

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Semi ATASÖZ**

**GADOLİNYUM (Gd) KATKILI ZnB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ÜN  
KARAKTERİZASYONU VE TERMOLÜMİNESANS  
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**ADANA-2022**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GADOLİNYUM (Gd) KATKILI  $ZnB_2O_4$ 'ÜN KARAKTERİZASYONU VE  
TERMOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Semi ATASÖZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

Bu tez .../.../2022 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından  
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....  
Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU  
DANIŞMAN

.....  
Prof. Dr. Hüseyin TOKTAMIŞ  
ÜYE

.....  
Doç. Dr. Mehmet YÜKSEL  
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.  
**Kod No:**

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

**Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.**  
**Proje No: FYL-2020-12565**

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

## ÖZ

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### GADOLİNİUM (Gd) KATKILI $ZnB_2O_4$ 'ÜN KARAKTERİZASYONU VE TERMOLÜMINESANS ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

#### Semi ATASÖZ

#### ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU  
Yıl: 2022, Sayfa: 85  
Jüri : Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU  
: Prof. Dr. Hüseyin TOKTAMIŞ  
: Doç. Dr. Mehmet YÜKSEL

Bu tez çalışmasında, yanma yöntemi ile sentezlenmiş olan Çinko Borat ( $ZnB_2O_4$ ) ve  $ZnB_2O_4:xGd$  ( $x=0.25\%-0.5\%-1\%-2\%-3\%-4\%-5\%-7\%-10\%$ ) fosforlarının termolüminesans (TL) özellikleri araştırılarak uzay, klinik, kişisel veya çevresel dozimetresi gibi alanların birinde dozimetre olarak kullanılıp kullanılamayacağına yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen fosforların kristalleşmelerinin oluşup oluşmadığını belirlemek için XRD ölçümleri yapılmıştır. Sentezlenen fosforların lüminesans özellikleri TL yöntemiyle incelenmiştir.  $ZnB_2O_4$  ve Gd katkılı  $ZnB_2O_4$  fosforlarının farklı filtrelerdeki ışıma eğrileri 10 Gy beta test dozuna maruz bırakılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, bu malzemenin TL çalışmaları için en uygun filtrenin geniş bant olduğu görülmüştür.  $ZnB_2O_4:Gd$  fosforları için en uygun kütle konsantrasyonunun % 0.25 Gd olduğu bulunmuştur. Farklı ısıtma hızları ve başlangıçtaki artış yöntemleri kullanılarak  $ZnB_2O_4: 0.0025Gd$  fosforlarının tuzak parametreleri hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Termolüminesans, Çinko Borat, Kinetik Parametreler, LexySmart

## ABSTRACT

### MSc THESIS

#### CHARACTERIZATION AND DETERMINATION OF THE THERMOLUMINANCES PROPERTIES OF GADOLINIUM (Gd) DOPPED $\text{ZnB}_2\text{O}_4$

#### Semi ATASÖZ

#### ÇUKUROVA UNIVERSITY INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU  
Year: 2022, Pages: 85  
Jury : Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU  
: Prof. Dr. Hüseyin TOKTAMIŞ  
: Assoc Prof. Dr. Mehmet YÜKSEL

In this thesis, the thermoluminescence (TL) properties of Zinc Borate ( $\text{ZnB}_2\text{O}_4$ ) and  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{xGd}$  ( $\text{x}=0.25\%-0.5\%-1\%-2\%-3\%-4\%-5\%-7\%-10\%$ ) phosphors, synthesized by combustion method were investigated and experimental studies were carried out to determine whether these phosphors can be used as a dosimeter in one of the fields such as space, clinical, personal or environmental dosimetry. XRD measurements were made to determine whether crystallization of the synthesized phosphors occurred. The luminescence properties of the synthesized phosphors were investigated by TL method.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  and Gd doped phosphors were exposed to 10 Gy beta test dose and the glow curves in different filters were examined. In the light of the results obtained, it has been seen that the most suitable filter for TL studies of this material is broadband. It was found that the optimum mass concentration for Gd doped  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  phosphors was 0.25% Gd. Trap parameters of  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.0025\text{Gd}$  phosphors were calculated using different heating rates and initial increase methods.

**Key words:** Thermoluminescence, Zinc borate, Kinetic Parameters, LexySmart

## GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Bu tez çalışmasında katkısız ve Gd katkılı çinko borat (% 0.25, % 0.5 ,% 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10 kütlece) fosforları yanma yöntemi ile sentezlenmiştir. Elde edilen fosforların kristalografik özellikleri, X-Işını Kırınımı (XRD) kullanılarak belirlenmiştir. Sentezlenmiş olan örneklerin lüminesans özelliklerinin belirlenmesinde termolüminesans (TL) yöntemi kullanılmıştır. Katkısız ve katkılı tüm TL ölçümleri, her biri yaklaşık 20 mg olmak üzere bir pellet üzerinde Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, örnek üzerinde saniyede ~0.11 Gy doz hızında ışınlama amaçlı dahili  $\beta$  partikül kaynağına ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) sahiptir. Beta radyasyon kaynağının yarılanma ömrü yaklaşık 30 yıl olup maksimum 2.27 MeV'lik enerjiye sahip  $\beta$  parçacıkları yaymaktadır. Malzemeden yayılan lüminesans, bir foto çoğaltıcı (PM) tüp ve sistem içerisinde yer alan optik filtreler aracılığıyla detekte edilmiştir. Cihazda BSL, TL-365 nm, BSL, TL-365 nm (% 0.25), IRSL, TL-410 nm, IRSL, TL-410 nm (% 0.25), IRSL, TL-565 nm ve IRSL, TL-geniş band olmak üzere 6 farklı optiksel algılama filtresi bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada BSL, TL-365 nm, IRSL, TL-410 nm, TL-565 nm ve IRSL ve TL-geniş band filtre kombinasyonları kullanıldı. Katkısız ve Gd katkılı çinko borat (% 0.25, % 0.5 ,% 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10 kütlece) fosforlarının XRD analizlerinden, 900 °C'deki tüm örneklerin kristal yapıya dönüştüğü ve XRD kırınım desenlerinin JCPDS 00-39-1126 nolu PDF kartında verilen  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. TL ölçümleri için katkısız ve katkılı her bir örnek BSL, TL-365 nm, IRSL, TL-410 nm, TL-565 nm ve IRSL ve TL-geniş band filtrelerinde 10 Gy beta test radyasyon dozuna maruz bırakılarak en uygun filtrenin belirlenmesi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Yayılan fotonların daha hassas bir şekilde saptanması için optimal TL şiddetini geçiren filtre kombinasyonunun belirlenmesi ile katkısız fosforun TL ışıma eğrisi elde edilmiştir. Katkısız çinko borat fosforundan elde edilen TL ışıma eğrisi değerlendirilerek malzemenin dozimetrik amaçlar için

kullanılabileceği görülmüştür. Buradan hareketle yeni tuzaklar ve yeniden birleşme merkezleri oluşturmak ve daha kararlı, daha yüksek lüminesans sinyalleri elde edebilmek için önceden belirlenen farklı oranlardaki Gd iyonu  $ZnB_2O_4$  fosforuna yanma yöntemi kullanılarak katkılanmıştır. Her bir katkı oranı için 10 Gy beta test radyasyon dozuna karşılık yapılan filtre testlerinin sonucunda TL ölçümleri için en uygun filtrenin IRSL-TL geniş band olduğu belirlenmiştir. Bu filtre ile yapılan ölçümlerde, yüksek hassasiyetli TL şiddeti bakımından en uygun katkı oranının % 0.25 Gd olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı, tez çalışması kapsamında % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun dozimetrik özelliklerinin araştırılmasına karar verilmiştir. Doz yanıt deneyi ile doz duyarlılığı ve doğrusal doz aralığı belirlendi. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu, IRSL-TL geniş band TL filtre kombinasyonu kullanılarak 0.11'den 50 Gy'e kadar beta dozu ile ışınladı. Yani, doz yanıt deneyinde, malzemeye 0.11-50 Gy aralığında dozlar verilmiştir. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun yeniden kullanılabilirlik kalitesi (tekrarlanabilirliği) aynı koşullar altında 15 kez radyasyon dozuna maruz bırakılarak TL okuması yapıldı. Bu 15 okumanın standart sapmasının, %5 dozimetri sınırının içerisinde kalarak % 4 standart sapma verdiği gözlemlenmiştir. Farklı ısıtma hızları yöntemi kullanılarak % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu için gerçekleştirilen deneylerin sonucunda, her üç TL ısıtma tepesi de artan ısıtma hızına bağlı olarak yüksek sıcaklık bölgelerine doğru kaymaktadır. Bu kaymanın ısısal gecikme olayının bir sonucu olduğu belirlenmiştir. Isıtma hızının artışıyla birlikte Tepe 1 ve Tepe 2 ısıtma tepelerine ilişkin TL şiddetinin azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın ısısal sönüm olayının bir sonucu olduğu belirlenmiştir. Tepe 3 ısıtma tepesinin TL şiddetinin ise arttığı görülmektedir. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu için her bir ısıtma hızına göre elde edilen TL ısıtma eğrilerinin dozimetrik tepelerinin maksimum TL şiddetlerine karşılık gelen maksimum sıcaklık (deneysel  $T_M$  ve sıcaklık düzeltmesi yapılmış  $T_M$ ) değerlerinden yararlanarak tuzak parametreleri hesaplandı. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun ısıtma eğrisinin kaç tepeden oluştuğunu bulmak için 50-300 °C aralıklarında 5'er derecelik

artışlarla tekrarlanan deneyler sonucunda elde edilen  $T_{maksimum}-T_{durma}$  verilerine başlangıç artış yöntemi (IR) uygulanarak tuzak parametreleri hesaplanmıştır.

5 Gy beta radyasyon dozuna maruz bırakılmış % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforuna ait ışıma eğrisi CGCD yöntemi ile analiz edildiğinde bir birine çok yakın ve iç içe girmiş 7 ışıma tepesinden oluştuğu görülmektedir. Bu tepeler sırasıyla Tepe 1, Tepe 2, Tepe 3, Tepe 4, Tepe 5, Tepe 6 ve Tepe 7 olarak isimlendirilmiştir. Bu ışıma tepelerine ait tuzak parametreleri hesaplanmıştır. FOM değeri ise 0.674 olarak bulunmuştur. 5 Gy beta radyasyon dozuna maruz bırakılan % 0.25 Gd katkılı çinko fosforu laboratuvarında karanlık ortamda önceden belirtilen zaman (1 dk, 10 dk ve 60 dk, 1 gün, 2 gün, 1 hafta ve 35 gün) diliminden sonra 2. tepenin 1 dk, 10 dk ve 60 dk bekleme sürelerinin sonunda TL şiddeti ölçümlerinden düşük olduğu görülmüştür. 6 saat, 1 gün, 2 gün, 1 hafta ve 35 gün sonra ise alınan TL şiddeti ölçümlerinden ise yüksek olduğu gözlenmiştir. 3.tepenini tüm bekleme sürelerinden sonra alınan TL şiddeti ölçümlerinin referans ölçümünden büyük olduğu gözlenmiştir. Bekleme sürelerinden sonra alınan tüm TL ölçümlerinin toplam alanları hesaplanıp aynı grafikte çizdirildiğinde 1 hafta sonunda toplam sinyalin % 30 unu kaybettiği, 35 gün sonunda ise toplam sinyalin % 50 ni kaybettiği tespit edilmiştir.





## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımı takip eden ve yürüten, araştırmamın her aşamasında bilgisini, önerilerini, yardım ve desteğini esirgemeyen, alanımda gelişmemi sağlayan değerli katkılarda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa TOPAKSU ya teşekkürlerimi sunarım. Malzeme üretimi konusunda bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Yusuf Ziya HALEFOĞLU na teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım esnasında desteğini, hoşgörüsünü insani yapısını esirgemeyen çalışma arkadaşım Savaş SARIKCI ya, çalışmalarımda bilgi, öneri, destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Dr. Z. Gizem PORTAKAL UÇAR'a, Sayın Doç. Dr. Sibel Akça ya, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kenan BULCAR'a, Dr. Mehmet OĞLAKÇI'ya, Yüksek Lisans öğrencisi Muammer SONSUZ'a teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte, birçok fedakârlık göstererek beni destekleyen aileme, eşim Nurdan ATASÖZ 'e sevgili oğullarım Kerem Çınar ATASÖZ ve Oğuzhan ATASÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni doğuran büyüten desteğini esirgemeyen annem Ayten ÇÜRÜKe desteğini ve gölgesini esirgemeyen babam İsmail ÇÜRÜK e, bu süreçte her konuda desteklerini esirgemeyen ablalarım Nilhan NAZİK ve Vedia YÜCEL'e, eniştem Fahri NAZİK e hoşgörülü ve fedakâr katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

## SAYFA

|                                                                           |      |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZ .....                                                                  | I    |
| ABSTRACT.....                                                             | II   |
| GENİŞLETİLMİŞ ÖZET .....                                                  | III  |
| TEŞEKKÜR.....                                                             | VII  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                         | VIII |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                   | X    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                     | XII  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                              | XVI  |
| 1. GİRİŞ .....                                                            | 1    |
| 1.1. Lüminesans .....                                                     | 2    |
| 1.2. Katılarda Bant Modeli ve Elektron Geçişleri.....                     | 5    |
| 1.3. Termolüminesans.....                                                 | 8    |
| 1.3.1. Termolüminesans kinetikleri.....                                   | 9    |
| 1.3.1.1. Birinci derece kinetik (Randall-Wilkins Teorisi) .....           | 12   |
| 1.3.1.2. İkinci derece kinetik ( Garlic-Gibson Teorisi) .....             | 14   |
| 1.3.1.3. Genel derece kinetiği.....                                       | 17   |
| 1.4. TL tuzak parametrelerinin belirlemesi için kullanılan yöntemler..... | 18   |
| 1.4.1. Doz yanıt yöntemi .....                                            | 19   |
| 1.4.2. Başlangıç artışı (IR) yöntemi .....                                | 19   |
| 1.4.3. Farklı ısıtma hızlarına dayanan yöntem .....                       | 21   |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                                | 23   |
| 3. MATERYAL VE METOT .....                                                | 33   |
| 3.1. Materyal.....                                                        | 33   |
| 3.1.1. Tez kapsamında kullanılan kimyasallar .....                        | 33   |
| 3.1.2. Tez kapsamında kullanılan cihazlar .....                           | 34   |
| 3.1.2.1. Lexsyg Smart TL / OSL okuyucusu .....                            | 34   |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2.2. X-ışınları toz kırınımı (XRD) ölçüm cihazı .....                                                                                                         | 39 |
| 3.1.2.3. Isıl işlemlerde kullanılan fırın .....                                                                                                                   | 39 |
| 3.1.2.4. Agat havan.....                                                                                                                                          | 40 |
| 3.1.2.5. Hassas Terazı.....                                                                                                                                       | 41 |
| 3.1.2.6. Hidrolik pres cihazı .....                                                                                                                               | 42 |
| 3.1.2.7. Alümina kroze ve Manyetik karıştırıcı.....                                                                                                               | 43 |
| 3.1.2.8. Çeker Ocak .....                                                                                                                                         | 45 |
| 3.2. Metot.....                                                                                                                                                   | 46 |
| 3.2.1. Yanma sentez yöntemi .....                                                                                                                                 | 46 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                                                                                                                     | 49 |
| 4.1. Giriş .....                                                                                                                                                  | 49 |
| 4.2. XRD Analizi Sonuçları.....                                                                                                                                   | 49 |
| 4.3. Termoluminesans (TL) ölçümleri ile ilgili bulgular .....                                                                                                     | 50 |
| 4.3.1. Katkısız ve Gd katkılı Çinko Borat $ZnB_2O_4$ (% 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10) fosforlarının filtre testleri ile ilgili bulgular..... | 50 |
| 4.3.2. Doz yanıt deneyleri ile ilgili bulgular .....                                                                                                              | 56 |
| 4.3.3. Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyi ile ilgili bulgular.....                                                                                   | 59 |
| 4.3.4. Farklı ısıtma hızları deneyi ile ilgili bulgular.....                                                                                                      | 60 |
| 4.3.5. Başlangıç artış (IR, Initial Rise) yöntemi ile ilgili bulgular .....                                                                                       | 64 |
| 4.3.6. Bilgisayarla ısıtma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi ile ilgili bulgular .....                                                                             | 65 |
| 4.3.7. Sönüm (fading) ile ilgili bulgular.....                                                                                                                    | 67 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                                                                                        | 73 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                                                                   | 75 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                                                                    | 85 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 1.1. Uyarım kaynaklarına göre lüminesans çeşitleri.....            | 3  |
| Çizelge 3.1. Malzeme sentezlenmesinde kullanılan kimyasal malzemeler ..... | 33 |
| Çizelge 3.2. Cihazda bulunan mevcut filtreler ve özellikleri.....          | 38 |





## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1.   | Floresans (a) ve Fosforesans (b) olayının şematik olarak gösterimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 4  |
| Şekil 1.2.   | Karakteristik zamanına ( $\tau_c$ ) göre lüminesans olayının adlandırılması. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 5  |
| Şekil 1.3.   | Mutlak sıfır sıcaklığında denge durumunda bulunan metal (a), yarıiletken (b) ve yalıtkan (c) bir malzemenin enerji seviyeleri. Burada $E_f$ , Fermi enerji seviyesini göstermektedir.....                                                                                                                                                                                                                                  | 6  |
| Şekil 1.4.   | Yalıtkan veya yarıiletken bir malzeme içindeki elektron geçişleri ve lüminesans işlemleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 7  |
| Şekil 1.5.   | Yalıtkan ya da yarıiletken malzemelerde TL olayının enerji band modeli kullanılarak açıklanması.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 9  |
| Şekil 1.6.   | TL süreci için OTOR modelinin şematik diyagramı.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 11 |
| Şekil. 3.1.  | Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu cihazı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 34 |
| Şekil. 3.2.  | Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucunun temel bölümleri (Richter, 2015) Lexsyg Smart TL/OSL okuyucuda bulunan beta ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) radyasyon kaynağı özel bir kurşun blok içerisine yerleştirilmiştir. Beta radyasyon kaynağının yarılanma ömrü yaklaşık 30 yıl olup maksimum 2.27 MeV'lik enerjiye sahip $\beta$ parçacıkları yaymaktadır. Radyasyon kaynağı, saniyede 0.1 Gy'lik bir doz hızına sahiptir. .... | 35 |
| Şekil. 3.3.  | Lexsyg Smart TL / OSL Okuyucu cihazının içerisine malzeme yerleştirmek için kullanılan örnek tabla. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 36 |
| Şekil. 3.4.  | Isıtma birimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 37 |
| Şekil. 3.5.  | Hamamatsu (H7360-02 model) standart bi-alkalin fotokatlandırıcı tüp ünitesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 37 |
| Şekil. 3.6.  | Protherm marka fırın .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 40 |
| Şekil. 3. 7. | Agat havan.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 41 |

|              |                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil. 3.8.  | Prescisa XB 220 A marka dijital hassas terazi .....                                                                                                                                            | 42 |
| Şekil. 3.9.  | CARVER marka hidrolik presleme cihazı .....                                                                                                                                                    | 43 |
| Şekil. 3.10. | Alümina kroze .....                                                                                                                                                                            | 44 |
| Şekil. 3.11. | Elektrikli Isıtıcı Manyetik Karıştırıcı .....                                                                                                                                                  | 45 |
| Şekil. 3.12. | Çeker Ocak .....                                                                                                                                                                               | 45 |
| Şekil 4.1.   | Katkısız ve Gd katkılı $ZnB_2O_4$ (% 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10) fosforlarına ait XRD kırınım desenleri.....                                                            | 50 |
| Şekil 4.2.   | Katkısız çinko borat fosforuna ait filtre testi sonuçları .....                                                                                                                                | 51 |
| Şekil 4.3.   | a-1. % 0,25, % 0,5, %1, %2, %3, %4, %5, %7 ve % 10 Gd katkılı çinko borat fosforuna ait filtre test sonuçları.....                                                                             | 54 |
| Şekil 4.4.   | IRSL-TL geniş bant filtresinde 10 Gy beta dozuna maruz bırakılmış Gd katkılı Çinko Borat $ZnB_2O_4$ (% 0.25, % 0.5, %1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10) fosforlarının TL ışıma eğrileri ..... | 55 |
| Şekil 4.5.   | Farklı oranlardaki Gd konsantrasyonlarına karşılık toplam TL eğri alanları.....                                                                                                                | 56 |
| Şekil 4.6.   | % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı radyasyon dozlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri.....                                                                    | 58 |
| Şekil 4.7.   | % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforuna 0.1-50 Gy arası doz verilerek elde edilen doz cevap eğrisi .....                                                                                       | 59 |
| Şekil 4.8.   | % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun ilk okumaya göre normalize edilmiş TL sinyal alanının döngü sayısına karşı grafiği....                                                                | 60 |
| Şekil 4.9.   | % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı ısıtma hızlarında elde edilen TL ışıma eğrilerinin karşılaştırılması.....                                                                      | 61 |
| Şekil 4.10.  | % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı ısıtma hızlarında elde edilen Tepe 1 için sıcaklık gecikmeli ve düzeltilmiş grafiği. ....                                                      | 63 |
| Şekil 4.11.  | % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı ısıtma hızlarında elde edilen Tepe 2 için sıcaklık gecikmeli ve düzeltilmiş grafiği. ....                                                      | 63 |

|             |                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.12. | % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun 5°C'lik artışlarla 50°C ve 300°C aralığındaki ön ısıtma sıcaklıklarına ilişkin ısıma eğrileri .....                                            | 64 |
| Şekil 4.13. | Başlangıç artış yöntemi ile $T_{durma}$ (ön ısıtma) sıcaklıkları kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjileri.....                                                                    | 65 |
| Şekil 4.14. | 5 Gy beta radyasyon dozuna maruz bırakılmış % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun CGCD yöntemi ile analizi.....                                                                      | 66 |
| Şekil 4.15. | % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun 1 dakikalık bekleme süresi sonunda TL ısıma eğrisinde meydana gelen değişim.....                                                               | 68 |
| Şekil 4.16. | <b>a-g.</b> % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun 10 dk, 1 saat, 6 saat, 1 gün, 2 gün, 1 hafta ve 35 gün günlük bekleme süresi sonunda TL ısıma eğrisinde meydana gelen değişim..... | 71 |
| Şekil 4.17. | % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun ilk okumaya göre normalize edilen TL sinyalinin zamana karşı sönümleme grafiği.....                                                            | 72 |





## SİMGELER VE KISALTMALAR

|            |                                           |
|------------|-------------------------------------------|
| b          | : Kinetik derece                          |
| CGCD       | : Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma    |
| E          | : Aktivasyon enerjisi                     |
| $E_g$      | : Yasak enerji aralığı                    |
| EDS        | : Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi |
| eV         | : Elektron volt                           |
| F          | : Işınımlı geçiş verimi                   |
| Gy         | : Grey                                    |
| k          | : Boltzman sabiti                         |
| k.b.       | : Keyfi birim                             |
| OSL        | : Optik uyarmalı lüminesans               |
| PM         | : Fotoçoğaltıcı                           |
| PMT        | : Fotoçoğaltıcı tüp                       |
| RC         | : Yeniden birleşme merkezi                |
| s          | : Frekans faktörü                         |
| T          | : Mutlak sıcaklık                         |
| T          | : Elektron tuzak merkezi                  |
| TL         | : Termolüminesans                         |
| TLD        | : Termolüminesans dozimetre               |
| UV         | : Ultraviyole ışık                        |
| $ZnB_2O_4$ | : Çinko borat                             |
| XRD        | : X-ışını kırınımı                        |
| $\beta$    | : Isıtma hızı                             |
| $\tau$     | : Ortalama ömür                           |
| $\mu$      | : Mikro                                   |
| $\tau_c$   | : Karakteristik zaman                     |



## 1. GİRİŞ

Günümüzde son derece yaygın kullanım alanına sahip olan radyasyon ve radyasyon ile ilgili uygulamaların, günlük hayatımızdaki yeri gün geçtikçe artmaktadır. Radyasyonun yararlı yönlerinin olmasına rağmen, iyonlaştırıcı radyasyonun düşük dozlarda bile kanser ve genetik hasarlara neden olabilme olasılığının olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, iyonlaştırıcı radyasyon alanlarında çalışanların maruz kaldıkları radyasyon dozunun doğru ölçülmesi, bu kişilerin sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Nükleer santraller, nükleer tıp merkezleri, radyoterapi ve radyoloji merkezleri gibi radyasyon alanlarında çalışan personellerin ve tedavi olan kişilerin, maruz kaldıkları radyasyon doz miktarının ölçülmesi oldukça önemlidir. Ayrıca nükleer kaza, nükleer silah denemesi ve kullanılması sonucu insan sağlığı açısından çevresel radyasyon güvenliği için çevreye yayılan radyasyon dozunun ölçümü de önem arz etmektedir. Benzer şekilde, arkeolojik ve jeolojik yaş tayini gibi alanlarda ve uzay araştırmalarında da radyasyon doz ölçümünün yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda radyasyona maruz kalan, canlı ya da cansız, tüm çevrenin radyasyon güvenliğini sağlamak amacıyla radyasyon dozunun ölçüm yoluyla izlenmesi ve radyasyonun kullanıldığı alanlarda doz takibinin rutin olarak yapılması gerekmektedir. Bu amaçla güvenli radyasyon şartlarında çalışmalarının takibi ve maruz kaldıkları radyasyon dozlarının ölçülmesi için termolüminesans (TL) dozimetreleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Termolüminesans dozimetreler (TLD) konusunda bu güne kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların önemli bir kısmı yeni TLD malzemelerin araştırılması üzerine yoğunlaşırken diğer kısmı ise var olan TL malzemelerin sentezlenme ve katkılama durumlarında değişiklikler yapılarak TL özelliklerini geliştirmeye yöneliktir. Bu amaçla, bu tez çalışmasında da yanma yöntemi ile sentezlenmiş olan Gd katkılı Çinko Borat ( $ZnB_2O_4$ ) fosforlarının TL özellikleri araştırılarak bu fosforların uzay, klinik, kişisel veya çevre dozimetresi

gibi alanların birinde dozimetre olarak kullanılıp kullanılamayacağına yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

### 1.1. Lüminesans

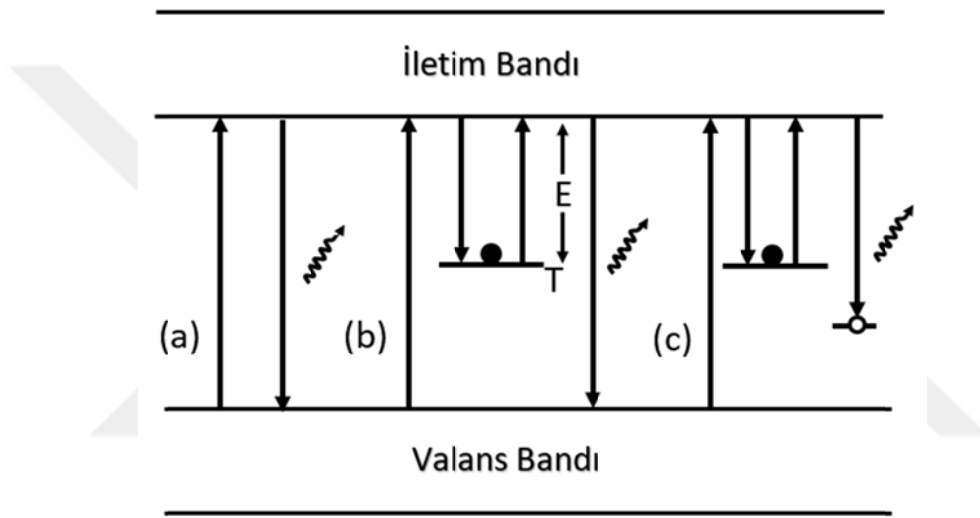
Bilindiği üzere radyasyon doz ölçümünde kullanılan doz ölçüm sistemleri arasında en yaygın olarak kullanılan katı hal dozimetreleridir. Katı hal dozimetrisi için kullanılacak malzeme fosforlu bir yapıya sahip malzeme olmalıdır. Fosfor, parıldama (lüminesans) veya ışık yayan bir malzeme olarak tanımlanır (Kitai, 2008). Fosforlar çoğunlukla ev sahibi örgüyü içeren inorganik maddelerin içerisinde nadir toprak elementleri gibi belli stokiyometrik konsantrasyonlarda safsızlıklar katılması ile elde edilen katı maddelerdir (Ronda, 2008). Fosfor olarak da bilinen bu lüminesans malzemeler, herhangi bir radyasyon kaynağından (X-ışını, ultraviyole (UV) ve gama ( $\gamma$ ) ışınları gibi) veya benzeri bir enerji kaynağından (ısı, mekaniksel kuvvet ve elektriksel enerji gibi) gelen enerjiyi soğurabilir. Daha sonra bu enerjiyi genellikle görünür bölgede yaydığı bir elektromanyetik ışıma olarak verir. Lüminesansın tanımından da anlaşılacağı üzere lüminesans olayının meydana gelmesi için dış bir uyarıcıya ihtiyaç vardır. Bundan dolayı lüminesans mekanizması, uyarılma kaynağına göre farklı isimler almaktadır. Örneğin uyarılma için gerekli enerji, elektriksel enerjiden sağlanıyorsa elektrolüminesans, kimyasal enerjiden sağlanıyorsa kemilüminesans,  $\gamma$  ışınları,  $\beta$  parçacıkları veya x-ışınların gibi nükleer radyasyondan sağlanıyorsa radyolüminesans olarak adlandırılmaktadır. Çizelge 1.1’de farklı uyartım kaynaklarına bağlı olarak lüminesans çeşitleri verilmiştir.

Çizelge 1.1. Uyartım kaynaklarına göre lüminesans çeşitleri

| Lüminesans Türü        | Uyartım Kaynağı                        |
|------------------------|----------------------------------------|
| Termolüminesans (TL)   | İyonlaştırıcı Radyasyon + Isı Enerjisi |
| Fotolüminesans (PL)    | Uygun Dalgaboylu Işık                  |
| Katodolüminesans (CL)  | Elektron Demeti                        |
| Radyolüminesans (RL)   | İyonlaştırıcı Radyasyon                |
| Tribolüminesans        | Mekanik Enerji                         |
| Biyolüminesans         | Biyokimyasal Enerji                    |
| Kemilüminesans         | Kimyasal Enerji                        |
| Elektrolüminesans (EL) | Elektrik Alan                          |

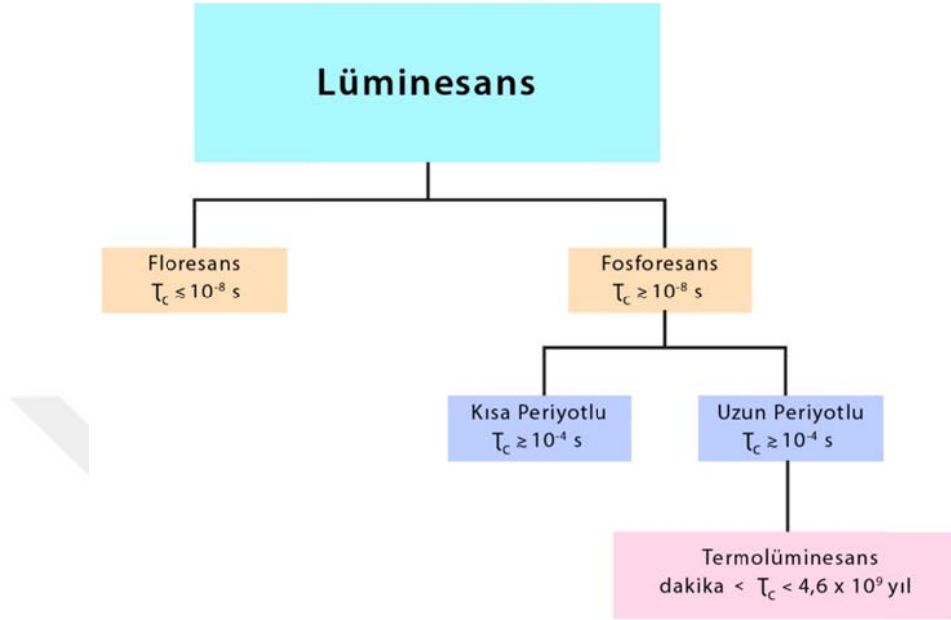
Malzemedен ışığın yayılımı, radyasyonun soğurulmasından sonra  $\tau_c$  karakteristik zamanı kadar zaman almaktadır. Bu bağlamda lüminesans olayı sonucu oluşan elektromanyetik ışıma, uyartım ve ışığın açığa çıkması arasındaki karakteristik zamana ( $\tau_c$ ) bağlı olarak floresans ve fosforesans olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılabilir (McKeever, 1985). Floresans, malzemenin radyasyonu soğurmasından sonra ışığın  $10^{-8}$  saniyeden daha az bir sürede yayımlandığı lüminesans olayıdır (Şekil 1.1.a.). Bu da, ışığın yayılımının radyasyonun soğurulması ile eş zamanlı oluştuğunu ve radyasyonun kesilmesiyle de ışığın aniden durduğu anlamına gelmektedir. Fosforesans olayı ise, malzemenin radyasyonu soğurulmasından sonra ışığın  $10^{-8}$  saniyeden daha fazla bir sürede yayımlandığı lüminesans olayıdır. Bu durumun temel sebebi, iletim bandında serbest halde hareket eden elektronun tekrar kararlı duruma geçişi esnasında yasak enerji aralığı içerisindeki yarı kararlı enerji seviyesi tarafından tuzaklanmasıdır. Bu durum iki farklı şekilde gerçekleşir. Birincisi, tuzaklanmış olan bu elektronun, tuzaktan kurtulması için en az tuzak derinliği (E) kadar bir ısı ve benzeri bir enerji kaynağına maruz bırakılması sonucunda tuzaktan kurtulan elektronun tekrar taban durumuna dönmesi esnasında valans bandındaki hol ile birleşerek ışıma vermesidir.

(Şekil 1.1.b.). İkincisi ise, tuzaklanmış olan bu elektronun tuzaktan kurtulduktan sonra yeniden birleşme merkezindeki hol ile birleşerek ışıma yapmasıdır (Şekil 1.1.c). Fosforesans olayında, malzeme üzerindeki uyarıcı kaynağın kesilmesinden sonra da ışımanın bir süre daha devam ettiği gözlenmektedir. Floresans ve fosforesans arasındaki en temel ayırım, floresans olayı sıcaklıktan bağımsız iken fosforesans olayı sıcaklığa bağlıdır.



Şekil 1.1. Floresans (a) ve Fosforesans (b) olayının şematik olarak gösterimi (McKeever, 1985)

Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, karakteristik zamana bağlı olarak lüminesans olayının sınıflandırılması verilmiştir. Dozimetrik malzeme geliştirme araştırmalarında kullanılan TL olayı fosforesans grubuna girmektedir ve bu grupta birkaç dakikadan bir milyon yıla kadar elektronları tutabilen tuzaklar bulunmaktadır.

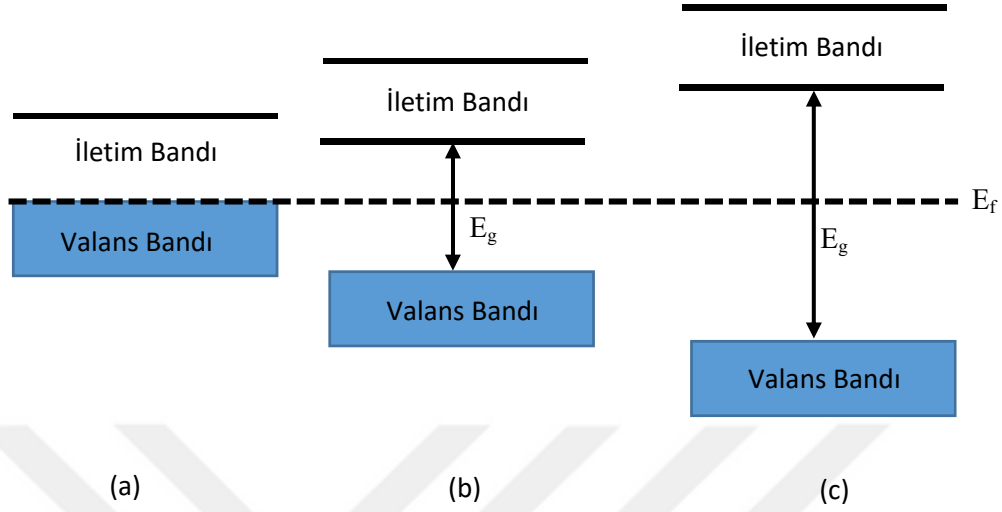


Şekil 1.2. Karakteristik zamanına ( $\tau_c$ ) göre lüminesans olayının adlandırılması (McKeever, 1985).

## 1.2. Katılarda Bant Modeli ve Elektron Geçişleri

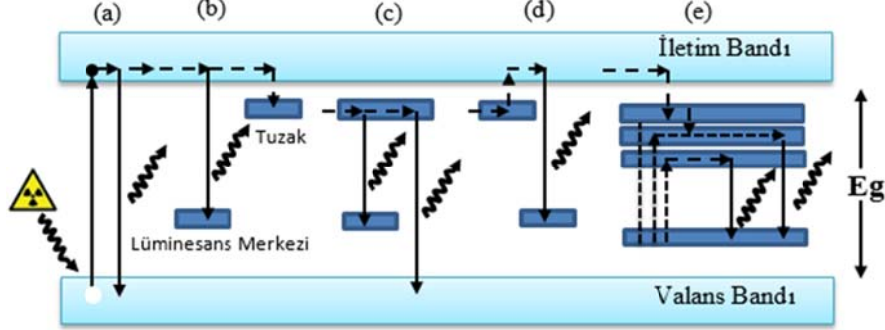
Kusursuz bir kristal, sadece mutlak sıcaklıkta (0 K) bulunabilir. Enerji bant modeline göre bu mutlak sıcaklıkta (0 K) elektronların dolu bandına değerlik bandı ve değerlik bandını izleyen ilk boş banda ise iletim bandı denilmektedir (Şekil 1.3). Bu iki band arasındaki bölgeye de yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) denilmektedir ve bu bant izinli iki enerji durumunu birbirlerinden ayırmaktadır (Şekil 1.3). Kusursuz kristallerde yasak enerji aralığında elektronlar bulunmaz. Ancak, doğada kusursuz kristal yoktur. Bu da bütün gerçek kristallerin bünyelerinde yapı kusurlarını ve safsızlıkları içerdiği anlamına gelmektedir. Bu safsızlıklar ile yasak enerji aralığında yeni ara enerji seviyeleri oluşmaktadır ve bu enerji seviyelerinde elektronlar tuzaklanmaktadır.





Şekil 1.3. Mutlak sıfır sıcaklığında denge durumunda bulunan metal (a), yarıiletken (b) ve yalıtkan (c) bir malzemenin enerji seviyeleri. Burada  $E_f$ , Fermi enerji seviyesini göstermektedir (McKevver, 1985).

Enerji band modeline göre, mutlak sıcaklıkta yalıtkan ya da yarıiletken kristal bir malzeme herhangi bir dış enerji kaynağına (ısı, iyonlaştırıcı radyasyon, foton gibi) maruz kalmadığı sürece elektronların değerlik bandından iletkenlik bandına geçmesi mümkün değildir. Yalıtkan ya da yarıiletken kristal bir malzemenin alfa, beta ve gama gibi iyonlaştırıcı radyasyon kaynağına maruz kalması ile valans bandında bulunan elektronların yeterli enerjiyi soğurmaları sonucunda kristal örgü içinde çeşitli geçişler yapar. Bu geçişler şekil 1.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Yalıtkan veya yarıiletken bir malzeme içindeki elektron geçişleri ve lüminesans işlemleri (Gaft ve ark.,2015)

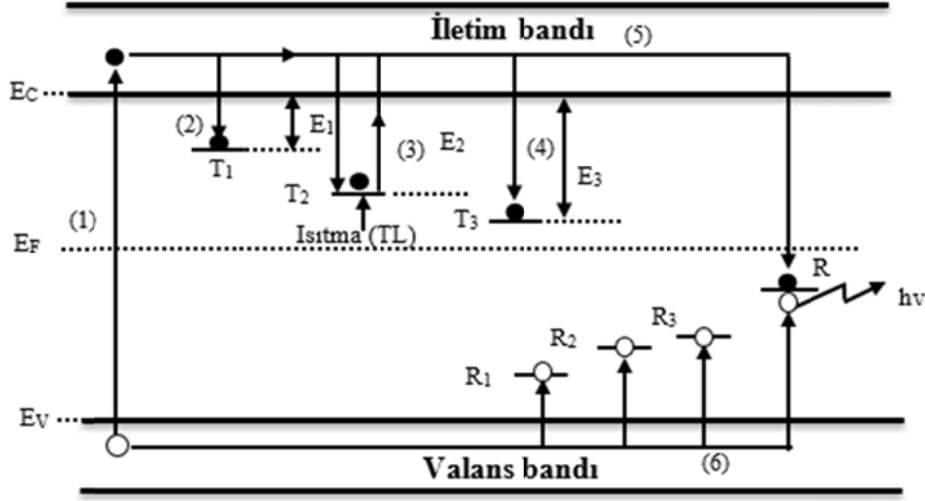
İyonlaştırıcı radyasyonun malzeme tarafından soğrulması sonucunda değerlik bandında bulunan elektron yeterli enerjiyi kazanarak iletkenlik bandına geçer ve daha sonra elektron tekrar valans bandına geçerken ışıma meydana gelir (Şekil 1.4.a). Ayrıca, iletim bandına çıkan her elektron valans bandında bir deşik bırakır. Yeterli enerjiyi soğurup iletkenlik bandına çıkan elektron, değerlik bandına geri dönerken ya yasak enerji aralığındaki yeniden birleşme merkezlerinde tuzaklanmış hol ile birleşerek ışıma yapar ya da yasak enerji aralığında bir elektron tuzaklı tarafından tuzaklanır (Şekil 1.4.b). Tünelleme olayının etkisi ile tuzaktan kurtulan elektron, ya yasak enerji aralığında yeniden birleşme merkezinde tuzaklanmış hol ile birleşerek ya da valans bandında bulunan hol ile birleşerek ışıma yapar (Şekil 1.4.c). Yasak enerji aralığında, yarı kararlı enerji seviyesinde tuzaklanmış olan elektron, ısı veya uygun dalga boylu ışık ile gerekli enerjiyi kazanıp iletim bandına çıkıp, valans bandına dönerken yeniden birleşme merkezinde tuzaklanmış hol ile birleşerek ışıma yapar (Şekil 1.4.d). İletim bandında çok kısa bir süre hareket eden elektronlar, valans bandına dönme esnasında yasak enerji aralığı boyunca tek bir tuzakla ya da çoklu tuzaklarla karşılaşabilirler. Lüminesans merkezlerinde, elektronların ve hollerin birleşmesiyle de foton yayılımı gerçekleşir (Şekil 1.4.e). Bu şekilde gerçekleşen ışık yayımına dışsal lüminesans denilmektedir. Dışsal lüminesans merkezleri, ev sahibi malzeme

içindeki safsızlık atomlarının varlığı yani aktivatör iyonlarından dolayı yasak enerji aralığı bölgesinde meydana gelen noktasal kusur ya da kümelenmiş kusurları içerir (Tarashchan ve Waychunas, 1995).

### 1.3. Termolüminesans

TL olayı, temelde malzemenin iyonlaştırıcı radyasyon kaynağına maruz kalması ve hemen sonrasında malzemenin doğrusal bir ısıtma hızı ile ısıtılması şeklinde iki adımda açıklanmaktadır. TL olayının gözlenebilmesi için malzemenin yalıtkan veya yarıiletken olması gerekir. Bu malzemelerin yasak enerji aralığında, gelen enerjiyi (radyasyonu) birkaç dakikadan bir milyon yıla kadar dahi tutabilecek kusurlara (safsızlıklara) sahiptir. Yasak enerji aralığında elektron ve hol tuzağı olarak davranan bu kusurlar, yalıtkan ve yarıiletken malzemelerin dozimetre ve tarihlendirme uygulamalarında geniş kullanım alanı oluşturmuştur. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan malzemenin ısıtılıp tekrar soğutuktan sonra tekrar ısıtılması ile termolüminesans yayını gerçekleşmez. Bundan dolayı, malzemenin lüminesans yayını göstermesi için iyonlaştırıcı radyasyona tekrar maruz bırakılıp ısıtılması gerekir.

Termolüminesans mekanizmasını tam olarak açıklayabilen bir model yoktur. Ancak, katılardaki enerji-band modeli ile TL olayını basite indirgeyerek açıklayabiliriz. Alfa ( $\alpha$ ) ve beta ( $\beta$ ) parçacıkları ile X ve gama ( $\gamma$ ) ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan yalıtkan ya da yarı iletken maddelerin enerji soğurması sonucunda valans bandında bulunan elektronlarının uyarılmasıyla iletkenlik bandında serbest elektronlar ve valans bandında ise serbest holler oluşur (Şekil 1.5.(1)).



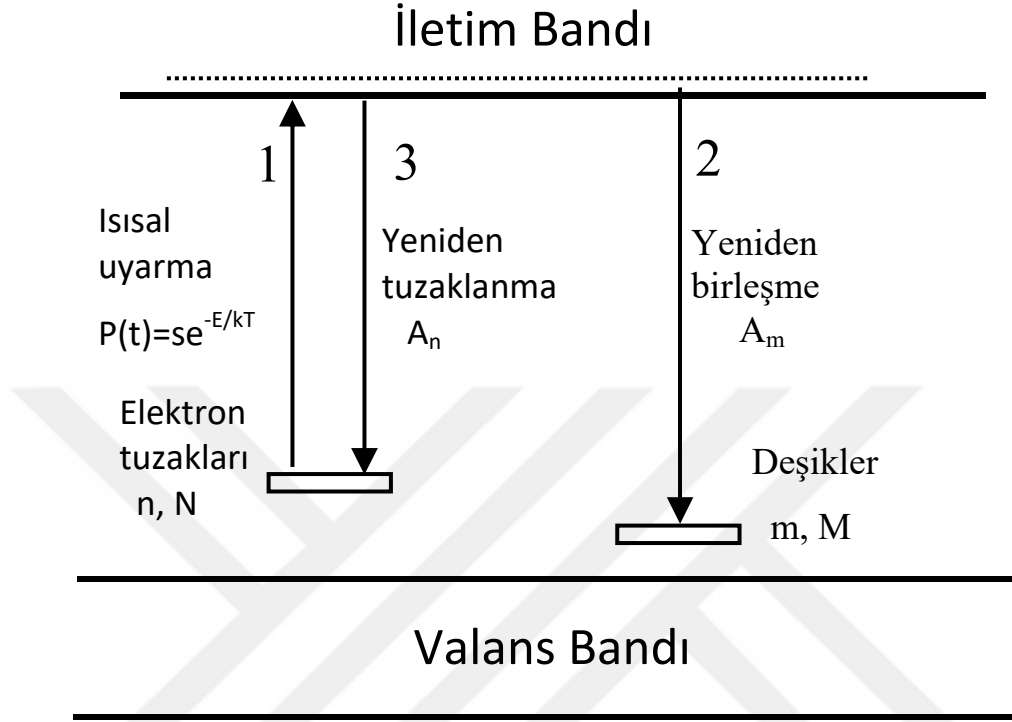
Şekil 1.5. Yalıtkan ya da yarıiletken malzemelerde TL olayının enerji band modeli kullanılarak açıklanması (Yukihara ve McKeveer, 2011)

İletim bandında serbest halde hareket eden elektronlar ile valans bandında serbest halde hareket eden holler, yasak enerji aralığında farklı derinlikteki elektron ( $T_1$ ,  $T_2$  ve  $T_3$ ) ve hol tuzakları ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) tarafından tuzaklanabilirler. Yarı kararlı enerji seviyesindeki tuzaklanmış elektronların, tuzaktan kurtulması için kristalin doğrusal bir ısıtma hızında ısıtılması (TL) ya da uygun dalga boylu ışıığa (OSL) maruz bırakılması ile sağlanabilir (Şekil 1.5.(3)). Tuzaklanmış olan bu elektronların gerekli olan enerjiyi ısı enerjisi olarak almaları sonucunda, elektronlar tekrar iletim bandına geçebilirler (Şekil 1.5. (5)). İletkenlik bandında serbest halde hareket eden elektron, değerlik bandına geri dönerken yasak enerji aralığındaki yeniden birleşim merkezlerinde ( $R$ ) tuzaklanmış hol ile birleşerek ışıma yapar. Bu şekilde malzemeden ışıma (foton) yayılması olayına termolüminesans (TL) denilmektedir (McKevver, 1985; Sunta, 2015).

### 1.3.1. Termolüminesans kinetikleri

TL olayı, genellikle "Bir Tuzak ve Bir Yeniden Birleşme Merkezi" (OTOR) olarak adlandırılan enerji band modeli yaklaşımı kullanılarak

açıklanabilmektedir (Sunta, 2015; Pagonis, 2021). Şekil 1.6'deki şematik yapı bu modele ait enerji seviyelerini ve izinli geçişleri içermektedir (Sunta, 2015). OTOR modelinde, iyonlaştırıcı radyasyonun etkisiyle tuzaklanmış olan elektronlar ısı veya optik uyarma sonucunda tuzaktan kurtulurlar ve daha sonra ya yeniden birleşme merkezindeki hol ile birleşerek ışıma yaparlar ya da tekrar tuzaklanırlar. OTOR modeli için bu geçişler Şekil 1.6'de şematik olarak gösterilmiştir. Geçiş 1, tuzaklanmış elektronların ısı veya optik uyarılmasını, geçiş 2, bir elektronun iletim bandından yeniden birleşme merkezine (R) yakalanmasını ve geçiş 3 ise, bir elektronun iletim bandından elektron tuzacağına yeniden tuzaklanmasını temsil eder. OTOR modelini daha detaylı incelemek için bazı parametreleri tanımlamak gerekmektedir. Bunlar;  $N$ , kristaldeki toplam elektron tuzaklarının konsantrasyonunu;  $M$ , kristaldeki toplam hol tuzaklarının konsantrasyonunu;  $n$ , herhangi bir  $t$  anında tuzaklanmış elektronun konsantrasyonunu;  $n_c$ , iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonunu;  $m$ , herhangi bir  $t$  anında yeniden birleşme merkezlerinde tuzaklanmış hol konsantrasyonunu;  $E$ , tuzaklanmış bir elektronun tuzaktan kurtulması için gerekli aktivasyon enerjisini ya da tuzak derinliğini;  $T$ , mutlak sıcaklık;  $k$ , Boltzmann sabiti;  $s$ , tuzaklanmış elektronun tuzaktan kurtulmak için yaptığı hamlelerin sayısı;  $A_n$ , elektronların yeniden tuzığa yakalanma olasılığı sabiti ve  $A_m$  yeniden birleşme olasılığı sabitidir.



Şekil 1.6. TL süreci için OTOR modelinin şematik diyagramı (Pagonis, 2021)

Yarı iletken ya da yalıtkan bir kristal malzemedeki Şekil 1.6'daki gibi gösterilen yarı kararlı enerji seviyesinde tuzaklanmış olan bir elektronun ısıtılma esnasında birim zamanda tuzaktan kurtulma olasılığı

$$p = \frac{1}{\tau} = s \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) \quad 1.1$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada,  $p$ ; birim zamandaki olasılık,  $\tau$ ; yarı kararlı enerji seviyesindeki elektronun tuzakta geçirdiği ortalama ömür,  $s$  ( $s^{-1}$ ); frekans faktörü ya da kaçış frekansı,  $E$  (eV); aktivasyon enerjisi ya da tuzak derinliği,  $T$  (K); mutlak sıcaklık ve  $k$  ( $eVK^{-1}$ ) Boltzmann sabitini ifade etmektedir. OTOR modeline göre, ısıtılma sonucunda iletim bandındaki elektronların tuzaklar tarafından tekrar yakalanma olasılığı,

$$T_{\text{tekrar}} = n_c A_n (N - n) \quad (1.2)$$

eşitliği ile tanımlanmıştır. Benzer şekilde iletim bandındaki elektronların yeniden birleşme merkezlerine ( $R$ ) yakalanma sırasında yayımlanan lüminesans şiddeti,

$$R = I_{(t)} = \frac{dn}{dt} = -\frac{dm}{dt} = n_c A_m m \quad (1.3)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Elektronların tekrar tuzaklanma ve yeniden birleşme merkezlerine geçiş olasılıkları ele alındığında ısıtma boyunca lüminesans verimi,

$$F = \left( \frac{R}{R + T_{\text{tekrar}}} \right) \quad (1.4)$$

denklemleri ile verilebilir (Sunta, 2015). Burada,  $F$ , ışınlı geçiş verimidir. Lüminesans şiddeti, kaçış frekansı, ışınlısal geçiş ve yeniden tuzaklanma olasılıkları ile ilgili verilen bilgilerle zamanın bir fonksiyonu olarak yazılabilir;

$$I_{(t)} = \frac{dn}{dt} = \frac{mA_m n \exp(-\frac{E}{kT})}{A_n (N - n) + mA_m} \quad (1.5)$$

Denklem (1.5)'den kinetik denklemlerin farklı dereceleri türetilir.

### 1.3.1.1. Birinci derece kinetik (Randall-Wilkins Teorisi)

1945'te Randall ve Wilkins, fosforesans üzerinde yapılan çalışmalardan başlayarak, ışıma eğrisindeki her bir ışımının tepe noktası için kapsamlı matematik işlemleri kullanmıştır (Randall ve Wilkins, 1945). Bu matematiksel işlemler katılardaki OTOR modeline dayanmaktadır. Randall-Wilkins teorisi, temel olarak tek bir tuzak derinliğini göz önünde bulundurur. Bu bağlamda tuzaklardan kurtulan elektronların tekrar tuzaklanma olasılığı ihmal ederek direkt lüminesans

merkezlerindeki hollerle birleşerek foton yayımlar. Bu teori ( $T_{tekrar} = 0$ ) doğrultusunda eşitlik (1.4)'deki ışınlımlı geçiş veriminin 1 (bir) olacağı söylenilebilir. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan yalıtkan ya da yarı iletken malzemeden kopan her elektron yerinde bir hol bırakır. Yani yük taşıyıcılar çiftler halinde oluşur ve çiftler halinde yok olurlar. Bundan dolayı yeniden birleşme merkezindeki hollerin sayısı serbest halde ya da tuzaklanmış durumda bulunan elektron sayısı ile orantılıdır. Bu durumda TL ışıma şiddeti;

$$I_{TL} = cT_{uyarma} = -c \frac{dn}{dt} = cns \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.5)$$

denklemleri ile verilmektedir. Burada  $c$ , optiksel verimliliği temsil eden bir sabittir.  $c = 1$  olması durumunda yeniden birleşme merkezindeki tüm birleşmelerin foton ile sonuçlandığı ve yayınlanan fotonların tamamı dedektör tarafından algılandığını göstermektedir. TL malzemelerde ısısal uyarma sabit bir ısıtma hızında olduğu kabul edilmiştir. Yani, her hangi bir  $t$  anındaki sıcaklık

$$T(t) = T_0 + \beta t \quad (1.6)$$

eşitliğine uygun olarak artmaktadır. Burada,  $T_0$  örneğin başlangıç sıcaklığını,  $\beta$  ısıtma hızını ( $^{\circ}\text{C/s}$ ) ve  $t$  zamanı (s) temsil etmektedir. Eşitliğin zamana göre türevi alındığında;

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (1.7)$$

ifadesi elde edilir. Sabit bir ısıtma hızı için eşitlik (1.7) göz önünde bulundurularak eşitlik (1.5)'in yeniden düzenlenip integrali alındığında



$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -\left(\frac{s}{\beta}\right) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \quad (1.8)$$

eşitliği elde edilmiş olur. Buradan gerekli matematiksel işlemler yapıp  $n$  yalnız bırakıldığında;

$$n = n_0 \exp \left[ -\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right] \quad (1.9)$$

denklemini elde edilir. Burada,  $n_0$   $t = 0$ 'da tuzaklanmış elektron sayısını ( $\text{m}^{-3}$ ),  $n$  ise herhangi bir  $t$  anında tuzaklanan elektronların konsantrasyonunu ifade etmektedir.  $n$  değeri (1.1) denkleminde yerine yazıldığında,

$$I_{TL} = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp \left[ -\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right] \quad (1.10)$$

şeklinde bir diferansiyel denklem elde edilir. Bu diferansiyel denklem TL olayını açıklamada kullanılan birinci dereceden Randall-Wilkins modeli olarak bilinir.

### 1.3.1.2. İkinci derece kinetik ( Garlic-Gibson Teorisi)

İkinci derece kinetik teorisine göre ısıtma ile tuzaklardan kurtulan elektronlar ya tekrar tuzaklara yakalanırlar ya da lümineans merkezinde tuzaklanmış hollerle birleşirler. İkinci derece kinetik teorisi tuzaklardan kurtulan elektronların tekrar tuzaklara yakalanma olasılığının lüminesans merkezlerinde tuzaklanmış hollerle birleşme olasılığından daha yüksek olduğu durumlar için kullanılan bir modeldir (Garlick ve Gibson, 1948). Bu modelde de matematiksel ifadelerin türetilmesi OTOR modeline dayanmaktadır (Şekil 1.6). Bu bağlamda iletim bandındaki elektronların yeniden birleşme merkezlerine ( $R$ ) yakalanma olasılığı

$$R = \frac{dn}{dt} = A_m n \quad (1.11)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Benzer şekilde ısıtma işlem sonucunda tuzaktan kurtulan elektronların tekrar tuzaklanma olasılığı

$$T_{tekrar} = A_n(N - n) \quad (1.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu iki eşitlik denklem (1.4)'de yerine yazıldığında

$$F = \left( \frac{A_m n}{A_m n + A_n (N - n)} \right) \quad (1.13)$$

eşitliği elde edilir. Garlick-Gibson modelinde, elektronların yeniden tuzaga yakalanma olasılığı ( $A_n$ ) ile yeniden birleşme olasılığının ( $A_m$ ) eşit olduğu varsayılır. Bu durumda ısıtma sırasında elektronların yayılım oranının lüminesans verimliliği

$$F = \left( \frac{n}{N} \right) \quad (1.14)$$

denklemleri ile elde edilmiş olur. Böylece, TL şiddetinin ( $I_{TL}$ ),  $\left( \frac{n}{N} \right)$  ile orantılı olduğu görülmüş olur. Yani,

$$I_{TL} = - \frac{dn}{dt} = np \left( \frac{n}{N} \right) = \left( \frac{n^2}{N} \right) s \exp \left( - \frac{E}{kT} \right) \quad (1.15)$$

bağıntısı elde edilmiş olur. Eşitlik (1.15), düzenlenip (0-t) aralığındaki mutlak sıcaklık için integrali alındığında

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n^2} = - \left( \frac{s}{N} \right) \int_0^t \exp \left( - \frac{E}{kT} \right) dt \quad (1.16)$$

bağıntısı elde edilir. Gerekli matematiksel hesaplamalar yapıp  $n$  yalnız bırakıldığında

$$n = n_0 \left[ 1 + \left( \frac{n^2}{N} \right) n_0 t \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) \right]^{-1} \quad (1.17)$$

eşitliği elde edilmiş olur.  $n$  değeri eşitlik (1.15)'te yerine yazılırsa

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = \left( \frac{n^2}{N} \right) s \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) = \frac{n_0^2 \left( \frac{s}{N} \right) \exp \left( -\frac{E}{kT} \right)}{\left[ 1 + \left( \frac{s}{N} \right) n_0 t \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) \right]^2} \quad (1.18)$$

eşitliği elde edilir. Sabit bir ısıtma hızı için

$$dt = \frac{dT}{\beta} \quad (1.19)$$

eşitliği dikkate alınıp denklem (1.16)'nın integrali tekrar alındığında

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n^2} = -\left( \frac{s}{\beta N} \right) \int_{T_0}^T \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) dT \quad (1.20)$$

bağıntısı elde edilmiş olur. Buradan gerekli matematiksel işlemler yapıp  $n$  değeri yalnız bırakıldığında

$$n = n_0 \left[ 1 + \left( \frac{s n_0}{N \beta} \right) \int_{T_0}^T \exp \left( -\frac{E}{kT'} \right) dT' \right]^{-1} \quad (1.21)$$

eşitliği elde edilir.  $n$  değeri eşitlik (1.15)'te yerine yazıldığında

$$I_{TL} = n_0^2 \left(\frac{s}{N}\right) \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{n_0 s}{N\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^{-2} \quad (1.22)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik, ikinci derece kinetiğe sahip TL ışıma eğrisinin sıcaklığa bağlı diferansiyel denklem ifadesini veren Garlic-Gibson modeli olarak bilinir.

### 1.3.1.3. Genel derece kinetiği

Randall-Wilkins birinci dereceden ve Garlick-Gibson ikinci dereceden termolüminesans ışıma eğrisindeki her bir tepayı ifade eden denklemlerini türetirlerken, önceden kabul ettikleri bazı varsayımları göz önünde bulundurmuşlardır. Ancak, bazen bu varsayımlar uygulanma noktasında yetersiz kalabilmektedir ve bu durumda TL ışıma tepeleri hem birinci hem de ikinci dereceden kinetiğe uymamaktadır. Başka bir deyişle ısıtma sürecinde tuzaklardan kurtulan elektronlar için birinci ve ikinci derece kinetiklerin varsayım durumlarının yetersiz olduğu durumlarda kullanılan bir metottur. May ve Partridge, önceden kabul edilen bu varsayımları ve üretilen bu denklemleri göz önünde bulundurarak termolüminesans ışıma eğrisindeki tepeleri ifade eden yeni bir deneysel metot olan ve genel derece kinetiği diye isimlendirilen bir metodu öne sürmüşlerdir. Bu kabulleri ve elde edilen denklemleri göz önünde bulundurarak termolüminesans ışıma şiddetini ifade eden yeni bir denklem geliştirmişlerdir. Bu denklem

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = s' n^b \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.23)$$

eşitliği ile tanımlanmıştır (May ve Partridge, 1964). Burada,  $s'$  ön üstel faktörüdür ve değeri  $s' = s n_0^{1-b}$  ile ifade edilir.  $b$ , genellikle  $1 \leq b \leq 2$  aralığında herhangi bir değer alır ve kinetik merteye olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik

(1.23)'deki denklemin çözümünde doğrusal bir ısıtma hızı ( $dT = \beta dt$ ) kullanılarak gerekli düzenlemeler yapıldığında

$$\int_{n_0}^n n^{-b} dn = - \int_{T_0}^T s' \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \quad (1.24)$$

eşitliği elde edilir. Buradan da gerekli matematiksel işlemler yapıp  $n$  değeri yalnız bırakıldığında

$$n = n_0 \left[ 1 + (b-1) \frac{s' n_0^{b-1}}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right]^{-\frac{1}{1-b}} \quad (1.25)$$

ifadesi elde edilmiş olur.  $n$  değeri eşitlik (1.23)'te yerine yazılıp gerekli matematiksel düzenlemeler yapıldığında sıcaklığa bağlı TL şiddeti

$$I_{TL} = s' n_0^b \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[ (b-1) \frac{s' n_0^{b-1}}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' + 1 \right]^{-\frac{b}{b-1}} \quad (1.26)$$

olarak elde edilir. Bu diferansiyel denklem, genel dereceden kinetik denklemi olarak adlandırılmaktadır.

#### 1.4. TL tuzak parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler

İyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakılmış yalıtkan ya da yarı iletken bir malzeme, yapısındaki bozukluklar veya malzeme içindeki yabancı atomlardan (safsızlıklar) dolayı meydana gelen kusurlar maruz kaldığı radyasyon enerjisinin bir kısmını soğurur. Ardından malzeme lineer bir ısıtma hızı ile ısıtılır, soğurduğu bu enerjiyi ışıma şeklinde yayması sonucunda zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bir ya da bir çok tepe içeren eğri kaydedilir. Bu eğriye TL ışıma eğrisi denilmektedir. TL ışıma eğrilerinden tuzak parametrelerinin belirlenebilmesi için birçok deneysel/teorik yöntemler geliştirilmiştir (Aitken, 1998; Azorín, 1986;

Chen ve McKeever, 1997; Chen ve Pagonis, 2011; Kirsh, 1992; McKeever ve ark., 1985; Pagonis ve ark., 2006).

Bu tez çalışmasında yanma yöntemi ile sentezlenmiş olan Gd katkılı çinko borat (% 0.25, %0.5, %1, %2, %3, %4, %5, %7, %10) fosforlarının tuzak parametrelerinin belirlenebilmesi için doz yanıt yöntemi, farklı ısıtma hızları yöntemi, bilgisayarla ısıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi ve başlangıç artış yöntemleri kullanılmıştır.

#### 1.4.1. Doz yanıt yöntemi

Termolüminesans ısıma eğrisindeki her bir ısıma tepesinin kinetik mertebesini (b) belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntemde farklı doz oranlarında radyasyona maruz bırakılan malzemenin TL okuması sonucu elde edilen ısıma eğrilerinden tepe maksimum sinyaline karşılık gelen tepe maksimum ( $T_m$ ) sıcaklığı belirlenilir. Böylelikle farklı doz oranlarındaki radyasyonun tepe sıcaklıkları üzerindeki etkisi kaydedilir. Malzemeye verilen radyasyon dozunun artması ile beraber ısıma eğrilerinin tepe maksimum şiddetlerinde de artış olacaktır. Tepe maksimum sıcaklıklarının konumları sabit kalması durumunda elde edilen ısıma tepesinin birinci derece kinetiğe ( $b=1$ ) sahip olduğunu göstermektedir (McKeever, 1985). Termolüminesans teorisine göre sabit bir ısıtma hızında tepe maksimum sıcaklığı malzemeye verilen radyasyon dozundan bağımsızdır. Malzemeye verilen radyasyon dozunun artması ile beraber ısıma eğrilerinin tepe maksimum şiddetlerinde bir artış olup ancak tepe maksimum sıcaklıklarının düşük sıcaklık değerlerine doğru kayması malzemenin ikinci derece kinetiğe ya da genel derece kinetiğe sahip olduğunu göstermektedir.

#### 1.4.2. Başlangıç artış (IR) yöntemi

Çevresindeki diğer ısıma eğrilerinden yalıtılmış tek bir ısıma tepesinin aktivasyon enerjisini hesaplamada kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem temelde Garlick ve Gibson (1948) tarafından bir termolüminesans ısıma eğrisinin ilk

yükselme kısmının üssel olarak sıcaklığa bağlı olduğunu öne süren bir öneriden kaynaklanmaktadır. Böylelikle sıcaklığın fonksiyonu olarak TL ışıma eğrisini ifade eden eşitlik;

$$I(t) = n_0 s \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) \quad (1.27)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Bu yöntemle göre termoluminesans ışıma eğrisinin başlangıç artış bölgesinde tuzaklanan elektronların yoğunluğunun sıcaklıkla neredeyse çok az değiştiği ve bundan dolayı yaklaşık olarak sabit kaldığı kabul edilmektedir. Ancak bu kabul, kritik bir sıcaklığa kadar geçerliliğini korumaktadır. Bu kritik sıcaklık ise tepe maksimumunun % 15'ni aşmayan ve tepe maksimumunun % 5'in altına düşmeyen bölgeler arasını kapsamaktadır (McKeever, 1985). Böylelikle eşitlik;

$$I(t) = c \exp \left( -\frac{E}{kT} \right) \quad (1.28)$$

basit haline indirgenmiş olur. Burada c; diğer tüm parametreleri temsil eden bir sabit, E; aktivasyon enerjisi ya da tuzak derinliği, k; Boltzman sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Bu denklemde eşitliğin her iki tarafının logaritması alındığında;

$$\ln(I) = \ln(c) - \frac{E}{k} \frac{1}{T} \quad (1.29)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemde,  $\ln(I)$ 'nın  $-1/kT$ 'ye göre grafiği çizildiğinde elde edilen lineer eğrinin eğimi  $-E/k$ ' ya eşit olacaktır ve buradan aktivasyon enerjisi kolaylıkla hesaplanabilir.

Başlangıç artış yöntemi sadece iyi tanımlandığında ve diğer ışıma tepelerinden belirgin bir şekilde ayrıldığında kullanılabilir. Ancak TL ışıma eğrisi

iki veya daha fazla ısıma tepesinden ya da birbirine yakın kompleks eğrilerden meydana gelmiş ise bu yöntem kullanılmaz. Böyle bir durumda TL ısıma eğrilerinin birbirinden ayırıp tek bir ısıma piki elde edebilmek için  $T_{\text{maksimum}}-T_{\text{durma}}$  (ısısal temizleme) tekniği uygulanabilir (Nicholas ve Woods, 1964; McKeever, 1985). Bu teknikte TL ısıma eğrisindeki ilk tepenin düşük sıcaklık kısmına karşılık gelen sıcaklık değerinin ( $T_{\text{durma}}$ ) ötesindeki kısma kadar ısıtılır ve bu şekilde bu tepeden sorumlu tuzaklar boşaltılarak silinir. Örnek daha sonra hızlı bir şekilde soğutulur ve ısıma eğrisinin geri kalanını elde etmek için örnek tekrar ısıtılır ve maksimum sıcaklık ( $T_{\text{mak}}$ ) belirlenir. Daha sonra  $T_{\text{durma}}$ 'ın yeni bir değeri kullanılarak döngüler birkaç kez tekrarlanır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda,  $T_{\text{durma}}$  karşılık ( $T_{\text{mak}}$ ) grafiği çizilir. Böylelikle, ana TL ısıma eğrisinin içerisinde bulunabilecek tepe sayısı tespit edilmiş olur (McKeever, 1985).

#### 1.4.3. Farklı ısıtma hızlarına dayanan yöntem

TL tuzak parametrelerinin hesaplanması, birçok araştırmacı tarafından farklı ısıtma hızları yöntemi kullanılarak öne sürülmüştür (Hoogenstraaten, 1958; Chen ve Winer, 1970; Rasheedy, 2005). Bu araştırmacılar Hoogenstraaten, aktivasyon enerjisi ve frekans faktörünü hesaplamak için ısıtma hızının artmasıyla beraber birinci derece kinetik parametrelere sahip ısıma tepeleri söz konusu olduğu durumlar için ısıma eğrisindeki tepe maksimum yoğunluğunun ( $I_m$ ) yüksek sıcaklık ( $T_m$ ) bölgesine doğru kayması esasına dayanan bir bağıntı geliştirmişlerdir (Hoogenstraaten, 1958). Bu bağıntı

$$\ln\left(\frac{T_m^2}{\beta}\right) = \frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_m}\right) - \ln\left(\frac{E}{sk}\right) \quad (1.30)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada  $T_m$ , maksimum sıcaklık tepesi;  $\beta$ , lineer ısıtma hızı;  $k$ , Boltzman sabiti;  $s$ , frekans faktörü ve  $E$ , aktivasyon enerjisidir. TL ısıma eğrilerinden maksimum TL ısıma şiddetine karşılık gelen maksimum sıcaklık değeri belirlenir. Son olarak farklı ısıtma hızları deneyinde elde edilmiş olan TL



ışma eğrilerinin maksimum sıcaklık değerleri ( $T_m$ ) kullanılarak  $\left(\frac{1}{T_m}\right)$ 'e karşı  $\ln\left(\frac{T_m^2}{\beta}\right)$  grafiği çizildiğinde bir doğru elde edilir. Elde edilen doğrunun eğimi  $E/k$ 'ya eşittir ve buradan aktivasyon enerjisi hesaplanabilir.

#### 1.4.4. Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi

Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi, deneysel olarak elde edilen TL ışıma eğrilerinden aktivasyon enerjisi, kinetik mertebe ve frekans faktörü gibi tuzak parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yaygın yöntemlerden biridir (Horowitz ve Yossian, 1995; Chen ve ark., 1996;). Ayrıca, CGCD yöntemi ile karmaşık TL ışıma eğrilerinin tekli ışıma tepelerine ayrıştırılmasında da kullanılmaktadır (Horowitz ve Yossian, 1995). Bu yöntemin diğer deneysel yöntemlere göre asıl avantajı, üst üste binmiş karmaşık TL ışıma tepelerinin ısı işlem sürecine tabi tutulmadan ayrıştırılması ve deneysel tekrarlar olmadan ışıma piklerine ait tuzak parametrelerinin eş zamanlı olarak belirlenmesidir (Chen ve McKevver, 1997). Tuzak parametrelerini hesaplamak için basit formüller kullanmak yerine bilgisayarda hazırlanmış programlarla birkaç adımda hesaplamak mümkün hale gelmiştir. Bunun için birinci derece kinetik ( $b=1$ ) ya da genel derece kinetik ( $b \neq 1$ ) denklemi önceden kullanılacak bilgisayar programına tanıtılır. Bilgisayara tanıtılan bu eğri daha sonra gerçek deneysel eğri ile karşılaştırılır. Deneysel ve teorik arasında bir eşleşme işareti olarak kabul edilen FOM, CGCD kullanıcıları için ortak bir değer haline gelmiştir. Bulunan FOM değeri % 0 ile % 2.5 arasında değişiyorsa iyi fit olduğunu, % 2.5 ile % 3 arası için uyumlu olduğunu ve % 3.5'dan büyük olarak bulunan FOM değerleri için kötü bir fit olduğunu belirtmektedirler (Balian, 1977; Misra, 1979; Hsu ve ark., 1986).

$$FOM = 100 \times \frac{\sum TL_{exp} - TL_{fit}}{\sum TL_{fit}} \quad (1.31)$$

Burada  $TL_{exp}$ , deneysel verilerde farklı sıcaklık değerlerinde ölçülen toplam şiddet değerleridir.  $TL_{fit}$  ise en iyi fit değerine karşılık gelen toplam veri değerleridir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde Temolüminesans olayına baktığımızda 1895 yılında Wiedemann ve Schmidt'in laboratuvar ortamında sistematik olarak dikkatli bir şekilde ilk kez TL araştırmalarını yapan kişiler olduğu görülmüştür (Becker, 1974). Wiedemann ve Schmidt'in laboratuvar ortamında, doğal ve yapay olarak sentezledikleri malzemeleri elektron demetiyle uyararak termolüminesansı gözlemlemişlerdir (McKeever, 1985). Wiedemann ve Schmidt'in sentetik olarak elde ettikleri birçok fosforu katod ışınlarına yani elektron demetine maruz bırakarak malzemenin yayımladığı termolüminesans ışımayı gözlemlemiş ve lüminesans mekanizmasının içindeki katkı (safsızlık) elementlerinin önemi üzerinde odaklanmışlardır (McKeever, 1985; Vij, 1998). Bu araştırmalar sonucunda, günümüzde de hala sıkça kullanılan ve lüminesans özellikleri iyi bilinen doğal fluorit ve  $\text{CaF}_2\text{:Mn}$  malzemelerinde güçlü bir termolüminesans olayı gözlemlemişlerdir (Sunta, 2015). Wiedemann ve Schmidt doğal malzemelerin termolüminesansı üzerine de çalışmalar yapmıştır. Doğal fosforların termolüminesansını laboratuvar ortamında çalışarak sonuçlarını ilk kez yayınlayan bilim insanları Trowbridge ve Burbank'tır (Trowbridge ve Burbank, 1898). Marie Curie'nin 1904'te yayınladığı doktora tezinde, fosforesans ve radyasyon arasındaki ilişki ile ilgili çalışmalar yapmıştır (McKeever, 1985). Curie, yaptığı deneysel çalışmaları sonucunda fluorit ( $\text{CaF}_2$ ) gibi bazı malzemelerin ısıtıldıklarında ısıma yaptığını yani termolüminesans özellik kazandığını rapor etmiş, bir süre sonra ışımların söndüğünü farketmiş ve radyoaktif Radium kaynağına maruz bırakıp tekrar ısıttığında ya da sadece ısıttığında bu özelliklerini yeniden gösterdiklerini gözlemlemiştir (McKeever, 1985).  $\text{CaF}_2$  minerali üzerinde TL ile ilgili ilk detaylı çalışma 1905 yılında Morse tarafından yayınlanmıştı (Lyman, 1932). TL'nin daha modern bir tartışması ve fosforesansla olan ilişkisi Chen ve McKeever tarafından tartışılmıştır (Chen ve ark.1997). Lind ve Bardwell (1923) tarafından TL üzerine yapılan çalışmalarda, çeşitli mücevher ve saydam mineralleri radyum kaynağına

maruz bırakarak radyasyonun malzemeler üzerine olan etkisinin araştırmalarını sürdürmüşlerdir (McKevver, 1985; Lind ve Bardwell, 1923). Bir süre sonra bu çalışmayı Wick'in 1924'teki floritler üzerine olan doğal TL gözlemi izlemiştir (Wick, 1924). Daha sonra Wick ve arkadaşları, uyartım kaynağı olarak X-ışını ve elektron demeti kullanarak seçtikleri doğal (Wick ve Gleason, 1924; Wick, 1927) ve sentetik (Wick ve Slattey, 1927) fosforlar üzerinde TL olaylarını gözlemlediler, daha önce Wiedemann ve Schmidt (1895) tarafından araştırılan aynı sentetik fosfor malzemesini X-ışınlarına maruz bırakarak TL özelliklerini kapsamlı bir şekilde araştırdılar. Araştırılan bu fosforlara mangan (Mn) katkılı  $\text{CaSO}_4$  bileşiği dahil edildi. Mangan bir aktivatör olarak bu ev sahibi malzeme ile iyi bir uyum sağladı ve mükemmel bir termoluminesans fosforu olarak tanındı. Bu materyal Lyman tarafından, ultraviyole radyasyona maruz bıraktığı bir fosfor malzemesinde TL olayını gözlemiştir (Becker, 1974). Przibram'ın arkadaşı Urbach, 1930 yılında alkali halijenürle ilgili yaptığı çalışmasında TL ışıma eğrisinin maksimum olduğu yerin tuzak derinliğiyle ilişkili olduğunu ortaya atmış ve TL yöntemi ile tuzak derinliği dağılımlarını incelemiştir (Urbach, 1930; Sunta, 2015). 1945 yılında Randall ve Wilkins tarafından tuzaktan serbest bırakılan elektronların birinci dereceden kinetiklerini ifade eden matematiksel denklemleri TL ışıma pikinin ilk teorik temellerini oluşturmuşlardır (Randall ve Wilkins, 1945; McKeever, 1985). 1948 yılında ise Garlick ve Gibson tuzaktan serbest kalan elektronların tekrar tuzaklanma olasılığının luminesans merkezindeki değişikliklerle birleşme olasılığından daha yüksek olduğunu varsaydılar (Garlick ve Gibson, 1948). Kinetik mertebelerinin genel yaklaşımına daha sonra Kelly ve Braunlich tarafından geliştirilmiştir (Sunta, 2015).

Dozimetre aşaması, ilk olarak bir radyofotoluminesans cam dozimetre geliştirildi (Becker 1974; Sunta, 2015). Daniels ve arkadaşlarının fosforlar üzerinde yaptıkları araştırmaları sonucunda radyasyona olan yüksek hassasiyetinden dolayı radyasyon dozimetresinde kullanılması için LiF'in iyi bir malzeme olduğunu farkettiler. Bu materyalin küçük peletleri, tedavi amaçlı kanser hastalarına enjekte edilen iyot gibi radyoaktif izotopların iç radyasyon dozlarını ölçmek için kullanıldı (Daniels ve ark., 1953). Daha sonra Cameron ve arkadaşları tarafından LiF temelli TL doz ölçerler Wisconsin Üniversitesi'nde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Sunta, 2015). LiF peletleri kullanılarak yapılan ilk saha testi, 1953'de atom bombası patlamasından sonra yayılan radyasyonu ölçmek için farklı istasyonlara yerleştirilerek birkaç binden birkaç Röntgen (R)'lik radyasyon doz ölçümü yapılmıştır (McKeever, 1985; Annalakshmi, 2013; Oğuz, 2016). TL yönteminin personel dozimetresi alanında kullanımı  $\text{CaF}_2\text{:Mn}$  dozimetrelerinin geliştirilmesi çalışmaları yapılmıştır. (Ginter ve ark.,1957). Bu gelişmeye paralel olarak Cameron ve arkadaşlarının daha sonra Harshaw Şirketi ile birlikte gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda, Mg ve Ti iyonunu LiF malzemesine katkılamaıyla günümüzde hala yaygın olarak kullanılan TLD-100 dozimetresini geliştirdiler (McKeever, 1985). Sonraki aşamalarda malzemenin sentezlenme şartlarına bağlı olarak TLD-600 ve TLD-700 olmak üzere farklı dozimetrik malzeme üretimi gerçekleştirildi. Malzemelerin maruz kalınan iyonlaştırıcı radyasyon dozlarının ölçülmesinde kullanılan TL yönteminin yanı sıra optiksel uyarma ile malzemedan elde edilen lüminesansın belirlenmesinde optiksel uyarmalı lüminesans (OSL) olarak adlandırılan ilk çalışmayı Edmond Becquerel gerçekleştirmiştir. Çinko ve kalsiyum sülfatı iyonlaştırıcı radyasyona maruz bıraktıktan sonra farklı dalga boyuna sahip foton ile uyarak ışıma elde etmiştir. (Yukihara, 2011). Antonov-Romanovsky ve arkadaşları bu tekniğin kişisel dozimetre alanında kullanılmasını önermişlerdir (Antonov-Romanovsky ve ark., 1956). Braunlich ve ark. (1967) (Braunlich, 1967) ve Sanborn (Sanborn, 1967) tarafından bu teknik kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda personel, çevresel, klinik ve yüksek doz gibi farklı alanlarda

kullanılmak üzere daha verimli dozimetrik malzemelerin üretilmesine ve fosforların özelliklerinin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (McKeever, 1985; McKeever ve ark., 1995; Pagonis ve ark., 2005; Yukihiro ve ark., 2011; Botter ve ark., 2003; Sunta, 2015). Bor tabanlı malzemeler ile ilgili ilk TL çalışması, Schulman ve arkadaşları tarafından sentezledikleri Mn katkılı lityum borat fosforlarının dozimetrik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir (Schulman vd., 1967). Daha sonraki yıllarda ise bor tabanlı malzemelere farklı araştırmacılar farklı katkı iyonları katkılararak  $MgB_4O_7:Dy$ , Tm (Porkic, 1980);  $MgB_4O_7:Dy$ , Na (Furetta ve ark. 2000);  $SrB_4O_7:Dy$  (Santiago ve ark. 2001);  $Li_2B_4O_7:Cu$ , Ag, P (Prokic, 2002);  $CaB_4O_7:Cu$ , Mn (Manam ve ark., 2003);  $BaB_4O_7:Dy$  (Li ve ark., 2004);  $Li_2B_4O_7:Cu$ , Ag (Burak ve ark., 2005);  $Ba_2Ca(BO_3)_2:Tb$  (Liu ve ark., 2005);  $BaB_4O_7:Ce$  (Yazici ve ark. 2006);  $LiSr_4(BO_3)_3:Ce^{+3}$  (Jiang ve ark. 2007);  $LiB_3O_5:Al$  (Depci ve ark. 2008);  $Li_2B_4O_7:Mn$ , Ag (Kelemen ve ark., 2008);  $MgB_4O_7:Cu$  (Rao ve ark. 2009);  $LiCaBO_3:RE^{+3}$  (Anishia ve ark. 2010);  $ZnB_2O_4:La$  (Çakır, 2012);  $Na_2B_4O_7:Ag$  ve  $MgB_4O_7:Cu$ , Ag (Yüksel, 2013);  $Li_2B_4O_7:Mn$ ,  $Mg_2B_4O_7:Gd$ ,  $ZnB_2O_4:Tm$ ,  $CdB_4O_7$ , (Annalakshmi, 2013);  $ZnB_2O_4:La$  (Gözel, 2014);  $CaB_4O_7:Mn$  (Oğuz, 2016);  $ZnB_2O_4:Tm$  (Yaman, 2017);  $Li_2B_4O_7:Cu$ , B (Özdemir, 2018)  $NaBaBO_3$  (Oğlakçı, 2019),  $ZnB_2O_4:Sm$  (Bulcar ve ark., 2018);  $ZnB_2O_4:Tm$  (Bulcar ve ark., 2019) gibi TL çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar bor tabanlı malzemelerin, özellikle kişisel dozimetre ve çevresel dozimetrelerde kullanılabilir dozimetrik malzeme oldukları söylenebilmektedir.

Bor tabanlı üretilen dozimetrik malzemelerden biri olan çinko boratlar, özellikle son yıllarda alev geciktirici olarak plastiklerde, polimerlerde, kaplama endüstrisinde ve kauçuk gibi materyallerde katkı maddesi olarak sıkça kullanılmaktadır (Khalilev, 2004; Yan ve ark., 2004; Kim ve ark., 2007; Pang ve ark., 2008; Mu ve ark., 2014). Ayrıca, yangın söndürme, duman baskılama, tutuşmayı engelleme, yanmaz kablo yapımı, yanmaz yüzeyler kaplama, orman yangını için insansız hava araçlarında kullanılabilecek bir malzeme niteliği

taşımaktadır. Tüm bunların yanı sıra yasak enerji aralığının büyük olması, ısı kararlılık, lüminesans verimliliği ve maliyetçe düşük olması gibi özelliklerinden dolayı da dozimetrik alanlarda ev sahibi materyal olarak kullanılma potansiyeli taşıdığı görülmüştür (Li ev ark., 2007; Li ve ark., 2008; Zheng ve ark., 2009). Bu bağlamda son yıllarda birçok araştırmacı tarafından farklı sentezleme metodu kullanılarak farklı iyon katkılama suretiyle çinko borat fosforlarının dozimetrik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. Tez çalışması kapsamında Gd katkılı çinko borat fosforlarının dozimetrik özellikleri inceleneceğinden, bu bölümde bu tür katkılamalara benzer son dönemlerde yapılmış bazı çalışmalar yer almıştır.

Li ve arkadaşları (2007), yüksek sıcaklıkta katı hal tepkime yöntemi ile sentezledikleri poli-kristal yapıdaki  $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Tb}^{+3}$  toz fosforların yapısal ve lüminesans özelliklerini araştırmışlardır.  $950^\circ\text{C}$ 'deki ısı işlem sonunda  $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Tb}^{+3}$  fosforlarının XRD kırınım desenlerinin tam olarak keskinleştiği ve başka safsızlık piklerinin oluşmadığını görmüşlerdir. PL ve üç boyutlu TL ölçümlerinin birbiriyle mükemmel uyum sağladıklarını rapor ettiler.  $^{60}\text{Co}$  gama ışınlarına maruz bırakılmış  $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:0.04\text{Tb}^{+3}$  fosforunun 1-100 Gy doz arasında doğrusal bir doz yanıt eğrisine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Liu ve arkadaşları (2010), katıhal tepkime yöntemi ile sentezledikleri  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{Eu}^{+3}$  fosforlarının yapısal ve lüminesans özelliklerini araştırdılar. Optimum (konsantrasyon sönümleme)  $\text{Eu}^{+3}$  konsantrasyon yüzdesini % 10 ve  $\text{Bi}^{+3}$  iyonu konsantrasyonu oranını da % 10 olarak tespit etmişlerdir.

Kucuk ve arkadaşları (2013), % 1, % 2, % 3, % 4, % 5 ve % 10 konsantrasyonlarda nitrik asit yöntemiyle sentezledikleri  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{xLa}^{+3}$  fosforlarının yapısal özelliklerini XRD ve lüminesans özelliklerini TL yöntemini kullanarak araştırmışlardır. % 2, % 3 ve % 5 katkı oranları için 143 mGy ile 60 Gy arasında lineer davranış sergilediklerini bildirmişler. 1.43 Gy sabit beta radyasyon dozuna maruz bırakılmış  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{xLa}^{+3}$  (% 1, % 2, % 3, % 4, % 5 ve % 10) fosforlarından en yüksek TL şiddetini veren konsantrasyonun % 3  $\text{La}^{+3}$  olduğunu

tespit etmişlerdir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.03\text{La}^{+3}$  fosforunun dozimetrik uygulamalar için umut vaad eden bir malzeme olduğunu öne sürmüşlerdir.

Annalakshmi ve arkadaşları (2014), katıhal tepkime yöntemi ile sentezledikleri nadir toprak elementleri (Tb, Gd, Mn, Dy ve Tm) katkılı  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  polikristal toz örneklerinin yapısal ve lüminesans özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek hassasiyetli TL sinyali  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Tm}$  fosforunda elde etmişlerdir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Tm}$  fosforlarının 10 mGy- $10^3$  Gy aralığında lineer davranış gösterdiğini rapor etmişlerdir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Tm}$  fosforuna ait TL ısıma eğrisinin kinetik parametrelerini CGCD yöntemi ile belirlemişlerdir. Ayrıştırma sonucunda TL ısıma eğrisinin bir birine yakın ve iç içe girmiş beş ısıma tepesinden oluştuğunu görmüşlerdir. FOM değerini % 0.67 olarak bulmuşlardır. Baskın olan iki ısıma tepesi için aktivasyon enerji ve kinetik mertebeleri sırasıyla 0.77 eV, 1.34 eV ve 1.9, 1.75 olarak belirlemişlerdir. Deneysel veriler ışığında,  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Tm}$  fosforun radyasyon doz ölçümlerinde kullanılma potansiyeline sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Kucuk ve arkadaşları (2015), nitrik asit yöntemiyle sentezledikleri polikristal yapıdaki  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{La}^{+3}$  (% 1, % 2, % 3 ve % 4) fosforlarının lüminesans özelliklerini TL yöntemini kullanarak incelemişlerdir. En yüksek TL şiddetinin % 3 konsantrasyonda elde edildiğini belirtmişlerdir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{La}^{+3}$  (% 1, % 2, % 3 ve % 4) fosforlarının kinetik parametrelerini belirlemek için GlowFit yazılım tabanlı CGCD yöntemini ve tepe şekil metodunu kullanmışlardır.

Dogan ve arkadaşları (2017), nitrik asit yöntemiyle sentezledikleri  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{+3}$  (% 1, % 4 ve % 10) fosforlarının lüminesans özelliklerini araştırdılar. Farklı ısıtma hızları yöntemini kullanılarak fosforların tuzak parametrelerini yani aktivasyon enerjileri ve frekans faktörlerini hesaplamışlardır. Katkılı bütün fosforlarının hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri P1 için 0.47–0.53 eV aralığında ve P2 için ise 0.61–0.66 eV aralığında olduğunu hesapladılar. Her katkı oranı için tekrarlanabilirliğinin % 5'ten az bir sapmaya sahip olduklarını bildirdiler.

Portakal ve arkadaşları (2017), nitrik asit yöntemi ile sentezledikleri  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{x Dy}^{+3}$  (% 1, % 3, 5 %, % 7 ve % 9) fosforlarının yapısal ve lüminesans özelliklerini araştırmışlardır. Fosforlarının dozimetrik özelliklerini TL yöntemini kullanarak belirlemişler ve ölçümlerini Lexsy smart TL/OSL okuyucu ile yapmışlardır. 250-850 nm aralığında 10 keV elektron demetine maruz bırakılan  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{x Dy}^{+3}$  (% 1, % 3, % 5, % 7 ve % 9) fosforlarının oda sıcaklığında gerçekleştirilen CL ölçümleri sonucunda,  $\text{Dy}^{+3}$  iyonlarının ~ 478, 490, 572, 588, 668, 678 ve 754 nm dalga boylarında emisyon verdiklerini tespit etmişlerdir.  $T_{\text{maksimum}}-T_{\text{durma}}$  tekniği ile  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{x Dy}^{+3}$  (% 1, % 3, % 5, % 7 ve % 9) fosforlarının 10 °C'lik artışlarla 60-200 °C aralığındaki sıcaklıklardaki TL ışıma eğrilerinin aktivasyon enerjisini ve frekans faktörünü hesaplamışlardır.

Rosario ve arkadaşları (2017), çözücü buharlaştırma yöntemiyle sentezledikleri  $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{x Tb}^{+3}$  (0.5-% 8 mol) fosforlarının yapısal ve lüminesans özelliklerini araştırmışlardır. Sentezlenmiş olan fosforların yapısal analizleri için XRD, SEM ve EDX tekniklerini kullanmışlardır. Lüminesans özellikleri için de TL yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Beta radyasyon kaynağı ile ışınlanmış olan  $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:0.04\text{Tb}^{+3}$  fosforunun 0.022-27.7 Gy aralığında lineer davranış gösterdiklerini bildirmişlerdir. Benzer şekilde gama radyasyon kaynağı ile ışınlanmış  $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:0.04\text{Tb}^{+3}$  fosforunun 0.5-50 Gy aralığında lineer davranış gösterdiklerini belirlemişlerdir. 5 Gy gama dozuna maruz bırakılmış  $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:0.04\text{Tb}^{+3}$  fosforunun tavlama işlemi yapılmaksızın elde edilen TL ışıma eğrisinin CGCD yöntemi ile analiz edildiğinde 6 ışıma tepesinden oluştuğunu rapor etmişlerdir.

Bulcar ve arkadaşları (2018), nitrik asit yöntemi ile sentezledikleri polikristal yapıdaki samaryum katkılı çinko borat  $\text{Zn}_{1-x}\text{Sm}_x\text{B}_2\text{O}_4$  ( $x = \% 1, \% 2, \% 3, \% 4$  ve  $\% 5$  mol) fosforlarının yapısal ve lüminesans özelliklerini araştırmışlardır. Her bir katkı oranı için 20.7 Gy beta radyasyon dozuna karşılık yapılan filtre testlerinin sonucunda TL ölçümleri için en uygun filtrenin IRSL-TL geniş band olduğu belirlenmiştir. Bu filtre ile yapılan ölçümlerde, TL şiddeti bakımından en uygun



katkı oranının % 2  $\text{Sm}^{+3}$  olduğu belirlenmiştir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.02\text{Sm}^{+3}$  fosforunun 0.11-69 Gy doz aralığında lineer bir özellik gösterdiği belirlenmiştir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.02\text{Sm}^{+3}$  fosforunun tekrarlanabilirliği 10 döngüye kadar test edilmiş olup en fazla % 3 oranında bir sapma gösterdiği görülmüştür.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.02\text{Sm}^{+3}$  fosforunun ışıma eğrisinin kaç tepeden oluştuğunu belirlemek için Tmaksimum-Tdurma tekniği ile CGCD yöntemi uygulanmıştır.

Yüksel ve arkadaşları (2018), nitrik asit yöntemiyle sentezledikleri  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{La}$  (% 1, % 4 ve % 10) fosforlarının farklı ısıtma hızlarındaki davranışını TL yöntemiyle belirlemişlerdir. Tüm katkılı fosforlar için elde edilen TL ışıma eğrilerinin 80-85 °C ve 150-160 °C’de konumlanmış iki karakteristik TL ışıma tepesinden oluştuğunu rapor etmişlerdir. sönmekten dolayı TL ışıma eğrisi altında kalan alanın azaldığını rapor etmişlerdir. Aynı koşullarda 5 Gy sabit beta dozuna maruz bırakılan  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{La}$  (% 1, % 4 ve % 10) fosforunun ilk okuma ile son okuma (10. döngü) arasında TL şiddetlerinde % 3 oranından az bir sapma gösterdiğini bildirmişlerdir. Tüm katkılı örneklerin her biri için bilgisayarlı ışıma eğrisi ayrıştırma yöntemi (CGCD) kullanılarak dozimetrik ışıma eğrisinin iç içe geçmiş altı ışıma tepesinden oluştuğunu belirtmişler.

Akca ve arkadaşları (2019), nitrik asit yöntemiyle sentezledikleri  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Pr}^{+3}$  (% 0.2, % 0.5, % 0.8 ve % 10) fosforların yapısal ve lüminesans özelliklerini incelemişlerdir. Sentezledikleri fosforların yapısal karakterizasyon analizleri için XRD yöntemini kullanmışlardır. Lexsy Smart TL/OSL okuyucu cihazını kullanarak yaptıkları ölçümlerden sonra tüm katkılı fosforlar için elde edilen TL ışıma eğrilerinin 71 °C (P1), 124 °C (P2) ve 233°C (P3) olmak üzere belirgin üç ışıma tepesinden oluştuğunu rapor etmişlerdir. 5 Gy sabit beta dozu sonrası  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.002\text{Pr}^{+3}$  fosforunun ilk okuma ile son okuma (10. döngü) arasında TL hassasiyetlerinde % 2 oranından az bir sapma gösterdiğini bildirmişler.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.002\text{Pr}^{+3}$  fosforunun tuzak parametrelerini hesaplamada farklı ısıtma hızları, başlangıç artışı,  $T_{\text{maksimum}}-T_{\text{durma}}$  ve CGCD yöntemini kullanmışlar. % 0.2 katkı oranı için hesaplanan FOM değerini % 2.19 olarak belirlemişlerdir.

Chen ve arkadaşları (2019), katı hal tepkime yöntemiyle sentezledikleri poli-kristal yapıdaki  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{xMn}^{+2}$  (% 1, % 3, % 5, % 7, % 10, % 15, % 20) fosforlarının katodoluminesans ve fotoluminesans özelliklerini detaylı bir şekilde araştırmışlardır. 451 nm dalga boyuna sahip UV uyartım altında oda sıcaklığında 235-530 nm aralığında gerçekleştirilen PL ölçümlerinde sırasıyla ~ 260, 344, 372, 380, 420, 426 ve 444 nm’de görünür emisyon piklerini elde etmişlerdir. UV ve mavi ışık kaynağına maruz bırakılan fosforların 541 nm pikinde parlak yeşil bir ışık yayıldığını gözlemlemişlerdir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Mn}^{+2}$  fosforlarının LED ve FED cihazlarında kullanılabilir bir potansiyele sahip olduğunu bildirdiler.

Doğan ve arkadaşları (2019), nitrik asit yöntemiyle sentezledikleri  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{+3}$  (% 2, % 4, % 5, % 6, % 7, % 8 ve % 10 mol) fosforlarının yapısal ve luminesans özelliklerini araştırmışlar. Sentezlemiş oldukları fosforların yapısal özelliklerini karakterize etmek için XRD, ESEM, EDS ve CL yöntemlerini kullanmışlardır. Luminesans özelliklerini ise Leksy Smart TL/OSL okuyucu cihazını kullanarak TL yöntemiyle belirlemişlerdir. Konsantrasyon sönümleme olayının % 5 katkı oranından sonra gerçekleştiğini bildirmişlerdir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.05\text{Eu}^{+3}$  fosforunun 0.1-10 Gy aralığında lineer davranış göstermiştir.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.05\text{Eu}^{+3}$  fosforuna ait ana ışıma eğrisinin kaç ışıma tepesinden oluştuğunu belirlemek için 70-240 °C aralıklarında 10’ar °C artışlarla  $T_{\text{maksimum}}-T_{\text{durma}}$  tekniğini kullanmışlardır. Benzer şekilde  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.05\text{Eu}^{+3}$  fosforunu CGCD yöntemiyle ayrıştıktan sonra tuzak parametrelerinin hesaplanmasında tepe şekil yöntemini kullanmışlardır.

Kucuk (2019), nitrik asit yöntemiyle sentezlediği  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{xTb}^{+3}$  (x = % 1, % 2, % 3, % 4, % 5 ve % 10 mol) fosforlarının yapısal ve dozimetrik özelliklerini incelemiştir. Sentezlenen fosforların TL özellikleri Risø TL/OSL DA-20 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlarda katkılanan fosforlardan en yüksek TL şiddetine sahip olan  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.03\text{Tb}^{+3}$  fosforunun dozimetrik özellikleri araştırılmıştır.  $\text{ZnB}_2\text{O}_4:0.03\text{Tb}^{+3}$  fosforunun dozimetrik uygulamalar için potansiyel bir malzeme olduğunu rapor etmiştir.

Çinko borat fosforunun TL karakteristikleri farklı gruplarca çalışılmış olmasına rağmen lüminesans oluşum mekanizmasının tam olarak anlaşılabilmesi için hala çok sayıda detaylı çalışmalara ihtiyaç olduğu yapılan literatür taraması sonucunda görülmüştür.



## 3. MATERYAL VE METOT

## 3.1. Materyal

## 3.1.1. Tez kapsamında kullanılan kimyasallar

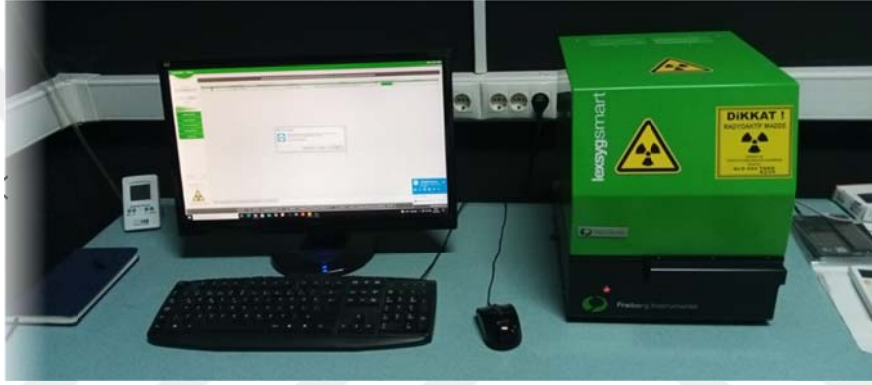
Bu tez çalışmasında TL dozimetresi geliştirmek amacıyla gadolinium (Gd) katkılı Çinko Borat ( $ZnB_2O_4$ ) fosforları kimyasal yanma yöntemi ile sentezlenmiştir. Sentezlemede Çinko Nitrat ( $Zn(NO_3)_2$ , %97.5 saflıkta), Borik asit ( $H_3BO_3$ , %99.5 saflıkta), Amonyum Nitrat ( $2NH_4NO_3$ , %99.9 saflıkta), Üre ( $2CO(NH_2)_2$ , %98 saflıkta) ve gadolinium nitrat (%99.9 saflıkta) bileşikleri kullanılmıştır. Malzemelerin sentezlenmesinde kullanılan kimyasallar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Malzeme sentezlenmesinde kullanılan kimyasal malzemeler

| KİMYASAL MALZEMELER                   |                         |                         |                    |                                          |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------------|
| Çinko Nitrat                          | Amonyum Nitrat          | Borik Asit              | Üre                | Gadolinium Nitrat                        |
| $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$<br>%97,5     | $NH_4NO_3$<br>%99,5     | $H_3BO_3$<br>%99,5      | $CH_4N_2O$<br>%98  | Gd %99,9                                 |
| Hexahydrate                           | SİGMA<br>(Life Science) | SİGMA<br>(Life Science) | ACROS<br>(Organik) | Kod:<br>316760250                        |
| Alman malı<br>MERCK marka<br>UN: 1514 | Cas: 6484-52-2          | Cas:10043-35-3          | Kod:197460010      | Cas:19598-90-4<br>Amerikan malı          |
| Grup No:<br>V7A781027B                | EC:229-347-8            | EC:233-139-2            | Lot:A0411790       | UN No:<br>1477<br>ACRAS<br>Organik marka |

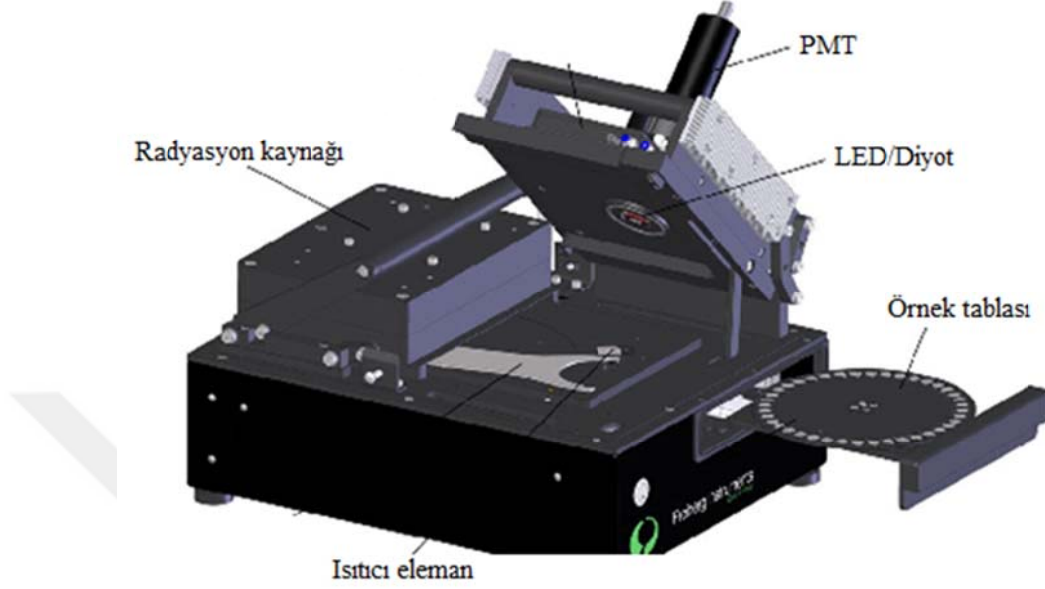
**3.1.2. Tez kapsamında kullanılan cihazlar****3.1.2.1. Lexsyg Smart TL / OSL okuyucusu**

Bu tez çalışmasında sentezlenen dozimetrik malzemelerin lüminesans özelliklerinin termolüminesans (TL) tekniğiyle belirlenmesinde, Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Termolüminesans (TL)/Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) Dozimetri ve Tarihlendirme Laboratuvarında bulunan "Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu" cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.1).



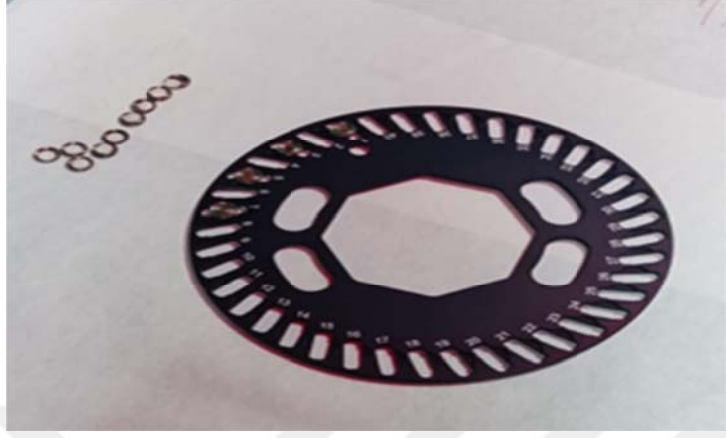
Şekil. 3.1. Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu cihazı

Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu, radyasyon kaynağı, karosel tabla, ısıtma sistemi, PM Tüpü ve Optiksel Uyarımlı Lüminesans (uygun dalga boylu ışık kaynağı) olmak üzere beş farklı kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.2)



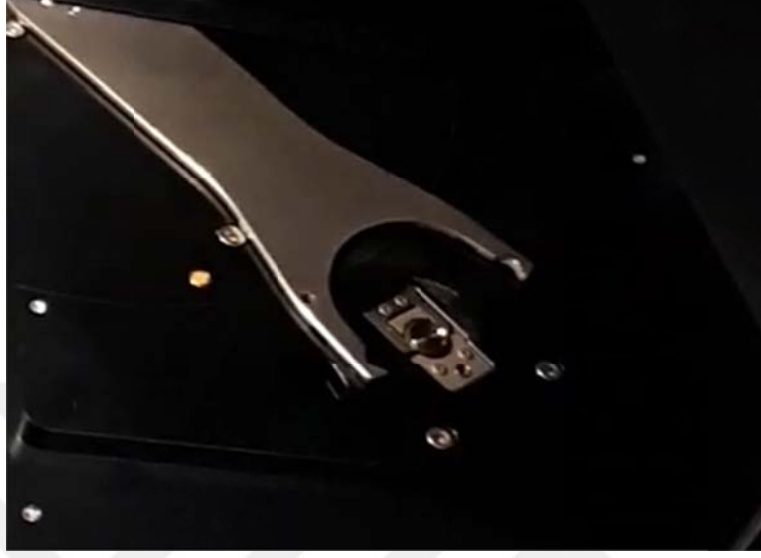
Şekil. 3.2. Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucunun temel bölümleri (Richter, 2015)  
Lexsyg Smart TL/OSL okuyucuda bulunan beta ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) radyasyon kaynağı özel bir kurşun blok içerisine yerleştirilmiştir. Beta radyasyon kaynağının yarılanma ömrü yaklaşık 30 yıl olup maksimum 2.27 MeV'lik enerjiye sahip  $\beta$  parçacıkları yaymaktadır. Radyasyon kaynağı, saniyede 0.1 Gy'lik bir doz hızına sahiptir.

Cihaz içindeki örnek tabla, 40 adet farklı bölmeden oluşan ve 40 farklı ürünü aynı anda Lexsyg Smart TL/OSL cihazına yerleştirebilmemizi sağlayan aparatır (Şekil 3.3). Bu aparata malzemeler planşetler yardımı ile konulmaktadır. Aparat daire şeklinde olup cihaz içerisinde dönme hareketi yapabilmektedir.



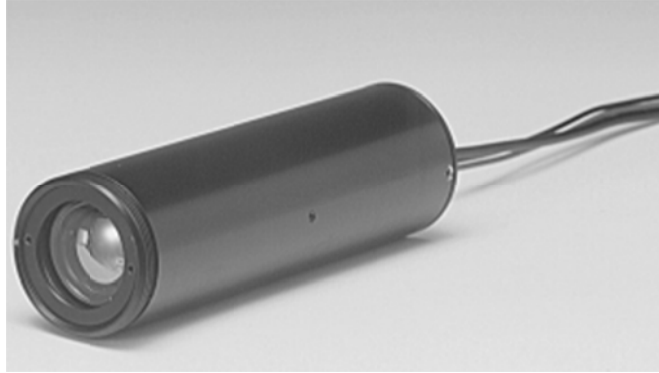
Şekil. 3.3. Lexsyg Smart TL / OSL Okuyucu cihazının içerisine malzeme yerleştirmek için kullanılan örnek tabla.

Isıtma sistemi, kenarlıklı disk içinde bulunan örneğin konulduğu döner tabla ile ısıtıcı üniteye bağlı olan ısı çifti (themocouple) adı verilen bir bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.4). Isıl çift yardımıyla ısıtılan örnekler doğrusal bir ısıtma hızı ile yapılmaktadır. Örnekler 0.5°C/s'lik ısıtma hızından başlayarak 20 °C/s'lik ısıtma hızlarına kadar yapılabilmektedir. Isıl çift, fotoçoğaltıcı tüpün altına yerleştirilmiştir



Şekil. 3.4. Isıtma birimi

Lexsyg Smart TL/OSL okuyucuda, lüminesans yayınına ışığa duyarlı bir fotokatlandırıcı tüp (Photomultiplier Tube, PMT) tarafından algılanmaktadır (Şekil 3.5). PM tüp yüksek hassasiyete, hızlı cevap süresine ve düşük gürültü seviyesine sahiptir.



Şekil. 3.5. Hamamatsu (H7360-02 model) standart bi-alkalin fotokatlandırıcı tüp ünitesi



Cihazda 6 farklı optiksel filtre bulunmaktadır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Cihazda bulunan mevcut filtreler ve özellikleri

| İsim                     | Filtre                                                                                                                                                       |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BSL, TL-365 nm           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hoya-U340-Glas-2,5mm</li> <li>Delta-BP 365/50 EX-Interference-5 mm</li> </ul>                                         |
| BSL, TL-365 nm (% 0.25)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hoya – U340-Glas-2,5mm</li> <li>Delta-BP 365/50 EX-Interference-5mm</li> <li>Schott-NG 4- Glas-1,2 mm</li> </ul>      |
| IRSL, TL-410 nm          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schott-BG 39-Glas-3mm</li> <li>AHF-BrightLine HC 414/46-Interference-3,5mm</li> </ul>                                 |
| IRSL, TL-410 nm (% 0.25) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schott-BG 39-Glas-3mm</li> <li>AHF-BrightLine HC 414/46-Interference-3,5mm</li> <li>Schott-NG 4-Glas-1,2mm</li> </ul> |
| IRSL, TL-565 nm          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schott-BG 39-Glas-3mm</li> <li>AHF-BrightLine HC 575/25-Interference-5mm</li> </ul>                                   |
| IRSL, TL-geniş band mavi | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schott-KG 3-Glas-2mm</li> <li>Schott-BG 25-Glas-3mm</li> <li>Schott-BG 39-Glas-3mm</li> </ul>                         |

Lexsyg Smart TL/OSL okuyucuda optiksel uyarımı sağlayan infrared, görünür veya ultraviyole lazer diyot/LED ünitesi kaynakları bulunmaktadır.

Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu, tüm fonksiyonlarıyla özel hazırlanmış Windows tabanlı "LexStudio" programının yüklü olduğu bir bilgisayara bağlanmıştır.

**3.1.2.2. X-ışınları toz kırınımı (XRD) ölçüm cihazı**

Üç boyutlu uzayda, bir kristalin atomik yapısı düzgün tekrarlanan bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla, kristal yapı, atom, atom gruplarının ya da moleküllerin kristale özgü üç boyutlu belli bir geometrik düzen içerisinde (kendini tekrar eden) bir araya gelmesi sonucu meydana gelir. İlk kez kristal yapı ve yapı içerisindeki atomların dizilişleri Max van Laue tarafından (1912) incelenmiştir. Kristal yapı analizinde a,b,c ve  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  birim hücre parametreleri, birim hücrede kaç tane atom veya molekül olduğu, bunların konumları, bağ uzunlukları, kristal yüzlerinin indislenmesi, kristalin mükemmelliği X-ışınların, fotonların, elektronların ve nötronların kırınımı yoluyla tespit edilir.

Bu tez çalışmasında yanma yöntemi ile sentezlenen katkısız ve Gd katkılı çinko borat (% 0.25, %0.5, %1, %2, %3, %4, %5, %7, %10) fosforlarının XRD ölçümleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi (İBTAM) laboratuvarında bulunan Rigaku marka RadB model XRD cihazı ile yapılmıştır.

**3.1.2.3. Isıl işlemlerde kullanılan fırın**

Yanma yöntemi ile sentezlenen Gd katkılı çinko borat (% 0.25, %0.5, %1, %2, %3, %4, %5, %7, %10) ile sentezlenen malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kalsinasyon, tavlama ve sinterleme gibi ısı işlemlerinin yapılması için Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Termoluminesans (TL)/Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) Tarihlendirme laboratuvarında bulunan Protherm PLF 14/50/450 marka fırında kullanılmıştır (Şekil 3.6). Fırının programlanabilir özelliği sayesinde, malzemelerin hangi sıcaklığa kaç dakikada çıkacağı ve bu sıcaklıkta ne kadar süre kalacağı ayarlanabilmektedir. Örneğin bu çalışmada üretilen  $ZnB_2O_4$  malzemesi fırın yardımı ile 550 °C ve 900 °C ye kadar ısıtılabilmiştir.



Şekil. 3.6. Protherm marka fırın

#### 3.1.2.4. Agat havan

Agat havan, üretilen malzemenin fırından çıktıktan sonra döğme/öğütme işlemini gerçekleştirdiğimiz araç/gereçtir. Sentezlenen katı formdaki örneklerin parçacık boyutlarındaki homojenliğini yakalamak için agat havan kullanılarak örnekler öğütülmüştür (Şekil 3.7).



Şekil. 3.7. Agat havan

#### 3.1.2.5. Hassas Terazı

Kullandığımız malzemelerin tartımı için Precisa XB 220 A marka dijital hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 3.8). Malzemelerin tartımı, birçok farklı birimlerde (mg, g gibi) yapabilmektedir. Ayrıca, tara alma özelliği sayesinde hedeflenen miktarın tam olarak tartımı yapılabilmektedir.



Şekil. 3.8. Precisa XB 220 A marka dijital hassas terazi

#### 3.1.2.6. Hidrolik pres cihazı

Agat havanda yapılan öğütme işleminden sonra hazırlanan toz numuneler TL ölçümlerinde kullanılmak üzere, küçük çelik çekirdekler arasında kalacak şekilde CARVER marka hidrolik presleme cihazı pelletler elde edilmiştir. Şekil 3.9’da görülen basınç makinesinin ön yüzünde bulunan gösterge yardımı ile örnekler kaç bar basınç verileceğini tayin edebiliriz. Basınç arttırma işlemi şekilde görülen kol yardımı ile yapılabilmektedir. Çelik diskler içerisindeki toz malzeme makine içerisine yerleştirilir ve 20 dakika basınç altında kalması beklenir.



Şekil. 3.9. CARVER marka hidrolik presleme cihazı

#### 3.1.2.7. Alümina kroze ve Manyetik karıştırıcı

Alümina kroze, katkısız ve katkılı  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  fosforlarının sentezlenmesinde tepkimeye girecek olan malzemelerin içerisine konulduğu kaptır (Şekil 3.10).



Şekil. 3.10. Alümina kroze

Krozeler elektrikli ısıtıcı ve manyetik karıştırıcının üzerine yerleştirilir. Karıştırıcı, krezelere ısı ve titreşim vermektedir. Malzemenin sıvılaşması ve homojenizasyonunu, ısıtma ve karıştırma işlemi yapmamıza olanak sağlayan alümina kroze kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklara kadar çıkabilen elektrikli fırına örnekler konulurken de yine bu krezeler kullanılmaktadır.

Ön ısıtma, tavlama, titreşim ile karıştırma, homojenizasyon işlemlerini yaptığımız cihaz elektrikli ısıtıcı manyetik karıştırıcıdır (Şekil 3.11). Ön yüzünde bulunan elektronik göstergeler, titreşim miktarını ve sıcaklık değerini ayarlayabildiğimiz çevirmeli düğmelerden oluşan konsoldur.



Şekil. 3.11. Elektrikli Isıtıcı Manyetik Karıştırıcı

#### 3.1.2.8. Çeker Ocak

Çeker ocak içerisinde yapılan malzemelerin sentezlenme aşamasında ortaya çıkan zehirli gazların laboratuvar ortamına yayılmasını engellemek için fan ve filtre sisteminin bulunduğu çok fonksiyonlu bir cihazdır (Şekil 3.12). Çalışma esnasında ortaya çıkan istenmeyen kimyasal malzemelerin ortamdan çekilmesi otomatik olarak ayarlanabilmektedir.



Şekil. 3.12. Çeker Ocak



### 3.2. Metot

Dozimetrik malzemelerin kullanım amacına yönelik olarak farklı yöntemler tercih edilebilmektedir. Yanma sentezi yöntemi, katı hal tepkime yöntemi, çöktürme yöntemi, sol-jel yöntemi ve nitrik asit yöntemi bu metotlar arasından bazılarıdır. Bu tez çalışmasında malzemelerin sentezlenmesinde yanma sentez yöntemi kullanılmıştır.

#### 3.2.1. Yanma sentez yöntemi

$$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{H}_3\text{BO}_3 + 2\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \rightarrow \text{ZnB}_2\text{O}_4 + 5\text{N}_{2(g)} + 2\text{CO}_{2(g)} + 11\text{H}_2\text{O}_{(g)}$$
 kimyasal denklem kullanılarak önceden belirlenen stokiyometrik oranlarda başlangıç malzemeleri tartılarak alümina krozeyle konularak Çinko Borat ( $\text{ZnB}_2\text{O}_4$ ) sentezi yapılmıştır. Kimyasal denklemde sırasıyla eklenen kimyasal bileşiklerin kütleleri belirlenmiştir. Gd katkısı, toplam kütle üzerinden, reaksiyon öncesi tartılarak belli oranlarda tüm malzeme ile malzemeler katı halde iken tepkime başlamadan önce yapılmıştır. Ana malzeme Çinko Borat üretimi için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda bileşiği oluşturmak için reaksiyona giren malzemelerin en uygun kütle oranları bulunmuştur. Bileşiğe giren kimyasalların kütleleri 0,5 gr  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  + 0,4 gr  $\text{H}_3\text{BO}_3$  + 0,8 gr  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 0,8 gr  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  şeklindedir. Sonuçta saf Çinko Borat bileşiği yanma yöntemi ile bu oranlar dahilinde üretilmiştir.

$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ve  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  stokiyometrik oranlarda tartılıp katkısız ve kütlece % 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10 Gd katkı malzemeleri ayrı ayrı krozelere konulup 90 °C deki bir manyetik karıştırıcıda 20 dakika karıştırılır. Daha sonra manyetik karıştırıcının sıcaklık derecesi 150 °C ye çıkarılarak 20 dakika daha homojenizasyon için iyice karıştırılmıştır. Katı haldeki ürünler sıcaklığın etkisi ile sıvı/jel ürün haline gelir. Isıtılan ve sıvı/jel hale gelen malzeme oda sıcaklığındaki elektrikli fırına (krozelerin içerisinde) yerleştirilir. Fırın 2 saatte 550 °C çıkması için ayarlanır. 550 °C sıcaklığa çıkan malzeme 30 dk daha bu sıcaklıkta fırında bekletilir. Daha sonra

fırındaki krozeler metal maşa ve eldiven yardımı ile tutulup oda sıcaklığında soğuması için bekletilmek üzere çıkarılır. Katı hale gelen malzemeler agat havan yardımı ile 10 dakika dövülerek toz malzeme haline getirilir. Toz haline getirilen malzemeler temiz krozelere tekrar konulur. Krozelere konulan malzemeler tekrar fırına yerleştirilir. Fırın oda sıcaklığından 900 °C ye 1 saatte çıkarılır ve 900 °C de 1 saat daha bekletilir. Bu işlemten sonra krozelerdeki malzemeler fırından çıkarılır ve soğuması beklenir. Malzemeler agat havana alınır ve 10 dk daha dövme işlemi yapılır. Elde edilen toz ürünler analizlere hazır hale getirilmiş olur.





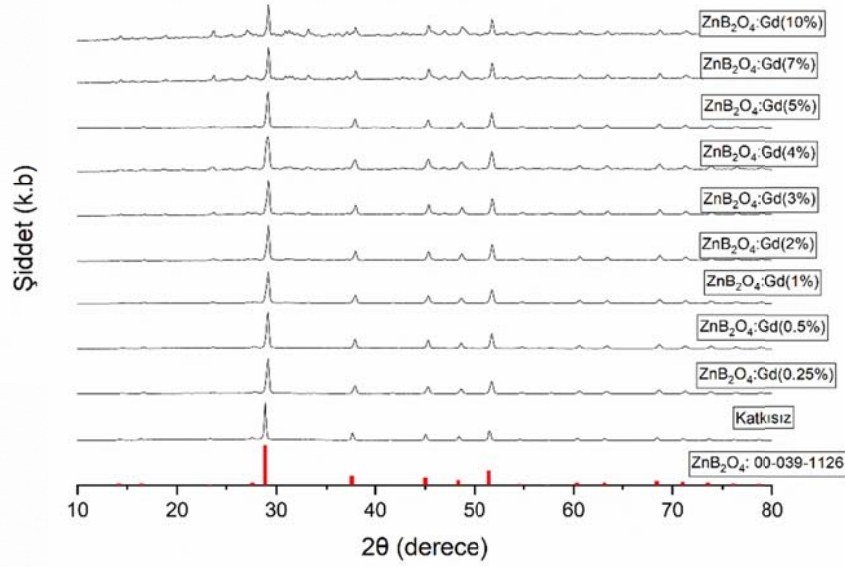
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

##### 4.1. Giriş

Bu bölümde, yanma yöntemi ile sentezlenmiş olan katkısız ve Gd katkılı  $ZnB_2O_4$  (% 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10 kütlece) fosforlarının lüminesans özellikleri TL yöntemi kullanılarak araştırılan bu fosforların uzay, klinik, kişisel veya çevre dozimetresi gibi alanların birinde TL dozimetresi olarak kullanılıp kullanılmayacağına yönelik analiz sonuçları verilmiştir. X-Işını Kırınımı (XRD) analizlerinden sentezlenen fosforların yapısal özelliklere ait sonuçlar yorumlanmıştır. Sentezlenen fosforların dozimetrik özelliklerinin incelenmesinde Lexsyg Smart TL/OSL okuyucu cihazı kullanılmıştır.

##### 4.2. XRD Analizi Sonuçları

Bir XRD cihazı, X-ışını tüpü, X-ışını detektörü ve örnek tutucu olmak üzere üç temel parçadan oluşur. X-ışını tüpündeki flamanın ısıtılmasıyla üretilen elektronlar yüksek voltaj altında hızlandırılarak bakır, kobalt ve molibden gibi hedef malzemeye çarptırılması sonucu meydana gelen X ışınlarının örnek yüzeyine gönderilmesi ile XRD desenleri oluşur. Bu XRD desenlerinden, örneğin kristal yapısı, birim hücre boyutu ve kristalleşmenin derecesi gibi birçok konuda bilgi sağlanır. Bu bağlamda yanma yöntemi kullanılarak sentezlenen katkısız ve Gd katkılı Çinko Borat  $ZnB_2O_4$  (% 0.25, %0.5, %1, %2, %3, %4, %5, %7 ve % 10 kütlece) fosforların kristalleşmelerinin oluşup oluşmadığını belirlemek için XRD ölçümleri yapılmıştır. Yapılan bu ölçümler sonucunda sentezlenen fosforların XRD kırınım desenlerinin konum ve şiddetleri 00-039-1126 nolu PDF kartında verilen  $ZnB_2O_4$  ile uyum içerisinde (Şekil 4.1). Şekil 4.1’den de görüldüğü gibi, yapılan Gd katkılanması kristal yapıda herhangi bir değişiklik meydana getirmemiştir.

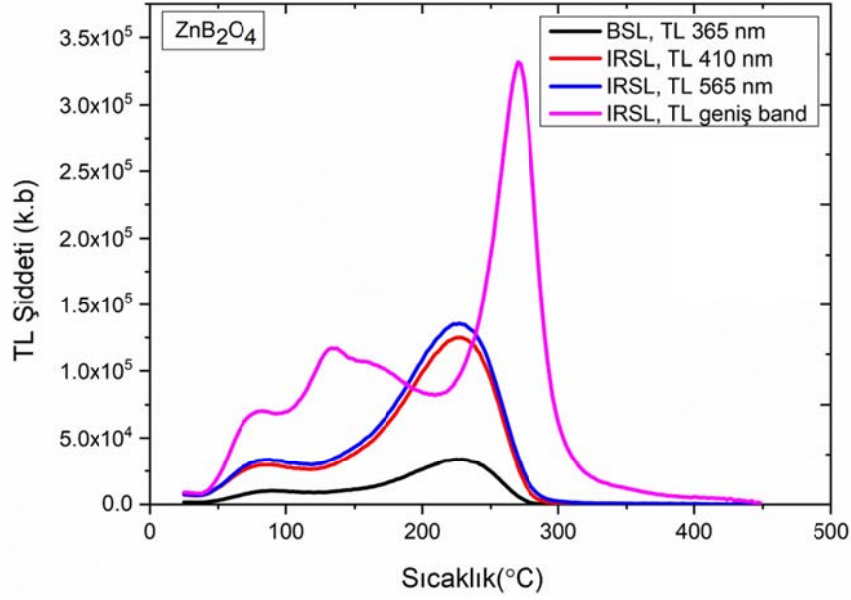


Şekil 4.1. Katkısız ve Gd katkılı  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  (% 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10) fosforlarına ait XRD kırınım desenleri

#### 4.3. Termoluminesans (TL) ölçümleri ile ilgili bulgular

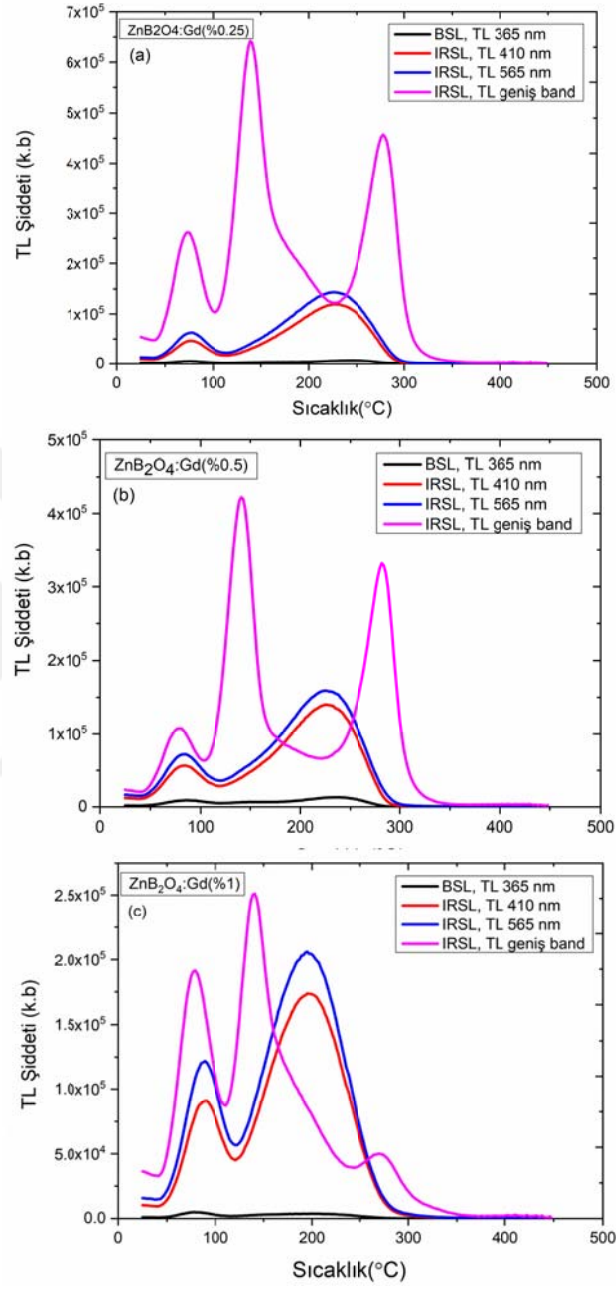
##### 4.3.1. Katkısız ve Gd katkılı Çinko Borat $\text{ZnB}_2\text{O}_4$ (% 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10) fosforlarının filtre testleri ile ilgili bulgular

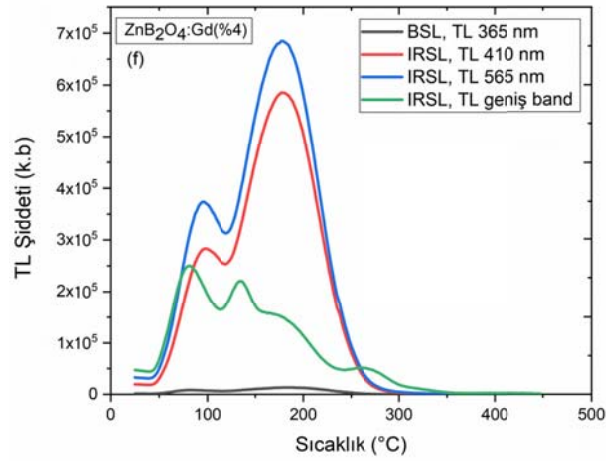
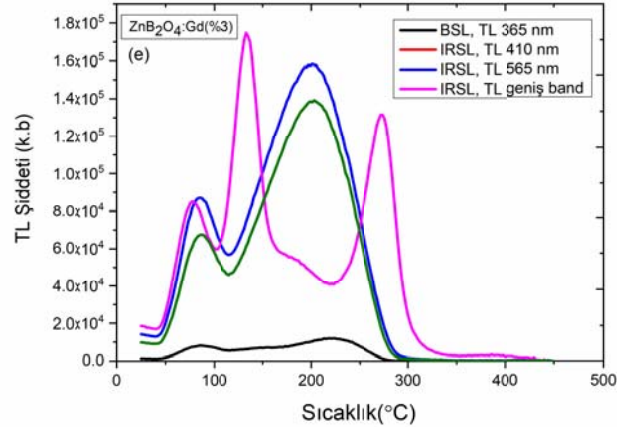
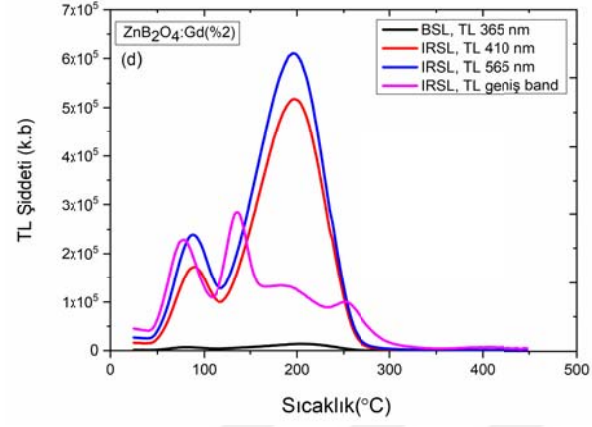
TL ölçümleri için, ilk olarak katkısız  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  ve Gd katkılı  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  fosforlarından yayılan fotonların daha hassas bir şekilde saptanması için en uygun filtrenin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen katkısız Çinko Borat ( $\text{ZnB}_2\text{O}_4$ ) fosforuna 10 Gy beta test dozu verilerek  $2\text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$  ısıtma hızı ile oda sıcaklığından  $450\text{ }^\circ\text{C}$  ye kadar ısıtılıp farklı filtrelerde TL ölçümü alınmıştır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi katkısız çinko borat fosforuna ait BSL, TL 365 nm, IRSL, TL 410 nm, IRSL, TL 565 nm ve IRSL, TL geniş band olmak üzere farklı filtre testi sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda IRSL, TL geniş band filtresinde TL şiddet değerinin oldukça yüksek olduğu tespit edildi.



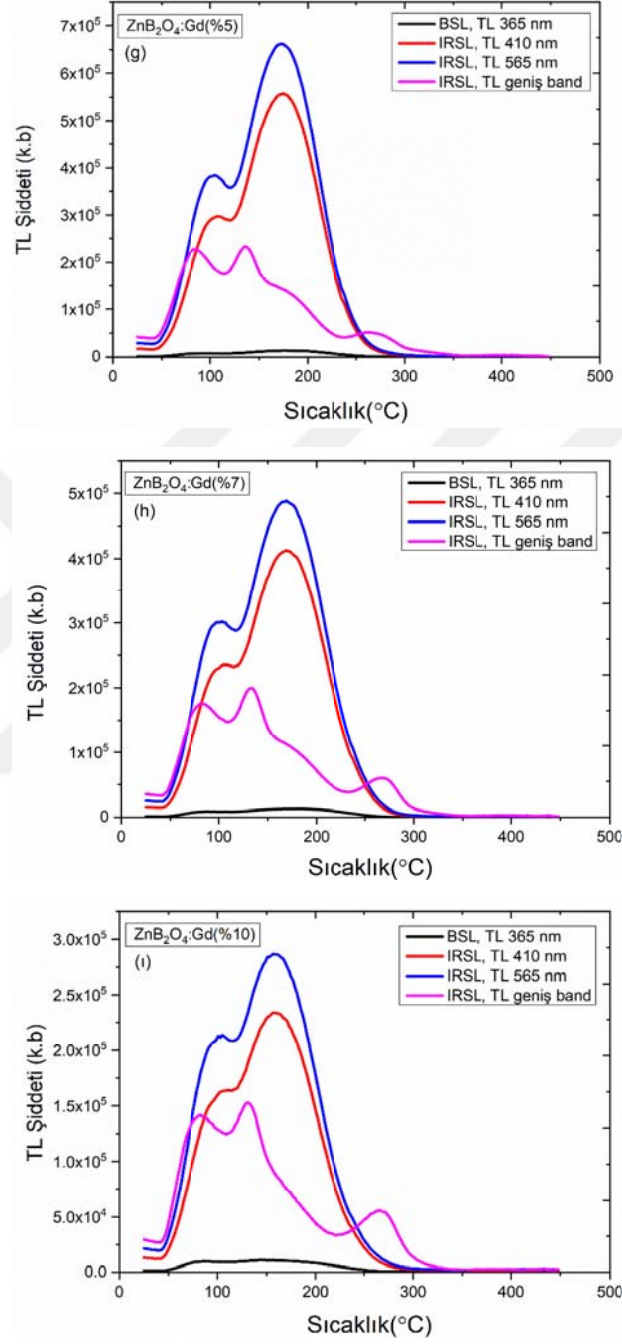
Şekil 4.2. Katkısız çinko borat fosforuna ait filtre testi sonuçları

Katkısız çinko borat fosforundan elde edilen TL ışıma eğrisi değerlendirilerek malzemenin dozimetrik amaçlar için kullanılabileceği görülmüştür. Bundan dolayı katkısız  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  fosforunun TL şiddetini ve özelliklerini artırmak amacıyla önceden belirlenen farklı oranlardaki Gd iyonu  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  fosforuna katkılандırılmıştır. Bu bağlamda Gd katkılı  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  (% 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10 kütlece) fosforunun her bir örneği 10 Gy beta test radyasyon dozuna maruz bırakılarak farklı filtrelerdeki TL ışıma eğrileri elde edildi (Şekil 4.3.a-ı.).





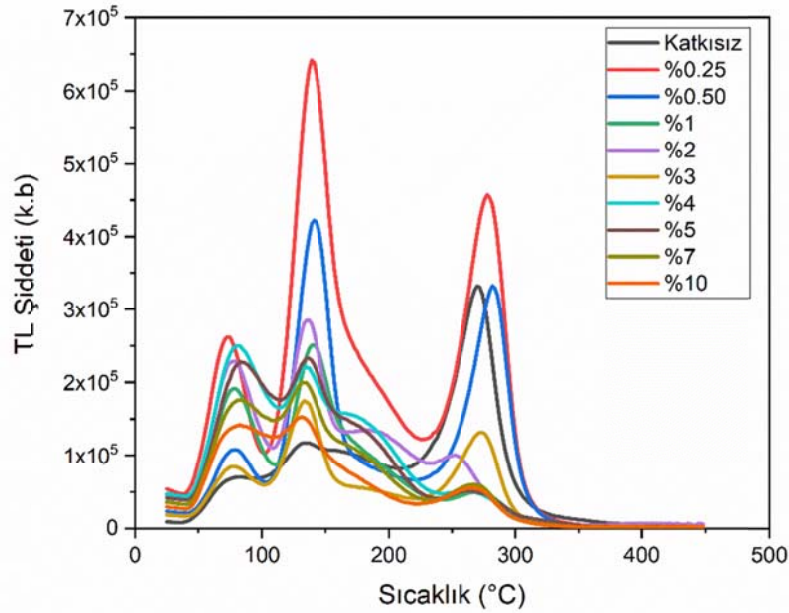




Şekil 4.3. **a-i.** % 0,25, % 0,5, %1, %2, %3, %4, %5, %7 ve % 10 Gd katkılı çinko borat fosforuna ait filtre test sonuçları

Yapılan filtre testlerinin sonucunda Gd katkılı  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  fosforlarının TL şiddetleri için en uygun filtrenin IRSL-TL geniş band olduğu belirlenmiştir.

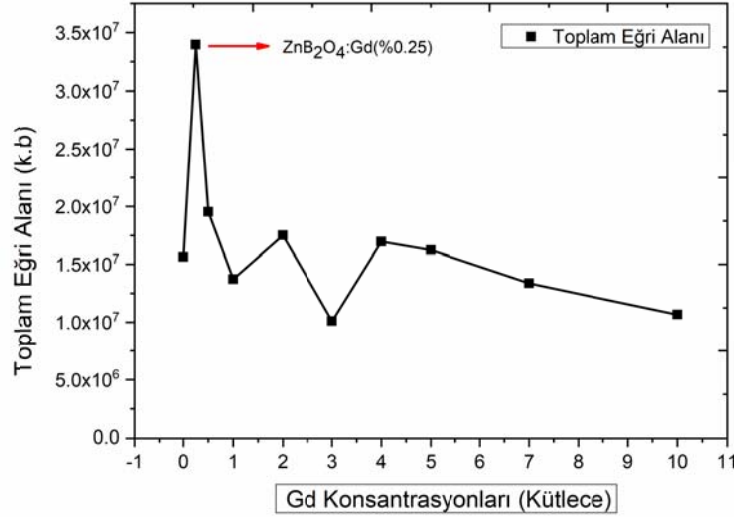
Şekil 4.4’de her bir katkı oranı için Gd katkılı  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  (% 0,25, % 0,5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10 kütlece) fosforları IRSL-TL geniş band filtresinde 10 Gy’lik beta radyasyon dozuna maruz bırakıldıktan sonra TL okumaları sonucunda elde edilen TL ışıma eğrileri görülmektedir. Bu sonuçlara göre en uygun katkı oranının % 0.25 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.4. IRSL-TL geniş bant filtresinde 10 Gy beta dozuna maruz bırakılmış Gd katkılı Çinko Borat  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  (% 0.25, % 0.5, %1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10) fosforlarının TL ışıma eğrileri

Benzer şekilde, sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi için her bir katkı oranına karşılık toplam eğri alanı grafiği çizilmiştir (Şekil 4.5). Şekil 4.5’den de görüldüğü gibi Gd’nin % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, % 5, % 7 ve % 10 oranlarında TL ışıma şiddetinin azaldığı görülmektedir ve dolayısıyla en uygun katkı oranının % 0.25 olduğu belirlenmiştir. Bu durum, Gd katkılanması için eşik konsantrasyon

değerinin % 0.25 olduğu ve bu eşik değerden sonra yapılan katkılamlarda konsantrasyona bağlı sönümlenme olayının gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.5. Farklı oranlardaki Gd konsantrasyonlarına karşılık toplam TL eğri alanları

Böylelikle yeni TL dozimetre geliştirme çalışmalarında % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun dozimetrik özellikleri araştırılacaktır.

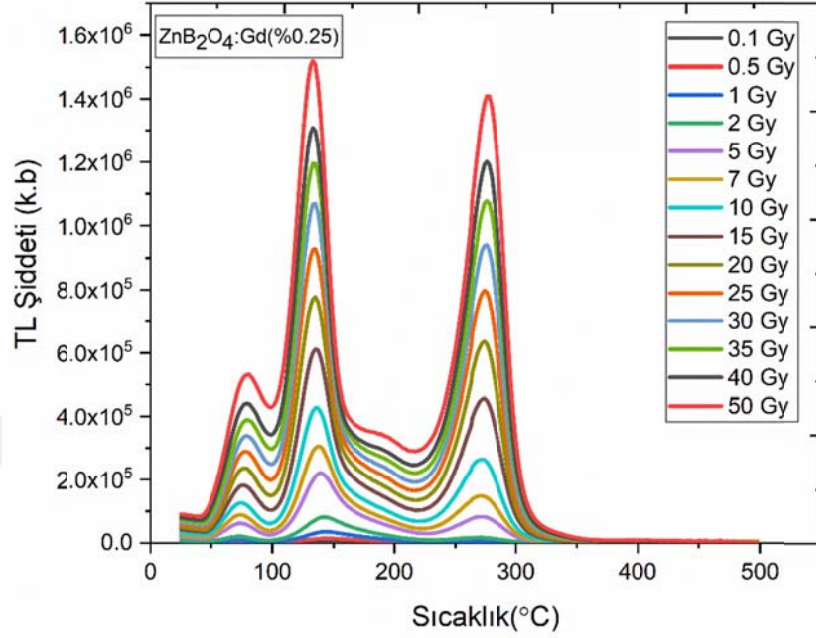
#### 4.3.2. Doz yanıt deneyleri ile ilgili bulgular

Herhangi bir dozimetrik malzemeye farklı oranlarda radyasyon dozu uygulandığı zaman aynı oranda ve aynı hassasiyette TL şiddetlerinde bir artışın olması beklenen bir durumdur. Yani, malzemeye verilen radyasyon dozundaki artış ile TL şiddetindeki artış miktarı doğru orantılıdır. Bu bağlamda dozimetrik malzemelerin geniş bir doz aralığında lineer (doğrusal) bir doz cevap eğrisine sahip olması beklenir. Ancak, birçok malzeme ile ilgili yapılan çalışmalarda herhangi bir dozimetrik malzemeye

verilen radyasyon dozundaki artış ile birlikte doz cevap eğrisinin genellikle önce lineer sonra supralineer (lineer üstü) ve sublineer (lineer altı) olmak üzere üç bölgeye ayrıldığı gözlenmiştir (McKeever ve ark, 1995). Sublineer davranışın arkasın da materyalin verilen doza karşı doyuma ulaşması beklenir. TL şiddetinin soğurulan doza bağımlılığının fonksiyonel ifadesi  $g(N)$  ile gösterilir. Normalize edilmiş doz cevap fonksiyonu (veya supralineerlik indeksi)  $g(N)$  aşağıdaki denklem ile verilebilir:

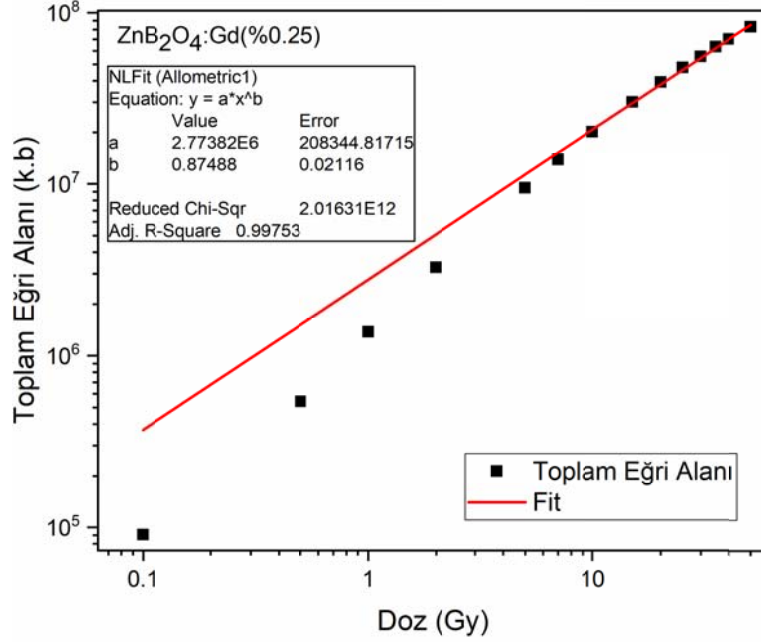
$$g(N) = \frac{\left(\frac{G(N)}{N}\right)}{\left(\frac{G(N_1)}{N_1}\right)} \quad (4.1)$$

Burada  $g(N)$ , herhangi bir  $N$  dozuna karşılık gelen doz cevabıdır ve  $G(N_i)$  ise daha düşük bir  $N_i$  doz değerine karşılık gelen doz cevabıdır. Böylece ideal bir dozimetre için geniş bir bölgede (ör.  $N=0$  Gy'den birkaç MGy'e kadar)  $g(N)=1$  olması beklenir. (McKeever ve ark., 1995). Normal şartlarda bir dozimetrik malzemeden elde edilen doz cevap eğrisinde dozun artması ile beraber lineer, supralineer ve sublineer (doygunluk) bölgelere rastlanabilir. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı dozlarda beta radyasyon kaynağına maruz bırakılmasının ardından elde edilen TL ışıma eğrileri Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi,  $ZnB_2O_4:0.0025Gd$  fosforunun maruz kaldığı beta dozunun artmasıyla TL ışıma eğrisini oluşturan tepelerin şiddeti de artmaktadır.



Şekil 4.6. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı radyasyon dozlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri

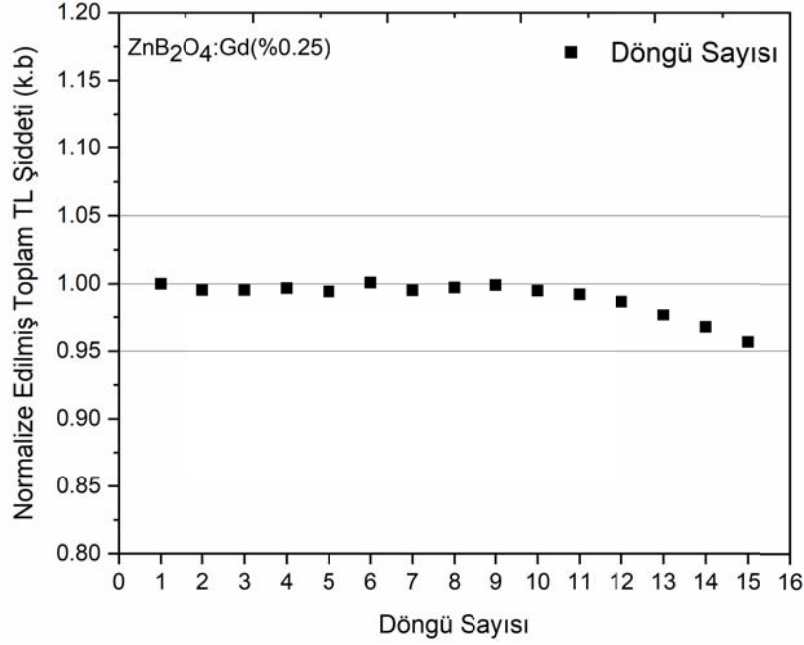
% 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun 0,1-50 Gy aralığında soğurduğu farklı dozlardan elde edilen TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlar, her bir doz değeri için hesaplanarak radyasyon dozuna karşılık grafiği çizilmiştir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi % 0.25 Gd katkılı çinko borat 0,1 Gy’lik dozdan 50 Gy’lik doza kadar olan bölgede doğrusal fonksiyon ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.7. % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforuna 0.1-50 Gy arası doz verilerek elde edilen doz cevap eğrisi

#### 4.3.3. Tekrar kullanılabilirliğin test edilmesi deneyi ile ilgili bulgular

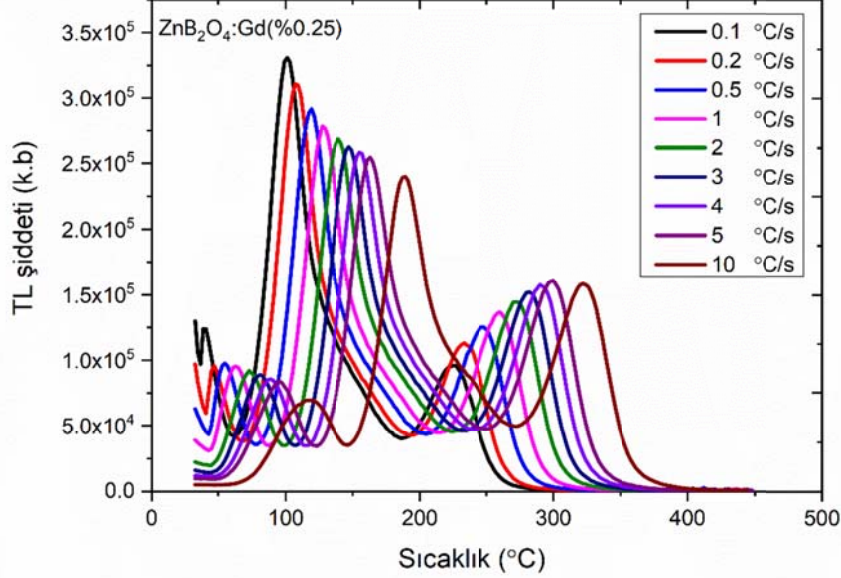
Tekrarlanabilirlik herhangi bir dozimetrik materyalin lüminesans özelliklerini araştırmada en önemli noktalarından birisidir. İyi bir dozimetrik malzemenin tekrarlanabilirliği, aynı doz ve okuma koşullu altında tekrarlanan ölçümler %5'ten az standart bir sapmaya sahip olmalıdır (Furetta, 2003). % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun (5 Gy Beta dozu, 2°Cs<sup>-1</sup> ısıtma hızı) TL sinyalinde 15 döngü sonunda ilk döngüden başlayarak son döngüye kadar en fazla % 4 oranında bir sapma gösterdiği ve bu sapma değerinin kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu söylenebilir (Şekil 4.8). % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun dozimetrik açıdan iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.8. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun ilk okumaya göre normalize edilmiş TL sinyal alanının döngü sayısına karşı grafiği

#### 4.3.4. Farklı ısıtma hızları deneyi ile ilgili bulgular

Isıtma hızı, TL ısıtma eğrisinin konumunu ve şeklini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Başka bir deyişle, farklı ısıtma hızları, TL ısıtma eğrilerinin maksimum sıcaklık ( $T_m$ ) tepe noktalarının değişmesine neden olmaktadır. Farklı ısıtma hızları yönteminde numuneye sabit doz verilir ve belirlenen bir ısıtma hızında TL okuma işlemi alınır. Daha sonra aynı doz miktarı numuneye tekrar verilir ve farklı bir ısıtma hızında TL okuma işlemi yapılır. Bu şekilde farklı ısıtma hızları kullanılarak tekrar edilir. Şekil 4.9'da % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforuna 5 Gy'lik beta dozu verildikten sonra 0.1-10 °C/s'lik ısıtma hızları kullanılarak elde edilen ısıtma eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.9. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı ısıtma hızlarında elde edilen TL ışıma eğrilerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi her üç TL ışıma tepesinde (Tepe 1, Tepe 2 ve Tepe 3) de artan ısıtma hızına bağlı olarak yüksek sıcaklık bölgesine doğru kayma meydana gelmiştir. Bu kaymalar literatürdeki birçok çalışmada verilen ısısal (sıcaklık) gecikme (temperature lag) ile açıklanabilir (Kitis ve ark., 1993; Kitis ve Tuyn, 1999; Bulcar ve ark., 2018). Isısal gecikme, TL okuması sırasında ısıtma işlemini sağlayan ısı çifti (thermocouple) ile örnek arasındaki sıcaklık farkının oluşmasından dolayı lüminesans verimliliğinin azalması durumudur. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi ısıtma hızı arttıkça Tepe 1 ve Tepe 2 ışıma tepelerinin TL şiddetlerinin azaldığı, fakat Tepe 3 ışıma tepesinin TL şiddetinin ise arttığı görülmektedir. Tepe 1 ve Tepe 2 ışıma tepelerinin TL şiddetlerinin azalması ısısal sönmüleme (thermal quenching) etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumun oluşmasının nedeninin lüminesans mekanizmalarında ışımasız geçiş olasılığının ışımalı geçiş olasılığına göre daha baskın olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Oglakcı ve ark. 2019; Bulcar ve ark., 2018). Isıtma hızının

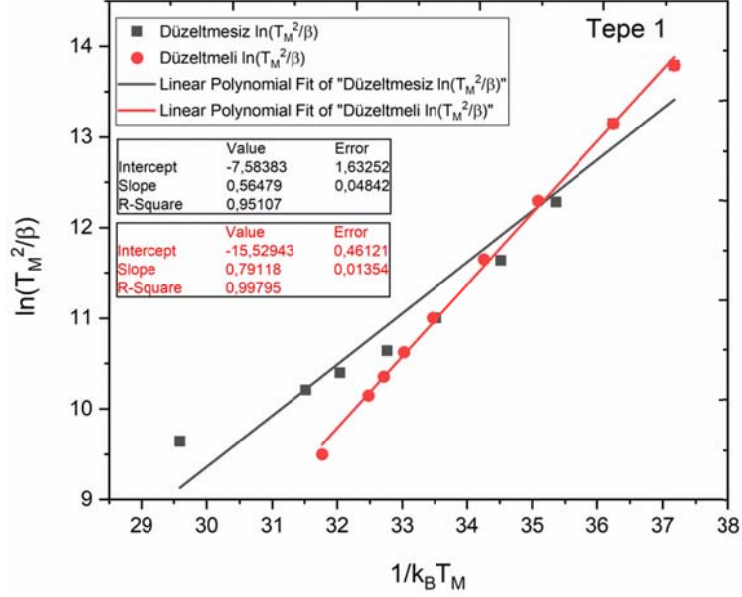


artmasıyla, ısısal sönüme bağlı olarak TL ışıma eğrisinin altında kalan toplam alanlarda azalmaktadır. Tepe 3'deki artış ise TL teorisi ve şu ana kadar değerlendirilmiş olan davranışlar ile açıklanamamaktadır. Bazı araştırmacılar, farklı ısıtma hızları için bu anormal etkiyi açıklamak için yerel geçişlerin ışımsal olmayan katkısının ve yerel olmayan geçişlerin ışımsal katkısının hesaba katılmasını rapor etmişlerdir (Mandowski ve Bos, 2011).

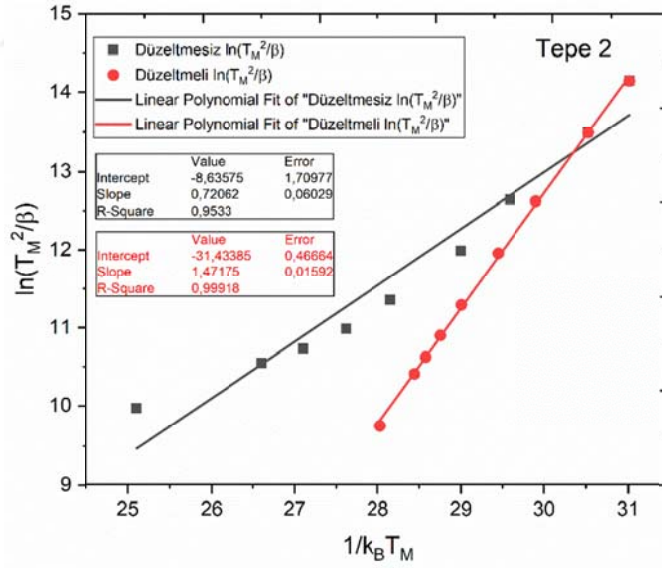
TL ışıma eğrisinde tepelerin tuzak parametrelerinin hesaplanmasında, tepe maksimumuna karşılık gelen tepe sıcaklık değerinin belirlenmesi yeterli olacaktır. Yapılan her bir ısıtma hızındaki ölçümlerde elde edilen TL ışıma eğrisinin tepe noktasına karşılık gelen  $T_m$  değerleri belirlenir. Belirlenen  $T_m$  değerleri kullanılarak  $\ln(T_m^2/\beta)$ 'nın  $1/kT_m$ 'ye karşı grafiği çizdirilir. Grafikten elde edilen doğrunun eğimi  $(E_a/k)$ 'ya kesişimi ise  $(E_a/ks)$ 'ye eşittir. Buradan elde edilen değerler kullanılarak aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ) ve frekans faktörü ( $s$ ) değerleri hesaplanır (Chen ve Winer, 1970; Hoogenstraten, 1958).

Bu çalışmada Tepe 1 ve Tepe 2 üzerinde analiz yapılmıştır. Bu tepelerin  $(1/T_m)$  ye karşı  $\ln(T_m^2/\beta)$  grafikleri çizilmiştir. Isısal gecikmeden kaynaklanan sıcaklık düzeltmeleri yapılmış ve düzeltmeli sıcaklık değerleri ile de  $(1/T_m)$  ye karşı  $\ln(T_m^2/\beta)$  grafikleri tekrar çizilmiştir. Her iki durum içinde aktivasyon enerjileri ve frekans faktörleri hesaplanmıştır.

% 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu için her bir ısıtma hızına göre elde edilen TL ışıma eğrilerinin dozimetrik tepelerinin maksimum TL şiddetlerine karşılık gelen maksimum sıcaklık (deneysel  $T_M$  ve sıcaklık düzeltmesi yapılmış  $T_M$ ) değerlerinden yararlanarak,  $\ln(T_M^2/\beta)$  nın  $1/T_M$  ye karşı grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.10-4.11).



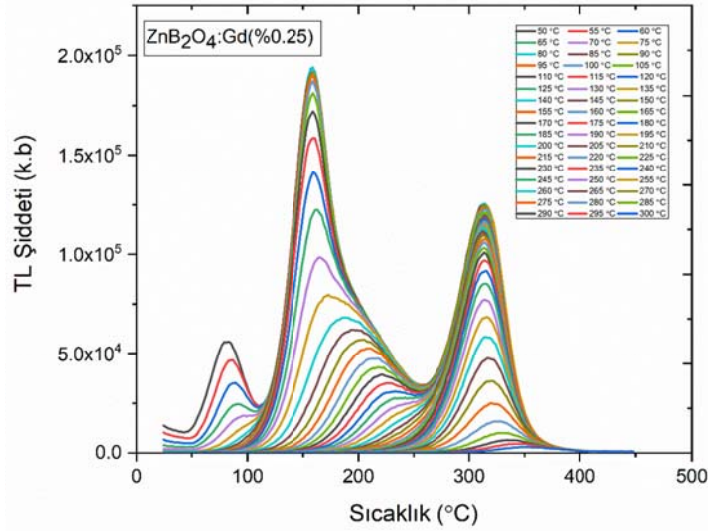
Şekil 4.10. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı ısıtma hızlarında elde edilen Tepe 1 için sıcaklık gecikmeli ve düzeltilmiş grafiği.



Şekil 4.11. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun farklı ısıtma hızlarında elde edilen Tepe 2 için sıcaklık gecikmeli ve düzeltilmiş grafiği.

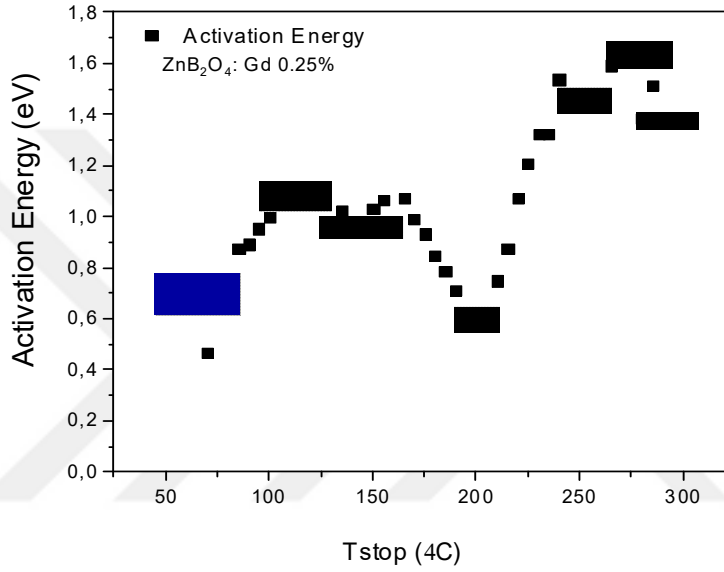
#### 4.3.5. Başlangıç artış (IR, Initial Rise) yöntemi ile ilgili bulgular

Sığ tuzaklardan gelen kararsız sinyallerin malzemenin ana dozimetrik TL eğrisine olan katkısı, radyasyon dozu ölçümlerinde büyük belirsizliklere neden olmakta ve bu nedenle yapılan ölçüm gerçeği yansıtamamaktadır. Bu yüzden bu etkiyi ortadan kaldırmak veya minimize etmek için,  $T_{\text{maksimum}}-T_{\text{durma}}$  tekniği kullanılabilir. Bu teknikte, % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu 5 Gy beta radyasyon dozuna maruz bırakıldıktan sonra sabit bir ısıtma hızı ( $2^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ ) ile ilk ışıma tepenin düşük sıcaklık kısmına karşılık gelen  $50^{\circ}\text{C}$ 'deki ( $T_{\text{durma}}$ ) sıcaklığa kadar ısıtılarak ısısal temizleme ( $T_{\text{durma}}$ ) işlemi uygulanır. Isıtılan örnek hızlı bir şekilde oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılır. Isısal temizleme işleminden sonra, ışıma eğrisinin geri kalanının elde edilmesi için fosfor, oda sıcaklığından  $450^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar tekrar ısıtılıp  $T_{\text{maksimum}}$  belirlendi. Daha sonra  $T_{\text{durma}}$ 'ın yeni bir değeri kullanılarak benzer bir şekilde her ışınlamadan sonra  $50^{\circ}\text{C}$ 'den  $300^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar  $5^{\circ}\text{C}$ 'lik artışlarla ısısal temizlenme yapıldı (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun  $5^{\circ}\text{C}$ 'lik artışlarla  $50^{\circ}\text{C}$  ve  $300^{\circ}\text{C}$  aralığındaki ön ısıtma sıcaklıklarına ilişkin ışıma eğrileri

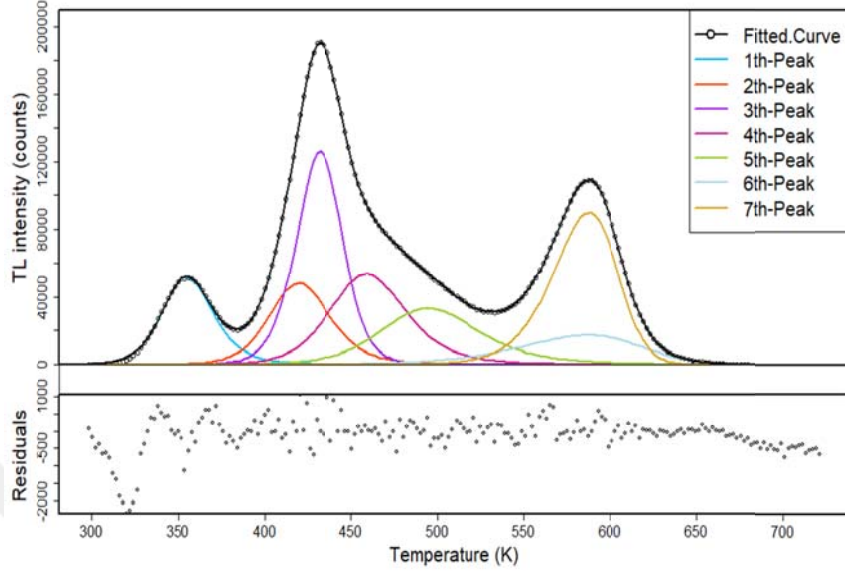
% 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforu için IR metodu kullanılarak her bir ısıtma eğrisi için tepe maksimum şiddetinin % 10'ı ile % 15 aralığındaki veriler kullanılarak  $\ln(I)$ 'nın  $1/T$ 'ye göre grafiği çizilmiş olup aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Başlangıç artış yöntemi ile  $T_{durma}$  (ön ısıtma) sıcaklıkları kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjileri

#### 4.3.6. Bilgisayarla ısıtma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi ile ilgili bulgular

Bu çalışmada % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun tuzak parametreleri CGCD analizi ile teorik olarak tahmin edildi (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. 5 Gy beta radyasyon dozuna maruz bırakılmış % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun CGCD yöntemi ile analizi

5 Gy beta dozuna maruz bırakılmış % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforuna ait ısıma eğrisi incelendiğinde, ısıma eğrisinin birbirinden bağımsız ve belirgin bir şekilde üç ısıma tepesinden meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.12). Ancak bu ısıma eğrisi CGCD yöntemi ile analiz edildiğinde birbirine çok yakın ve iç içe girmiş 7 ısıma tepesinden (Şekil 4.14) oluştuğu görülmektedir. Bu ısıma tepelerine ait tuzak parametreleri Çizelge de verilmiştir. FOM değeri ise 0.674 olarak hesaplanmıştır.

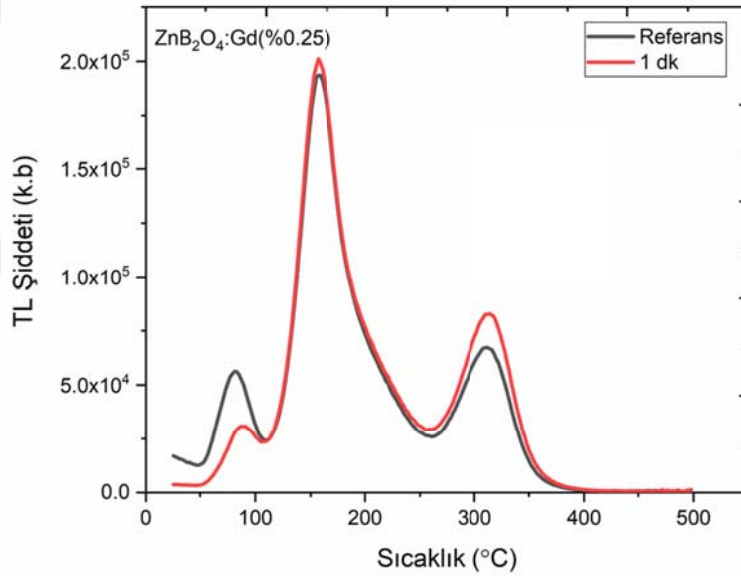
Çizelge 4.1. % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforuna ait tuzak parametreleri

|        | $T_M$ (°C) | $\mu_g$ | $E_{ort}$ (eV) | Kinetik parametre | $s$ (s <sup>-1</sup> ) |
|--------|------------|---------|----------------|-------------------|------------------------|
| Tepe 1 | 81,73      | 0.540   | 1,03           | 2                 | 8,66E+13               |
| Tepe 2 | 139,95     | 0.477   | 1.36           | GOK               | 7,84E+15               |
| Tepe 3 | 158,53     | 0.500   | 1.62           | 2                 | 2,04E+18               |
| Tepe 4 | 190,02     | 0.500   | 1,26           | 2                 | 7,28E+12               |
| Tepe 5 | 214,77     | 0.462   | 0,69           | 1                 | 9,09E+05               |
| Tepe 6 | 302,18     | 0.432   | 0,65           | 1                 | 2,42E+04               |
| Tepe 7 | 314,78     | 0,468   | 1,78           | GOK               | 2,33E+14               |

#### 4.3.7. Sönüm (fading) ile ilgili bulgular

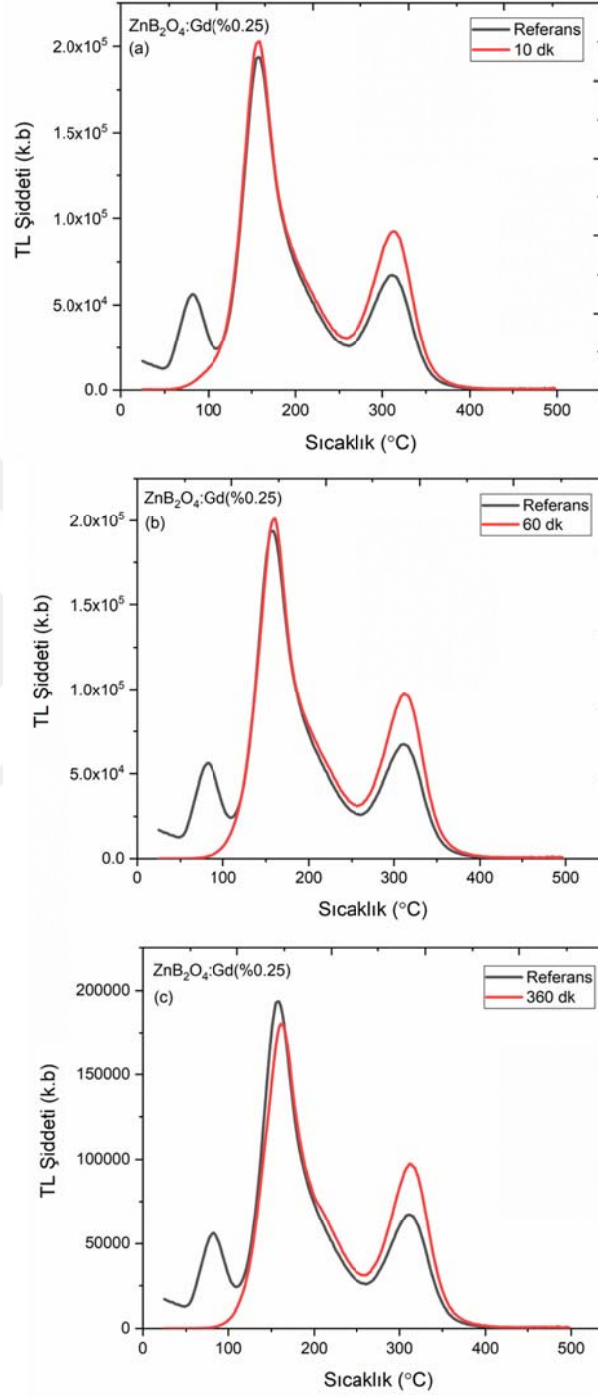
TL dozimetresi yapımında yeni malzemelerin kullanıma kazandırılabilmesi amacıyla üretilen fosforların radyasyona maruz bırakıldıktan sonra ışık almayan bir ortamda bekletilme sonucunda TL şiddetinde azalmalar olduğu (solma/sönme) gözlemlenmektedir. TL şiddetindeki bu azalma solma/sönme olarak adlandırılır. İletim bandına yakın bir yerde bulunan sık tuzaklardaki elektronların ömürleri derin tuzaklardaki elektronlara göre daha azdır ve çok hızlı solmaya uğrarlar (özellikle de 200 °C'nin altındaki sıcaklıklardaki tuzaklarda tuzaklanmış elektronlar). İdeal bir dozimetrik fosforda TL maksimasının 200-300 °C arasında olması beklenir. Bu sıcaklık aralığındaki tuzaklanmış elektronların ömürleri yüksektir. Buna karşılık oda sıcaklığında bile bazı yüksek sıcaklıklardaki TL ışıma maksimalarının düştüğü gözlemlenmiştir (Wintle, 1973). Bunun sebebi; (i) kuantum mekaniksel olarak tünelleme yolu ile tuzaklanmış elektronların yeniden birleşme merkezlerine direkt olarak geçmeleri (Visocekas ve ark.1976), (ii) tuzakları meydana getiren bazı iyonların fosforu oluşturan kristal yapıdan difüzyon ile uzaklaşmasıdır (Templer, 1986)

% 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun solma özelliğinin incelenmesi için, 5 Gy radyasyon dozuna maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında nem, sıcaklık ve herhangi bir ışık kaynağından etkilenmeyecek şekilde karanlık bir ortama örnek saklama haznesine daha önceden belirlenmiş (1 dk, 10 dk, 1 saat, 6 saat, 1 gün, 2 gün, 1 hafta ve 35 gün) zaman diliminde saklandı. Belirlenen süre dolduktan hemen sonra fosforun TL okuması yapılarak TL ışıma eğrisi kaydedilmiştir. Eş zamanlı olarak aynı malzemenin aynı koşullar altında 5 Gy radyasyon dozuna maruz bırakılmasının ardından TL okuması yapılarak TL ışıma eğrileri karşılaştırılarak sönmeme miktarları tespit edildi.

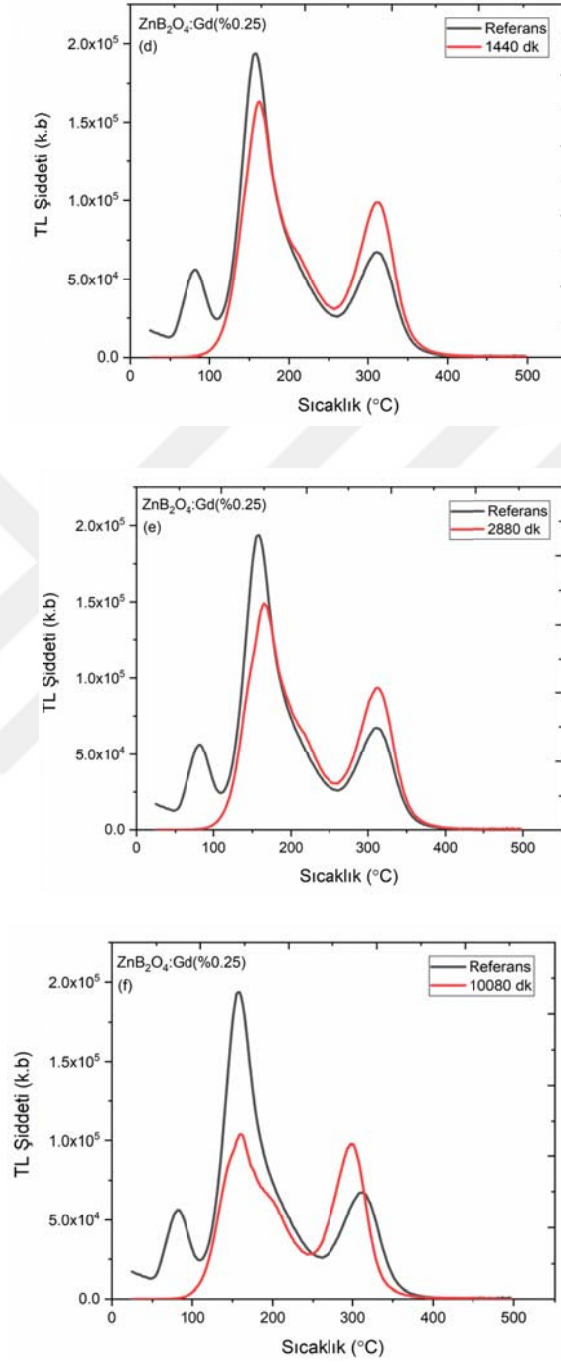


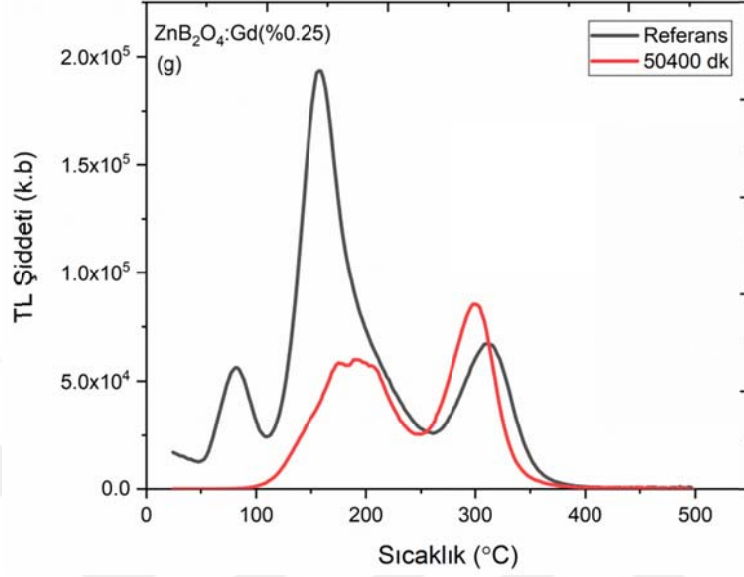
Şekil 4.15. % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun 1 dakikalık bekleme süresi sonunda TL ışıma eğrisinde meydana gelen değişim

Benzer şekilde daha önce belirlenmiş olan süreler (10 dk, 1 saat, 6 saat, 1 gün, 2 gün, 1 hafta ve 35 gün) için de aynı protokol uygulanarak TL ışıma eğrileri kaydedilerek gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır (Şekil 4.16.a-g).



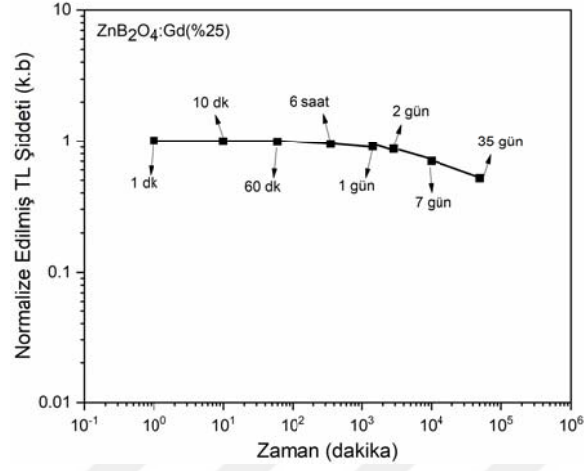






Şekil 4.16. **a-g.** % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun 10 dk, 1 saat, 6 saat, 1 gün, 2 gün, 1 hafta ve 35 gün günlük bekleme süresi sonunda TL ışıma eğrisinde meydana gelen değişim

% 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun sönmüleme miktarının belirlenmesi amacıyla belirlenen süre (1 dk, 10 dk, 1 saat, 6 saat, 1 gün, 2 gün, 1 hafta ve 35 gün) sonunda ilk okumaya göre normalize edilmiş TL sinyalinin değişim garfı Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun ilk okumaya göre normalize edilen TL sinyalinin zamana karşı sönümlene grafiği

Yapılan deneyler sonucunda sönümlene miktarının çok düşük olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, TL dozimetrik malzeme geliştirmek amacıyla sentezlenmiş olan katkısız ve Gd katkılı çinko borat ( % 0.25, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4, %5, % 7 ve % 10) fosforlarının karakterizasyonu ve termoluminesans özellikleri araştırılmıştır. Bunun için ilk olarak, yanma yöntemi kullanılarak fosforların sentezlenmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen fosforlar 10 dakika öğütme ile toz haline getirildi. Toz haline getirilen fosforların yapısındaki organik bileşiklerin yapıdan uzaklaştırılması için 550°C sıcaklıkta 30 dakika boyunca kalsine edildi. Kalsineden sonra 10 dakika boyunca tekrar agat havanda öğütüldü. Kristal yapının tam oluşması için bu tozlu numuneler 900 °C'de 1 saat boyunca sinterlendi. Öğütülen fosforlara şekil vermek ve atomlar arası bağlantıları güçlendirmek için hidrolik presle 20 bar basınç uygulanarak 28 mg'lık 6 mm çapında ve 0,70 mm kalınlığında silindirik peletler elde edilerek ölçüme hazır hale getirildi.

İkinci olarak, sentezlenen fosforların kristal yapılarının belirlenmesi XRD yöntemi ile ve dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde ise Lexsyg Smart TL/OSL Okuyucu cihazı kullanılmıştır. Katkısız ve katkılı tüm fosforların XRD kırınım desenlerinin konum ve şiddetleri JCPDS 39-1126 nolu PDF kartında verilen  $ZnB_2O_4$  ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun 0.1 ile 50 Gy arasında doğrusal fonksiyon ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiş. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforunun tekrarlanabilirliği 15 döngüye kadar test edilmiştir ve ilk okumaya göre % 4 oranında sapma göstermiştir. Bu sapma deneysel hata sınırları içerisinde olduğundan dolayı, sentezlenen TL malzemesinin iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olduğu söylenebilir.

Farklı ısıtma hızları yöntemi kullanılarak % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu için gerçekleştirilen deneylerin sonucunda, her üç TL ısıtma tepesi de artan ısıtma hızına bağlı olarak yüksek sıcaklık bölgelerine doğru kaymaktadır. Bu kaymanın ısısal gecikme olayının bir sonucu olduğu belirlenmiştir.

Isıtma hızının artışıyla birlikte Tepe 1 ve Tepe 2 ısıma tepelerine ilişkin TL şiddetinin azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın ısısal sönüm olayının bir sonucu olduğu belirlenmiştir. Tepe 3 ısıma tepesinin TL şiddetinin ise arttığı görülmektedir. % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu için her bir ısıtma hızına göre elde edilen TL ısıma eğrilerinin dozimetrik tepelerinin maksimum TL şiddetlerine karşılık gelen maksimum sıcaklık (deneysel  $T_M$  ve sıcaklık düzeltmesi yapılmış  $T_M$ ) değerlerinden yararlanarak tuzak parametreleri hesaplandı.  $T_{maksimum}-T_{durma}$  tekniği ile 50 °C'den 300 °C'ye kadar 5°C'lik artışlarla ısısal temizlenme yapıldı. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforu için  $T_{durma}$  sıcaklıklarına karşılık gelen aktivasyon enerji grafiği çizildi.

CGCD yöntemi ile ilgili deneylerin sonuçlarına göre, 5 Gy beta dozuna maruz bırakılmış % 0.25 Gd katkılı çinko borat fosforuna ilişkin ısıma eğrisi analiz edildiğinde bir birine çok yakın ve iç içe girmiş 7 ısıma tepesinden oluştuğu tespit edilmiştir.

5 Gy radyasyon dozuna maruz bırakılan % 0,25 Gd katkılı çinko borat fosforunun sönümlenme miktarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonucunda, düşük sıcaklık tepelerinin hızlı bir şekilde sönüme uğradıkları gözlenmiştir. Bu durumun, düşük sıcaklıklarda sık tuzaklara yakalanan elektronların, örneklerin karanlık ortamda bekletilmesi sırasında tünelleme olayının etkisi ile tuzaklardan kurtulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, gerçekleştirilen solma deneyleri sırasında örnek oda sıcaklığında muhafaza edildiği için ısı etkisiyle solma olayının gerçekleşme oranı düşüktür.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda, ev sahibi malzemeye lantanit gruplarından ikili ya da üçlü iyon katkılandırması yapılarak en uygun TL dozimetrik malzeme geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Aitken, M.J., 1998. An Introduction to Optical Dating. The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-stimulated Luminescence. Oxford University Press, New York, 267pp.
- Akca, S., Oglakci, M., Portakal, Z.G., Kucuk, N., Bakr, M., Topaksu, M., Can, N., 2019. Thermoluminescence analysis of beta irradiated  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$ :  $\text{Pr}^{3+}$  phosphors synthesized by a wet-chemical method. Radiation Physics and Chemistry, 160: 105-111pp.
- Anishia, S.R. Jose, M.T., Annalakshmi, O., Ponnusamy, V., Ramasamy, V., 2010. Dosimetric properties of rare earth doped  $\text{LiCaBO}_3$  thermoluminescence phosphors. J. Lumin., 130: 1834pp.
- Annalakshmi, O., 2013. Dosimetric characteristics of borate based thermoluminescent materials. Homi Bhabha National Institute,
- Annalakshmi, O., Jose, M.T., Madhusoodanan, U., Subramanian, J., Venkatraman, B., Amarendra, G., Mandal, A.B., 2014. Thermoluminescence dosimetric characteristics of thulium doped  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  phosphor. Journal of Luminescence, 146: 295-301pp.
- Annalakshmi, O., Jose, M.T., Sridevi, J., Venkatraman, B., Amarendra, G., Mandal, A.B., 2014. Kinetic parameters and TL mechanism in cadmium tetra borate phosphor. J. Lumin., 147: 284pp.
- Azorín, J., 1986. Determination of thermoluminescence parameters from glow curves. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 11: 159-166pp.
- Azorín, J., 1986. Determination of thermoluminescence parameters from glow curves. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 11:159-166pp.
- Balci-Yegen, S., Yüksel, M., Kucuk, N., Karabulut, Y., Ayvacikli, M., Can, N., Topaksu, M., 2018. Thermoluminescence dose and heating rate dependence and kinetic analysis of  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$ : $0.05\text{Dy}^{3+}$  phosphor. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B, 416: 50-54pp.

- Balian, H.G., and Eddy, N.W., 1977. Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectral peaks. *Nuclear Instruments and Methods* 145: 389-395pp.
- Becker, K., 1974, The discovery of thermoluminescence. *Health Phys.*, 27: 321pp.
- Bulcar, K., Dogan, T., Akça, S., Yüksel, M., Ayvacikli, M., Karabulut, Y., Kucuk, N., Canimoglu, A., Can, N., Topaksu, M., 2018. Thermoluminescence behavior of  $\text{Sm}^{3+}$  activated  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  phosphors synthesized using low temperature chemical synthesis method. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*, 428: 65-71pp.
- Bulcar, K., Kucuk, N., Topaksu, M., Can, N., 2019. Thermoluminescence spectra of Tm doped  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  phosphor prepared via a wet-chemical synthesis. *Applied Radiation and Isotopes*, 147: 177-181pp.
- Burak, Y.A.V., Adamiv, V.T., Antonyak, O.T., Malynych, S.Z., Pidzyrailo, M.S., Teslyuk, I.M., 2005. Thermoluminescence in doped single crystals  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:A}$  (A = Cu, Ag). *Ukr. J. Phys.*, 50(10): 1153pp.
- Canada, 19 pp.
- Chen, H., Wang, Y., 2019. Photoluminescence and cathodoluminescence properties of novel rare-earth free narrow-band bright green-emitting  $\text{ZnB}_2\text{O}_4\text{:Mn}^{2+}$  phosphor for LEDs and FEDs. *Chemical Engineering Journal*, 361: 314-321pp.
- Chen, R., and McKeever, S.W.S., 1997. Theory of thermoluminescence and related phenomena. World Scientific, Singapore, 576p.
- Chen, R., and Pagonis V., 2011. Thermally and optically stimulated luminescence: a simulation approach, A John Wiley & Sons, New Jersey, 419p.
- Chen, R., and Winer, S.A.A, 1970. Effects of various heating rates on glow curves. *Journal of applied physics*, 41 (13): 5227-5232.

- Chen, R., Fogel, G., and Lee., C. K., 1996. A New look at the models of the superlinear dose dependence of thermoluminescence. *Radiation Protection Dosimetry*, 65: 63-68pp.
- Daniels, F., Boyd, C.A., and Saunders, D.F., 1953. Thermoluminescence as a research tool. *Science*, 117: 343-349pp.
- Dogan, T., Yüksel, M., Akça, S., Portakal, Z.G., Yegen, S.B., Kucuk, N., Topaksu, M., 2017. Normal and anomalous heating rate effects on thermoluminescence of Ce-doped  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$ . *Applied Radiation and Isotopes*, 128: 256-262pp.
- Furetta, C., 2003. *Handbook of thermoluminescence*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 450pp.
- Furetta, C., Prokic, M., Salamona, R. and Kitis, G., 2000. Dosimetric characterisation of a new production of  $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy,Na}$  thermoluminescent material. *Appl. Radiat. Isot.*, 52: 243pp.
- Gaft, M., Reisfeld, R., Panczer, G., 2015. *Modern Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials*, Springer Mineralogy, Second Edition, 606pp.
- Garlick, G.F.J, and Gibson, A.F., 1948. The electron trap mechanism of luminescence in sulphide and silicate phosphors. *Proceedings of the physical society* 60: 574-589pp.
- Germany, 3 pp.
- Hoogenstraaten, W., 1958. Electron traps in zinc sulphide phosphors. *Philips Research Report* 13: 515-693pp.
- Horowitz, Y. S., and Yossian, D., 1995. Computerised Glow Curve Deconvolution: Application to Thermoluminescence Dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 60 (1): 5-12pp.
- Hsu, P. C., and Wang, T. K., 1986. On the annealing procedure of  $\text{CaF}_2\text{:Dy}$ . *Radiation Protection Dosimetry*, 16(3): 253-256pp.
- Jiang, L.H., Zhang, Y.L., Li, C.Y., Hao, J.Q., Su, Q., 2007. Thermoluminescence properties of  $\text{Ce}^{3+}$ -doped  $\text{LiSr}_4(\text{BO}_3)_3$  phosphor. *Mater. Lett.*, 61: 5107pp.



- Jose, M.T., Anishia, S.R., Annalakshmi, O., Ramasamy, V., 2011. Determination of thermoluminescence kinetic parameters of thulium doped lithium calcium borate. *Radiat. Meas.*, 46(10): 1026pp.
- Kalita, J.M., Wary, G., 2012. Effect on thermoluminescence parameters of biotite mineral due to thermal quenching. *J. Lumin.*, 132 (11): 2952pp.
- Kelemen, A., Holovey, V., Ignatovych, M., 2008. Relative yields of radioluminescence and thermoluminescence in manganese- and silver-doped lithium tetraborate phosphors. *Radiat. Meas.*, 43: 375pp..
- Khalilev, V.D., Suzdal, N.V., 2004. Crystallization capacity of  $\text{ZnB}_2\text{O}_4\text{-NaPO}_3$  glasses, *Glass Ceram*, 61: 145–147pp.
- Kim, J.R., Kim, D.W., Cho, I.S., Kim, B.S., An, J.S., Hong, K.S., 2007. *J. Eur. Ceram. Soc.* 27: 3075pp.
- Kim, J.R., Kim, D.W., Cho, I.S., Kim, B.S., An, J.S., Hong, K.S., 2007. Low temperature sintering and microwave dielectric properties of  $\text{Ba}_3\text{Ti}_5\text{Nb}_6\text{O}_{28}$  with  $\text{ZnO-B}_2\text{O}_3$  glass additions for LTCC applications. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 27: 3075-3079pp.
- Kirsh, Y., 1992. Kinetic analysis of thermoluminescence. *Physica status solidi*, 129:15-48pp.
- Kitai, A., 2008. *Luminescent Materials and Applications*, John Wiley & Sons,
- Kitis, G., Spiropulu, M., Papadopoulos, J., Charalambous, S., 1993. Heating rate effects on the TL glow-peaks of three thermoluminescent phosphors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 73(3): 367-372pp.
- Kitis, G., Tuyn, J.W.N., 1999. Correction for temperature lag and thermal gradient effects arising during thermoluminescence readout. *Radiation Protection Dosimetry*, 84(1-4):371-374pp.
- Kucuk, N., 2019. Thermoluminescence characteristics of terbium doped zinc borates. *Crystals*, 9: 557: 1-10pp.

- Kucuk, N., Gozel, A.H., Yüksel, M., Dogan, T., Topaksu, M., 2015. Thermoluminescence kinetic parameters of different amount La-doped ZnB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Applied Radiation and Isotopes*, 104: 186-191pp.
- Kucuk, N., Kaynar, Ü.H., Akca, S., Alajlani, Y., Yin, L., Wang, Y., Garcia Guinea, J., Bulcar, K., Dogan, T., Karabulut, Y., Ayvacikli, M., Canimoglu, A., Topaksu, M., Can, N., 2020. Enhancing the blue luminescence behaviour of the Li co-doped novel phosphor ZnB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Tm<sup>3+</sup>. *Journal of Alloys and Compounds*, 838: 155587pp.
- Kucuk, N., Kucuk, I., Cakir, M., Keles, S.K., 2013. Synthesis, thermoluminescence and dosimetric properties of La-doped zinc borates. *Journal of Luminescence*, 139: 84-90pp.
- Kumar, M., Chourasiya, G., Bhatt, B.C., Sunta, C.M., 2010. Dependence of peak height of glow curves on heating rate in thermoluminescence. *J. Lumin.*, 130: 1216pp.
- Liu, L., Zhang, Y., Hao, J., Li, C., Tang, Q., Zhang, C., Su, Q., 2005. Thermoluminescence characteristics of terbium-doped Ba<sub>2</sub>Ca(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> phosphor. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 202(14): 2800pp.
- Liu, W.R., Lin, C.C., Chiu, Y.C., Yeh, Y.T., Jang, S.M., Liu, R.S., 2010. ZnB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Bi<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup>: a highly efficient, red-emitting phosphor. *Optics Express*, 18 (3): 2946–2951pp.
- Manam, J., Sharma, S.K., 2003. Thermally stimulated luminescence studies of undoped and doped CaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> compounds. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron*, 6(4): 465pp.
- Mandowski, A., Bos, A.J.J., 2011. Explanation of anomalous heating rate dependence of thermoluminescence in YPO<sub>4</sub>:Ce<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup> based on the semilocalized transition (SLT) model. *Radiation Measurements*, 46, 12, 1376- 1379pp.
- May, C., Partridge, J., 1964. Thermoluminescent kinetics of alpha-irradiated alkali halides. *The Journal of Chemical Physics* 40: 1401-1409pp.

- McKeever, S.W.S., 1985. Thermoluminescence of solids. Cambridge University Press, England, 450pp.
- Misra, S.K., Eddy, N.W., 1979. IFOM, a formula for universal assessment of goodness-of-fit of gamma ray spectra. Nuclear Instruments and Methods 166 (3): 537-540pp.
- Mu, Z., Hu, Y., Chen, L., Wang, X., Chen, R., Wang, T., Fu, Y., Xu, J., 2014. Synthesis of  $\text{Bi}^{3+}$  and  $\text{Gd}^{3+}$  doped  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  for evaluation as potential materials in luminescent display applications. Displays, 35: 147-151 pp.
- Nasdala, L., Götze, J., Hanchar, J., et al, 2004b. Luminescence techniques in Earth sciences. In: Biran A, Lubowitzky E (eds) EMU notes in mineralogy, spectroscopic methods in mineralogy. Mineralogical Society of America, Chantilly, vol 6/2, pp 43-91 pp.
- Nicholas, K.H., and Woods, J., 1964. The evaluation of electron trapping parameters from conductivity glow curves in cadmium sulphide. British Journal of Applied Physics, 15 (7):783-795pp.
- Oglakci, M., Akça, S., Halefoglu, Y.Z., Dogan, T., Ayvacikli, M., Karabulut, Y., Topaksu, M., Can, N., 2019. Characterization and thermoluminescence behavior of beta irradiated  $\text{NaBaBO}_3$  phosphor synthesized by combustion method. Ceramics International, 45: 7011-7017pp.
- Pagonis, V., Kitis, G., Furetta, C., 2006. Numerical and practical exercises in thermoluminescence. Springer, New York, 208pp.
- Pang, L.X., Wang, H., Zhou, D., Zhou, H.F., Yao, X., 2008. Low temperature firing and microwave dielectric properties of  $\text{Ca}[(\text{Li}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.8}\text{Ti}_{0.2}]\text{O}_3$ -delta ceramics with  $\text{ZnB}_2\text{O}_4$  glass addition. Int. J. Appl. Ceram. Technol., 5: 341-346pp.

- Portakal, Z.G., Dogan, T., Balci Yegen, S., Küçük, N., Ayvacikli, M., Garcia Guinea, J., Canimoglu, A., Karabulut, Y., Topaksu, M., Can, N., 2017. Luminescence characteristics of  $\text{Dy}^{3+}$  incorporated zinc borate powders. *Journal of Luminescence*, 188: 409-417pp.
- Prokic, M., 2002. Dosimetric characteristics of  $\text{Li}_2\text{BO}_7\text{:Cu}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{P}$  solid TL detectors. *Radiat. Prot. Dosim.*, 100 (1-4): 265pp.
- QiuHong, Z., Jing, W., Mei, Z., Weijia, D., Qiang, S., 2006. Luminescence properties of  $\text{Sm}^{3+}$  doped  $\text{Bi}_2\text{ZnB}_2\text{O}_4$ . *Journal of Rare Earths*, 24: 392-395pp.
- Randall, J.T. and Wilkins, M.H.F. 1945. Phosphorescence and electron traps-I. The study of trap distributions. *Proc. R. Soc. London A*, 184: 366-389pp.
- Rao, M.R., Rao, B.S., Rao, N.P., Somaiah, K., Murthy, K.V.R., 2009. Dosimetric characteristics of  $\text{MgB}_4\text{O}_7$ ,  $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Mn}$  and  $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Cu}$  phosphors. *Indian J. Pure Appl. Phys.*, 47: 456pp.
- Rasheedy, M.S., 2005. Method of hoogenstraaten as a tool for obtaining the trap parameters of general-order thermoluminescence glow peaks, *Radiation. Effect & Defect in Solids*, 160: 383-390pp.
- Richter, D., Richter, A., and Dornich, K., 2015. Lexsyg smart-a luminescence detection system for dosimetry, material research and dating application. *Geochronometria*, 42: 202-209pp.
- Ronda, C.R., 2008. *Luminescence from Theory to Applications*, Wiley-VCH,
- Santiago, M., Grasselli, C., Caselli, E., Lester, M., Lavat, A., Spano, F., 2001. Thermoluminescence of  $\text{SrB}_4\text{O}_7\text{:Dy}$ , *Phys. Stat. Sol. (a)* 185(2): 285pp.
- Schulman, J.H., Kirk, R.D., West, E.J., 1967. Proceedings of the international conference on luminescence dosimetry. CONF-650637, Stanford University.
- Sunta, C.M., 2015. *Unraveling thermoluminescence*. Springer Press, London, 188pp.

- Tarashchan, A.N., and Waychunas, G., 1995. Interpretation of luminescence spectra in terms of band theory and crystal field theory: Sensitization and quenching, photoluminescence, radioluminescence, and cathodoluminescence. Methods and Instrumentations, Springer Verlag, 124-35pp.
- Templer, R., 1986. Radiat. Prot. Dosim. 17: 493pp.
- Trowbridge, J., Burbank, J. E., 1898. Thermoluminescence of natural substances. Am. J. Sci. Ser., 4(5): 55pp.
- Urbach, F., 1930. Wiener Ber., 139, 363pp.
- Vij, D.R., 1998. Luminescence of solids. Plenum Press, New York and London.
- Visocekas, R., 1988. Comparison between tunnelling afterglows following alpha or beta irradiations. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 14: 163-168pp.
- Wick, F. G., 1924. A Spectroscopic Study of the cathodo-luminescence of Fluorite. Phys. Rev., 24(3): 272-282pp.
- Wick, F.G. and Gleason, J.M., 1924. J. Opt. Soc. Am., 9: 639pp.
- Wick, F.G. and Slattery, M.K., 1927. J. Opt. Soc. Am., 14: 125pp.
- Wintle, A., Huntley, D., 1980. Thermoluminescence dating of ocean sediments. Canadian Journal of Earth Sciences, 17: 348-360pp.
- Wintle, A.G., 1973. Anomalous Fading of Thermo-luminescence in Mineral Samples. Nature, 245: 143-144pp.
- Wu, M., He, X.B., Shen, Z.S., Qu, X.H., 2009. Preparation, crystallization, and wetting of ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass-ceramics for sealing to Kovar. Int. J. Miner. Metall. Mater., 16: 586–591pp.
- Yan, P.X., Liu, J.Z., Wang, J., Wu, Z.G., 2004. Appl. Phys. Lett. 85, 4747pp.
- Yan, P.X., Liu, J.Z., Wang, J., Wu, Z.G., 2004. Overgrowing single crystalline ZnB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> on multiwall carbon nanotubes: Straightening the curly tubes, Appl. Phys. Lett., 85: 4747-4749pp.

- Yukihara, E.G., McKeever, S.W.S, 2011. Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications. Wiley Press, New Jersey, 362pp.
- Yüksel, M., 2013. Doğal ve katkılanmış bor minerallerinin dozimetre geliştirmek amacıyla termoluminesans (TL) yöntemi kullanılarak çalışılması. Çukurova Üniversitesi., Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- Yüksel, M., Dogan, T., Balci-Yegen, S., Akca, S., Portakal, Z.G., Kucuk, N., Topaksu, M., 2018. Heating rate properties and kinetic parameters of thermoluminescence glow curves of La-doped zinc borate. Radiation Physics and Chemistry, 151: 149-155pp.
- Zhang, X., Qiao, X. and Seo, H.J., 2010. Luminescence properties of novel  $Ce^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  doped  $NaSr_4(BO_3)_3$  phosphors. Current Applied Physics, 11: 442-446pp.
- Zhang, Z., Li, C., Han, C., Li, J., Jia, Y., Wang, D., 2016. High-brightness  $Sm^{3+}$ -doped  $La_{0.67}Mg_{0.5}W_{0.5}O_3$  red phosphor for NUV light-emitting diodes application. Journal of Alloys and Compounds, 654: 146-150pp.
- Zheng, Y.H, Qu, Y.N, Tian, Y.M, Rong, C.G, Wang, Z.C, Li, S.L, Chen, X., Ma, Y.J, 2009. Effect of  $Eu^{3+}$ -doped on the luminescence properties of zinc borate nanoparticles. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects, 349: 19-22pp.
- Zou, X., and Toratani, H., 1995. Evaluation of spectroscopic properties of  $Yb^{3+}$ -doped glasses. Physical Review B, 52: 15889-15897pp.



## ÖZGEÇMİŞ

Semi ATASÖZ, İlk, orta ve lise öğrenimimi Adana’da tamamladı. 2001 yılında Dicle Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden mezun oldu(1997-2001). 2003 yılında vatani görevimi tamamladı. Uzun yıllar Adana’daki çeşitli öğretim kurumlarında fizik öğretmenliği yaptı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Sürekli Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezinde İş ve Meslek Danışmanlığı Mesleki Yeterlilik Belgesi (Seviye 6) sınavlarına girerek İş ve Meslek Danışmanlığı belgesini aldı. 18.02.2013 te Çalışma ve İş Kurumu Adana İl Müdürlüğüne İş ve Meslek Danışmanı olarak atandı. Halen aynı kurumda görevine devam etmektedir.