



**DİSPORSİYUM KATKILI ÇİNKO BORAT FOSFORLARIN
TERMOLÜMİNESANS YÖNTEMİ KULLANILARAK DOZİMETRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Damla YAMAN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİSPORSİYUM KATKILI ÇİNKO BORAT FOSFORLARIN
TERMOLÜMİNESANS YÖNTEMİ KULLANILARAK DOZİMETRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Damla YAMAN

Doç. Dr. Nil KÜÇÜK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA-2017

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Damla YAMAN tarafından hazırlanan "Disprosiyum Katkılı Çinko Borat Fosforların Termolüminesans Yöntemi Kullanılarak Dozimetrik Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Nil KÜÇÜK

Başkan: Doç. Dr. Nil KÜÇÜK
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye: Yrd. Doç. Dr. Cengiz AKAY
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye: Doç. Dr. Kadir ERTÜRK
Namık Kemal Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Ali Bayram

Yukarıdaki sonucu onaylarım
Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü

2.12.2017

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, - görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

02.09.2017

İmza

Damla YAMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİSPORSİYUM KATKILI ÇİNKO BORAT FOSFORLARIN TERMOLÜMINESANS YÖNTEMİ KULLANILARAK DOZİMETRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Damla YAMAN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nil KÜÇÜK

Bu çalışmada, beta ışınlanmasıyla disporsiyum (Dy^{+3}) katkılı çinko borat (ZnB_2O_4) fosforlarının termolüminesans (TL) araştırmaları rapor edilmiştir. % 1, % 2, % 3, % 4, % 5 ve % 10 Dy- katkılı ZnB_2O_4 fosforlar, başlangıç oksitleri [çinko oksit (ZnO), borik asit (H_3BO_3) ve katkı yapılacak elementin oksidi (Dy_2O_3)] kullanılarak nitrik asit yöntemiyle hazırlanmıştır. Hazırlanan toz örnekler, X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Toz örneklerin beta radyasyon dozuna bağlılığı, termolüminesans tekniğiyle araştırılmıştır. Toz örneklerin TL özellikleri, Risø TL/OSL DA-20 okuyucu sistemiyle ölçülmüştür. TL emisyonu, 330-480 nm arasında ileten bir filtre paketi (Schott BG-39 ve Corning 7-59) yoluyla dedekte edilmiştir. TL ışına eğrileri, 450 °C'ye kadar 5 °C/s sabit ısıtma oranında ısıtma ile elde edilmiştir. $^{90}Sr/^{90}Y$ beta radyasyonuna (40 mCi) maruz bırakılan toz örneklerin doz-cevap eğrileri, 143 mGy-60 Gy doz aralığında araştırılmıştır. Toz örneklerin artan radyasyon dozları için doz-cevapları ve minimum dedekte edilebilir doz değerleri belirlenmiştir. Beta radyasyonuna karşı $ZnB_2O_4:Dy$ toz örneklerinin TL-doz cevapları, oldukça lineer bir cevap göstermiştir. 207-232 °C'de yüksek sıcaklık piki gösteren %3 Dy- katkılı ZnB_2O_4 toz örneğinin minimum dedekte edilebilir doz değeri, (0,041 Gy) olarak belirlenmiştir. %1, %2, %4, %5 ve %10 Dy- katkılı ZnB_2O_4 toz örneklerinin minimum dedekte edilebilir doz değerleri ise, sırasıyla (0,077 Gy), (0,075 Gy), (0,093 Gy), (0,074 Gy) ve (0,162 Gy) olarak belirlenmiştir. Toz örneklerin lüminesans şiddetlerinin düşük radyasyon dozları için kullanılabilir olmasının olduğu gösterilmiştir. Deney sonuçları, $ZnB_2O_4:Dy$ toz örneklerinin radyasyon dozimetresi için beta-ışını termolüminesans dozimetre (TLD) malzemesi olarak potansiyel bir kullanıma sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Termolüminesans, disporsiyum, çinko borat, beta-ışını, nadir toprak elementleri.

2017, ix + 72 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF DOSIMETRIC PROPERTIES USING THERMOLUMINESCENCE METHOD OF DYSPROSIUM DOPED ZINC BORATE PHOSPHORS

Damla YAMAN

Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Nil KÜÇÜK

This paper reports the thermally stimulated luminescence (TL) studies of dysprosium (Dy^{3+}) doped zinc borate (ZnB_2O_4) phosphors by beta-ray irradiation. Dy-doped ZnB_2O_4 phosphors at 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 10% (by weight) were prepared by the nitric acid method using the starting oxides [zinc oxide (ZnO), boric acid (H_3BO_3) and doped element oxide (Dy_2O_3)]. The prepared powder samples were characterized by X-ray diffraction (XRD). Dependence on the dose of beta-ray radiation of the powder samples was investigated by the thermoluminescence technique. TL properties of the powder samples were measured with Risø TL/OSL DA-20 reader. TL emission was detected through a filter pack (Schott BG-39 and Corning 7-59) transmitting between 330-480 nm. TL glow curves were obtained with heating at a constant heating rate of 5 °C/s up to 450 °C. The dose response curves of the powder samples exposed to $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta radiation (40 mCi) were investigated in the dose range from 143 mGy to 60 Gy. Dose responses and minimum detectable dose values for increasing radiation doses of the powder samples were determined. The TL-dose responses of the $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Dy}$ powder samples to beta-ray radiation have shown a quite linear response. Minimum detectable dose value of 3% Dy-doped ZnB_2O_4 powder sample which shows a high temperature peak at 207-232 °C was determined as 41 mGy. Minimum detectable dose values for 1%, 2%, 4%, 5% and 10% Dy-doped ZnB_2O_4 powder samples were also determined as 77 mGy, 75 mGy, 93 mGy, 74 mGy and 162 mGy, respectively. Luminescence intensities of the powder samples were shown to be likely to be used for low radiation doses. The experiment results showed that $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Dy}$ powder samples had potential use as the materials of beta-ray thermoluminescence dosimeter (TLD) for radiation processing dosimetry.

Keywords: Thermoluminescence, dysprosium, zinc borate, beta-ray, rare earths.

2017, ix + 72 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve fikirleriyle beni geliştiren ve ufkumu açan çok değerli danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Nil KÜÇÜK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, "Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu" tarafından OUAP(F)-2015/31 Proje Numaralı Orta Ölçekli BAP projesiyle desteklenmiştir. Bu bağlamda "Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine" çok teşekkür ederim.

Termoluminesans ölçümler için Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsüne, bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen Dr. Eren ŞAHİNER'e ve Uzman Şule KAYA KELEŞ'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan ve bu süreci benimle birlikte yaşayan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Damla YAMAN

02/02/2017

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1. Radyasyon Dozimetresi ve Dozimetri Sistemleri.....	4
2.1.1. Radyasyon Dozimetresi	4
2.1.2. Dozimetri Sistemleri	4
2.1.2.1. İyonizasyon Odası Dozimetri Sistemleri	5
2.1.2.2. Film Dozimetri Sistemleri.....	6
2.1.2.3. Yarı-iletken Dozimetri Sistemleri	7
2.1.2.4. Termolüminesans Dozimetri Sistemleri.....	8
2.1.2.4.1. Kişisel Dozimetri	14
2.1.2.4.2. Çevresel Dozimetri	14
2.1.2.4.3. Klinik Dozimetri	15
2.1.2.4.4. Yüksek Doz Dozimetresi.....	16
2.1.2.5. Optiksel Uyarımlı Lüminesans Dozimetri	16
2.1.2.6. Diğer Dozimetri Sistemleri	17
2.2. Lüminesans.....	18
2.3. Termolüminesans.....	21
2.4. Termolüminesans Dozimetresinin Taşınması Gerektiği Özellikler	23
2.5. Bu Konuda Yapılmış Bilimsel Çalışmalar	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	31
3.1. Çalışmada Kullanılan Araç-Gereç ve Cihazlar	31
3.1.1. Yüksek Sıcaklık Fırını	31
3.1.2. Hassas Teraziler	31
3.1.3. Manyetik Karıştırıcı	32
3.1.4. Agat Havan	33
3.1.5. Hidrolik Pres	33
3.1.6. Elekler	34
3.1.7. Termolüminesans Ölçüm Sistemi	34
3.2. Nitrik Asit Yöntemiyle Örneklerin Hazırlanması	39
3.3. Termolüminesans Yöntemiyle Lüminesans Ölçümler	43
4. BULGULAR	45
4.1. X-ışını Toz Kırınım Analizleri.....	45
4.2. TL Işıma Eğrileri	49
4.3. Lineer Doz-Cevap Eğrileri	61
4.4. Minimum Dedekte Edilebilir Doz	65
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$\text{LiB}_3\text{O}_5:\text{Al}$	Alüminyum katkılı lityum triborat
Å	Angstrom
Cu_2O	Bakır 1 oksit
CuCl_2	Bakır 2 klorür
BeO	Berilyum oksit
β	Beta
Bi	Bizmut
B_2O_3	Bor Oksit
H_3BO_3	Borik asit
$\text{B}(\text{NO}_3)_3$	Boron nitrat
ZnB_2O_4	Çinko Borat
ZnO	Çinko Oksit
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	Çinko nitrat
rpm	Dakikadaki dönüş sayısı
Dy	Disporsiyum
DyCl_3	Disporsiyum klorid
$\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Dy}$	Disporsiyum katkılı çinko borat
$\text{Zn}_{0,96}(\text{BO}_2)_2:\text{Dy}$	Disporsiyum katkılı çinko borat
$\text{BaB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$	Disporsiyum katkılı baryum tetraborat
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	Disporsiyum katkılı kalsiyum sülfat
$\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$	Disporsiyum katkılı magnezyum tetraborat
$\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$	Disporsiyum katkılı sitronsiyum tetraborat
$\text{Dy}(\text{NO}_3)_3$	Disporsiyum nitrat
Dy_2O_3	Disporsiyum Oksit
eV	Elektron Volt
Z_{etkin}	Etkin atom numarası
Eu	Evropiyum
$\text{BaZr}_{0,25}\text{Ti}_{0,75}\text{O}_3:\text{Eu}$	Evropiyum katkılı baryum zirkonyum titanat
Gd	Gadolinyum
Ge	Germenyum
GBq	Giga Becquerel
Gy	Gray
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag}$	Gümüş katkılı sodyum borat
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$	Karbon katlı alüminyum oksit
CaB_4O_7	Kalsiyum tetraborat
K	Kelvin
IR	Kızılötesi
kW	Kilo Watt
Co	Kobalt
LiF	Lityum florür
LiCaBO_3	Lityum kalsiyum borat

Li ₂ CO ₃	Lityum karbonat
LiF:Mg	Magnezyum katlı lityum florür
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	Mangan katlı lityum tetraborat
MPa	Mega Pascal
MeV	Mega elektron Volt
mA	Miliamper
mSv	Mili Sievert
mGy	Miligray
mCi	Mili Cruie
µm	Mikrometre
UV	Morötesi
nm	Nanometre
K	Potasyum
Rem	Röntgen Equivalent Man
LiSr ₄ (BO ₃) ₃ :C	Seryum katlı lityum stronsiyum borat
KSr ₄ (BO ₃) ₃ :Ce	Seryum katlı potasyum
NaSr ₄ (BO ₃) ₃ :Ce	Seryum katlı Sodyum stronsiyum borat
CsSb	Sezyum antimon
Sv	Sievert
Si	Silisyum
Sr	Stronsiyum
Na ₂ SO ₄	Sodyum sülfat
H ₂ O	Su
T _m	Tepe sıcaklığı
SrB ₆ O ₁₀ :Tb	Terbiyum katlı stronsiyum borat
Ba ₂ Ca(BO ₃) ₂ :Tb	Terbiyum katlı baryum kalsiyum borat
Zn(BO ₂) ₂ :Tb	Terbiyum katlı çinko borat
Tb	Terbiyum
Th	Toryum
Tm	Tulyum
CaF ₂ :Tm	Tulyum katlı kalsiyum florür
U	Uranyum

Kısaltmalar

Açıklama

ESR	Elektron Spin Rezonans
PMT	Foton çoğaltıcı tüp (Photon Multiple Tube)
FT-IR	Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
LED	Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
TLD	Termolüminesans Dozimetre
TL	Termolüminesans
OSL	Optik uyarmalı lüminesans
OSLD	Optik uyarmalı Lüminesans Dozimetri (Transmission Electron Microscope)
XRD	X-Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. İyon odası dozimetri sistemi.....	6
Şekil 2.2. Film dozimetreler.....	7
Şekil 2.3. Film dozimetrelerin şematik gösterimi	7
Şekil 2.4. Yarı-iletken dozimetri sistemi	8
Şekil 2.5. TL okuyucunun şematik gösterimi	9
Şekil 2.6. TL Dozimetreler	9
Şekil 2.7. TLD'lerin uygulama alanlarının şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.8. MicroStar OSLD okuyucu, nanoDot ve Inlight dozimetreler.....	17
Şekil 2.9. Floresans ve fosforesans olayı.....	19
Şekil 2.10. Kristal yapı içerisinde ışınlama ile gerçekleşen süreç.....	22
Şekil 2.11. Zn(BO ₂) ₂ :0,04Ce toz örneği için ışıma eğrileri.....	23
Şekil 3.1. Yüksek sıcaklık fırını.....	31
Şekil 3.2. Hassas terazi	32
Şekil 3.3. Manyetik karıştırıcı.....	32
Şekil 3.4. Agat havan	33
Şekil 3.5. Hidrolik pres	33
Şekil 3.6. Elekler.....	34
Şekil 3.7. Risø TL/OSL (model TL/OSL-DA-20) ölçüm sistemi.....	34
Şekil 3.8. Risø TL/OSL okuyucunun şematik gösterimi	35
Şekil 3.9. Risø TL/OSL okuyucunun şematik şablonu	36
Şekil 3.10. TL okuyucu sisteminde bulunan filtreler.....	37
Şekil 3.11. ⁹⁰ Sr / ⁹⁰ Y beta ışınlayıcının şematik gösterimi	38
Şekil 3.12. a) Isıtıcının ölçüm pozisyonundaki resmi, b) Karuselinde yerleştirildiği a) ile aynı ısıtıcının resmi.....	39
Şekil 3.13. Örneklerin hazırlanma aşamaları	41
Şekil 3.14. Örneklerin TL ölçüm işlemine hazırlanma aşamaları.....	43
Şekil 4.1. %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (450 °C)	45
Şekil 4.2. %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (700 oC).....	46
Şekil 4.3. %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (800 oC).....	46
Şekil 4.4. %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 oC).....	47
Şekil 4.5. %2 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 oC).....	47
Şekil 4.6. %3 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 oC).....	48
Şekil 4.7. %4 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 oC).....	48
Şekil 4.8. %5 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 oC).....	49
Şekil 4.9. %10 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 oC).....	49
Şekil 4.10. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri.....	50
Şekil 4.11. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri.....	51
Şekil 4.12. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %2 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri	52
Şekil 4.13. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %2 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri	52
Şekil 4.14. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %3 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri	53
Şekil 4.15. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %3 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri	54

Şekil 4.16. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %4 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri	55
Şekil 4.17. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %4 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri	55
Şekil 4.18. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %5 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri	56
Şekil 4.19. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %5 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri	57
Şekil 4.20. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %10 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri	58
Şekil 4.21. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %10 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri	58
Şekil 4.22. Dy katkıli çinko borat fosforuların TL ışımaya eğrileri (30 Gy)	59
Şekil 4.23. %5 Dy katkıli çinko borat fosforun farklı ısıtma hızlarında ölçülen TL ışımaya eğrileri	60
Şekil 4.24. %1 Dy- katkıli ZnB_2O_4 için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)	62
Şekil 4.25. %2 Dy- katkıli ZnB_2O_4 için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)	62
Şekil 4.26. %3 Dy- katkıli ZnB_2O_4 için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)	63
Şekil 4.27. %4 Dy- katkıli ZnB_2O_4 için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)	63
Şekil 4.28. %5 Dy- katkıli ZnB_2O_4 için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)	64
Şekil 4.29. %10 Dy- katkıli ZnB_2O_4 için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Ticari dozimetrelerin tavlama prosedürleri	12
Çizelge 3.1. Örnek listesi, laboratuvar kodları ve deneysel parametreler.....	42



1. GİRİŞ

Radyasyonun kullanıldığı tüm alanlarda hangi miktarda radyasyona maruz kalındığının bilinmesi gereklidir. Sadece bu alanlarda çalışan kişilerin değil aynı zamanda ışınlanan her türlü malzemenin maruz kaldığı radyasyon dozu çeşitli dozimetreler ile düzenli olarak ölçülmelidir. Bunun yanı sıra nükleer bir kaza sonucunda kaza alanında bulunan kişilerin, kaza alanına bağlı olarak havanın, suyun, toprağın ve tarım ürünlerinin kaza sonucu hangi miktarlarda radyasyona maruz kaldığının bilinmesi gerekir. Dozimetri için birçok farklı yöntem ve materyal kullanılabilir. Lüminesans özelliği gösteren materyaller bu alanlarda oldukça sık kullanılan dozimetre çeşitlerindedir. Dozimetrede, soğurulan radyasyon dozu tespiti ve ölçümü için termolüminesans (TL) materyalleri kullanılabilir. Temel prensip, bir TL dozimetresinin detektör içindeki kristalden yayınlanan görünür ışık miktarını ölçerek radyasyon dozunun belirlenmesidir. Yayınlanan ışık miktarı, kristal materyali tarafından alınan radyasyon dozuna bağlıdır (Kucuk ve ark. 2013).

Kullanılacak radyasyon doz aralığında bir materyalin lüminesans veriminin yüksekliği, artan radyasyon dozu ile lüminesans şiddetindeki artışın lineer olması, tekrarlanan ölçümlerde lüminesans hassasiyetinin değişmemesi, tuzakların oda sıcaklığında belirli bir süreden önce kendiliğinden boşalmaması gibi özellikler, bir materyalin dozimetre olarak kullanılabilmesi için gerekli şartları taşıyıp taşımadığı araştırılırken dikkate alınması gereken özelliklerdir. Dozimetre olarak kullanılması amacıyla daha verimli, ucuz ve kolay elde edilebilir yeni malzemelerin bulunması için bilimsel çalışmalar bütün dünyada yoğun bir şekilde sürdürülmektedir (Gündoğmuş 2015).

Termolüminesans, nadir toprak elementi katkı fosforlarda gözlemlenmiştir (McKeever 1993). Nadir toprak elementi katkı fosforlar, iyonlaştırıcı radyasyonun klinik, kişisel ve çevresel görüntülendiği birçok alanda radyasyon detektörü olarak önemli bir rol oynamaktadır. Buna ek olarak, ana materyal içerisine nadir toprak elementi ilave edilirse, bu durum materyalin radyasyon doz davranışını olduğu kadar TL özelliklerini de değiştirmek için fırsat sağlar. Lityum florit, en yaygın olarak kullanılan TL fosforudur. Ancak bu fosfor, yüksek doz seviyelerinde üst-lineerlik, karmaşık tavlama davranışı ve tekrar kolayca hazırlanamaz olmaları nedeniyle dezavantajlara sahiptirler. Radyasyon dozimetresindeki TL tekniğine olan ilgi, yeni ve yüksek performanslı TL materyallerin üretimine yönelik sayısız çabaya neden olmuştur (Prokic 2001). Borat kristalleri doğal

olarak ışıldardır ve ayrıca TL ve diğer ilginç optik özellikler gösterir. Katkılı boratların TL özellikleri, doku eşdeğeri soğurma katsayıları, çok düşük maliyetli olmaları, düşük sentez sıcaklığı, iyi termal kararlılık ve mekanik özellikleri, daha yüksek hassasiyet ve nispeten kolay hazırlanmaları nedeniyle kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu yüzden, dozimetrik uygulamalar için göz önüne alınmaya değerlerdir. Radyasyon dozunu ölçmek için kullanılan TL dozimetreler, bu sentetik boratlar için önemli bir yüksek teknoloji kullanım alanı olmuştur.

Çinko borat, son yıllarda alev geciktirici olarak kullanılan bir bor bileşiğidir. Teorik birleşimi, % 42,05 bor oksit (B_2O_3), % 37,45 çinko oksit (ZnO) ve % 14,50 kristal su (H_2O) biçimindedir. Çinko borat, beyaz renkli ve nem çekmeyen toz üründür. 550 °C civarında ergime noktasına sahip, 8-20 µm parçacık boyutlu ve 7,6 pH'lı malzemelerdir. Çinko boratların çok geniş kullanım alanları vardır. Kullanılan yüzeyde daha ileri yanmayı engelleyici yüzey tabakası oluşturarak malzemenin yanarak kömürleşmesini yavaşlatma özelliği nedeniyle alev geciktirici, duman bastırıcı, korozyon geciktirici olarak polimerlerde ve kaplamalarda kullanılır. En önemli avantajı, çinko boratların yanma işlemi sırasında toksin ve aşındırıcı maddeler üretmemesidir. Lüminesans malzemelerinin önemli bir ailesi olan çinko boratlara, mükemmel özellikleri nedeniyle yoğun ilgi gösterilmektedir. Bu bağlamda Li ve arkadaşları (2007, 2008), Tb^{+3} ve Dy^{+3} katkılı ZnB_2O_4 fosforları ^{60}Co gama-ışını ile ışınlayarak, bu malzemenin fotolüminesans özellikleri ve termolüminesans dozimetri karakteristikleri üzerinde çalışmışlardır. Bu fosforların klinik dozimetre için gama-ışınları TL dozimetre materyali olarak potansiyel bir kullanımı olduğunu önermişlerdir. Liu ve arkadaşları (2010), yeni kırmızı bir fosfor olan $ZnB_2O_4:Bi^{+3},Eu^{+3}$ 'un lüminesans özelliklerini incelemişlerdir. Ana materyal içine Bi^{+3} ve Eu^{+3} 'un birlikte katkılanması ile lüminesans şiddetinde bir iyileşme olduğuna işaret etmişlerdir. Mu ve arkadaşları (2011), katı-hal reaksiyon yöntemi ile bir dizi Eu^{+3} katkılı ZnB_2O_4 fosforu sentezlemişler ve Eu^{+3} 'un lüminesansını arttırmak için birkaç uygulama önermişlerdir. Son zamanlarda birçok araştırmacı, lantanit fosforların hazırlanmasına ve lüminesans özelliklerine odaklanmıştır. Nitrik asit yöntemi (Kucuk ve ark. 2013, Kucuk ve ark. 2016), katı-hal reaksiyonu (Ayvacıklı ve ark. 2014), jel yanma reaksiyonu (Muresan ve ark. 2016), hidrotermal gibi verimli bir fosfor materyalinin hazırlanmasında kullanılan çeşitli yöntemlere literatürde rastlamak mümkündür.

Bu çalışmada %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforlar (ZnB_2O_4), nispeten kolay ve ucuz olan nitrik asit yöntemiyle hazırlanmıştır. Termolüminesans yöntemi kullanılarak bu fosforların dozimetrik özellikleri incelenmiş ve rapor edilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Radyasyon Dozimetresi ve Dozimetri Sistemleri

Radyasyon ölçümünde kullanılan tüm sistemler, radyasyonla maddenin etkileşmesi sonucunda meydana gelen iyonizasyon ve uyarma olaylarına karşı gösterdikleri duyarlılıkla çalışırlar.

2.1.1. Radyasyon Dozimetresi

Radyasyon, arkeoloji, biyoloji, fizik, jeoloji, kimya, metalürji, tarih ve tıp gibi birçok bilimsel ve teknik alanda kullanılmakta olduğundan, bu araştırmalarda radyasyonun ölçülmesi önemli bir yere sahiptir. Radyasyonla yapılan çalışmalarda güvenli ve verimli bir şekilde sonuca ulaşabilmek, radyasyonun zararlı etkilerinden çalışanı, çevreyi ve halkı koruyabilmek için radyasyon dozunun ölçülmesi gereklidir. Bu bağlamda radyasyon dozimetresi, tüm radyasyon uygulama işlemlerinde doz ve doz hızının belirlenmesi amacıyla kullanılan cihazlardır.

Radyasyondan etkilenen dokunun soğurduğu enerjiyi hesaplamak güç olduğundan, maruz kalınan X veya gama dozunun yaklaşık değerleri ölçülebilmektedir. Bu amaçla radyasyonun iyonlaştırıcı özelliğinden yararlanılarak yapılmış çeşitli dozimetre sistemleri vardır. Bu dozimetrelerin bir kısmı kişinin maruz kaldığı radyasyon dozunu doğrudan okumayı mümkün kılarken, bir kısmı ise belirli bir zaman aralığında alınan toplam dozu ölçmeyi mümkün kılar (Küçük 2010, Cember ve Johnson 2009).

2.1.2. Dozimetri Sistemleri

Radyasyonun ölçülmesinde gerekli olan şart madde ile etkileşimidir. Radyasyonun madde ile etkileşimi floresans, fosforesans, iyonizasyon gibi çeşitli olaylara sebep olur. Bu gibi olaylarla radyasyon enerji kaybeder. Bu özelliklerden yararlanılarak radyasyonların ölçülmesini sağlayan dozimetri sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlere, iyonizasyon odası, film dozimetri, yarı-iletken dozimetri, lüminesans dozimetri ve diğer dozimetri (alanin, elmas, jel vb.) sistemleri örnek olarak verilebilir.

2.1.2.1. İyonizasyon Odası Dozimetri Sistemleri

Soğurulan radyasyon dozunu belirleyebilmek için en doğrudan doğruya ve en geniş kullanımı olan dozimetri sistemleridir. Bu dozimetri sistemleri, belli bir hacimde bulunan gazların içinden geçen enerji yüklü parçacıkların iyonlaşmaya sebep olması ve bu iyon çiftlerinin ölçülmesi esasına göre tasarlanmışlardır.

İyonizasyon odalarının çalışmaları şu prensibe dayanır: değişmez bir şekilde ışınlanan büyük ve homojen bir soğurma ortamı içine, küçük bir iyonizasyon odası gibi, küçük bir oyuk yerleştirilirse, oyuktaki ikincil elektron atmosferi, oyuk yerleştirilmeden önce ortam içindeki mevcut elektron atmosferi ile eşdeğerdedir. İyonizasyon odasındaki gaz hava ise ve odanın duvarlarını teşkil eden malzemenin atom numaraları havanınkine yakın ise; iyonizasyon odası içinde her gram hava başına kaybedilen enerji, iyonizasyon odasının bulunduğu noktada her gram hava için kaybedilen enerji ile esasen aynı değerde olacaktır. Bunun için, ideal olarak, bir iyonizasyon odası iç yüzeyleri elektriksel olarak iletken olan ve hava eşdeğerli duvarlar ile çevrelenen, hacmi bilinen bir odadan ibarettir. Odanın içinde duvarlardan yalıtılmış halde bulunan ve artı potansiyelin uygulandığı merkezi bir elektrot vardır. Radyasyonun geçmesiyle odada meydana gelen iyonlar, merkezi elektrotta bir voltaj değişimine sebep olurlar. Doğrudan doğruya röntgen veya birim zamanda röntgen cinsinden bir değer gösteren yük veya akım ölçen bir sistem üzerinde bu değişim ölçülür. Oluşan bu akımın şiddeti gelen radyasyonun şiddeti ile orantılı olarak değişir. Böyle bir aletin yapısına ve kullanılmasına birçok faktörler tesir eder ve bu sebepten ideal bir iyonizasyon odasına, ancak sınırlı bir enerji aralığında ulaşılabilir. İyonizasyon odaları, ışın tedavisi ve radyolojide radyasyon dozunun belirlenmesi için kullanılabilir. Şekil 2.1'de bir iyon odası dozimetri sistemi gösterilmiştir (Atakan 1966).



Şekil 2.1. İyon odası dozimetri sistemi

2.1.2.2. Film Dozimetri Sistemleri

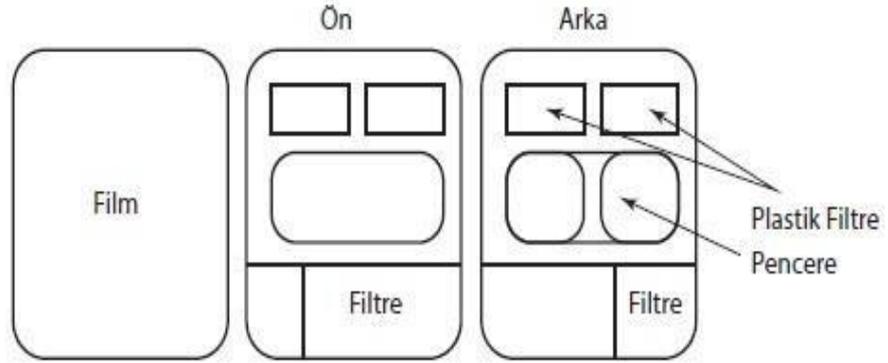
Radyasyonla çalışan kişilerin maruz kaldığı kişisel dozu tayin etmek için kullanılan en eski ve en yaygın sistemlerdir. Film üzerinde radyasyon etkisiyle meydana gelen optik yoğunluğun ölçülmesi ve sonucun değerlendirilmesi esasına dayanır. Filmin maruz kaldığı optiksel yoğunluk radyasyonun miktarı ile orantılıdır. Bu dozimetreler, film ve taşıyıcı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Film üzerinde radyasyon etkisiyle ortaya çıkan optik yoğunluğun, radyasyonun tipi ve enerjisinden bağımsız olması için, taşıyıcı içerisinde değişik tip ve kalınlıkta filtreler bulunmakta ve film üzerinde filtre arkalarına karşılık gelen optik yoğunluklar ölçülerek doz hesabı yapılabilmektedir. Film dozimetreler ile beta (β), gama (γ), X-ışınları ve taşıyıcı üzerinde uygun filtre sistemi kullanıldığında nötron parçacıklarından alınan radyasyon dozları ölçülebilmektedir. Film dozimetreler ile 0,1 mSv (10 mrem)'den yaklaşık 10 Sv (1000 rem)'e kadar okuma yapılabilir (Cember ve Johnson 2009, Tanır ve ark. 2013).

Film dozimetrelerde aynı radyasyon maruziyetinin doz okuması tekrar yapılabilir ve kaydedilebilir. Ancak film dozimetreler yeniden kullanılamaz. Ayrıca sıcaklık ve nem gibi hava şartlarından kolayca etkilenmeleri, daha geniş bir yerleşim alanı gerektirmeleri, anında değerlendirme yapılamaması, işlem parametrelerinin fazlalığı, enerji bağımlılığı, radyasyon enerjisi ve doz nicelikleri hakkında bilgi verememesi gibi dezavantajları

bulunmaktadır. Bu nedenle günümüzde film dozimetreler yerine TL dozimetreler tercih edilmektedir. Film dozimetreler, Şekil 2.2’de ve film dozimetreler için şematik bir gösterim ise Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Film dozimetreler



Şekil 2.3. Film dozimetrelerin şematik gösterimi

2.1.2.3. Yarı-iletken Dozimetri Sistemleri

Yarı-iletken dozimetre sistemleri, silikon diyot ve metal oksit yarı-iletken alan etkili transistör (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) dozimetri sistemleri olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır. Silikon diyot dozimetre, p-n bağlantılı bir diyottur. Germanyum (Ge) ve silisyum (Si) gibi yarı-iletken elementlerden yapılmış detektörler, yarı-iletken detektörlere örnek oluşturmaktadır. MOSFET ise özellikle in-vivo dozimetri için uygun mükemmel uzaysal çözünürlüğe sahip olan ve küçük boyutları nedeniyle çok az bir ışın zayıflaması sunan minyatür bir silikon transistördür. MOSFET dozimetrelerin çalışma prensibi, soğurulmuş dozun lineer bir fonksiyonu olan eşik gerilim voltajının ölçümüne dayanır. İyonlaştırıcı radyasyon oksitte

nüfuz ettiğinde kalıcı olarak tuzaklanmış yük üretir; böylece bu durum eşik gerilim voltajında değişime sebep olur. Bu değişim soğurulmuş dozun miktarı ile orantılıdır. MOSFET dozimetreler ile birleşik doz ölçümü, ışınlama sırasında ya da ışınlama sonrasında ölçülebilir. Ancak MOSFET'ler ışınlama esnasında bir yönlendirici (bias) voltaja ihtiyaç duyarlar. MOSFET'lerin ömürleri sınırlıdır (Yüksel 2013).

Yarı-iletken diyot dozimetrelerin en önemli avantajları çok iyi enerji ayırma gücüne ve çok yüksek uzaysal çözünürlüğe sahip olmalarıdır. En iyi enerji ayırma gücüne sahip olan yarı-iletken detektör materyali çok düşük sıcaklıklarda işleyen germanyumdur. Bir yarı-iletken dozimetri sistemi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



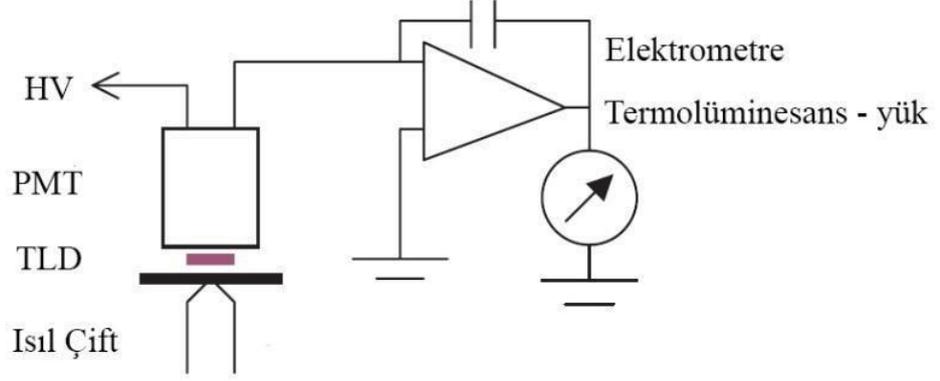
Şekil 2.4. Yarı-iletken dozimetri sistemi

2.1.2.4. Termolüminesans Dozimetri Sistemleri

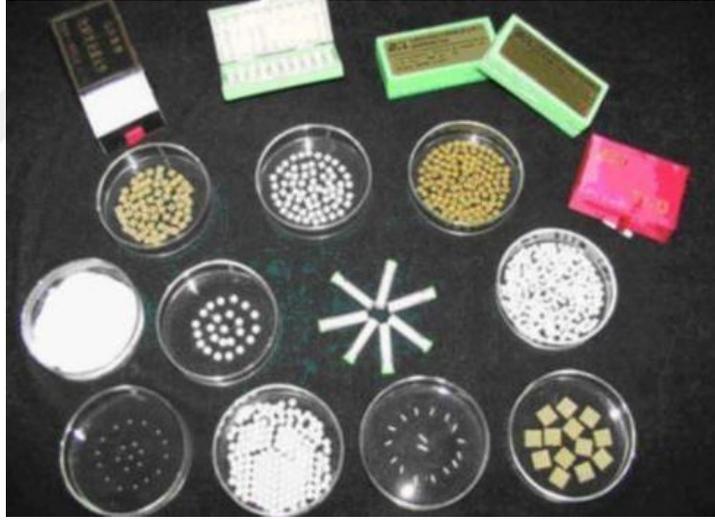
Radyasyonla ışınıldıktan sonra ısıtıldıklarında ışık yayan yarı-iletken ya da yalıtkan materyallere, termolüminesans dozimetreler (TLD) denir. Bu dozimetreler ile 10 keV-10 MeV enerji aralığında gama, X-ışını, beta ve nötron dozları ölçülebilmektedir (Cember ve Johnson 2009). Doz aralığı, radyasyon tipine ve TLD okuyucusuna bağlıdır.

TLD'lerin ilk uygulaması, 1950'lerde radyasyon dozunu ölçmek için Daniel ve arkadaşları tarafından kullanılmıştır (Daniel ve ark. 1953). Daha sonraki yıllarda başarılı uygulamalar sayesinde bu dozimetreler geliştirilerek çalışmalar günümüze kadar devam etmiştir. Bir TLD sistemi, sisteme yerleştirilen malzemenin ısıtılması için kullanılan ısı

çiftler ve kenarlıklı diskler, TL sinyallerini toplayan bir foto-çoğaltıcı tüp (PMT) ve bu ışık sinyallerini elektriksel sinyallere çeviren bir elektrometreden oluşur. Şekil 2.5’de bir TL okuyucunun şematik gösterimi verilmiştir (Izewska ve Rajan 2005). TLD’lerin toz, çip, çubuk gibi değişik formları bulunur (Şekil 2.6).



Şekil 2.5. TL okuyucunun şematik gösterimi



Şekil 2.6. TLD dozimetreler

TLD dozimetrelerin ticari adları ve içerdikleri materyaller şu şekilde sıralanabilir:

- 1) **TLD-100 (LiF:Mg, Ti):** Sağlık ve medikal fizik dozimetri uygulamaları için uygundur. Ölçüm aralığı 10 pGy-10 Gy'dir. Toz, çubuk, cips, kart formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{eff} = 8,2$ 'dir.
- 2) **TLD-100 H (LiF:Mg, Cu, P):** Doku eşdeğeri ve yüksek duyarlılıktadır.

- 3) **TLD-200 (CaF₂:Dy)**: Çevresel dozimetri uygulamaları için uygundur. Ölçüm aralığı 0.1 pGy-1 Gy'dir. Çevresel ölçümler için yüksek hassasiyetlidir. Toz, çubuk, cips, kart formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{\text{eff}} = 16,3$ 'dür.
- 4) **TLD-300 (CaF₂:Tm)**: Çevresel dozimetri ve hızlı nötron dozimetrisi uygulamaları için uygundur. Çubuk, cips ve tek kristal formundadır.
- 5) **TLD-400 (CaF₂:Mn)**: Çevresel dozimetri ve yüksek doz dozimetrisi uygulamaları için uygundur. Toz, çubuk, cips, kart ve ampul formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{\text{eff}} = 16,3$ 'dür.
- 6) **TLD-500 (Al₂O₃:C)**: Çevresel dozimetri uygulamaları için uygundur. Disk formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{\text{eff}} = 10,2$ 'dir.
- 7) **TLD-600 (LiF:Mg,Ti)**: Yüksek duyarlılıktadır. Nötron dozimetrisi uygulamaları için uygundur. Toz, çubuk, cips, kart formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{\text{eff}} = 8,2$ 'dir.
- 8) **TLD-600 H (LiF:Mg,Cu,P)**: Nötronlara duyarlıdır.
- 9) **TLD-700 (LiF:Mg,Ti)**: Nötronlara duyarlıdır. Gama dozimetrisi uygulamaları için uygundur. Toz, çubuk, cips, kart formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{\text{eff}} = 8,2$ 'dir.
- 10) **TLD-700 H (LiF:Mg,Cu,P)**: Yüksek gama duyarlılığına sahiptir. Çevresel dozimetri uygulamaları için uygundur. Toz, cips, kart formundadır.
- 11) **TLD-800 (Li₂B₄O₇:Mn)**: Kilo/Mega rad dozimetresidir. Yüksek doz dozimetrisi ve nötron dozimetrisi uygulamaları için uygundur. Toz, cips, kart formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{\text{eff}} = 7,4$ 'dür.
- 12) **TLD-900 (CaSO₄:Dy)**: Çevresel dozimetri uygulamaları için uygundur. Toz, cips, kart formundadır. Etkin atom numarası, $Z_{\text{eff}} = 15,5$ 'tir.

TLD dozimetrelerin kullanım alanlarının bu derece yaygın olması avantajlarının çok olmasını da yansıtmaktadır. TLD dozimetrelerin avantaj ve dezavantajları şu şekilde listelenebilir:

TLD Dozimetrelerin Avantajları

- Doz ölçme aralıklarının geniş olması,
- Hassas ölçüm yapabilmeleri,
- Birden fazla TL element kombinasyonu ile farklı enerjideki gama, beta, X ve nötronların belirlenmesi,
- Doza orantılı cevaplar vermeleri,
- Yeniden kullanılabilir olmaları,

- Küçük ve hafif olmaları,
- Kolay ve hızlı değerlendirilebilmeleridir.

TLD Dozimetrelerin Dezavantajları

- Sadece ısıtma sırasında bir kez okuma yapılır, tekrar edilemezler,
- Tekrar ölçüm alınmadan önce sıfırlanmaları gerekir,
- Mor ötesi ışıklardan etkilenmezler.

TLD'ler ile 0,1 mSv'e kadar düşük dozlar belirlenebilir. Fakat düşük doz ölçümlerinde yapılan hata daha yüksek dozların ölçümünde yapılanlardan daha fazladır. Yüksek dozlardaki hassasiyet %3 iken düşük dozlarda bu değer %15'e kadar çıkabilmektedir (TAEK 2016).

TLD'lerin kullanılmadan önce artık sinyallerinin silinmesi için tavlama gerekmektedir. Bu tavlama işlemi için, ısıtma ve soğutma hızlarının da iyi bir şekilde belirlendiği tekrarlanabilir tavlama döngülerinin kullanılması gereklidir. Çizelge 2.1'de ticari amaçlı kullanılan dozimetrelerin tavlama prosedürleri özetlenmiştir (Kaykal 2005).

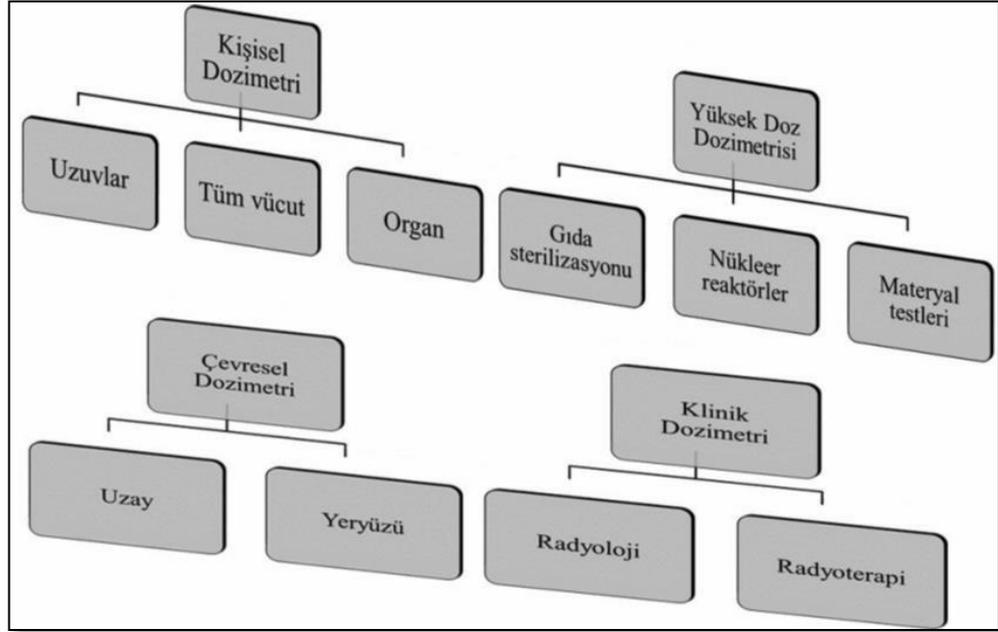
Çizelge 2.1. Ticari dozimetrelerin tavlama prosedürleri

Sıra No:	Madde	Tavlama Prosedürü	
		Fırında	Okumada
1	Al ₂ O ₃ :C	400 °C'de + 80 °C'de 16 saat	
2	Al ₂ O ₃ :Cr	350 °C'de 15 dakika	
3	Mg ₂ SiO ₄ :Tb	500 °C'de 2-3 saat	
4	MgB ₄ O ₇ :Dy/Tm	500-600 °C'de 1 saat	
5	MgB ₄ O ₇ :Dy,Na	700 °C'de 30 dakika+ 800 °C'de veya 550 °C'de 2 saat	
6	CVD elmas	300 °C'de 1/2 saat.	
7	KMgF ₃ (Pb, Cr veya Ag ile katkılandırılmış)	400 °C'de 1 saat	
8	Yarıiletken-katkılı vycor camı	400 °C'de birkaç saniye	
9	LiF:Mg,Ti (TLD 100,600,700)	400 °C'de 1 saat + 100 °C'de 2 saat veya 400 °C'de 1 saat + 80 °C'de 20 saat hızlı tavlama 400 °C'de 15 dakika+ 100 °C'de 10 dakika	300-400 °C'de 30 saniye (Fırında 80 °C'de + 20 saat)
10	PTFE'deki LiF:Mg,Ti	300 °C'de 1 saat + 80 °C'de 20 saat	300 °C'de 30 saniye (Fırında 80 °C'de + 20 saat)
11	LiF:Mg,Na (LiF-PTL)	500 °C'de 30 saniye hızlı soğutma	
12	LiF:Mg,CuP (GR-200A)	240 °C'de 10 saniye veya 15 saniye	240 °C'de 30 saniye
13	CaF ₂ :Dy (TLD200)	600 °C'de 1 saat veya 450 °C'de 30 saniye veya 400 °C'de 1 saat + 100 °C'de 3 saat	400 °C'de 30 saniye
14	CaF ₂ :Tm (TLD300)	400 °C'de 1,5-2 saat veya 300 °C'de + 30 dakika	
15	CaF ₂ :Mn (TLD400)	450-500 °C'de 30-60 dakika	
16	CaSO ₄ :Dy (TLD900)	400 °C'de 1/2-1 saat	
17	CaSO ₄ :Tm	400 °C'de 1/2-1 saat (PTFE, 300 °C'de 2 saat)	
18	BeO (Termoloks 995)	400 veya 600 °C'de 15 dakika	400 °C'de 30 saniye
19	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn (TLD800)	300 °C'de 15 dakika-1 saat	
20	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn,Si	300 °C'de 15 dakika-1 saat	
21	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	300 °C'de 15 dakika-1 saat	
22	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu,Ag	300 °C'de 15 dakika-1 saat	
23	LiF:Mg,Ti (TLD 100,600,700)	100 °C'de 10 dakika	160 °C'de 20 saniye
24	PTFE'deki LiF:Mg,Ti		160 °C'de 10-20 saniye
25	LiF:Mg,Na (LiF-PTL)		130 °C'de 10 saniye
26	LiF:Mg,Cu,P (GR-200A)	130 °C'de 10 dakika	160 °C'de 20-30 saniye
27	CaF ₂ :Dy (TLD200)	110 °C'de 10 dakika veya 115 °C'de 10 dakika	160 °C'de 16 saniye

Çizelge 2.1. Ticari dozimetrelerin tavlama prosedürleri (Devamı)

Sıra No:	Madde	Tavlama Prosedürü	
		Fırında	Okumada
28	CaF ₂ :Tm (TLD300)	90 °C'de 30 dakika veya 115 °C'de 10 dakika	160 °C'de 16 saniye
29	CaSO ₄ :Dy (TLD900)	100 °C'de 20-30 dakika veya 140 °C'de 5 dakika	120 °C'de 16-32 saniye
30	CaSO ₄ :Tm	100 °C'de 20-30 dakika	120 °C'de 16-32 saniye
31	CaSO ₄ :Tm	400 °C'de 1/2-1 saat (PTFE, 300 °C'de 2 saat)	
32	BeO (Termoloks 995)		140 °C'de 1 dakika
33	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn (TLD800)	100 °C'de 10 dakika	
34	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn,Si		160 °C'de 20 saniye
35	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu,Ag		160 °C'de 20 saniye
36	Al ₂ O ₃ :Cr	150 °C'de 15 dakika	
37	MgB ₄ O ₇ :Dy/Tm		160 °C'de birkaç saniye
38	KMgF ₃ (Pb, Cr veya Ag ile katkılandırılmış)	50 °C'de 30-60 dakika	

TLD'lerin her biri doz-cevap lineerliğine bağlı olarak kişisel, çevresel, klinik ve yüksek doz dozimetrisi gibi farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de bu uygulama alanlarının şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.7. TLD'lerin uygulama alanlarının şematik gösterimi

2.1.2.4.1. Kişisel Dozimetri

Kişisel dozimetride, radyasyonla ilgili uygulamalarda çalışan personelin rutin uygulamalar sırasında maruz kaldığı radyasyon dozunun ölçülmesi temel alınmaktadır. Nükleer reaktör çalışanları, hastanelerdeki ışın tedavisi teknisyenleri ve nükleer atıklar ile ilgilenen radyasyon işçileri bu guruba örnek olarak verilebilir. Burada radyasyon dozunun ölçülmesindeki amaç bu personelin maruz kaldığı radyasyon dozunun uluslararası kuruluşlar tarafından (örneğin ICRP-International Commission on Radiological Protection, IEAE-International Atomic Energy Agency) önceden belirlenmiş limitlerin altında tutmaya çalışmaktır. Bu rutin doz belirleme uygulamasının yanı sıra radyoaktif kazalar sonucunda maruz kalınan radyasyon dozunun ölçülmesi de bu alana girmektedir. Tüm bu uygulamaların temel amacı, her bireyin maruz kaldığı toplam radyasyon miktarının ICRP tarafından belirlenen ve izin verilen maksimum doz değerinin altında tutmaktır. Bu alanların ilgilendiği doz aralığı $\sim 10^{-5}$ Sv'ten 10^{-1} Sv'e kadar değişmekle beraber dozun belirsizliği $\pm \%10-20$ aralığında olmalıdır (Chen ve McKeever 1997).

2.1.2.4.2. Çevresel Dozimetri

Son yıllarda bilim, sağlık, sanayi ve politik çevreler, toplumların insan yapımı radyasyon kaynaklarından ileri gelen çevresel felaketlere verdikleri tepkilerin artmasıyla, radyasyondan korunma konuları üzerine araştırmalar yapmaya başlamışlardır. Dünyanın geniş bir kitlesinde, nükleer santrallerde yapılan çalışmalar sırasında gaz formundaki radyo-nüklidlerin günden güne ortama sızması, düşük seviyeli atıkların atılımı, nükleer yakıtların kullanımı, nükleer santral kazaları ve nükleer enerji endüstrisinin yapmış olduğu bazı aktiviteler sonucunda, bu çalışmaların olası çevresel zararları ile ilgili endişeler oluşmaya başlamıştır. Sonuçta çevresel radyasyon dozunun sürekli olarak ölçülmesi endüstrileşen ülkeler için önemli bir konu haline gelmiştir. Bu sebeple TLD'lerin çevresel radyasyonun ölçülmesindeki kullanımı önemlidir. Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da nükleer santrallerin kurulmakta olduğu bölgelere radyoaktivite seviyesinin belirlenmesi amacıyla TLD sistemleri yerleştirilmektedir. Böyle bir çalışmada kullanılan TLD'lerin kişisel dozimetri alanında kullanılanlara göre performans kriterlerinin farklı olması gerekmektedir. Burada dokuya eşdeğer doz söz konusu değildir. Buna karşın, maruz kalınan doz seviyesinin düşük olması (doz eşdeğeri tipik olarak 10^{-2}

mSv civarındadır) uzun süren bir okuma zamanı gerektirir. Böylece kullanılacak olan TLD'lerin uzun süreler boyunca istikrarlı halde kalabilmesi yüksek orandaki hassasiyetlerini koruyabilmeleri oldukça önemlidir. Özellikle gama ışını yayan kaynaklar bu konuda üzerinde yoğun olarak çalışılan ana kaynak tipleridir. Son zamanlardaki uzay uçuşlarının artması çevresel dozimetrenin bir alt kolu olan uzay dozimetrisine karşı olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu ilginin en büyük sebebi astronotların zararlı radyasyonla karşı karşıya kalmaları ve dolayısıyla maruz kalınan dozun ölçülmesinin gerekliliğidir. Ayrıca elektronik cihazların uzun süre boyunca radyasyona maruz kalmaları da bir diğer sebeptir. Çünkü bu cihazlar uzun süreli radyasyona maruz kaldıklarında sistemin çökmesine yol açacak kadar ciddi sorunlar yaşanmaktadır. Uzaysal radyasyonun kaynağı, ana bileşeni daha çok yüksek enerjili fotonlardan oluşan galaktik kozmik ışınlar ve güneş rüzgârlarından gelen ağır yüklü parçacıklardır. Yüksek enerjili radyasyonların etkisinin hesaplanabilmesi için TLD'ler son zamanlarda birçok uçuşta kullanılmaya başlanmıştır (McKeever ve ark. 1995, Nur 2010).

2.1.2.4.3. Klinik Dozimetri

Küçük boyuttaki TLD'ler, teşhis ve tedavi sırasında hastanın vücudunun üzerine yerleştirilerek hastanın maruz kaldığı iyonize radyasyonun miktarının hesaplanması amacıyla sıkça kullanılırlar. Radyasyona maruz kalan TLD daha sonra hastadan alınarak ölçümleri yapılmaktadır. Bu sayede fizikçiler kritik iç organlara ulaşan gerçek doz miktarını hesaplayabilmekte ve böylece tedaviye yön verebilecek bilgiler edinmektedirler. Bu tarz bir uygulamanın diğer radyasyon dozimetre tipleri ile gerçekleştirilmesi oldukça zordur.

İnsanlar klinik radyasyona iki alanda maruz kalırlar; bunlardan birincisi teşhis amaçlı radyoloji (örneğin mamografide, dişçilikte ve genel tanı amaçlı çekilen filmler sırasında X-ışınına maruz kalınır), ikincisi de radyoterapi yani değişik tiplerdeki birinci seviyeden kanser terapileridir. Bu alanlarda kullanılan radyasyon tipleri X-ışınları (maksimum 10 keV civarında), gama ışınları (^{137}Cs veya ^{60}Co kaynaklı), elektronlar (40 MeV'e kadar), ağır yüklü parçacıklar ve nötronlardır. Kullanılan radyasyon doz oranları radyoloji için 10^{-5} ile 10^{-2} Gy arasında değişirken radyoterapide 20 Gy'e kadar radyasyon dozu

kullanılmaktadır. Radyasyon terapisi için hesaplanan dozdaki hata oranı \pm %3'ten az olmalıdır. Aksi takdirde tedavi sürecinde sorunlar yaşanabilmektedir.

TLD materyallerinin bu alandaki kullanımı ile elde edilen doz, doku eşdeğer dozdur. TLD'lerden beklenen, canlı içerisinde doz ölçümünü yüksek hassasiyette gerçekleştirebilmeleri ve mümkün olduğunca küçük boyutlarda olmalarıdır. Ayrıca yukarıda belirtilen doz aralıklarında yüksek oranda lineer doz-cevap eğrisine sahip olmaları da bu dozimetrelere beklenen bir diğer özelliktir (McKeever ve ark. 1995, Nur 2010).

2.1.2.4.4. Yüksek Doz Dozimetri

TLD'lerin kullanıldığı başka bir uygulama alanı yüksek dozlardaki yani 10^2 Gy- 10^6 Gy doz aralığındaki radyasyon miktarının ölçülmesidir. Yüksek doz uygulamalarına nükleer santrallerin içerisinde, gıdaların sterilizasyonunda veya malzeme testlerinde rastlanabilir. Geleneksel TLD'lerin bu doz aralıklarında kullanılması, bazı limitlerden dolayı zordur. Bu limitler kullanılan malzemenin doygunluğa ulaştığı doz miktarı ile paraleldir. Bu alanda kullanılan TLD materyallerinin (örneğin TLD-100, LiF: Mg, Ti), ışımaya eğrilerinin özellikle yüksek sıcaklık tepeleri kullanılmaktadır. Çünkü yüksek sıcaklık tepelerinin daha yüksek dozlarda doygunluğa ulaştığı görülür. Bazı araştırmacılar, TLD materyalinin okuma öncesi yüksek dozlara maruz bırakılması ile (radyoaktif hasar) doz hassasiyetlerinin azalacağını ve böylece bu özelliğin alternatif olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, TLD'lerin böyle yüksek uç noktadaki dozların bulunduğu ortamlarda kullanılabilmesi amacıyla sahip olmaları gereken özellikler biraz karmaşık olabilmektedir (McKeever ve ark. 1995, Nur 2010).

2.1.2.5. Optiksel Uyarımlı Lüminesans Dozimetri Sistemleri

Optik Uyarımlı Lüminesans (OSL) dozimetri sistemleri, TL dozimetri sistemleri ile benzer prensipler üzerine kuruludur. Tek fark termolüminesans dozimetri sistemlerinde kullanılan ısı ile uyarım yerine görünür bölgedeki ışık ile uyarım yapılmasıdır. OSL dozimetri, radyoterapide in-vivo dozimetri yerine yeni bir teknik potansiyel sunmaktadır. Işınlama sırasında ölçülen birleşik doz daha sonra doğrudan OSL kullanılarak değerlendirilebilir. Son yıllarda OSL tekniğine dayalı dozimetri sistemlerinin

yaygınlaşmasıyla birlikte optik uyarmalı lüminesans dozimetre (OSLD) olarak kullanılan dot, nanoDot ve Inlight dozimetreler yaygınlaşmıştır. Şekil 2.8’de microStar OS LD okuyucu, nanoDot ve Inlight OS LD’ler gösterilmiştir (Yüksel 2013).



Şekil 2.8. MicroStar OS LD okuyucu, nanoDot ve Inlight dozimetreler

2.1.2.6. Diğer Dozimetri Sistemleri

Diğer dozimetri sistemlerine, alanin, plastik sintilatör, elmas ve jel dozimetreler verilebilir. Bir amino asit çeşidi olan alanin, bir bağlayıcı madde ile çubuk ya da pellet şeklinde preslenmiş, tipik olarak yüksek doz ölçümlerinde kullanılan bir dozimetredir. Bu dozimetre, radyoterapi dozimetrisinde yeterli hassasiyet ile yaklaşık 10 Gy ya da daha üst bir doz seviyesinde kullanılabilir. Plastik sintilatör dozimetresi, radyoterapi dozimetrisinde nispeten yeni gelişme gösteren bir dozimetri sistemidir. Bu dozimetri sisteminin çalışması, sintilasyon maddesine radyasyon enerjisinin aktarılmasıyla bu maddenin görünen ışık veya görünen ışığa yakın dalga boyunda bir radyasyonu yayınlanması prensibine dayanır. Elde edilen ışık, foto-çoğaltıcı tüp kullanılarak

çoğaltılmaktadır. Elmas dozimetresi, radyasyona maruz kaldığında kendi direncini değiştirir. Yönlendirici voltaj uygulandığında, meydana gelen akım maruz kalınan radyasyonun dozu ile orantılıdır. Ticari olarak piyasada yer alan elmas dozimetreler yüksek enerjili foton ve elektronların göreceli doz dağılımını ölçmek için kullanılmaktadır. Jel dozimetri sistemleri ise bağıl doz ölçümleri için kullanılabilen uygun tek gerçek 3 boyutlu dozimetrelerdir. Jel dozimetreler ile 3 boyutlu geometride soğurulmuş doz dağılımı bir fantom altında aynı anda ölçülebilir. Jeller çok yakın bir doku eşdeğeri olup farklı şekil ve biçimlerde kullanılabilmektedir (Yüksel 2013).

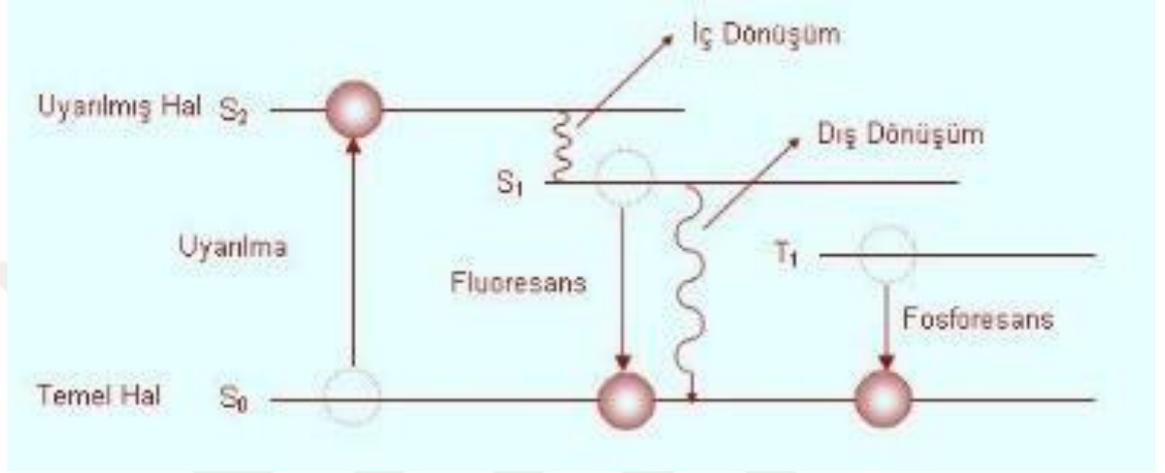
2.2. Lüminesans

Bir madde herhangi bir şekilde radyasyona maruz kaldığında enerjisinin bir kısmını soğurur ve daha uzun dalga boylu ışık olarak yeniden yayınlar. Soğurulan enerji atomun en dış kabuğundaki elektronu uyarır ve elektron bir üst enerji seviyesine yükselir. Elektron, kararsız olan enerji seviyesinden eski kararlı haline dönerken soğurduğu enerjiyi foton olarak yayınlar. Bu olaya “lüminesans” denir. Yayılan ışığın dalga boyu malzemeye özgüdür. Lüminesans olayı, malzeme içerisindeki enerji seviyeleri hakkında bilgi vermektedir. Bu sayede örneklerin kristal yapısı hakkında bilgi edinilebilir.

Lüminesans, doğal radyoaktivite gibi kendiliğinden oluşmaz. Uyarıcı bir enerjiye ihtiyaç duyar. Uyarma UV, X-ışını, gama-ışınları, elektron veya alfa parçacıkları kullanılarak sağlanabilir. Lüminesans, katılarda atom veya moleküllerin elektronik geçişleri ile ilgili olduğundan enerjinin soğurulup tekrar geri salınımı kuantumsal birer süreçtir.

Lüminesans, yayımlanma ömrüne göre ikiye ayrılır. Bir lüminesans ışınması, uyarımla başlayıp uyarma zamanı olan 10^{-8} s boyunca devam ederse “floresans”, uyarma kesildikten sonra (10^{-8} s’den sonra) lüminesans ışınma bir müddet daha devam ederse “fosforesans” olayı gerçekleşir (Chen ve McKeever 1997). Floresans olayı, yalnızca madde üzerindeki uyarılma işlemi devam ettirildiği sürece gerçekleşir. Aksi takdirde floresans olayı durur. Floresans olayının bitme zamanı sıcaklıktan bağımsızdır. Floresansın bitiş zamanı, uyarılmış bir enerji seviyesinden taban enerji durumuna geçiş olasılığı ile belirlenir. Floresans olayı, enerji band modeli ile açıklanabilir ve sıcaklığa bağlı değildir (Fonda 1939). Floresans ve fosforesans olayları Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Floresans ve fosforesans arasındaki farkı anlamanın tek yolu lüminesans bozunumu

üzerindeki sıcaklığı incelemektir. Floresans, sıcaktan bağımsızdır ve radyasyonla uyarımın hemen ardından başlar ve radyasyon ortadan kalktığı zaman sona erer. Fosforesans ise, güçlü bir sıcaklığa bağlılık sergilerken, uyarım ortadan kalktıktan sonra da bir süre daha devam eder. Fosforesansta gözlenen bu gecikme elektronların tuzakta harcandığı zamanla ilgilidir.



Şekil 2.9. Floresans ve fosforesans olayı

Lüminesans, uyarılma yöntemlerine göre çeşitlere ayrılır. Bunlar, şu şekilde listelenebilir:

- ❖ **Biyolüminesans (BL):** Canlı bir organizma tarafından kimyasal bir reaksiyon esnasında kimyasal enerjinin ışık enerjisine dönüştürülerek ışık üretilmesi ve ışık yayılmasıdır.
- ❖ **Elektrolüminesans (EL):** Malzemeye elektrik alan uygulayarak elde edilen lüminesans çeşididir. Hava molekülerinin uyarılması sonucunda elektrik boşalmasıyla enerjili elektronların oluşmasına neden olur. Aydınlanma olmamakla birlikte hava içerisinde sadece parıldamalar gözlemlenir.
- ❖ **Fotolüminesans (PL):** Ultraviyole (UV), görünür ve kızılötesi (IR) ışıkla uyarılan maddede oluşan bir lüminesans çeşididir. Malzemenin ışık ile etkileşmesi sonucu meydana gelen fotolüminesans, gelen ışık demeti sayesinde oluşan elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleşmesi ile meydana gelir. Yüksek uyarma enerjilerine sahip katodolüminesans (CL) ile karşılaştırıldığında fotolüminesans daha küçük enerjilere ve lüminesans şiddetine sahiptir. CL sistemindeki elektron enerjisi 20 keV'e kadar çıkabilirken, bir UV lambasından elde edilen foton enerjileri 2-5 eV civarındadır. Floresans ve fosforesans olayları fotolüminesansın özel durumlarıdır.

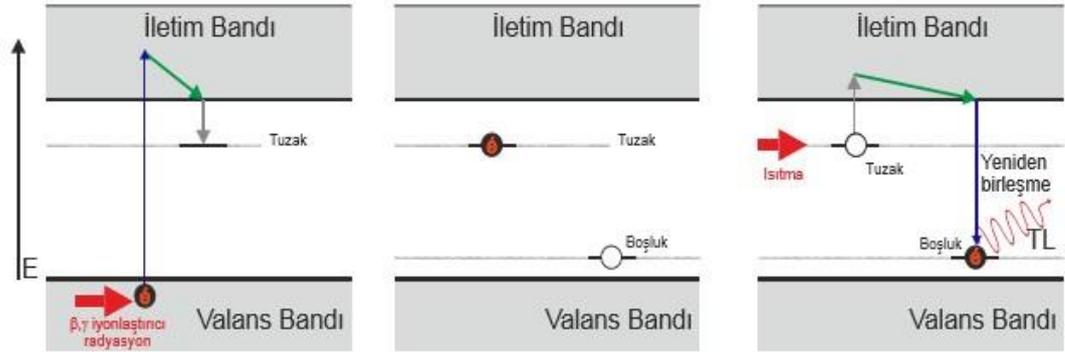
- ❖ **Katodoluminesans (CL):** Nükleer uyarılmanın bir elektron demeti ile gerçekleştiği luminesans çeşididir. CL, elektroluminesansa benzemekle birlikte burada farklı olan nokta katodoluminesans olayında elektron, yalıtılmış şekilde hareket ederken, elektroluminesansta elektriksel deşarj ile uyarılma sağlanır.
- ❖ **Kemiluminesans:** Uyarılma enerjisi bir kimyasal tepkime tarafından sağlanan luminesans çeşididir. Kemiluminesans oluşumunda etkin olan kimyasal tepkime elektrokimyasal olarak bir elektrot yüzeyinde gerçekleşiyorsa elektrokemiluminesans adını alır.
- ❖ **Kristaloluminesans:** Bazen kristalleşme sırasında üretilen luminesans çeşididir. Kemiluminesansın başka bir biçimidir, çünkü enerji aslında atomlar arasındaki bağdan gelir.
- ❖ **Optik Uyarmalı Luminesans (OSL):** Radyasyona maruz kalan malzemenin görünür bölgedeki UV veya IR ile uyarılması sonucu oluşan luminesans çeşididir.
- ❖ **Piezoluminesans:** Basınçla (10 ton/m²) uyarılma sonucunda meydana gelen luminesans çeşididir.
- ❖ **Radyoluminesans (RL):** Nükleer uyarılmanın gama ve X-ışını gibi radyasyonlar yardımıyla gerçekleştiği luminesans çeşididir. RL olayında, diğer tekniklerden farklı olarak malzeme, X-ışınlarına maruz bırakılır ve deney boyunca malzemeye gelen radyasyon kesintiye uğramaz. X-ışınları malzemenin tüm yüzeyine nüfus ettiği için bu yöntem bize malzemenin hacimsel kısımları hakkında bilgi verir. CL oluşturmak için kullanılan alfa ve beta parçacıklarına göre daha büyük nüfuz etme derinliğine sahiptir.
- ❖ **Sonoluminesans:** Yüksek frekanslı ses dalgaları veya fononlarla meydana gelen bir luminesans çeşididir.
- ❖ **Termoluminesans (TL):** Radyasyona maruz kalan malzemenin ısıtılarak uyarılması sonucu oluşan luminesans çeşididir.
- ❖ **Triboluminesans:** Mekanik enerji kullanılarak veya sürtünme yoluyla uyarılmanın gerçekleştiği luminesans çeşididir. Kırılarak, esnetilerek veya koparılarak ayrılan yüzeylerde, ayrılan yüzeyler arasında ince hava tabakası içinde iki yüzey üzerinde zıt yüklerin üretilmesi nedeniyle bir elektrik boşalması oluşur. Malzemenin parçalanması yöntemi içinde, harcanan mekanik enerji uyarılma enerjisini sağlar ve karanlık içinde gözlenebilen bir kızarıklığa neden olabilir. Bu olay triboluminesans

olarak bilinir. Bazı yapışkan bantların, karanlık içinde atmosfer azotunun içinde elektrik boşalması nedeniyle mavi bir ışık yayması buna bir örnektir.

2.3. Termolüminesans

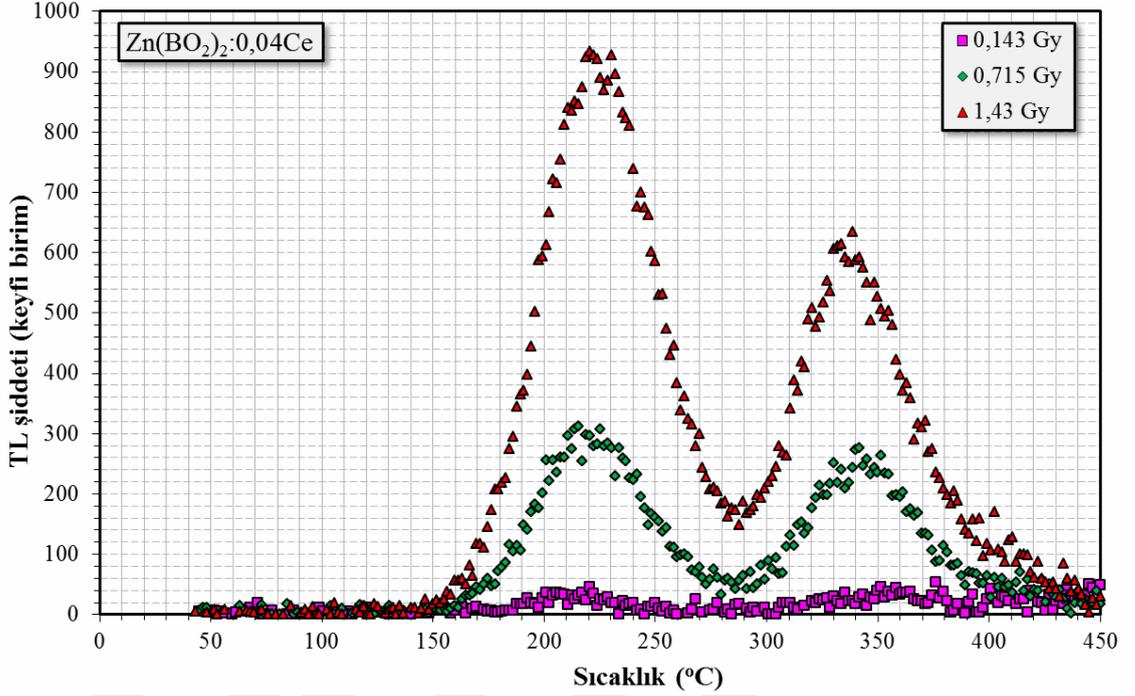
Bazı yalıtkan ve yarı-iletken maddeler ısıtıldıkları zaman ışığa yaparlar. Bu olaya ısıtma ile ışığa anlamına gelen termolüminesans (TL) denir.

Yalıtkan ve yarı-iletken maddeler içlerinde ve çevrelerinde bulunan uranyum (U), toryum (Th) ve potasyum (K) gibi radyoaktif elementlerin yaydığı alfa ve beta parçacıkları ile gama-ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyonların etkisiyle enerji soğururlar. Soğurdukları enerjinin bir kısmını kristal yapılarında depolarlar. Enerjinin depolanması şu şekilde gerçekleşir: Radyasyon madde içinden geçerken yolu üzerindeki atomlarla çarpışır. Bu durumda valans bandında bulunan ve iyonlaştırıcı radyasyonun etkisiyle enerji kazanan elektronlar yasak enerji aralığını geçerek iletim bandına çıkar ve daha sonra maddenin kristal yapısında çeşitli nedenlerle oluşan ve tuzak adı verilen yerlerde yakalanırlar. Böylece bu elektronlar radyasyondan aldıkları enerjiyi bu tuzaklarda biriktirmiş olurlar (Şekil 2.10). Elektronların yakalandıkları tuzaklarda kalma süreleri, çevre koşullarına ve tuzak özelliklerine bağlıdır. Birkaç dakikadan bir milyon yıla kadar elektronları tutabilen tuzaklar vardır. Kısa sürede boşalan tuzaklara sığ, uzun sürede boşalanlara da derin tuzaklar denir. Derin tuzaklar oluştuğları andan itibaren kendiliklerinden boşalmadıkları için maddenin aldığı radyasyon miktarını tam olarak yansıtırlar. Radyasyona maruz kalan madde ısıtıldığında tuzaklanmış elektronlar tuzaklardan kurtulurlar, tuzaklardan kurtulan elektronlar boşluk içeren uygun yeniden birleşme merkezleriyle birleşerek ışık (foton) yayarlar (Şekil 2.10). Maddede biriken radyasyon enerjisi de böylece ışık olarak geri verilmiş olur. Çıkan ışık miktarı maddenin biriktirdiği radyasyon enerjisi miktarına bağlıdır. Ne kadar çok enerji birikirse o kadar çok ışık çıkar. Hiç enerji birikmemişse veya biriken enerji herhangi bir nedenle, örneğin ısınma yoluyla boşalmış ise TL gözlenmeyecektir.



Şekil 2.10. Kristal yapısında ışınlama ile gerçekleşen süreç

Radyasyona maruz kalan madde, sabit bir hızla ısıtılacak olursa tuzaklar, sığlardan derinlere doğru sırayla boşalır. Her tuzak grubunun farklı bir boşalma sıcaklığı vardır. Bu nedenle madde içindeki elektron tuzakları sırayla boşalırken farklı sıcaklıklarda ayrı ayrı tepeler meydana gelir. Tuzak gruplarının boşalma sıcaklıklarına yaklaşıldıkça ısıtma artar ve bir maksimum değer aldıktan sonra azalmaya başlar. Bu azalma bir sonraki tuzak grubunun boşalmaya başladığı sıcaklığa kadar devam eder. Ondan sonra yeniden artmaya başlar. Işımadaki bu artma ve azalmaları, sıcaklığa karşı gösteren eğriye “ışınma eğrisi (glow curve)” denir. Örnek olarak Şekil 2.11’de, beta ışınlaması altında %4 Ce katkılı çinko borat $[Zn(BO_2)_2:0,04Ce]$ toz örneğinin farklı dozlarda elde edilmiş TL ışıma eğrileri gösterilmiştir (Kucuk ve ark. 2016). Şekilden farklı enerji seviyelerdeki tuzaklara karşılık gelen TL tepeleri açıkça görülür.



Şekil 2.11. $Zn(BO_2)_2:0,04Ce$ toz örneği için ışıma eğrileri

2.5. Termoluminesans Dozimetresinin Taşınması Gerektiği Özellikler

Birçok termoluminesans materyal vardır. Ancak dozimetri için kullanışlı olanların taşınması gerekli özellikleri şu şekilde listelenebilir (Çakır 2012):

- ❖ Basit ışıma eğrisi: Işıma eğrisi, lüminesans şiddetinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini gösteren bir grafikdir. Işıma eğrisinin altında kalan alan, tuzaklardan boşalan elektronların sayısı yani başlangıçta uygulanan radyasyon miktarı ile orantılıdır. Dozimetre olarak kullanılacak bir fosforun tek bir tepeye sahip olması ışıma eğrisinin analizini kolaylaştırdığı gibi, ön ısıtma ve tavlama işlemlerini de sadeleştirdiği için tercih edilir.
- ❖ Basit tavlama ve ön ısıtma işlemi: Materyalin tüm tuzaklarının boşaltılması amacıyla yapılan fırınlama (yüksek sıcaklıklara kadar ısıtma) işleminin, özellikle rutin çalışmalarda, materyalin TL özelliğini değiştirmeyecek bir sıcaklıkta ve kısa sürede gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- ❖ Radyasyon verimi: Kullanılan materyalin foton kaynağı ile ışınlanması sonucunda elde edilen TL şiddetinin ne kadar yüksek olduğunun bir göstergesidir. Bir materyalin yüksek foton hassasiyetine sahip olması, onun düşük radyasyon dozlarında yüksek TL şiddeti elde edilmesi ve böylece daha düşük radyasyon

dozlarının ölçülebilmesi anlamını taşır. TL ölçümlerinde kullanılan materyalin hassasiyetinin tavlama ve ön-doğ işlemleri ile artırılabilceği gözlenmiştir (Horowitz 1984, Göksu ve Hübner 1997).

- ❖ Lineer doz bağımlılığı: Bir materyalin ışına şiddetinin radyasyon dozuna bağlı olarak değişiminin her bölgede lineer olmadığı bilinmektedir (Aitken 1985). Bu nedenle çalışmada kullanılacak materyalin radyasyon dozuna bağımlılığı incelenmeli ve bu bağımlılığın lineer olduğu kısımda çalışılmalıdır.
- ❖ Tekrar edilebilirlik: TL’de kullanılan materyalin hassasiyeti, tekrarlanan ısıtma ve radyasyon dozu uygulamalarında değişim, bu nedenle bu uygulamalar karşısında materyaldeki hassasiyet artışı minimum olmalıdır. Bu, aynı zamanda çalışmanın doğruluğunun kontrolünü ve karşılaşılabilecek sorunlarda tekrarını sağlayacaktır.
- ❖ Foton enerji-doz bağımlılığı: Işınlamada kullanılan fotonun enerjisine bağlı olarak belirli bir doz değeri için TL şiddetinde gözlenen farklılık o maddenin enerji bağımlılığı olarak tanımlanır. TLD’lerin en yaygın kullanıldığı medikal fizik uygulamalarında, bir dokuda soğurulan toplam doz değeri söz konusu olduğundan kullanılacak materyalin de etkin atom numarasının (Z_{etkin}) dokuya eşdeğer olması gerekir. Bu bağlamda LiF veya BeO gibi materyallerin etkin atom numaraları dokuya eşdeğer ($Z_{etkin} = 7,4$) oldukları için tercih edilirler (Horowitz 1984, Furetta 2003, McKeever 1995).
- ❖ Gün ışığına karşı duyarsızlık: Bazı maddelerde ışığın, elektronları tuzaklardan boşalttığı veya daha az derin tuzaklara taşıdığı bilinmektedir. Kullanılacak fosforun gün ışığına karşı duyarsız olması ya da bu duyarlılığın dozimetrenin doğru ölçümünü engellemeyecek kadar düşük olması gerekmektedir.
- ❖ TL sönüme uğramadan oda sıcaklığında en az birkaç ay depolanabilmesi: Bir TL materyalde özellikle sığ tuzaklarda bulunan elektronlar oda sıcaklığında sönüme uğrayabilir. Bu durumda, materyalde depolanan radyasyon dozunda bir azalma meydana gelir. Bu etkinin azaltılması için materyale, kullanımdan önce ön ısıtma işlemi uygulanabilir veya ışına eğrilerinin daha kararlı bölgeleri dozimetrik ölçüm için kullanılabilir.
- ❖ Kullanım uygunluğu: TL materyalleri, radyasyon dozu ölçülecek olan örnek üzerine kolayca yerleştirilmesi, ısıtıldığında sıcaklığın homojen olarak yayılması veya

dozimetretenin alt seviyelerinden çıkan TL ışımalarının foton çoğaltıcı tüpe ulaşması gibi nedenlerle küçük boyutlu yapılardır.

2.6. Bu Konuda Yapılmış Bilimsel Çalışmalar

Bor tabanlı bileşiklerin termolüminesans özelliklerinin incelenmesine, ilk Schulman ve arkadaşlarının 1967’de yaptığı çalışmayla başlanmıştır (Schulman ve ark. 1967). Literatür incelendiğinde, dozimetre konusunda yapılmış çalışmalarda araştırılan borat malzemeler şöyle özetlenebilir: $MgB_4O_7:Dy$, 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 , $CaB_4O_7:Cu$, Mn (Manam ve Sharma 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), $SrB_6O_{10}:Tb$ (Liu ve ark. 2006), $Sr_2Mg(BO_3)_2:Tm$, Tb, Dy (Liu ve ark. 2006), $BaB_4O_7:Ce$ (Yazici ve ark. 2006), $LiSr_4(BO_3)_3:Ce^{+3}$ (Jiang ve ark. 2007), $Zn(BO_2)_2:Tb$ (Li ve ark. 2007), $Zn(BO_2)_2:Dy$ (Li ve ark. 2008), $LiB_3O_5:Al$ (Depci ve ark. 2008), $Li_2B_4O_7:Mn$, Ag (Kelemen ve ark. 2008), $KSr_4(BO_3)_3:Ce$ (Jiang ve ark. 2009), $NaSr_4(BO_3)_3:Ce^{+3}$ (Jiang ve ark. 2009), MgB_4O_7 , $MgB_4O_7:Mn$, $MgB_4O_7:Cu$ (Rao ve ark. 2009), $LiCaBO_3:RE^{+3}$ (Anishia ve ark. 2010, Jiang ve ark. 2008), $LiSrBO_3:RE^{+3}$ (Jiang ve ark. 2010), $ZnB_2O_4:La$ (Kucuk ve ark. 2013), $ZnB_2O_4:Ce$ (Kucuk ve ark. 2016), $Na_2B_4O_7:Ag$ ve $MgB_4O_7:Cu$, Ag (Yüksel 2013), $ZnO:RE^{+3}$ (RE=Eu, Tb) (Pal ve Manam 2014), $LiF:Mg$, Cu, Si (Tang ve ark. 2015), $MgB_4O_7:Sr$ (Evis ve ark. 2016), $BaZr_{0,25}Ti_{0,75}O_3:Eu^{+3}$ (Nag Bhargavi ve ark. 2017).

Annalakshmi ve arkadaşları (2014), “Tulyum Katkılı ZnB_2O_4 Fosforunun Termolüminesans Dozimetrik Özellikleri” başlıklı çalışmalarında, katkısız ve nadir toprak elementi katkılı çinko borat polikristal toz örnekleri, katı-hal yüksek sıcaklık difüzyon tekniği ile sentezlemişlerdir. Sentezlenen fosforların TL ışımaya eğrisi, TL emisyon spektrumu, fotolüminesans spektrum, gama doz-cevap, sönmeme incelemeleri, tekrar edilebilirlik ve yeniden kullanılabilirlik çalışmaları ile dozimetrik özellikleri araştırılmıştır. Tb, Gd, Mn, Dy, Tm gibi farklı nadir toprak elementi katkılı fosforlar arasında, Tm katkılı çinko boratın daha yüksek hassasiyete sahip olduğu ve TL uygulama için çinko borat örgüsü içinde en verimli dopant özelliği gösterdiği bulunmuştur. Böylece bu fosforun ayrıntılı dozimetrik özellikleri belirtilmiş ve 10 mGy’den 10^3 Gy’e kadarki doz aralığında doz-cevabın lineer olduğu gözlemlenmiştir.

Deneysel veriler değerlendirildiğinde, bu fosforun radyasyon dozimetri çalışmalarında potansiyel uygulamalara sahip olabileceği sonucuna varılmıştır.

Kucuk ve arkadaşları (2013), “La-katkılı Çinko Boratların Sentezi, Termoluminesans ve Dozimetrik Özellikleri” başlıklı çalışmalarında, %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 La-katkılı çinko borat fosforları nitrik asit yöntemiyle hazırlanmışlardır. Hazırlanan örnekler, 140 °C’de yapılan ön ısıtma işleminden sonra 450 °C’ye kadar, azot atmosferinde, 5 °C/s sabit ısıtma hızında ısıtılarak, 40 mCi’lik aktiviteye sahip ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta kaynağıyla 143 mGy-60 Gy doz aralığında ışınlanmıştır. Her bir örneğin ışınma eğrileri yardımıyla doz-cevapları ve minimum ölçülebilir doz değerleri (MDD) belirlenmiştir. Tüm örnekler için beta radyasyonuna karşı doz cevaplarının oldukça lineer olduğu bulunmuştur. %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 La katkılı ZnB₂O₄ fosforlarının MDD değerleri sırasıyla, 10mGy, 50mGy, 10 mGy, 10mGy, 30mGy ve 4 mGy olarak belirlenmiştir. İncelenen örneklerin luminesans şiddetlerinin düşük beta-radyasyon dozları için kullanılabilme olasılığının olabileceği gösterilmiştir.

Bahl ve arkadaşları (2013), “Gama ve Protonla Işınlanmış MgB₄O₇:Dy, Na Nano Kristallerinin Sentezi ve TL Karakteristikleri” başlıklı çalışmalarında, MgB₄O₇:Dy, Na örneklerini yakma metodu ile sentezlemişlerdir. Başlangıç karışımında Mg(NO₃):H₃BO₃:NH₄NO₃:CH₄N₂O=1.0:3.2:10.2:10.2 oranlarını kullanmışlar ve karışım viskoz sıvı haline gelene kadar DyCl₃ ve Na₂SO₄ uygun miktarlarda ilave etmişlerdir. Hazırlanan karışım 400 °C’de tavlayıp tavlama işlemi sonrasında oda sıcaklığına soğutarak MgB₄O₇:Dy, Na malzemesini hazırlamışlardır. Elde ettikleri ürünün XRD ve TEM sonuçlarına bakarak morfolojisini ve boyutlarını tespit etmişlerdir. XRD sonuçlarına göre elde ettikleri malzemenin ortogonal yapıya sahip olduğunu ve tane boyutunun yaklaşık olarak 45 nm ile 55 nm aralığında değiştiğini gözlemişlerdir. MgB₄O₇:Dy, Na örneklerini 200 °C ile 400 °C arasında değişen sıcaklıklarda tavlayıp 10 Gy gama ışınına maruz bırakarak TL ölçümlerini yapmışlar ve tavlamanın TL şiddetine etkisine bakmışlardır. 300 °C’de yapılan tavlamanın örneğin TL şiddetini maksimum yaptığını gözlemişler ve uygun tavlama sıcaklığı olarak 300 °C’yi seçmişlerdir. Işınlanan örnekleri TL cihazında 1 K/s, 2 K/s, 5 K/s ve 7 K/s’lik farklı ısıtma hızları ile ısıtarak TL ölçümlerini almışlar ve en yüksek TL şiddetinin gözlemlendiği 5 K/s’lik ısıtma hızını deneylerde kullanılmak üzere seçmişlerdir. Üretilen malzemeyi pelletler halinde

hazırlayarak 0,1-1000 Gy arasında gama ışınlarına ve 1 Gy-450 Gy arası 150 MeV enerjili proton demetlerine maruz bırakarak TL ölçümlerini yapmışlar ve bu ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Gamaya maruz bırakılmış örneklerin 400 K ve 512 K’de, proton demetlerine maruz bırakılmış örneklerin ise 450 K ve 477 K’de TL ışıma tepelerine sahip olduklarını gözlemişlerdir. Proton demetlerine maruz bırakılan örneklerin 350 Gy’e kadar, gamaya maruz bırakılan örneklerin ise 1000 Gy’e kadar doğrusal doz-cevabı verdiklerini belirlemişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada gama ve protonla ışınlanmış örneklerin 30 günlük periyot için solma (fading) özelliklerini de çalışmışlar ve TL tepelerinin solma oranlarını belirlemişlerdir.

Kawashima ve arkadaşları (2013), “MgB₄O₇:Tb Fosforunun Termoluminesans Özellikleri” başlıklı çalışmalarında MgB₄O₇ bor bileşenine çözücü buharlaştırma yöntemi ile farklı oranlarda Tb katkılamışlardır. Katkılama işlemleri sonrasında yaptıkları TL okumaları ile molar olarak %1 oranında Tb katkılı örneklerin yüksek TL şiddetine sahip olduğunu belirlemişler ve bu örneklerin TL özelliklerini çalışmışlardır. TL okumaları sonucunda MgB₄O₇:Tb örneklerinin TL ışıma eğrilerinin 220 °C civarında belirgin ve iyi tanımlanabilen bir tepe ile 330 °C civarında küçük bir omuzdan oluştuğunu gözlemişlerdir. %1 oranında Tb katkılı örneklerin 489 nm, 545 nm, 588 nm ve 622 nm civarlarında Tb⁺³ iyonundan kaynaklı TL ve floresans yayınına sahip olduklarını belirlemişlerdir. Ayrıca 1 Gy ve 10 Gy arasında değişen dozlarda gama ile ışınladıkları örneklerin doğrusal doz-cevabına sahip olduğu aralıkları ve ölçülebilir en küçük dozu bulmuşlardır.

Singh ve arkadaşları (2012), “Li₂B₄O₇:Cu, Ag, P Fosforunun Hazırlanmasına Isısal İşlemin Etkisinin Çalışılması” başlıklı çalışmalarında Li₂B₄O₇ bor bileşenine ağırlıkça %0,02 ve %0,04 oranlarında Cu, Ag ve P elementlerini katkılayarak iki ayrı örnek hazırlamışlardır. Hazırlanan örnekler, 800 °C’de 1 saat tavlaniıp hızlıca oda sıcaklığına soğutulduktan sonra 525 °C’de 30 dakika daha tavlanimıştır. Tavlama işlemlerinden sonra örneklere ⁶⁰Co gama kaynağıyla 5 Gy’lik doz verilip 2 °C/s’lik ısıtma hızı ile TL ölçümleri alınmıştır. Aynı işlemler 2 saat, 3 saat ve 4 saatlik farklı ısı işlemler uygulanarak tekrarlanmıştır. Yapılan farklı ısı işlemlerinin ve farklı katkılama konsantrasyonlarının hepsi için 200 °C’de aynı yayılıma sahip TL tepeleri gözlemişler,

ancak 3 saatlik ısıtma işlemi için elde edilen TL şiddetinin maksimum olduğunu belirlemişlerdir.

Zheng ve arkadaşları (2009), "Çinko Borat Kristallerin Lüminesans Özellikleri Üzerine Eu^{+3} Katkısının Etkisi" başlıklı çalışmalarında, Eu^{+3} iyonları ile yaklaşık 300 nm parçacık boyutlu çinko borat kristal toz örnekleri, çökeltme yöntemi kullanılarak hazırlamışlardır. Hazırladıkları örnekleri, XRD, TEM, FT-IR ve lüminesans spektrumuyla karakterize etmişlerdir. Eu^{+3} katkısının lüminesans şiddetini önemli ölçüde yükselttiğini belirtmişlerdir.

Rao ve arkadaşları (2009), " MgB_4O_7 , $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ Fosforlarının Termolüminesans Karakteristikleri" başlıklı çalışmalarında katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle 1200 °C'de 4 saat sinterleme yaparak MgB_4O_7 'ye %0,5 oranında Cu ve Mn katkılarını ve MgB_4O_7 , $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ bileşiklerinin termolüminesans karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, ^{90}Sr beta kaynağı ile 10 Gy doz verdikleri örneklerin termolüminesans okumalarını Nucleonix marka cihaz ile yaparak MgB_4O_7 için 225 °C, $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ için 240 °C ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ için ise 240 °C ve 290 °C civarlarında TL tepeleri gözlemlendiğini rapor etmişlerdir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise 1 Gy ile 60 Gy arasında farklı dozlarla ışınladıkları örneklerin TL doz cevaplarını ve ayrıca karanlık bir ortamda 50 gün süresince bekleterek inceledikleri normal sönümlerini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, elde ettikleri dozimetrik malzemelerin kaza sonucu oluşabilecek radyasyon sızıntılarında TL dozimetresi olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Pekpak ve ark. (2009), "Lityum Tetraboratın Termolüminesans Karakteristikleri" başlıklı çalışmalarında, başlangıç malzemesi olarak lityum karbonat (Li_2CO_3) ve borik asidin (H_3BO_3) agat havanda öğütülmüş tozlarını uygun oranlarda karıştırıp, katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle 400 °C'de 3 saat ön ısıtma yaptıktan sonra, 750 °C'de 4 saat fırınlayıp oda sıcaklığına kadar soğutarak lityum tetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) sentezlemişlerdir. Sentezlenen lityum tetraborata, bakır-1 oksit (Cu_2O) bileşiğini kullanarak katı-hal sentez reaksiyonu yöntemiyle ve bakır-2 klorür (CuCl_2) bileşiğini kullanarak hidrotermal sentez yöntemiyle değişik oranlarda Cu katkılarını, elde ettikleri katı-hal malzemelerin yapısal özelliklerini XRD yöntemi ile belirlemişlerdir. Çalışmanın son aşamasında değişik

oranlarda ve iki farklı yöntemle bakır katkılanmış olan lityum tetraborat örneklerinin TL özelliklerini belirlemek için, her bir örneği oda sıcaklığında $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağıyla 5 dakika (2,5 Gy) ışınladıktan sonra Harshaw TLD Sistem 3500 Manual TL okuyucuda 50 °C'den 400 °C'ye kadar 1 °C/s ısıtma hızı ile TL ölçümünü yapmışlardır. Sonuç olarak en yüksek TL cevabın, bakır katkı oranı en az olan örneklerde gözlemlendiğini ve hidrotermal yöntemle katkılanan örneklerin katı-hal yöntemi ile katkılanan örneklere göre daha kullanışlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Juan ve arkadaşları (2008), "Disporsiyum Katkılı Çinko Metaborat Fosforlarının Fotoluminesans ve Termoluminesans Özellikleri" başlıklı çalışmalarında, disporsiyum (Dy) katkı çinko metaborat polikristal toz örnekleri, yüksek sıcaklıkta katı-hal reaksiyon yöntemiyle hazırlamışlar ve XRD ile karakterize etmişlerdir. Hazırladıkları örnekleri, ^{60}Co gama kaynağı ile ışınladıktan sonra fotoluminesans ve üç boyutlu termoluminesans emisyon spektrumlarını incelemişlerdir. Gama-ışını radyasyonuna maruz bırakılan $\text{Zn}_{0,96}(\text{BO}_2)_2:0,04\text{Dy}$ polikristal toz örneğinin TL-doza cevabının, 1 Gy'den 100 Gy'ye kadarki klinik doz seviyelerinde hemen hemen lineer olduğunu belirlemişlerdir. Deneysel sonuçlardan $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Dy}$ fosforunun, klinik dozimetri için gama-ışını termoluminesans dozimetre materyali olarak potansiyel kullanıma sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Li ve arkadaşları (2007), "Yeni Fosfor $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Tb}$ 'ın Sentezi, Fotoluminesans, Termoluminesans ve Dozimetri Özellikleri" başlıklı çalışmalarında, Tb katkı çinko borat toz örneklerini, yüksek sıcaklıkta termal karbon indirgeyici atmosfer içinde katı-hal reaksiyon yöntemiyle hazırlamışlardır. Bu fosforları ^{60}Co gama kaynağıyla ışınladıktan sonra fotoluminesansını, üç boyutlu termoluminesans emisyon spektrumunu ve dozimetrik karakteristiklerini incelemişlerdir. Gama radyasyonu ile ışınlanan toz örneklerin TL-doza cevaplarının, klinik doz seviyeleri için 1 Gy'den 100 Gy'e kadarki doz aralığında hemen hemen lineer olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlardan $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Tb}$ örneğinin klinik dozimetre için gama-ışınları termoluminesans dozimetre materyali olarak potansiyel kullanıma sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Prokic (2001), "Lityum Borat Katı Termoluminesans (TL) Dedektörleri" başlıklı çalışmada, katı-hal reaksiyonu yöntemiyle lityum tetraborata ağırlıkça %0,07 Cu, %0,07 In ve %0,05 Ag katkılarak $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu, In, Ag}$ bileşimini ayrıca yine lityum

tetraborata ağırlıkça %0,07 Cu, %0,07 In katkılayarak $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$, In bileşiğini elde etmiştir. Bu iki örneği öğütüp 75 μm -200 μm arasında toz halde elde edip basınç altında sıkıştırarak 4,5 mm genişlik ve 0,95 mm kalınlıkta pelletler yapmış ve pelletleri 850 °C’de sinterlemiştir. Böylece elde ettiği dozimetrelere ^{60}Co kaynağı ile 10^{-4} Gy ile 3×10^3 Gy arasında ışınlanmış ve TL ölçümlerini Harshaw TL Analyzer Model 2000 ile 5°C/s ısıtma hızında yapmıştır. Ölçümler sonucunda $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$, In dozimetresi için 125 °C ve 210 °C civarlarında iki ışım tepesi, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$, In, Ag dozimetresi için ise 125 °C, 190 °C ve 225 °C civarlarında üç ışım tepesi gözlediğini rapor etmiş ve 190 °C’deki ışım tepesinin Ag katkısından kaynaklandığını belirtmiştir. Ayrıca $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$, In ve $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$, In, Ag bileşiklerinin doz-cevap eğrilerini karşılaştırarak doz-cevaplarının doğrusal olduğu doz aralıklarını da belirlemiştir.

Santiago ve arkadaşları (1998), “Bakır İçeren Sodyum Borat Bileşiklerinin Termoluminesansı” başlıklı çalışmalarında 741 °C civarındaki erime noktasında CuCl_2 ve sodyum boratı fırınlamaya sodyum borata %0,1 oranında bakır katkılarını ve elde ettikleri bileşiklerini öğütürerek 20-150 μm parçacık boyutunda toz örnek haline getirmişlerdir. Bu toz örnekleri 400 °C’de 1 saat tavlayıp X-ışınlarına maruz bırakarak deneyler yapmışlardır. X-ışını deneylerinin sonuçlarına göre örneklerin erime noktasından daha yüksek sıcaklıklarda camsı, düşük sıcaklıklarda ise kristalin olduğunu gözlemişlerdir. Bileşiklerin TL ışım tepelerini incelemek için 15 mg’lık toz örnekleri 400 °C’de 15 dakika tavlayıp tavlama işlemlerinden sonra ^{60}Co kaynağı kullanarak 0,1 Gy ile 20 Gy aralığında ışınlayıp 1 °C/s’lik ısıtma hızında TL ölçümleri almışlardır. Amorf ve kristal örnekler için elde ettikleri ışım tepelerini $\text{LiF}:\text{Mg}$, Ti (TLD-100) dozimetresinin ışım tepeleri ile karşılaştırmışlardır. Amorf bileşiklerin 120 °C, 210 °C ve 290 °C’de üç ışım tepesine, kristal bileşiklerin 90 °C ve 260 °C’de iki ışım tepesine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca ışım tepelerinin solma oranlarını belirledikten sonra izomerik çizimlerle bileşiklerin ışım spektrumlarına ait dalga boyu aralıklarını bulduktan sonra son aşamada elektron spin rezonans (ESR) deneylerini amorf ve kristal örneklerle ayrı ayrı uygulayarak rapor etmişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Çalışmada Kullanılan Araç-Gereç ve Cihazlar

3.1.1. Yüksek sıcaklık fırını

Disporsiyum katkılı çinko borat fosforların üretiminde ısıtma işlemleri, Protherm marka PLF 14/50/450 model elektrikli fırın ile yapılmıştır. Fırın, Kanthal APM ve Kanthal A-1 kalite rezistans teller içermektedir. Isıtma işlemi sırasında sürekli olarak fırının sıcaklığı dijital olarak okunabilmekte ve maksimum 1400 °C sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir. Sıcaklık hassasiyeti ± 2 °C, gücü 3,85 kW ve tek faza sahiptir. İstenilen maksimum sıcaklık ve ayarlanan sıcaklıktaki bekleme süresi programlanabilmektedir. Isıtma işlemleri için kullanılan yüksek sıcaklık fırını Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yüksek sıcaklık fırını

3.1.2. Hassas terazi

Malzeme üretim aşamasında kullanılan toz örneklerin tartım işlemleri, AND marka hassas terazi ile yapılmıştır. Tam otomatik kalibrasyonu sayesinde, açıldığında kendisini kalibre edebilmektedir. Deneysel çalışmada toz örnek karışımları her biri 5 g olacak şekilde tartılmıştır. Cihazın hassasiyeti 0,0001 g’dır. Tartım işlemi için kullanılan hassas terazi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Hassas terazi

3.1.3. Manyetik karıştırıcı

Disporsiyum katkılı çinko borat fosforların hazırlanmasında, 250 mL'lik cam beher içine konan toz karışıma 80 mL nitrik asit çözeltisi eklenmiş ve bu cam beher manüel işletimli Cleaver marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı üzerinde belli bir sıcaklıkta bırakılmıştır. Karıştırıcı 5-380 °C'ye kadar örneği ısıtabilme ve 60-1500 rpm'ye kadar örneği karıştırma hızına sahiptir. Yüksek ısı rezistansı sayesinde, paslanmaz çelik tabanıyla güçlü asit ve baza karşı kimyasal rezistansı yüksektir. Örneklerin hazırlanması aşamasında kullanılan manyetik karıştırıcı Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Manyetik karıştırıcı

3.1.4. Agat havan

Üretilen örneklerin toz hale getirilmesi için agat havan kullanılmıştır. Bu havan çok sert bir malzemeden yapıldığından (moh skalasına göre 6,5 sertliğinde) örneklerin öğütülmesi aşamasında bulaşmayı minimuma indirmektedir. Aksi halde öğütme işlemi sırasında kullanılan malzemelerin örneğe karışma ihtimali söz konusu olabilmektedir. Örnekleri toz hale getirmek için kullanılan agat havan Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Agat havan

3.1.5. Hidrolik pres

Agat havanda ezilen toz örnekler, Specac marka hidrolik pres (maksimum 15 MPa) ile pellet yapılarak 700 °C, 800 °C, 900 °C'lik tavlama işlemlerine maruz bırakılmıştır. Örnekleri pellet yapmak için kullanılan hidrolik pres Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Hidrolik pres

3.1.6. Elekler

Farklı oranlarda Dy katkılı çinko borat toz örneklerin TL ölçüm işlemine geçmeden önce farklı tanecik boyutlarına ayrılmasında Retsch marka test elekleri kullanılmıştır. Eleklerin boyutları 45 µm ile 250 µm arasındadır. Deneysel işlemlerde kullanılan elekler Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



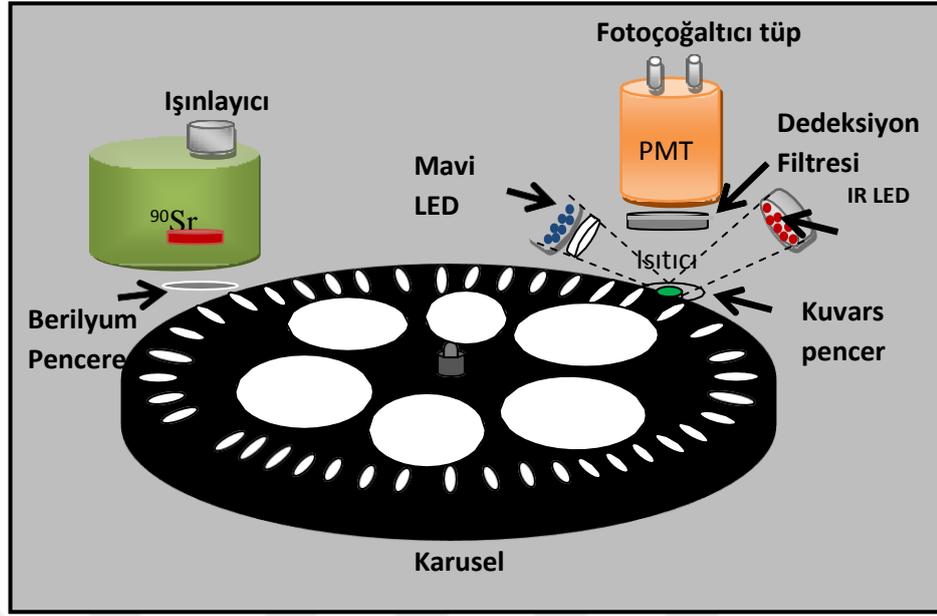
Şekil 3.6. Elekler

3.1.7. Termoluminesans Ölçüm Sistemi

Termoluminesans ölçümler, Şekil 3.7'de gösterilen Risø TL/OSL okuyucu (model TL/OSL-DA-20) ile yapılmıştır. Sistemin ana bileşenleri, ışık dedeksiyon sistemi, lüminesans uyarım sistemi (termal ve optik) ve ışınlama kaynağıdır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Risø TL/OSL (model TL/OSL-DA-20) ölçüm sistemi



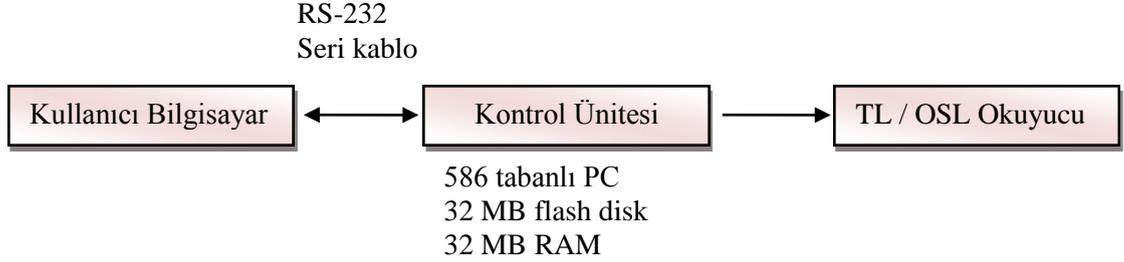
Şekil 3.8. Risø TL/OSL okuyucunun şematik gösterimi

Risø TL/OSL otomatik ölçüm sistemi ile hem TL hem de OSL ölçümleri yapılabilmektedir. Lüminesans uyarım sisteminde, optik uyarım ve ısıtma bileşenleri bulunur. Bu iki bileşen birlikte veya ayrı ayrı kullanılabilir. Sistem içinde dâhili $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta ışınlama kaynağı bulunmaktadır. Sistemde bulunan örnek taşıyıcıya 48 tane örnek yerleştirilebilir ve örnek yerleştirme konumlarının arası 17 mm'dir. Uygulama programı kullanılarak her örnek için farklı ışınlama, okuma prosedürü kullanılabilir. Örnekler oda sıcaklığından 700 °C'ye kadar ısıtılabilir. TL ölçümleri saf azot akımı altında yapıldığı gibi, vakumlu ortamda da alınabilir.

Risø TL/OSL Sistemi iki üniteden oluşur (Şekil 3.7).

- 1) Okuyucu Ünitesi: Örneklerin yerleştirildiği, termal ve optik olarak uyarıldığı, dedekte edildiği ve radyasyon kaynağı ile ışınlandığı ünitelerdir.
- 2) Kontrol Ünitesi: Sistemin elektronik kontrol kısmını oluşturur. Programlar ile okuyucu arasında köprü görevi görür ve örnekler için hazırlanan ölçüm parametrelerinin uygulanmasını sağlar. Yüksek voltajın uygulanması, vakum ortamının sağlanması, örnek taşıyıcısının açılması ve kapanması kontrol ünitesi tarafından yapılmaktadır. Sistem, standart bir bilgisayara kurulan iki program ile çalışır. İlk program, cihazın basit testlerinin yapılmasını sağlayan "Kontrol Programı", diğer program ise ölçüm

parametrelerinin her örnek için ayrı ayrı girilebildiği “Sequence Editor” programlarıdır (Şekil 3.9).



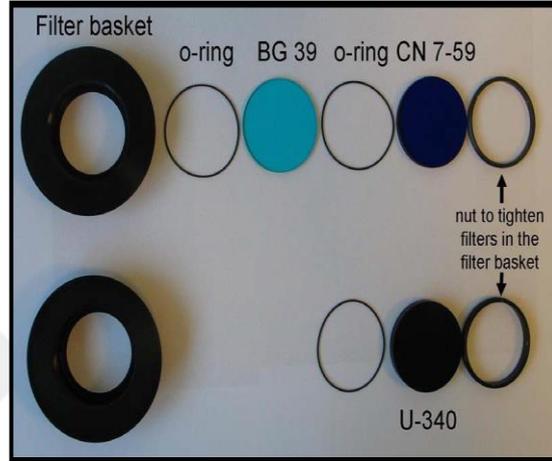
Şekil 3.9. Risø TL/OSL okuyucunun şematik şablonu

Işık dedeksiyon sistemi, foto-çoğaltıcı tüp (PMT) ve uygun optik dedeksiyon filtrelerinden oluşmaktadır. Bu filtrelerin kullanım amacı, saçılan ışığın PMT'e ulaşmasını engellemek ve spektral dedeksiyon penceresi oluşturmaktır.

Lüminesans yayılımı, PMT ile dedekte edilir. PMT'deki ışığa hassas olan kısım katottur. Katot, genellikle foto-yayıcı madde olan CsSb ve diğer bialkali karışımlardan oluşur. Foto-katotta az sayıda (gelen foton sayısından az) yayınlanan elektronlar dinot denilen bir dizi elektrotla çoğaltılır ve odaklanırlar. Dinotlar, bir yüksek voltaj kaynağı tarafından üretilen bir voltaj zinciri ve bir dizi voltaj bölücüleriyle birleştirilmiştir. Katottan salınan elektronlar birinci dinota çekilir ve çoğaltılır. Birbirini takip eden her dinot bir öncekinden daha yüksek potansiyeldedir. Tipik bir tüpte 10 veya 14 tane dinot vardır. Komşu dinotlar arasındaki tipik potansiyel farkı yaklaşık 100 V'tur ve böylece elektronlar dinotlara 100 eV'luk enerji ile çarparlar. Dinotlar ikincil elektron yayınlanmasının yüksek olasılıklı olduğu bir maddeden yapılır; bir elektron salınması için 2-3 eV yeterli olabilir, böylece elektron sayısında 30-50 çarpanı kadar bir kazanç sağlanabilir. Ancak elektronlar, madde içinde rastgele doğrultularda yayınlandıkları için yüzeyde az sayıda elektron yayınlanacaktır. Her dinotdaki artış, voltaj farkına bağlı olduğu için yüksek voltajdaki herhangi bir değişme çıkış pulslarındaki değişimlere neden olacaktır; bu yüzden yüksek voltaj kaynağının kararlı olması gereklidir (Krane 2006).

Risø TL/OSL okuyucu içindeki standart PMT'lerde, bialkali EMI 9235QB tüp kullanılır. Maksimum dedeksiyon verimi 200 nm ile 400 nm arasındadır. Sistemde, örnek ile katot arasındaki mesafe 55 mm'dir ve dedeksiyon katı açısı yaklaşık 0,4 steradyandır. Uyarma

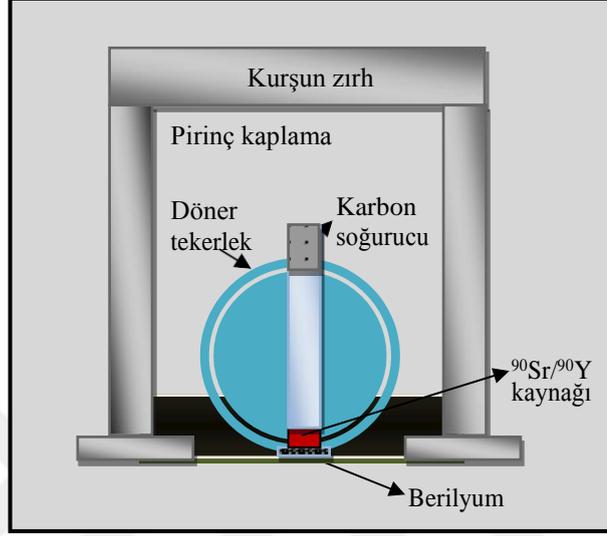
ışığının şiddeti yayılan ışığın şiddetinden yaklaşık 10^{18} kat daha büyüktür. Bu nedenle yayılan lüminesansın ölçülebilmesi için, uyarımda kullanılan ışığın PMT'ye ulaşımının uygun optik filtrelerle engellenmesi gerekir. Risø TL/OSL okuyucuda, aşağıdaki üç tip filtre bulunmaktadır. Bunlar; Hoya U-340 (7,5 mm kalınlığında, $\varnothing = 45$ mm), Schott BG 39 (2 mm kalınlığında, $\varnothing = 45$ mm) ve Corning 7-59 (4 mm kalınlığında, $\varnothing = 45$ mm). Bu filtreler Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. TL okuyucu sisteminde bulunan filtreler

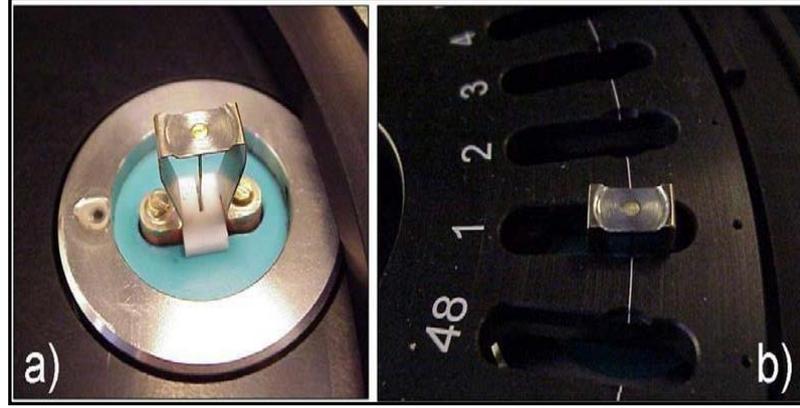
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta ışınlayıcı, örnek karuselinin üzerinde yer alır. Işınlayıcı, pirinç malzemeden yapılmıştır ve dış çapı 10 mm'dir. İki tarafından 20 mm'lik ve üzerinden 40 mm'lik kurşun zırhla çevrelenmiştir. Dış çapı 222 mm olan bir alüminyum emniyet başlığı, ışınlayıcıyı ve kurşun zırhı örter. Kaynak şiddeti, genellikle yaklaşık olarak 1,48 GBq'dir. Kaynak maksimum enerjisi 2,27 MeV olan beta parçacıkları yayar. Yarı-ömrü 30 yıl ve aktivitesi ise 1,48 GBq (40 mCi)'dir. Kaynağın altında 7 mm mesafede tutulan bir kuvars örneğinin aldığı doz saniyede 143 mGy'dir. 0,125 mm'lik bir berilyum penceresi ışınlayıcıyla örnek odası arasına yerleştirilmiştir. Bu pencere vakum ara yüzeyi olarak işlev görmektedir. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı pnömatik (hava basıncıyla çalışan) bir kapağa sahip kurşun blok içine yerleştirilmiştir. Kaynak basınçlı havayla kontrol edilen dönen bir paslanmaz çelik tekerin içine yerleştirilmiştir. Bu düzenek aracılığı ile kaynağı kapalı pozisyondan açık pozisyona getirmek 0,11 s sürmektedir (Markey ve ark. 1997). Kaynak kapalı olduğu zaman tekerlek 180° döner, böylece kaynak ucu direkt karbon soğurucuya yönelir. Bu sistem ile örnek, en az 1 saniye süresince ışınlanabilmektedir. Beta kaynağının şematik gösterimi Şekil 3.11'de verilmektedir. 48 örneklilik numune

tablasındaki iki komşu örneğin merkezleri arasındaki mesafe 17 mm'dir. Bu yakın konumlanma, bir örneğin ışınlanması sırasında komşu örneklerin de belli bir miktar doz soğurmalarına yol açmaktadır. Bu olay ışınlama çapraz-etkisi olarak adlandırılır ve TL ölçümüne çok az etkisi vardır.



Şekil 3.11. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta ışınlayıcının şematik gösterimi

Isıtıcı ve kaldırma mekanizması PMT altında yer alır (Şekil 3.12). Isıtıcının iki fonksiyonu vardır; birincisi örneği ısıtmak, ikincisi ise örneği ölçüm pozisyonuna getirmektir. Bu sayede LED'lerden (**L**ight **E**mitting **D**iode kelimelerinin kısaltılmış halidir ve "ışık yayan diyot" anlamına gelir) gelen ışık, örneği aydınlatırken daha az dağılmaya uğramakta ve örnekten çıkan lüminesans ışığı da daha az kayıpla PMT'ye ulaşmaktadır. Isıtıcı azot gazı kullanılarak soğutulur ve aynı zamanda azot akışı ısıtıcıyı yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeden de korumaktadır. Çünkü hızlı soğumanın gerçekleşmediği durumda örneklerin TL hassasiyetinde bir azalma meydana gelmektedir.



Şekil 3.12. a) Isıtıcının ölçüm pozisyonundaki resmi,b) Karuselinde yerleştirildiği a) ile aynı ısıtıcının resmi

3.2. Nitrik Asit Yöntemiyle Örneklerin Hazırlanması

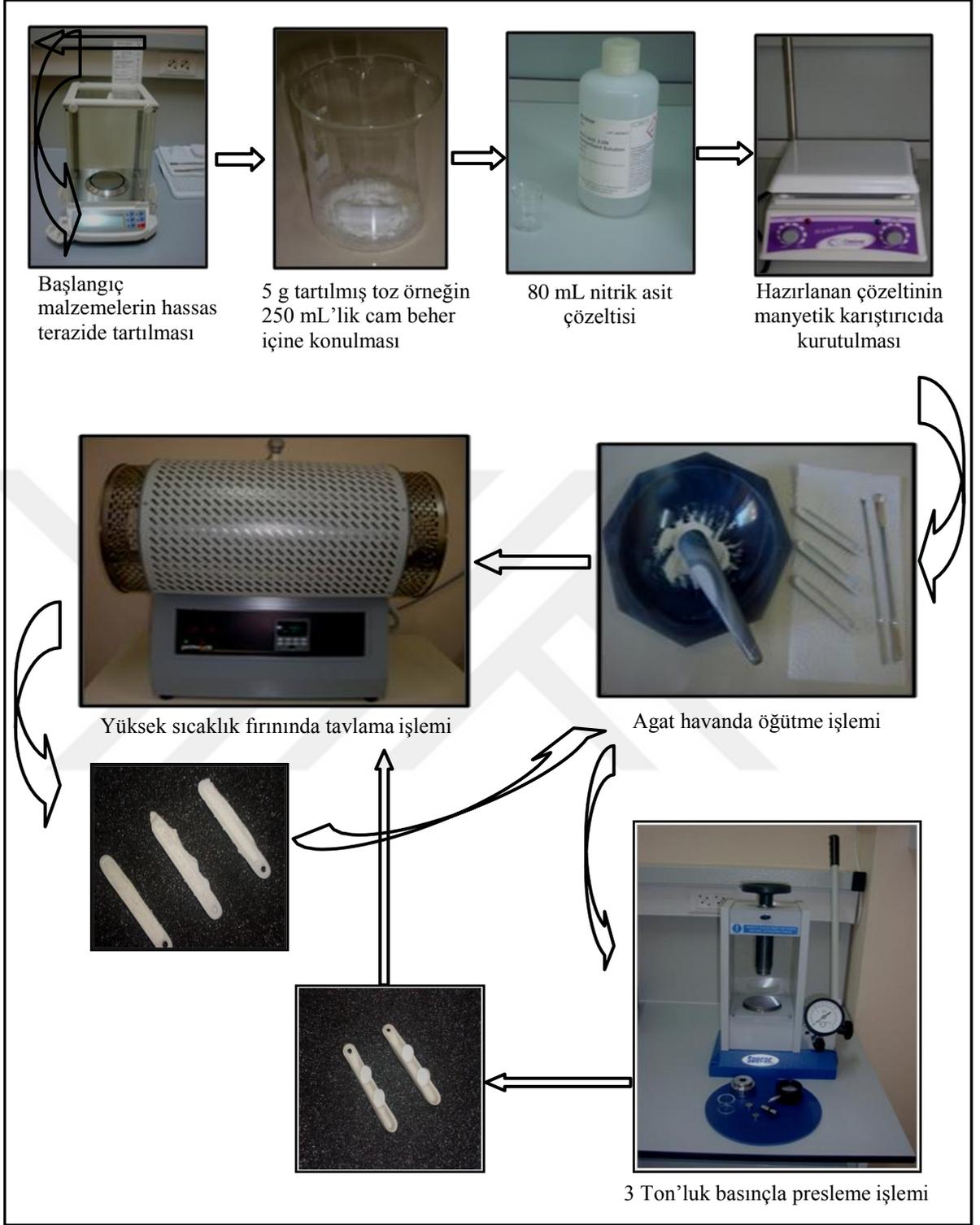
% 1, %2, %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforlar, Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü'nde “Dozimetrik Malzeme Geliştirme Laboratuvarında” üretilmiştir (Küçük 2015). Örneklerin hazırlanma aşamasında aşağıdaki işlem sıralamasına uyulmuştur:

- 1) Çözelti hazırlama (80 mL nitrik asit)
- 2) Kurutma (80 °C)
- 3) Tavlama (450 °C)
- 4) Pellet yapma (3 Ton)
- 5) Sinterleme (700 °C, 800 °C, 900 °C)

Dy katkılı çinko borat fosforları, nitrik asit yöntemiyle hazırlanmıştır. Hazırlanacak çözelti içine, hassas terazi ile uygun miktarlarda tartılan toz halindeki çinko oksit (ZnO , en az %99,9 saflıkta), borik asit (H_3BO_3 , %99,9 saflıkta) ve disporsiyum oksit (Dy_2O_3 , %99,9 saflıkta) konmuştur. Bu başlangıç materyalleri, içine 80 ml nitrik asit (HNO_3 , standart solüsyon) konan 250 mL'lik cam beher içinde ve manyetik karıştırıcı üzerinde 80 °C ısıtılarak karıştırılmıştır. Kuru bir ön madde elde edilene kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Elde edilen kuru madde, ince bir toz elde edilinceye kadar, yaklaşık 15 dakika agat havanda öğütülmüştür. Bu kuru toz, porselen potalara konularak olası organik bileşenleri arındırmak için 5 saat süreyle yüksek sıcaklık fırınında 450 °C'de tavlansmıştır. Tavlanan toz örnekler, tekrar agat havanda ezilerek hidrolik preste 3 ton'luk basınç

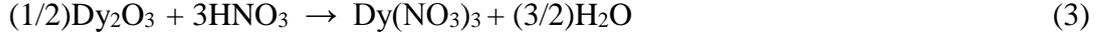
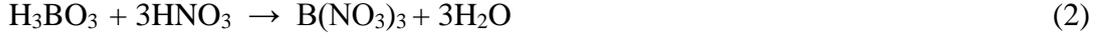
altında pellet haline getirilmiştir. Pelletler ayrı ayrı porselen potalara yerleştirilerek, önce 700 °C’de 2 saat sinterlenmiş ve sonra oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan pelletler fırından çıkarılıp agat havanda tekrar öğütülerek plastik tüplere yerleştirilmiştir. Aynı işlemler diğer potalara konan pelletler için sırasıyla 800 °C ve 900 °C’de tekrarlanmıştır. Kullanılan deneysel yöntemin resimlerle anlatımı Şekil 3.13’te verilmektedir.





Şekil 3.13. Örneklerin hazırlanma aşamalar

Deneysel süreçte tüm oksitler ve borik asit, aşağıda verilen kimyasal reaksiyonlarla metalik nitratlara [yani $Zn(NO_3)_2$, $B(NO_3)_3$ ve $Dy(NO_3)_3$] dönüştürülmüştür:



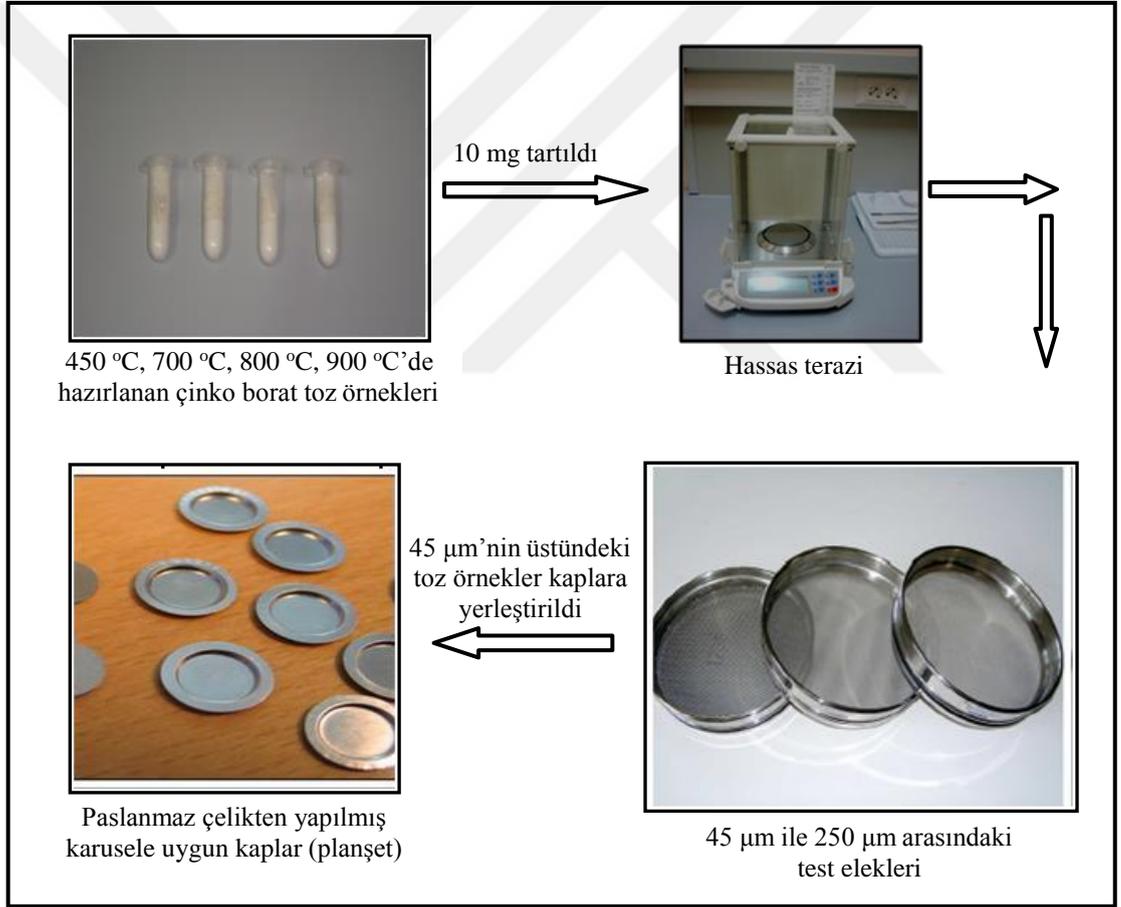
Deneysel aşamaların takibini kolaylaştırmak için her bir örnek, hazırlanma prosedürüne göre kodlandırılmıştır. Çizelge 3.1’de hazırlanan örneklerin listesi, laboratuvar kodları ve deneysel parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Örnek listesi, laboratuvar kodları ve deneysel parametreler

Örnek	Kod Adı	Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama süresi (saat)	Pellet basıncı (ton)	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Sinterleme süresi (saat)
Zn _{0,99} Dy _{0,01} B ₂ O ₄	Dy1	450	5	-	-	-
Zn _{0,99} Dy _{0,01} B ₂ O ₄	Dy17	450	5	3	700	2
Zn _{0,99} Dy _{0,01} B ₂ O ₄	Dy18	450	5	3	800	2
Zn _{0,99} Dy _{0,01} B ₂ O ₄	Dy19	450	5	3	900	2
Zn _{0,98} Dy _{0,02} B ₂ O ₄	Dy2	450	5	-	-	-
Zn _{0,98} Dy _{0,02} B ₂ O ₄	Dy27	450	5	3	700	2
Zn _{0,98} Dy _{0,02} B ₂ O ₄	Dy28	450	5	3	800	2
Zn _{0,98} Dy _{0,02} B ₂ O ₄	Dy29	450	5	3	900	2
Zn _{0,97} Dy _{0,03} B ₂ O ₄	Dy3	450	5	-	-	-
Zn _{0,97} Dy _{0,03} B ₂ O ₄	Dy37	450	5	3	700	2
Zn _{0,97} Dy _{0,03} B ₂ O ₄	Dy38	450	5	3	800	2
Zn _{0,97} Dy _{0,03} B ₂ O ₄	Dy39	450	5	3	900	2
Zn _{0,96} Dy _{0,04} B ₂ O ₄	Dy4	450	5	-	-	-
Zn _{0,96} Dy _{0,04} B ₂ O ₄	Dy47	450	5	3	700	2
Zn _{0,96} Dy _{0,04} B ₂ O ₄	Dy48	450	5	3	800	2
Zn _{0,96} Dy _{0,04} B ₂ O ₄	Dy49	450	5	3	900	2
Zn _{0,95} Dy _{0,05} B ₂ O ₄	Dy5	450	5	3	-	2
Zn _{0,95} Dy _{0,05} B ₂ O ₄	Dy57	450	5	3	700	2
Zn _{0,95} Dy _{0,05} B ₂ O ₄	Dy58	450	5	3	800	2
Zn _{0,95} Dy _{0,05} B ₂ O ₄	Dy59	450	5	3	900	2
Zn _{0,90} Dy _{0,10} B ₂ O ₄	Dy10	450	5	3	700	2
Zn _{0,90} Dy _{0,10} B ₂ O ₄	Dy107	450	5	3	800	2
Zn _{0,90} Dy _{0,10} B ₂ O ₄	Dy108	450	5	3	900	2
Zn _{0,90} Dy _{0,10} B ₂ O ₄	Dy109	450	5	3	900	2

3.3. Termoluminesans Yöntemiyle Lüminesans Ölçümler

Dy katkıli çinko borat fosforları, iri tanecik yöntemiyle TL ölçümüne hazırlanmıştır. Toz örnekler, 10 mg olacak şekilde tartılmış ve 45 µm–250 µm boyutlarındaki test elekleri yardımıyla elenmiştir. Çalışmada 45 µm'den büyük olan toz örnekler kullanılmıştır. Elenen toz örnekler, ölçümde kullanılan paslanmaz çelikten yapılmış karusele uygun çelik kapların (planşet) üzerine yerleştirilmiştir. Kapların üzerindeki toz tanecikleri, homojen olarak dağıtılmıştır. Hazırlanan çelik kapların üzerindeki örnekler ölçüm için 48 örnek alabilen karusele konulmuştur. Örneklerin TL ölçümüne hazırlanma aşamaları Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Örneklerin TL ölçüm işlemine hazırlanma aşamaları

Ölçüm işleminde kullanılan deneysel parametreler aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Beta kaynağı doz hızı: 143 mGy.s⁻¹

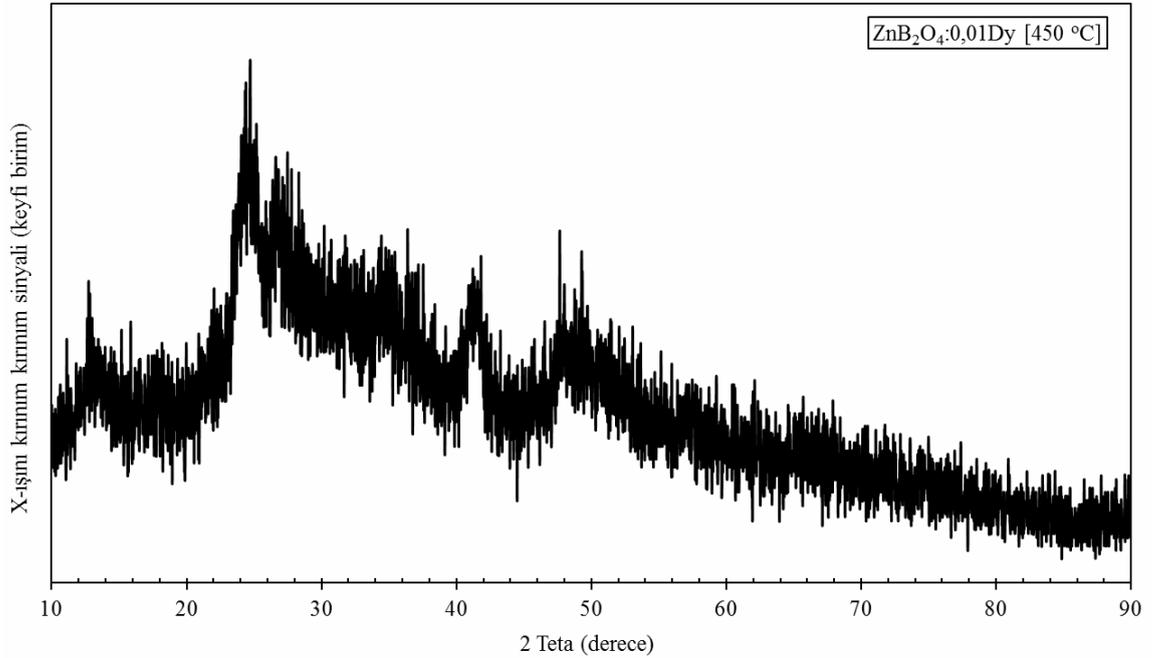
- Kullanılan optik filtreler: BG-39, CN 7-59
- Ön-ısıtma sıcaklığı: 140 °C, 2 °C/s
- TL okumaları: 450 °C, 5 °C/s
- Işınlanan radyasyon doz değerleri: (143 mGy), (715 mGy), (1,43 Gy), (15 Gy), (28,29 Gy), (30 Gy), (60 Gy)
- Farklı ısıtma hızları: 1 °C/s, 3 °C/s, 5 °C/s, 10 °C/s



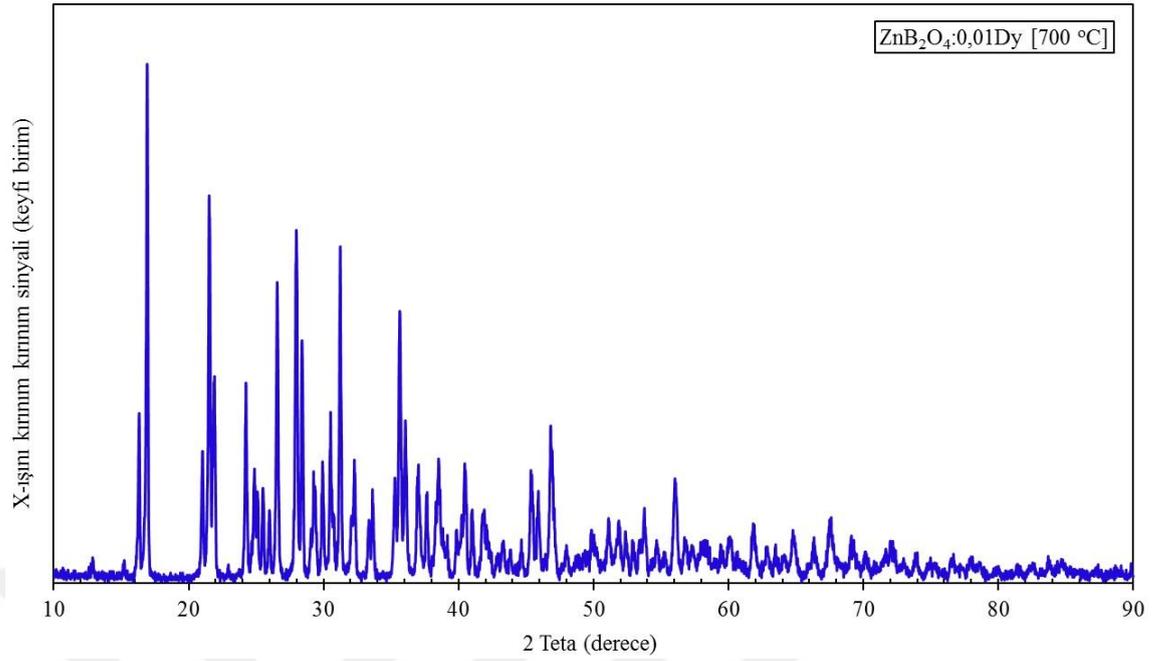
4. BULGULAR

4.1. X-ışını Toz Kırınım Analizleri

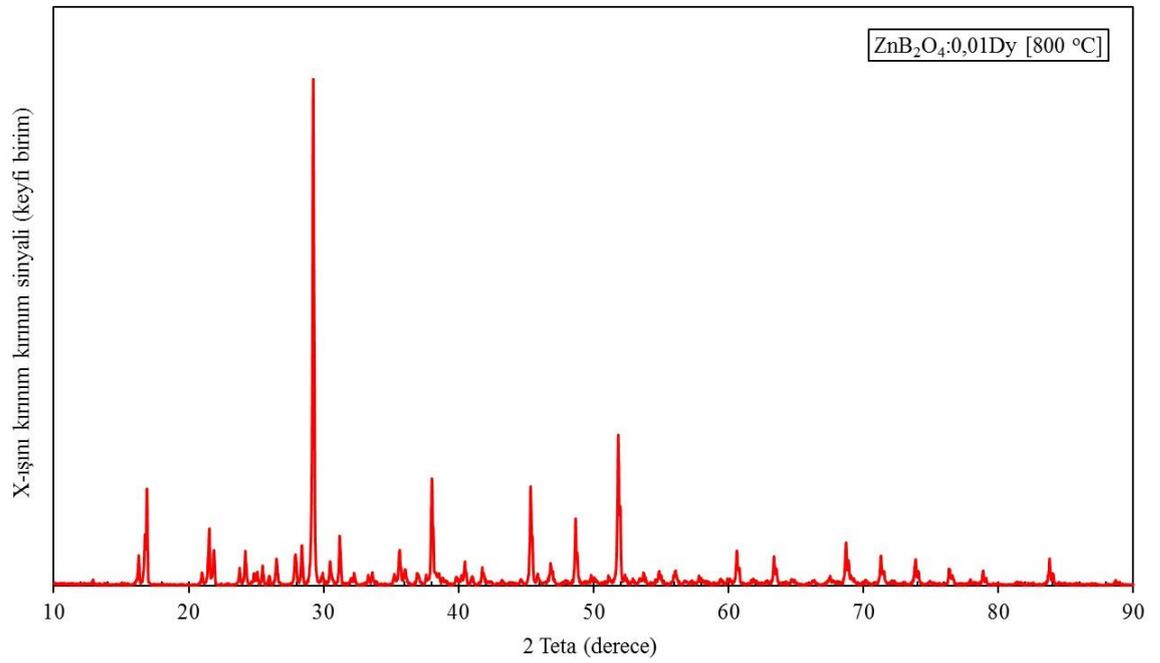
X-ışını toz kırınım (XRD) yöntemi, her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Dy katkılı çinko borat fosforların tam olarak sentezlenip sentezlenmediğinin anlaşılması için, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Merkez Laboratuvarında bulunan Rigaku Ultima IV X-ışını Difraktometresiyle (Cu K α 40 kV, 30mA, $\lambda=1,54050$ Å) XRD ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, $10^\circ < 2\theta < 90^\circ$ aralığında 0,02 derecelik adımlarla kaydedilmiştir. 450 °C, 700 °C, 800 °C ve 900 °C’de hazırlanan %1 Dy katkılı çinko borat toz örneklerinin XRD desenleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Bu XRD desenlerinden görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça kristal yapı yeniden düzenlenerek daha mükemmel bir yapıya dönüşmektedir. Bu bağlamda 900 °C’de hazırlanmış tüm örneklerin neredeyse yüksek kristalli saf fazda olduğu gözlenmiş ve XRD desenlerinin JCPDS kart no. 39-1126’da rapor edilenlerle tutarlı olduğu bulunmuştur. 900 °C’de hazırlanan %2, %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforların XRD desenleri ise Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



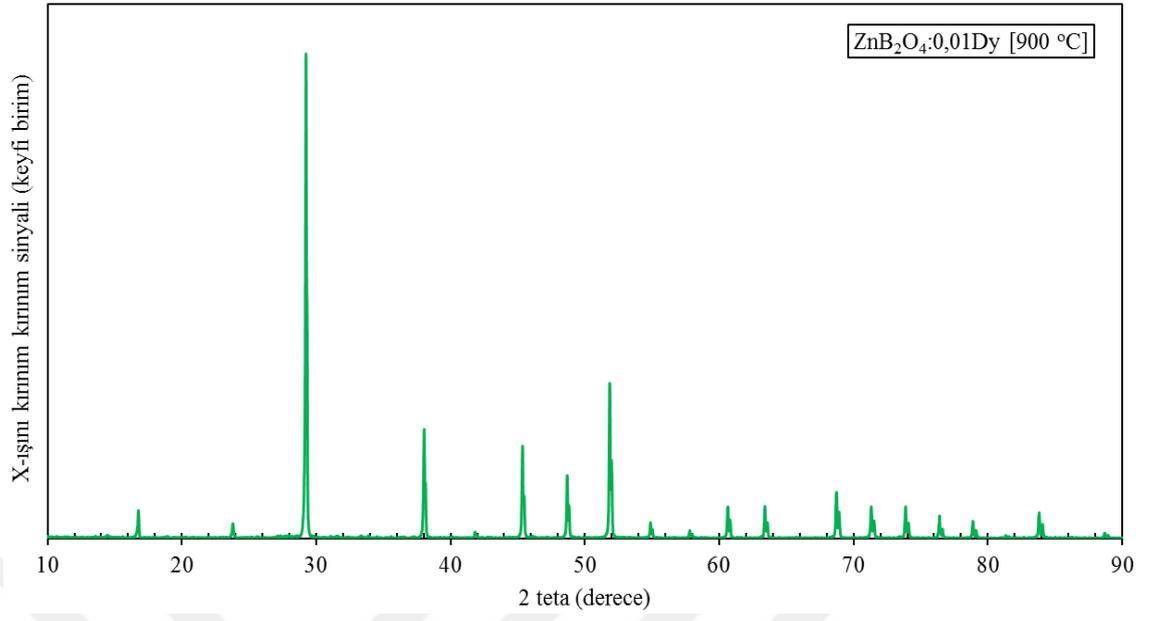
Şekil 4.1. %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (450 °C)



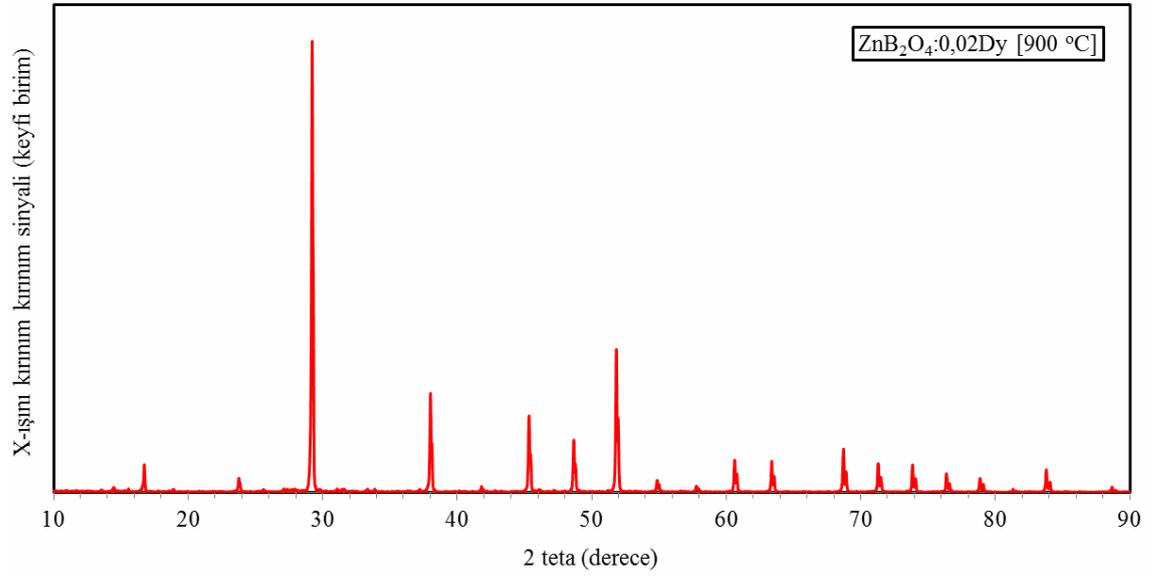
Şekil 4.2. %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (700 °C)



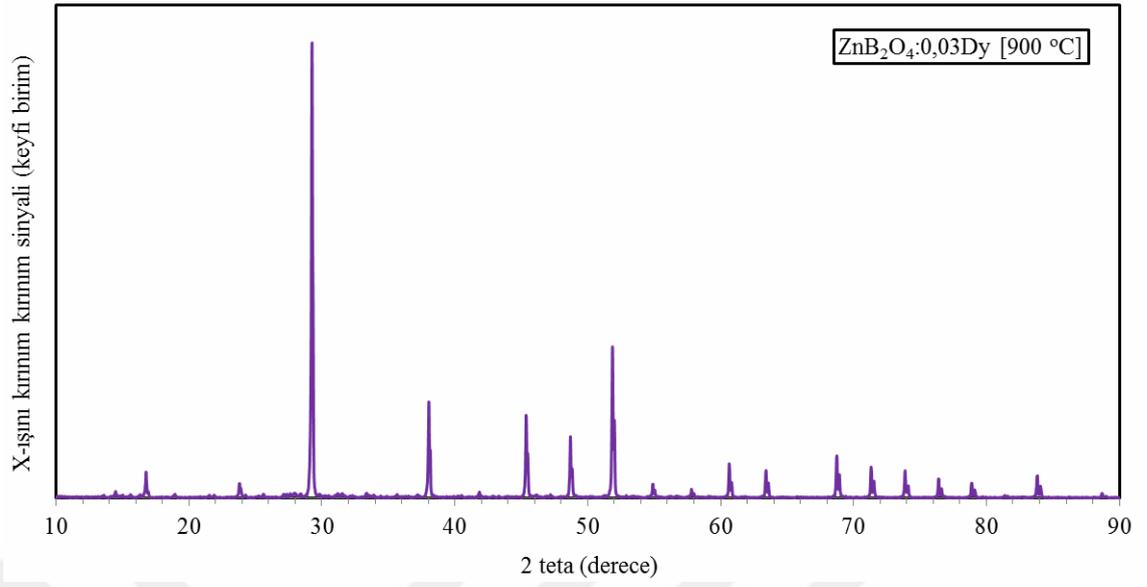
Şekil 4.3. %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (800 °C)



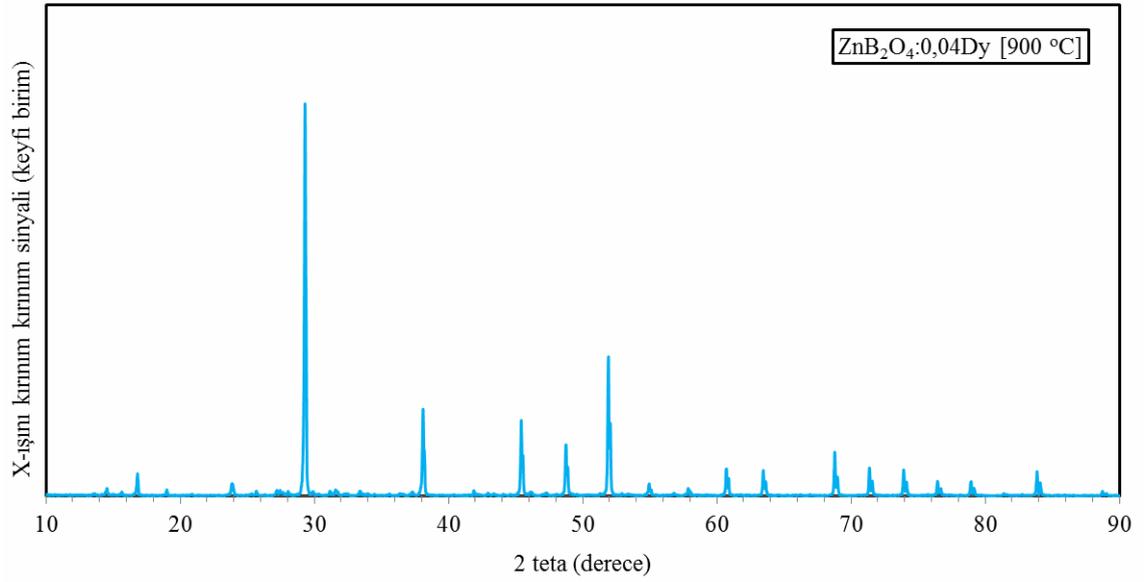
Şekil 4.4. %1 Dy katkıli çinko borat fosforunun XRD deseni (900 °C)



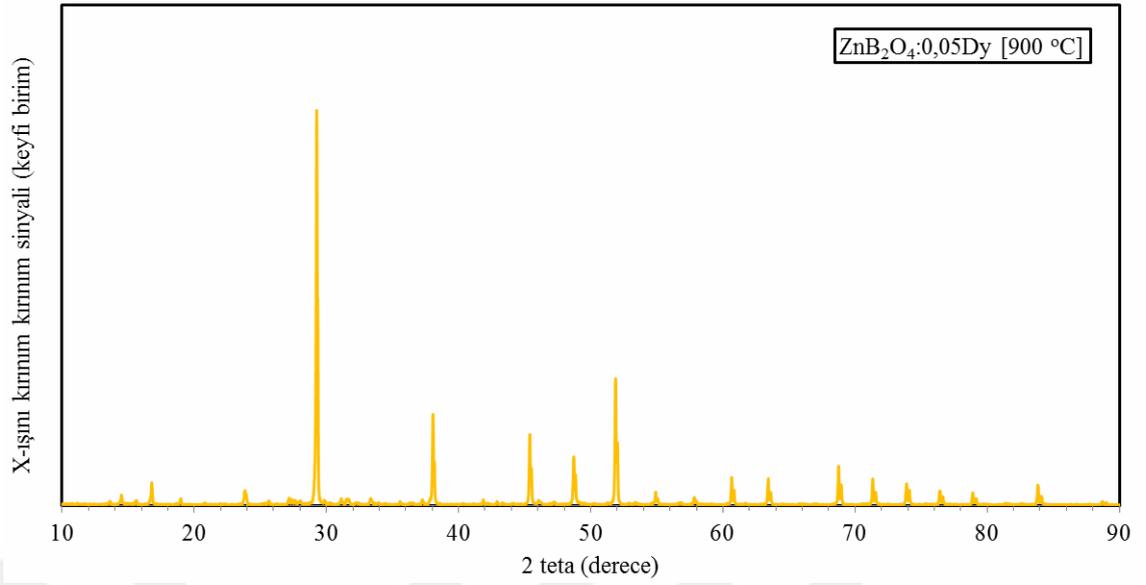
Şekil 4.5. %2 Dy katkıli çinko borat fosforunun XRD deseni (900 °C)



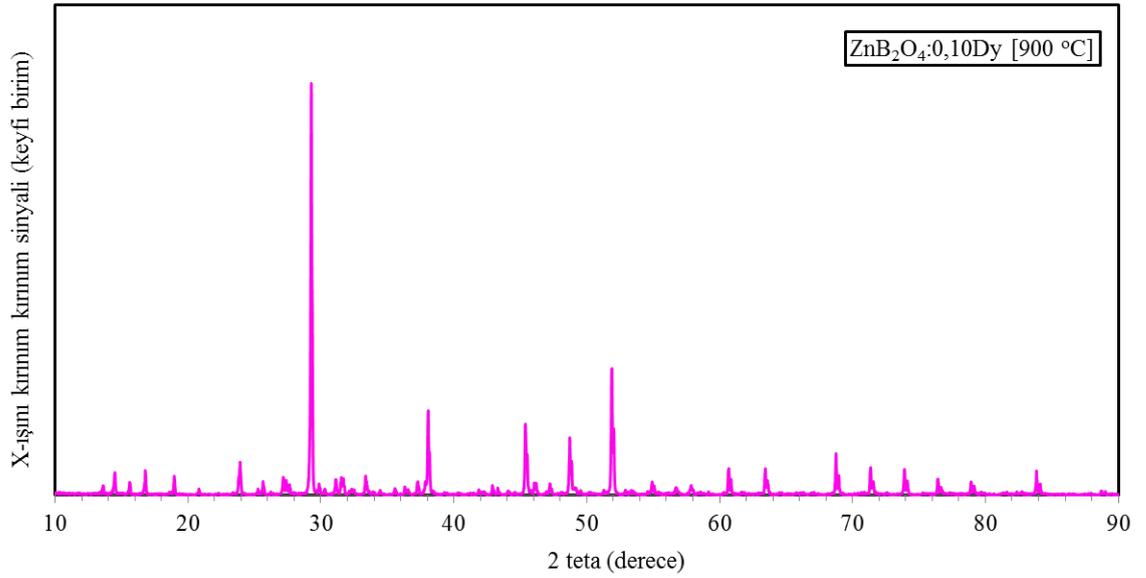
Şekil 4.6. %3 Dy katkıli çinko borat fosforunun XRD deseni (900 °C)



Şekil 4.7. %4 Dy katkıli çinko borat fosforunun XRD deseni (900 °C)



Şekil 4.8. %5 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 °C)



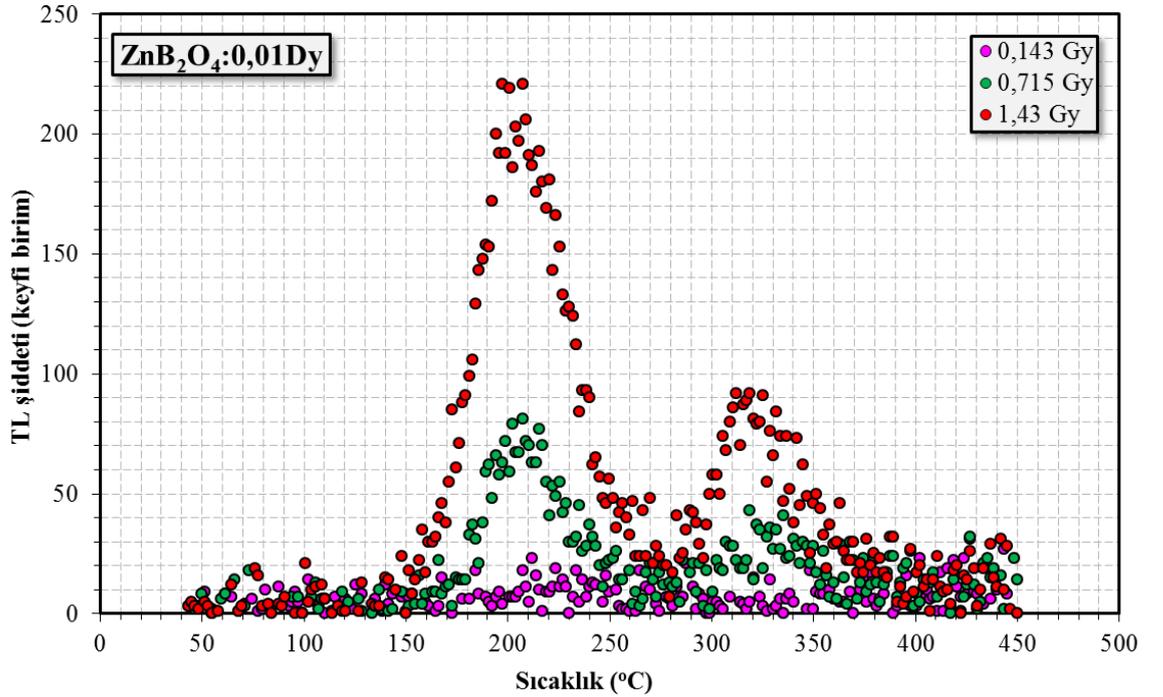
Şekil 4.9. %10 Dy katkılı çinko borat fosforunun XRD deseni (900 °C)

4.2. TL Işıma Eğrileri

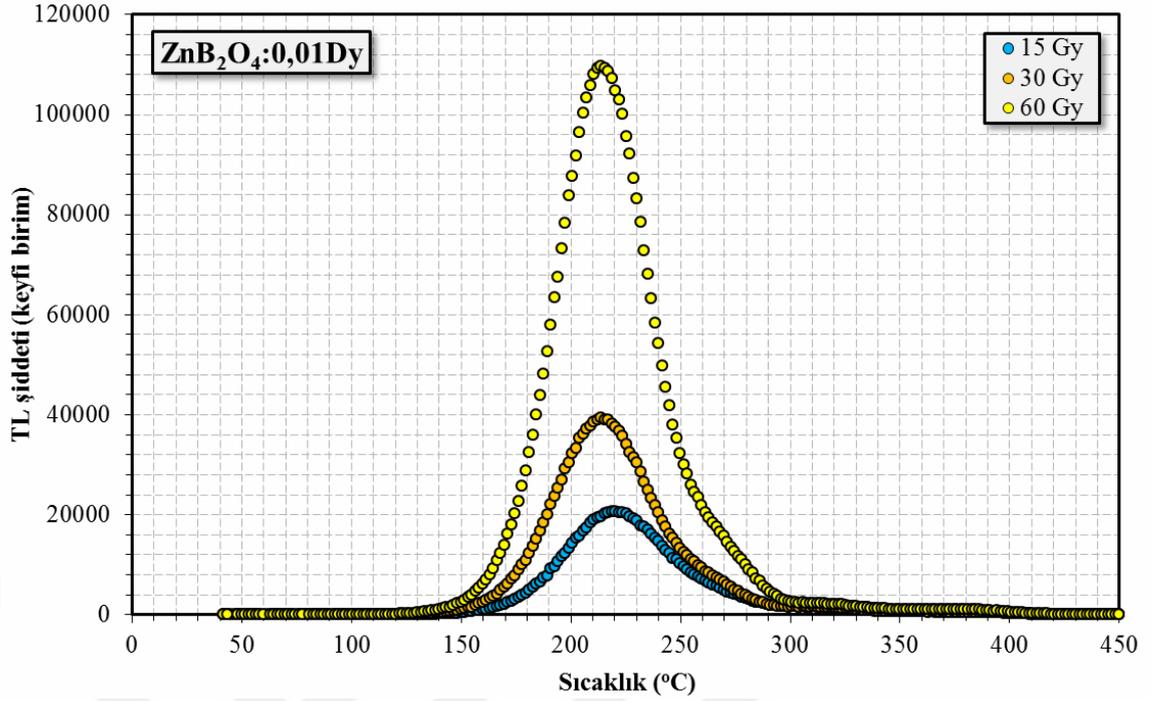
Işıma eğrileri, bir materyalin TL dozimetre amaçlı olarak kullanılmasına izin verilip verilmeyeceğine ilişkin ana göstergeler olduğu için özellikle önemlidir. Genellikle, ışıma eğrisinin, mümkünse basit, 200 °C’de zirveye ulaşması istenir (Pekpak 2010). Işıma eğri

şekilleri ve pik sıcaklıkları, sentez ve katkılama yöntemlerinden de etkilenir (Kayhan 2009). Genellikle ışıma eğrisindeki en yüksek pik, doz eşdeğerliğini hesaplamak için kullanılır. Eğrinin altındaki kısım TLD'de bırakılmış olan ışıma eğrisinin, diğer bir deyişle fosfor içerisinde depolanan doz miktarını verir. Piklerin genişliği tuzaklarda depolanan doz ile orantılıdır. Soğurulan doz, ışıma eğrisinin piklerinin yüksekliğinden ölçülür.

Hazırlanan %1, %2 , %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforların TL ışıma eğrileri, ⁹⁰Sr beta kaynağı kullanılarak (0,143 Gy), (0,715 Gy), (1,43 Gy), (15 Gy), (28,29 Gy), (30 Gy) ve (60 Gy) radyasyon dozları için incelenmiştir. Her bir örneğe 2 °C/s ısıtma hızı ile 140 °C'de ön-ısıtma işlemi yapılmış ve örnekler 5 °C/s ısıtma hızı ile 450 °C'ye kadar ısıtılarak ışıma eğrileri elde edilmiştir. TL ışıma eğrilerinde integral alan 40 °C-400 °C arasında alınmış ve doğal fon düzeltmeleri yapılmıştır. %1, %2 , %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforların TL ışıma eğrileri Şekil 4.10-Şekil 4.21'de verilmiştir.

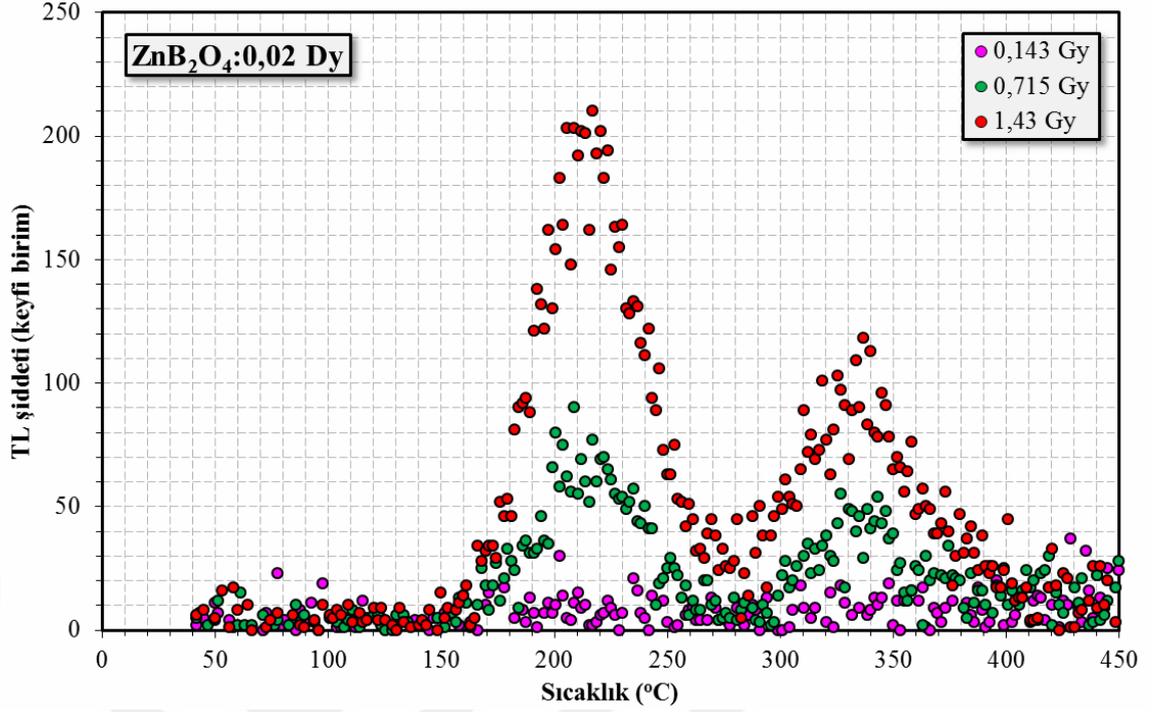


Şekil 4.10. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri

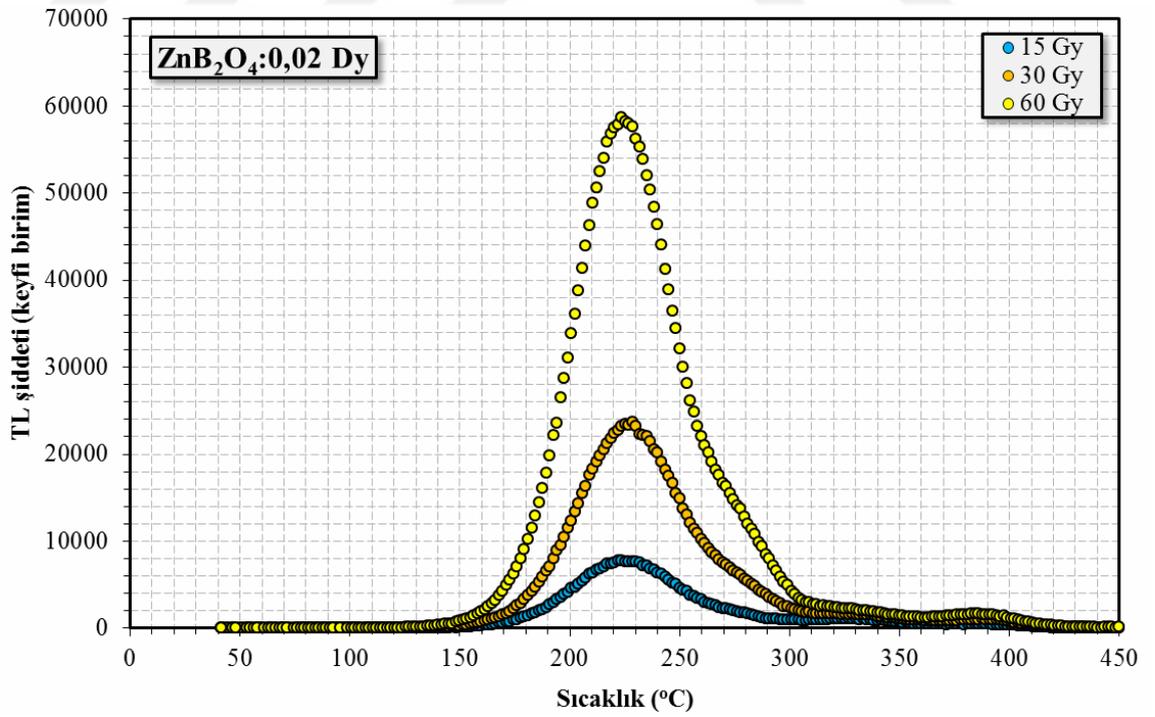


Şekil 4.11. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki TL ışıma eğrileri incelendiğinde, %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun, 207/219 °C civarında maksimum sıcaklığa sahip baskın TL pikleri sergiledikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca TL ışıma pik şiddetlerinin uygulanan beta dozuna bağlı oldukları ve artan doz seviyelerinin artmasıyla arttıkları belirlenmiştir. 30 Gy beta dozu için ışıma pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 182 kat arttığı bulunmuştur.

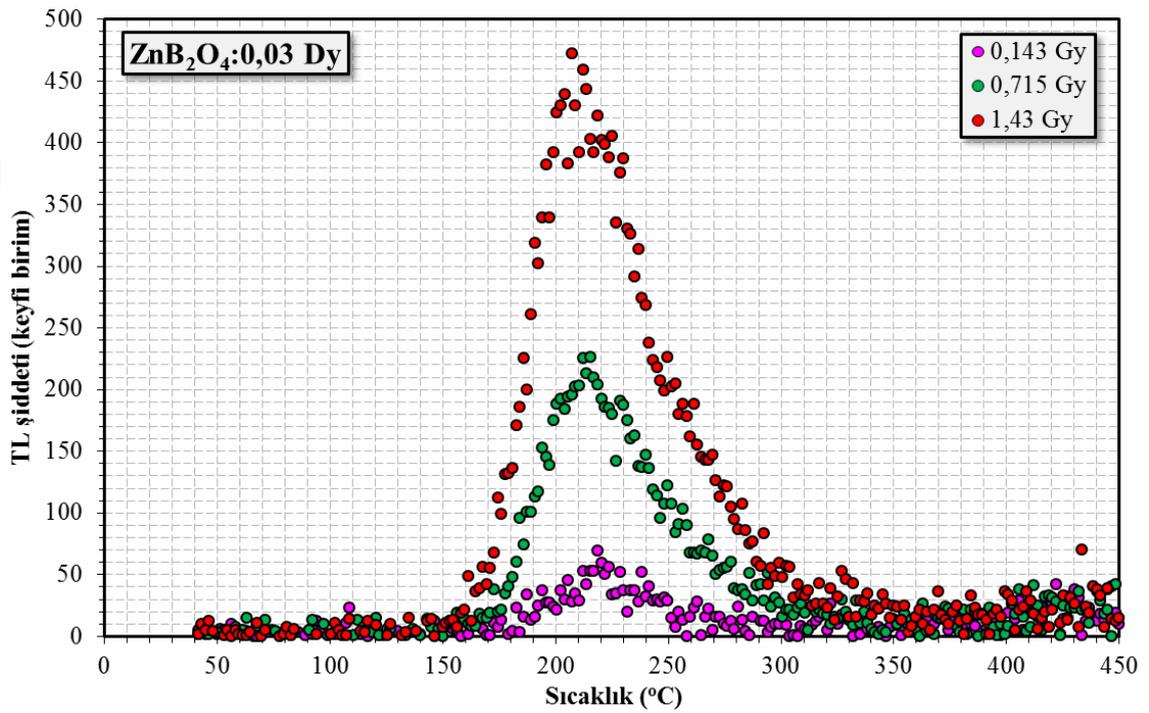


Şekil 4.12. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %2 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri

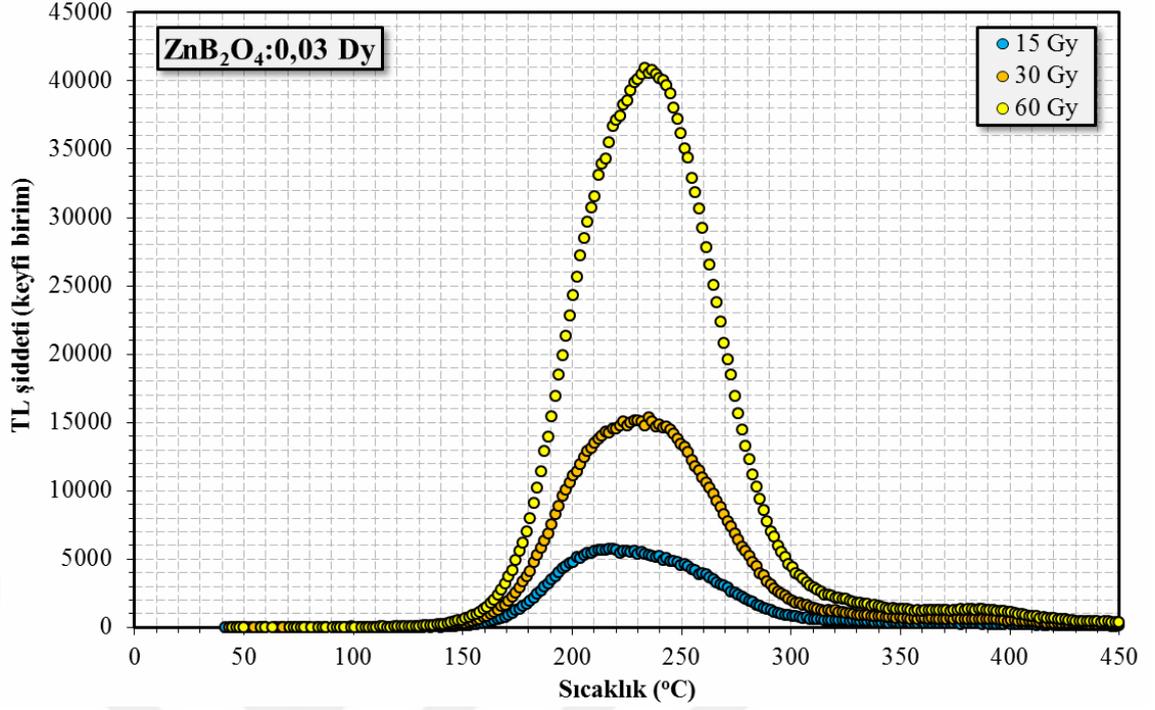


Şekil 4.13. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %2 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'deki TL ışımaya eğrileri incelendiğinde, %2 Dy katkıli çinko borat fosforunun, 209/229 °C civarında maksimum sıcaklığa sahip baskın TL pikleri sergiledikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca TL ışımaya pik şiddetlerinin uygulanan beta dozuna bağlı oldukları ve artan doz seviyelerinin artmasıyla arttıkları belirlenmiştir. 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 113 kat arttığı bulunmuştur.

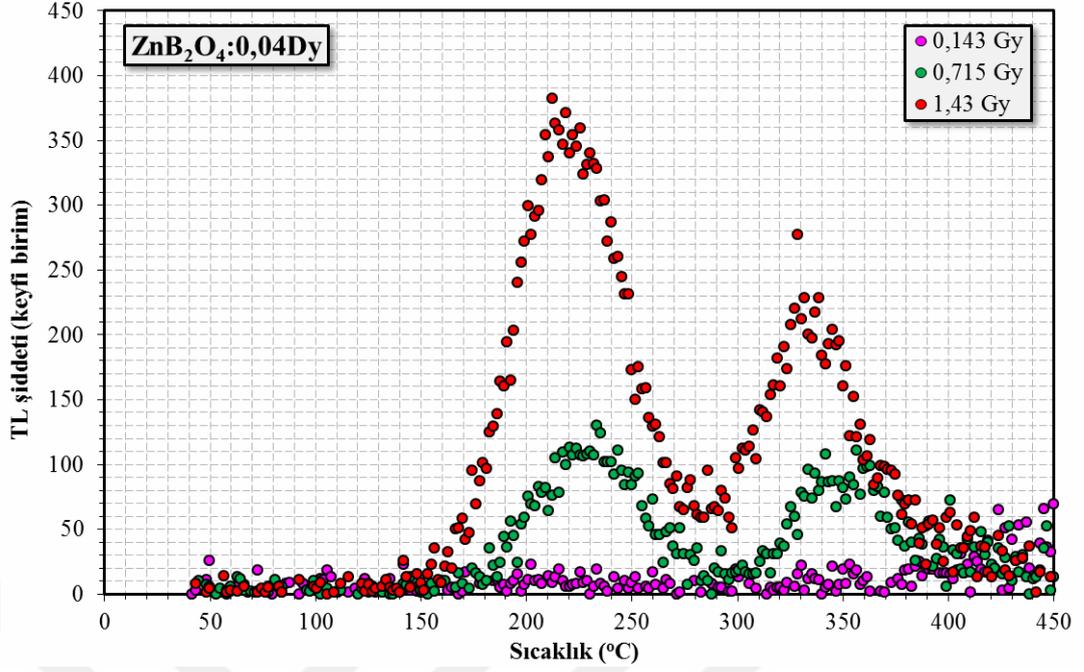


Şekil 4.14. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %3 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri

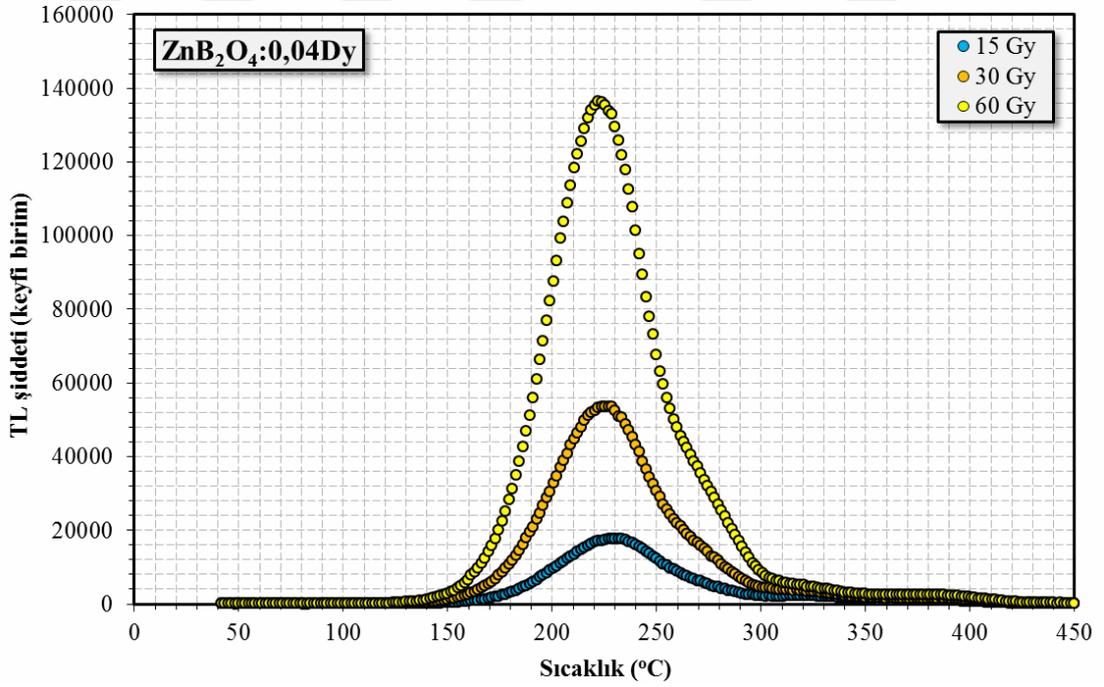


Şekil 4.15. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %3 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'deki TL ışımaya eğrileri incelendiğinde, %3 Dy katkılı çinko borat fosforunun, 207/232 °C civarında maksimum sıcaklığa sahip baskın TL pikleri sergiledikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca TL ışımaya pik şiddetlerinin uygulanan beta dozuna bağlı oldukları ve artan doz seviyelerinin artmasıyla arttıkları belirlenmiştir. 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 32 kat arttığı bulunmuştur.

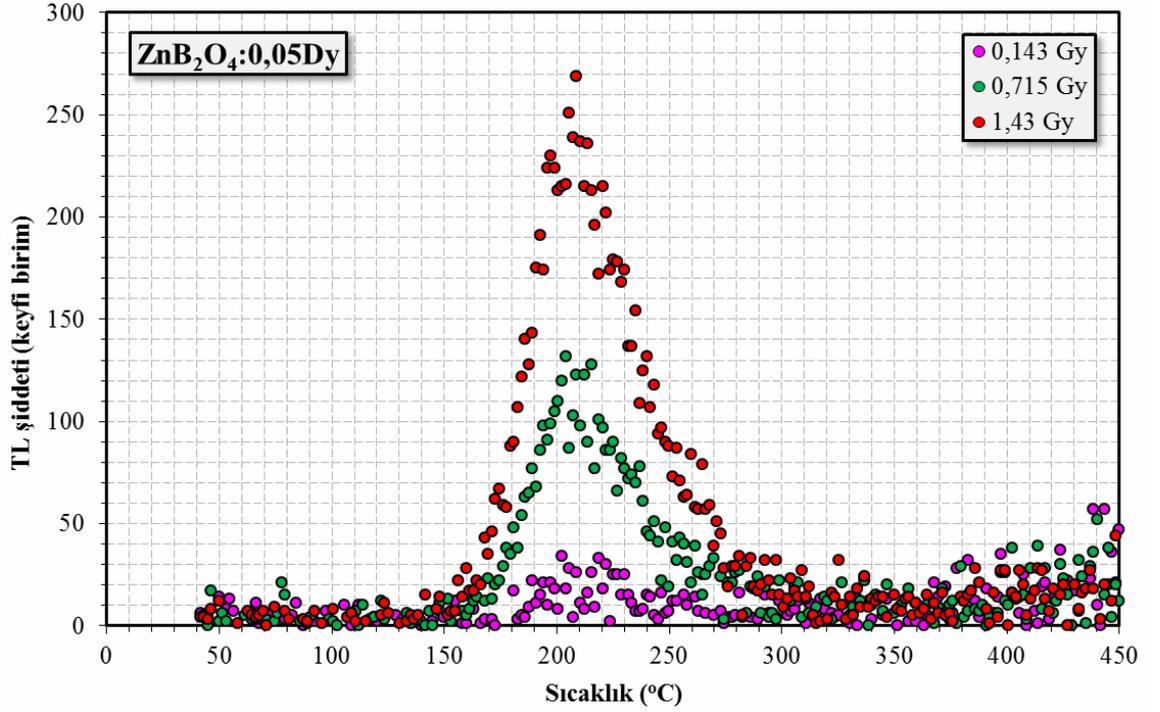


Şekil 4.16. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %4 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri

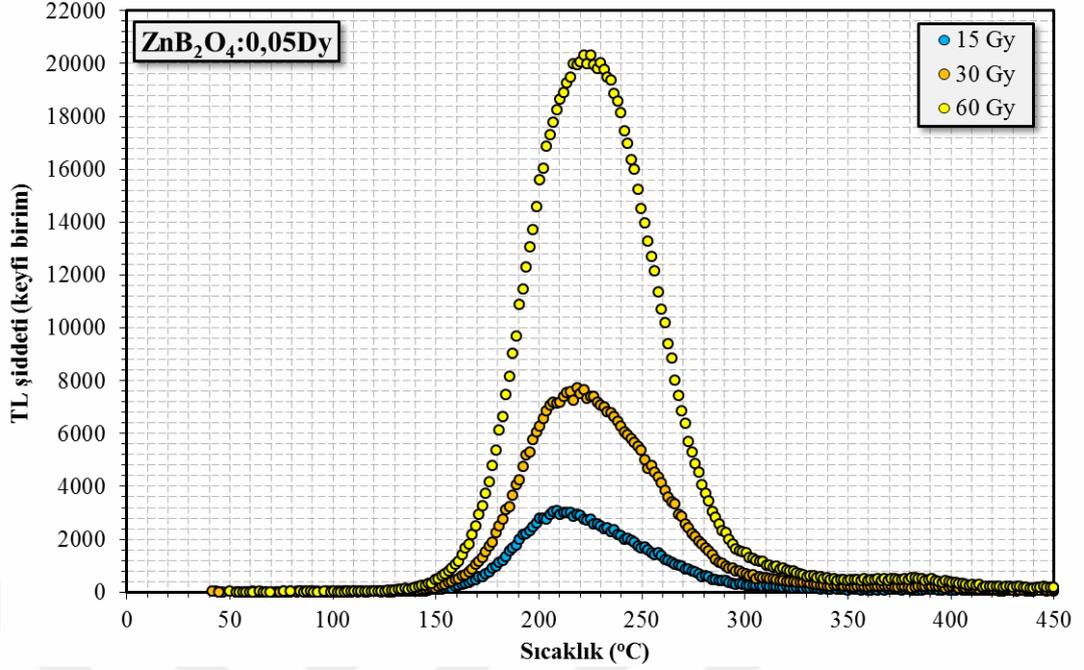


Şekil 4.17. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %4 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'deki TL ışına eğrileri incelendiğinde, %4 Dy katkılı çinko borat fosforunun, 219/229 °C civarında maksimum sıcaklığa sahip baskın TL pikleri sergiledikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca TL ışına pik şiddetlerinin uygulanan beta dozuna bağlı oldukları ve artan doz seviyelerinin artmasıyla arttıkları belirlenmiştir. 30 Gy beta dozu için ışına pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 143 kat arttığı bulunmuştur.

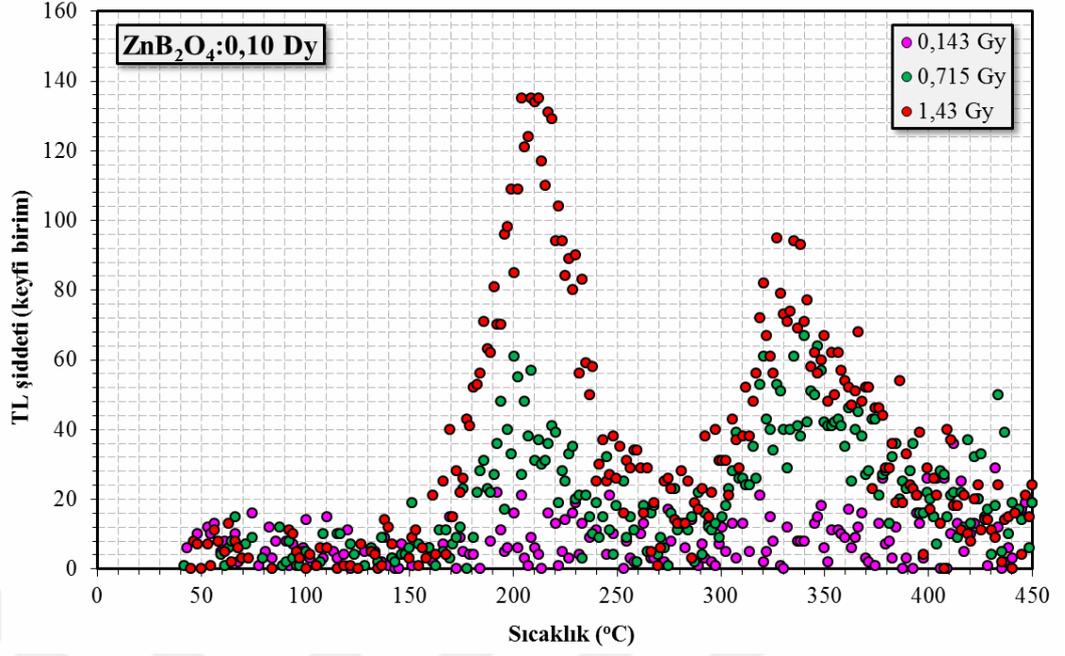


Şekil 4.18. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %5 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışına eğrileri

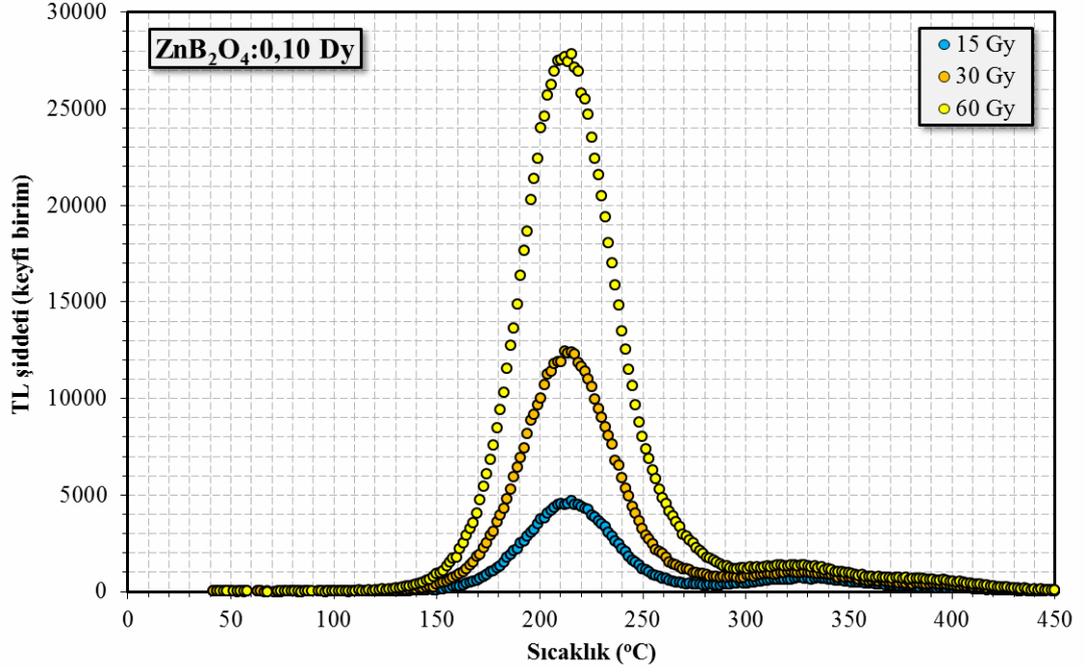


Şekil 4.19. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %5 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL ışımaya eğrileri

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'daki TL ışımaya eğrileri incelendiğinde, %5 Dy katkılı çinko borat fosforunun, 206/225 °C civarında maksimum sıcaklığa sahip baskın TL pikleri sergiledikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca TL ışımaya pik şiddetlerinin uygulanan beta dozuna bağlı oldukları ve artan doz seviyelerinin artmasıyla arttıkları belirlenmiştir. 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 30 kat arttığı bulunmuştur.



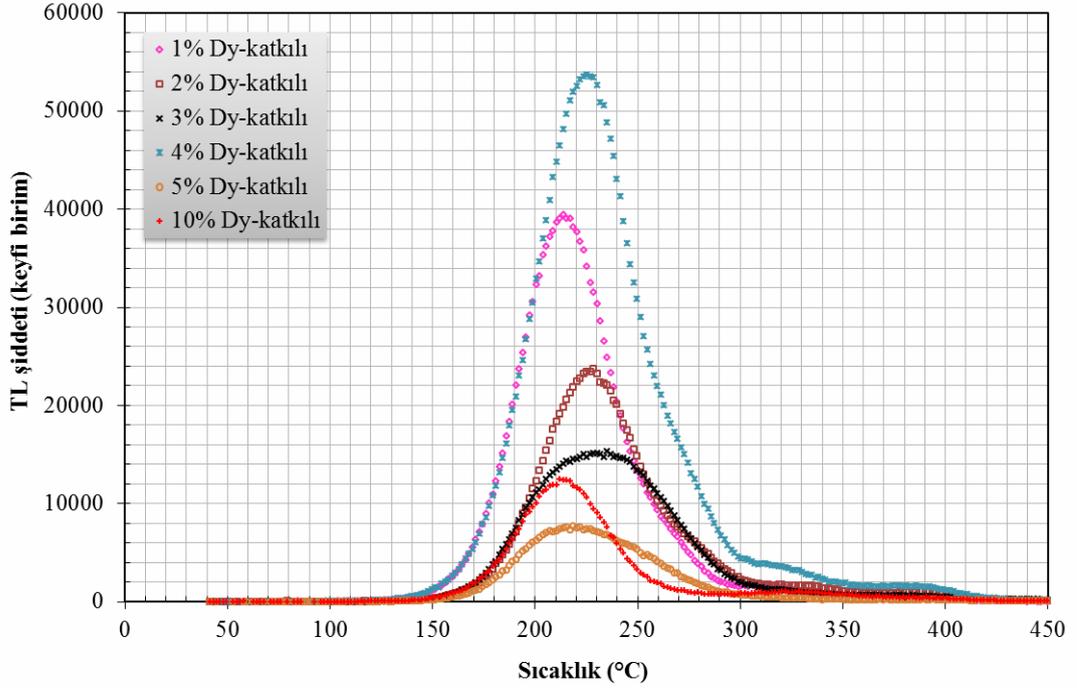
Şekil 4.20. 0,143 Gy, 0,715 Gy ve 1,43 Gy beta dozları için %10 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri



Şekil 4.21. 15 Gy, 30 Gy ve 60 Gy beta dozları için %10 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL ışıma eğrileri

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'deki TL ışımaya eğrileri incelendiğinde, % 10 Dy katkıli çinko borat fosforunun, 209/215 °C civarında maksimum sıcaklığa sahip baskın TL pikleri sergiledikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca TL ışımaya pik şiddetlerinin uygulanan beta dozuna bağlı oldukları ve artan doz seviyelerinin artmasıyla arttıkları belirlenmiştir. 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 92 kat arttığı bulunmuştur.

Şekil 4.22'de, 30 Gy beta dozuna maruz kalan Dy katkıli çinko borat fosforlarının TL ışımaya eğrileri verilmiştir. Bu şekilden, üretilen tüm fosforların ışımaya eğrisi yapılarındaki TL piklerinin şeklinin neredeyse sabit kaldığı görülebilir ve ayrıca Dy katkı miktarından bağımsız olduğu söylenebilir.

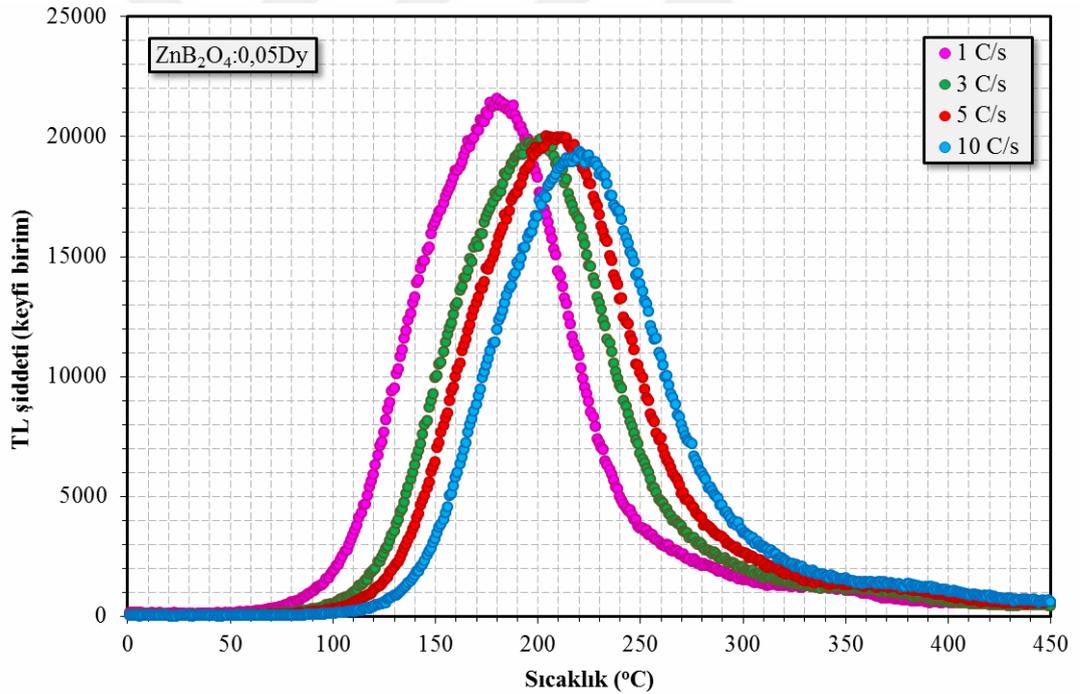


Şekil 4.22. Dy katkıli çinko borat fosforlarının TL ışımaya eğrileri (30 Gy)

Şekil 4.22'den %4 Dy katkıli çinko borat fosforunun TL şiddetinin, diğer Dy katkıli fosforlarından çok daha şiddetli olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca ışımaya pik şiddetleri ve pik sıcaklıklarının, Dy'nin konsantrasyon miktarına bağlı olduğu bulunmuştur. TL şiddeti, önce Dy-konsantrasyon miktarının artmasıyla azalır, daha sonra optimum konsantrasyon seviyesinde maksimum değere ulaşır, sonra tekrar düşer ve daha sonra Dy-konsantrasyonunun artmasıyla hafifçe artar. Diğer yandan ana ışımaya pikinin pik

sıcaklığı, Dy-konsantrasyon seviyesinin artmasıyla hafifçe kayar. Böylece beta ışınlanmasıyla üretilen tuzakların dağılımlarının, çinko borata eklenen Dy iyonunun konsantrasyonlarının değişimi ile büyük oranda değiştirilebildiği sonucu çıkarılabilir. Artan dozla ışınma eğrilerinin şiddetlerindeki artış, bu ışınma pikleri için daha da fazla tuzakların artan ışınlama dozu ile dolduğu ve ardından bu tuzakların termal uyarılmayla yük taşıyıcılarını serbest bıraktığı, böylece farklı ışınma pik yüksekliği verdiği anlaşılabilir.

Ayrıca daha sonra yapılan bir deneyle %5 Dy katkılı çinko borat fosforu, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (Doz hızı: 123 mGy/s) beta kaynağı ile 230 saniye (28,29 Gy) ışınlanmıştır. Bu çinko borat fosforu için dört farklı ısıtma hızlarında (1 °C/s, 3 °C/s, 5 °C/s ve 10 °C/s) TL okumaları yapılmıştır. TL okumaları sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak sıcaklığa karşılık TL ışınma şiddeti grafikleri Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



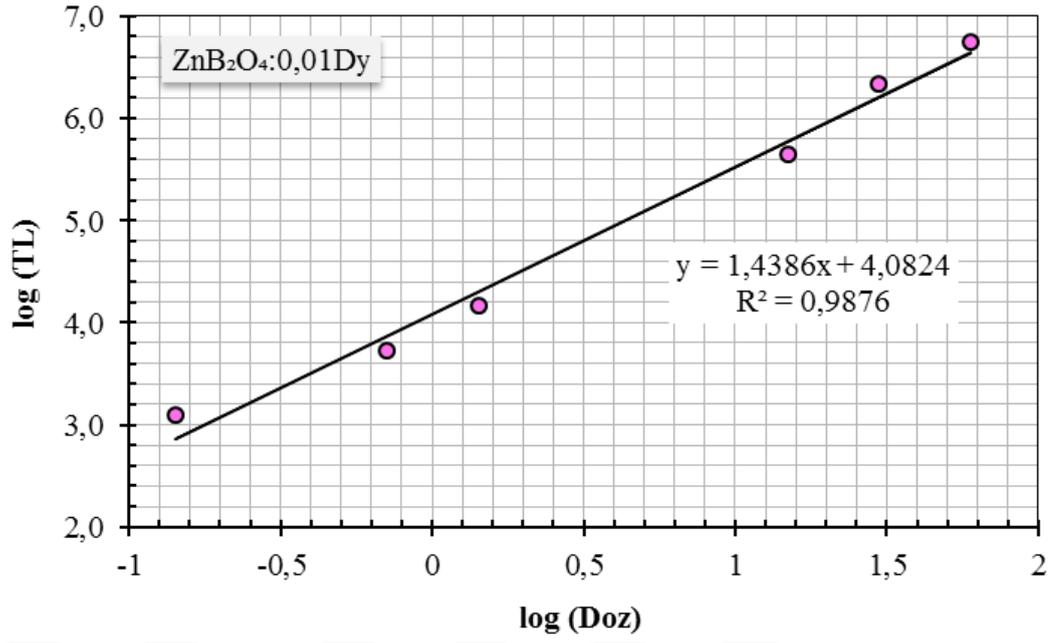
Şekil 4.23. %5 Dy katkılı çinko borat fosforun farklı ısıtma hızlarında ölçülen TL ışınma eğrileri

Şekil 4.23’de görüldüğü gibi, ışınma tepeleri, TL teorisinde olduğu gibi ısıtma hızı değişiminin TL tepelerine etkisi ile ilgili teoriye uygun olarak yüksek sıcaklıklara doğru

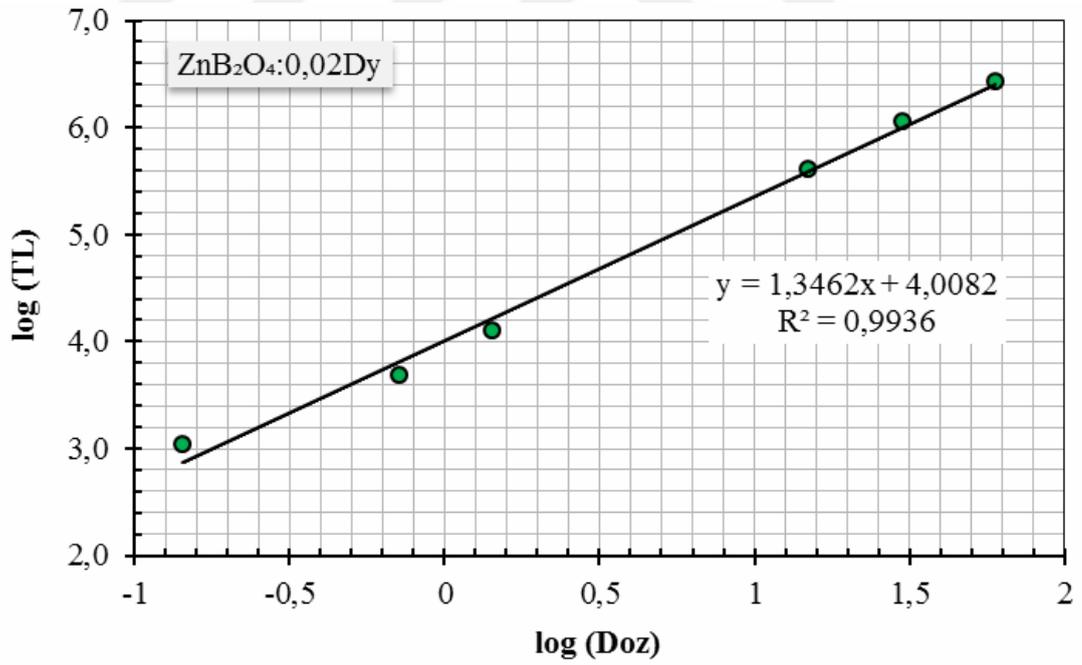
kaymaktadır. Ayrıca ısıtma hızı arttıkça tepe yükseklikleri ve eğri altında kalan alanlar azalmaktadır.

4.3. Lineer Doz-Cevap Eğrileri

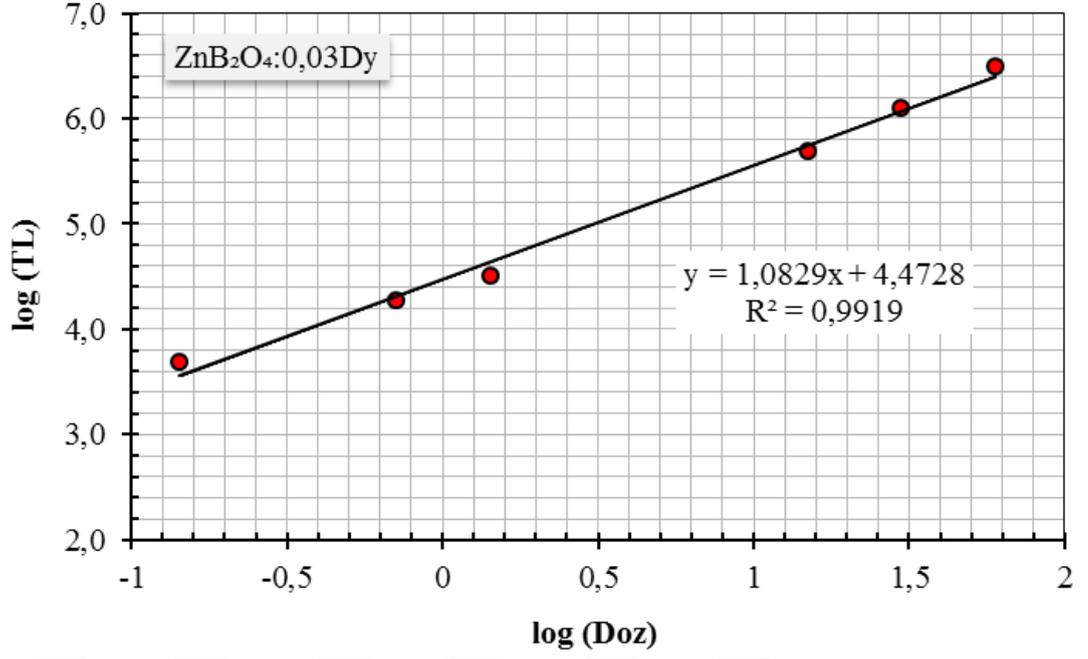
Lineer doz-cevap, materyalin radyasyona karşı verdiği cevabın materyalin maruz kaldığı radyasyon dozu ile doğru orantılı olduğunu gösterir. Bir TL dozimetre materyalinin önemli bir özelliği, TL şiddeti ile soğurulan doz arasında lineer bir ilişki sergilemesidir. Bu çalışmada TL doz-cevapları, şu formdaki bir denklemle ifade edilebilir: $TL = a (Doz)^b$. Bu denklemin her iki tarafının logaritması alınması durumunda, $\log(TL) = \log(a) + b \log(Doz)$ denklemi elde edilir. Eğim (b =lineerlik faktörü), $\log(TL)$ 'nin $\log(Doz)$ 'a karşı grafiğine lineer fit denkleminde bulunabilir. Eğer $b=1$ ise doz-cevap lineer olacaktır. Eğer $b<1$ ise alt-lineer, $b>1$ ise süper-lineer olacaktır (Kucuk ve ark. 2013, Kucuk ve ark. 2016). Bu çalışmada tüm Dy katkılı çinko borat fosforların doz-cevap eğrileri, 143 mGy-60 Gy beta doz aralığında elde edilmiştir. %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforların lineer doz-cevap eğrileri logaritmik olarak, sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir. Bu grafiklerden, çalışılan 143 mGy-60 Gy beta doz aralığında, tüm Dy katkılı çinko borat fosforların beta radyasyonuna oldukça lineer bir cevap sergilediği görülebilir. Ayrıca grafikler üzerinde lineer fit denklemleri verilmiştir. Deneysel noktalara fit edilen denklemin eğiminden b değerleri belirlenmiştir. Buna göre %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforların b değerleri, sırasıyla (1,4386), (1,3462), (1,0829), (1,3666), (1,0547) ve (1,1987) olarak bulunmuştur.



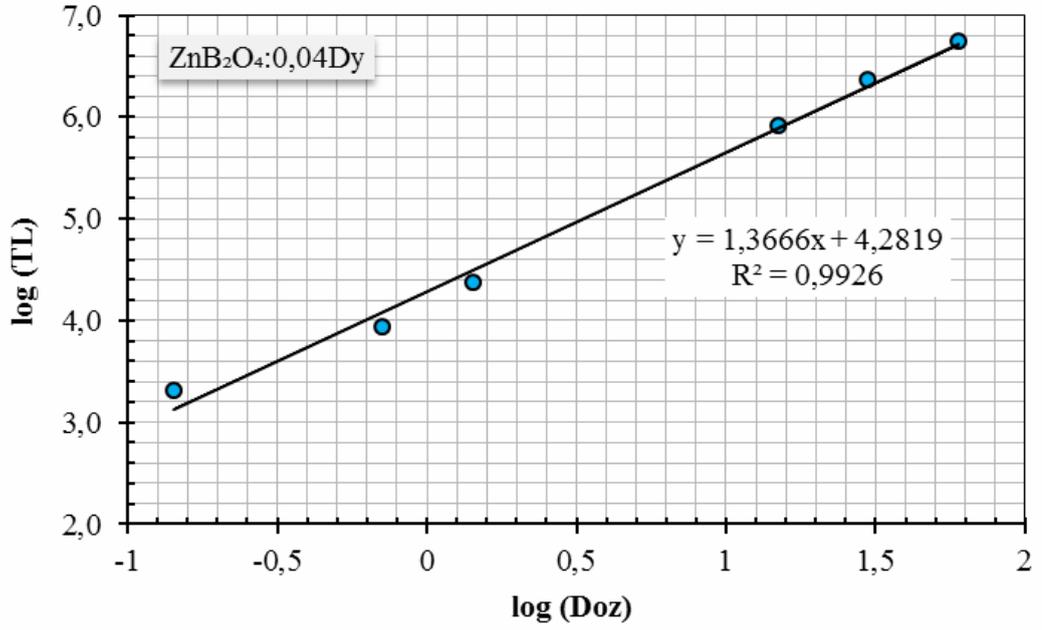
Şekil 4.24. %1 Dy-katkılı ZnB₂O₄ için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)



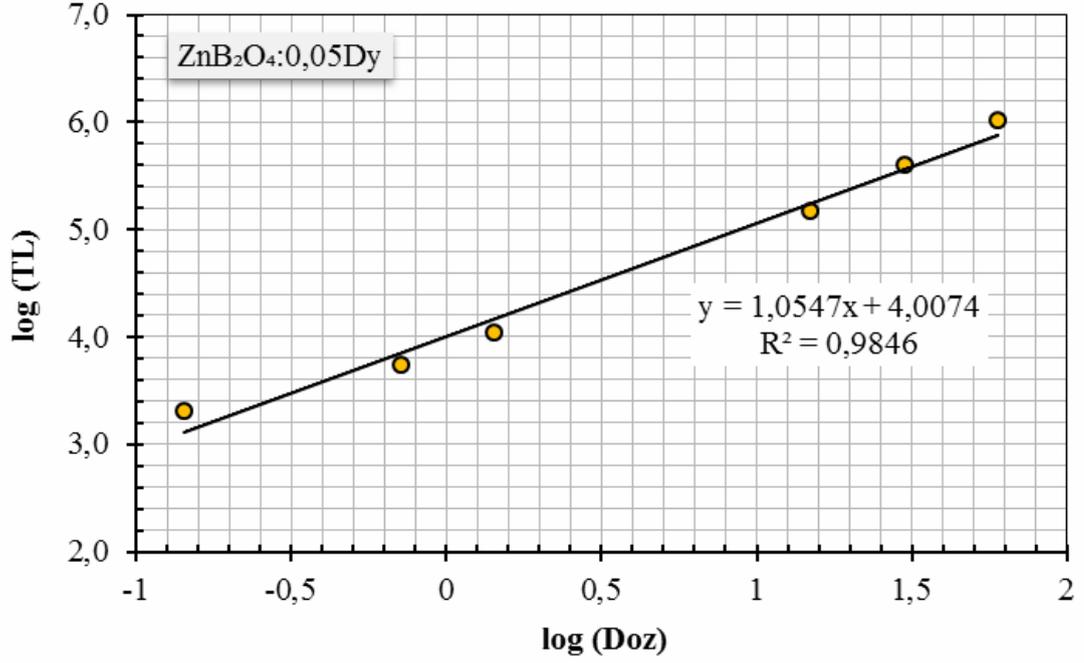
Şekil 4.25. %2 Dy-katkılı ZnB₂O₄ için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)



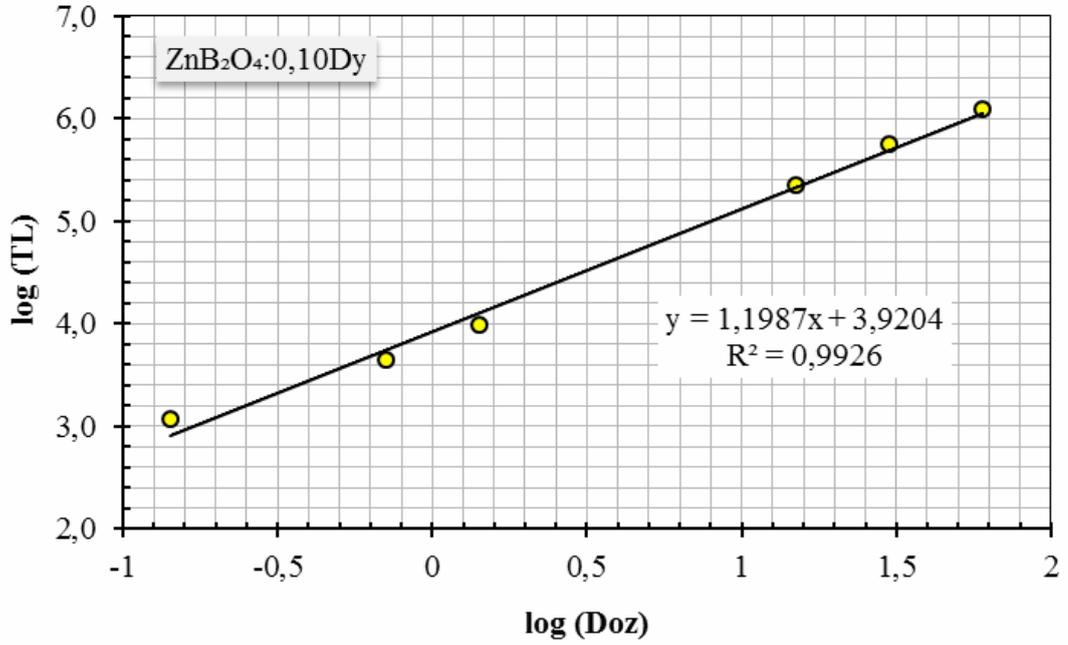
Şekil 4.26. %3 Dy-katkılı ZnB₂O₄ için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)



Şekil 4.27. %4 Dy-katkılı ZnB₂O₄ için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)



Şekil 4.28. %5 Dy-katkılı ZnB₂O₄ için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)



Şekil 4.29. %10 Dy-katkılı ZnB₂O₄ için doz-cevap eğrisi (143 mGy-60 Gy)

4.4. Minimum Dedekte Edilebilir Doz

Tüm Dy katkılı çinko borat fosforların minimum dedekte edilebilir doz değerleri, doğal fon sayımının 3 katına denk gelen doz değeri olarak belirlenmiştir (McKeever 1988, Furetta ve ark. 2000, Furetta 2010). %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforların minimum dedekte edilebilir doz değerleri hatalarıyla birlikte sırasıyla $(0,077\pm0,001 \text{ Gy})$, $(0,075\pm0,004 \text{ Gy})$, $(0,041\pm0,031 \text{ Gy})$, $(0,093\pm0,009 \text{ Gy})$, $(0,074\pm0,021 \text{ Gy})$ ve $(0,162\pm0,001 \text{ Gy})$ değerlerinde bulunmuştur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforlar nitrik asit yöntemiyle hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler, XRD analizleriyle karakterize edilmiştir. Bu bağlamda sadece 900 °C’de üretilen tüm örneklerin neredeyse yüksek kristalli saf fazda olduğu gözlenmiş ve XRD desenlerinin JCPDS kart no. 39-1126’da rapor edilenlerle tutarlı olduğu bulunmuştur (Şekil 4.1-Şekil 4.9).

Tüm fosforların TL özellikleri ve beta radyasyon dozuna bağlılığı, termoluminesans tekniğiyle araştırılmıştır. ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta kaynağı kullanılarak (0,143 Gy), (0,715 Gy), (1,43 Gy), (15 Gy), (30 Gy) ve (60 Gy) radyasyon dozları için TL ışımaya eğrileri, 450 °C’ye kadar 5 °C/s sabit ısıtma oranında ısıtma ile elde edilmiştir (Şekil 4.10-Şekil 4.21). TL ışımaya eğrileri üzerinde baskın ana piklerin 206-232 °C sıcaklık aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Tüm fosforlara ait TL ışımaya pik şiddetlerinin uygulanan beta dozuna bağlı oldukları ve artan doz seviyelerinin artmasıyla arttıkları belirlenmiştir. 30 Gy beta dozuna maruz kalan Dy-katkılı çinko borat fosforlarının TL ışımaya eğrileri incelendiğinde, ışımaya eğrisi yapılarındaki TL piklerinin şeklinin neredeyse sabit kaldığı görülmüştür (Şekil 4.22). TL pik şekillerinin Dy-katkı miktarından bağımsız olduğu söylenebilir. Diğer yandan ana TL pik sıcaklığı, Dy-katkı miktarının artmasıyla hafifçe kayar. Böylece beta ışınlanmasıyla üretilen tuzakların dağılımlarının, çinko borata eklenen Dy-katkı miktarının değişimi ile büyük oranda değiştirilebildiği sonucu çıkarılabilir. Artan dozla ışımaya eğrilerinin şiddetlerindeki artış, bu ışımaya pikleri için daha da fazla tuzakların artan beta dozu ile dolduğu ve ardından bu tuzakların termal olarak uyarılmayla yük taşıyıcılarını serbest bıraktığı, böylece farklı ışımaya pik yüksekliği verdiği anlaşılabilir. %4 Dy katkılı çinko borat fosforunun TL pik şiddeti, diğer Dy-katkılı çinko borat fosforlarından çok daha şiddetli olduğu bulunmuştur (Şekil 4.22). Ayrıca %1 Dy katkılı çinko borat fosforunun 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 182 kat arttığı bulunmuştur. %2 Dy katkılı çinko borat fosforunun 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 113 kat arttığı bulunmuştur. %3 Dy katkılı çinko borat fosforunun 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 32 kat arttığı bulunmuştur. %4 Dy katkılı çinko borat fosforunun 30 Gy beta dozu için ışımaya pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 143 kat arttığı bulunmuştur. %5 Dy

katkılı çinko borat fosforunun 30 Gy beta dozu için ışıma pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 30 kat arttığı bulunmuştur. %10 Dy katkılı çinko borat fosforunun 30 Gy beta dozu için ışıma pik şiddetinin 1,43 Gy beta dozu değerine göre yaklaşık 92 kat arttığı bulunmuştur.

Farklı ısıtma hızları deneyleri, örnekler içinden seçilen %5 Dy katkılı çinko borat fosforu için 1 °C/s, 3 °C/s, 5 °C/s ve 10 °C/s'lik ısıtma hızları kullanılarak yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ışıma tepelerinin, TL teorisinde olduğu gibi artan ısıtma hızı ile yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı gözlenmiştir (Furetta ve Weng 1998). Ayrıca, ısıtma hızı arttıkça tepe yükseklikleri ve ışıma eğrisi altında kalan alanların azaldığı gözlenmiştir. Fakat bu durum 3 °C/s ve 5 °C/s'lik ısıtma hızlarında yaklaşık olarak aynı kalmıştır (Şekil 4.23).

Dy-katkılı çinko borat fosforların doz-cevap eğrileri, 143 mGy-60 Gy beta doz aralığında elde edilmiştir (Şekil 4.24-Şekil 4.29). Bu doz aralığında, tüm Dy-katkılı çinko borat fosforların beta radyasyonuna oldukça lineer bir cevap sergilediği ve lineerlik faktörü olan b değerlerinin yaklaşık 1 değerine yakın olduğu bulunmuştur.

%3 Dy katkılı çinko borat fosforunun minimum dedekte edilebilir doz değeri 0,041 Gy olarak belirlenmiştir. %1, %2, %4, %5 ve %10 Dy katkılı çinko borat fosforlarının minimum ölçülebilen doz değerleri ise sırasıyla (0,077 Gy), (0,075 Gy), (0,093 Gy), (0,074 Gy) ve (0,162 Gy) değerlerinde bulunmuştur.

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, Dy-katkılı çinko borat fosforların termoluminesans şiddetlerinin ve minimum ölçülebilir doz değerlerinin, düşük radyasyon dozları için kullanılabilme olasılığının olduğu gösterilmiştir. Rapor edilen sonuçlar $ZnB_2O_4:Dy$ fosforunun, iyonlaştırıcı radyasyon dozimetresi için yeni umut verici TLD materyali olabileceğini gösterirken, somut ve anlamlı bir TL mekanizmasını tam olarak ortaya koymak için yeterli değildir. Bu nedenle, hazırlanan örneklerin diğer lüminesans özelliklerinin incelenmesi çalışmalarına devam edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Aitken, M.J.1985.** Thermoluminescence dating. Academic Press, London, 359.
- Anishia, S.R. Jose, M.T., Annalakshmi, O., Ponnusamy, V., Ramasamy, V., 2010.** Dosimetric properties of rare earth doped LiCaBO₃ Thermoluminescence phosphors. *J. Lumin.* 130: 1834.
- Annalakshmi, O., Jose, M.T., Madhusoodanan, U., Subramanian, J., Venkatraman, B., Amarendra, G., Mandal, A.B., 2014.** Thermoluminescence dosimetric characteristics of thulium doped ZnB₂O₄ phosphor, *Journal of Luminescence* 146: 295–301.
- Atakan, Y., 1966.** Radyoizotopların emniyetle kullanılmasında sağlık fiziği. *TAEK*, Ankara.
- Ayvacıklı, M., Canimoglu, A., Karabulut, Y., Kotan, Z., Herval, L.K.S., Godoy, M.P.F., Galvão Gobato, Y., Henini, M., Can, N., 2014.** Radioluminescence and photoluminescence characterization of Eu and Tb doped barium stannate phosphor ceramics, *J. Alloys and Comp.* 590: 417-423.
- Bahl, S., Pandey, A., Lochab, S.P., Aleynikov, V.E., Molokanov, A.G., Kumar, P., 2013.** Synthesis and thermoluminescence characteristics of gamma and proton irradiated nanocrystalline MgB₄O₇:Dy,Na, *Journal of Luminescence*, Volume: 134, pp: 691-698.
- Burak, Y.A.V., Adamiv, V.T., Antonyak, O.T., Malynych, S.Z., Pidzyrilo, M.S., Teslyuk, I.M., 2005.** Thermoluminescence in doped single crystals Li₂B₄O₇:A (A=Cu, Ag). *Ukr. J. Phys.* 50 (10): 1153.
- Cember, H., Jonhson, T.E., 2009.** Introduction to Health Physics. Fourth Edition. The McGraw-Hill Companies, USA, p: 888.
- Chen, R., McKeever, S.W.S., 1997.** Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena. World Scientific Publishing, Singapore, s: 559.
- Çakır, M., 2012.** Katkısız ve La ile katkılanmış çinko boratların termoluminesans (TL) özelliklerinin incelenmesi ve dozimetrik uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırılması”, *Yüksek Lisans*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Daniels, J.M., Scholes, G., Weiss, J., 1953.** *Nature* 171: 1153.
- Depci, T., Özbayoğlu, G., Yılmaz, A., Yazıcı, A.N., 2008.** The thermoluminescent properties of lithium triborate (LiB₃O₅) activated by aluminium. *Nucl. Instrum. Meth. B* 266: 755.
- Evis, D., Yucel, A., Kizilkaya, N., Depci, T., Kafadar, V.E., Öztürk, E., Yildirim, R.G., 2016.** A new activator strontium for magnesium tetraborate: PL and TL studies, *Applied Radiation and Isotopes*, 116: 138–142.
- Fonda, G.R., 1939.** *J. Phys. Chem.*, 43: 561.
- Furetta, C., Weng, P.S., 1998.** Operational Thermoluminescence Dosimetry, World Scientific, Singapore.
- Furetta, C., Prokic, M., Salamona, R. and Kitis, G., 2000.** Dosimetric characterisation of a new production of MgB₄O₇:Dy,Na thermoluminescent material. *Appl. Radiat. Isot.* 52: 243.
- Furetta, C., 2003.** Handbook of Thermoluminescence. World Scientific Publishing, Singapore, 482 p.
- Furetta, C., 2010.** Handbook of Thermoluminescence. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., p: 229.

- Göksu, H.Y., Hübner, S., 1997.** Retrospective Dosimetry Using The OSL-Pre-Dose Effect in Porcelain. *Appl. Radiat. Isot.* 48/9: 1231-1235.
- Gündoğmuş, M., 2015.** Farklı Bor Bileşiklerinin Dozimetrik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Retrospektif Dozimetri Alanında Kullanımının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı, Ankara.
- Horowitz, Y., 1984.** Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry. C.R.C. Press, Florida.
- Izewska, J., Rajan G., 2005.** Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teacher and Students, International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Jiang, L.H., Zhang, Y.L., Li, C.Y., Hao, J.Q., Su, Q., 2007.** Thermoluminescence properties of Ce³⁺-doped LiSr₄(BO₃)₃ phosphor. *Mater. Lett.* 61: 5107.
- Jiang, L.H., Zhang, Y.L., Li, C.Y., Pang, R., Hao, J.Q., Su, Q., 2008.** Thermoluminescence characteristics of rare-earth-doped LiCaBO₃ phosphor. *J. Lumin.* 128: 1904.
- Jiang, L.H., Zhang, Y.L., Li, C.Y., Pang, R., Shi, L., Zhang, S., Hao, J.Q., Su, Q., 2009.** Thermoluminescence characteristics of NaSr₄(BO₃)₃:Ce³⁺ under x-ray irradiation. *J. Rare Earths* 27: 320.
- Jiang, L.H., Zhang, Y.L., Li, C.Y., Hao, J.Q., Su, Q., 2009.** Synthesis, photoluminescence, thermoluminescence and dosimetry properties of novel phosphor K Sr₄(BO₃)₃:Ce. *J. Alloys Comp.* 482: 313.
- Jiang, L.H., Zhang, Y.L., Li, C.Y., Hao, J.Q., Su, Q., 2010.** Thermoluminescence studies of LiSrBO₃:RE³⁺ (R=Dy, Tb, Tm and Ce). *Appl. Radiat. Isot.* 68: 196.
- Juan, L., Chunxiang, Z., Qiang, T., Jingquan, H., Yanli, Z., Qiang, S. ve Shubin, W., 2008.** Photoluminescence and thermoluminescence properties of dysprosium doped zinc metaborate phosphors, *Journal of Rare Earths*, Vol. 26: No. 2, 203.
- Kawashima, Y.S., Gugliotti, C.F., Yee, M., Tatumi, S.H., Mittani, J.C.R., 2013.** Thermoluminescence features of MgB₄O₇:Tb phosphor, Radiation Physics and Chemistry, In Press, Corrected Proof, Available online 31 December 2012.
- Kayhan, M., 2009.** Effect of Synthesis and Doping Methods on Thermoluminescence Glow Curves of Manganese Doped Lithium Tetraborate, *M.S. Thesis*, Middle East Technical University, Turkey.
- Kaykal, Keser, B., 2005.** Çeşitli Termolüminesans Dozimetre Malzemelerinin Işıma Eğrilerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Katihal Fiziği Programı, Manisa.
- Kelemen, A., Holovey, V., Ignatovych, M., 2008.** Relative yields of radioluminescence and thermoluminescence in manganese- and silver-doped lithium tetraborate phosphors. *Radiat. Meas.* 43: 375.
- Krane, K.S., 2001.** Nükleer Fizik I, Çeviri Editörü : Başar Şarer, Palme Yayıncılık, Ankara, 2001.
- Kucuk, N., Manohara, S.R., Hanagodimath, S.M., Gerward, L., 2013.** Modeling of gamma ray energy-absorption buildup factors for thermoluminescent dosimetric materials using multilayer perceptron neural network: A comparative study, *Radiation Physics and Chemistry*, 86, pp: 10-22.
- Kucuk, N., Kucuk, I., Cakir, M., Keles, S.K., 2013.** Synthesis, thermoluminescence and dosimetric properties of La-doped zinc borates, *J. Lum.* 139: 84-90.

- Kucuk, N., Kucuk, I., Yüksel, M., Topaksu, M., 2016.** Thermoluminescence characteristics of $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Ce}^{3+}$ under beta-irradiation, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 168, No. 4, pp: 450–458, DOI: 10.1093/rpd/ncv360.
- Küçük, N., Küçük, İ., Çakır, M., Göksu, H.Y., Kurt, A., 2010.** Borlu Bileşiklerin Termoluminesans Özelliklerinin İncelenmesi ve Dozimetrik Uygulamalarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi Başkanlığı Uygulamalı Araştırma Projesi. Proje No: UAP(F)-2010/28.
- Küçük, N., 2015.** Arkla Eritme Yöntemi Kullanılarak Özellikleri Geliştirilecek Çinko Boratla Dozimetre Üretimi, Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi Başkanlığı Orta Ölçekli Uygulamalı Araştırma Projesi. Proje No: OUAP(F)-2015/31.
- Li, J., Hao, J., Zhang, C., Tang, Q., Zhang, Y., Su, Q. and Wang, S., 2004.** Thermoluminescence characteristics of $\text{BaB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$ phosphor. *Nucl. Instrum Methods B* 222: 577.
- Li, J., Zhang, C.X., Tang, Q., Zhang, Y.L., Hao, J.Q., Su, Q., Wang, S.B., 2007.** Synthesis, photoluminescence, thermoluminescence and dosimetry properties of novel phosphor $\text{Zn}(\text{BO}_2)_2:\text{Tb}$, *J. Phys. Chem. Solids*, 68: 143–147.
- Li, J., Zhang, C.X., Tang, Q., Hao, J.Q., Zhang, Y.L., Su, Q., Wang, S.B., 2008.** Photoluminescence and thermoluminescence properties of dysprosium doped zinc metaborate phosphors, *J. Rare Earths*, 26: 203–206.
- Liu, L., Zhang, Y., Hao, J., Li, C., Tang, Q., Zhang, C., Su, Q., 2005.** Thermoluminescence characteristics of terbium-doped $\text{Ba}_2\text{Ca}(\text{BO}_3)_2$ phosphor. *Phys. Stat. Sol. (a)* 202 (14), 2800.
- Liu, L., Hao, J., Li, C., Tang, Q., Zhang, C., Su, Q., Wang, S., 2006.** Thermoluminescence Characteristics of $\text{SrB}_6\text{O}_{10}:\text{Tb}$, *Journal of Rare Earths*, 24: 276–280.
- Liu, L.Y., Zhang, Y.L., Hao, J.Q., Li, C.Y., Tang, Q., Zhang, C.X., Su, Q., 2006.** Thermoluminescence studies of rare earth doped $\text{Sr}_2\text{Mg}(\text{BO}_3)_2$ phosphor. *Mater. Lett.* 60: 639.
- Liu, W.R., Lin, C.C., Chiu, Y.C., Yeh, Y.T., Jang, S.M., Liu, R.S., 2010.** $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Bi}^{3+},\text{Eu}^{3+}$: a highly efficient, red-emitting phosphor, *Optics Express* 18: 2946-2951.
- Markey, B.G., Bøtter-Jensen, L., Duller, G.A.T., 1997.** A new flexible system for measuring thermally and optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 27: 83-89.
- Manam, J., Sharma, S.K., 2003.** Thermally stimulated luminescence studies of undoped and doped CaB_4O_7 compounds. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* 6(4), 465.
- McKeever, S.W.S., 1988.** Thermoluminescence of Solids. Cambridge University Press, p: 207.
- McKeever, S.W.S., Moscovitch, M., Townsend, P.D., 1995.** Dosimetry Materials: Properties and Uses. Nuclear Technology Publishing, Ashford, England, 117-159 p.
- McKeever, S.W.S., 1993.** Thermoluminescence of Solids (in Chin.). Edited by G.G. Cai, F. Wu, S.T. Wang Beijing: Atomic Energy Press, 234.
- Mu, Z., Hu, Y., Chen, L., Wang, X., 2011.** Enhanced red emission in $\text{ZnB}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ by charge compensation, *Opt. Materials* 34: 89-94.
- Muresan, L.E., Karabulut, Y., Cadis, A.I., Perhaita, I., Canimoglu, A., Garcia Guinea, J., Barbu Tudoran, L., Silipas, D., Ayvacikli, M., Can, N., 2016.** Tunable

luminescence of broadband-excited and narrow line green emitting $\text{Y}_2\text{SiO}_5\text{:Ce}^{3+}$, Tb^{3+} phosphor, *J. Alloys and Comp.* 658: 356-358.

Nag Bhargavi, G., Khare, A., Brahmeb, N., 2017. Estimation of kinetic parameters from thermoluminescence glow curves of pure and Eu^{3+} doped barium zirconate titanate (BZT), *Optik*, 129: 83–92.

Nur, N., 2010. Ametistlerin termolüminesans yöntemiyle dozimetrik karakteristiğinin analiz edilmesi. *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, İzmir.

Pal, P.P., Manam, J., 2014. Enhanced luminescence of ZnO:RE^{3+} (RE=Eu, Tb) nanorods by Li^+ doping and calculations of kinetic parameters, *Journal of Luminescence*, 145: 340–350.

Pekpak, E., Özbayaoglu, G., Yılmaz, A., 2009. Thermoluminescence Characteristics of Lithium Tetraborate, 4th International Boron Symposium, October, 15-17, Eskişehir, Türkiye, 103-110.

Pekpak, E., Yılmaz, A., Özbayoglu, G., 2010. The Open Miner. Process. J., 3, 14.

Prokic, M., 2001. Lithium Borate Solid TL Detectors, Radiation Measurements, Volume 33, Issue 4, pp: 393-396.

Prokic, M., 2002. Dosimetric characteristics of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$, Ag, P solid TL detectors. *Radiat. Prot. Dosim.* 100 (1–4): 265.

Rao, M.R., Rao, B.S., Rao, N.P., Somaiah, K., Murthy, K.V.R., 2009. Dosimetric characteristics of MgB_4O_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: 456.

Santiago, M., Lester, M., Caselli, E., Lavat, A., Ges, A., Spano, F., Kessler, C., 1998. Thermoluminescence of sodium borate compounds containing copper, *Journal of Material Science Letters*, Volume 17, Issue 15, pp: 1293-1296.

Santiago, M., Grasseli, 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): 285.

Schulman, J.H., Kirk, R.D., West, E.J., 1967. Proceedings of the International Conference on Luminescence Dosimetry, Stanford University, CONF-650637, 113.

Singh, T.R., Singh, S.N., and Singh, A.N., 2012. Study of the Effect of Thermal Treatment in the Preparation of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag,P}$ Phosphor, *International Journal of Materials Physics*, Volume 3, Issue 1, pp: 39-43.

Tang, K., Fan, H., Cui, H., Zhu, H., Liu, Z., 2015. Further Studies on The Role of Dopants In LiF:Mg,Cu,Si Thermoluminescent Material, *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 163, No. 3, pp. 288–291.

Tanır, A.G., Bölükdemir, M.H., Koç, K., 2013. Radyasyon ve radyasyondan korunma fiziği, Palme Yayıncılık.

Yazici, A.N., Doğan, M., Kafadar, V.E., Toktamiş, H., 2006. Thermoluminescence of undoped and Ce-doped BaB_4O_7 . *Nucl. Instrum. Methods B* 246: 402.

Yüksel, M., 2013. Doğal ve Katkılanmış Bor Minerallerinin Dozimetre Geliştirmek Amacıyla Termolüminesans (TL) Yöntemi Kullanılarak Çalışılması, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana.

Zheng, Y., Qu, Y., Tian, Y., Rong, C., Wang, Z., Li, S., Chen, X., Ma, Y., 2009. Effect of Eu^{3+} -doped on the luminescence properties of zinc borate nanoparticles”, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 349: 19–22.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Damla YAMAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Eminönü/ İstanbul 06/08/1990
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Hadımköy Örfi Çetinkaya Anadolu Lisesi–2009
Lisans : Balıkesir Üniversitesi, Fen–Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü–2014

İletişim (e-posta) : damlayaman_121@hotmail.com
Katıldığı Kurslar :

- 1) Nükleer Bilimler ve Uygulamaları Kış Semineri, 4-11 Şubat 2016, ANKARA.
- 2) Nükleer Bilimler ve Uygulamaları Yaz Okulu, 9-16 Haziran 2015, Manavgat, ANTALYA.
- 3) 1. Ulusal Radyasyondan Korunma Kongresi, 19-21 Kasım 2015, ANKARA.
- 4) RADKOR İş Sağlığı Güvenliğinde Radyasyondan Korunma, Kasım 2015, ANKARA.