonuna İlişkin Bulgular.....	42
4.3.1. Tavlama (Annealing) Testi	42
4.3.2. Filtre Testi.....	43
4.3.3. Doz Yanıt Deneyine İlişkin Bulgular	44
4.3.4. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyine İlişkin Bulgular	47
4.3.5. Farklı Isıtma Hızları Deneyine İlişkin Bulgular	49
4.3.6. Isısal Temizleme ve Başlangıç Artış Yöntemi	50
4.3.7. Bilgisayarlı Işıma Eğrisi Ayrıştırma Yöntemi	54
4.3.8. Sönüm (Fading) Deneyine İlişkin Bulgular.....	57
4.4. Bursa Meteorinin Doğal TL Analizi.....	60
4.4.1. Eşdeğer Doz Grafiğinin Oluşturulması	62
4.4.2. Bursa Meteorinin Günberi Uzaklığının Tahmini.....	64
4.4.3. Kozmik Radyasyon Yaşı Tahmini.....	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKÇA.....	71
ÖZGEÇMİŞ	77

Bursa Meteoritinin Termolüminesans Özelliklerinin Belirlenmesi

Murat KURTARAN

Danışman: Prof. Dr. Aysun AKYÜZ
II. Danışman: Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU

Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı

ÖZ

Bu tez çalışmasında, Bursa meteoritinin yapısal ve karakteristik Termoluminesans (TL) özellikleri incelenmiş ve meteorite ait TL kinetik parametreler belirlenmiştir. Bu kapsamda yapay TL (YTL) ile meteoritin dozimetrik potansiyeli araştırılmış, doğal TL (DTL) analizleri ile günberi uzaklığı ve kozmik radyasyon maruziyet yaşı (KRY) tahmin edilmiştir. SEM-EDS analizleri, meteoritin morfolojik özellikleri ve kimyasal element içeriklerinin sıradan kondritlerle uyumlu olduğunu göstermiştir. XRD sonuçları, baskın mineral fazlarının silikatlı minerallerden oluştuğunu doğrulamış; TL sinyalinin de bu silikat minerallerinin kusurlu yapılarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. TL ölçümleri, 500 °C'de 15 dakika tavllanmış numune üzerinde 565 nm filtre kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doz-cevap deneyi, 0,5–50 Gy aralığında uygulanan dozlarda TL şiddetinin doğrusal olarak arttığını ortaya koymuştur. Yeniden kullanılabilirlik testlerinde 20 Gy için yaklaşık %3,5'lik azalma, 50 Gy için ise %5'lik artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar, Bursa meteoritinin tekrarlı kullanımlarda kararlı bir davranış sergilediğini göstermiştir. Artan ısıtma hızlarında gerçekleştirilen deneyler (1–5 °C/s), tepe maksimum sıcaklıklarının yükselmesine, tepe şiddetlerinin azalmasına, yarı tepe genişliklerinin genişlemesine ve ışıma eğrisi altındaki toplam alanlarının azalmasına neden olmuştur. TL sinyaline katkı sağlayan tuzakların aktivasyon enerjileri başlangıç artış yöntemiyle hesaplanmış ve 0,90–1,70 eV aralığında dokuz bireysel tuzaktan oluştuğu belirlenmiştir. Bilgisayarlı ışıma eğrisi ayrıştırma yöntemiyle bu dokuz tuzakın kinetik parametreleri değerlendirilmiştir. Solma deneyinde, bir haftalık bekleme süresi sonunda %30,83'lük solma belirlenmiş; teorik solma analizinde ise solmanın büyük ölçüde ilk üç sıg tuzaktan kaynaklandığı ve bu nedenle malzemenin kısa süreli dozimetrik uygulamalarda kullanıma uygun olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, DTL ışıma eğrisinin analizinden meteoritin günberi uzaklığı yaklaşık 1,007 AB ve KRY alt limiti 11.000 yıl olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Bursa meteoritinin TL özelliklerinin yanısıra astrofiziksel geçmişi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Meteorit, termolüminesans, dozimetri

Determination of Thermoluminescence Properties of The Bursa Meteorite

Murat KURTARAN

Advisor: Prof. Dr. Aysun AKYÜZ

II. Advisor: Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU

Department of Astronomy and Astrophysics

ABSTRACT

In this thesis, the structural and characteristic Thermoluminescence (TL) properties of the Bursa meteorite were examined, and the TL kinetic parameters of the meteorite were determined. In this context, the dosimetric potential of the meteorite was investigated using induced TL (ITL), while natural TL (NTL) analyses were used to estimate the perihelion distance and cosmic radiation exposure age (CRE). SEM-EDS analyses showed that the morphological features and chemical elemental compositions of the meteorite are consistent with ordinary chondrites. XRD results confirmed that the dominant mineral phases consist of silicate minerals, and the TL signal was evaluated to originate from the defect structures of these silicate minerals. TL measurements were performed on a sample annealed at 500 °C for 15 minutes using a 565 nm filter combination. The dose-response experiment revealed that TL intensity increased linearly for doses applied in the 0.5–50 Gy range. In reusability tests, a decrease of approximately 3.5% was observed for 20 Gy, while a 5% increase was recorded for 50 Gy. These results demonstrate that the Bursa meteorite exhibits stable behavior under repeated use. Experiments conducted at increasing heating rates (1–5 °C/s) resulted in higher peak maximum temperatures, lower peak intensities, broader full widths at half maximum (FWHM), and reduced total areas under the glow curves. The activation energies of the traps contributing to the TL signal were calculated using the initial rise method and determined to arise from nine individual traps in the 0.90–1.70 eV range. The kinetic parameters of these nine traps were evaluated through computerized glow-curve deconvolution. In the fading experiment, a fading level of 30.83% was observed after a one-week waiting period; theoretical fading analysis showed that the fading predominantly originates from the first three shallow traps, indicating that the material is suitable for short-term dosimetric applications. Furthermore, analysis of the NTL glow curve yielded a perihelion distance of approximately 1.007 AU and a lower limit of 11,000 years for the CRE age of the meteorite. These results provide important insights into both the TL properties and the astrophysical history of the Bursa meteorite.

Keywords: Meteorite, thermoluminescence, dosimetry

TEŞEKKÜR

Bu Yüksek Lisans çalışmamın yürütülmesi sürecinde bilimsel rehberliği, yönlendirmeleri ve desteğiyle büyük katkı sağlayan Prof. Dr. Aysun AKYÜZ'e ve Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU' ya en içten şükranlarımı sunarım. Laboratuvar çalışmalarının analizi ve değerlendirilmesindeki değerli katkılarından dolayı Doç. Dr. Sibel AKÇA ÖZALP'e ve konu ile ilgili değerli görüşleri ile çalışmalarımıza katkı sağlayan Prof. Dr. Osman PARLAK' a teşekkür ederim.

Deneysel süreçlerin gerçekleştirilmesinde desteklerini esirgemeyen Dr. Öğrencisi Muammer Sonsuz ve Aya Barad'a minnettarım. Çalışmada kullanılan Bursa meteorit örneğini temin ederek araştırmamıza katkı sağlayan sayın hocamız Prof. Dr. Mehmet EMİN ÖZEL'e teşekkür ederim.

Termoluminesans /Optik Uyarmalı Lüminesans Tarihlendirme Laboratuvarı'nın kullanımını sağlayan Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ne teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca gösterdikleri anlayış ve destek için eşim Gülden KURTARAN'a ve çocuklarım Murathan ve Zeynep KURTARAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kondritlerin dokusal özellikleri	5
Çizelge 1.2. Kondritlerin metamorfizma derecelerine göre sınıflandırılması.....	6
Çizelge 1.3. Şok Evrelerinin (S1–S6) basınç aralıklarına göre sınıflandırılması ve Bursa meteoriti için karakteristik özellikleri.....	7
Çizelge 4.1. Bursa meteoritinin Şekil 4.3'teki işaretli bölgede kimyasal element bileşenleri	39
Çizelge 4.2. Bursa meteoritinin Şekil 4.4'teki işaretli bölgede kimyasal element bileşenleri	40
Çizelge 4.3. T_D sıcaklıklarına karşı belirlenen aktivasyon enerjileri.....	54
Çizelge 4.4. Bursa meteoriti örneğinin tuzak parametreleri.....	55
Çizelge 4.5. 25 °C'de 7 günlük bekleme süresine göre Garlick–Gibson birinci merteye kinetik eşitliği ile hesaplanan teorik TL solma (Fading) değerleri	57
Çizelge 4.6. DTL ışınma eğrisini oluşturan piklerin aktivasyon enerjileri	61
Çizelge 4.7. Referans meteoritlerin günberi uzaklıkları ve 200 °C'de ED değerleri	64
Çizelge 4.8. Referans meteoritler kullanılarak belirlenen Bursa meteoritinin tahmini günberi uzaklıkları	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Allende meteoritinin cilalı kesit yüzeyi (Takeshima ve ark., 2023).....	4
Şekil 1.2. Kondrit meteoritlerde gözlenen başlıca kondrül dokusal tipleri (Antonio Ciccolella, 2020).....	5
Şekil 1.3. Meteoritlerin sınıflandırılması (Weisberg ve ark., 2006; Tobias1984, 2012)	9
Şekil 1.4. Termoluminesans olgusunun enerji bant modeli: (a) Işınlama, (b) Tuzaklanma, (c) Isıtma ve (d) Işıma evreleri (Sears ve ark., 2013).....	12
Şekil 1.5. Meteoritlerde doğal TL seviyesi,. (Sears ve ark., 2013).....	14
Şekil 3.1. Bursa L6 meteorit örneği.....	25
Şekil 3.2. ÇÜMERLAB' da Quanta 650 Field Emission SEM cihazı.....	26
Şekil 3.3. ÇÜMERLAB' da PANalytical marka EMPYREAN XRD model XRD cihazı.....	27
Şekil 3.4. Öğütme işleminde kullanılan agat havan.....	28
Şekil 3.5. Precisa XB 220 A marka terazi.....	28
Şekil 3.6. Isıl işlem için kullanılan Protherm marka fırın.....	29
Şekil 3.7. Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu cihazı	30
Şekil 3.8. Lexsyg Smart TL/OSL okuyucunun temel bölümleri (Richter ve ark., 2015)	30
Şekil 4.1. Bursa meteoritinin 400 µm ölçekte SEM-EDS görüntüsü	37
Şekil 4.2. Bursa meteoritinin 5µm ölçekte SEM-EDS görüntüsü	38
Şekil 4.3. Bursa meteorit numunesinin silikatça zengin bir bölgesi (EDS Spot 1).....	39
Şekil 4.4. Bursa meteorit numunesinin metal bakımından zengin bir bölgesi (EDS Spot 2)	40
Şekil 4.5. Bursa L6 meteorit örneğinin (a) ve baskın mineral fazlarına ait (b) referansların XRD desenleri	41
Şekil 4.6. Maksimum TL ışına şiddeti için uygun tavlama sıcaklığının (a) ve süresinin (b) optimizasyonu.....	43
Şekil 4.7. Bursa meteoriti örneklerinin farklı filtre kombinasyonları kullanılarak elde edilen TL ışına eğrileri.....	44
Şekil 4.8. Bursa Meteorit örneğine farklı radyasyon dozlarının uygulanması sonucu oluşan TL ışına eğrileri.....	45
Şekil 4.9. Uygulanan doza karşı Işıma eğrilerinin altında kalan alanların (a) ve maksimum TL ışına şiddetlerinin (b) doğrusallık ilişkisi (Eksenler logaritmik ölçektedir).	45
Şekil 4.10. Farklı dozlarda TL ışına eğrilerinin tepe maksimum T_m sıcaklıkları.....	47
Şekil 4.11. Her döngüde (20 Gy doz uygulandığında) oluşan ışına eğrileri (a) ve normalize edilmiş TL şiddeti değişimi (b)	48
Şekil 4.12. Her döngüde (50 Gy doz uygulandığında) oluşan ışına eğrileri (a) ve normalize edilmiş TL şiddeti değişimi (b)	48

Şekil 4.13. Farklı Isıtma Hızlarında 20 Gy (a) ve 50 Gy (b) beta dozu verilen örneğin ışıma eğrileri ve bu eğrilerden sırasıyla elde edilen toplam alan, yarı tepe genişliği (FWHM), maksimum TL şiddeti ile tepe maksimum sıcaklığı (T_m) değerleri (c) (d)...	49
Şekil 4.14. Bursa meteorit örneğinin 5°C'lik artışlarla 50°C - 300°C aralığında ön ısıtma sıcaklıklarına ait ışıma eğrileri	51
Şekil 4.15. T_D sıcaklıklarına karşı oluşan ışıma eğrilerinin T_{mak} sıcaklıkları	51
Şekil 4.16. 150 °C T_D sıcaklığında oluşan ışıma eğrisinin başlangıç artış yöntemi ile belirlenenen aktivasyon enerjisi (Grafikteki eğim değeri aktivasyon enerjisini verir)..	52
Şekil 4.17. Başlangıç Artış Yöntemiyle elde edilen hesaplanmış aktivasyon enerjileri	53
Şekil 4.18. Bursa meteoritinin ışıma eğrisinin CGCD yöntemiyle ayrıştırılması	55
Şekil 4.19. Bursa meteoritine ait 1 dk, 1 saat ve 1 hafta bekleme süreleri sonrası elde edilen TL ışıma eğrilerinin karşılaştırması.....	58
Şekil 4.20. Bursa meteorit örneğinin zamana bağlı TL ışıma şiddetlerinin değişimi	59
Şekil 4.21. Bursa L6 meteoriti örneğinin DTL ve 700 Gy uygulandığında oluşan YTL ışıma eğrileri.....	60
Şekil 4.22. DTL ışıma eğrisinin TGCD paketi ile ayrıştırılması.....	61
Şekil 4.23. Bursa L6 meteoritine laboratuvar ortamında uygulanan 700 Gy doz sonucu oluşan ED grafiği	62
Şekil 4.24. Karasal yaşları bilinen 44 sıradan kondritin 200 °C (a) ve 300 °C (b) sıcaklıklarında elde edilen ED seviyeleri (Melcher,1980). M=Malakal, F=Fayalit meteoritlerini temsil eder	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Å	: Angström
b	: Kinetik derece
β	: Isıtma hızı (°C/s)
CGCD	: Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma
d	: Kristal düzlemler arası mesafe
E	: Aktivasyon enerjisi
EDS	: Enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi
eV	: Elektron volt
Gy	: Gray
IR	: Başlangıç artış yöntemi
k	: Boltzmann sabiti
krad	: Kilorad (1 krad = 10 Gy)
λ	: X-ışını dalga boyu
μ	: Mikro
n	: Kırınım mertebesi
PMT	: Fotoçoğaltıcı tüp
Q_1 / Q_2	: Doğal / 300 °C sonrası TL oranları
s	: Frekans faktörü
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
T	: Mutlak sıcaklık
T_m	: TL eğrisinin tepe sıcaklığı
TL	: Termolüminesans
TLD	: Termolüminesans dozimetre
UV	: Ultraviyole ışık
XRD	: X-ışını kırınımı
τ	: Ortalama ömür
\dot{D}	: Kozmik radyasyon doz hızı (Gy/yıl)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$: Beta radyasyon kaynağı
AB	: Astronomik birim
KRY	: Kozmik Radyasyon Yaşı
DTL	: Doğal Termolüminesans
YTL	: Yapay Termolüminesans
ED	: Eşdeğer Doz

1. GİRİŞ

Meteoritler, Güneş'in kökeni ve evrimi hakkında önemli bilgiler barındıran, kaya ve metal içerikli gök cisimleridir. Bu cisimler, Güneş Sistemi'nin oluşumundan arta kalan enkazın bir bölümünü oluştururlar. Kimyasal içerikleri ve mineralojik yapıları, Güneş Sistemi'nin erken dönemlerine ait veriler sunduğundan adeta birer zaman kapsülü olarak nitelendirilebilirler (Scott ve Krot, 2014). Uzun süreli kozmik yolculukları boyunca çarpışmalardan kaynaklanan şok etkilerine ve farklı ısınma süreçlerine maruz kalarak metamorfizmaya uğramaları nedeniyle, kronolojik saat işlevi gören kayıt cihazları olarak da değerlendirilebilirler.

Meteorlar, genellikle kuyruklu yıldızlar veya asteroitler gibi daha büyük gök cisimlerinden kopan küçük meteoroid parçalarının atmosfere girmesiyle oluşur. Bu cisimler sürtünme nedeniyle aşırı ısınır ve yanarlar; bu olaya halk arasında "göktaşı" denir. Eğer bu parçalar yanma sürecinden sonra yeryüzüne ulaşırsa, bunlara "meteorit" adı verilir. Her yıl önemli miktarda Dünya dışı malzeme atmosferimize girmekte, ancak bunların yalnızca az bir kısmı yeryüzüne ulaşabilmektedir. Bu parçaların önemli bir bölümü, karasal örtünün az olduğu Antarktika ve çöl bölgelerinde uzun süre orijinal hâlini koruyabilir (Harvey, 2003).

Genel olarak meteoroidler, ilkel ve başkalaşmış meteoroidler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. İlkel meteoroidler, erken evre Güneş bulutsusunun oluşum mekanizmalarına dair önemli ipuçları taşırlar. İlkel olmaları, bu meteoroidlerin şok etkisi ya da metamorfizma geçmişi yaşamış olsalar bile önemli ölçüde erime veya büyük çaplı farklılaşma geçirmemiş oldukları anlamına gelir. Bu sayede kimyasal kompozisyonlarını ve mineralojik özelliklerini büyük ölçüde korumuşlardır.

Öte yandan başkalaşmış meteoroidler, yeterli kütleyle sahip nesnelerin iç kısımlarında radyoaktif elementlerin bozunmasıyla oluşan ısı nedeniyle tamamen erimeleri ve farklılaşmaları sonucunda oluşurlar. Bu süreçte dış kısımdaki daha yoğun elementler (çoğunlukla demir ve nikel) merkeze çökerken, daha hafif olan silikat bileşenleri manto ve kabuk bölgelerini oluşturur. Böylece cismin farklı katmanlarında, kimyasal kompozisyonları değişmiş ve ilkel özelliklerini yitirmiş bölgeler meydana gelir. Bu tür nesnelerin parçalanarak savrulmasıyla oluşan meteoroidler genellikle büyük asteroitlerin ve gezegenlerin parçalarıdır. Dolayısıyla, gezegen oluşumu ve jeolojisi hakkında değerli bilgiler taşırlar.

Asteroitler, çoğunlukla Mars ile Jüpiter arasında, Güneş'ten uzaklığı 2.1–3.3 AB olan ayrı bir kuşakta bulunurlar. Yaklaşık 1 m'den 1000 km'ye kadar değişen çaplara sahip milyonlarca nesneden oluşan bu bölge "Asteroit Kuşağı" olarak adlandırılır. Dünya'ya düşen meteoritlerin büyük çoğunluğunun bu kuşaktaki asteroitlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, Dünya'nın yörüngesine yakın bölgelerde dolanan Dünya Yakını Nesnelere (NEO) de mevcuttur. NASA, bu tür nesnelerin oluşturabileceği olası tehditleri izlemek amacıyla özel bir gözlem programı yürütmektedir (NASA, 2025). Ayrıca, Jüpiter'in çekim etkisiyle yörüngesinin iki bölgesinde toplanan Truva asteroitleri de bilinmektedir.

Asteroit Kuşağı'ndaki nesnelere, silikat ve metal içeriklerine göre üç gruba ayrılmıştır. Güneş'e daha yakın yörüngelerde silikat oranı yüksek taşlı nesnelere; kuşağın orta kısımlarında taşlı-demir karışımı, Güneş'e en uzak bölgelerde ise daha metalik yapıda nesnelere yoğunlaşmıştır. Dünya'ya düşen meteoritlerin mineralojik ve kimyasal bileşimleri ile bu kuşağtaki nesnelere arasındaki benzerlikler oldukça önemlidir (DeMeo ve Carry, 2014).

Güneş etrafında eliptik yörüngelerde dolanan bu meteoroidlerin yörüngeleri, özellikle Jüpiter gibi büyük gezegenlerin kütle çekim etkisiyle değişebilir. Ayrıca, Güneş ışınlarının oluşturduğu ışınım basıncı (Yarkovski etkisi) ve termal değişimler de bu yörüngelerde sapmalara neden olabilir. Bu değişimler, meteoroidlerin Dünya, Ay ve Mars gibi gök cisimlerine düşmesine yol açabilir (Bottke ve Nesvorný, 2015). Çapları yaklaşık 1 mm ile 1 m arasında değişen meteoroidler, galaktik kozmik ışınlar ve Güneş kaynaklı yüksek enerjili parçacıklara karşı daha savunmasızdır. Bu parçacıklar, meteoritlerin mineral yapısı, şekli ve boyutuna bağlı olarak farklı etkiler yaratır.

Meteoroidler, ani çarpışmalar sonucu şok etkisiyle yüksek sıcaklık artışlarına maruz kalabildikleri gibi, Güneş etrafındaki eliptik yörüngelerinde yer aldıkları konuma göre sıcaklıklarında da belirgin değişimler yaşarlar. Dünya'nın çekim alanı etkisiyle atmosfere girdiklerinde 11.2–72 km/s hızlara ulaşabilirler. Atmosferle sürtünme sonucu yüzey sıcaklıkları 1000 °C'yi aşabilir. Bu sırada kinetik enerji ısıya dönüşür ve yüzeyde hızlı erime ile buharlaşma (ablasyon) başlar. Bu ısı transferi oldukça sınırlıdır; yüzeyin yaklaşık 5 mm altına kadar etkili olur. Cismin ön yüzeyi en fazla ısınırken, arka taraf daha az ısıya maruz kalır. Erimiş ve buharlaşan katmanın hemen altında camsı, amorf bir yanık tabaka oluşur; bu tabaka "füzyon kabuğu" olarak adlandırılır. Derinlik profili analizleri sayesinde meteoroidin atmosfere girişten önceki şekli ve büyüklüğü hakkında çıkarımlar yapılabilir (Goldstein ve Grande, 2009).

Meteoroidler, atmosferde buharlaşırken oluşan gazlar ile atmosferik gazların etkileşimi sonucunda ışıklı bir iz oluştururlar. Bu iz, mineral içeriklerine göre farklı renklerde gözlemlenebilir. Atmosferden geçiş sırasında "meteor" olarak adlandırılırlar. Yüksek parlaklığa sahip olanlara "ateş topu" veya "bolid" denir. Giriş açıları, hızları ve yönleri geldikleri yörünge hakkında önemli ipuçları sunar. Fotoğrafik görüntüleme, video kaydı ve radar gözlemleriyle bu nesnelere yörüngeleri belirlenebilir. Bu bilgiler, meteor yağmurlarının kaynağının tespit edilmesi gibi çalışmalara da olanak sağlar (Weisberg ve ark., 2006).

Meteorlar çoğu zaman yere ulaşmadan atmosferde patlayıp parçalanırlar. Bu nedenle aynı düşüşe ait parçaların tespiti, meteorit koleksiyonlarının doğru şekilde kataloglanması ve düşüş olayının tam olarak anlaşılması açısından büyük önem taşır. Yeryüzüne ulaşmayı başaranlara "meteorit" denir. Düşüşü gözlemlenen ve ardından bulunan meteoritler "düşüş", yerde sonradan bulunanlar ise "buluntu" adı verilir (Agee ve ark., 2015).

Meteoritler, yeryüzü kayalarından görünüş olarak çok farklı olmadıkları için ayırt edilmeleri zordur. Ancak bazı belirgin özelliklerle tanımlanabilirler. Demir içeriği nedeniyle genellikle daha yoğunlardır; yüzeylerinde camsı bir yanma kabuğu bulunabilir. Yüzeylerinde parmak izini andıran

çukurluklar oluşabilir. İnce kesitlerinde “kondrül” adı verilen küçük küresel tanecikler görülebilir. Ayrıca manyetik özellikleri nedeniyle mıknatıslara karşı duyarlıdırlar (Weisberg ve ark., 2006).

Ancak çok eski tarihlerde düşmüş meteoritleri fark etmek daha zordur. Bu meteoritler zamanla oksijenle etkileşime girerek oksitlenebilir, suyla temas ederek kimyasal yapıları değişebilir, rüzgârlarla yer değiştirebilir ya da parçalanabilirler (Bland ve Berry, 2003). Antarktika, bitki örtüsünün sınırlı olması ve geniş buzullarıyla kaplı yüzeyi sayesinde meteoritlerin yoğun bir şekilde toplandığı eşsiz bir bölgedir. 1960’lardan itibaren bu bölgeye düzenlenen bilimsel seferler günümüzde de devam etmektedir.

Toplanan meteoritler üzerinde çeşitli analitik teknikler uygulanmakta olup, bunlardan biranesi de TL yöntemidir. 1980–2000 yılları arasında toplanan meteoritlerin doğal TL ölçümleri sistematik olarak kaydedilerek kozmik radyasyon maruziyetleri ve yaş tahminleri için temel veri kaynağı oluşturmuştur. Bu yöntemin hızlı sonuç vermesi ve az miktarda numune gerektirmesi, onu meteorit araştırmalarında vazgeçilmez kılmaktadır. TL, malzemede birikmiş enerjinin ısıtma yoluyla ışık yayımı olarak açığa çıktığı bir süreçtir ve karasal yaş tahmini, günberi uzaklıklarının belirlenmesi, şok etkileri, metamorfizma süreçleri ile mineral karakterizasyonu gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ise TL, radyasyon dozimetri cihazlarına entegre edilerek pratik uygulamalara dönüştürülmüştür. Bu bağlamda çalışmamız, Bursa L6 meteoritinin TL özelliklerini belirlemeyi, dozimetrik potansiyelini değerlendirmeyi ve ayrıca günberi uzaklığı ile KRY’nin belirlenmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1. Meteoritlerin Oluşum Senaryosu

Göktaşları, Güneş Sistemi’nin ilk dönem maddelerinden oluşan ve gezegenlerin oluşum sürecine temel hazırlayan kozmik kaya parçalarıdır. Güneş bulutsusunun yaklaşık 4,56 milyar yıl önce yoğunlaşmasıyla birlikte, metal, silikat ve buzdan oluşan mikroskobik toz tanecikleri birleşmeye başlamıştır. Bu tanecikler, elektrostatik çekim kuvvetleri ve düşük enerjili çarpışmalar sonucunda gezegen öncülü cisimler hâline gelmiştir (Amelin, 2025).

Bu gezegen öncülü cisimler, içlerinde bulunan radyoaktif izotopların (özellikle ²⁶Al ve ⁶⁰Fe) bozunması sonucu ısınarak farklı derecelerde ısıl başkalaşım (erime ve farklılaşma) süreçlerine uğramışlardır. Bazıları hiç erimeden ilk hâlini korumuş (kondritler), bazıları ise kısmen veya tamamen eriyerek akondrit, demirli ya da taş-demirli göktaşlarını oluşturmuştur (Amelin, 2025).

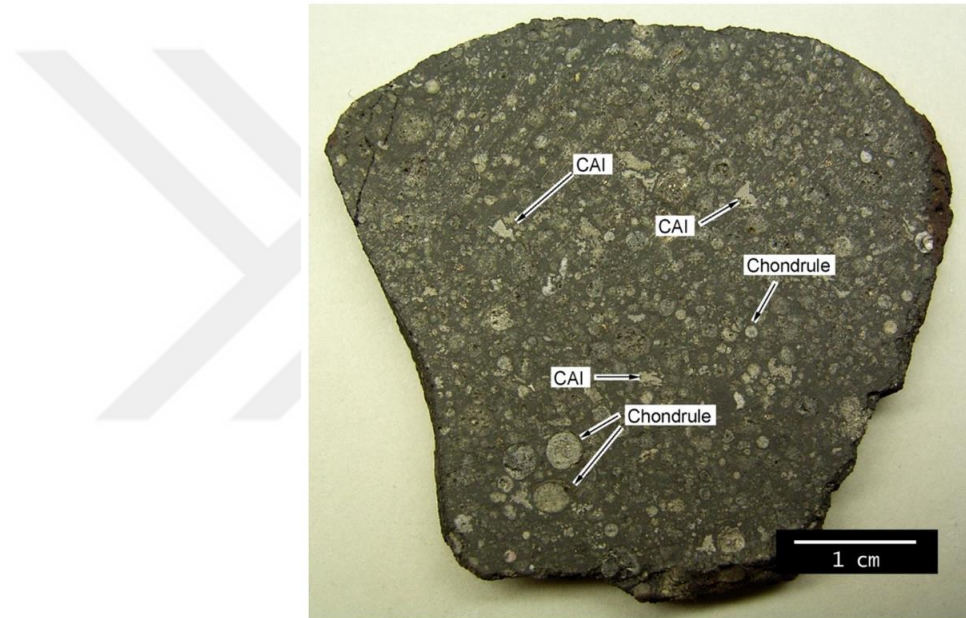
1.1.1. Kondritlerin Oluşumu

Kondritler, Güneş Sistemi’nin en eski ve en az değişime uğramış katı maddeleridir. İlkel Güneş bulutsusundaki gaz ve toz karışımının yoğunlaşması sırasında, mikrometre boyutundaki toz parçacıkları ani ısınma ve hızlı soğuma olaylarıyla kısmen eriyerek, kondrül adı verilen milimetrik damlalar hâline gelmiştir (Scott ve Krot, 2014). Bu kondrüller çoğunlukla Mg-Fe silikatları (olivin, piroksen) içerir ve kısmen ergimiş kristallerden oluşur. Kondrüller, daha sonra metalik Fe–Ni taneleri

ve ince taneli tozlarla birleşerek matris kısmını oluşturmuştur. Bu bileşenlerin birleşimiyle, erken dönem asteroid gövdelerinde katılmış kondrit meteoritler meydana gelmiştir.

Kondritlerde ayrıca CAI (Calcium–Aluminum-rich Inclusion) ve AOA (Amoeboid Olivine Aggregate) adı verilen erken oluşumlu bileşenler de bulunur: CAI'lar, Güneş bulutsusundaki ilk yoğunlaşan yüksek sıcaklık mineralleridir (~1500–1800 °C). AOA'lar, olivin ve piroksen karışımlarından oluşmuş düzensiz yapıya sahip yığılımlardır. Allende meteoritinin yüzey kesiti bu oluşumları gösteren tipik bir örnektir (Şekil 1.1).

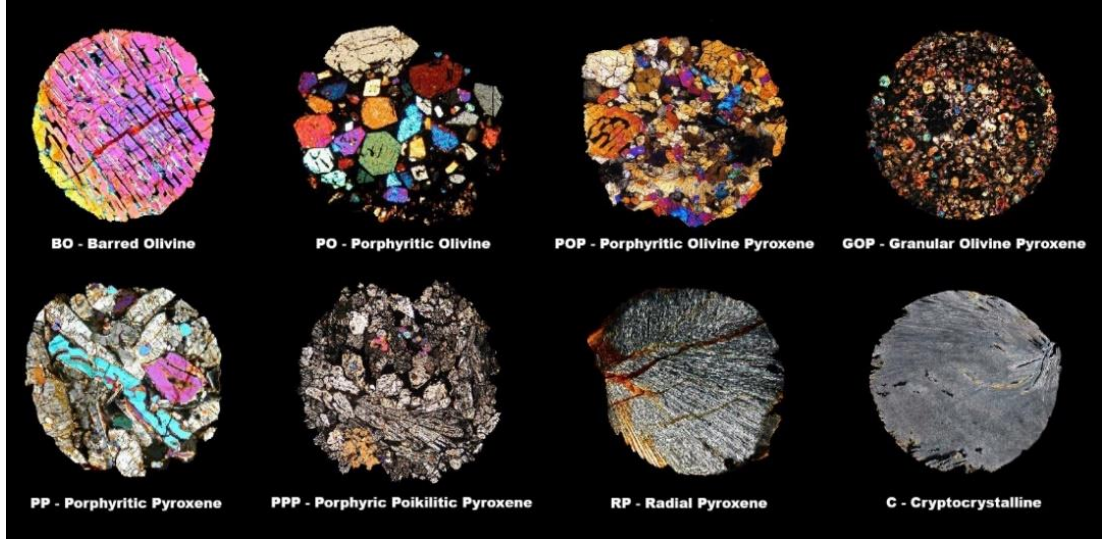
Bu bileşenler, kondritlerin Güneş bulutsusunun erken kimyasal koşullarını koruduğunu gösterir. Dolayısıyla kondritler, hem kozmik kimyasal hem de gezegenimsi oluşum süreçlerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadırlar (Takeshima ve ark., 2023).



Şekil 1.1. Allende meteoritinin cilalı kesit yüzeyi (Takeshima ve ark., 2023)

1.1.2. Kondritlerin Dokusal Özellikleri

Kondritler, farklı ısı ve kimyasal süreçlerin etkisiyle çeşitli dokusal tipler geliştirir (Şekil 1.2). Bu dokular, kondrüllerin kristallenme geçmişini, soğuma hızını ve oluşum ortamını yansıtır. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda suyla etkileşim sonucu minerallerde sulu alterasyon (aqueous alteration) gözlemlenebilir. Kondritlerin dokusal özellikleri çizelge 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Kondrit meteoritlerde gözlenen başlıca kondrül dokusal tipleri (Antonio Ciccoella, 2020)

Çizelge 1.1. Kondritlerin dokusal özellikleri

Dokusal Tip	Kısaltma	Soğuma	Ana Özellik
Barred Olivine	BO	Hızlı	Paralel olivin çubukları
Porfirik Olivin	PO	Orta-Yavaş	Büyük olivin kristalleri
Porfirik Olivin– Piroksen	POP	Orta-Yavaş	Büyük olivin ve piroksen karışımı
Granüler Olivin– Piroksen	GOP	Yavaş	Eşit boyutlu, taneli olivin/piroksen
Porfirik Piroksen	PP	Orta-Yavaş	Büyük piroksen kristalleri
Porfirik Poikilitik Piroksen	PPP	Belirli	Piroksen içinde küçük olivinler
Radyal Piroksen	RP	Hızlı	Merkezden yayılan piroksen lamelleri
Kriptokristalin	C	Çok Hızlı	Çok küçük / amorf kristaller

1.1.3. Kondritlerde Termal Metamorfizma

Kondritlerin ana gövdelerinde radyoaktif bozunmalar sonucu oluşan içsel ısı etkisiyle termal metamorfizma meydana gelir. Bu süreç, minerallerin yeniden kristalleşmesine, kondrül–matris bileşenlerinin kimyasal dengeye ulaşmasına ve uçucu bileşenlerin kaybolmasına neden olur. Metamorfik değişim, petrolojik tip 1–6 arasında sınıflandırılır ve (Dodd ve ark., 1967; Huss ve ark., 1981). Tip 3’ten Tip 6’ya doğru metamorfizma derecesi artar. Tip 4–6 kondritler “dengelenmiş (equilibrated)”, Tip 3 ise “dengelenmemiş (unequilibrated)” kondritlerdir. Kondritlerin metamorfizma derecelerine göre sınıflandırılması Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Kondritlerin metamorfizma derecelerine göre sınıflandırılması

Petrolojik Tip	Metamorfizma Derecesi	Özellikler
Tip 1	Çok düşük (sulu alterasyon baskın)	Tamamen hidratlanmış, kondrüller yok veya çok az; matris kilce ve karbonatça zengin
Tip 2	Düşük (sulu alterasyon baskın)	Kısmen hidratlanmış, kondrüller korunmuş ama aşınmış; matris suyla etkileşmiştir
Tip 3	Hafif termal metamorfizma	İlkel yapı, kondrüller iyi korunmuş, uçucu maddece zengin
Tip 4	Orta derecede termal metamorfizma	Kondrüller kristalleşmiş, matris sertleşmiş, uçucu maddeler azalmış
Tip 5	Yüksek derecede termal metamorfizma	Kondrül sınırları belirsiz, kristaller büyümüş, matris tamamen kristalleşmiş
Tip 6	Çok yüksek termal metamorfizma	Kondrül sınırları kaybolmuş, homojen kristal yapı, yoğun metamorfizma

Petrolojik tip yükseldikçe (Tip 3'ten Tip 6'ya doğru), artan termal metamorfizma, mevcut TL sinyalini termal boşalma yoluyla azaltır veya tamamen sıfırlar. Ancak, bu yoğun ısınma ve yeniden kristalleşme süreci, kristal yapıyı düzenleyerek malzemenin radyasyonu depolama verimliliğini (TL kapasitesini) artırır; bu da, sonrasında maruz kalınan radyasyon için potansiyel olarak daha yüksek bir maksimum TL seviyesine ulaşmasını sağlar (Huss ve ark., 2006).

1.1.4. Kondritlerde Şok Etkisi (Şok Metamorfizması)

Asteroitler arası çarpışmalar sırasında kondritler, milisaniye–saniye ölçeğinde yüksek basınç ve sıcaklık etkilerine maruz kalır. Bu olay “şok metamorfizması” olarak adlandırılır. Şok dalgaları, minerallerde deformasyon, mikroçatlaklar, bölgesel erimeler ve yüksek basınç fazlarının (maskelynit, ringwoodite) oluşumuna neden olur. Şok şiddeti S1–S6 arasında sınıflandırılır (Çizelge 1.3).

Çizelge 1.3. Şok Evrelerinin (S1–S6) basınç aralıklarına göre sınıflandırılması ve Bursa meteoriti için karakteristik özellikleri

Şok Evresi	Basınç Aralığı (GPa)	Özellikler
S1	5–10	Çok hafif şok, çatlaklar sınırlı, deformasyon az
S2	10–20	Hafif şok, mikro kırıklar yaygın, mineraller sağlam
S3	20–30	Orta şok, mozaik yapıların başlangıcı, hafif faz değişimleri
S4	30–45	Yüksek şok, maskelynit oluşumu, lokal erimeler
S5	45–60	Çok yüksek şok, faz dönüşümleri (ör. olivin → ringwoodite)
S6	>60	Aşırı şok, tam erime, camlaşma ve şok damarları baskın

Asteroit çarpışmaları sırasında kondritlerin maruz kaldığı bu şok etkisi, TL sinyalini iki yönlü etkiler. Şokun yarattığı anlık yüksek sıcaklık, tıpkı termal metamorfizmada olduğu gibi, tuzaklardaki birikmiş elektronları hızla boşaltarak mevcut TL sinyalini tamamen sıfırlayabilir. Özellikle S4 ve üzeri şok evrelerinde oluşan maskelynit ve bölgesel erimeler, radyasyonu depolayan kristal kafes yapısını bozarak malzemenin radyasyon depolama verimliliğini kalıcı olarak düşürür. Bu nedenle şoklanmış kondritlerin laboratuvarında elde edilen TL doygunluk seviyeleri, şoklanmamış kondritlere göre genellikle daha düşüktür (Stöffler ve ark., 1991).

1.2. Meteoritlerin Toplanması ve Sınıflandırılması

Meteoritlerin toplanması, tanımlanması ve sınıflandırılması üzerine çalışmalar 19. yüzyılın başlarından itibaren yapılmaktadır. Bu kapsamda jeologlar ve kimyagerler, meteoritleri Dünya kökenli kayalardan ayırt etmek ve kendi içlerindeki farklılıkları ortaya koymak amacıyla kapsamlı sınıflandırma çalışmaları yürütmüşlerdir.

Günümüzde meteoritlerin sınıflandırılması yaygın olarak Weisberg ve ark. (2006) çalışmasına dayanmaktadır (Şekil 1.3). Bu çalışma, önceki kimyasal, mineralojik, petrolojik ve izotopik sınıflandırma yaklaşımlarını birleştirerek sistematik bir yapı oluşturmuştur. Böylece meteoritler kondritler, ilkel akondritler ve akondritler olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflar klanlara, klanlar gruplara, gruplar ise alt gruplara ayrılarak hiyerarşik bir sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. Ancak yeni bulgular, keşifler ve teknolojik gelişmeler bu sınıflandırmanın sürekli revize edilmesini zorunlu kılmaktadır (Rubin, 2019). Yeni bulunan ve herhangi bir gruba dâhil edilemeyen meteoritlerin sayısı giderek artmaktadır.

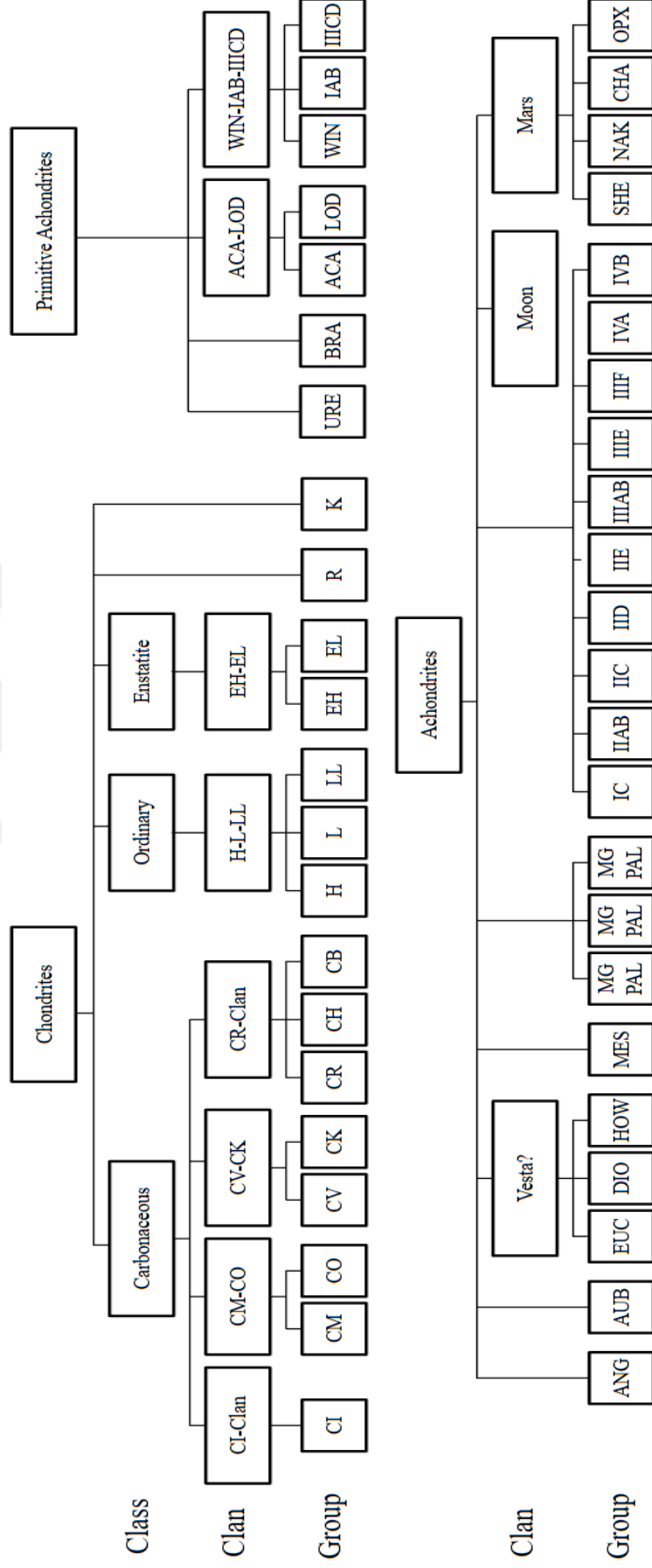
OSIRIS-REx (Bennu) ve Hayabusa2 (Ryugu) görevlerinden elde edilen veriler ve getirilen örnekler üzerinde süren çalışmalar, bazı sınıfların alt gruplarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmiştir (Hamilton ve ark., 2019). Günümüzde meteoritlerin ve asteroidlerin spektral özellikleri, makine öğrenmesi gibi yöntemlerle karşılaştırılarak hangi ana gövdelerden geldikleri

belirlenmeye başlanmıştır (Dyar ve ark., 2023). Bu gelişmeler, meteorit sınıflandırma yaklaşımlarına yeni bakış açıları kazandırmaktadır.

Geleneksel sınıflandırma sistemi, meteoritleri taşsı (silikatça zengin), taşsı-demirli ve demirli (metalce zengin) olmak üzere üç ana gruba ayırır. Bu yöntem pratik olmakla birlikte yalnızca kimyasal bileşime dayanır. Modern sınıflandırma ise meteoritlerin erime geçmişi, metamorfizma derecesi ve jeolojik evrimi gibi süreçleri de dikkate alır (Weisberg ve ark., 2006). Bu sınıflandırmanın şematik hali Şekil 1.3' de verilmektedir.



Şekil 1.3. Meteoritlerin sınıflandırılması (Weisberg ve ark., 2006; Tobias1984, 2012)



1.3. Sıradan Kondritlerin Özellikleri Ve Bursa Meteoriti

Dünya’da bulunan meteoritlerin yaklaşık %85–90’ı sıradan kondritlerden (*ordinary chondrites*, OC) oluşur (Weisberg ve ark., 2006). Bu grup, kimyasal bileşim ve mineralojik yapı bakımından benzerlik gösterse de demir içeriği açısından üç alt gruba ayrılır: H (yüksek demir), L (düşük demir) ve LL (düşük demir, düşük metal). H grubu en yüksek metalik demir-nikel oranına, LL grubu ise en düşük Fe-Ni oranına sahiptir. Bursa meteoriti sıradan kondritler sınıfına ait L tipi bir kondrittir.

Sıradan kondritlerin başlıca bileşenleri olivin [(Mg,Fe)₂SiO₄], ortopiroksen [(Mg,Fe)SiO₃], plajiyoklaz feldspat, troilit (FeS) ve değişen miktarlarda kamasit–taenit (Fe–Ni) alaşımlarıdır. Bu mineraller, ana gövdede ısıl metamorfizma süreçleriyle denge fazlarını oluşturmuştur. Spektral analizler, sıradan kondritlerin S-tipi asteroitlerle yakın benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle 6 Hebe, 433 Eros ve 8 Flora gibi asteroitler, sıradan kondritlerin olası ana kaynak cisimleri olarak değerlendirilmektedir (Binzel ve ark., 2010; McCoy ve ark., 2001; Vernazza ve ark., 2014; Gayon-Markt ve ark., 2020; Ebel ve ark., 2015; Dunn ve ark., 2013).

1.4. Bursa Meteoritinin Dokusal, Metamorfik Ve Şok Özellikleri Açısından Değerlendirilmesi

Bursa meteoritinin sınıflandırması, Meteoritical Bulletin Database kayıtlarına göre L6 (Sıradan Kondrit) – S5 şok evresi olarak belirlenmiştir. 2005 yılında Prof. Mehmet Emin Özel, Bursa meteoritinden alınan 9,84 g’lık numune üzerinde çeşitli jeokimyasal analizler yapmış ve meteoritin sınıflandırmasını L6 olarak doğrulamıştır (Sengül ve ark., 2005). Meteorit, 1946 yılında Bursa ili yakınlarına düşmüş, yaklaşık 25 kg kütleyle sahiptir ve koordinatları 40° 12’ K, 29° 14’ D olarak kaydedilmiştir (Meteoritical Society, 2025). Numunenin ana parçası Ege Üniversitesi Koleksiyonu’nda (İzmir) muhafaza edilmektedir.

1.4.1. Dokusal Özellikler

Bursa meteoritinde kondrül sınırları büyük ölçüde silinmiş ve olivin-piroksen mineralleri tane yapısının birbirine geçmiş bir doku oluşturmuştur. Bu doku, minerallerin uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalarak yeniden kristalleşip eş boyutlu taneler haline gelmesiyle meydana gelmiştir. Mikroskobik ince kesitlerde, yalnızca bazı bölgelerde kondrül izleri görülebilmektedir.

1.4.2. Mineralojik Özellikler

Bursa meteoritinin mineralojik bileşimi; olivin, ortopiroksen (enstatit), plajiyoklaz feldspat, troilit (FeS) ve Fe–Ni metal fazlarından (kamasit–taenit) oluşmaktadır. Olivin genellikle fayalitçe fakir (Fa_{25,2}), ortopiroksen ise ferrosilit (Fs_{21,4}) bakımından fakirdir (Maksimova ve ark., 2020). Metamorfik süreç boyunca olivin ve piroksen kristalleri büyüyerek tane yapısını birbirine geçmiş bir dokuda yeniden düzenlenmiş, plajiyoklaz minerali kısmen camlaşarak maskelynit forma dönüşmüştür. Metalik Fe–Ni taneleri ile troilit damarcıkları matris içinde ince dağılımlı şekilde

bulunur ve yer yer deformasyon izleri taşır (Maksimova ve ark., 2020; Ünsalan, 2020; Weisberg ve ark., 2006).

1.4.3. Şok Özellikleri

En az 64,9 GP düzeyinde şok basıncının etkisi altında, olivin minerali yer yer ringwoodite fazına dönüşmüş, plajiyoklaz feldspat maskelynit hâline gelmiştir (Ünsalan ve Altunayar-Ünsalan, 2020). Yüksek basınç bölgelerinde lokal erimeler ve şok damarları gelişmiş; bazı Fe–Ni taneleri bu damarlar boyunca eriyerek yeniden çökelmiştir (Maksimova ve ark., 2020). Bu deformasyon yapıları, meteoritin kısa süreli ancak yüksek enerjili bir çarpışma olayına maruz kaldığını göstermektedir.

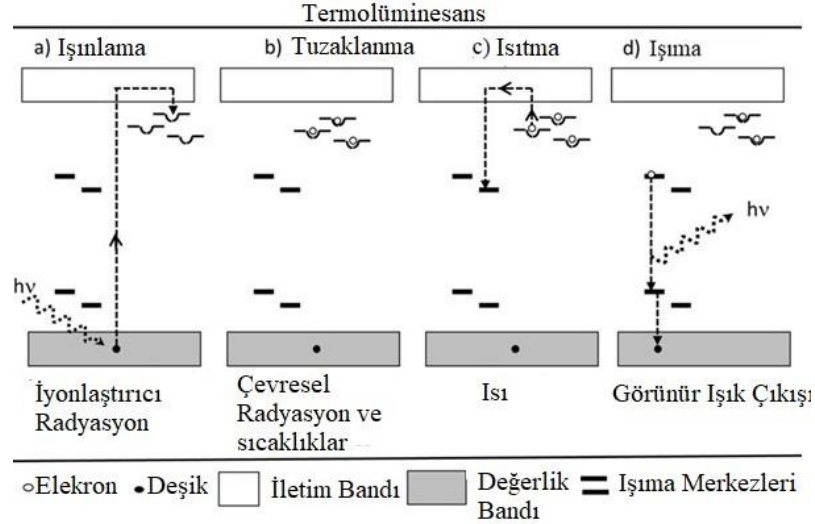
Bu bulgular, Bursa meteoritinin ana gövdesinde hem uzun süreli termal metamorfizma hem de yoğun şok süreçlerinin etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Bursa meteoriti, yüksek derecede dengelenmiş, şok etkili ve tam kristal dengeye ulaşmış bir L6 tipi sıradan kondrit karakteri sergilemektedir.

1.5. Termoluminesansın Doğası ve Matematiksel Anlamı

Katı malzemeler (iletken, yarı iletken, yalıtkan), elektriksel iletkenliklerini oluşturan kristal kafes örgüleri ile TL olgusunu gösterir (Aitken, 1974; McKeever, 1985). Kristal kafes yapısı, değerlik bandı (VB) ve iletkenlik bandı (CB) adı verilen enerji bantlarından oluşur; aralarındaki bölge ise yasak bölge (bant aralığı) olarak adlandırılır. Yalıtkan veya yarı iletken malzemelerde bu aralık geniştir (Sears ve ark., 2013).

Kusursuz kristal yapıya sahip malzeme olmadığından, elektronlar yasak enerji aralığında, iletkenlik bandının 1–2 eV altında bulunan kusur bölgelerinde (içsel yapıdan veya dışsal safsızlıklardan kaynaklanan) toplanır. Bu bölgelere “tuzak” adı verilir (McKeever, 1985). İyonlaştırıcı radyasyon (alfa, beta, gama, vb.) uygulandığında, değerlik bandındaki elektronlar iletkenlik bandına geçer ve bu tuzaklara yakalanarak enerjinin bir kısmını depolarlar (Aitken, 1974; Sears ve ark., 2013).

Tuzaklardaki elektronlar ısı enerjisiyle serbest bırakıldığında, atomik kusurlar veya safsızlıklardan kaynaklanan rekombinasyon merkezleriyle birleşerek ultraviyole (UV), infrared (IR) veya görünür ışık yayar. Isı enerjisiyle tuzakların boşalması ve ışık oluşumu, termoluminesans olarak adlandırılır (McKeever, 1985; Sears ve ark., 2013; Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Termolüminesans olgusunun enerji bant modeli: (a) Işınlama, (b) Tuzaklanma, (c) Isıtma ve (d) Işıma evreleri (Sears ve ark., 2013).

Yük taşıyıcılarının tuzaklardan serbest kalma hızı Arrhenius eşitliği ile tanımlanır. TL ışımasının şiddetini modellemek için üç temel kinetik model kullanılır. Bu modeller aşağıda sırasıyla verilmiştir.

1.5.1. Randall ve Wilkins Modeli (Birinci Mertebe Kinetik)

Yeniden tuzaklanma olmadan, elektronların doğrudan yeniden birleşme merkezleriyle birleştiği ideal durumu varsayar ve asimetrik TL piki verir. Birinci derece kinetik eşitliği

$$I(T) = n_0 \cdot s \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[-\int_{T_0}^T \frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right] \quad (1.1)$$

şeklinde verilir.

Bu model ilk olarak Randall ve Wilkins (1945a,1945b) tarafından tanımlanmış olup, termolüminesansın temel kinetik modelini oluşturur.

1.5.2. Garlick ve Gibson Modeli (İkinci Mertebe Kinetik)

Serbest kalan elektronların yeniden tuzaklanabileceği varsayımına dayanır. Matematiksel eşitliği, birinci derece kinetiğe göre daha simetrik bir ışıma eğrisi verir ve yeniden tuzaklanma nedeniyle pik yüksek sıcaklık bölgesine doğru genişler. Matematiksel eşitliği

$$I(T) = \frac{\frac{n_0^2 s}{N} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}{\left[1 + \frac{sn_0}{\beta N} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^2} \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu model, Garlick ve Gibson (1948) tarafından tanımlanmış olup, termolüminesans süreçlerinde ikinci mertebe kinetiğin temelini oluşturur.

1.5.3. Chen'in Genel Mertebe Kinetik Modeli

Karmaşık TL davranışlarını açıklamak için esnek bir çerçeve sunar. Burada b , kinetik mertebeyi ifade eder (genellikle $1 \leq b \leq 2$ aralığındadır). $b = 1$ iken birinci mertebe, $b = 2$ iken ikinci mertebe kinetiğe karşılık gelir. b değeri arttıkça ışıma eğrisi daha simetrik bir yapı sergiler.

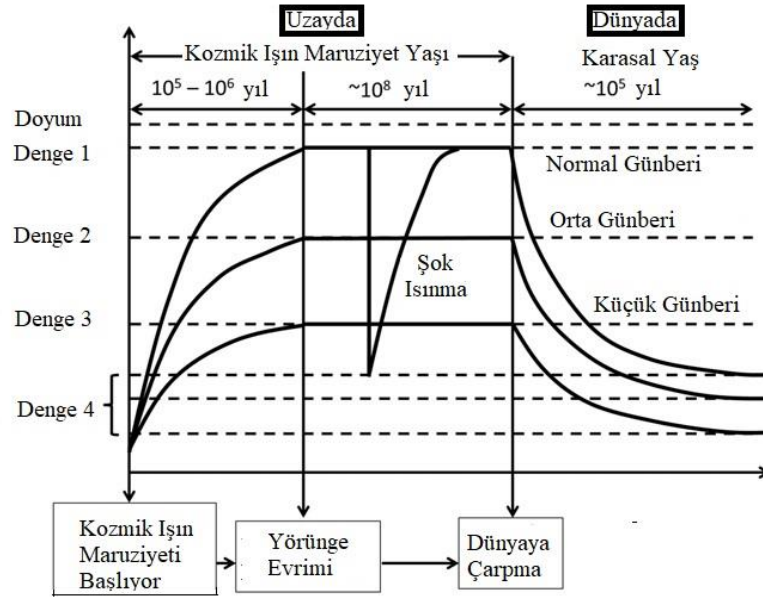
$$I(T) = s'n_0^b \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + (b-1) \frac{s'n_0^{b-1}}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^{-\frac{b}{b-1}} \quad (1.3)$$

Bu model, Chen (1969) tarafından geliştirilen genel mertebe kinetik yaklaşımına dayanır ve farklı mertebelerdeki TL davranışlarını tek bir matematiksel ifade altında birleştirir (Eşitlik 1.3)

1.6. Meteoritler ve Termolüminesans

TL analizleri için, meteoritlerin geçmişlerindeki radyasyon birikimi ve ısıl süreçleri kapsamlı olarak araştırılması önemlidir. Meteoritler, ana gövdenin (genellikle asteroidler) derin kısımlarındayken kozmik ışınlardan korunur ve içsel radyoaktivite kaynaklı düşük dozlu radyasyona maruz kalır; bu nedenle doğal TL seviyeleri genellikle ihmal edilebilir. Ana gövdenin parçalanmasıyla oluşan meteoroidler, uzayda galaktik kozmik ışınlarla ve Güneş parçacıklarına doğrudan maruz kalmaya başlar. Yörüngede, kozmik ışınlarla radyasyon birikimi ile Güneş kaynaklı sıcaklık etkisiyle TL sinyalinde boşalma (azalma) arasında zaman içinde bir dinamik denge oluşur. Meteorit bu denge durumuna 10^5 – 10^6 yıl içinde ulaşır. Yaklaşık 10^8 yıl sürebilen bu denge durumu, çarpışmalarla kesintiye uğrayabilir ve TL sinyalinde ani düşüşe neden olabilir.

Bir meteoroidin Güneş'e uzaklığı, bu denge seviyesini belirleyen temel etkidir: Güneş'e yakın geçen meteoroidlerde sıcaklık yüksek olduğundan TL daha hızlı boşalır ve denge TL seviyesi düşük olur; uzak yörüngelerde ise sıcaklık düşük olduğundan TL birikimi artar ve denge seviyesi daha yüksektir (Sears, 1980; Sears ve ark., 2013; Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Meteoritlerde doğal TL seviyesi,. (Sears ve ark., 2013).

Denge durumunda, tuzaklara elektron yakalanma hızı $\alpha R(N - n)$ ile tuzaklardan serbest kalma hızı $n \cdot s \cdot \exp(-E/kT)$ eşittir.

$$\alpha R(N - n) = n \cdot s \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.4)$$

Bu denge eşitliği düzenlenerek, doğal TL seviyesini temsil eden soğrulan radyasyon dozu aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\emptyset = \emptyset_s \left\{ 1 + \left[\frac{s}{\alpha R \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)} \right] \right\}^{-1} \quad (1.5)$$

Bu eşitlik, doğal TL seviyesinin (\emptyset) α , R , s , E , k , ve T parametrelerine bağlılığını gösterir. Burada, α , tuzak verimliliğini; R , doz oranını; s , frekans faktörünü; E , tuzak derinliğini; k , Boltzmann sabitini; ve T , mutlak sıcaklığı temsil eder (Sears ve Durrani, 1987). Günberi uzaklığı (Güneş'e en yakın konum), meteoroitin maruz kaldığı sıcaklığı belirler. Günberi uzaklığı küçük olan meteoroitler daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı için daha düşük doğal TL seviyeleri gösterir.

Meteoritlerde kozmik radyasyona maruz kalma, atmosferin perdelemesi ve Dünya'nın manyetik etkisi nedeniyle neredeyse sifıra iner. Ancak, yeryüzündeki ortam sıcaklığı (~ 300 K), uzaydaki düşük sıcaklıklarla karşılaştırıldığında TL sinyalinde boşalma (azalma) meydana getirir. Bu düşüş, yeni bir denge durumuna ulaşıncaya kadar devam eder (Sears ve ark., 2013; Şekil 1.5).

1.7. Meteoritlerde TL Yönteminin Kullanım Alanları

TL yöntemi, meteoritlerin hem radyasyon hem de termal geçmişlerini incelemede yaygın olarak kullanılan güçlü bir analiz tekniğidir. Bu yöntemle meteorit örnekleri iki farklı biçimde değerlendirilebilir: Doğal TL (DTL) ve Yapay TL (YTL)

DTL, meteoritin doğadan “alındığı haliyle” ısıtılması sonucu, daha önce soğurduğu enerjinin ışık olarak açığa çıkması esasına dayanır. Sıcaklıkla birlikte ışık şiddetinin (foton salınımının) değişimi, örnek içindeki tuzakların doluluk oranı ve enerji dağılımı hakkında doğrudan bilgi verir. Bu ölçüm, meteoritin uzayda veya karasal ortamda biriktirdiği toplam radyasyon dozunu ve bu doza bağlı olarak gelişen tuzak yoğunluğunu yansıtır.

Buna karşılık, YTL ölçümlerinde örneğe laboratuvar koşullarında bilinen miktarlarda beta veya gama radyasyonu verilerek kalibrasyon yapılır. Bu yöntem, meteoritin mineralojik yapısı, tuzak derinlikleri, enerji seviyeleri ve metamorfik geçmişi hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Özellikle YTL eğrilerinin sıcaklığa bağlı şiddet dağılımı, feldspat ve piroksen gibi minerallerin TL üretme kapasitesini ve metamorfizma derecelerini ayırt etmede kullanılır (Sears ve Hasan, 1986).

1.7.1. Karasal Yaş (Terrestrial Age) Tayini

Bir meteoritin karasal yaşı, Dünya’ya düştükten sonra biriktirdiği toplam TL dozunun çevresel doz hızına bölünmesiyle tahmin edilir. Bu amaçla genellikle füzyon kabuğunun hemen altındaki tabakalardan alınan örnekler kullanılır; çünkü bu bölge atmosferik giriş sırasında sıfırlanmıştır. Düşüşten sonra içsel ve çevresel radyasyonla yeniden TL birikmeye başlar.

Elde edilen doğal TL seviyesi, meteoritin yeryüzünde geçirdiği sürenin bir ölçüsüdür. Ancak, TL sinyalinin sıcaklığa bağlı “solması” (fading) ve çevresel koşullar (örneğin Antarktika gibi düşük sıcaklıklar veya çöl gibi yüksek sıcaklıklar) bu yaştan hesaplanmasında belirsizlik yaratır. Bu nedenle TL tabanlı karasal yaşlar genellikle alt sınır olarak değerlendirilir (Sears ve Durrani, 1987; Sears ve ark.,2013).

1.7.2. Günberi (Perihelion) Uzaklığı ve Yörünge Bilgisi

Doğal TL seviyeleri aynı zamanda meteoritin Güneş’e en yakın konumunda (günberi) maruz kaldığı maksimum sıcaklıkla ilişkilidir. Günberi uzaklığı küçük olan (Güneş’e yakın geçen) meteoritlerde, yüksek sıcaklık nedeniyle TL seviyesi düşük; uzak olanlarda ise yüksektir (Benoit ve ark.,1997a,1997b). Bu ilişki sayesinde, TL verileri kullanılarak meteoritlerin yaklaşık yörünge parametreleri (0,8–1,0 AB aralığı) tahmin edilebilir (Sears ve ark., 2013).

1.7.3. Şok Derecesinin (S1–S6) Belirlenmesi

TL yöntemi, meteoritlerdeki şok etkilerinin belirlenmesinde önemli bir tamamlayıcı araçtır. Şok dalgaları kristal kafesleri bozarak TL’ye neden olan tuzakların boşalmasına veya tahrip olmasına yol açar. Bu nedenle şok derecesi arttıkça TL şiddeti azalır. Bununla birlikte düşük şok seviyelerinde

(S1–S2), kristal yapıda oluşan hafif bozulmalar yeni sığ tuzakların ortaya çıkmasına yol açtığından TL şiddetinde hafif bir artış görülebilir (Sears, 1980). Yaklaşık 30 GPa basınç altında indüklenmiş TL'nin 100 kata kadar düştüğü gösterilmiştir (Hasan ve ark., 1987). Bu etki özellikle feldspat minerallerinde gözlenir; feldspatın amorflaşması (maskelynitleşme) TL sinyalinin azalmasının temel nedenidir.

Ayrıca, şiddetli şok sonrası soğuma evresinde kristal yapıda yeni derin tuzaklar ($E \geq 1,4$ eV) oluşur. Bu merkezler, 350 °C üzerindeki TL bölgesinde belirgin “omuz” veya ikincil piklerle kendini gösterir. Düşük şoklu (S2–S3) meteoritlerde bu bileşen zayıftır; ancak S5–S6 sınıflarında güçlü biçimde ortaya çıkar. Bursa meteoritinde (L6 S5) gözlenen yüksek sıcaklık bileşeni, bu şokla yeniden yapılandırılmış derin tuzakların tipik bir örneğidir.

1.7.4. Metamorfizma Derecesi ve Mineralojik Dönüşümler

TL ayrıca meteoritlerin termal metamorfizma geçmişini yansıtır. Tip 3'ten Tip 6'ya doğru ilerleyen metamorfik süreçte, camsı (amorfl) yapı feldspata dönüşür, kristal boyutu artar ve bu da yapay TL şiddetinde sistematik bir artışa neden olur. Bu ilişki, meteoritlerin petrolojik tiplerinin (3.0–6.0) belirlenmesinde kullanılır. Metamorfizma arttıkça olivin ve piroksen mineralleri homojenleşir, uçucu elementler uzaklaşır ve TL duyarlılığı yükselir. Böylece yapay TL ölçümleri, Tip 3 alt sınıflarının (3.0–3.9) ayırımında dahi yararlı bir kriter hâline gelir (Hasan ve ark., 1987; Sears ve ark., 2013).

1.7.5. Meteorit Parçalarının Eşleştirilmesi

Antarktika koleksiyonlarında, aynı düşüşe ait farklı meteorit parçalarının tespiti için TL yöntemi kullanılmıştır. Aynı meteoritin parçaları, benzer TL eğrisi şekilleri ve şiddetleri sergiler. Bu nedenle TL profilleri, kimyasal analizlerle birlikte kullanılarak meteoritlerin eşleşme (pairing) doğrulamasında güçlü bir araç olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak, TL yöntemi meteoritlerin yalnızca yaş ve radyasyon geçmişini değil; aynı zamanda şok, metamorfizma ve yörünge süreçlerini de ortaya koyan çok yönlü bir tekniktir. DTL, meteoritin çevresel ve kozmik doz birikimini YTL ise mineralojik ve yapısal özelliklerini yansıtır. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması, hem şok etkisinin derecesini hem de karasal yaş, kozmik radyasyon yaşı ve günberi geçmişinin aynı anda değerlendirilmesini sağlar (Sears ve ark., 2013).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

TL, malzemelerin yapılarında radyasyon etkisiyle birikmiş enerjinin, ısı verilerek ışık formunda açığa çıkması sürecidir. Bazı malzemelerin ışık yaydığı çok eski dönemlerden beri bilinmektedir. Ancak bilimsel anlamda bu ışımanın nedenlerini araştıran ve bulgularını raporlayan ilk kişi olarak Robert Boyle (Boyle,1664) kabul edilir. Daha sonra Alexander Herschel, 1881’de düşen Middlesbrough meteoriti üzerinde yaptığı çalışmada lüminesans özelliklerini incelemiş ve bu ışımanın feldspat minerallerinden kaynaklandığını öne sürmüştür. Ayrıca atmosfer geçişi sırasında meteoritlerin iç kısımlarının önemli ölçüde etkilenmediğini ileri sürmüştür (Sears ve ark., 2013).

20. yüzyılda, lüminesans özellik gösteren malzemelerin katı hâl fiziği kapsamında incelenmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Randall ve Wilkins, 1945a, 1945b; Garlick ve Gibson, 1948; Chen,1969; McKeever, 1985). Termolüminesans süreçlerinin matematiksel ve fiziksel temelleri ise Garlick ve Gibson (1949) tarafından ortaya konmuştur. 1950’lerden itibaren TL yöntemi, arkeolojik çalışmalarda seramiklerin tarihlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Aynı yöntem, jeolojide tortulların geçmişteki ısı ve radyasyon süreçlerinin incelenmesinde de kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, çevresel radyasyon dozunun ölçülmesi için geliştirilen dozimetre cihazlarında da önemli bir rol oynamaktadır. Meteorit araştırmalarında TL yönteminin potansiyel faydaları, 1950’li yılların başlarında Houtermans ve çalışma arkadaşları tarafından fark edilmiştir. Ancak bu yöntemin meteoritler üzerinde sistematik biçimde uygulanması, 1960’lı yıllardan itibaren hız kazanmıştır (Cameron ve ark., 1968; Aitken, 1974).

Antarktika’da meteoritlerin sistemli şekilde toplanmasına ise 1978 yılında başlanmıştır. Bu çalışmalar, NASA, Ulusal Bilim Vakfı (NSF) ve Smithsonian Enstitüsü iş birliğiyle kurulan Antarctic Meteorite Working Group tarafından yürütülmüştür. Grup; meteoritlerin toplanması, korunması, sınıflandırılması ve bilimsel araştırmalarda kullanılması gibi konularda ortak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Toplanan meteoritler, Houston’daki Johnson Uzay Merkezi’nde özel laboratuvarlarda muhafaza edilmekte ve bu meteoritlerle ilgili analiz sonuçları bilim insanlarıyla paylaşılmaktadır. Çalışma grubunun talebi doğrultusunda gerçekleştirilen bir araştırmada, Antarktika’da toplanan meteoritlerin doğal TL sinyallerindeki sönmüleme hızı ile kozmik izotop ^{26}Al ’in bozunma hızı arasında yaklaşık bir benzerlik olduğu belirlenmiştir (Hasan ve ark., 1987). Bu bulgunun ardından, Antarktika’da bulunan meteoritlerin doğal TL ölçümleri sistematik olarak yapılmış ve elde edilen veriler 14 yıl boyunca NASA’nın Antarctic Meteorite Newsletter adlı yayını aracılığıyla bilim dünyasına sunulmuştur.

Meteoritlerin toplanması ve bilim dünyasıyla paylaşılması, çok sayıda araştırmaya kaynaklık etmiştir. EPMA (Elektron Prob Mikroanalizi), SEM–EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu–Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi), XRD (X-ışını Kırınımı), polarizan mikroskop ve Mössbauer spektroskopisi gibi çeşitli analiz yöntemleriyle meteoritlerin kimyasal bileşimleri, mineralojik içerikleri, dokusal özellikleri, metamorfizma dereceleri ve şok etkileri detaylı biçimde incelenmiştir.

TL tekniği, meteoritlerin geçmişlerini anlamada önemli bir araç olarak bilimsel literatürde geniş yer bulmuştur. Bu alandaki ilk önemli çalışmalardan biri, Houtermans ve Liener (1966) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmacılar, meteoritlerin hem doğal hem de laboratuvarıda yapay TL lmlerinin karakteristiklerini sınıflarına göre incelemişlerdir. Çalışmada farklı meteoritlerin doğal ve yapay TL seviyeleri ölçülmüş, ışıma eğrileri analiz edilmiştir. Özellikle Akondrit, Mezosiderit, Pallasit ve Kondrit (Hipersten ve Bronzit grubu) rneklerinin ışıma eğrilerinin şekilleri, pik şiddetleri ve pik sıcaklıkları değerlendirilmiştir. Bu alışma ile TL verileri kullanılarak kozmik radyasyon yaşlarının belirlenip belirlenemeyeceğini araştırmıştır. Hipersten (L tipi) kondritlerde doğal ve indüklenmiş TL tepe yükseklikleri arasında korelasyon saptanmıştır. Bazı rneklerde TL sinyali alınmaması, yaklaşık 40 C civarındaki çevresel sıcaklıklara bağlanmıştır. şok etkilerinin mevcut tuzakları tahrip ederek TL sinyalini azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca TL verilerinin kozmik ışın yaşlarının belirlenmesinde kullanılabileceği, ancak içsel radyoaktif çekirdeklerin katkısının da dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bronzit (H tipi) kondritlerde ise yapay TL ile radyasyon yaşı arasında anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir.

McKeever ve Sears (1979), TL yönteminin meteorit çalışmalarındaki olası kullanım alanlarını değerlendirmişlerdir. Ancak, yöntemin potansiyelinin tam olarak anlaşılmadığını vurgulamışlardır. Arkeolojik ve jeolojik tarihlendirmelerde olduğu gibi, meteorit yaşlarının belirlenmesinde doğrudan kullanılamayacağını belirtmişlerdir. TL sinyali ile doz arasındaki ilişki her zaman lineer değildir; bu nedenle doz birikimiyle birlikte termal solma ve bozunma hızının da bilinmesi önemlidir. Düşük sıcaklıklarda dahi kararsız tuzaklardan boşalma gerçekleşebilir ve bu durum yaş tayininde hata yaratabilir. Meteoritlerin uzayda uzun sreler boyunca maruz kaldıkları radyasyon, dinamik denge durumuna yol açar ve TL yöntemiyle 10⁶ yıldan büyük kozmik yaşlar hesaplanamaz. Buna karşın, TL verileri meteoritlerin yörünge ve uzay sıcaklığı koşulları hakkında bilgi verebilir. TL duyarlılığının zamanla artabileceği, büyük şok veya yeniden ısıtma olaylarının bu duyarlılığı sıfırlayabileceği ne srlmştir; dolayısıyla bu tür olayların tarihlendirilmesinde TL'nin potansiyel bir araç olabileceği ifade edilmiştir.

Melcer (1981), meteoritlerin eşdeğer doz (ED) seviyeleriyle günberi uzaklıkları arasında ilişki olabileceğini ngrmştir. Bu amaçla, karasal yaşları 3–170 yıl arasında değerşen 44 meteorit ile 488 yıllık Ensisheim meteoritinin 200 C'deki ED seviyeleri llmştir. Aynı yaşta olan örneklerde ED değerleri arasında, iki örnek hariç, yaklaşık 10 kat fark saptanmıştır. Yeryüzü solmasının ihmal edilmesiyle bu farkın günberi uzaklıklarına bağlı olduğu dşnlmştir. 0.79 AB ve 0.986 AB gnberilerinde sıcaklıkların sırasıyla 294 K ve 264 K olduğu, absorptivite-emisivite farkları hesaba katıldığında sıcaklık farkının 24 K olabileceği ve bu farkın ED değerimini açıklayabileceği belirtilmiştir. Malakal meteoritinin anormal düşük ED seviyesi, yüksek ²⁶Al ve ⁵³Mn aktivitesine rağmen, yakın Güneş geçişine (0.5–0.6 AB) bağlanmıştır. Farmville meteoritinde ise 1–7 cm derinlikte ED'nin 4 kat arttığı görülmüş; bu farkı açıklayacak doz azalması veya radyasyon katkısı bulunamamıştır. Bu nedenle Farmville'deki ED değerimini açıklayamamıştır.

Sutton ve Walker (1986), TL yönteminin meteorit araştırmalarındaki önemini vurgulamışlardır. TL, meteoritlerin karasal yaşlarını hızlı biçimde tahmin etmede ve aynı düşüşe ait parçaları ayırt etmede etkili bir tekniktir. Aynı meteorit parçalarında TL farkı genellikle iki katı geçmezken, farklı meteoritler arasında bu fark 200 kata ulaşabilir. Yöntem, meteoritlerin ısı ve radyasyon geçmişlerini de ortaya koyar. Malakal meteoritinin düşük TL seviyesi, yüksek ²⁶Al aktivitesiyle birlikte Güneş'e yakın (0.5–0.6 AB) yörüngede bulunduğuna işaret eder. Benzer şekilde, Ay kökenli meteoritlerde düşük TL, çarpışma sonucu oluşan yüksek sıcaklıkla açıklanmıştır.

Hasan ve ark. (1987), 23 dengelenmiş Antarktika kondritlerinin (TL) seviyeleri ile ²⁶Al içeriklerini karşılaştırmış, doğal TL verilerini eşdeğer doz ile pik yükseklik oranı (LT/HT) yöntemlerini kullanarak sunmuşlardır. LT düşük sıcaklık pikini HT yüksek sıcaklık pikini temsil eder. Antarktika meteoritlerinin ortalama LT/HT oranı 2.5, Antarktika dışı meteoritlerde ise yaklaşık 4 olarak bulunmuştur. Bu farkın karasal yaş farklılıklarından kaynaklandığı belirtilmiştir. 23 örnekten 17'sinde TL ile ²⁶Al arasında anlamlı bir korelasyon belirlenmiştir. Geriye kalan 6 örnekte ise bu ilişki gözlenmemiştir; bu durumun, söz konusu meteoritlerin geçmişte maruz kaldıkları farklı termal olaylar veya kozmik radyasyon dozlarındaki değişimlerden kaynaklandığı düşünölmüştür. LT/HT oranları ile karasal yaşlar arasında da ilişki kurulmuş; düşük TL seviyelerinin şok etkileri ve yakın Güneş geçişi nedeniyle oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca, kimyasal bileşim ve petrografik farklılıkların LT/HT ile ²⁶Al korelasyonundaki sapmaları açıklayabileceği ifade edilmiştir.

Hasan ve ark. (1988), Antarktika meteoritlerinin TL ölçümlerinde kullanılan iki temel normalizasyon yöntemini incelemişlerdir: pik yükseklik oranı ve eşdeğer doz. Pik yükseklik oranı, 250°C'deki düşük sıcaklık pikinin 350°C'deki yüksek sıcaklık pikine oranlanmasıyla elde edilirken, eşdeğer doz, laboratuvarında doğal TL'ye yapay doz verilerek belirlenmiştir. Pik yükseklik oranı daha güvenilir bulunmuş, buna karşılık ED yöntemi ölçüm hassasiyetine bağlı olarak daha belirsizdir. Pik yükseklik oranı, aynı ışıma eğrisi içindeki iki pikten hesaplandığı için ölçüm hatalarından daha az etkilenir. Buna karşılık ED yöntemi, TL–doz eğrisinin doğruluğuna bağlı olduğundan daha fazla belirsizlik içerir. 237 sıradan kondritin verileri grafikte karşılaştırılmış ve iki yöntem arasında genel bir uyum olduğu doğrulanmıştır. Ölçüm sıcaklıklarındaki farklılıkların eşdeğer dozdaki belirsizliklerin temel nedeni olduğu belirtilmiştir.

Benoit ve ark. (1993), farklı sıcaklıklarda teorik TL sönümlene eğrileri geliştirerek meteoritlerin karasal yaşlarının doğal TL verileriyle hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Dünyanın çeşitli bölgelerinden meteorit örneklerinde etkin saklama sıcaklıkları belirlenmiş ve bu değerlerin izotopik yaşlarla uyumlu olduğu saptanmıştır. Çalışmada, 19 Antarktika meteoritinden 14'ünün saklama sıcaklığı 0 ila -5°C arasında tahmin edilmiştir. Ancak, kalan 5 örneğin düşük TL seviyeleri ise yakın günberi (0.8 AB'dan az) nedeniyle oluşan ısınmaya bağlanmıştır.

Sengupta ve ark. (1997), füzyon kabuğu kullanarak sekiz Antarktika meteoritinin karasal yaşlarını hesaplamış ve doğal TL seviyelerinin yeni düşmüş meteoritelerde atmosfer geçişi sırasında TL'nin sıfırlanmasına karşın, bu meteoritlerde Dünya'daki çevresel radyasyon kaynaklarından yıllar boyunca doz birikmesi nedeniyle belirgin biçimde daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Füzyon tabakasındaki TL'nin atmosfer geçişinde sıfırlandığı varsayımıyla, karasal yaşların 10.000–100.000 yıl aralığında olduğu belirlenmiştir. Radyasyon dozunun, bulunduğu ortamın doz hızına bölünerek yaş hesaplandığı vurgulanmıştır. Buz içinde gömülü kalmanın doz üzerinde önemsiz etkisi olduğu, füzyon kabuğunun yapısının TL hassasiyetini ve solmayı etkilemediği belirtilmiştir. Ayrıca, düşük karasal yaşa sahip meteoritlerde fotokatlandırıcının karanlık akım etkisinin TL ölçümlerini sınırlandırdığı ifade edilmiştir.

Ninagawa ve ark. (2000), Japon Antarktika Meteorit Koleksiyonu'ndan 30 Tip-3 sıradan kondritin TL özelliklerini incelemiş ve daha önceki 43 örnekle birlikte değerlendirerek toplam 73 meteorit üzerinde çalışmışlardır. TL pik sıcaklıkları ve genişlikleri, feldispat minerallerinin kristal yapısındaki düzen ve metamorfizma derecesi hakkında bilgi vermiştir. TL hassasiyetine göre meteoritlerin metamorfizma dereceleri 3.0-3.9 arasında belirlenmiş; yüksek hassasiyet düzenli kristal yapıyı göstermiştir. TL verileri kullanılarak meteoritler iki gruba ayrılmış ve pik yükseklik oranları üzerinden termal geçmişleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, 73 meteorit 18 eşleşmiş gruba ayrılarak aynı düşüşe ait parçalar tespit edilmiştir.

Biswas (2011), meteoritlerin TL sinyallerinin beklenenden düşük çıkması sorununu detaylıca incelemiştir. Geleneksel yöntemlerle ölçülen eşdeğer dozlar yaklaşık 1000 Gy civarında olup, buna göre kozmik radyasyona maruz kalma yaşları (KRY) yaklaşık 10.000 yıl olarak bulunmuştur. Ancak, bu değerler izotopik tarihlendirmelere göre çok düşüktür. Çalışmada farklı emisyonlarda ED ölçümleri yapılmış, termal olmayan solma oranları ve yıllık kozmik radyasyon doz hızları yeniden hesaplanmıştır. Sonuçlar, KRY yaşlarının doğal TL kullanılarak daha doğru hesaplanmasını sağlamıştır. Termal olmayan solma oranının KRY yaşlarıyla lineer olmayan şekilde azaldığı, bunun da radyasyon kaynaklı kusur hasarlarına bağlı olduğu düşünülmüştür. Kinetik parametreler bilgisayarlı yöntemlerle tespit edilmiştir. Kozmik doz hızlarının mavi ve kırmızı emisyon bantlarında farklı olduğu belirlenmiş; kırmızı emisyonun Sm^{3+} içerdiği ve daha yüksek doz gösterdiği saptanmıştır. Buna rağmen KRY yaşları beklenen seviyelerin altında kalmıştır. Meteoritlerin doz hızındaki değişim düşük olup, termal olmayan solmanın KRY yaşları üzerindeki etkisi vurgulanmıştır.

Sears ve ark., (2013) makalesi, TL ve katodlüminesans (CL) mekanizmalarının teorik ve deneysel temellerini detaylı şekilde açıklamaktadır. Makalede ayrıca, TL yöntemiyle yapılan meteorit çalışmalarının kapsamlı bir özeti sunulmuştur. Özellikle, meteoritlerin karasal yaşlarının belirlenmesinde kullanılan doğal TL sinyalinin solma hızı ve yanma kabuğu teknikleri üzerinde durulmuştur. Meteoritlerin radyasyon doz seviyeleri ve sıra dışı dozların nedenleri ayrıntılı şekilde ele alınmıştır. TL yöntemi, başta Antarktika meteoritleri olmak üzere, birikim mekanizmalarının

anlaşılmasında ve aynı düşüğe ait eşleşmiş meteoritlerin ayırt edilmesinde çok önemli katkılar sağlamıştır. Bununla birlikte, kondritlerin matris ve kondrül bileşenlerinde TL uygulamalarının karşılaştığı zorluklar da tartışılmıştır. Son olarak, kuyruklu yıldızlar, mikrometeoritler ve gezegenler arası tozlar gibi alanlarda TL yönteminin potansiyel faydaları vurgulanarak, gelecekteki araştırmalar için yol haritası oluşturulmuştur.

Ivliev ve Kuynko'nun (2014) çalışmasında, Ash Creek ve Tamdakht meteoritleri üzerinde TL yöntemiyle şok metamorfizması ve yörünge özellikleri incelenmiştir. Laboratuvarında farklı şok basınçları uygulanarak minerallerin indüklenmiş TL seviyeleri ölçülmüş ve şok basıncının S1-S2 evrelerinde TL seviyelerini artırırken, S3-S6 evrelerinde azalttığı belirlenmiştir. Bu ilişki kullanılarak Ash Creek için yaklaşık 15 GPa, Tamdakht için ise 20 GPa şok basıncı hesaplanmıştır. Ayrıca, doğal TL şiddetleri Ash Creek'te 600 Gy, Tamdakht'ta 1200 Gy bulunmuş ve bu değerlerin, sıradan kondritlerin 250 °C seviyesindeki eşdeğer dozlarına uygun olduğu, meteoritlerin Güneş'e olan mesafelerine göre tipik yörünge davranışları sergilediklerini göstermektedir.

Vokhmintsev ve ark. (2021), TL tekniğindeki önemli gelişmeleri örnekleyen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Chelyabinsk LL5 ve Tsarev L5 kondritlerinin doğal ve yapay TL ışınma eğrilerini, geniş bir sıcaklık aralığında (oda sıcaklığından 870 K'ye kadar) incelemiştir. Ayrıca, yayılan ışığın spektrumu 300-650 nm bandında analiz edilmiştir. Bu kapsamlı analizler, mevcut TL ekipmanına entegre edilen yüksek hassasiyetli özel bir modül sayesinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler fotoluminesans ve katodluminesans yöntemlerinden alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu modül, kondritlerin doğal TL sinyallerinin düşük spektral yoğunluğunu güçlendirmek amacıyla kullanılmış ve analizlerin hassasiyetini artırmıştır. Çalışma, her iki kondritin TL spektrumunun benzer özellikler taşıdığını, 350-650 nm aralığında yarı kararlı tuzakların bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu tuzakların, forsterit ve enstatit minerallerindeki kusurlu yeniden birleşme merkezlerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Genel dereceden kinetik modelleme ile bu aralıktaki aktivasyon enerjileri Chelyabinsk için 0.86 eV, Tsarev için ise 1.08 eV olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma, TL spektral analizlerinde modüllerin kullanımının önemini ve kondritlerin termal geçmişi hakkında detaylı bilgi sağlama potansiyelini açıkça göstermektedir.

Kaygısız (2018), Türkiye'ye düşen Bursa meteoritinin petrografik ve elemental analizlerini içeren kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, Fethiye (Kemer), Didim ve Fas meteoritleri de incelenmiştir. Bursa meteoriti, polarizan mikroskop, yansımali mikroskop, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) ve elektron prob mikroanalizi (EPMA) yöntemleriyle detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Analizler, meteoritin L6 kondriti olduğunu doğrulamış; olivin, piroksen, feldspat ve metalik mineraller (kamasit, taenit, troilit) tespit edilmiştir. Kanada ACME laboratuvarlarında gerçekleştirilen ICP-MS ve ICP-AES analizleriyle ana oksit (SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO) ve iz element (örneğin, La, Ce, Cr) içerikleri

belirlenmiştir. Bu çalışma, Bursa meteoritinin mineralojik ve kimyasal özelliklerini netleştirerek Türkiye'deki meteorit araştırmalarına önemli bir katkı sağlamıştır.

Ayrıca, Çalışkan (2019) tez çalışmasında, Bursa L6 kondriti ile birlikte Kayakent, Sivas, Çanakkale, Gibeon ve Palasite meteoritlerini SEM, XRD ve ICP-MS yöntemleriyle analiz etmiştir. Bursa meteoritinin %37,16 SiO₂, %34,11 Fe₂O₃, %23,95 MgO gibi ana oksitler ve 20 ppm Ba, 800,7 ppm Co gibi iz elementler içerdiği belirlenmiştir.

Maksimova ve ark. (2020), Bursa L6 sıradan kondriti üzerinde gerçekleştirdikleri incelemede optik mikroskopi, SEM-EDS, EMPA, XRD, manyetizasyon ölçümleri ve Mössbauer spektroskopisi gibi ileri analitik teknikleri kullanarak meteoritin kimyasal bileşimini, mineralojik içeriğini ve manyetik özelliklerini ayrıntılı biçimde ortaya koymuşlardır.

Ünsalan ve Altunayar-Ünsalan (2020) tarafından yapılan çalışmada, Bursa L6 kondritinde olivin-ringwoodit ve plajiyoklaz-maskelynit dönüşümleri Raman ve ATR-FTIR spektroskopisi ile belirlenmiştir. Forsterit (Fo) oranı yaklaşık %75 olarak tahmin edilmiş, şok basıncının en az 64.9 GPa olduğu ve meteoritin şok aşamasının en az S5 olduğu ilk kez raporlanmıştır.

Meteoritlerin fiziksel özelliklerine odaklanan Szurgot ve ark. (2021), Ay ve Gezegen Bilimi Konferansı'nda Bursa L6 kondrit ve Sarıçiçek howardit meteoritlerinin ortalama atomik ısılarını incelemiştir. Atomik ağırlık ve özgül ısı kapasitesiyle hesaplanan atomik ısı, meteoritlerin iç, kenar ve kabuk kısımlarında sıcaklıkla değişkenlik göstermektedir. Bu termofiziksel özellikler, meteoritlerin karakterizasyonu ve sınıflandırılmasında önemli parametreler olarak öne çıkmaktadır.

Szurgot ve ark. (2022), Meteorit Topluluğu'nun yıllık toplantısında sundukları çalışmalarında Bursa meteoritinin ısı iletkenliğini farklı sıcaklık, vakum ve atmosfer basıncı koşullarında değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, meteoritin %5,80 gibi düşük gözenekliliğinin ve uygulanan basıncın ısı iletkenliği üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca Bursa meteoritinin ısı iletkenlik özelliklerinin, sıradan kondrit sınıfındaki diğer meteoritlerle uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

Bu termal iletkenlik bulgularını tamamlayıcı olarak, Altunayar-Unsalan ve ark. (2025) tarafından Bursa L6 kondritinin yoğunluk, gözeneklilik, spesifik ısı kapasitesi, termal iletkenlik, termal difüzyon ve termal atalet gibi termofiziksel özellikleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Meteoritin ana gövdesinin termal evrimi ve atmosferik geçiş sırasındaki ısı transferi davranışı aydınlatılmıştır. Spesifik ısı kapasitesi $740 \pm 33 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, termal iletkenlik havada $2,6 \pm 0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve vakumda $1,8 \pm 0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, termal difüzyon ise havada $1,25 \pm 0,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ve vakumda $0,71 \pm 0,03 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu değerlerin, sıradan kondritlerin tipik termofiziksel özellikleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. %5,80'lik düşük gözenekliliğin, meteoritin sıkı ve yoğun bir yapıya sahip olduğu gösterilmiştir; bu, su ve diğer sıvıların iç kısımlara nüfuz ederek kimyasal değişime yol açma olasılığının azaldığına işaret edilmiştir. Troilit içeriğinin (%4,59 ağırlık), meteoritin önemli ölçüde oksidasyona veya sulu alterasyona uğramadığı ve mineral

bileşiminin büyük ölçüde korunduğu ortaya konmuştur. Bu bulgularla, meteoritin ana gövdesinin düşük alterasyonla korunduğu ve erken güneş sistemi koşullarının yansıtıldığı doğrulanmıştır.





3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde Bursa meteorit örneğinin analizinde kullanılan laboratuvar ekipmanları, analitik yöntemler ve deneysel uygulamalar tanıtılmıştır.

3.1. Materyal ve Örneğin Hazırlanması

Bu çalışmada incelenen numune, Bursa meteoritine ait yaklaşık 100 gramlık bir parçadır. Numune, Türkiye’de meteorit araştırmalarına öncülük eden Prof. Dr. Mehmet Emin Özel’den temin edilmiştir (Şekil 3.1). Bursa meteoritinin sınıflandırması Meteoritical Bulletin kayıtlarına göre L6 petrografik tipi ve S5 şok evresi olup sıradan kondrit grubunda yer almaktadır.



Şekil 3.1. Bursa L6 meteorit örneği

3.2. Deneysel Aşamalar ve Analitik Yöntemler

Bu çalışma kapsamında, numunenin yapısal, morfolojik ve dozimetrik özellikleri; XRD, SEM-EDS ve TL ölçüm sistemi gibi temel yöntemlerle analiz edilmiştir.

3.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) Sistemi

Numunenin mikro yapısal özellikleri ve elementel bileşim dağılımı, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda (ÇÜMERLAB) bulunan FEI Quanta 650 Field Emission SEM cihazı ile incelenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. ÇÜMERLAB' da Quanta 650 Field Emission SEM cihazı

Analizlerde 30 kV hızlandırma voltajı kullanılmış; yüzey görüntüleri ikincil elektron ve geri saçılmış elektron modlarında elde edilmiştir. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) sistemi ile elementlerinin örnek yüzeyindeki dağılımları haritalanmıştır.

Elektron demeti, örnek yüzeyine çarptığında çeşitli sinyaller üretir. Bu sinyaller dedektörler tarafından toplanır ve yüzey topografisi ile elementel bileşim haritası oluşturulur. SEM yöntemi, meteoritlerdeki şok etkisine bağlı mikro çatlakların, erime bölgelerinin ve mineraller arası dokusal ilişkilerin incelenmesine olanak sağlar.

3.2.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Sistemi

Numunenin mineral faz bileşiminin belirlenmesi amacıyla XRD analizi yapılmıştır. Analizler, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (ÇÜMERLAB) bünyesindeki PANalytical Empyrean XRD cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. ÇÜMERLAB' da PANalytical marka EMPYREAN XRD model XRD cihazı

X-ışını kırınımı, kristal yapıyı oluşturan atom düzlemleri arasındaki periyodik aralıklardan yansıyan X-ışınlarının yapıcı girişimi ilkesine dayanır. Bu girişim koşulu Bragg yasası ile ifade edilir:

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

Burada;

- n kırınım mertebesini,
- λ kullanılan X-ışınının dalga boyunu,
- d kristal kafes düzlemleri arası mesafeyi,
- θ ise kırınım açısını temsil eder.

Her kristal fazın kendine özgü d-aralıkları bulunduğundan, XRD analizinde ölçülen 2θ değerleri yardımıyla hesaplanan bu d-aralıkları fazların tanımlanmasında bir “yapısal parmak izi” görevi görür. Bu yöntem, numunedeki minerallerin tanımlanması ve kristal yapılarının belirlenmesi için temel karakterizasyon tekniği olarak kullanılır.

3.2.3. TL Ölçüm Sistemi

Numune öncelikle kırılma ve çizilmelere karşı dayanıklı agat havanda (Şekil 3.4) öğütülmüş ve planşete yerleştirilerek terazide tartım yapılacak şekilde hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.4. Öğütme işleminde kullanılan agat havan

Ardından tartım işlemi 0.001 mg hassasiyete sahip Precisa XB 220 A marka dijital hassas terazi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Precisa XB 220 A marka terazi

± 2 °C hassasiyete sahip Protherm PLF 14/50/450 marka fırın (Şekil 3.6) numunenin tavlama sıcaklığının ve süresinin belirlenmesinde kullanılmış sonrasında numune TL ölçümleri gerçekleştirilmek üzere TL ölçüm cihazına taşınmıştır.



Şekil 3.6. Isıl işlem için kullanılan Protherm marka fırın

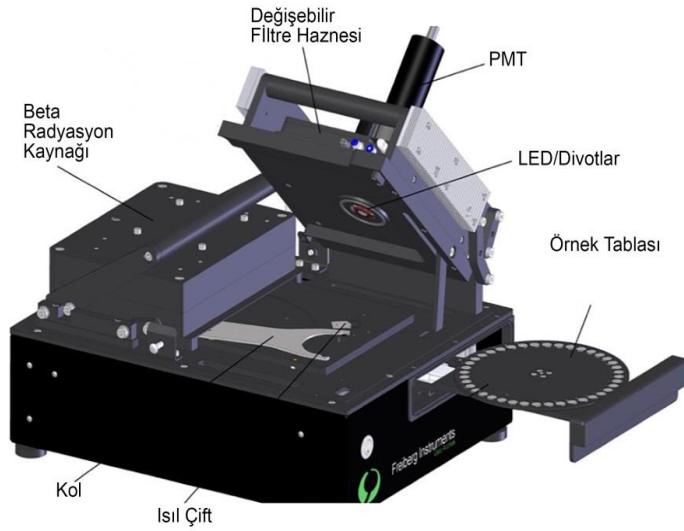
TL ölçümleri, Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü termoluminesans (TL)/ Optik uyarmalı Lüminesans (OSL) Dozimetri ve tarihlendirme Laboratuvarı'nda bulunan "Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu" cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz, 22 mm kalınlığında kurşun blok içinde yer alan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta radyasyon kaynağına sahiptir. Bu kaynak, numuneye kontrollü dozlarda radyasyon uygulayarak TL ölçümü için uyarım sağlar (Şekil 3.7).

Örnek tablası $710\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılabilir ve aynı anda 40 örnek ölçülebilir. Isıtma işlemi, thermocouple sensör ile sıcaklık geri bildirimini alınarak, sabit doğrusal ısıtma hızı ($\beta = 2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) altında gerçekleştirilmiştir. Numuneden yayılan ışığa, fotonları elektrik sinyallerine dönüştüren yüksek hassasiyetli fotokatlandırıcı tüp (PMT) tarafından tespit edilir. PMT'nin ölçüm aralığı 280–650 nm arasındadır. Gürültüyü azaltmak ve yalnızca istenen spektrumu ölçmek amacıyla PMT önüne optik cam filtreler yerleştirilir (Richter ve Kumar, 2014). Cihaz, LexStudio2 yazılımı aracılığıyla bilgisayara bağlı olarak çalışmakta; sıcaklık, doz, süre ve ölçüm parametreleri otomatik olarak kontrol edilmektedir.



Şekil 3.7. Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu cihazı

Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu, temel olarak beş ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar: örneklerin yerleştirildiği örnek tablası (karosel), numunelerin ışınlanmasını sağlayan beta radyasyon kaynağı, numunelerin ısı olarak uyarıldığı TL ünitesi, optiksel uyarımın gerçekleştirildiği OSL bölümü ve bu süreçlerde açığa çıkan fotonları algılayan fotoçoğaltıcı tüptür (PMT). Bu bileşenler birlikte çalışarak TL ve OSL ölçümlerinin hassas bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Lexsyg Smart TL/OSL okuyucunun temel bölümleri (Richter ve ark., 2015)

3.3. Deneysel Uygulamalar

Dozimetrik bir materyalin uygunluğu, deneysel ölçümler ve analitik değerlendirmelerin birleştirilmesiyle tayin edilir. Aşağıda, laboratuvar ortamında gerçekleştirdiğimiz deneyler ve bunların teorik arka planları uygulama sırasına uygun olarak listelenmiştir.

3.3.1. Tavlama (Annealing) Testi

Malzemelerin kristal yapılarında bulunan kusurlar, serbest elektronlar için birer tuzak görevi görür. Bu tuzaklarda biriken elektronları boşaltmak için tavlama (annealing) adı verilen bir işlem uygulanır. Bu işlem sırasında malzeme kontrollü bir şekilde ısıtılır. Ancak sıcaklığın doğru seçilmesi büyük önem taşır. Eğer sıcaklık yeterince yüksek değilse, tuzakların bir kısmı boşalmaz ve sonraki ölçümlerde artık (residual) sinyaller gözlenebilir. Tam tersine, sıcaklık gereğinden fazla olursa, kristal yapıdaki tuzak merkezleri kalıcı olarak hasar görebilir; bu durumda, ölçülen ışımaya şiddeti olması gerekenden düşük çıkar. Doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için, malzemenin tüm tuzaklarını boşaltırken yapısal bozulmaya yol açmayacak optimum tavlama sıcaklığı ve süresi titizlikle belirlenmelidir (Uzun, 2008; Oğuz, 2016). Bu amaçla, farklı örnekler belirli sıcaklıklarda ve sürelerde tavlansak TL ışımaya eğrileri kaydedilir. Elde edilen grafik analizleri sonucunda, tuzaklara zarar vermeden tüm elektronların boşalmasını sağlayan ideal sıcaklık ve süre değerleri belirlenir.

3.3.2. Filtre Testi

Dozimetrik amaçlarla kullanılan malzemeler ısıtıldıklarında, farklı frekans ve dalga boylarında ışık yayırlar. Ancak bu yayılım, sadece malzemeye özgü TL ışımaya değil, aynı zamanda cihaz kaynaklı parazitleri ve kara cisim ışımaya da içerebilir. Bu istenmeyen bileşenleri bastırmak ve sadece TL'ye ait sinyali seçmek için, belirli dalga boylarındaki ışığın geçişine izin veren optik filtreler (çoğunlukla renkli cam filtreler) kullanılır (Furetta, 2003). Bu filtreler, fotoçoğaltıcı tüp (PMT) önüne yerleştirilir ve sadece hedeflenen dalga boyu aralığındaki fotonların algılanmasına izin verir. Böylece, TL sinyali gürültüden arındırılmış olur ve ölçümün doğruluğu artar. Uygun filtre seçimi, özellikle çoklu tuzak sistemine sahip minerallerde (örneğin, farklı ışımaya merkezleri içeren feldspatlar veya olivin gibi minerallerde) pik ayırt edilebilirliğini ve sinyal-gürültü oranını önemli ölçüde iyileştirir.

3.3.3. Doz-Yanıt Deneyi

Doz-yanıt deneyi, TLD olarak kullanılacak malzemenin lineer doz-yanıt aralığını belirlemeyi amaçlar. Bu aralığın tespiti, malzemenin medikal dozimetri, çevresel izleme gibi hangi amaçlarla kullanılabileceğini tayin etmek açısından kritik öneme sahiptir. Radyasyon dozunun artması, kristal yapısındaki tuzaklara daha fazla elektronun iyonlaşarak taşınmasına yol açar. Bu elektronların termal enerjiyle serbest kalması ve yeniden birleşme merkezlerinde foton salınımı, ışımaya eğrilerinin tepe değerlerinin yükselmesine neden olur (Manam ve Sharma, 2003; Haghiri ve ark., 2013). Doz artışıyla ışımaya şiddeti arasındaki ilişkinin doğrusal olup olmadığı, eğrilerin tepe yükseklikleri veya altındaki alanların hesaplanmasıyla belirlenir.

Uygulanan doz ile TL sinyali arasındaki ilişki, $I = a \cdot D^b$ kuvvet yasası ile modellenebilir; burada I ışıma şiddetini, D uygulanan dozu, a malzemenin kristal yapısına bağlı bir katsayıyı ve b lineerlik katsayısını temsil eder. Logaritmik dönüşümle çizilen grafiğin eğimi, b değerini verir:

- $b=1$: Doğrusal (lineer) ilişki, ideal dozimetrik malzeme özelliği.
- $b<1$: Lineer altı (sublineer) ilişki, tuzak verimliliğinin düşmesi veya doyum.
- $b>1$: Lineer üstü (supralineer) ilişki, yeniden birleşme etkinliğinin artması.

Doz-yanıt deneyi, kinetik mertebenin ilk tahmininde de kullanılabilir. Farklı doz değerlerinde ışıma eğrisinin tepe maksimum sıcaklığı (T_m) ölçülür. Eğer T_m dozla değişmiyorsa (± 2 °C sınırları içinde), birinci mertebe kinetik geçerlidir; çünkü yeniden tuzaklanma ihmal edilir. T_m 'nin değişmesi ise ikinci veya genel mertebe kinetiği işaret eder. İkinci ve genel mertebe kinetiklerde, doz artışı tuzaklanmış elektron konsantrasyonunu artırır; bu da ısıtma sırasında elektronların yeniden tuzaklanma olasılığını yükselterek T_m 'nin düşük sıcaklıklara kaymasına neden olur. Ancak, kesin kinetik mertebe belirlemesi için daha kapsamlı analizler gereklidir.

Sonuç olarak, doz-yanıt deneyi, TLD malzemelerinin kalibrasyonu ve kullanım alanlarının (örneğin, medikal veya çevresel dozimetri) belirlenmesinde temel bir araçtır. Lineer doz aralığı ve kinetik mertebe bilgisi, malzemenin güvenilirliğini ve pratik uygulamalardaki doğruluğunu artırır.

3.3.4. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyi

Bir malzemenin TLD olarak kullanılabilmesi için, aynı koşullarda benzer ve kararlı bir tepki vermesi gerekir. Bu durum, malzemenin aynı radyasyon dozuna karşı her uygulamada tutarlı bir ışıma şiddeti üretmesiyle değerlendirilir. Belirli bir radyasyon dozu uygulanarak TL sinyali ölçülür ve bu ışınlama ile ölçüm işlemi yeterli sayıda (örneğin 10 döngü) tekrarlanır. Her ölçümde TL sinyalinin pik yüksekliği veya eğri altındaki alan belirlenir.

Elde edilen sonuçlar, bir referans değere göre normalize edilerek TL sinyalindeki yüzdelik değişim hesaplanır. Bu değişimin %5'ten küçük olması, malzemenin tekrar edilebilirlik açısından uygun olduğunu gösterir (Furetta, 2003).

3.3.5. Farklı Isıtma Hızları Deneyi

TLD olarak kullanılacak bir malzemenin farklı ısıtma hızlarına verdiği tepki, performansını değerlendirmede önemli bir parametredir. Farklı ısıtma hızları, elektronların tuzaklardan boşalma kinetiğini etkileyerek ışıma eğrisinin şeklini ve TL sinyalini değiştirir. Yüksek hızlarda, eğrinin tepe sıcaklığının yüksek sıcaklıklara kayması ve genişliğinin artması beklenir. TLD olarak kullanılabilirlik için, malzemenin farklı ısıtma hızlarında tepe sıcaklık değerleri ve ışıma eğrisi şeklinin önemli ölçüde değişmemesi gerekir.

Isıtma hızları ve ışıma eğrilerinin tepe maksimum sıcaklıkları (T_m) biliniyorsa, tuzaklara ilişkin kinetik parametreler—aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü (s)—pratik olarak hesaplanabilir. Çünkü T_m , E ve s 'nin bir fonksiyonudur. Birinci mertebeye kinetik eşitliği, ısıtma hızı (β) ve T_m cinsinden yeniden düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\ln\left(\frac{T_m^2}{\beta}\right) = \frac{E}{k} \cdot \frac{1}{T_m} + \ln\left(\frac{E}{ks}\right) \quad (3.2)$$

Bu eşitliğe göre $\frac{1}{kT_m}$ ye karşı $\ln\frac{T_m^2}{\beta}$ grafiği çizildiğinde oluşan doğrunun eğimi E_a , y eksenini kestiği nokta $\ln\left(\frac{E}{ks}\right)$ 'yi verir.

Farklı ısıtma hızlarında, dozimetrik malzemelerin TL özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda karşılaşılan bazı olaylar dikkat çekicidir. Bunlar ısısal gecikme (thermal lag) ısısal sönümlenme (thermal quenching) ve anormal ısıtma hızı etkisi (anomalous heating rate effect) şeklinde sıralanabilir (Chen ve McKeever, 1997).

Isısal gecikme (thermal lag): TL cihazındaki örneği ısıtan ısı-çift ile planşete yerleştirilmiş örnek arasında ısı akışının eş zamanlı gerçekleşmemiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda örnek, ısı-çift'in ulaştığı sıcaklığın gerisinde kalmaktadır. Isısal gecikme, TL ışıma eğrilerinin şeklinde ve tepe noktalarının konumlarında farklılaşmalara yol açar. Artan ısıtma hızlarında, genel olarak, tepe sıcaklıkları yüksek sıcaklıklara kayar, ışıma şiddeti düşer ve ışıma eğrileri genişler. Bu sayede malzemenin kinetik parametreleri (E_a , s ve kinetik mertebesi b) hakkında öncü değerlendirmeler de bulunulabilir.

Isısal sönümlenme (thermal quenching) ise tuzaklardan kurtulan elektronların ışıma yapmadan yeniden birleşme merkezlerine geçmesidir. Bu geçişler ışıma eğrisinde kaydedilmediğinden TL sinyalinde bir düşüşe neden olur. Yüksek ısıtma hızlarında ve sıcaklıklarda etkisi daha açık şekilde gözlenir.

Anormal Isıtma Hızı Etkisi (Anomalous Heating Rate Effect): Anormal ısıtma hızı, TL ışıma eğrilerinde beklenmedik davranışlara yol açabilen bir olgudur. Bu durum, ışıma eğrisinin tepe maksimum sıcaklığında (T_m) kaymalara, TL sinyalinde sıradışı değişikliklere (örneğin, tutarsız yoğunluk artışı veya azalış) veya diğer anormalliklere neden olabilir. Sebep olarak, yüksek ısıtma hızlarının tuzaklarla etkileşimi ve kristal yapısındaki heterojen tuzak dağılımları gibi faktörler öne çıkar. Bu olgu, kinetik parametrelerin doğru belirlenmesi için ek dikkat ve analiz gerektirir.

3.3.6. Isısal Temizleme ve Başlangıç Artış (Initial Rise) Yöntemi

Isısal temizleme, karmaşık ve sürekli tuzak yapılarını ayırtmada kullanılan önemli bir tekniktir. Bu yöntemde, ilk tepe sıcaklığının başlangıç değeri referans alınır, malzeme bu sıcaklığa

kadar ısıtılır. Ardından kısa bir süre bekletilip hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulur ve ışıma eğrisi kaydedilir. Bu işlem küçük sıcaklık artışlarıyla tekrarlanır. Her sıcaklık artışı yeni “durma sıcaklığı” (T_s) sıcaklığı olarak adlandırılır. Amaç, önceki sıcaklıklarda tuzakların boşalmasını sağlayarak ışıma eğrisine etkisini en aza indirmek ve ana eğriyi oluşturan bireysel piklerin tepe maksimum sıcaklıklarının (T_m) konumlarını belirlemektir. T_m değerleri doğrudan aktivasyon enerjileri ile ilişkili olduğundan, bu teknik tuzakların kinetik parametrelerinin bulunmasına dolaylı katkı sağlar. Başlangıç artış yöntemi ise, ışıma eğrisini kullanarak tuzak parametrelerinin (E ve s) analiz edilmesine olanak sağlayan güçlü bir tekniktir. Işıma eğrisi üzerinde, TL tepe maksimum sıcaklığına ulaşmadan önce ışıma şiddeti, sıcaklıkla düzenli ve öngörülebilir bir şekilde üssel olarak artar; bu, yöntemin temelini oluşturur. Tuzak konsantrasyonu (n), normalde sıcaklık (T) artışıyla üssel bir şekilde azalır. Ancak başlangıç artış yöntemi, T_m 'a ulaşmadan önceki bölgede, bu azalışın ihmal edilebilir derecede düşük olduğu durumlarda uygulanır. Özellikle ışıma eğrisinin maksimum yüksekliğinin %5 ile %15 aralığındaki bölgeye uygulandığında verimli sonuçlar elde edilir. Bu koşul altında, ışıma şiddeti (I) ile sıcaklık (T) arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$I = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte I , TL ışıma şiddetini, n_0 başlangıçtaki tuzaklanmış elektron konsantrasyonunu, s frekans faktörünü, E aktivasyon enerjisini (tuzak derinliği), k Boltzmann sabitini (8.617×10^{-5} eV/K) ve T ise mutlak sıcaklığı (Kelvin) temsil eder. Eşitlik (3.4) logaritmik forma dönüştürülürse

$$\ln(I) = \ln(n_0 s) - \frac{E}{kT} \quad (3.4)$$

elde edilir.

Başlangıç artış yöntemi, tuzak konsantrasyonunun değişmediğini varsaydığından n_0 sabittir. Eşitlik (3.3) 'de $\ln(I)$ 'nın $1/kT$ ye grafiği çizildiğinde eğimi $-E$ değerini verir. Eğim bilgisinden aktivasyon enerjisi (E) hesaplanabilir.

T_s verilerine karşı T_m grafiği çizilebileceği gibi, T_s 'lara karşı hesaplanan aktivasyon enerjileri için de bir grafik oluşturulabilir; bu aktivasyon enerjileri, Başlangıç Artış Yöntemi ile elde edilebilir. Bu grafik, bazı bölümlerinde düzlükler içeren merdiven şeklinde bir yapı sergiler. Düzlükler, her biri aktif bir tuzağı ve dolayısıyla ana ışıma eğrisini oluşturan bireysel ışıma eğrilerini temsil eder. Bu düzlük bölgeleri, tuzakların aktivasyon enerjilerinin sabit olduğu sıcaklık aralıklarını yansıtır ve bu plato sayıları, bireysel tepelerin sayısını belirlemek için analiz edilir.

3.3.7. Bilgisayarlı Işıma Eğrisi Ayırıştırma Yöntemi

Işıma eğrileri genellikle bir veya birkaç belirgin pikten oluşuyormuş gibi görünse de, gerçekte birçok bireysel pikin üst üste gelmesiyle meydana gelir. Kinetik parametrelerin doğru hesaplanabilmesi için bu bireysel piklerin birbirinden ayırıştırılması gereklidir. Bilgisayarlı Işıma Eğrisi Ayırıştırma (CGCD) yöntemi, bu ayırıştırma işlemini gerçekleştirmek amacıyla kullanılan bilgisayar destekli bir tekniktir. Bu yöntemde, ışımaya eğrisini oluşturan pikler uygun yazılımlar aracılığıyla bireysel bileşenlerine ayırıştırılır ve her bir pikin kinetik parametreleri belirlenir. Bu çalışmada, TL cihazından elde edilen verilerin ayırıştırma işlemi R-Stüdyo programında yer alan Termolüminesans Işıma Eğrisi Ayırıştırma (TGCD) paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.8. Sönüm (Fading) Deneyi

TLD olarak kullanılacak malzemeler, iyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakıldıktan belirli bir süre sonra, çevresel koşullara (örneğin sıcaklık, ışık ve nem gibi) bağlı olarak TL sinyallerinde azalma gösterebilir. Bu olaya sönüm (fading) denir. Sönüm miktarı, malzeme içindeki elektron tuzaklarının kararlılığıyla doğrudan ilişkilidir. Sönüm deneyleri ile dozimetrik amaçla kullanılacak malzemelerde tuzakların çevresel radyasyonu depolayabilme kapasiteleri değerlendirilmiş olur.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

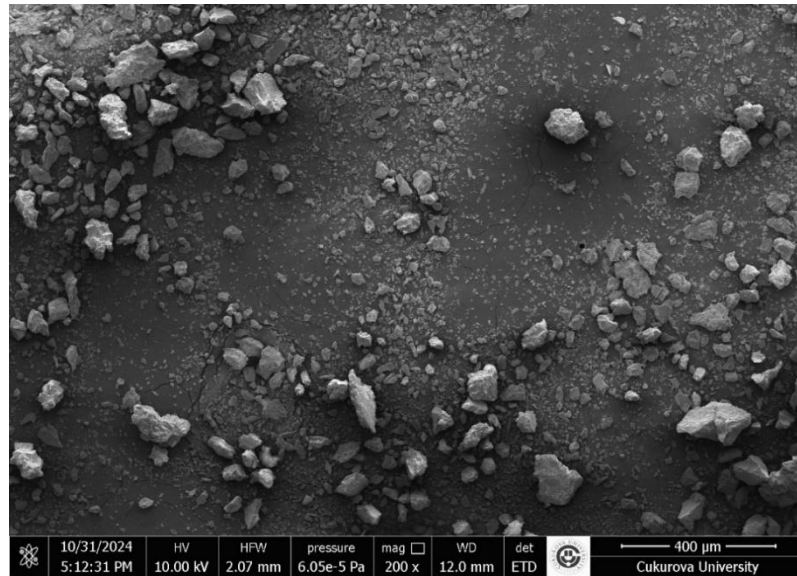
Bu bölümde laboratuvar ortamında gerçekleştirdiğimiz deneylerin sonuçları ve kapsamlı değerlendirilmesi uygulama sırasına göre sunulmuştur. Sırasıyla çalışılan örneğin SEM-EDS ile morfolojik ve element içeriğine ilişkin özellikleri belirlenmiştir. XRD analizi ile etkin mineraller belirlenmiş ve kristal yapıları incelenmiştir. Dozimetrik potansiyelinin değerlendirilmesi için TL yöntemi ile ölçümler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Daha sonra meteorit örneğinin doğal TL davranışı önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak Kozmik Radyasyon Yaşı (KRY) ve Günberi uzaklığı üzerine tahminde bulunulmuştur.

4.1. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM-EDS) Analizi

Meteoritin kimyasal analizi, ÇÜMERLAB' da bulunan FEI Quanta 650 Field Emission SEM modeli SEM cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, numunenin hem morfolojik yapısı hem de kimyasal bileşimi incelenmiştir.

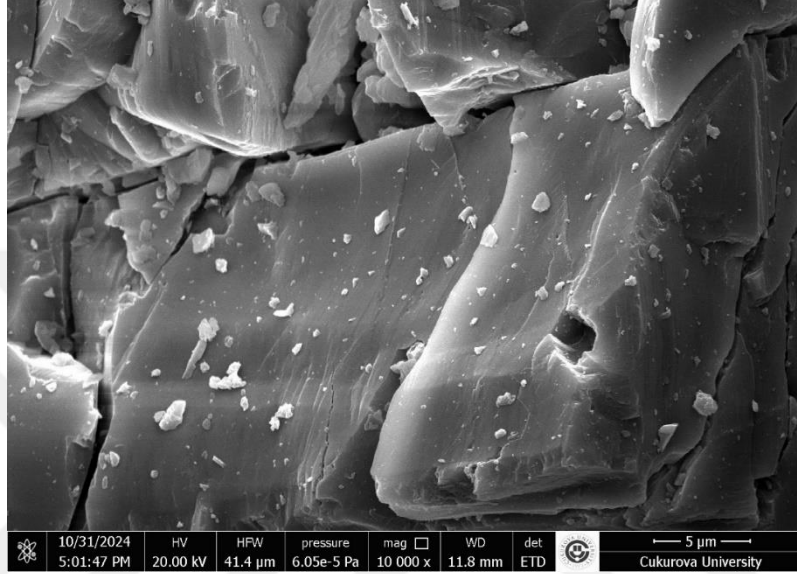
4.1.1. Genel Morfoloji

Düşük büyütme (400 µm) görüntülerinde, ince taneli bir matris içerisinde dağılmış yeniden kristalleşmiş malzeme gözlenmiştir (Şekil 4.1). Bu durum, meteoritin metamorfizmaya uğrayarak orijinal kondrül yapısını kaybettiğini göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda (750–950 °C) gerçekleşen bu süreçte, kondrüller ile matris arasındaki sınırlar belirsizleşmiş ve mineral yapılar homojenleşmiştir. Bursa meteoritinin L6 metamorfizma derecesi literatürde belirtilen bu yapısal değişimle uyumludur (Scott ve Jones, 1990).



Şekil 4.1. Bursa meteoritinin 400 µm ölçekte SEM-EDS görüntüsü

Yüksek büyütme (5 µm) görüntülerinde ise matris içerisinde parlak ve gri parçacıklar seçilebilmektedir (Şekil 4.2). Parlak bölgeler Fe-Ni alaşımları gibi metal fazlarını, gri bölgeler ise silikat minerallerini temsil etmektedir. Ayrıca, gözlenen mikro çatlaklar iç termal gerilimlerden kaynaklanabilirken, daha düzenli paralel çatlakların şok dalgaları sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Bu gözlemler, Bursa meteoritinin literatürde rapor edilen S5 şok derecesi ile uyum göstermektedir (Stöffler ve ark., 1991).

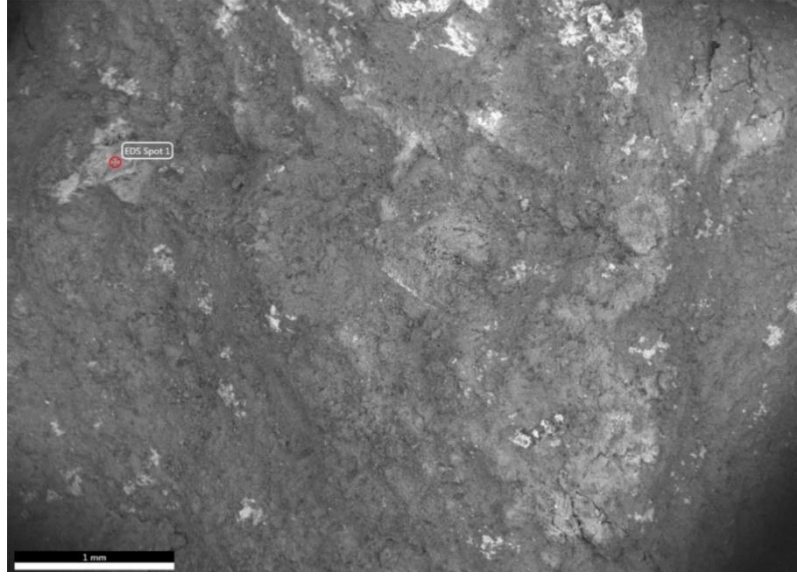


Şekil 4.2. Bursa meteoritinin 5µm ölçekte SEM-EDS görüntüsü

4.1.2. Kimyasal İçerik

Kimyasal element içeriğinin belirlenebilmesi için meteorit örneği üzerinden iki farklı noktanın SEM-EDS görüntüsü alınarak analizleri gerçekleştirilmiştir.

Silikatça zengin bölgede (Şekil 4.3) O, Mg, Si ve Fe elementleri baskın olup (O = %44,13, Mg = % 16,67, Si = %20,76, Fe = % 10,20), bu bileşim olivin [(Mg, Fe)₂SiO₄] ve ortopiroksen [(Mg, Fe)SiO₃] minerallerinin varlığı ile uyumludur (Çizelge 4.1). Literatürde Bursa L6'da yaklaşık %24–26 mol fayalit ve %20.8–21.38 mol ferrosilit içerikleri rapor edilmiştir (Ünsalan ve ark., 2020). Bu çalışmada elde edilen kimyasal element verileri de aynı şekilde olivin ve ortopiroksen varlığına işaret etmektedir.

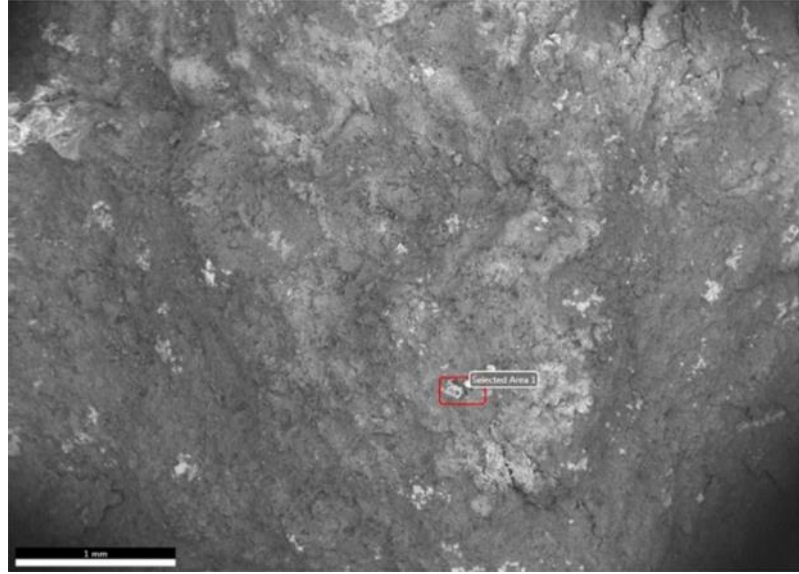


Şekil 4.3. Bursa meteorit numunesinin silikatça zengin bir bölgesi (EDS Spot 1)

Çizelge 4.1. Bursa meteoritinin Şekil 4.3'teki işaretli bölgede kimyasal element bileşenleri

Element	Ağırlık %	Atom %	Net Sayım
C K	6,50	10,92	28,22
O K	44,13	55,63	857,83
Mg K	16,67	13,83	738,14
Al K	0,64	0,48	27,80
Si K	20,76	14,91	1083,45
Ca K	1,08	0,54	42,45
Fe K	10,20	3,68	196,92

Metal içerikli bölgede ise (Şekil 4.4) yüksek Fe (%30.48) ve düşük Ni (%2.67) içerikleri tespit edilmiştir (Çizelge 4.2). Hesaplanan Fe/Ni oranı ≈ 11.4 (ağırlıkça) olup, bu oran kamasit varlığını işaret etmektedir. Literatürde belirtildiği üzere az miktarda taenit bulunması da olasıdır (Maksimova ve ark., 2021). Sülfür sinyali tespit edilmemiştir; bu durum analiz edilen küçük alan için Fe-sülfür fazlarının yokluğunu göstermektedir, ancak genelleme yapmak için yeterli değildir. Ayrıca Mg, Si, Ca ve Al elementleri silikat minerallerine işaret ederken, Na ve Al varlığı plajyoklazın şok etkisiyle camsı forma dönüşmüş hali olan maskelynite oluşumunu düşündürmektedir (Ünsalan ve ark., 2021).



Şekil 4.4. Bursa meteorit numunesinin metal bakımından zengin bir bölgesi (EDS Spot 2)

Çizelge 4.2. Bursa meteoritinin Şekil 4.4'teki işaretli bölgede kimyasal element bileşenleri

Element	Ağırlık %	Atom %	Net Sayım
C K	27,81	46,50	203,82
O K	24,69	31,00	346,56
Na K	1,68	1,47	29,73
Mg K	4,24	3,51	144,36
Al K	0,87	0,65	37,16
Si K	5,68	4,06	298,74
Ca K	1,88	0,94	82,57
Fe K	30,48	10,96	608,48
Ni K	2,67	0,91	39,25

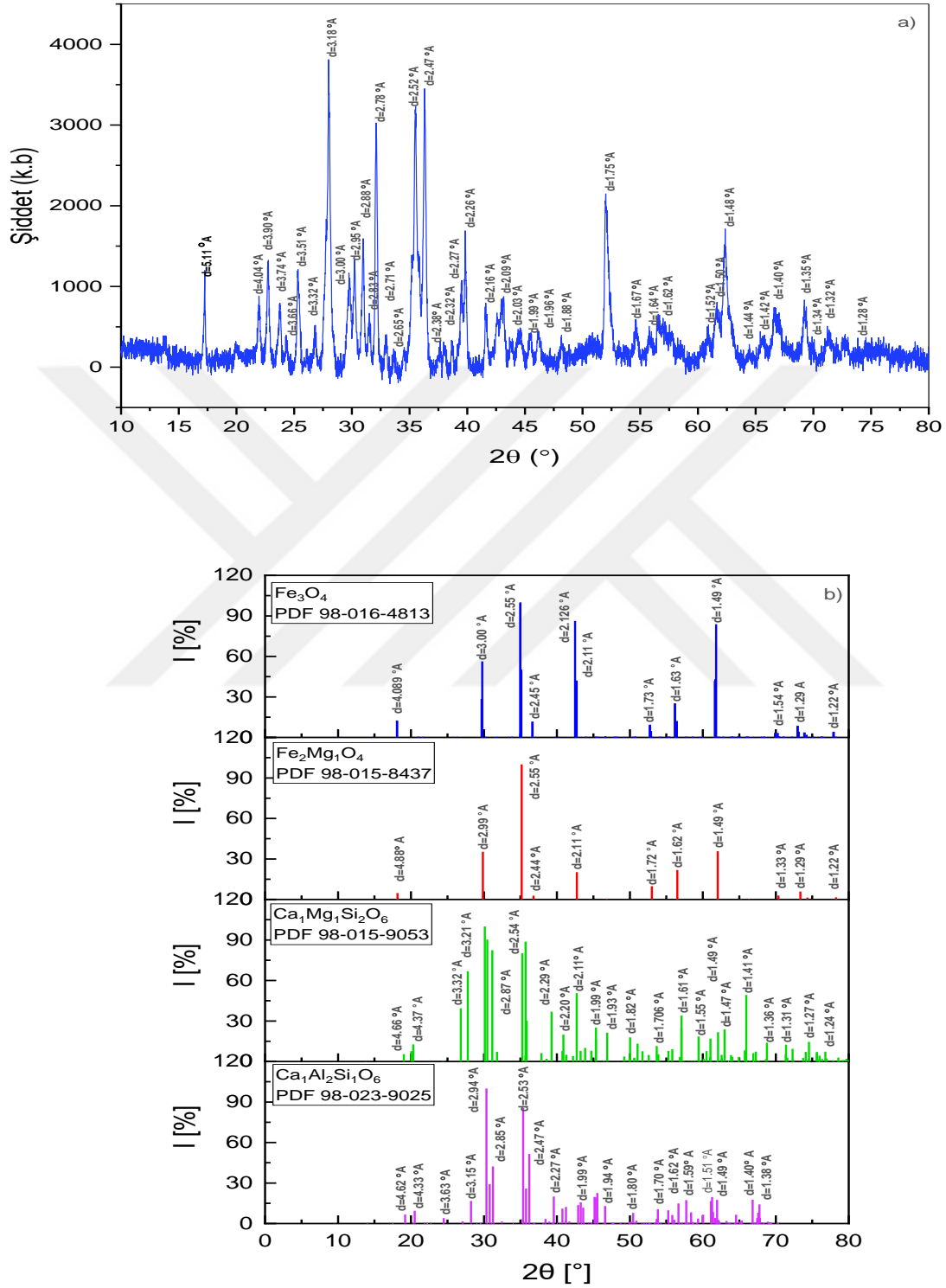
SEM-EDS sonuçları, Bursa meteoritinin silikat mineralleri (olivin, ortopiroksen, plajyoklaz/maskelynit) ve Fe-Ni metal fazlarını (özellikle kamasit, kısmen taenit) içerdiğini göstermektedir. Farklı bölgelerde farklı mineral zenginlikleri bulunması, meteoritin heterojen yapısını ortaya koymaktadır. Morfolojik ve kimyasal bulgular, Bursa meteoritinin L6 metamorfizma derecesi ve S5 şok derecesi ile literatürde rapor edilen özellikleriyle uyumludur.

4.2. XRD Ölçümleri

Meteoritin baskın mineral fazları ve kristal kafes yapısına ilişkin bulgular Çukurova Üniversitesi Merkez Laboratuvarında bulunan PANalytical EMPYREAN XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Bursa meteoritinin XRD analizi sonucunda baskın fazlar Kalsiyum-Alüminyum zincirli alümosilikat ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$), Diopsit ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), Manyezoferrit (Fe_2MgO_4) ve Magnetit (Fe_3O_4)

olarak belirlenmiştir (Şekil 4.5). Bu mineraller, meteoritin hem silikat fazlarını hem de oksit/spinel fazlarını temsil etmektedir.



Şekil 4.5. Bursa L6 meteorit örneğinin (a) ve başlıklarına ait (b) referansların XRD desenleri

Şekil 4.5'den görüleceği gibi Bursa meteoriti dört ayrı mineral PDF kartı ile uyumluluk göstermektedir. Bunlar; Fe_3O_4 (PDF 98-016-4813), $MgFe_2O_4$ (PDF 98-015-8437) , $CaMgSi_2O_6$ (PDF 98-015-9053), $Al_2Ca_1O_6Si_1$ (PDF 98-023-9025) 'dır.

Magnetit (Fe_3O_4), sıradan kondritlerde Fe-fazlarının oksidasyonu sonucu sıkça oluşan bir demir oksit mineralidir. XRD deseninde saptanması, Bursa meteoritinin oksidatif ve yüksek sıcaklık koşullarında yeniden kristalleştiğini göstermektedir. Kristal sistemi monoklinikdir.

Maneyzoferrit ($MgFe_2O_4$), spinel grubuna ait ve genellikle yüksek sıcaklık oksidasyon süreçleri sonucu oluşan bir mineraldir. XRD deseninde maneyzoferritin varlığı, Bursa meteoritinde ileri düzey termal metamorfizma ve şok etkisinin belirgin olduğunu göstermektedir. Kristal sistemi kübiktir.

Diopsit ($CaMgSi_2O_6$), piroksen grubuna ait yaygın bir klinopiroksendir ve sıradan kondritlerde sıkça gözlenir. Bursa meteoritinin XRD deseninde belirgin şekilde tespit edilmesi, L6 grubuna ait kondritlerde beklenen mineralojik bileşimi doğrulamaktadır. SEM-EDS sonuçlarında Mg, Si ve Ca elementlerinin belirlenmesi, diopsit mineralinin varlığını desteklemektedir. Kristal sistemi monoklinikdir.

Kalsiyum-Alüminyum zincirli alüminosilikat ($Al_2Ca_1O_6Si_1$), XRD deseninde baskın olarak belirlenen Ca-Al zengin bir klinopiroksen bileşimi olup, şok ve termal metamorfizma sırasında plajiyoklazın yeniden kristalleşmesiyle ilişkili bir faz olarak değerlendirilmektedir. Bu bulgu, Bursa meteoritinin yüksek derecede termal metamorfizma ve şok etkisine maruz kaldığını düşündürmektedir. Kristal sistemi anortiktir.

Genel olarak, XRD bulguları Bursa meteoritinin hem yüksek sıcaklık ve şok etkilerine maruz kaldığını hem de silikat ve oksit fazlarının dengeli bir bileşime sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, meteoritin L6 şok derecesi (S5) ve metamorfizma geçmişi ile tutarlı bir mineralojik yapıya işaret etmektedir.

4.3. Termoluminesans Karakterizasyonuna İlişkin Bulgular

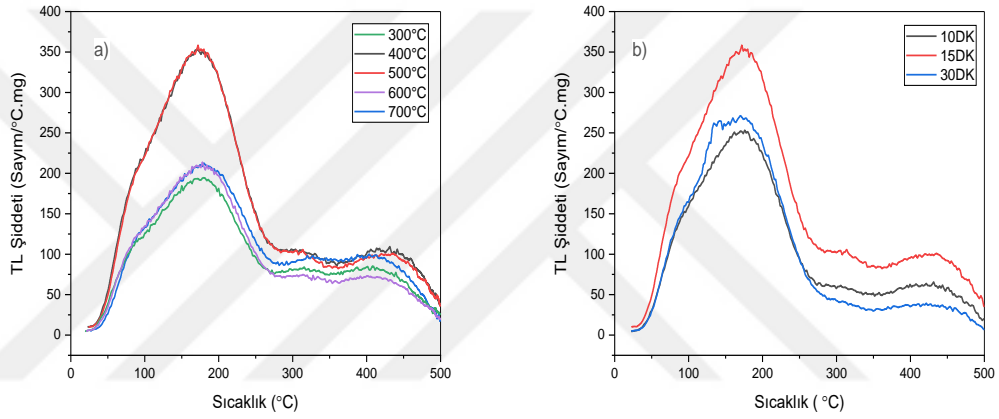
Bu çalışmada, Bursa meteoritinde TL yöntemi; örneğin dozimetrik olarak kullanılabilirliğini değerlendirmek, kozmik radyasyon yaşını belirlemek ve yörüngesel günberi uzaklığını tahmin etmek amacıyla uygulanmıştır. Bu hedeflere ulaşmak için gerekli deneysel işlemler gerçekleştirilmiş, elde edilen TL verileri çeşitli modeller kullanılarak aktivasyon enerjisi (E), frekans faktörü (s) ve kinetik mertebe (b) gibi kinetik parametreler hesaplanmıştır.

4.3.1. Tavlama (Annealing) Testi

Tavlama optimizasyonu; malzemenin tuzak yapısının kararlı hale getirilmesi ve önceki etkilerden arındırılması amacıyla uygun tavlama sıcaklığı ve sürenin belirlenmesi işlemi kullanılmıştır.

Bu amaçla, uygun tavlama sıcaklığı için malzeme farklı sıcaklıklarda (300, 400, 500, 600 ve 700 °C) 15 dk bekletilmiş; ardından her sıcaklık için 10 Gy doz uygulanarak yeniden ışımaya eğrileri kaydedilmiştir. Şekil 4.6.a, uygun tavlama sıcaklığının 500 °C olduğunu göstermektedir. Bu sıcaklığın, malzemenin kristal yapısını optimize ederek maksimum TL sinyalinin sağladığı söylenebilir.

Benzer şekilde, malzeme 500 °C sıcaklıkta sırayla 10, 15, 30 dk bekletilmiş; ardından her bekleme süresi sonunda 10 Gy doz verilerek ışımaya eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.6.b, 15 dk bekletilme süresinde örneğin en yüksek TL ışımaya şiddeti verdiğini göstermektedir. Bu, 15 dakikanın tuzak merkezlerini en verimli şekilde aktive ettiğine ve radyasyon dozuna karşı en güçlü yanıtı verdiğine işaret eder. Dolayısıyla örnekler 500 °C'de 15 dk tavlansın TL ölçümlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.6. Maksimum TL ışımaya şiddeti için uygun tavlama sıcaklığının (a) ve süresinin (b) optimizasyonu

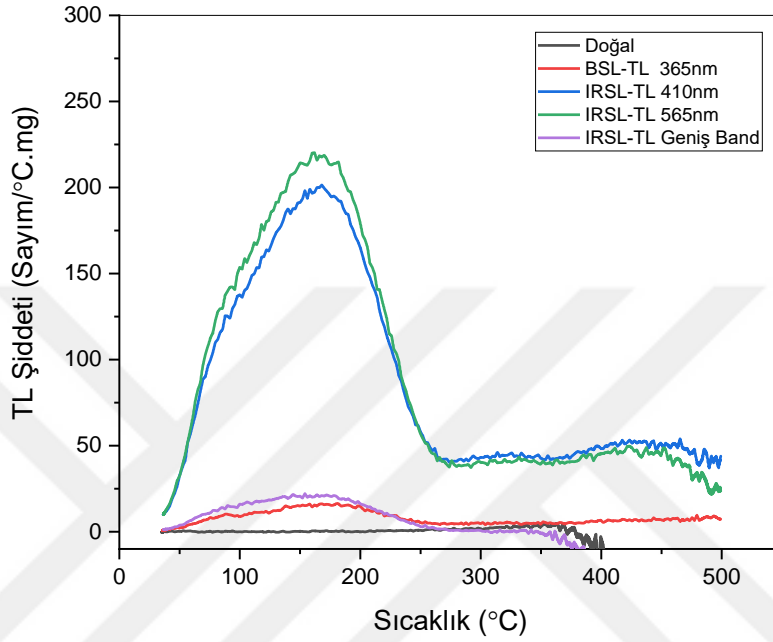
4.3.2. Filtre Testi

Bursa meteoriti gibi doğal malzemeler, yapıları itibarıyla çok sayıda farklı mineral ve kristal kafes kusurları içerir. Bu heterojen yapı, malzemenin radyasyon dozuna karşı karmaşık bir TL ışımaya eğrisi vermesine neden olur.

TL analizi, depolanan radyasyondan kaynaklanan ışığın analizine dayandığı için, en verimli ve temiz sinyalin elde edileceği dalga boyunu belirlemek büyük önem taşır. Bu amaca ulaşmak için dört farklı filtre kombinasyonu kullanılarak filtre testi yapılmıştır:

- TL geniş bant (IRSL, TL)
- 365 nm (BSL, TL)
- 410 nm (IRSL, TL)
- 565 nm (IRSL, TL)

Filtre testini gerçekleştirmek için meteorit parçasına 5 Gy beta test dozu verilmiş ve numune, 2 °C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 500 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Her filtre kombinasyonu için oluşan ışımaya eğrileri kaydedilmiş ve maksimum ışımaya şiddetleri veya eğri altındaki alanlardan 565 nm (IRSL, TL) filtre kombinasyonu altında en yüksek TL sinyali elde edilmiştir (Şekil 4.7). Bundan sonraki deneylerimiz bu filtre kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



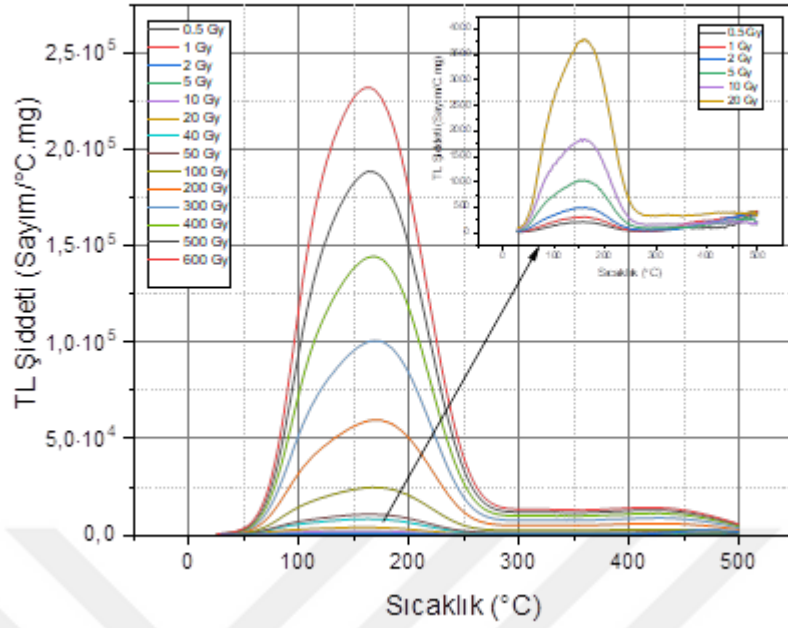
Şekil 4.7. Bursa meteoriti örneklerinin farklı filtre kombinasyonları kullanılarak elde edilen TL ışımaya eğrileri

4.3.3. Doz Yanıt Deneyine İlişkin Bulgular

Bursa meteorit örneklerine (7,3 gram), 0.5-600 Gy aralığında değişen beta dozları uygulanmıştır. 2°C/s'lik sabit ısıtma hızında, oda sıcaklığından 500°C'ye kadar 565 nm filtre kombinasyonu altında ısıtma yapılarak her doz için ışımaya eğrileri kaydedilmiştir (Şekil 4.8).

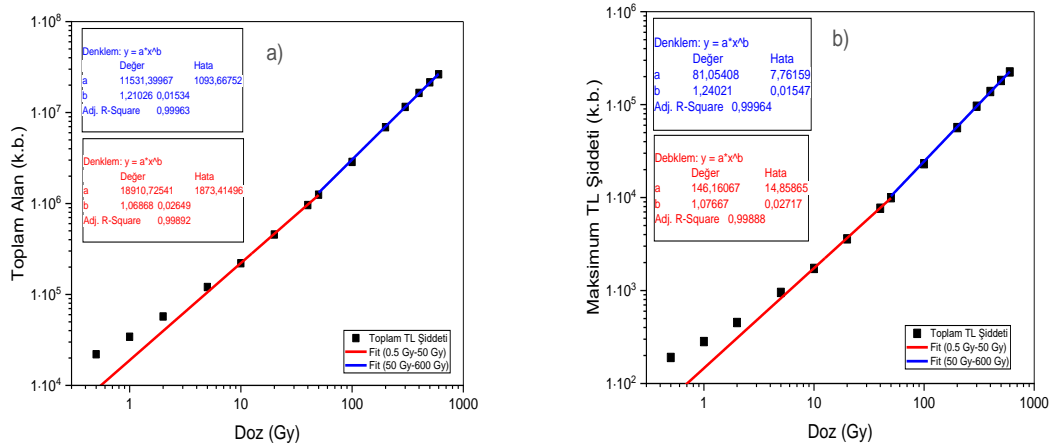
Bursa meteorit örneklerine 0.5-600 Gy aralığında beta dozu uygulandığında, ışımaya eğrisi düşük sıcaklıkta (yaklaşık 160 °C) oldukça belirgin ve baskın bir tepeden ve daha yüksek sıcaklıklarda artan dozla belirginleşmeye başlayan zayıf bir tepeden oluşmaktadır. Ölçümlerde örnekler daha yüksek beta dozları uygulandığında PMT (Fotokatlayıcı tüp)'nin okuyabileceği üst limitin üzerine çıktığından sinyal kaydı gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle bu deneyde en fazla 600 Gy'lik doz uygulanmıştır.

Şekil 4.8'deki ışımaya eğrisi incelendiğinde, radyasyon dozu arttıkça ışımaya şiddetinin de düzenli olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca maksimum tepe sıcaklıkları, meteorit malzemenin termal kararlılığına dair önemli bilgiler verir. Bu sıcaklıklar, tuzaklanan elektronların aktivasyon enerjileri ile doğrudan ilgilidir.



Şekil 4.8. Bursa Meteorit örneğine farklı radyasyon dozlarının uygulanması sonucu oluşan TL ışıma eğrileri

Doz ile birlikte TL sinyalindeki artışın doğrusallığını daha doğru bir şekilde belirlemek amacıyla her doza karşı ışıma eğrisinin altındaki alanların ve maksimum TL ışıma şiddet grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.9.a ve b).



Şekil 4.9. Uygulanan doza karşı ışıma eğrilerinin altında kalan alanların (a) ve maksimum TL ışıma şiddetlerinin (b) doğrusallık ilişkisi (Eksenler logaritmik ölçektedir).

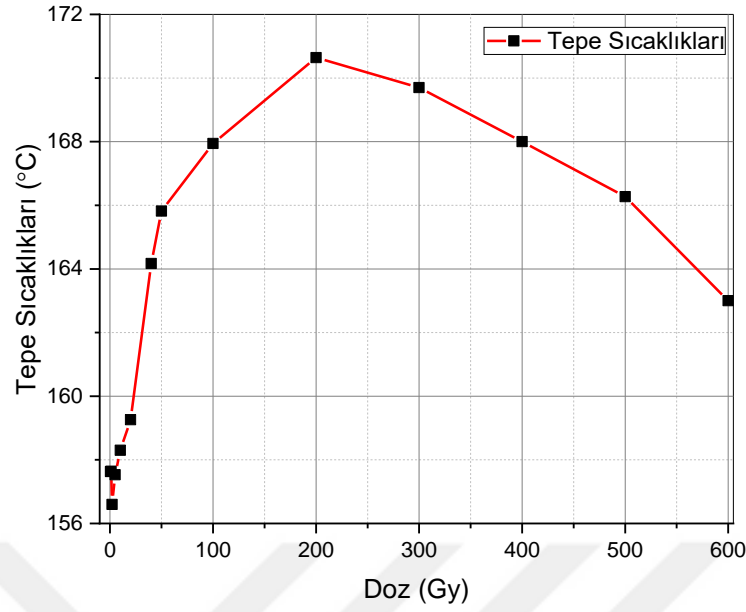
0,5 Gy ile 50 Gy doz aralığında, ışıma eğrilerinin altında kalan alanların lineerlik indeksi $b=1,06$ olup ideal lineerlik indeksinden ($b=1$) %6 oranında büyüktür. Benzer şekilde, Doz-Maksimum TL Şiddeti grafiği eğimi ($b=1,07$) ideal eğimden %7 oranında büyüktür. Her iki durum

için veri noktalarının fit doğrusu ile uyum içerisinde olduğu, korelasyon katsayısının ($R^2=0.998$) yüksek olmasından anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda 0,5 Gy-50 Gy doz aralığında TL sinyal üretimi uygulanan doz ile lineer bir artış göstermektedir.

50 Gy ile 600 Gy arasındaki doz artışıyla, ışına eğrilerinin altındaki alan da artmıştır. Bu bölgede lineerlik indeksi yaklaşık $b=1,21$ olup ideal durumdan yaklaşık %21 oranında yüksektir. Benzer bir durum, doz artışına bağlı maksimum TL ışına şiddetindeki artış oranında da gözlemlenmektedir. Doz-Işıma şiddeti lineerlik indeksi $b=1,24$, ideal durumdan yaklaşık %24 oranında daha yüksektir. Bu doz aralığında, lineerlik indeksinin her iki durum için (Doz-Alan, Doz-TL şiddeti) ideal durumdan (%20'den fazla) sapma göstermesi, TL sinyal üretiminin doz artışından orantısız olarak daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum 'Lineerüstü davranış' olarak adlandırılır. 'Lineerüstü' olgusu, tuzaklanan elektronların ısıyla serbest kalması sonucu yeniden tuzaklanması ve karmaşık rekombinasyon süreçlerine dair önemli bir göstergedir. Bu nedenle, maruz kalınan dozu ölçmede bu bölgeye ait veriler genellikle kullanılmaz.

Sonuç olarak, Bursa meteorit örneği uygulanan doz artışına bağlı olarak TL sinyali depolayabilme potansiyeline sahiptir. Lineerüstü özelliklere sahip olsa da özellikle 0,5-50 Gy doz aralığında lineer bir karaktere sahiptir. Bu sonuçlar ışığında, sadece doz-cevap deneyinin sonuçlarına göre karar verecek olursak Bursa meteoriti, nispeten yüksek radyasyonlu alanlarda kullanılabilir bir potansiyele sahiptir diyebiliriz.

Uygulanan doza karşı TL ışına eğrilerinin tepe maksimum sıcaklıklarının (T_m) konumu, TL sürecinin kinetik mertebesini belirlemede önemli bir parametredir (Furetta, 2003; McKeever ve ark.,1985). Kinetik mertebeye, tuzaklardan serbest kalan elektronların yeniden tuzaklanma ve yeniden birleşme merkezleriyle birleşme mekanizmaları hakkında kritik bilgiler sağlar. Ayrıca, tuzaklar arasındaki karmaşık etkileşimler kinetik mertebeye doğrudan ilişkilidir. Birinci mertebeye kinetiklerde ($b=1$), doz artışı tepe sıcaklıklarının konumunda değişikliğe yol açmaz, çünkü bu modelde serbest kalan elektronların tamamı tekrar tuzaklanmadan yeniden birleşme merkezleriyle birleşerek ışığa dönüşür. Bu, ideal bir durumu yansıtır. Ancak, meteoritler gibi doğal malzemeler, karmaşık tuzak seviyeleri ve bu seviyeler arasındaki etkileşimler nedeniyle genellikle birinci mertebeye davranış göstermez (Furetta, 2003; McKeever ve ark., 1985). İkinci mertebeye ($b =2$) ve genel mertebeye ($1 < b < 2$) kinetiklerde doz artışı ile farklı tuzak seviyelerinde yeniden tuzaklanma olasılıkları yükselir ve tepe maksimum sıcaklıkları kayar. Bu bağlamda, Bursa meteorit örneğinin Şekil 4.8'de sunulan farklı dozlara karşı TL ışına eğrilerinin T_m değerleri belirlenmiştir ve Şekil 4.10'de sunulmuştur.



Şekil 4.10. Farklı dozlarda TL ışımaya eğrilerinin tepe maksimum T_m sıcaklıkları

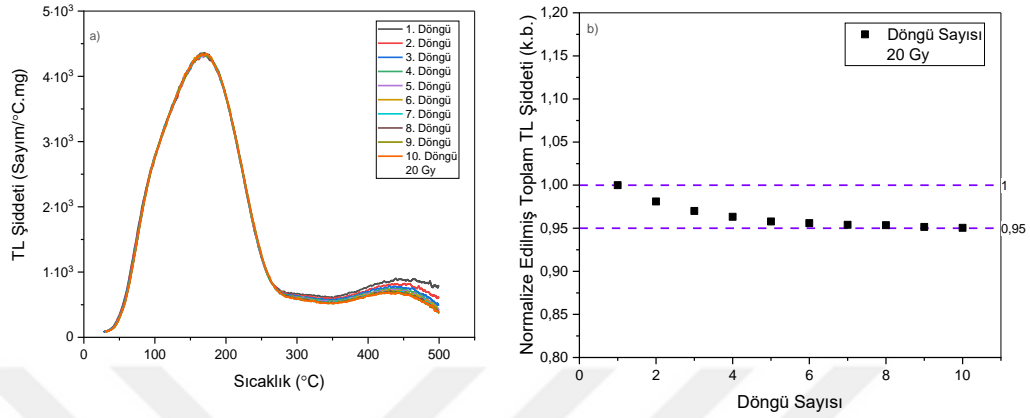
0,5 Gy ile 200 Gy arasında uygulanan dozlarda, TL eğrilerinin T_m değerleri genel olarak yüksek sıcaklıklara kaymıştır (157,63°C'den 170,64°C'ye). 200 Gy ile 600 Gy arasında ise düşük sıcaklıklara doğru bir kayma gözlenmiştir (170,64°C'den 163°C'ye). Bu davranış, standart birinci mertebe ($b=1$) kinetik modelleriyle açıklanamaz. T_m 'nin önce artıp sonra düşmesi, tek tip bir tuzak yapısından ziyade çoklu tuzak seviyelerinin varlığını ve doz bağımlı dolun dinamiklerini ortaya koyar. 0,5–200 Gy aralığında T_m 'nin yükselmesi, doz artışıyla daha derin tuzakların dolmasıyla ilişkilidir (Furetta, 2003). 200–600 Gy aralığında ise T_m 'nin düşmesi, derin tuzakların doygunluğa ulaşması ve sığ tuzakların baskın hale gelmesiyle açıklanabilir.

4.3.4. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyine İlişkin Bulgular

İdeal bir TLD malzemenin her ölçüm döngüsünde kararlı bir ışımaya eğrisi göstermesi ve hassasiyetinin değişmemesi beklenir. Bu beklentiyi karşılayan malzemeler, tekrar kullanılabilir malzemeler olarak nitelendirilir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneylerde, malzemeye laboratuvar ortamında sabit bir radyasyon dozu uygulanır; ardından sabit bir ısıtma hızıyla belirli sıcaklıklara kadar ısıtılarak ışımaya eğrileri kaydedilir. Bu işlem, aynı koşullar altında belirli sayıda art arda tekrarlanır.

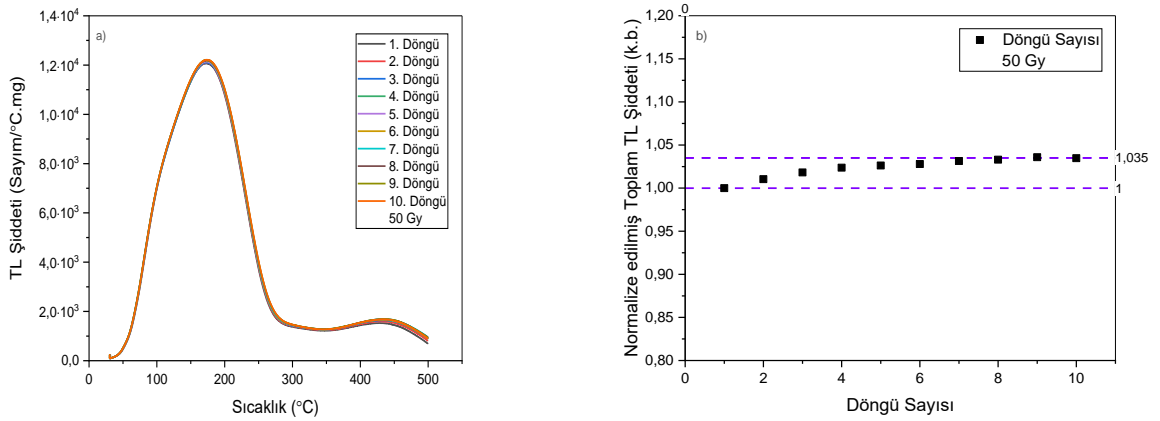
Kaydedilen ışımaya eğrilerinin altındaki alanlar veya ışımaya şiddetleri kullanılarak normalize edilmiş dağılım grafikleri oluşturulur. Elde edilen veriler doğrusal olarak fit edilerek ölçüm hassasiyetinde bir değişim olup olmadığı değerlendirilir. Böylece, malzemenin tekrar kullanım açısından uygun olup olmadığına karar verilir. Bu yöntem Bursa meteoritine uygulanarak, örneğin tekrar kullanılabilirlik özelliği deneysel olarak değerlendirilmiştir.

20 Gy doz altında ardışık 10 döngüde TL sinyal seviyesinde bir miktar düşme gözlenmiştir. Normalize TL sinyalinin döngü sayısına göre değişimi grafik üzerinde gösterildiğinde, sinyal kaybının %5 civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Bu kayıp, literatürde kabul edilebilir sınırlar arasındadır (Furetta, 2003).



Şekil 4.11. Her döngüde (20 Gy doz uygulandığında) oluşan ışıma eğrileri (a) ve normalize edilmiş TL şiddeti değişimi (b)

50 Gy doz altında ardışık 10 döngüde, ardışık 10 kez uygulanan 20 Gy doz döngüsünün aksine TL sinyal seviyesinde bir miktar artış gözlenmiştir. Her döngüde elde edilen normalize edilmiş toplam TL sinyalinin değişimi grafik üzerinde gösterildiğinde, sinyal artışının yaklaşık %3,5 civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.12). Bu artış kabul edilebilir sınırlar içerisinde.

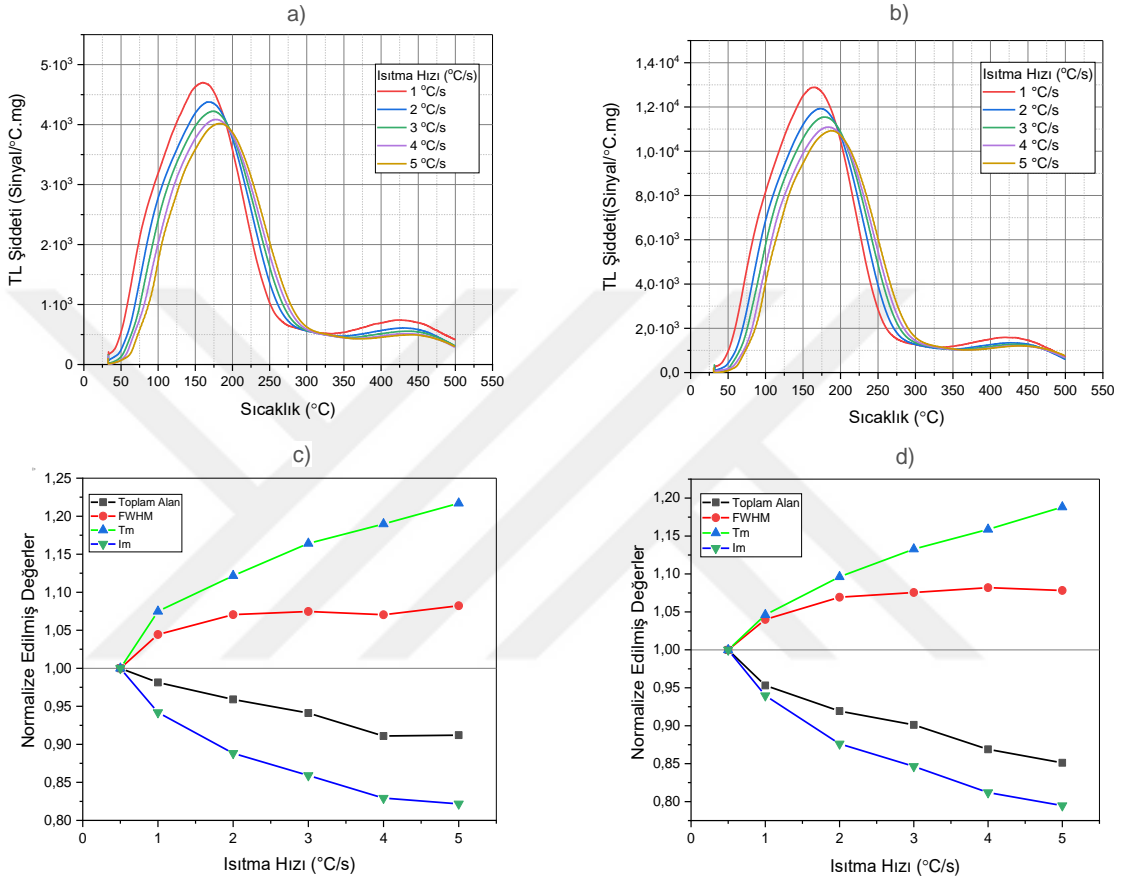


Şekil 4.12. Her döngüde (50 Gy doz uygulandığında) oluşan ışıma eğrileri (a) ve normalize edilmiş TL şiddeti değişimi (b)

Bursa meteorit örneğinin tekrar kullanılabilirlik deneyi sonuçları, TLD olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. 20 Gy'de %5 sinyal kaybı ve 50 Gy'de %3.5 sinyal artışı literatürde kabul edilebilecek sınırlar arasında yer almaktadır.

4.3.5. Farklı Isıtma Hızları Deneyine İlişkin Bulgular

İşıma eğrilerinin şekli, tepe maksimum sıcaklıklarının konumları ve ışıma şiddetleri farklı ısıtma hızlarında farklı davranışlar sergiler. Yüksek ısıtma hızlarında genellikle tepe maksimum sıcaklıkları yüksek sıcaklıklara doğru kayar, ışıma şiddetleri azalır ve maksimum pik yüksekliklerinin yarı genişlikleri artar (Kitis ve ark., 1993; Kitis ve Tuyn, 1998). Bu farklılaşmalar, aktivasyon enerjisinin (E) ve frekans faktörünün (s) hesaplanmasına olanak tanır.



Şekil 4.13. Farklı Isıtma Hızlarında 20 Gy (a) ve 50 Gy (b) beta dozu verilen örneğin ışıma eğrileri ve bu eğrilerden sırasıyla elde edilen toplam alan, yarı tepe genişliği (FWHM), maksimum TL şiddeti ile tepe maksimum sıcaklığı (T_m) değerleri (c) (d)

Şekil 4.13.a ve b'de meteorit örneğine 20 Gy ve 50 Gy beta radyasyon dozu uygulanması sonucunda 1, 2, 3, 4 ve 5 °C/s'lik farklı ısıtma hızlarında elde edilen ışıma eğrileri gösterilmektedir. Literatürle uyumlu olarak yarı tepe genişliği (FWHM) ve tepe sıcaklıkları (T_m) artış gösterirken, ışıma şiddeti (I_m) ve ışıma eğrisi altında kalan alan azalmaktadır.

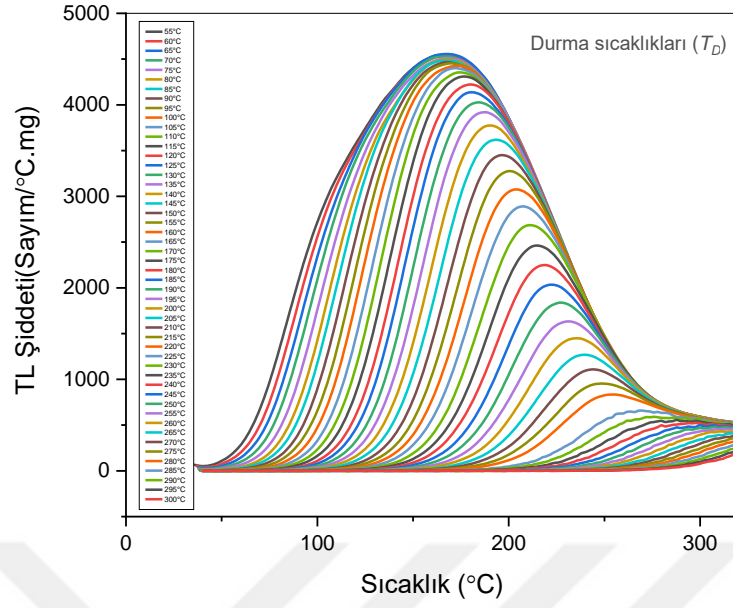
20 Gy doz maruziyeti altında T_m sıcaklıkları %17,82; FWHM değerleri %7,60 oranında artmış, I_m değerleri %17,83 ve eğri altında kalan toplam alan %8,91 oranında azalmıştır (Şekil 4.13.c). Benzer şekilde 50 Gy doz maruziyeti altında T_m sıcaklıkları %15,50; FWHM %7,58 oranında artmış, I_m değerleri %20,53 ve eğri altında kalan toplam alan %14,89 oranında azalmıştır (Şekil 4.13.d). Bu değişimler, maksimum ve minimum değerler arasındaki farkı yansıtmaktadır. Sonuçlar

değerlendirildiğinde, her iki doz için de (20 Gy ve 50 Gy) farklı ısıtma hızlarında elde edilen ışımaya eğrilerinin benzer davranışlar sergilediği görülmektedir.

Artan ısıtma hızlarında tepe maksimum sıcaklıklarının yüksek sıcaklıklara kayması beklenen bir TL davranışıdır. Ancak bazı durumlarda bu kayma miktarı beklenenden daha fazla olabilir. Bu olgu literatürde ısısal gecikme (temperature lag) olarak adlandırılır (Kitis ve ark. 1993; Kitis ve Tuyn, 1998). Bu durum, ısı çifti ile planşetteki malzeme arasında ısı alışverişinin eş zamanlı gerçekleşmemesinden kaynaklanır. Planşetteki malzemenin sıcaklık artışı, ısı çiftinin sıcaklık artışının gerisinde kalır ve bunun sonucunda T_m daha yüksek sıcaklıklara kayar. Artan ısıtma hızlarında tepe maksimum sıcaklıklarının yüksek sıcaklıklara kayması ile I_m ışımaya şiddetinin düşmesi (sayım/°C birimi altında) beklenir. Bu davranışla birlikte pik yüksekliğinin yarı genişliği (FWHM) artar; bu nedenle, ışımaya eğrisinin altında kalan alanın değişmemesi beklenir. Ancak hem 20 Gy hem de 50 Gy doz uygulandığında yüksek ısıtma hızlarında eğri altındaki alanın azaldığı görülmektedir. Toplam alanın azalması, lüminesans verimliliğinin azaldığını gösterir. Bu durum, genellikle yüksek ısıtma hızlarında tuzaklardan serbest kalan elektronların ışımasız geçiş yapmasına bağlanır ve ısısal sönmüleme (thermal quenching) olarak adlandırılır (Dogan ve ark., 2017; Bulcar ve ark., 2018).

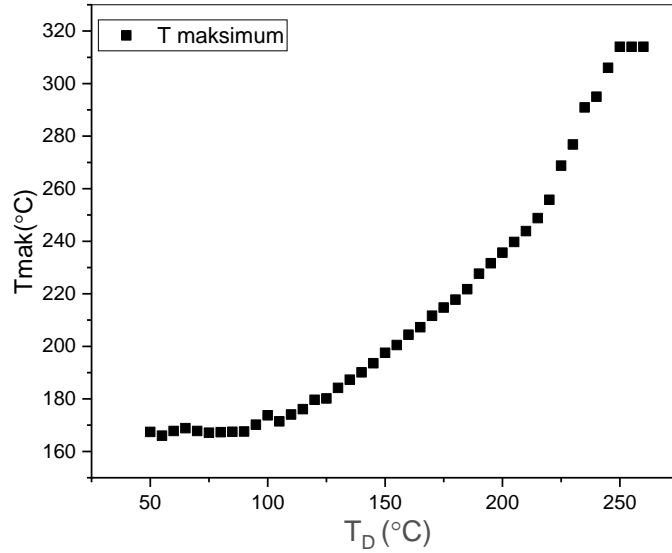
4.3.6. Isısal Temizleme ve Başlangıç Artış Yöntemi

Bu deneyde, 500°C'de 15 dakika tavllanmış Bursa meteorit örneğine 20 Gy sabit beta dozu uygulanmıştır. Ardından, ısıtma hızı 2°C/s olarak ayarlanarak ısısal temizleme yöntemi uygulanmış ve her durma sıcaklığında (T_D) TL ışımaya eğrileri ile tepe maksimum sıcaklıkları (T_{mak}) belirlenmiştir. İlk T_D sıcaklığı 50°C'den başlayarak 5°C artışlarla son T_D sıcaklığı 375°C'ye kadar ulaşılmıştır. Her durma sıcaklığında 10 saniye beklenmiş, ardından örnek hızlıca oda sıcaklığına soğutulmuştur. Elde edilen ışımaya eğrileri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Bursa meteorit örneğinin 5°C'lik artışlarla 50°C - 300°C aralığında ön ısıtma sıcaklıklarına ait ışıma eğrileri

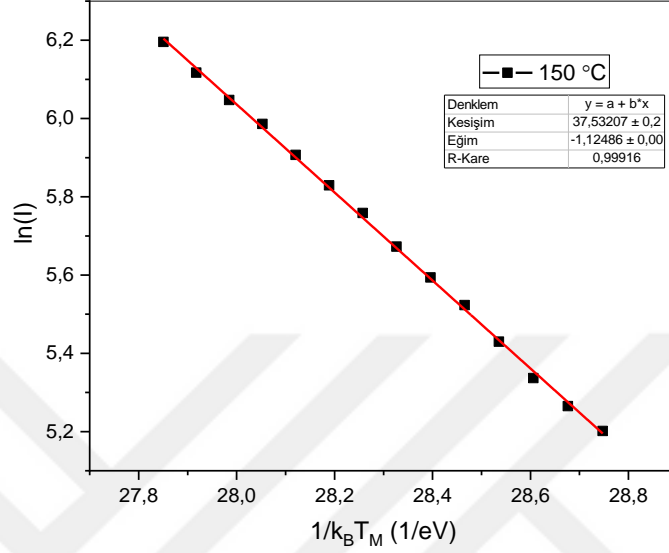
Isısal temizleme işlemi sonucu, 50 - 300 °C T_D sıcaklık aralığında oluşan ışıma eğrilerinin maksimum sıcaklıkları T_{mak} değişimi incelenmiştir (Şekil 4.15). Şekil, ana ışıma eğrisinin birbirine yakın pek çok bireysel ışıma eğrisinden oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.15. T_D sıcaklıklarına karşı oluşan ışıma eğrilerinin T_{mak} sıcaklıkları

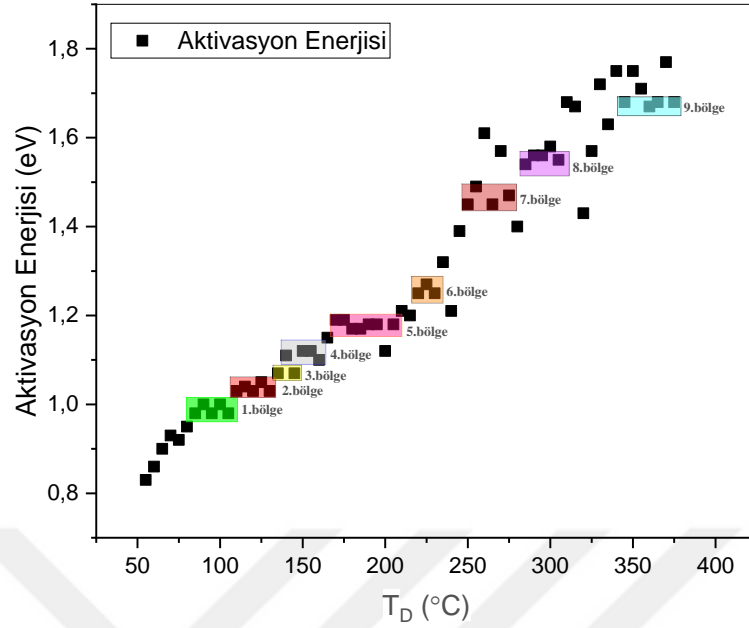
Ardından ısısal temizleme işleminden geçmiş ışıma eğrilerine başlangıç artış yöntemi uygulanmış ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Bu yöntem, dozla birlikte TL sinyalinin doğrusal

olarak arttığı ışımaya eğrisinin belirli bir aralığını kullanır. Bu işlem için ışımaya eğrilerinin maksimum şiddetlerinin %5 ile %15 aralığı alınmış, $1/kT_m$ 'ye karşı $\ln(I)$ grafiği çizilerek eğimden aktivasyon enerjileri (E_a) belirlenmiştir (Furetta ve Weng, 1998).



Şekil 4.16. 150 °C T_D sıcaklığında oluşan ışımaya eğrisinin başlangıç artışı yöntemi ile belirlenen aktivasyon enerjisi (Grafikteki eğim değeri aktivasyon enerjisini verir)

Şekil 4.16, T_D sıcaklığı 150°C için yapılmış bir örnek grafiği göstermektedir. Aynı işlem, tüm T_D durma sıcaklıkları için tekrarlanmış ve 50°C-300°C aralığında tüm T_D durma sıcaklıklarındaki aktivasyon enerjileri belirlenmiştir.



Şekil 4.17. Başlangıç Artış Yöntemiyle elde edilen hesaplanmış aktivasyon enerjileri

Isısal temizleme yöntemiyle ışıma eğrisini oluşturan tepe sıcaklıklarının belirlenmesi ve ardından Başlangıç Artış Yöntemi ile aktivasyon enerjilerinin hesaplanması, Bursa meteorit örneğinin tek ve basit bir tuzak yapısı içermediğini, karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum T_D sıcaklıklarına karşı hesaplanmış aktivasyon enerjileri grafiğinde açıkça görülmektedir (Şekil 4.17). Her T_D sıcaklığında neredeyse sürekli artan aktivasyon enerjileri ana baskın tepenin birbirine yakın iç içe geçmiş veya üst üste binmiş bireysel piklerden oluştuğunun göstergesidir. Renkli ve yaklaşık yatay seyreden çizgiler nispeten güçlü ve kararlı aktivasyon enerjilerine sahip pikleri temsil etmektedir. Bu bölgeler “plato” olarak adlandırılır. Bu bölgelerin tespiti ana tepenin bileşenlerini ve etkin tuzakların yerlerini belirlemek için önemlidir. Grafik, ana ışıma eğrisinin, aktivasyon enerjileri yaklaşık 0,90-1,70 eV aralığında yer alan 9 bireysel tepenin iç içe geçmesiyle oluştuğuna işaret etmektedir. Belirlenen etkin aktivasyon enerjileri aralıkları Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. T_D sıcaklıklarına karşı belirlenen aktivasyon enerjileri

Bölge No	Aktivasyon Enerjisi E (eV)
1. Bölge	0,90–1,00
2. Bölge	1,00–1,04
3. Bölge	1,08–1,10
4. Bölge	1,12–1,14
5. Bölge	1,17–1,19
6. Bölge	1,20–1,24
7. Bölge	1,40–1,45
8. Bölge	1,56–1,58
9. Bölge	1,63–1,68

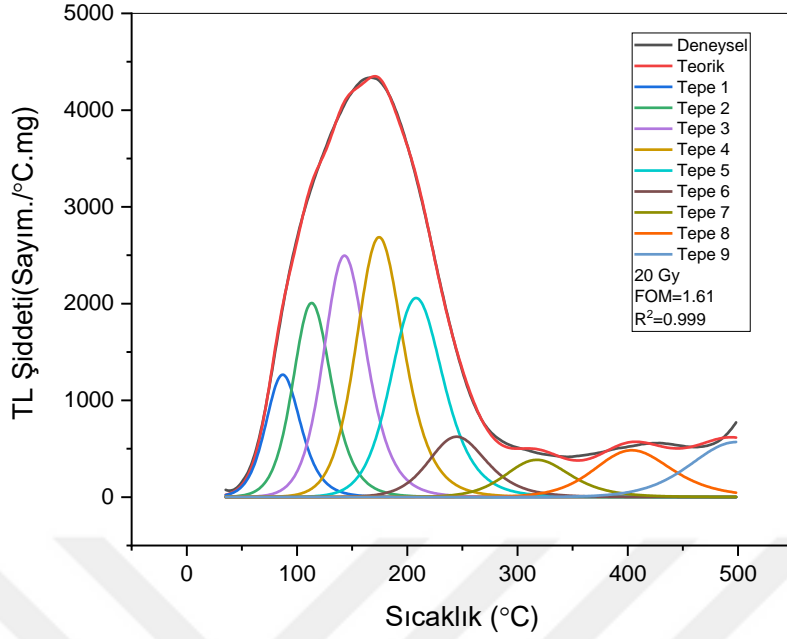
4.3.7. Bilgisayarla Işıma Eğrisi Ayırıştırma Yöntemi

Yalıtkan ve yarı iletken malzemelerdeki yasak enerji aralığı, birden fazla elektron tuzağı seviyesini barındırma potansiyeline sahiptir. Kuramsal olarak tek bir tepe noktası beklenmesine rağmen, deneysel TL ışıma eğrileri genellikle birden fazla tepe noktasının üst üste binmesi şeklinde gözlenir. Bu üst üste binme sorununu çözmek ve her bir TL tuzağının kinetik parametrelerini izole edip ayrı ayrı analiz etmek amacıyla Bilgisayarlı Işıma Eğrisi Ayırıştırma (CGCD) yöntemi uygulanmıştır (Kitis ve Tuyn, 1998). Bu yaklaşım, malzemeye ait her bir tuzağın Aktivasyon Enerjisi (E) ve frekans faktörü (s) gibi temel kinetik parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır.

Bu çalışma, Bursa L6 Meteoriti örneğine 2°C/s sabit ısıtma hızı ile 20 Gy beta radyasyon dozu uygulanması sonucu elde edilen TL eğrisine odaklanmıştır. TL ışıma eğrisi ayırıştırma işlemleri, ücretsiz ve açık kaynak kodlu "tgcd" isimli R paketi (Peng ve ark., 2016) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu yazılım aracılığıyla, TL ışıma eğrileri, kinetik mertebenin ($b=2$) olarak sabitlendiği İkinci Mertebe Kinetiği eşitliği temel alınarak ayırıştırılmıştır (Eşitlik 4.1). Yapılan analizler, numunenin dokuz (9) ayrı TL tepesinden oluştuğunu ortaya koymuştur (Şekil 4.18). Elde edilen ayırıştırma parametreleri Çizelge 4.4'te detaylı olarak sunulmuştur.

$$I(T) = \frac{\frac{n_0^2 s}{N} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}{\left[1 + \frac{sn_0}{\beta N} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^2} \quad (4.1)$$



Şekil 4.18. Bursa meteoritinin ışımaya eğrisinin CGCD yöntemiyle ayrıştırılması

Çizelge 4.4. Bursa meteoriti örneğinin tuzak parametreleri

Tepe No	T_m (°C)	E (eV)	Şiddet I_m	s (s ⁻¹)	τ (yıl)
1	68,49	1,001	1264,4	$1,663 \times 10^{13}$	$1,586 \times 10^{-4} \approx 1,4$ Saat
2	94,29	1,042	2006,2	$5,961 \times 10^{12}$	$2,183 \times 10^{-3} \approx 0,80$ Gün
3	123,8	1,082	2495,9	$1,729 \times 10^{12}$	$3,570 \times 10^{-2} \approx 13,1$ Gün
4	154,96	1,142	2686,3	$8,988 \times 10^{11}$	$7,096 \times 10^{-1} \approx 8,5$ Ay
5	188,67	1,182	2057,6	$2,672 \times 10^{11}$	$1,132 \times 10^1 \approx 11,3$ Yıl
6	276,85	1,242	623,2	$1,234 \times 10^{11}$	$2,534 \times 10^2 \approx 253,4$ Yıl
7	297,98	1,442	384,3	$1,812 \times 10^{11}$	$4,146 \times 10^5 \approx 415$ Bin Yıl
8	385,67	1,582	483,2	$4,542 \times 10^{10}$	$3,846 \times 10^8 \approx 385$ Milyon Yıl
9	485,66	1,662	568,5	$4,303 \times 10^9$	$9,136 \times 10^{10} \approx 91$ Milyar Yıl

Analizin başarısını gösteren Uygunluk Kriteri (FOM) değeri %1,61 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, kabul edilebilir 0–2,5% aralığı içinde yer alarak, ayrıştırma işleminin yüksek doğrulukla yapıldığını teyit etmektedir (Balian ve Eddy, 1977; Misra ve Eddy, 1979; Hsu ve ark., 1986). Tespit edilen aktivasyon enerjisi (E) değerleri 1,001 eV ile 1,662 eV arasında değişmektedir.

Kinetik mertebenin (b) derin tuzaklarda birinci mertebe davranışına yaklaştığı kabul edilmiştir (Furetta, 2003). Bu yaklaşıma dayanarak hesaplamalarda $b = 1$ varsayımı kullanılmış ve elde edilen τ değerlerinin, gerçek ömürlerin alt sınırını yansıttığı düşünülmüştür.

Ayrıca, CGCD yöntemiyle ayrıştırılan bireysel eğriler dikkate alınarak tuzakların termal kararlılığı incelenmiştir. Tuzakların termal kararlılığı, oda sıcaklığı olan 25 °C (298 K) koşullarında ömürleri (τ) hesaplanarak değerlendirilmiştir. τ değeri, kinetik mertebeden bağımsız olan aşağıdaki Arrhenius eşitliği (Eşitlik 4.2) kullanılarak hesaplanmıştır (Randall ve Wilkins, 1945; McKeever, 1985).

$$\tau = \frac{e^{\frac{E}{k_B T}}}{s n_0} \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte;

τ , tuzakta hapsolmuş taşıyıcıların ortalama ömrünü,

E , aktivasyon enerjisini (eV),

k_B , Boltzmann sabitini ($8,617 \times 10^{-5}$ eV·K⁻¹),

T , mutlak sıcaklığı (K),

s , frekans faktörünü (s⁻¹),

n_0 ise başlangıçtaki tuzak doluluk oranını ifade etmektedir ve 1 olarak alınmıştır.

Düşük sıcaklıklarda oluşan kararsız tuzaklar (aktivasyon enerjileri 1,001–1,042–1,082 eV) yaklaşık 1,4 saat ile 13,1 gün arasında değişen kısa ömürlere sahiptir. Bu durum, söz konusu tuzakların oda sıcaklığında hızla boşaldığını ve uzun süreli doz depolamada kullanıma uygun olmadığını göstermektedir. Yaklaşık 8,5 ay ömüre sahip, $E = 1,142$ eV aktivasyon enerjili tepe ise kısa süreli çevresel doz ölçümlerinde kullanılabilir düzeyde kararlıdır. $T_m = 276,85$ °C sıcaklığında gözlenen Tepe 6'ya karşılık gelen yaklaşık 253 yıllık ömür, Bursa L6 örneğinde güvenilir dozimetrik kaydın başlangıç sınırını göstermektedir. En kararlı tuzak seviyeleri 415 bin yıl (Tepe 7) ile 91,4 milyar yıl (Tepe 9) arasında değişen termal ömürlere sahiptir. Bu olağanüstü kararlılık, Bursa L6 meteoriti materyalinin hem uzay hem de jeolojik zaman ölçeğinde radyasyon dozimetrisi için uygun bir aday olduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca CGCD analizinden elde edilen kinetik parametrelerin, materyalin termal kararlılığını öngörme yeteneğini göstermek amacıyla bir teorik solma (fading) analizi yapılmıştır. Bu analizde, ışınlanmış numunelerin oda sıcaklığında (25 °C, 298 K) bir haftalık (7 gün) süreyle bekletilmesi durumunda beklenen sinyal kaybı hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda Garlick–Gibson birinci derece kinetik bağıntısından türetilmiş üstel bozunum eşitliği kullanılmıştır:

$$\frac{I(t)}{I_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (4.3)$$

Burada $I(t)$, t süresi sonunda kalan ışımaya şiddetini; I_0 , başlangıçtaki toplam ışımaya şiddetini; τ ise tuzakların ortalama ömrünü ifade eder. Her bir tuzak için hesaplanan solma miktarları aşağıda Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. 25 °C'de 7 günlük bekleme süresine göre Garlick–Gibson birinci merteye kinetik eşitliği ile hesaplanan teorik TL solma (Fading) değerleri

Tepe No	Şiddet I_0 (Başlangıç)	Kayıp Yüzdesi (%)	Kayıp Miktarı
1	1264,4	100,00%	1264,4
2	2006,2	99,98%	2005,79
3	2495,9	41,24%	1029,29
4	2686,3	2,67%	71,78
5	2057,6	0,17%	3,5
6	623,2	0,01%	0,05
7	384,3	0,00%	0
8	483,2	0,00%	0
9	568,5	0,00%	0
TOPLAM	12579,6		4374,81

TL şiddetindeki bir hafta sonunda toplam kayıp miktarı (4374,81) başlangıçtaki toplam TL (12579,6) şiddetine oranlandığında

$$\text{Solma yüzdesi} = \frac{4374,81}{12579,6} = 0,34769 \approx \% 34,77 \quad (4.4)$$

Böylece 25 °C'de bir haftalık bekleme sonucunda sinyalin yaklaşık %34,8'inin kaybolduğu, bu kaybın büyük ölçüde ilk üç düşük sıcaklık (sıg ve kararsız) tuzaklardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıktaki derin tuzakların ise bu süre içinde ihmal edilebilir düzeyde boşaldığı görülmüştür.

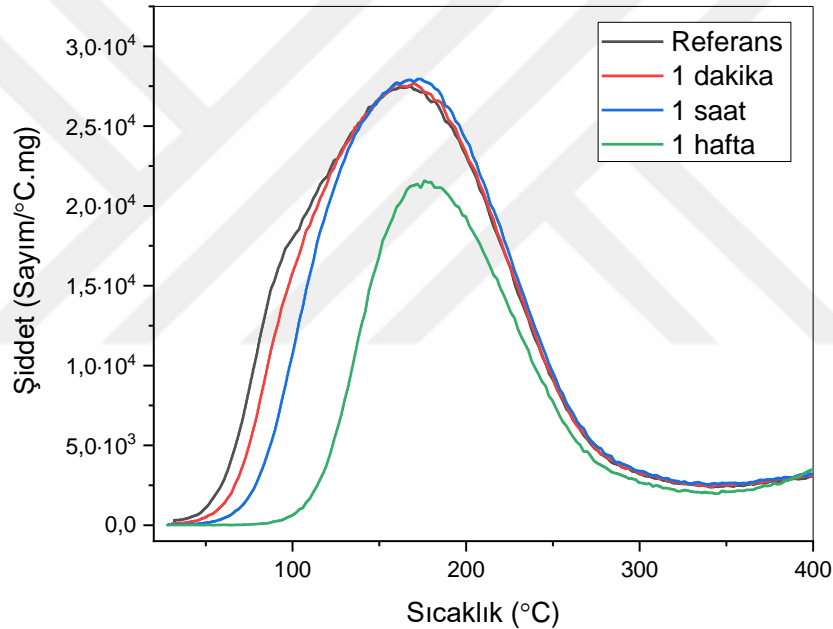
Bu tahmin, tuzakların gerçek kinetik mertebesi İkinci Mertebe ($b=2$) olmasına rağmen Birinci Mertebe ($b=1$) kinetiği varsayımıyla yapılmıştır. Dolayısıyla, materyalin gerçek kararlılığının minimum sınırını temsil etmektedir.

4.3.8. Sönüm (Fading) Deneyine İlişkin Bulgular

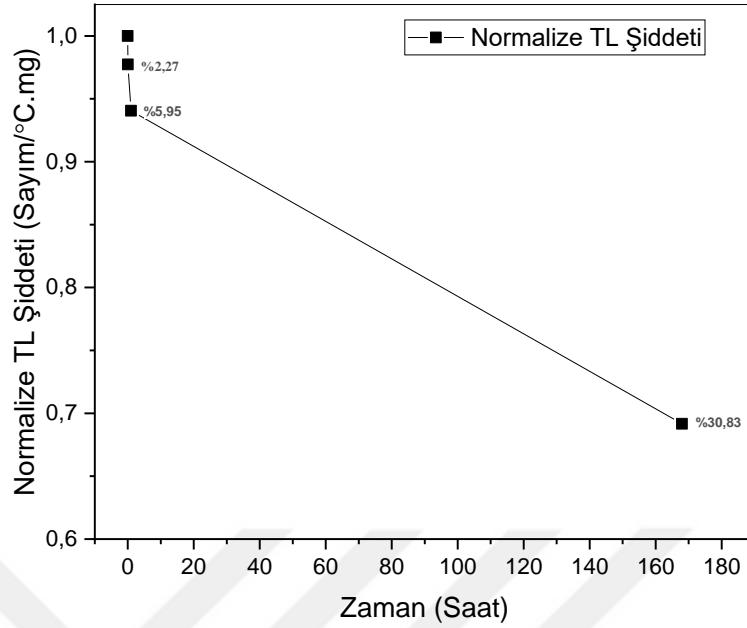
TLD adayı malzemeler, çevresel etkenler (sıcaklık, nem ve basınç gibi) nedeniyle depoladıkları radyasyon dozunu çok kısa sürelerde büyük ölçüde kaybedebilirler. Bu nedenle, bu etkenlere karşı kararlı bir tutum sergilemeleri, biriken radyasyon dozunun ölçümleri için büyük önem taşır.

Bu amaçla, malzemeye bilinen bir radyasyon dozu uygulanır ve ışıma eğrisi, referans olarak kullanılmak üzere kaydedilir. Ardından malzeme, dış etkenlerin etkisini en aza indirmek üzere dış etkilerden etkilenmeyecek korunaklı ve karanlık bir ortamda belirli bir süre saklanır. Bu süre sonunda malzemenin TL ışıma eğrisi tekrar ölçülür ve sinyal kaybı olup olmadığına bakılır. Bu süreç, farklı zaman dilimleri için tekrarlanır. Başlangıç referans sinyal şiddeti ile zaman içinde değişen sinyal değerleri karşılaştırılır. Bu tür sönüm (fading) deneyleri, TL sinyalinin zamanla azalmasını ve tuzak kararlılığını değerlendirmek amacıyla yapılır (Aitken, 1985).

Bursa meteorit örneğinin solma davranışını ölçmek için malzemeye her defasında 20 Gy beta dozu uygulanmış, ardından 2 °C/s ısıtma hızı kullanılarak oda sıcaklığından 500 °C'ye kadar ısıtılarak ışıma eğrisi referans olarak kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Farklı zaman dilimleri için (1 dakika, 1 saat, 1 hafta) sinyal kayıpları belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 4.19-20'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.19. Bursa meteoritine ait 1 dk, 1 saat ve 1 hafta bekleme süreleri sonrası elde edilen TL ışıma eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 4.20. Bursa meteorit örneğinin zamana bağlı TL ışınma şiddetlerinin değişimi

Sinyal kayıpları genel olarak değerlendirildiğinde, doz uygulaması yapıldıktan kısa süre sonra solma başlamış ve 1 hafta içerisinde %30,83 değerine ulaşmıştır. Bu sinyal kaybı oldukça yüksek olarak değerlendirilir ve TLD adayı malzemeler için ciddi bir olumsuzluktur. Çünkü sığ enerji seviyelerinde yer alan tuzaklar düşük aktivasyon enerjilerine sahiptir. Bu nedenle bu tuzaklarda biriken elektronlar oda sıcaklığında dahi kolaylıkla termal enerji kazanarak değerlik bandına geri döner. Elektronların bu erken boşalması, ölçüm yapılmadan önce radyasyonla birikmiş sinyalin azalmasına neden olur. Zamanla oluşan solmanın orantısız olmaması, bir kalibrasyon elde edilebilmesini olanak dışı bırakır. Sonuç olarak, kısa sürede sinyal kaybının yüksek olması Bursa meteoritinin kısa süreli TLD olarak kullanılmasına olanak tanımamaktadır.

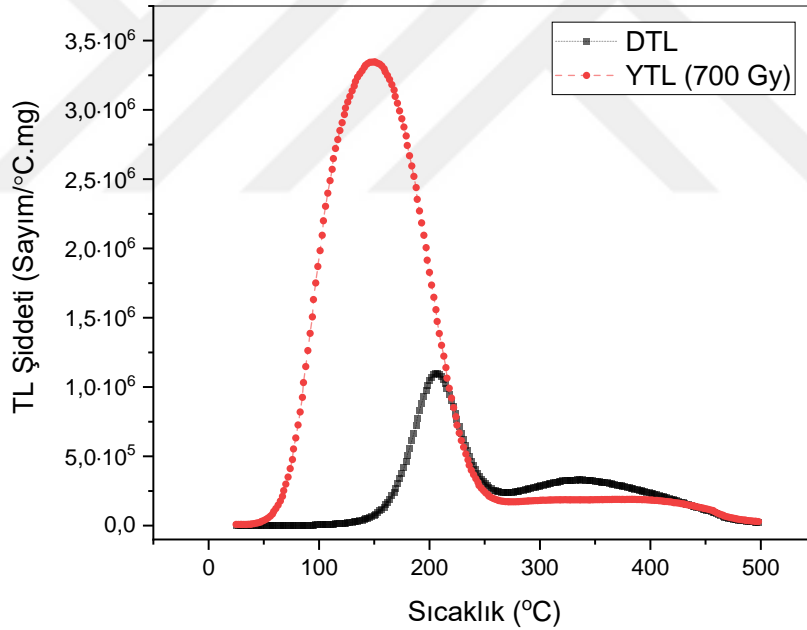
Sonuç olarak, 1 hafta içerisinde hesaplanan teorik solma (%34,77) ile ölçülen deneysel solma (%30,83) arasında tutarlılık gözlenmiştir; her ikisi de kısa sürede yüksek solma oranını doğrulamaktadır. Aradaki yaklaşık %4'lük farkın nedenleri (örneğin, kinetik merteye varsayımı veya deneysel koşullar), çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Solma oranı genel olarak yüksek olsa da, teorik hesaplamalara göre bu kaybın ağırlıklı olarak ilk üç tuzaktan (%98,28 solma) kaynaklandığı görülmektedir (Çizelge 4.5). Bu açıdan değerlendirildiğinde, gerekli düzeltmeler yapılarak 4. (1,142 eV) ve 5.(1,182 eV) tepeden elde edilen bireysel eğrilerin dozimetrik amaçlar için kullanılabileceğine karar verilmiştir.

4.4. Bursa Meteoritinin Doğal TL Analizi

Bursa L6 sıradan kondrit meteoriti örneğinin DTL ışıma eğrisi, 5 mg'lık numune üzerinde incelenmiştir. Termal ısıtma işlemi, 2 °C/s'lik sabit ısıtma hızında oda sıcaklığından 500 °C'ye kadar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 700 Gy doz uygulanarak kaydedilen YTL ışıma eğrisi doğal TL ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.21).

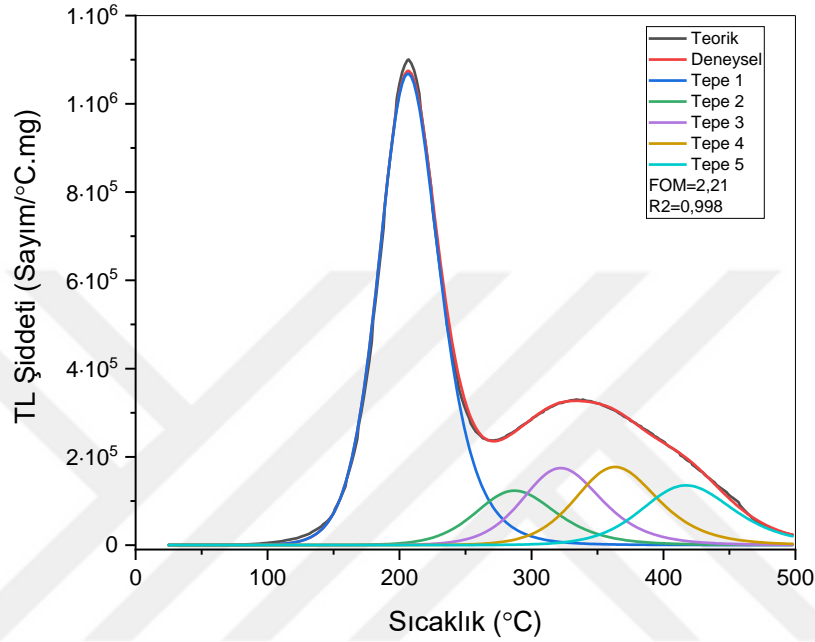
DTL ışıma eğrisinde yaklaşık 207 °C ve 332 °C'de iki belirgin pik gözlenmektedir. Birinci pikin keskinliği, belirgin bir tuzak bölgesinin varlığını gösterirken; ikinci pik, omuzlu yapısıyla daha geniş bir alana yayılmakta ve daha yoğun orta-derin tuzakların varlığını yansıtmaktadır. Işıma eğrisinin genel şekli ve tepe sıcaklıkları, literatürde sıradan kondritler için raporlanan bulgularla uyumludur (Melcher, 1980).

Uygulanan 700 Gy dozun düşük sıcaklık bölgesinde oluşturduğu belirgin tepe, DTL ışıma eğrisinde büyük ölçüde gözlenmemektedir. Bu durumun temel nedeni, 1946'dan beri düşük sıcaklık bölgesindeki ışık tuzakların önemli ölçüde boşalmış olmasıdır. Ayrıca, yüksek sıcaklık tepe şiddetinin yapay eğrininkinden fazla olması dikkat çekmektedir.



Şekil 4.21. Bursa L6 meteoriti örneğinin DTL ve 700 Gy uygulandıığında oluşan YTL ışıma eğrileri

Bursa L6 meteorit örneğinin DTL ışımaya eğrisi, R Studio programındaki tgcd paketi kullanılarak ayrıştırılmıştır. Ayrıştırma işlemi, İkinci Mertebe Kinetiği ($b=2$) temel alınarak yapılmış ve YTL eğrisinden elde edilen tuzak aktivasyon enerjileri (E) kullanılarak test edilmiştir. DTL ışımaya eğrisi, toplam 5 bireysel pikten oluşmaktadır (Şekil 4.22) ve E değerleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.22. DTL ışımaya eğrisinin TGCD paketi ile ayrıştırılması

Çizelge 4.6. DTL ışımaya eğrisini oluşturan piklerin aktivasyon enerjileri

Tepe No	E (eV)
1	1,22
2	1,24
3	1,44
4	1,44
5	1,58
9	1,66

Bu durum, ayrıştırılmış dokuz bireysel pik içeren YTL eğrisiyle karşılaştırıldığında, $E=1,00$ 'den $E=1,18$ eV'a kadar olan sığ tuzakların büyük ölçüde boşaldığını göstermektedir. Bu kayıp, termal ömürleri (τ) 79 yıldan düşük olan bu tuzakların, meteoritin karasal yaşı boyunca kararsız kaldığını kanıtlar. Bunun yanında $E=1,24$ ve $E=1,66$ eV arası yüksek sıcaklık bölgesinde ki dört derin tuzağın korunduğu ve kararlı olduğu doğrulanmıştır.

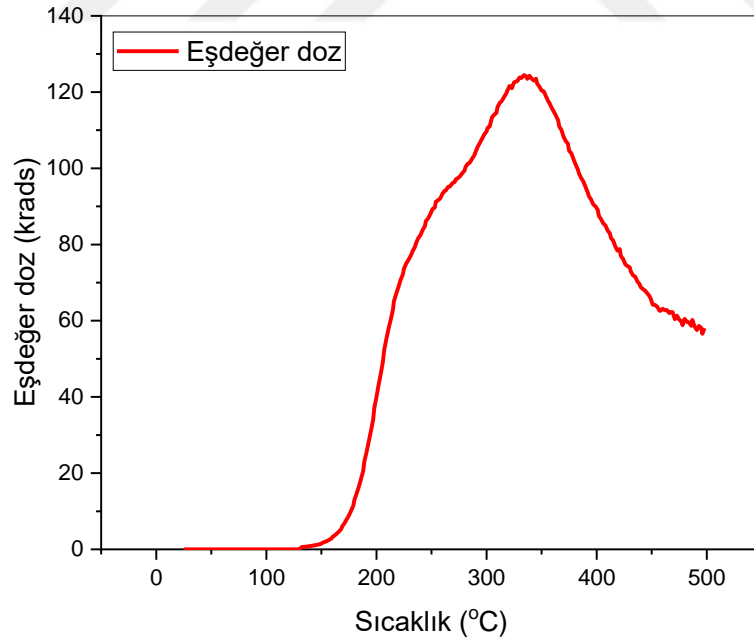
$E=1,24$ eV'luk aktivasyon enerjisine sahip tuzak (yüksek şiddetli pik), YTL eğrisinden elde edilen kinetik parametreler kullanılarak hesaplandığında ≈ 254 yıllık bir termal ömre (τ) sahiptir. Bu τ değeri, tuzanın 79 yıllık bekletme süresine rağmen DTL sinyalini korumasını teorik olarak destekleyen güçlü bir kanıttır.

$E=1,44$ eV ve üzerindeki daha yüksek E değerine sahip tuzaklar ise (1,44; 1,52; 1,58; 1,66 eV), uzay radyasyon dozunun saklanması açısından yüksek dozimetrik kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir.

4.4.1. Eşdeğer Doz Grafiğinin Oluşturulması

ED analizi, laboratuvar ortamında belirli dozlar uygulanarak malzemede doğal olarak biriken radyasyon dozunun nicel olarak belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir. Bu değer, doz artışıyla TL ışımasının doğrusal değişim gösterdiği aralıkta yapılan bir çıkarımla saptanır. Bu amaçla malzemeye 700 Gy (70 krad) doz uygulanmış ve Eşitlik (4.5) kullanılarak ED–Sıcaklık grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4.23). Doğal ışınım eğrisini oluşturan tuzaklarda birikmiş radyasyon, literatürdeki uygulamalara uygun olarak krad birimiyle ($1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$) ifade edilmiştir (Melcher, 1981).

$$\text{Eşdeğer Doz} = \frac{(\text{Doğal TL sinyali})}{(\text{Yapay TL sinyali})} \times \text{Uygulanan Doz} \quad (4.5)$$

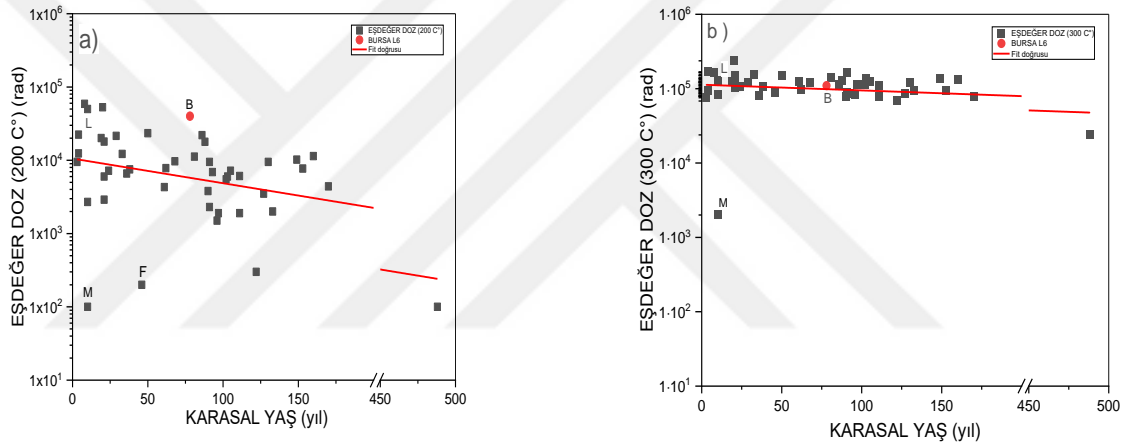


Şekil 4.23. Bursa L6 meteoritine laboratuvar ortamında uygulanan 700 Gy doz sonucu oluşan ED grafiği

Laboratuvarda uygulanan doz arttıkça ED seviyesinin de artarak bir zirve yaptığı görülmektedir. 334 °C civarında yaklaşık 124 krad (1240 Gy) ED değerine ulaşılması, bu sıcaklık

aralığındaki tuzakların yüksek doz depolama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, ED seviyesinin bu değerden sonra sabit kalmak yerine düşüş göstermesi, doz artışıyla birlikte tuzak yapısının bozulmaya başlaması veya yeni sönmüleme merkezlerinin oluşmasıyla (aşırı doz/hasar etkisi) ilişkilendirilebilir (Furetta, 2003; McKeever, 1985).

Bu nedenle, kozmik radyasyon maruziyet yaşı ve günberi uzaklığı gibi parametrelerin tahmininde, aşırı doz ve termal sönmüleme etkilerine karşı dirençli, kararlı tuzakların kullanılması kritik önem taşır. 334 °C sonrasında gözlenen belirsizlik ve sinyal düşüşü, bu tür hesaplamalar için uygun bir referans aralığı sağlamamaktadır. Literatürde sıradan kondritler için karşılaştırma amacıyla genellikle 200 ve 300 °C civarındaki ED seviyeleri referans alınmakta; bu değerler hem karasal yaşların değerlendirilmesinde hem de günberi uzaklıklarının belirlenmesi ve kozmik radyasyon yaşlarının tahmininde kullanılmaktadır (Melcher, 1981; Sears ve Hasan, 1986).



Şekil 4.24. Karasal yaşları bilinen 44 sıradan kondritin 200 °C (a) ve 300 °C (b) sıcaklıklarında elde edilen ED seviyeleri (Melcher,1980). M=Malakal, F=Fayalit meteoritlerini temsil eder

Bursa meteorit örneğinin ED seviyeleri, eşdeğer doz grafiğinden 200 °C'de yaklaşık 40 krad (400 Gy) ve 300 °C'de yaklaşık 110 krad (1100 Gy) olarak belirlenmiştir. Bu değerler, sıradan kondrit örnekleri için literatürde bildirilen tipik ED seviyeleriyle uyum içindedir. Melcher (1980) tarafından 44 sıradan kondrit üzerinde yapılan çalışma da bu durumu doğrulamaktadır. Şekil 4.24 (a) ve (b)'de Bursa meteoritine ait değerler kırmızı işaretlerle gösterilmiştir.

200 °C'deki ED seviyeleri, karasal yaşın artmasıyla birlikte azalma eğilimi göstermektedir. Aynı karasal yaşa sahip örnekler arasında görülen yaklaşık on katlık ED farkı ise meteoritlerin farklı günberi uzaklıklarına atfedilmektedir (Melcher, 1980). Buna karşılık, 300 °C'deki tuzaklar daha derin ve kararlı olduğu için karasal yaş artsa dahi ED seviyeleri büyük ölçüde korunmaktadır. Bu nedenle çalışmanın devamında Bursa meteoritinin kozmik radyasyon maruziyet yaşı için 300 °C'deki ED (1100 Gy) ve günberi uzaklığının hesaplanması için 200 °C'deki ED (400 Gy) değeri esas alınmıştır.

4.4.2. Bursa Meteorinin Günberi Uzaklığının Tahmini

Günberi uzaklığı bilinen meteoritlerin yörünge sıcaklığı, Stefan–Boltzmann yasasının sadeleştirilmiş biçiminden türetilen Eşitlik (4.6) ile hesaplanır:

$$T^4 = \frac{L_{\odot}(1 - A)}{16\pi d^2 \sigma \varepsilon} \quad (4.6)$$

Burada; T denge sıcaklığı (K), $L_{\odot} = 3.83 \times 10^{26}$ W Güneş'in parlaklığı, A albedo, d Güneş'e uzaklık (m), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W·m⁻²·K⁻⁴ Stefan–Boltzmann sabiti ve ε yayım katsayısını ifade eder.

Sıradan kondritler için literatürde verilen A ve ε ortalama değerleri kullanılarak 1 AB uzaklıkta yörünge sıcaklığı $T=261$ K olarak alınmıştır (Melcher,1981). Eşitliğin d 'ye bağlılığı $T \propto 1/\sqrt{d}$ şeklinde olduğundan, genel sıcaklık bağıntısı şu şekilde yazılır:

$$T = \frac{261}{\sqrt{d}} \quad (4.7)$$

Bu eşitlik kullanılarak günberi uzaklıkları bilinen üç meteoritin (Melcher, 1981) günberi sıcaklıkları hesaplanmış ve Çizelge 4.7'de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.7. Referans meteoritlerin günberi uzaklıkları ve 200 °C'de ED değerleri

Meteorit	Tür	Günberi (AB)	ED (200°C) (Q_1 , krad)	T_1 (günberi, K)
Pribram	H5	0,79	29	293,65
Lost City	H5	0,967	5	265,42
Innisfree	L4	0,986	9,5	262,85

Sıradan kondritlerin yörünge parametrelerinden biri olan günberi uzaklığı, TL mekanizması kullanılarak tahmin edilebilir. Bu yöntem ilk kez Melcher (1981) tarafından, TL sinyalinin yörünge sıcaklığına olan bağımlılığı temel alınarak geliştirilmiştir. Melcher (1981), ikinci mertebe kinetiğe dayalı olarak aşağıdaki bağıntıyı tanımlamıştır:

$$T_2 = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{2k}{E} \ln \frac{Q_1}{Q_2} \right)^{-1} \quad (4.8)$$

Burada:

- T_2 : Hesaplanacak meteoritin (Bursa) ortalama yörünge sıcaklığı (K).
- T_1 : Referans meteoritin yörünge sıcaklığı (1 AB 'da 261 K'dan hesaplanmıştır).
- Q_2 : Bursa'nın 200 °C'deki ED değeri (40 krad).

- Q_1 : Referans meteoritin 200°C'deki ED değeri.
- E : Seçilen TL tuzağının aktivasyon enerjisi (Bursa meteorit örneği için 1,20 eV).
- k : Boltzmann sabiti ($8,617 \times 10^{-5}$ eV/K).

Bu çalışmada Melcher (1980)'in eşitliği kullanılarak referans meteoritlerin verileri üzerinden Bursa meteoritinin ortalama yörünge sıcaklığı T_2 hesaplanmıştır (Çizelge 4.8). Ardından Eşitlik (4.7) kullanılarak Bursa meteoritinin günberi uzaklığı (d) elde edilmiştir.

Çizelge 4.8. Referans meteoritler kullanılarak belirlenen Bursa meteoritinin tahmini günberi uzaklıkları

Referans Meteoritler	Q_1/Q_2 Oranı	T_2 (K)	Tahmini Günberi d (AB)
Pribram	$29/40 \approx 0,725$	289,68	0,81
Lost City	$5/40 \approx 0,125$	246	1,12
Innisfree	$9,5/40 \approx 0,237$	249	1,09

Çizelge 4.8'te görüldüğü gibi, Bursa meteoritinin günberi uzaklığı 0,81–1,12 AB aralığında tahmin edilmiştir. Ortalama olarak 1.007 AB değerine karşılık gelen bu sonuç, Dünya'nın yörüngesi (1 AB) ile oldukça yakın bir konumda olup, Bursa meteoritinin dinamik kökeni açısından tutarlı bir sonuç ortaya koymaktadır.

4.4.3. Kozmik Radyasyon Yaşı Tahmini

Meteoritler, ana gövdelerinin (genellikle asteroidlerin) iç kısımlarında buldukları sürece kozmik radyasyondan korunurlar ve bu dönemde radyasyon birikimi ihmal edilebilecek seviyededir. Ancak ana gövdeden koparak serbest bir meteorit hâline geldiklerinde, uzay boşluğunda doğrudan kozmik ışınlar maruz kalmaya başlarlar. Dünya atmosferine girene kadar geçen bu süre, kozmik radyasyon maruziyet yaşı (KRY) olarak tanımlanır.

Literatürde meteoritlerin KRY karşılaştırmada, kararlı tuzakların bulunduğu 300 °C'deki ED değeri kullanılmakta ve bu bölgedeki sinyalin meteoritin uzayda geçirdiği süreyi temsil ettiği kabul edilmektedir. Bursa L6 meteoritinin 300 °C'de ED seviyesi yaklaşık 1100 Gy olarak belirlenmiştir. Uzay ortamı için radyasyon doz hızı $\dot{D} = 0,1$ Gy/yıl (Melcher, 1981) kabul edilirse KRY aşağıdaki Eşitlik (4.9) ile hesaplanabilir:

$$KRY = \frac{\text{Kozmik Radyasyon Dozu}}{\text{Kozmik Radyasyon Doz Hızı}} = \frac{ED}{\dot{D}} = \frac{1100}{0,1} = 11.000 \text{ yıl} \quad (4.9)$$

Bu hesaplama yöntemi literatürle uyumlu olsa da, elde edilen 11 bin yıllık KRY değeri L6 kondritler için beklenenden oldukça düşüktür. Radyometrik çalışmalar sıradan kondritlerde KRY'nın en düşük değerinin milyonlar mertebesinde olduğunu göstermektedir (Biswas, 2011). Nitekim kozmojenik ^3He , ^{21}Ne ve ^{38}Ar izotoplarına dayanarak Bursa meteoritinin kozmik ışın maruziyet yaşı yaklaşık 2 milyon yıl (2 Ma) olarak hesaplanmıştır (Ünsalan ve Altunayar-Ünsalan, 2020). TL yöntemine dayalı KRY'nın düşük çıkmasının başlıca nedenleri şunlardır:

Meteoritler Güneş etrafında eliptik yörüngelerde dolanırken, Güneşe yaklaştıklarında iç kısımlarında birikmiş radyasyon dozu Güneş ısısının etkisiyle TL yoluyla boşalır; uzaklaştıklarında ise kozmik doz birikimi artar. Bu süreç, doz birikimi ile doz boşalım hızlarının eşitlendiği dinamik termal denge durumuna kadar sürer. Bu dengeye ulaşıldığında net radyasyon birikimi durur. Kozmik radyasyon sürse bile denge oluştuğunda yeni doz eklenmediğinden, ED değeri meteoritin toplam radyasyon yaşını doğru yansıtamaz. Bu nedenle TL yöntemiyle belirlenen KRY, meteoritin ana gövdeden kopmasından dinamik dengeye ulaşmasına kadar geçen süreyi temsil eder. Bursa meteoriti için TL yöntemi ile hesaplanan KRY'nın, kozmojenik izotoplara göre düşük çıkmasının nedenlerinden biri budur.

Ayrıca meteoritlerde çarpışmalar sonucu TL sinyali kısmen veya tamamen sıfırlanabilir. Bu durumda TL ile hesaplanan KRY, şokun seviyesine bağlı olarak değişir. Şokun TL'yi tamamen sıfırladığı durumlarda hesaplanan KRY, şok olayından dinamik dengeye ulaşmaya kadar geçen süreyi ifade eder. Bursa meteoritinin S5 şok derecesi dikkate alındığında KRY'nın düşük çıkmasının bir diğer nedeni de budur.

Bunun yanında, 0,1 Gy/yıl olarak aldığımız radyasyon doz hızı meteorit yüzeyi için üst sınır değerlerden biridir; iç kısımlardaki doz hızı bu değerden daha düşüktür. Doz hızının yüksek kabul edilmesi, KRY'nın olduğundan küçük çıkmasına yol açan etkenlerdendir. TL verimindeki zamanla azalma ve kuantum tünelleme gibi termal olmayan solma süreçleri ED değerini düşürerek KRY'nın daha düşük hesaplanmasına neden olabilir. Tüm bu etkenler birlikte değerlendirildiğinde, Bursa meteoritine ait TL tabanlı 11.000 yıllık KRY'nın, gerçek maruziyet süresinin yalnızca alt sınırını temsil ettiği şeklinde değerlendirilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bursa meteoritinin TL özellikleri ve dozimetrik potansiyeli üzerine gerçekleştirdiğimiz çalışmanın önemli sonuçları aşağıda sunulmuştur:

1- SEM-EDX analizleri, Bursa meteoritinin morfolojik yapısının ve elementel içeriğinin sıradan kondritlere özgü özellikler sergilediğini göstermiştir. Numunenin bazı bölgelerinde gözlemlenen dağınık ince çatlakların varlığı, malzemenin içsel ve yüksek derecede termal gerilimlere maruz kaldığına işaret etmektedir. Öte yandan, bazı bölgelerdeki paralel çatlaklar, çarpışmalar sonucu oluşan şok dalgalarının etkisiyle meydana geldiğine dair izler taşımaktadır. Bu bulgular, meteoritin yüksek derece şok (S5) ve ileri düzey termal metamorfizma (L6) evresine sahip olduğunu göstermektedir. İki farklı bölgede yapılan noktasal EDS incelemeleri, element içeriğinin olivin, piroksen ve feldispat gibi silikat mineralleri ile kamasit-taenit benzeri metalik fazlara karşılık gelebileceğini düşündürmektedir. Bu minerallerin olası varlığı, sıradan kondritlerin tipik içerikleriyle uyumludur. Ayrıca, bu fazlar TL sinyalinin potansiyel kaynak mineralleri olmaları açısından önem taşımaktadır.

2- XRD analizleri sonucunda baskın mineral fazlarının Kalsiyum-Alüminyum zincirli alüminosilikat (CaAlAlSiO_6 ; PDF 98-023-9025), diopsit ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$; PDF 98-015-9053), manyezoferrit (MgFe_2O_4 ; PDF 98-015-8437) ve magnetit (Fe_3O_4 ; PDF 98-016-4813) olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Bursa meteoritinin yüksek sıcaklık ve şok etkilerine maruz kaldığına işaret etmektedir. Ayrıca, TL sinyalinin hangi minerallerin kusur merkezlerinden kaynaklandığını göstermesi açısından önem taşımaktadır.

3-Doz-Yanıt Deneyi, 50 Gy'e kadar uygulanan doz artışıyla TL sinyalinde doğru orantılı bir artış (lineerlik indeksi $\approx 1,06-1,07$) olduğunu net bir şekilde göstermiştir. Bu bulgu, Bursa meteoritinin dozimetrik potansiyele sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

4-Tekrar Kullanılabilirlik Testi, malzemenin dozimetrik bir aygıt olarak kullanıldığında güvenilir ölçüm yapabilme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

5-Farklı Isıtma Hızları Deneyi ise, yükselen ısıtma hızlarında tepe sıcaklıklarının (T_m) ve tepe genişliklerinin (FWHM) arttığını; buna karşılık ışımaya şiddetlerinin (I_m) ve eğrilerin altındaki alanların azaldığını göstermiştir.

6-Isısal Temizleme ve Başlangıç Artış yöntemi, ışımaya eğrisini oluşturan bireysel piklerin konumlarının belirlenmesi ve her bir tuzağın aktivasyon enerjilerinin (E) tespit edilmesi amacıyla birlikte kullanılmıştır. 20 Gy doz uygulanmış TL ışımaya eğrisinin şekli, birden fazla bireysel pikin üst üste bindiğini ve malzemede sürekli bir tuzak yapısının varlığını göstermiştir.

7- CGCD, bir program aracılığıyla (R-Stüdyo) başlangıç artış yöntemiyle belirlenen dokuz aday pikin enerjileri kısıtlanarak deneysel TL eğrisinin ayrıştırılmasını sağlamıştır. Ayrıştırma işlemi, ikinci mertebeye kinetik varsayımı ($b=2$) ile yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen ışımaya eğrisi

ile ayrıştırma sonucu elde edilen fit eğrisi arasındaki uyumluluk kabul edilebilir sınırlar içerisinde (FOM=1,61) bulunmuştur. Ayrıştırma sonucunda dokuz pikin toplam şiddetinde bir hafta içerisinde teorik olarak %34,77 civarında bir solmanın gerçekleştiği görülmüştür.

8- Solma deneyi (Fading), uygulanan dozun yaklaşık %30,83'lük önemli bir kısmının bir hafta sonunda sönmüldüğü (solduğu) göstermiştir. Bu sonuç, TL pik şiddetlerinden elde edilen teorik solma miktarı (%34,77) ile benzer bir eğilime sahiptir. TL sinyalinin kısa sürede bu denli yüksek oranda azalması, malzemenin TL temelli dozimetrik aygıt olarak uzun süreli kullanıma uygun olmadığına işaret etmiştir. Ancak, teorik sinyal kaybının büyük ölçüde düşük sıcaklık bölgesindeki ilk üç tuzaktan (%98,28) kaynaklandığı görülmüştür. 4. ve 5. piklere karşılık gelen 1.14 ve 1.18 eV enerji seviyeli tuzakların 25 °C'deki teorik solma oranları sırasıyla %2.67 ve %0.17'dir ve bu oranlar oldukça düşüktür. Bu nedenle, bu iki tuzak gerekli sinyal kaybı düzeltmeleri uygulanarak kısa veya orta vadeli dozimetre uygulamalarında kullanılabilir görünmektedir. Ancak bu sonuçlar yalnızca yedi günlük deneysel veriye dayandığından, uzun süreli kararlılığın belirlenebilmesi için daha geniş zaman aralıklarını kapsayan fading testlerinin yapılması önerilmektedir.

Termal olarak kararlı derin tuzakların, jeolojik zaman ölçeğinde düşük sönmülme oranları göstermeleri nedeniyle, meteoritin kozmik geçmişi ve yörünge analizlerinde güvenle kullanılabileceğini göstermiştir.

9- DTL eğrisi, dar ve oldukça keskin bir düşük sıcaklık piki ile omuzlu yapıya sahip, geniş bir alana yayılan yüksek sıcaklık pikinden oluşmaktadır. Bursa meteoritinin 79 yıllık karasal yaş süresi boyunca, düşük sıcaklık bölgesindeki sığ ve kararsız tuzaklar büyük ölçüde boşalmış; yalnızca uzun ömürlü, kararlı ve derin tuzakların sinyali korunmuştur. *E* tuzakların fiziksel olarak değişmeyen karakteristik parametresi olduğundan, daha önce yapay ışımaya eğrisinden elde edilen *E* değerleri doğal ışımaya eğrisinin analizinde referans alınmıştır. R-Studio programı ile yapılan DTL eğrisi ayrıştırması sonucunda, kabul edilebilir bir %FOM değeriyle 5 bireysel tepe belirlenmiştir. Yapay ışımaya eğrisinde tanımlanan 9 pikin son dört tanesi, doğal ışımaya eğrisini en uygun şekilde temsil etmektedir. Bu durum, 79 yıllık karasal yaş süresince ilk beş pikin sinyalinin büyük ölçüde sönmüldüğünü göstermiştir. Kalan son dört derin tuzak, termal olarak kararlı yapıları sayesinde Bursa meteoritinin kozmik radyasyon yaşı ve günberi uzaklığının belirlenmesinde kullanılmıştır.

10- ED çalışması, meteorit örneğinin tuzaklarında birikmiş radyasyon dozunun nicel değerlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, aktivasyon enerjileri önceden belirlenmiş dokuz bireysel pike karşılık gelen tuzaklarda biriken radyasyon dozları hesaplanmıştır.

ED grafiğinde, 334 °C civarındaki tuzakların yaklaşık 1200 Gy düzeyinde radyasyon dozu depolayabildiği görülmüştür. Ancak bu sıcaklık aralığından sonra ED seviyesinin azalması, yüksek dozlarda meydana gelen tuzak hasarı veya aşırı doz etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Bu nedenle, 334 °C

ve üzeri sıcaklık aralıklarını temsil eden tuzaklar kararlı bir dozimetrik davranış sergilememekte ve analitik amaçlarla kullanılmaları uygun görülmemektedir. Bu doğrultuda, literatürde sıklıkla referans alınan ve kararlılığı iyi bilinen 200 ve 300 °C civarındaki tuzaklar, günberi uzaklıklarının ve kozmik radyasyon yaşlarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

11- Kozmik Radyasyon Yaşı (KRY), literatürdeki doz hızı varsayımıyla (0.1 Gy/yıl) uyumlu olarak yaklaşık 11 bin yıl olarak tahmin edilmiştir. Bu sonuç, radyometrik yaşlandırma yöntemleriyle hesaplanmış sürelerle karşılaştırıldığında en az 100 kat civarında düşüktür.

12- Meteoritlerin günberi uzaklıklarının belirlenmesi, ana gövdelerinin (kaynak cisimlerinin) Güneş Sistemi'ndeki konumlarını ve yörünge dinamiklerini ortaya koymak açısından önem taşımaktadır. Literatürde günberi uzaklıkları belirlenmiş olan Pribram, Lost City ve Innisfree meteoritleri referans olarak alınmış; bu meteoritlerin 200 °C'de ölçülmüş ED seviyeleri kullanılarak Bursa meteoritinin günberi uzaklığı yaklaşık 1,007 AB olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, sıradan kondritlerin çoğunlukla 0,8–1,0 AB aralığında gözlenen günberi uzaklıklarıyla uyum içindedir. Bu hesaplamalarda Melcher'in (1980) ikinci merteye kinetiklere dayalı olarak geliştirdiği eşitlik esas alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, TL yöntemini kullanarak meteoritlerin günberi uzaklıklarının belirlenmesinde pratik bir yöntem geliştirmektir.

Sonuç olarak, elde edilen bulgulara ek olarak Bursa meteoritinin termal metamorfizma ve şok geçişine yönelik kapsamlı bir araştırma ile literatürde mevcut çalışmalara önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.



KAYNAKÇA

- Agee, C. B., Allton, J. H., Bajt, S., Blum, J. D., Bottke, W. F. (2015). The Meteoritical Bulletin, No. 102. *Meteoritics & Planetary Science*, 50(3), 674–682.
- Aitken, M. J. (1974). *Thermoluminescence dating*. Academic Press.
- Aitken, M. J. (1985). *Thermoluminescence dating*. Academic Press.
- Altunayar-Ünsalan, B., Çalışkan, Ö. (2025). Physical and thermal properties of Bursa L6 chondrite: A combination of density, porosity, specific heat, water content, thermal conductivity, and thermal diffusivity results. *Astrophysics and Space Science*.
- Amelin, Y. (2025). Recent progress and future prospects of the early solar system: Developments in isotope chronology of oldest extraterrestrial materials. *National Science Review*, 12(9).
- Balian, H. G., Eddy, N. W. (1977). Figure of merit (FOM): An objective function for assessing the fit of computed thermoluminescence glow curves. *Nuclear Instruments and Methods*, 145(2), 389–395.
- Benoit, P. H., Sears, D. W. G. (1993). Natural thermoluminescence and terrestrial ages of meteorites from a variety of temperature regimes. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E6), 9669–9685.
- Benoit, P. H., Sears, D. W. G. (1997a). The natural thermoluminescence of ordinary chondrites and their recent orbital histories. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(1), 113–123.
- Benoit, P. H., Sears, D. W. G. (1997b). The orbits of meteorites from natural thermoluminescence. *Icarus*, 125(2), 281–287.
- Binzel, R. P., DeMeo, F. E., Turtelboom, E. (2010). Spectral properties and composition of asteroid (6) Hebe: Implications for H chondrite origin. *Icarus*, 205(2), 655–664.
- Biswas, M. R. H. (2011). Thermoluminescence of the meteorite interior: A possible tool for the estimation of cosmic ray exposure ages. *Planetary and Space Science*, 59(1), 1–13.
- Bland, P. A., Berry, F. J. (2003). Weathering and alteration of meteorites. In M. K. Weisberg, A. N. Krot, T. J. McCoy (Eds.), *Meteorites and the early solar system II* (pp. 853–867). University of Arizona Press.
- Bottke, W. F., Nesvorný, D. (2015). The Yarkovsky and YORP effects. In P. Michel, F. E. DeMeo, W. F. Bottke (Eds.), *Asteroids IV* (pp. 701–724). University of Arizona Press.
- Boyle, R. (1664). *Experiments and considerations touching colours*. Henry Herringman.
- Bulcar, K., Dogan, T., Akça, S., Yüksel, M., Ayvacikli, M., Karabulut, Y., Kucuk, N., Canimoglu, A., Can, N., Topaksu, M. (2018). Thermoluminescence behavior of Sm³⁺ activated ZnB₂O₄ phosphors synthesized using low temperature chemical synthesis method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 428, 65–71.
- Cameron, A. G. W., Anders, E., Wänke, H. (1968). Chemical composition of the Earth and meteorites. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 6(1), 59–106.

- Chen, R. (1969). On the calculation of activation energies and frequency factors from glow curves. *Journal of Applied Physics*, 40(2), 570–585.
- Chen, R., McKeever, S. W. S. (1997). *Theory of thermoluminescence and related phenomena*. World Scientific.
- Ciccolella, A. (2020). Types of chondrules in meteorites. Wikimedia Commons.
- Çalışkan, Ö. (2019). Meteorilerin sınıflandırılması ve Türkiye’deki bazı meteorilerin analizi (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi.
- DeMeo, F. E., Carry, B. (2014). Solar system evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 505(7485), 629–634.
- Dodd, R. T., Van Schmus, W. R., Olsen, E. J. (1967). A survey of the unequilibrated ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(6), 921–951.
- Dogan, T., Yüksel, M., Akça, S., Portakal, Z. G., Yegen, S. B., Kucuk, N., Topaksu, M. (2017). Normal and anomalous heating rate effects on thermoluminescence of Ce-doped ZnB₂O₄. *Applied Radiation and Isotopes*, 128, 256–262.
- Dunn, T. L., McCoy, T. J., Sunshine, J. M., McSween, H. Y. (2013). A coordinated spectral, mineralogical, and compositional study of ordinary chondrites. *Icarus*, 222(1), 273–282.
- Dyar, M. D., Wallace, S. M., Burbine, T. H., Sheldon, D. R. (2023). A machine learning classification of meteorite spectra applied to understanding asteroids. *Icarus*, 406, 115718.
- Ebel, D. S., Alexander, C. M. O’D. (2015). Compositional constraints on asteroid 433 Eros as an ordinary chondrite parent body. *Meteoritics & Planetary Science*, 50(3), 529–543.
- Furetta, C. (2003). *Handbook of thermoluminescence*. World Scientific.
- Furetta, C., Weng, P. S. (1998). *Operational thermoluminescence dosimetry*. World Scientific Publishing.
- Garlick, G. F. J., Gibson, A. F. (1948). The electron trap mechanism of luminescence in sulphide and silicate phosphors. *Proceedings of the Physical Society*, 60(6), 574–590.
- Garlick, G. F. J., Gibson, A. F. (1949). The kinetics of thermally stimulated luminescence in phosphors. *Proceedings of the Physical Society*, 62(10), 862–873.
- Gayon-Markt, J., Delbo, M., Vernazza, P. (2020). Thermal and collisional evolution of the Hebe family: A possible source of H chondrites. *Astronomy & Astrophysics*, 639, A67.
- Goldstein, J. I., Grande, T. (2009). *Metallography and microstructure of meteorites*. Cambridge University Press.
- Haghiri, A., Sharafi, A., Shokouhi, M. (2013). Evaluation of thermoluminescence response and kinetic parameters of natural calcite. *Radiation Measurements*, 56, 247–251.
- Hamilton, V. E., Kaplan, H. H., Christensen, P. R., Ballouz, R.-L., Rozitis, B., Simon, A. A., Lauretta, D. S. (2019). Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Bennu. *Nature Astronomy*, 3(4), 332–340.

- Harvey, R. P. (2003). The origin and significance of Antarctic meteorites. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 63(2), 93–112.
- Hasan, F. A., Sears, D. W. G., Alexander, M. S. (1987). Thermoluminescence of ordinary chondrites – III. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(9), 2777–2788.
- Hasan, F. A., Score, R., Sears, D. W. G. (1988). Reporting natural TL data. *Antarctic Meteorite Newsletter*, 11(2), 1–12.
- Houtermans, F. G., Liener, A. (1966). Thermoluminescence of meteorites. *Journal of Geophysical Research*, 71(6), 1667–1678.
- Hsu, S. C., Tsai, P. S., Chen, R. (1986). Thermoluminescence characteristics of natural minerals and implications for trap structure. *Journal of Luminescence*, 35(1), 55–64.
- Huss, G. R., Ruben, G., Grossman, L. (1981). Thermal metamorphism in chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(1), 33–51.
- Huss, G. R., Rubin, A. E., Grossman, J. N. (2006). Thermal metamorphism in chondrites. In D. S. Lauretta, H. Y. McSween Jr. (Eds.), *Meteorites and the early solar system II* (pp. 567–586). University of Arizona Press.
- Ivliev, A. I., Kuynko, N. S. (2014). Thermoluminescence in Ash Creek and Tamdakht chondrites. 45th Lunar and Planetary Science Conference.
- Kaygısız, E. (2018). Türkiye’ye düşen Bursa, Fethiye (Kemer), Didim ve Fas meteoritlerinin petrografik ve elemental analizleri (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi.
- Kitis, G., Gomez-Ros, J. M., Tuyn, J. W. N. (1993). Thermoluminescence glow-curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26(11), 2017–2027.
- Kitis, G., Tuyn, J. W. N. (1998). A simple method to obtain trap parameters in thermoluminescence glow curves. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(20), 2636–2641.
- Maksimova, A. I., Petrova, E. V., Chukin, A. V., Ünsalan, O., Szabó, Á., Dankházi, Z., Felner, I., Myatin, D. A., Kuzmann, E., Homonnay, Z., Oshtrakh, M. I. (2021). Study of Bursa L6 ordinary chondrite by X-ray diffraction, magnetization measurements, and Mössbauer spectroscopy. *Hyperfine Interactions*, 242(1), 27.
- Maksimova, L., Ünsalan, O., Altunayar-Ünsalan, F., Dolenko, T. (2020). Study of Bursa L6 ordinary chondrite by X-ray diffraction, magnetization measurements, and Mössbauer spectroscopy. *Ankara University Journal of Science Faculty*, 69(2), 178–189.
- Manam, J., Sharma, S. K. (2003). Thermoluminescence study of gamma-irradiated LiF:Mg,Ti phosphor. *Radiation Physics and Chemistry*, 66(5), 373–377.
- McCoy, T. J., et al. (2001). The composition of asteroid 433 Eros: Evidence for partial melting. *Science*, 293(5538), 289–292.
- McKeever, S. W. S. (1985). *Thermoluminescence of solids*. Cambridge University Press.

- McKeever, S. W. S., Sears, D. W. G. (1979). Thermoluminescence of meteorites. *Nature*, 279(5714), 508–510.
- Melcher, C. L. (1980). Thermoluminescence of meteorites and terrestrial ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 48(1), 25–38.
- Melcher, C. L. (1981). Thermoluminescence of meteorites and their orbits. *Earth and Planetary Science Letters*, 52(1), 39–54.
- Meteoritical Society. (2025). Meteoritical Bulletin Database: Bursa (No. 5177).
- Misra, K. C., Eddy, N. W. (1979). Computer analysis of thermoluminescence glow curves. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 12(5), 733–742.
- NASA. (2025). Near-Earth Object Observations Program.
- Ninagawa, K., Soyama, K., Ota, M., Toyoda, S., Imae, N., Kojima, H., Benoit, P. H., Sears, D. W. G. (2000). Thermoluminescence studies of ordinary chondrites in the Japanese Antarctic Meteorite collection. *Antarctic Meteorite Research*, 13, 203–219.
- Oğuz, K. (2016). Nadir toprak elementi ve geçiş metali katkılı Si ve Ca bazlı malzemelerin lüminesans özelliklerinin incelenmesi (Doktora tezi). Ege Üniversitesi.
- Peng, J., Dong, Z. B., Han, F. Q. (2016). tgcd: An R package for analyzing thermoluminescence glow curves. *SoftwareX*, 5, 112–120.
- Randall, J. T., Wilkins, M. H. F. (1945a). Phosphorescence and electron traps I: The study of trap distributions. *Proceedings of the Royal Society A*, 184(999), 366–389.
- Randall, J. T., Wilkins, M. H. F. (1945b). Phosphorescence and electron traps II: The interpretation of long-period phosphorescence. *Proceedings of the Royal Society A*, 184(999), 390–407.
- Richter, A., Kumar, T. (2014). Instruction manual: Lexsygsmart–Automated TL/OSL reader. Freiberg Instruments.
- Richter, D., Richter, A., Dornich, K. (2015). Lexsyg smart – A luminescence detection system for dosimetry, material research and dating applications. *Geochronometria*, 42, 202–209.
- Rubin, A. E. (2019). Classification of meteorites and their parent asteroids. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 79(3), 125–141.
- Scott, E. R. D., Jones, R. H. (1990). Disentangling nebular and asteroidal features of CO₃ carbonaceous chondrite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(9), 2485–2502.
- Scott, E. R. D., Krot, A. N. (2014). Chondrites and their components. In A. M. Davis (Ed.), *Meteorites and cosmochemical processes* (pp. 65–137). Elsevier.
- Sears, D. W. G. (1980). Thermoluminescence of meteorites: Relationships between thermoluminescence, metamorphism, and shock. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(12), 3001–3010.
- Sears, D. W. G., Durrani, S. A. (1987). Thermoluminescence of meteorites and the nature of their parent bodies. *Nature*, 326(6111), 556–558.

- Sears, D. W. G., Hasan, F. A. (1986). Thermoluminescence of meteorites: Relationships between induced thermoluminescence properties and metamorphism in ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(7), 1469–1474.
- Sears, D. W. G., Ninagawa, K., Singhvi, A. K. (2013). Luminescence studies of extraterrestrial materials. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 73(1), 1–37.
- Sengül, E., Kocahan, O., Ozmaya, S., Ozel, M. E., Demircan, O. (2005). Chemical analysis of some meteorite claims in Turkey. In *Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies RAST* (pp. 714–716).
- Sengupta, D., Sears, D. W. S., McKeever, S. W. S. (1997). Terrestrial ages of Antarctic meteorites measured by thermoluminescence of the fusion crust. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(4), 543–548.
- Stöffler, D., Keil, K., Scott, E. R. D. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845–3867.
- Sutton, S. R., Walker, R. M. (1986). Thermoluminescence: A rapid tool for meteorite studies. *The Meteoritical Bulletin*, 21(1), 1–4.
- Szurgot, M. A., Wach, R. A., Altunayar-Ünsalan, C., Ünsalan, O. (2021). Mean atomic heat of Sariçiçek howardite and Bursa L6 chondrite. 52nd Lunar and Planetary Science Conference.
- Szurgot, M. A. (2022). The thermal conductivity of the Bursa chondrite. 85th Annual Meeting of the Meteoritical Society.
- Takehima, T., Yokoyama, T., Nagasawa, K., Miura, H., Yamashita, Y. (2023). The Allende meteorite and its constituent minerals: Insights into early solar system evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 349, 1–25.
- Tobias1984. (2012). Meteorite classification after Weisberg, McCoy & Krot (2006). Wikimedia Commons.
- Uzun, E. (2008). Seydişehir alüminasının termoluminesans özelliklerinin karakterizasyonu ve doz-cevap özelliklerinin araştırılması (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Ünsalan, D., Maksimova, A. I., Dankházi, Z., Szabó, Á., Kuzmann, E., Oshtrakh, M. I. (2021). Study of shock-induced transformations of olivine–ringwoodite and plagioclase–maskelynite in Bursa (L6) chondrite. *Hyperfine Interactions*, 242(1), 30.
- Ünsalan, O., Altunayar-Ünsalan, F. (2020). Shock-induced olivine–ringwoodite and plagioclase–maskelynite transformations in Bursa L6 chondrite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 241, 118646.
- Vernazza, P., Binzel, R. P., Rossi, A., Fulvio, D., Birlan, M. (2014). Relating H, L, and LL chondrites to S-type asteroids: Implications for the source regions of ordinary chondrites. *The Astrophysical Journal*, 791(2), 120.

- Vokhmintsev, A. S., Henaish, A. M. A., Sharshar, T., Hemedda, O. M., Weinstein, I. A. (2021). Study of spectrally resolved thermoluminescence in Tsarev and Chelyabinsk chondrites. *Materials*, 14(21).
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J., Krot, A. N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. In D. S. Lauretta, H. Y. McSween Jr. (Eds.), *Meteorites and the early solar system II* (pp. 19–52). University of Arizona Press.



ÖZGEÇMİŞ

Murat KURTARAN. İlk, Orta ve Lise Öğrenimini İstanbul'da tamamladı. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Bölümünden 1994 yılında mezun oldu. Bir süre özel kurumlarda öğretmen olarak çalıştı. Uzun bir süredir, Hobi ve Sanat Malzemeleri imalatı, tedariki ve dağıtımı ile ilgili bir sektörde kendi işini yapmaktadır.

