

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet YÜKSEL

**DOĞAL VE KATKILANMIŞ BOR MİNERALLERİNİN DOZİMETRE
GELİŞTİRMEK AMACIYLA TERMOLÜMİNESANS (TL) YÖNTEMİ
KULLANILARAK ÇALIŞILMASI**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2013

Sevgili annem, babam ve kardeşlerime...

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

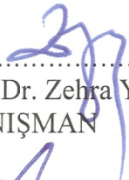
**DOĞAL VE KATKILANMIŞ BOR MİNERALLERİNİN DOZİMETRE
GELİŞTİRMEK AMACIYLA TERMOLÜMİNESANS (TL) YÖNTEMİ
KULLANILARAK ÇALIŞILMASI**

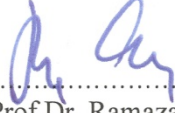
Mehmet YÜKSEL

DOKTORA TEZİ

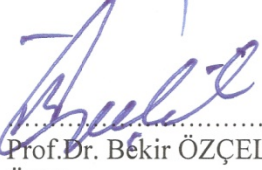
FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez 02/08/2013 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/~~Oyçokluğu~~ İle Kabul Edilmiştir.

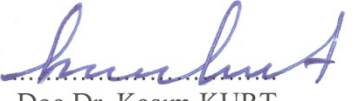

Prof.Dr. Zehra YEĞİNGİL
DANIŞMAN

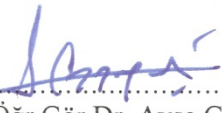

Prof.Dr. Ramazan ESEN
ÜYE


Prof.Dr. Osman PARLAK
ÜYE


Prof.Dr. Bekir ÖZÇELİK
ÜYE


Doç.Dr. Mustafa TOPAKSU
ÜYE


Doç.Dr. Kasım KURT
ÜYE


Öğr.Gör.Dr. Ayşe Gülbin Özger KAVAK
ÜYE (2. DANIŞMAN)

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

**Prof.Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Bu Çalışma Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ve Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
(BOREN) Tarafından Desteklenmiştir.
Proje no: FEF2010D22 ve 2013.Ç03383

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

ÖZ

DOKTORA TEZİ

DOĞAL VE KATKILANMIŞ BOR MİNERALLERİNİN DOZİMETRE GELİŞTİRMEK AMACIYLA TERMOLÜMİNESANS (TL) YÖNTEMİ KULLANILARAK ÇALIŞILMASI

MEHMET YÜKSEL

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof.Dr. Zehra YEĞİNGİL
Yıl: 2013, Sayfa: 227
İkinci Danışman : Öğr.Gör.Dr. Ayşe Gülbin Özger KAVAK
Jüri : Prof.Dr. Zehra YEĞİNGİL
: Prof.Dr. Ramazan ESEN
: Prof.Dr. Osman PARLAK
: Prof.Dr. Bekir ÖZÇELİK
: Doç.Dr. Mustafa TOPAKSU
: Doç.Dr. Kasım KURT
: Öğr.Gör.Dr. Ayşe Gülbin Özger KAVAK

Bu çalışmada, doğal ve katkılanmış bor bileşiklerinin dozimetrik özellikleri termolüminesans yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında doğal susuz boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) örneklerinin karakterizasyonları TG/DTA, XRD, XRF ve SEM analizleri ile yapılmıştır. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ örneklerinin beta ve foton (X-ışını) doz yanıtları, tekrar kullanılabilirlikleri, anormal sönümleri, TL ışıma tepelerine parçacık boyutunun etkisi, uygun tavlama sıcaklığı ve süresinin belirlenmesi, yüksek dozun TL hassasiyetine etkisi ve farklı ısıtma hızlarının etkisi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, sırasıyla katı-hal sentez reaksiyonu ve çözelti yanma sentez yöntemleri kullanılarak $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ bor bileşikleri üretilmiştir. Son olarak, çalışmanın ilk aşamasında olduğu gibi katkılanmış bor bileşiklerinin dozimetrik özellikleri çalışılmıştır. Sonuç olarak, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ örnekleri için önceki dozların etkisinin 400°C 'de 15 dakikalık tavlama ile silindiği, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerinin sırasıyla $\sim 1\text{-}200$ Gy, $\sim 9\text{-}803$ Gy ve $\sim 17\text{-}134$ Gy doz aralıklarında doğrusal doz yanıtına sahip oldukları ve ayrıca tüm örneklerin nemden etkilendiği gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Termolüminesans (TL) dozimetri, Susuz boraks (Etibor-68), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$, $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$, Doz yanıtı, Malzeme üretimi

ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATING NATURAL AND DOPED BORON MINERALS USING THERMOLUMINESCENCE (TL) METHOD FOR THE PURPOSE OF DEVELOPMENT OF A DOSIMETER

MEHMET YÜKSEL

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof.Dr. Zehra YEĞİNGİL
Year: 2013, Page: 227
Co-Supervisor : Instructor Dr. Ayşe Gülbin Özger KAVAK
Jury : Prof.Dr. Zehra YEĞİNGİL
: Prof.Dr. Ramazan ESEN
: Prof.Dr. Osman PARLAK
: Prof.Dr. Bekir ÖZÇELİK
: Assoc.Prof.Dr. Mustafa TOPAKSU
: Assoc.Prof.Dr. Kasım KURT
: Instructor Dr. Ayşe Gülbin Özger KAVAK

In this study, the dosimetric characteristics of natural and doped boron compounds were investigated by using thermoluminescence technique. The first phase of the study, the natural anhydrous borax samples (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) were characterized by using analysis of TG/DTA, XRD, XRF and SEM methods. The beta and photon (X-ray) dose response, reproducibility, fading properties, the effect of particle size to the TL glow peaks, suitable annealing temperature and time, effects of the high dose on TL sensitivity and experiments of various heating rate effect of the $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ samples can be outlined. The second phase of the study, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ and $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ bor compounds were produced using respectively solid-state synthesis reaction and solution combustion synthesis (SCS) methods. Finally, the dosimetric characteristics of doped boron compounds were investigated as in the first phase of the study. Consequently, it was observed that for the samples of $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, the effect of previous doses were deleted with annealing at 400°C for 15 minute, the samples of $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ and $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ had linear dose response between ~ 1 Gy to ~ 200 Gy, ~ 9 Gy to ~ 803 Gy and ~ 17 Gy to ~ 134 Gy dose ranges and also all samples were affected the humidity.

Key Words: Thermoluminescence (TL) dosimetry, Anhydrous borax (Etibor-68), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$, $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$, Dose response, Material production

TEŞEKKÜR

Öncelikle, bu tezin yönetiminde ve oluşumunda aynı zamanda çalışmalarım sırasında karşılaştığım sorunların çözümünde her türlü desteğini esirgemeyen, çalışma yapmak için bütün olanakları sağlayan danışman hocam, Prof.Dr. Zehra YEĞİNGİL'e ve çalışmalarım sırasında Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı'nda yaptığım çalışmalarda gereken ilgiyi eksik etmeyen ve emek harcayan ikinci danışmanım Öğr.Gör.Dr. Ayşe Gülbin Özger KAVAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında her türlü desteğini esirgemeyen Adıyaman Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi hocam Doç.Dr. Mustafa TOPAKSU'ya ve Çukurova Üniversitesi İmamoğlu Meslek Yüksekokulu öğretim elemanı arkadaşım Öğr.Gör.Dr. Tamer DOĞAN'a özellikle teşekkür ediyorum. Yine çalışmalarım sırasında destek ve yardımlarını eksik etmeyen grup arkadaşlarım Arş.Gör. Z. Gizem PORTAKAL ve yüksek lisans öğrencisi Adnan ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Mersin Üniversitesi öğretim üyelerinden Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Doç.Dr. Kasım KURT'a ve Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi (MEİTAM) öğretim üyesi Doç.Dr. Kasım OCAKOĞLU'na çalışmalarım sırasındaki desteklerinden, yardımlarından ve MEİTAM bünyesindeki laboratuvar olanaklarını sağladıkları için teşekkür ediyorum. Ayrıca MEİTAM bünyesindeki laboratuvarların kullanımını Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) tarafından desteklenen 2013.Ç03383 numaralı projemizin çalışmaları için bize açan Mersin Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve MEİTAM çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında kullandığım örneklerimin ışınlaması için tüm olanaklarını bana sağlayan Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı öğretim üyelerine özellikle Prof.Dr. Candaş TUNALI'ya teşekkür ederim.

Doktora Tez İzleme Jürimde yer alıp çalışmalarım boyunca her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof.Dr. Ramazan ESEN'e, Çukurova Üniversitesi Jeoloji

Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof.Dr. Osman PARLAK'a ve jüri üyelerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezimle ilgili çalışmalarım sırasında her türlü desteklerini esirgemeyen Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinin tamamına özellikle laboratuvar olanaklarından faydalandığım Doç.Dr. Cebrazil GÜMÜŞ'e, Prof.Dr. Bekir ÖZÇELİK'e ve Yrd.Doç.Dr. Ahmet EKİCİBİL'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarım sırasında desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden Arş.Gör. Mustafa AKYOL'a, doktora öğrencisi Havva ÖZDAMAR'a ve Adıyaman Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Arş.Gör. Ali Osman AYAŞ'a teşekkür ederim. Fakültemiz Fizik Bölümü sekreteri Sayın Hasan ERGİN'e her türlü yazışmalarımızda gösterdiği çaba ve sabırdan ötürü teşekkür ederim.

Doktora tezimle ilgili olarak yaptığım çalışmalar sırasında kimyasal hesaplarla ilgili sık sık fikir ve önerilerine başvurduğum Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Arş.Gör. Burak AY'a, doktora öğrencisi İlyas GÖNÜL'e ve yüksek lisans öğrencisi Saip CİHANGİR'e teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında yanımda desteğini sürekli olarak hissettiğim, babam Ahmet YÜKSEL'e, annem Aynur YÜKSEL'e, kardeşlerim Bayram Fikri YÜKSEL, Akif YÜKSEL ve Gülnaz ÜNSAL'a ayrıca yardımlarından dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Arş.Gör. Emre ÜNSAL'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım esnasında tüm olanaklardan yararlanmamı sağlayan Ç.Ü. Rektörlüğü'ne, Ç.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Dekanlığına, maddi olarak destek sağlayan Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) (Proje no: 2013.Ç03383) ve Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: FEF2010D22) içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
ÇİZELGELER DİZİNİ	XXI
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XXIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Maddenin Temel Yapısı ve Atom	1
1.1.1. Molekül, Atom ve Element	1
1.1.2. Çekirdeklerin Bazı Özellikleri	2
1.1.3. Çekirdek Büyüklüğü	4
1.1.4. Kararlı Çekirdekler	5
1.1.5. İzotop, İzobar, İzoton.....	6
1.1.6. Elektron Volt (eV)	7
1.2. Radyasyon ve Radyoaktivite	7
1.2.1. Radyasyonun Sınıflandırılması.....	8
1.2.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	8
1.2.1.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon.....	9
1.2.2. Radyasyon Kaynakları.....	10
1.2.2.1. Doğal Radyasyon Kaynakları	10
1.2.2.1.(1). Kozmik Radyasyon	11
1.2.2.1.(2). Gama Radyasyonu	11
1.2.2.1.(3). Radon Solunumu.....	12
1.2.2.1.(4). İç Işınlanma.....	13
1.2.2.2. Yapay Radyasyon Kaynakları	14
1.2.3. Radyoaktif Bozunma Kanunu.....	15
1.2.4. Radyoaktif Denge	17
1.2.5. Radyoaktif Bozunma Türleri (Dönüşüm Mekanizmaları).....	19

1.2.5.1. Alfa Bozunumu.....	19
1.2.5.2. İzobarik Bozunma.....	20
1.2.5.2.(1). Beta (negatron, β^-) Bozunumu	20
1.2.5.2.(2). Pozitron (β^+) Bozunumu	20
1.2.5.2.(3). Elektron Yakalama.....	20
1.2.5.3. İzomerik Bozunma.....	21
1.2.5.3.(1). Gama (γ) Bozunumu	21
1.2.5.3.(2). İç Dönüşüm	21
1.2.6. Radyasyon Dozu Nicelikleri ve Ölçüm Birimleri	22
1.2.6.1. Işınlama Birimi	22
1.2.6.2. Soğurulmuş (Absorblanmış) Doz Birimi.....	23
1.2.6.3. Eşdeğer Doz Birimi (Biyolojik Doz).....	23
1.2.6.4. Etkin Doz	25
1.2.6.5. Kollektif Etkin Doz.....	25
1.2.7. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi	25
1.2.7.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi.....	25
1.2.7.2. Yüksüz Parçacıkların Madde ile Etkileşimi	27
1.2.7.3. Fotoelektrik Etki	27
1.2.7.4. Compton Etkisi	29
1.2.7.5. Çift Oluşumu	30
1.2.7.6. Rayleigh Saçılması (Kohorent Saçılma).....	31
1.2.7.7. Fotonükleer Etkileşimler	32
2. RADYASYON DOZİMETRESİ VE DOZİMETRİ SİSTEMLERİ	33
2.1. Radyasyon Dozimetresi.....	33
2.2. Dozimetrelerin Özellikleri.....	34
2.2.1. Doğruluk ve Hassasiyet	34
2.2.2. Doğrusallık	34
2.2.3. Doz Hızı Bağımlılığı.....	35
2.2.4. Enerji Bağımlılığı	36
2.2.5. Yön Bağımlılığı	36
2.2.6. Uzaysal Çözünürlük ve Fiziksel Boyut	36

2.2.7. Okuma Kolaylığı	37
2.2.8. Kullanım Kolaylığı	37
2.3. Dozimetri Sistemleri.....	38
2.3.1. İyonizasyon Odası Dozimetri Sistemleri	38
2.3.2. Film Dozimetri Sistemleri	39
2.3.3. Yarı İletken Dozimetri Sistemleri (Silicon diode, MOSFET)	41
2.3.4. Lüminesans Dozimetri (TLD, OSLD) Sistemleri.....	44
2.3.4.1. Termolüminesans (TL) Dozimetri	44
2.3.4.1.(1). Kişisel Dozimetri	47
2.3.4.1.(2). Çevresel Dozimetri	48
2.3.4.1.(3). Klinik Dozimetri	49
2.3.4.1.(4). Yüksek Doz Dozimetrisi	50
2.3.4.2. Optiksel Uyarmalı Lüminesans (OSL) Dozimetri	50
2.3.5. Diğer Dozimetri sistemleri (Gel, Diamond)	51
3. TERMOLÜMİNESANS (TL) TEORİSİ	55
3.1. Lüminesans Türleri.....	55
3.2. Kristal Kusurları	56
3.2.1. Noktasal Kusurlar	57
3.2.2. Çizgisel Kusurlar	59
3.2.3. Yüzeysel Kusurlar	59
3.2.4. Hacimsel Kusurlar	60
3.3. Katılarda Band Modeli	61
3.4. Termolüminesans (TL) Teorisi	62
3.5. Termolüminesans (TL) Kinetikleri	67
3.5.1. Birinci Derece Kinetik (Randall-Wilkins Teorisi)	69
3.5.2. İkinci Derece Kinetik (Garlick-Gibson Teorisi).....	75
3.5.3. Genel Derece Kinetik (May-Partridge Teorisi)	81
3.6. Termolüminesans Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması İçin Yöntemler.....	87
3.6.1. İki Farklı Isıtma Hızına Dayanan Yöntem.....	87
3.6.2. Farklı Isıtma Hızlarına Dayanan Yöntem.....	88

3.6.3. Doz Yanıtları Yöntemi	90
3.6.4. $T_{\max}$ - T_{stop} Yöntemi	90
3.6.5. Başlangıçtaki Artış Yöntemi.....	91
3.6.6. İzotermal Bozunum Yöntemi	95
3.6.7. Bilgisayarla Işıma Eğrisi Ayırıştırma (CGCD) Yöntemi	97
3.6.8. Üç Nokta Yöntemi	98
3.6.9. Tepe Şekli Yöntemi	100
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	105
5. MATERYAL VE METOD	117
5.1. Materyal.....	117
5.1.1. Bor ve Bor Mineralleri	117
5.1.1.1. Bor Rezervleri.....	119
5.1.2. Çalışmada Kullanılan Kimyasallar	121
5.1.3. Çalışmada Kullanılan Araç-Gereç ve Cihazlar.....	124
5.1.3.1. Termoluminesans (TL) Ölçüm Sistemi	125
5.1.3.1.(1). IR ve Mavi Işık Kaynağı.....	128
5.1.3.1.(2). Fotokatlandırıcı Tüp (PMT).....	128
5.1.3.1.(3). Algılama Filtreleri.....	130
5.1.3.1.(4). Radyasyon Kaynağı: Beta ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$)	132
5.1.3.1.(5). Isıtma Sistemi.....	134
5.1.3.1.(6). Kontrolör	135
5.1.3.2. X-Işınları Toz Kırınımı (XRD) Ölçüm Sistemi.....	135
5.1.3.3. Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Floresans Spektrometresi (WDXRF) Ölçüm Sistemi.....	138
5.1.3.4. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM).....	140
5.1.3.5. Termogravimetrik Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA) Ölçüm Sistemi.....	141
5.1.3.6. Tavlama Fırınları	141
5.1.3.7. Agat Havan ve Porselen Krozeler.....	144
5.1.3.8. Elekler	145

5.1.3.9. Su Arıtma Cihazı	145
5.1.3.10. Doğrusal Hızlandırıcı	146
5.2. Metod.....	148
5.2.1. Doğal Susuz Boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) Örneklerinin Hazırlanması ve Deneysel Aşamaları	148
5.2.1.1. Örneklerin Hazırlanması.....	148
5.2.1.2. Termal Analizler (TG/DTA).....	148
5.2.1.3. X-Işını Toz Kırınım (XRD) ve X-Işını Floresans (XRF) Analizleri.....	149
5.2.1.4. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizleri.....	149
5.2.1.5. Termolüminesans (TL) Ölçümleri.....	149
5.2.1.5.(1). Doz Yanıtları Deneyi	150
5.2.1.5.(2). Tavlama Deneyleri.....	151
5.2.1.5.(3). Farklı Isıtma Hızları Deneyi	152
5.2.1.5.(4). Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi Deneyi	152
5.2.1.5.(5). Termolüminesans Işıma Tepelerine Parçacık Boyutunun Etkisinin Test Edilmesi Deneyi	152
5.2.1.5.(6). Yüksek Dozun Susuz Boraksın TL Hassasiyetine Etkisi	153
5.2.1.5.(7). Sönüm (Fading) Deneyleri.....	153
5.2.1.5.(8). Foton (X-Işını) Doz Cevabı ve Sönüm Deneyleri	153
5.2.2. Farklı Elementlerle Katkılanmış Sodyum Tetra Borat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ve Magnezyum Borat (MgB_4O_7) Örneklerinin Hazırlanması ve Deneysel Aşamaları	154
5.2.2.1. Katı-Hal Sentez Reaksiyonu Yöntemi.....	154
5.2.2.2. Çözelti Yanma Sentez Yöntemi (SCS).....	155
5.2.2.3. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ Örneklerinin Hazırlanması ve Seçimi.....	155
5.2.2.4. X-Işını Toz Kırınım (XRD) Analizleri	156

5.2.2.5. Termolüminesans (TL) Ölçümleri	156
5.2.2.5.(1). Ön Isıtma Deneyleri	157
5.2.2.5.(2). Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi	
Deneyi	158
5.2.2.5.(3). Doz Yanıtları Deneyi	158
5.2.2.5.(4). Farklı Isıtma Hızları Deneyi	158
5.2.2.5.(5). Yüksek Dozun TL Hassasiyetine Etkisi.....	158
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	161
6.1. Doğal Susuz Boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) Örnekleri ile Yapılan	
Çalışmanın Bulguları	161
6.1.1. Termal Analizlerle (TG/DTA) İlgili Bulgular.....	161
6.1.2. X-Işını Toz Kırınım (XRD) ve X-Işını Floresans (XRF) Analizleri	
ile İlgili Bulgular	162
6.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri ile İlgili	
Bulgular.....	165
6.1.4. Termolüminesans (TL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular	166
6.1.4.1. Doz Yanıt Deneyleri ile İlgili Bulgular	166
6.1.4.2. Tavlama Deneyleri ile İlgili Bulgular.....	171
6.1.4.3. Farklı Isıtma Hızları Deneyi ile İlgili Bulgular	173
6.1.4.4. Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi Deneyi ile İlgili	
Bulgular.....	177
6.1.4.5. Termolüminesans Işıma Tepelerine Parçacık Boyutunun	
Etkisinin Test Edilmesi Deneyi ile İlgili Bulgular.....	180
6.1.4.6. Yüksek Dozun Susuz Boraksın TL Hassasiyetine Etkisi	
ile İlgili Bulgular	182
6.1.4.7. Sönüm (Fading) Deneyleri ile İlgili Bulgular.....	183
6.1.4.8. Foton (X-Işını) Doz Yanıtı ve Sönüm Deneyleri ile İlgili	
Bulgular.....	187
6.2. Farklı Elementlerle Katkılanmış Sodyum Tetra Borat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ve	
Magnezyum Borat (MgB_4O_7) Örnekleri ile Yapılan Çalışmaların	
Bulguları.....	191

6.2.1. Çalışmada Kullanılacak Olan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ Örneklerinin Seçimi ile İlgili Deneylerin Bulguları	191
6.2.2. X-Işını Toz Kırınım (XRD) Analizleri ile ilgili Bulgular	193
6.2.3. Termoluminesans (TL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular	195
6.2.3.1. Ön Isıtma Deneyleri ile İlgili Bulgular	195
6.2.3.2. Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi Deneyi ile İlgili Bulgular	197
6.2.3.3. Doz Yanıtları Deneyleri ile İlgili Bulgular	198
6.2.3.4. Farklı Isıtma Hızları Deneyi ile İlgili Bulgular	204
6.2.3.5. Yüksek Dozun TL Hassasiyetine Etkisi ile İlgili Bulgular	206
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	209
KAYNAKLAR	217
ÖZGEÇMİŞ	227

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1. Atomun yapısı	1
Şekil 1.2. Rutherford saçılma deneyi ve önerdiği atomun gezegen modeli	4
Şekil 1.3. Nükleonların yerleşimi	5
Şekil 1.4. Kararlı çekirdekler için nötron sayısının proton sayısına göre değişimi	6
Şekil 1.5. Elektromanyetik spektrum	10
Şekil 1.6. Bina içerisine Radonun girişi	13
Şekil 1.7. Radyoaktif çekirdeğin zamanla değişimi	16
Şekil 1.8. Bremsstrahlung radyasyonunun oluşumu	26
Şekil 1.9. Fotoelektrik olay	27
Şekil 1.10. Compton olayı	29
Şekil 1.11. Çift oluşumu	31
Şekil 1.12. Rayleigh saçılma	32
Şekil 2.1. İki dozimetri sisteminin yanıt karakteristikleri	35
Şekil 2.2. İyon odası dozimetri sisteminin genel görünüşü	39
Şekil 2.3. Film dozimetreler	40
Şekil 2.4. n-tipi diyot dedektörün kristal yapısı	42
Şekil 2.5. p-tipi diyot dedektörün kristal yapısı	43
Şekil 2.6. Yarı iletken dozimetri sistemi	44
Şekil 2.7. Değişik şekil ve biçimlerde termolüminesans dozimetreler	45
Şekil 2.8. Termolüminesans okuyucu	46
Şekil 2.9. TLD'lerin kullanıldığı alanların alt kategorileri ile birlikte gösterimi	46
Şekil 2.10. microStar OSLD okuyucu, nanoDot ve Inlight dozimetreler	51
Şekil 2.11. Jel dozimetrelerin genel bir görüntüsü	52
Şekil 3.1. Kristal yapı içerisinde oluşan noktasal kusurlar	58
Şekil 3.2. Kristal yapıda oluşan (a) F merkezli, (b) M merkezli, (c) R merkezli noktasal kusurlar	59
Şekil 3.3. Bir kristalde çizgisel kusurlar	59
Şekil 3.4. Bir kristalde hacimsel kusurlar	60

Şekil 3.5. Bir kristalde vida kayma kusuru	61
Şekil 3.6. Katıların iletkenlik özelliklerine göre bant yapısı	62
Şekil 3.7. Doğal CaF_2 'nin ışıma eğrileri	64
Şekil 3.8. Kristal yapı içerisinde ışınlama ile gerçekleşen süreç	65
Şekil 3.9. Kristal yapı içerisinde ısıtma ile meydana gelen süreç	65
Şekil 3.10. Yeniden birleşme merkezinde (RC) zamanın bir fonksiyonu olarak sıcaklık profili $T(t)$, TL şiddeti $I(t)$ ve tuzaklanmışdeşiklerin yoğunluğu $n(t)$	68
Şekil 3.11. Birinci derece TL denklemine göre normalize edilmiş ışıma tepesi	70
Şekil 3.12. Birinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin ısıtma hızı ile değişimi	72
Şekil 3.13. Birinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin başlangıçta ($t=0$) tuzaklanmış elektron yoğunluğu ile değişimi	73
Şekil 3.14. Birinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) ile değişimi	73
Şekil 3.15. Birinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin frekans faktörü (kaçış frekansı) ile değişimi	74
Şekil 3.16. İkinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin başlangıçta ($t=0$) tuzaklanmış elektron yoğunluğu ile değişimi	77
Şekil 3.17. İkinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin ısıtma hızı ile değişimi	79
Şekil 3.18. İkinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) ile değişimi	80
Şekil 3.19. İkinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin frekans faktörü (kaçış frekansı) ile değişimi	80
Şekil 3.20. Farklı kinetik derecelerin TL ışıma tepelerine etkisi	84
Şekil 3.21. İki farklı ısıtma hızı kullanılarak elde edilen birinci derece TL ışıma eğrileri	88
Şekil 3.22. Başlangıç artış grafiği	92
Şekil 3.23. Işıma tepesinin başlangıçtaki yükselen kısmı	93
Şekil 3.24. Işıma tepesinin başlangıçta yükselen kısmına ait teget	94

Şekil 3.25. Bir TL ışıma tepesi için sıcaklık parametreleri ve bu parametrelere karşılık gelen ışıma şiddetleri.....	99
Şekil 3.26. İzole edilmiş ışıma tepesi ve sıcaklık parametreleri	100
Şekil 4.1. LTB:Cu, LTB:Ag ve LTB:Mn tek kristallerinin TL ışıma eğrileri ve yayılım spektrumları	107
Şekil 4.2. Farklı sürelerde ısıtıl işlem görmüş $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag,P}$ (%0.02) ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag,P}$ (%0.04) örneklerine ait TL ışıma tepeleri	109
Şekil 4.3. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mg}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:P}$ örneklerine ait TL ışıma tepeleri	110
Şekil 4.4. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu,In}$ ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu,In,Ag}$ örneklerine ait TL ışıma tepeleri ve bu tepelere ait doz yanıt grafiği.....	113
Şekil 4.5. Bakır katkılı amorf ve kristalin sodyum borat bileşiklerinin TL ışıma eğrileri ve TLD-100 ile karşılaştırılmaları	114
Şekil 4.6. Bakır katkılı (a) amorf ve (b) kristalin sodyum borat bileşiklerinin izometrik çizimleri	115
Şekil 4.7. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve B_2O_3 bor bileşiklerinin TL ışıma eğrileri.....	116
Şekil 5.1. Borun (a) bor elementi (b) kolemanit (c) boraks (d) üleksit gibi formlarının genel görünümü	117
Şekil 5.2. Türkiye bor madenleri (a) Balıkesir (b) Bursa (c) Kütahya (d) Eskişehir.....	120
Şekil 5.3. Susuz boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)	121
Şekil 5.4. $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ boraks mineralinin kristal yapısı	124
Şekil 5.5. Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sisteminin genel görünümü	126
Şekil 5.6. Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sisteminin şematik gösterimi.....	127
Şekil 5.7. 48 örnek haznesine sahip Örnek Tablası ve örneklerin yerleştirildiği diskler.....	127
Şekil 5.8. (a) IR ve Mavi LED'lerin dizilişi ve (b) bu LED'lere ait yayılım dalga boyuna ait grafik.....	129

Şekil 5.9. EMI 9235QB PMT (Bialkali) fotokatlandırıcı tüpünün kuantum verimliliğinin foton dalga boyuna göre grafiği	130
Şekil 5.10. Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemine uyumlu üç algılama filtresinin geçirgenlik karakteristikleri	131
Şekil 5.11. Hoya U-340 ve mavi filtre paketinin geçirgenlik karakteristikleri ile kuvars ve feldispatın yayılım spektrumları	131
Şekil 5.12. Radyasyon kaynağının bulunduğu kurşun muhafaza.....	133
Şekil 5.13. Isıtma sisteminin	
a) Ölçüme hazır pozisyondaki görüntüsü	
b) Örnek tablası yerinde iken görüntüsü	134
Şekil 5.14. Bir Windows komut programı tarafından yönetilen kontrolör	135
Şekil 5.15. Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi.....	138
Şekil 5.16. Rigaku marka ZSX Primus II model dalga boyu dağılımlı X-Işını floresans spektrometresi cihazı	139
Şekil 5.17. FE-SEM ölçüm sistemi	141
Şekil 5.18. Nabertherm marka tavlama fırını	142
Şekil 5.19. Protherm marka tavlama fırını	143
Şekil 5.20. Memmert Model INB 400 tipi elektrikli inkubatör	144
Şekil 5.21. Farklı boyutlardaki agat havan ve porselen krezeler	145
Şekil 5.22. Farklı elek boyutlarına sahip Retsch marka elekler	145
Şekil 5.23. Human Power I marka su arıtma cihazı	146
Şekil 5.24. VARIAN marka CLINAC 600C DBX model doğrusal hızlandırıcı	147
Şekil 5.25. Ön ısıtma deneyleri için kullanılan sequence protokolünün görünümü	157
Şekil 6.1. Susuz boraksa ait TG/DTA eğrileri.....	161
Şekil 6.2. Susuz boraksa ait XRD spektrumu	162
Şekil 6.3. Susuz boraksa ait XRD spektrumları.	
(a) Tavlınmamış (b) 500°C’de 1 saat tavlınmış	
(c) 500°C’de 2 saat tavlınmış	163
Şekil 6.4. Susuz boraksa ait SEM görüntüleri.....	166
Şekil 6.5. Farklı doz oranları (1.7 Gy-15 Gy) deneyinden elde edilen ısıtma eğrileri	167

Şekil 6.6. Farklı doz oranları (26.76 Gy-301 Gy) deneyinden elde edilen ışıma eğrileri	168
Şekil 6.7. Farklı doz oranları (0.4 kGy-4 kGy) deneyinden elde edilen ışıma eğrileri	168
Şekil 6.8. Işıma eğrilerinin altında kalan alanlardan elde edilen doz yanıt eğrileri	170
Şekil 6.9. Farklı tavlama sıcaklıkları sonrasında elde edilen artık (residual) TL ışıma eğrileri.....	172
Şekil 6.10. Tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak artık (residual) TL ışıma şiddeti	172
Şekil 6.11. Tavlama süresinin bir fonksiyonu olarak artık (residual) TL ışıma şiddeti	173
Şekil 6.12. Tavlama yapılmadan farklı ısıtma hızlarında ölçülen ışıma eğrileri.....	174
Şekil 6.13. Tavlama yapılarak farklı ısıtma hızlarında ölçülen ışıma eğrileri	175
Şekil 6.14. Isıtma hızlarının fonksiyonu olarak tepe sıcaklıkları	175
Şekil 6.15. Isıtma hızlarının fonksiyonu olarak ışıma tepelerine ait alanların TL yanıt eğrileri	176
Şekil 6.16. Tavlama yapılmamış aynı susuz boraks örneklerine 15 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri	177
Şekil 6.17. 400°C’de 15 dakika tavllanmış aynı susuz boraks örneklerine 15 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri.....	178
Şekil 6.18. Tavlama yapılmamış örneklerin çevrim başına TL hassasiyetinin değişimi	179
Şekil 6.19. 400°C’de 15 dakika tavllanmış örneklerin çevrim başına TL hassasiyetinin değişimi	179
Şekil 6.20. 33.445 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri.	181
Şekil 6.21. 66.89 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri.	181
Şekil 6.22. 133.78 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri	182

Şekil 6.23. Yüksek doz öncesi ve sonrası 10 Gy'lik beta dozu ile ışınlanmış örneklerin TL ışıma eğrileri.	183
Şekil 6.24. 66.89 Gy beta dozu ile ışınlanmış ve ışık alan ortamda saklanmış susuz boraks örneklerine ait sönüm eğrileri.....	184
Şekil 6.25. 66.89 Gy beta dozu ile ışınlanmış ve karanlık ortamda saklanmış susuz boraks örneklerine ait sönüm eğrileri.....	186
Şekil 6.26. Farklı dozlarda (1-50 cGy) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrileri	188
Şekil 6.27. Farklı dozlarda (100-1000 cGy) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrileri	188
Şekil 6.28. Farklı dozlarda (1-1000 cGy) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen doz yanıt eğrisi.....	189
Şekil 6.29. Fotonlarla 1000 cGy doz verilmiş ve karanlık ortamda saklanmış susuz boraks örneklerine ait sönüm eğrisi	191
Şekil 6.30. 5 Gy beta dozu ile ışınlanmış $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri.....	192
Şekil 6.31. 40 Gy beta dozu ile ışınlanmış MgB_4O_7 ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri	193
Şekil 6.32. (a) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve (b) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ örneklerine ait XRD spektrumları.....	194
Şekil 6.33. (a) MgB_4O_7 ve (b) $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerine ait XRD spektrumları.....	194
Şekil 6.34. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ örneklerine ait ön ısıtma sıcaklığının fonksiyonu olarak TL şiddeti grafiği.....	196
Şekil 6.35. $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerine ait ön ısıtma sıcaklığının fonksiyonu olarak TL şiddeti grafiği.....	196
Şekil 6.36. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ örneklerinden elde edilen çevrim başına TL hassasiyetinin değişim grafiği	197
Şekil 6.37. $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerinden elde edilen çevrim başına TL hassasiyetinin değişim grafiği	198
Şekil 6.38. Farklı dozlarda ışınlanmış $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri	199

Şekil 6.39. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlardan elde edilen doz yanıt eğrisi	200
Şekil 6.40. Farklı dozlarda ışınlanmış $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri	202
Şekil 6.41. $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{Ag}$ örneklerinin TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlardan elde edilen doz yanıt eğrisi	203
Şekil 6.42. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin farklı ısıtma hızlarında ölçülen ışıma eğrileri	205
Şekil 6.43. $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{Ag}$ örneklerinin farklı ısıtma hızlarında ölçülen ışıma eğrileri	205
Şekil 6.44. Yüksek doz öncesi ve sonrası 20 Gy'lik beta dozu ile ışınlanmış $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri	206
Şekil 6.45. Yüksek doz öncesi ve sonrası 20 Gy'lik beta dozu ile ışınlanmış $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri	207

Çizelge 1.1. Atom içi parçacıkların temel özellikleri	3
Çizelge 1.2. Radyasyonların sınıflandırılması	9
Çizelge 1.3. Yapay radyasyon kaynakları.....	14
Çizelge 1.4. Radyasyon türlerine göre RBE ve KF	24
Çizelge 1.5. Fotoelektronların yumuşak dokuda erişme mesafeleri	28
Çizelge 2.1. Dozimetri sistemlerinin avantaj ve dezavantajları	53
Çizelge 3.1. u_m ve kinetik derecenin bir fonksiyonu olarak geometrik faktörün değerleri.....	85
Çizelge 5.1. Ticari önem taşıyan bor minerallerinin bileşimleri.....	119
Çizelge 5.2. Bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı.....	120
Çizelge 5.3. Etibor-68'in kimyasal özellikleri ve elek analizi	121
Çizelge 5.4. Çalışmada kullanılan kimyasallar	123
Çizelge 6.1. Doğal susuz boraksın birim hücre parametreleri	164
Çizelge 6.2. Doğal susuz boraksın Miller indisleri	164
Çizelge 6.3. Doğal susuz boraksın XRF sonuçları.....	165
Çizelge 6.4. Doğal susuz boraks örneklerinin beta doz yanıt oranları.....	171
Çizelge 6.5. Doğal susuz boraks örneklerinin foton doz yanıt oranları	190
Çizelge 6.6. $Na_2B_4O_7:Ag$ örneklerinin beta doz yanıt oranları	201
Çizelge 6.7. $MgB_4O_7:Cu,Ag$ örneklerinin beta doz yanıt oranları.....	204

SİMGELER VE KISALTMALAR

α	: Alfa parçacığı
a.u.	: Keyfi birim (arbitrary unit)
β^-	: Beta parçacığı (elektron, e^-)
β^+	: Beta parçacığı (pozitron, e^+)
β	: Isıtma hızı
Bq	: Becquerel
BOREN	: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
CGCD	: Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma
Ci	: Curie
eV	: Elektron volt, enerji birimi
exp	: Exponansiyel
E	: Aktivasyon enerjisi
fm	: Femtometre (fermi)
Gy	: Gray (Soğurulmuş doz birimi, J/kg)
I(T)	: Termolüminesans sinyalinin şiddeti
IR	: İnfrared (Kızıl ötesi)
k	: Boltzmann sabiti
MgB ₄ O ₇	: Magnezyum borat
MTA	: Maden Tetkik Arama Enstitüsü
Na ₂ B ₄ O ₇	: Susuz boraks (Sodyum tetra borat)
nm	: Nano metre, 1 nm=10 ⁻⁹ m
OSL	: Optik uyarmalı lüminesans
RC	: Yeniden birleşme merkezi
⁹⁰ Sr	: Stronsiyum-90
T	: Mutlak sıcaklık
TL	: Termolüminesans
TLD	: Termolüminesans dozimetre
UV	: Ultra-Viyole (Mor ötesi)
γ	: Gama ışını

XRD : X-ışını kırınımı
XRF : X-ışını floresans
⁹⁰Y : İtiryum-90

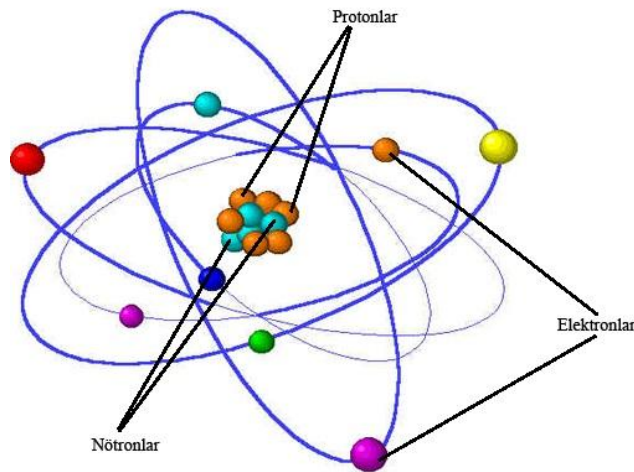
1. GİRİŞ

1.1. Maddenin Temel Yapısı ve Atom

1.1.1. Molekül, Atom ve Element

Bir maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini kaybetmeden bağımsız olarak bulunabileceği en küçük parçasına “molekül” adı verilir. Molekülleri oluşturan temel yapıtaşları atomlardır. Atom, maddelerin tüm özelliklerini kaybetmeden bölünebilecek en küçük parçacıkları olarak bilinmektedir. Radyoaktif parçalanmalar dışında atomlar başka bir maddeye dönüştürülemez. Aynı cins atomların bir araya gelerek oluşturdukları maddeye ise “element” denir.

Tüm maddeler atomlardan meydana gelmiştir. Geçmişten günümüze atomla ilgili birçok teori üretilmiştir. Günümüzde bazı değişikliklere uğrayarak geçerliliğini sürdüren Bohr atom modeli 1913 yılında Niels Bohr tarafından ortaya atılmış ve Summerfield tarafından bu modele birçok katkı yapılarak model bugünkü halini almıştır. Bugün kabul edilen modern atom teorisine göre en basit anlamda atomik yapı, ortada pozitif yüklü bir çekirdek (nükleus) ve çekirdek etrafındaki muhtelif enerji düzeylerinde (katmanlarında) dolanan elektronlardan oluşur. Atomun yapısı Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Atomun yapısı.

Nötr bir atomda proton sayısı elektron sayısına eşittir. Elektron sayısı proton sayısına eşit olmayan atomlara iyon adı verilir. İyonlar bir ya da daha çok elektron vermiş ya da almış atomlardır. Elektron veren atomlar pozitif yük, elektron alan atomlar ise negatif yük ile sembolize edilirler.

Atomun çevresinde yer alan elektron bulutu şeklindeki eliptik yörüngelerde elektronlar dolanırlar. Bu yörüngeler çizgi şeklinde olmayıp her yörünge kendi içinde alt yörüngelerden oluşmuştur. Elektron yörüngeleri içten dışa doğru K, L, M, N, ... ya da kuantum numaraları denilen ($n=1, 2, 3, 4, \dots$) rakamlarıyla gösterilirler. Bir atomda içten dışa doğru yörünge çapının artmasına bağlı olarak elektron sayısı da artmaktadır (Cember ve Johnson, 2009; Demir, 2008).

1.1.2. Çekirdeklerin Bazı Özellikleri

Bütün çekirdekler, nötron ve proton olarak adlandırılan iki çeşit parçacıktan oluşurlar. Bu durumun tek istisnası hidrojen çekirdeğidir. Hidrojen çekirdeği tek bir protondan oluşur. Bir atomun çekirdeği içerisindeki temel parçacıkları ve bunların temel özellikleri ile ilgili tanımları inceleyecek olursak;

- Atom numarası Z , çekirdekteki proton sayısına eşittir ve protonlar pozitif yüklüdür.
- Nötron numarası N , çekirdekteki nötron sayısına eşittir ve nötronlar yüksüzdür.
- Kütle numarası $A=Z+N$, çekirdekteki nükleon (nötron ve protonların her ikisi birden) sayısına eşittir.

İçerdikleri proton ve nötron sayılarını belirtecek şekilde çekirdeklerin sembolik olarak gösterimi yaygın bir kullanım türüdür. Buna bağlı olarak atom numarası Z ve kütle numarası A olan bir çekirdeğin sembolik gösterimi ${}^A_ZX$ şeklindedir. Burada X elementin kimyasal sembolüdür. Örneğin ${}^{56}_{26}Fe$ gösteriminde demirin kütle numarası 56, atom numarası ise 26'dır. Çekirdek 26 proton ve 30 nötron içermektedir.

Belirli bir elementin tüm atomlarının çekirdekleri hep aynı sayıda proton içerdikleri halde farklı sayıda nötron içerebilirler Bu tür çekirdeklere “izotop” denir. Örneğin $^{12}_6C$, $^{13}_6C$ ve $^{14}_6C$ karbon elementinin izotoplarıdır. Bazı izotoplar doğal yoldan oluşmadıkları için çekirdek reaksiyonları sonucunda laboratuvarlarda elde edilebilirler.

Proton, elektronun $|e| = 1.6 \times 10^{-19} C$ ’luk yüküne değerce eşit olan tek bir pozitif yük taşır. Nötron ise yük taşımaz ve nötrdür.

Çekirdeklerin kütleleri, kütle spektrometresi yardımıyla ve çekirdek reaksiyonlarının analizi sonucu, büyük bir duyarlılıkla ölçülebilmektedir. Protonun kütlesi, elektrona kıyasla yaklaşık 1836 kat daha büyüktür. Proton ve nötronun kütleleri hemen hemen birbirine eşittir. Atomik boyutta kütleler için, atomik kütle birimi, u , ^{12}C izotopunun kütlesi 12 u olacak şekilde tanımlanmıştır. Böylece bir çekirdeğin kütlesi ^{12}C izotopunun bir nötr atomu cinsinden ölçülür. Burada 1 u , $1.660559 \times 10^{-27} kg$ ’dır. Nötron ve protonun her birinin kütlesi yaklaşık 1 u ’dur. Elektronun kütlesi ise, atomik kütle biriminin sadece ufak bir kesri değerindedir:

$$m_p = 1.007276 u$$

$$m_n = 1.008665 u$$

$$m_e = 0.0005486 u$$

Atomik kütle biriminin, enerji eşdeğeri cinsinden tanımlanarak kullanılması da yaygındır. Çekirdek fiziğinde atomik kütle birimi sıkça MeV/c^2 biriminde verilmektedir. Burada,

$$1 u = 1.660559 \times 10^{-27} kg = 931.50 MeV/c^2 \text{’dir.}$$

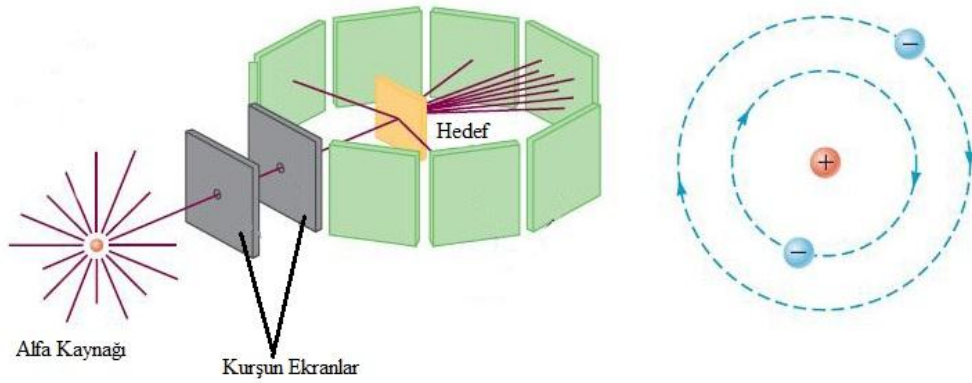
Çizelge 1.1’de atom içi parçacıkların temel özellikleri verilmiştir (Serway ve Jewet, 2010).

Çizelge 1.1. Atom içi parçacıkların temel özellikleri.

Parçacık	Sembol	Yük	Kütle		
			u	kg	MeV/c^2
Elektron	e	-1	$5,48579 \times 10^{-4}$	9.10938×10^{-31}	0.510999
Proton	p	+1	1.007276	1.67262×10^{-27}	938.27
Nötron	n	0	1.008665	1.67493×10^{-27}	939.57

1.1.3. Çekirdek Büyüklüğü

Çekirdeklerin yapısı ve büyüklüğü ile ilgili çalışmalar ilk olarak 1911’de Ernest Rutherford ile öğrencileri Hans Geiger ve Ernst Marsden tarafından yapılan saçılma deneyleri ile incelenmiştir. Bu deneylerde helyum atomunun pozitif yüklü çekirdekleri (alfa parçacıkları) metal folyo (çok ince kristal) üzerine gönderilmiş (Şekil 1.2) ve meydana gelen saçılmalar göz önüne alınarak bir takım hesaplamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlardan yararlanılarak atomdaki pozitif yükün, çekirdek denilen ve yarıçapı yaklaşık 10^{-14} m’den daha büyük olmayan küçük bir kürede yoğunlaştığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.2. Rutherford saçılma deneyi ve önerdiği atomun gezegen modeli (Serway ve Jewet, 2010).

Çekirdek fiziğindeki uzaklıkların çok küçük olması nedeniyle bazen fermi olarak adlandırılan femtometre (fm) uzaklık birimi,

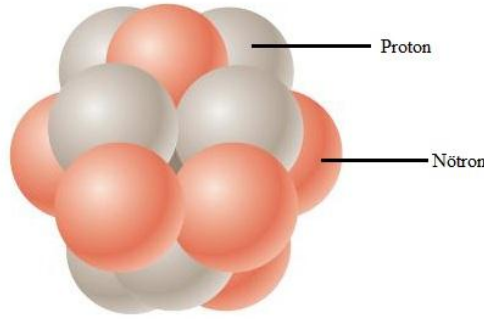
$$1 \text{ fm} \equiv 10^{-15} \text{ m}$$

olarak tanımlanmıştır. Yapılan diğer deneyler sonucunda, pek çok çekirdeğin yaklaşık olarak küresel geometriye sahip oldukları ve ortalama yarıçap için,

$$r = r_0 A^{1/3}$$

ifadesinin kullanılabileceği gösterilmiştir. Burada A kütle numarası ve r_0 değeri $1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$ olan bir sabittir. Bir kürenin hacmi, r yarıçapının küpü ile orantılı olduğundan bir çekirdeğin hacminin toplam nükleon sayısı ile orantılı olduğu görülür. Bu görüş, “tüm çekirdekler yaklaşık aynı yoğunluktadır” sonucunu verir.

Nükleonlar, birleşik bir çekirdek oluşturmak üzere bir araya geldiklerinde Şekil 1.3'te de görüldüğü gibi sıkıca istiflenmiş küreler gibi birleşirler (Serway ve Jewet, 2010).

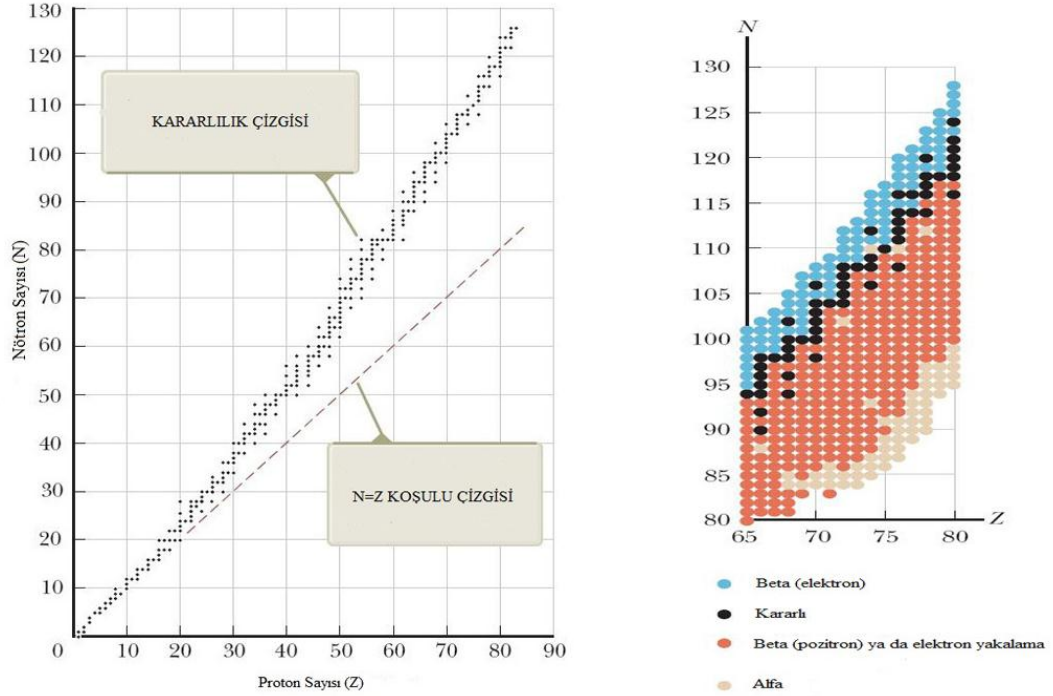


Şekil 1.3. Nükleonların yerleşimi (Serway ve Jewet, 2010).

1.1.4. Kararlı Çekirdekler

Coulomb kanununa göre aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılı olacak şekilde çekirdekte yer alan protonlarla yörüngelerdeki elektronlar arasında çekim kuvveti, protonların kendi aralarında ise itme kuvvetleri meydana gelmektedir. Protonlar arasında meydana gelen bu itme kuvvetinin etkisiyle çekirdeğin parçalanması gerekirken gerçekte böyle olmamaktadır. Bunun nedeni, çekirdek kuvveti olarak adlandırılan başka bir kuvvetin varoluşudur. Bu kuvvet 2 fm gibi çok kısa bir menzilde etkili olan çekirdekteki tüm parçacıklara etki eden çekici bir kuvvettir.

Bir atomun kararlılığı, çekirdek içerisinde yer alan proton ve nötron sayılarıyla ilişkilidir. Şekil 1.4'te de görüldüğü gibi hafif çekirdekler eşit sayıda nötron ve proton içeriyorlarsa ($N = Z$, $N/Z = 1$) daha kararlıdırlar. Ağır çekirdeklerde ise nötron sayısı proton sayısından ne kadar büyükse o çekirdek o kadar kararlıdır. Büyük atom numarası (Z) değerleri için protonlar arası itici kuvvet daha çok nötron ilavesi ile dengelenemez. Bu olay, $Z = 83$ değeri ile sınırlıdır. 83'den daha fazla proton içeren çekirdekler kararlı değildir (Serway ve Jewet, 2010).



Şekil 1.4. Kararlı çekirdekler için nötron sayısının proton sayısına göre değişimi (Serway ve Jewet, 2010).

1.1.5. İzotop, İzobar, İzoton

Benzer karakteristiği olan atomlar bazen nükleer aileler olarak tanımlanır. Bir nüklid kütle numarası A , atom numarası Z ve nükleonların çekirdek içindeki dizilimlerine göre karakterize edilebilmektedir.

Atom numarası aynı olup kütle numarası farklı olan nüklidlere “izotop”, atom numarası farklı kütle numarası aynı olan nüklidlere “izobar” ve nötron sayısı aynı olan nüklidlere ise “izoton” adı verilir. Örneğin $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ ve $^{14}_6\text{C}$ karbon elementinin izotopları, $^{131}_{53}\text{I}$, $^{131}_{54}\text{Xe}$ ve $^{131}_{55}\text{Cs}$ nüklidleri izobar ve $^{131}_{78}\text{I}$, $^{132}_{78}\text{Xe}$ ve $^{133}_{78}\text{Cs}$ nüklidleri ise izotondur.

1.1.6. Elektron Volt (eV)

Etkileştiği maddede değişiklik yapabilme kabiliyeti radyasyon enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Radyasyon enerjisi çoğu zaman elektron volt (eV) birimi kullanılarak ifade edilir. 1 eV, bir elektronun 1 voltluk potansiyel altında hızlandırılmasıyla kazandığı enerji olarak tanımlanmaktadır.

1.2. Radyasyon ve Radyoaktivite

Birçok nüklit kararlı olmasına rağmen, çoğunluğu da kararsızdır. Kararlılık esasen bir nüklitin bulundurduğu nötron ve proton sayıları arasındaki denge ile belirlenir. Daha küçük kararlı nüklitler eşit sayıda proton ve nötrona sahipken, daha büyük kararlı nüklitler ise protondan biraz daha fazla nötrona sahiptir. Çok fazla nötronu bulunan nüklitler bir nötronu bir protona dönüştürerek kendilerini çok daha kararlı bir yapıya kavuşturma eğilimindedir ve beta bozunumu olarak bilinen bu süreç, beta parçacığı olarak adlandırılmış negatif yüklü bir elektronun yayınlanması ile neticelenir. Çok sayıda protonu olan nüklitler ise beta bozunumundan farklı olarak fazla protonları nötronlara dönüştürerek pozitif yüklü elektron olan pozitron yayınlanması ile pozitif yükünü kaybeder.

Bu dönüşümlerde çoğu kez atom çekirdeği, gama ışınları olarak adlandırılan yüksüz ve kütsüz yüksek enerjili fotonlar yayarak fazla enerjisini kaybeder. Atom çekirdeğinin kendiliğinden dönüşümüne “radyoaktivite” denir ve yayınlanmış fazla enerji de iyonlaştırıcı radyasyon biçimindedir. Bu dönüşüm eylemine “bozunum” değişen ve radyasyon yayan atom çekirdeğine ise “radyonüklit” denir.

Bazı ağır çekirdekler iki proton ve iki nötrondan oluşan alfa parçacığı yayınlarak bozunur. Helyum çekirdeği ile özdeş olan alfa parçacıkları beta parçacıklarından çok daha ağırdır ve iki değerlikli pozitif yük taşır (IAEA, 2004; TAEK, 2009).

1.2.1. Radyasyonun Sınıflandırılması

Radyasyon, etkileştiği ortamdaki atom ve molekülleri iyonizasyona uğratabiliyorsa iyonlaştırıcı, uğratamıyorsa iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak adlandırılır. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri Çizelge 1.2’de görülmektedir.

1.2.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonizasyon, nötr haldeki bir atomun veya bir molekülün herhangi bir etki ile elektrik yükünün değiştirilerek iyon haline getirilmesi işlemidir. Bu işlem, sisteme bir elektron eklenerek veya sistemden bir elektron çıkarılarak yapılabilir. Radyasyonun madde ile etkileşmesi sonucu iyonizasyon olayının gerçekleşebilmesi için radyasyonun enerjisi, etkileştiği maddenin atomuna ait iyonizasyon potansiyelinden daha yüksek olmalıdır.

İyonlaştırıcı radyasyon maddeyi doğrudan ya da dolaylı olarak iyonize edebilir çünkü onun enerjisi maddenin iyonlaşma potansiyelini aşar. İyonlaştırıcı radyasyon iki ana kategoriye ayrılabilir:

- Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon (yükü parçacıklar)
elektronlar, protonlar, alfa parçacıkları, ağır iyonlar
- Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon (yüksüz parçacıklar)
fotonlar (x-ışınları, gama ışınları), nötronlar (Podgorsak, 2010)

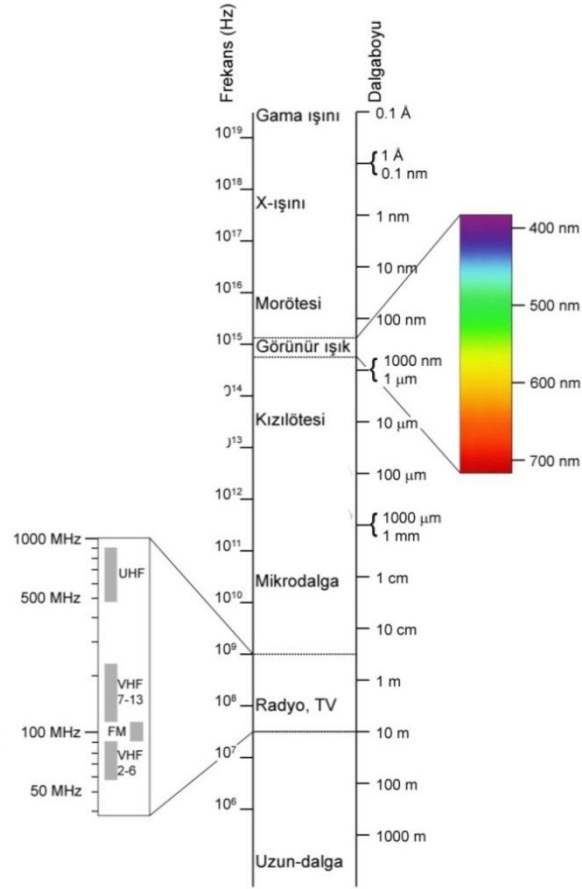
Çizelge 1.2. Radyasyonların sınıflandırılması.

Radyasyonların Sınıflandırılması		
İyonlaştırıcı Radyasyonlar		İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyonlar
<i>Doğrudan İyonlaştırıcı</i>	<i>Dolaylı İyonlaştırıcı</i>	<i>Dalga Karakterli</i>
Alfa parçacıkları Beta parçacıkları Protonlar	X-ışınları Gama ışınları Nötronlar	Radyo dalgaları Mikrodalgalar Kızıl ötesi Görünür Mor ötesi

1.2.1.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Enerjisi maddeyi iyonlaştırma potansiyeline sahip olmadığı için iyonizasyona sebep olamayan radyasyonlara iyonlaştırıcı olmayan radyasyon adı verilir. Bu radyasyonlar Şekil 1.5'teki elektromanyetik spektrumdan da görüleceği üzere enerjileri 10^{-9} eV ile 10 eV arasında değişen ve düşük enerjiliden yüksek enerjiliye doğru radyo dalgaları, mikro dalgalar, kızıl ötesi (infrared, IR), görünür (visible) ve mor ötesi (ultraviolet, UV) radyasyonlar olarak isimlendirilirler. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar düşük enerjili olandan yüksek enerjili olana doğru şu şekilde sıralanabilir:

- Radyo dalgaları
- Mikro dalgalar
- Kızıl ötesi (infrared, IR)
- Görünür ışık (visible)
- Mor ötesi (ultraviolet, UV)



Şekil 1.5. Elektromanyetik spektrum (I).

1.2.2. Radyasyon Kaynakları

1.2.2.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Doğal iyonlaştırıcı radyasyon etrafımızı sarar. Kozmik ışınlar dünyaya uzaydan ulaşır. Dünyanın kendisi de radyoaktiftir. Havada, gıda ve içeceklerde doğal radyoaktivite mevcuttur. Hepimiz az ya da çok seviyede doğal radyasyona maruz kalırız; ve bu, insanların çoğu için başlıca ışınlanma kaynağıdır. Ancak insan, hayvan ve bitkiler bu doğal radyasyon ortamında evrimleşmiştir ve bu radyasyonun sağlık açısından önemli bir risk oluşturmadığı konusunda genel bir kanı bulunmaktadır (IAEA, 2004; TAEK, 2009).

1.2.2.1.(1). Kozmik Radyasyon

Kozmik ışınlar, esas itibarıyla, uzayda menşei belli olmayan ve atmosferimize hemen hemen sabit miktarda ulaşan yüksek enerjili protonlardır. Bununla birlikte, bazı düşük enerjili protonların güneşten geldikleri ve güneşteki patlamalar sırasında ortaya çıktıkları bilinmektedir. Kozmik ışınlar atmosfere nüfuz ettikçe karmaşık reaksiyonlar başlatır ve kademeli bir şekilde soğurulurlar. Kozmik radyasyon protonlar, alfa parçacıkları, elektronlar ve yüksek enerjili diğer çeşitli parçacıklar gibi birçok radyasyon tipinin bir karışımıdır. Yer seviyesindeki kozmik radyasyon esas olarak, müonlar, elektronlar, pozitronlar ve fotonlardan oluşmakla beraber dozun büyük bir kısmı müonlar ve elektronlardan kaynaklanır. UNSCEAR, yer seviyesindeki kozmik ışınlardan kaynaklanan yıllık etkin dozu, enlem ve yükseklikteki değişimleri dikkate alarak ortalama 0.4 mSv civarında hesaplamıştır.

Bireylerin içinde yaşadıkları yerleşim alanları, bu yerleşim alanlarının yüksekliği ve yaşanan binanın tipi gibi bir takım özellikler kozmik ışınlardan kaynaklanan dozu az da olsa etkilemektedir. Uçuş yüksekliklerindeki kozmik ışınların yoğunluğu, yer seviyesindekinden daha yüksektir. Kıtalararası uçuşlardaki uçuş yüksekliğindeki doz hızı, yer seviyesindeki doz hızının 100 katına ulaşabilir. Uçakla yapılan seyahatler, bazı topluluklar için yıllık dozda ortalama 0.01 mSv'lik artışa neden olur, ancak bu doz dünya ortalaması olan 0.4 mSv değerini etkilemez (IAEA, 2004; TAEK, 2009).

1.2.2.1.(2). Gama Radyasyonu

Yer kabuğundaki bütün maddeler radyonüklitler içermektedir. Aslında, dünyanın derinliklerindeki doğal aktiviteden kaynaklanan enerji, yer kabuğunun şekillenmesine ve iç sıcaklıkların korunmasına katkıda bulunur. Bu enerji esas olarak, uranyum, toryum ve potasyumun radyoaktif izotoplarının bozunması sonucu açığa çıkmaktadır.

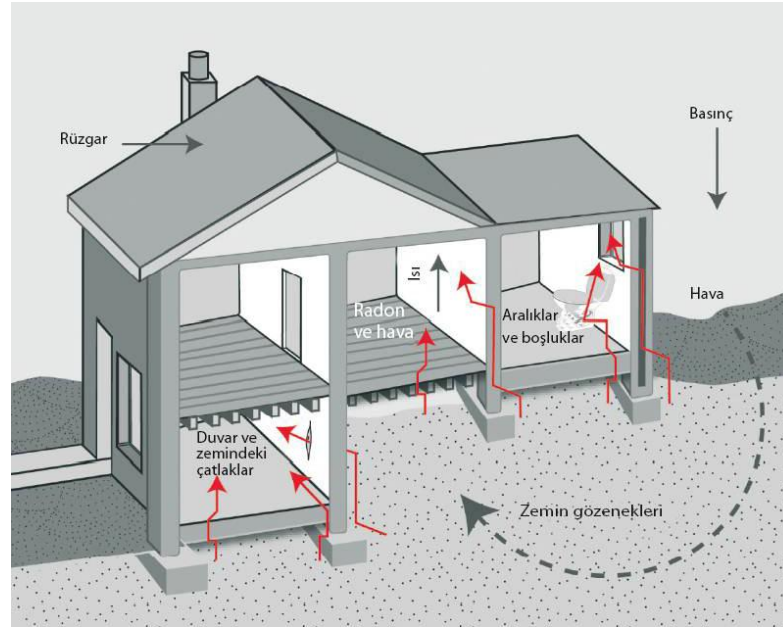
Yeryüzündeki radyonüklitler, insanları hemen hemen düzgün dağılımlı olarak ısınlayan nüfuz edici gama ışınları yayınlamaktadır. Yapı malzemelerinin çoğu yer

kökenli olduğundan düşük oranda radyoaktiftir ve insanlar binaların dışında olduğu gibi içinde de ışınlanırlar. İnsanların aldıkları dozlar, hem yaşadıkları bölgenin jeolojik özellikleri hem de yaşadıkları binaların yapısından etkilenir, fakat doğal gama ışınlarından kaynaklanan ortalama etkin doz, yılda yaklaşık 0.5 mSv'dir. Bazı insanlar, bu ortalama değerin birkaç kat üzerinde veya altında doz alabilirler (IAEA, 2004; TAEK, 2009).

1.2.2.1.(3). Radon Solunumu

Radon gazı, doğal radyasyon ile ışınlanmada önemli bir pay teşkil etmektedir. Bunun nedeni, havadaki küçük parçacıklara yapışan, alfa parçacıkları ile akciğer dokularını ıslayan radon-222'nin kısa yarılanma süreli bozunum ürünleri olan radyonüklitlerdir. Aynı durum, radon-220 (toron) için de geçerlidir, fakat akciğerin ışınlanma derecesi oldukça düşüktür. Radon gazı yerden atmosfere girdiğinde havada dağılır, bu nedenle bina dışındaki derişimi düşüktür. Gaz, zeminden geçerek bina içine girdiğinde kapalı hacimdeki aktivite derişimi artar. Binaların iyi derecede havalandırılması, radon birikimini engelleyecektir. Birçok ülkede (özellikle soğuk ülkeler) binalar, ısı kaybının ve hava akımının önlenmesi önceliğiyle inşa edilmiştir. Bunlar, bu nedenle, genellikle düşük seviyede havalandırılırlar ve bina içindeki radon derişimi, çoğu kez bina dışındaki derişiminden yüksek olabilir (Şekil 1.6). Binalardaki radon derişimi, yerel jeolojik yapıya oldukça bağlıdır ve ülkenin değişik bölgelerinde, hatta aynı alanda binadan binaya farklılık gösterebilir.

Dünya genelinde radon bozunum ürünleri nedeniyle maruz kalınan yıllık ortalama etkin dozun, yaklaşık 1.2 mSv olduğu tahmin edilmektedir. Ancak bu değere ilişkin belirgin farklılıklar mevcuttur.



Şekil 1.6. Bina içerisine Radonun girişi (IAEA, 2004; TAEK, 2009).

1.2.2.1.(4). İç Işınlanma

Uranyum ve toryum serilerindeki diğer radyonüklitler, özellikle kurşun-210 ve polonyum-210 havada, gıdada ve suda bulunur ve vücudumuzda iç ışınlanmaya sebep olur. Potasyum-40 da normal beslenme yoluyla vücuda girer; radon bozunma ürünleri dışında, iç ışınlanmanın ana kaynağıdır. Buna ilaveten, kozmik ışınların atmosferle etkileşimi, iç ışınlanmayı artıran karbon-14 gibi bir takım radyonüklitleri oluşturur.

Bu iç ışınlanma kaynaklarının sebep olduğu yıllık ortalama etkin dozun 0.3 mSv olduğu ve bunun yarısının da potasyum-40'tan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. İnsan vücudundaki potasyum miktarının biyolojik süreçlerle kontrol edildiği bilinmesine rağmen dozun bireyden bireye nasıl değiştiğine dair bilgiler sınırlıdır. Vücuttaki potasyum ve dolayısıyla potasyum-40 miktarı kas miktarı ile değişir; genç erkeklerde yaşlı bayanlara oranla yaklaşık iki kat daha fazladır. Çok yüksek radyoaktivite içeren gıdaların tüketilmemesi dışında iç ışınlanmayı önlemek için yapılabilecek çok az şey vardır.

Doğal radyasyondan kaynaklanan toplam ortalama yıllık etkin doz yaklaşık 2.4 mSv'dir ancak dozlar büyük ölçüde değişebilir. Bazı ülkelerdeki ulusal doz ortalamaları yıllık 10 mSv'nin üzerindedir ve bazı bölgelerde genellikle radon ve bozunum ürünlerinin yüksek düzeyde olduğu binalar nedeniyle kişisel dozlar yılda 100 mSv'yi aşabilir.

Ortalama dozlar, doğal ve yapay kaynaklardan yayınlanan radyasyonun, insan sağlığı açısından önemini karşılaştırmak için faydalı bir ölçüdür; ancak bu dozların, kapalı ortamlardaki radon gibi ortalamadan büyük farklılıklar göstermesi durumunda ilave verilerle desteklenmesi gerekebilir. Bu gibi durumlarda yapılacak en faydalı iş ortaya çıkan belirli büyüklükteki dozların görülme sıklığını tanımlamak olabilir (IAEA, 2004; TAEK, 2009).

1.2.2.2. Yapay Radyasyon Kaynakları

Dışarıdan herhangi bir etki sonucu radyoaktif özellik kazanan çekirdeklerden yayılan radyasyona yapay radyasyon adı verilir. 1934'te Curie ve arkadaşları nötron elde etmek için hafif elementleri alfa bombardımanına tutmuşlardır. Yapılan bu çalışma sırasında pozitronun açığa çıkmasıyla yapay radyoaktivite keşfedilmiş oldu. Böylece yapay radyasyon kaynaklarının üretiminin temellerinin atılmasıyla yapay radyasyon kaynakları hayatımıza girmiş oldu. Başlıca yapay radyasyon kaynakları Çizelge 1.3'te görülmektedir.

Çizelge 1.3. Yapay radyasyon kaynakları.

Nükleer Endüstri	Tıbbi Kullanımlar	Endüstriyel Kaynaklar
Uranyum madenciliği		Işınlama
Uranyum öğütme	Radyoloji	Radyografi
Zenginleştirme	Diş hekimliği	İzotop üretimi
Yakıt üretimi	Nükleer tıp	Kuyu işleme
Nükleer reaktörler	Radyoterapi	Hızlandırıcılar
Yeniden işleme		Aydınlatma

1.2.3. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Radyoaktifliğin keşfedildiği 1896 yılını izleyen üç yılda, saf bir radyoaktif numunenin zamanla bozunma hızının üstel kanuna uyduğu gösterilmiştir (Şekil 1.7). Radyoaktifliğin tüm numunede değil de tek tek atomlarda değişikliği temsil ettiğinin ve bozunmanın istatistiksel yapıda olduğunun keşfedilmesi daha uzun yıllar almıştır.

Eğer bir t anında N radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye yeni çekirdekler ilave edilmiyorsa dt süresi içinde bozunan dN çekirdek sayısı, N ile orantılıdır:

$$\lambda = -\frac{(dN/dt)}{N} \quad (1.1)$$

Burada λ , bozunma veya parçalanma sabitidir. Denklemin sağ tarafı bir atomun birim zamanda bozunma olasılığıdır, yani bu olasılık, atomun yaşı ne olursa olsun sabit olup radyoaktif bozunmanın istatistiksel teorisinin temel varsayımdır. (1.1) denklemini düzenleyecek olursak;

$$-\lambda dt = \frac{dN}{N} \text{ ifadesinin } t = 0 \text{ dan bir } t \text{ zamanına kadar integrali alınırsa}$$

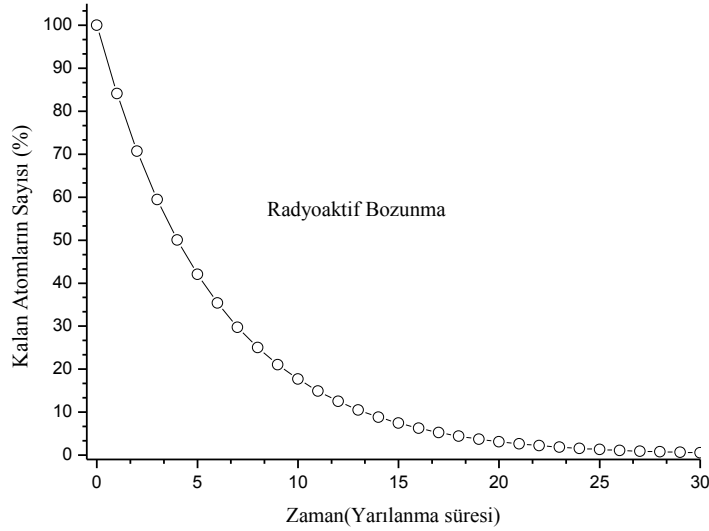
$$\int_0^t -\lambda dt = \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} \Rightarrow [\ln N + C]_{N_0}^N = -\lambda t$$

$$[\ln N(t) + C] - [\ln N_0 + C] = -\lambda t$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = \ln \left(\frac{N(t)}{N_0} \right) = -\lambda t \Rightarrow \frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

üstel radyoaktif bozunma kanunu elde edilir. Burada N_0 integrasyon sabiti $t=0$ 'da henüz bozunmamış çekirdeklerin sayısıdır.



Şekil 1.7. Radyoaktif çekirdeğin zamanla değişimi.

Yarı ömür $t_{1/2}$ çekirdeklerin yarısının bozunması için geçen süreyi ifade etmektedir. Radyoaktif bozunma kanunu denkleminde $N(t) = \frac{N_0}{2}$ yazılarak $t_{1/2}$ hesaplanabilir.

$$N(t) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln(1) - \ln(2) = -\lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.3)$$

Ortalama ömür (τ) bir çekirdeğin bozununcaya kadar geçirdiği ortalama süre olarak tanımlanır ve bozunma sabitinin tersine eşittir.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.4)$$

Radyoaktif bir numunenin birim zamandaki bozunma sayısına yani numunenin bozunma hızına “aktiflik” adı verilir. Aktiflik için bozunma/s uygun bir birimdir. Aktifliğin diğer bir birimi Curie (Ci)’dir ve başlangıçta 1 gram radyumun aktifliği olarak ifade edilirken şimdi basitçe

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ bozunma/s}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Laboratuvarlarda kullanılmakta olan tipik birçok radyoaktif kaynağın aktifliği mikrocurie (μCi) veya milicurie (mCi) mertebesinde dir. Aktifliğin SI’daki birimi Becquerel (Bq) olup saniyede bir parçalanmaya eşittir; ancak Curie aktiflik birimi olarak öyle yerleşmiştir ki Becquerel henüz yaygın olarak kullanılan bir aktiflik birimi değildir.

Aktiflik sadece saniyedeki parçalanma sayısını vermekte, yayınlanan radyasyonun türü veya enerjileri ile ilgili hiçbir bilgi vermemektedir (Krane, 2001).

1.2.4. Radyoaktif Denge

Radyoaktif bir ana çekirdek bozunum sonucunda kız çekirdek adı verilen bir çekirdek üretir. Kız çekirdek kararlı ya da radyoaktif olabilir. Eğer kız çekirdek radyoaktifse bir torun çekirdeğe bozunur ve bu bozunum süreci devam eder. Böylece her bir radyoaktif ana çekirdek, her bozunum üretimle kendine özgü bir bozunma sabitine ve bu nedenle de farklı bir yarı ömre sahip bir seri bozunum süreci başlatır. Genel olarak ana çekirdek kız ve torun çekirdeklere göre daha uzun bir yarı ömre sahip olduğundan ana çekirdek sayısı uzun bir süre değişmiyor olarak kabul edilebilir. Buna bağlı olarak ana çekirdekler kız ve torun çekirdeklerini hızlıca oluştururlar. Belirli bir zaman sonra bozunma zincirinin herhangi bir üyesinin çekirdeklerinin sayısını değiştirerek değişiminin durduğu bir durum gelişebilir. Böyle bir durumda birim zamanda oluşan kız ve torun çekirdek sayısı aynı süre içerisinde bozunan ana çekirdek sayısına eşit olur. Böylece radyoaktif denge kurulmuş olur. Bu durumun ne zaman ortaya çıkacağını görmek için bozunum serisini 1, 2, 3, ..., bozunma sabitlerini $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ ve belirli bir zamandaki

çekirdek sayılarını ise $N_1, N_2, N_3, \dots$ ile temsil edelim. Kız çekirdek, $\lambda_1 N_1$ hızı ile ve oluşan çekirdekler de $\lambda_2 N_2$ hızıyla bozunur. Böylece ana, kız ve torun çekirdeğin değişimi için bir Δt zamanında şu ifadeyi yazabiliriz:

$$\begin{aligned}\Delta N_1 &= -\lambda_1 N_1 \Delta t \\ \Delta N_2 &= \lambda_1 N_1 \Delta t - \lambda_2 N_2 \Delta t \\ \Delta N_3 &= \lambda_2 N_2 \Delta t - \lambda_3 N_3 \Delta t \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots\end{aligned}\tag{1.5}$$

1.5 denklemlerini düzenleyip yeniden yazarsak

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ \frac{dN_3}{dt} &= \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots\end{aligned}\tag{1.6}$$

denklemleri elde edilir.

Sonuç olarak,

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = \dots = 0\tag{1.7}$$

ve

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots\tag{1.8}$$

şartı gerçekleştiğinde ana, kız, torun çekirdeklerin hepsi birbiriyle bir denge içerisinde olacaktır ve sayıları zamanla değişmeyecektir (Das ve Ferbel, 2005).

1.2.5. Radyoaktif Bozunma Türleri (Dönüşüm Mekanizmaları)

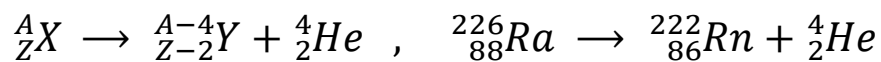
Radyoaktif bozunumların tamamı üç ana başlık altında incelenmektedir. Bunlar;

- (i) alfa bozunumu,
- (ii) izobarik bozunma (beta bozunumu-negatron (β^-), pozitron bozunumu (β^+) ve elektron yakalama)
- (iii) izomerik bozunma (gama bozunumu, iç dönüşüm)

1.2.5.1. Alfa Bozunumu

Alfa parçacığı 2 protonu ve 2 nötronu olan pozitif yüklü Helyum (${}^4_2\text{He}^{+2}$) çekirdeğidir. Alfa parçacığı (α) sahip olduğu pozitif elektriksel çekim kuvveti yoluyla etkileştiği ortamda kuvvetli bir iyonizasyon yaratır. Örneğin 34 MeV enerjili bir alfa parçacığı havada 100000 iyonizasyon olayı meydana getirebilir. Alfa parçacığının kinetik enerjisi yaklaşık olarak 5 MeV civarında olup havadaki erişim menzili 3.84 cm ve dokudaki erişim menzili ise 3×10^{-3} mm olarak hesaplanmıştır. Alfa parçacığının dokudaki menzilin kısıtlı olması nedeniyle ciltle teması geçmesi halinde deriyi geçemeyecektir. Böylece sahip olduğu enerjinin tamamı deri üzerinde etkili olacak ve çok kuvvetli bir iyonizasyon yaratacaktır.

Alfa bozunum sürecinde radyoaktif (kararsız) bir çekirdek bir helyum atomu (α parçacığı) yayarak daha kararlı bir çekirdeğe dönüşür. Alfa bozunum denklemi



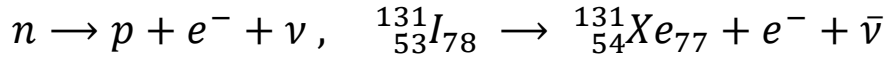
şeklinde ifade edilebilir.

1.2.5.2. İzobarik Bozunma

Kararsız bir çekirdek fazla proton veya nötronundan bir protonu nötrona veya bir nötronu protona dönüştürerek kurtulabilir. Bu işlem üç farklı yolla gerçekleşebilir. Bu işlemler, beta (negatron) bozunumu, pozitron bozunumu ve elektron yakalama işlemleridir.

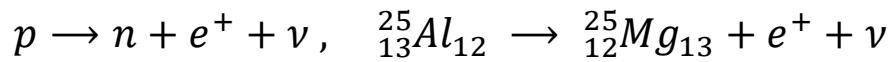
1.2.5.2.(1). Beta (negatron, β^-) Bozunumu

Beta, negatif beta (β^-) veya negatron bozunumu olarak adlandırılan bu bozunumda, bir nötron bir protona ve bir elektrona dönüşür. Bozunum sonucunda bir elektrona eşlik eden kütlesi ve yükü olmayan ve ayrıca dedekte edilemeyen bir parçacık olan antinötrino parçacığı ($\bar{\nu}$) yayınlanır.



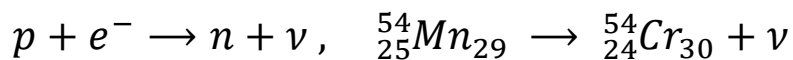
1.2.5.2.(2). Pozitron (β^+) Bozunumu

Pozitif beta (β^+) veya pozitron bozunumu olarak adlandırılan bu bozunum olayında, bir proton bir nötrona dönüşürken pozitif yüklü bir elektron (e^+) ve bir nötrino parçacığı (ν) yayınlanır.



1.2.5.2.(3). Elektron Yakalama

Elektron yakalama olayında, çekirdeğe çok yakın bulunan bir elektron, çekirdek tarafından yakalanır ve bir proton ve bir nötrona dönüşür.



1.2.5.3. İzomerik Bozunma

1.2.5.3.(1). Gama (γ) Bozunumu

Uyarılmış bir durumdan daha düşük bir uyarılmış duruma veya taban duruma, nükleer durumlar arasındaki farka eşit, yayınlanan çekirdeğin geri tepme enerjisi kadar eksik bir enerjiyle geçilmesi sırasında bir gama (γ) ışını yayınlanır. Gama yayınlanması uyarılmış bağlı durumları olan ($A > 5$) tüm çekirdeklerde gözlenir ve genellikle alfa veya beta bozunmalarını izler, çünkü bu bozunumlarla ana çekirdek ürün çekirdeğin uyarılmış durumunda kalır.

Gama yayınlanmasının yarı ömrü çok kısadır, genellikle 10^{-9} s'den daha küçüktür, ancak saat, hatta gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayınlanmaları da vardır. Bu geçişler izomerik geçişler olarak bilinir ve uzun ömürlü uyarılmış durumlara izomerik durumlar veya izomerler (ya da metastable durumlar) denir (Krane, 2001).

1.2.5.3.(2). İç Dönüşüm

İzomerik durumda bulunan nüklidlerde iç dönüşüm olayı sıklıkla görülmektedir. İç dönüşüm olayında çekirdek bir orbital elektronunu çekerek alır ve uyarılmış hale geçer. Uyarılma sonrasında çekirdek enerjisini gama fotonu salarak atar. Salınan gama fotonu aynı atom içerisinde doğrudan doğruya bir atom elektronuna çarparak onu yörüngesinden söker ve laboratuvarında bir serbest elektron gözlenir (Krane, 2001).

İç dönüşüm olayında gözlenen elektron dönüşüm (konversiyon) elektronu olarak adlandırılır ve bu elektronlar genellikle iç tabaka (K ve L) elektronlarıdır. Dönüşüm elektronunun enerjisi, kendine çarpan fotonun enerjisi ile bağlı bulunduğu tabakanın bağlanma enerjisinin farkına eşittir. Dönüşüm elektronunun atılmasından sonra boşalan yere daha üst yörüngelerden yeni bir elektronun gelmesiyle ikincil X-ışını ve Auger elektronları salınımı olur. İç dönüşüm beta bozunumunda olduğu gibi elektron emisyonu ile sonuçlanmaktadır, ancak iki olay arasında önemli farklar

bulunmaktadır. Birincisi beta bozunumunda (β^-) elektron orjinini çekirdekten alır, oysa iç dönüşümde elektronun orjini orbitallerdir. İkincisi β^- parçacıkları sürekli spektruma göstermesine rağmen iç dönüşüm olayında dönüşüm elektronlarının belli bir enerjisi olup bu enerji gama ışını enerjisi ile orbital elektronunun bağlanma enerjisinin farkına eşittir (Demir, 2008).

1.2.6. Radyasyon Dozu Nicelikleri ve Ölçüm Birimleri

Duyu organlarımızla iyonlaştırıcı radyasyonları doğrudan algılayamayız. Bu tür radyasyonların ortak bir özelliği etkileştikleri atomları iyonlaştırmalarıdır. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyonların tüm etkileri radyasyonun geçtiği ortamda meydana getirdiği iyonlaşmaya bağlıdır. Bu iyonlaşma miktarı da radyasyonun enerjisi ile doğrudan ilişkilidir. Radyasyonu bu atomlarla etkileşiminden, iyonlaştırma özelliğinden veya madde ile etkileşiminden faydalanan fotoğraf filmleri, Geiger-Müller tüpleri ve sintilasyon sayaçları gibi tekniklere dayalı yöntemler ve aynı zamanda termoluminesans malzemeler ve silikon diyotları kullanan daha yeni teknikler ile tespit ederek ölçebiliriz. Böylece yapılan ölçümler, vücuda veya vücudun belli bir kısmına ilgilenilen radyasyon ile aktarılan enerji cinsinden yorumlanabilir.

Hedef kütle tarafından belirli bir sürede soğurulan veya alınan radyasyon enerjisi miktarına “radyasyon dozu” adı verilir. Radyasyon dozunun hedef kütleye meydana getireceği etki, radyasyonun çeşidine, doz hızına ve bu doza maruz kalış süresine göre değişir. Bu nedenle her bir etkileşim için kullanım amacına yönelik olarak farklı birimler tanımlanmıştır.

1.2.6.1. Işınlama Birimi

Işınlama, X ve gama ışınlarının havayı iyonlaştırma özelliğinin bir ölçüsüdür. Işınlama birimi “Röntgen (R)” standart ısı ve basınçta (0° ve 760 mmHg) 1 kg havada 2.58×10^{-4} Coulomb (C)’luk elektrik yükü değerinde iyonlar oluşturan ya da diğer bir deyişle 2.8×10^9 iyonizasyon oluşturan X ve gama radyasyonlarının

miktardır. Röntgen sadece ışınlama birimi olup foton sayısını ve foton enerjisini vermez. SI birim sisteminde Röntgen'in karşılığı Coulomb/kg (C/kg) olarak ifade edilmektedir. Birimler arası dönüşüm,

$$1 \text{ C/kg} = 3.876 \times 10^3 \text{ R}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

şeklinde ifade edilmektedir (Krane, 2001; IAEA, 2004; Demir, 2008; TAEK, 2009).

1.2.6.2. Soğurulmuş (Absorblanmış) Doz Birimi

Radyasyonun insan dokusu gibi herhangi bir maddenin birim kütlesine aktardığı enerji miktarına “soğurulmuş doz” adı verilir. Soğurulmuş doz birimi SI birim sisteminde Gray (Gy), CGS birim sisteminde ise rad'dır. Gray, ışınlanan maddenin 1 kg'ına 1 Joule'lük enerji veren radyasyon miktarı olarak da tanımlanabilir. Gray ve rad birimlerinin askatları da sıklıkla kullanılmaktadır (mGy, mrad, vb.). Bu doz birimi sadece soğurulan enerji miktarını gösteren fakat hem parçacık hem de elektromanyetik radyasyonlara uygulanabilen bir büyüklük olup radyasyon demeti ile birlikte soğurucu maddenin özelliklerini de içerir. Birimler arası dönüşüm,

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

şeklinde ifade edilmektedir (Holmes-Siedle ve Adams, 2000; IAEA, 2004; Demir, 2008; TAEK, 2009).

1.2.6.3. Eşdeğer Doz Birimi (Biyolojik Doz)

İyonlaştırıcı radyasyon tiplerinin biyolojik maddeler ile etkileşim yolları farklıdır. Eşit miktarda soğurulmuş dozlar (eşit miktarda depolanan enerji) aynı biyolojik etkiye neden olmayabilir. Örneğin, alfa parçacıklarının oldukça yavaş ve daha fazla pozitif yüklü olması ve yolları boyunca enerjilerini daha yoğun kaybetmelerinden dolayı dokuya aktarılan 1 Gy'lik alfa radyasyonu 1 Gy' lik beta radyasyonundan daha zararlıdır. İyonlaştırıcı radyasyonun farklı tiplerinin sahip

olduğu hasar oluşturma potansiyelini aynı prensipleri esas alarak inceleyebilmek için yeni bir niceliğe gereksinim duyulmuştur. Bu nicelik eşdeğer doz olarak adlandırılır. Birimi SI birim sisteminde Sievert (Sv), CGS birim sisteminde ise rem olarak tanımlanmıştır. Sievert'in ve rem'in askatlarından en yaygın olarak kullanılanları milisievert (mSv) ve milirem (mrem)'dir.

Eşdeğer doz, soğurulmuş dozun belirli bir radyasyon tipinin doku içindeki enerji dağılımını dikkate alan bir faktör ile çarpımına eşittir. Böylelikle radyasyon tipinin bağıl olarak biyolojik hasar oluşturma etkinliği hesaba katılmış olur. Gama ışınları, X ışınları ve beta parçacıkları için radyasyon ağırlık faktörü 1'dir, bu nedenle belirtilen radyasyon tipleri için soğurulmuş doz ve eşdeğer doz sayısal olarak eşittir (Çizelge 1.4). Alfa parçacıkları için bu faktör 20'dir, bu durumda eşdeğer doz soğurulmuş dozun 20 katıdır. Farklı enerjilerdeki nötronlar için radyasyon ağırlık faktörü değerleri 5 ile 20 arasında değişir (Holmes-Siedle ve Adams, 2000; IAEA, 2004; Demir, 2008; TAEK, 2009).

Çizelge 1.4. Radyasyon türlerine göre RBE ve KF.

Radyasyon Türü	RBE	KF
Alfa (α)	20	20
Beta (β)	1	1
Gama (γ)	1	1
X	1	1
Nötron	5-20	5-20

RBE: Rölatif Biyolojik Etkinlik, KF: Kalite Faktörü

$$RBE = \frac{\text{Referans radyasyonun soğurulmuş dozu}}{\text{Aynı etkiyle verilen radyasyonun soğurulmuş dozu}}$$

$$\text{Biyolojik doz} = RBE \times \text{Dose (rad ya da gray)}$$

$$RBE = \frac{\text{Belirli bir etkiyi oluşturan 250 keV'lik X – ışınları dozu}}{\text{Aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon dozu}}$$

1.2.6.4. Etkin Doz

Vücuttaki başlıca doku ve organların her birindeki eşdeğer doz, bu doku ve organ ile ilişkilendirilmiş risk ile ilgili ağırlık faktörünün çarpılmasıyla ağırlıklı eşdeğer dozlar hesaplanabilir. Ağırlıklı eşdeğer dozların toplamı *etkin doz* olarak ifade edilir ve vücuttaki çeşitli doz eşdeğerlerinin tek bir sayı ile ifade edilmesini sağlar. Aynı zamanda etkin doz radyasyonun enerji ve tipini dikkate alır ve toplam sağlık hasarının iyi bir göstergesidir. Bundan başka iç ve dış ışınlamalar ile homojen veya homojen olmayan ışınlamalarda kullanılır (IAEA, 2004; Cember ve Thomas, 2009; TAEK, 2009).

1.2.6.5. Kollektif Etkin Doz

Bazı durumlarda insan grupları veya toplum geneli için toplam radyasyon dozunun ifade edilmesini sağlayan bir niceliğin olması yararlıdır ve bu nicelik *kollektif etkin doz* olarak ifade edilir. Bu, bir grup veya toplumdaki her bir bireyin söz konusu radyasyon kaynağından aldığı etkin dozların toplamıdır. Örneğin tüm radyasyon kaynakları nedeniyle maruz kalınabilecek etkin doz yılda ortalama 2.8 mSv' dir. Dünya nüfusunun yaklaşık 6 milyar olduğu göz önüne alındığında, toplum için yıllık kollektif etkin doz bu iki değerın çarpılması ile elde edilir ve yaklaşık olarak 17 000 000 *insan-sievert*, sembolü ise *insan-Sv*'dir (IAEA, 2004; TAEK, 2009).

1.2.7. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

1.2.7.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

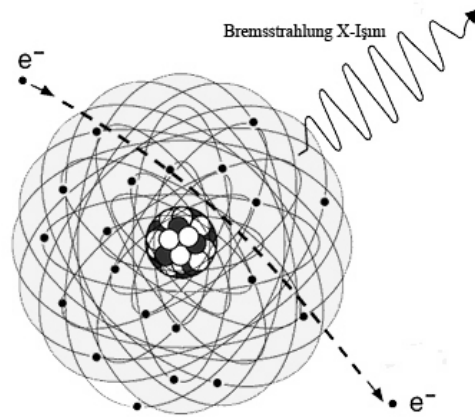
Yüksek hıza sahip alfa (α) ve beta (β) parçacıkları madde içinden geçerken maddenin atom ve molekülleri ile çarpışarak enerjilerini kaybederler. Kaybolan enerji etkileşim ortamındaki madde tarafından soğurulur. Bu olay sonucunda maddenin atom ya da moleküllerinde iyonizasyon, eksitasyon (uyarılma) veya her

ikisi birden gerçekleşebilir. Bu nedenle yüksek enerjili, yüklü parçacıklar iyonizan radyasyon sınıfına girerler. Madde içinde bu olayları yaratamayacak kadar düşük enerjisi olan parçacıklar atom ve moleküller arasında küçük titreşimler yaratarak enerjilerini bırakırlar.

Yüklü parçacık ile etkileşme ortamının atom ya da molekülleri arasında elektriksel güçlerin itme veya çekmesine bağlı olarak çarpışma meydana gelir. Örneğin yüklü bir parçacık dış tabaka elektronlarından birine çarparsa onu bağlı olduğu yörüngesinden fırlatıp atabilir. Çarpışmaya neden olan elektron enerjisini kaybederken fırlayan elektron enerji kazanmış olup ikincil etkileşmelere neden olabilir.

Yüklü bir parçacık (elektron), atom çekirdeğinin yakınından geçerken çekirdeğin güçlü Coulomb alanı tarafından frenlenerek yavaşlatılması sonucu enerji kaybeder. Kaybedilen bu enerji “Bremsstrahlung” ya da “frenleme radyasyonu” adı verilen sürekli x-ışını spektrumu şeklinde görülür. Bu olay Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Bu radyasyon, elektronun ivmeli hareketinden dolayı ortaya çıkar ve çekirdeğin elektriksel çekimi nedeniyle elektronun izlediği yörüngede sapma meydana getirir.

Madde ortamında yüklü parçacıkların bir diğer etkileşme şekli, enerjisi azalmış olan parçacıkların soğurulmasında görülür. Bu tür enerjisi azalmış olarak gelen yüklü parçacıklar soğurucu ortamın molekülleri arasında bir titreşime ya da ultraviyole (UV) radyasyonun yayılmasına neden olurlar (Demir, 2008).



Şekil 1.8. Bremsstrahlung radyasyonunun oluşumu (II).

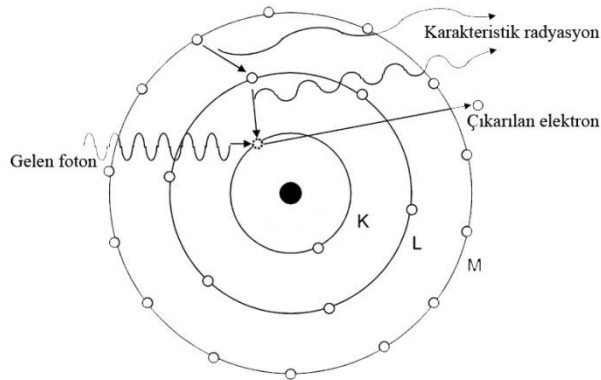
1.2.7.2. Yüksüz Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

Yüksüz parçacıklar (yüksek enerjili fotonlar; gama ışınları, x-ışınları, anihilasyon ve frenleme radyasyonu) madde içinden geçerken karmaşık bir takım etkileşimler yaparlar. Bu etkileşimler, yüklü parçacıklarda olduğu gibi doğrudan (direct) iyonizasyona neden olmayıp dolaylı (indirect) yoldan iyonizasyona sebep olurlar. Bununla birlikte düşük bir ihtimalle de olsa fotonlar etkileşim ortamındaki atomun bir elektronuna çarparak onu atomdan dışarı fırlatmak suretiyle doğrudan iyonizasyona da sebep olabilirler. Atomdan dışarı fırlayan elektron kazandığı kinetik enerjiyle ikincil (seconder) iyonizasyonlara sebep olabilir. Bu nedenlerle yüksek enerjili fotonlar ikincil iyonizan radyasyonlar olarak da bilinir.

Fotonların madde ile etkileşimi sonucu, Compton etkisi, fotoelektrik etki, çift oluşum, Rayleigh saçılması (Kohorent saçılma) ve fotonükleer etkileşimler olmak üzere 5 tip olay gerçekleşmektedir.

1.2.7.3. Fotoelektrik Etki

Yüksek enerjili bir foton bir atomun elektronlarından birine çarptığında enerjisinin tamamını elektrona transfer ederek onu yörüngesinden fırlatır (Şekil 1.9). Fırlayan bu elektrona “fotoelektron” adı verilir. Bu olayda fotoelektronun enerjisi, gelen fotonun enerjisi ile elektronun bağlanma enerjisinin farkına eşittir.



Şekil 1.9. Fotoelektrik olay (III).

Gelen fotonun enerjisi orbital elektronunun enerjisinden fazla olmadıkça fotoelektron meydana gelmez. Gelen fotonun bir iç tabaka elektronuna çarpması durumunda, şayet enerjisi yeterli ise onu da yörüngesinden fırlatması mümkündür. Bu durumun meydana gelme ihtimali dış tabaka elektronlarına göre daha azdır. İç tabakaların birinden atılan fotoelektronun yerine üst tabakalardan başka elektronların göçmesi ile karakteristik x-ışınları (ya da Auger elektronları) meydana gelir. Düşük atom numaralı elementlerde bağlanma enerjileri ve karakteristik x-ışını enerjileri çok düşüktür. Ağır elementlerde bağlanma enerjileri 20-100 keV aralığındadır. Bu nedenle gelen fotonun enerjisini önemli oranda soğururlar. Fotoelektronların enerjilerine bağlı olarak dokuda erişme uzaklıkları Çizelge 1.5'te verilmiştir (Demir, 2008).

Çizelge 1.5. Fotoelektronların yumuşak dokuda erişme mesafeleri.

Enerji (keV)	Erişme uzaklığı (mm)	Enerji (keV)	Erişme uzaklığı (mm)
34	0.023	270	0.64
40	0.034	400	1.24
68	0.070	590	2.8
86	0.108	1240	4.4
146	0.180		

$h\nu$ enerjisi ile gelen bir fotonun E_b bağlanma enerjisi ile atoma bağlı olan bir elektrona çarptığı durumda $h\nu > E_b$ ve $h\nu$ ne kadar küçükse fotoelektrik olayın gerçekleşme olasılığı o kadar yüksektir. Bu durumda koparılan elektronun kinetik enerjisi,

$$T_e = h\nu - E_b - T_a \quad (T_a: \text{Geri tepen atomun kinetik enerjisi})$$

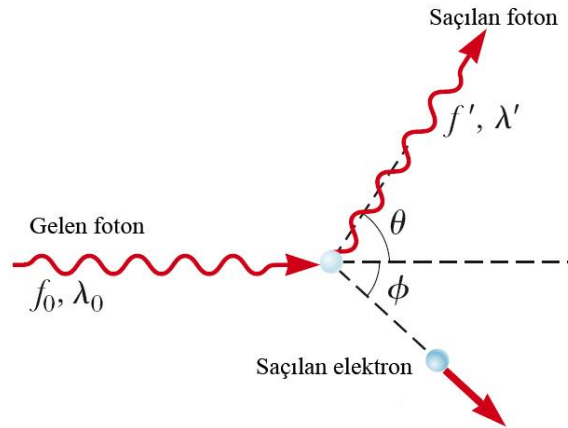
ifadesi ile verilir; ancak burada T_a çok küçük olduğundan sıfır kabul edilir ve ifade,

$$T_e = h\nu - E_b$$

şeklini alır.

1.2.7.4. Compton Etkisi

Compton saçılması atomun dış tabaka elektronlarından biri ile bir fotonun çarpışması esnasında gözlenir. Gelen fotonun enerjisi çarptığı elektronun bağlanma enerjisinden oldukça büyüktür. Gelen foton enerjisinin bir kısmını çarptığı elektronu yörüngesinden fırlatmak için harcar. Fırıl原因an elektrona geri tepme (recoil) elektronu denir. Fotonun geri kalan enerjisi, geliş doğrultusu ile bir θ açısı yaparak yoluna devam etmesini sağlar (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Compton olayı (Serway ve Jewet, 2010).

Burada saçılan foton ile saçılan elektronun enerjileri toplamı, gelen fotonun enerjisi ile durgun elektronun enerjilerinin toplamına eşittir. Enerjinin korunumundan,

$$hf_0 = hf' + K_e \quad \Rightarrow \quad \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{hc}{\lambda'} + K_e = \frac{hc}{\lambda'} + (\gamma - 1)m_e c^2 \quad (1.9)$$

(Burada $\gamma = 1/\sqrt{1 - (V^2/c^2)}$ ve V elektronun hızıdır.)

ifadesi ve momentumun korunumundan, momentumun x bileşeni:

$$\frac{h}{\lambda_0} = \frac{h}{\lambda'} \cos\theta + \gamma m_e V \cos\phi \quad (1.10)$$

momentumun y bileşeni:

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - \gamma m_e V \sin \varnothing \quad (1.11)$$

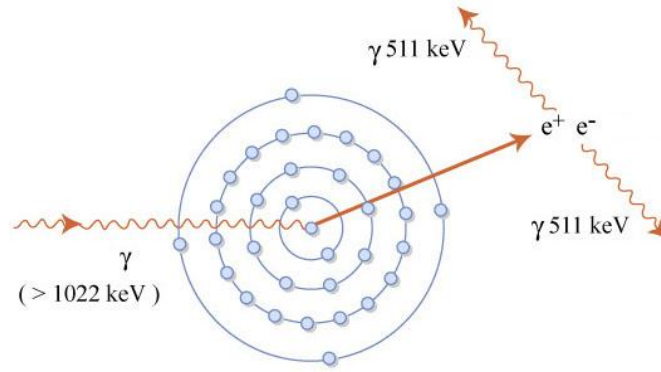
ifadeleri yazılıp (1.9) ve (1.11) numaralı eşitliklerden V ve $\varnothing$ yok edilerek geri kalan üç değişkeni (λ' , λ_0 ve $\varnothing$) birbirine bağlayan Compton kayması eşitliği olarak ifade edilen (1.12) eşitliği elde edilir.

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (1.12)$$

Enerji transferi soğurucu materyalin yoğunluğuna, atom numarasına veya başka bir özelliğine bağlı değildir. Compton olayı tam anlamıyla foton-elektron etkileşmesine bağlıdır. Compton olayında meydana gelen saçılmada ortaya çıkan saçılmış foton enerjileri, dedekte edilmek istenen gelen fotonun enerjisinden daha düşüktür.

1.2.7.5. Çift Oluşumu

Bir foton yüklü parçacıkların elektrik alanına girdiği zaman çift oluşumu olayı meydana gelir. Bu olay genellikle yüksek enerjili bir fotonun (gama ışını), atom çekirdeğinin yakınından geçerken meydana gelebilir. Çift oluşumu olayında foton, enerjisinin tamamını bırakarak gözden kaybolur. Bu esnada biri negatif (elektron), diğeri pozitif (pozitron) yüklü iki parçacık salınır. Negatif yüklü parçacık enerjisi tükenene kadar çeşitli çarpışmalar yapar. Pozitif yüklü parçacık ilk karşılaştığı atomun bir orbital elektronuna çarparak yok olur. Bu olayda enerjileri 511 keV olan ve birbirleriyle 180° açı yapan zıt doğrultuda iki tane anihilasyon fotonu meydana gelir (Şekil 1.11). Çift oluşumu olayının meydana gelebilmesi için gelen fotonun enerjisi en az 1022 keV (2x511 keV) olmalıdır.

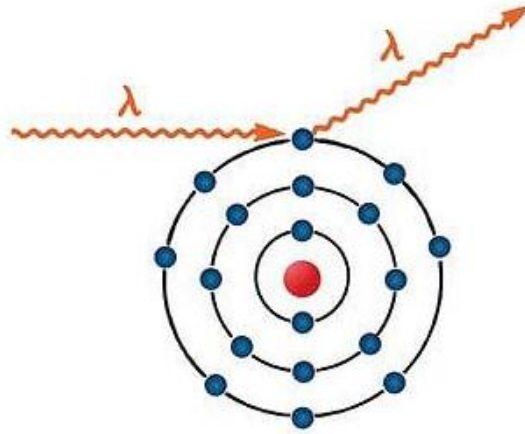


Şekil 1.11. Çift oluşumu (IV).

Çift oluşumu olayı Pozitron Emisyon Tomografisi (PET)’nin fiziksel temelini oluşturmaktadır. Enerjileri 511 keV olan anihilasyon fotonları PET dedektörleri ile görüntülenir. Bu olayın nükleer tıp açısından son yıllarda önemi artmıştır.

1.2.7.6. Rayleigh Saçılması (Kohorent Saçılma)

Bu olayda foton atomun bir yörünge elektronu ile etkileşir. Şekil 1.12’de de görülen Rayleigh saçılması “kohorent saçılma” olarak da anılır. Bunun nedeni, fotonun atomla beraber ortak hareket etmesidir. Bu etkileşimin elastik olması bakımından foton enerjisinden bir şey kaybetmez. Atom ise momentumunu koruyacak kadar saçılır. Foton bu etkileşimle beraber çok küçük bir açı ile saçıldığı için saçılma açısı dar bir ışın geometrisinde fark edilebilir. Rayleigh saçılması, yüklü bir parçacığa enerji vermediği gibi iyonizasyona veya uyarmaya da sebep olmaz. Bu nedenle bu olayın kerma ya da soğurulmuş doza bir katkısı bulunmamaktadır (Attix, 1986).



Şekil 1.12. Rayleigh saçılma. Etkileşimde hiçbir enerji aktarılması olmadığı için saçılan fotonun dalga boyu gelen foton ile aynıdır (Khan, 2010).

1.2.7.7. Fotonükleer Etkileşimler

Fotonükleer etkileşimde, enerjisi birkaç MeV'i aşan bir foton çekirdek tarafından soğurularak çekirdeğin bir proton veya nötron yaymasına neden olur. Rayleigh saçılmasında da olduğu gibi fotonükleer etkileşimlerin meydana gelme olasılığı diğer foton etkileşimlerinden daha azdır (Attix, 1986).

2. RADYASYON DOZİMETRESİ VE DOZİMETRİ SİSTEMLERİ

2.1. Radyasyon Dozimetresi

Radyasyon dozimetresi maruz kalmayı, kermayı, soğurulan veya eşdeğer dozu, bunların zamana göre türevlerini, iyonlaşma radyasyonunun ilgili büyüklüklerini doğrudan veya dolaylı olarak ölçen veya hesaplayan sistem ya da cihazdır.

Doza ait bir niceliğin ölçümü, dozimetrik sistem kullanarak ve deneysel olarak niceliğin değerini bulma sürecidir. Bu ölçümün sonucu, sayısal bir değer ve uygun bir birimden elde edilerek ifade edilen dozimetrik bir niceliğin değeridir.

Bir dozimetrenin bir radyasyon dozimetresi fonksiyonuna sahip olabilmesi için en azından ölçülen bir dozimetrik niceliğin fonksiyonu olan bir fiziksel özelliği olmalıdır ve bu dozimetre özel bir kalibrasyonla radyasyon dozimetresi olarak kullanılabilmelidir. Faydalı olabilmesi için radyasyon dozimetreleri istenen birkaç karakteristiğe sahip olmalıdır. Örneğin, radyoterapide hem belirlenen bir noktada suda soğurulan dozun ve onun uzaysal dağılımının hem de ilgilenilen hastanın bir organındaki doz hesabının bilinmesi önemlidir. Buna göre doğruluk ve kesinlik, doğrusallık, doz veya doz oranına bağlı olarak enerji cevabı, doz cevabı, yöne bağlılık, uzaysal çözünürlük arzulanan dozimetrede tanımlanmış olması gereken özelliklerdir.

Şüphesiz ki bütün dozimetreler bütün karakteristikleri bir arada sağlayamazlar. Bir radyasyon dozimetresinin seçimi o dozimetre okuyucusunun ölçüm durumu da göz önüne alınarak yapılmalıdır. Örneğin, radyoterapide iyon odaları hüzmeye kalibrasyonları için önerilirken göreceli (relative) dozimetreler gibi diğer dozimetreler doz dağılımı için veya doz doğrulanması için uygundur (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2. Dozimetrelerin Özellikleri

2.2.1. Doğruluk ve Hassasiyet

Radyoterapi dozimetresinde ölçümle ilişkili belirsizlik genellikle doğruluk ve hassasiyet açısından ifade edilir. Dozimetri ölçümlerinin hassasiyeti, benzer koşullar altında ölçümlerin tekrarlanabilirliğini belirtir ve tekrarlanan ölçümlerde elde edilen verilerden bu hassasiyet hesaplanabilir. Yüksek hassasiyet, ölçüm sonuçlarının dağılımının küçük bir standart sapmasıyla ilişkilidir. Dozimetri ölçümlerinin doğruluğu, ölçülen niceliğin gerçek değeri beklenen değerinin yakınlığı ile ilgilidir.

Ölçüm sonuçları kesin olarak doğru olamaz ve bir ölçüm sonucunun hatası belirsizlik olarak tanımlanır. Belirsizlik, bir niceliğin ölçülen değerlerinin dağılımını tanımlayan bir parametredir: bu parametre istatistiksel olarak veya başka yöntemlerle değerlendirilir. Ölçümün hatası bir niceliğin ölçülen değeri ile o niceliğin gerçek değeri arasındaki farktır.

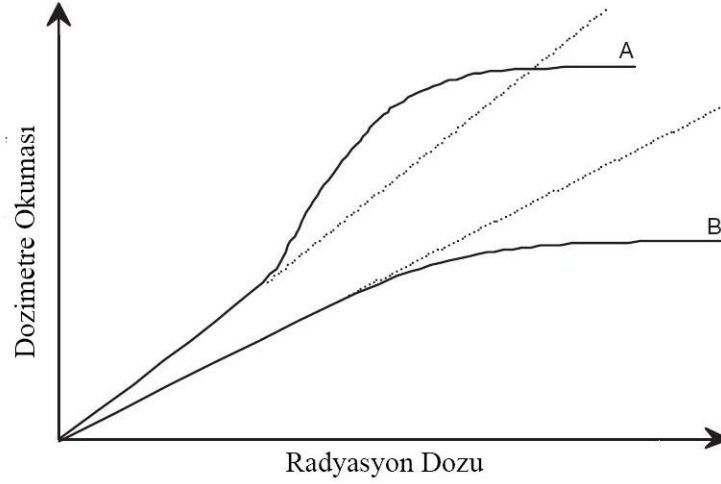
- Bir hata, bir sayısal değer ve bir işarete sahiptir.
- Genellikle, ölçüm hataları tam olarak bilinemez fakat en iyi şekilde tahmin edilebilmekte ve mümkün olan dengeleyici düzeltmeler yapılabilmektedir.
- Bilinen tüm düzeltmelerin uygulanmasından sonra hatalar için beklenen değer 0 olmalıdır (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2.2. Doğrusallık

İdeal olarak, dozimetre okuması M dozimetrik nicelik Q ile doğrusal olarak orantılı olmalıdır. Ancak belli bir doz aralığının ötesinde doğrusal olmayan bir davranış ortaya çıkar. Doğrusallık aralığı ve doğrusal olmayan davranışlar dozimetrenin çeşidine ve onun fiziksel karakteristiklerine bağlıdır.

Dozimetri sistemlerinin yanıt karakteristiklerinin iki tipik örneği Şekil 2.1’de gösterilmiştir. A eğrisi, ilk olarak artan doz ile doğrusallık, daha sonra bir

supralineer davranış ve son olarak doyma sergiler. B eğrisi, ilk olarak doğrusallık ve daha sonra yüksek dozlarda doyma sergiler.



Şekil 2.1. İki dozimetri sisteminin yanıt karakteristikleri (Izewska ve Rajan, 2005).

Genel olarak, doğrusal olmayan bir davranışın düzeltilmesi gerekmektedir. Bir dozimetre ve okuyucusu doğrusal olmayan karakteristikler de gösterebilir fakat onların birleşik etkisi daha geniş bir aralık boyunca doğrusallık ortaya koyabilir (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2.3. Doz Hızı Bağımlılığı

Entegre edilmiş sistemler bir dozimetri sisteminin birleşik yanıtını ölçer. Bu tür sistemler için ölçülen dozimetrik nicelik o niceliğin doz hızından bağımsız olmalıdır. İdeal olarak, bir dozimetri sisteminin yanıtı olan M/Q farklı iki doz oranında $((dQ/dt)_1$ ve $(dQ/dt)_2$) sabit kalmalıdır. Gerçekte doz hızı dozimetre okumalarını etkileyebilmektedir bu nedenle uygun düzeltmeler yapılmalıdır (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2.4. Enerji Bağımlılığı

Bir dozimetri sisteminin yanıtı olan M/Q genel olarak radyasyonun ışın kalitesinin (ya da enerjisinin) bir fonksiyonudur. Dozimetri sistemlerinin belirlenmiş bir radyasyon ışın kalitesinde (ya da kalitelerinde) kalibre edilmesinden ve çok daha geniş bir enerji aralığının kullanılmasından beri radyasyon kalitesiyle (quality) (enerji bağımlılığı olarak adlandırılır) bir dozimetri sisteminin yanıtının değişiminin düzeltilmesi gerekmektedir.

İdeal olarak, enerji cevabı düz, yani sistem kalibrasyonu radyasyon niteliklerinin belli bir aralığı içinde enerjiden bağımsız olmalıdır. Gerçekte, enerji düzeltilmesi çoğu ölçüm durumları için Q miktarının belirlenmesini içermelidir. Radyoterapide ilgilenilen miktar, sudaki ya da dokudaki dozdur. Tüm radyasyon ışın nitelikleri için hiçbir dozimetre su ya da doku eşdeğeri olmayıp enerji bağımlılığı bir dozimetri sisteminin önemli bir karakteristiğidir (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2.5. Yön Bağımlılığı

Radyasyonun geliş açısıyla bir dozimetrenin yanıtındaki değişim, dozimetrenin yön ya da açısal bağımlılığı olarak bilinir. Dozimetreler çoğunlukla yapısal detayları, fiziksel boyutları ve ışının enerjisi nedeniyle yöne bağımlılık gösterirler. Yön bağımlılığı belirli uygulamalarda, örneğin in-vivo dozimetride yarı iletken dozimetreler kullanılırken, önemlidir. Terapi dozimetreleri genellikle kalibre edildikleri geometri ile aynı geometride kullanılırlar (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2.6. Uzaysal Çözünürlük ve Fiziksel Boyut

Doz bir nokta değer olduğu için bir dozimetre çok küçük bir hacimden dozun belirlenmesine izin vermelidir. Başka bir deyişle tek bir noktada dozu karakterize etmek için bir nokta dozimetreye ihtiyaç vardır. Doz belirlendiğinde noktanın pozisyonu (ya da mekânsal konumu) bir referans koordinat sisteminde iyi bir şekilde tanımlanmış olmalıdır.

Termoluminesans dozimetreler (TLD) çok küçük boyutlara sahiptir. TLD'lerin doz ölçümünde kullanımı sonucu, yapılan ölçümlerde bir nokta ölçüme yaklaşılabilmektedir, bu nedenle kullanımları yaygındır. Nokta ölçüm sadece değerlendirme sisteminin çözünürlüğü tarafından sınırlandırıldığında, film dozimetreler 2 boyutlu ve jeller 3 boyutlu mükemmel birer çözünürlüğe sahiptirler. İyon odası tipindeki dozimetreler gerekli hassasiyeti vermek için sonlu boyutludurlar, ancak nokta mikro odaların yeni tipi kısmen sorunun üstesinden gelecektir (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2.7. Okuma Kolaylığı

İyon odaları gibi doğrudan okuma dozimetreleri, TLD ve film dozimetreleri gibi genellikle maruz kalma işleminden sonra okuma yapan pasif okuma dozimetrelerine göre daha kullanışlıdır. TLD ve jel dozimetreler gibi bazı dozimetreler doğal yapılarından dolayı radyasyon dozunu biriktirerek ölçüm yapmalarına karşın iyon odaları gibi diğer dozimetreler integral ve diferansiyel modların her ikisinde de ölçülebilir (Izewska ve Rajan, 2005).

2.2.8. Kullanım Kolaylığı

Kullanım ömürleri içerisinde iyon odalarının hassasiyetlerinde ya hiç değişiklik olmamakta ya da çok az bir değişiklik olmaktadır. Bu nedenle iyon odaları tekrar tekrar kullanılabilen bir dozimetre çeşididir. Yarı iletken dozimetreler kullanım ömrü içerisinde meydana gelen aşamalı bir hassasiyet kaybı dahilinde yeniden kullanılabilir oysaki film, jel ve alanin gibi bazı dozimetreler yeniden kullanılabilir değildir.

Farklı dozimetreler farklı özellikler gösterebilir. Örneğin film ve jel dozimetreler tek bir maruz kalmadaki doz dağılımını ölçer. İyon odaları gibi bazı dozimetreler oldukça dayanıklı olup bu dozimetrelerde dokunma, hassasiyeti etkilemezken TLD ve vb. diğer dozimetreler ise dokunmaya karşı oldukça duyarlı olup hassasiyetleri etkilenebilmektedir (Izewska ve Rajan, 2005).

2.3. Dozimetri Sistemleri

Radyasyonların ölçülebilmesi için madde ile temasa geçirilmeleri şarttır. Radyasyon maddeye çarpınca, kimyasal, fotokimyasal, iyonizasyon, fosforesans ve floresans gibi çeşitli olaylara sebep olur ve enerjilerini kaybeder. İşte bu özelliklerden yararlanılarak radyasyonların ölçülmesini sağlayan bir takım dozimetri sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlere, iyonizasyon odası, film dozimetri, yarı iletken dozimetri, lüminesans dozimetri ve diğer dozimetri (jel vb.) sistemleri örnek olarak verilebilir.

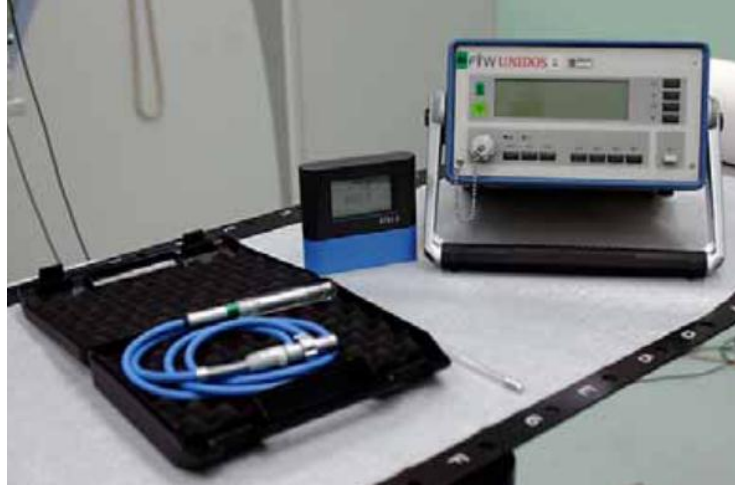
2.3.1. İyonizasyon Odası Dozimetri Sistemleri

İyonizasyon odaları radyoterapi ve radyolojide radyasyon dozunun belirlenmesi için kullanılır. Şekil 2.2’de bir iyon odası dozimetri sisteminin genel görünüşü verilmiştir. Referans ışınlama şartlarında yapılan doz tayinine ışın kalibrasyonu denir. İyonizasyon odaları özel gereksinimlere bağlı olarak çeşitli şekil ve boyutlardadır, ancak genel olarak aşağıda verilen tüm özelliklere sahiptirler:

Bir iyonizasyon odası temel olarak, iletken bir dış duvarla çevrili ve merkezi bir toplama elektroduna sahip olan gaz dolu bir boşluktur. Bir polarizasyon gerilimi iyonizasyon odasına uygulandığında oluşabilecek olan kaçak akımı azaltmak için duvar ve toplama elektrodu yüksek kaliteli bir yalıtım ile ayrılmıştır.

Odadan daha fazla gaz kaçağı olmaması için iyon odasına genellikle koruyucu bir elektrod eklenmiştir. Koruyucu elektrod kaçak akımın önünü keserek toplama elektroda ulaşmasını engeller. Bu aynı zamanda odanın aktif ya da hassas hacminde homojenlik sağlar.

Serbest hava iyonizasyon odaları ile yapılan ölçümler, ortam sıcaklığı ve basınç ile oda hacmindeki havanın kütleindeki değişimi hesaplamak için basınç ve sıcaklık düzeltilmesi gerektirir (Izewska ve Rajan, 2005).



Şekil 2.2. İyon odası dozimetri sisteminin genel görünüşü (V).

İyon odalarının çoğunda elektrodlar arasındaki gaz, atmosfer ile karışması önlenmiş, muhafazalı havadır. Radyasyonun bu havada oluşturduğu iyonizasyon akımını ölçmek için kullanılırlar. İyonlaştırıcı radyasyon gaz molekülleriyle etkileşerek gazı iyonlarına ayırır. Pozitif iyonlar katoda, negatif iyonlar anoda göç eder. Böylece iki zıt kutup arasında bir iyon ya da iyonizasyon akımı meydana gelir. Oluşan bu akımın şiddeti gelen radyasyonun şiddeti ile orantılı olarak değişir (Demir, 2008). Böylece iyon odasına bağlı elektrometre ile ölçülen akım gelen radyasyonun bir karakteristiğidir. En çok kullanılan iyon odaları: silindirik, paralel levhalı, brakiterapi ve extrapolasyon odalarıdır.

2.3.2. Film Dozimetri Sistemleri

X-ışınlarının keşfinden sonra, fotoğraf filmlerinin iyonize radyasyonun tespit edilmesinde kullanımı yaygınlaşmıştır (Şekil 2.3). Bu kullanım günümüzde de önemini korumaya devam etmektedir. Temel olarak fotoğraf filmi, gümüş halojenür özellikle gümüş bromür tanelerinden oluşan emisyonun jelatin matris ve onu destekleyen cam ya da selüloz asetat film içinde süspansiyon halinde tutulmasıyla oluşur. İyonize radyasyonun etkisi görünür ışığın etkisine benzer, bazı tanecikler radyasyonun gümüş halojenür emüsyon elektronlarıyla etkileşmesi sonucu uyarılır. Uyarılan tanecikler bu seviyede tanımsız kalırlar, böylece iyonize parçacıkların

emisyonda bıraktıkları izle oluşan kuluçka görüntü elde edilmiş olur. Sonraki banyo sürecinde, mevcut uyarılmış tanecikler metalik gümüşe dönüştürülür. Çok büyük çapta olan etkileşimler sonucunda tanecikler birleşerek görünür hale gelir.



Şekil 2.3. Film dozimetreler (VI).

Temel olarak iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan film, maruz kaldığı radyasyon dozunun etkisiyle piksellerinde meydana gelen değişim sonucu zamanla kararır. Meydana gelen bu kararın filmin ışığı yansıtma veya iletme özelliklerinde bir takım değişimlere sebep olur. Sonuç olarak meydana gelen bu değişimler filmin maruz kaldığı radyasyonun dozu ile orantılıdır. Bu orantı kullanılarak maruz kalınan dozun ölçümü bir takım işlemlerden geçirilen film ile tespit edilebilmektedir. Film dozimetri içerisinde en çok kullanılan filmler, radyografik ve radyokromik filmlerdir.

Radyografik filmlerin, tanısal radyolojide, radyoterapide ve radyasyondan korunmada bir çok önemli işlevi bulunmaktadır. Radyografik filmler, bir radyasyon dedektörü, göreceli bir dozimetre, bir görüntüleme cihazı ve bir arşiv aracı olarak kullanılabilir. Pozlanmamış bir radyografik film radyasyona duyarlı bir emülsiyon (gümüş bromür, AgBr) ile her iki tarafı ince plastikte kaplanmış bir yapıdan oluşmaktadır.

Radyokromik filmler, radyoterapi dozimetresinde kullanılan filmlerin yeni bir türüdür. En yaygın olarak kullanılanı Gafkromik filmlerdir. Gafkromik filmler

yaklaşık doku eşdeğeri bir yapıya (%9 hidrojen, %60.6 karbon, %11.2 azot ve %19.2 oksijen) sahip olan renksiz bir film olmakla beraber, radyasyona maruz kaldığında mavi bir renk alır. 10 cGy ile 800 cGy aralığındaki dozlara duyarlıdır.

Radyokromik film, radyasyona maruz kaldığında polimerleşen özel bir boya içermektedir. Bu polimerler ışığı soğurur ve filmde geçen ışık uygun bir araçla (dansitometre) ölçülebilir. Radyokromik film taneciksiz olduğu için yüksek çözünürlüğe sahiptir ve dozun keskin değişim gösterdiği bölgelerde dozimetrik amaçlı olarak kullanılabilir (Izewska ve Rajan, 2005).

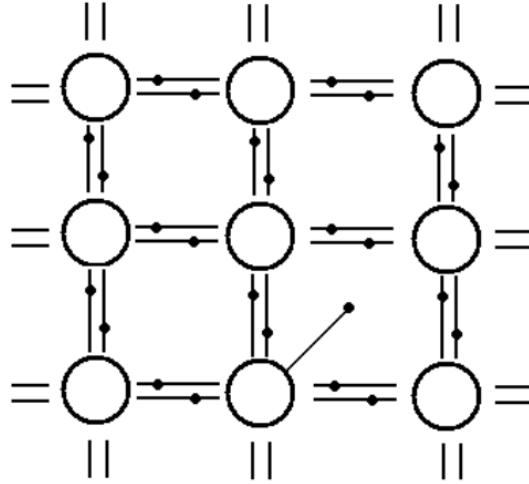
2.3.3. Yarı İletken Dozimetri Sistemleri (Silicon diode, MOSFET)

Yarı iletken dozimetre sistemleri, silikon diyot ve MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) dozimetri sistemleri olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır.

Bir silikon diyot dozimetre p-n bağlantılı bir diyottur. Germanyum (Ge) ve silisyum (Si) gibi yarı iletken elementlerden yapılmış dedektörler yarıiletken dedektörlere örnek oluşturmaktadır. Ge ve Si içinde 4 değerlikli atomların komşu atomlarla dört kovalent bağ oluşturdıkları kök kristaller şeklindedirler. Tüm değerlik elektronları kovalent bağa katılır ve bant yapısı bir dolu değerlik bandı ve bir boş iletim bandından oluşur. Yalıtkan bir madde ile yarı iletken arasındaki fark değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki yasak enerji aralığının farkına bağlıdır. Bu fark bir yalıtkan maddede 5 eV ve bir yarıiletkende 1 eV civarındadır. Yarıiletkenlerde az sayıda, Belki de 10^9 'da 1 elektron oda sıcaklığında, değerlik bandında deşik adı verilen bir boşluk bırakarak iletim bandına doğru termal olarak uyarılır. Bu boşluk komşu elektronlardan biriyle doldurulur ve yeni bir deşik oluşturulur. Böylece deşikler, kristal içerisinde hareket ediyorlarmış gibi görünürler aslında pozitif yüklü atomlar hareket etmezler.

Yarı iletkenlerde, elektriksel iletimi kontrol etmek için, az miktarda katkı maddesi denilen maddeler ilave edilir. Bu işlem için 3 veya 5 değerlikli atomlar örgü içine yerleştirilirler. 5 değerlikli atom durumunda (P, As, Sb) elektronlardan dördü komşu Si veya Ge ile kovalent bağ yapar. Beşinci elektron örgü içinde kolayca

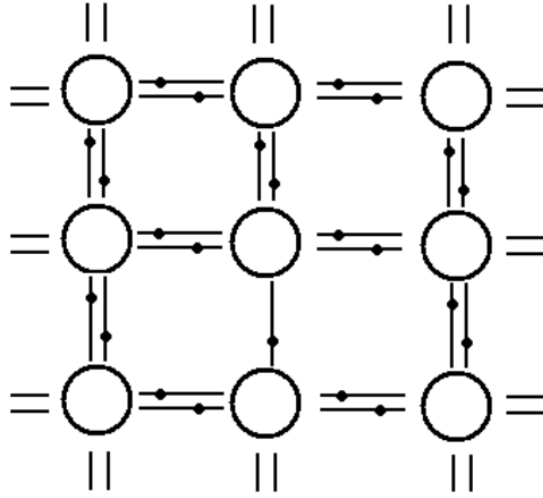
hareket edebilir ve verici durumlarının kümesini oluşturur. Böyle yarı iletken kristallere negatif yük taşıyıcıları yani elektronlarının fazla olması dolayısıyla n-tipi yarıiletken denir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. n-tipi diyot dedektörün kristal yapısı (I; Çolak, 2008).

3 değerlikli atomlarda ise kristalde dört komşu atomla kovalent bağ oluşur ve deşik fazlalığı ortaya çıkar. Bunlar değerlik bandının hemen üstünde alıcı durumda kalırlar bu tür yarı iletkenlere p-tipi yarı iletken denir (Şekil 2.5).

N-tipi ve p-tipi materyaller birbirleriyle temas ettirilirse, eklem yakınındaki elektron ve deşikler birleşerek yük taşıyıcılarının tükendiği bir bölge oluştururlar. Eğer radyasyon, tükenme bölgesine girer ve elektron-deşik çiftleri yaratırsa, iyon odasına çok benzer şekilde bir sonuç ortaya çıkar. Elektronlar bir yönde hareket ederken deşikler diğer yönde hareket eder ve biriken elektronların toplamı bir elektronik sinyal oluşturur (I; Çolak, 2008).



Şekil 2.5. p-tipi diyot dedektörün kristal yapısı (I; Çolak, 2008).

Örneğin bir gama ışını yarıiletken bir diyota çarptığında enerjisini bırakarak kendisi yok olur, çarptığı atomdan bir elektron (fotoelektron) koparır. Böylece yarı iletkende iyonizasyonla iki çeşit taşınır yük meydana getirilmiş olur. Bunlar negatif yüklü elektronlar ve pozitif yüklü hollerdir. Bu zıt yüklerin negatif ve pozitif elektrodla doğru hızla çekilmesini sağlamak için yarı iletkeni yönlendirici voltaj uygulanır. Bu sayede negatif yüklü elektronlar pozitif elektroda, pozitif yüklü holler ise negatif yüklü elektroda doğru çekilirler. Yarı iletken üzerine düşen her gama ışını için bu olay tekrarlanır. Bu sayede yarı iletken içinde gama ışını doğrudan elektronik sinyal haline dönüşmüş olur. Bu elektronik sinyaller ise gama ışını tarafından yarı iletkeni aktarılan radyasyon dozu ile orantılıdır. Yarı iletken diyot dozimetrelerin en önemli avantajları çok iyi enerji ayırma gücüne ve çok yüksek uzaysal çözünürlüğe sahip olmalarıdır. En iyi enerji ayırma gücüne sahip olan yarı iletken dedektör materyali çok düşük sıcaklıklarda işleyen germanyumdur. Yarı iletken dozimetri sistemi Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Yarı iletken dozimetri sistemi (VII).

Alan etkili yarı iletken metal oksit transistör (MOSFET, Metal-oxide semiconductor field effect transistor) özellikle in-vivo dozimetri için uygun mükemmel uzaysal çözünürlüğe sahip olan ve küçük boyutları nedeniyle çok az bir ışın zayıflaması sunan minyatür bir silikon transistördür. MOSFET dozimetrelerin çalışma prensibi, soğurulmuş dozun lineer bir fonksiyonu olan eşik gerilim voltajının ölçümüne dayanır. İyonlaştırıcı radyasyon oksite nüfuz ettiğinde kalıcı olarak tuzaklanmış yük üretir; böylece bu durum eşik gerilim voltajında değişime sebep olur. Bu değişim soğurulmuş dozun miktarı ile orantılıdır. MOSFET dozimetreler ile birleşik doz ölçümü ışınlama sırasında ya da ışınlama sonrasında ölçülebilir ancak MOSFET'ler ışınlama esnasında bir yönlendirici (bias) voltaja ihtiyaç duyarlar. MOSFET'lerin ömürleri sınırlıdır.

2.3.4. Lüminesans Dozimetri (TLD, OSLD) Sistemleri

2.3.4.1. Termolüminesans (TL) Dozimetri

Bazı materyaller radyasyona maruz kaldıklarında radyasyon enerjisinin bir kısmını soğururlar. Soğurulan bu enerji daha sonra ultraviyole, görünür ya da kızıl ötesi ışık şeklinde serbest bırakıldığında meydana gelen olaya “lüminesans” adı verilmektedir. Materyal üzerinde depolanan enerjinin serbest bırakılması farklı yollarla mümkün olmaktadır.

Eğer enerjinin serbest bırakılması olayı maddenin ısısal olarak uyarılması yoluyla sağlanıyorsa bu olaya termolüminesans (TL) denir. Radyasyona maruz kalan ve enerjiyi soğuran materyale termolüminesans malzeme ve eğer malzeme dozimetrik amaçlar için kullanılıyorsa termolüminesans dozimetre (TLD) olarak adlandırılır.

Malzeme tarafından soğurulan enerjinin serbest bırakılması olayı maddenin ışıkla uyarılması yoluyla sağlanıyorsa bu olaya da optik uyarmalı lüminesans (OSL) denir.

LiF:Mg,Ti (TLD-100), LiF:Mg,Cu,P ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ gibi termolüminesans dozimetreler (TLD), doku eşdeğeri olduklarından, $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ ve $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ gibi TLD dozimetreler ise yüksek duyarlılıklarından dolayı tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

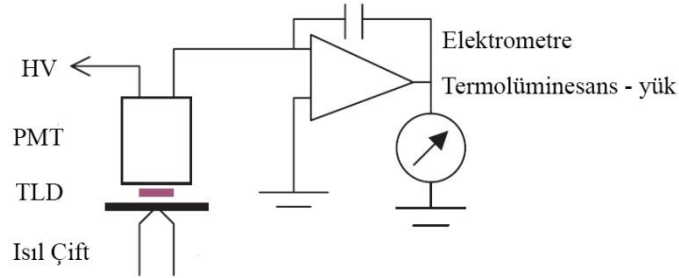
TLD'lerin toz, çip, çubuk vb. değişik formları bulunmaktadır (Şekil 2.7). TLD'lerin kullanılmadan önce artık sinyallerinin silinmesi için tavlama gerekmektedir. Bu tavlama işlemi için, ısıtma ve soğutma hızlarının da iyi bir şekilde belirlendiği tekrarlanabilir tavlama döngülerinin kullanılması gereklidir.



Şekil 2.7. Değişik şekil ve biçimlerde termolüminesans dozimetreler (VIII).

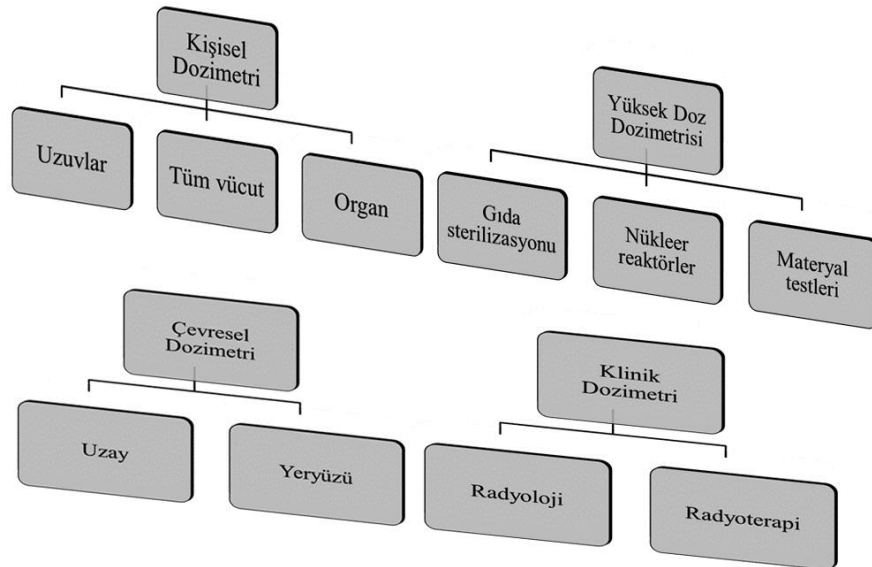
Temel bir termolüminesans dozimetri sistemi, TLD'ler, TLD'lerin ısıtılması için kullanılan ısı çiftleri ve planchetler (kenarlıklı disk), TL sinyallerini toplayan bir

PMT (Photomultiplier Tube), bu ışık sinyallerini elektriksel sinyallere çevirerek kaydeden bir elektrometreden oluşmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Termolüminesans okuyucu (Izewska ve Rajan, 2005).

Termolüminesans dozimetrelerin her biri doz yanıt doğrusallığına bağlı olarak kişisel, çevresel, klinik ve yüksek doz dozimetrisi gibi farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Şekil 2.9'da bu uygulama alanlarının şematik olarak gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.9. TLD'lerin kullanıldığı alanların alt kategorileri ile birlikte gösterimi.

2.3.4.1.(1). Kişisel Dozimetri

Kişisel dozimetride, radyasyonla ilgili uygulamalarda çalışan personelin rutin uygulamalar sırasında maruz kaldığı radyasyon dozunun ölçülmesi temel alınmaktadır. Nükleer reaktör çalışanları, hastanelerdeki radyoterapi teknisyenleri ve nükleer atıklar ile ilgilenen radyasyon işçileri bu gruba örnek olarak verilebilir. Burada radyasyon dozunun ölçülmesindeki amaç bu personelin maruz kaldığı radyasyon dozunun uluslararası kuruluşlar tarafından (örneğin ICRP-International Commission on Radiological Protection, IEAE-International Atomic Energy Agency) önceden belirlenmiş limitlerin altında tutmaya çalışmaktır. Bu rutin doz belirleme uygulamasının yanı sıra radyoaktif kazalar sonucunda maruz kalınan radyasyon dozunun ölçülmesi de bu alana girmektedir. Tüm bu uygulamaların temel amacı, her bireyin maruz kaldığı toplam radyasyon miktarının ICRP tarafından belirlenen ve izin verilen maksimum doz değerinin altında tutmaktır (McKeever ve ark., 1995).

Şekil 2.9’da belirtilen alt kategoriler aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Uzuv Dozimetresi: Eller, kollar ve bacaklar gibi insan vücudunun uzuvlarının maksimum eşdeğer doz miktarının kullanılmasında kullanılır.

Tüm Vücut Dozimetresi: İnsan vücudunun yüzeyinin altında yer alan organların içerisinde 1.0 cm derinliğindeki eşdeğer dozun hesaplanmasında kullanılır. Burada ilgilenilen konu etki gücü yüksek radyasyon tipleridir. Başka bir deyişle gama ışınları, X-ışınları (>15 keV) ve nötronlardır.

Doku Dozimetresi (deri dozimetresi): Birkaç milimetre derinlikteki soğurulan eşdeğer doz ile ilgilenir. Bu kategoride ise etki gücü düşük olan (örneğin beta parçacıkları ve enerjisi <15 keV olan X ışınları) radyasyon tipleri ile ilgilenilir.

Sonuç olarak, TLD’lerin yukarıda bahsedilen alanlarda kullanılmasındaki en büyük gereksinim organların maruz kaldıkları eşdeğer dozların hesaplanması olduğu açıkça söylenebilir. Bu alanların ilgilendiği doz aralığı $\sim 10^{-5}$ Sv’ten 10^{-1} Sv’e kadar değişmekle beraber dozun belirsizliği $\pm \%10-20$ aralığında olmalıdır (McKeever ve ark., 1995).

2.3.4.1.(2). Çevresel Dozimetri

Son yıllarda bilim, sağlık, sanayi ve politik çevreler, toplumların yapay radyasyon kaynaklarından ileri gelen çevresel felaketlere verdikleri tepkilerin artmasıyla, radyasyondan korunma stratejilerine daha çok önem vermeye başlamışlardır. Dünyanın geniş bir kitlesinde, nükleer santrallerde yapılan çalışmalar sırasında gaz formundaki radyonüklidlerin günden güne sızıntı yapması, düşük seviyeli atıkların atılımı, nükleer yakıtların kullanımı, nükleer santral kazaları ve nükleer enerji endüstrisinin yapmış olduğu bazı aktiviteler sonucunda, bu çalışmaların olası çevresel zararları ile ilgili endişeler oluşmaya başlamıştır. Sonuçta çevresel radyasyon dozunun sürekli olarak ölçülmesi endüstrileşen ülkeler için önemli bir konu haline gelmiştir. Bu sebeple TLD'lerin çevresel radyasyonun ölçülmesindeki kullanımı önemlidir. Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da nükleer santrallerin kurulmakta olduğu bölgelere radyoaktivite seviyesinin belirlenmesi amacıyla TLD sistemleri yerleştirilmektedir. Böyle bir çalışmada kullanılan TLD'lerin kişisel dozimetri alanında kullanılanlara göre performans kriterlerinin farklı olması gerekmektedir. Burada doku eşdeğer doz söz konusu değildir. Buna karşın, maruz kalınan doz seviyesinin düşük olması (doz eşdeğeri tipik olarak 10^{-2} mSv civarındadır) uzun süren bir okuma zamanı gerektirir. Böylece kullanılacak olan TLD'lerin uzun süreler boyunca istikrarlı halde kalabilmesi yüksek orandaki hassasiyetlerini koruyabilmeleri oldukça önemlidir. Özellikle gama ışını yayan kaynaklar bu konuda üzerinde yoğun olarak çalışılan ana kaynak tipleridir (McKeever ve ark., 1995).

Son zamanlardaki uzay uçuşlarının artması çevresel dozimetrenin bir alt kolu olan uzay dozimetrisine karşı olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu ilginin en büyük sebebi astronotların zararlı radyasyonla karşı karşıya kalmaları ve dolayısıyla maruz kalınan dozun ölçülmesinin gerekliliğidir. Ayrıca elektronik cihazların uzun süre boyunca radyasyona maruz kalmaları da bir diğer sebeptir. Çünkü bu cihazlar uzun süreli radyasyona maruz kaldıklarında sistemin çökmesine yol açacak kadar ciddi sorunlar yaşanmaktadır. Uzaysal radyasyonun kaynağı, ana bileşeni daha çok yüksek enerjili fotonlardan oluşan galaktik kozmik ışınlar ve güneş rüzgârlarından

gelen ağır yüklü parçacıklardır. Yüksek enerjili radyasyonların etkisinin hesaplanabilmesi için TLD'ler son zamanlarda birçok uçuşta kullanılmaya başlanmıştır (McKeever ve ark., 1995).

2.3.4.1.(3). Klinik Dozimetri

Son zamanlarda küçük boyuttaki TLD materyalleri teşhis ve tedavide oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Termolüminesans dozimetreler teşhis, tedavi veya her ikisinde birden yapılan uygulamalar sırasında hastanın vücudunun üzerine yerleştirilerek maruz kaldıkları iyonize radyasyonun miktarının hesaplanması amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Radyasyona maruz kalan TLD daha sonra hastadan alınarak ölçümleri yapılmaktadır. Bu sayede fizikçiler kritik iç organlara ulaşan gerçek doz miktarını hesaplayabilmekte ve böylece tedaviye yön verebilecek bilgiler edinmektedirler. Bu tarz bir uygulamanın diğer radyasyon dozimetre tipleri ile gerçekleştirilmesi oldukça zordur.

İnsanlar klinik radyasyona iki alanda maruz kalırlar; bunlardan birincisi teşhis amaçlı radyoloji (örneğin mamografide, dişçilikte ve genel tanı amaçlı çekilen filmler sırasında X ışınına maruz kalırlar), ikincisi de radyoterapidir (değişik tiplerdeki birinci seviyeden kanser terapileri). Bu alanlarda kullanılan radyasyon tipleri X ışınları (maksimum 10 keV civarında), gama ışınları (^{137}Cs veya ^{60}Co kaynaklı), elektronlar (40 MeV'e kadar), ağır yüklü parçacıklar ve nötronlardır. Kullanılan doz oranları radyoloji için 10^{-5} ile 10^{-2} Gy arasında değişirken radyoterapide 20 Gy'e kadar radyasyon dozu kullanılmaktadır. Radyasyon terapisi için hesaplanan dozdaki hata oranı $\pm \%3$ 'ten az olmalıdır. Aksi takdirde tedavi sürecinde sorunlar yaşanabilmektedir.

TLD materyallerinin bu alandaki kullanımı ile elde edilen doz doku eşdeğer dozdur. TLD'lerden beklenen canlı içerisinde doz ölçümünü yüksek hassasiyette gerçekleştirebilmeleri ve mümkün olduğunca küçük boyutlarda olmalarıdır. Ayrıca yukarıda belirtilen doz aralıklarında yüksek oranda doğrusal doz cevap eğrisine sahip olmaları da bu dozimetrelerden beklenen bir diğer özelliktir (McKeever ve ark., 1995).

2.3.4.1.(4). Yüksek Doz Dozimetrisi

TLD'lerin kullanıldığı bir diğer uygulama alanı ise yüksek doz oranlarındaki radyasyon miktarının (10^2 Gy'den 10^6 Gy'e kadar) ölçülmesidir. Yüksek doz uygulamalarına nükleer santrallerin içerisinde, gıdaların sterilizasyonunda veya malzeme testlerinde rastlanılmaktadır. Geleneksek TLD'lerin bu doz aralıklarında kullanılması bazı limitlerden dolayı zor olabilir. Bu limitler kullanılan malzemenin doygunluğa ulaştığı doz miktarı ile paraleldir. Bu alanda kullanılan TLD materyallerinin (örneğin TLD-100, LiF:Mg,Ti) özellikle yüksek sıcaklık tepeleri kullanılmaktadır. Çünkü bu yüksek sıcaklık tepelerinin daha yüksek dozlarda doygunluğa ulaştığı görülmektedir. Alternatif olarak bazı araştırmacılar, TLD materyalinin okuma öncesi yüksek dozlara maruz bırakılması ile (radyoaktif hasar) doz hassasiyetlerinin azalacağını ve böylece bu özelliğin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak TLD'lerin böyle yüksek uç noktalardaki dozların bulunduğu ortamlarda kullanılabilmeleri amacıyla sahip olmaları gereken özellikler biraz karmaşık olabilmektedir (McKeever ve ark., 1995).

2.3.4.2. Optiksel Uyarmalı Lüminesans (OSL) Dozimetri

OSL dozimetrisi TL dozimetri ile benzer prensipler üzerine kuruludur. Tek fark termolüminesans dozimetri sistemlerinde kullanılan ısı ile uyarmı yerine ışıkla uyarmı yapılmasıdır. OSL dozimetri, radyoterapide in-vivo dozimetri yerine yeni bir teknik potansiyel sunmaktadır. Işınlama sırasında ölçülen birleşik (entegre) doz daha sonra doğrudan OSL kullanılarak değerlendirilebilir. Son yıllarda OSL tekniğine dayalı dozimetri sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte OSLD olarak kullanılan dot, nanoDot ve Inlight dozimetreler yaygınlaşmıştır. Şekil 2.10'da Landauer firması tarafından OSL teknolojisine dayalı olarak geliştirilmiş microStar OSLD okuyucusu, nanoDot ve Inlight OSLD'ler görülmektedir.



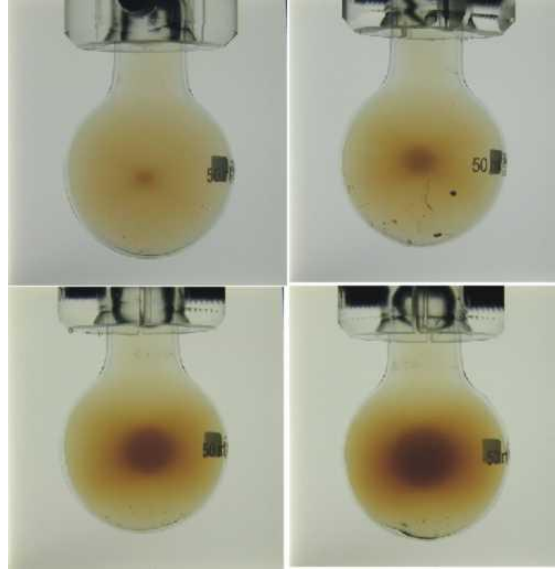
Şekil 2.10. microStar OSLD okuyucu, nanoDot ve Inlight dozimetreler (IX; X).

2.3.5. Diğer Dozimetri Sistemleri (Gel, Diamond)

Bu bölümde yer alan dozimetri sistemleri, alanin/elektron paramanyetik rezonans, plastik sintilatör, elmas ve jel dozimetri sistemleridir.

Bir amino asit çeşidi olan alanin, bir bağlayıcı madde ile çubuk ya da pellet şeklinde preslenmiş tipik olarak yüksek doz ölçümlerinde kullanılan bir dozimetredir. Bu dozimetre radyoterapi dozimetrisinde yeterli hassasiyet ile yaklaşık 10 Gy ya da daha üst bir doz seviyesinde kullanılabilir.

Plastik sintilatör dozimetresi, radyoterapi dozimetrisinde nispeten yeni yeni gelişme gösteren bir dozimetri sistemidir. Bu dozimetri sisteminin çalışması, sintilasyon maddesine radyasyon enerjisinin nakli ile bu maddenin görünen ışık veya görünen ışığa yakın dalga boyunda bir radyasyonu yayınlaması prensibine dayanır. Elde edilen ışık PMT kullanılarak çoğaltılmaktadır.



Şekil 2.11. Jel dozimetrelerin genel bir görüntüsü (XI).

Elmaslar radyasyona maruz kaldıklarında kendi dirençlerini değiştirirler. Yönlendirici voltaj (bias) uygulandığında, meydana gelen akım maruz kalınan radyasyonun dozu ile orantılıdır. Ticari olarak piyasada yer alan elmas dozimetreler yüksek enerjili foton ve elektronların göreceli doz dağılımını ölçmek için kullanılmaktadır.

Jel dozimetri sistemleri (Şekil 2.11), bağıl doz ölçümleri için kullanılabilen uygun tek gerçek 3 boyutlu dozimetrelerdir. Jel dozimetreler 3 boyutlu geometride soğurulmuş doz dağılımını bir fantom altında aynı anda ölçebilmektedir. Jeller çok yakın bir doku eşdeğeri olup farklı şekil ve biçimlerde kullanılabilirler.

Çizelge 2.1’de bazı dozimetri sistemlerinin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Dozimetri sistemlerinin avantaj ve dezavantajları (Her + işareti avantajı göstermektedir.).

Dozimetre	Güvenirlilik ve Tekrarlanabilirlik	Duyarlık	Doğrusallık	Doz Hızı Bağımsızlığı	Enerji Bağımsızlığı	Uzaysal Ayırma Gücü	Su Eşdeğerliliği	Kullanım Kolaylığı
İyon odası	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	+++
Diyot	++	+++	++	++	++	+++	+	+++
Elmas	++	++	++	+	+++	+++	+++	+
TLD	++	++	++	+++	++	++	++	+
MOSFET	+	++	+++	+++	++	+++	+	+
Plastik sintilatör	+	+	+++	+++	++	+++	+++	+
Alanin	+	+	++		+	+++	++	+
EBT	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++
MD-55	+	++	++	+++	+++	+++	+++	+++
EDR2	++	+++	++	+++	++	+++	+	++
XV	++	+++	++	+++	+	+++	+	++

3. TERMOLÜMİNESANS (TL) TEORİSİ

3.1. Lüminesans Türleri

Bir madde üzerine radyasyon geldiği zaman, enerjisinin bir kısmı soğurulur ve daha uzun dalga boylu bir ışık olarak yeniden yayılır (Stoke's Yasası). Bu yayılım, kara cisim ışımasını içermeyen ve fosfor olarak adlandırılan bazı katılardan ışığın yayılması olayıdır ve bu olay “lüminesans” olarak adlandırılır.

Yayılan ışığın dalga boyu, ışıma yapan maddenin karakteristiği olup gelen radyasyonun karakteristiği değildir. Genellikle lüminesans olayı ile ilgili çoğu çalışma, görünen ışığın yayılımı ile ilgilidir; fakat diğer dalga boylarında da yayılma olabilir. Örneğin ultraviyole (UV) ve kızılötesi (IR) gibi. Biz burada sadece görünen ışığın yayılımı ile ilgileneceğiz.

Lüminesansa yol açan enerji kaynakları, elektron akışı, elektrik ya da manyetik alan, morötesi ışıma, alfa parçacıkları salınımı şeklindedir. Bu yolla uyarılmış atomlar, kararlı hallerine dönerken dışarıya ısı ya da elektromanyetik ışıma -ya da her ikisi birden- yoluyla enerji verirler. Atomdaki bu uyarılma en dıştaki elektron kabuğunda oluşur. Belirtilen şekilde uyarılan atomun en dış elektron kabuğundaki elektron valans ya da değerlilik elektronu, bir üst enerji düzeyine yükselir. Ancak bu enerji düzeyi kararsız olduğundan tekrar eski enerji düzeyine düşecektir. Bu, elektronun aldığı enerjiyi geri vermesidir ve bir foton salınımı olarak gerçekleşir. Lüminesans olayının birçok türü vardır. Bunlar kısaca:

- Floresans: Işıma ile uyarılan ve uyarılma ışıması kalktıktan sonra, 10^{-8} s'den fazla devam etmeyen lüminesanstır. Uyarılma şekilleri, iyonlaştırıcı radyasyon, ultraviyole (UV) ve görünür ışık.
- Fotolüminesans: Ultraviyole (UV), görünür ve kızılötesi (IR) ışıkla uyarılan maddede oluşan bir lüminesans çeşididir. Floresans ve fosforesans olayları fotolüminesansın özel durumlarıdır.

- Termolüminesans: İyonlaşma radyasyonu ile uyarılan bazı cisimler ısıtıldıklarında bir lüminesans gösterirler. Bu ışımaya termolüminesans denir. Uyarılma şekilleri, iyonlaştırıcı radyasyon, ultraviyole (UV) ve görünür ışık.
- Yavaş floresans: Hiç ısıtılmadan ve saniyenin kesri mertebesinde ışıma gösteren bir lüminesanstır.
- Sonolüminesans: Yüksek frekanslı ses dalgaları veya fononlarla meydana gelen bir lüminesans türüdür.
- Katodolüminesans: Elektronların kristallere çarpmasıyla oluşabilen lüminesanstır. Uyarılma şekli: katot ışınları.
- Elektrolüminesans: Maddeye elektrik alanının uygulanması ile meydana gelen lüminesans çeşididir.
- Tribolüminesans: Mekanik deformasyonlar veya sürtünmelerle oluşan lüminesans türüdür.
- Radyolüminesans: Hızlandırıcılardan, kozmik ışınlardan, radyoaktif maddelerden veya diğer kaynaklardan gelen yüksek enerjili parçacıkların etkisi ile meydana gelen lüminesans çeşididir.
- Biyolüminesans: Biyokimyasal reaksiyon enerjileri ile uyarılma sonucunda meydana gelen lüminesanstır.
- Piezolüminesans: Basınçla (10 ton/m^2) uyarılma sonucunda meydana gelen lüminesanstır.

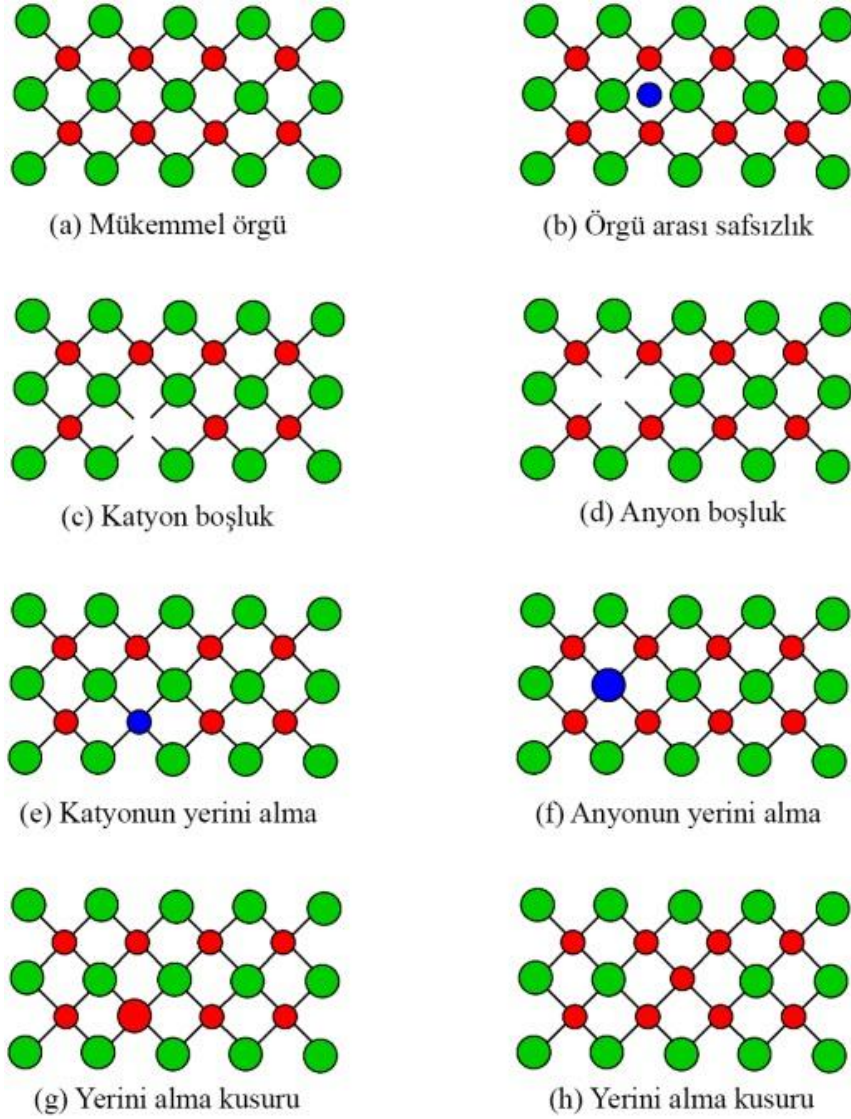
3.2. Kristal Kusurları

Teorik olarak kristal örgünün mükemmel olduğu ve her boş konumun bir atom tarafından işgal edildiği varsayılmaktadır. Fakat bir metre küpte yaklaşık 10^{28} atomun yer aldığı düşünüldüğünde istatistiksel olarak bir takım düzensizliklerin olacağı beklenen bir durumdur. Tüm gerçek kristaller, termolüminesans (TL) olayı için çok büyük önem teşkil eden farklı şekillerde oluşmuş kristal kusurları içerirler. Kristaller, alaşımlarda soğuk şekillendirilebilirlik, yarı iletkenlerde elektrik iletkenliği, atomların hareket hızı ve metallerde korozyon gibi birçok mekanik ve fiziksel özelliği kapsayan kusurlara sahiptirler. Kristalin üretimi veya doğal oluşum

işlemleri bir kristalde hangi tip kusur olduğunun belirlenmesinde önemli faktörlerdir. Kristal kusurları noktasal, çizgisel, yüzeysel ve hacimsel kusurlar olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir.

3.2.1. Noktasal Kusurlar

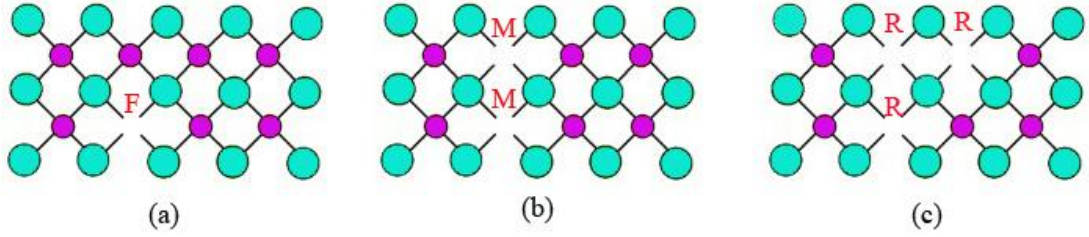
Bir atomun kendine ait yerde bulunmaması demek olan atom boşluğuna nokta kusuru denir. Atom boşlukları metallerde denge kusurlarıdır ve oluşma enerjileri yaklaşık olarak 1-2 eV'tur. Metallerde biçim değiştirme, yüksek sıcaklıklardan düşük sıcaklıklara aniden düşme ilave boşluklar oluşturabilmektedir. Şekil 3.1'de nokta kusurlarının çeşitleri görülmektedir. Boşluk kusurları atomdaki boşluk sayısına göre üçe ayrılmaktadır. Eğer tek bir boşluk varsa F merkezli boşluk kusuru, iki boşluk varsa M merkezli boşluk kusuru ve üç boşluk varsa R merkezli boşluk kusuru olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.2). Oluşması için 1-2 eV'ye gereksinim olan boşluklar, örgü arası fazlalıklar (ara yer atomu), kristallerde ısısal uyarılmanın bir sonucu olarak meydana gelirler ve sayıları sıcaklıkla hızla yükselir. Bu kusurların parçacık ışıınımı ile oluşumu da çok önemlidir. Örneğin bir nükleer reaktörde yüksek enerjili nötronlar atomları normal konumlarından oynatırlar (Beiser, 1995).



Şekil 3.1. Kristal yapı içerisinde oluşan noktasal kusurlar (Barron ve Smith, 2010).

Eğer bir artı katyon bir iyonik kristalde ara yere girerse normal iyon yerinde bir katyon boşluğu oluşmuş olur. Bu şekilde oluşan kusurlara "Frenkel Kusuru" denir. Frenkel kusuru, elektrik iletkenliğinde bir artışa sebep olur.

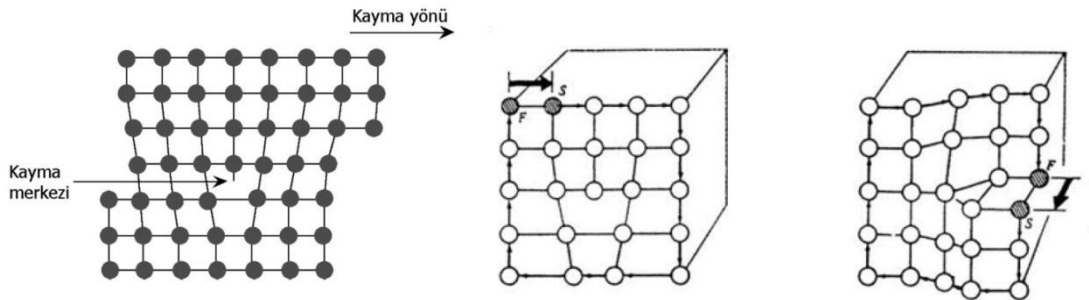
Bir iyonik kristalden iki karşı yüklü iyon yok olduğunda "Schottky Kusuru" denilen katyon-anyon ikili boşluğu oluşur.



Şekil 3.2. Kristal yapıda oluşan (a) F merkezli, (b) M merkezli (c) R merkezli noktasal kusurlar.

3.2.2. Çizgisel Kusurlar

Kristal örgülerinde dış bir etki ile atomların kayması sonucunda bir çizgi boyunca örgünün çarpılmasına neden olan örgü kusurlarıdır. Kristalin katılaşması sırasında oluşurlar. Çeşitli çizgisel kusurlar Şekil 3.3'te görülmektedir.



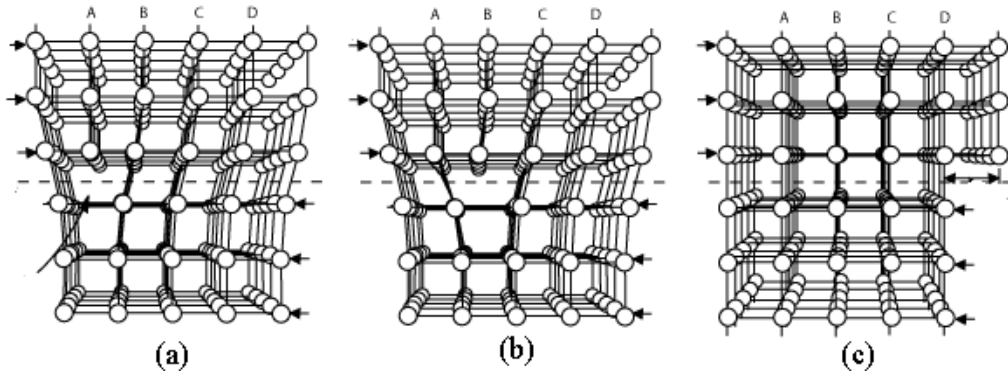
Şekil 3.3. Bir kristalde çizgisel kusurlar (Barron ve Smith, 2010).

3.2.3. Yüzeysel Kusurlar

Bir kristal küçük kristal taneciklerinden oluşmuştur. Genellikle kristal malzemeler bu tip kristal taneciklerinin üst üste yığılmasıyla oluşturulmuştur. Küçük metal tanecikler düzgün olmalarına rağmen birleşme anında birbirleriyle açı yaptıklarından yüzeyde kusur oluştururlar. Tane sınırları, çok kristalli metallerde farklı yönelimdeki taneleri birbirinden ayıran yüzey kusurlarıdır. Metallerdeki tane sınırları, katılaşma sırasında farklı çekirdeklerden oluşan ve aynı zamanda büyüyen kristaller birbiriyle temas edince oluşur.

3.2.4. Hacimsel Kusurlar

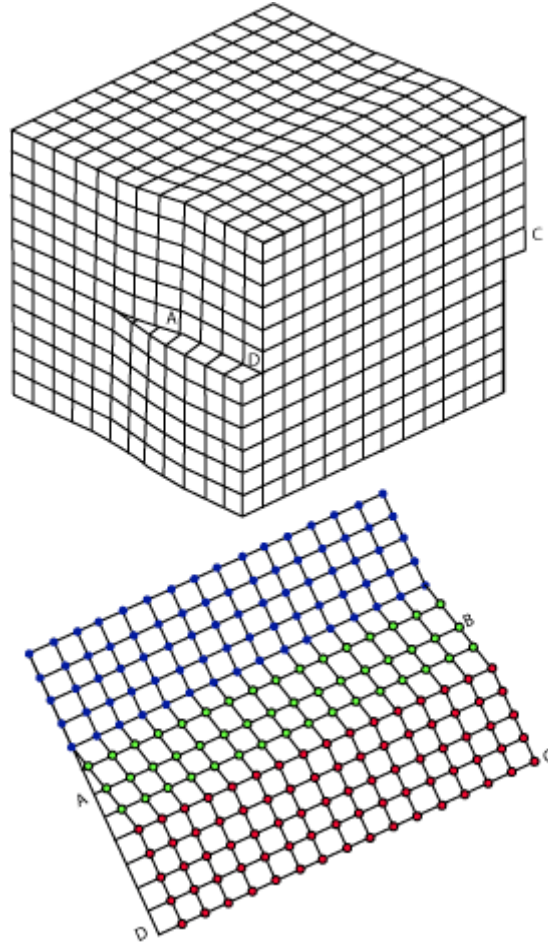
Hacimsel kayma kusurlarının oluşması için gereken enerji miktarı oldukça fazladır. Hacimsel kusurların başında kayma kusuru gelmektedir. Kayma kusuru, bir atom dizisinin doğru yerinde olmadığı bir kristal kusurudur. Kayma kusurlarının iki temel türü vardır. Şekil 3.4 bir atom tabakasının bir kısmının ortadan kalkması sonucunda meydana gelen kenar kayma kusurunu göstermektedir.



Şekil 3.4. Bir kristalde hacimsel kusurlar (XII).

Kuvvet uygulanan bir kristal, yapısındaki kayma kusurları konum değiştirdiği için kalıcı şekil bozukluğuna uğrar. Şekil 3.4.a'da kenar kayma kusuru olan bir kristalin başlangıçtaki yapısı gösterilmektedir. Kayma kusurunun altındaki tabakada bulunan atomlar, üstlerindeki atomlarla olan bağlarını birer birer kaydırırken, kayma kusuru sağa doğru ilerler (Şekil 3.4.b). Şekil 3.4.c'de kristal kalıcı şekil değişikliğine uğramaktadır. Diğer bir tür ise dislokasyon vida kayma kusurlarıdır. Bir vida kayma kusurunun oluşumunu düşünelim: Mükemmel bir kristalde yarım bir kesik yapıldığını ve Şekil 3.5'teki gibi kesiğin bir tarafının diğer tarafına göre yerinden oynatıldığını düşünelim. Böylece atom tabakaları kayma kusurunun etrafında spiraller oluştururlar (Beiser, 1995).

Enerji seviyeleri kusurun ve örgünün yapısına bağlı olarak tek veya dağılmış olabildikleri için kristal kusurları lüminesans olayları için oldukça önemlidir.



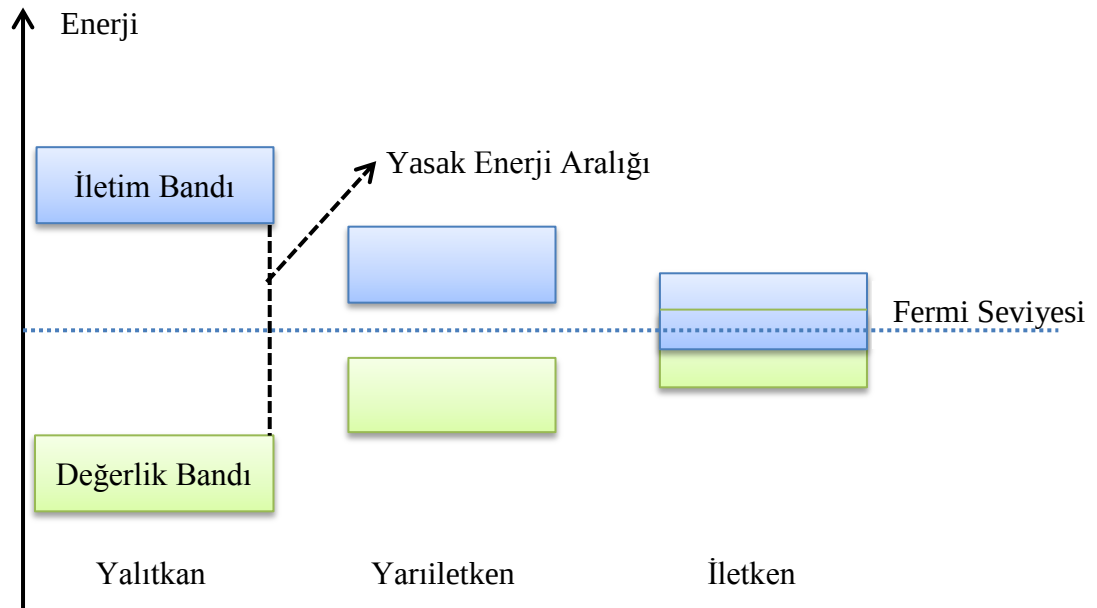
Şekil 3.5. Bir kristalde vida kayma kusuru (XII).

3.3. Katılarda Band Modeli

Katılar atomlarının dizilişlerine göre amorf yapı ve kristal yapı olmak üzere iki grupta toplanırlar. Bazı katıların atomları gelişigüzel dizilmiş olup belirli bir düzene sahip değildirler. Bunlara amorf katılar denir ve oluşturdukları yapıya da amorf yapı adı verilir. Bazı katılarda ise katıyı oluşturan atom, atom grupları ve moleküller, o katıya özgü belirli bir düzen içinde bir araya gelirler. Bu katılara da kristal denir ve oluşturdukları yapıya da kristal yapı adı verilir.

Katılarda elektronların yer aldığı enerji bandına değerlik bandı, bu bandın üzerinde yer alan ve yasak enerji aralığı ile ayrılmış banda ise iletim bandı adı verilir.

Katılar elektriksel ve optik özelliklerine göre de yalıtkanlar, yarı iletkenler ve iletkenler olmak üzere üç grupta toplanırlar. Katıların enerji-bant teoremine göre, değerlik (valans) bandı tamamen dolu ve iletim bandı tamamen boş olan katılara yalıtkanlar adı verilir. Yalıtkanlarda bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığının geniş olması nedeniyle oda sıcaklığında elektronların değerlik bandından iletim bandına geçmeleri olanaksızdır. Değerlik ve iletim bantları üst üste binen katılara ise iletkenler adı verilir. Tüm metaller bu gruba girerler. Değerlik ve iletim bantları arasındaki yasak enerji aralığı yalıtkanlarda olduğu kadar geniş olmayan katılara da yarı iletkenler adı verilir ([XIII]). Şekil 3.6'da yalıtkan, yarı iletken ve iletken katılarda bant yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Katıların iletkenlik özelliklerine göre bant yapısı.

3.4. Termolüminesans (TL) Teorisi

Bazı yalıtkan ve yarı iletken maddeler ısıtıldıkları zaman ışıma yaparlar. Bu fiziksel olaya "ısıtma ile ışıma" anlamına gelen termolüminesans (TL) denir.

Yalıtkan ve yarı iletken maddeler içlerinde ve çevrelerinde bulunan uranyum (U), toryum (Th) ve potasyum (K) gibi radyoaktif elementlerin yaydığı alfa (α) ve

beta (β) parçacıkları ile gama (γ) ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyonların etkisiyle, enerji soğururlar. Soğurdukları enerjinin bir kısmını kristal yapılarında depo ederler.

Maddede enerji birikimi şu şekilde olmaktadır: Maddeden geçen radyasyon, yolu üzerindeki atomlarla çarpışır. Bu arada değerlik bandında bulunan ve iyonlaştırıcı radyasyonun etkisiyle enerji kazanan elektronlar yasak enerji aralığını geçerek iletim bandına çıkar ve daha sonra maddenin kristal yapısında çeşitli nedenlerle oluşan ve "tuzak" adı verilen yerlere yakalanırlar. Böylece bu elektronlar radyasyondan aldıkları enerjiyi bu tuzaklarda biriktirmiş olurlar.

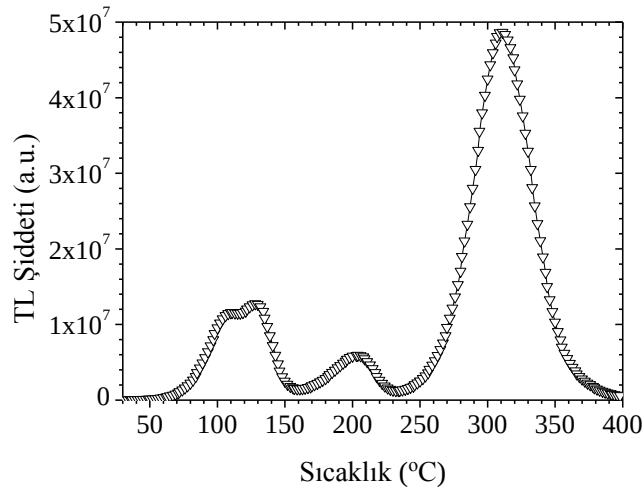
Elektronların yakalandıkları tuzaklarda kalma süreleri, çevre koşullarına ve tuzak özelliklerine bağlıdır. Birkaç dakikadan bir milyon yıla kadar elektronları tutabilen tuzaklar vardır. Kısa sürede boşalan tuzaklara sığ, uzun sürede boşalanlara da derin tuzaklar denir. Derin tuzaklar oluştukları andan itibaren kendiliklerinden boşalmadıkları için maddenin aldığı radyasyon miktarını tam olarak yansıtır.

Kristal ısıtıldığında tuzaklanmış elektronlar tuzaklardan kurtulurlar, tuzaklardan kurtulan elektronlar boşluk içeren uygun yeniden birleşme merkezleriyle birleşerek ışık (foton) yayarlar. Maddede biriken radyasyon enerjisi de böylece ışık olarak geri verilmiş olur. Çıkan ışık miktarı maddenin biriktirdiği radyasyon enerjisi miktarına bağlıdır. Ne kadar çok enerji birikirse o kadar çok ışık çıkar. Hiç enerji birikmemişse veya biriken enerji herhangi bir nedenle, örneğin ısınma yoluyla boşalmış ise ışık çıkışı olmayacaktır.

Madde, sabit bir hızla ısıtılacak olursa tuzaklar, sıklardan derinlere doğru sırayla boşalırlar. Her tuzak grubunun farklı bir boşalma sıcaklığı vardır. Bu nedenle örnek içindeki elektron tuzakları sırayla boşalırken farklı sıcaklıklarda ayrı ayrı tepeler meydana gelir. Tuzak gruplarının boşalma sıcaklıklarına yaklaştıkça ışıma artar ve bir maksimum değer aldıktan sonra azalmaya başlar. Bu azalma bir sonraki tuzak grubunun boşalmaya başladığı sıcaklığa kadar devam eder. Ondan sonra yeniden artmaya başlar. Işımadaki bu artma ve azalmaları, sıcaklığa karşı gösteren eğriye "ışıma eğrisi" (glow curve) denir.

Şekil 3.7'de beta parçacıkları ile ışınlanmış doğal CaF_2 örneklerinin ışıma eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerdeki ışıma dorukları (tepe noktaları) değişik derinlikteki tuzak gruplarının boşalma sıcaklıklarını göstermektedir. Tuzak

gruplarının birbirinden çok farklı derinlikte olması durumunda ışıma dorukları belirgin bir şekilde görülür. Eğer, grupların tuzak derinliği birbirine yakınsa ışıma dorukları da yakın sıcaklıklarda olacakları için birbirlerini etkilerler ve tek tek belirmeyip geniş bir eğri şeklinde ortaya çıkarlar. Bu durumda eğrinin kaç doruktan oluştuğu ilk bakışta anlaşılmaz. Şekil 3.7'deki eğriler birkaç doruğun girişiminden oluşmaktadır.

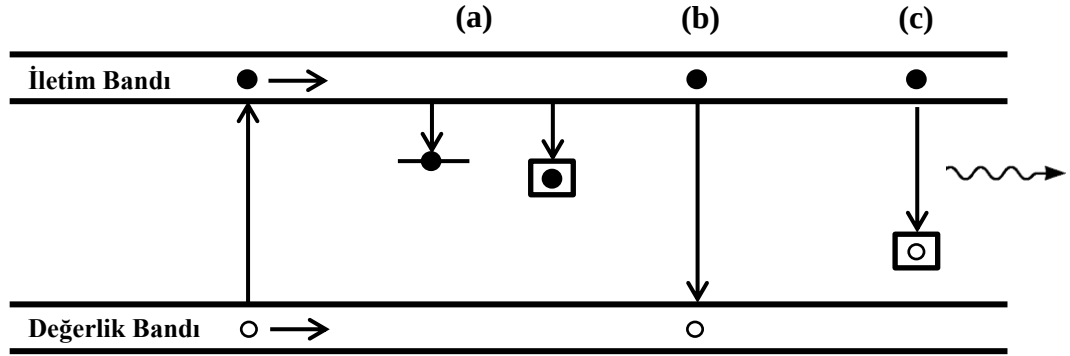


Şekil 3.7. Doğal CaF_2 'nin ışıma eğrileri (Yüksel, 2008; Yüksel ve ark., 2010).

Basit termolüminesans modeli ve TL olayının açıklaması Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görülmektedir. Basit termolüminesans modeli iki adımda açıklanabilir:

Adım1: Işınlama

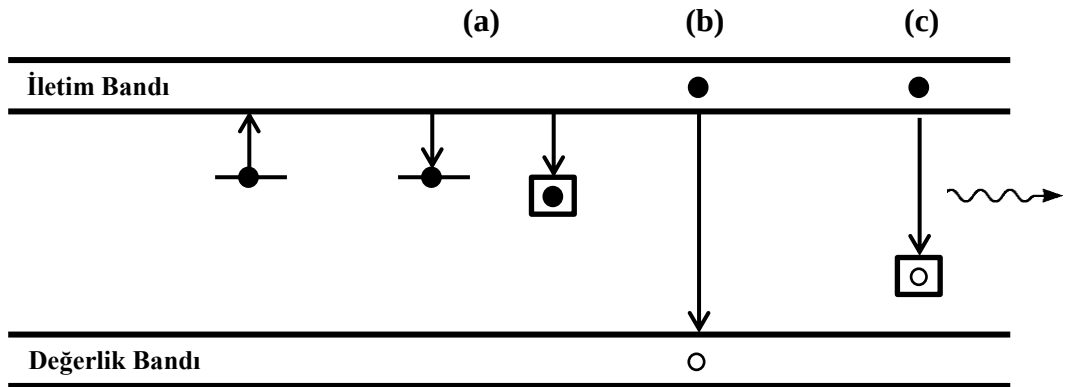
Malzeme ısımlandığında serbest elektronlar ve deşikler açığa çıkar. Bu elektronlar yasak enerji aralığını aşarak çok kısa bir süreliğine değerlik bandından iletim bandına çıkarlar. Daha sonra katının içerisindeki tuzaklardan birine yakalanır (Şekil 3.8.a) ya da valans banda geri dönerek ışımsal veya ışımsız bir şekilde deşiklerle birleşirler (Şekil 3.8.b) ya da ışınlamanın bir sonucu olarak deşikler tarafından aktif hale getirilmiş lüminesans merkezlerine yakalanırlar (Şekil 3.8.c). Yeniden birleşmenin olabilmesi için öncelikle boşlukların yeniden birleşme merkezlerinde tuzaklanmaları gerekir. Aynı süreçler deşikler için de geçerlidir (Furetta ve Weng, 1998).



Şekil 3.8. Kristal yapı içerisinde ışınlama ile gerçekleşen süreç.

Adım2: Isıtma

Yarı kararlı enerji seviyesindeki tuzaklanmış elektronlar, tuzaktan kurtulması için gereken ve aktivasyon enerjisi (ya da tuzak derinliği) olarak ifade edilen E kadarlık yeterli enerjiyi aldıktan sonra tuzaklardan iletim bandına doğru geçerler. Bu elektronlar ya yeniden tuzaklanır (Şekil 3.9.a) ya değerlik banda dönerek ışınlımsal veya ışınlımsız bir şekildedeşiklerle birleşirler (Şekil 3.9.b) ya da lüminesans merkezindeki birdeşik ile birleşerek foton yayarlar (Şekil 3.9.c). Son süreçte yayınlanan bu ışık termolüminesans olarak adlandırılır. Aynı süreçlerdeşikler için de geçerlidir (Furetta ve Weng, 1998).



Şekil 3.9. Kristal yapı içerisinde ısıtma ile meydana gelen süreç.

Kusursuz ideal bir kristalin TL özelliği göstermesi beklenmez. Elektron tuzakları ve lüminesans merkezleri ilgilenilen minerallerin kristal örgülerindeki bozukluklardan oluşmaktadır. Bu bozukluklara örnek olarak yerinde olmayan bir

iyonu veya konumunda olmayan bir atomu gösterebiliriz. Başlangıçta TL'nin nasıl oluştuğu düşünüldüğünde bu bozukluklar kristal için önem taşımaktadır ve dozimetrenin temelini de bunların arasındaki elektronların hareketleri oluşturur.

İyonlaşma radyasyonu, bir TL fosforuyla ve çevresindeki ortamla etkileştiği zaman fosfor tarafından enerji soğurulur ve dedektöre gelen radyasyon ile orantılı olarak tuzaklar tarafından depolanır. Bu enerjinin bir kısmı, fosforu ısısal olarak uyatarak ölçülebilir ışık cinsinden serbest bırakılabilir. Işık çıktısı ya fosforun ısıtılması sırasında sıcaklığına karşı çizilerek veya ısıtılması sırasında zamana karşı çizilerek bir ışıma eğrisi oluşturulur. Oluşturulan bu ışıma eğrisinin altında kalan alanın ve her bir ışıma tepesinin yüksekliğinin sayısal değeri, fosforun maruz kaldığı radyasyon dozu ile orantılıdır.

TL fosforlarının da gama radyasyon dedektörlerinde olduğu gibi enerji bağımlılıkları vardır ve çoğunlukla 100 keV'in altındaki fotonlar tarafından radyasyona maruz kaldıklarında elde edilen TL yanıtları enerji bağımlılıklarından dolayı daha yüksektir. Fotonların enerjisine olan bu bağımlılık, fosforun uygun bir muhafaza içine alınmasıyla minimuma indirilir. Maalesef fosforu muhafaza içine almak veya paketlemek, eğer fosfor küresel simetriye sahip değilse, sıklıkla yöne ait bağımlılığa neden olmaktadır. Ayrıca fosforların çoğunun üzerine ışığın veya nemin etkisini minimuma indirmek için paketlenmesi gerekmektedir. Cam içinde kapsüle yerleştirmek bu sorunlardan korur; fakat sıklıkla cam içerisindeki potasyumdan (^{40}K) dolayı kendi radyasyonuna neden olur. Bazı fosforlar daha önceden depoladıkları enerjiden dolayı sahip oldukları sinyali zaman içerisinde kaybederler bu olaya "fading" (solma) denir; solma oranı genellikle sıcaklıkla artar. Solma son derece karışık bir süreç olarak literatürde geniş olarak tartışılmış ve genellikle süreç ve etkileri ile ilgili sonuçlar birbirleriyle uyumsuz olmuştur.

Düşük ölçme limitinde olduğu gibi bu problemler uygulamalar için önem teşkil etmiştir. Bu uygulamalarda çevre koşulları, özellikle sıcaklık, radyasyona maruz kalma gibi, birbirlerinden farklıdır. Ölçülebilen radyasyon miktarı 1 mrad'a kadar inebilir ve geniş bir enerji spektrumuna dağılır.

3.5. Termolüminesans (TL) Kinetikleri

Termolüminesans süreçlerini (işlemlerini) yöneten birinci, ikinci ve genel derece denklemler Randall-Wilkins (1945), Garlick-Gibson (1948) ve May-Partridge (1964) tarafından verilmiştir. Bunlar sırasıyla:

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = nse^{-E/kT} \quad (3.1)$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{N} se^{-E/kT} \quad (3.2)$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s' se^{-E/kT} \quad (3.3)$$

denklemleri ile ifade edilir.

Tipik bir deneysel durumda örneği ısıtmak için lineer bir ısıtma hızı (β) kullanılır. Deneyde sıcaklık değişimi $T = T_0 + \beta t$ olarak ifade edilir ki burada β lineer bir ısıtma hızı olup birimi (Ks^{-1})'dir. Şekil 3.10'da zamanın fonksiyonu olarak sıcaklık, deşik yoğunluğu ve TL şiddetine ait grafikler görülmektedir.

Eşitlik 3.3'te,

I : Termolüminesans (TL) şiddeti,

t : zaman (s),

n : herhangi bir t anında tuzaklanan elektronların yoğunluğu (m^{-3}),

N : toplam tuzak yoğunluğu (m^{-3}),

s : elektron tuzaklarının karakteristiklerini belirleyen ve ön üstel frekans faktörü ya da kaçış frekansı olarak adlandırılan sabit (s^{-1}). Bu parametre, bir kristal örgüsünde bulunan atomların ortak titreşimlerinin frekansı ile orantılıdır. Tipik s maksimum değerleri kristal örgüde bulunan atomların ortalama titreşim değerlerine karşılık gelir. Örneğin, $10^{12} - 10^{14} s^{-1}$.

s' : genel dereceden kinetikler için etkin olduğu varsayılan ön üstel frekans faktörü ($m^{3(b-1)}s^{-1}$),

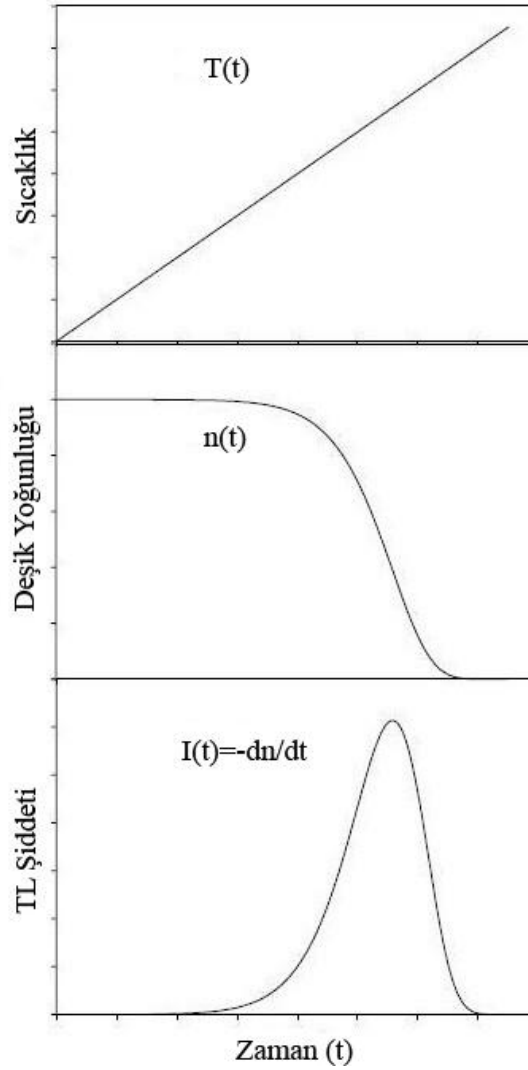
k : Boltzman sabiti (eVK^{-1}),

b : kinetik derece (mertebe), tipik olarak $1 \leq b \leq 2$ değerlerini alan parametre

E : aktivasyon enerjisi (ya da tuzak derinliği) (eV),

T : mutlak sıcaklık (K),

T_0 : $t = 0$ anındaki mutlak sıcaklık (K), (Pagonis ve ark., 2006).



Şekil 3.10. Yeniden birleşme merkezinde zamanın bir fonksiyonu olarak sıcaklık profili $T(t)$, TL şiddeti $I(t)$ ve tuzaklanmış deşiklerin yoğunluğu $n(t)$ (Pagonis ve ark., 2006).

3.5.1. Birinci Derece Kinetik (Randall-Wilkins Teorisi)

Birinci derece kinetik diğer bir ifadeyle Randall-Wilkins Teorisi tek bir tuzak derinliğini göz önüne alır ve tuzaklardan kurtulan elektronların tekrar tuzaklanmadığını varsayar. Bu teoriye göre, TL şiddeti (I), herhangi bir sıcaklıkta tuzaktan kurtulan elektronların sayısı ile orantılıdır:

$$I(t) = -c \left(\frac{dn}{dt} \right) = c p n \quad (3.4)$$

Elde edilen bu denklemde $c=1$ olarak alınabilen bir sabittir.

$$n = n_0 \exp \left[-s t \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \right] \quad (3.5)$$

ve

$$P = s \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \quad (3.6)$$

denklemleri göz önüne alınıp 3.4 denkleminde yerine yazılırsa:

$$I(t) = n_0 s \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \exp \left[-s t \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \right] \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir.

Isıtma hızının lineer olduğu düşünülürse ($\beta = dT/dt$) kullanılarak

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -\left(\frac{s}{\beta} \right) \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT' \quad (3.8)$$

$$\ln(n) - \ln(n_0) = -\left(\frac{s}{\beta} \right) \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT' \quad (3.9)$$

denkleminde n hesaplanırsa

$$n = n_0 \exp \left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT' \right] \quad (3.10)$$

denklemini elde edilir. n değeri 3.4 denkleminde yerine yazılacak olursa Randall-Wilkins bağıntısı,

$$I(t) = n_0 s \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \exp \left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT' \right] \quad (3.11)$$

olarak bulunur.

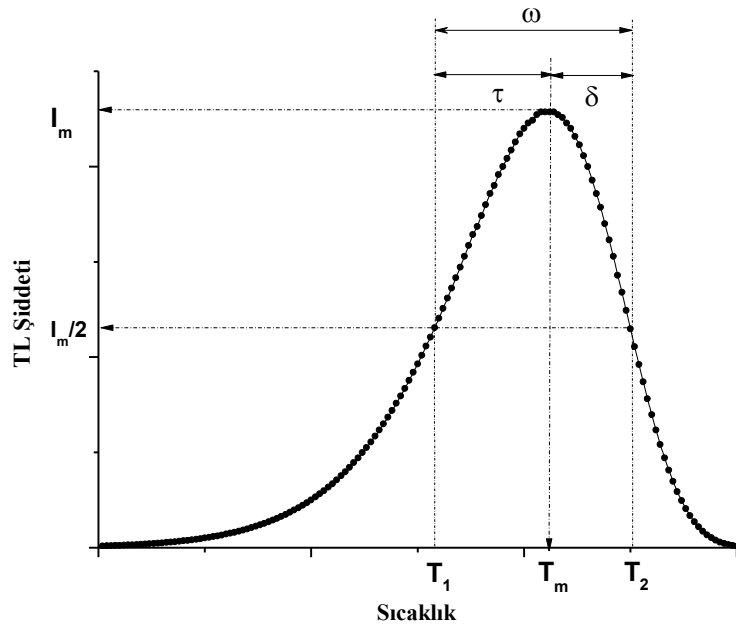
Burada,

n_0 : $t=0$ 'da tuzaklanan elektronların sayısı (m^{-3}),

β : doğrusal ısıtma hızı (Ks^{-1}),

T' : mutlak sıcaklığı gösteren bir değişkendir.

3.11 ifadesi karakteristik bir T_M sıcaklığında maksimum bir yoğunluk ile sayısal olarak hesaplanırsa Şekil 3.11'deki gibi çan şeklinde bir eğri verir.



Şekil 3.11. Birinci derece TL denkleminde normalize edilmiş ışıma tepesi.

3.11 denkleminin $T = T_M$ değerinde sıcaklığa göre türevi alınıp 0'a eşitlenip

$$\frac{dI(t)}{dT} = 0, \quad T = T_M \quad (3.12)$$

bu işlem pratik olarak logaritmik türev olarak kabul edilerek

$$\frac{d(\ln I(t))}{dT} = \frac{1}{T} \frac{dI(t)}{dT} \quad (3.13)$$

3.11 denkleminde

$$\ln(I(t)) = \ln(n_0 s) - \frac{E}{kT} - \frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \quad (3.14)$$

$$\left[\frac{d(\ln I(t))}{dT} \right]_{T=T_M} = \frac{E}{kT_M^2} - \frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) = 0 \quad (3.15)$$

3.15 ifadesi düzenlenerek

$$\frac{\beta E}{kT_M^2} = s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \quad (3.16)$$

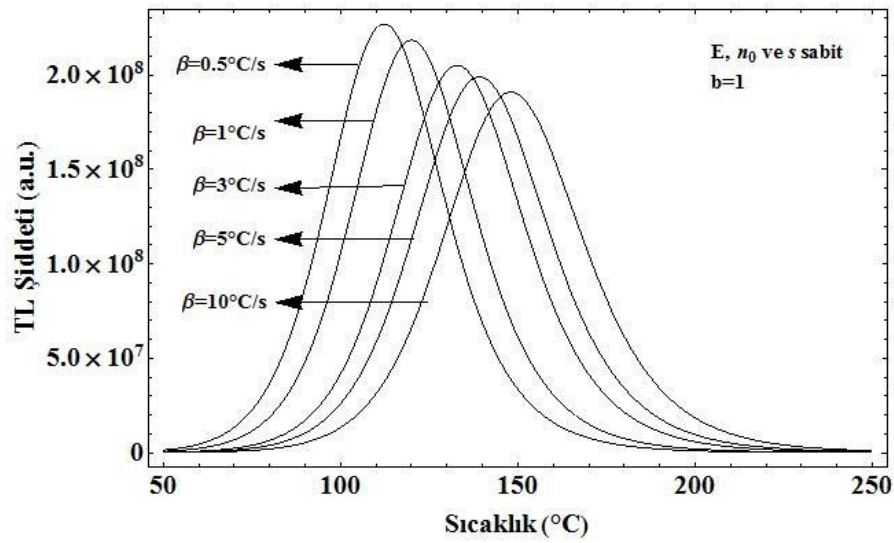
elde edilir. 3.16 denkleminde s çekilecek olursa

$$s = \frac{\beta E}{kT_M^2} \exp\left(\frac{E}{kT_M}\right) \quad (3.17)$$

denklemini elde edilir.

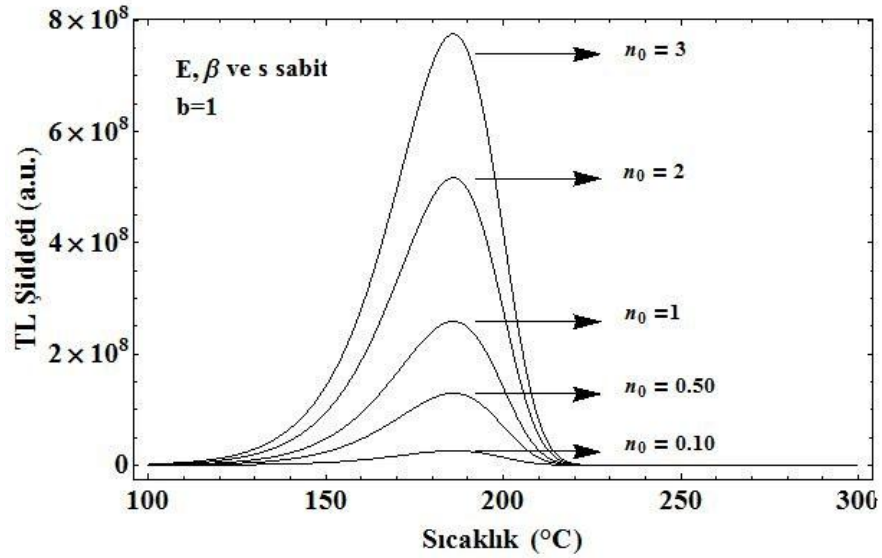
Randall-Wilkins Teorisi ile tanımlanan birinci dereceden kinetikler için bazı temel karakteristikler ve ölçütler vardır. Bunlar:

- Birinci dereceden tepeler asimetriktir. Şekil 3.11’de de görüldüğü gibi bu tepelerin $\tau = T_M - T_1$ ile ifade edilen düşük sıcaklık bölgesine ait yarı genişliği her zaman $\delta = T_2 - T_M$ ile ifade edilen yüksek sıcaklık bölgesine ait yarı genişlikten %50 daha büyüktür.
- Tepe şekli ve tepe sıcaklığı ısıtma hızına bağlıdır. E ve s ’nin sabit değerleri için ısıtma hızının artmasıyla T_M yüksek sıcaklıklara doğru kayar (Şekil 3.12).



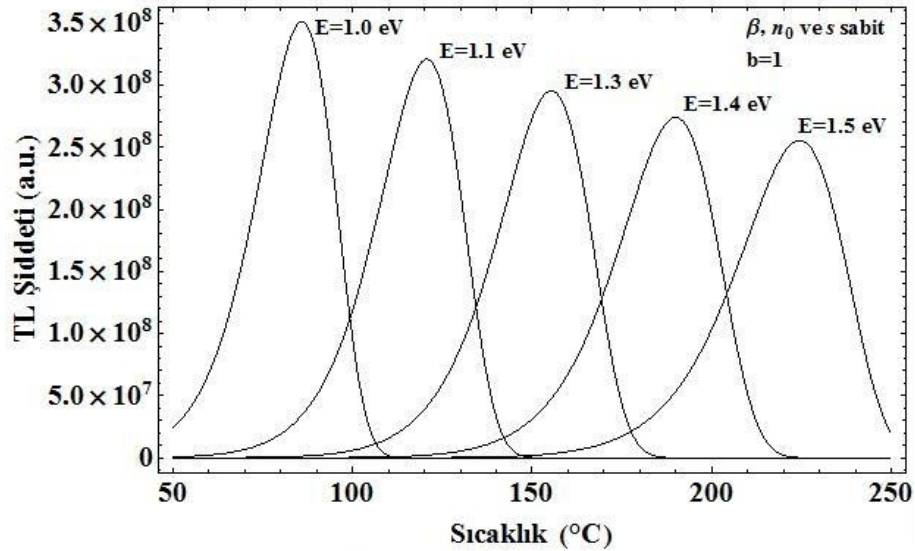
Şekil 3.12. Birinci derece TL denkleminde ısıtma hızının ısıtma tepelerinin ısıtma hızı ile değişimi.

- Eğer E ve β sabit fakat n_0 değişiyorsa tepe yüksekliği de değişir. Fakat tepenin konumu değişmez. Bu birinci dereceden TL eğrilerinin önemli bir karakteristik özelliğidir (Şekil 3.13).
- n_0 ’ın değeri ön ölçüm dozuna bağlıdır.
- Birinci dereceden bir ısıtma tepesi TL denkleminde göre asimetrik ya da geometrik faktör olarak tanımlanan $\mu = \frac{\delta}{\omega} = \frac{T_2 - T_M}{T_2 - T_1} = 0.423$ tipik değerine sahiptir.



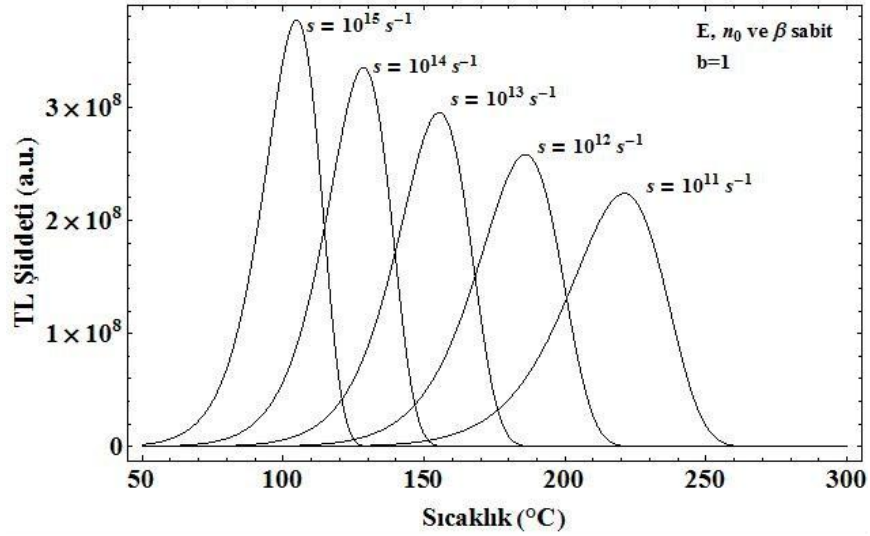
Şekil 3.13. Birinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin başlangıçta ($t=0$) tuzaklanmış elektron yoğunluğu ile değişimi.

- Sabit bir ısıtma hızı için, kararlı tuzak derinliğinin (E) artması ile tepe maksimumu T_M yüksek sıcaklıklara doğru kayar, tepenin yüksekliği azalır ve genişliği artar (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Birinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) ile değişimi.

- Sabit bir ısıtma hızı için, frekans faktörünün (s) azalmasıyla tepe maksimumu T_M yüksek sıcaklıklara doğru kayar, tepenin yüksekliği azalır ve genişliği artar. (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Birinci derece TL denklemine göre ışıma tepelerinin frekans faktörü (kaçış frekansı) ile değişimi.

- T_M , n_0 'dan (yani maruz kalınan dozdan) bağımsızdır.
- Tepelerdeki kayma: Birinci dereceden TL ışıma tepelerinde, maksimum TL şiddetinin konumu farklı ışınlama dozları için bulunduğu sıcaklığın dışına kaymaz.
- İzotermal bozunum: İzotermal bozunum sonuçları farklı sıcaklıklarda dahi TL süreçlerinin kinetiği hakkında bağımsız bilgiler sağlayabilmektedir. Birinci dereceden kinetikler üstel izotermal bozunum eğrilerine karşılık gelmektedir.
- Toplam ışıma miktarını S olarak adlandıırırsak, S ifadesi için şöyle bir denklem yazılabilir;

$$S = \int_0^{\infty} I(t)dt = -c \int_0^{\infty} \frac{dn}{dt} dt = -c \int_{n_0}^0 dn = cn_0 \quad (3.18)$$

3.18 denkleminde de görüldüğü gibi S tuzaklanmış yüklerin başlangıçtaki sayısı ile doğru orantılıdır. Fakat ısıtma sürecinden bağımsızdır. Tuzaklanmış yüklerin sayısının radyasyon dozu ile orantılı olduğu bilinmektedir. Bu durumda S de

radasyon dozu ile orantılıdır ve bu özellik radyasyon dozimetresinde çok önemlidir (Furetta ve Weng, 1998; Pagonis ve ark., 2006; Bos, 2007).

3.5.2. İkinci Derece Kinetik (Garlick-Gibson Teorisi)

Garlick ve Gibson elektronun yeniden tuzaklanma olasılığının, tuzaklanmış deşiklerle birleşme olasılığından daha yüksek olduğunu varsaydılar ve bu durumu tanımlamak amacıyla “ikinci dereceden kinetik” ifadesini kullandılar. Böylece bir serbest yük taşıyıcısının TL merkezi ile yeniden birleşmesi veya tekrar tuzaklanması olasılıklarını birlikte incelemişlerdir. Buna bağlı olarak aşağıda verilen denklemin kullanılmasını önermişlerdir:

$$I(t) = \frac{dn}{dt} = -n^2 \frac{s}{N} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) = -n^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.19)$$

3.19 denklemini biraz düzenleyerek sabit bir T mutlak sıcaklığı için integre edersek

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n^2} - s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \int_0^t dt \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{n_0} - \frac{1}{n} = -s' t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.21)$$

$$n = n_0 \left[1 + s' n_0 t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (3.22)$$

böylece

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) = \frac{n_0^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}{\left[1 + s' n_0 t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]^2} \quad (3.23)$$

diğer taraftan $dt = \frac{dT}{\beta}$ ifadesini dikkate alarak

$$\frac{dn}{n^2} = -\frac{s'}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT \quad (3.24)$$

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n^2} = -\frac{s'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT \quad (3.25)$$

$$\frac{1}{n_0} - \frac{1}{n} = -\frac{s'}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \quad (3.26)$$

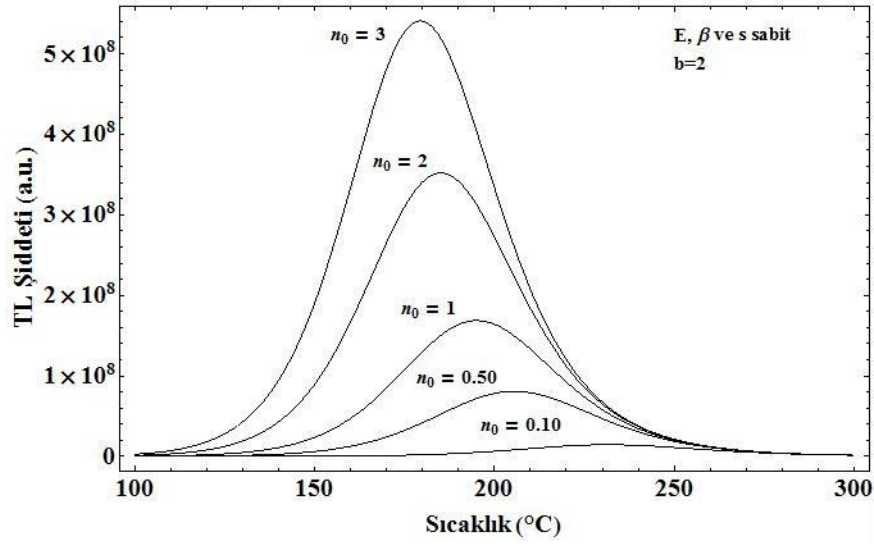
$$n = n_0 \left[1 + \left(\frac{s' n_0}{\beta} \right) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right]^{-1} \quad (3.27)$$

3.27 denklemini de kullanılarak $I(t)$ yazılırsa

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) = \frac{n_0^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}{\left[1 + \frac{s' n_0}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right]^2} \quad (3.28)$$

3.28 eşitliği ikinci derece kinetik teoreinin ifadesi olan Garlick-Gibson denklemdir.

Birinci derece TL tepesi ile ikinci derece TL tepesi arasındaki en belirgin fark n_0 arttıkça ikinci derece TL tepesinin n_0 ile orantılı olarak büyümesi ve düşük sıcaklık kısmına doğru kaymasıdır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. İkinci derece TL denkleminde göre ışıma tepelerinin başlangıçta ($t=0$) tuzaklanmış elektron yoğunluğu ile değişimi.

$I(t)$ 'nin logaritmik ifadesinin türevini alıp 0'a eşitleyecek olursak

$$\ln(I(t)) = \ln(n_0^2 s') - \frac{E}{kT} - 2 \ln \left[1 + \left(\frac{s' n_0}{\beta} \right) \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT' \right] \quad (3.29)$$

$$\left[d \left(\frac{\ln I(t)}{dT} \right) \right]_{T=T_M} = \frac{E}{kT_M^2} - 2 \frac{\frac{s' n_0}{\beta} \exp \left(-\frac{E}{kT_M} \right)}{1 + \frac{s' n_0}{\beta} \int_{T_0}^{T_M} \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT'} = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{E}{kT_M^2} = 2 \frac{\frac{s' n_0}{\beta} \exp \left(-\frac{E}{kT_M} \right)}{1 + \frac{s' n_0}{\beta} \int_{T_0}^{T_M} \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT'} \quad (3.31)$$

ve 4.31 denklemini yeniden düzenlenerek

$$\frac{\beta E}{2kT_M^2} \left[1 + \frac{s' n_0}{\beta} \int_{T_0}^{T_M} \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT' \right] = s' n_0 \exp \left(-\frac{E}{kT_M} \right) \quad (3.32)$$

elde edilir ve bu eşitlik 3.10 denkleminde

$$\frac{1}{2} \left[1 + \frac{s'n_0}{\beta} \int_{T_0}^{T_M} \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right] = \frac{s'n_0}{s} \quad (3.33)$$

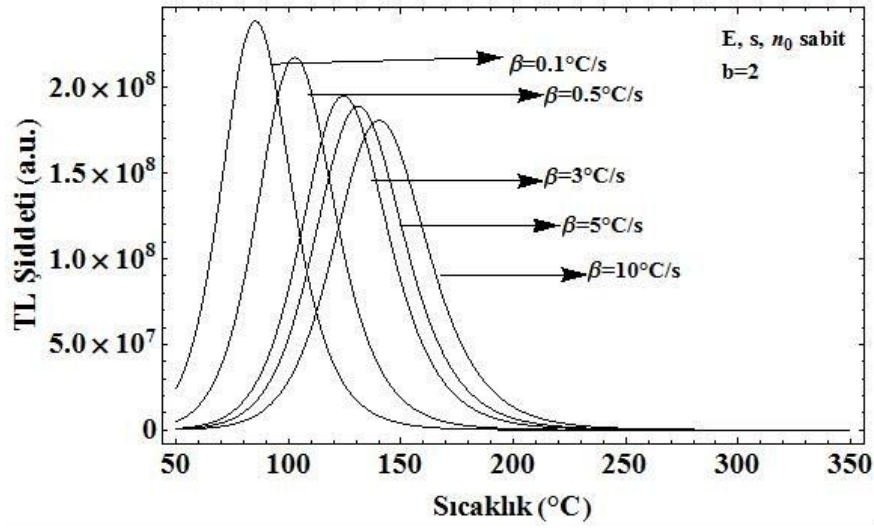
faktörü kadar farklılaşır. Denklem üzerinde yapılacak olan düzenlemelerle sonuç olarak

$$\frac{\beta E}{kT_M^2} = s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \left[1 + \left(\frac{2kT_M}{E}\right) \right] \quad (3.34)$$

ifadesi elde edilir.

Garlick-Gibson Teorisi ile tanımlanan ikinci dereceden kinetikler için bazı temel karakteristikler ve ölçütler vardır. Bunlar:

- İkinci dereceden bir ısıma tepesi TL denkleminde göre simetrik ya da geometrik faktör olarak tanımlanan $\mu = \frac{\delta}{\omega} = \frac{T_2 - T_M}{T_2 - T_1} = 0.524$ tipik değerine sahiptir.
- İkinci dereceden tepeler simetriktir. Bu tepelerin $\tau = T_M - T_1$ ile ifade edilen düşük sıcaklık bölgesine ait yarı genişliği $\delta = T_2 - T_M$ ile ifade edilen yüksek sıcaklık bölgesine ait yarı genişliğine yaklaşık olarak eşittir.
- Diğer tüm parametrelerin sabit olması koşulu ile tepe şekli ve tepe sıcaklığı ısıtma hızına bağlıdır (Şekil 3.17).
- Sabit bir ısıtma hızında tepe şekli ve sıcaklığı güçlü bir şekilde önceden tuzaklanmış yük yoğunluğuna (n_0) bağlıdır. Elde edilen tepeler farklı n_0 değerleri için bir faktörle çarpılarak üst üste bindirilemez.
- Farklı n_0 değerleri için elde edilen ısıma tepeleri, ısıma tepesinin yüksek (uç) sıcaklığında üst üste binme eğilimindedir.



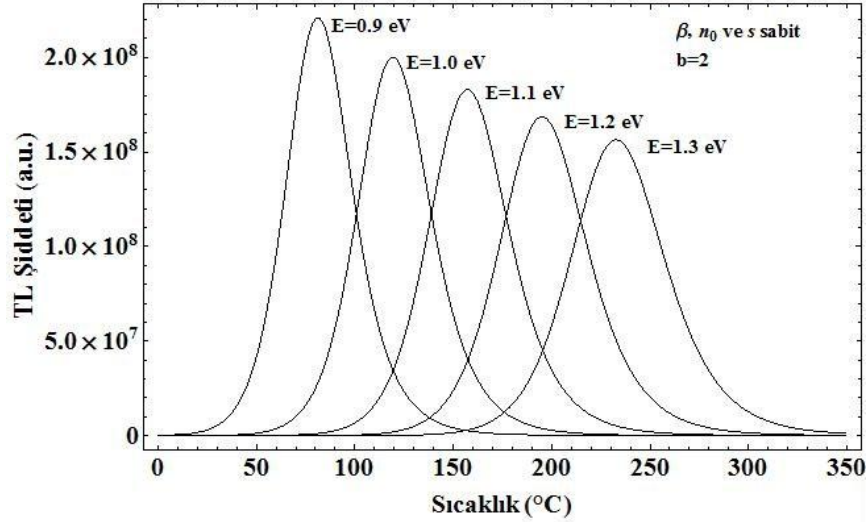
Şekil 3.17. İkinci derece TL denkleminin ısıtma hızı ile ışınım tepelerinin ısıtma hızı ile değişimi.

- Artan n_0 değeri ile birlikte tepe sıcaklığı denklem 3.32'ye göre Şekil 3.16'da da görüldüğü gibi düşük sıcaklıklara doğru kayar.
- İkinci dereceden tepelerin izotermal bozunumu hiperboliktir. İkinci dereceden izotermal bozunum için, $\left(\frac{I_t}{I_0}\right)^{-1/2}$ 'nin zamana göre grafiği bir doğrudur ve bu doğrunun eğimi E değerini verir.
- Tepelerdeki kayma: Birinci dereceden olmayan TL ışınım tepelerinin çoğunda maksimum TL şiddetinin konumu daha düşük tuzak dolulukları (daha küçük dozlar) için daha yüksek sıcaklıklara doğru kayar.
- Süper lineerlik etkileri: İkinci dereceden tepeler düşük dozlarda zayıf süper lineerlik etkileri gösterirler.
- $I_M - T_M$ bağımlılığı: İkinci dereceden kinetikler için

$$\ln \left[I_M \left(\frac{T_M^2}{\beta} \right)^2 \right] = \frac{E}{kT_M} + c$$

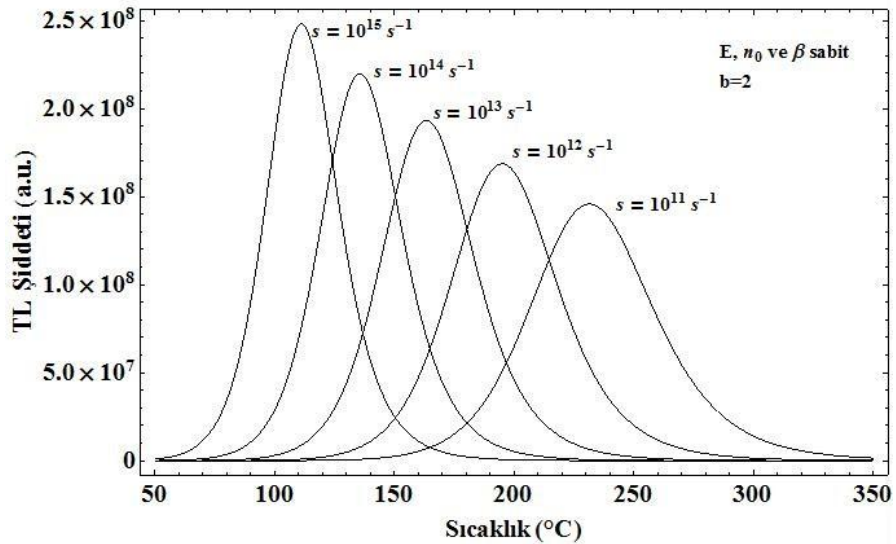
eşitliği ile verilmektedir. Bu eşitliğe göre çizilen $\ln \left[I_M \left(\frac{T_M^2}{\beta} \right)^2 \right]$ 'nin $\frac{1}{kT_M}$ 'ye göre grafiği bir doğrudur ve bu doğrunun eğimi E değerine karşılık gelir.

- Diğer parametrelerin sabit olması koşuluyla E 'nin değeri arttıkça ikinci dereceden TL ışıma tepeleri Şekil 3.18'de de görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklara doğru kayar.



Şekil 3.18. İkinci derece TL denkleminin aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) ile değişimi.

- İkinci dereceden TL tepeleri için frekans faktörünün artmasıyla TL ışıma tepeleri düşük sıcaklıklara doğru kayarken tepenin yarı genişliği de azalır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. İkinci derece TL denkleminin frekans faktörü (kaçış frekansı) ile değişimi.

- İkinci derece reaksiyonda, serbest kalan elektronların büyük çoğunluğu yeniden birleşmeden önce tuzaklanırlar. Böylece ışıyım yayınımindan gecikmeye ve yayınımin geniş bir sıcaklık aralığına yayılmasına neden olurlar (Furetta ve Weng, 1998; Pagonis ve ark., 2006; Bos, 2007).

3.5.3. Genel Derece Kinetik (May-Partridge Teorisi)

Birinci ve ikinci derece kinetik şartları sağlanmadığı zaman, arada bulunan durumlara genel derece kinetiğı uygulanır. May ve Partridge genel derece kinetiğı için bir empirik TL bağıntısı geliştirdiler (McKeever, 1985).

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.35)$$

Burada s'' ön üstel faktördür ve $s'' = s n_0^{1-b}$ ile ifade edilir. 3.35 denklemi sözde genel dereceden kinetik bağıntısı olarak adlandırılır ve b genellikle 1 ve 2 arasında değer alır.

Denklem 3.35 yeniden düzenlenerek

$$\frac{dn}{n^b} = -s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dt \quad (3.36)$$

$$\int_{n_0}^n n^{-b} dn = - \int_0^t s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dt$$

$$n^{1-b} = n_0^{1-b} \left[1 + s'' n_0^{b-1} (b-1) t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]$$

$$n = n_0 \left[1 + s(b-1) t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]^{\frac{1}{1-b}} \quad (3.37)$$

buradan yararlanarak

$$s = s'' n_0^{b-1} \quad (3.38)$$

elde edilir. 3.38 ifadesini 3.35’de yerine yazarsak

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) = s n_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + s(b-1)t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)\right]^{\frac{1}{1-b}} \quad (3.39)$$

doğrusal bir ısıtma hızı ile $dT = \beta dt$ varsayılarak denklem 3.36’dan

$$\frac{n^{1-b} - n_0^{1-b}}{1-b} = -\frac{s''}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'$$

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

her iki denklemin köklerini alıp 3.38 denklemini yerine yazarak

$$n = n_0 \left[1 + \frac{s(b-1)}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^{\frac{1}{1-b}} \quad (3.40)$$

bulunur. Yoğunluk

$$I(t) = s n_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{s(b-1)}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^{\frac{1}{1-b}} \quad (3.41)$$

denklemini ile ifade edilir.

3.41 denklemine göre,

- üstel faktör T ile orantılı olarak sürekli artar;
- parantez içindeki faktör T arttıkça azalır.

$I(T)$ 'nin logaritması alınıp

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

sonra da türevi alınarak

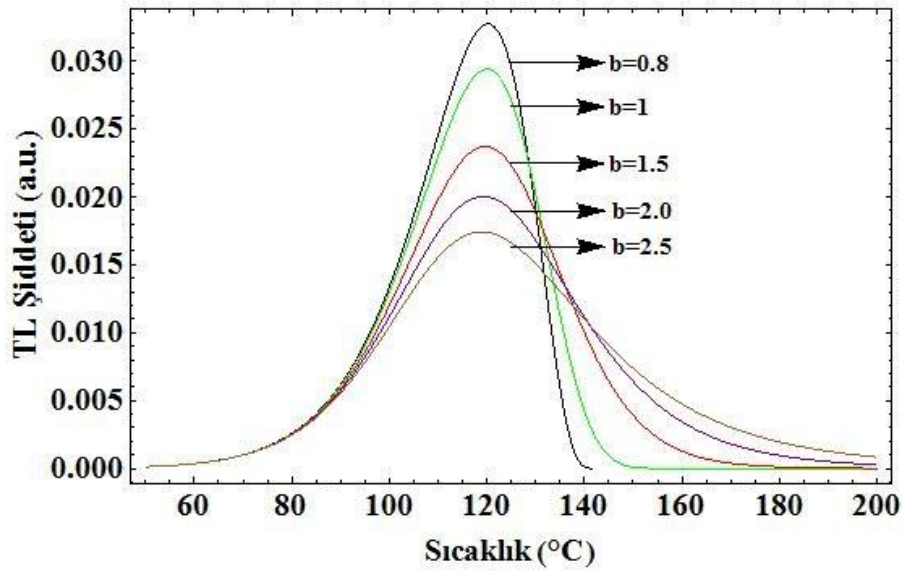
$$\left. \frac{d(\ln I(T))}{dT} \right|_{T=T_M} = \frac{E}{kT_M^2} - \frac{b}{b-1} \left[1 + \frac{s(b-1)}{\beta} \int_{T_0}^{T_M} \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right]^{-1} \frac{s(b-1)}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) = 0$$

elde edilir ve bu denklem düzenlenerek

$$\frac{kT_M^2 bs}{\beta E} \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) = 1 + \frac{s(b-1)}{\beta} \int_{T_0}^{T_M} \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \quad (3.42)$$

denklemini elde edilir (Furetta ve Weng, 1998).

Şekil 3.20'de farklı derecelerden kinetiklere ait grafikler görülmektedir.



Şekil 3.20. Farklı kinetik derecelerin TL ışıma tepelerine etkisi.

May-Partridge Teorisi ile tanımlanan genel dereceden kinetikler için bazı temel karakteristikler ve ölçütler vardır. Bunlar:

- Genel dereceden bir ışıma tepesi TL denkleminde göre geometrik faktör olarak tanımlanan $\mu = \frac{\delta}{\omega} = \frac{T_2 - T_M}{T_2 - T_1}$ 0.42 ile 0.52 arasında yer alan tipik değerlere sahiptir.
- Genel dereceden bir ışıma tepesi TL denkleminde göre birinci dereceden olmayan (örneğin ikinci derece) tepelerin temel karakteristikleri ve ölçütleri ile benzer özelliklere sahiptir.

$$u_m = \frac{E}{kT_M}$$

ve

$$T_x < T_M \text{ için } T_x = T_x^-$$

$$T_x > T_M \text{ için } T_x = T_x^+ \text{ olmak üzere geometrik faktör}$$

$$\mu_x(x) = \frac{T_x^+ - T_M}{T_x^+ - T_x^-} = \frac{u_x^-(u_M - u_x^+)}{u_x^- - u_x^+}$$

şeklinde ifade edilir. Kinetik derecenin ve u_M 'nin bir fonksiyonu olarak geometrik faktörün (μ) değerleri Çizelge 3.1'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir (Furetta ve Weng, 1998).

Çizelge 3.1. u_m ve kinetik derecenin bir fonksiyonu olarak geometrik faktörün değerleri.

Mertebe	u_M	$\mu(0.2)$	$\mu(0.5)$	$\mu(0.8)$
0.7	20	0.311	0.372	0.426
	30	0.302	0.365	0.422
	40	0.297	0.362	0.420
1.0	20	0.389	0.426	0.458
	30	0.378	0.418	0.453
	40	0.372	0.415	0.451
1.5	20	0.481	0.485	0.491
	30	0.468	0.477	0.487
	40	0.461	0.473	0.485
2.0	20	0.544	0.526	0.514
	30	0.531	0.518	0.510
	40	0.524	0.514	0.508
2.5	20	0.592	0.557	0.531
	30	0.579	0.549	0.527
	40	0.572	0.545	0.525

Birinci, ikinci ve genel derece kinetiklerle ilgili elde edilen temel denklemleri bir araya toplayarak bu denklemleri birbirleriyle karşılaştırmak faydalı olabilir. Aşağıda bu denklemler görülmektedir:

Birinci derece kinetiklere ait denklemler:

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = nse^{-E/kT} \quad (3.43)$$

$$I(T) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right] \quad (3.44)$$

$$\frac{\beta E}{kT_M^2} = s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \quad (3.45)$$

İkinci derece kinetiklere ait denklemler:

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{N} s e^{-E/kT} \quad (3.46)$$

$$I(T) = n_0^2 \frac{s}{N} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{n_0 s}{\beta N} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^{-2} \quad (3.47)$$

$$\frac{\beta E}{kT_M^2} = s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \left[1 + \left(\frac{2kT_M}{E}\right)\right] \quad (3.48)$$

Genel derece kinetiklere ait denklemler:

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s' e^{-E/kT} \quad (3.49)$$

$$I(T) = n_0 s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{s''(b-1)}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^{-\frac{b}{b-1}} \quad (3.50)$$

$$\frac{\beta E}{kT_M^2} = s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \left[1 + (b-1) \left(\frac{2kT_M}{E}\right)\right] \quad (3.51)$$

3.6. Termolüminesans Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması İçin Yöntemler

3.6.1. İki Farklı Isıtma Hızına Dayanan Yöntem

Isıtma hızı, TL ışıma eğrisinin karakteristik özelliklerini etkileyen bir parametredir. Isıtma hızı arttığı zaman tepe maksimumu yüksek sıcaklıklara doğru kayar, tüm tepeler genişler ve TL şiddeti azalır. TL şiddetindeki bu azalma ısısal azalmadan kaynaklanır.

Isıtma hızlarını değiştirip (Şekil 3.21) başlangıçtaki tuzak yoğunluğu (n_0) gibi diğer tüm parametreleri sabit tutan değişik yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemler ısısal olarak uyarılan olaylardan bağımsız olarak geliştirilmiştir.

Booth (1954), Bohum (1954) ve Parfianovitch (1954) birbirlerinden bağımsız olarak çalışırken iki farklı ısıtma hızı ve birinci derece maksimum yayılım şartını kullanarak aktivasyon enerjisi ve frekans faktörünü hesaplamak için bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Şekil 3.21’de görülen ısıtma hızları 3.45 eşitliğinde yerine yazılacak olursa

$$\frac{\beta_1 E}{k T_{M_1}^2} = s \exp\left(-\frac{E}{k T_{M_1}}\right) \quad (3.52)$$

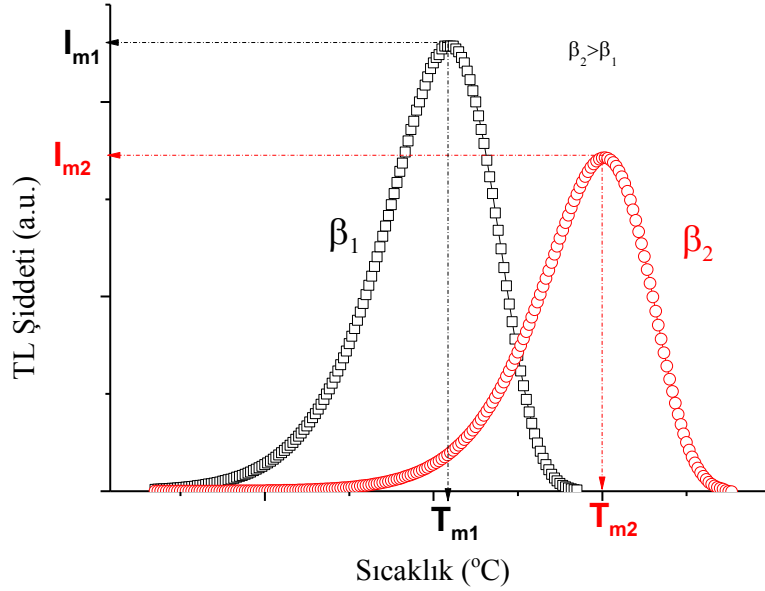
$$\frac{\beta_2 E}{k T_{M_2}^2} = s \exp\left(-\frac{E}{k T_{M_2}}\right) \quad (3.53)$$

denklemleri elde edilir. Bu iki bağıntı taraf tarafa oranlanıp E çekilecek olursa

$$E = k \left(\frac{T_{M_1} T_{M_2}}{T_{M_1} - T_{M_2}} \right) \ln \left[\left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \left(\frac{T_{M_2}}{T_{M_1}} \right)^2 \right] \quad (3.54)$$

elde edilen 3.54 denklemi birinci dereceden kinetiklere uygulanabilir. Örneğin $\beta_1 = 1^\circ\text{C/s}$ ve $\beta_2 = 2^\circ\text{C/s}$ olarak seçilip her iki ısıtma hızında da elde edilen maksimum TL şiddetlerine karşılık gelen tepe sıcaklıkları ölçülüp 3.54 bağıntısı kullanılarak E kolay bir şekilde hesaplanabilir. Hesaplanan bu E değeri de her iki

ısıtma hızı için ayrı ayrı 3.52 ve 3.53 denklemlerinde yerine yazılarak s değeri belirlenebilir.



Şekil 3.21. İki farklı ısıtma hızı kullanılarak elde edilen birinci derece TL ısıtma eğrileri.

3.6.2. Farklı Isıtma Hızlarına Dayanan Yöntem

Hoogenstaraaten (1958) aktivasyon enerjisi ve frekans faktörünü belirlemek için bir bağıntı geliştirmiştir (Bos, 2007). Bu bağıntı 3.45 eşitliğinin doğal logaritması alınıp gerekli matematiksel işlemler yapılırsa

$$\ln\left(\frac{\beta E}{kT_M^2}\right) = \ln\left[s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right)\right] = \ln(s) - \frac{E}{kT_M}$$

$$-\frac{E}{kT_M} = \ln\left(\frac{\beta E}{kT_M^2}\right) - \ln(s) = \ln\left(\frac{\beta E}{skT_M^2}\right)$$

$$\frac{E}{kT_M} = \ln\left(\frac{skT_M^2}{\beta E}\right) = \ln\left(\frac{sk}{E}\right) + \ln\left(\frac{T_M^2}{\beta}\right)$$

$$\ln\left(\frac{T_M^2}{\beta}\right) = \left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{1}{T_M}\right) + \ln\left(\frac{E}{sk}\right) \quad (3.55)$$

denklemini elde edilir. 3.55 denkleminin bağı olarak $\ln\left(\frac{T_M^2}{\beta}\right)$ 'nin $\left(\frac{1}{T_M}\right)$ 'e göre grafiği çizilecek olursa bu grafik, eğimi $\frac{E}{k}$ olan bir doğrudur ($y = mx + n$) ve eğimden faydalanılarak aktivasyon enerjisi (E) hesaplanabilir. E hesaplandıktan sonra $\frac{1}{T_M} = 0$ (yani $x = 0$) alınarak $y = mx + n$ doğrusunun y eksenini kestiği nokta $\ln\left(\frac{E}{sk}\right)$ 'ye eşitlenip frekans faktörü (s) hesaplanabilir. Ancak üst üste binmiş olan tepeler varsa bu hesaplamalarda güçlükler oluşabilir. Çünkü ölçülen ısıma eğrisinin maksimumu ısıma tepelerinin asıl tepe maksimumları ile çakışmayabilir ve buna bağlı olarak da gerçek kinetik dereceler hesaplanamayabilir. Bu sorunu gidermek için düşük sıcaklık tepeleri ısısal temizleme yöntemi ile yok edilebilir. Bu yöntemle göre örnek tepe maksimumundan yüksek sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu işlem tüm tepeler için tekrarlanır.

Farklı ısıtma hızları yöntemi ile elde edilen kinetik parametrelerde, ısıtıcı eleman ve örnek arasında var olan sıcaklık farkı çok büyük hatalara sebep olabilmektedir. Kitis ve Tuyn (1998), bu sıcaklık farkından kaynaklanan hatayı düzeltmek ve farklı ısıtma hızlarında asıl tepe sıcaklıklarını belirlemek için;

$$T_M^j = T_M^i - C \ln\left(\frac{\beta_i}{\beta_j}\right) \quad (3.56)$$

bağıntısını geliştirdiler. Burada T_M^j ve T_M^i , β_j ve β_i ısıtma hızlarında tepelerin maksimum sıcaklıklarıdır. C, ısıtıcı eleman ve örnek arasında var olan sıcaklık farkının ihmal edilebileceği iki düşük ısıtma hızı kullanılarak elde edilen bir sabittir. C'yi bulmak için 1°C/s'nin altındaki ısıtma hızları tercih edilir.

3.6.3. Doz Yanıtları Yöntemi

Işıma eğrisindeki her ışıma tepesinin kinetik derecesini belirlemek için bu yöntem kullanılır. TL teorisinin birinci derece kinetiğinde, ışıma tepelerinin maksimum sıcaklıkları yalnızca ısıtma hızı değiştiği zaman değişir. Eğer ısıtma hızı sabitse maksimum yayınım şartında başlangıçta tuzaklanan elektron sayısı n_0 olmadığı için maksimum sıcaklık doz oranıyla değişmez ve deneysel hata limitleri içerisinde ($\pm 2^\circ\text{C}$) sabit kalır. İkinci ve genel derece kinetiğinde ise tepe sıcaklıkları artan doz oranıyla düşük sıcaklıklara doğru kayar. Eğer doz oranı, f çarpanı kadar artıyorsa tepe maksimumundaki kayma

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{T_1 T_2 k(i-1)}{E \ln f} \quad (3.57)$$

3.57 bağıntısı ile belirlenir. Eğer $T_1 = T_M$ ise orijinal tepe konumudur. $T_1 > T_2$ ise doz artışından sonraki tepe konumudur (Bos ve Dieldorf, 1991).

3.6.4. $T_{max} - T_{stop}$ Yöntemi

Işıma eğrisindeki tepelerin kinetik dereceleri $T_{max} - T_{stop}$ yöntemiyle de belirlenebilir. Bu yöntemde şu adımlar sırasıyla uygulanır:

- Örnekler ısıtılır.
- Işınlanan örnekler ilk tepenin düşük sıcaklık kısmına karşılık gelen bir sıcaklığa (T_{stop}) kadar ısıtılır.
- Isıtılan örnekler oda sıcaklığına soğumaya bırakılır.
- Oda sıcaklığına soğuyan örnekler, ışıma eğrisinin geri kalanını elde etmek için aynı ısıtma hızında tekrar ısıtılır ve T_{max} belirlenir.
- İlk dört işlem örnekler üzerinde birçok kez tekrarlanır.

- T_{stop} değerlerine karşılık elde edilen T_{max} veya her bir tepe için hesaplanan aktivasyon enerjisi (E) değerlerinin grafiği çizilir.

$T_{max} - T_{stop}$ grafiği her bir üst üste binmiş tepenin merdiven basamağı şeklinde görüldüğü bir grafikdir. Bu yöntemle tepelerin sayısı kolayca belirlenir. Grafikte görülen her plato bölgesi (merdiven basamağı) her bir tepenin yaklaşık konumunu, yani tepenin hangi sıcaklıkta oluştuğunu belirler. Plato bölgesinin bitimindeki T_{max} 'daki kademeli artış kinetik derecenin birden büyük olduğunu gösterir. Birinci derece TL kinetiğinde ise T_{max} bir sonraki plato bölgesinde keskin bir artış gösterir (Bos ve Dieldorf, 1991).

3.6.5. Başlangıçtaki Artış Yöntemi

Bu yönteme göre TL ışıma eğrisinin başlangıcında tuzaklanan elektronların yoğunluğu n_0 sıcaklıkla çok az değişir ve böylece sabit olur. Sıcaklık tepe maksimumundan küçük bir T_c sıcaklığına yükseldikçe

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

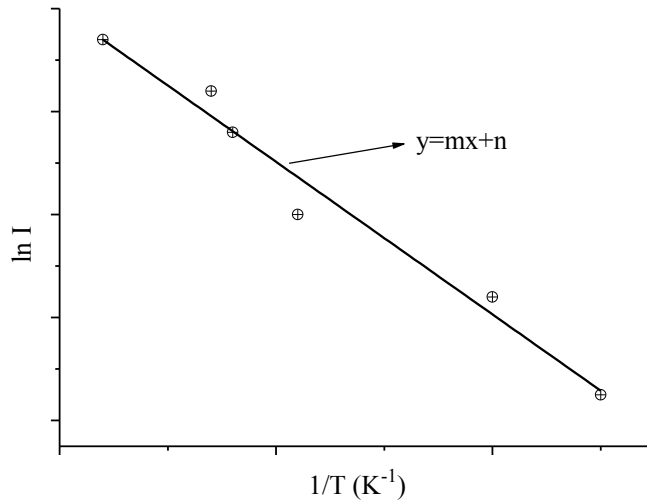
denklemindeki ilk exponansiyel terim artarken ikinci exponansiyel terim bire eşittir. Sıcaklık arttıkça ($T > T_c$) ikinci terim azalmaya başlar. Bundan dolayı birinci ve genel derece kinetik denklemleri

$$I(T) = A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.58)$$

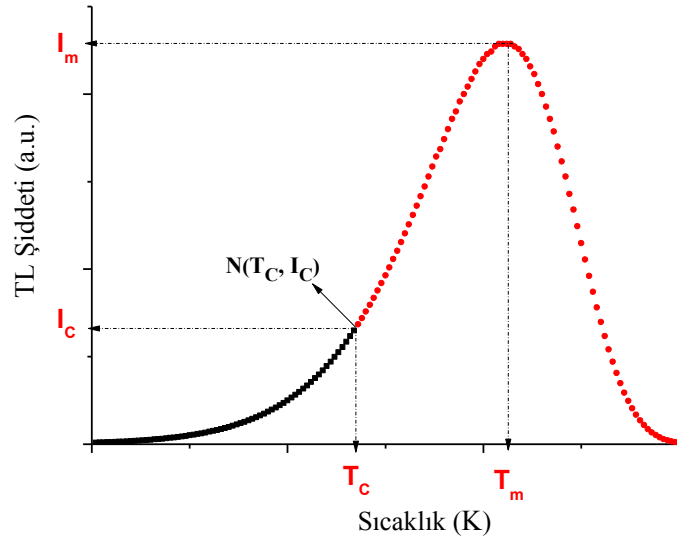
olacak şekilde basitleştirilir. Burada A bir sabittir ve TL şiddeti kinetik dereceden bağımsızdır. $\ln I(T)$ 'nin $\frac{1}{T}$ 'ye göre grafiği, eğimi, $-\frac{E}{k}$ olan bir doğrudur (Şekil 3.22). Doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi (E) kolayca hesaplanabilir. Bu yöntem yalnızca tepe maksimumunun (I_M) %15'ini aşmamak üzere (Furetta ve Weng, 1998)

ancak %10'una kadar olan başlangıç bölgesine uygulanır. Tepenin başlangıcında şiddet çok düşük veya ışıma eğrisi birden fazla ışıma tepesinden oluşuyorsa, elde edilen aktivasyon enerjileri asıl değerlerini yansıtmaz. Bundan dolayı E değerlerindeki hataları azaltmak için yüksek sıcaklık tepeleri kullanılır (Yazıcı ve ark., 2002).

Eğer TL ışıma eğrisi iki veya daha fazla üst üste binen tepeden oluşuyorsa bu yöntem kullanılmaz. Üst üste binmiş tepelerden oluşan TL ışıma eğrilerine de başlangıçtaki artış yöntemini uygulayabilmek için ısısal temizleme yöntemi geliştirilmiştir. Isısal temizlemeyle tepeler birbirinden ayrılır ve daha sonra bu yöntem uygulanır.



Şekil 3.22. Başlangıç artış grafiği.



Şekil 3.23. Işıma tepesinin başlangıçtaki yükselen kısmı.

Başlangıçtaki artış yöntemine dayalı olarak Ilich (1979) tarafından geliştirilen ve grafiksel yöntem olarak adlandırılan yöntem de literatürde sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemle, Şekil 3.23'te görüldüğü gibi $N(T_c, I_c)$ noktasından çizilen bir teğetin sıcaklık eksenini kestiği noktadaki değer T_0 olarak kabul edilir (Şekil 3.24) ve benzer şekilde 3.58 ifadesinden hareketle eşitliğin T 'ye göre türevi alınırsa

$$\frac{dI(T)}{dT} = \frac{d}{dT} \left[A \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \right] = A \frac{E}{kT^2} \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) = I(T) \frac{E}{kT^2} \quad (3.59)$$

ve daha sonra teğetin eğimini yazarsak

$$\left. \frac{dI(T)}{dT} \right|_{T=T_c} = I_c \frac{E}{kT_c^2} \quad (3.60)$$

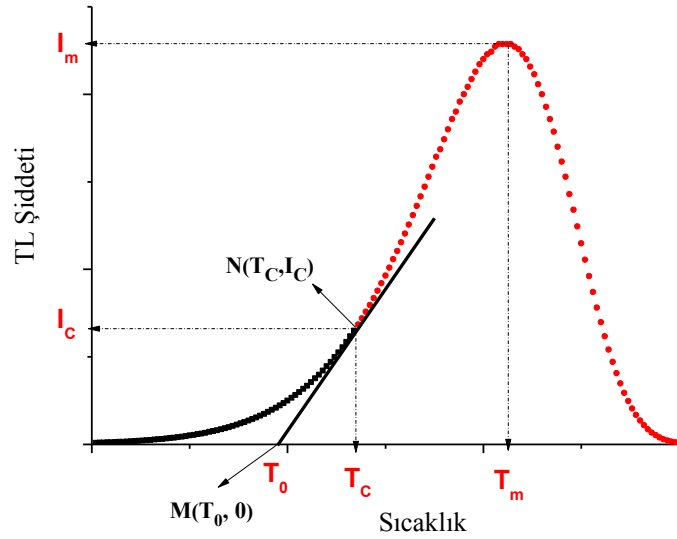
olarak ifade edilir. Şimdi $M \equiv (T_0, 0)$ noktasını belirlemek için aşağıdaki denklemleri yazabiliriz:

$$I - I_c = I_c \frac{E}{kT_c^2} (T - T_c) \quad , \quad I = 0 \quad (3.61)$$

3.61 denklemlerinden yararlanarak aktivasyon enerjisi eşitliğini,

$$E = k \frac{T_c^2}{T_c - T_0} \quad (3.62)$$

olarak elde ederiz. 3.62 denklemi kullanılarak aktivasyon enerjisi Ilich grafiksel yöntemi ile kolayca hesaplanabilir.



Şekil 3.24. Işıma tepesinin başlangıçtaki yükselen kısmına ait teğet.

Bu yöntemle yapılacak olan hesaplarda maksimum hata,

$$\ln E = \ln k + 2 \ln T_c - \ln(T_c - T_0) \quad (3.63)$$

$$\left| \frac{\Delta E}{E} \right| = 2 \left| \frac{\Delta T_c}{T_c} \right| + \left| \frac{\Delta T_c}{T_c - T_0} \right| + \left| \frac{\Delta T_0}{T_c - T_0} \right| \quad (3.64)$$

3.64 denklemi kullanılarak ve eğer

$$\Delta T_c = \Delta T_0 = \Delta T$$

ise

$$\left| \frac{\Delta E}{E} \right| = 2\Delta T \left| \frac{1}{T_c} + \frac{1}{T_c - T_0} \right| \quad (3.65)$$

3.65 eşitliği ile kolayca hesaplanabilir.

3.6.6. İzotermal Bozunum Yöntemi

İzotermal bozunum yöntemi TL'ye dayanan bir yöntem olmamasına rağmen yine de aktivasyon enerjisini (E) ve frekans faktörünü (s) hesaplamak için kullanışlı bir yöntemdir. Bu yöntemde herhangi bir ısıtma döngüsü kullanılmamaktadır. Deneysel aşamada örnekler ışılandıktan sonra, bir sıcaklığa kadar hızlı bir şekilde ısıtılır ve belli bir süre o sıcaklıkta tutulur. Işık çıkışı (fosforesans bozunumu) ölçülür ve bu yöntemle tuzaklanan elektronların azalma oranını belirlemek mümkündür.

İzotermal bozunum yöntemi, Garlick-Gibson tarafından birinci dereceden kinetikler için gösterilmiştir. Bir T_i sıcaklığındaki izotermal bozunum eğrisi, birinci dereceden TL ışıma tepeleri için zamanın fonksiyonu olarak üstel bir grafikdir. Ve bu:

$$I(T) = I_0 \exp \left[-s \exp \left(-\frac{E}{kT_i} \right) t \right] \quad (3.66)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikten faydalanılarak çizilen $\ln(I)$ 'nin t 'ye karşılık grafiği bir doğru olup bu doğrunun eğimi,

$$m_i = -s \exp \left(-\frac{E}{kT_i} \right) \quad (3.67)$$

eşitliği ile ifade edilir. 3.67 eşitliğinin doğal logaritması alınarak

$$\ln(m_i) = \ln s - \frac{E}{kT_i} \quad (3.68)$$

elde edilen 3.68 denkleminde yararlanılarak çizilen $\ln(m_i)$ 'nin $1/kT$ 'ye karşılık grafiği bir doğrudur ve bu doğrunun eğimi $-E$ ve y eksenini kesim noktası $\ln s$ 'dir.

Eğer deney, farklı T_1 ve T_2 gibi sabit iki sıcaklıkta yapıldığında, m_1 ve m_2 gibi iki farklı eğim elde edilir. Böylece aktivasyon enerjisinin kolayca hesaplanabileceği 3.70 denklemi elde edilir.

$$\ln\left(\frac{m_1}{m_2}\right) = \frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (3.69)$$

$$E = \frac{kT_1T_2 \ln\left(\frac{m_1}{m_2}\right)}{T_1 - T_2} \quad (3.70)$$

İzotermal bozunum yönteminin genel dereceden kinetikler için uygulaması May-Partridge (1964), Takeuchi ve arkadaşları (1975) tarafından önerilmiştir. İzotermal analiz kullanılarak kinetik derecenin hesaplanması mümkündür. Sıcaklığı sabit tutarak ve

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s' e^{-E/kT}$$

denkleminin zamana göre integralini alarak

$$I(t) = I_0 \left[1 + s' n_0^{b-1} (b-1) t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]^{\frac{b}{1-b}} \quad (3.71)$$

burada

$$I_0 = s' n_0^b \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.72)$$

olarak ifade edilir. Denklem 3.71 yeniden düzenlenecek olursa

$$\left(\frac{I(t)}{I_0}\right)^{\frac{1-b}{b}} = \left[1 + s'n_0^{b-1}(b-1)t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)\right] \quad (3.73)$$

elde edilen 3.73 denkleminde yararlanılarak $\left(\frac{I(t)}{I_0}\right)^{\frac{1-b}{b}}$ ifadesinin zamana göre grafiği çizilirse bu grafik bir doğrudur ve bu doğrudan faydalanılarak kinetik derece hesaplanabilir.

Farklı izotermal bozunum sıcaklıklarında elde edilen doğruların eğimlerinin bir seti kullanılarak

$$m = s'n_0^{b-1}(b-1) \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.74)$$

elde edilir ve yine çizilen $\ln(m_i)$ 'nin $1/kT$ 'ye karşılık grafiğinden E hesaplanabilir.

Alternatif olarak kinetik derece (b) May-Partridge (1964) tarafından önerilen

$$\ln \frac{dI}{dt} = \ln C + \frac{2b-1}{b} \ln I \quad (3.75)$$

eşitliğinden faydalanılarak $\ln \frac{dI}{dt}$ 'nin $\ln I$ 'ya karşılık grafiği olan doğrudan elde edilen

$$m = \frac{2b-1}{b} \quad (3.76)$$

3.76 ifadesi kullanılarak da hesaplanabilir.

3.6.7. Bilgisayarla Işıma Eğrisi Ayırıştırma (CGCD) Yöntemi

Bilgisayarla ışıma eğrisi ayırıştırma (CGCD-Computerised Glow-Curve Deconvolution), TL ışıma eğrilerinden tuzak parametrelerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden en yaygın olanıdır. Işıma eğrisini analiz etmek için bir bilgisayarla ışıma eğrisi ayırıştırma (CGCD) programı kullanılır. Dağıtımı ve kullanımı programcılar tarafından ücretsiz olarak sunulan başlıca CGCD programları, sadece birinci dereceden üst üste binmiş TL ışıma tepelerini

ayrıştırabilen GlowFit (Puchalska, Bilski; 2006), MATLAB tabanlı olarak yazılmış GCAFIT (Abd El-Hafez ve ark., 2011) ve Kore Atom Enerjisi Kurumu Araştırma Enstitüsü'nden Ki Soo Chung ve arkadaşları (2005) tarafından yazılmış olan ve kinetik derecelerin tamamını ayrıştırabilen TL Glow Curve Analyzer (TLanal) programlarıdır.

Bu programların algoritmaları temel termolüminesans kinetik denklemlerinin nümerik çözümlerine dayalı olarak oluşturulmaktadır.

3.6.8. Üç Nokta Yöntemi

Bu yöntemle üst üste binmiş olan tepelerden oluşan karmaşık TL ışıma eğrilerinde birbirinden bağımsız bir şekilde her bir tepenin TL tuzak parametreleri, yani aktivasyon enerjisi (E), kinetik derece (b) ve frekans faktörü (s), rahatlıkla belirlenebilir.

Genel dereceden kinetikler için verilen denklemden hareketle,

$$I = -\frac{dn}{dt} = \frac{n^b}{N^{b-1}} s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.77)$$

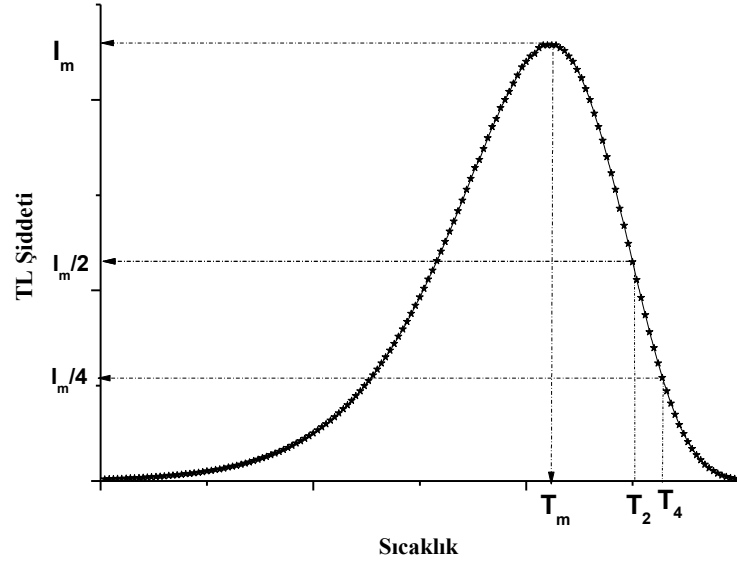
ve

$$I_M = \frac{A_M^b}{N^{b-1}} s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (3.78)$$

denklemleri elde edilir. Şekil 3.25'te gösterilen miktarlar kullanılarak aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$I_2 = \frac{I_M}{2} = \frac{A_2^b}{N^{b-1}} s \exp\left(-\frac{E}{kT_2}\right) \quad (3.79)$$

$$I_4 = \frac{I_M}{4} = \frac{A_4^b}{N^{b-1}} s \exp\left(-\frac{E}{kT_4}\right) \quad (3.80)$$



Şekil 3.25. Bir TL ışıma tepesi için sıcaklık parametreleri ve bu parametrelere karşılık gelen ışıma şiddetleri.

3.78, 3.79 ve 3.80 eşitliklerindeki A_M , maksimum tepe şiddeti, A_2 , maksimum tepe şiddetinin yarısı, ve A_4 ise maksimum tepe şiddetinin dörtte bir kadarlık şiddete sahip olan bölgenin sağ yarısının altında kalan alandır.

3.78, 3.79 ve 3.80 eşitliklerinin doğal logaritması alınarak düzenlenirse

$$E = \frac{\left[\ln 2 - b \ln \left(\frac{A_M}{A_2} \right) \right] k T_M T_2}{T_M - T_2} \quad (3.81)$$

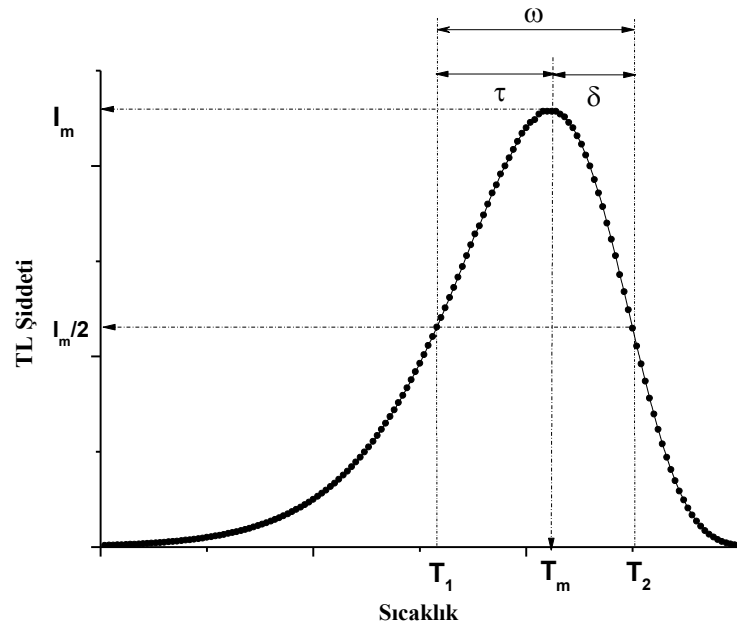
$$E = \frac{\left[\ln 2 - b \ln \left(\frac{A_M}{A_4} \right) \right] k T_M T_4}{T_M - T_4} \quad (3.82)$$

elde edilen 3.81 ve 3.82 denklemleri kullanılarak E kolayca hesaplanabilir. Bu denklemlerden E'nin elemine edilmesi ile b aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$b = \frac{T_2(T_M - T_4) \ln 2 - T_4(T_M - T_2) \ln 4}{T_2(T_M - T_4) \ln \left(\frac{A_M}{A_2} \right) - T_4(T_M - T_2) \ln \left(\frac{A_M}{A_4} \right)} \quad (3.83)$$

3.6.9. Tepe Şekli Yöntemi

Doğrusal ısıtma hızı kullanılarak elde edilmiş bir TL tepesini analiz etmenin bir yolu da onun geometrik özelliklerini dikkate almaktır. İkinci dereceden tepeler simetrik olarak karakterize edilirken, birinci dereceden tepeler asimetriktir. Şekil 3.26'daki grafikten aşağıdaki parametreler tanımlanabilir:



Şekil 3.26. İzole edilmiş ışıma tepesi ve sıcaklık parametreleri.

T_M : maksimum TL şiddetinin ölçüldüğü tepe sıcaklığı,

T_1 ve T_2 : T_M değerinin her iki yanında yer alan ve maksimum TL şiddetinin yarı değerlerinin ölçüldüğü noktalardaki yarı tepe sıcaklıkları

$\tau = T_M - T_1$: tepenin düşük sıcaklık tarafındaki yarı genişliği

$\delta = T_2 - T_M$: tepenin yüksek sıcaklık tarafındaki yarı genişliği

$\omega = T_2 - T_1$: tepenin toplam yarı genişliği

$\mu = \delta/\omega$: geometrik faktör (simetri faktörü)

İlk olarak, Grossweiner (1953) tuzak derinliği ve frekans faktörünün hesaplanmak için ışıma tepelerinin şeklinden faydalanmıştır. Onun yöntemi, maksimum tepe sıcaklığı T_M ve tepenin yarı TL şiddetine karşılık gelen düşük sıcaklık değerine dayanmaktadır. Birinci derece kinetik ifadelerini kullanarak

$$I_M = I(T_M) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^{T_M} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right] \quad (3.84)$$

$$I_{\frac{M}{2}} = I(T_1) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT_1}\right) \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^{T_1} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right] \quad (3.85)$$

elde edilir. 3.84 ve 3.85 denklemlerini oranlarsak

$$\frac{1}{2} = \exp\left[-\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_M}\right)\right] \exp\left[\frac{s}{\beta} \int_{T_1}^{T_M} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right] \quad (3.86)$$

3.86 denkleminde parantez içerisindeki integral asimptotik açılımla çözülüp serinin ilk değeri alınarak

$$\frac{1}{2} = \exp\left[-\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_M}\right)\right] \exp\left[\frac{s}{\beta} \frac{kT_M^2}{E} \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) - \frac{s}{\beta} \frac{kT_1^2}{E} \exp\left(-\frac{E}{kT_1}\right)\right] \quad (3.87)$$

eşitliği elde edilir. Elde edilen 3.87 eşitliğinin doğal logaritması alınıp maksimum durum şartından yararlanılarak denklem düzenlenirse

$$\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_M}\right) - 0.693 = 1 - \left(\frac{T_1}{T_M}\right)^2 \exp\left(-\frac{E}{kT_1} + \frac{E}{kT_M}\right) \quad (3.88)$$

denklemini elde edilecektir.

E/kT 'nin 20'den daha büyük değerleri için denklemdeki son üstel terim 0.184 değerine eşit olacaktır. Ayrıca 3.88 eşitliğindeki $(T_1/T_M)^2$ terimi, s/β değerinin 107'den daha büyük olduğu durumlarda E değerini %2'den daha az etkilediği için ihmal edilebilir. Sonuç olarak 3.88 denklemi bu yaklaşımlar göz önüne alınarak tekrar düzenlenirse birinci dereceden bir TL ışıma tepesi için tuzak derinliği aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir:

$$E = 1.51k \frac{T_M T_1}{T_M - T_1} \quad (3.89)$$

Grossweiner tarafından elde edilen 3.89 eşitliği Chen (1969) tarafından yeniden düzenlenerek yine birinci dereceden TL ışıma tepeleri için 1.51 sabiti yerine 1.41 sabitinin kullanılmasıyla aşağıdaki gibi önerilmiştir:

$$E = 1.41k \frac{T_M T_1}{T_M - T_1} \quad (3.90)$$

Benzer şekillerde, Şekil 3.26'da görülen eğri üzerinde bir takım yaklaşımlar kullanarak Lushchik (1956) tarafından birinci ve ikinci dereceden TL ışıma tepeleri için aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir:

$$b = 1 \text{ için } E = \frac{kT_M^2}{\delta} \quad (3.91)$$

$$b = 2 \text{ için } E = \frac{2kT_M^2}{\delta} \quad (3.92)$$

Chen (1969), E değerinin doğruluğunu arttırmak için 3.91 ve 3.92 denklemlerini sırasıyla 0.978 ve 0.853 sabit değerleriyle çarpmak suretiyle aşağıdaki denklemleri önermiştir:

$$b = 1 \text{ için } E = 0.978 \frac{kT_M^2}{\delta} \quad (3.93)$$

$$b = 2 \text{ için } E = 0.853 \frac{2kT_M^2}{\delta} \quad (3.94)$$

Halperin ve Braner (1960), farklı bir yaklaşımla T_1 ve T_2 değerlerinin her ikisini de kullanarak birinci ve ikinci dereceden TL ışıma tepelerine ait tuzak derinliklerinin hesaplanabilmesi için TL ışıma tepelerine ait tepe şekillerinin geometrik özelliklerinden faydalanarak

$$\Delta_M = \frac{2kT_M}{E} \quad (3.95)$$

şeklinde bir tanımlama yapmışlardır. 3.95 tanımlamasından yola çıkarak aşağıdaki denklemleri önermişlerdir:

$$b = 1 \text{ için } E = \frac{1.72}{\tau} kT_M^2 (1 - 2.58\Delta_M) \quad (3.96)$$

$$b = 2 \text{ için } E = \frac{2}{\tau} kT_M^2 (1 - 3\Delta_M) \quad (3.97)$$

Chen (1969), 3.96 ve 3.97 ifadelerinin belli bir yaklaşımla yeniden düzenleyerek aşağıdaki şekilde ifade etmiştir:

$$b = 1 \text{ için } E = 2kT_M \left(1.25 \frac{T_M}{\omega} - 1 \right) \quad (3.98)$$

$$b = 2 \text{ için } E = 2kT_M \left(1.76 \frac{T_M}{\omega} - 1 \right) \quad (3.99)$$

Balarin (1979), $\gamma = \delta/\tau$ ifadesinin bir fonksiyonu olarak kinetik derecelerin grafiğini çizdirmiş ve tuzak derinliği bilinen bir TL malzemesi için frekans faktörünün hesabı için aşağıdaki eşitliği önermiştir:

$$s = \left(\frac{\beta}{T_M^2} \right) \left(\frac{E}{k} \right) \frac{1}{1 + (b-1) \left(\frac{2kT_M}{E} \right)} \exp \left(\frac{E}{kT_M} \right) \quad (3.100)$$

4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bahl ve ark. (2013), “Gama ve Protonla Işınlanmış $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy,Na}$ Nano Kristallerinin Sentezi ve TL Karakteristikleri” isimli çalışmalarında $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy,Na}$ örneklerini yakma metodu (Combustion method) ile sentezlemişlerdir. Başlangıç karışımında $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2\text{:H}_3\text{BO}_3\text{:NH}_4\text{NO}_3\text{:CH}_4\text{N}_2\text{O}=1.0\text{:3.2:10.2:10.2}$ oranlarını kullanmışlar ve karışım viskoz sıvı haline gelene kadar DyCl_3 ve Na_2SO_4 uygun miktarlarda ilave etmişlerdir. Hazırlanan karışım 400°C ’de tavlayıp tavlama işlemi sonrasında oda sıcaklığına soğutarak $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy,Na}$ malzemesini hazırlamışlardır. Elde ettikleri ürünün XRD ve TEM sonuçlarına bakarak morfolojisini ve boyutlarını tespit etmişlerdir. XRD sonuçlarına göre elde ettikleri malzemenin ortogonal yapıya sahip olduğunu ve tane boyutunun yaklaşık olarak 45 ile 55 nm aralığında değiştiğini gözlemişlerdir. $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy,Na}$ örneklerini 200°C ile 400°C arasında değişen sıcaklıklarda tavlayıp 10 Gy gama ışınına maruz bırakarak TL ölçümlerini yapmışlar ve tavlamanın TL şiddetine etkisine bakmışlardır. 300°C ’de yapılan tavlamanın örneğin TL şiddetini maksimum yaptığını gözlemişler ve uygun tavlama sıcaklığı olarak 300°C ’yi seçmişlerdir. Işınlanan örnekleri TL cihazında 1-2-5 ve 7 K/s’lik farklı ısıtma hızları ile ısıtarak TL ölçümlerini almışlar ve en yüksek TL şiddetinin gözlemlendiği 5 K/s’lik ısıtma hızını deneylerde kullanılmak üzere seçmişlerdir. Üretilen malzemeyi pelletler halinde hazırlayarak 0.1-1000 Gy arasında gama ışınlarına ve 1-450 Gy arası 150 MeV enerjili proton demetlerine maruz bırakarak TL ölçümlerini yapmış ve bu ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Gamaya maruz bırakılmış örneklerin 400 K ve 512 K’de, proton demetlerine maruz bırakılmış örneklerin ise 450 K ve 477 K’de TL ışıma tepelerine sahip olduklarını gözlemişlerdir. Proton demetlerine maruz bırakılan örneklerin 350 Gy’e kadar, gamaya maruz bırakılan örneklerin ise 1000 Gy’e kadar doğrusal doz yanıtı verdiklerini belirlemişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada gama ve protonla ışınlanmış örneklerin 30 günlük periyot için solma (fading) özelliklerini de çalışmışlar ve TL tepelerinin solma oranlarını belirlemişlerdir.

Kawashima ve ark., (2013), “ $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Tb}$ Fosforunun Termoluminesans Özellikleri” isimli çalışmalarında MgB_4O_7 bor bileşenine Çözücü Buharlaştırma

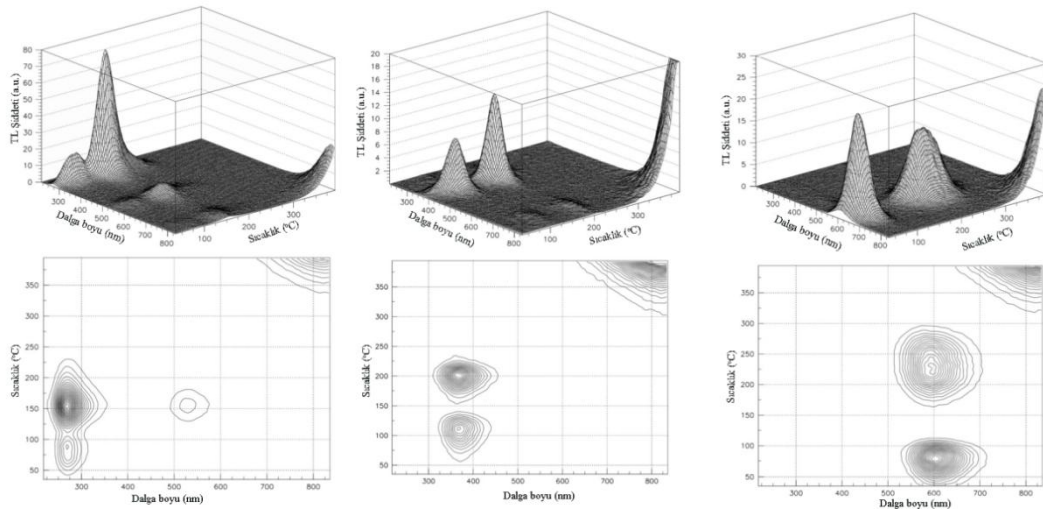
Yöntemi ile farklı oranlarda Tb katkılanmışlardır. Katkılama işlemleri sonrasında yaptıkları TL okumaları ile molar olarak %1 oranında Tb katkılı örneklerin yüksek TL şiddetine sahip olduğunu tespit etmişler ve bu örneklerin TL özelliklerini çalışmışlardır. TL okumaları sonucunda $MgB_4O_7:Tb$ örneklerinin TL ışıma eğrilerinin $220^\circ C$ civarında belirgin ve iyi tanımlanabilen bir tepe ile $330^\circ C$ civarında küçük bir omuzdan oluştuğunu gözlemişlerdir. %1 oranında Tb katkılı örneklerin 489, 545, 588 ve 622 nm civarlarında Tb^{+3} iyonundan kaynaklı TL ve floresans yayınıma sahip olduklarını belirlemişlerdir. Ayrıca 1 ve 10 Gy arasında değişen dozlarda gama ile ışınladıkları örneklerin doğrusal doz yanıtına sahip olduğu aralıkları ve ölçülebilir en küçük dozu belirlemişlerdir.

Ekdal ve ark. (2012), “Mn Katkılı $Li_2B_4O_7$ Tek Kristallerinin Işıma Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bildirimlerinde Czochralski yöntemini kullanarak hazırladıkları farklı katkı oranlarına sahip $Li_2B_4O_7:Mn$ tek kristallerini ^{90}Sr beta kaynağı ile ışınlayarak ışıma eğrilerini elde etmişlerdir. Hazırlanan malzemelerin birbirinden iyi bir şekilde ayrılmış iki tepeden oluştuğunu, farklı sürelerde beta dozlarına maruz bırakılan malzemelerde ana ışıma tepelerinin 1 Gy’e kadar doğrusal doz cevabına sahip olduğunu yeniden kullanılabilirliğini, termal sönümleme özelliklerini ve $LiF:Mg,Ti$ (TLD-100) dozimetresi ile karşılaştırılmasını rapor etmişlerdir.

Ignatovych ve ark. (2012), “Cu, Ag ve Mn Katkılanmış Lityum Tetraborat Tek Kristal ve Camlarının Termoluminesansının Çalışılması” başlıklı çalışmalarında Spektral Olarak Çözünmüş Termoluminesans tekniğini kullanarak katkılama yapılmamış ve Cu, Ag ve Mn katkılanmış (LTB:Cu, LTB:Ag ve LTB:Mn) lityum tetraborat (LTB) tek kristallerinin ve camsı LTB örneklerinin TL’sini çalışmışlardır (Şekil 4.1). Çalışmada aynı oranlarda ve aynı katkı maddeleriyle katkılanmış olan tek kristallerin TL duyarlılıklarıyla camsı LTB örneklerinin TL duyarlılıklarını karşılaştırmışlardır. Çalışmanın ilk aşamasında katkılama yapılmamış LTB, Cu, Ag ve Mn katkılanarak Czochralski Tekniği ile büyütülüp hazırlanan LTB:Cu, LTB:Ag ve LTB:Mn tek kristallerini ve yine Cu, Ag ve Mn katkılایarak elde ettikleri camsı LTB örneklerini hazırlamışlardır. Hazırlanan bu yedi farklı örneğin yapısal özelliklerinin tayin edilmesi için XRD analizlerini yapmışlardır. Çalışmanın son

aşamasında ise her bir örneğe X-ışını kaynağı ile 500 Gy'lik radyasyon dozu verdikten sonra ev yapımı yüksek duyarlıklı deneysel bir sistemi kullanarak 1°C/s ısıtma hızıyla örnekleri ısıtarak spektral olarak çözünmüş 3 boyutlu TL grafiklerini kaydetmişlerdir. Sonuç olarak:

- LTB:Ag için 272 nm'de, LTB:Cu için 370 nm'de ve LTB:Mn içinse 608 nm'de TL emisyon bandları gözlemişlerdir.
- Işıma eğrilerinin fotoluminesans spektrumlarıyla TL ve PL emisyon bandlarına ait dalgalıboylarının mükemmele yakın derecede benzer olduklarını belirlemişlerdir.
- Camsı örneklerin TL şiddetlerinin tek kristallere ait TL şiddetlerine göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu belirlenmişler ve bu durumun iyonlaştırıcı radyasyonun zayıf enerji depolamasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.
- Camsı ve tek kristallerin TL ışıma eğrilerinin yapı ve şekil farklılıklarını yük tuzaklarının karakteristik farklılığıyla açıklamışlardır.

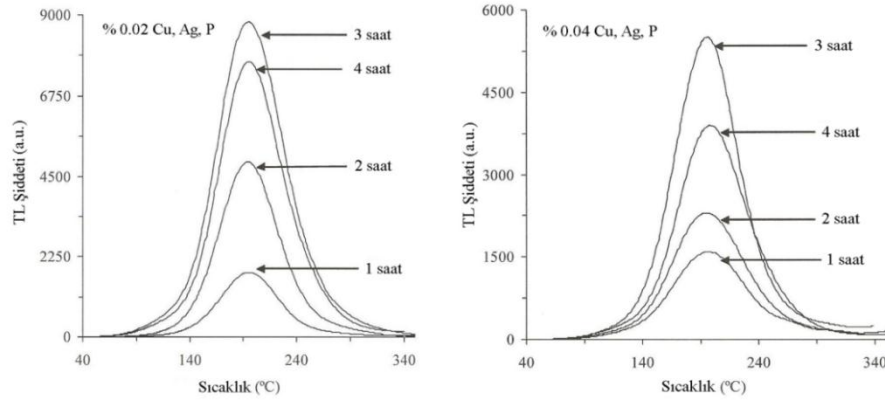


Şekil 4.1. LTB:Cu, LTB:Ag ve LTB:Mn tek kristallerinin TL ışıma eğrileri ve yayılım spektrumları (Ignatovych ve ark., 2012).

Kurt ve ark. (2012), “Seryum ve Lityum Katkılı Magnezyum Borat ($\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Ce,Li}$) Mineralinin Optiksel Uyarılma ile Lüminesans (OSL)

Merkezlerinin Belirlenmesi” isimli bildirilerinde, Ce ve Li Katkılı Magnezyum Borat kristalinin $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile radyasyona maruz bırakıldıktan sonraki OSL yayınimleri ve bu yayınimlardan sorumlu olan tuzak merkezlerini belirlemeye çalışmışlardır. OSL yayınına ait ışıma merkezlerini belirlerken adım tavlama yöntemiyle elde edilen Termoluminesans (TL) eğrileri ile OSL yayınimlarının toplam yoğunluğunun karşılaştırılması sonucu belirlemişlerdir. Elde ettikleri TL ışıma eğrisinde 95°C , 125°C ve 250°C ’de üç adet TL ışıma tepesi, OSL yayınimleri toplam ışıma yoğunluğuna göre ise 175°C ’ye kadar kararlı olduğunu bu sıcaklıktan sonra hızlı bir düşüşe maruz kaldığını gözlemişlerdir. Elde edilen veriler ışığında, 95°C ve 125°C sıcaklıklardaki TL tepelerine ait tuzakların OSL yayınimlarına ait katkısının son derece küçük olduğunu, ana katkının 250°C ’deki TL tuzaklarından kaynaklandığını rapor ederek $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Ce},\text{Li}$ mineralinin OSL tıbbi dozimetresi olarak kullanılabilirliğinin uygun olduğunu ve daha detaylı çalışmaların yapılması gerektiğini rapor etmişlerdir.

Singh ve ark. (2012), “ $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{Ag},\text{P}$ Fosforunun Hazırlanmasına Isısal İşlemin Etkisinin Çalışılması” adlı çalışmalarında $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ bor bileşenine ağırlıkça %0.02 ve %0.04 oranlarında Cu, Ag ve P elementlerini katkılayarak iki ayrı örnek hazırlamışlardır. Hazırlanan örnekler 800°C ’de 1 saat tavlانیp hızlıca oda sıcaklığına soğutulduktan sonra 525°C ’de 30 dakika daha tavlانmışlardır. Tavlama işlemlerinden sonra örneklerle ^{60}Co gama kaynağıyla 5 Gy’lik doz verilip $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ’lik ısıtma hızı ile TL ölçümleri alınmıştır. Aynı işlemler 2, 3 ve 4 saatlik farklı ısıtma işlemler uygulanarak tekrarlanmıştır. Yapılan farklı ısıtma işlemlerinin ve farklı katkılama konsantrasyonlarının hepsi için 200°C ’de aynı yayılıma sahip TL tepeleri gözlemlenmişler ancak 3 saatlik ısıtma işlemi için elde edilen TL şiddetinin maksimum olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 4.2).

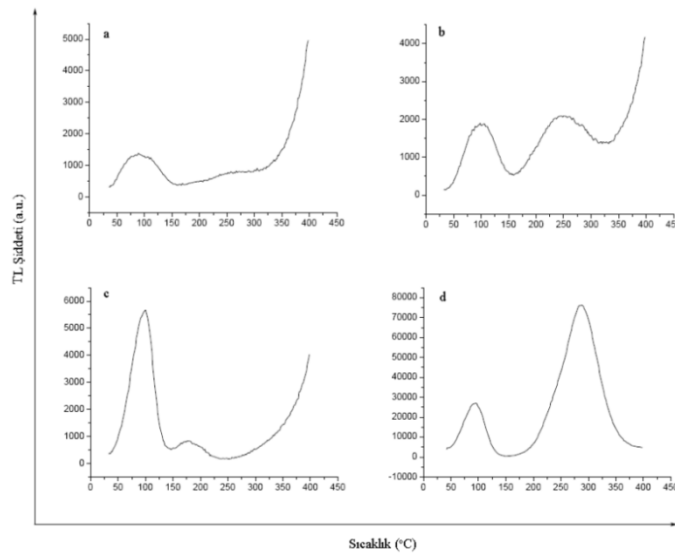


Şekil 4.2. Farklı sürelerde ısıtılma görmüş $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ (%0.02) ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ (%0.04) örneklerine ait TL ışıma tepeleri (Singh ve ark., 2012).

Rao ve ark. (2009), “ MgB_4O_7 , $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ Fosforlarının Termoluminesans Karakteristikleri” isimli çalışmalarında katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle 1200°C ’de 4 saat sinterleme yaparak MgB_4O_7 ’ye %0.5 oranında Cu ve Mn katkılamışlar ve MgB_4O_7 , $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ bileşiklerinin termoluminesans karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, Sr-90 beta kaynağı ile 10 Gy doz verdikleri örneklerin termoluminesans okumalarını Nucleonix marka cihaz ile yaparak MgB_4O_7 için 225°C , $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ için 240°C ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ için ise 240°C ve 290°C civarlarında TL tepeleri gözlemlendiğini rapor etmişlerdir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise 1-60 Gy arasında farklı dozlarla ışınladıkları örneklerin TL doz yanıtlarını ve ayrıca karanlık bir ortamda 50 gün süresince bekleterek inceledikleri normal sönümlerini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, elde ettikleri dozimetrik malzemelerin kaza sonucu oluşabilecek radyasyon sızıntılarında TL dozimetre olarak kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Kayhan (2009), "Mangan Katkılanmış Lityum Tetraboratın Sentez ve Katkılama Yöntemlerinin Isısal İşildama Eğrisi Üzerine Etkileri" başlıklı yüksek lisans tezinde, ilk olarak katı-hal sentez reaksiyonu yöntemi ve hidrotermal sentez yöntemleriyle $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ’ye Mangan (Mn) katkılamış ve toz örneklerin ışıma eğrilerindeki farklılıkları incelemiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde temel olarak başlangıç malzemelerinin suda çözünmesini içeren hidrotermal sentez ve başlangıç

malzemelerinin toz halde karıştırılmasını içeren katı-hal sentez reaksiyonu yöntemlerini kullanarak $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 'ye değişik miktarlarda Ag, Mg, Mn ve P katkılanmıştır. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ örnekleri arasındaki yapısal değişiklikleri görmek için XRD, katkılanmadan kaynaklanan bağ yapısındaki değişiklikleri tespit etmek için FTIR spektrometresi analizi, katkıların gerçek miktarlarının tespiti için Endüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES), ayrıca örneklerin morfolojik yapılarının karşılaştırılması için SEM analizi ve son olarak da TL cihazı ile ısısal ısıldama ölçümlerini yapmıştır. Sonuç olarak ürünlerin başarıyla sentezlendiğini, katkı maddelerinin eklenmesiyle Lityum Tetraboratın yapısal veya bağ özelliklerinin değişmediğini ve katkılanmış $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 'nin TL ışıma eğrilerinin sentez ve katkılama yöntemlerinden etkilendiğini belirlemiştir.



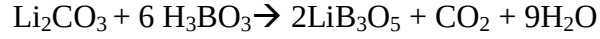
Şekil 4.3. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:Ag, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:Mg, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:Mn ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:P örneklerine ait TL ışıma tepeleri (Kayhan, 2009).

Pekpak ve ark. (2009), "Lityum Tetraboratın Termoluminesans Karakteristikleri" adlı çalışmalarında, başlangıç malzemesi olarak lityum karbonat (Li_2CO_3) ve borik asitin (H_3BO_3) agat havanda öğütülmüş tozlarını uygun oranlarda karıştırıp, katı hal sentez reaksiyonu yöntemiyle 400°C 'de 3 saat ön ısıtma yaptıktan sonra, 750°C 'de 4 saat fırınlayıp oda sıcaklığına kadar soğutarak lityum tetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) sentezlemişlerdir. Sentezlenen Lityum Tetraborata, bakır-1 oksit (Cu_2O)

bileşiğini kullanarak katı hal sentez reaksiyonu yöntemiyle ve bakır–2 klorür (CuCl_2) bileşiğini kullanarak hidrotermal sentez yöntemiyle değişik oranlarda Cu (bakır) katkılamışlar, elde ettikleri katkılı malzemelerin niteliklerini XRD yöntemi ile belirlemişlerdir. Çalışmanın son aşamasında değişik oranlarda ve iki farklı yöntemle bakır katkılanmış olan Lityum Tetraborat örneklerinin TL özelliklerini belirlemek için, her bir örneği oda sıcaklığında $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağıyla 5 dakika (2.5 Gy) ışınladıktan sonra Harshaw TLD Sistem 3500 Manual TL okuyucuda 50°C 'den 400°C 'ye kadar $1^\circ\text{C}/\text{s}$ ısıtma hızı ile TL ölçümü yapmışlardır. Sonuç olarak en yüksek TL yanıtının, bakır katkı oranı en az olan örneklerde gözlemlendiğini ve hidrotermal yöntemle katkılanan örneklerin katı hal yöntemi ile katkılanan örneklere göre daha kullanışlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Manam ve Sharma (2008) "Mangan Katkılı Lityum Tetraborat Fosforunun TSL Işıma Eğrilerinden Tuzak Parametrelerinin Belirlenmesi" başlıklı çalışmalarında, eritme yöntemiyle lityum tetraborata ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) mangan (Mn) katkılıyıp $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ bileşiğinin termoluminesans tuzak parametrelerini belirlemişlerdir. Çalışmada lityum karbonat (Li_2CO_3) ve borik asit (H_3BO_3) orantılı olarak ve MnCl_2 ağırlıkça %0.5 oranında karıştırıp maden eritme kabında 950°C 'de eritilmiş ve hızlıca oda sıcaklığına soğuttuktan sonra elde edilen örnekleri 650°C 'de 30 dakika tavlamışlardır. Tavlama işleminden sonra örnekleri öğütürerek 100–200 μm aralığında elemişlerdir. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ bileşiğinin tanımlanması için FTIR (Fourier Transform Infrared) analizi yaparak 4000–400 cm^{-1} aralığında örneklerin FTIR spektrumlarını kaydetmişlerdir. Daha sonra örnekleri 400°C 'de 5 dakika tavlayıp oda sıcaklığına soğutmuşlar ve x-ışını (20 kV, 15 mA, bakır hedef, Machlett tüp) ile ışılandıktan sonra örneklere ait TSL eğrilerini, tip 1007 PC-Based TL Analiz Sisteminde $4^\circ\text{C}/\text{s}$ ısıtma hızında okuyarak kaydetmişlerdir. Örneklere ait TSL ışıma eğrilerinin birinin 190°C 'de ve diğerinin 310°C 'de iki tepeden oluştuğunu 310°C 'deki yüksek sıcaklık tepesinin maksimum şiddete sahip olduğunu gözlemişlerdir. 310°C ışıma tepesinin kinetik derecesini, aktivasyon enerjisini ve frekans faktörünü izotermel bozunum ve Chen yöntemleri ile hesaplayarak karşılaştırmalarını yapmışlardır.

Ardıçoğlu (2005), "Nadir Toprak Elementleri ile Katkılanmış Lityum Triborat Sentezi" başlıklı yüksek lisans tezinde, Lityum Karbonat (Li_2CO_3) ve Borik Asiti (H_3BO_3) uygun miktarlarda karıştırarak homojen hale getirmiş, karışımı porselen krozelerde 750°C 'de 14 saat süreyle tavlama ve

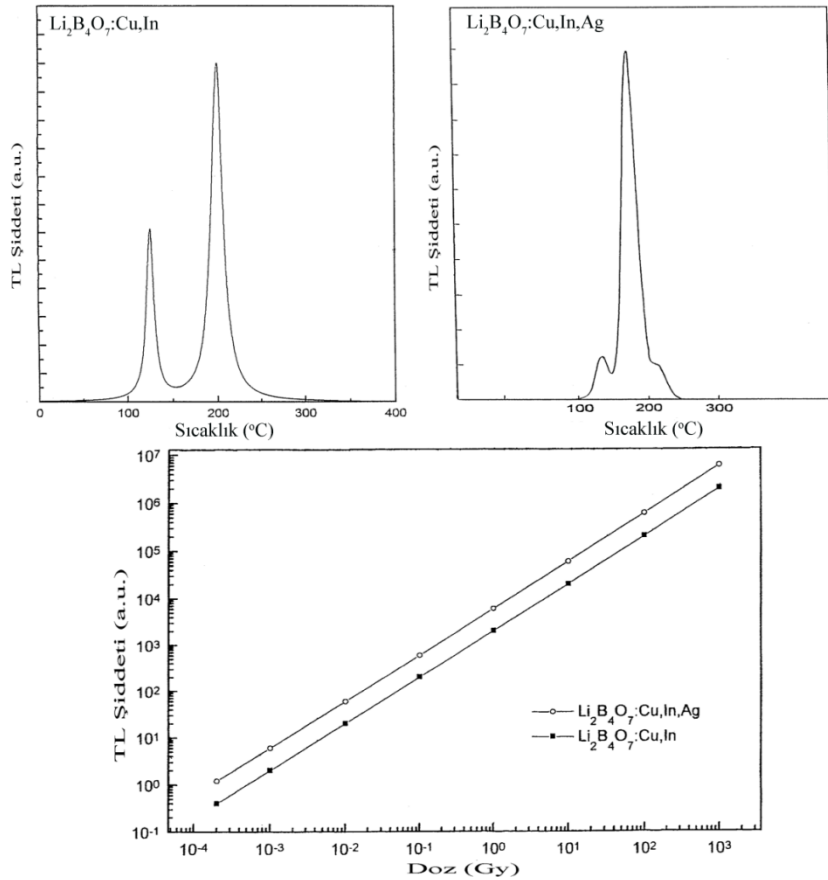


reaksiyonu ile Lityum Triborat elde etmiştir. Elde ettiği ürünü çeşitli konsantrasyonlarda hazırladığı Gd_2O_3 , La_2O_3 ve Y_2O_3 ile 750°C 'de 7 saat süreyle sinterleyerek katkılamış ve ürünlerin tanımlanmasını X-Işını Toz Kırınım Yöntemiyle (XRD), yapısını kızılötesi (IR) analiziyle ve termal özelliklerini Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ile yapmıştır. Ayrıca Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile bileşiklerin yapısını incelemiş ve son olarak da Termolüminesans (TL) Yöntemi ile bileşiklerin dozimetrik özelliklerini test etmiştir. Sonuç olarak Lityum Triboratın XRD deseninde farklılık gözlememiş, Nadir Toprak Elementlerini (NTE) sistemde oksit bileşikleri halinde ve az miktarda gözlemiş, IR analizine göre NTE'lerin bor atomuna bağlanmadığı, Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ile Nadir Toprak Elementlerinin eklenmesiyle Lityum Triboratın erime sıcaklığının düştüğünü tespit etmiştir. Ayrıca SEM resimlerinde Lityum Triborat taneciklerinin üzerine yapışmış olan NTE'yi açıkça gözlemiş ve Termolüminesans (TL) ölçüm sonuçlarına göre ise bileşiğin dozimetrik özellikleri olduğunu tespit etmiştir.

Özdemir ve ark. (2004), "Katı-Hal Reaksiyonu Yöntemiyle Lityum Triborat (LiB_3O_5) Sentezi" adlı çalışmalarında, Li_2CO_3 ve H_3BO_3 agat havanda öğütülmüş tozlarını uygun oranlarda karıştırıp homojen hale getirdikten sonra porselen kroze koyup katı hal sentez reaksiyonu yöntemiyle 750°C 'de 7, 14 ve 21 saatlik sürelerle ısıtıp yeni bileşikler elde etmişler ve bu bileşikleri tanımlamak için XRD analizlerini yapmışlardır. Sonuç olarak bir miktar yan ürünle birlikte non-lineer optik malzeme olan lityum triborat elde etmişlerdir.

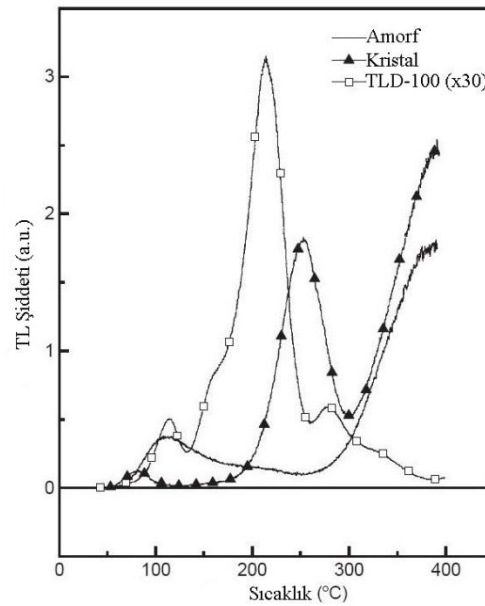
Prokic (2001), "Lityum Borat Katı Termolüminesans (TL) Dedektörleri" başlıklı makalesinde, katıhal reaksiyonu yöntemiyle lityum tetra borata ağırlıkça

%0.07 Cu, %0.07 In ve %0.05 Ag katkılayarak $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In},\text{Ag}$ bileşiğini ayrıca yine lityum tetra borata ağırlıkça %0.07 Cu, %0.07 In katkılayarak $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In}$ bileşiğini elde etmiştir. Elde ettiği iki örneği öğütüp 75 μm -200 μm arasında toz halde elde edip basınç altında sıkıştırarak 4.5 mm genişlik ve 0.95 mm kalınlıkta pelletler yapmış ve pelletleri 850°C’de sinterlemiştir. Böylece elde ettiği dozimetreleri ^{60}Co kaynağı ile 10^{-4} Gy ile 3×10^3 Gy arasında ışınlamış ve TL ölçümlerini Harshaw TL Analyzer Model 2000 ile 5°C/s ısıtma hızında yapmıştır. Ölçümler sonucunda $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In}$ dozimetresi için 125°C ve 210°C civarlarında iki ışıma tepesi, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In},\text{Ag}$ dozimetresi için ise 125°C, 190°C ve 225°C civarlarında üç ışıma tepesi gözlediğini rapor etmiş ve 190°C’deki ışıma tepesinin Ag katkısından kaynaklandığını belirtmiştir. Ayrıca $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In}$ ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In},\text{Ag}$ bileşiklerinin doz cevap eğrilerini de karşılaştırarak doz yanıtlarının doğrusal olduğu doz aralıklarını da belirlemiştir.

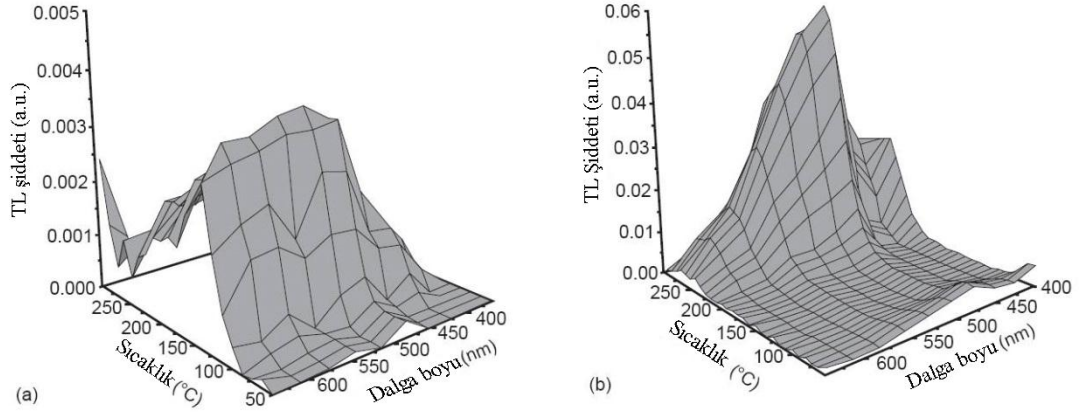


Şekil 4.4. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In}$ ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In},\text{Ag}$ örneklerine ait TL ışıma tepeleri ve bu tepelere ait doz yanıt grafiği (Prokic, 2001).

Santiago ve ark. (1998), “Bakır İçeren Sodyum Borat Bileşiklerinin Termoluminesansı” adlı çalışmalarında 741°C civarındaki erime noktasında CuCl_2 ve Sodyum Boratı fırınlayarak Sodyum Borata %0.1 oranında bakır katkılamışlar ve elde ettikleri bileşikler öğütürerek 20-150 μm parçacık boyutunda toz örnek haline getirmişlerdir. Bu toz örnekleri 400°C’de 1 saat tavlayıp x-ışınlarına maruz bırakarak deneyler yapmışlardır. X-ışını deneylerinin sonuçlarına göre örneklerin erime noktasından daha yüksek sıcaklıklarda camsı, düşük sıcaklıklarda ise kristalin olduğunu gözlemişlerdir. Bileşiklerin TL ışıma tepelerini incelemek için 15 mg’lık toz örnekleri 400°C’de 15 dakika tavlayıp tavlama işlemlerinden sonra ^{60}Co kaynağı kullanarak 0.1 Gy ile 20 Gy aralığında ışınlayıp 1°C/s’lik ısıtma hızında TL ölçümleri almışlardır. Amorf ve kristalin örnekler için elde ettikleri ışıma tepelerini LiF:Mg,Ti (TLD-100) dozimetresinin ışıma tepeleri ile karşılaştırmışlardır. Amorf bileşiklerin 120°C, 210°C ve 290°C’de üç ışıma tepesine, kristalin bileşiklerin 90°C ve 260°C’de iki ışıma tepesine sahip olduğunu belirlemişlerdir (Şekil 4.5). Ayrıca ışıma tepelerinin solma (fading) oranlarını belirledikten sonra izomerik çizimlerle (Şekil 4.6) bileşiklerin ışıma spektrumlarına ait dalgaboyu aralıklarını belirledikten sonra son aşamada Elektron Spin Rezonans (ESR) deneylerini amorf ve kristalin örneklerle ayrı ayrı uygulayarak rapor etmişlerdir.



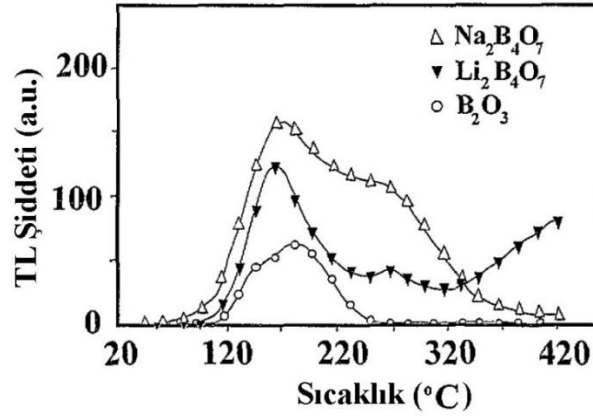
Şekil 4.5. Bakır katkılı amorf ve kristalin sodyum borat bileşiklerinin TL ışıma eğrileri ve TLD-100 ile karşılaştırılmaları (Santiago ve ark., 1998).



Şekil 4.6. Bakır katkılı (a) amorf ve (b) kristalin sodyum borat bileşiklerinin izometrik çizimleri (Santiago ve ark., 1998).

Spano, ve ark. (1995), “Sodyum Tetraborat Bileşiklerinin Termoluminesans Tuzak Parametreleri” başlıklı çalışmalarında gamma kaynağı ile ışınladıkları Sodyum Tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), Lityum Tetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ve doğal Borat (B_2O_3) bileşiklerinin TL ve Fosforesans ölçümlerini yaparak örneklerle ait tüm ışıma tepelerin aktivasyon enerjilerini (E), kinetik derecelerini (b) ve frekans faktörlerini (s) hesaplamışlardır. Çalışmanın ilk bölümünde $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ‘nin X-Işını Toz Kırınım Yöntemi (XRD) ile analizleri yapıp safsızlık oranları ve amorf yapıda oldukları tanımlandıktan sonra 10^3 - 10^4 Gy arasında ışınladıkları $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve B_2O_3 örneklerinin $400^\circ\text{C}/\text{dk.}$ ’lık ısıtma hızı ile TL ölçümlerini yapmışlardır (Şekil 4.7). Ölçüm sonucunda MI olarak adlandırdıkları düşük sıcaklık bandında, her üç örnek için 170°C ’de, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ için MII olarak adlandırdıkları yüksek sıcaklık bandında 270°C ’de ışıma tepeleri gözlenirken B_2O_3 için MII bandında ışıma tepesi gözlememişlerdir. Işıma tepelerini analiz ettiklerinde 1. dereceden tepe (b=1) olduklarını tespit etmişlerdir. Çalışmalarının ikinci aşamasında $400^\circ\text{C}/\text{dk.}$ ısıtma hızında 90°C - 420°C aralığında ısıtılan örneklerin fosforesansına bakıp ESR adım tavlama yöntemini uygulamışlar ve Başlangıçtaki Artış (Initial Rise-IR) metodu ile $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ’nin MII bandında yer alan ışıma tepelerine ait aktivasyon enerjisini (E) ve frekans faktörünü (s) hesaplamışlardır. Hesaplamalar sonucunda aktivasyon enerjileri, IR yöntemiyle 1.13 eV, ESR yöntemiyle 1.12 eV ve fosforesans

ölçümüyle 1.1 eV olarak, frekans faktörleri ise ESR yöntemiyle $6 \times 10^9 \text{ sn}^{-1}$ ve fosforesans ölçümüyle $1 \times 10^{10} \text{ sn}^{-1}$ olarak hesaplamışlardır.



Şekil 4.7. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve B_2O_3 bor bileşiklerinin TL ışıma eğrileri (Spano ve ark., 1995).

Prokic (1993), “Yeni Bir TL Dozimetre” başlıklı çalışmasında Mangan Katkılı Magnezyum Boratın ($\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$) 10°C/s ısıtma hızı ile TL ışıma tepelerini, ışıma spektrumunu, TL hassaslığını, 10^{-4} ile $8 \times 10^3 \text{ Gy}$ doz aralıklarındaki gamma doz yanıtını, doz eşliğini (algılanabilen minimum dozu), 20 keV ile 161 keV aralığındaki foton enerji yanıtını, solma (fading) özelliklerini, yeniden kullanılabilirliğini (reusability) ve farklı laboratuvarlarda ölçümlerdeki benzerliğini test etmiştir. Yaptığı çalışmalar sonucunda,

- 150°C ve 270°C civarlarında iki ışıma tepesi elde etmiş ve 270°C civarındaki ışıma tepesinin dozimetrik tepe olduğunu,
- Dozimetrik kullanımlar için her okumadan sonra yeniden okuma veya 500°C 'de 45 dakika tavlama yapılması gerektiğini,
- Elde edilen dozimetrenin lineer doz cevap aralığının yaklaşık 45 Gy'e kadar olduğu ve 10^3 Gy 'den sonra doyuma ulaştığını,
- Foton enerji yanıtının, 30 keV'lik ^{60}Co kaynağı için 1.7 keV olduğunu rapor etmiştir.

5. MATERYAL ve METOD

5.1. Materyal

5.1.1. Bor ve Bor Mineralleri

Günümüzde birçok bilimsel araştırmaya konu olan bor (B), atom numarası 5, atom ağırlığı 10.811, yoğunluğu 2.34 g/cm^3 , erime noktası 2076°C ve kaynama noktası 3927°C olan metalle ametal arası (yarı metal, metaloid) yarı iletken özelliğe sahip olan bir elementtir. Borun elektron dizilimi $1s^2 2s^2 2p^1$ olup periyodik tablonun 3A grubunda yer almaktadır. Bor, gerek Güneş Sistemi'nde gerekse Dünya'nın kabuğunda düşük miktarda yer alan ve doğada element olarak bulunmayıp, alkali boratlar ya da borik asit gibi çok değişik bileşikler halinde bulunmaktadır (Şekil 5.1).



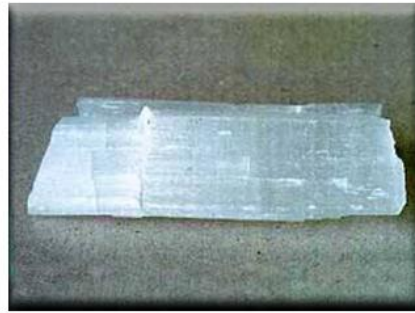
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.1. Borun (a) bor elementi (b) kolemanit (c) boraks (d) üleksit gibi formlarının genel görünümü.

Bor elementi ^8B , ^{10}B , ^{11}B , ^{12}B , ^{13}B izotoplarından oluşmaktadır. En kararlı izotopları ^{10}B ve ^{11}B 'dir. Bu izotopların doğada bulunma oranları sırasıyla %19.1-20.3 ve %79.7-80.9'dur. ^{10}B izotopu, çok yüksek termal nötron tutma özelliği gösterir. Bundan dolayı nükleer malzemeler ve nükleer enerji santrallerinde kullanılabilir.

Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, bor bileşiklerinin birçok endüstride kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır, ancak, farklı olarak saf bor, karbon gibi elektrik iletkenidir. Kristalize bor, görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir. Borun saf elementi ilk kez, 1808 yılında Fransız kimyager J. L. Gay-Lussac ve Baron L. J. Thenard ile İngiliz kimyager H. Davy tarafından elde edilmiştir.

Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. Alfa ve beta rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır. Alfa rombohedral strüktür 1200°C 'nin üzerinde bozulur ve 1500°C 'de beta rombohedral form oluşur. Amorf form yaklaşık 1000°C 'nin üzerinde beta rombohedral ve her türlü saf bor ergime noktasının üzerinde ısıtılıp tekrar kristalleştirildiğinde beta rombohedral forma dönüşür.

Bor, yerkabuğunda yaygın olarak bulunan 51. elementtir. Bor doğada hiçbir zaman serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Yaygın olarak bulunan bor minerallerinden bir tanesi bir tür alumino borosilikat minerali olan ve yapısında %10'a kadar bor içerebilen turmalindir. Ancak, sanayide alkali ve toprak alkali bor mineralleri olan tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) kullanılmaktadır. Ticari maden yatakları sınırlı olup en çok Türkiye ve ABD'de bulunmaktadır. Ticari önem taşıyan bor minerallerinin bileşimleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Bor elementinin kimyasal özellikleri, morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron boyutundaki amorf bor, kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristalin bor kolay reaksiyon vermez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve bazı diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile

reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlayıcı olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur.

Çizelge 5.1. Ticari önem taşıyan bor minerallerinin bileşimleri.

Mineral	Formülü	% B ₂ O ₃	Bulunduğu Yer
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36.60	Türkiye, ABD, Arjantin
Kernit (Razorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	51.00	Türkiye, ABD, Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	43.00	Türkiye, ABD, Arjantin, Şili
Probertit	NaCaB ₃ O ₉ ·5H ₂ O	49.60	Türkiye, ABD
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	50.80	Türkiye, ABD
Pandermit	CaB ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O	49.80	Türkiye
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62.20	Almanya
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41.40	Kazakistan, Çin
Hidroborasit	CaMgB ₆ O ₁₁ ·6H ₂ O	50.50	Türkiye, Arjantin

5.1.1.1. Bor Rezervleri

Dünya bor cevheri rezervleri bakımından ilk üç sırada yer alan ülkeler sırasıyla Türkiye (%71.3), Kazakistan (%8.2) ve Amerika Birleşik Devletleri (%6.5)'dir. Çizelge 5.2'de 2010 yılı ROSKILL verilerine göre bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı görülmektedir. Türkiye bor rezervinin fazla olması ve ticari önem taşıyan bor bileşimlerini barındırması açısından önemli bir yere sahiptir. Türkiye'de önemli bor yatakları, Balıkesir'de Bigadiç, Susurluk ve Sultançayırı, Bursa'da Mustafa Kemal Paşa, Kütahya'da Emet, Eskişehir'de Seyitgazi ve çevresinde bulunmaktadır (Şekil 5.2). Bu yataklar dünyanın en zengin boraks yatakları olarak bilinmektedir. Bu yataklardan çıkarılan bor Balıkesir'deki Bandırma ve Eskişehir'deki Kırka tesislerinde işlenmektedir (XIV; XV).

Bor ve bor ürünleri çağımızın gelişen modern teknolojisinin vazgeçilmez birer unsurudur. Başta cam, seramik, emaye, metalurji, deterjan sanayi, tarım sektörü olmak üzere nükleer enerji, jet ve roket yakıtı, eczacılık, kimya ve daha

birçok tüketim alanında kullanılan bor minerallerinin kullanım alanları gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün artmaktadır.

Çizelge 5.2. Bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı (XIV).

Ülke	Toplam Rezerv (Bin ton B ₂ O ₃)	Toplam Rezerv (% B ₂ O ₃)
Türkiye	885.000	71.3
Kazakistan	102.000	8.2
ABD	80.000	6.5
Çin	47.000	3.8
Şili	41.000	3.3
Rusya	35.000	2.8
Peru	22.000	1.8
Bolivya	19.000	1.5
Arjantin	9.000	0.7
İran	1.000	0.1
Toplam	1.241.000	100

Yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları ile önemi daha da artmakta olan bor minerallerinin dozimetrik malzeme olarak kullanılması ile ilgili araştırmalar ve çalışmalar da son dönemlerde yoğunluk kazanmıştır.



Şekil 5.2. Türkiye bor madenleri (a) Balıkesir (b) Bursa (c) Kütahya (d) Eskişehir.

5.1.2. Çalışmada Kullanılan Kimyasallar

Yapılan bu çalışmanın ilk aşamasında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı Eskişehir ili Kırka bucağında kurulu olan maden işletmesinden alınan ve Etibor-68 ya da susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) olarak adlandırılan doğal bor minerali kullanılmıştır (Şekil 5.3).



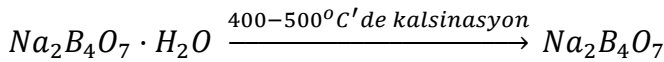
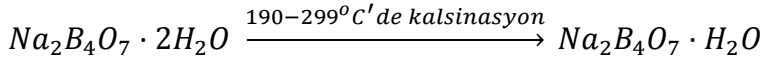
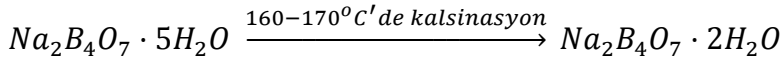
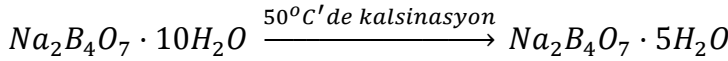
Şekil 5.3. Susuz boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$).

Çizelge 5.3'te çalışmada kullanılan Etibor-68 ürününe ait Eti Maden İşletmeleri tarafından verilen kimyasal özellikler ve elek analiz boyutları verilmektedir.

Çizelge 5.3. Etibor-68'in kimyasal özellikleri ve elek analizi (XVI).

Kimyasal Özellikler			Elek Analizi Boyut (mm)		
<i>İçerik</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>	<i>İçerik</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
B_2O_3	%	68.00 min.	+1.600	%	1.00 max.
Na_2O	%	30.27 min	-0.075	%	5.00 max.
SO_4	ppm	200 max.			
Cl	ppm	105 max.			
Fe	ppm	150 max.			
Suda çözünmeyenler	ppm	920 max.			

Susuz boraks ya da Etibor-68 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), Eskişehir Kırka bor işletmesinde boraks dekahidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) bir takım ısıtma işlemlere tabi tutulması sonucunda elde edilmektedir. Doğada tinkal minerali olarak bulunan boraks dekahidrat 50°C 'de ısıtıldığında boraks pentahidratı ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) vermektedir. Boraks pentahidrat (tinkalkonit) bazik yapıda rombohedral kristalli bir bor bileşiğidir. Sulu çözeltilerde 60.8°C 'nin üzerinde hızla kristalleşme özelliğine sahiptir. Boraks pentahidrat $160-170^\circ\text{C}$ 'de boraks dihidrata ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), $190-299^\circ\text{C}$ 'de boraks monohidrata ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve $400-500^\circ\text{C}$ ' de ise susuz boraksa ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) dönüşür. Bu işlemler sonucunda elde edilen susuz boraks amorf yapıdadır ve kırıcılardan geçirilerek istenen elek boyutlarında üretilmektedir (XVI; Kirk-Othmer, 2001). Bu işlemleri kısaca aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz:



Boraksın kristal yapısı Şekil 5.4'te görülmektedir.

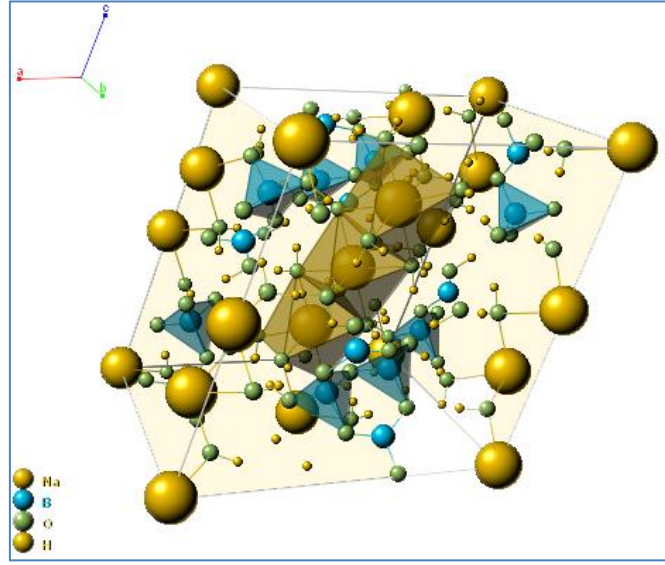
Çalışmanın ikinci aşamasında ise Sigma-Aldrich firmasından temin edilen susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ve SCS yöntemi kullanılarak saf su içerisinde magnezyum nitrat ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), üre (NH_2CONH_2) ve borik asit'in (H_3BO_3) farklı oranlarda karıştırılıp çözülmesi sonucunda elde edilen magnezyum tetra borat (MgB_4O_7) gibi bor mineralleri kullanılmıştır. Kullanılan bu minerallerden $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 'ye katı-hal sentez reaksiyonu yöntemi ile farklı katkı oranlarında gümüş (Ag) ve MgB_4O_7 'ye çözelti yanma sentez (SCS, Solution Combustion Synthesis) yöntemi ile farklı katkı oranlarında hem gümüş (Ag) hem de bakır (Cu) katkılanarak deneysel çalışmalar

yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan kimyasallar ve özellikleri Çizelge 5.4’de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.4. Çalışmada kullanılan kimyasallar.

Kimyasallar	Temin Edilen Firma	CAS numarası	Safılık (%)	Kullanım Amaçları
Etibor-68 Susuz boraks $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Kırka Bor İşletmesi	-	Doğal	Başlangıç kimyasalı
Susuz boraks $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Sigma-Aldrich	1330-43-4	99.998	Başlangıç kimyasalı
Magnezyum nitrat $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Sigma-Aldrich	13446-18-9	99.999	MgB_4O_7 üretimi
Borik asit H_3BO_3	Sigma-Aldrich	10043-35-3	99.999	MgB_4O_7 üretimi
Üre $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	Sigma-Aldrich	57-13-6	-	MgB_4O_7 üretimi
Gümüş (I) Oksit Ag_2O	Sigma-Aldrich	20667-12-3	99.99	Katkı kimyasalı
Bakır (II) nitrat $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$	Sigma-Aldrich	13778-31-9	99.999	Katkı kimyasalı
Gümüş (I) nitrat AgNO_3	Sigma-Aldrich	7761-88-8	99	Katkı kimyasalı

Yapılan deneysel çalışmalar, Metod bölümünde 5.2.1 ve 5.2.2’de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 5.4. $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ boraks mineralinin kristal yapısı (XVII).

5.1.3. Çalışmada Kullanılan Araç-Gereç ve Cihazlar

Yapılan bu çalışmada kullanılan araç-gereç ve cihazların tamamı aşağıda listelenmiş ve bunların temel özellikleri verilen sırada detaylı olarak açıklanmıştır.

- Termoluminesans ölçüm sistemi (Risø TL/OSL Sistem Model DA-20)
- X-ışınları toz difraktometresi (XRD) ölçüm sistemi (Rigaku Miniflex II)
- Dalga boyu dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi (WDXRF) ölçüm sistemi (Rigaku ZSX Primus II)
- Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ölçüm sistemi (Zeiss Supra 55)
- Termogravimetrik diferansiyel termal analiz (TG/DTA) ölçüm sistemi (Extar TG/DTA 7300)
- Tavlama fırını ve inkubatör (Nabertherm GmbH, Memmert INB 400)
- Agat havan, porselen krezeller
- Elekler
- Saf su cihazı (Human Power I)
- Doğrusal Hızlandırıcı (VARIAN marka CLINAC 600C DBX model)

5.1.3.1. Termolüminesans (TL) Ölçüm Sistemi

Risø Ulusal Laboratuvarı Radyasyon Araştırma Bölümü 1982'den beri otomatik termolüminesans (TL) okuma cihazlarının geliştirilmesi ile ilgili araştırmalarını sürdürmektedir. Bölümün en son geliştirdiği TL/OSL-DA-20 modeli hem termolüminesans (TL) hem de optiksel uyarılma ile lüminesans (OSL) uygulamalarını bir arada yapabilen bir cihazdır.

Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Termolüminesans Dozimetri ve Medikal Fizik Laboratuvarında dozimetri uygulamalarında Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 cihazı kullanılmaktadır (Şekil 5.5). Bu yeni TL/OSL cihazı tüm fonksiyonlarıyla bilgisayar kontrollü bir cihazdır. Bu kontrolün sağlanabilmesi ve elde edilen ölçüm sonuçlarının analiz edilebilmesi için “Analyst” ve “Sequence” adı verilen iki adet program kullanılmaktadır.

Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi hem TL hem de OSL ölçümlerini yapabilmektedir. Sistem, 48 örneğin;

- Oda sıcaklığıyla 700°C arasında herhangi bir sıcaklığa kadar her bir örneğin ayrı ayrı ısıtılmasını sağlamakta,
- Sürekli dalgada (CW) ve lineer modülasyonlu OSL (LM-OSL) modunda değişik ışık kaynakları kullanarak optiksel uyarılma sağlamakta,
- Radyoaktif beta (β) kaynağı ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) yardımıyla örneklerin her birinin ayrı olarak radyasyona tutulmasına izin vermektedir.

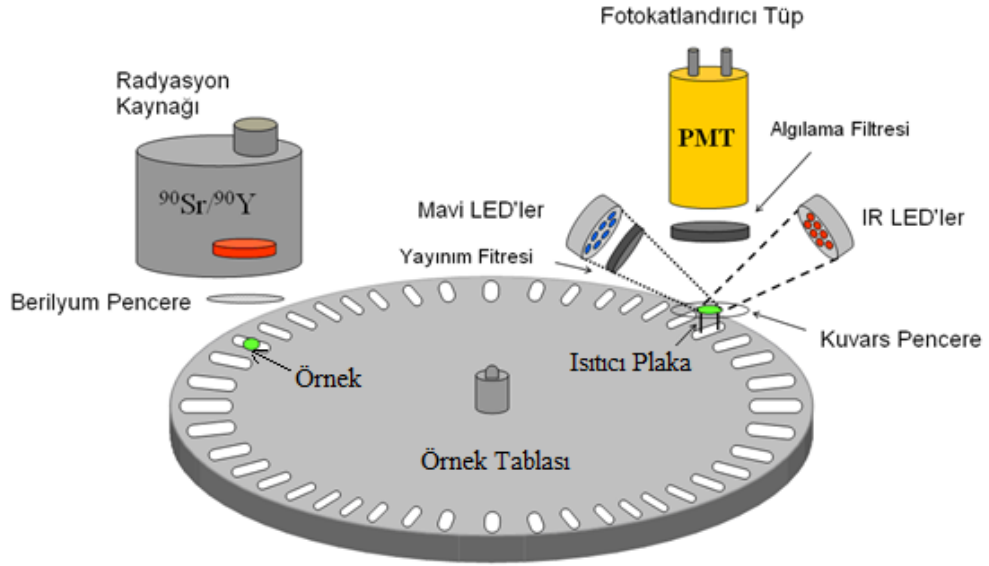
Ayrıca, TL/OSL cihazının bir diğer avantajı da örneklerin OSL ve TL ölçümleri sırasında istenilen sürelerle ön ısıtmaların (pre-heat) yapılabilmesidir. Ayrıca, OSL ölçümü istenilen bir ön ısıtma sıcaklığında sabit tutularak da yapılabilir.



Şekil 5.5. Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sisteminin genel görünümü.

Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi 5 temel bölümden oluşmaktadır (Şekil 5.6):

- IR ve Mavi Işık Kaynağı,
- PM Tüpü (fotokatlandırıcı),
- Radyasyon Kaynağı,
- Isıtma sistemi,
- Kontrolör



Şekil 5.6. Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sisteminin şematik gösterimi (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

Bir fotokatlandırıcı tüp ve uygun algılama (dedeksiyon) filtreleri bulunduran bir ışık algılama sistemi tarafından lüminesans şiddeti ölçülmektedir. Örnek odası vakum veya azot akışı ile azot atmosferine sahip bir ortam oluşturulacak biçimde dizayn edilmiştir. Örnek odasında 48 örneğin bir arada okunmasını sağlayan örnek diski bulunmaktadır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. 48 örnek haznesine sahip örnek tablası ve örneklerin yerleştirildiği diskler (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

Risø TL/OSL cihazının ana bölümleri şunlardır:

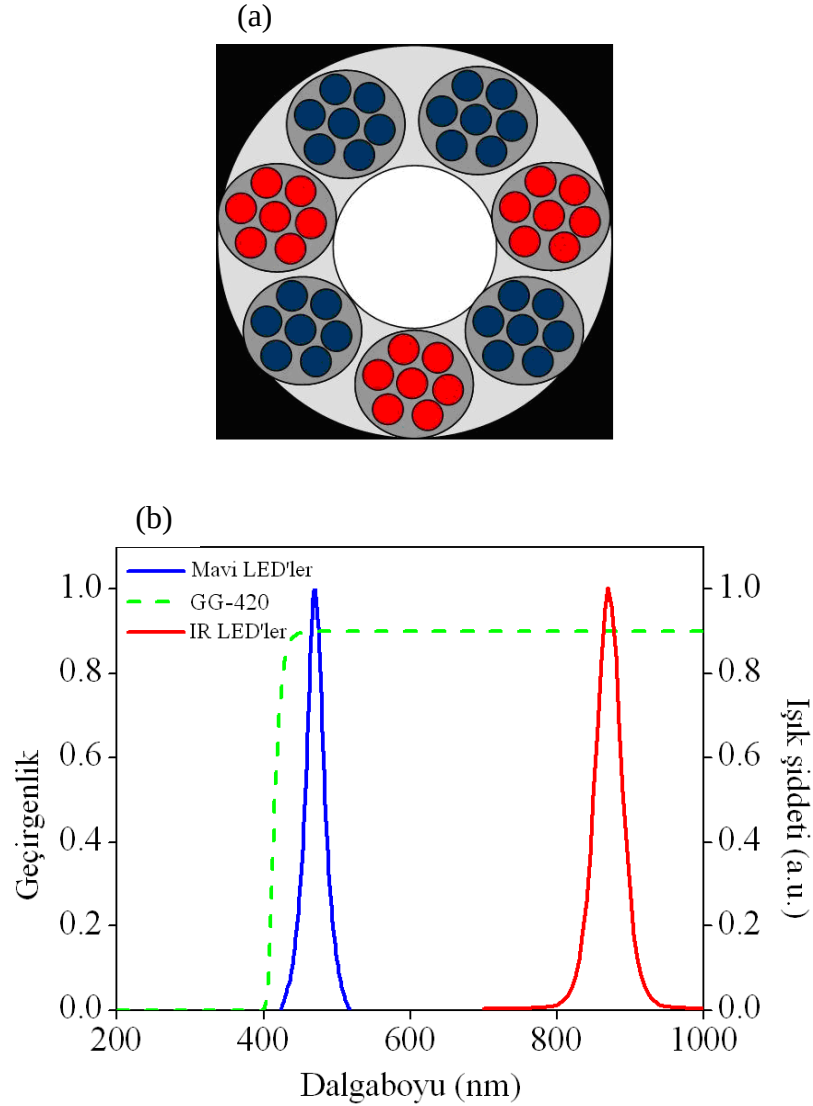
5.1.3.1.(1). IR ve Mavi Işık Kaynağı

Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sisteminin içerisinde örneklerin hem IR hem de mavi ışık ile uyarılabilmesini sağlayan, her birinde 4 adet mavi LED gurubu ve 3 adet IR LED gurubu bulunan yedişer adet LED'den oluşmaktadır. Bu LED'lerden hangisinin kullanılacağı cihazın arkasında bulunan düğmelerle önceden ayarlanmalıdır. Mavi LED'ler ve IR LED'ler sırası ile 40 mW/cm^2 , 135 mW/cm^2 'lik ışıma gücüne sahiptir.

Şekil 5.8'de de görüldüğü gibi Mavi LED'ler 450 nm civarında IR LED'ler ise 875 nm civarında dalga boylu ışık yaymaktadırlar. Böyle iki tip LED kullanarak hem kuvars hem de feldispat kristallerinin uyarılmaları mümkün olmaktadır. Bu durum bizlere önemli bir avantaj sağlamaktadır. Kuvars kristalinde bulunan tuzaklanmış elektronların uyarılması için 450 nm'lik dalga boyuna sahip ışık kaynağı yeterliyken feldispatta bu değer 875 nm civarındadır. Görüldüğü gibi Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi bu yönüyle çok fonksiyonel bir cihaz olma özelliği taşımaktadır.

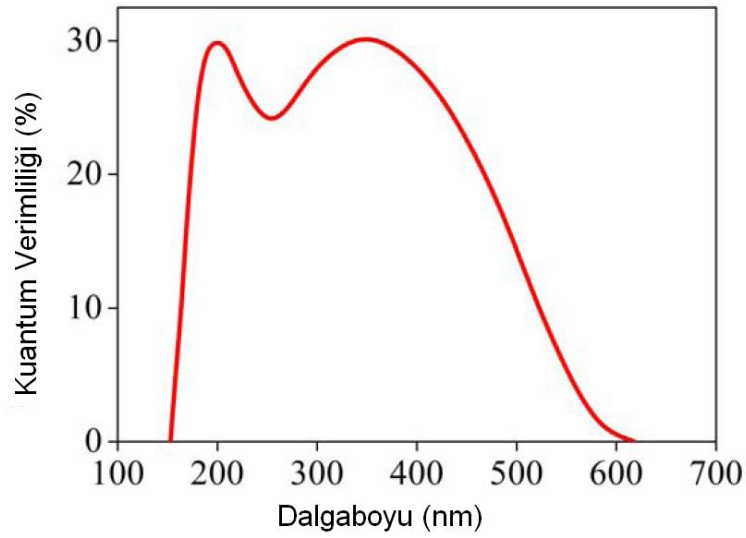
5.1.3.1.(2). Fotokatlandırıcı Tüp (PMT)

Lüminesans yayını bir fotokatlandırıcı tüp (Photomultiplier Tube-PMT) tarafından algılanmaktadır. PMT'deki ışığa karşı duyarlı eleman katottur. Katot ışık yayan bir malzeme ile kaplıdır, CsSb ve diğer alkali bileşikler bu materyal için oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Tipik olarak katoda görünür skalada on foton çarptığında bu ışık demeti birle üç arası elektron koparabilir ve ardından fotokatot tarafından yayımlanan bu elektronlar dinotlar ile fotokatot arasındaki voltaj gerilim farkından dolayı bir seri dinota doğru hızlandırılırlar. Elektronlar yeterli hıza ulaşmış ise dinotlara çarpması sonucu yüzeyden ikincil elektronlar kopacaktır.



Şekil 5.8. (a) IR ve Mavi LED'lerin dizilişi ve (b) bu LED'lere ait yayılım dalga boyuna ait grafik (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sisteminin okuyucusundaki standart PM tüpü Bialkali EMI 9235QB model numaralı bir fotokatlandırıcıdır. PM tüpünün kuantum verimliliğinin foton dalga boyuna göre grafiği aşağıda Şekil 5.9'da verilmiştir. PM tüpünün en verimli algılamayı yaptığı dalga boyu 200–400 nm arasındadır. Risø TL okuyucusunda PMT katodu ile örnek arasındaki mesafe 55 mm'dir.



Şekil 5.9. EMI 9235QB PMT (Bialkali) fotokatlandırıcı tüpünün kuantum verimliliğinin foton dalga boyuna göre grafiği (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

5.1.3.1.(3). Algılama Filtreleri

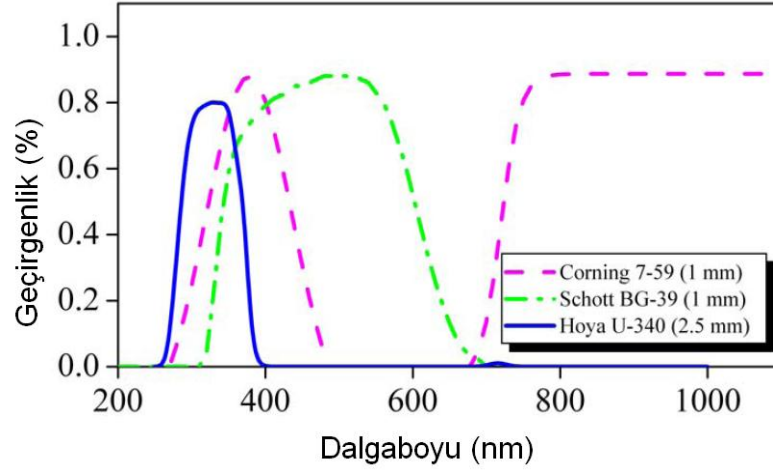
Risø TL/OSL cihazının kullanımı sırasında fotokatlandırıcı tüpün uyarım ışık kaynağından ve diğer çevresel ışık kaynaklarında etkilenmemeleri amacı ile optik filtreler kullanılmaktadır. Bu filtreler ölçümü yapılacak olan örneğin tipine ve kullanılacak olan TL/OSL ölçümüne bağlı olarak seçilmelidir.

Uyarım ışığının miktarı, örnekten yayılan lüminesans ışığından $\sim 10^{18}$ mertebesinde daha büyüktür. Bu nedenle yayılan lüminesansın ölçülebilmesi için, örnekten yansıyan uyarım ışığının doğrudan PMT'ye ulaşmasını önlemek amacı ile algılama filtreleri kullanılmalı ve spektral uyarım ve algılama penceresi iyi bir şekilde ayrılmış olmalıdır. Örneğin, kuvars 365 nm civarında baskın yayınıma sahipken birçok feldispat türü de 410 nm civarında baskın yayınıma sahiptir.

Risø TL/OSL okuyucusu 3 farklı algılama filtresi ile kullanılabilmektedir:

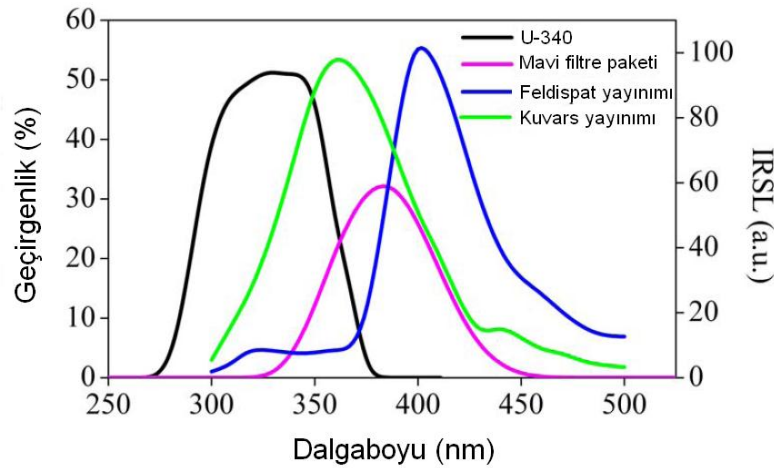
- Hoya U-340 (7,5 mm kalınlık Ø = 45 mm)
- Schott BG 39 (2 mm kalınlık Ø = 45 mm)
- Corning 7-59 (4mm kalınlık Ø = 45 mm)

Bu filtrelerin tipik karakteristikleri Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10. Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemine uyumlu üç algılama filtresinin geçirgenlik karakteristikleri (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

Kuvars OSL genellikle Hoya U340 kullanılarak okunmaktadır. Buna karşılık feldispat ise genellikle mavi filtre paketi olarak adlandırılan ve Schott BG-39 ile Corning 7-59 filtrelerinin birlikte kullanılması ile oluşturulan filtre kombinasyonu ile okunur. Bu mavi filtre paketinin geçirgenlik eğrisi ve kuvars ile feldispatın yayılım spektrumu Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



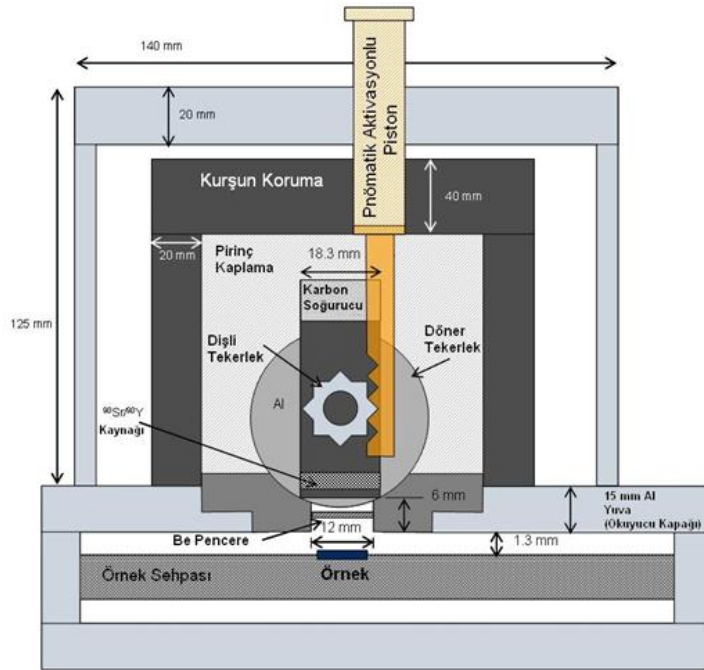
Şekil 5.11. Hoya U-340 ve mavi filtre paketinin geçirgenlik karakteristikleri ile kuvars ve feldispatın yayılım spektrumları (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

5.1.3.1.(4). Radyasyon Kaynağı: Beta ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$)

Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sisteminde bulunan beta ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) radyasyon kaynağı basınçlı hava ile çalışarak açılan bir kapağa sahip özel bir kurşun blok içerisine yerleştirilmiştir. Radyasyon kaynağı modülünün içerisinde, maksimum yarılanma ömrü 30 yıl olan 1.48 GBq (40 mCi) aktiflikte 2.27 MeV'lik enerjili β parçacıkları yayan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı bulundurulur. Kuvars için örnek pozisyonundaki maruz kalınan doz değeri 6.689 Gy/d'dır.

Kaynak basınçlı havayla kontrol edilen dönen bir paslanmaz çelik tekerlek içerisine monte edilmiştir.. Bu sistem ile örnek en az 1 saniye süresince ışınlatabilmektedir. Bu düzenek aracılığı ile kaynağı kapalı pozisyondan açık pozisyona getirmek 0,11 s sürmektedir. Bu açma kapama süresi bütün radyasyona tutma işlemleri için aynıdır ve uzun ışınlamalarda ihmal edilebilecek seviyededir (Markey ve ark., 1997).

β kaynağı ile örnek arası mesafe hem örneğin en yüksek doz oranında ışınlabilmesi hem de kaynak boyunca yakın mesafede doz oranında meydana gelebilecek sapma doz hatasına sebep olacağından en uygun şekilde ayarlanmalıdır. Bu nedenlerden dolayı kaynak ile örnek arası mesafe 7 mm olarak ayarlanmıştır.



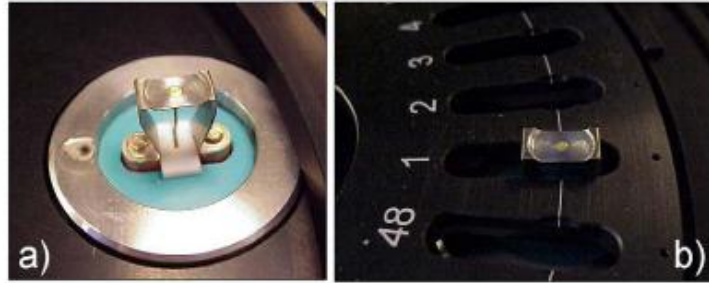
Şekil 5.12. Radyasyon kaynağının bulunduğu kurşun muhafaza (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

Kaynak ışınlayıcının içerisinde sırasıyla bir 20 mm kalınlığında alüminyum hazne, bir 20 mm kalınlığında kurşun hazne, bir yaylı conta ve en son olarak 25 mm kalınlığında alüminyum hazne ile çevrilidir (Şekil 5.12). Kaynak kapalı pozisyonda (varsayılan pozisyon) iken yukarıya, karbon soğurucuya doğru bakacak şekilde ayarlanmıştır. Kaynak açık pozisyonuna getirildiğinde (uyarılmış pozisyon) aşağı, ölçüm odasına doğru yönlendirilmektedir. 0.125 mm'lik bir Berilyum (Be) pencere ışınlayıcı ile ölçüm odası arasına yerleştirilmiştir ve bu pencere vakum ara yüzeyi olarak işlev görmektedir.

48 örneklik numune tablasındaki iki komşu örneğin merkezleri arasındaki mesafe 17 mm'dir. Bu yakın konumlanma, bir örneğin ışınlanması sırasında komşu örneklerin de belli bir miktar doz soğurmalarına yol açmaktadır. Bu olay ışınlama çapraz-etkisi olarak adlandırılır. Bu ışınlama çapraz-etkisi bitişik örnek için $\pm 0.250 \pm 0.003$, bir sonraki örnek için ise $\pm 0.014 \pm 0.002$ olacak şekilde ölçülmüştür (Thomsen ve ark., 2006).

5.1.3.1.(5). Isıtma Sistemi

Isısal uyarılma tam olarak PMT'nin altına yerleştirilmiş bir ısıtılan elemanın kullanılması ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 5.13). Bu ısıtılan elemanın iki fonksiyonu vardır. 1) Örneği ısıtır ve 2) örneği ölçüm konumuna yükseltir. Bu sayede LED'lerden gelen ışık daha az dağılmaya uğrayarak örneği aydınlatacak ve örnekten çıkan lüminesans ışığı da daha az kayıpla PM tüpüne ulaşacaktır. Isıtıcı band Kanthal'dan (yüksek dirençli alaşım) yapılmıştır. Isıtma, ısıtılan elemanın bir kontrollü alternatif akımla beslenmesiyle gerçekleştirilir. Sıcaklığın geri bildirim kontrolü için düşük kütleli bir Cromel-Alumel ısısal çift (thermocouple) ısıtıcı bandın altına monte edilmiştir. Isıtma, 20 kHz'de çalışan ve açma kapaması olmayan sürekli tam Sinüs dalgası jeneratörü ile kontrol edilmektedir. Isıtma sistemi örnekleri 1°C'den 20°C/s'ye kadar değişen doğrusal ısıtma hızlarında, 700°C'ye kadar ısıtma gücüne sahiptir. Isıtma bandı azot akışıyla soğutulur. Bu akış aynı zamanda ısıtma sistemini yüksek sıcaklıklardaki oksidasyondan korur.



Şekil 5.13. Isıtma sisteminin

- a) Ölçüme hazır pozisyonundaki görüntüsü
- b) Örnek tablası yerinde iken görüntüsü (DTU TL Okuyucu Kullanım Kılavuzu, 2013).

Ayarlanan sıcaklık ile ısıtıcı elemanın gerçek sıcaklığı arasındaki sistematik sapmayı ısıtma sistemini kontrol eden yazılım (bunun öncelikli sebebi elektronik sistemdeki lineerlikten sapmadır) düzeltir. Her bir ısıtma sisteminin kalibrasyonu kendine özgüdür. Kalibrasyondan sonra sistematik sapma tüm set sıcaklığı boyunca 0.25°C aralığında sabitlenmektedir (Yüksel, 2008; Nur, 2010).

5.1.3.1.(6). Kontrolör

Kontrolörün (Şekil 5.14) kontrol edilmesini sağlamak amacıyla Windows tabanlı bir yazılım kullanılmaktadır. Bu yazılım sayesinde ölçüm şartları oluşturulabilir, yazılabilir ve bu şartlara göre TL/OSL okuması yapılabilir. Kontrol programının en önemli özelliği içerisinde özel olarak geliştirilmiş bir komut dili çeviricisinin olmasıdır. Komut dili sistem donanımının ve veri kazanç metodlarının tam kontrolünü sağlayan yaklaşık 40 komut içermektedir. Komut editörü komutları (ör. “TL”) kontrolörün anlayacağı düşüş seviye komutlarına çevirerek bunların gerçekten gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğini kontrol eder ve örnekten elde edilen verileri cihazdan alır. Ayrıca kontrol dili kullanıcının kendi üst seviye komutlarının kolaylıkla oluşturmasına izin verir. Bunların yanı sıra kullanıcılar kendi kontrol programlarını yazabilmelerine (ör. Lab_view kullanarak) ve böylece alternatif ölçüm teknikleri inşa etmelerine olanak sağlamaktadır (Nur, 2010).



Şekil 5.14. Bir Windows komut programı tarafından yönetilen kontrolör.

5.1.3.2. X-Işınları Toz Kırınımı (XRD) Ölçüm Sistemi

Mineraller gibi amorf olmayan materyallerin üç boyutlu yapısı, bir kristal örgüdeki atomların tekrarlanan düzenli düzlemleriyle tanımlanır. Odaklanmış bir x-ışını demeti, atomların bu düzlemleriyle etkileşime girdiğinde, ışık demetinin bir kısmı yayılır, bir kısmı atom tarafından soğurulur, bir kısmı saçılır ve diğer bir kısmı da kırılır. Bir kristalleşmiş katı tarafından bir x-ışını demetinin kırınımı, bildiğimiz

gökkuşağı oluşumundaki su damlacıklarının ışığı kırmasına benzer. X-ışını, her bir mineralden, mineralin kristal yapısına ve atomların nasıl dizildiğine bağlı olarak, farklı şekilde kırılır. İncelemede kullanılan x-ışınları vakum altında bir tüp içerisinde üretilir.

Tüp içerisindeki sıcak bir filamentte akım uygulandığında filamentten büyük bir elektron yayılımı olur. Bu elektronların üretimi bir televizyon tüpündeki elektronların üretimine benzer. Genellikle 15-60 kV'lık bir yüksek gerilim tüp içerisine uygulanır. Bu yüksek voltaj elektronları hızlandırır ve hızlanan elektronlar genelde bakırdan yapılmış bir hedefe çarpar ve böylece x-ışınları üretilmiş olur. Oluşan bu x-ışınlarının dalga boyu hedefin karakteristiğini gösterir.

X-ışınları toplanır ve ince toz haline getirilmiş (10 mikrondan daha küçük) örnek üzerine gönderilir ve bir dedektör yardımıyla x-ışını sinyali tespit edilir. Bir x-ışını, bir örneğe çarpıp kırıldığında Bragg Yasasının uygulanması ile örnekteki atomların düzlemleri arasındaki mesafeyi ölçebiliriz. Bragg Yasası:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada,

n : kırılmış demetlerin derecesi (n , tek sayı)

λ : gelen x-ışını demetinin dalga boyu

d : atomların komşu düzlemleri arasındaki mesafe

θ : x-ışını demetinin gelme açısıdır.

Denklemden, λ 'yı bildiğimiz ve θ 'yı ölçebildiğimiz için d mesafelerini hesaplayabiliriz. d mesafelerinin karakteristiği, örnekteki mevcut mineral veya mineraller hakkında bir ipucu sağlar. Standart referanslar ve ölçüm sonuçları karşılaştırılıp yorumlama yapıldığında, bu ipuçları materyalin tanınmasında yol gösterici olur.

Birçok analitik teknik, materyallerin karakteristiğini belirlemek için kullanılır. XRD (X-Işını Kırınım) yöntemi bu tekniklerden biridir. XRD, minerallerin belirlenmesi için kullanılan yararlı bir tekniktir. XRD, araştırmacılara

minerallerin iyi bir şekilde tanımlanması için hızlı ve güvenilir sonuçlar sağlar. XRD, özellikle ince tanecikli minerallerin ve karışımların belirlenmesi için faydalıdır ve temel belirlemenin dışında ek bilgiler de sağlayabilir. Eğer örnek bir karışımsa, XRD verileri, mevcut farklı minerallerin oranını tayin etmek için kullanılabilir. XRD yöntemiyle elde edilebilecek diğer bilgilerse, mevcut mineral veya minerallerin kristallik derecesi, minerallerin yapısal durumları gibi özellikler olarak sıralanabilir.

Çalışmalar sırasında, Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Malzeme Karakterizasyonu Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi kullanılmıştır.

Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi, yüksek gerilim jeneratörü sabitlenmiş 30 kV potansiyelinde ve yine sabit 15 mA'lık çıkış akımında tam otomatik ve bilgisayar kontrollü olarak çalışma kapasitesine sahiptir. Yüksek potansiyel üretim tekniği, yüksek frekans Cockcroft-Walton yöntemine dayalıdır. Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi, x-ışını kaçaklarına karşı korumalı olan, özel kabin içerisindedir. Sistem kesintisiz ve regüleli otomatik kesintiz güç kaynağı ile beslenmekte olup, elektrik kesilmesi durumunda cihazın çalışmaya devam etmesini sağlamaktadır. Sistem, Toshiba A-20, A-41 veya Phillips PW22XX gibi x-ışınları tüpleri ile kullanılabilme özelliğine sahiptir. Ölçüm sistemi, $\text{CuK}\alpha$ ışınımlı 0.154 nm dalga boylu ışınlar kullanmaktadır. Sistemde monokromatize x-ışını elde etmek amacıyla grafit monokromatör veya filtreler kullanılmaktadır. Numuneden difrakte olan x-ışınları NaI (Tl) tipi sintilasyon dedektörü ile toplanmakta ve sisteme bağlı bulunan bilgisayar ünitesi yardımıyla değerlendirilmektedir. Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi Şekil 5.15'te görülmektedir.



Şekil 5.15. Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi.

Difraktometre ölçüm çapı 150 mm olup difraktometre konumu düşey olarak ayarlanmıştır. Difraktometre konfigürasyonları tüp çeşidine bağlı olarak $\theta - \theta$ veya $\theta - 2\theta$ olarak seçilebilmektedir. Ölçümler isteğe bağlı olarak “hızlı ölçüm” konumunda da yapılabilmektedir. Numenin ölçüm aralığı 2θ cinsinden -3° ile 145° açı aralığında yapılabilmektedir. Difraktometrede sıfır noktası düzeltmesi aletin kendisi tarafından kuvarz standart kullanılarak otomatik olarak yapılmaktadır.

Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sisteminin kontrol ve ayarları otomatik olarak sisteme bağlı bulunan bilgisayar ve bu bilgisayarda yüklü olan ve XRD toz deseni veri değerlendirmelerini yapmaya yarayan PDXL hazır paket program aracılığıyla yapılmaktadır.

5.1.3.3. Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Floresans Spektrometresi (WDXRF) Ölçüm Sistemi

X ışını floresans analizi (XRF) her çeşit numunede, sıvı, katı ve toz farkı olmadan elementel analiz yapmak için kullanılan en iyi analitik tekniklerden birisidir. XRF basit ve hızlı numune hazırlığıyla Bordan (B) Uranyuma (U) kadar olan element konsantrasyonlarını %100 ppm seviyesinin altında yüksek kesinlik ve doğruluk oranıyla vermektedir. Hızlı, duyarlı, kullanım kolaylığı ve malzemeye zarar verip vermemesi gibi özellikleri göz önüne alındığında teknolojik ve bilimsel

araştırmalardaki önemi daha da artmaktadır. XRF tekniği, genel olarak foton-madde etkileşmesi sonucu meydana gelen karakteristik x-ışınları ve saçılma fotonlarının nicel ve nitel değerlendirilmesine bağlı olarak uygulanan bir tekniktir. XRF cihazları temel olarak 2 farklı ölçüm prensibi kullanırlar. Enerji Dağılımlı X-Işını Floresans (EDXRF) olarak adlandırılan sistemler, analiz edilen örnekten elde edilen x-ışınlarının enerjisini hesaplayarak elementleri tayin ederken, gelen ışınları da sayarak element miktarlarının belirlenmesini sağlarlar. Dalga Boyu Dağılımlı X-Işını Floresans (WDXRF) ise örnekten elde edilen x-ışınlarını önce özel kristallerde yansıtıktan sonra yansıma açılarını tespit ederek elementleri ve ışınları sayarak da miktarlarını belirler. Genel olarak EDXRF sistemlerinin hassasiyeti kullanılan detektörün çözünürlüğüne, WDXRF sistemlerde ise hassasiyet, kullanılan x-ışını tüpünün gücüne göre değişmektedir.

Çalışmalar sırasında, Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi Laboratuvarları'nda bulunan Rigaku marka ZSX Primus II model WDXRF ölçüm sistemi kullanıldı.

Rigaku marka ZSX Primus II model WDXRF ölçüm sistemi Şekil 5.16'da görülmektedir.



Şekil 5.16. Rigaku marka ZSX Primus II model dalga boyu dağılımlı X-Işını floresans spektrometresi cihazı (XVIII).

5.1.3.4. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM)

FE-SEM ile seramik, metal, polimer, ince film, jeolojik malzemeler ve biyolojik numunelerin topografi, morfoloji, şekil, boyut, bileşim ve kristallografik yapıları hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Zeiss marka Supra 55 model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobunda bulunan ikincil elektron görüntü (SE), in-lens SE, geri yansıyan elektron görüntü (BSE) ve katodoluminesans (CL) dedektörleri ile yüksek çözünürlükte görüntü elde edilebilmektedir. Cihazla beraber EDS sistemi ile belirlenmiş bir nokta, çizgi ve alan taraması ve seçilmiş alan X-ışın haritalanması ve bu bölgelerde kalitatif ve kantitatif analizler yapılabilir. Cihazda yalıtkan numunelerin analizi için numune hazırlamada kullanılmak üzere yüksek vakum sputter platin kaplama cihazı ve karbon kaplama ataçmanı, ayrıca biyolojik örnekler için kritik nokta kurutucusu mevcut olduğundan, dokularda fizyolojik veya patolojik olarak, ya da deneysel yöntemlerle ortaya çıkan morfolojik değişikliklerin analizi yapılarak yorumlanabilmektedir.

Çalışmalar sırasında, Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi Laboratuvarları'nda bulunan Zeiss marka Supra 55 model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ölçüm sistemi kullanıldı.

Zeiss marka Supra 55 model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ölçüm sistemi (Şekil 5.17) Everhart-Thornley ikincil elektron ve yüksek verimli lens detektörlere sahip olup 0.1 kV ile VP modunda 30 kV arasında değişebilen hızlandırma gerilimi üretebilmektedir. Büyütme oranı 12x ile 900,000x arasında değişmekle beraber çözünürlüğü,

15 kV hızlandırma geriliminde 1.0 nm,

1 kV hızlandırma geriliminde 1.7 nm,

0.2 kV hızlandırma geriliminde 3.5 nm,

30 kV (VP modunda) hızlandırma geriliminde 2.0 nm

olarak ayarlanabilmektedir.



Şekil 5.17. FE-SEM ölçüm sistemi.

5.1.3.5. Termogravimetrik Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA) Ölçüm Sistemi

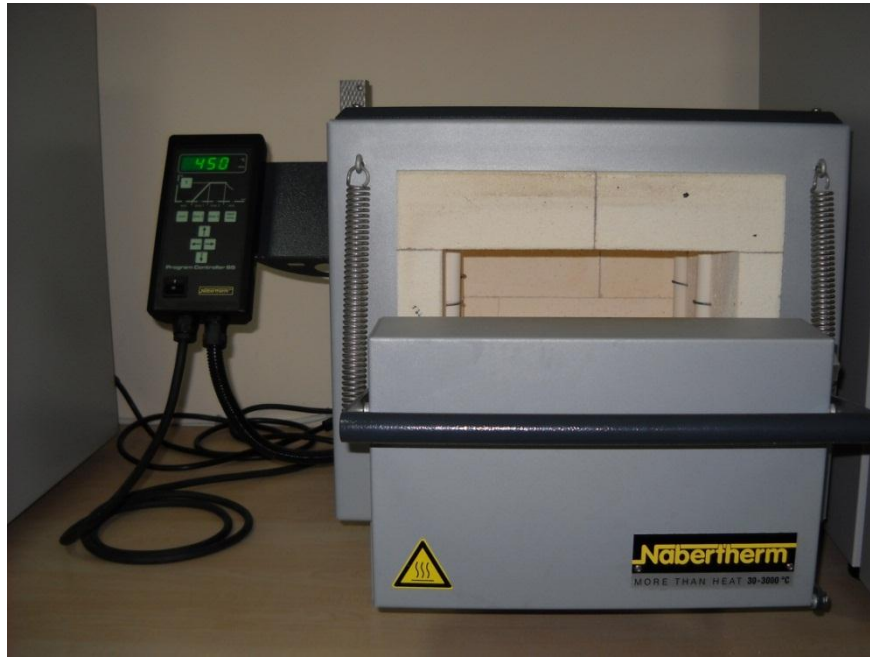
Yapılan çalışmada kullanılan dozimetrik malzemelerin termogravimetrik diferansiyel termal analizleri (TG/DTA) Adıyaman Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü'nde bulunan Extar TG/DTA 7300 model ölçüm sistemi ile yapılmıştır. Ölçümler yapılırken örnekler oda sıcaklığından 1000°C'lik sıcaklığa kadar 10°C/dk.'lık ısıtma hızı ile ısıtıldı ve veriler kaydedildi.

5.1.3.6. Tavlama Fırınları

Yapılan çalışmada kullanılan susuz boraksın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, Etibor-68) yüksek sıcaklıklarda tavlama için Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarı İletken İnce Film Üretim Laboratuvarı'nda bulunan özel olarak tasarlanmış mikroişlemci kontrollü bir Nabertherm GmbH tipi elektrikli fırınla yapıldı (Şekil 5.18). Kullanılan fırının 0°C ile 300°C arasında sıcaklık hassaslığı $\pm 2^\circ\text{C}$, 300°C ile 3000°C arasındaki yüksek sıcaklık ısıtma işlemlerinde ise $\pm 5^\circ\text{C}$ 'dir.

Sıcaklık ayarı oda sıcaklığı ile 3000°C arasında 1°C'lik hassasiyetle ayarlanabilmektedir. Fırının içerisi özel tuğlalarla kaplanmış olup bu tuğlalar fırının geç ısınıp geç soğumasını sağlamaktadır. Isıtma işlemi sırasında sürekli olarak fırının sıcaklığı dijital olarak okunabilmektedir. Her tavlama işleminden sonra örnek soğuk bir aliminyum levhanın üzerine konularak oda sıcaklığına kadar soğutulur.

Ayrıca $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ bor mineralinin katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle Ag ile katkılanarak kristallendirilmesi ve SCS yöntemi ile üretilen $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ dozimetrik malzemesinin kristallendirilmesi için yapılan yüksek sıcaklıkta tavlama işlemleri, Şekil 5.19'da gösterilen ve Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Malzeme Üretim Laboratuvarı'nda bulunan özel olarak tasarlanmış Protherm marka yüksek sıcaklık fırını kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.18. Nabertherm marka tavlama fırını.



Şekil 5.19. Protherm marka tavlama fırını.

Dozimetrik malzemeleri nemden korumak için Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Termoluminesans Dozimetresi ve Medikal Fizik Laboratuvarı'nda bulunan özel olarak tasarlanmış mikroişlemci kontrollü bir Memmert Model INB 400 tipi elektrikli inkubatör kullanıldı (Şekil 5.19). Hazırlanan örnekler deneysel çalışmalar boyunca bu inkubatörde 40°C'de tutularak nem alması önlendi. Kullanılan Memmert Model INB 400 tipi elektrikli inkubatör çift kapılı olup sıcaklığı 20°C ile 70°C arasında 0.5°C'lik hassasiyetle ayarlanabilmektedir.



Şekil 5.20. Memmert Model INB 400 tipi elektrikli inkubatör.

5.1.3.7. Agat Havan ve Porselen Krozeler

Çalışmada kullanılan dozimetrik malzemelerin öğütülerek toz haline getirilmesi için agat havan kullanılmıştır. Agat havanın üretim malzemesi olan agat Mohs sertlik ölçeği 7 olan çok sert bir malzeme olup kırılma ve çizilmeye karşı oldukça dayanıklıdır. Bu nedenle öğütme sırasında örneklerle karışma olasılığı çok düşüktür.

Agat havan kullanılarak öğütülmüş örneklerle toz haline getirilmiş farklı katkı malzemelerinin eklenmesinden sonra eklenen malzemelerle örneklerin homojen olarak karıştırılması ve karışımın yüksek sıcaklıklarda tavlanması sırasında değişik boyut ve şekillerde porselen krozeler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agat havan ve porselen krozeler Şekil 5.21’de görülmektedir.



Şekil 5.21. Farklı boyutlardaki agat havan ve porselen krozeler.

5.1.3.8. Elekler

Agat havan kullanılarak öğütülen örnekler 45 ile 200 μm arasında farklı elek boyutlarına sahip Retsch marka elekler kullanılarak elenmiş ve 90-140 μm parçacık boyutuna sahip örnekler alınarak ölçümlerde kullanılmıştır. Ayrıca bu eleme işlemi ile örnekler farklı tanecik boyutlarında gruplandırılarak katkılama işlemleri sırasında homojen bir dağılım oluşturulabilmesine olanak sağlanmıştır. Şekil 5.22’de kullanılan elekler görülmektedir.



Şekil 5.22. Farklı elek boyutlarına sahip Retsch marka elekler.

5.1.3.9. Su Arıtma Cihazı

Deneyisel çalışmalar boyunca kullanılan laboratuvar araç-gereçlerinin temizlenmesi sırasında her hangi bir kontaminasyon oluşmaması için Human Power

I marka (Şekil 5.23) su arıtma cihazı ile arıtılan saf su kullanılmış ve temizlenen araç-gereçler inkubatörde kurutulmuştur. Ayrıca deneyler için hazırlanan sulu çözeltilerde de bu cihaz tarafından arıtılan saf su kullanılmıştır.



Şekil 5.23. Human Power I marka su arıtma cihazı.

5.1.3.10. Doğrusal Hızlandırıcı

Susuz boraks örneklerinin fotonlarla ışınlanması için Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı'nda bulunan VARIAN marka CLINAC 600C DBX model doğrusal hızlandırıcı kullanılmıştır (Şekil 5.24). Örneklerin farklı dozlarda ışınlanması işlemleri sırasında, 6 MV enerjili fotonlar kullanılmıştır. Absolut doz değerleri PTW Farmer TM30013 iyon odası ve PTW Unidos Weblin T10021 elektrometre kullanılarak elde edilmiştir. Işınlama işlemleri SSD 100 cm, alan açıklığı $10 \times 10 \text{ cm}^2$ olacak şekilde 1.5 cm'lik derinlikte katı su fantomu kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.24. VARIAN marka CLINAC 600C DBX model doğrusal hızlandırıcı.

5.2. Metod

5.2.1. Doğal Susuz Boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) Örneklerinin Hazırlanması ve Deneysel Aşamaları

5.2.1.1. Örneklerin Hazırlanması

Bu araştırmada kullanılan doğal susuz boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) örnekleri Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğüne Bağlı Eskişehir ili Kırka bucağında kurulu bulunan Kırka Bor İşletmesi'nden temin edilmiştir. Temin edilen örnekler agat havan kullanılarak öğütüldükten sonra 45, 90, 140 ve 200 μm elek aralıklarına sahip Retsch marka eleklerle elenmiştir. Eleme işlemi sonrasında örnekler parçacık boyutlarına (pb) göre dört gruba ($\text{pb}<45$, $45<\text{pb}<90$, $90<\text{pb}<140$ ve $140<\text{pb}<200$ μm) ayrılmıştır. Parçacık boyutunun termolüminesans (TL) ışına tepelerine etkisi ile ilgili çalışmada bu grupların dördü, yapılan diğer tüm çalışmalarda ise $90<\text{pb}<140$ μm aralığında parçacık boyutlarına sahip 30 mg'lık örnekler kullanılmıştır.

5.2.1.2. Termal Analizler (TG/DTA)

İlk aşamada, çalışmada kullanılacak olan doğal susuz boraks örneklerinin sıcaklığa bağlı olarak kütle değişimini tespit eden Termogravimetrik Analiz (TG) ve referans ile örnek arasındaki sıcaklık farkını tespit eden Diferansiyel Termal Analiz (DTA) gibi termal analizler yapılmıştır. Yapılan termal analizler sonucunda doğal susuz boraks örneğinin tabakalar arası su çıkışı (dehidrasyon), kristal yapı suyunun çıkışı (dehidroksilasyon) ve erime (yeni mineral faz oluşumu, 739.1°C), sıcaklıkları tespit edilmiştir.

5.2.1.3. X-Işını Toz Kırınım (XRD) ve X-Işını Floresans (XRF) Analizleri

90<pb<140 µm aralığında parçacık boyutlarına sahip (toz) doğal susuz boraks örneklerinden 50 mg'lık 3 toz örnek alınıp termal analiz sonuçları da göz önüne alınarak ilk örnek herhangi bir işleme tabi tutulmadan, ikinci örnek 500°C'de 1 saat ve üçüncü örnek 500°C'de 2 saat tavlannmıştır. Hazırlanan bu örneklerin, XRD analizleri, Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Karakterizasyon Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi ile yapılmıştır.

Benzer şekilde 90<pb<140 µm aralığında parçacık boyutuna sahip doğal susuz boraks örneklerinden 100 mg'lık toz örnek alınıp herhangi bir ısı işlem uygulanmadan XRF analizleri, Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Rigaku marka ZSX Primus II model dalga boyu dağılımlı XRF spektrometresi cihazı ile yapılmıştır.

5.2.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Doğal susuz boraks örneklerinden 90 µm ile 140 µm aralığında parçacık boyutuna sahip 100 mg'lık toz örnek alınarak herhangi bir ısı işlem tabi tutulmadan Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Zeiss Supra 55 model Taramalı Elektron Mikroskobu ile taranarak SEM resimleri çekildi.

5.2.1.5. Termoluminesans (TL) Ölçümleri

TL ölçümlerini yapmak için kullanılan 90<pb<140 µm aralığında parçacık boyutuna sahip 30 mg'lık doğal susuz boraks örnekleri, termal analizlerle (TG-DTA) beraber XRD ve XRF analizleri de göz önüne alınarak 500°C'de 1 saat tavlannmış ve deney sürecinde nem almaması için inkubatörde 45°C'de bekletilmiştir.

Susuz boraksın çalışma boyunca yapılan termoluminesans okumaları, aksi belirtilmedikçe örnekler Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi ile 200°C'ye kadar ön ısıtma yapıp bu sıcaklıkta 15 s tutulduktan sonra 2°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar ısıtılarak yapılmıştır.

5.2.1.5.(1). Doz Yanıtları Deneyi

Doz yanıtları deneyi aşamasında doğal susuz boraks (Etibor-68) örnekleri Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi içerisinde bütünleşik olarak bulunan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile 11 cGy ile 4.816 kGy arasında ısıtılmıştır. Yapılan her ısınlamadan sonra yine Risø TL/OSL ölçüm sistemiyle 2°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 450°C'ye kadar ısıtılarak TL ısıma tepeleri kaydedilmiştir. Bu ölçümler sonucunda çizilen grafiklerden TL ısıma tepeleri belirlenmiştir. Bu ısıma tepelerinin 130°C ve 250°C civarlarında iç içe geçmiş tepelerden oluşan iki belirgin tepe gözlenmiştir. Gözlenen bu tepelerden 130°C civarındaki tepeleri silip sadece yüksek sıcaklık tepelerini (derin tuzaklar) gözleyebilmek için 200°C'ye kadar ön ısıtma yapıp bu sıcaklıkta 15 s tutulduktan sonra 2°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar ısıtılarak TL ölçümleri yapılmasına karar verilmiştir.

Doz yanıtları deneyi ile ilgili alınan bu karardan sonra deney şu aşamalar takip edilerek yapılmıştır:

- Doğal susuz boraks (Etibor-68) örnekleri $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile 11 cGy ile 4.82 kGy arasında ısıtılmış,
- Her bir ısınlama işlemlerinden sonra 200°C'ye kadar ön ısıtma yapıp bu sıcaklıkta 15 s tutulmuş ve son olarak
- Örnekler, 2°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar ısıtılarak TL ölçümleri yapılarak TL ısıma tepeleri kaydedilmiştir.

5.2.1.5.(2). Tavlama Deneyleri

Önceki radyasyonların etkisinin silinmesi ve tuzakların kararlı hale getirilmesini sağlayan en uygun tavlama sıcaklığının ve tavlama süresinin belirlenebilmesi için tavlama deneyleri yapılmıştır. Tavlama deneyleri, uygun tavlama sıcaklığının belirlenmesi ve uygun tavlama süresinin belirlenmesi işlemlerinden oluşan iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada izlenen yöntem şu şekildedir: Tavlama süresi 10 dakika, test dozu 66.89 Gy olarak seçilip aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulanmıştır.

Adım 1. Örnek 66.89 Gy β dozu verilerek ışınlandı.

Adım 2. Herhangi bir tavlama işlemi olmaksızın ışınlanan örneğin TL okuması yapıldı.

Adım 3. Örnek 66.89 Gy β dozu verilerek ışınlandı.

Adım 4. Işınlanan örnek 50°C’de 10 dakika tavlandı. Tavlanan örnek oda sıcaklığına soğumaya bırakıldı.

Adım 5. Oda sıcaklığına soğuyan örneğin TL okuması yapıldı.

Adım 6. Her ışınlama sonrasında 50°C’lik artışlarla 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 ve 500°C’lik tavlama sıcaklıkları kullanılarak *Adım 4* ve sonrasında da *Adım 5* tekrarlandı.

Yapılan bu işlemler sonrasında tavlama sıcaklığına karşılık TL şiddeti grafiği çizilerek TL şiddetinin fonu (background) verdiği sıcaklık (400°C) uygun tavlama sıcaklığı olarak belirlendi.

İkinci aşamada izlenen yöntem ise şu şekildedir: Tavlama sıcaklığı 400°C, test dozu 66.89 Gy olarak seçilip ilk aşamada olduğu gibi bu kez sadece tavlama süreleri 0 ile 30 dakika arasında beşer dakikalık artışlarla değiştirilmiştir. Yapılan bu işlemler sonrasında tavlama süresine karşılık TL şiddeti grafiği çizilerek TL şiddetinin fonu (background) verdiği tavlama süresi (15 dakika) en uygun tavlama süresi olarak belirlenmiştir.

5.2.1.5.(3). Farklı Isıtma Hızları Deneyi

Farklı ısıtma hızları deneyi aşamasında doğal susuz boraks örnekleri iki gruba ayrılarak bu deneyler gerçekleştirilmiştir.

İlk grup, tavlama işlemine tabi tutulmadan 66.89 Gy beta dozu ile ışınladı ve her ışınlama sonrasında farklı ısıtma hızlarında (1, 2, 3, 5, 7, 10°C/s) TL okuması yapıldı.

İkinci grup, 400°C’de 15 dakika tavlandıktan sonra 66.89 Gy beta dozu ile ışınladı ve her ışınlama sonrasında farklı ısıtma hızlarında (1, 2, 3, 5, 7, 10°C/s) TL okuması yapıldı.

5.2.1.5.(4). Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi Deneyi

Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyi, doğal susuz boraks örnekleri tavlannmamış ve tavlannmış örnekler olarak iki gruba ayrılarak yapılmıştır.

İlk grup herhangi bir tavlama işlemi yapılmadan, ikinci grup ise 400°C’de 15 dakika tavlandıktan sonra 15 Gy beta dozu ile ışınladı. Her ışınlama sonrasında TL okuması yapıldı. Bu işlemler tavlannmış örnekler için 12, tavlannmamış örnekler içinse 11 defa tekrarlandı.

5.2.1.5.(5). Termolüminesans Işıma Tepelerine Parçacık Boyutunun Etkisinin Test Edilmesi Deneyi

Farklı parçacık boyutu (pb) aralıklarına sahip olan ($pb < 45$, $45 < pb < 90$, $90 < pb < 140$ ve $140 < pb < 200$ μm) üç grup susuz boraks örneği alınarak herhangi bir tavlama işlemi yapılmadan, ilk grup 33.445 Gy, ikinci grup 66.89 Gy ve üçüncü grup 133.78 Gy’lik beta dozlarıyla ışınladı. Her ışınlama işleminden sonra TL okumaları yapıldı.

5.2.1.5.(6). Yüksek Dozun Susuz Boraksın TL Hassasiyetine Etkisi

Yüksek dozun susuz boraksın TL hassasiyetine etkisinin test edilmesi için örnekler ışınlama öncesinde 400°C’de 15 dakika tavlandıktan sonra 10 Gy beta dozu ile ışınlanıp TL okumaları yapıldı. Benzer işlem 1 kGy beta dozu ile ışınlandıktan sonra ve tekrar 10 Gy’lik beta dozu ile ışınlanarak tekrarlandı.

5.2.1.5.(7). Sönüm (Fading) Deneyleri

Sönüm (fading) deneyleri için ilk aşamada 24 adet susuz boraks örneği hazırlandı (m=30 mg) ve bu örneklerin ilk 12 tanesi 400°C’de 15 dakika tavlarken diğer 12 tanesine herhangi bir ısı işlem uygulanmadı. İkinci aşamada tüm örnekler 66.89 Gy’lik beta dozu ile ışınladı. Üçüncü aşamada tavlansın ışınlansın ve tavlansın ışınlansın altışar tane iki grup örnek saklanmak üzere karanlık bir ortama, benzer şekilde geriye kalan tavlandıktan sonra ışınlansın ve tavlansın ışınlansın altışar tane iki grup örnek ise saklanmak üzere ışık alan laboratuvar ortamına konuldu.

Karanlık ortamda ve ışık alan laboratuvar ortamında saklanan örneklerden, belirlenen sürelerin (0, 7, 14, 30, 60 ve 90 gün) bitiminde her iki gruptan da hem tavlansın ışınlansın hem de tavlansın ışınlansın üçer örnek alındı. Alınan örneklerin oda sıcaklığından 600°C’ye kadar TL okumaları yapıldı.

5.2.1.5.(8). Foton (X-Işını) Doz Cevabı ve Sönüm Deneyleri

Parçacık boyutları 90-140 µm aralığında olan 0.75 g kütleli toz formundaki doğal susuz boraks (Etibor-68) örnekleri 4 x 2 cm²’lik boyutlarda şeffaf ince poşetler içerisine düzgün bir şekilde dağıtıldıktan sonra Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı’nda bulunan VARIAN marka CLINAC 600C DBX model doğrusal hızlandırıcı kullanılarak ışınladı. Örneklerin ışınlansın sırasında, 6 MV enerjili fotonlar kullanıldı. Mutlak doz değerleri PTW Farmer TM30013 iyon odası ve PTW Unidos Weblin T10021 elektrometre

kullanılarak elde edildi. Işınlama işlemleri, SSD (Source Surface Distance) 100 cm, alan açıklığı 10 x 10 cm² olacak şekilde katı su fantomu kullanılarak 1.5 cm'lik maksimum doz derinliğinde 1, 5, 10, 50, 100, 150, 300, 500, 800 ve 1000 cGy'lik mutlak doz değerleri kullanılarak yapıldı. Yapılan ışınlamalar sonrasında örnekler 48 saat bekletilip Risø TL/OSL ölçüm sistemiyle 5°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar ısıtılarak TL ışıma tepeleri kaydedildi.

Örneklerin sönüm (fading) deneyleri için 1000 cGy doz verilen örneklerden 10 mg'lık 3 adet örneğin ilk okuması ışınlama işleminden hemen sonra Risø TL/OSL ölçüm sistemiyle 5°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar yapıp geriye kalan örnekler ise ayrılarak karanlık bir ortamda beklemeye bırakıldı. Karanlık ortamda saklanan örneklerden, belirlenen sürelerin (1, 6, 12 saat, 4, 7, 14 gün) bitiminde alınan 10 mg'lık üç adet örneğin TL okuması Risø TL/OSL ölçüm sistemiyle 5°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar yapıldı.

5.2.2. Farklı Elementlerle Katkılanmış Sodyum Tetra Borat (Na₂B₄O₇) ve Magnezyum Borat (MgB₄O₇) Örneklerinin Hazırlanması ve Deneysel Aşamaları

5.2.2.1. Katı-Hal Sentez Reaksiyonu Yöntemi

Farklı elementlerle katkılanmış yeni malzemeler üretmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde başlangıç malzemesi ile oksit bazlı katkı malzemeleri uygun şartlar altında iyice öğütülerek ince toz haline getirilir. Toz haline getirilen malzemeler karışımın stokiometrisi göz önüne alınarak uygun miktarlarda tartılır ve tartılan toz malzemeler homojen bir karışım sağlanana kadar karıştırılır. Karıştırma işlemi sırasında öğütme ve malzemeleri karbonatlardan arındırmak için kalsinasyon işlemleri de uygulanabilir. Homojen karışımın sağlanmasından sonra karışım ana malzemenin termal özellikleri göz önüne alınarak seçilen yüksek bir sıcaklık değerinde uygun bir süre ile ısıtma işlemi tabi tutularak kristal formasyonunun oluşması sağlanır.

5.2.2.2. Çözelti Yanma Sentez Yöntemi (SCS)

Bu yöntemde üretilmek istenen başlangıç malzemesinin nitrat bileşenleri, bu başlangıç malzemesine katılacak olan katkı malzemelerinin nitratları ve yanmayı sağlayacak olan üre stokiometrilere göz önüne alınarak uygun miktarlarda tartılır. Tartılan malzemeler hot plate üzerindeki bir beher içerisine konulan saf suda belirlenmiş olan uygun bir sıcaklıkta karıştırılarak çözülür. Malzemeler saf su içerisinde çözülüp homojen bir çözelti hazırlandıktan sonra daha yüksek bir sıcaklık değerinde yapılacak olan çalışmanın amacına uygun olarak belirlenmiş bir süre ile karıştırılmaya devam edilir. Son olarak hazırlanmış olan homojen çözeltinin suyunu buharlaştırmak ve çökelmeyi sağlamak için karışım amaca göre belirlenmiş olan daha yüksek bir sıcaklığa çıkarılır ve bu sıcaklıkta çözeltinin suyu buharlaşana kadar tutulur. Çökelme işlemi meydana geldikten sonra oluşan malzeme öğütülerek ince toz haline getirilip yüksek sıcaklık fırınında belirli sürelerle ısıtılarak kristal formasyonunun oluşması sağlanır.

5.2.2.3. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ Örneklerinin Hazırlanması ve Seçimi

Bu araştırmada kullanılan farklı oranlarda gümüşle (Ag) katkılanmış $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ örnekleri katı-hal sentez reaksiyonu yöntemi kullanılarak hazırlandı. Farklı oranlarda bakır (Cu) ve gümüş (Ag) katkılı $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örnekleri ise çözelti yanma sentez (SCS, Solution Combustion Synthesis) yöntemi kullanılarak hazırlandı. $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örnekleri hazırlanırken, magnezyum nitrat ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), borik asit (H_3BO_3), üre ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) ve katkı oranlarına göre bakır nitrat ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$) ile gümüş nitrat (AgNO_3) hot plate üzerinde ısıtılarak uygulanarak saf suda çözülmüş daha sonra çözeltinin suyu buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma sonrası elde edilen örnekler agat havanda ezilip porselen krozellerle yüksek sıcaklıkta belirli sürelerle tavlansın ve böylece $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örnekleri elde edildi. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örnekleri agat havanda ezilerek Retsch marka eleklerle elendi. Eleme işlemi sonrasında örnekler parçacık boyutlarına (pb) göre dört gruba ($\text{pb} < 45$, $45 < \text{pb} < 90$, $90 < \text{pb} < 140$ ve $140 < \text{pb} < 200$ μm) ayrıldı.

Çalışmada kullanılan $MgB_4O_7:Cu,Ag$ ve $Na_2B_4O_7:Ag$ örnekleri 3 aliquot olarak hazırlanmış olup her bir aliquotta yer alan toz örnekler $90 < \mu m < 140$ parçacık boyutuna sahip olup kenarlıklı disklerle ~ 10 mg'lık kütleler halinde yerleştirilip kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılacak olan $Na_2B_4O_7$ ($Z_{etkin}=8.50$) örneklerine Ag ve MgB_4O_7 ($Z_{etkin}=8.37$) örneklerine ise Cu ve Ag katkılıdır. Farklı oranlarda katkılanan örneklerden en yüksek TL şiddetini veren örnekler seçilerek bu çalışmada kullanıldı. Katkılanmamış ve Ag katkılanan $Na_2B_4O_7$ örneklerine eşit miktarda doz (5 Gy) verilerek TL ışıma eğrileri kaydedildi ve katkılamanın etkisini görebilmek için karşılaştırıldı. Benzer şekilde katkısız ve Cu-Ag katkılı MgB_4O_7 örneklerine ~ 40 Gy beta dozu verilerek kaydedilen TL ışıma eğrileri karşılaştırıldı.

5.2.2.4. X-Işını Toz Kırınım (XRD) Analizleri

$90 < \mu m < 140$ μm aralığında parçacık boyutlarına sahip (toz) $Na_2B_4O_7$ (Sigma Aldrich), $Na_2B_4O_7:Ag$, MgB_4O_7 ve $MgB_4O_7:Cu,Ag$ örneklerinin her birinden 50 mg alınıp bu örneklerin, Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Karakterizasyon Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku Miniflex II XRD ölçüm sistemi ile $10-130^\circ C$ aralığında taranarak XRD analizleri yapıldı.

5.2.2.5. Termoluminesans (TL) Ölçümleri

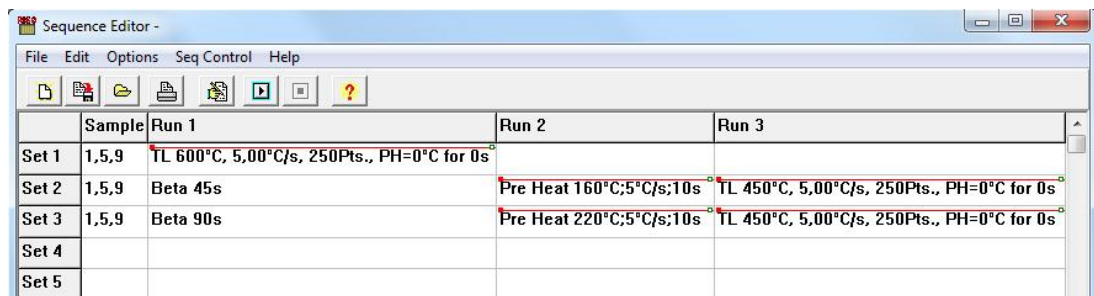
TL ölçümlerini yapmak için üçer aliquot olarak hazırlanan $Na_2B_4O_7:Ag$ ve $MgB_4O_7:Cu,Ag$ örnekleri kullanılmıştır. Çalışma boyunca yapılacak olan termoluminesans okumalarında kullanılacak olan protokollerde uygulanacak olan ön ısıtma işlemleri Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi ile $Na_2B_4O_7:Ag$ ve $MgB_4O_7:Cu,Ag$ örnekleri için ayrı ayrı yapılan ön ısıtma deneyleri ile belirlenmiştir.

5.2.2.5.(1). Ön Isıtma Deneyleri

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri için yapılan ön ısıtma deneylerinde örnekler $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile 45 s (5 Gy) ışınladı, her ışınlama sonrasında 100°C 'den 300°C 'ye kadar 10°C 'lik artışlarla ön ısıtma yapıldı ve ön ısıtma işlemleri sonrasında 450°C 'ye kadar 5°C/s 'lik ısıtma hızı ile TL ışıma eğrileri kaydedildi. Yapılan ölçümler sonucunda düşük sıcaklık tepelerini tamamen silen ve sadece üzerinde çalışılacak olan dozimetrik tepenin net olarak elde edilebildiği 160°C ön ısıtma sıcaklığı olarak belirlendi.

$\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri için yapılan ön ısıtma deneylerinde örnekler $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile 90 s (10 Gy) ışınladı, her ışınlama sonrasında 100°C 'den 340°C 'ye kadar 15°C 'lik artışlarla ön ısıtma yapıldı ve ön ısıtma işlemleri sonrasında 450°C 'ye kadar 5°C/s 'lik ısıtma hızı ile TL ışıma tepeleri kaydedildi. Yapılan ölçümler sonucunda düşük sıcaklık tepelerini tamamen silen ve sadece üzerinde çalışılacak olan dozimetrik tepenin net olarak elde edilebildiği 220°C ön ısıtma sıcaklığı olarak belirlendi.

Ön ısıtma deneyleri göz önüne alınarak, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri için çalışma boyunca yapılan termoluminesans okumaları, aksi belirtilmedikçe örnekler Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi ile $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri 160°C 'ye (Şekil 5.25 Set 2) ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri için ise 220°C 'ye (Şekil 5.25 Set 3) kadar ön ısıtma yapıp bu sıcaklıkta 10 s tutulduktan sonra 5°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 450°C 'ye kadar ısıtılarak yapılmıştır.



	Sample	Run 1	Run 2	Run 3
Set 1	1,5,9	TL 600°C , $5,00^\circ\text{C/s}$, 250Pts., PH= 0°C for 0s		
Set 2	1,5,9	Beta 45s	Pre Heat 160°C ; 5°C/s ; 10s	TL 450°C , $5,00^\circ\text{C/s}$, 250Pts., PH= 0°C for 0s
Set 3	1,5,9	Beta 90s	Pre Heat 220°C ; 5°C/s ; 10s	TL 450°C , $5,00^\circ\text{C/s}$, 250Pts., PH= 0°C for 0s
Set 4				
Set 5				

Şekil 5.25. Ön ısıtma deneyleri için kullanılan sequence protokolünün görünümü.

5.2.2.5.(2). Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi Deneyi

Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyleri yapılırken $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri 45 s (5 Gy) ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri ise 90 s (10 Gy) beta dozu ile ışınladı. Her ışınlama sonrasında TL okuması yapıldı. Bu işlemler her iki grup için de 10 defa tekrarlandı.

5.2.2.5.(3). Doz Yanıtları Deneyi

Doz yanıtları deneyi aşamasında hazırlanan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi içerisinde bütünleşik olarak bulunan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile 11 cGy ile 4.013 kGy arasında ışınladı. Yapılan her ışınlamadan sonra TL okumaları, Risø TL/OSL ölçüm sistemiyle örnekler Bölüm 5.2.2.3.(1)'de belirtilen TL okuma protokolleri kullanılarak yapıldı ve TL ışıma tepeleri kaydedildi. Elde edilen TL ışıma tepeleri kullanılarak her iki örneğin doz cevap eğrileri oluşturuldu.

5.2.2.5.(4). Farklı Isıtma Hızları Deneyi

Farklı ısıtma hızları deneyi aşamasında $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri 45 s (5 Gy) ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri ise 90 s (10 Gy) beta dozu ile ışınladı ve her ışınlama sonrasında farklı ısıtma hızlarında (1, 2, 3, 5, 7, 10°C/s) TL okuması yapıldı.

5.2.2.5.(5). Yüksek Dozun TL Hassasiyetine Etkisi

Yüksek dozun TL hassasiyetine etkisinin test edilmesi için ilk olarak $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri 180 s (20 Gy) beta dozu ile ışınlanıp ışınlama işleminden sonra TL okumaları yapıldı. TL okumaları, benzer şekilde her iki örnek önce 17940 s (2 kGy) beta dozu ile ışılandıktan sonra ve bu işleminden sonra tekrar 180 s (20 Gy) beta dozu ile ışınlanarak tekrarlandı. Yapılan ışınlama işlemlerinin her birinden sonra TL ışıma tepeleri kaydedildi. Örneklerin yüksek doz

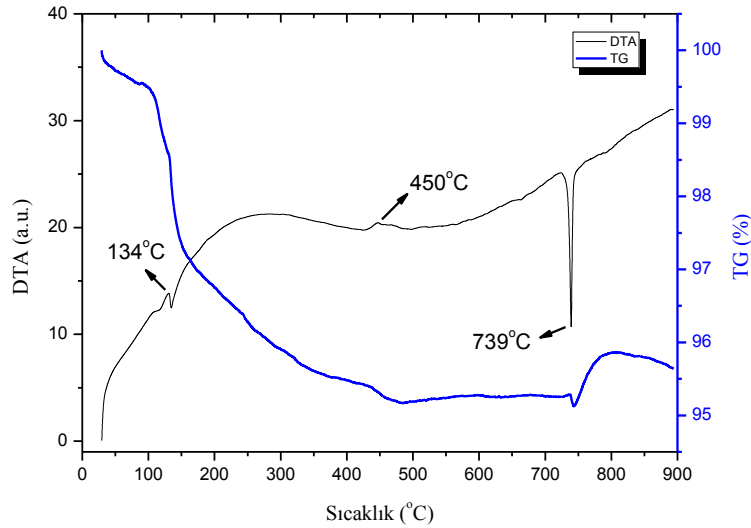
öncesi elde edilen TL ışıma tepeleri ile yüksek doza maruz bırakıldıktan sonraki TL ışıma tepeleri karşılaştırılarak yüksek dozun TL hassasiyetine etkisi test edildi.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Doğal Susuz Boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) Örnekleri ile Yapılan Çalışmanın Bulguları

6.1.1. Termal Analizlerle (TG/DTA) İlgili Bulgular

Termal analizler öncesinde herhangi bir ısıtılma işlemine tabi tutulmamış olan susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) örneğinden 90 μm ile 140 μm aralığında parçacık boyutuna sahip 2.325 mg'lık toz örnek alınarak TG/DTA analizlerinde kullanıldı. Analizler sonucunda elde edilen verilerle çizilen grafik Şekil 6.1'de görülmektedir.



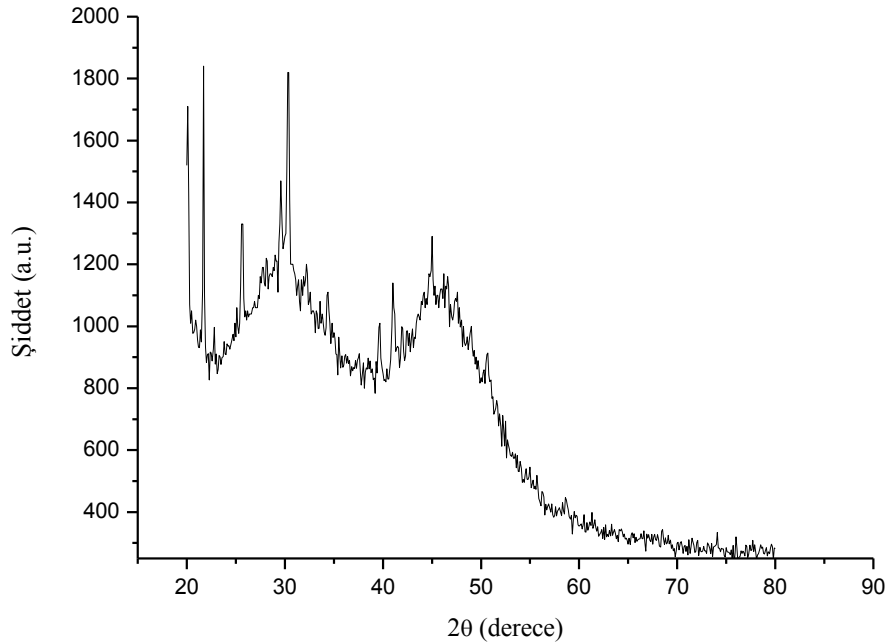
Şekil 6.1. Susuz boraksa ait TG/DTA eğrileri.

Şekil 6.1'de görüldüğü gibi DTA analiz sonuçlarına göre çalışmada kullanılan susuz boraks mineralinin 134°C ile 739°C civarlarında endotermik ve 450°C civarında ise ekzotermik tepeler verdiği görülmektedir. Bu bulgular ışığında doğal susuz boraksın termal özellikleriyle ilgili olarak 134°C civarında tabakalar arası su çıkışının (dehidrasyon), 450°C civarında kristal yapı suyunun çıkışının (dehidroksilasyon) ve 739°C civarında ise yeni mineral faz oluşumunun (erime noktası) meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca TG analizi sonucunda susuz boraksın

450°C'lik sıcaklığa ulaşana kadar başlangıç kütlesinin yaklaşık olarak %5'ini kaybettiği ve bu kütle kaybının 739°C'lik erime noktası sıcaklığına kadar sabit kaldığı Şekil 6.1'de görülmektedir.

6.1.2. X-Işını Toz Kırınım (XRD) ve X-Işını Floresans (XRF) Analizleri ile İlgili Bulgular

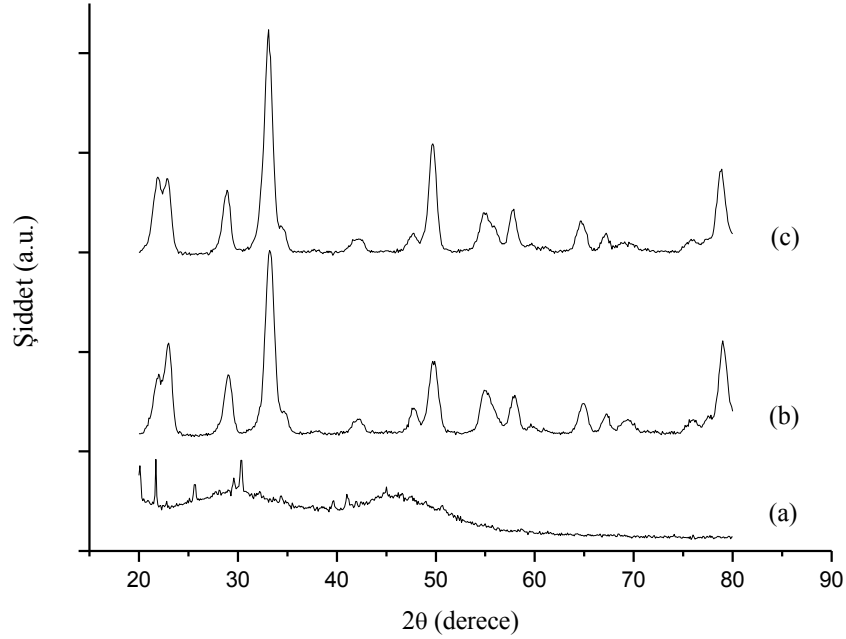
Doğal susuz boraks örneğinden 90 µm ile 140 µm aralığında parçacık boyutuna sahip 50 mg'lık toz örnek alınarak herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan Rigaku Miniflex II XRD analiz cihazında 20° ile 80° aralığında taranıp XRD analizi yapıldı. Yapılan analiz sonucunda elde edilen XRD spektrumu Şekil 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2. Susuz boraksa ait XRD spektrumu.

Yapılan XRD ve TG/DTA analiz sonuçları göz önüne alınarak XRD analizi, doğal susuz boraks örneğinden 90 µm ile 140 µm aralığında parçacık boyutuna sahip 50 mg'lık üç ayrı örnek alınıp ilk örnek tavlansız, ikinci örnek 500°C'de 1 saat ve üçüncü örnek 500°C'de 2 saat tavlandı. Bu üç grup örneğin XRD analizleri

yeniden yapıldı. Analiz sonuçları ile elde edilen XRD spektrum grafikleri Şekil 6.3'te görülmektedir.



Şekil 6.3. Susuz boraksa ait XRD spektrumları.

- (a) Tavlanmamış
- (b) 500°C'de 1 saat tavlanmış
- (c) 500°C'de 2 saat tavlanmış

XRD ve TG/DTA analiz sonuçlarından elde edilen bu bulgulardan yola çıkılarak çalışmanın ilk aşamasında susuz boraks örnekleri 500°C'de 1 saat tavlanmış ve çalışma süresince kullanılan örnekler inkubatörde 45°C'lik sıcaklıkta muhafaza edilmiştir.

XRD spektrum sonuçlarına ve yapılan analizlere bağlı olarak doğal susuz boraksın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) hesaplanan birim hücre parametreleri Çizelge 6.1'de görülmektedir.

Çizelge 6.1. Doğal susuz boraksın birim hücre parametreleri.

Bileşik		Kristal yapı	Birim hücre parametreleri						Hacim	Z*
İsim	Formül		a	b	c	α	β	γ		
Sodyum Borat	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Ortorombik	6.468	8.720	11.540	90	90	90	650.867	4

Elde edilen tepelerin açısı değerleri, şiddet parametreleri ve Miller indisleri Çizelge 6.2’de görülmektedir (PDF no: 00-009-0014).

Çizelge 6.2. Doğal susuz boraksın Miller indisleri.

2 θ (derece)	(h k l)
22	(1 0 2)
23	(1 1 2)
29	(1 2 2)
33.2	(1 3 0)
42	(0 4 1)
48	(0 1 6)
50	(2 4 1)
55	(4 2 5)
58	(4 3 1)
65	(0 5 10)
67	(1 2 14)
70	(5 1 10)
76	(3 5 7)
79	(6 3 0)

Doğal susuz boraks örneğinden 90 μm ile 140 μm aralığında parçacık boyutuna sahip 50 mg’lık toz örnek alınarak herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan Rigaku Miniflex II XRF analiz cihazında XRF analizi yapıldı. Yapılan analiz sonuçları Çizelge 6.3’te görülmektedir.

Çizelge 6.3. Doğal susuz boraksın XRF sonuçları.

İçerik	Kütle (%)	Hata (%)
B ₂ O ₃	66.9066	0.100
Na ₂ O	32.2776	0.100
MgO	0.0777	0.002
Al ₂ O ₃	0.1782	0.002
SiO ₂	0.2517	0.001
P ₂ O ₅	0.0023	0.001
SO ₃	0.0443	0.001
Cl	0.0484	0.001
K ₂ O	0.0118	0.001
CaO	0.1126	0.002
Fe ₂ O ₃	0.0134	0.001
NiO	0.0025	0.001
CuO	0.0021	0.001
SrO	0.0043	0.001
ZrO ₂	0.0172	0.001
BaO	0.0493	0.001

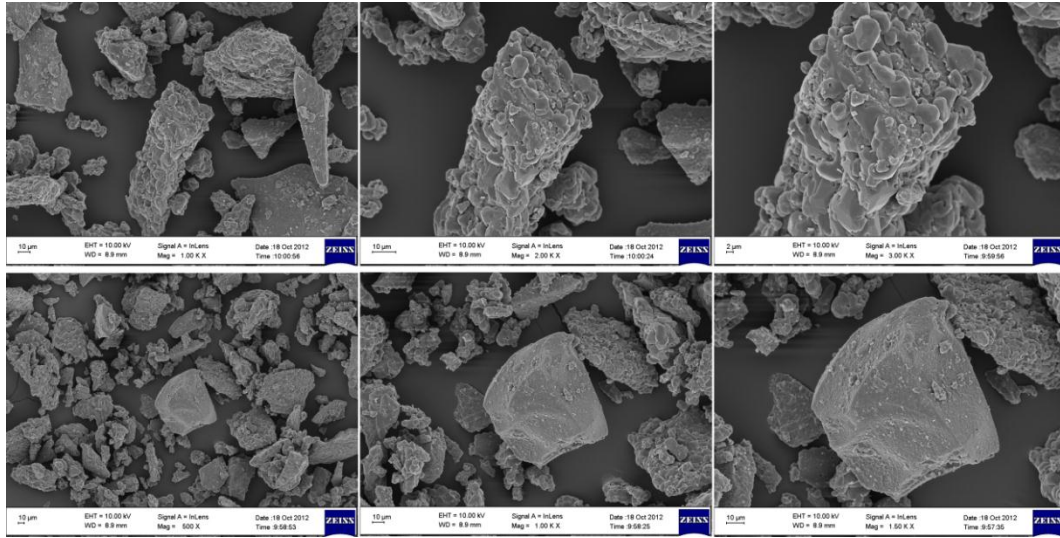
Çizelge 6.3'te de görüldüğü gibi çalışmada kullanılan susuz boraks örneğinin, %66.9066 oranında B₂O₃ ve %32.2776 oranında Na₂O olmak üzere Na₂B₄O₇'yi oluşturan temel elementler düşünüldüğünde %99.1842 oranında bu temel elementlerden oluştuğu görülmektedir. Susuz boraks mineralinin %0.8158'lik kısmı ise MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, Cl, K₂O, CaO, Fe₂O₃, NiO, CuO, SrO, ZrO₂ ve BaO element ve bileşiklerinden oluşmaktadır.

Örneklerin temin edildiği Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı Eskişehir ili Kırka bucağında kurulu olan maden işletmesinin analiz sonuçları göz önüne alındığında işletmenin susuz boraksın temel bileşikleri olan B₂O₃ ve Na₂O için belirttiği minimum %98.27'lik oran ile bu çalışmada yapılan XRF analizi sonucunda elde edilen %99.1842'lik oran birbiriyle uyum içerisinde olduğu gözlemlendi (XV).

6.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri ile İlgili Bulgular

Doğal susuz boraks örneklerinden 90 µm ile 140 µm aralığında parçacık boyutuna sahip 100 mg'lık toz örnek alınarak herhangi bir ısıtma işlemine tabi

tutulmadan Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Zeiss Supra 55 model Taramalı Elektron Mikroskobu ile taranarak SEM resimleri çekildi. Elde edilen SEM görüntüleri Şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.4. Susuz boraksa ait SEM görüntüleri.

Şekil 6.4'te de görüldüğü gibi susuz boraks örneklerinin çekilen SEM görüntülerinde, parçacık boyutlarının yaklaşık olarak 5-100 μm aralığında olduğu, parçacıklar arası boşlukların ve parçacık şekillenimlerinin farklılıklar gösterdiği bu nedenle homojen bir dağılımın olmadığı söylenebilir. Bu durumun XRD sonuçları da göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmayan örneklerin tam olarak kristallenmemiş olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

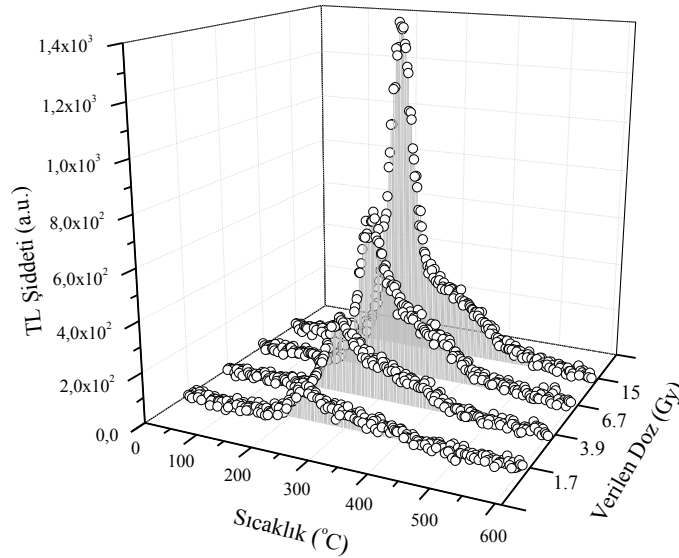
6.1.4. Termoluminesans (TL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular

6.1.4.1. Doz Yanıt Deneyleri ile İlgili Bulgular

Doğal susuz boraks (Etibor-68) örneğinden 90 μm ile 140 μm aralığında parçacık boyutuna sahip 30 mg'lık üç adet toz örnek alınarak herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi içerisinde

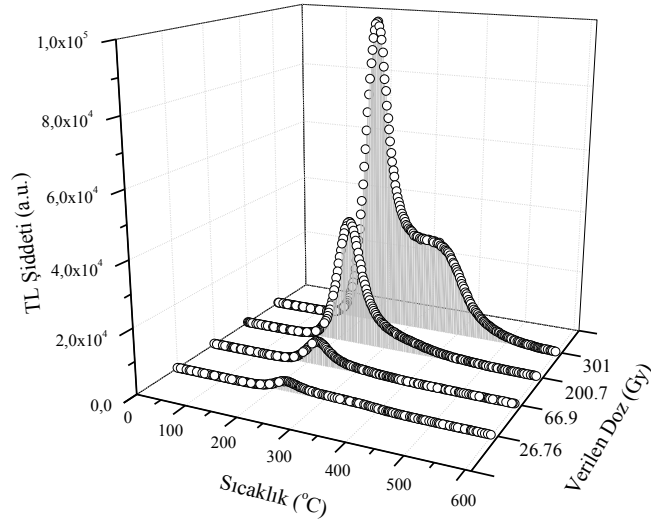
bütünleşik olarak bulunan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile 11cGy ile 9.632 kGy arasındaki farklı dozlarda ışınladı. Işınlanan doğal susuz boraks örnekleri her bir ışınlama işleminden sonra 200°C 'ye kadar ön ısıtma yapıp bu sıcaklıkta 15 s tutuldu ve son olarak 2°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C 'ye kadar ısıtılarak TL ışıma eğrileri kaydedildi. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen ışıma eğrilerine ait grafikler Origin 9.0 programı kullanılarak çizilmiş ve çizilen bu grafiklerden seçilmiş olanlar bu bölümde sunulmuştur.

Farklı dozlarda 1.7 Gy ile 15 Gy arasında ışınlanan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrileri, Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



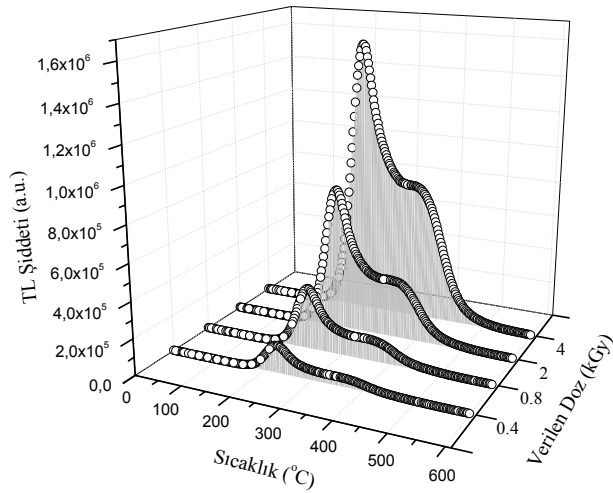
Şekil 6.5. Farklı dozlarda (1.7 Gy-15 Gy) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrileri.

Farklı dozlarda (26.76 Gy ile 301 Gy arasında) ışınlanan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrileri, Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Farklı dozlarda (26.76 Gy ile 301 Gy arasında) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrileri.

Farklı dozlarda (0.4 kGy ile 4 kGy arasında) ışınlanan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrileri, Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Farklı dozlarda (0.4 kGy ile 4 kGy arasında) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrileri.

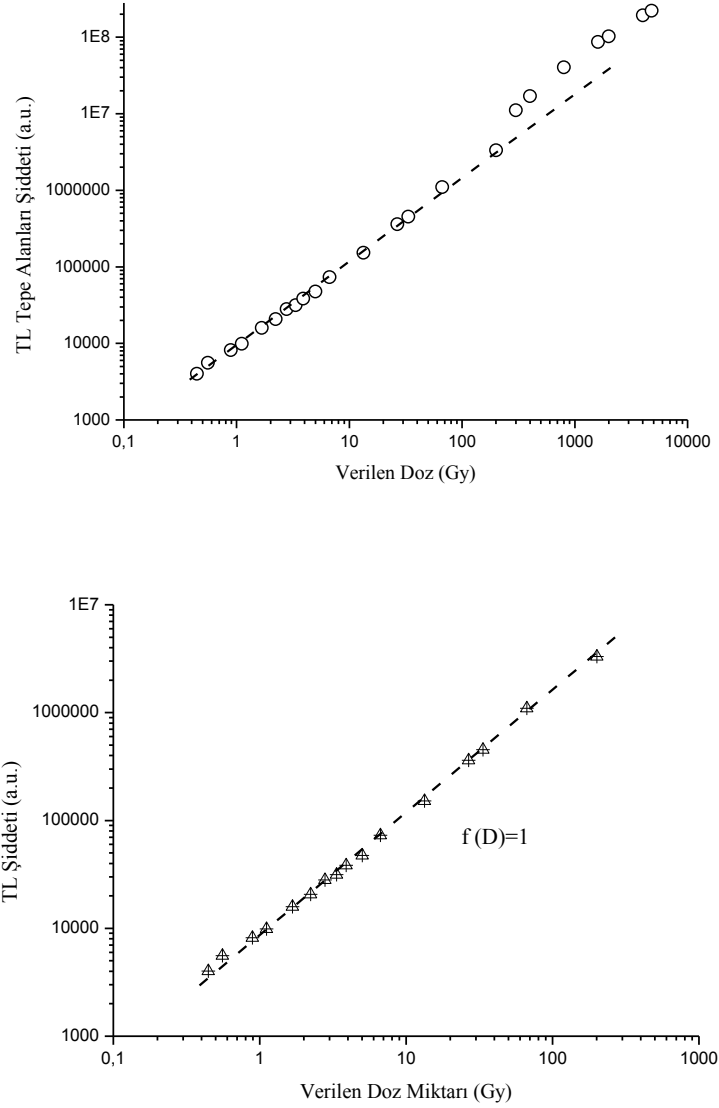
Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’den de görüldüğü gibi, tüm tepelerin TL şiddetleri artan doz oranı ile artmaktadır. Dozdaki artış miktarı ile TL şiddetlerindeki artış miktarı doğru orantılıdır.

Kullanışlı bir dozimetrik malzemenin farklı dozlara karşı benzer hassasiyetle cevap vermesi beklenir. Herhangi bir dozimetrik malzemedan elde edilen doz cevap eğrisinde verilen dozun artmasıyla beraber lineer (doğrusal), supralineer ve sublineer bölgelere bölgelere rastlanır. Bir dozimetrik malzeme için normalize edilmiş doz cevap fonksiyonu $f(D)$,

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1}$$

ifadesi ile verilir. Bu ifade de $F(D)$ herhangi bir D dozuna karşılık gelen doz cevabıdır ve $F(D_1)$ ise daha düşük bir D_1 doz değerine karşılık gelen doz cevabıdır. İdeal bir dozimetre için oldukça geniş bir bölgede $f(D) = 1$ olması beklenir. Ancak birçok dozimetrik malzemedan $f(D) = 1$ şartı çoğunlukla çok dar bir doz bölgesinde gözlenmektedir. Burada gözlenen genellikle supralineerlik yani $f(D) > 1$ durumudur. Sublineerlik olarak adlandırılan durum ise daha çok doygunluğa ulaşılrken gözlenen $f(D) < 1$ durumudur (McKeever ve ark., 1995).

Doz yanıt deneyleri ile elde edilen ışıma eğrilerinin altında kalan alanlar Origin 9.0 programı kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan tepe alanlarından yararlanılarak, verilen doz miktarlarına karşılık TL şiddetleri logaritmik eksenler kullanılarak çizilip çizilen grafiğin doğrusal artış gözlenen bölümü yeniden çizilmiştir. Çizilen grafikler Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Işıma eğrilerinin altında kalan alanlardan elde edilen doz yanıt eğrileri.

Şekil 6.8’de yer alan grafiklerin verilerinden ve

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1}$$

fonksiyonundan yararlanılarak susuz boraks örnekleri için $f(D)$ değerleri hesaplanarak Çizelge 6.4’te verilmiştir.

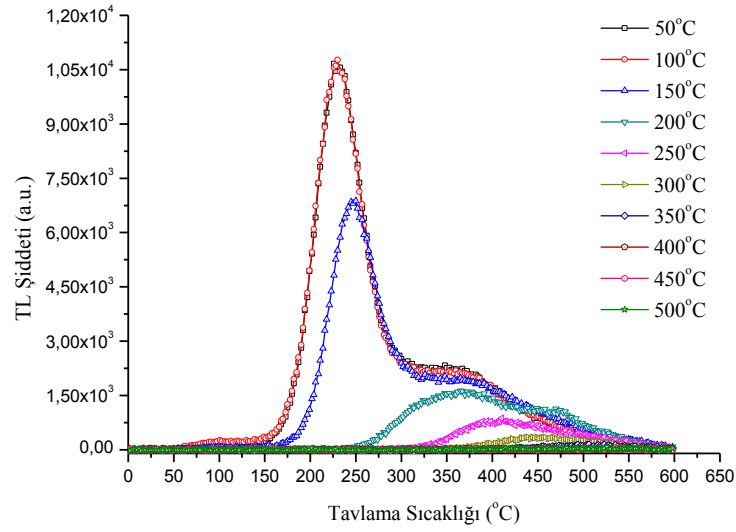
Çizelge 6.4. Doğal susuz boraks örneklerinin beta doz yanıt oranları.

<i>Doz (Gy)</i>	<i>f(D)</i>	<i>Doz (Gy)</i>	<i>f(D)</i>
0.557	1.1	26.756	1.2
0.892	0.9	33.445	1.00
1.115	1.0	66.890	1.2
1.672	1.1	200.670	1.0
2.230	1.0	301.005	2.2
2.787	1.1	401.340	1.2
3.345	0.9	802.680	1.2
3.902	1.0	1605.360	1.2
5.017	1.0	2006.700	0.95
6.689	1.2	4013.400	0.94
13.378	1.0	4816.080	0.96

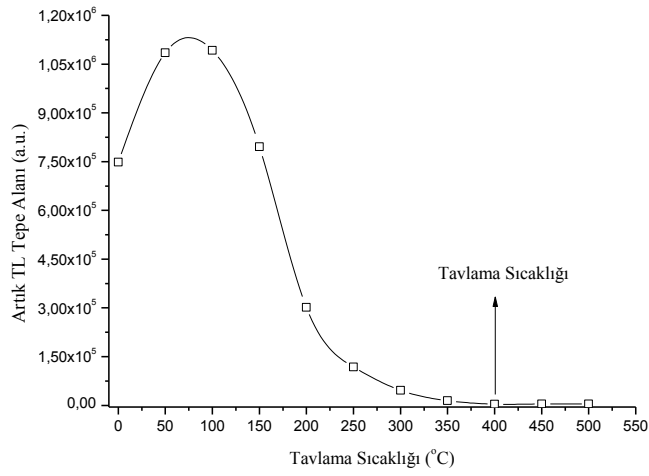
Şekil 6.8 ve Çizelge 6.4'ten de görüldüğü gibi, susuz boraksın 1 Gy'lik dozdan 200 Gy'lik doza kadar doğrusal bir artış ($f(D) \approx 1$), 200 Gy'lik dozun üzerinde supralineer artış ($f(D) > 1$) göstermekte ve 4 kGy'lik dozdan itibaren doyuma ulaşmaya ($f(D) < 1$) başlamaktadır.

6.1.4.2. Tavlama Deneyleri ile İlgili Bulgular

Önceki radyasyonların etkisinin silinmesi ve tuzakların kararlı hale getirilmesini sağlayan en uygun tavlama sıcaklığının ve tavlama süresinin belirlenebilmesi için Bölüm 5.2.1.5.(2)'de detaylı olarak anlatılan tavlama deneyleri yapılmıştır. Yapılan doz-tavlama-TL ölçümü denemeleri sonucunda, her bir tavlama sıcaklığı değeri için örneğin verdiği artık (residual) TL ışıma eğrileri kaydedildi (Şekil 6.9). Kaydedilen her bir artık TL ışıma eğrisine ait sayımların (eğri altında kalan alanlar) tavlama sıcaklığına karşılık grafikleri çizildi (Şekil 6.10).



Şekil 6.9. Farklı tavlama sıcaklıkları sonrasında elde edilen artık (residual) TL ışıma eğrileri.

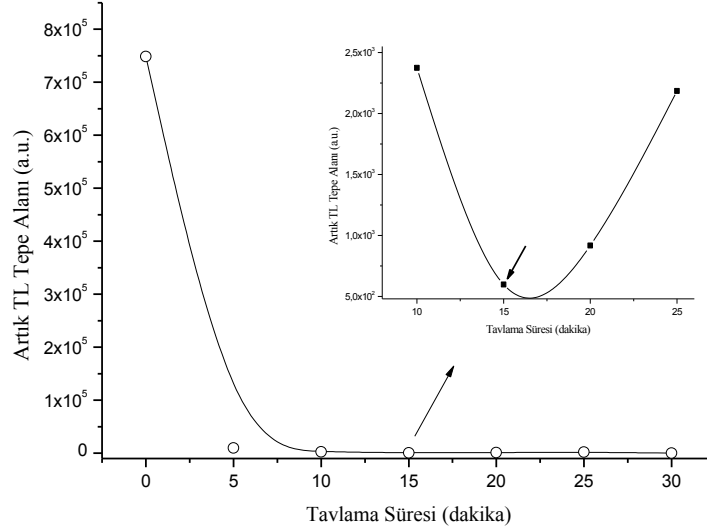


Şekil 6.10. Tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak artık (residual) TL ışıma şiddeti.

Şekil 6.10'da da görüldüğü gibi, artık TL ışıma eğrilerine ait sayımların 400°C'lik tavlama sıcaklığından sonra fon değerine ulaştığı ve susuz boraks örnekleri için en uygun tavlama sıcaklığının 400°C olduğu söylenebilir.

Tavlama süresinin belirlenmesi için 400°C'lik tavlama sıcaklığında yapılan farklı sürelerdeki tavlama sonrasında, her bir tavlama süresi değeri için örneğin verdiği artık (residual) TL ışıma eğrileri kaydedildi. Kaydedilen her bir artık TL

ışılma eğrisine ait sayımların (eğri altında kalan alanlar) tavlama sıcaklığına karşılık grafikleri çizildi (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Tavlama süresinin bir fonksiyonu olarak artık (residual) TL ışıma şiddeti.

Şekil 6.11’de de görüldüğü gibi, artık TL ışıma eğrilerine ait sayımların 15 dakikalık tavlama sıcaklığında fon değerine ulaştığı ve susuz boraks örnekleri için en uygun tavlama süresinin 15 dakika olduğu söylenebilir.

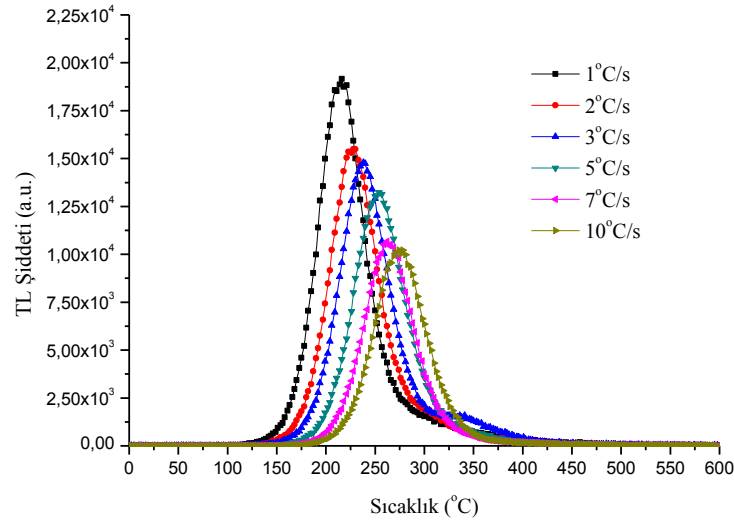
Tavlama deneyleri sonucunda önceki dozların silinmesi ve tuzakların kararlı hale getirilmesi için susuz boraks örneklerinin 400°C ’de 15 dakika tavllanması uygun ve yeterlidir.

6.1.4.3. Farklı Isıtma Hızları Deneyi ile İlgili Bulgular

Doğal susuz boraks (Etibor-68) örneğinden $90\ \mu\text{m}$ ile $140\ \mu\text{m}$ aralığında parçacık boyutuna sahip $30\ \text{mg}$ ’lık altı adet toz örnek alındı. Alınan örneklerden üç tanesi herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan, diğer üç tanesi ise tavlama deneyleri sonucunda elde edilen 400°C ’de 15 dakikalık tavlama işlemine tabi tutularak Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi içerisinde bütünleşik olarak bulunan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile $66.89\ \text{Gy}$ ’lik dozla ışınladı. Işınlanan doğal susuz boraks örnekleri her bir ışınlama işleminden sonra 200°C ’ye kadar ön ısıtma yapıp bu

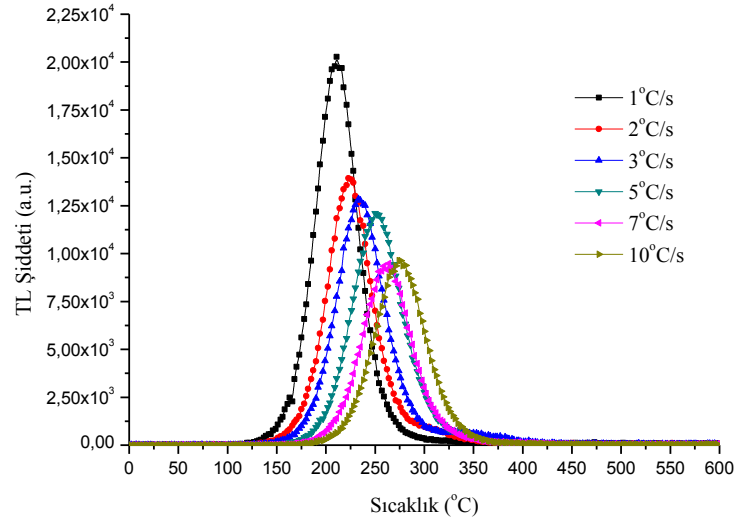
sıcaklıkta 15 s tutuldu ve son olarak 1°C/s'lik ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar ısıtılarak TL ışıma eğrileri kaydedildi. Yapılan bu işlemler her ışınlama işlemi öncesinde ilk üç grup örnek tavlamanmadan diğer üç grup örnek 400°C'de 15 dakika tavlansarak 2°C/s, 3°C/s, 5°C/s, 7°C/s ve 10°C/s'lik ısıtma hızlarında tekrarlandı. TL okumaları sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak sıcaklığa karşılık TL ışıma şiddeti grafikleri Origin 9.0 programı kullanılarak çizildi.

Tavlama işlemi yapılmadan ışınlanıp farklı ısıtma hızlarında TL okuması yapılan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrileri, Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



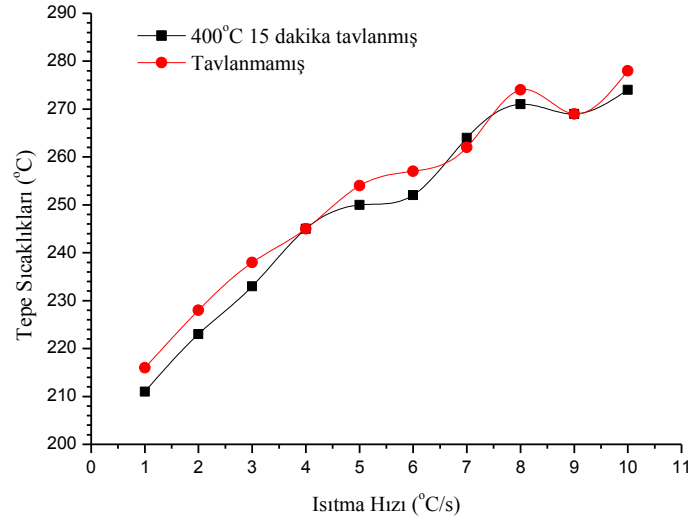
Şekil 6.12. Tavlama yapılmadan farklı ısıtma hızlarında ölçülen TL ışıma eğrileri.

400°C'de 15 dakika tavlandıktan sonra ışınlanıp farklı ısıtma hızlarında TL okuması yapılan örneklerden elde edilen TL ışıma eğrileri, Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Tavlama yapılarak farklı ısıtma hızlarında ölçülen TL ışıma eğrileri.

Farklı ısıtma hızları deneyi ile elde edilen tepelerin gözlendiği sıcaklıklar ısıtma hızının fonksiyonu olarak çizilmiş ve çizilen grafik Şekil 6.14'te gösterilmiştir.

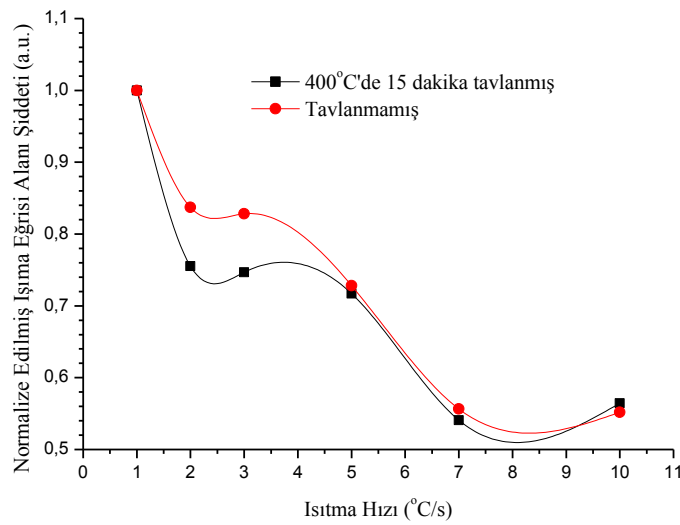


Şekil 6.14. Isıtma hızlarının fonksiyonu olarak tepe sıcaklıkları.

Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te de görüldüğü gibi, ışıma tepeleri, TL teorisinde bahsedilen ısıtma hızı değişiminin TL tepelerine etkisi ile ilgili teoriye

uygun olarak yüksek sıcaklıklara doğru kaymaktadır. Ayrıca ısıtma hızı arttıkça tepe yükseklikleri ve eğri altında kalan alanlar azalmaktadır.

Farklı ısıtma hızları deneyi ile elde edilen ısıtma eğrilerinin altında kalan alanlar Origin 9.0 programı kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan alanlar 1°C/s 'lik ısıtma hızında elde edilen değere oranlanarak normalize edilip, ısıtma hızlarına karşılık, normalize edilmiş ısıtma eğrisi alanları şiddeti grafikleri çizildi. Bu grafikler hem tavlama hem de tavlanmamış örnekler için Şekil 6.15'te gösterilmiştir.

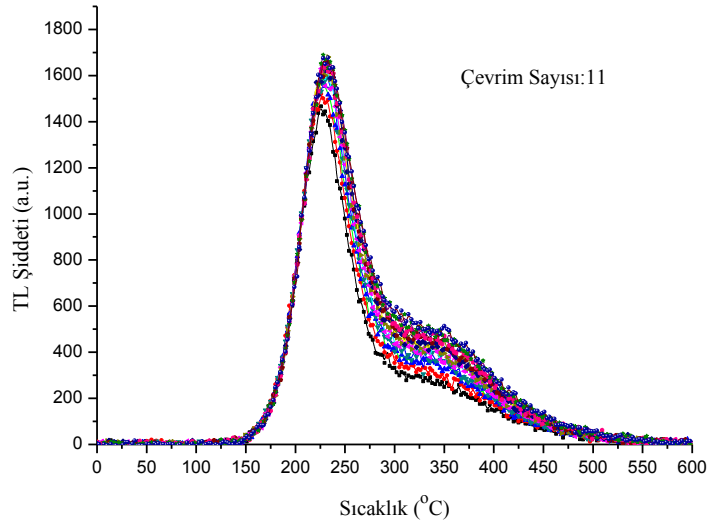


Şekil 6.15. Isıtma hızlarının fonksiyonu olarak ısıtma tepelerine ait alanların TL yanıt eğrileri.

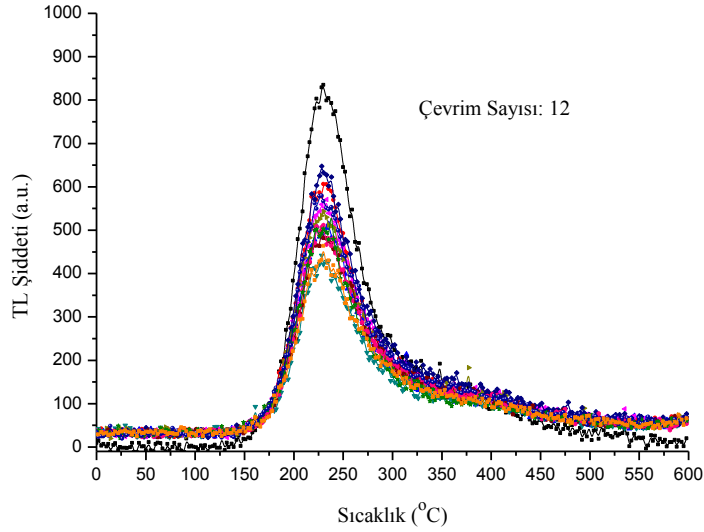
Şekil 6.15'te de görüldüğü gibi ısıtma eğrisi alan şiddetleri, artan ısıtma hızı ile düşmektedir. Bu düşüş başlangıç değerlerine göre, 2°C/s 'lik ısıtma hızında, 400°C 'de 15 dakika tavlama örnekler için yaklaşık %24, tavlanmamış örnekler için %16 oranındadır. Benzer şekilde bu düşüş 3°C/s 'lik ısıtma hızında, tavlama örnekler için % 26 ve tavlanmamış örnekler içinse %18 oranındadır. Ayrıca 5, 7 ve 10°C/s 'lik ısıtma hızlarında ise hem tavlama hem de tavlanmamış örnekler için yaklaşık olarak aynıdır. Bu düşüşler 5°C/s ısıtma hızı için %28, 7°C/s ısıtma hızı için %46 ve 10°C/s ısıtma hızı için ise %44 oranlarına sahiptir.

6.1.4.4. Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi Deneyi ile İlgili Bulgular

Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyleri Bölüm 5.2.1.5.(4)'te detaylı olarak anlatıldığı gibi bir gruptaki örnekler tavlama işlemi uygulanmadan diğer grup örneklerine ise tavlama işlemi uygulandıktan sonra 15 Gy doz verilip TL ışıma eğrileri tekrar tekrar kaydedilerek yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda tavlama işlemi uygulanmayan örnek grubundan elde edilen ışıma eğrileri Şekil 6.16'da, 400°C'de 15 dakika tavlama işlemi uygulanan örnek grubundan elde edilen ışıma eğrileri ise Şekil 6.17'de görülmektedir.

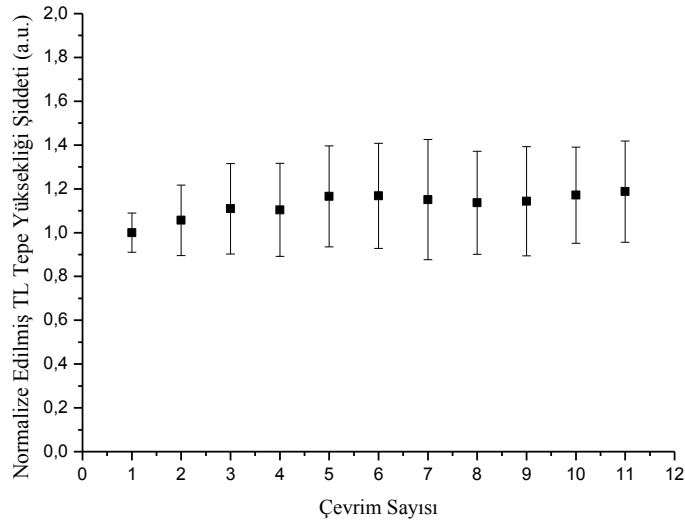


Şekil 6.16. Tavlama yapılmamış aynı susuz boraks örneklerine 15 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri.



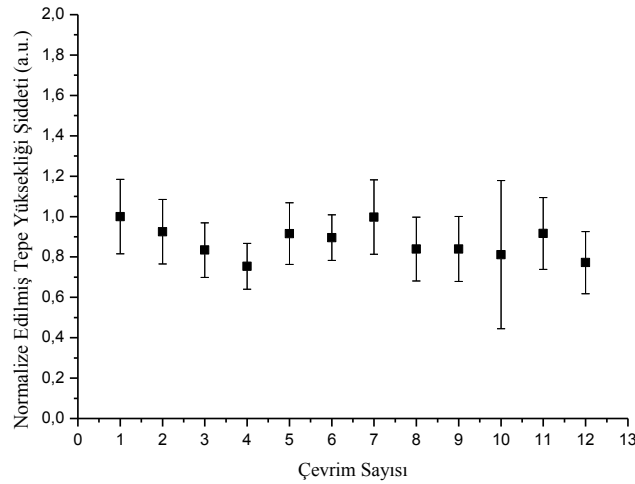
Şekil 6.17. 400°C’de 15 dakika tavllanmış aynı susuz boraks örneklerine 15 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri.

Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyi ile elde edilen TL ışıma eğrilerinin tepe yükseklikleri ($\sim 225^{\circ}\text{C}$ tepeleri) Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de görülen ışıma eğrilerinden belirlenmiştir. Belirlenen tepe yükseklikleri ilk kaydedilen TL ışıma tepesinden elde edilen tepe yüksekliği değerine oranlanarak normalize edilip, çevrim sayısına karşılık, normalize edilmiş TL tepe yükseklikleri şiddeti grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler tavlannmamış örnekler için Şekil 6.18’de tavlannmış örnekler içinse Şekil 6.19’da gösterilmiştir.



Şekil 6.18. Tavlama yapılmamış örneklerin çevrim başına TL hassasiyetinin değişimi.

Şekil 6.18’de görüldüğü gibi tavlama yapılmamış örneklerin 11 çevrim sonunda TL hassasiyetlerinin ilk çevrimden başlayarak bir artış gösterdiği ancak bu artış miktarının, kullanılan üç farklı örnek için hesaplanan TL hassasiyetlerindeki sapmaya uygun olarak bu bu sapma sınırları içerisinde yer aldığı söylenebilir.



Şekil 6.19. 400°C’de 15 dakika tavllanmış örneklerin çevrim başına TL hassasiyetinin değişimi.

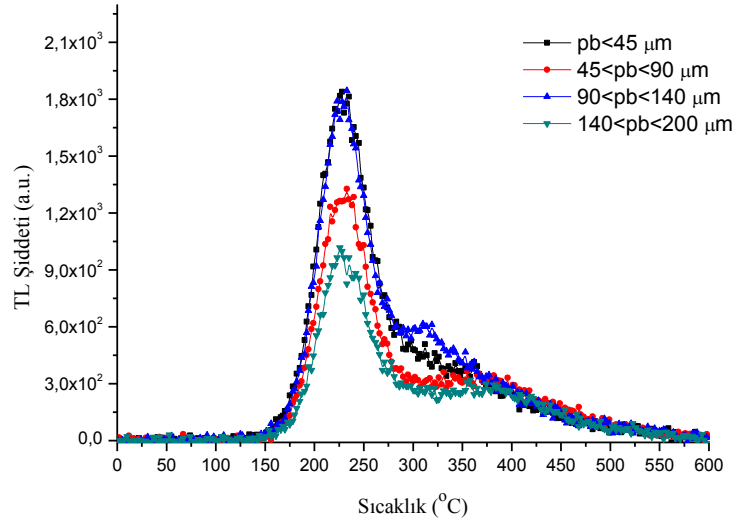
Şekil 6.19’da da görüldüğü gibi 400°C’de 15 dakika tavllanmış örneklerin TL hassasiyetlerinin ilk 4 çevrime kadar azaldığı daha sonra 7. çevrime kadar artış gösterip 7. çevrimden sonra tekrar azaldığı görülmektedir. TL hassasiyetindeki bu değişimlerin susuz boraksın tavlama işlemlerinden sonra yapılan oda sıcaklığına kadar ani soğutma işlemi sırasında nem almalarından kaynaklandığı söylenebilir. Bu durumun önüne geçebilmek için örneklerin dozimetrik olarak kullanımları sırasında desikatör içerisinde tutulmalarının uygun olacağı düşünülmektedir.

6.1.4.5. Termolüminesans Işıma Tepelerine Parçacık Boyutunun Etkisinin Test Edilmesi Deneyi ile İlgili Bulgular

Termolüminesans dozimetre çalışmalarında üzerinde sıkça durulan ve birçok çalışmaya konu olan değişkenlerden biri de TL ışıma tepelerine parçacık boyutunun etkisidir. Bu konu üzerinde çalışan birçok araştırmacı farklı sonuçlara ulaşmıştır (Shinde ve ark., 1988; Silva, 1989; Armitage ve Bailey, 2005).

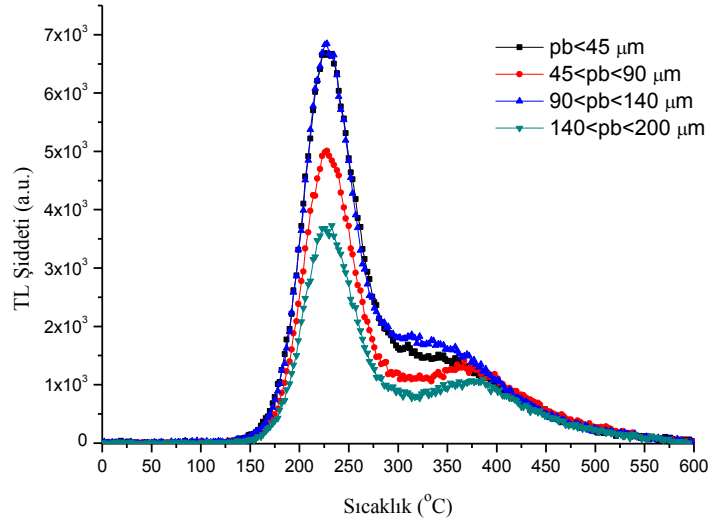
TL ışıma tepelerine parçacık boyutunun etkisinin test edilmesi için Bölüm 5.2.1.5.(5)’te detaylı olarak anlatılan deneyler yapılmış ve farklı beta dozlarıyla (33.445, 66.89 ve 133.78 Gy) ışınlanmış olan örneklerle farklı parçacık boyutlarının (pb) etkisi test edildi.

Şekil 6.20’de 33.445 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri görülmektedir.



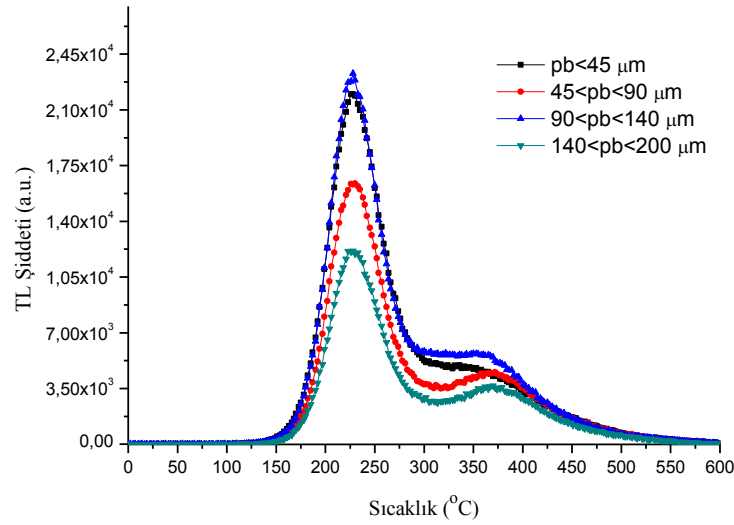
Şekil 6.20. 33.445 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri.

Şekil 6.21’de 66.89 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri görülmektedir.



Şekil 6.21. 66.89 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri.

Şekil 6.22’de 133.78 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri görülmektedir.



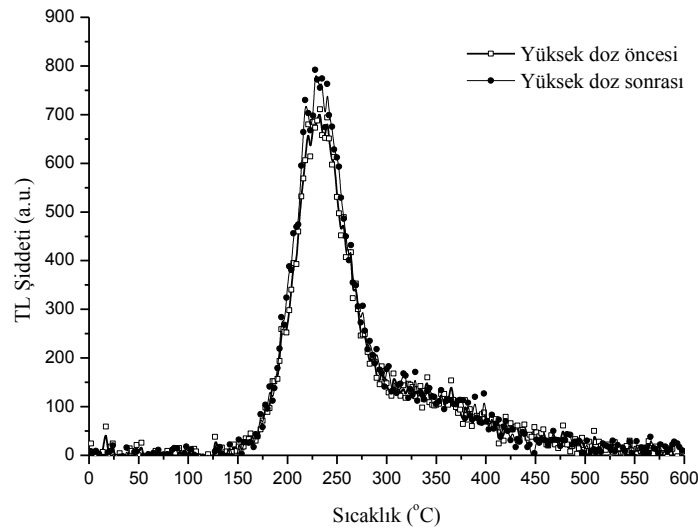
Şekil 6.22. 133.78 Gy beta dozu ile ışınlanmış farklı parçacık boyutlarına sahip örneklerin TL ışıma eğrileri.

Şekil 6.20, Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de farklı dozlarda ışınlanmış olan örneklerden, parçacık boyutu 45 μm ’den daha küçük ve parçacık boyutu 90 μm ile 140 μm arasında olan susuz boraks örneklerinin 225°C civarında yer alan TL ışıma tepelerinin yaklaşık olarak benzer TL ışıma şiddetlerine sahip oldukları görülmektedir. Bu nedenle 225°C civarında yer alan TL ışıma tepesi ile ilgili olarak yapılacak olan detaylı çalışmalarda parçacık boyutu olarak $\text{pb} < 45 \mu\text{m}$ ve $90 < \text{pb} < 140 \mu\text{m}$ aralıkları seçilebilir.

6.1.4.6. Yüksek Dozun Susuz Boraksın TL Hassasiyetine Etkisi ile İlgili Bulgular

Termoluminesans materyallerin yüksek doza maruz bırakıldıklarında TL hassasiyetlerinde değişim meydana geldiği ve bu nedenle yüksek doz sonrası önceki dozların etkisinin silinebilmesi için tavlama işlemlerinin uygulanması gerektiği birçok bilimsel araştırmaya konu olmuştur (Mariani ve ark., 1989; Zimmerman, 1971; Franklin ve ark., 1990; Pagonis ve Michael, 1994; Furetta, 2003; Topaksu ve ark., 2013; Drozdowski ve ark., 2013).

Yüksek dozun susuz boraksın TL hassasiyetine etkisinin test edilmesi için Bölüm 5.2.1.5.(6)'da anlatılan işlemler uygulanmıştır. Yüksek doz öncesi düşük doz (10 Gy) ışınlama sonrasında kaydedilen TL ışıma eğrisi ve 1 kGy doz verilip yapılan TL okumasından sonra tekrar düşük doz (10 Gy) verilerek yapılan yüksek doz sonrası TL ışıma eğrisi Şekil 6.23'te görülmektedir.



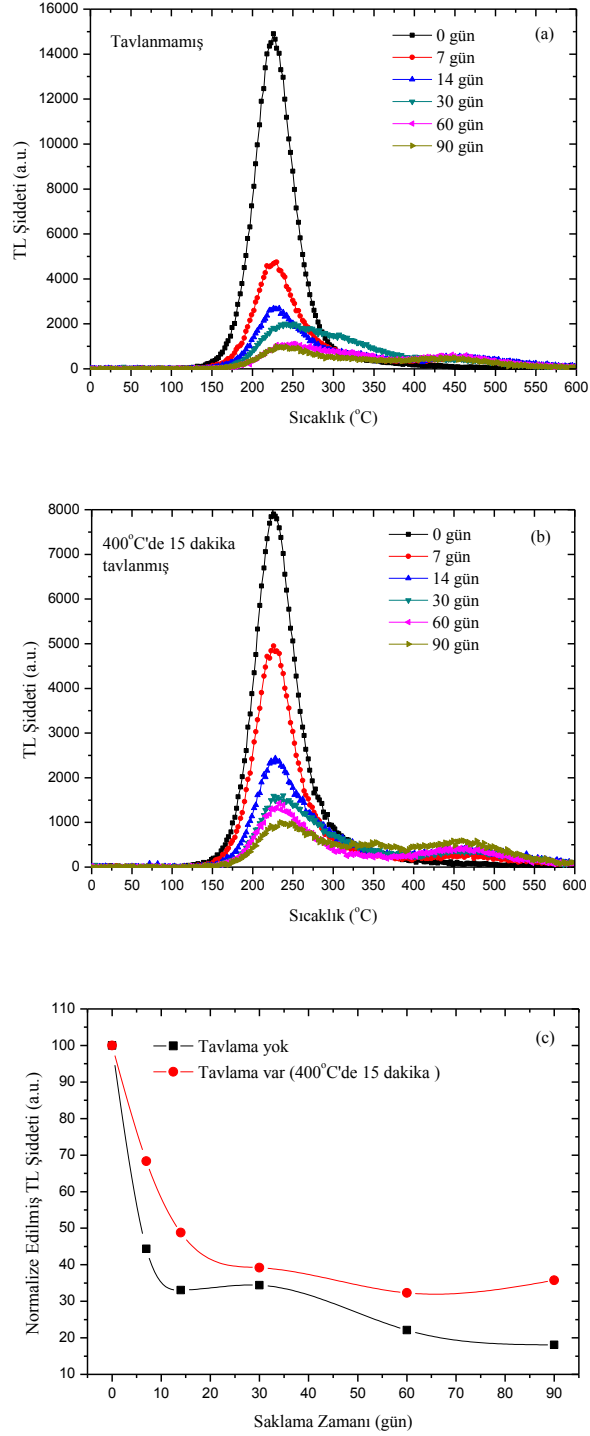
Şekil 6.23. Yüksek doz öncesi ve sonrası 10 Gy'lik beta dozu ile ışınlanmış örneklerin TL ışıma eğrileri.

Şekil 6.23'te de görüldüğü gibi susuz boraks örneklerinde verilen yüksek doz sonrasında düşük doz verilerek yapılan TL okumalarına yüksek dozun etkisinin olmadığı ve örneklerin TL hassasiyetini etkilemediği söylenebilir.

6.1.4.7. Sönüm (Fading) Deneyleri ile İlgili Bulgular

Çalışmada kullanılan susuz boraks (Etibor-68) örneklerinin sönümlerinin test edilmesi için ayrıntılı olarak Bölüm 5.2.1.5.(7)'de anlatılan deneyler yapılmıştır. Karanlık ortamda ve ışık alan laboratuvar ortamında saklanan örneklerden, belirlenen sürelerin (0, 7, 14, 30, 60 ve 90 gün) bitiminde her iki gruptan da hem tavlaniş ışınlanmış hem de tavlanişmadan ışınlanmış üçer örnek alındı. Alınan örneklerin oda sıcaklığından 600°C'ye kadar TL okumaları yapıldı. Tavlama yapılmadan ve 400°C'de 15 dakika tavlandıktan sonra 66.89 Gy beta dozu veren ve

ışık alan laboratuvar ortamında saklanan susuz boraks örneklerine ait sönüm eğrileri Şekil 6.24'te görülmektedir.



Şekil 6.24. 66.89 Gy beta dozu ile ışınlanmış ve ışık alan ortamda saklanmış susuz boraks örneklerine ait sönüm eğrileri.

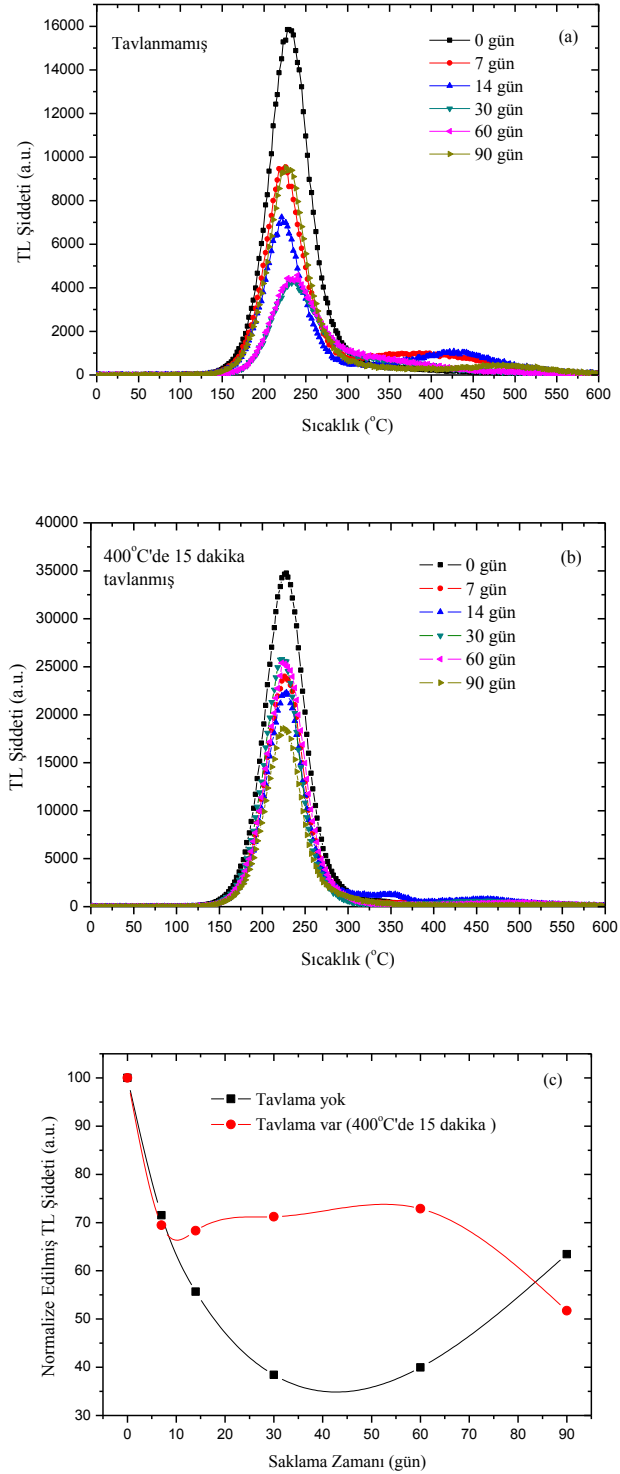
Şekil 6.24'te yer alan grafiklerde de görüldüğü gibi hem tavllanmış hem de tavlansamış örneklerin TL şiddetleri saklama zamanı ile ters orantılıdır.

Şekil 6.24.c'de herhangi bir tavlama işlemine tabi tutulmadan ışınlanıp ışık alan laboratuvar ortamında saklanan susuz boraks örneklerinin ilk hafta sonunda TL şiddetlerinin %56, ikinci hafta sonunda %67 oranında azaldığı, bu %67'lik azalmadan sonraki iki haftalık süreçte herhangi bir azalmaya uğramadığı sonraki 1 aylık dönemlerde ise yaklaşık olarak her ay %10 oranında azalarak 3 aylık saklama süresi sonunda ilk ölçülen TL şiddetine göre %82 oranında azaldığı görülmektedir.

Şekil 6.24.c'de 400°C'de 15 dakika tavlandıktan sonra ışınlanıp ışık alan laboratuvar ortamında saklanan susuz boraks örneklerinin ilk hafta sonunda TL şiddetlerinin %32, ikinci hafta sonunda %52 oranında azaldığı, bu %52'lik azalmadan sonraki iki haftalık süreçte %10 oranında yeni bir azalmaya uğradığı ve sonraki 2 aylık saklama zamanında ise %3 oranında düşük bir azalmaya uğradığı görülmektedir.

Bu bulgular ışığında, tavllanmış örneklerin saklama zamanına bağlı olarak TL şiddetlerindeki azalmaların tavlansamış örneklere göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun, tavlama yapılarak tuzakların yeniden yapılandırılmasının ve örneklerin yapısında bulunan nemin tavlama yoluyla uzaklaştırılması sonucunda hidroksil iyonlarının oluşturduğu sahte tuzaklardan kaynaklanan ışımların önüne geçilmesinin bir sonucu olduğu söylenebilir.

Tavlama yapılmadan ve 400°C'de 15 dakika tavlandıktan sonra 66.89 Gy beta dozu veren ve karanlık laboratuvar ortamında saklanan susuz boraks örneklerine ait TL ışıma eğrileri ve sönüm grafikleri Şekil 6.25'te görülmektedir.



Şekil 6.25. 66.89 Gy beta dozu ile ışınlanmış ve karanlık ortamda saklanmış susuz boraks örneklerine ait sönüm eğrileri.

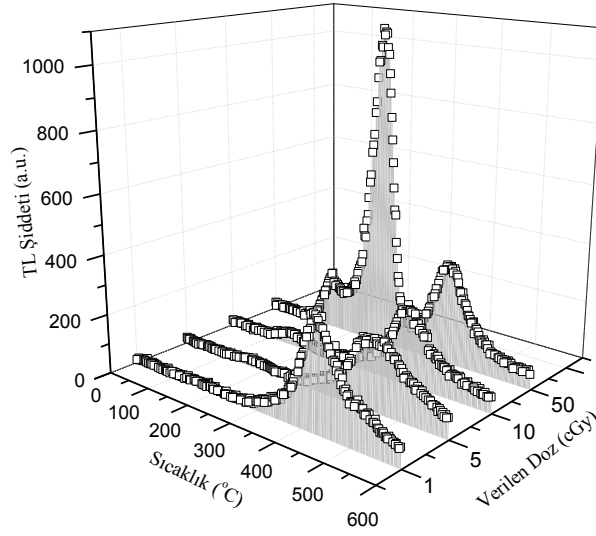
Şekil 6.25'te yer alan grafiklerde de görüldüğü gibi hem tavllanmış hem de tavlansamış örneklerin TL şiddetleri saklama zamanı ile ters orantılıdır. Ancak Şekil 6.25.a'da tavlama yapılmadan ışınlanan ve karanlık ortamda saklanan susuz boraks örneklerinin 60 günlük saklama zamanı sonrasında TL şiddetinde artma gözlenmiştir. Bu durumun daha derin tuzaklardaki yük transferinden ve OH⁻ iyonlarının meydana getirdiğı sahte tuzaklardan kaynaklandığı söylenebilir.

Şekil 6.25.c'de herhangi bir tavlama işlemine tabi tutulmadan ışınlanıp karanlık ortamda saklanan susuz boraks örneklerinin ilk hafta sonunda TL şiddetlerinin %29, ikinci hafta sonunda %45, takibeden sonraki 2 haftalık süreçte ise %20 oranında azaldığı, bu %20'lik azalmadan sonraki iki haftalık saklama süresinde herhangi bir azalmaya uğramadığı görölmektedir.

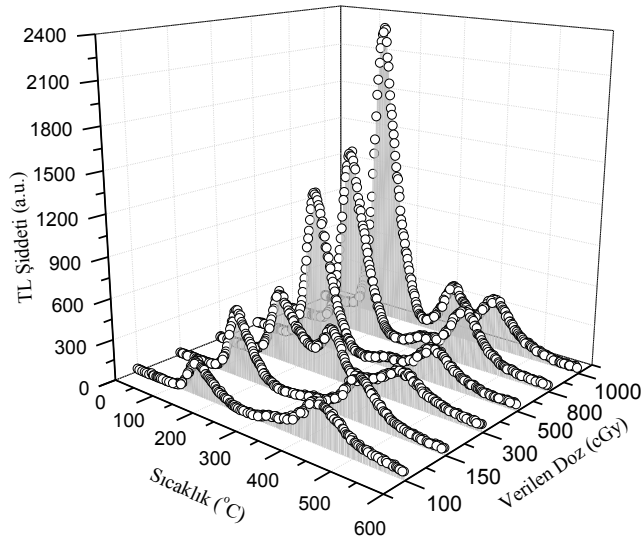
Şekil 6.25.c'de 400°C'de 15 dakika tavlandıktan sonra ışınlanıp karanlık ortamda saklanan susuz boraks örneklerinin ilk hafta sonunda TL şiddetlerinin %31 oranında azaldığı, ikinci haftadan sonra her hafta %1 oranında azaldığı ve 3 aylık saklama süresi sonunda ilk ölçülen TL şiddetine göre toplamda %49 oranında azaldığı görölmektedir. TL şiddetindeki azalma ilk 2 aylık süreçten sonraki TL sinyallerinde meydana gelen %21 oranındaki ani azalma ışınlımsız geçişlerin tuzakları boşaltmasından kaynaklanıyor olabilir.

6.1.4.8. Foton (X-Işını) Doz Yanıtı ve Sönüm Deneyleri ile İlgili Bulgular

Çalışmada kullanılan doğal susuz boraks (Etibor-68) örneklerinin foton (X-ışını) doz yanıtlarının ve fotonlarla ışınlanmış örneklerin sönümlerinin test edilmesi için ayrıntılı olarak Bölüm 5.2.1.5.(8)'de anlatılan deneyler yapılmıştır. Yapılan doz-yanıt deneyleri sonucunda kaydedilen TL ışıma eğrileri Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Farklı dozlarda (1-50 cGy) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen TL ısıma eğrileri.

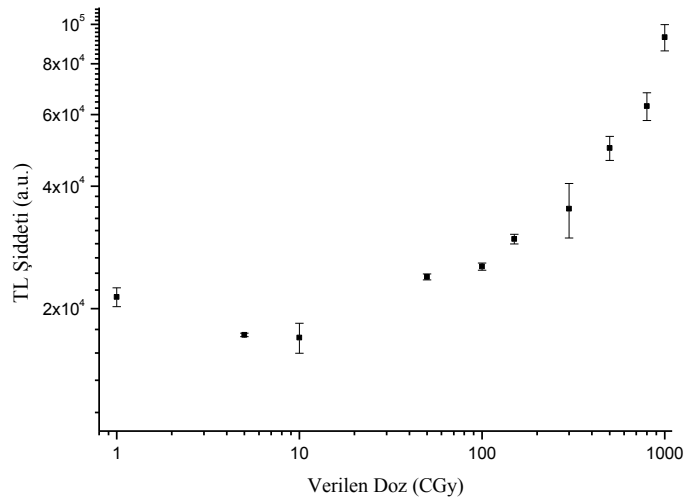


Şekil 6.27. Farklı dozlarda (100-1000 cGy) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen TL ısıma eğrileri.

Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’de de görüldüğü gibi, 6 MV enerjili x-ışınlarına maruz bırakılan susuz boraks örneklerinin 150°C, 315°C ve 430°C civarlarında 3 adet TL ısıma tepesine sahiptir. Şekil 6.26’da da görülen 1, 5 ve 10 cGy’lik dozlarla ışınlanmış olan susuz boraks örneklerinin sadece 430°C civarında TL ısıma tepelerine sahip olduğu 10 cGy’lik dozdan sonra ise 150°C ve 315°C tepelerinin de

gözlendiği görülmektedir. Bu durumun, 1, 5 ve 10 cGy düzeyindeki düşük dozlarda sığ tuzaklara yakalanan elektronların, örneklerin karanlık ortamda 48 saat süre ile bekletilmesi sırasında tuzaklardan kurtulmasından kaynaklandığı söylenebilir. Daha yüksek dozlara çıkıldıkça 150°C ve 315°C tepelerinin tekrar gözlenmesi bu tepelere sebep olan sığ tuzaklara yakalanmış olan elektronların sayısının fazla olması ve 48 saatlik bekleme süresinde bu elektronların tamamının tuzaklardan kurtulmamış olmasından kaynaklanıyor olabilir.

Doz yanıtları deneyleri ile elde edilen ısıma eğrilerinin altında kalan alanlar Origin 9.0 programı kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan tepe alanlarından yararlanılarak, verilen doz miktarına karşılık TL şiddetleri logaritmik eksenler kullanılarak çizilmiştir. Çizilen grafikler Şekil 6.28’de gösterilmiştir.



Şekil 6.28. Farklı dozlarda (1-1000 cGy) ışınlanan susuz boraks örneklerinden elde edilen doz yanıt eğrisi.

Şekil 6.28’in verilerinden ve

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1}$$

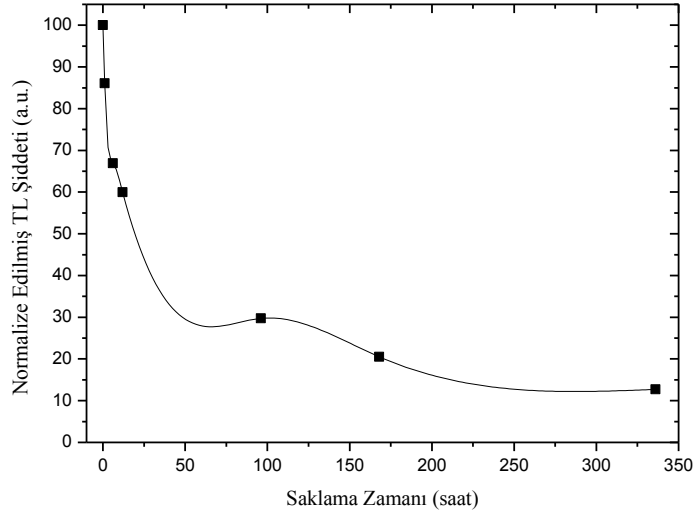
fonksiyonundan yararlanılarak susuz boraks örnekleri için $f(D)$ değerleri hesaplanarak Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Doğal susuz boraks örneklerinin foton doz yanıt oranları.

<i>Doz (cGy)</i>	<i>f(D)</i>
1	-
5	0.16
10	0.49
50	0.28
100	0.53
150	0.78
300	0.59
500	0.85
800	0.79
1000	1.18

Şekil 6.28 ve Çizelge 6.5'ten de görüldüğü gibi, susuz boraksın foton doz yanıtı 1 cGy'lik dozdan 800 cGy'lik doza kadar $f(D) < 1$, 1000 cGy'lik dozda ise $f(D) > 1$ davranışına sahiptir. Bu nedenle foton doz yanıtının doğrusal olduğu bölgeler 1000 cGy'lik doza kadar gözlenememiştir.

Örneklerin sönüm (fading) deneyleri için Bölüm 5.2.1.5.(8)'de detaylı olarak anlatılan deneyler yapıldı. Fotonlarla (x-ışınları) 1000 cGy doz verilen örneklerden 10 mg'lık 3 adet örneğin ilk okuması ışınlama işleminden hemen sonra Risø TL/OSL ölçüm sistemiyle 5°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar yapıp geriye kalan örnekler ise ayrılarak karanlık bir ortamda beklemeye bırakıldı. Karanlık ortamda saklanan örneklerden, belirlenen sürelerin (1, 6, 12 saat, 4, 7, 14 gün) bitiminde alınan 10 mg'lık üç adet örneğin TL okuması Risø TL/OSL ölçüm sistemiyle 5°C/s ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 600°C'ye kadar yapıldı. Yapılan TL okumaları sonucunda elde edilen TL ışıma tepelerinin altında kalan alanlar hesaplandı. Hesaplanan alanlar ilk okuma değerine bölünerek normalize edildi. Elde edilen bu verilerden faydalanılarak saklama zamanına karşılık normalize edilmiş TL şiddeti grafiği çizdirildi (Şekil 6.29).



Şekil 6.29. Fotonlarla 1000 cGy doz verilmiş ve karanlık ortamda saklanmış susuz boraks örneklerine ait sönüm eğrisi.

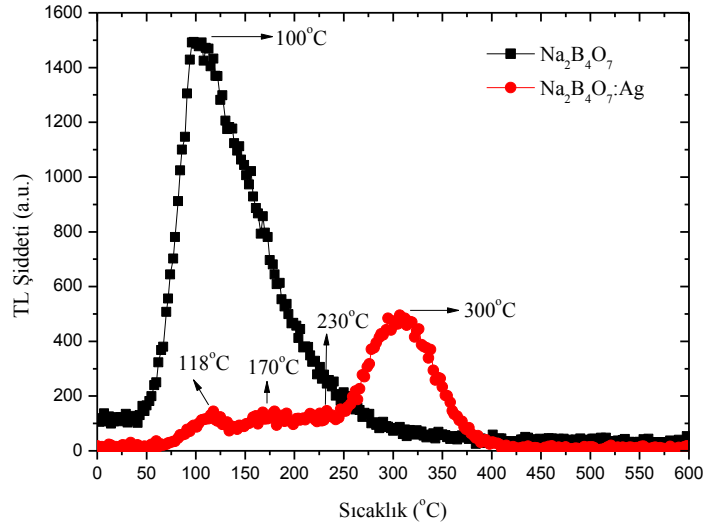
Şekil 6.29’da da görüldüğü gibi susuz boraks örneklerinin TL şiddetlerinin ilk 12 saatlik saklama zamanı sonunda %40, ilk 4 günlük saklama zamanı sonunda %70 oranında azaldığı ve bu azalmanın 14 günlük süre sonunda %88 oranında olduğu gözlemlendi.

6.2. Farklı Elementlerle Katkılanmış Sodyum Tetra Borat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ve Magnezyum Borat (MgB_4O_7) Örnekleri ile Yapılan Çalışmaların Bulguları

6.2.1. Çalışmada Kullanılacak Olan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ Örneklerinin Seçimi ile İlgili Deneylerin Bulguları

Bölüm 5.2.2.1.’de detaylı olarak anlatılan yöntemler kullanılarak elde edilen ve en yüksek TL şiddetine sahip olan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri çalışmada kullanılmak üzere seçildi. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ örneklerinin katkılama işlemleri sonrasında TL ışıma tepelerinde meydana gelen değişiklikleri gözleyebilmek için $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine 5 Gy beta dozu verilerek oda sıcaklığından 600°C ’ye kadar TL okuması yapıp elde edilen TL ışıma tepelerine ait grafikler

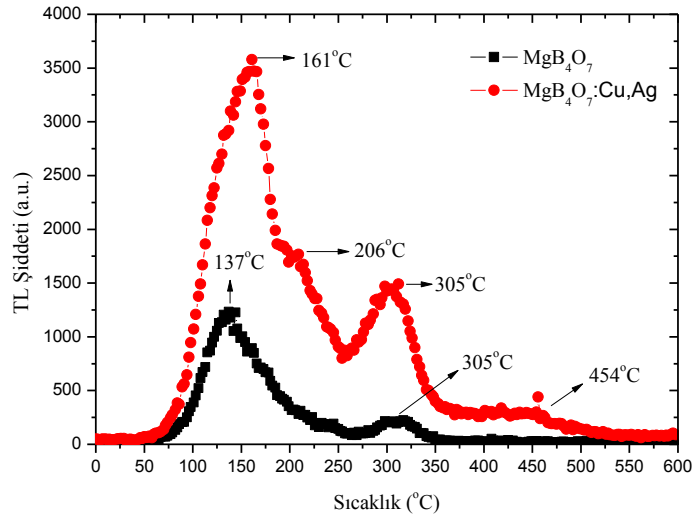
çizdirilerek karşılaştırıldı. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait grafikler Şekil 6.30'da görülmektedir.



Şekil 6.30. 5 Gy beta dozu ile ışınlanmış $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri.

Şekil 6.30'da $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ örneklerinin iç içe geçmiş tepelerden oluşan 100°C civarında belirgin bir TL ışıma tepesine sahip olduğu, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin ise 118°C, 170°C, 230°C ve 300°C civarlarında dört farklı ışıma tepesine sahip olduğu görülmektedir. TL ışıma tepelerinde meydana gelen bu değişimler göz önüne alınarak katılama işlemi ile birlikte düşük sıcaklık ışıma tepelerine ait TL şiddetlerinin azaldığı ve Ag safsızlıklarının 300°C civarında yeni bir TL ışıma tepesinin oluşumuna sebep olduğu söylenebilir.

MgB_4O_7 örneklerinin katılama işlemleri sonrasında TL ışıma tepelerinde meydana gelen değişiklikleri gözleyebilmek için MgB_4O_7 ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerine 40 Gy beta dozu verilerek oda sıcaklığından 600°C'ye kadar TL okuması yapıp elde edilen TL ışıma tepelerine ait grafikler çizdirilerek karşılaştırıldı. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait grafikler Şekil 6.31'de görülmektedir.

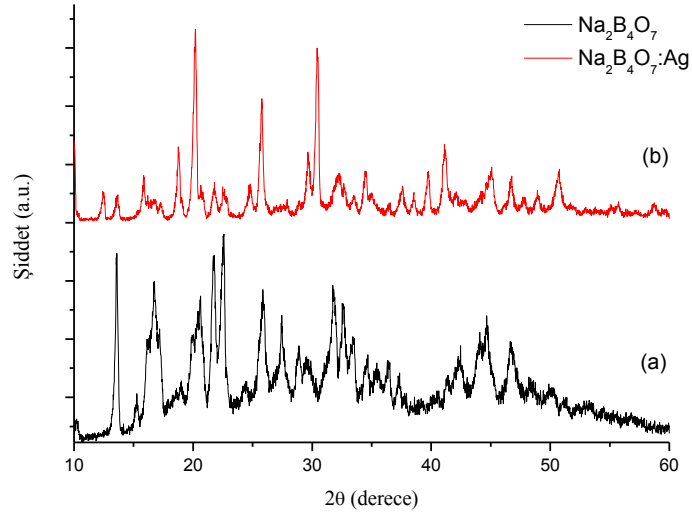


Şekil 6.31. 40 Gy beta dozu ile ışınlanmış MgB_4O_7 ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri.

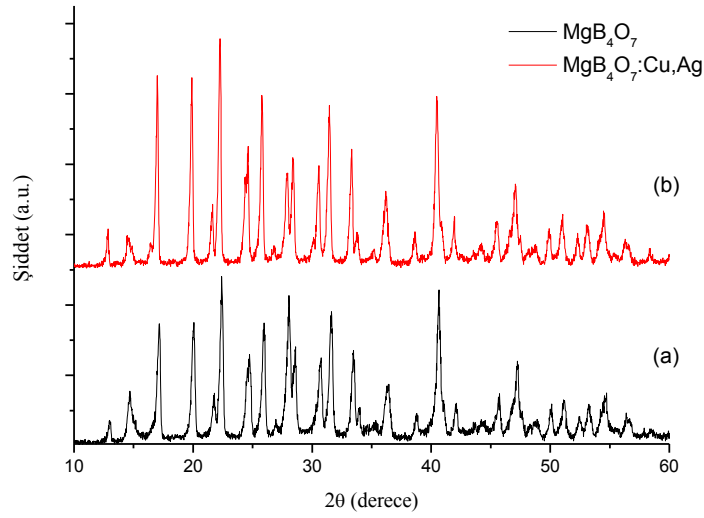
Şekil 6.31’de MgB_4O_7 örneklerinin ilki iç içe geçmiş tepelerden oluşan 137°C civarında belirgin ve ikincisi 305°C civarında olmak üzere iki tane TL ışıma tepesine sahip olduğu, $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin ise 161°C , 206°C , 305°C ve 454°C civarlarında dört farklı ışıma tepesine sahip olduğu görülmektedir. TL ışıma tepelerinde meydana gelen bu değişimler göz önüne alınarak katkılama işlemi ile birlikte TL ışıma şiddetlerinde belirgin artışlar meydana geldiği ve yeni TL ışıma tepelerinin oluştuğu söylenebilir.

6.2.2. X-Işını Toz Kırınım (XRD) Analizleri ile İlgili Bulgular

Çalışmanın bu aşamasında katkılanmamış ve Ag katkılanmış Sodyum Tetra Borat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$), katkılanmamış ve Cu-Ag katkılanmış Magnezyum Borat (MgB_4O_7 ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$) örneklerinden $90\ \mu\text{m}$ ile $140\ \mu\text{m}$ aralığında parçacık boyutuna sahip 50 mg’lık toz örnek alınarak Rigaku Miniflex II XRD analiz cihazında 10° ile 130° aralığında taranıp XRD analizi yapıldı. Yapılan analiz sonucunda elde edilen XRD spektrumları, 60° ’lik tarama açısından sonra ışıma tepelri gözlenmediğinden 10° ile 60° arasında çizdirildi. Örneklere ait XRD spektrumları Şekil 6.32 ve Şekil 6.33’de görülmektedir.



Şekil 6.32. (a) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve (b) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait XRD spektrumları.



Şekil 6.33. (a) MgB_4O_7 ve (b) $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerine ait XRD spektrumları.

Şekil 6.32’de de görüldüğü gibi $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ örneklerinin katkılama işlemi öncesinde tam olarak kristalleşmediği ve Ag katkılanması ile birlikte uygulanan ısıtma işlemi sonucunda kristalleşmenin gerçekleştiği söylenebilir. Katkılama sonrasında yapısal olarak bir değişikliğin meydana gelmediği, ancak Ag iyonlarının yapıda yer bulması ile birlikte yeni ışıma tepelerinin oluştuğu, bazı ışıma tepelerinin

şiddetlerinde azalma gözlenirken bazı ışıma tepelerinin ise şiddetlerinin arttığı söylenebilir.

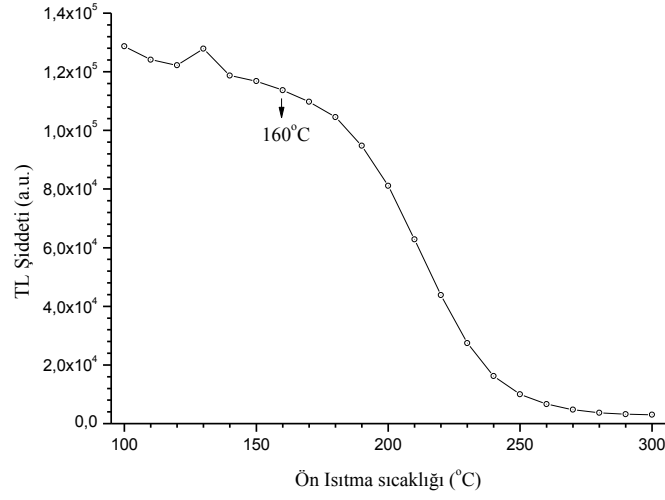
Şekil 6.33'te görüldüğü gibi SCS yöntemiyle yüksek sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanarak üretilmiş olan MgB_4O_7 örneklerinin kristalleşmiş olduğu, örneklerle Cu ve Ag katkılanmasıyla birlikte bazı ışıma tepelerinin şiddetlerinde azalma meydana gelirken bazı ışıma tepelerinin ise şiddetlerinin arttığı söylenebilir.

6.2.3. Termoluminesans (TL) Ölçümleri ile İlgili Bulgular

6.2.3.1. Ön Isıtma Deneyleri ile İlgili Bulgular

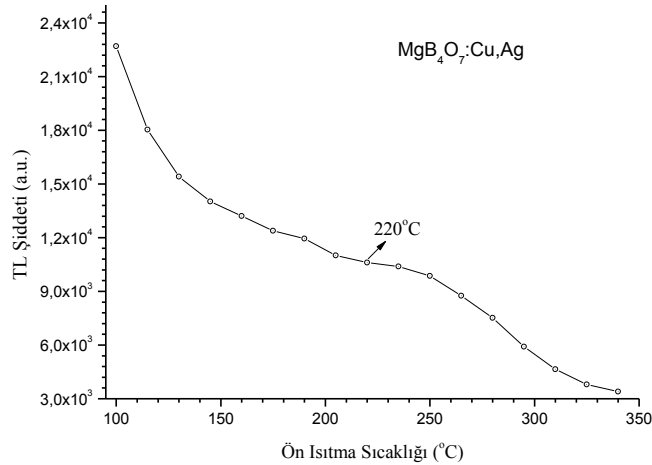
$Na_2B_4O_7:Ag$ örnekleri için yapılan ön ısıtma deneylerinde örnekler $^{90}Sr/^{90}Y$ β kaynağı ile 45 s (5 Gy) ışınlanıp her ışınlama işlemi sonrasında $100^\circ C$ 'den $300^\circ C$ 'ye kadar ön ısıtma yapıldıktan sonra TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir. Kaydedilen TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlara Origin 9.0 programı ile hesaplanıp hesaplanan alanlar ön ısıtma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak çizilip Şekil 6.34'te verilmiştir.

$MgB_4O_7:Cu,Ag$ örnekleri için yapılan ön ısıtma deneylerinde ise örnekler $^{90}Sr/^{90}Y$ β kaynağı ile 90 s (10 Gy) ışınlanıp her ışınlama işlemi sonrasında $100^\circ C$ 'den $340^\circ C$ 'ye kadar ön ısıtma yapıldıktan sonra TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir. Kaydedilen TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlara Origin 9.0 programı ile hesaplanıp hesaplanan alanlar ön ısıtma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak çizilip Şekil 6.35'te verilmiştir.



Şekil 6.34. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait ön ısıtma sıcaklığının fonksiyonu olarak TL şiddeti grafiği.

Şekil 6.34'ten de görüldüğü gibi düşük sıcaklık TL ışıma tepelerinin silinmesi ve yüksek sıcaklık tepelerinin net bir şekilde elde edilebilmesi için en uygun ön ısıtma sıcaklığının 160°C olarak seçilmesinin uygun olacağı söylenebilir. Buna bağlı olarak $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin dozimetrik özelliklerinin incelenmesi sırasında TL ışıma tepeleri, 160°C 'de ön ısıtma yapıldıktan sonra kaydedilmiştir.

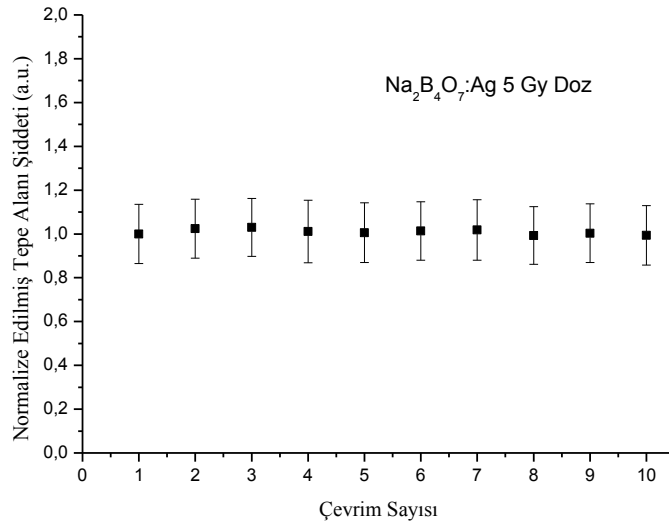


Şekil 6.35. $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerine ait ön ısıtma sıcaklığının fonksiyonu olarak TL şiddeti grafiği.

Şekil 6.35'ten faydalanılarak $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri için de en uygun ön ısıtma sıcaklığının 220°C olarak seçilmesinin uygun olacağı söylenebilir. Buna bağlı olarak $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin dozimetrik özelliklerinin incelenmesi sırasında TL ışıma tepeleri, 220°C 'de ön ısıtma yapıldıktan sonra kaydedilmiştir.

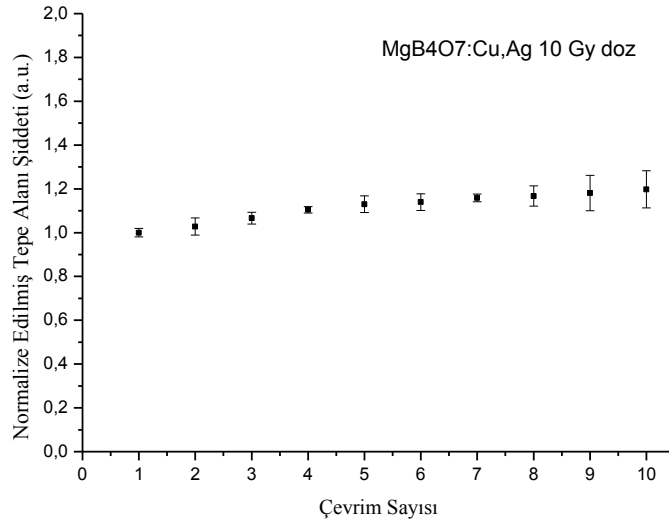
6.2.3.2. Tekrar Kullanılabilirliğin Test Edilmesi Deneyi ile İlgili Bulgular

Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyleri Bölüm 5.2.2.3.(2)'de anlatıldığı gibi $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri 45 s (5 Gy) ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri ise 90 s (10 Gy) beta dozu ile ışınladı. Her ışınlama sonrasında TL okuması yapıldı. Bu işlemler her iki grup için de 10 defa tekrarlandı. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ışıma eğrileri Şekil 6.36 ve Şekil 6.37'de görülmektedir.



Şekil 6.36. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinden elde edilen çevrim başına TL hassasiyetinin değişim grafiği.

Şekil 6.36'da da görüldüğü gibi $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin ilk okuma ile son okuma (10. çevrim) arasında TL hassasiyetlerinde %3'ün altında bir değişim gözlenmektedir.



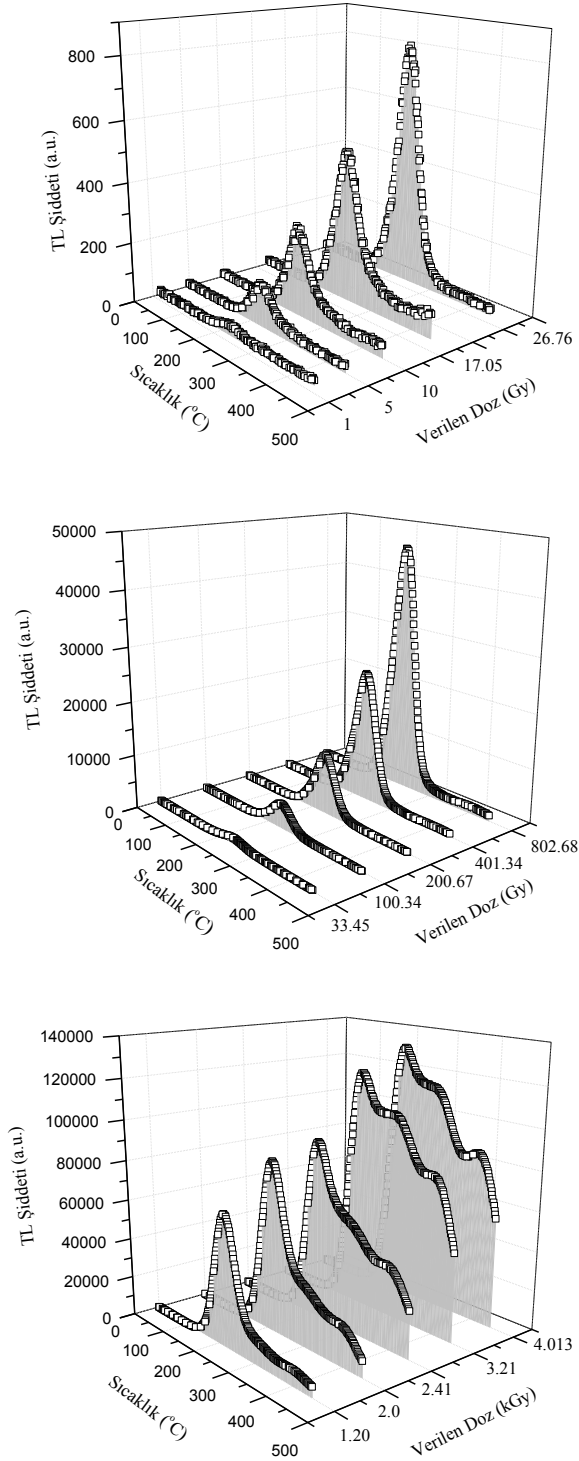
Şekil 6.37. $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{Ag}$ örneklerinden elde edilen çevrim başına TL hassasiyetinin değişim grafiği.

Şekil 6.37'de de görüldüğü gibi $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu}, \text{Ag}$ örneklerinin ilk okuma ile son okuma (10. çevrim) arasında TL hassasiyetlerinde %10 civarında bir değişim gözlenmektedir.

6.2.3.3. Doz Yanıtları Deneyleri ile İlgili Bulgular

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{Ag}$ örneklerinden 90 μm ile 140 μm aralığında parçacık boyutuna sahip 30 mg'lık üçer adet toz örnek alınarak herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi içerisinde bütünleşik olarak bulunan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı ile 11cGy ile 4.013 kGy arasındaki dozlarda ışınladı. Işınlama sonrasında elde edilen verilerden yararlanarak TL ışıma eğrileri çizildi.

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri için ışınlama sonrasında elde edilen TL ışıma eğrileri Şekil 6.38'de görülmektedir.

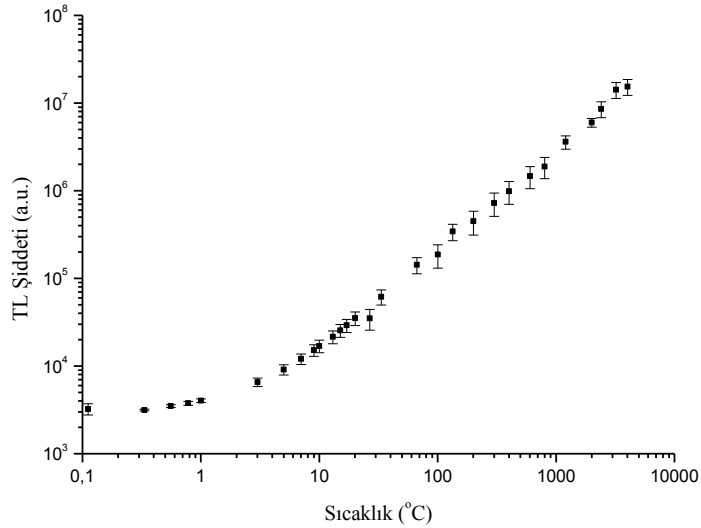


Şekil 6.38. Farklı dozlarda ısıtılmış $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri.

Şekil 6.38’de de görüldüğü gibi, tüm tepelerin TL şiddetleri artan doz oranı ile artmaktadır. Dozdaki artış miktarı ile TL şiddetlerindeki artış miktarı doğru

orantılıdır. Yine Şekil 2.37'deki grafiklerden görüldüğü gibi 1.20 kGy'lık doza kadar 225°C civarlarında belirgin tek bir TL ışıma tepesi gözlenirken 1.20 kGy'lık doz ve daha yüksek dozlarda 305°C ve 400°C civarlarında iki yeni TL ışıma tepesinin gözlenmeye başladığı görülmektedir. Bu durum yüksek dozun yeni elektron tuzakları oluşturmamasından kaynaklanıyor olabilir.

Şekil 6.38'deki grafiklere ait verilerden yararlanılarak Origin 9.0 programında TL ışıma eğrileri altında kalan alanlar hesaplandı ve verilen dozun fonksiyonu olarak TL şiddeti grafikleri çizdirildi. Çizdirilen grafikler Şekil 6.39'da görülmektedir.



Şekil 6.39. Na₂B₄O₇:Ag örneklerinin TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlardan elde edilen doz yanıt eğrisi.

Şekil 6.39'da yer alan grafiklerin verilerinden ve

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1}$$

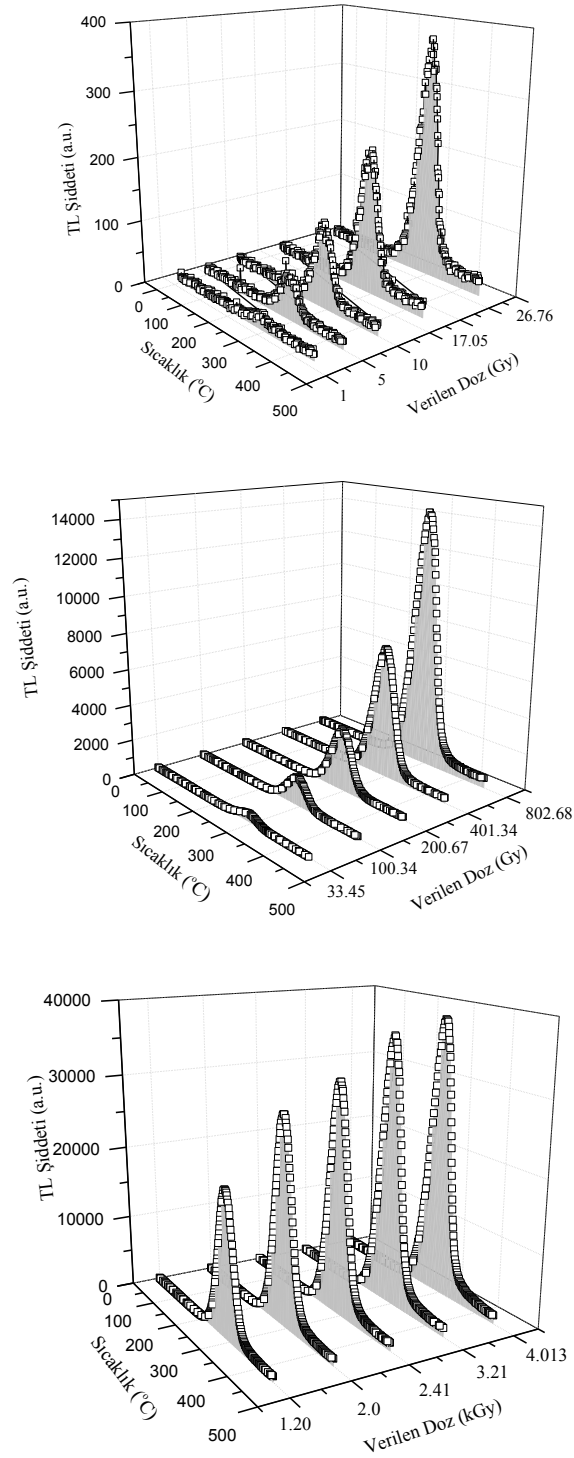
fonksiyonundan yararlanılarak susuz boraks örnekleri için $f(D)$ değerleri hesaplanarak Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Na₂B₄O₇:Ag örneklerinin beta doz yanıt oranları.

<i>Doz (Gy)</i>	<i>f(D)</i>	<i>Doz (Gy)</i>	<i>f(D)</i>
0.111	-	33.445	1.42
0.334	0.32	66.890	1.16
0.557	0.66	100.335	0.87
0,780	0.77	133.780	1.37
1.003	0.83	200.670	0.87
3.010	0.54	301.005	1.08
5.017	0.83	401.340	1.02
7.023	0.95	602.010	0.99
9.030	0.98	802.680	0.96
10.034	1.00	1204.020	1.27
13.044	0.98	2006.700	0.99
15.050	1.02	2408.040	1.19
17.057	1.00	3210.720	1.25
20.067	1.02	4013.400	0.86
26.756	0.74	-	-

Şekil 6.39 ve Çizelge 6.6'dan da görüldüğü gibi, Na₂B₄O₇:Ag'nin 9 Gy'lik dozdan 802.680 Gy'lik doza kadar doğrusal bir artış ($f(D) \approx 1$), 802.680 Gy'lik dozun üzerinde supralineer artış ($f(D) > 1$) göstermekte ve 3.210 kGy'lik dozdan itibaren doyuma ulaşmaya ($f(D) < 1$) başlamaktadır.

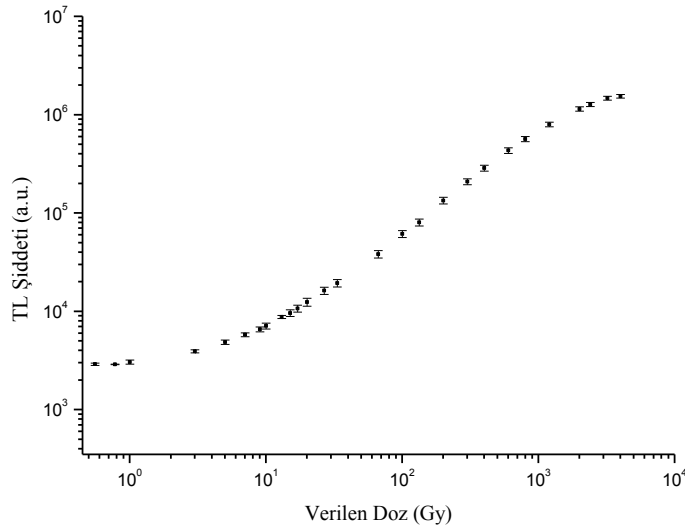
MgB₄O₇:Cu,Ag örnekleri için farklı beta dozlarında yapılan ışınlama sonrasında elde edilen TL ışıma eğrileri Şekil 6.40'ta görülmektedir.



Şekil 6.40. Farklı dozlarda ısıtılmış $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri.

Şekil 6.40'ta da görüldüğü gibi, tüm tepelerin TL şiddetleri artan doz oranı ile artmaktadır. Dozdaki artış miktarı ile TL şiddetlerindeki artış miktarı doğru orantılıdır. Yine Şekil 6.40'taki grafiklerden görüldüğü gibi 295°C civarlarında belirgin tek bir TL ışıma tepesi gözlenmektedir.

Şekil 6.40'taki grafiklere ait verilerden yararlanılarak Origin 9.0 programında TL ışıma eğrileri altında kalan alanlar hesaplandı ve verilen dozun fonksiyonu olarak TL şiddeti grafikleri çizdirildi. Çizdirilen grafikler Şekil 6.41'de görülmektedir.



Şekil 6.41. MgB₄O₇:Cu,Ag örneklerinin TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlardan elde edilen doz yanıt eğrisi.

Şekil 6.41'de yer alan grafiklerin verilerinden ve

$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1}$$

fonksiyonundan yararlanılarak susuz boraks örnekleri için $f(D)$ değerleri hesaplanarak Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7. MgB₄O₇:Cu,Ag örneklerinin beta doz yanıt oranları.

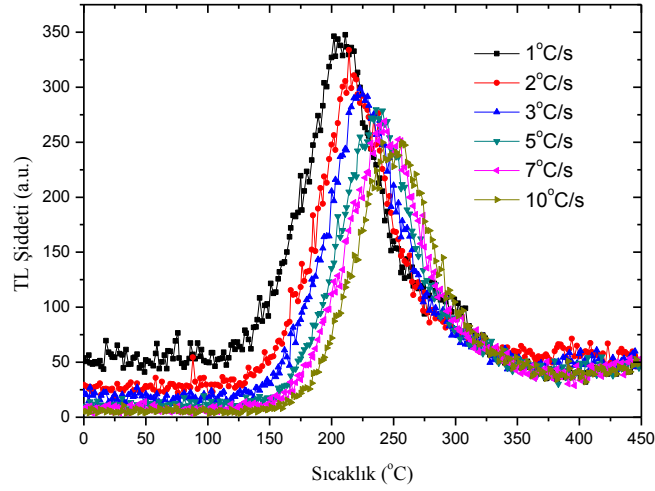
Doz (Gy)	$f(D)$	Doz (Gy)	$f(D)$
0.111	-	33.445	0.96
0.334	0.36	66.890	0.98
0.557	0.60	100.335	1.07
0,780	0.71	133.780	0.98
1.003	0.82	200.670	1.11
3.010	0.43	301.005	1.04
5.017	0.74	401.340	1.03
7.023	0.85	602.010	1.01
9.030	0.88	802.680	0.98
10.034	0.97	1204.020	0.94
13.044	0.95	2006.700	0.86
15.050	0.95	2408.040	0.93
17.057	0.98	3210.720	0.87
20.067	0.99	4013.400	0.83
26.756	0.98	-	-

Şekil 6.41 ve Çizelge 6.7’den de görüldüğü gibi, MgB₄O₇:Cu,Ag’nin 17.057 Gy’lik dozdan 133.780 Gy’lik doza kadar doğrusal bir artış ($f(D) \approx 1$), 200.670 Gy’lik dozun üzerinde supralineer artış ($f(D) > 1$) göstermekte ve 802.680 Gy’lik dozdan itibaren doyuma ulaşmaya ($f(D) < 1$) başlamaktadır.

6.2.3.4. Farklı Isıtma Hızları Deneyi ile İlgili Bulgular

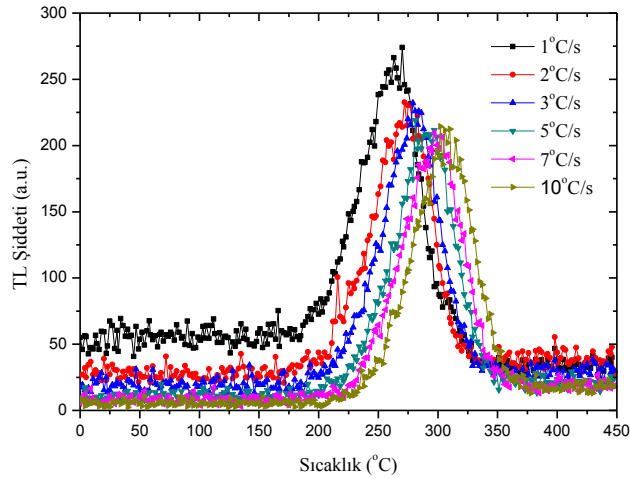
Na₂B₄O₇:Ag ve MgB₄O₇:Cu,Ag örneklerinden 90 µm ile 140 µm aralığında parçacık boyutuna sahip 30 mg’lık üçer adet toz örnek alınarak Risø TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi içerisinde bütünleşik olarak bulunan ⁹⁰Sr/⁹⁰Y β kaynağı ile Na₂B₄O₇:Ag örnekleri 45 s (5 Gy) ve MgB₄O₇:Cu,Ag örnekleri 90 s (10 Gy) beta dozu ile ışınladı. Işınlanan Na₂B₄O₇:Ag örnekleri her bir ışınlama işleminden sonra 160°C’ye kadar, MgB₄O₇:Cu,Ag örnekleri ise 220°C’ye kadar ön ısıtma yapıp bu sıcaklıkta 10 s tutuldu ve son olarak 1°C/s’lik ısıtma hızıyla oda sıcaklığından 450°C’ye kadar ısıtılarak TL ışıma eğrileri kaydedildi. Yapılan bu işlemler 2°C/s, 3°C/s, 5°C/s, 7°C/s ve 10°C/s’lik ısıtma hızlarında tekrarlandı. TL okumaları sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak sıcaklığa karşılık TL ışıma şiddeti grafikleri Origin 9.0 programı kullanılarak çizildi.

Şekil 6.42’de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri için farklı ısıtma hızlarının TL şiddetlerine karşılık grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.42. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin farklı ısıtma hızlarında ölçülen ışıma eğrileri.

Şekil 6.43’te $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri için farklı ısıtma hızlarının TL şiddetlerine karşılık grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.43. $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin farklı ısıtma hızlarında ölçülen ışıma eğrileri.

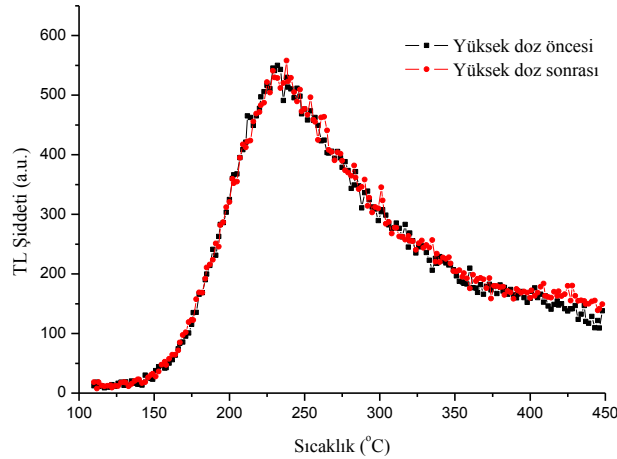
Şekil 6.42 ve Şekil 6.43’te de görüldüğü gibi, ışıma tepeleri, TL teorisinde bahsedilen ısıtma hızı değişiminin TL tepelerine etkisi ile ilgili teoriye uygun olarak

artan ısıtma hızına bağlı olarak yüksek sıcaklıklara doğru kaymaktadır. Ayrıca ısıtma hızı arttıkça tepe yükseklikleri ve eğri altında kalan alanlar da azalmaktadır.

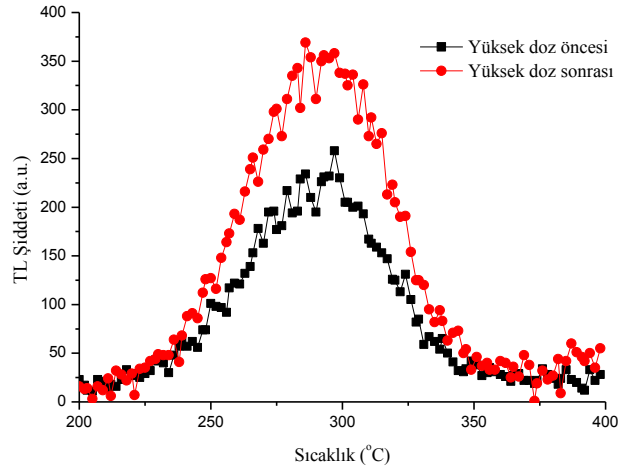
6.2.3.5. Yüksek Dozun TL Hassasiyetine Etkisi ile İlgili Bulgular

Yüksek dozun TL hassasiyetine etkisinin test edilmesi için ilk olarak $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri 180 s (20 Gy) beta dozu ile ısıtılıp ısıtılama işleminden sonra TL okumaları yapıldı. TL okumaları, benzer şekilde her iki örnek önce 17940 s (2 kGy) beta dozu ile ısıtıldıktan sonra ve bu işlemten sonra tekrar 180 s (20 Gy) beta dozu ile ısıtılarak tekrarlandı. Yapılan ısıtılama işlemlerinin her birinden sonra TL ışıma tepeleri kaydedildi.

Yüksek doz öncesi düşük doz (20 Gy) ısıtılama sonrasında kaydedilen TL ışıma eğrisi ve 2 kGy doz verilip yapılan TL okumasından sonra tekrar düşük doz (20 Gy) verilerek yapılan yüksek doz sonrası TL ışıma eğrileri, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri için Şekil 6.44'te ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri içinse Şekil 6.45'te görülmektedir.



Şekil 6.44. Yüksek doz öncesi ve sonrası 20 Gy'lik beta dozu ile ısıtılmış $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerine ait TL ışıma eğrileri.



Şekil 6.45. Yüksek doz öncesi ve sonrası 20 Gy’lik beta dozu ile ışınlanmış $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerine ait TL ısıma eğrileri.

Şekil 6.44’te de görüldüğü gibi $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri için verilen yüksek dozun ardından düşük doz verilerek yapılan TL okumalarına yüksek dozun etkisinin olmadığı ve örneklerin TL hassasiyetini etkilemediği söylenebilir.

Şekil 6.45’te de görüldüğü gibi $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerine için verilen yüksek dozun ardından düşük doz verilerek yapılan TL okumalarına yüksek dozun etkisinin olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak yüksek dozun $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin TL hassasiyetlerini arttırdığı söylenebilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmanın ilk aşamasında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı Eskişehir ili Kırka bucağında kurulu olan maden işletmesinden alınan ve Etibor-68 ya da susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) olarak adlandırılan doğal bor mineralinin, ikinci aşamasında ise laboratuvar ortamında katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle üretilen $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve çözelti yanma sentez yöntemiyle (SCS) üretilen $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ bor bileşenlerinin dozimetrik özellikleri termoluminesans (TL) yöntemi kullanılarak detaylı olarak çalışıldı. Literatür taraması yapıldığında sodyum boratlarla ilgili çok fazla çalışmanın yapılmadığı yapılan çalışmalarda (Spano ve ark., 1995; Santiago ve ark., 1998) ise doğal ve katkılı sodyum boratların dozimetrik özelliklerin detaylı olarak çalışılmadığı görülmektedir. Literatürde, sodyum boratların aksine doğal ve katkılı magnezyum boratların dozimetrik özelliklerinin detaylı olarak ve yoğun bir şekilde çalışıldığı (Prokic, 1980; Furetta ve ark., 1999; Kawashima ve ark., 2012; Bahl ve ark., 2013) ve çalışılmaya devam edildiği görülmektedir.

Yapılan bu doktora çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edildi ve bu sonuçlar ışığında bazı önerilere yer verildi.

Susuz boraks (Etibor-68, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) örneklerinin yapılan TG/DTA termal analizleri sonucunda, örneğin 134°C ile 739°C civarlarında endotermik ve 450°C civarında ise ekzotermik tepeler verdiğini göstermiştir. Bu bulgular ışığında doğal susuz boraksın termal özellikleriyle ilgili olarak 134°C civarında tabakalar arası su çıkışının (dehidrasyon), 450°C civarında kristal yapı suyunun çıkışının (dehidroksilasyon) ve 739°C civarında ise yeni mineral faz oluşumunun (erime noktası) meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca TG analizi sonucunda susuz boraksın 450°C 'lik sıcaklığa ulaşana kadar başlangıç kütlelerinin yaklaşık olarak %5'ini kaybettiği ve bu kütle kaybının 739°C 'lik erime noktası sıcaklığına kadar sabit kaldığı da yapılan termal analizlerin sonuçlarında gözlenmiştir (Şekil 6.1).

Doğal susuz boraks örneklerinin yapılan XRD analizleri sonucunda herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmayan örneklerin tam olarak kristallenmedikleri uygun sıcaklıklarda uygulanan tavlama işlemleri ile kristallenmenin gerçekleştirilebileceği

gözlenmiştir (Şekil 6.3). Ayrıca yapılan XRD analizleri sonucunda susuz boraks örneklerinin birim hücre parametreleri ve Miller indisleri de belirlenmiştir (PDF no: 00-009-0014).

Susuz boraks örneklerinin kimyasal yapısının belirlenmesi için yapılan XRF analizleri Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelge 6.3'te de görüldüğü gibi çalışmada kullanılan susuz boraks örneğinin, %66.9066 oranında B_2O_3 ve %32.2776 oranında Na_2O olmak üzere $Na_2B_4O_7$ 'yi oluşturan temel elementler düşünüldüğünde %99.1842 oranında bu temel elementlerden oluştuğu görülmektedir. Susuz boraks mineralinin %0.8158'lik kısmı ise MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , Cl , K_2O , CaO , Fe_2O_3 , NiO , CuO , SrO , ZrO_2 ve BaO element ve bileşiklerinden oluşmaktadır.

Herhangi bir ısıtılma işlemine tabi tutulmamış olan susuz boraks örneklerinin çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde, parçacık boyutlarının yaklaşık olarak 5-100 μm aralığında olduğu, parçacıklar arası boşlukların ve parçacık şekillenimlerinin farklılıklar gösterdiği bu nedenle homojen bir dağılımın olmadığı görülmektedir. Bu durumun XRD sonuçları da göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, herhangi bir ısıtılma işlemine tabi tutulmayan örneklerin tam olarak kristallenmemiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 6.4).

Susuz boraks örneklerinin beta doz yanıtlarını belirlemek için örnekler Riso TL/OSL Sistem Model DA-20 ölçüm sistemi içerisinde bütünleşik olarak bulunan $^{90}Sr/^{90}Y$ β kaynağı ile 11cGy ile 9.632 kGy arasındaki farklı dozlarda ışınlanarak TL ışıma eğrileri kaydedildi. Susuz boraks örneklerinin, ~1 Gy'lik dozdan ~200 Gy'lik doza kadar doğrusal bir artış ($f(D) \approx 1$), 200 Gy'lik dozun üzerinde supralineer bir artış ($f(D) > 1$) gösterdiği ve 4 kGy'lik dozdan itibaren doyuma ulaşmaya başladığı ($f(D) < 1$) gözlenmiştir (Şekil 6.8 ve Çizelge 6.4).

Dozimetrik amaçlı kullanılacak olan malzemelerin her kullanım sonrasında maruz kaldıkları radyasyonların etkisinin silinmesi ve tuzakların kararlı hale getirilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada bu durumu test edebilmek ve en uygun tavlama sıcaklığının ve tavlama süresinin belirlenmesini sağlamak amacıyla tavlama deneyleri yapılmıştır. Tavlama deneyleri sonucunda önceki dozların silinmesi ve tuzakların kararlı hale getirilmesi için susuz boraks örneklerinin 400°C'de 15 dakika

tavlanmasının uygun ve yeterli olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11).

Farklı ısıtma hızları deneyleri hem tavlamanmamış hem de tavllanmış susuz boraks örnekleri için 1°C/s, 2°C/s, 3°C/s, 5°C/s, 7°C/s ve 10°C/s'lik ısıtma hızları kullanılarak yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ışıma tepelerinin, TL teorisinde bahsedildiği gibi artan ısıtma hızı ile yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı gözlenmiştir. Ayrıca, ısıtma hızı arttıkça tepe yükseklikleri ve ışıma eğrisi altında kalan alanların azaldığı gözlenmiştir. Isıtma hızının artmasıyla birlikte TL ışıma eğrileri altında kalan alanlardaki düşüşün başlangıç değerlerine göre, 2°C/s'lik ısıtma hızında, 400°C'de 15 dakika tavllanmış örnekler için yaklaşık %24, tavlamanmamış örnekler için %16 oranında olduğu, benzer şekilde 3°C/s'lik ısıtma hızında, tavllanmış örnekler için %26 ve tavlamanmamış örnekler içinse %18 oranında olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, meydana gelen düşüşün oranı 5, 7 ve 10°C/s'lik ısıtma hızlarında hem tavllanmış hem de tavlamanmamış örnekler için yaklaşık olarak aynıdır. Bu düşüşlerin 5°C/s ısıtma hızı için %28, 7°C/s ısıtma hızı için %46 ve 10°C/s ısıtma hızı için ise %44 oranında olduğu görülmüştür (Şekil 6.12, 6.13, 6.14 ve 6.15).

Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyleri sonucunda tavlama yapılmamış örneklerin 12 çevrim sonunda TL hassasiyetlerinin ilk çevrimden başlayarak bir artış gösterdiği ancak bu artış miktarının, kullanılan üç farklı örnek için hesaplanan TL hassasiyetlerindeki sapmaya uygun olarak bu sapma sınırları içerisinde yer aldığı söylenebilir (Şekil 6.18). 400°C'de 15 dakika tavllanmış örneklerin TL hassasiyetlerinin ilk 4 çevrime kadar azaldığı daha sonra 7. çevrime kadar artış gösterip 7. çevrimden sonra tekrar azaldığı görülmektedir (Şekil 6.19). TL hassasiyetindeki bu değişimlerin susuz boraksın tavlama işlemlerinden sonra yapılan oda sıcaklığına kadar ani soğutma işlemi sırasında nem almalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için yapılacak olan çalışmalarda örneklerin desikatör içerisinde tutulmalarının uygun olacağı söylenebilir.

TL ışıma tepelerine parçacık boyutunun etkisinin test edilmesi için yapılan deneylerin sonucunda, farklı dozlarda ışınlanmış olan örneklerden, parçacık boyutu

45 μm 'den daha küçük ve parçacık boyutu 90 μm ile 140 μm arasında olan örneklerin 225°C civarında yer alan TL ışıma tepelerinin yaklaşık olarak benzer TL ışıma şiddetlerine sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 6.20, 6.21, 6.22). Bu nedenle, 225°C civarında yer alan TL ışıma tepesi ile ilgili olarak yapılacak olan detaylı çalışmalarda parçacık boyutu olarak $p_b < 45 \mu\text{m}$ veya $90 < p_b < 140 \mu\text{m}$ aralıklarının kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

Yüksek dozun susuz boraksın TL hassasiyetine etkisinin test edilmesi için yapılan deneylerin sonucunda, susuz boraks örneklerine verilen yüksek doz sonrasında düşük doz verilerek yapılan TL okumalarına yüksek dozun etkisinin olmadığı ve yüksek dozun örneklerin TL hassasiyetini etkilemediği söylenebilir (Şekil 6.23).

Çalışmada kullanılan susuz boraks örneklerinin sönümlerinin test edilmesi için eşit miktarda beta dozu (66.89 Gy) verilen örnekler karanlık ortamda ve ışık alan laboratuvar ortamında saklanmıştır. Saklanan örnekler belirlenen sürelerin (0, 7, 14, 30, 60 ve 90 gün) bitiminde hem tavlaniş ışınlanmış hem de tavlanişmadan ışınlanmış örneklerin oda sıcaklığından 600°C'ye kadar TL okumaları yapılmıştır. Yapılan TL okumaları sonucunda, herhangi bir tavlama işlemine tabi tutulmadan ışınlanmış ışık alan laboratuvar ortamında saklanan susuz boraks örneklerinin ilk hafta sonunda TL şiddetlerinin %56, ikinci hafta sonunda %67 oranında azaldığı, bu %67'lik azalmadan sonraki iki haftalık süreçte herhangi bir azalmaya uğramadığı sonraki 1 aylık dönemlerde ise yaklaşık olarak her ay %10 oranında azalarak 3 aylık saklama süresi sonunda ilk ölçülen TL şiddetine göre %82 oranında azaldığı gözlemlendi. 400°C'de 15 dakika tavlandıktan sonra ışınlanmış ışık alan laboratuvar ortamında saklanan susuz boraks örneklerinin ilk hafta sonunda TL şiddetlerinin %32, ikinci hafta sonunda %52 oranında azaldığı, bu %52'lik azalmadan sonraki iki haftalık süreçte %10 oranında yeni bir azalmaya uğradığı ve sonraki 2 aylık saklama zamanında ise %3 oranında düşük bir azalmaya uğradığı gözlemlendi. Tavlama yapılmadan karanlık ortamda 60 gün saklanan örneklerin TL şiddetinde artma gözlemlendi. Bu durumun daha derin tuzaklardaki yük transferinden ve OH⁻ iyonlarının meydana getirdiği sahte tuzaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Tavlama yapılmış ve ışınlanarak karanlık ortamda saklanmış olan örneklerin TL şiddetlerinin,

60 günlük saklama zamanından sonra aniden düştüğü gözlemlendi. Bu ani azalmanın ışınlımsız geçişlerin tuzakları boşaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada susuz boraks örneklerinin foton (6 MV enerjili x-ışını) doz yanıtları ve ortalama 6 MV'lik fotonlarla ışınlanmış olan örneklerin sönümleri de çalışıldı. X-ışınlarına maruz bırakılan susuz boraks örnekleri 48 saat süreyle karanlık laboratuvar ortamında saklandı ve bu süre sonunda TL ışıma eğrileri kaydedildi. TL okumaları sonucunda örneklerin 150°C, 315°C ve 430°C civarlarında 3 farklı TL ışıma tepesine sahip olduğu gözlemlendi. 1, 5 ve 10 cGy'lik dozlarla ışınlanmış olan susuz boraks örneklerinin sadece 430°C civarında TL ışıma tepelerine sahip olduğu 10 cGy'lik dozdan sonra ise 150°C ve 315°C'de de TL ışıma tepeleri gözlemlendi. Bu durumun, 1, 5 ve 10 cGy düzeyindeki düşük dozlarda sık tuzaklara yakalanan elektronların, örneklerin karanlık ortamda 48 saat süre ile bekletilmesi sırasında tuzaklardan kurtulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha yüksek dozlara çıkıldıkça 150°C ve 315°C tepelerinin tekrar gözlenmesinde sık tuzaklara yakalanan elektronların sayısının fazla olmasının ve 48 saatlik bekleme süresinde bu elektronların tamamının tuzaklardan kurtulmamış olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Susuz boraksın foton doz yanıtının 1 cGy'lik dozdan 800 cGy'lik doza kadar $f(D) < 1$, 1000 cGy'lik dozda ise $f(D) > 1$ davranışına sahip olduğu gözlemlendi. Bu nedenle foton doz yanıtının doğrusal olduğu bölgeler ($f(D) \approx 1$) 1000 cGy'lik doza kadar gözlenememiştir. Doğrusal doz yanıt bölgesinin gözlenebilmesi için 1000 cGy'lik dozlardan daha yüksek dozlarla çıkılarak çalışmanın detaylandırılmasının önemli olacağı düşünülmektedir.

Fotonlarla (x-ışınları) 1000 cGy'lik doz verilerek ışınlanmış olan susuz boraks örneklerinin sönüm deneyleri sonucunda, TL şiddetlerinin ilk 12 saatlik saklama zamanı sonunda %40, ilk 4 günlük saklama zamanı sonunda %70 oranında azaldığı ve bu azalmanın 14 günlük süre sonunda %88 oranında olduğu gözlemlendi.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında, Na₂B₄O₇ (CAS no:1330-43-4, Sigma-Aldrich) örneklerine katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle farklı oranlarda gümüş katkılanarak dozimetrik özellikleri çalışıldığı gibi çözelti yanma reaksiyonu yöntemiyle (SCS, Solution Combustion Synthesis) MgB₄O₇, bakır (Cu) ve gümüş

(Ag) katkılı $MgB_4O_7:Cu,Ag$ örnekleri üretilerek bu örneklerin de dozimetrik özellikleri de çalışılmıştır.

Katkılanmamış ve Ag katkılanmış Sodyum Tetra Borat ($Na_2B_4O_7$ ve $Na_2B_4O_7:Ag$) örneklerinin yapılan XRD analizleri sonucunda, $Na_2B_4O_7$ örneklerinin katkılama işlemi öncesinde tam olarak kristalleşmediği ve Ag katkılanması ile birlikte uygulanan ısıtma işlemi sonucunda kristalleşmenin gerçekleştiği gözlemlendi. Katkılama sonrasında yapısal olarak bir değişikliğin meydana gelmediği, ancak Ag iyonlarının yapıda yer bulması ile birlikte yeni ışıma tepelerinin oluştuğu, bazı ışıma tepelerinin şiddetlerinde azalma gözlenirken bazı ışıma tepelerinin ise şiddetlerinin arttığı gözlemlendi (Şekil 6.32). Katkılanmamış ve Cu-Ag katkılanmış Magnezyum Borat (MgB_4O_7 ve $MgB_4O_7:Cu,Ag$) örneklerinin yapılan XRD analizleri sonucunda ise SCS yöntemiyle yüksek sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanarak üretilmiş olan MgB_4O_7 örneklerinin kristalleşmiş olduğu, örnekler Cu ve Ag katkılanmasıyla birlikte bazı ışıma tepelerinin şiddetlerinde azalma meydana gelirken bazı ışıma tepelerinin ise şiddetlerinin arttığı gözlemlendi.

Katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle farklı oranlarda gümüş katkılanan $Na_2B_4O_7:Ag$ ve katkısız $Na_2B_4O_7$ örneklerine eşit dozlar (5 Gy) verilerek yapılan TL okumaları sonucunda, $Na_2B_4O_7$ örneklerinin iç içe geçmiş tepelerden oluşan $100^\circ C$ civarında belirgin bir TL ışıma tepesine, $Na_2B_4O_7:Ag$ örneklerinin ise $118^\circ C$, $170^\circ C$, $230^\circ C$ ve $300^\circ C$ civarlarında dört farklı ışıma tepesine sahip olduğu gözlemlendi. Benzer şekilde çözelti yanma reaksiyonu yöntemiyle üretilen MgB_4O_7 ve $MgB_4O_7:Cu,Ag$ örneklerine eşit dozlar (40 Gy) verilerek yapılan TL okumaları sonucunda, MgB_4O_7 örneklerinin ilki iç içe geçmiş tepelerden oluşan $137^\circ C$ civarında belirgin ve ikincisi $305^\circ C$ civarında olmak üzere iki tane TL ışıma tepesine sahip olduğu, $MgB_4O_7:Cu,Ag$ örneklerinin ise $161^\circ C$, $206^\circ C$, $305^\circ C$ ve $454^\circ C$ civarlarında dört farklı ışıma tepesine sahip olduğu gözlemlendi.

Sıg tuzaklardan kaynaklanan ve çok kısa sürelerde sönmeye uğrayan düşük sıcaklık tepelerinin silinerek derin tuzaklardan kaynaklanan ve sönmeye karşı oldukça dirençli olan yüksek sıcaklık tepelerini net bir şekilde elde edebilmek ve dozimetrik özelliklerini çalışabilmek için ön ısıtma deneyleri yapıldı. Yapılan ön ısıtma deneyleri sonucunda $Na_2B_4O_7:Ag$ örnekleri için en uygun ön ısıtma sıcaklığının

160°C ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri içinse en uygun ön ısıtma sıcaklığının 220°C olduğu gözlemlendi (Şekil 6.34, Şekil 6.35).

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin tekrar kullanılabilirlikleri yapılan deneylerle test edildi. Bu deneyler sonucunda $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin ilk çevrimden başlayarak 10. çevrime kadar TL hassasiyetlerinin en fazla %2 oranında değiştiği gözlemlendi. $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin TL hassasiyetlerinin ilk çevrimden itibaren her çevrimde %2 oranında artarak 10. çevrim sonunda %18 oranına ulaştığı gözlemlendi.

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin beta doz yanıtlarının belirlenmesi amacıyla doz yanıt deneyleri yapıldı ve örneklerle 11 cGy ile 4.013 kGy arasında değişen dozlar verilerek TL ışıma eğrileri kaydedildi. Yapılan deneyler sonucunda $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin, 9 Gy'lik dozdan 802.68 Gy'lik doza kadar doğrusal bir artış ($f(D) \approx 1$), 802.68 Gy'lik dozun üzerinde supralineer artış ($f(D) > 1$) gösterdiği ve 3.21 kGy'lik dozdan itibaren doyuma ulaşmaya ($f(D) < 1$) başladığı gözlemlendi. Benzer şekilde $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin 17.057 Gy'lik dozdan 133.78 Gy'lik doza kadar doğrusal bir artış ($f(D) \approx 1$), 200.67 Gy'lik dozun üzerinde supralineer artış ($f(D) > 1$) gösterdiği ve 802.68 Gy'lik dozdan itibaren doyuma ulaşmaya ($f(D) < 1$) başladığı gözlemlendi. Bu sonuçlar ışığında $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örneklerinin 9 ile 802.68 Gy'lik, $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin ise 17.057 ile 133.78 Gy'lik doz aralıklarında dozimetrik amaçlı olarak (yüksek doz dozimetrisinde) kullanılabileceği belirlenmiştir.

Farklı ısıtma hızları deneyleri hem $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ hem de $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri için 1, 2, 3, 5, 7 ve 10°C/s'lik ısıtma hızları kullanılarak yapıldı. Yapılan deneyler sonucunda ışıma tepelerinin, TL teorisinde bahsedildiği gibi artan ısıtma hızı ile yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı (Furetta ve Weng, 1998) ve ısıtma hızı arttıkça tepe yükseklikleri ve ışıma eğrisi altında kalan alanların azaldığı gözlemlendi.

Yüksek dozun $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örneklerinin TL hassasiyetine etkisinin test edilmesi için yapılan deneylerin sonucunda, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$ örnekleri için verilen yüksek dozun ardından düşük doz verilerek yapılan TL okumalarına yüksek dozun etkisinin olmadığı ve örneklerin TL hassasiyetinin değişmediği gözlemlendi (Şekil 6.44). $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag}$ örnekleri için verilen yüksek dozun ardından düşük

doz verilerek yapılan TL okumalarına ise yüksek dozun etkisinin olduğu ve yüksek dozun $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerinin TL hassasiyetlerini arttırdığı gözlemlendi (Şekil 6.45).

Yapılan bu çalışmada, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerinin dozimetre olarak kullanımında dikkat edilmesi gereken birkaç önemli nokta tespit edilmiştir. Dozimetrik amaçlı kullanımlarda bu örneklerin özellikle nemden ve ışıktan korunması gerekmektedir. Bu nedenle örneklerin nem almaması için desikatör içerisinde muhafaza edilmesi önemlidir. Ayrıca örnekleri ışıktan korumak içinse uygun bir muhafaza kullanılmalıdır.

Beta kaynağı kullanılarak yapılan ışınlamalardan elde edilen veriler ışığında her üç örneğin de yüksek doz dozimetrisinde kullanılabileceği tespit edildi. Örneklerin dozimetrik amaçlı olarak kullanımlarında, TL okumalarının, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ örneklerinin 200°C 'de, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Ag}$ örneklerinin 160°C 'de ve $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag}$ örneklerinin ise 220°C 'de ön ısıtma işlemine tabi tutulduktan sonra yapılmasının uygun olacağı yapılan deneyler sonucunda belirlendi.

KAYNAKLAR

- ABD EL-HAFEZ, A.I., YASIN, M.N., SADEK, A.M., 2011. GCAFIT-A new tool for glow curve analysis in thermoluminescence nanodosimetry, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume: 637, Issue : 1, pp. 158-163.
- ARDIÇOĞLU, B., 2005. Synthesis of Rare-Earth Doped Lithium Triborate, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mining Engineering, The Degree of Master of Science Thesis, 126 pages.
- ARMITAGE, S.J., BAILEY, R.M., 2005. The measured dependence of laboratory beta dose rates on sample grain size, Radiation Measurements, Volume: 39, Issue: 2, pp. 123-127.
- ATTIX, F.H., 1986. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. First Edition. Wiley-VCH, Weinheim, 640 p., 1986.
- BAHL, S., PANDEY, A., LOCHAB, S.P., ALEYNIKOV, V.E., MOLOKANOV, A.G., KUMAR, P., 2013. Synthesis and thermoluminescence characteristics of gamma and proton irradiated nanocrystalline $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$, Journal of Luminescence, Volume: 134, pp. 691-698.
- BALARIN, M., 1979. Phys. Stat. Sol. (a), 54 K137 (1979).
- BARRON, A.R., SMITH, C., 2010. Crystal Structure, Connexions module : m16927, Kaynak : <http://cnx.org/content/m16927/latest/>, Erişim tarihi : 08.03.2013, 2010.
- BEISER, A., 1995. Modern Fiziğin Kavramları, McGraw-Hill, Inc., pp. 334-336.
- BOHUM, A., 1954. Czech. J. Phys., 4, 91 (1954).
- BOOTH, A.H., 1954. Canad. J. Chem., 32, 214 (1954).
- BOS, A.J.J., 1993. 1993b Radial. Protec. Dosim, 47-41.
- BOS, A.J.J., 2007. Theory of Thermoluminescence, Radiation Measurements 41 (2007), S45-S56.

- BOS, A.J.J., DIELDORF, J.B., 1991. The Analysis of Thermoluminescence Glow Peaks in $\text{CaF}_2\text{:Tm}$, Radiation Protection Dosimetry 37, pp. 231-239.
- CEMBER, H., THOMAS, E.J., 2009. Introduction to Health Physics, Fourth Edition, McGraw-Hill Companies, 2009.
- CHEN, R., 1969. J. Appl. Phys., 40, 570 (1969).
- CHUNG, K.S., CHOE, H.S., LEE, J.I., KIM, J.L., and CHANG, S.Y., 2005, A Computer Program for the Deconvolution of Thermoluminescence Glow Curves, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 115, No:1-4, pp. 345-349.
- ÇOLAK, F., 2008. Serviks Kanserinin İntrakaviter Brakiterapi'sinde Bilgisayarlı Tomografi ile Uyumlu Aplikatörler Kullanılarak Doz Dağılımının Üç Boyutlu İncelenmesi ve Bacak Pozisyonunun Doz Dağılımına Etkisi, Hacettepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2008).
- DAS, A., FERBEL, T., 2005. Introduction to Nuclear and Particle Physics, Second Edition, World Scientific Publishing, 2005.
- DEMİR, M., 2008. Nükleer Tıp Fiziği ve Klinik Uygulamaları, Bayrak Ofset, 2008.
- DROZDOWSKI, W., BRYLEW, K., WITKOWSKI, M.E., WOJTOWICZ, A.J., KAMADA, K., YANAGIDA, T., YOSHIKAWA, A., 2013. Effect of thermal annealing on light yield, low temperature thermoluminescence, and time profiles of LuAg:Pr scintillator crystals, Radiation Measurements, In Press, Corrected Proof, Available online 15 February 2013.
- DTU, 2013. Guide to The Riso TL/OSL Reader, http://www.nutech.dtu.dk/english/About/Radiation_physics/Products/TL_OS�SL_reader/Manuals.
- EKDAL, E., KARALI, T., KELEMEN, A., IGNATOVYCH, M., 2012. Mn Katkılı $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Tek Kristallerinin Işıma Özelliklerinin İncelenmesi, 6. Lüminesans Dozimetri Kongresi (LÜMİDOZ-VI) Bildiri Özetleri Kitabı, Çeşme/İzmir, Sayfa : 20, 11-13 Eylül 2012.
- FRANKLIN, A.D., HORNYAK, W.F., PAGONIS, V., KRISTIANPOLLER, N., 1990. Thermoluminescence study of annealing a geological calcite, International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part D.

- Nuclear Tracks and Radiation Measurements, Volume: 17, Issue: 4, pp. 517-523.
- FURETTA, C., KITIS, G., WENG, P.S., CHU, T.C., 1999. Thermoluminescence characteristics of $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume: 420, Issue : 3, pp. 441-445.
- FURETTA, C., WENG, P.S., 1998. Operational Thermoluminescence Dosimetry, World Scientific, Singapore, 1998.
- FURETTA, C., 2003. Handbook of Thermoluminescence, World Scientific, Singapore, 450p, 2003.
- GARLICK, G.F.J., GIBSON, A.F., 1948. Proceedings of the Physical Society, 60, 574, 1948.
- GROSSWEINER, L.I., 1953. J. Appl. Phys. 24 (1953) 1306.
- HALPERIN, A., BRANER, A.A., 1960. Physical Review Online Archive, 117, 408.
- HOLMES-SIEDLE, A., ADAMS, L., 2000. Handbook of Radiation Effects, Second Edition, Oxford University Press, 2000.
- HOOGENSTARAATEN, W., 1958. Philips Res. Repts, 13, 515 (1958).
- IAEA, 2004. Radiation People and the Environment (IEAE), IAEA/PI/A.75/04-00391, Handbook, 2004.
- ILICH, B.M., 1979. Sov. Phys. Solid State, 21, 1880 (1979).
- IZEWSKA, J., RAJAN, G., 2005. Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teacher and Students, International Atomic Energy Agency (IAEA), 2005.
- KAWASHIMA, Y.S., GUGLIOTTI, C.F., YEE, M., TATUMI, S.H., MITTANI, J.C.R., 2013. Thermoluminescence features of $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb}$ phosphor, Radiation Physics and Chemistry, In Press, Corrected Proof, Available online 31 December 2012.
- KURT, K., OLIVEIRA, L.C., MILLIKEN, E.D., DOULL, B.A., YUKIHARA, E.G., 2012. Cerium ve Lityum Katkılı Magnezyum Borat ($\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Ce,Li}$) Mineralinin Optiksel Uyarılma ile Lüminesans (OSL) Merkezlerinin Belirlenmesi, 6. Lüminesans Dozimetri Kongresi (LÜMİDOZ-VI) Bildiri

- KAYHAN, M., 2009. Effects of Synthesis and Doping Methods on Thermoluminescence Glow Curves of Manganese Doped Lithium Tetraborate, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Chemistry, The Degree of Master of Science Thesis, 59 pages.
- KHAN, F.M., 2010. The Physics of Radiation Therapy, Forth Edition, Lippincott Williams & Wilkins, USA, 560 p., 2010.
- KITIS, G., TUYN, J.W.N., 1998. A simple method to correct for the temperature lag in TL glow-curve measurements. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31 (1998) 2065–2073.
- KRANE, K.S., 2001. Nükleer Fizik I, Çeviri Editörü : Başar Şarer, Palme Yayıncılık, Ankara, 2001.
- LUSHCHIK, L.I., 1956. *Soviet Phys. JEPT*, 3, 390 (1956).
- MAGDALYNA, I, FASOLI, M, KELEMEN, A., 2012. Thermoluminescence Study of Cu, Ag and Mn Doped Lithium Tetraborate Single Crystals and Glasses, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 81, No. 9, September 2012, pp. 1528-1532.
- MANAM, J., SHARMA, S.K., 2008. Determination of Trapping Parameters from Thermally Stimulated Luminescence Glow Curves of Mn-Doped Li₂B₄O₇ Phosphor, *Radiation Effects & Defects in Solids*, Vol. 163, No. 10, October 2008, pp. 813-819.
- MARIANI, D.F., VIGNOLO, J., JIMENEZ DE CASTRO, M., 1989. Thermal annealing of the effect of plastic deformation on the thermoluminescence of KBr, *Solid State Communications*, Volume: 69, Issue: 5, pp. 471-474.
- MARKEY, B.G., BØTTER-JENSEN, L., DULLER, G.A.T., 1997. A new flexible system for measuring thermally and optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 27, 83-89.
- MAY, C.E., PARTRIDGE, J.A., 1964. *J. Chem. Soc.*, 40, 1401, 1964.
- MCKEEVER, S.W.S., 1985. *Thermoluminescence of Solids*, Cambridge University Press, 1985.

- MCKEEVER, S.W.S., MOSCOVITCH, M. and TOWNSEND, P.D., 1995. Dosimetry Materials : Properties and Uses (Ashford : Nuclear Technology Publishing), England.
- NUR, N., 2010. Ametistlerin Termoluminesans Yöntemiyle Dozimetrik Karakteristiğinin Analiz Edilmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, (2010).
- ÖZDEMİR, Z., ÖZBAYAOĞLU, G., KIZILYALLI, M., YILMAZ, A., 2004. Katı-hal Reaksiyonu Yöntemiyle Lityum Triborat (LiB_3O_5) Sentezi, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eylül, 23-25, Eskişehir, Türkiye. 109-112.
- PAGONIS, V., KITIS, G., FURETTA, C., 2006. Numerical and Practical Exercises in Thermoluminescence, Springer Science+Business Media, Inc., 232 p., Publication Date : 04/01/2006.
- PAGONIS, V., MICHAEL, C., 1994. Annealing effects on the thermoluminescence of synthetic calcite powder, Radiation Measurement, Volume: 23, Issue: 1, pp. 131-142.
- PARFIANOVITCH, I.H., 1954. J. Exp. Theor. Phys. SSSR, 26, 696 (1954).
- PEKPAK, E., ÖZBAYAOĞLU, G., YILMAZ, A., 2009. Thermoluminescence Characteristics of Lithium Tetraborate, 4th International Boron Symposium, October, 15-17, Eskişehir, Türkiye. 103-110.
- PODGORSKAK, E.B., 2010. Radiation Physics for Medical Physicists (Series: Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering), Second Edition, Springer, 2010.
- PROKIC, M., 1980. Development of highly sensitive $\text{CaSO}_4:\text{Dy/Tm}$ and $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy/Tm}$ sintered thermoluminescent dosimeters, Nuclear Instruments and Methods, Volume 175, Issue 1, pp. 83-86.
- PROKIC, M., 1993. $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ as a New TL Dosimeter, Radiation Protection Dosimetry, Volume 47, Issue 1-4, pp. 191-193.
- PROKIC, M., 2001. Lithium Borate Solid TL Detectors, Radiation Measurements, Volume 33, Issue 4, August 2001, pp. 393-396.

- PUCHALSKA, M., BILSKI, P., 2006. GlowFit—a new tool for thermoluminescence glow-curve deconvolution, *Radiation Measurement*, Volume: 41, Issue: 6, pp. 659-664.
- RANDALL, J.T., WILKINS, M.H.F., 1945. *Proceedings of the Royal Society A*, 184, 366, 1945.
- SANTIAGO, M., LESTER, M., CASELLI, E., LAVAT, A., GES, A., SPANO, F., KESSLER, C., 1998. Thermoluminescence of sodium borate compounds containing copper, *Journal of Material Science Letters*, Volume 17, Issue 15, pp. 1293-1296.
- SERWAY, R.A., JEWETT, J. W. JR., 2010. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, Eighth Edition, Brooks/Cole Cengage Learning, 2010.
- SHINDE, S.S., LAKSHMANAN, A.R., BHATT, B.C., BHATT, R.C., 1988. Photo transfer thermoluminescence in $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ -grain size dependence, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 31, Issue 4, pp. 592-596.
- SILVA, H., 1989. The effect of grain size and teflon matrix on the energy dependence of thermoluminescent dosimeters, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part A. Applied Radiation and Isotopes*, Volume 40, Issue 2, pp. 109-116.
- SPANO, F., SANCHEZ, G., CASELLI, E., and RODRIGUEZ, M.E., 1995. Thermoluminescent Trap Parameters of Sodium Tetraborate Compounds, *Journal of Physics: Condensed Matter*, Volume 7, Issue 13, 1995, pp. 2633-2640.
- SINGH, T.R., SINGH, S.N., and SINGH, A.N., 2012. Study of the Effect of Thermal Treatment in the Preparation of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ Phosphor, *International Journal of Materials Physics*, Volume 3, Issue 1, pp. 39-43.
- TAEK, 2009. *Radyasyon İnsan ve Çevre, Radiation People and the Environment* (IEAE) kitabından çeviri, 2009.
- TAKEUCHI, N., INABE, K., and NANTO, H., 1975. *J. Mater. Sci.* 10 (1975) 159.

- THOMSEN, K.J., BØTTER-JENSEN, L., DENBY, P.M., MURRAY, A.S., 2006. Luminescence response to irradiation using mini X-ray generators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 252:267–275.
- TOPAKSU, M., YÜKSEL, M., DOĞAN, T., NUR, N., AKKAYA, R., YEGİNGİL, Z., TOPAK, Y., 2013. Investigation of the characteristics of thermoluminescence glow curves of natural hydrothermal quartz from Hakkari area in Turkey, Physica B : Condensed Matter, Volume 424, Issue 1, pp. 27-31.
- YAZICI, A.N., SOLAK, S., CHEN, R., YEĞİNGİL, Z., 2002. The Analysis of Thermoluminescent Glow Peaks of $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ After β -Irradiation, J. Physics D : Applied Physics, 35, 2526-2535, (2002).
- YÜKSEL, M., 2008. Orta Anadolu Fluoritlerinin (CaF_2) Termoluminesans (TL) Işıma Tepelerine Tavlamanın Etkisi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2008).
- YÜKSEL, M., TOPAKSU, M., YAZICI, A.N., YEĞİNGİL, Z., DOĞAN, T., 2010. The effects of pre-irradiation heat treatment and heating rate on the thermoluminescence glow peaks of natural CaF_2 , Radiation Effects & Defects in Solids, Vol. 165, No. 5, May 2010, pp. 396-402.
- ZIMMERMAN, J., 1971. The radiation-induced increase of the 100°C thermoluminescence sensitivity of fired quartz, J. Phys. C : Solid St. Phys., Vol. 4, pp. 3265-3276.
- I, KEINER, L.E., Coastal Carolina University, Solar Matters III, Teacher Page, Electromagnetic Spectrum, p. 10, http://www.fsec.ucf.edu/en/education/k-12/curricula/sm3/documents/SM3_ElectromagneticSpectrum.pdf, (Erişim Tarihi: 20 Mart 2013)
- II, European Nuclear Society Web Page, <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/bremsstrahlung.htm>, (Erişim tarihi: 20 Mart 2013)
- III, <http://whs.wsd.wednet.edu/faculty/busse/mathhomepage/busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter12/chapter12.html> (Erişim Tarihi: 8 Mart 2013)

- IV, <http://www.flickr.com/photos/mitopencourseware/with/4706123553/>,
(Erişim tarihi: 20 Mart 2013)
- V, International Atomic Energy Agency (IAEA)
<http://nucleus.iaea.org/HHW/MedicalPhysics/Radiotherapy/Dosimetry/Generalprinciples/>
(Erişim Ttarihi: 20 Mart 2013)
- VI, <http://www.mvtec.com/halcon/solutions/helmholtz/>
(Erişim Tarihi : 20 Mart 2013)
- VII, http://www.irsn.fr/fr/professionnels_sante/documentation/documents/radiation_dosimeters.pdf
(Erişim Tarihi : 20 Mart 2013)
- VIII, <http://image.made-in-china.com/2f0j00ZsDTQeKyrEbm/Chip-TLD-GR-200-Series-.jpg>,
(Erişim Tarihi : 29 Mart 2013)
- IX, <http://www.epsilonlandauer.com.tr/tr/osl-teknolojisi-15-h.html>,
(Erişim Tarihi : 29 Mart 2013)
- X, www.landauer.com,
(Erişim Tarihi : 29 Mart 2013)
- XI, <http://3dgeldos.fjfi.cvut.cz/results/clinicalapplications/images/shots.htm>,
(Erişim Tarihi : 29 Mart 2013)
- XII, http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/linear_defects.htm,
(Erişim Tarihi : 29 Mart 2013)
- XIII, <http://iys.inonu.edu.tr/webpanel/dosyalar/1259/file/yarinot-2.pdf>,
(Erişim Tarihi : 29 Mart 2013)
- XIV, www.boren.gov.tr,
(Erişim Tarihi : 30 Mart 2013)
- XV, www.etimaden.gov.tr,
(Erişim Tarihi : 30 Mart 2013)
- XVI, www.mta.gov.tr,
(Erişim Tarihi : 30 Mart 2013)

- XVII, <http://webmineral.com/data/Borax.shtml>,
(Erişim Tarihi : 30 Mart 2013)
- XVIII, <http://www.rigaku.com/products/xrf/primus>,
(Erişim Tarihi : 30 Mart 2013)

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Mersin'in Tarsus ilçesinde dünyaya geldi. İlköğrenimini 1995 yılında Gülek İlköğretim Okulunda, ortaöğrenimini 1998 yılında Devlet Parasız Yatılı olarak okuduğu Trabzon Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fatih Eğitim Fakültesi Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi (OFMAE) Bölümü Fizik Öğretmenliği Programından (lisansla birleştirilmiş yüksek lisans) yüksek lisans derecesi ile mezun oldu. 2008 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans öğrenimini tamamladı. Şuan Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimini sürdürmektedir.