

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
GENEL FİZİK BİLİM DALI**

**NADİR TOPRAK ELEMENTİ KATKILI LİTYUM BORAT  
FOSFORUNUN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Onur DİNÇER**

**Danışman  
Doç. Dr. Arzu EGE**



**MANİSA-2019**

## TEZ ONAYI

**Onur DİNÇER** tarafından hazırlanan " **Nadir Toprak Elementi Katkılı Lityum Borat Fosforunun Sentezi Ve Karakterizasyonu**"adlı tez çalışması 13/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

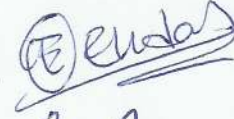
**Danışman**

**Doç. Dr. Arzu EGE**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Elçin EKDAL KARALI**  
Ege Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. İsrail ŞABİKOĞLU**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Onur DİNÇER**



**Onur  
DİNÇER**

**NADİR TOPRAK ELEMENTİ KATKILI LİTYUM BORAT FOSFORUNUN SENTEZİ VE  
KARAKTERİZASYONU**

**2019**

## İÇİNDEKİLER

|                                                           | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| İÇİNDEKİLER.....                                          | I     |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                       | II    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                      | III   |
| TABLO DİZİNİ .....                                        | IV    |
| TEŞEKKÜR .....                                            | V     |
| ÖZET.....                                                 | VI    |
| ABSTRACT .....                                            | VII   |
| 1. GİRİŞ .....                                            | 1     |
| 1.1. Literatür Özeti.....                                 | 2     |
| 2. GENEL BİLGİLER.....                                    | 13    |
| 2.1. Lüminesans ve Lüminesans Mekanizması .....           | 13    |
| 2.2. Termolüminesans .....                                | 15    |
| 2.2.1. Termolüminesans Tarihi .....                       | 16    |
| 2.2.2. Termolüminesans Mekanizması.....                   | 17    |
| 2.3. Termolüminesans Uygulamaları .....                   | 20    |
| 2.4. Radyasyon Dozimetreleri .....                        | 24    |
| 2.4.1. Dozimetrelerin Özellikleri.....                    | 25    |
| 2.4.2. Lüminesans Dozimetrisi.....                        | 27    |
| 2.4.3. Termolüminesans Dozimetrisi .....                  | 28    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....                             | 33    |
| 3.1. Terbiyum Katkılı Lityum Borat Fosforun Sentezi ..... | 33    |
| 3.2. X-Işını Kırınımı (XRD).....                          | 33    |
| 3.3. Termolüminesans Ölçümleri.....                       | 34    |
| 3.4. Radyolüminesans Ölçümleri.....                       | 35    |
| 3.5. Termolüminesansın Kinetik Karakterizasyonu.....      | 36    |
| 3.5.1 Çeşitli Isıtma Hızları (VHR) Metodu .....           | 36    |
| 3.5.2 Pik Şekli (PS) Metodu .....                         | 37    |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....                  | 39    |
| 4.1. XRD Sonuçları .....                                  | 39    |
| 4.2. Radyolüminesans Sonuçları .....                      | 40    |
| 4.3. Termolüminesans Sonuçları .....                      | 42    |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                | 48    |
| KAYNAKLAR.....                                            | 50    |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                            | 55    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|             |                                          |
|-------------|------------------------------------------|
| <b>İB</b>   | İletim Bandı                             |
| <b>DSÖ</b>  | Dünya Sağlık Örgütü                      |
| <b>DTA</b>  | Diferansiyel Termal Analiz               |
| <b>E</b>    | Aktivasyon Enerjisi                      |
| <b>Eg</b>   | Bant Aralığı                             |
| <b>GSE</b>  | Taban Durum Enerjisi                     |
| <b>IR</b>   | Kızılötesi                               |
| <b>IRCP</b> | Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu |
| <b>LED</b>  | Işık Yayan Diyot                         |
| <b>ML</b>   | Mekanoluminesans                         |
| <b>OSL</b>  | Optik Uyartımlı Lümineans                |
| <b>PL</b>   | Fotoluminesans                           |
| <b>PMT</b>  | Fotoçoğaltıcı Tüp                        |
| <b>PS</b>   | Pik Şekli                                |
| <b>RL</b>   | Radyoluminesans                          |
| <b>S</b>    | Frekans faktörü                          |
| <b>SEM</b>  | Taramalı Elektron Mikroskobu             |
| <b>T</b>    | Sıcaklık                                 |
| <b>TBI</b>  | Tedavi Tekniklerinin Işınlaması          |
| <b>TLD</b>  | Termoluminesans Dozimetre                |
| <b>TSL</b>  | Termal Uyartımlı Lüminesans              |
| <b>UV</b>   | Morötesi                                 |
| <b>DB</b>   | Değerlik Bandı                           |
| <b>VHR</b>  | Çeşitli Isıtma Hızları                   |
| <b>XRD</b>  | X Işını Kırınımı                         |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                        | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. İçsel kusura sahip fosforun elektronik yapısının şematik gösterimi .....                                                                                                                                                    | 15    |
| Şekil 2.2. Termolüminesans için enerji depolama aşamasının (tuzaklama) enerji seviyesi diyagramı.....                                                                                                                                  | 18    |
| Şekil 2.3. Termolüminesans için enerji boşaltma aşamasının enerji seviyesi diyagramı.....                                                                                                                                              | 19    |
| Şekil 2.4. Bazı ana TLD malzemelerinin ışıma eğrilerinin örnekleri (a) LiF: Mg, Ti; (b) LiF: Mg, Cu, P; (c) CaF <sub>2</sub> : Mn; (d) CaF <sub>2</sub> : Dy; (e) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : C; (f) CaSO <sub>4</sub> : Dy ..... | 20    |
| Şekil 2.5. Termolüminesansın uygulamalarının şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                   | 21    |
| Şekil 2.6. Tipik bir TLD okuyucunun şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                            | 30    |
| Şekil 2.7. Düşük bir ısıtma hızında bir TLD okuyucu ile ölçülen LiF: Mg, Ti'nin tipik bir ışıma eğrisi .....                                                                                                                           | 31    |
| Şekil 3.1. TL ışıma eğrilerinin kaydedildiği MicroLab RA94 model TLD okuyucu. ....                                                                                                                                                     | 35    |
| Şekil 3.2. Radyolüminesans ölçümlerinin alındığı sistem. ....                                                                                                                                                                          | 36    |
| Şekil 3.3. Pik Şekli metoduna göre bir termolüminesans ışıma piki için belirlenen $\tau$ , $\delta$ , $\omega$ nicelikleri .....                                                                                                       | 38    |
| Şekil 4.1. Tb katkılı lityum borat örneğinin X-ışını kırınım deseni ve evsahibi yapıya ait kristal düzlemlerinin ana pikleri.....                                                                                                      | 39    |
| Şekil 4.2. Tb <sup>+3</sup> katkılı lityum borat fosforunun oda sıcaklığındaki radyolüminesans spektrumu .....                                                                                                                         | 40    |
| Şekil 4.3. Tb katkılı lityum borat örneğinin 2 °C.s <sup>-1</sup> 'lik bir ısıtma hızı ile ön ısıtmasız ve 100 °C'de ön ısıtmalı TL ışıma eğrileri. ....                                                                               | 44    |
| Şekil 4.4. X-ışını ile ışınlanmış Tb katkılı lityum boratın 1, 2, 5 ve 10 °C.s <sup>-1</sup> farklı ısıtma hızlarında kaydedilen ışıma eğrileri ....                                                                                   | 45    |
| Şekil 4.5. VHR yönteminin TLA için düzeltilmiş (♦) ve düzeltilmemiş (□) verilere uygulanması .....                                                                                                                                     | 46    |

## TABLO DİZİNİ

|                                                                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tablo 4.1. Tb katkılı LiBO <sub>2</sub> fosforunun 155 °C pikine ait iki yöntemle elde edilen TL kinetik parametreleri ..... | 47    |





## TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmaya başlama kararı almamda beni cesaretlendiren, çalışma boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, okul dışında da kendime bir şeyler katmamı sağlayan, kendisiyle çalışma hususunda ne kadar şanslı olduğumu dile getirmekten hiçbir zaman çekinmediğim ve tanımaktan onur duyduğum sevgili danışman hocam Doç. Dr. Arzu EGE 'ye

Yükseköğrenim hayatımın lisans döneminde tanıştığım ve daha sonra yüksek lisans süresince de gerek laboratuvar gerek kaynak araştırması gerekse fikir danışmak anlamında her türlü desteği gördüğüm değerli hocalarım Doç. Dr. Mehmet AYVACIKLI 'ya ve Doç. Dr. İsrail ŞABİKOĞLU 'na,

Ve ANNEME...

En içten duygularıyla teşekkür ederim.

Onur DİNÇER  
Manisa, 2019

## ÖZET

Yüksek Lisans

### Nadir Toprak Elementi Katkılı Lityum Borat Fosforunun Sentezi Ve Karakterizasyonu

Onur DİNÇER

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Arzu EGE

Çalışmada yaygın olarak kullanılan geleneksel katıhal sentez yöntemi ile nadir toprak elementi olan terbiyum (Tb) katkılı lityum borat fosforları ilk defa sentezlenmiştir. Sentezlenen terbiyum katkılı lityum borat fosforların yapısal ve lüminesans özelliklerini araştırmak için X-ışını kırınımı (XRD) analizi, radyolüminesans (RL) ve termal uyartımlı lüminesans (TSL) yöntemleri kullanılmıştır. 1200 °C'de sentezlenen lityum borat fosforlarının XRD desenleri incelendiğinde monoklinik yapıya sahip olduğunu görülmüştür.

Sentezlenen terbiyum katkılı lityum borat fosforun RL spektrumu, üç değerlikli oksidasyon durumunda terbiyum iyonlarının mevcut olduğunu ortaya koymuştur. RL ölçümleri, Tb<sup>3+</sup> in tipik 4f 4f alt yapısına karşılık gelen ışıma durumu  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$  ve  $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$  serisinin ortaya çıktığını ve yaklaşık 541 nm'de ana ışıma pikinin olduğunu göstermektedir. Yeni hazırlanmış terbiyum katkılı lityum borat fosforun TSL kinetik parametreleri hesaplanmıştır. LiBO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup>, 90 ve 155 °C civarında iki TSL ışıma eğrisi göstermiştir. Malzemenin ana ışıma piki (155 °C) ile ilişkili aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) ve frekans faktörü (s) olarak adlandırılan kinetik parametreler pik şekli (PS) ve çeşitli ısıtma hızları (VHR) yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lityum borat, termolüminesans, Radyolüminesans

2019, 56 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc.**

### **Synthesis and Characterisation of Rare Earth Element Doped Lithium Borate Phosphor**

**Onur DİNÇER**

**Manisa Celal Bayar University  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Arzu EGE**

Rare earth element terbium doped lithium borate phosphor was synthesized by conventional solid-state reaction method for the first time. X-ray diffraction (XRD) analysis, radioluminescence (RL) and thermally stimulated luminescence (TSL) techniques were used to investigate structural and luminescence properties of terbium doped lithium borate phosphors. XRD patterns confirm that the lithium borate phosphors sintered at 1200 °C exhibit monoclinic structure.

RL spectrum of synthesized terbium doped lithium borate phosphor revealed that terbium ions represent in trivalent oxidation states. RL measurements shows that the series of emission state  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$  and  $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ , corresponding to the typical 4f-4f intra-configuration forbidden transitions of  $Tb^{3+}$ , are appeared and major emission peak is around at 541 nm. The TSL kinetic parameters of a newly synthesized terbium doped lithium borate phosphor have been calculated. The  $LiBO_2:Tb^{3+}$  exhibits two TSL glow curves at around 90 and 155 °C. The kinetic parameters, namely activation energy (trap depth) and frequency factor (s) associated with the main glow peak (155 °C) of the material were determined using peak shape (PS) and various heating rates (VHR) methods.

**Keywords: Lithium borate, Thermoluminescence, Radioluminescence**

**2019, 56 pages**

## 1. GİRİŞ

Nadir toprak elementleri ile katkılı borat fosforları, 4f kabuğundaki iyi tanımlanmış geçişleri nedeniyle dikkat çekmektedir [1]. Nadir toprak (RE) elementleri ultraviyole ve görünür bölgedeki ışıma özelliklerine bağlı olarak fosforlar için en önemli ve umut verici aktivatörler olarak düşünülmektedir. Terbiyum iyonu, üç ana renk merkezinin yeşil bileşeni için teorik olarak ideal dalga boyuna yakın olan yüksek yoğunluklu, 541 nm civarında keskin bir ışımaya sahiptir. Bu nedenle, birkaç fosfor için en önemli yeşil ışık yayan lüminesans aktivatörüdür [2,3]. Terbiyum iyonu ( $Tb^{+3}$ ) katkılı borat fosforlar son yıllarda çok kez çalışılmıştır. Geniş bant aralıklarından dolayı, boratlar lüminesans iyonlar için ev sahibi örgüler olarak ilgi çekmektedir [4,5]. Örneğin, hidrotermal sentezle hazırlanan  $YBO_3: Tb^{+3}$  plazma ekran panelleri ve Hg içermeyen lambalar için etkili bir fosfor ve (Y, Gd)  $BO_3: Eu$  plazma ekran panel uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [6,7].

Boratlar oldukça kararlı kimyasal bileşiklerdir. Nadir toprak elementleri ve metalik iyonlar gibi termolüminesans (TL) duyarlılığını arttırıcı maddeler ile katkılendirme girişiminde ciddi sorunlar içermezler. Borat fosforlar, yüksek hassasiyet, lineerlik ve depolama özelliklerini gösterirler. Ayrıca ışık duyarlılığı, sönmüleme ve nem gibi birçok sorunu önlerler [8,9]. Lityum borat bileşiklerinin TL çalışmaları 1967 yılında Schulman ve arkadaşları tarafından [10] ve daha sonra alkali ve alkalın toprak boratların TL özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır [9, 11, 12, 13]. Doku eşdeğer TL dedektörler, özellikle klinik uygulamalarda ve radyasyon tedavisinde radyasyon dozimetresi için çok uygundur [14]. Çok az sayıda TL malzemenin yumuşak biyolojik dokuya çok yakın olan etkin atom numarası ile doku eşdeğeri (7,42) olduğu görülür. Lityum borat bazlı TL dozimetreler 7,3 etkin atom numarası ile oldukça ilgi çekici bir malzemedir.

Yapılan incelemelerde terbiyum (Tb) nadir toprak iyonu katkılı lityum meta borat ( $LiBO_2: Tb^{+3}$ ) fosforu ile ilgili literatürde bugüne kadar herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca uygulamalar için bu materyallerin gerçek potansiyelleri henüz keşfedilmemiş olması ve Terbiyum (Tb) katkısının lüminesans özellikleri üzerindeki etkisini bilme ihtiyacı mevcut çalışmaya motivasyonu arttırmıştır.

Bu çalışmada, katıhal reaksiyon yöntemi ile sentezlenen Tb<sup>+3</sup> katkılı LiBO<sub>2</sub> fosforların yapısal ve lüminesans özellikleri üzerinde durulmaktadır. Fosforların yapısal ve lüminesans özellikleri, X ışını kırınımı (XRD), radyolüminesans (RL) ve TL ölçümleri ile açıklanmıştır.

Birinci bölümde nadir toprak elementi katkılı lityum borat fosforunun sentezi ve karakterizasyonu ile ilgili geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde lüminesans ve TL mekanizması açıklanmıştır. Üçüncü bölümde sentezlenen terbiyum katkılı lityum borat malzemesinin karakterizasyonunda kullanılan TL ve RL yöntemleri ve yapılan ölçümler detaylı olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde XRD, RL ve TL analiz sonuçları verilmiştir. Tezin son bölümünde ise elde edilen sonuçlar ile ilgili öneriler sunulmuştur.

### 1.1. Literatür Özeti

Senguttuvan ve arkadaşları 2002 yılında Ce, In, Ni, Cu ve Ti iyonlarıyla katkılı Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> tek kristallerinin kristal büyümesi ve lüminesans özellikleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (LTB), büyük nötron yakalama kesiti izotoplarına sahip olan Li ve B'yi içerdiği için nötron tespiti için yararlı malzemelerden biri olarak düşünülmüştür. Bu çalışmada, Ce, In, Ni, Cu ve Ti katkılı LTB'nin kristal büyümesine ve ışıma özelliklerine ilişkin bazı çalışmalar mevcuttur. Kristaller Bridgman metodu ile %0,5 wt Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, CuO ve TiO<sub>2</sub> malzemeleri LTB karışımı içerisinde Platin (Pt) kroze kullanılarak büyütülmüştür. CeO<sub>2</sub>, ağırlık yüzdesi %0,1, 1,0 ve 2,0 oranında ilave edilmiş ve kristaller bir sıra deneyde oluşturulmuştur. Ce ile katkılı kristaller bazı küçük alanlar hariç saf olmasa da bileşik 270 ve 320 nm'de iki uyarılma piki için 375 nm'de kuvvetli emisyon göstermiştir. Katkı maddesi Ce, LBO ile homojen bir karışım sağlamamış ve kristalin saf alanı, herhangi bir ışıma göstermemiştir. Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> ile büyütülen kristaller, saydamlıkla çok az ayırım yapmışlardır. NiO ve CuO ile katkılanırlan kristaller, bazı alanlar hariç oldukça saf ve berrak bulunmuştur. Net alan üzerinde ölçülen geçirgenlik, NiO katkılanırlıldığı durumunda yaklaşık 220 nm'de ve CuO katkılanırlıldığında yaklaşık 200 nm'de (saf LTB'nin kesilmesi 167 nm'dir) kısa dalga boyu kesilmiştir. Ni katkılı LTB için 440, 500 ve 560 nm'de ve Cu katkılı için 240, 255 ve 310 nm'de soğurma pikine sahiptir. Bu iki kristal arasında Cu-katkılı LTB 245 nm'de uyarma için 360 nm'de yoğun emisyon göstermiştir [15].

Ignatovych ve arkadaşları 2004 yılında bakır (Cu) ve evropiyum (Eu) katkılı LTB'nin lüminesans özellikleri ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Cu ve Eu katkılı LTB'nin karakterizasyonu için fotolüminesans (PL), RL ve optik soğurma teknikleri kullanılmıştır. Ev sahibi yapının tek kristal ve camı hal değişikliği ve sınırlı miktarda katkı maddesi içeriği araştırılmıştır. Zamanla çözümlenen ölçümler, salınan türlerin belirlenmesine yardımcı olmuştur [16].

Ishii ve arkadaşları 2004 yılında katkılı tek kristal ve camı yapıdaki LTB'nin lüminesansı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Cu ile katkılandırılmış LTB tekli kristal, nötron dedeksiyonu için yeni bir materyal gibi görülmektedir. Hem nötron yakalama için büyük tesir kesitine sahip hem de Li ve B'nin varlığı ile yüksek enerjili birikimli etkin nötron dedeksiyonu beklenmektedir. Bu çalışmada nadir toprak elementi olan Ce iyonu yanında periyodik tabloda IA, IB, IIIA, IVA ve VA gruplarından 14 tane farklı katkı maddesi seçilmiştir. Kristaller, dikey Bridgman yöntemi ile çapı 20 mm ve uzunluğu 70 mm olan bir boyuta büyütülmüştür. Yetiştirilen kristaller optik geçirgenlik ve uyarma emisyon çalışmaları ile karakterize edilmiştir. Ce katkılı LTB camın geçirgenlik ve emisyon özellikleri de bildirilmektedir [17].

Haranath ve arkadaşları 2005 yılında borik asidin sentezdeki rolü ve kalsiyum alüminat fosfor özelliklerine uyarlaması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yüksek mavi ışık yayan kalsiyum alüminat fosforun geliştirilmesi ile ilgili mevcut çalışmada, kimyasal katkı olarak borik asidin ( $H_3BO_3$ ) aktif rolü tanımlanmıştır. Kalsiyum alüminatlı uzun ömürlü fosforun kristal yapısını, morfolojisini ve parlaklık özelliklerini belirleyen belirgin  $H_3BO_3$  kullanımı sistematik olarak incelenmiş ve sunulmuştur. Sonuçlar  $H_3BO_3$  için iki önemli role sahiptir; %10 mol'den az miktarlarda ilâve edildiğinde gerekli kristal faz oluşumuna teşvik etmek için bir madde olarak ve %10 mol'ün üzerinde ilave edildiğinde alüminoborat kompleksinin oluşumu için öncelikli olarak kullanılabildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu miktar alüminoborat kompleks oluşumu için bir eşik değeri olarak ele alınabilir. Lüminesans çalışmaları, belirlenen tüm fazların dışında, sırasıyla  $Eu^{+2}$  ve  $Nd^{+3+}$  iyonlarından maksimum PL artırımına ve uzun süre kalıcılığa (10-12 saat) katkıda bulunan tek fazı  $CaAl_2O_4$ 'tür. Nadir toprak katkılı kalsiyum alüminat uzun ömürlü fosfor sisteminin katı hal sentezinde yer alan ilgili kimya ve reaksiyon mekanizması, borik asit ilavesiyle etkilenen ışıma özelliklerine daha fazla vurgu yapılarak tartışılmıştır [18].

Ardıçoğlu ve arkadaşları 2006 yılında nadir toprak iyonu katkılı lityum triboratın üretimi ve tanımlaması ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Doğrusal olmayan optik aygıtlar alanında yapılan araştırmalar, ortak lazer kaynakları tarafından sağlanan frekans aralığını genişletebilen yeni borat bileşiklerine artan bir ilgi olduğunu göstermektedir. Lityum triborat (LBO) lazer silahı, kaynak, radar, izleyici, ameliyat, iletişim vb. için yeni geliştirilen ideal doğrusal olmayan bir optik kristaldir. Bu çalışmada, nadir toprak katkılı LBO'nun sentezi ve tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Nadir toprak elementleri içeren boratlar doğal olmayan optik uygulamalarda üstün olmaları nedeniyle ilgi çekicidir. LBO katı hal reaksiyonundan üretilmiştir. LBO daha sonra, birkaç farklı konsantrasyonda bazı nadir toprak elementleri (Gd, La, Y, vb.) ile katkılanmıştır. Bu çalışmada, Gd ile katkılı LBO örnekleri sunulmuştur. Yeni ürünlerin karakterizasyonu X-ışını kırınımı (XRD) ve kızılötesi (IR) analizi ile yapılmıştır. Bileşiklerin termal özelliklerinin incelenmesi için Diferansiyel Termal Analiz (DTA) kullanılmış, yeni bileşiklerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenmiştir. Bileşikler daha sonra TL çalışmalarına tabi tutulmuştur. XRD çalışmalarından, nadir toprak elementlerinin ilavesi ile ilgili herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. IR analizi, nadir toprak elementlerinin katkısı ile B-O bağlantısı ile ilgili herhangi bir değişiklik olmadığını göstermiştir. DTA çalışmaları, LBO'nun erime noktasının nadir toprak elementlerinin katkısıyla azaldığını göstermiştir. SEM görüntülerinde, nadir toprak elementleri ve LBO parçacıkları açıkça görülmüştür [19].

Sangetaa ve arkadaşları 2007 yılında lityum boratın farklı fazlarının TL incelemesi ve kristal karakterizasyonunda uygulanması ile ilgili çalışmalar yapmışlardır.  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ 'in tek kristalleri, öz akının bir bileşimini kullanarak üstten tohumlandırılmış çözelti büyütme tekniği ile büyütülmektedir. Burada, platin telle tuzaklamak, opak bir merkezi bölgeye ve saydam dış kısma sahip kristallerin büyümesine neden olur. Toz XRD ölçümleri, yarı saydam kısımda küçük bir parça  $\text{Li}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$  varlığını ortaya koymuştur. Her iki bölge için, UV emisyonlu lüminesans gözlenmiştir. Bu da safsızlık durumuna bağlıdır.  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ 'den termal olarak uyarılan lüminesans (TSL) ve  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$  sisteminde  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  fazı ile bir arada bulunan  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ve  $\text{Li}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$  olan diğer iki faz incelenmiştir. Polikristalin  $\text{Li}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$  ve  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 'nin ışıma eğrileri, iki farklı karakteristik ışımanın varlığını göstermiştir; ancak farklı

sıcaklıklarda,  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  için sadece bir ışıma piki gözlemlenmiştir. Bir külçenin farklı bölgelerinden alınan  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  tek kristal numunede yapılan ölçümler, kristalin saf kısmının, XRD ölçümünün algılama limitlerinin altında olan, çok küçük bir safsızlık fazı içerdiğini göstermiştir. Bu çalışma  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  kristal içinde bir miktar safsızlık fazının bulunması ile TSL' nin kazançlı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir [20].

Depci ve arkadaşları 2008 yılında alüminyum ile katkılanmış lityum triboratın TL özellikleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, sentezledikleri Al katkılı  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  bileşikler TL dozimetrik özellikler göstermiştir. Toz numuneleri katı hal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanmış ve bileşiklerin kristal oluşumu bir X-ışını kırınımı çalışması ile teyit edilmiştir. Katkısız ve Al katkılı  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  numunelerinin TL çalışmaları benzer ışıma eğrisi yapıları göstermiştir. Örneklerin  $1\text{ }^\circ\text{C/s}$ 'lik sabit bir ısıtma hızında ısıtma işleminden sonra yaklaşık 60, 130 ve 200  $^\circ\text{C}$ 'de üç adet ışıma pikine sahip olduğu belirlenmiştir. Karşılaştırmalı TL çalışmaları, ağırlıkça %5 Al katkılı  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  bileşiğin, doymamış bileşikten yaklaşık 240 kat daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Al katkılı  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ 'ün TL emisyon spektrumu yaklaşık 520 nm'de maksimum bir bant göstermiştir. TL doz cevabı, TL duyarlılığı, sönümleme, minimum saptanabilir doz, tekrarlanabilirlik, doz ölçümünün hassasiyeti ve tavlama gibi ana dozimetrik özellikler, Al-katkılı  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  numunesinin dozimetrik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir. Beta ile ışınlanmış katkısız ve Al katkılı  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  numunelerinin ışıma pikleri ile ilişkili tuzak parametreleri, yani kinetik merteye (b), aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü Glow Curve deconvolution (GCD) programı ile elde edilmiştir [21].

Ferreira ve arkadaşları tarafından 2011 yılında cam kararlılığı parametrelerinin kritik analizi ve lityum borat camlara uygulanması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Soğutmada oksit sıvılarının cam oluşturma yeteneğini (GFA) öngörmek için diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) deneylerinden belirlenen kristalleşmeye karşı, dokuz cam kararlılığı parametresini (GS) yeniden değerlendirmişlerdir. Ardından, borat camları hazırlanmış ve  $\text{Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$  sistemini %20,0-66,7 mol litya ile kaplamışlardır. Camlar, bir çözelti metodu ile elde edilen hem ticari hem de kimyasallardan hazırlanmıştır. GS parametreleri, karakteristik cam geçişi, kristalleşme ve DSC termogramlarının erime noktaları kullanılarak hesaplanmıştır. Yedi kararlılık



parametresinin, %33,3 mol lityaya kadar kompozisyonlar için benzer sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Burada beklendiği gibi GS, litya içeriği ile önemli ölçüde azalmaktadır. Bundan sonra litre başına %66,7 mol lityaya kadar GS, geniş bir sığ maksimum gösterir, ancak yaklaşık olarak sabittir, şaşırtıcı bir şekilde, kompozisyonun bu geniş kompozisyon aralığında GFA'yı önemli ölçüde etkilemediğini gösterir. Bu sonuç, nitel olarak %74 mol lityaya kadar bileşimlere sahip camları hazırlama konusundaki başarılı tecrübeleri kabul eder ve cam oluşturma sıvılarının GS ve GFA'sını karşılaştırmalı olarak ölçmek için basit DSC testlerinin yeterliliğini destekler [22].

Anishia ve arkadaşları 2011 yılında nadir toprak katkı lityum magnezyum borat fosforların TL özellikleri ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma, nadir toprak katkı lityum magnezyum borat (LMB) polikristal fosforun TL özelliklerini bildirmektedir. LMB fosfor, yüksek sıcaklıkta katı hal difüzyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Nadir toprak katkı LMB fosforları arasında terbiyum katkı materyal 240 °C'de geniş bir dozimetrik ışıma piki ile maksimum TL hassaslığını göstermiştir. Doku eşdeğeri olan terbiyum katkı TL fosforun TLD-100'ün yaklaşık dört kat fazla TL duyarlılığı vardır. Işıma eğrisi kararlılığı, emilime karşı TL cevabı, radyasyon sonrası depolama kararlılığı ve tekrar kullanılabilirlik gibi temel dozimetrik özellikler incelenmiştir. Bu TL materyali, 103 Gy'e kadar doğrusal bir doz cevabı, ihmal edilebilir depolama sönümlemesi ve basit bir tavlama işlemi ile tekrar kullanılmaktadır. LMB: Tb<sup>+3</sup> fosforunun TL emisyon spektrumu 544 nm'de geniş yeşil emisyon göstermiş ve bu da ev sahibi emisyon ile birleşmiştir. Karakteristik Tb<sup>+3</sup> emisyonları, PL spektrumunda görülmüştür [9].

Annalakshmi ve arkadaşları 2014 yılında nadir toprak katkı tetraborat fosforlarda TL mekanizması ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Nadir toprak elementleri (RE) katkı magnezyum tetraborat, katı hal sentezleme tekniği ile hazırlanmıştır. Bu fosforda incelenen farklı RE katkı maddeleri arasında, gadolinyum katkı fosforlara göre daha yüksek bir sıcaklıkta dozimetrik bir pik oluşturmuştur. RE katkı magnezyum tetraboratın TL emisyon spektrumu, karakteristik RE<sup>+3</sup> emisyonları göstermiştir. Elektromanyetik rezonans ölçümleri, bu fosforlarda, gama ışınlaması sırasında oluşan kusur merkezlerini belirlemek ve TL işlemi için bir mekanizma oluşturmak üzere gerçekleştirilmiştir. (BO<sub>3</sub>)<sup>-2</sup> 'e karşılık gelen sinyaller, TL

işlemindeki rolünü gösteren 250 °C'de tavlama kaybolan ışınlama üzerine  $O_v^-$  görülmüştür. Termal aktivasyon enerjileri, TL'nin mekanizmasının geçerliliğini gösteren olağan klasik metot esas alınarak hesaplanan sinyallerle çakışan, bu bozulmalara dayanarak hesaplanmıştır [23].

Anjaiah ve arkadaşları 2014 yılında evropiyum katkılı lityum borat camların spektroskopik özellikleri ve parlaklık davranışı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Evropiyum ile katkılı  $Li_2O-MO-B_2O_3$  ( $MO = ZnO, CaO$  ve  $CdO$ ) camlar, soğurma potansiyellerini anlamak için absorpsiyon ve lüminesans özelliklerini incelemek için eriyik söndürme tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Camların XRD sonuçları amorf doğayı teyit etmiş ve IR spektrumları cam ağında  $BO_3$  ve  $BO_4$  ünitelerinin varlığını ortaya koymuştur. Judd-Ofelt (J-O) yoğunluk parametreleri  $\Omega_\lambda$  ( $\lambda = 2, 4, 6$ ), optik soğurma spektrumlarının çeşitli emilim bantlarının yoğunluklarından değerlendirilmiştir.  $Eu^{+3}$  iyonlarının  $^5D_0 \rightarrow ^7F_j$  ( $J=1-4$ ) geçişleri için geçiş olasılıkları ( $A$ ), ömür süresi ( $\tau_R$ ), dallanma oranları ( $\beta_R$ ) ve uyarılmış emisyon kesitini ( $\sigma_P$ ) hesaplamak için J-O parametreleri kullanılmıştır. Bu camlarda  $Eu^{3+}$  iyonların  $^5D_0$  seviyesinden gelen bozunum ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Tüm bu camlar için ölçülen dallanma oranları ve uyarılmış emisyon kesitleri, incelenen  $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$  geçişinin lazer uygulamaları için yeterli potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Mevcut camlardan elde edilen yüksek uyarılmış emisyon kesiti ve dallanma oranları, kızılötesi lazerler için olan potansiyelini göstermektedir. TL çalışması da yapılmış ve veriler CdBEu camının üç  $Eu^{+3}$  katkılı cam arasında TL emisyonu için uygun olduğunu önermektedir [24].

Venkata ve arkadaşları 2015 yılında optik spektroskopisi için  $Dy^{+3}$  katkılı borat camların lüminesans uygulamaları üzerine çalışmışlardır.  $Dy^{+3}$  gömülü iyonu ile  $(50 - x)B_2O_3-20PbO-15MgF_2-15NaCl-xDy_2O_3$  ( $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$  ve  $2.0$  mol % 'si) borat camları hazırlamış ve diferansiyel termal analiz (DTA), X-ray Kırınım (XRD), Raman spektrumları, optik soğurma ve farklı konsantrasyonların fonksiyonu olarak PL kullanılarak incelemişlerdir. Borat camının termal kararlılığı DTA ile hesaplanmıştır. Cam matrisin amorf yapısını XRD ile teyit etmişlerdir. Raman spektrumuna dayanarak, cam matrislerinde bulunan fonksiyonel grupları analiz etmişlerdir. Judd-Ofelt teorisine dayanarak, üç spektral yoğunluk parametresi  $\Omega_\lambda$  ( $\lambda = 2, 4, 6$ ) soğurma spektrumlarından hesaplanmıştır. Bu parametreler, uyarılan durumun

çeşitliliğine karşılık gelen ilgili alt seviyelerdeki çeşitli durumlarda  $Dy^{+3}$  geçişlerinin radyasyon geçiş olasılıklarını ( $A_R$ ), radyasyon ömrünü ( $\tau_R$ ) ve dallanma oranlarını ( $\beta_R$ ) belirlemek için kullanılır. PL spektrumları sırasıyla  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$  (mavi),  $^6H_{13/2}$  (sarı),  $^6H_{11/2}$  (kırmızı) geçişleri nedeniyle iki dolu ve bir zayıf bant göstermektedir. Bu geçişler için lüminesans özellikleri araştırılmıştır.  $Dy^{+3}$  iyonlarının konsantrasyonundaki artış ile yoğunluğun %0,8 mol'e kadar arttığı ve daha sonra konsantrasyonun sönümlendiği gözlenmiştir. Bu, hazırlanmış camlar için optimize edilmiş konsantrasyondur (%0,8 mol). Deneysel ortalama ömür ( $\tau_{exp}$ ), bozunma eğrisi analizinden tüm cam matrisleri için hesaplanmıştır. %0,8 mol katkılı disprosyum iyonu üzerindeki spektroskopik ve lüminesans özellikleri, bilinen diğer cam matrisleri ile karşılaştırılmıştır. Yukarıdaki analizden, %0,8 mol  $Dy^{+3}$  katkılı borat camlarının, görünür spektral bölgedeki sarı aydınlatma uygulamaları için yararlı olabileceği düşünülmüştür [25].

Ramteke ve arkadaşları 2015 yılında  $Sm^{+3}$  iyonlarının lityum borat camlarının yapısal ve lüminesans özellikleri üzerine konsantrasyon etkisi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır.  $Sm^{3+}$  içeren lityum borat camları başarıyla hazırlanmış, fiziksel ve spektroskopik özellikleri analiz edilmiştir.  $Sm^{+3}$  iyonlarının ilavesi,  $BO_4^-$  ünitesinin oluşturulması nedeniyle camların yoğunluğunu arttırmıştır.  $Sm^{+3}$  içeren camların soğurma spektrumu, baz camla karşılaştırıldığında geçiş pikleri sayısını gösterir. Tauc'un yöntemi camların optik enerji bant aralığını bulmak için kullanılır. Optik enerji bandı boşluğunun değeri, yapısal değişiklikler temelinde açıklanan  $Sm^{+3}$  içeriğindeki artışla birlikte azalır. Uyarıcı spektrumlarından, bu camların UV ve yakın UV ışığı ile kolayca uyarılabileceği açıktır. Uyarılma durumunda bu camlar, 598 nm'de  $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{7/2}$  geçişine karşılık gelen güçlü bir emisyon gösterirler. Lüminesans sonuçları, bu camların LED uygulamaları için daha fazla modifiye edilebileceğini göstermiştir [26].

Padlyak ve arkadaşları 2016 yılında Er katkılı LTB camlarının spektroskopisi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Er ile katkılandırılmış  $Li_2B_4O_7$  camların; elektron paramanyetik rezonansı, optik soğurma ve lüminesans (emisyon ve uyarma) spektrumunun yanı sıra lüminesans kinetiğini de incelemiş ve analiz etmişlerdir. %0,5 ile %1,0 mol  $Er_2O_3$  içeren yüksek optik kalitedeki  $Li_2B_4O_7$ : Er camlar, standart cam senteziyle polikristal bileşiklerinden elde etmişlerdir. 4,2-300 K sıcaklık aralığındaki

elektron paramanyetik rezonans spektroskopisi ve 300 K'deki optik spektroskopisi, Er safsızlığının sadece  $\text{Er}^{+3}$  ( $^4f^{11}$ ,  $^4I_{15/2}$ ) iyonları olarak  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  cam örgüsü içine katılabildiğini göstermiştir. Cam örgüsünün Li bölgelerinde,  $\text{Er}^{+3}$  lüminesans merkezlerinin yerel yapısı önerilmiştir. Standart Judd-Ofelt teorisine dayanarak %1,0 mol  $\text{Er}_2\text{O}_3$  içeren  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Er}$  cam içindeki  $\text{Er}^{+3}$  merkezleri için fenomenolojik yoğunluk parametrelerinin ( $\Omega_2, \Omega_4, \Omega_6$ ) yanı sıra gözlenen soğurma geçişleri için osilatör gücü ( $P_{\text{cal}}$ ) ve deneysel osilatör gücü ( $P_{\text{exp}}$ ) hesaplanmıştır. Geçişlerin emisyon olasılıklarını ( $W_r$ ), dallanma oranları ( $\beta$ ) ve ışıma ömrünü ( $\tau_{\text{rad}}$ ) içeren lazer uygulamaları için ilişkili spektroskopik parametreler  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Er}$  camları içerisindeki  $\text{Er}^{+3}$  merkezlerinin ana gözlenen emisyon geçişleri için hesaplanmıştır. Deneysel ve hesaplanan teorik ömürleri karşılaştırılmış ve yeşil ( $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  geçişi) ve kızılötesi ( $4I_{13/2} \rightarrow I_{15/2}$  geçişi) emisyon bantları için kuantum verimliliği ( $\eta$ ) tahmin edilmiştir [27].

Obayes ve arkadaşları 2016 yılında gelişmiş dozimetrik özelliklere sahip yeni bir stronsiyum bakır katkılı lityum borat cam kompozisyonu üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma dozimetrik özellikleri ve yeni sentezlenmiş stronsiyum / bakır katkılı lityum borat cam bileşiminin (LB: Sr, Cu) kinetik parametrelerini kanıtlamıştır. Güçlendiricilerin konsantrasyonuna bağlı olarak ışıma eğrisinin şekli ile TL duyarlılığı, TL doz cevabı, minimum saptanabilir dozu, sönümlene ve tekrarlanabilirliği, tavlama, kinetik, aktivasyon enerjisi ve frekans faktörleri sırası ile belirlenmiştir. Önerilen dozimetrenin basit ışıma eğrisi, 0,5-4,1-10 ve 10-100 Gy (Co-60 gama ışıması) doz aralığında iyi bir doğrusalılık, kolay tavlama özellikleri, mükemmel tekrarlanabilirlik ve minimal sönümlene sergilemiştir. Bu ilgi çeken özellikleri ile hazırlanan cam bileşimi radyasyon dozimetre uygulamaları için kullanılabilirliği önerilmiştir [28].

Janek ve arkadaşları 2016 yılında MO ( $M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ) ile yapısı değiştirilmiş nadir toprak katkılı kurşunsuz borat camların lüminesans araştırmalarını yapmışlardır. Farklı oksit değiştiriciler ve lantanit iyonları bulunan kurşunsuz borat camların dizisi hazırlanmıştır. Oksit değiştiriciler MO ( $M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ )'nin üç değerlikli  $\text{Ln}^{+3}$  ( $\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Er}, \text{Pr}$ ) spektroskopik özellikleri üzerine olan etkisi sistematik olarak araştırılmıştır. Özellikle  $\text{Ln}^{+3}$  katkılı kurşunsuz borat camlarının lüminesans spektrumu, seçici bileşenlerin ( $\text{CaO}, \text{SrO}$  ve  $\text{BaO}$ ) etkisine göre sunulmuş ve

tartışılmıştır. Lântanit iyonlarının  $^5D_0$  ( $Eu^{+3}$ ),  $^4I_{13/2}$  ( $Er^{+3}$ ) ve  $^1D_2$  ( $Pr^{+3}$ ) uyarılmış halleri için R / O ( $Eu^{+3}$ ), floresans yoğunluğu oranı ve ölçülen lüminesans ömrü gibi çeşitli spektroskopik parametreler detaylı olarak analiz edilmiştir. Araştırma, üç değerlikli  $Ln^{3+}$ 'in spektroskopik özelliklerinin, camın ev sahibi matrislerindeki varlığı oksit değiştirici MO (M = Ca, Sr, Ba) türüne önemli ölçüde bağlı olduğunu kanıtlamıştır [29].

Patra ve arkadaşları 2016 yılında gümüş katkılı  $Li_2B_4O_7$  çeşitli nükleer radyasyona maruz bırakıldıktan sonra Ag katkılı  $Li_2B_4O_7$  (LTB: Ag) 'nin tek kristalleri üzerinde optik uyarılmış lüminesans (OSL) ölçümleri yapılmıştır. Katkılandırıldığı zaman OSL yoğunluğunun 0,1 Gy ile 500 Gy aralığında doğrusal olduğu bulunmuştur. 48 saat içinde OSL sinyalinin sönümlenmesi %36 civarındadır.  $^6Li$  ve  $^{10}B$ 'nin varlığı, termal nötron dozlarını ölçmek için yararlı bir şekilde kullanılmıştır. Ayrıca, uyartım kaynağının dalga boyu ( $\sim 460$  nm) ile LTB: Ag 'nin 270 nm'deki emisyonu arasındaki büyük fark, uygun filtrelerle basit bir OSL kurulumunda sinyal-gürültü oranını arttırmıştır. LTB: Ag'nin termal nötronlara karşı yüksek hassasiyeti, karışık alanlarda kişisel dozimetre ve nötron radyografisi için görüntüleme cihazları da dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yararlı olacağı belirtilmiştir [30].

Pawar ve arkadaşları 2016 yılında  $Dy^{+3} / Pr^{+3}$  Co katkılı lityum borat camların W-LED (beyaz led) için fiziksel ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Nadir toprak iyonları katkılı camlar, çeşitli optik ve optoelektronik cihazlarda kullanımları için araştırmacılar arasında büyük ilgi uyandırmıştır. Bu çalışmada, beyaz LED uygulaması için  $Dy^{+3}$  ve  $Pr^{+3}$  ile birlikte doymuş lityum borat camlarının fiziksel ve optik parametreleri incelenmiştir. Cam numunelerini hazırlamak için geleneksel ergitme soğutma tekniği kullanılmıştır. Cam numunelerin amorf doğası XRD çalışması ile teyit edilmiştir. Çeşitli fonksiyonel gruplar FTIR spektroskopisi ile incelenmiştir. Optik soğurma spektrumları, UV-VIS-NIR spektroskopisi ile kaydedilmiştir. İzin verilen doğrudan ve dolaylı enerji bant boşluğu, Tau yöntemi ile elde edilmiştir. Lüminesans spektrumları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve spektrumlar çeşitli dalga boyu aralıklarında yedi emisyon bandı göstermiştir.  $Pr^{+3}$ 'den  $Dy^{+3}$ 'e enerji aktarımı nedeniyle 663 nm'de ( $F_{9/2} \rightarrow 6H_{11/2}$ ) yoğun bir emisyon bandı gözlenmiştir. CIE renk koordinatları, tüm cam numuneleri için hesaplanmıştır. CIE kromatiklik diyagramı renk koordinatları  $X = 0,33$  ve  $Y = 0.40$  olan %0,6 mol  $Pr_6O_{11}$

içeren camı (G-4) en yüksek kırmızı (663 nm) emisyon yoğunluğuna sahiptir. Bu camların emisyonu beyaz ışığa çok yakın olduğundan beyaz LED uygulaması için kullanılabilir olduğu önerilmiştir [31].

Soheilian ve arkadaşları 2016 yılında nano-kristalin LTB'yi imal etmek için farklı bir yaklaşım olarak bakır parçacıklarının TL cevabını incelemişlerdir. Bu çalışmada, lityum-tetraborat (LTB), yüksek sıcaklıkta katı hal, yaş ve yanma reaksiyonlarının üç yöntemi ile sentezlenmiştir. TL özelliklerini geliştirmek için çözelti yardımlı yöntemle saf LTB'ye bakır ilave edilmiştir. LTB tanecikleri, 850 °C'de presleme (sıkıştırma) ve sentezleme (katılaştırma) işlemleri kullanılarak üretilmiştir. 5-20 Gy doz aralığında <sup>60</sup>Co kaynağının gama ışınlarına maruz bırakılan sentezlenmiş LTB parçacıkları ve ışımaya eğrilerinin yanı sıra doz-cevap diyagramları elde edilmiştir. Sonuç olarak katkı, kristalit boyutu ve parçacık morfolojileri gibi farklı davranışların TL davranışlarına etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, saf numuneler arasında yanma yöntemiyle sentezlenen LTB'nin diğer yöntemlerden daha yüksek TL duyarlılığına sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, LTB'nin nano-kristal yapısı nedeniyle, 5 Gy için zayıf bir ışımaya piki görülmüştür. Bu özellik, düşük dozlarda TL yoğunluğunu azaltmaya ve yüksek dozlarda doygunluğun azalmasına yol açmıştır. Bu numunenin sönümü diğerlerinden daha az ve göreceli olarak daha iyi bir tekrarlanabilirlik vermiştir. LTB: Islak reaksiyon ile sentezlenen bakır parçacıkları arasında, daha fazla tuzak ve lüminesans merkezleri oluşması nedeniyle diğerlerine göre daha yüksek TL cevabı göstermiş ve doza cevap doğrusallığı ve sönümlenme durumunda umut vaat eden özellikler göstermiştir [32].

Steudel ve arkadaşları 2016 yılında nadir toprak katkılı lityum borat camda uyarılmış kristalleşmenin etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Nadir toprak katkılı borat camları ve cam seramikleri, potansiyel foton dönüştürücü olarak araştırılmıştır. Yapılan camın termal olarak işlenmesi, içinde nano-kristaller oluşmasına neden olmuştur. Optik aktivasyon için Eu<sup>+3</sup> ve Tb<sup>+3</sup> ile katkılı camlar ultraviyole uyarma altında yoğun bir emisyon sağlarlar. Kristalleşme davranışını analiz etmek için diferansiyel tarama kalorimetresi ve X-ışını kırınımı uygulanmıştır. Katkısız cam ile karşılaştırıldığında, cam geçiş sıcaklığı ve kristalleşme sıcaklığı Eu<sup>3+</sup> katkısı ile artırılmıştır. Yapılmış haldeki camların termal olarak işlenmesi üzerine, iletim önemli

ölçüde azaltılmıştır. Ön PL kuantum verimlilik ölçümleri, cam seramikleri için daha düşük değerler verir [33].



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Lüminesans ve Lüminesans Mekanizması

Lüminesans terim olarak, tamamen termal olmayan diğer bir deyişle normal ve düşük sıcaklıktaki diğer kaynaklardan gelen ışığın "soğuk ışık" olduğu ışık yayılımını ifade etmektedir. Lüminesans, bazı enerji kaynakları fazladan enerji sağlayarak taban durumundaki bir atomun elektronunu uyarılmış duruma getirir; ardından bu uyarılmış (en yüksek enerjili) durum kararsız olduğu için, elektron bu enerjiyi ışık yoluyla vererek taban (en düşük enerjili) durumuna geri döner [34]. Aydınlatma esnasında, parlayan solucanlarda, ateşböceklerinde ve bazı deniz bakterilerinde ve denizde yaşayan hayvanlarda doğadaki lüminesans olayını gözlemlemek mümkündür. Bu olay, Arkeoloji, Jeoloji, Biyomedikal, Mühendislik, Kimya, Fizik ve Kalite Kontrol, Araştırma ve Geliştirme için farklı bilim adamları tarafından endüstriyel uygulamalarda çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

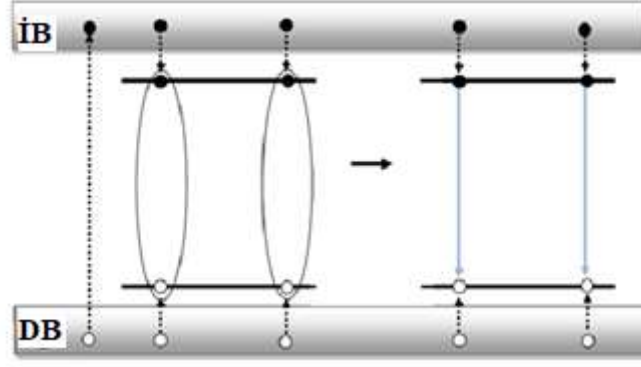
Lüminesans, inorganik bileşikler arasında nadir bulunan bir olaydır. Bunun nedeni, radyasyon ile ilişkili olmayan gevşeme süreçlerinin baskın olmasıdır. Bir kristal içindeki bir kompleksin veya bir metal merkezinin elektronik uyarımı, genellikle titreşim enerjisi ve sonunda ısı olarak sona erer. Doğal ışık yayılımının meydana geldiği bu durumlarda, spektral ve zamansal özellikleri, yarı kararlı yayılım durumu ve taban durumu ile ilişkisi hakkında birçok önemli bilgi taşır. Lüminesans spektroskopisi bu özellikleri keşfetmek için çok önemli bir araçtır. Lüminesans özelliklerini inceleyerek sadece ışık yayma sürecini değil, aynı zamanda ışımasız fotofizik ve fotokimyasal süreçler hakkında da fikir sahibi olmak mümkündür.

Lüminesans madde ile optik radyasyonun (kızılötesi, görünür veya ultraviyole ışığı) emisyonudur [35]. Bu olay, yüksek sıcaklığa ( $> 5000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sahip olması nedeniyle bir maddenin ışıyım emisyonu (siyah cisim ışıması) olduğu, parlaklığından fark edilebilir. Lüminesans çok çeşitli maddelerde ve birçok farklı durumda ortaya çıkabilir. Bu durumda, atomlar, polimerler, inorganik, organik veya organo-metalik moleküller, organik veya inorganik kristaller ve amorf maddeler, uygun koşullar altında lüminesans yayarlar [36].



Işık, insan hayatının temelini oluşturur ve güneş battığında faaliyette bulunmak için günlük olarak gereklidir. Mumdan, gaz aydınlatmasından, akkor aydınlatmadan ve lüminesans temelli aydınlatma gibi çeşitli ışık biçimleri vardır. Lüminesans soğuk emisyon olarak bilinir ve bu tür ışık yayan materyaller fosfor olarak adlandırılır. Bir fosfor materyalinin uygulamaları, modern LED'lerde, televizyon ekranlarında, cep telefonu ekranlarında, aydınlatma saatlerinde, acil durum tabelasında, biyolojik görüntülerde vs. bulunur. Bu bölüm, emilim, aktivatörün lüminesans dinamiği ve kalıcı emisyon mekanizması arasında değişen, lüminesans olayını göstermeyi amaçlamaktadır.

Fosfor, dışarıdan gelen radyasyon enerjisini soğurma ve onu elektromanyetik dalgalar olarak yeniden yayma yeteneğine sahip olan bir lüminesans malzemedir [37]. Emisyon, içsel kusur seviyesi durumları arasındaki elektronik geçişler [38] veya dışsal kusur seviyelerindeki lüminesans durumları nedeniyle gözlenir [37]. ZnO, içsel kusurlardan kaynaklanan emisyonu iyi bir örnektir. Bu, bir radyasyon soğurulduğunda oluşur (Şekil 2.1). Elektronlar iletim bandından donör seviyesine (pozitif yüklü içsel kusur) geri uyarılırken, boşluklar ise akseptör seviyesine (negatif yüklü içsel kusurlar) çekilir. İki zıt yük, elektron ve boşluklar, geçici olarak bağlanmış halde bulunur ve daha sonra radyasyon yoluyla yeniden birleşme yapacaklardır [38, 39]. Fosforlar, bir ev sahibi malzeme içerisine, bir aktivatörün (dışsal kusur) katılmasıyla oluşturulur. Burada aktivatör bir lüminesans merkezi gibi davranırken, ev sahibi malzeme ise herhangi bir alaşım bileşiğidir. Genellikle lantanit iyonları, lüminesans merkezi olarak davranması için kullanılır. Lantanit iyonları, lüminesansın yayıldığı merkez olan ev sahibi içinde, ayrı enerji seviyelerine neden olur (Şekil 2.1). Enerji seviyeleri bant boşluğunda konumlanmıştır, öyle ki elektronlar daha yüksek enerji durumundan daha düşük enerji seviyesine ışınlı olarak geri dönerler [37].



Şekil 2.1. İçsel kusura sahip fosforun elektronik yapısının şematik gösterimi.

Dışsal kusura sahip fosforda, uyarım kaynağının büyük enerjisi ev sahibi malzeme tarafından soğrulur. Bu enerji, sonunda emisyonun kaynaklandığı lüminesans merkezine aktarılır. İletkenlik bandına (İB) uyarılan negatif yüklü elektronlar, ışınlama soğurulduğunda değerlik bandında (DB) pozitif yük (boşluklar) bırakırlar. İletim bandındaki elektronlar, bant boşluğundaki ( $E_g$ ) aktivatörün en yüksek seviyesine geri uyarılır ve boşluklar aktivatörün en düşük seviyesine çekilir. Lüminesans durumundaki elektronlar, radyasyonla ışık yayarak en yüksek seviyeden en düşük seviyeye geri uyarılırlar. Bir ev sahibi yapı içerisindeki iki aktivatöre sahip bir fosfor durumunda, aktivatörler ya bağımsız olarak enerjiyi yayınlayacaktır ya da biri diğerine enerji transfer edecektir. Bu genellikle beyaz ışığı yayan bir fosfor üretirken kullanılır [40]. Dışsal kusura sahip fosforlarda, enerjiyi diğerine aktaran iyon, hassaslaştırıcı olarak adlandırılır ve sadece ışınlamı soğurur ve onu diğer iyon olan aktivatöre iletir. Bu, hassaslaştırıcının emisyon konumu aktivatör iyonunun emme enerjisi pozisyonuyla çakıştığında oluşur. Bu, bir fosforun lüminesans şiddetinin artırılması için ilginçtir [41, 42].

## 2.2. Termolüminesans

McKeever ve arkadaşları tarafından belirtildiği gibi TL termal olarak uyarılmış işlemlerden biridir [8]. Genel olarak TL, radyasyon ile uyarımın ardından bir kristalden sıcaklık uyarısı ile yapılan ışık emisyonudur. Bunun yanı sıra, mikroskobik olarak, çok daha karmaşıktır. Bu bölümde, TL mekanizması ayrıntılı olarak tartışılacaktır. Gelişen teknoloji ile birlikte TL; radyasyon dozimetresi, yaş tayini ve jeoloji gibi çeşitli uygulama alanlarına sahiptir.

### 2.2.1. Termolüminesans Tarihi

TL üzerine yapılan çalışmalar, Johann Sigismund Elsholtz, Robert Boyle ve Henry Oldenburg gibi akademisyenler, radyasyonlarını görmek için ısıtma yoluyla mineraller üzerine yaptıkları deneyler on yedinci yüzyıla kadar uzanmıştır. Fosforu toz haline getirilmiş, suyla karıştırılmış yeşil bir taş olarak gören ve ısıtıldığında parladığını savunan George Kaspar Kirchmaier ve Fosfor metalorum ismini kullanan Nathaniel Grew, bu konuya ilgi gösteren diğer bilim insanlarıdır.

On sekizinci yüzyıl araştırmacıları arasında Dufay, TL üzerine bulgularıyla kabul edilen ilk kişi olmuştur. Aydınlatmaya bir çeşit yanma olarak değinmiştir. Başta klorofan olmak üzere birçok materyal üzerinde çalışmış ve çok fazla ısınmanın materyalin TL kaybına neden olacağını öğrenmiştir. Ünlü bir bilim adamı olan Canton, Dufay'ın çalışmalarını, fosforun sıcaklığını daha da artırarak ve suni fosforun TL olarak adlandırdığı yeni bir ışıma türü keşfederek yeni bir aşamaya getirmiştir.

On sekizinci yüzyılda incelenen TL biliminde önde gelen bilim adamları olan De Saussure ve Thomas Wedgwood'a değinilmelidir. Üç farklı türde taş incelemişlerdir. Bunlardan birincisi, sülfür içeren ve serbest havada yanan bir kükürt bileşiği, ikincisi ışığı soğuran ve daha sonra da elmas gibi yananlar ve üçüncüsü hava gerektirmeyen kalsiyum ve magnezyumlu taş ve kalsiyum floriti gibi sıcak su altında lüminesans yapanlardır. Kalsiyum floritin renginin yoğunluğunun TL seviyesi için bir gösterge olduğunu beyan etmişlerdir. İkinci olarak TL ve tribolüminesans için sürtünme sonucu aydınlatma üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu bulgular, iki lüminesans modelleri arasında sağlam bir ilişkinin mümkün olmadığını göstermiştir.

TL üzerine çalışmalar on dokuzuncu yüzyılda da devam etmiştir. Araştırmacı Heinrich, hemen hemen tüm maddelerin toz formunda ve ılımlı ısıtmaya tabi tutulması koşuluyla ışık yayabileceğini iddia etmiştir. Bir başka araştırmacı Theodor von Grotthus, floresansla özel olarak ilgilenmiş ve TL ile özü arasındaki benzerliği göstermiştir. Her ikisi de olumlu ve olumsuz kısımlardan oluşur. Daha sonra, bilim adamı David Brewster, mineralleri ışığa maruz bırakarak lüminesans özelliğinin her zaman kazanılabileceğini savunarak Grotthus'a karşı çıkmıştır.

On dokuzuncu yüzyılda TL çalışan diğer araştırmacılar, renk ile TL arasında bir ilişki kurmaya çalışan Pearsall'dır; Pearsall'ın bulgularını geçersiz kılan Specia; deneyler yapan Napier; Wiedmann ve Schmitt, TL karakteristiğini katot ışınlarına bağlamıştır [43].

### **2.2.2. Termoluminesans Mekanizması**

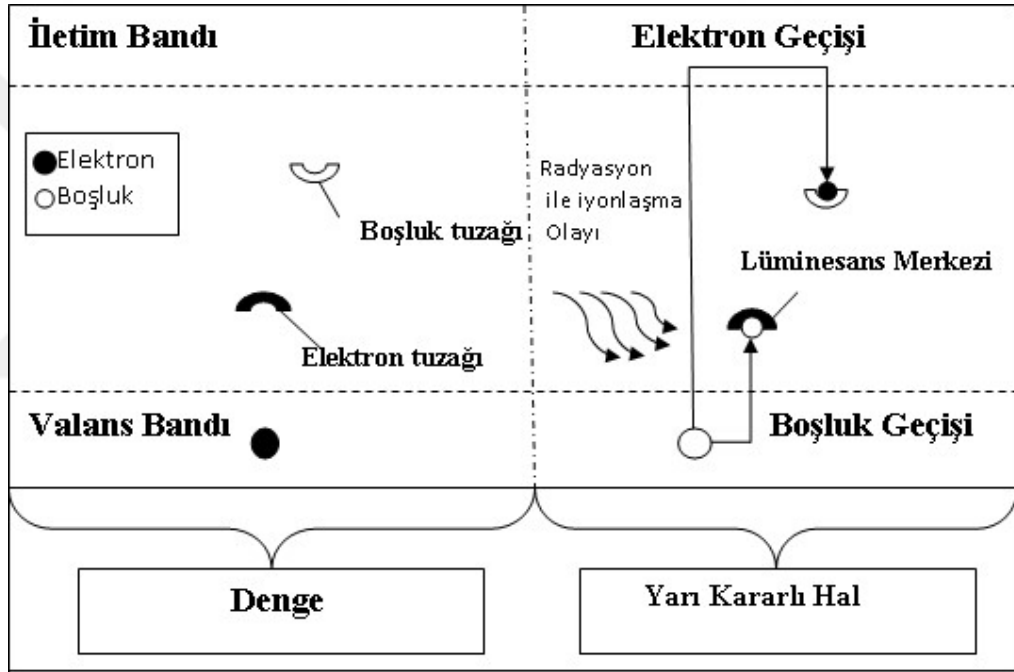
TL özetle iki aşamalı olarak tanımlanabilir. Birinci aşama, UV veya iyonlaşan radyasyondan gelen enerjiyi emerek sistemin denge durumundan yarı kararlı duruma geçmesidir. Ardından, ikinci aşamada, ısı uyarılma yardımı ile ışık gibi enerji salınmasıyla sistemin dengeye geri dönüşü sağlanır. Böylece TL radyasyondan önceki enerjinin soğurulmasını izleyen ısının uyarılmış emisyonudur [43]. Bu bölümde, bu ışık emisyonunun aşamaları ve çıktıları kısaca tartışılacaktır.

Bu soğurulan enerjinin kararlılığı için iki yol vardır: elektronik uyarılma ve yer değiştirme. Her iki işlemin sonunda, materyal yapısında radyasyona bağlı kusurlar meydana gelir. Radyasyona bağlı kusurlar elektronların dengesiz konsantrasyonunun bulunduğu sınırlandırılmış elektronik durumlardır [44]. Diğer adıyla, ışınlamadan yani radyasyona maruz bırakmadan önce, materyaller sınırlandırılmış elektronik enerji durumlarına sahiptir ve ışınlamadan sonra, bu hallerin bir kısmı dengesiz elektron yoğunluğu ile mevcuttur. Bu nedenle, bu kusurlara uyarılmış radyasyona bağlı kusurlar denir. McKeever'e göre, araştırmalar dikkate alındığında, kusurların meydana gelmesinin nedeninin iyonize olmayan yer değiştirme kusurunun dışında elektronik uyarılma olduğunu göstermişlerdir.

Elektronik uyarımdan kaynaklanan enerji depolaması, elektron-boşluk çiftinin üretilmesi ve uyarma oluşturulması ile gerçekleşir. Elektron-boşluk çifti üretimi, ışınlıktan sonra malzemenin kristal yapısında boşlukların ve elektronların oluşumudur. Buna ek olarak, yabancı maddelerin veya radyasyona bağlı kusurların yarattığı kusurlardan bir orta boşluk durumu vardır. Bu boşluk iki enerji bandı arasında bulunur; iletkenlik bandı ve değerlik bandı. Değerlik bandı en dıştaki enerji seviyesidir ve katı haldeki taban durumundaki elektron-boşluk çiftlerini içerir. Diğer yandan; iletkenlik bandında, elektronlar hareket etmekte serbesttirler ve elektrik akımı üretme yeteneğine sahiptirler.

TL olayına göre, orta boşluk hallerinde sınırlandırılmış olan elektron tuzağı ve kristaldeki boşluk tuzağı olarak adlandırılan iki kusur türü olduğu kabul edilir [8, 43, 45]. Orta aralıkta, elektron tuzağının iletim bandına yakın olduğuna ve boşluk tuzağının değerlik bandından uzak olduğu düşünülmektedir [8, 43, 45].

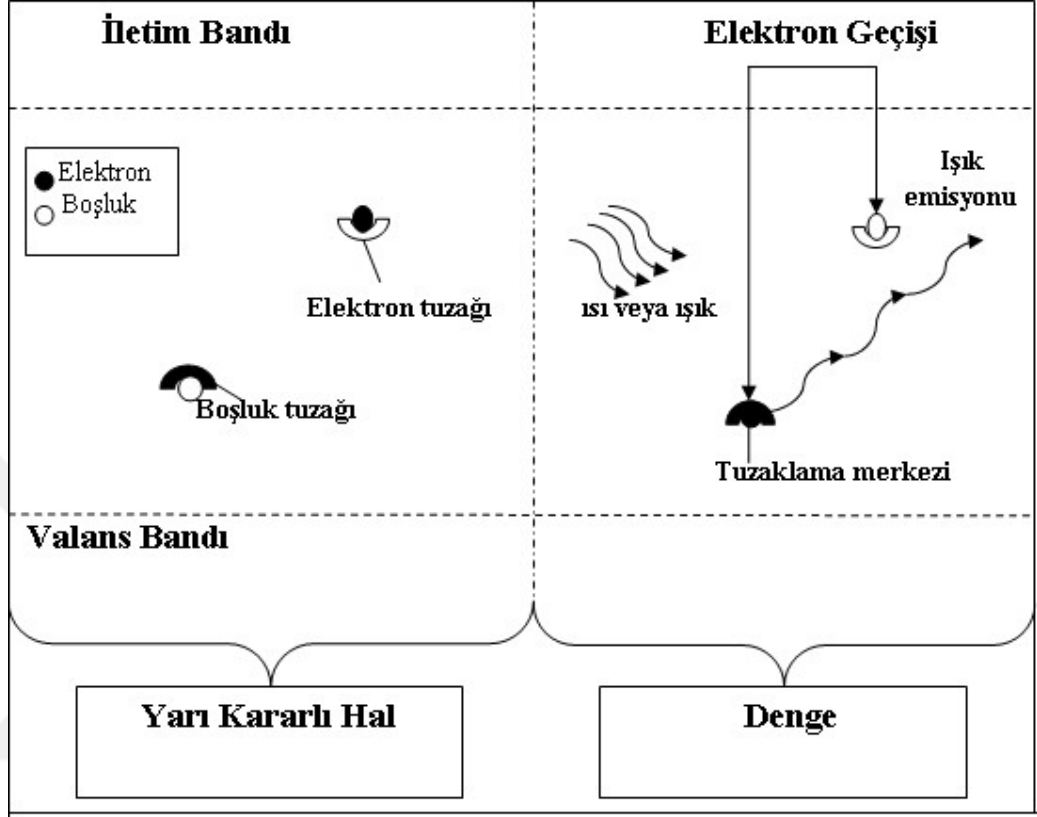
Şekil 2.2 enerji depolama mekanizmasını göstermektedir. Işınlama sonrasında, elektronlar değerlik bandından iletim bandına geçer ve boşluk, değerlik bandında pozitif yüklü bir alan haline gelir. Elektron iletim bandına ulaştığında, elektron bir elektron tuzağına dönüşür ve boşluk bağlantılı tuzağı kaplar. Boşluk tuzakları bu süreçte lüminesans merkezi olarak adlandırır [8, 43, 45, 46].



**Şekil 2.2.** Termolüminesans için enerji depolama aşamasının (tuzaklama) enerji seviyesi diyagramı.

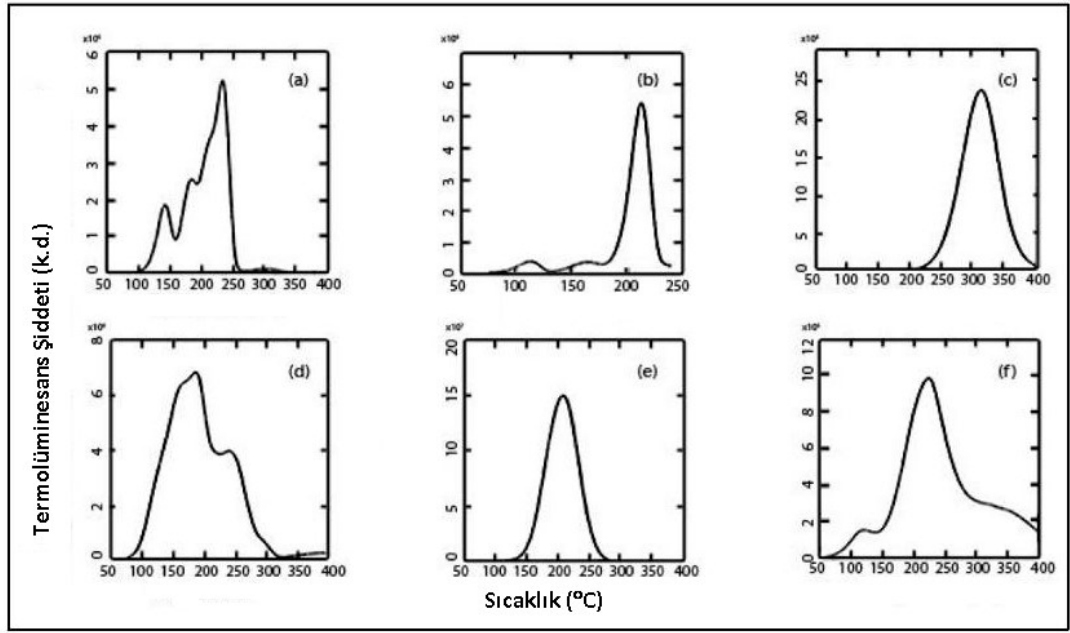
Sıcaklık artışı veya ışık verme ile uyarma, depolanan enerjinin serbest bırakılmasına neden olur. Ayrıca, maddenin durumu yarı kararlı duruma ulaşır. Isı arttıkça, elektron tuzağına sıkışan elektron iletim bandına geçer. Daha sonra elektron, boşluk tuzağında bulunan elektron ile tuzaklama veya yeniden birleşme yapabilir.

Elektronun boşluk tuzağındaki boşluk ile yeniden birleşmesi fotonların emisyonuyla sonuçlanır. Bu durumda, boşluk tuzağı, yeniden birleşme merkezi olarak adlandırılır [43]. Bu işlem Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.3.** Termoluminesans için enerji boşaltma aşamasının enerji seviyesi diyagramı.

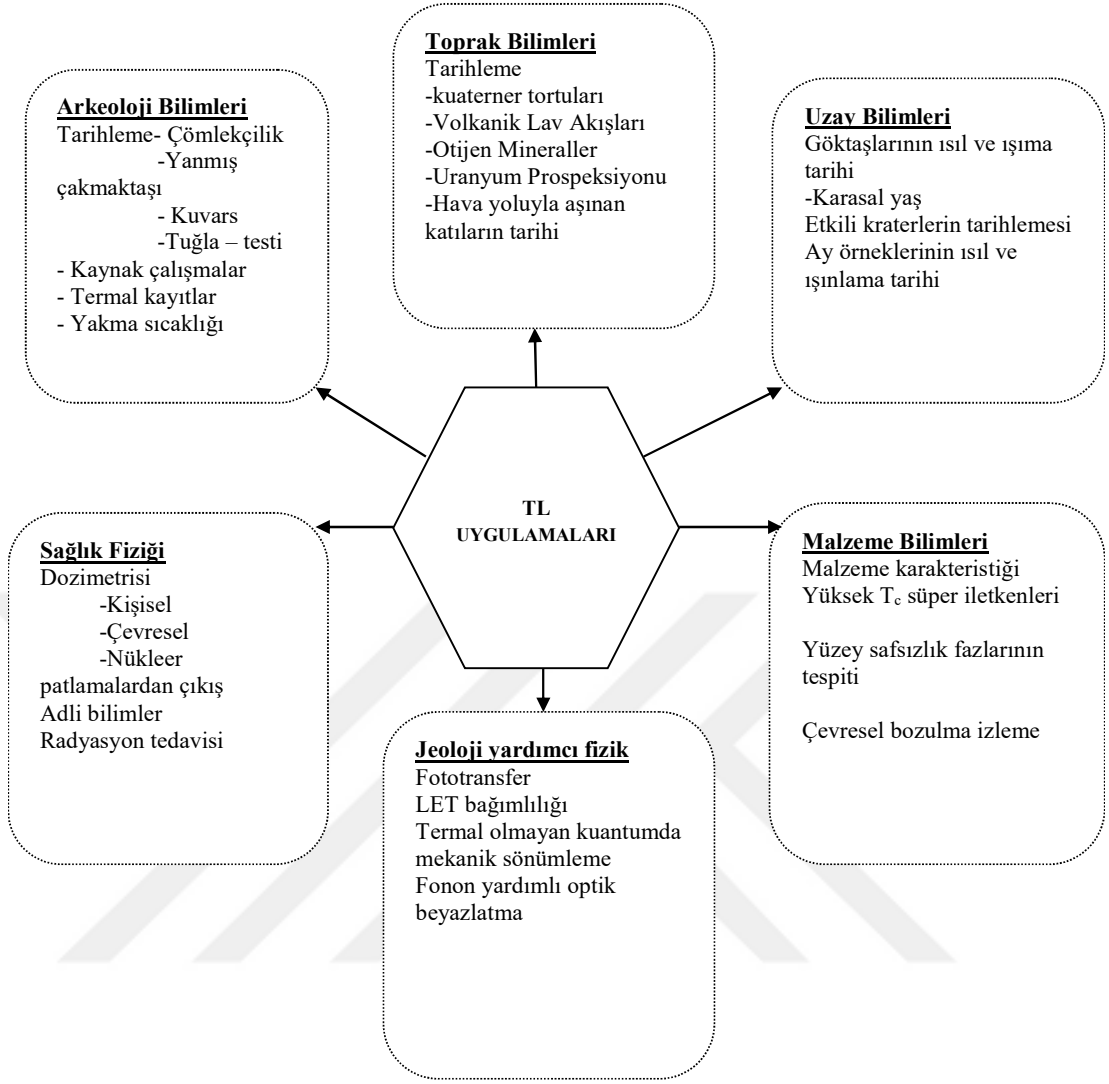
Enerji serbest bırakıldıktan sonra, yayılan ışığın sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çıkışı TL ısıma eğrisi olarak adlandırılır [43]. ısıma eğrilerinin şekli, yayılan ışığın bir veya daha fazla pik vermesidir ve bazıları üst üste gelebilir. ısıma eğrilerinin büyüklükleri ve görünüşleri ışığa duyarlı cihazın spektral tepkisine, numune ile dedektör arasındaki farklı filtre kullanımına ve ısıtma hızına bağlı olarak değişebilir. Buna ek olarak, numune ısınlığında sadece bir atış etkisi vardır. İkinci bir TL çıkışı, tekrar dozlanmadığı sürece soğutma ve yeniden ısıtma ile kaydedilemez. Şekil 2.4, bazı TL malzemelerin ısıma eğrisi örneklerini göstermektedir [43].



**Şekil 2.4** Bazı ana TLD malzemelerinin ışıma eğrilerinin örnekleri (a) LiF: Mg, Ti; (b) LiF: Mg, Cu, P; (c) CaF<sub>2</sub>: Mn; (d) CaF<sub>2</sub>: Dy; (e) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: C; (f) CaSO<sub>4</sub>: Dy.

### 2.3. Termolüminesans Uygulamaları

TL malzemelerin sektörde kullanıldığı üç ana alanı vardır. Bunlar; radyasyon dozimetrisi, yaş belirleme ve jeolojidir. Radyasyon dozimetrisi, ışınlamaya maruz kalan numune tarafından soğurulan dozu ölçer. Radyasyon dozimetrisi üç alt gruba ayrılır. Bunlar; personel dozimetrisi, tıbbi dozimetri ve çevresel dozimetridir. Termolüminesansın şematik gösterim uygulamaları şekil 2.5'de gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** Termolüminesansın uygulamalarının şematik gösterimi.

Personel dozimetrisi, personelin radyasyona maruz kalacağı alanlarda kullanılır. Nükleer reaktörler, hastanelerde ışın tedavisi (radyoterapi) ve nükleer güce sahip deniz altılar gibi. Bu nedenle, personel dozimetrisi kullanmanın amacı, radyasyona dayalı etkileri önlemek için bireyin radyasyona maruz kalma düzeyini takip etmektir. Güvenli sınırlar, Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (IRCP) gibi kuruluşlar tarafından belirlenir. Bunun yanı sıra kazara veya tesadüfen radyasyona maruz kalma nedeni ile kişilerin maruz kaldığı radyasyon miktarı da personel dozimetrisi ile ölçülür.



Personel dozimetrisinin üç alt kategorisi vardır. Bunlar; aşırı doz dozimetresi, tüm vücut dozimetrisi ve doku dozimetrisidir. Birincisi, eller, kollar veya ayaklar gibi radyasyona maruz kalan vücut kısımlarına odaklanırken, tüm vücut dozimetrisi; vücut yüzeyinin altındaki dokuya ya da kritik organlara odaklanır. Vücudun bu bölgelerinde soğurulan dozu gama ve X ışınları (15 keV'dan büyük) ve nötronlarla ilişkili olarak ölçer. Doku dozu olarak da adlandırılan doku dozimetrisi, ciltte emilen dozu ölçer. Bununla birlikte, etkili radyasyon ile uğraşmak yerine, beta parçacıkları veya 15 KeV'den küçük X-ışını gibi etkisi olmayan radyasyona odaklanmaktadır. Bu ölçümlerin yapılması için insan dokusuna eşdeğer bir termoluminesans dozimetresi (TLD) materyali gereklidir. TLD materyali, aynı radyasyon düzeyleri içerisinde aynı alanda insan dokusu ile aynı dozda radyasyon miktarını soğurmalıdır.

Tıbbi dozimetri, insan vücudundaki uygun yerlere yerleştirilen bir TLD'nin etkilerini ölçmeyi amaçlamaktadır. Bunu yaparak, hasta, tedavi işlemleri veya teşhis için iyonlaştırıcı radyasyonlara maruz bırakılmadan önce, bu TLD üzerinde ölçümler yapılabilir. Elde edilen verilerden, olası ek tedaviler veya doz kontrolü uygulanabilir. Bunu radyasyon dozimetresi dışında yapmak mümkün değildir. Hasta dozlarını belirleyen başlıca değişkenler; görüntüleme yöntemi, teknik faktörler ve floroskopi durumunda ışın zamanıdır [47]. Bu faktörlere ek olarak, hastanın boyutu da belirleyici bir faktördür. Tıbbi dozimetrenin iki kategorisi vardır. Bunlar; tanı radyolojisi ve radyoterapidir. Burada kullanılan radyasyon, X-ışınları (10 keV seviyesine yakın), gama ışınları, beta parçacıkları, protonlar ve diğer ağır parçacıklar ve nötron olabilir [8].

TLD malzemesinin doku eşdeğer ve oldukça hassas olması gerekir. Mümkün olan en küçük TLD malzemesi boyutunu gerektiren laboratuvar koşullarında yapılan ölçümler için gereklidir. Bu özelliklerin dışındaki TLD toksik (zehirli) olmamalıdır. Tıbbi görüntüleme yöntemleri için önerilen tanı referans seviyeleri ICRP tarafından yayınlanmıştır [47].

Çevresel dozimetre, insanlığın yarattığı radyasyon ile ilgilidir. Nükleer santrallerden atılan atıklar, nükleer yakıtların kullanımı veya işlenmesi ve nükleer santral arızalarının yarattığı felaketler gibi uygulamalar sebebiyle çevreye yüksek

düzeyde radyasyon yayılmaktadır. Bu nedenle, çevreye sürekli olarak yayılan radyasyonun izlenmesi esastır.

TLD'ler çevresel dozimetre uygulamaları için de kullanılır. Bununla birlikte, çevresel dozimetre uygulamalarında TLD'lerin özellikleri, personelin izlenmesi için gerekli olanlardan farklıdır. Çevresel dozimetre olarak kullanılacak TLD'nin radyasyona karşı yüksek duyarlılığa sahip olması tercih edilir. Bunun yanı sıra doku eşdeğer olmasına gerek yoktur. Çevre sürekli olarak uzun süre radyasyona maruz kaldığından, çevre dozimetresi değerleri uzun bir süre ölçer. Dolayısıyla, TLD'ler uzun vadeli yapısal olarak sağlam ve tekrarlanabilir olmalıdır.

Son yıllarda, son teknolojik yeniliklerin yardımıyla astronotlarla uzay uçuşu mümkün hale gelmiştir. Uzayda radyasyon vardır ve galaksiyi kozmik ışınlardan korumak için bir atmosfer olmadığından, uzay uçuşlarındaki radyasyonu ölçmek önemlidir. Ayrıca gemide astronotlardan gelen radyasyon da araçların dijital donanımı için zararlıdır. Radyasyon kaynakları, ana bileşeni güneş rüzgârından yüksek enerjili protonlar ve ağır yüklü parçacıklar olan galaktik kozmik ışınlardır [46]. Bu radyasyon kaynaklarının etkilerini ölçmek için TLD'ler kullanılır.

TL, yaş tayininde sıkça kullanılan bir yöntem haline geldiğinden, malzemelerin yaş belirleme süreçlerinde kullanılır. Daniels ve arkadaşları bu amaçla TL kullanımını öneren ilk kişilerdir. Kayalarda, uranyum, toryum ve potasyum gibi radyoaktif elementlerin bulunduğunu ve bu elementlerin kayalara doğal bir TL atadığını savunmuşlardır. Bu radyoaktivite nedeniyle malzemede jeolojik doz olarak adlandırılan bir birikim meydana gelir. Eğer radyoaktif minerallerden ışınlama oranı belirlenirse ve kayaç ışınlaması sırasında TL'nin termal salınım hızı ihmal edilebilir ise, o zaman kaya üzerine ışınlama süresi (yani, jeolojik yaş) soğurulan dozun doz hızına olan oranından hesaplanabilir [47, 48].

Bununla birlikte, kaya oluşumlarının yaş tayininde TL kullanılmıştır. Antik örneklerde doğal TL bulunana kadar arkeolojik tarihleme için kullanılmamıştır. Isının TL üzerindeki etkileri nedeniyle, çanağın termal olarak ışık verme işlemi fırın süresince sıfıra düşer. Yine de çanağın çevresi değişmez ve uranyum, toryum, potasyum gibi unsurlarla doğal olarak radyoaktif olur. Bu nedenle, çanak

radioaktiviteye maruz kalmaya devam eder ve çanağın arkeolojik yaşını elde etmek için ölçüleceğı belli bir miktar emer. TL artık yaş tayininin bilinen bir yoludur.

Mineraller çıkarılma yerlerine göre farklı ışıma eğrilerini verme eğilimindedir. TL, radyasyonu gözlemenin iyi bir yoludur. Jeolojide TL kullanarak bu minerallerin kaynağını tanımlamayı sağlar. TL kullanan jeolojinin diğeri bir yönü, meteorları ve aya ait materyalleri incelemektir.

Malzemelerin TL özellikleri, radyasyon dozlarının ölçülmesinde kullanılan dozimetrelerde kullanılmasını sağlar. Malzemelerin özellikleri birbirinden farklı olduğundan, farklı TL özelliklere sahip farklı malzemeler, farklı amaçlar için tercih edilir. LiF ve CaF<sub>2</sub> en yaygın TL materyalidir ve bunu sülfatlar takip eder [49].

#### **2.4. Radyasyon Dozimetreleri**

Bir radyasyon dozimetrisi, doğrudan veya dolaylı olarak maruz kalma, emilen dozu, eşdeğer dozu veya bunların zaman türevleri (oranları) ve ilgili iyonize radyasyon miktarlarını ölçen ve değerlendiren bir cihaz veya sistemdir [50]. Bir dozimetre ve okuyucudan oluşan sistem, dozimetri sistemi (doz ölçüm sistemi) olarak adlandırılır. Bir dozimetrik miktarın ölçümü, dozimetri sistemlerini kullanarak deneysel olarak miktarın değerini bulma işlemidir. Bir ölçümün sonucu, sayısal bir değeri ve uygun bir birimin ürünü olarak ifade edilen bir dozimetrik nicelik değeri.

Bir radyasyon dozimetresi olarak işlev görmek için, dozimetre, ölçülen dozimetrik niceliğinin bir fonksiyonu olan ve uygun kalibrasyon ile radyasyon dozimetresi için kullanılabilen en az bir fiziksel özelliğe sahip olmalıdır. Kullanılabilir olabilmesi için, radyasyon dozimetrelerinin birkaç istenen özellik göstermesi gerekir. Örneğinin, radyoterapide hem belirli bir noktadaki suyun soğurduğu dozu hem de uzaysal dağılımına ilişkin kesin bilgi, dozun hastadaki ilgili organa sağlanma olasılığı oldukça önemlidir. Buna bağılı olarak tercih edilen dozimetre özellikleri doğruluk ve hassasiyet, lineerlik, doz veya doz hızı bağımlılığı, enerji cevabı, yön bağımlılığı ve uzaysal çözünürlük ile karakterize edilir [51].

Açıkçası, tüm dozimetreler bu özellikleri sergileyemez. Bu nedenle, bir radyasyon dozimetresi ve okuyucusu seçimi, ölçüm durumunun gereklilikleri dikkate

alınarak dikkatli yapılmalıdır. Örneğin radyoterapide iyon odaları ışın kalibrasyonları için önerilir ve diğer dozimetreler doz dağılımının (rölatif dozimetre) ölçümü veya dozu doğrulama için uygundur.

#### 2.4.1. Dozimetrelerin Özellikleri

Doğruluk ve hassaslık; radyoterapi dozimetrisinde ölçümle ilgili belirsizlik, çoğunlukla doğruluk ve hassaslık bakımından ifade edilir. Dozimetri ölçümlerinin hassasiyeti, benzer koşullar altında ölçümlerin tekrarlanabilirliğini belirtir ve tekrarlanan ölçümlerde elde edilen veriler yardımıyla hesaplanabilir. Yüksek hassasiyet, ölçüm sonuçlarının dağılımındaki küçük bir standart sapma ile ilişkilidir. Dozimetri ölçümlerinin doğruluğu, beklenen değerin ölçülen miktarın 'gerçek değerine' yakın olmasıdır. Ölçüm sonuçları kesinlikle doğru olamaz ve bir ölçüm sonucundaki hata 'belirsizlik' olarak nitelendirilir [52].

Belirsizlik; bir miktarın ölçülen değerlerinin dağılımını tanımlayan bir parametredir. İstatistiksel yöntemlerle veya diğer yöntemlerle değerlendirilir. Bilinen bir işareti yoktur ve genellikle simetrik olduğu varsayılır. Ölçüm hatası, bir miktarın ölçülen değeri ile söz konusu miktarın gerçek değeri arasındaki farktır. Bir hata hem sayısal bir değer hem de bir işaret verir. Tipik olarak, ölçüm hataları tam olarak bilinmemekle birlikte, mümkün olan en iyi şekilde tahmin edilirler ve mümkün olduğunca telafi edici düzeltmeler ortaya atılır. Bilinen tüm düzeltmelerin uygulanmasından sonra, hatalar için beklenen değer sıfır olmalı ve sadece ilgilenilenin miktarı belirsizliktir.

Lineerlik; ideal olarak, dozimetre okuma  $M$ , dozimetrik miktar  $Q$  ile doğru orantılı olmalıdır. Bununla birlikte, belirli bir doz aralığının ötesinde lineer olmayan bir özellik ortaya çıkar. Lineerlik aralığı ve lineer olmayan davranış, dozimetrenin türüne ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Genel olarak lineer olmayan davranış düzeltilmelidir. Bir dozimetre ve okuyucu, lineer olmayan özellikler gösterebilir. Ancak kombine etkileri daha geniş bir aralıkta lineerlik üretebilir.

Doz hızına bağımlılığı; entegre sistemler bir dozimetri sisteminin tamamının tepkisini ölçer. Bu tür sistemler için ölçülen dozimetrik miktar, bu miktarın hızından bağımsız olmalıdır. İdeal olarak,  $M/Q$  dozimetri sisteminin iki farklı doz hızında

$(dQ/dt)_1$  ve  $(dQ/dt)_2$  cevabı sabit kalmalıdır. Gerçekte, doz hızı dozimetre okumalarını etkileyebilir ve uygun düzeltmeler gerekir. Örneğin değişken ışınlardaki iyon odaları için yeniden birleşme düzeltmeleri gibi.

Enerji bağımlılığı; bir dozimetri sisteminin cevabı  $M/Q$  genellikle radyasyon ışını kalitesinin (enerjinin) bir fonksiyonudur. Dozimetri sistemleri belirli bir radyasyon ışını kalitesinde (veya nitelikleri) kalibre edildiği ve çok daha geniş bir enerji aralığında kullanıldığı için, bir dozimetri sisteminin radyasyon kalitesiyle cevabındaki değişimler (enerji bağımlılığı olarak adlandırılır) düzeltme gerektirir.

İdeal olarak, enerji cevabı düz olmalıdır (yani, sistem kalibrasyonu belirli bir radyasyon kalitesinin belirli aralıklarında enerjiden bağımsız olmalıdır). Gerçekte, enerji düzeltmesinin çoğu ölçüm durumunda  $Q$  miktarının belirlenmesine dâhil edilmesi gereklidir. Radyoterapide, ilgi konusu suya (veya dokuya) verilen dozdur. Herhangi bir dozimetre, tüm radyasyon ışını nitelikleri için su veya doku eşdeğeri olmadığından, enerji bağımlılığı bir dozimetri sisteminin önemli bir özelliğidir.

Yönlü bağımlılık; radyasyon etki alanı açısı ile bir dozimetrenin cevabındaki değişim dozimetrenin yönsel veya açısal bağımlılığı olarak bilinir. Dozimetreler genellikle yapısal ayrıntıları, fiziksel boyutu ve gelen radyasyonun enerjisinden dolayı yön bağımlılığı gösterir. Yönlü bağımlılık bazı uygulamalarda, örneğin yarı iletken dozimetreler kullanılırken vücut içi dozimetri için önemlidir. Terapi dozimetreleri genelde kalibre edildiği geometride kullanılır.

Uzaysal çözünürlük ve fiziksel boyut; doz, bir nokta miktarı olduğundan dozimetre, çok küçük bir hacimde dozun belirlenmesine izin vermelidir (yani, bir noktadaki dozun karakterize edilmesi için bir nokta dozimetre'ye ihtiyaç duyar). Dozun belirlendiği noktanın konumu (örneğin uzaysal konumu) bir referans koordinat sisteminde iyi tanımlanmalıdır.

TLD'ler çok küçük boyutlara sahiptir ve kullanımları büyük kapsamda bir nokta ölçümüne yaklaşıktır. Ölçümün yalnızca değerlendirme sisteminin çözünürlüğü ile sınırlı olduğu yerlerde; film dozimetreler mükemmel iki boyut çözünürlüğe ve jeller üç boyut çözünürlüğe sahiptir. Bununla birlikte, iyon odası tipi dozimetreler, yeni tip

iğne ucu mikro-odalarla kısmen sorunun üstesinden gelmesine rağmen gerekli duyarlılığı vermek için sonlu boyuttadır.

Okunabilirlik kolaylığı; direkt okuma dozimetreleri (örneğin iyon odaları) genellikle pasif dozimetrelerden daha uygundur (örneğin maruziyet sonrası uygun işleminden sonra okunan dozlar, TLD'ler ve filmler). Bazı dozimetreler doğal olarak toplayıcı tipte (örneğin TLD'ler) iken, diğerleri hem integral hem de diferansiyel modlarda ölçüm yapabilir (iyon odaları).

Kullanım kolaylığı; iyonizasyon odaları ömrü boyunca hassasiyet değişikliği olmaksızın yeniden kullanılabilir. Yarı iletken dozimetreler tekrar kullanılabilir ancak ömürleri boyunca kademeli olarak hassasiyet kaybı yaşarlar. Bununla birlikte, bazı dozimetreler tekrar kullanılamaz (örneğin filmler, jeller ve alanin). Bazı dozimetreler doz dağılımını tek seferlik ölçebilmektedir (örneğin filmler ve jeller) ve bazı dozimetreler oldukça dayanıklı iken (diğer bir deyişle, kullanımı hassasiyetini etkilememektedir, örneğin iyon odaları), diğerleri kullanım konusunda hassastır (örneğin TLD'ler).

#### **2.4.2. Lüminesans Dozimetrisi**

Radyasyonun soğurulması üzerine bazı malzemeler, soğurulan enerjinin bir kısmını yarı kararlı hallerde tutar. Bu enerji daha sonra mor ötesi, görünür veya kızılötesi ışık olarak bırakıldığında, bu olay lüminesans olarak adlandırılır. Uyarılma ile ışık emisyonu arasındaki zaman gecikmesine bağlı, floresans ve fosforesans olarak iki tür lüminesans bilinmektedir [53, 54]. Floresans,  $10^{-10}$  ve  $10^{-8}$  s arasındaki bir zaman gecikmesiyle oluşur. Fosforesans ise  $10^{-8}$  saniyeyi aşan bir gecikme ile oluşur. Fosforesans süreci, ısı veya ışık şeklinde uygun bir uyarım ile hızlandırılabilir. Uyarıcı faktör ısı ise, olay TL olarak bilinir ve dozimetre amaçlı kullanıldığında materyal; TL materyal veya TLD olarak adlandırılır. Uyarıcı faktör ışık ise, olay optik uyarımlı lüminesans (OSL) olarak adlandırılır.

Yüksek enerjili ikincil yüklü parçacıklar, genellikle fotonların madde ile birincil etkileşimlerinde üretilen elektronlar, aslında madde içindeki foton enerjisinin birikiminden sorumludur. Kristal halindeki bir katı madde içinde bu ikincil yüklü parçacıklar atomların ve iyonların iyonlaşmaları yoluyla sayısız düşük enerjili serbest

elektron ve boşluğu serbest bırakırlar. Bu şekilde üretilen serbest elektronlar ve boşluklar kristalin herhangi bir yerinde, sırasıyla elektron veya boşluk tuzağında ya yeniden birleşeceklerdir ya da tuzaklanacaklardır.

Tuzaklar içsel olabilir ya da boşluklar veya safsızlıklardan oluşan örgü kusurları şeklinde kristalde ortaya konulur. Genel olarak iki tür tuzak bilinmektedir. Bunlar depolama tuzakları ve yeniden birleşme merkezleridir. Bir depolama tuzağı sadece serbest yük taşıyıcılarını yakalar ve ardından ısıtma sırasında serbest bırakır böylece TL işlemi ortaya çıkar veya ışınlama işlemi ışık ile olur böylece de OSL işlemi ortaya çıkar. Bir depolama tuzağından salınan bir yük taşıyıcı, bir yeniden birleşme merkezinde (lümİnesans merkezi) zıt işaretli bir tuzaklanmış yük taşıyıcıyla birleşebilir. Yeniden birleşme enerjisi en azından kısmen, morötesi, görünür veya kırmızıötesi ışık şeklinde yayılır ve bu fotodiyotlar veya fotoçoğaltıcı tüpler (PMT'ler) ile ölçülebilir.

#### **2.4.3. Termolümİnesans Dozimetrİsi**

TL dozimetri, radyasyondan korunma, radyoterapi kliniğı, endüstri, çevre ve uzay araştırmaları gibi birçok bilimsel ve uygulamalı alanda birçok farklı malzeme kullanmaktadır. Bir TLD'nin temel özellikleri, iyi tekrarlanabilirlik, düşük higroskopiklik ve çok düşük doz ölçümleri için yüksek hassasiyet veya radyoterapi ve karışık radyasyon alanlarındaki yüksek dozlara iyi yanıt verebilmesidir. LiF'in, 8,3'lük etkin atom numarası suya veya dokuya yakın olduğundan radyoterapide doz ölçümleri için kullanılır. Lityum tetraborat, LiF'den daha fazla doku ile eşdeğerdir, ancak nem ile eriyebilen yapısı vardır (atmosferdeki nemi emer) ve depolanmış sinyalleri hızla yok olur. Bu nedenle kullanımı yalnızca, etkin atom numarası 7,3'ün dokuya olan yakınlığının dezavantajlara ağır bastığı durumlarda, x-ışınları için kullanımı uygundur [55]. Kalsiyum sülfat, 15,6 etkin atom numarasına sahiptir ve bu nedenle çok daha az doku eşdeğeridir, ancak etkin atom numarası, kemiğe oldukça yakındır. Kalsiyum sülfat çok duyarlıdır ve bu nedenle koruma dozimetresi için kullanılabilir. Kalsiyum florürün etkin atom numarası 16,9'dur. Aynı zamanda çok hassas olduğu için koruma dozimetresi için de kullanılır.

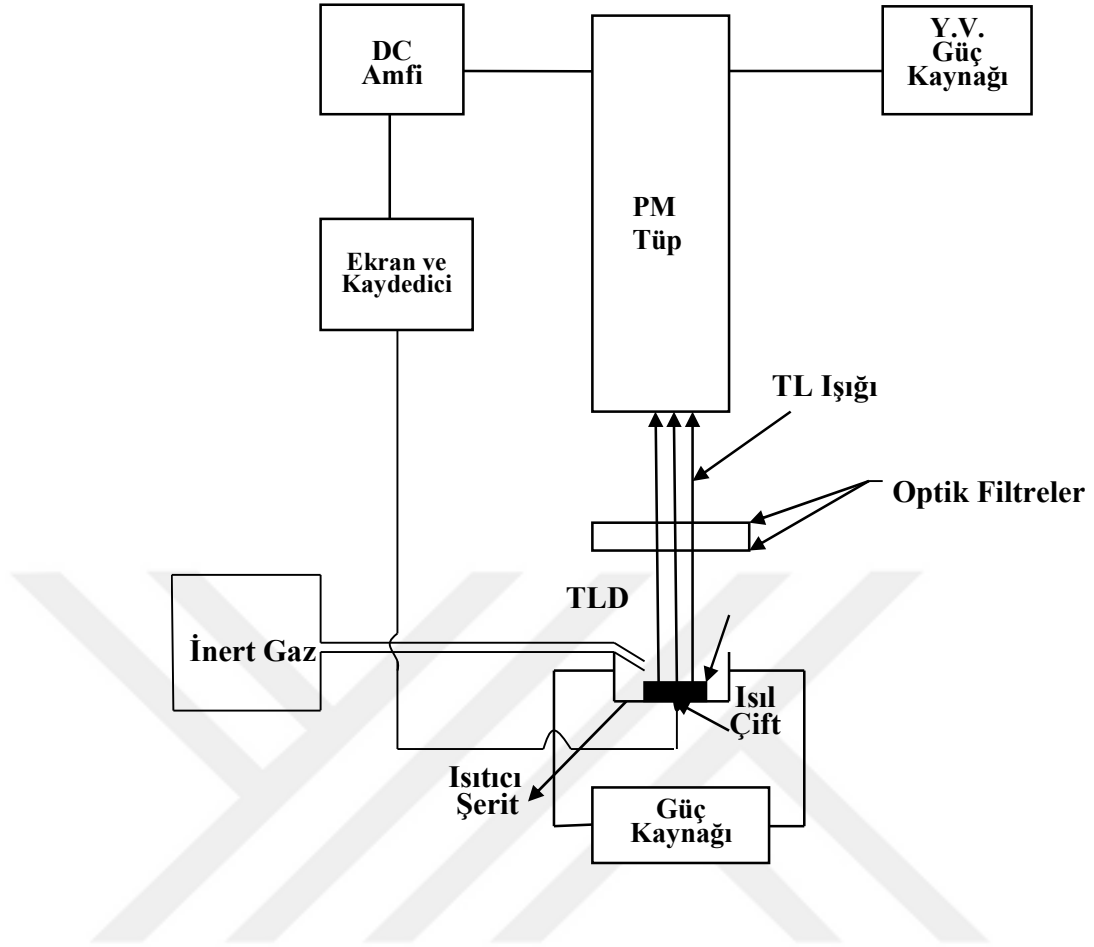
TLD'ler göreceli dozimetrelerdir ve bu nedenle iyon odası gibi kalibre edilmiş bir mutlak dozimetre sistemleri ile kalibrasyonu yapılmalıdır. Genellikle bir  $^{60}\text{Co}$  gama

kaynağı kullanılır. Küçük boyutlarından dolayı, TLD'ler tıp ve biyolojide doz dağılımı ölçümleri için uygundur.

Tıbbi uygulamalarda en sık kullanılan TLD'ler doku eşdeğerliliği nedeniyle LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,Cu,P ve Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Mn malzemeleridir. Yüksek duyarlılıklarından dolayı kullanılan diğer TLD'ler ise CaSO<sub>4</sub>:Dy, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C ve CaF<sub>2</sub>:Mn malzemeleridir. TLD'ler çeşitli şekillerde (örneğin toz, talaş, çubuklar ve şeritler) mevcuttur. Kullanılmadan önce kalan sinyali silmek için TLD'lerin tavllanması gerekir. Isıtma ve soğutma hızları da dahil olmak üzere, iyi belirlenmiş ve tekrarlanabilir tavlama döngüleri kullanılmalıdır.

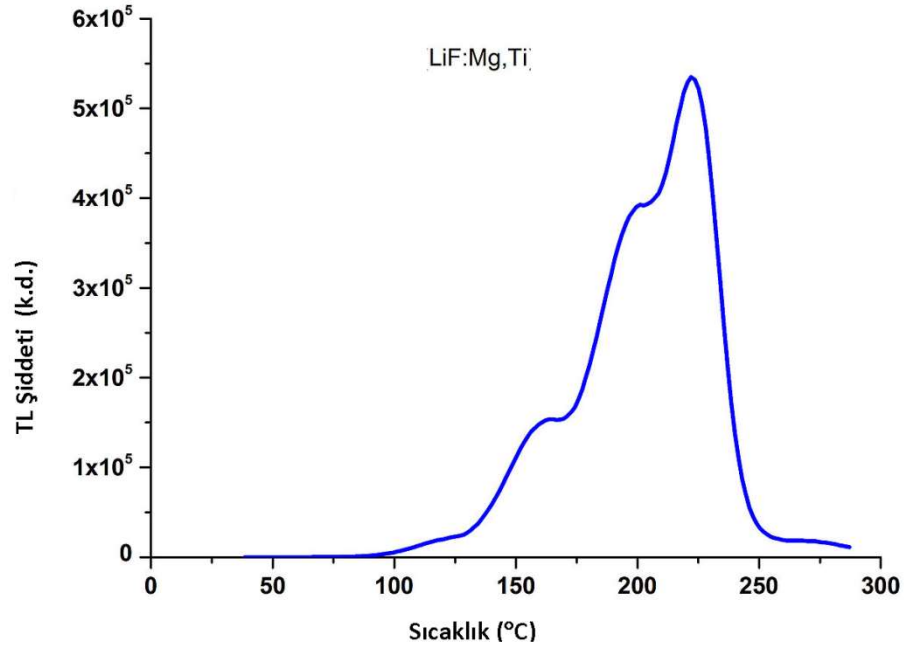
Temel bir TLD okuyucu sistemi, TLD'nin yerleştirilmesi ve ısıtılması için bir planşet, TL ışık emisyonunu algılayan ve algılanan foton akıcılık ile doğrusal orantılı doğrusal bir elektrik sinyaline dönüştüren bir PMT ve PMT sinyalini bir şarj olarak kaydetmek için bir elektrometreden oluşur. Bir TLD okuyucunun temel şematik diyagramı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.





**Şekil 2.6.** Tipik bir TLD Okuyucunun şematik gösterimi.

TL yoğunluğu emisyonu, TLD sıcaklığının ( $T$ ) bir fonksiyonudur. Isıtma hızını sabit tutmak,  $T$  sıcaklığı ile  $t$  zamanı orantılı hale getirir. Böylece TL yoğunluğu, TLD ölçüm sistemi ile bir kaydedici çıkışı mevcutsa,  $t$ 'nin bir fonksiyonu olarak çizilebilir. Ortaya çıkan eğri, TLD ışıma eğrisi olarak adlandırılır [56, 57]. Genel olarak, yayılan ışık kristal sıcaklığına karşı çizilirse TL termogramı (ısı değişim) elde edilir (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7.** Düşük bir ısıtma hızında bir TLD okuyucu ile ölçülen LiF: Mg, Ti'nin tipik bir ışıma eğrisi.

İşıma eğrisindeki tepeler, TL yayılımından sorumlu tuzak derinlikleri ile bağlantılı olabilir. LiF: Mg, Ti dozimetresi için ışıma eğrisinin 180 °C ile 260 °C arası ana dozimetrik pik noktası olarak kullanılır. Pik sıcaklığı, oda sıcaklığından etkilenmemesi için yeterince yüksektir ve ısıtma planşetinden gelen kara cisim yayılımına müdahale etmemek için yeterince düşüktür. Yayılan toplam TL sinyali (yani, ışıma eğrisinin altında kalan alan) uygun kalibrasyon yoluyla doz ile ilişkilendirilebilir. Okuma sırasında ısıtma döngüsünün iyi tekrarlanabilirliği, doğru dozimetre için önemlidir. TL sinyali, oda sıcaklığında kendiliğinden ışık yayımı nedeniyle ışınlama sonrasında zamanla azalır. Bu işleme sönümlenme denir. Tipik olarak, LiF: Mg, Ti için, dozimetrik pikin sönümlenme miktarı, ışınlamadan sonraki aylarda yüzde birkaçı geçmemektedir. TL doz cevabı radyoterapide kullanılan geniş bir doz aralığında lineerdir. Ancak daha yüksek dozlarda doyurulmadan önce süper lineer davranış sergileyen yüksek doz bölgesinde artmaktadır. TLD'lerin kullanılmadan önce kalibre edilmesi gerekir dolayısıyla göreceli dozimetreler görevi görürler. Soğurulan dozu TL okumasından elde etmek için enerji, sönümlenme ve doza cevabı lineer olmayanları gibi birkaç düzeltme faktörü uygulanmalıdır. Radyoterapide TLD'ler üç farklı uygulamada kullanılır. Bunlardan birincisi, rutin bir kalite güvence

yöntemi olarak ya da özel durumlarda doz izleme için, örneğin karmaşık geometriler, kritik organlara doz, toplam vücut ışınlaması (TBI), brakiterapi gibi hastalardaki canlı dokuda kullanılan dozimetredir. İkincisi çeşitli fantomlardaki tedavi tekniklerinin doğrulanması (örneğin insan biçimli fantomlar), üçüncüsü de dozimetre denetimleri (örneğin, IAEA-Dünya Sağlık Örgütü (WHO) TLD posta doz denetimi programı) ve hastaneler arasındaki karşılaştırmalardır.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölümde çalışmada kullanılan Terbiyum katkılı lityum borat fosforların sentezleri, örneklerin karakterizasyonunda kullanılan sistemler hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

#### 3.1. Terbiyum Katkılı Lityum Borat Fosforun Sentezi

Terbiyum katkılı lityum borat fosfor materyalleri geleneksel katıhal reaksiyonu yöntemi ile sentezlenmiştir. Sentez aşamasında, yüksek saflıktaki  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (Sigma-Aldrich >% 99,998),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (ayrıca akı olarak % 5 mol  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ve % 1 mol  $\text{Tb}_4\text{O}_7$  (Sigma-Aldrich >% 99,999) nadir toprak oksitleri uygun stokiyometrik miktarlarda kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığa sahip bazı borların buharlaşmasını telafi etmek için fazla miktarda  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (ağırlıkça %5) ilave edilmiştir. Hammaddeler, nötr bir atmosfer altında agat havanda karıştırılmıştır. Nadir toprak elementinin katkısı %1 mol olarak alınmıştır. Bunlar, platin bir kroze kullanılarak yüksek sıcaklık fırını içerisine yerleştirilmiştir. Örnekler, indirgenmiş atmosferde (%15  $\text{H}_2$  ve %85  $\text{N}_2$ ) 2 saat boyunca 1200 °C'de sinterlenerek sentezlenmiş ve daha sonra fırın içerisinde yaklaşık 24 saat soğumaya bırakılmıştır.

#### 3.2. X-Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı, öncelikle kristalin bileşiklerin faz tayini için kullanılan analitik bir tekniktir ve birim hücre boyutları hakkında bilgi sağlamak için de kullanılabilir. Bu teknikle sağlanan bilgiler, bir X-ışını tüpünde üretilen monokromatik X-ışınlarının yapısal etkileşimine ve numune tutacağına monte edilmiş kristal bir numuneye dayanmaktadır. Kristal bileşiğe gelen X-ışınlarının dalgaları, bileşik atomların elektronlarıyla etkileşime giren salınımlı bir elektrik alanı oluşturur. Elektronlar gelen elektromanyetik radyasyonu tutarlı bir şekilde saçar. Kırınım, periyodik bir dizide düzenlenmiş atomlar belirli açılardan ışıınımlı saçtığında ortaya çıkar [58]. Yapıcı girişim yaratmak için etkileşen ışınlar sonuç olarak desende gözlenen Bragg pikleri ile sonuçlanır. X-ışınları, su ile soğutulan bir bakır bloğu içeren bir X-ışını tüpü içinde üretilir. Bakırın üzerine bir anot oluşturan bir metal bağlanır ve anotun karşısında tungsten filamentten yapılmış bir katot konur. Tungsten filament ısıtılır ve elektronları sıcak tungsten filamandan anoda hızlandırmak için anot tungsten katotu arasında potansiyel farkı uygulanır. Elektronlar anottan çıktığında 1.39 ve 1.54

Å dalga boylarına sahip olan  $K_\beta$  ve  $K_\alpha$  Cu ışınları üretilir. 1.5 Å'nın altındaki dalga boylarını emen bir Nikel filament  $K_\beta$  radyasyonunu filtrelemek için kullanılır. Sonunda,  $K_\alpha$  X-ışınları numuneyi karakterize etmek için kullanılır. Dedektör radyasyona maruz bırakıldığında bir elektrik sinyali üretir ve bu da bir model oluşturur [59, 60].

XRD analizleri, kristalografik fazların saptanması için bir X-ışını difraktometresi (Philips X'Pert Pro) ile  $\lambda = 1.5418 \text{ Å}$  Cu  $K_\alpha$  yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.3. Termoluminesans Ölçümleri

Kusurlar, yüksek ısılarda üretilen materyallerin doğal bir özelliğidir. Özellikle oksitler örgü yapısında kusurlara sahiptir. Bu kusurlar, bir maddenin yasak bant aralığına yerleştirilmiş lokalize enerji seviyeleri üretir ve uyarılma üzerine hem boşlukların hem elektronların tuzakları olarak etkilerler. Malzeme ısılandıktan sonra ısıtıldığında, sıkışan taşıyıcılar tuzak bölgelerinden kurtulmak için yeterli enerji toplarlar. Bu serbest bırakılan taşıyıcılar sonunda lüminesans merkezine ulaşacaktır [61]. Elde edilen lüminesans, yasak bölge içindeki tuzak seviyelerinin derinliğine yaklaşmak için kullanılır ve bu bilgileri göstermek için TL spektroskopisi kullanılır. Bu bilgiler, sıcaklığın fonksiyonu olarak ortaya çıkan TL emisyonu olan ışıma eğrisinden çıkarılır [61].

Belirli bir ortamdaki elektromanyetik radyasyon katı bir malzemeye doğru yansıtıldığında, ışık dalgaları yansıtılır, soğurulur veya iletilir. Dalgalar metalik bir malzemeye çarparsa, yüzeyde ulaştığında geriye doğru yansıyan ayna gibi davranır. Metalik olmayan malzemeler eş zamanlı olarak gelen dalgaları soğurur, yansıtır veya soğurabilir, yansıtabilir ve iletebilir. Bunlar, ışık dalgalarının belirli bir bölümünün yapılarından geçmesine izin vermek için yeterince şeffaf olan malzemeler için geçerlidir. Malzemelerin emilme ve yansıtma kabiliyeti UV/VIS spektroskopisi tarafından fosfor malzemelerinin elektromanyetik radyasyona nasıl tepki verdiğini belirlemek için kullanılan önemli bir parametredir. Katılarla ışık yansıması çeşitli şekillerde oluşur. Bununla birlikte ışık, toz malzemelere benzer pürüzlü yüzeylere yansıtıldığında ortaya çıkan yayılma yansımasıdır [62, 63].

Numuneler, TL ölçümleri için 15 mA'lık akım ve 30 kV'lık voltaj altında dakikada 30 Gy'lık bir doz hızına sahip X-ışını tüpü (Machlett OEG-50A) ile ışınlanmıştır. Tüm termal uyartımlı lüminesans deneyleri ışınlama sonrasında hemen gerçekleştirilmiş ve TL ışıma eğrileri bir TLD okuyucu (MicroLab RA94) ile kaydedilmiştir (Şekil 3.1).



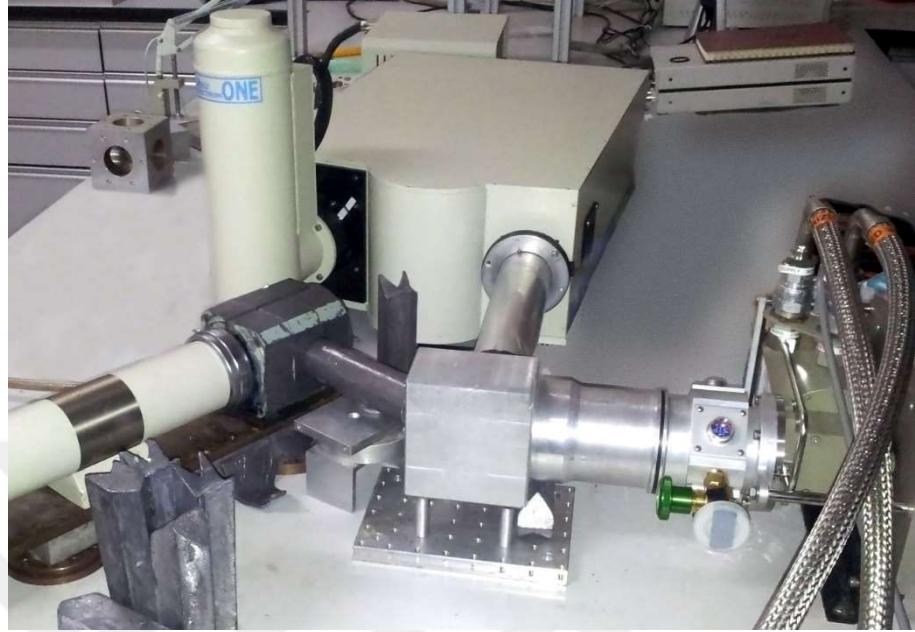
**Şekil 3.1.** TL ışıma eğrilerinin kaydedildiği MicroLab RA94 model TLD okuyucu.

Numunelerin ışıma eğrileri, ışınlama sonrası azot atmosferi altında, 50 ile 300 °C sıcaklık aralığında doğrusal ısıtma hızı 1, 2, 5 ve 10 °C s<sup>-1</sup> ile elde edilmiştir. Kinetik parametreler, aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü (s) 'yi belirlemek için fosfora ait yüksek sıcaklık pikine pik şekli (PS) ve çeşitli ısıtma hızı (VHR) yöntemleri uygulanmıştır.

### 3.4. Radyolüminesans Ölçümleri

RL, 25 kV ve 15 mA'lık maksimum deneysel değere sahip bir tungsten hedefli bir Machlett OEG-50A X-ışını tüpü ile ışınlama yoluyla uyarılmıştır (Şekil 3.2). X-ışını radyasyon kaynağı, yaklaşık olarak dakikada 30 Gy'lık bir doz hızı ile ışınlama sağlamıştır. Numuneden çıkan ışık, bir giriş açıklığına iletilip ve bir sıvı azot soğutmalı ışığa duyarlı bir elektronik cihaza (CCD) bağlanan bir Jobin Yvon spektrometresi ile

tespit edilmiştir. RL spektrumu, oda sıcaklığında 3 saniyelik bir entegrasyon süresi ile 450 ile 750 nm arasında kaydedilmiştir.



Şekil 3.2. Radyolüminesans ölçümlerinin alındığı sistem.

### 3.5. Termolüminesansın Kinetik Karakterizasyonu

TL'in kinetik karakterizasyon analizi yapılırken tuzak derinliği, frekans faktörü ve kinetik düzen gibi kinetik parametrelere bakılır. Bu kinetik parametreler malzemenin dozimetrik özelliklerine göre farklılık gösterir. Çalışmamızda farklı standart metotlar kullanılarak borat bazlı fosforların kinetik parametreleri belirlenmiştir.

#### 3.5.1 Çeşitli Isıtma Hızları (VHR) Metodu

VHR yönteminde, her ölçümün ısıtma eğrisi kaydedilir ve ısıtma hızına bağlı olarak TL pikleri farklı sıcaklıklarda kaydedilir. VHR yöntemi, aynı malzemenin farklı ısıtma hızlarındaki ısıtma piklerinin maksimum sıcaklıklarının gözlemlenmesine dayanır. Metoda göre maksimum sıcaklık ( $T_m$ ) ısıtma hızına ( $\beta$ ) bağlıdır; bu bağıntı aşağıdaki denklemle açıklanmaktadır:

$$\ln(T_m^2/\beta) = E/kT_m - \ln(sk/E) \quad (3.2)$$

Burada,  $s$  ( $s^{-1}$ ) frekans faktörü,  $E$  (eV) aktivasyon enerjisi,  $T_m$  TL ışıma pikinin maksimum sıcaklığı ve  $k$  Boltzmann sabitidir.  $T_m$  birkaç farklı ısıtma hızı için ölçülürse,  $E$ , eşitlik (3.2) 'in sol tarafındaki logaritmik terim  $T_m^2 / \beta$  'nin  $1 / T_m$ 'ye karşı çizilen düz çizgisinin eğiminden hesaplanabilir.  $s$  değeri de eğimin kesitinden saptanabilir [48]. Bu metodun en önemli sıkıntılarından biri malzeme ve ısıtıcı şerit arasındaki ısı boşluğu (TLA) ve sıcaklık gradyentinin ( $T_g$ ) pik maksimumundaki sıcaklık değerini etkilemesidir.

TL ölçümlerine dayanan ısı boşluğu (TLA) düzeltme yöntemi Kitis ve Tuyn tarafından tavsiye edilmiştir [64]. Denklem (3.3) bu yöntemde kullanılır:

$$T_m^j = T_m^i - c \ln\left(\frac{\beta_i}{\beta_j}\right) \quad (3.3)$$

Burada  $T_m^j$  ve  $T_m^i$  TL ışıma piklerinin sırasıyla  $\beta_j$  ve  $\beta_i$ , ısıtma hızları ile maksimum sıcaklıklarıdır ve  $c$  sabittir. Eşitlik (3.3) 'deki  $c$  sabiti, önce TLA'nın ihmal edilebilir olduğu iki çok düşük ısıtma oranı kullanılarak belirlenir. Çok yüksek bir ısıtma hızındaki  $T_m$ , bu eşitlik ve  $c$ 'nin değerlendirilen değeri kullanılarak en düşük ısıtma hızına göre hesaplanır. TLA ( $\Delta T$ ) nin maksimum pik değeri

$$\Delta T = T_g - T_m \quad (3.4)$$

Burada  $T_g$ ; TLA ( $T_g$ ) dâhil maksimum piki ve  $T_m$ ; TLA yoksa aynı ışıma pikinin gerçek pik sıcaklığıdır. Yukarıdaki eşitlik Kitis ve Tuyn tarafından verilen denklemler kullanılarak düzeltilmiştir [64, 65].

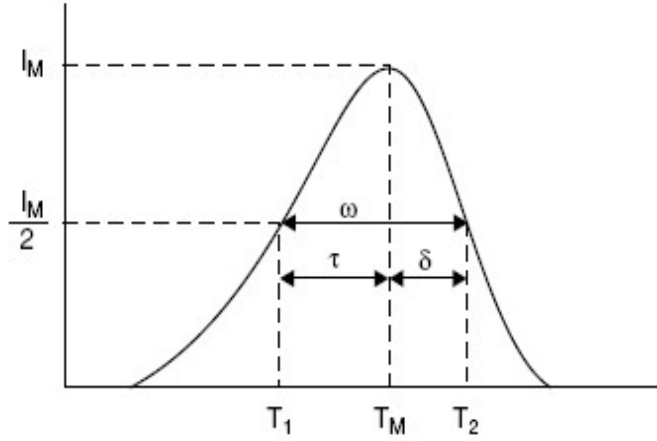
### 3.5.2. Pik Şekli (PS) Metodu

Genellikle Chen yöntemi olarak bilinen PS yöntemi, TL ışıma pikinin kinetik parametrelerini belirlemek için kullanılır. Bu yöntem  $T_M$ ,  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklık değerlerinin ölçümüne dayanır. Bunlar sırası ile ışıma eğrisinde maksimum TL yoğunluğunun olduğu ve yoğunluğun yarı maksimum değerindeki artan ve azalan kısımlara ait sıcaklık değerleridir. Bu yöntemde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir [48,66].

$T_M$  maksimumdaki pik sıcaklığı,  $T_1$  ve  $T_2$  sırasıyla  $T_M$  'nin yarı şiddetindeki her iki yanındaki sıcaklıklar,  $\tau = T_M - T_1$ ,  $\delta = T_2 - T_M$  ve  $\omega = T_2 - T_1$  nicelikleri Şekil



3.3 de gösterilmiştir.  $\mu = \delta/\omega$  geometrik şekil ya da simetri faktörü olarak isimlendirilir. Birinci dereceden TL ışıma pikleri için  $\mu=0,42$ , ikinci dereceden ışıma pikleri için ise  $\mu=0,52$  olarak alınmalıdır.



**Şekil 3.3.** Pik şekli metoduna göre bir termolüminesans ışıma piki için belirlenen  $\tau$ ,  $\delta$ ,  $\omega$  nicelikleri.

Pik şekli metoduna göre aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü aşağıda verilen denklemler kullanılarak belirlenebilir.

$$E = c_{\alpha} \left( \frac{kT_M^2}{\alpha} \right) - b_{\alpha} (2kT_M) \quad (3.5)$$

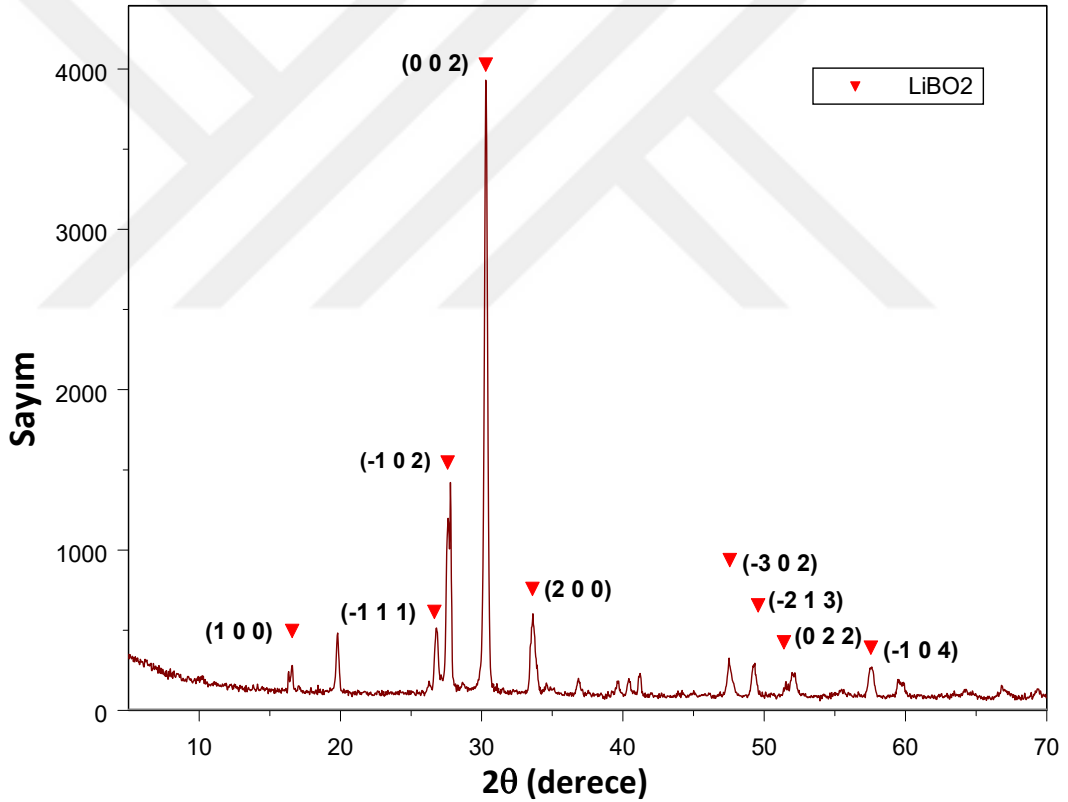
$c_{\alpha}$  ve  $b_{\alpha}$  'nin değerleri  $\alpha = \tau$ ,  $\delta$  ya da  $\omega$  için aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\begin{aligned} c_{\tau} &= 1.510 + 3.0(\mu - 0.42) & b_{\tau} &= 1.58 + 4.2(\mu - 0.42) \\ c_{\delta} &= 0.976 + 7.3(\mu - 0.42) & b_{\delta} &= 0, \\ c_{\omega} &= 2.52 + 10.2(\mu - 0.42) & b_{\omega} &= 1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. XRD Sonuçları

XRD yöntemi,  $\text{LiBO}_2: \text{Tb}^{+3}$  'den farklı herhangi bir bileşim safsızlık fazının olup olmadığını belirlemek için kullanılmıştır. Ortaya çıkan  $\text{LiBO}_2: \text{Tb}^{+3}$  'nin tipik bir X-ışını kırınım deseni şekil 4.1'de gösterilmektedir. XRD deseninden, 01-076-2212 [67] referansına dayanarak kırınım piklerinin iyi bir şekilde indekslenmesinden sonra oluşan belirgin fazın  $\text{LiBO}_2$  olduğu ve en yoğun pikin ( $30^\circ$ ) (0 0 2) düzlemi tarafından üretildiği bulunmuştur. Bu  $\text{LiBO}_2$  yapısının,  $a = 5,8450 \text{ \AA}$ ;  $b = 4,3530 \text{ \AA}$ ;  $c = 6,4540 \text{ \AA}$  ve  $\beta = 115^\circ$  hücre parametreleri olmak üzere, monoklinik bir yapıda olduğunu göstermiştir.



**Şekil 4.1.** Tb katkılı lityum borat örneğinin X-ışını kırınım deseni ve ev sahibi yapıya ait kristal düzlemlerinin ana pikleri.

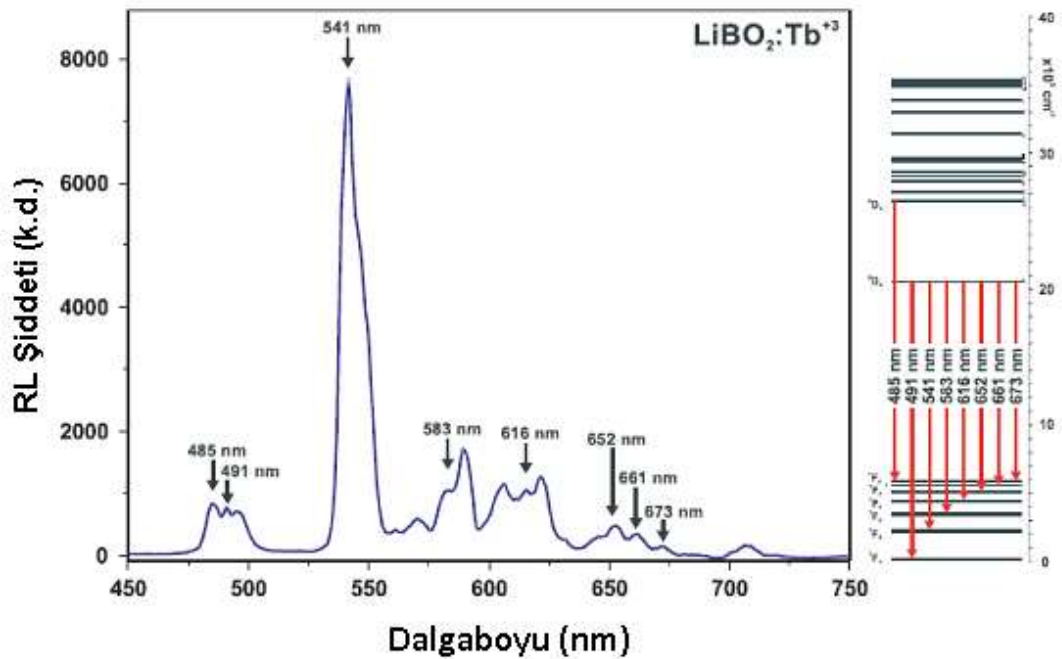
Nadir toprak elementi katkılı  $\text{LiBO}_2$  örneklerinde,  $\text{RE}^{+3}$  iyonlarının Li'nin yerini alması beklenebilir (iyonik yarıçap  $0,68 \text{ \AA}$ ). Bu durumda katkı iyonu, yapısal olarak bozuk bir ortamda olacaktır. Çünkü bir  $\text{RE}^{3+}$  iyonu, yük dengelemesi için

oksijenle ilgili kusur merkezleri veya  $\text{Li}^+$  boşlukları üretmek üzere bağlanacaktır. Bununla birlikte, katkı iyonlarının herhangi bir  $\text{Li}^+$  iyonun yerini alması yerine örgü içinde dokular arasındaki bir konuma girmesi mümkündür.

Burada hem iyonik yarıçap hem de yük  $\text{RE}^{3+}$  ve Li için aynı olmadığından, XRD modelinde ek pikler görülecektir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi; bu açıkça RE iyonlarının örgü konumlarına değil, ara konumlara gideceği gerçeğini göstermektedir. X-ışını kırınımı, sentezlenen lityum borat malzemesinin istenilen kristal yapısına sahip olduğuna dair bir kanıt getirmiştir.

#### 4.2. Radyolüminesans Sonuçları

Terbiyum (Tb) iyonlarının  $\text{LiBO}_2$  fosforları üzerindeki etkisi hakkında fikir sahibi olmak adına örneğin oda sıcaklığında 1 nm'lik ayırım gücünde RL spektrumları kaydedildi.  $\text{Tb}^{+3}$  katkılı  $\text{LiBO}_2$  fosforun RL emisyon spektrumu Şekil 4.2 gösterilmektedir.



**Şekil 4.2.**  $\text{Tb}^{+3}$  katkılı lityum borat fosforunun oda sıcaklığındaki radyolüminesans spektrumu.

Spektrumda  $\text{Tb}^{+3}$ 'in uyarılmış  $^5D_4 \rightarrow 7F_j$  ( $j = 6, 4, 3, 2, 1$  ve  $0$ ) seviyelerinden geçişlerle bağlantılı 450 ile 750 nm arasında değişen keskin çizgilerden oluşur. En

önemli yeşil renk yayan geçiş  $^5D_4 \rightarrow F_5$  (541 nm), manyetik dipol geçiş seçimi kurallarına uymaktadır.

Herhangi bir simetride geçiş olasılığı baskın seçim kurallarına dayanır. Simetri modelinde merkez olmadığında elektron dipol geçişleri oluşabilir ve seçim kuralları olarak  $\Delta J = \pm 2$  'ye karşılık gelir. Bununla birlikte,  $Tb^{+3}$  iyonu örgü içindeki çevreleyen atomlar için model simetrisinin merkezi olduğunda, sadece manyetik dipol geçişine izin verilir ve  $\Delta J = \pm 1$  seçim kuralları etkindir.  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$  geçişi elektrik dipoller olarak yasaklıdır. Ancak manyetik dipoller olarak izin verilir ve bileşen sayılarına bölünmüş bu geçişlere karşılık gelen tüm çizgiler yerel simetri ile yönetilir. Sonuçlarımız, ikinci yaklaşımı kullanarak daha iyi açıklanabilir.  $Tb^{+3}$ 'in  $\Delta J = \pm 1$  seçim kuralını karşılayan manyetik dipol geçişinin ( $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ) baskınlığı Judd-Ofelt teorisini [68] kullanarak  $^5D_4 \rightarrow ^7F_j$  ( $J = 0 \rightarrow 6$ ) geçişlerinin  $\beta$  dalgalanma oranını göz önünde bulundurarak netleştirebilir [69, 70].

$$\beta (^5D_4 \rightarrow ^7F_j) \propto \sum_{t=2,4,6} \Omega_t | \langle ^5D_4 | U^{(t)} | ^7F_j \rangle |^2 \quad (4.1)$$

Burada  $\langle i | U^{(t)} | f \rangle$  ve  $\Omega$  ifade edilirse indirgenemeyen tensör operatörü ile sırasıyla  $t = 2, 4, 6$  ve bir Judd-Ofelt parametresinin indirgenmiş matris elemanlarıdır. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, RL spektrumu  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$  (mavi 485, 496 nm),  $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$  (yeşil 583, 590 nm) ve  $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$  (yeşil 616, 627 nm) kaynaklı iyi bilinen mavi-yeşil emisyon hatlarıdır. Katkı konsantrasyonu, kritik konsantrasyonunu (%1 mol Tb) aştığında,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$  geçişlerindeki emisyon yoğunluğu çarpıcı bir şekilde azalmaktadır (veriler gösterilmemiştir). Bu, yaygın olarak adlandırılan konsantrasyonun sönme davranışdır ve  $Tb^{+3}$  emisyon işlemi sırasında çapraz gevşeme işlemi ile ilişkilendirilebilir. Bu durumda ev sahibi örgüdeki Tb iyonları arasındaki mesafe azalır ve  $Tb^{+3}$  iyonlarının çiftleşmesine veya kümelenmesine yol açar. Daha sonra konsantrasyon sönmesi oluşur. Ayrıca, nadir toprak iyonlarının  $LiBO_2$ 'ye katılmasının iyon boyutuna duyarlı olduğunu ve bunun, RL ve diğer özellikleri de içeren birçok özelliği etkilediğini de belirtebiliriz.

Çizgi tipi emisyonlar, bilinen RE elementleri (REE) 4f geçişlerini temsil etmektedir [71]. Bu çalışmada kullanılan REE'nin ana emisyon çizgileri RL spektrumuna yakın Dieke diyagramlarında gösterilmiştir (Şekil 4.2).

### 4.3. Termoluminesans Sonuçları

TL işleminde kullanılan dozimetrelerin özellikleri, kinetik parametrelerle ilişkilidir ve bu parametreler, tuzak merkezleri niceliksel olarak tanımlamaktadır. Dolayısıyla, bir TL maddesinin güvenilir bir dozimetrik çalışması, kinetik parametreleri iyi bir bilgiye dayalı olmalıdır [72]. Örneğin, ışınlama sonrası materyalde depolanan dozimetrik bilgilerin kaybı, yasak boşluğu ile tuzak seviyelerinin konumuna çok bağlıdır. Tb katkılı LiBO<sub>2</sub> fosforunun aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği)  $E_a$  (eV), frekans faktörü  $s$  ( $s^{-1}$ ), tuzaklanan elektronların sayısı  $n_0$  ( $m^{-3}$ ) ve kinetik derece  $b$  hakkında literatürde hiçbir bilginin bulunmadığı görülmüştür [73].

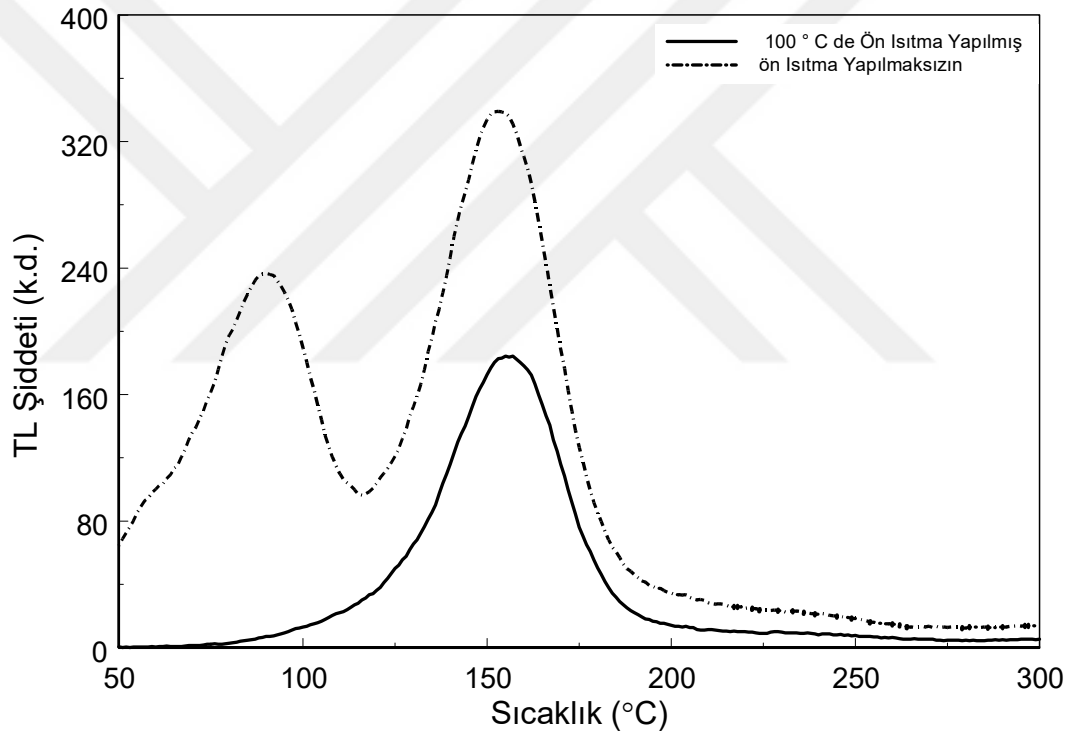
Herhangi bir TL dozimetre materyali için araştırılacak önemli konularından biri de ışıma eğrisidir. TL ışıma eğrilerinden kinetik parametrelerin değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler vardır. Burada TL ışıma eğrilerini analiz etmek için PS ve VHR olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Şekil 4.3 de Tb<sup>+3</sup> iyonu katkılı lityum borat fosforunun 2 °C s<sup>-1</sup>'lik bir ısıtma hızında ölçülen TL ışıma eğrileri görülmektedir. TL ölçümlerinde tüm numuneler 10 dakika boyunca X-ışınına maruz bırakıldıktan sonra TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir. Ön ısıtma yapılmaksızın elde edilen TL ışıma eğrisinde 80 ve 155 °C de iki pik olduğu kolaylıkla ayırt edilir (Şekil 4.3). Ancak daha 80 °C deki düşük sıcaklık piki kolayca sönmülenebileceğinden dozimetrik amaçla kullanılmaya uygun değildir. Bu nedenle tercihen ön ısıtma ile çıkarılmıştır. Ön ısıtma yapılmadan ve 100 °C'de ön ısıtılma yapılmış terbiyum katkılı lityum borat fosforların TL ışıma eğrileri karşılaştırıldığında, 155 °C'de görünen ön ısıtmalı numunenin ışıma eğrisinin şiddetinin ön ısıtmasız elde edilen ışıma eğrisinin şiddetinden daha düşük olduğu görülmüştür

İyonize radyasyon (X-ışınları), Tb katkılı LiBO<sub>2</sub> fosforunda büyük paramanyetik kusur konsantrasyonlarının üretilmesi için kullanılır. X-ışınları örgü içinde rastgele elektron ve boşluk çiftleri üretir. Bu elektronların ve boşlukların birçoğu, orijinal örgünün yeniden oluşması için radyasyonlu veya radyasyonsuz olarak

hemen birleşir. Bununla birlikte, elektronların ve boşlukların bir kısmı birbirinden yeterince uzağa gider ve bir boşluk veya bir yabancı madde gibi bir dengeleyici madde ile karşılaşır. Bu, elektron ve boşlukların birçoğunun, lityum borat fosforunun geniş bir şekilde birbirinden ayrılmış bölgelerinde "sıkışıp kalmasına" ve gözlemlenen kararlı paramanyetik nokta kusurlarının oluşmasına izin verir. Aşağıdaki sonuçlar, Tb iyonlarının Tb katkılı  $\text{LiBO}_2$ 'de hem elektron hem de boşluk tuzakları olarak hareket ettiğini göstermektedir. Bu zıt davranış, Tb iyonlarının  $\text{LiBO}_2$  fosforunda belirgin şekilde iki farklı konumda olması nedeniyle oluşur. Li iyonlarının yerini alan Tb iyonları boşluk tuzakları olarak hareket ederken, dokular arasında bulunan bölgelerdeki Tb iyonları elektron tuzakları olarak işlev görür.

X ışını ışıınımı altında, birçok elektron değerlik bandından (DB) iletim bandına (İB) yükseltilir ve burada kristal boyunca serbestçe dolaşılabilirler. Geride bırakılan boşluklarla birleşmek için değerlik bandına geri dönerken, uyarılan elektronlar ya lityum borat kusurları ya da Tb yabancı madde ile tuzaklanmış olabilir. Terbiyum iyonu, iki değerli formdaki 4f taban durum enerjisi (TDE) iletim bandının altında bulunduğu zaman elektronları ( $\text{Tb}^{+3}$  -  $\text{Tb}^{+2}$ ) yakalayabilir. Bilindiği gibi bu, La, Ce ve Gd dışındaki tüm lantanitler için geçerlidir. Yük taşıyıcının yeniden birleşmesi için tek olasılığının dört değerlikli terbiyum ile bir elektronun yeniden birleşmesi ile olduğunu ve uyarılmış bir terbiyum formu bıraktığını göstermektedir. Bir  $V_k$  merkezi oluşturulduğunda sırayla bir örgü kusuruyla veya bir Tb katkısı ile dengelenebilir. Aşağıda, bir kusur tarafından kararlı hale getirilmiş bir  $V_k$  merkezi  $V_{kA}$  merkezi olarak adlandırılacaktır. Bir  $V_{kA}$  merkez yayılımı,  $V_k$  merkezinin bu kusurdan kurtulması anlamına gelir. Belirlenen olası elektron ve boşluk tuzaklarından yola çıkarak, Tb katkılı lityum borat fosforların gözlenen TL özelliklerini açıklayabilen bir model oluşturulabilir. Bu, yalnızca aktivasyon enerjileri ile birlikte iki ana elektron tuzaklarını varsayarak yapılabilir. Bununla birlikte, gözlemlenen ışıma piklerine, yani aktivasyon enerjisinden veya bir  $\text{Tb}^{+3}$  safsızlığından salınan bir elektron, Tb katkısı ile tuzaklanmış bir boşluk ile yeniden birleşen ve bir termal  $V_{kA}$  merkezinin ya da Tb-tuzaklı boşluğun serbest bırakılması ve daha sonra iki değerlikli bir Tb iyonu ile yeniden birleşmeye tabi tutularak uyarılmış bir  $\text{Tb}^{+3}$  halini oluşturmasıdır. Bu uyarılan durumun bozulması,  $\text{Tb}^{+3}$  iyonu için bir emisyon spektrumu karakteristiği ile TL'ye neden olur.

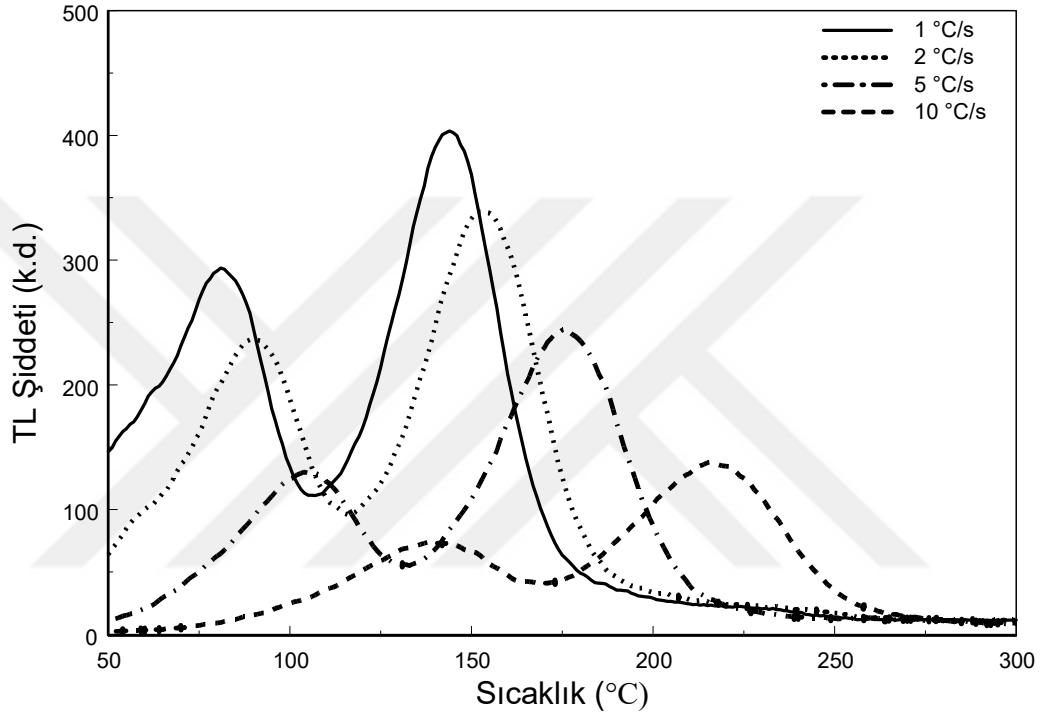
Genel olarak, aktivasyon enerjileri (veya tuzakları) içinde bir elektron ile boşlukların yeniden birleşmesi mümkündür. Eğer oluşursa, radyasyonsuz bir yeniden birleşme olur. Lüminesansın yalnızca değerlik bandının tepesine göre 4f taban durumlarının konumuna değil, aynı zamanda  $V_{kA}$  merkezi TDE'nin öngörülen konumuna bağlı olduğu söylenebilir.  $LiBO_2: Tb^{+3}$ 'deki yüksek lüminesans yoğunluğu,  $Ln^{+3}$  4f TDE'nin  $V_{kA}$  merkez enerjisinin üstünde bulunduğu zaman, lantanitlerin  $V_k$  merkezlerine göre daha yüksek bir boşluk tutma özelliğini gösterebilir. Bu çalışmada safsızlık konsantrasyonunun TL özelliklerine katkıda bulunan önemli bir faktör olduğu ve bu çalışmada kullanılan  $Tb^{+3}$  konsantrasyonunun daha düşük ve %1 mol 'den daha yüksek olduğu belirtilmiştir.



**Şekil 4.3.** Tb katkılı lityum borat örneğinin  $2\text{ }^{\circ}\text{C.s}^{-1}$  'lik bir ısıtma hızı ile ön ısıtmasız ve  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ön ısıtmalı TL ışıma eğrileri.

PS metodu için, Şekil 4.3'te gösterilen yaklaşık  $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ana ışıma piki, 25 saniye  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ön ısıtma yapılarak olası düşük sıcaklıktaki sığ tuzaklardan temizlenmiştir. Simetri faktörü  $\mu_g$ , 0,46 olarak hesaplanmıştır. Chen'in grafiğini kullanarak bu değerden kinetik derece  $b = 1,28$  olarak bulunmuştur. Enerji ve frekans faktörü, literatürde verilen denklemlere göre belirlenerek [48, 66] ve Tablo 4.1'de verilmiştir.

Isıtma hızı, TL ölçümlerinde temel deneysel bir değişkendir ve VHR yöntemi için önemli bir parametredir. Terbiyum katkılı lityum borat fosforların farklı ısıtma oranları ile ilgili fikir sahibi olabilmek için oda sıcaklığından 400 °C'ye kadar olan aralıkta TL spektrumu kaydedildi. Şekil 4.4'te, ışınlanmış Tb<sup>3+</sup> katkılı lityum borat fosforunun 1 ile 10 °C arasındaki farklı ısıtma hızlarındaki TL ışıma eğrilerini göstermektedir.

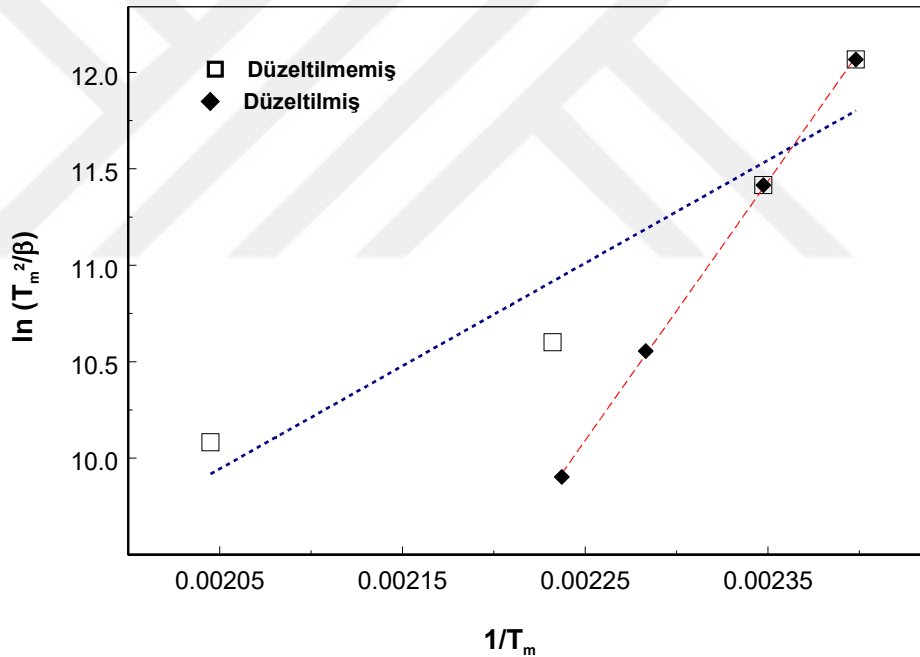


**Şekil 4.4.** X-ışını ile ışınlanmış Tb katkılı lityum boratın 1, 2, 5 ve 10 °C.s<sup>-1</sup> farklı ısıtma hızlarında kaydedilen ışıma eğrileri.

Farklı ısıtma oranları, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi birçok farklı etkiyi göstermektedir. Tüm numuneler 10 dakika boyunca X-ışınına maruz bırakılmasına rağmen, yüksek ısıtma hızları ile ölçümler yapıldığında TL ışıma pikleri daha yüksek sıcaklıklara kayar ve ana pikin şiddeti azalır. Malzemelerin ışıma eğrilerinin şekli, ısıtma hızının bir fonksiyonu olarak değişmez. Pik sıcaklığının ( $T_{max}$ ) ısıtma hızına göre değişimi deneysel olarak aşağıdaki şekilde açıklanabilir. Düşük ısıtma hızında ( $\beta_1$ ), lityum borat fosforun bir  $T_1$  sıcaklığında geçirdiği süre yeterince uzun olduğundan, bu sıcaklıktaki yarılanma ömrüne bağlı olarak bir elektron çıkışı gerçekleşebilir. Isıtma hızı  $\beta_2 > \beta_1$ 'e arttığında, aynı sıcaklıkta  $T_1$  için harcanan süre azalır ve elektronların termal salınımı da azalır. Sonra  $\beta_2$ 'de aynı ısı dağılımının



gerçekleşmesi için  $T_2$ 'nin daha yüksek bir sıcaklıkta olması gereklidir. Bu yolla, tüm ışıma pik noktası, her bir sıcaklıkta harcanan yarılanma ömrü ve zamana bağlı olarak artan sıcaklıklarında olduğu gibi daha yüksek sıcaklıklara kaydırılır. Artan ısıtma hızının bir fonksiyonu olarak fosforun azalan lüminesans duyarlılığı, TL parçacıklarında sıklıkla gözlemlenen bir durumdur. Bu etkinin termal sönümleme etkisinden kaynaklandığı öne sürülmüştür [74, 75]. TLA ve TG'nin değerlendirmelerinde tuzak parametrelerinin etkisinin kritik bir rol oynadığı iyi bilinmektedir [76, 77]. Tüm ölçümlerin TLA'sı, Kitis ve Tuyn tarafından önerilen yöntem [64, 65] ile belirlenmiştir.  $T_m$  maksimum pik sıcaklığının davranışı şekil 4.5'te gösterildiği gibi ısıtma oranlarının bir fonksiyonu olarak çizilir. Veri ( $\square$ ), TLA düzeltmesi yapılmadan, okunurken alınan  $T_m$  değerlerine ve ayrıca TLA tarafından düzeltilen  $T_m$  değerlerine veri ( $\blacklozenge$ ) verir.



**Şekil 4.5.** VHR yönteminin TLA için düzeltilmiş (◆) ve düzeltilmemiş (□) verilere uygulanması.

VHR yöntemi  $T_m$  değerine karşı çok duyarlı olduğu için sıcaklık düzeltmesi çok önemli bir faktördür. TLA için doğru bir düzeltme, aktivasyon enerji tayininde yer alan hatanın keskin bir şekilde azaltılmasına izin verir [72].  $\ln T^2/\beta$ 'nin  $1/T_m$ 'ye karşı grafiğinde, ısıtma hızı  $\beta$  düz bir çizgi vermelidir. Aktivasyon enerjisi bu çizgilerin eğiminden hesaplanır ve kesişim noktasından frekans faktörü elde edilir.

**Tablo 4.1.** Tb katkılı LiBO<sub>2</sub> fosforunun 155 °C pikine ait iki yöntemle elde edilen TL kinetik parametreleri

| Aktivasyon Enerjisi (E) (eV) |                |      | Frekans Faktörü (s) (s <sup>-1</sup> ) |                          |
|------------------------------|----------------|------|----------------------------------------|--------------------------|
| PS Metodu                    | E <sub>δ</sub> | 1,18 | s <sub>δ</sub>                         | 1,08 x 10 <sup>+12</sup> |
|                              | E <sub>τ</sub> | 1,16 | s <sub>τ</sub>                         | 3,17 x 10 <sup>+12</sup> |
|                              | E <sub>ω</sub> | 1,17 | s <sub>ω</sub>                         | 5,04 x 10 <sup>+12</sup> |
| VHR Metodu                   | E              | 1,19 | s                                      | 7,38 x 10 <sup>+12</sup> |

Sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur

Enerji ve frekans faktörü, gerçek pik pozisyonunun belirlenmesinde oldukça etkilenebildikleri için TLA düzeltmesi güvenilirse, E değerlerinin kabul edilebileceğine dikkat çekilmelidir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada geleneksel katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak terbiyum nadir toprak iyonu ile katılandırılmış lityum metaborat fosforunun sentezi, yapısal ve lüminesans özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Fosforun yapısal ve lüminesans özellikleri incelenirken X-ışını kırınımı, radyolüminesans ve termolüminesans teknikleri kullanılmıştır.

Fosforun sentezlenmesi sırasında uygun stokiometride lityum karbonat ve borik asit ve katkı malzemesi olarak ise %1 mol değerinde terbiyum oksit kullanılmıştır. Tüm bu malzemeler, nemden arındırılmış ve indirgenmiş atmosfer (azot) altında agat havanda öğütülerek karıştırılmış ve sonrasında bir platin kroze yardımı ile yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmiştir. Hazırlanan ham materyal; 1200°C'de ve indirgenmiş atmosfer (%15 hidrojen ve %85 azot) altında 2 saat boyunca sinterlenerek sentezleme işlemi sağlanmıştır. Daha sonra sentezlenen fosfor fırın içerisinde 24 saat boyunca soğumaya bırakılmıştır.

Sentezlenen fosforun yapısal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için X-ışını kırınımı ölçümleri yapılmıştır. X-ışını kırınımı ölçümleri; kristalografik fazların belirlenmesi adına, Philips X'Pert Pro marka bir X-ışını kırınım ölçeri yardımıyla bakır  $K\alpha$  ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) çizgisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. X-ışını kırınımı deseninden, sentezlenen fosforun lityum metaborat olduğu anlaşılmıştır. Fosforun; hücre parametreleri  $a = 5,8450 \text{ \AA}$ ;  $b = 4,3530 \text{ \AA}$ ;  $c = 6,4540 \text{ \AA}$  ve  $\beta = 115^\circ$  olmak üzere, monoklinik bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Katkı malzemesi olarak kullanılan terbiyum nadir toprak iyonlarının lityum metaborat üzerindeki etkilerini anlamak için radyolüminesans ölçümleri yapılmıştır. Radyolüminesans spektrumu 450 ila 750 nm aralığında, oda sıcaklığında kaydedilmiştir.  $\text{LiBO}_2:\text{Tm}$  fosforuna ait radyolüminesans spektrumu 480 ile 630 nm arasında güçlü bir yeşil emisyon göstermiştir. Bu emisyon, terbiyumun uyarılmış  $^5D_4 \rightarrow ^7F_j$  ( $j=6,4,3,2,1$  ve 0) seviyelerine ait geçişler ilişkilidir. Burada 541 nm'de görülen ve yeşil emisyonla sebep olan en önemli geçiş  $^5D_4 \rightarrow F_5$  geçiştir.

Fosforun dozimetrik özelliklerine yönelik olarak termolüminesans ölçümleri yapılmış ve kinetik karakterizasyon için pik şekli metodu ve çeşitli ısıtma hızları metotları kullanılmıştır. TL ölçümlerinde sentezlenen fosfor malzemeleri ışınlamak için X-ışını kullanılmıştır. Çeşitli ısıtma hızları metoduna yönelik ölçümlerde ışıma eğrileri; ışınlamadan hemen sonra azot atmosferi altında, 1, 2, 5 ve 10 °C s<sup>-1</sup> 'lik ısıtma hızlarında ve 50 ile 300 °C aralığında kaydedilmiştir. Pik şekli metodunda 2 °C s<sup>-1</sup> 'lik ısıtma hızıyla kaydedilen ışıma eğrisi kullanılmış ve 85 °C ve 155 °C 'de 2 pik gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklık piki 100 °C 'de ön ısıtma işlemiyle temizlenmiştir. Pik şekli ve çeşitli ısıtma hızları metotları ile elde edilen aktivasyon enerjiler sırasıyla 1.17 (ortalama) ve 1,16 eV olarak hesaplanmıştır. Her iki yöntemle elde edilen frekans faktörleri ise sırasıyla 6,34x10<sup>12</sup> s<sup>-1</sup> (ortalama) ve 7,38x10<sup>12</sup> s<sup>-1</sup> 'dir. Elde edilen sonuçlar kıyaslandığında uyum içinde olduğu görülmüştür.

Yapılan literatür incelemelerine göre, çalışma sentezlenen terbiyum katkılı LiBO<sub>2</sub>'nin lüminesans araştırması hakkında bilinen ilk çalışmadır. Yapılan çalışmalar, bu materyallerin herhangi bir somut ve anlamlı TL mekanizmasını önermek için gereklidir. Dolayısıyla, TL işleminin mekanizmasını ve bu fosforlar için farklı metotlar ile kinetik parametrelerin hesaplanmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Aynı ev sahibi malzemeye farklı katkı iyonlarıyla yeni fosfor malzemelerin sentezlenmesi ve bunların radyolüminesans ve termolüminesans özelliklerinin yanı sıra fotolüminesans spektrumlarının da incelenmesine yönelik yeni çalışmalar hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Blasse, G. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Volume 4, North Holland, Amsterdam, 1979, 237-274.
- [2] Mukherjee, S., Sudarsan, V., Vatsa, R.K., Godbole, S.V., Kadam, R.M., Bhatta, U.M., Tyagi, A.K. Effect of structure, particle size and relative concentration of  $\text{Eu}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$  ions on the luminescence properties of  $\text{Eu}^{3+}$  co-doped  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Tb}$  nanoparticles. Nanotechnology. 2008, 19, 32, 325704.
- [3] Mahlik, S., Zalewska, M., Grinberg, M., Konkowski, A.M., Godlewski, M. Luminescence kinetics in silica gel doped with  $\text{Tb}^{3+}$  ions and  $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$  nanocrystals. Journal of Luminescence. 2008, 128, 921–923.
- [4] Zhang, Y., Li, Y. Photo-luminescent properties of  $\text{Eu}^{3+}$  ion-doped  $\text{Ca}_4\text{REO}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{RE}=\text{La}, \text{Y}, \text{Gd}$ ). Journal of Luminescence. 2005, 113, 1-2, 45-49.
- [5] Wang, Y.H., Endo, T., Xie, E.Q., He, D.Y., Liu, B. Luminescence. Properties of  $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3:\text{Eu}$  in Ultraviolet and Vacuum Ultraviolet. Regions. Microelectronics Journal. 2004, 35, 4, 357-361.
- [6] Wang, Y.H., Endo, T., He, L., Wu, C.F. Synthesis and photoluminescence of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $(\text{Y}, \text{Gd})\text{BO}_3$  phosphors by a mild hydrothermal process. Journal of Crystal Growth. 2004, 268, 568-574.
- [7] Wang, Y.H., Wu, C.F., Zhang, J.C. Hydrothermal synthesis and photoluminescence of novel green-emitting phosphor  $\text{Y}_{1-x}\text{BO}_3:x\text{Tb}^{3+}$ . Materials Research Bulletin. 2006, 41, 1571-1577.
- [8] McKeever, S.W.S., Moscovitch, M., Townsend, P.D. Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses, Nuclear Technology Publishing; Ashford, Kent, England. 1995, 28, 12, 210 s.
- [9] Anishia, S.R., Jose, M.T., Annalakshmi, O., Ramasamy, V. Thermoluminescence properties of rare earth doped lithium magnesium borate phosphors. Journal of Luminescence. 2011, 131, 2492-2498.
- [10] Schulman, J.H., Kirk, R.D., West, E.J. Proceedings of the International Conference on Luminescence Dosimetry. CONF-650637, Stanford University, 1967, 113–118.
- [11] Annalakshmi, O., Jose, M.T., Amarendra, G. Dosimetric characteristics of manganese doped lithium tetraborate-An improved TL phosphor. Radiation Measurements. 2011, 46, 669-675.
- [12] Almond, P.R., McCray, K., Espejo, D. A Lithium borate thermoluminescent dosimetry system for radiologic physics dosimetry. American Journal of Roentgenology. 1970, 108, 197-200.
- [13] Manam, J., Sharma, S.K. Thermally stimulated luminescence studies of undoped and doped  $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$  compounds. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2004, 217, 314-320.
- [14] Prokic, M. Lithium borate solid TL detectors. Radiation Measurements. 2001, 33, 393-396.
- [15] Senguttuvan, N., Ishii, M., Shimoyama, M., Kobayashi, M., Tsutsui, N., Nikl, M., Dusek, M., Shimizu, H.M., Oku, T., Adachi, T., Sakai, K., Suzuki, J. Crystal growth and luminescence properties of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  singlecrystals doped with Ce, In, Ni, Cu and Ti ions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2002, 486, 264–267.

- [16] Ignatovych, M., Holovey, V., Watterich, A., Vidoczy, T., Baranyai, P., Kelemen, A., Chuiko, O. Luminescence characteristics of Cu- and Eu-doped  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . *Radiation Measurements*. 2004, 38, 567 – 570.
- [17] Ishii, M., Kuwano, Y., Asaba, S., Asai, T., Kawamura, M., Senguttuvan, N., Hayashi, T., Koboyashi, M., Nikl, M., Hosoya, S., Sakai, K., Adachi, T., Oku, T., Shimizu, H.M. Luminescence of doped lithium tetraborate single crystals and glass. *Radiation Measurements*. 2004, 38, 571 – 574.
- [18] Haranath, D., Sharma, P., Chander, H., Ali, A., Bhalla, N., Halder, S.K. Role of boric acid in synthesis and tailoring the properties of calcium aluminate phosphor. *Materials Chemistry and Physics*. 2007, 101, 163–169.
- [19] Ardiçoğlu, B., Özbayoğlu, G., Özdemir, Z., Yilmaz, A. Production and identification of rare-earth doped lithium triborate. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006, 418, 77–79.
- [20] Sangeeta, Sabharwal, S.C. Study of thermally stimulated luminescence from different phases of lithium borate and its application in crystal characterization. *Journal of Crystal Growth*. 2006, 289, 703–707.
- [21] Depci, T., Özbayoğlu, G., Yilmaz, A., Yazıcı, A.N. The thermoluminescent properties of lithium triborate ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ ) activated by aluminium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2008, 266, 755–762.
- [22] Ferreira, E.B., Zanotto, E.D., Feller, S., Lodden, G., Banerjee, J., Edwards, T., Affatigato, M. Critical Analysis of Glass Stability Parameters and Application to Lithium Borate Glasses. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011, 94, 3833–3841.
- [23] Annalakshmi, O., Jose, M.T., Madhusoodanan, U., Sridevi, J., Venkatraman, B., Amarendra, G., Mandal, A.B. Thermoluminescence mechanism in rare-earth doped magnesium tetra borate phosphors. *Radiation Effects and Defects in Solids. Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*. 2014, 169, 7, 636–645.
- [24] Anjaiah, J., Laxmikanth, C., Veeraiah, N. Spectroscopic properties and luminescence behaviour of europium doped lithium borate glasses. *Physica B*. 2014, 454, 148–156.
- [25] Venkata, K., Babu, S., Venkataiah, G., Ratnakaram, Y.C. Optical spectroscopy of  $\text{Dy}^{3+}$  doped borate glasses for luminescence applications. *Journal of Molecular Structure*. 2015, 1094, 274–280.
- [26] Ramteke, D.D., Ganvir, V.Y., Munishwar, S.R., Gedam, R.S. Concentration Effect of  $\text{Sm}^{3+}$  Ions on Structural and Luminescence Properties of Lithium Borate Glasses. *Physics Procedia*. 2015, 76, 25 – 30.
- [27] Padlyk, B.V., Lisiecky, R., Ryba-Romanowski, W. Spectroscopy of the Er-doped lithium tetraborate glasses. *Optical Materials*. 2016, 54, 126–133.
- [28] Obayes, H.K., Wagiran, H., Hussin, R., Saeed, M.A. A new strontium/copper co-doped lithium borate glass composition with improved dosimetric features. *Journal of Luminescence*. 2016, 176, 202–211.
- [29] Janek, J., Soltys, M., Zur, L., Pietrasik, E., Pisarska, J., Pisarski, W.A. Luminescence investigations of rare earth doped lead-free borate glasses modified by MO ( $M = \frac{1}{4} \text{Ca, Sr, Ba}$ ). *Materials Chemistry and Physics*. 2016, 180, 237–243.
- [30] Patra, G.D., Singh, S.G., Tiwari, B., Singh, A.K., Desai, D.G., Tyagi, M., Sen, S., Gadkari, S.C. Optically stimulated luminescence in Ag doped  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  single crystal and its sensitivity to neutron detection and dosimetry in OSL mode. *Radiation Measurements*. 2016, 88, 14–19.

- [31] Pawar, P.P., Munishwar, S.R., Gedam, R.S. Physical and optical properties of Dy<sup>3+</sup>/Pr<sup>3+</sup> Co-doped lithium borate glasses for W-LED. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, 660, 347-355.
- [32] Soheilian, S., Movahedi, B., Nasrabadi, M.N., Jabbari, I. A different approach to fabricate nanocrystalline LTB:Cu pellets with thermoluminescence response. *Radiation Measurements*. 2016, 89, 14-22.
- [33] Steudel, F., Rimbach, A.C., Loos, S., Ahrens, B., Schweizer, S. Effect of induced crystallization in rare-earth doped lithium borate glass. *Radiation Measurements*. 2016, 90, 274-278.
- [34] Newton Harvey, E. *A History of Luminescence: From the Earliest Times Until 1900*, Dover Publications, USA, 2005, 768 s.
- [35] Ronda, C.R. (Ed: Cornelis R. Ronda), *Luminescence From Theory to Applications*, Wiley-VCH Verlag Gmb H & Co. KGaA, Weinheim, 2008, 276 s.
- [36] Blasse, G., Grabmaier, B.C. *Luminescent materials*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994, 232 s.
- [37] Noto, L.L. Red emission of Praseodymium ions (Pr<sup>3+</sup>), Faculty of Natural and Agricultural Sciences, Department of Physics, University of Free State, Bloemfontein, South Africa, 2011, 110 s. (B.Sc. Thesis).
- [38] Jong, Y. R., Yoo, K.H., Park, S.M. Green Emission from ZnO Thin Films. *Journal of the Korean Physical Society*. 2008, 53, 110-114.
- [39] Kumar, V., Swart, H.C., Ntwaeaborwa, O.M., Kroon, R.E., Terblans, J.J., Shaat, S.K.K., Yousif, A., Duvenhage, M.M. Origin of the red emission in zinc oxide nanophosphors. *Materials Letters*. 2013, 101, 57-60.
- [40] Mickens, M.A., Assefa, Z. Tunable luminescence and white light emission of novel multiphase sodium calcium silicate nanophosphors doped with Ce<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>, and Mn<sup>2+</sup> ions. *Journal of Luminescence*. 2014, 145, 498-506.
- [41] Seed Ahmed, H.A.A., Ntwaeaborwa, O.M., Kroon, R.E. The energy transfer mechanism in Ce, Tb co-doped LaF<sub>3</sub> nanoparticles. *Current Applied Physics*. 2013, 13, 1264-1268.
- [42] Fabio, A. Energy transfer and charge transfer processes in luminescent materials, Universita Degli Studi Di Parma, Department of Chemistry, Italy, 2013, 159 s. (Ph.D. Thesis).
- [43] Chen, R., McKeever, S. *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1997, 537 s.
- [44] Furetta, C. *Handbook of Thermoluminescence*. World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd., Singapore, 2003, 457 s.
- [45] Pekpak, E. *Synthesis and Characterization of Lithium Tetraborate Doped Metals*. Middle East Technical University, Ankara, 2009, (M.S. Thesis).
- [46] Schauer D., Brodsky A., Sayeg, J. *Handbook of Radioactivity Analysis*, Second Edition. Elsevier Science B.V., Great Britan, 2003, 1165-1208.
- [47] Natarajan,V., Bhide, M.K., Dhobale, A.R., Godbole, S.V., Seshagirib, T.K., Pageb, A.G., Lua, C.H. Photoluminescence, thermally stimulated luminescence and electron para- magnetic resonance of europium-ion doped strontium pyrophosphate. *Materials Research Bulletin*. 2004, 39, 2065-2075.
- [48] McKeever, S. W. S. *Thermoluminescence of solids*. Cambridge University Press, Cambridge, 1983, 392 s.
- [49] Kortov, V. Materials for thermoluminescent dosimetry: Current status and future needs. *Radiation Measurements*. 2007, 42, 576-581.
- [50] Cameron, J.R., Suntharalingam, N., Kenney, G.K. *Thermoluminescent Dosimetry*. University of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin, 1968, 232 s.

- [51] Attix, F.H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986, 607 s.
- [52] Horton, J. L. Handbook of Radiation Therapy Physics. Prentice Hall, New York, 1987, 300 s.
- [53] Khan, F.M. The Physics of Radiation Therapy, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, USA, 2003, 608 s.
- [54] Klevenhagen, S.C. Physics and Dosimetry of Therapy Electron Beams, Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin, 1993, 479 s.
- [55] Van Dyk, J. (Ed: Jacob Van Dyk), The Modern Technology of Radiation Oncology: A Compendium for Medical Physicists and Radiation Oncologists, Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin, 1999, 286 s.
- [56] Cameron, J. Radiation Dosimetry. Environ Health Perspectives. 1991, 91, 45–48.
- [57] International Atomic Energy Agency (IAEA), Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams, Technical Reports Series No. 277, Viyana, Avusturya, 1997, 102 s.
- [58] Prelas, M.A., Popouci, G., Bigelow, L.K. Handbook of industrial diamonds and diamond films. CRC Press, New York, USA, 1997, 1232 s.
- [59] [http://chemwiki.ucdavis.edu/Analaltical\\_Chemistry/Instrumental\\_Analysis/Diffraction/](http://chemwiki.ucdavis.edu/Analaltical_Chemistry/Instrumental_Analysis/Diffraction/) [14 June 2014]
- [60] Moore, D.M., Reynolds (Jr.), R.C. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford Press, New York, USA, 1989, 400 s.
- [61] O'Brien, M.J., Lyman, R.L. Seriation, stratigraphy, and index fossils: the backbone of archaeological dating. (Ed: Michael J. O'Brien), 2002 Kluwer Academic Publishers, New York, USA, 1999, 268 s.
- [62] Stille, D.R. Manipulating light: reflection, refraction, and absorption. Compass Point Books, North Mankato, USA, 2005, 48 s.
- [63] Wooster, W.A. Diffuse X-ray reflection from crystals. Dover Publications, Inc., New York, USA, 1997, 200 s.
- [64] Kitis, G., Tuyn, J.W.N. Correction for temperature lag and thermal gradient effects arising during thermoluminescence readout. Radiation Protection Dosimetry. 1999, 84, 371-374.
- [65] Kitis, G., Tuyn, J.W.N. A simple method to correct for the temperature lag in TL glow-curve measurements. Journal of Physics D: Applied Physics. 1998, 31, 2065-2073.
- [66] Chen, R. Glow curves with general order kinetics. Journal of the Electrochemical Society. 1969, 116, 9, 1254-1257.
- [67] Kirfel, A., Will, G., Stewart, R.F. The chemical bonding in lithium metaborate,  $\text{LiBO}_2$ . Charge densities and electrostatic properties. Acta Crystallographica Section B Structural Science. 1983, 39, 175-185.
- [68] Ofelt, G.S. Intensities of Crystal Spectra of Rare-Earth Ions. Journal of Chemical Physics. 1962, 37, 511-520.
- [69] Kaminskii, A.A. Laser Crystals, Their Physics and Properties, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1990, 459 s.
- [70] Imbusch, G.F., Yen, W.M., Levenson, M.D. Lasers, Spectroscopy and New Ideas, (Ed: Marc D. Levenson), Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1988, 248 s.
- [71] Dieke, G.H., Crosswhite, H.M. The Spectra of the Doubly and Triply Ionized Rare Earths. Applied Optics. 1963, 2, 7, 675-686.



- [72] Kitis, G., Furetta, C., Prokic, M., Prokic, V. Kinetic parameters of some tissue equivalent thermoluminescence materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2000, 33, 1252-1262.
- [73] Yazici, A.N., Solak, S., Öztürk, Z., Topaksu, M., Yegingil, Z. The analysis of dosimetric thermoluminescent glow peak of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  : C after different dose levels by  $\beta$ -irradiation. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003, 36, 181.
- [74] Akselrod, M.S., Agersnap, L.N., Whitley, V., McKeever, S.W.S. Thermal quenching of F-center luminescence in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C. *Journal of Applied Physics* 84. 1998, 6, 3364-3373.
- [75] Ege, A., Ekdal, E., Karali, T., Can, N., Prokic, M. Effect of heating rate on kinetic parameters of  $\beta$ irradiated  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ :Cu,Ag,P in TSL measurements. *Measurement Science and Technology*. 2007, 18, 889-892.
- [76] Piters, T.M., Bos, A.J.J. Effects of non-ideal heat transfer on the glow curve in thermoluminescence experiments. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1994, 27, 1747-1756.
- [77] Betts, D.S., Couturier, L., Khayrat, A.H., Luff, B.J., Townsend, P.D. Temperature distribution in thermoluminescence experiments. I. Experimental results. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1993, 26, 843.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Onur DİNÇER

**Doğum Yeri ve Yılı** : İzmir, 1987

**Medeni Hali** : Bekar

**Yabancı Dili** : İngilizce

**E-posta** : onur1912@gmail.com

### Eğitim Durumu

**Lise** : Salih Dede Lisesi

**Lisans** : Celal Bayar Üniversitesi, Fizik Bölümü

**Yüksek Lisans** : Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

### Mesleki Deneyim

Türkiye Kızılay Derneği (Genel Müdürlük), 06.2016- Halen

Genel Başkanlık Yönetim Ofisi (Yönetim Kurulu Asistanı)

DenizBank A.Ş. (Ege Bölge Müdürlüğü) 04.2015- 06.2016

Gişe Görevlisi

İzmir Anadolu İmam Hatip Lisesi (İZMİR), 09.2014- 09.2014

Ücretli Öğretmen (Matematik Öğretmeni)

Vali Nevzat Ayaz Lisesi (İZMİR), 12.2013- 01.2014

Ücretli Öğretmen (İngilizce Öğretmeni)

Migros Tic. A.Ş. (Çeşme MM Satış Mağazası), 2010 Yaz Sezonu

Sezonluk Eleman (Müşteri Hizmetleri)

Migros Tic. A.Ş. (Çeşme MM Satış Mağazası), 2009 Yaz Sezonu

Sezonluk Eleman (Kasiyer)

## Yayınları

1. O. Dinçer, A. Ege, M. Ayvacıklı, İ. Şabikoğlu, N.Can. Terbiyum ile katkılandırılmış Lityum Borat Fosforunun Sentezi ve Lüminesans Karakterizasyonu, LUMİDOZ-V Ulusal Lüminesans ve Dozimetri Kongresi, Sayfa 10, 8-9 Eylül 2011, Mersin.
2. O. Dinçer, M. Ayvacıklı, A. Ege, N. Can. Eu, Dy ve Tb katkılı  $Y_2SnO_7$  Fosforunun Termolüminesans Özellikleri, LUMİDOZ-VI 6. Ulusal Lüminesans ve Dozimetri Kongresi, Sayfa 48, Çeşme-İzmir, 11-13 Eylül 2012.
3. P. Uysal, O. Dinçer, M. Ayvacıklı, L. Türkler, A. Ege,  $Li_6Y(BO_3)_3:Dy$  Malzemesinin Sentezi ve Lüminesans Karakterizasyonu, LUMİDOZ-VI 6. Ulusal Lüminesans ve Dozimetri Kongresi, Sayfa 67, Çeşme-İzmir, 11-13 Eylül 2012.
4. S. Uysal Satılmış, A. Ege, M. Ayvacıklı, O. Dinçer, E.J. Popovici. Seryum Katkılı İttriyum Gadolinyum Alüminat Fosforların Termolüminesans Karakterizasyonu, LUMİDOZ-VI 6. Ulusal Lüminesans ve Dozimetri Kongresi, Sayfa 68, Çeşme-İzmir, 11-13 Eylül 2012.
5. O. Dinçer, A. Ege. Synthesis and luminescence of  $Tb^{3+}$  doped lithium borate ( $LiBO_2$ ), Journal of Luminescence, 138, 174-178, 2013.
6. A. Ege, M. Ayvacıklı, O. Dinçer, S. Uysal Satılmış. Spectral emission of rare earth (Tb, Eu, Dy) doped  $Y_2Sn_2O_7$  phosphors, Journal of Luminescence, 143, 653-656, 2013.
7. O. Dinçer, S. Uysal Satılmış, M. Ayvacıklı, A. Ege. İttriyum Tabanlı Alüminatların Dozimetrik Özellikleri, LUMİDOZ 7, 7. Ulusal Lüminesans ve Dozimetri Kongresi, Sayfa 47, Isparta, 10-12 Eylül 2013.

## Proje Çalışmaları

111M222 Nolu TUBİTAK Projesi. Bursiyer.