

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



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

**NADİR TOPRAK İYONLARIYLA KATKILI LANTANYUM TRİ-
BORATIN SENTEZİ VE TERMOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Nur Hilal AKYOL

**Danışman
Doç. Dr. Yasemin Tuncer ARSLANLAR**

MANİSA-2025

NUR
HİLAL
AKYOL

NADİR TOPRAK İYONLARIYLA KATKILI LANTANYUM TRI-BORATIN SENTEZİ
VE TERMOLÜMINESANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Nur Hilal AKYOL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Nur Hilal AKYOL

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yasemin Tuncer ARSLANLAR

Bu tez çalışmasında LaB_3O_6 formülüne sahip fosfor malzemesi, yanma yöntemi ile sentezlenip elde edilen fosforların Tb^{+3} , Dy^{+3} , Sm^{+3} nadir toprak iyonları ile katkılandırılması amaçlanmaktadır. Sonrasında, elde edilen bu örneklerin kristallliğini araştırmak için toz X-ışını kırınımı (XRD), kristal yapı analizi ve element bileşimini keşfetmek için SEM-EDS (enerji dağılımlı spektroskopi), titreşim modlarını gözlemleyebilmek için Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR), spektroskopisi yöntemlerinden yararlanılacaktır. Ardından sentezlenen malzemelerin termolüminesans (TL) özellikleri incelenecektir. Bu amaç doğrultusunda dozimetrik amaçla kullanılabilecek yeni bir malzemenin üretimi sağlanmış olacaktır. Aynı zamanda TL kinetik parametreleri hesaplanarak dozimetrik kullanım için uygunluğu araştırılacaktır.

Özgün değere sahip olduğu düşünülen bu tez çalışmasının, başarılı sonuçlanması ve öngörülen sonuçların elde edilmesi halinde uluslararası literatürdeki boşluk doldurulacaktır. Ayrıca nükleer santrallerin kurulması planlanan ülkemiz için radyasyon dozimetriteri önem arz etmekte olup bu çalışmanın yeni dozimetrik bir malzemenin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda sahip olduğu bor rezervleri ile dünyanın önde gelen ülkelerinden birisi olan ülkemiz için bor ürünleriyle yapılan her çalışma önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: LaB_3O_6 fosforu, lüminesans, tuzak parametreleri, termolüminesans dozimetri, yanma yöntemi.

2025, 80 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Nur Hilal AKYOL

Manisa Celal Bayar University

Graduate School of Education

Department of Physics

Supervisor: Doç. Dr. Yasemin Tuncer ARSLANLAR

In this thesis study, it is aimed to synthesize the phosphorus material with the formula LaB_3O_6 by the combustion method and to add the obtained phosphors with Tb^{+3} , Dy^{+3} , Sm^{+3} rare earth ions. Afterwards, powder X-ray diffraction (XRD), crystal structure analysis and SEM-EDS (energy dispersive spectroscopy) to explore the elemental composition, and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy methods will be used to investigate the crystallinity of these samples. Then, the thermoluminescence (TL) properties of the synthesized materials will be examined. For this purpose, the production of a new material that can be used for dosimetric purposes will be achieved. At the same time, TL kinetic parameters will be calculated and its suitability for dosimetric use will be investigated.

If this thesis study, which is thought to have unique value, is concluded successfully and the predicted results are achieved, the gap in the international literature will be filled. In addition, radiation dosimeters are important for our country where nuclear power plants are planned to be established, and it is thought that this thesis study will contribute to the development of a new dosimetric material. At the same time, every study carried out with boron products is important for our country, which is one of the leading countries in the world with its boron reserves.

Key words: LaB_3O_6 phosphorus, luminescence, trap parameters, thermoluminescence dosimetry, combustion method

2025, 80 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, farklı konsantrasyonlarda samaryum, disprosyum ve terbiyum elementleri lantanyum tri-borat fosforuna katkılanarak, termolüminesans özellikleri incelenmiş ve kinetik parametre hesabı yazılmıştır. Bu kapsamda çalışma genel bilgiler, materyal ve yöntemler, araştırma bulguları ve tartışma, sonuç ve öneriler olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır.

Tez çalışmamın her aşamasında ve her konuda bilgileri, deneyimleri, desteği ve yardımlarıyla hiç yorulmadan ve bıkmadan daima yanımda olan, bana yol gösteren, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum ve hayatım boyunca benim için büyük bir öneme sahip olacak değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yasemin Tuncer ARSLANLAR 'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. TL ölçümleri aşamasında, yardımlarını hiç esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Elçin Ekdal KARALI 'ya teşekkürlerimi sunuyorum. Tez çalışmamın özellikle sentez ve malzemenin analizi kısmında destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Yusuf Ziya HALEFOĞLU 'na, kinetik parametre hesaplamaları sırasında bilgi ve donanımlarını esirgemeyen, gerek donanımsal gerekse yazılımsal anlamda çok şey öğrendiğim Sayın Doç. Dr. İlker Çetin KESKİN 'e, beta kaynağının kalibrasyonu aşamasında destek ve yardımları için Sayın Prof. Dr. Yasemin PARLAK 'a çok teşekkür ediyorum. Çalışmalarım sırasında her konuda, her zaman yanımda olan desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Ercan AKYOL'a, annem Rahime ŞAHİN, babam Burhan ŞAHİN, kardeşlerim Fatma ŞAHİN ve Aleyna ŞAHİN'e sonsuz teşekkür ederim.

Nur Hilal AKYOL

Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b: Kinetik derece

CL: Katodoluminesans

CGCD: Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma

E: Aktivasyon enerjisi

Eg: Yasak enerji aralığı

SEM: Çevresel taramalı elektron mikroskobu

EDX: Enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi

eV: Elektron volt

Gy: Gray

k: Boltzman sabiti

k.b.: Keyfi birim

mGy: Mili gray

OSL: Optik uyarmalı lüminesans

PS: Tepe şekil yöntemi

RC: Yeniden birleşme merkezi

RL: Radyoluminesans

s: Frekans faktörü

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

T: Mutlak sıcaklık

T: Elektron tuzak merkezi

TL: Termoluminesans

T_m: TL eğrisinin tepe maksimum şiddetine karşılık gelen sıcaklık

TLD: Termoluminesans dozimetre

UV: Ultraviyole ışık

LaB₃O₆: Lantanyum tri-borat

XRD: X-ışını kırınımı

β: Isıtma hızı

τ: Ortalama ömür

μ: Mikro

μg: Geometrik faktör (simetri faktör)

τc: Karakteristik zaman

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Farklı şekillerde oluşan lüminesans.....	5
Şekil 1.2. Enerji Dönüşümleri (a) floresans, (b) fosforesans.....	7
Şekil 1.3. Elektron demetiyle ışınlanan bir malzemede meydana gelebilecek olası etkileşim türleri.....	9
Şekil 1.4. Radyolüminesans Olayı.....	9
Şekil 1.5. Termolüminesans Bant Modeli Gösterimi.....	12
Şekil 1.6. T_M , tuzaklanmış elektronların başlangıçtaki yoğunluğu olan n_0 'dan bağımsızdır.....	14
Şekil 2.1. Agat Havan	26
Şekil 2.2. Alümina Kroze	26
Şekil 2.3. Elektrikli Isıtıcı Manyetik Karıştırıcı.....	26
Şekil 2.4. Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü TL/OSL Medikal Fizik laboratuvarında bulunan Nabertham (P330) Marka Kül Fırın.....	27
Şekil 2.5. Çukurova Üniversitesi ÇÜMERLAB Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan PANALYTICAL EMPYREAN XRD marka cihaz.....	28
Şekil 2.6. Celal Bayar Üniversitesi DEFAM Yüzey Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan ZEİSS marka GEMİNİ 500 model SEM-EDX cihazı	29
Şekil 2.7. Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında bulunan HARSHAW 3500 marka TLD okuyucu.....	31
Şekil 2.8. Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında bulunan Beta Kaynağı.....	32
Şekil 3.1. Katkısız LaBO_3 'e ait XRD grafiği sonucu.....	36
Şekil 3.2. LaB_3O_6 :%1 Tb^{+3} örneğine ait XRD spektrumu.....	37
Şekil 3.3. LaB_3O_6 : %1 Dy^{+2} örneğine ait XRD spektrumu.....	38
Şekil 3.4. LaB_3O_6 : %1 Sm^{+3} örneğine ait XRD spektrumu.....	38

Şekil 3.5. Saf LaB_3O_6 ve $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \text{Dy}^{+2}$, $\text{LaBO}_3:\text{Tb}^{+3}$, $\text{LaBO}_3:\text{Sm}^{+3}$ örneklerine ait XRD Spektrumu.....	37
Şekil 3.6. Katkısız LaB_3O_6 ' ün karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR Spektrumları.....	40
Şekil 3.7. $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%1\text{Sm}$ ve $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%2 \text{Sm}$ nin karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR spektrumları.....	41
Şekil 3.8. $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%1\text{Tb}$, $\text{LaBO}_3 : \%3\text{Tb}$ ve $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%4\text{Tb}$ nin karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR spektrumları.....	41
Şekil 3.9. $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%1\text{Dy}$ ve $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%2\text{Dy}$ nin karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR spektrumları.....	42
Şekil 3.10. Katkısız LaB_3O_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri.....	43
Şekil 3.11. $\%2 \text{Sm}$ iyonu ile katkılandırılmış LaB_3O_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri.....	43
Şekil 3.12. $\%1\text{Dy}$ iyonu ile katkılandırılmış LaB_3O_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri.....	44
Şekil 3.13. $\%4 \text{Tb}^{+3}$ iyonu ile katkılandırılmış LaB_3O_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri.....	44
Şekil 3.14. Katkısız LaB_3O_6 örneğinin TL spektrumu.....	46
Şekil 3.15. Katkılı $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Sm}^{+3}$ ($\%1$, $\%2$, $\%3$, $\%4$ ve $\%5$ kütlece) örneklerin TL Spektrumu.....	46
Şekil 3.16. Katkılı $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Tb}^{+3}$ ($\%1$, $\%2$, $\%3$, $\%4$ ve $\%5$ kütlece) örneklerin TL Spektrumu.....	47
Şekil 3.17. Katkılı $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Dy}^{+3}$ ($\%1$, $\%2$, $\%3$, $\%4$ ve $\%5$ kütlece) örneklerin TL Spektrumu.....	48
Şekil 3.18. $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%1\text{Sm}^{+3}$ fosforunun farklı doz oranlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri.....	49
Şekil 3.19. $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%4 \text{Tb}^{+3}$ fosforunun farklı doz oranlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri.....	49

Şekil 3.20. LaB ₃ O ₆ : %1 Dy ⁺³ fosforunun farklı doz oranlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri.....	50
Şekil 3.21. LaB ₃ O ₆ :%4 Tb ⁺³ fosforunun doz yanıt eğrisi.....	51
Şekil 3.22. LaB ₃ O ₆ :%1 Sm ⁺³ fosforunun doz yanıt eğrisi.....	51
Şekil 3.23. LaB ₃ O ₆ :%1 Dy ⁺³ fosforunun doz yanıt eğrisi.....	52
Şekil 3.24. 1-10 °C/s ısıtma hızı ile elde edilen LaB ₃ O ₆ : %1Sm ⁺³ fosforunun TL ışıma eğrileri.....	53
Şekil 3.25. 1-10 °C/s ısıtma hızı ile elde edilen LaB ₃ O ₆ :%4Tb ⁺³ fosforunun TL ışıma Eğrileri.....	54
Şekil 3.26. 1-10 °C/s ısıtma hızı ile elde edilen LaB ₃ O ₆ :%1 Dy ⁺³ fosforunun TL ışıma Eğrileri.....	55
Şekil 3.27. LaB ₃ O ₆ :%1Sm ⁺³ Fosforunun Tepe 1 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının ln (Tm ² /β) Karşılık 1/kBTm Grafiği.....	57
Şekil 3.28. LaB ₃ O ₆ :%1Sm ⁺³ Fosforunun Tepe 2 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının ln (Tm ² /β) Karşılık 1/kBTm Grafiği.....	57
Şekil 3.29. LaB ₃ O ₆ : %4 Tb ⁺³ Fosforunun Tepe 1 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının ln (Tm ² /β) Karşılık 1/kBTm Grafiği.....	58
Şekil 3.30. LaB ₃ O ₆ : %4 Tb ⁺³ Fosforunun Tepe 2 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının ln (Tm ² /β) Karşılık 1/kBTm Grafiği.....	58
Şekil 3.31. LaB ₃ O ₆ :%1 Dy ⁺³ Fosforunun Tepe 1 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının ln (Tm ² /β) Karşılık 1/kBTm Grafiği.....	59
Şekil 3.32. LaB ₃ O ₆ :%1 Dy ⁺³ Fosforunun Tepe 2 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının ln (Tm ² /β) Karşılık 1/kBTm Grafiği.....	59
Şekil 3.33. LaB ₃ O ₆ : %1 Sm örneğine her döngü için elde edilen TL ışıma eğrileri.....	61
Şekil 3.34. LaB ₃ O ₆ :%4 Tb örneğinde her döngü için elde edilen TL ışıma eğrileri.....	62
Şekil 3.35. LaB ₃ O ₆ :%1 Dy örneğinde her döngü için elde edilen TL ışıma eğrileri sayısı grafiği.....	62

Şekil 3.36. LaB ₃ O ₆ : %1Sm ³⁺ fosforunun normalize edilmiş pik alanına karşı döngü sayısı grafiği.....	63
Şekil 3.37. LaB ₃ O ₆ : %4 Tb ³⁺ fosforunun normalize edilmiş pik alanına karşı döngü sayısı grafiği.....	63
Şekil 3.38. LaB ₃ O ₆ : %1Dy ³⁺ fosforunun normalize edilmiş pik alanına karşı döngü sayısı grafiği.....	64
Şekil 3.39. LaB ₃ O ₆ : Tb ⁺³ (%4) fosforuna ait TL parıldama eğrisi CGDC analiz eğrileri.....	65
Şekil 3.40. LaB ₃ O ₆ : Dy ⁺³ (%1) fosforuna ait TL parıldama eğrisi CGDC analiz eğrileri.....	66
Şekil 3.41. LaB ₃ O ₆ : Sm ⁺³ (%1) fosforuna ait TL parıldama eğrisi CGDC analiz eğrileri.....	67

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. LaB ₃ O ₆ : %1Sm ³⁺ fosforu için Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel düzeltilmemiş ve düzeltilmiş Tm değerleri.....	56
Tablo 3.2. LaB ₃ O ₆ : %4 Tb fosforu için Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel düzeltilmemiş ve düzeltilmiş Tm değerleri.....	56
Tablo 3.3. LaB ₃ O ₆ : %1 Dy ⁺³ fosforu için Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel düzeltilmemiş ve düzeltilmiş Tm değerleri.....	56
Tablo 3.4. LaB ₃ O ₆ : %1 Sm ³⁺ fosforu Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel ve düzeltilmiş Tm değerleri kullanılarak hesaplanan tuzak parametreleri.....	60
Tablo 3.5. LaB ₃ O ₆ : %4 Tb fosforu Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel ve düzeltilmiş Tm değerleri kullanılarak hesaplanan tuzak parametreleri.....	60
Tablo 3.6. LaB ₃ O ₆ : %1 Dy ³⁺ fosforu Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel ve düzeltilmiş Tm değerleri kullanılarak hesaplanan tuzak parametreleri.....	61
Tablo 3.7. LaB ₃ O ₆ : Tb ⁺³ 'ün çözümlenen eğrilerinin PS Metodu ile elde edilen kinetik parametreler.....	65
Tablo 3.8. LaB ₃ O ₆ : Dy ⁺³ 'ün çözümlenen eğrilerinin PS Metodu ile elde edilen kinetik parametreler.....	66
Tablo 3.9. LaB ₃ O ₆ : Sm ⁺³ 'ün çözümlenen eğrilerinin PS Metodu ile elde edilen kinetik parametreler.....	67

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
TABLO DİZİNİ.....	IX
İÇİNDEKİLER	X
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM GENEL BİLGİLER

1.1. Lüminesans	4
1.2. Lüminesans Çeşitleri.....	6
1.2.1. Yayımlanma Ömürlerine Göre Lüminesans	6
1.2.2. Uyarılma Türlerine Göre Lüminesans.....	7
1.3. Termolüminesans Kinetikleri.....	12
1.3.1. Birinci Derece Termolüminesans Kinetiği.....	13
1.3.2. İkinci Derece Termolüminesans Kinetiği.....	15
1.3.3. Genel Derece Termolüminesans Kinetiği.....	16
1.4. Termolüminesans Dozimetrisi ve Çeşitleri.....	17
1.5. Lüminesans Malzemesi : LaB_3O_6 (Lantanyum Tri-Borat).....	20
1.6. Literatür Özeti.....	22

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1. Yanma yöntemi.....	25
2.2. X-Işını Kırınımı (XRD)	27
2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	28
2.4 EDS(Enerji Dispersiv Spektrum).....	29
2.5. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR).....	29
2.6. Termoluminesans Sistemi (TL).....	30
2.7. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması İçin Yöntemler.....	32
2.7.1. Farklı Isıtma Hızı Yöntemi.....	33
2.7.2. Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi.....	34
2.8. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyi.....	34
2.9. Doz Yanıt yöntemi.....	35

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Katkılı, Katkısız Ve Kodlanmış LaB_3O_6 'ün X-ışını kırınım Desenleri.....	36
3.2. Katkılı ve Katkısız LaB_3O_6 'ün ATR-FTIR Analizleri.....	39
3.3. Katkılı ve Katkısız LaB_3O_6 'ün SEM-EDX Analizleri.....	42
3.4. Termoluminesans (TL) Analizleri.....	45
3.4.1. Doz Yanıt Deneyi İle İlgili Bulgular.....	48
3.4.2. Farklı Isıtma Hızları Deneyi ile İlgili Bulgular.....	52
3.4.3. Yeniden kullanılabilirlik.....	61
3.4.4. Bilgisayarla Işıma Eğrisi Ayrıştırma (CGCD) Yöntemi ile İlgili Bulgular	64

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1.Sonuç ve Öneriler.....69

KAYNAKLAR73



GİRİŞ

Fosforlar ışığı geçici olarak depolayarak ışıma yapan ya da parıldayan malzemeler olarak tanımlanır. Bu özellikleri sayesinde de oldukça geniş uygulama alanına sahip malzemelerdir. Fosforlar, aktivatör olarak adlandırılan uygun iyonların (nadir toprak elementleri gibi) belirli oranlarda ilave edildiği ev sahibi örgü olarak bilinen çok saf inorganik malzemelerden oluşmaktadır. Son yıllarda bu şekilde, ev sahibi örgü ve katkı iyonlardan oluşan yeni verimli lüminesans malzemelerin tasarlanması ve geliştirilmesine olan ilgi giderek artmaktadır. Aktivatör atomları ilave edilmesiyle, kristalde ışıma ve lüminesans merkezleri oluştuğundan dolayı aktivatörler lüminesans mekanizmasının oluşumunda önemli rol oynarlar. Lüminesans olayında, etkin bir ışımanın gözlenebilmesi için ev sahibi (konak) kristal içerisine düşük derişimlerde aktivatör iyonları katkılanmaktadır [1-3].

Katıhal aydınlatma, optik iletişimde amplifikatörler, güneş pilleri, x ışını dedektör sistemleri, ekran (display) panelleri, katot ışını tüpleri, ürün kodlama ve radyasyon denetlemesi gibi alanlar nadir toprak iyonlarıyla katkılanmış fosfor malzemelere ait lüminesans çalışma alanlarından bazılarıdır [2-6].

Lüminesans çalışma alanlarından birisi olan radyasyon denetlemesi, maruz kalınan radyasyon dozunun belirlenmesi anlamına gelir. Bir maddede biriken ya da bir insanın radyasyon kaynaklarından maruz kaldığı enerjinin düzenli olarak ölçülmesi gerekir ki bunun için çeşitli dozimetreler kullanılır. Sıklıkla kullanılan dozimetre çeşitlerinden biri de lüminesans özellikleri gösteren malzemelerdir. Böyle bir dozimetride, soğurulan radyasyonun tespiti ve doz miktarının ölçümü için termolüminesans (TL) materyalleri kullanılır. Bir TL dozimetresi (TLD) için temel prensip, dedektör içindeki kristalden yayınlanan görünür ışık miktarının ölçülerek radyasyon dozunun belirlenmesidir. Burada yayınlanan ışık miktarı, kristal materyali tarafından alınan radyasyon dozuna bağlıdır. Bu dozimetreler; kişisel, çevresel, klinik ve yüksek doz dozimetrisi gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar nadir toprak elementi katkılı fosforların, söz konusu bu alanlarda, TLD dozimetrisi için önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Nadir toprak katkısı, materyalin hem radyasyon doz davranışını hem de TL özelliklerini etkiler [5], [7].

Borat kristalleri TL ve ilginç optiksel özellikler, gösteren doğal olarak ışıldar bir malzemedir. Katkılı borat bileşiklerinin TL çalışmaları, dokuya yakın absorpsiyon katsayıları, yüksek hassasiyet, doğrusallık, iyi depolama, son derece düşük maliyetle ve kolay hazırlanmaları, düşük sentez sıcaklıkları gibi iyi özellikleri nedeniyle ilgi görmektedir. Bu özellikleri, onları dozimetrik uygulamalar içinde kullanılmaya değer kılar. Bu sebeple TL dozimetreler, sentetik boratlar için önemli bir teknolojik kullanım alanı olmuştur. Bunun dışında, nadir toprak (Lantanit serisi) boratları, yüksek vakum ultraviyole şeffaflığına, büyük elektronik bant boşluğuna, kimyasal ve çevresel güvenilirliğe ve son derece geniş optik hasar eşiğine sahip olma özelliklerinden dolayı plazma ekran panellerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır [5], [8], [9], [10].

Boratlar, düşük sentez sıcaklıkları, büyük bant aralıkları, bol miktarda bulunan yapı tipleri ve ayarlanabilir katyonik ortamları nedeniyle lüminesans malzemeler için ideal bir matris görevi görürler. Lantan boratlar ise aşınmayı önleme ve sürtünmeyi azaltma yeteneklerine sahip olmakla birlikte optik iletişim, tıp ve lidar sistemlerinde potansiyel uygulamalara sahiptirler. Bu yüzden hem tribolojik hem de optoelektronik uygulamalarda değerli olan çok yönlü malzemelerdir. La_3BO_6 , LaBO_3 , ve LaB_3O_6 gibi lantan borat bileşikleri genellikle lüminesans malzemeler için konak (host) olarak kullanılırlar [11].

Nd^{+3} , Eu^{+3} , Gd^{+3} , Pr^{+3} gibi nadir toprak iyonlarıyla aktive edilen LaB_3O_6 , yüksek lüminesans verimliliği sayesinde lazer diyot (LD) pompalamalı lazer kristali ve/veya fototerapi uygulamalarına yönelik bir lamba fosforu olarak umut vadeden malzemelerdir. Ayrıca, bu fosfor bazlı malzemeler radyasyon dozimetrisi alanında da, büyük ilgi görmektedir. Çünkü bireysel radyasyon izleme, çevresel radyasyon takibi ve retrospektif dozimetri gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler [12].

Lantanyum ortoborat LaB_3O_6 bileşiği, farklı nadir toprak iyonları ile katkıldığında ise aydınlatma ve görüntüleme cihazlarında uygulama için umut verici malzemelerdir. Nadir toprak elementleriyle birleştirildiklerinde yüksek VUV şeffaflığına sahip olurlar. Bunun dışında alkali ve diğer metallerle katkılanmış LaB_3O_6 , katıhal proton iletkenleri olarak incelenmektedir. Yine çeşitli uygulamalarda manyetik özellik sağlayan bir malzeme olarak atfedilmektedirler [13].

Literatürde mevcut fosfat tabanlı fosforlar katıhal reaksiyonu ile sentezlenmektedir. Bu yöntemin uzun zaman alması, yüksek sıcaklıklar ve öğütme

gerektirmesi (bu durum sentezlenen malzemenin homojenliğini bozmakta ve lüminesans şiddetini azaltmaktadır) istenmeyen özellikleridir. Ayrıca uygulanması planlanan yanma yöntemi katı-hal yöntemlerine göre daha düşük sentez sıcaklığı kısa tepkime süresi, nano parçacık boyutu, kolay ve güvenli olması açısından üstünlükleri olan bir tekniktir [14]. Bu yüzden mevcut çalışmada önerilen fosforların yanma yöntemi ile sentezlenecek olması bir avantajdır.

Dozimetrik uygulamalarda özel bir malzeme kullanmak için, önemli gereksinimlerden biri, malzemenin toplu miktarlarda sentezlenme kolaylığıdır. Bu kriter gere, borat tabanlı fosforlar kolay sentezlenebilir malzemeler olup, bu da bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Bor elementi doğada hiçbir zaman serbest halde bulunmayan, çeşitli metal veya ametal elementlerle farklı özellikler gösteren bileşikler oluşturmaktadır. Bu nedenle, birçok bor bileşiği endüstrinin farklı dallarında kullanılmaktadır [15]. Nadir toprak metali içeren boratlı bileşiklerde, endüstride kullanılan bor ürünlerinden bir tanesidir. Türkiye sahip olduğu bor rezervleri ile dünyanın önde gelen ülkelerindendir. Dolayısıyla değişik bor ürünleri ile yapılacak her çalışma bor rezervi bakımından zengin olan ülkemize katkı sağlayacaktır.

Termolüminesans dozimetrenin (TLD) kinetik derecesi (b), aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktöründen (s) oluşan tuzaklanma parametrelerinin termolüminesans (TL) yöntemi kullanılarak hesaplanması, malzemenin kinetik karakterizasyonu ve daha etkin dozimetrelerin üretim çalışmaları açısından çok önemli olabilmektedir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında LaB_3O_6 fosforu, yanma yöntemi ile sentezlenip, Tb^{+3} , Dy^{+3} , Sm^{+3} nadir toprak iyonları ile katkılандırılmış ve elde edilen bu örneklerin karakter analizi için toz X-ışını kırınımı (XRD), SEM(Taramalı Elektron Mikroskobu)-EDX (enerji dağılımlı spektroskopi) ve Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) yöntemleri kullanılmıştır. Ardından sentezlenen bu malzemelerin termolüminesans (TL) özellikleri incelenmiş ve TL kinetik parametre hesabı yapılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Lüminesans

Lüminesans, fiziksel bir sistem tarafından, genellikle morötesi, görünür veya yakın kızılötesi bölgede gerçekleşen, termal ve kızılötesi ışımadan farklı olan, elektromanyetik radyasyon yayılımı olayıdır. Lüminesans birçok madde için, uyarılmanın doğasından bağımsızdır ve malzemenin doğrudan soğurmadığı dalga boylarında (enerji bantlarında) gerçekleşir. Işımanın kaynağı, elektronların uyarılmış bir enerji düzeyinden temel duruma geçişi sırasında açığa çıkan enerjidir [16].

"Lüminesans" terimi, ilk olarak 1888 yılında Alman fizikçi Eilhardt Wiedemann tarafından "lumineszenz" olarak kullanılmıştır. Ancak bu olgunun gözlemi, tarih öncesi çağlara kadar uzanır. Ateş böcekleri, deniz canlılarının parlaması, kuzey ışıkları (Aurora Borealis), Bolonya taşı gibi doğal örnekler, "ateşsiz ışık" olarak adlandırılan lüminesans olaylarına örnek teşkil eder. Bu erken gözlemler, zamanla bilimsel araştırmalara konu olmuş ve lüminesans fenomenine yönelik ilgi giderek artmıştır [17].

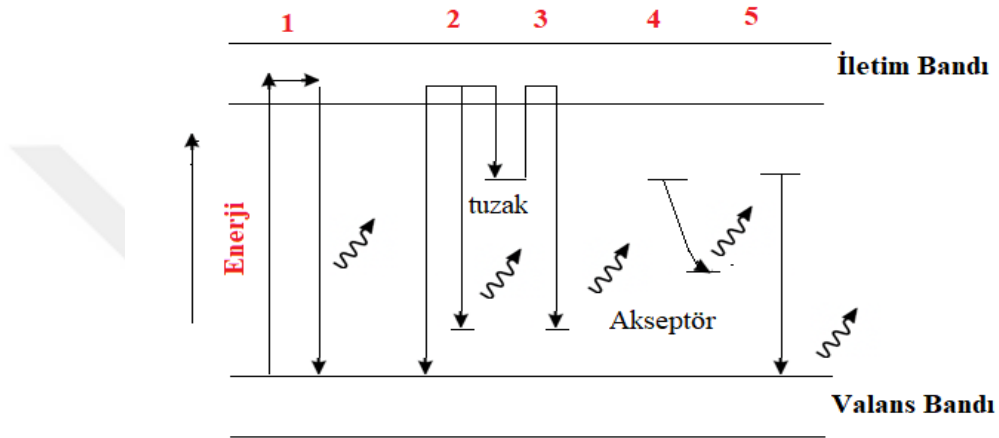
Lüminesans, bir malzeme içerisindeki elektronların farklı enerji seviyeleri arasında geçiş yapması sonucu ortaya çıkan ışıınım olayıdır. Bu süreç, genellikle harici bir enerji kaynağından sağlanan enerji ile başlar. Malzeme, harici bir enerji kaynağına (örneğin morötesi ışık, X-ışını, elektron demeti vb.) maruz bırakıldığında, bu enerji malzemedeki elektronlara aktarılır. Elektronlar, temel enerji seviyelerinden daha yüksek enerjili uyarılmış enerji seviyelerine geçer. Uyarılan elektronlar, kristal yapı içinde bulunan özel bölgelerde (lüminesans merkezlerinde) tuzaklanabilir. Bu merkezler, kristal örgüsündeki kusurlar veya katkı iyonları ile oluşur.

- Dislokasyonlar ve kristal kusurları,
- Geçiş metal iyonları (örneğin Mn^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+}),
- Ağır metal iyonları (örneğin Pb^{2+} , Tl^{+}),
- Nadir toprak elementleri (örneğin Eu^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+}),
- Elektron-boşluk merkezleri (örneğin S^{2-} , O^{2-} , F^{-} merkezleri)

yaygın lüminesans merkezleridir. Tuzaklanan elektronlar belirli bir süre sonra, termal uyarı ya da kuantum tünelleme gibi etkilerle yeniden temel enerji seviyelerine döner.

Elektronların bu geçişi sırasında fazla enerji foton olarak yayılır. Yayınlanan bu fotonlar Morötesi (UV), görünür (VIS) veya yakın kızılötesi (NIR) bölgede olabilirler.

Lüminesans oluşumu, uyarılmış taşıyıcıların (elektron veya deliklerin) rekombinasyon mekanizmalarına bağlı olarak farklı şekillerde gerçekleşebilir. Bu süreçler, büyük ölçüde lüminesans merkezlerinin türüne (iyonik yapısı, valans durumu) ve kristal örgüsü içerisindeki konumuna bağlıdır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Elektronların uyarılma sonrası değerlik bandı, iletkenlik bandı arasında izlediği farklı geçiş yolları ve bu geçişler sonucunda oluşan beş farklı lüminesans mekanizması

Lüminesans olayının farklı yollarla gerçekleşme süreci;

1. Elektron, dışarıdan aldığı enerjiyle değerlik bandından iletkenlik bandına geçer. Daha sonra temel duruma dönerken enerjisini foton olarak yayar.
2. Elektron iletkenlik bandından doğrudan valans bandına dönmeyip, akseptör adı verilen yeniden birleşme merkezine geçer. Bu sırada ışık yayılır.
3. Çeşitli tuzak seviyelerinden serbest hale gelen elektronlar, iletkenlik bandı üzerinden akseptör seviyelerine transfer olurken enerji yayar ve bu da lüminesansla sonuçlanır.
4. Tuzak seviyelerinden akseptör seviyelerine elektron geçişleri, foton yayımı ile sonuçlanarak lüminesansa neden olur.
5. Elektronların tuzak seviyelerinden doğrudan valans bandına rekombinasyonu sırasında yayılan enerji, lüminesans oluşumuna neden olur.

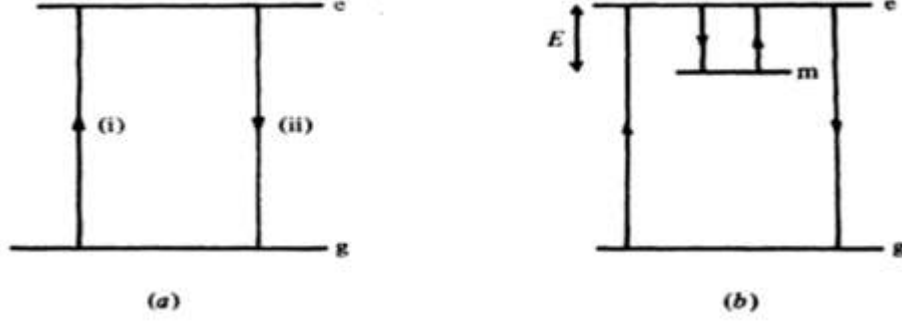
Lüminesans, malzeme içerisindeki atom ya da iyonların karakteristik enerji seviyelerinden kaynaklanan radyatif geçişlere dayanır. Bu geçişlerin analizi, malzemeyi oluşturan elementlerin elektronik yapısı hakkında bilgi sağlamanın yanı sıra, bu enerji seviyelerinin kristal alan etkilerine duyarlı olması nedeniyle, malzemenin kristal yapısı, yerel simetri ve kristal kusurları gibi yapısal özelliklerin de anlaşılmasına katkı sunar. Lüminesans süreçleri, uyarılma mekanizmasına (fotolüminesans, katodolüminesans, termolüminesans vb.) ve uyarılmış enerji seviyelerinin yaşam sürelerine bağlı olarak farklı kategorilere ayrılır. Bu sınıflandırma, lüminesans mekanizmasının temelini oluşturan geçiş türlerinin (izinli/izinli olmayan geçişler) anlaşılması açısından önemlidir [18].

1.2. Lüminesans Çeşitleri

1.2.1. Yayınlanma Ömürlerine Göre Lüminesans

Radyasyonun emiliminden sonra ışığın yayılması karakteristik bir t süresi kadar gerçekleşir ve bu t süresi bize lüminesans sürecini alt sınıflandırma yapmamızı sağlar. Yani, ışığın yayılma süresi $t < 10^{-8}$ s ye kadar olan lüminesans çeşidi floresans, $t > 10^{-8}$ sn ye kadar olan lüminesans çeşidi ise fosforesans olarak adlandırılır.

Floresans emisyonu, radyasyonun soğurulmasıyla eş zamanlı olarak gerçekleşir ve radyasyon kaynağı durdurulduğunda hemen durur. Fosforesans ise radyasyon emilimi ile tam yoğunluğa ulaşma süresi (t_{MAX}) arasındaki gecikmeyle karakterize edilir. Ayrıca uyarım kalktıktan sonra fosforesansın bir süre daha devam ettiği görülmektedir. Sıcaklığın lüminesansın bozunma süresine etkisiyle de floresans ve fosforesans olaylarını ayırt edebiliriz. Floresans esas olarak sıcaklıktan bağımsızdır, fosforesans ise güçlü bir sıcaklık bağımlılığı göstermektedir.



Şekil 1.2. Enerji Dönüşümleri (a) floresans, (b) fosforesans. G taban durumu, e uyarılmış seviyeyi, i ve ii elektron geçişlerini, m ise yarı kararlı durumu ifade etmektedir.

Genel olarak lüminesans, enerjinin radyasyondan alınarak katının elektronlarına verilmesiyle açıklanır. Böylece elektronlar g temel durumundan e uyarılmış durumuna uyarılır (Şekil 1.2). Lüminesans, uyarılmış bir elektronun temel duruma geri dönmesiyle gerçekleşir. Dolayısıyla floresans için i ve ii geçişleri arasındaki gecikme 10^{-8} sn den azdır ve sıcaklıktan bağımsızdır (Şekil 1.2(a)). Sıcaklığa bağlı fosforesansta ise Şekil 1.2.(b)'de görüldüğü gibi enerji seviyesi diyagramı e ve g arasındaki yasak enerji aralığında yarı kararlı bir m seviyesinin varlığıyla değiştirilir. G den e ye uyarılan bir elektron m de sıkışabilir ve burada yeterli enerji verilene kadar kalır. Dolayısıyla fosforesansta gözlemlenen bu gecikme elektronun elektron tuzağı m de geçirdiği süreye karşılık gelir [19].

1.2.2. Uyarılma Türlerine Göre Lüminesans

Fotolüminesans

Bir ışık kaynağından yayılan fotonların bir madde tarafından soğurulmasıyla oluşan ışık yayımına fotolüminesans (PL) denir. Foton absorpsiyonu sonucunda daha yüksek enerji seviyelerine uyarılan atom veya iyonlar, temel enerji seviyesine dönerlerken enerji salarak lüminesans oluştururlar. Floresan lambalar ve lazer ışığı gibi uygulamalar bu olaya örnek olarak verilebilir.

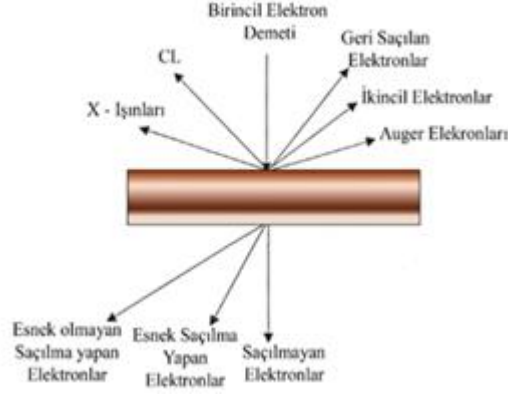
Katodolüminesans

Yüksek enerjili elektronların malzemeyi uyarmasıyla oluşan lüminesans türüne katodolüminesans denir. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi, elektronlar ile malzeme

arasında birden fazla etkileşim gerçekleşmektedir. Bu etkileşimler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

- **Karakteristik X-ışınlarının yayılması:** Atomların iç kabukları (K, L, M vb.) arasındaki elektron geçişleri sonucunda yayılan bu X-ışınları, WDS (dalga boyu dağılımlı spektrometre) veya EDS (enerji dağılımlı spektrometre) sistemleriyle analiz edilebilir.
- **Sürekli X-ışını yayılımı (bremsstrahlung):** Elektronların yavaşlatılması sırasında oluşur.
- **Düşük enerjili ikincil elektronlar (SE):** Topografik görüntüleme için kullanılır.
- **Yüksek enerjili geri saçılmış elektronlar (BSE):** Malzemenin bileşimsel bilgilerini sağlar.
- **Auger elektronları:** Dış kabuktan yayılan elektronlardır ve yüzey analizinde kullanılır.
- **Katodoluminesans (CL):** Elektron demetiyle uyarılan örnek, UV, görünür ya da yakın IR bölgelerinde ışık yayar. Bu ışık yayılımı, malzemenin optik özelliklerini yansıtır ve katodoluminesans (CL) analizi yapılmasına olanak tanır [20].

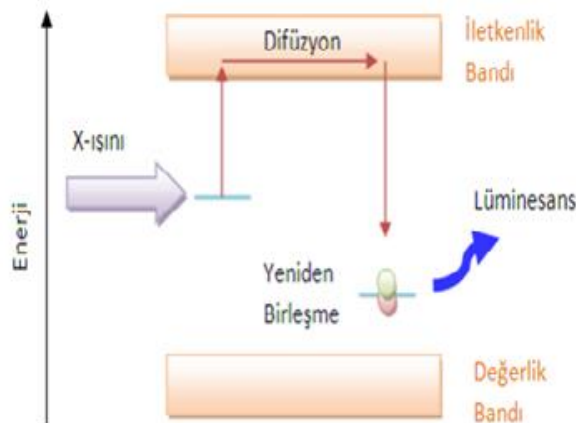
Katodoluminesans yönteminde kullanılan yüksek enerjili elektron demeti, diğer uyarma yöntemlerinden farklı olarak, malzemenin lokal bölgelerinde kristal örgü bozulmalarına neden olabilmektedir [21].



Şekil 1.3. Elektron demetiyle ışınlanan bir malzemede meydana gelebilecek olası etkileşim türleri

Radyolüminesans

Yüksek enerjili X-ışınları, gama ışınları ile veya β ve α parçacıklarıyla uyarılan malzemede oluşan lüminesans türüne radyolüminesans (RL) denir. Bu uyarım sonucunda madde atomları iyonize olur, serbest kalan elektronlar ile yeniden birleşerek foton yayılımı gerçekleştirir. Radyolüminesans, diğer lüminesans türlerinden farklı olarak, uyarımın sürekli devam ettiği bir süreçtir. Bu yöntemde, malzemenin tamamı X-ışınlarıyla uyarıldığından, malzemenin geneline dair bilgi edinmek mümkündür. Radyolüminesans sırasında soğurulan enerji, UV veya görünür ışık şeklinde yeniden yayımlanır.



Şekil 1.4. Radyolüminesans Olayı

Elektrolüminesans (EL)

Malzemenin elektrik alan içerisine maruz bırakılmasıyla gerçekleşen lüminesans eşidine denir. Malzemeye elektrik alan uygulandığında malzemedeki elektronlar uyarılma enerjisi kadar uyarılabilir.

İyonlüminesans veya iyon demeti lüminesansı

Malzemenin belli enerjiye sahip iyon demeti ile bombardımanı sonucu oluşur. Bu olayda genellikle 3 MeV'a kadar olan protonlar kullanılır. Derinlik olarak yaklaşık 40 mikrona kadar gidilebilir. Malzemedeki safsızlıkların belirlenmesi için oldukça yararlı bir yöntemdir.

Piezolüminesans

Malzemeye yaklaşık olarak 10 ton/m² mertebesinde basınç uygulanmasıyla gerçekleşen lüminesans çeşidi piezolüminesanstır. NaCl, KCl, KBr ve LiF'ün yapılarında piezolüminesans gerçekleşebilmektedir [18].

Tribolüminesans

Bir malzemeye uygulanan ezilme, sürtünme, kesme gibi statik kuvvetlerin neden olduğu mekanik bozulmalar sonucunda ışık yayımıdır. Şeker kristallerinin ezilmesi ya da yakut veya safir kristallerinin elmas testereyle kesilmesi tribolüminesansa neden olabilir.

Kemi-lüminesans

Kimyasal reaksiyonlar sonucu, düşük sıcaklıklarda gerçekleşen lüminesans çeşididir. Örnek olarak acil durum ışık çubukları ve ısıldayan sıvı dolu plastik tüpler verilebilir.

Biyolüminesans

Canlı organizmalarda bulunan kimyasal bir maddenin girdiği kimyasal reaksiyon sonucu gerçekleşen lüminesanstır. Işıldayan solucanlar, ateşböcekleri, mantarlar, denizanası gibi birçok okyanus canlısı örnek verilebilir [22].

Termolüminesans

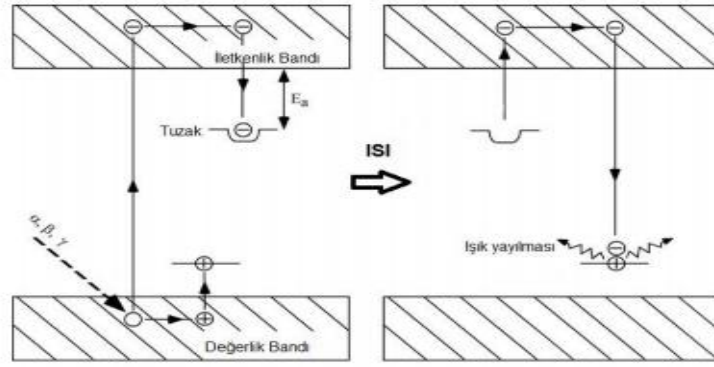
Termolüminesans, malzemenin gelen radyasyonu soğurmasının ardından ısıtılmasıyla ortaya çıkan bir lüminesans türüdür. Bu süreçte, malzeme tarafından tutulan enerji ısı etkisiyle serbest bırakılarak ışık olarak yayılır. Termolüminesans,

akkor ışık yayınından tamamen farklı bir mekanizmaya dayanır. Termolüminesansın gerçekleşebilmesi için yalıtkan veya yarıiletken malzemenin önceden radyasyona maruz kalmış olması temel koşuldur [23].

Termolüminesans (TL), fosforlardaki kusur yoğunluklarındaki değişimleri incelemek için yaygın olarak kullanılan güvenilir bir tekniktir. Yalıtkan malzemelerdeki kusurlar, yasak bant (band gap) içinde tuzak seviyeleri oluşturarak, elektronların burada hapsolmesine neden olurlar. TL analizleri ile bu tuzak yoğunlukları tespit edilebilir. TL sinyali elde etmek için, fosfor malzeme önce yüksek sıcaklığa ısıtılarak (genellikle 400–500 °C civarı) tüm elektron-delik tuzak seviyeleri boşaltılır. Ardından malzeme çok düşük sıcaklıklara soğutulur.

Malzeme, düşük sıcaklıkta incelenmesi istenen tuzaklardaki elektronların veya boşlukların kaybolmaması için yeterince kısa sürede ısıtılır ya da uyarılır. Uyarma enerjisi, malzemenin enerji bant boşluğundan daha yüksek olmalıdır. Işınlama tamamlandıktan sonra malzeme sabit bir ısıtma hızıyla ısıtılır. Uyarılma sırasında, tuzaklanmış elektronlar serbestleşir ve deliklerle rekombine olarak ışık yayılımına yol açan yeniden birleşme sürecini başlatırlar. Termal enerji, tuzaklarda hapsolmuş elektronların yeniden birleşme merkezlerine ulaşmasını sağlar. Yeniden birleşme, bir elektronun veya boşluğun bu merkezlerle birleşmesi sonucu gerçekleşir ve termolüminesans oluşumunu tetikler. Malzemenin sıcaklığı arttıkça termolüminesans yoğunluğu artar ve belirli bir sıcaklıkta maksimum değerine ulaşır; tuzaklardaki tüm yükler boşaldığında ise lüminesans şiddeti sıfıra düşer.

Malzemenin termolüminesans (TL) sinyalleri sıcaklığa bağlı olarak kaydedilerek bir eğri elde edilir. Bu eğriye TL eğrisi (veya ışıma eğrisi) denir [16]. TL eğrisi, malzemenin karakteristik özellikleri hakkında, özellikle aktivasyon enerjisi ve tuzak derinliği bilgisi sağlar. Grafikteki pikin en yüksek olduğu sıcaklık, ilgili tuzak seviyesinin derinliğiyle ilişkilidir. Birden fazla pik gözlenmesi, malzeme içerisinde farklı tuzakların bulunduğunu ve bu tuzakların özgün aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü (s) değerleri ile belirli sıcaklıklarda aktive olduklarını gösterir. Her bir pikin altında kalan alan ise, o tuzaktaki yük (elektron veya boşluk) miktarını, yani doldurulan tuzak sayısını temsil eder[24].



Şekil 1.5. Termolüminesans Bant Modeli Gösterimi

Termolüminesans dozimetrelerinde (TLD), kinetik derecesi (b), aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü (s) gibi tuzaklanma parametrelerinin hesaplanması, malzemenin dozimetrik performansının değerlendirilmesi ve etkili dozimetrelerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, sentezlenen saf ve katkılı maddelerin TL ışıma eğrilerinden kinetik parametreleri belirlenmektedir. Parametrelerin tayini için genel olarak pik şekli analizi, başlangıç artış yöntemi, doz-yanıt yöntemi, izotermal bozunma, farklı ısıtma hızları yöntemi, T_{max}-T_{stop} metodu ve bilgisayarlı ışıma eğrisi ayrıştırma gibi teknikler kullanılmaktadır [23], [16].

1.3. Termolüminesans Kinetikleri

Termolüminesans kinetikleri, radyasyona maruz kalmış yalıtkan veya yarıiletken malzemelerde, kristal örgü içerisindeki tuzaklarda hapsolmuş elektron ve deliklerin, ısıtma sırasında bu tuzaklardan serbest bırakılarak izledikleri süreçlerin matematiksel modellerle tanımlanmasıdır [25].

TL ölçümleri sonucu elde edilen ışıma eğrileri düzgün ve sürekli bir eğri görünümündedir. Termolüminesans (TL) eğrileri, farklı derinliklerdeki tuzaklarda tutulan elektronların ısıtma sırasında serbest kalmasıyla ortaya çıkan çok sayıda ışık pikinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu ışımaların nasıl gerçekleştiğini açıklamak için Randall ve Wilkins'in (1945) birinci derece kinetik teorisi ve Garlick ve Gibson'ın ikinci derece kinetik teorisi olmak üzere iki temel kinetik model geliştirilmiştir. Bu iki modele uymayan, ikisinin arasında kalan davranışlar gösteren ışıma eğrilerini açıklamak için de May ve Partridge tarafından başka bir model önerilmiştir. Bir TL

eğrisinin şekli, yüksekliği ve maksimum sıcaklık pikleri, malzemedeki tuzaklarla ilgilidir. Bu parametreler TL kinetikleridir ve frekans faktörü s , aktivasyon enerjisi E (eV) ve kinetik derece b 'yi içermektedir.

1.3.1. Birinci Derece Termolüminesans Kinetiği

Birinci derece kinetik teorisine göre, tuzaklardan kurtulan elektronlar tekrar tuzaklanmaz ve tek tuzak derinliğine sahiptir. Bu durumda TL ışıma şiddeti (I), tuzaklanmış elektronların konsantrasyonu(n) ile doğru orantılıdır.

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} \quad (2.1)$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = -nse^{(-E/kT)} \quad (2.2)$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{N} se^{(-E/kT)} \quad (2.3)$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s' e^{(-E/kT)} \quad (2.4)$$

Burada:

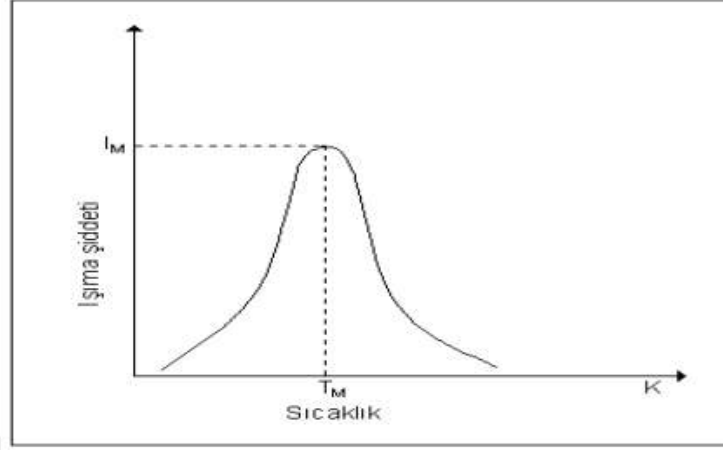
- **I(T)**: TL şiddeti (keyfi birimlerde),
- **n(T)**: t anındaki (veya sıcaklık T 'deki) tuzaklanmış elektron konsantrasyonu,
- **s**: frekans faktörü (s^{-1}),
- **E**: aktivasyon enerjisi (eV),
- **k**: Boltzmann sabiti ($eV \cdot K^{-1}$),
- **T**: anlık sıcaklık (K),
- **β** : lineer ısıtma hızı ($K \cdot s^{-1}$),
- **n_0** : T_0 sıcaklığında tuzaklanmış başlangıç yük taşıyıcılarının konsantrasyonu (cm^{-3}),
- **T_0** : başlangıç sıcaklığı (K).

olmak üzere;

$T=T_0$ 'dan $T=T$ 'ye integrali alınarak Randall – Wilkins bağıntısı:

$$I_{TL} = n_0 s \exp(-E/kT) \exp[-s/\beta \int_{T_0}^T e^{(-E/kT)} dT] \quad (2.5)$$

bulunur.



Şekil 1.6. T_M , tuzaklanmış elektronların başlangıçtaki yoğunluğu olan n_0 'dan bağımsızdır.

Denklem (2.5)'in integrali alınırsa;

$$I(T) = n_0 \exp(-E/kT) \exp[-s k T^2 / \beta E \exp(-E/kT) (1 - 2kT/E)] \quad (2.6)$$

elde edilir. Şekil 1.6.'dan da görüldüğü gibi $T=T_M$ noktasında denklem (2.5)'te $dI/dT = 0$ alınarak birinci derece kinetiklerin maksimum koşulunu veren ifade;

$$\frac{\beta E}{k T_m^2} = s \exp(-\frac{E}{k T_m}) \quad (2.7)$$

bulunur. Farklı ısıtma hızları (β) yöntemi kullanılarak elde edilen farklı T_M değerleri ile oluşturulan grafiklerden denklem (2.7) ile enerji seviyesi E ve frekans faktörü s kolaylıkla hesaplanabilir. Sabit bir ısıtma hızı için, E değeri arttırıldığında veya s azaltıldığında, T_M yüksek sıcaklıklara doğru kaymaktadır. Bir tuzak için (E ve s sabit) ısıtma hızı artarken, T_M daha yüksek sıcaklıklara doğru kayar. T_M , n_0 'dan dolayısı ile de verilen dozdan da bağımsızdır.

Denklem (2.7)'den s frekans faktörü;

$$s = \beta E / k T_M^2 \exp(-E / k T_M) \quad (2.8)$$

bulunur. Bu ifade (2.6)'da yerine yazılırsa;

$$I(T) = n_0 \beta E / k T_M^2 \exp[\frac{E}{k T_m} (\frac{T - T_m}{T_m})] \quad (2.9)$$

elde edilir. Denklem (2.9)'da görüldüğü gibi TL şiddeti I, tuzaklanan yüklerin konsantrasyonu ile doğru orantılı olup, ısıtma sürecinden bağımsızdır. Malzemeye verilen doz miktarı ile tuzaklanan yük konsantrasyonun orantılı olması, TL şiddetinin radyasyon dozu ile orantılı olmasını sağlar. Bu durumda termolüminesans dozimetrleri için oldukça önemlidir.

1.3.2. İkinci Derece Termolüminesans Kinetiği

Garlick ve Gibson (1948) tarafından ele alınan ikinci derece kinetik teorisi, TL şiddetinin elektronun yeniden yani ikinci kez tuzaklanmasıyla orantılı olduğunu söyler. Bu teoriye göre elektronlarının tuzaklanma olasılığı, tuzaklanmış deşiklerle (boşluk) birleşme olasılığından büyüktür. Buna göre denklem (2.2) yeniden düzenlenirse bir T (°K) sıcaklığında birim zamanda elektronların serbest kalma hızı;

$$I(T) = -\frac{dn}{dt} = -\frac{n^2}{N} \exp(-E/kT) \quad (2.10)$$

elde edilir. Bu ifade yeniden birleşme olasılığının 1'e eşit olduğu birinci derece kinetik için elde edilen sonuçtan farklıdır çünkü birinci derece kinetikte yeniden birleşme olasılığı yoktur. Denklem (2.10)'un integrali sabit T sıcaklığı için alınır;

$$n = n_0 \left[1 + \frac{s}{N} n_0 \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (2.11)$$

bulunur. Bulunan bu ifade denklem (2.10)'da yerine koyulup sabit ısıtma hızı ($\beta = dT/dt$) için integral alınır TL şiddeti

$$I(T) = n_0^2 \frac{s}{N} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{n_0 s}{\beta N} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT \right]^{-2} \quad (2.12)$$

ya da $s' = s/N$,

s' : b=2 durumu için indirgenmiş etkin ön expotansiyel faktör

s'' : etkin ön potansiyel faktör

b : kinetik derecesi olmak üzere (2.12) ikinci derece kinetikleri tanımlayan denklem;

$$I(T) = n_0 s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{s''}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT \right] \quad (2.13)$$

şeklinde de ifade edilebilir.

s'' (etkin ön exponansiyel faktör), ikinci derece tepe için n_0 arttıkça artar. Bunun nedeni TL tepesinin konumunun E' 'ye ve s' 'ye bağlı olmasından kaynaklanır. İkinci derece kinetiğin en önemli özelliği elektronların çoğunun yeniden birleşme olmadan tekrar tuzaklanmasıdır. Böylece TL pikinin geniş bir aralığa yayılması ve ışınlam yayınının gecikmesine yol açar.

$T = T_M$ noktasında denklem $dI/dT = 0$ alınarak ikinci derece kinetiklerin maksimum koşulunu veren ifade;

$$\frac{\beta E}{kTm^2} = s \exp\left(-\frac{E}{kTm}\right) \left[1 + \frac{2kTm}{E}\right] \quad (2.14)$$

1.3.3. Genel Derece Termoluminesans Kinetiği

May ve Partridge tarafından geliştirilen genel derece kinetik teorisi, birinci ve ikinci derece kinetik modellerin açıklamada yetersiz kaldığı durumlarda devreye girer. Bu teori tamamen deneysel verilere dayanır; yani, teorik olarak elde edilen eğrilerle deney sonuçları uyuşmadığında kullanılır. Bu teoriye göre; elektronlar tek bir enerji seviyesinde tuzaklanmıştır. Tek bir enerji seviyesinde bulunan yük taşıyıcılarının sayısı n ve kinetik derecesi b olmak üzere n 'in n^b ile orantılı olduğunu kabul edilirse bu durumda tuzaklardan kurtulma olasılığı;

$$I(T) = -dn/dt = n^b s' e^{-E'/kT} \quad (2.15)$$

olur. Burada s' (s^{-1}) frekans faktörüdür ve birimi $m^{3(b-1)} s^{-1}$ 'dir. $b \neq 1$ için bu denklemin integrali alınır;

$$I(T) = n_0 s'' \exp(-E/kT) \left[1 - (b-1) \frac{s''}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]^{-b/(b-1)} \quad (2.16)$$

genel dereceli deneysel TL bağıntısı elde edilir. Ancak bu denklemdeki s'' frekans faktörünün birimi, b kinetik derecesine bağlı olarak değişmesi TL eğrilerinin karşılaştırılmasını zorlaştırır. Bu sorunu gidermek amacıyla Rasheedy yeni bir bağıntı yazmıştır.

$$I(T) = -dn/dt = n^b/N s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.17)$$

Buna göre (2.16) denkleminin integrali alınır;

$$I(T) = n^b s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) N \left[1 + s(b-1) \left(\frac{n_0}{N}\right)^{b-1} / \beta \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]^{-b/(b-1)} \quad (2.18)$$

$$I(T) = \frac{\exp(\frac{E}{kT_m})}{kT_m^2} [1 + (b-1) \frac{2kT_m}{E}]^{-b/(b-1)} \quad (2.19)$$

elde edilir. Chen (1984) tarafından tanımlanan $s' = s n_0 b^{-1}$ etkin frekans faktörü gibi davranan deneysel bir parametredir. Bu durumda maksimum salınım koşulu;

$$\frac{\beta E}{kT_m^2} = s \exp(-\frac{E}{kT_m}) [1 + (b-1) (\frac{2kT_m}{E})] \quad (2.20)$$

olur [26].

1.4. Termolüminesans Dozimetrisi ve Çeşitleri

Yarı iletken veya yalıtkan malzemeler radyasyona maruz bırakıldıktan sonra ısıtıldıklarında ışık yayarlar. Bu tür materyallere termolüminesans dozimetrisi (TLD) denir. Termolüminesans dozimetreleri 10 keV-10 MeV enerji aralığında gama, X-ışını, beta ve nötron gibi çeşitli radyasyonların dozlarını ölçmek için kullanılmaktadır. Bu dozimetrelerin hassasiyeti kullanılan dozimetrik malzemeye ve TLD okuyucusunun özelliklerine bağlıdır (Cember ve Johnson 2009) [26].

Termolüminesans olayının ilk uygulamalarından biri, maruz kalan radyasyonun tespiti ve ölçümüydü. Lüminesans emisyonuna sahip yüksek hassasiyetli malzemeler keşfedilmeye başlandıkça termolüminesans olayının dozimetride kullanımı keşfedilmiştir. TL dozimetrelerinin en önemli özelliklerinden birisi, TL yoğunluğunun, doğrudan emilen radyasyon miktarıyla ilişkilendirilebilmesidir. İyi bir dozimetride, TL sinyali maruz bırakılan radyasyon dozu ile doğrudan orantılı olmalıdır. TL dozimetreleri, birkaç günlük doğal çevredeki radyasyon dozlarını veya nükleer reaktörler içindeki kadar yüksek doz radyasyonunda ölçmek için kullanılır [27].

Soğurulan radyasyon miktarı artmasıyla TL şiddeti de artar. Bunun nedeni, radyasyondan dolayı elektronların, enerji bant aralığında bulunan tuzak seviyelerine hapsolmeleridir. Dozimetride, çevresel faktörler doz ölçümlerini etkileyebilir. Örneğin, henüz TLD okunmadan, yüksek sıcaklık tuzaklardaki elektronların serbest kalmasına neden olabilmektedir. Bu da ölçülen değer gerçekte alınan dozdan daha düşük olmasına neden olur. Bir TLD'den yayımlanan termolüminesansın şiddeti, radyasyona maruz kalındığında dolan tuzaklar ve termal uyartımla boşalan tuzaklar arasındaki rekabetin sonucudur. Örnek ısıtılırken yayımlanan TL şiddeti, soğurulan

dozla orantılıdır. Böylece soğurulan radyasyon dozu, TL şiddetinden hesaplanabilir. TLD'lerin her biri doz-cevap lineerliğine bağlı olarak kişisel, çevresel, klinik ve yüksek doz dozimetrisi gibi farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır [28].

Personel dozimetrisi

Personel dozimetrisi, nükleer reaktörlerde çalışanlar, radyoterapi teknisyenleri veya nükleer enerjili gemilerdeki deniz kuvvetleri gibi mesleklerdeki personellerin maruz kaldığı radyasyon dozunu izler. Ayrıca bu dozimetrliler, kazara maruz kalınan radyasyon dozlarının belirlenmesinde de kullanılır. Personel dozimetrisinin temel amacı, kişinin maruz kaldığı doz miktarını yetkili kurumlar tarafından belirlenen maksimum doz miktarının altında tutmaktır. Personel dozimetrisi şu dozimetrlileri kapsamaktadır:

Uzuvlar Dozimetrisi: Ellerin kolların veya ayakların herhangi birine eşdeğer maksimum radyasyon dozunun belirlenmesi

Tüm Vücut Dozimetrisi: İnsan vücudunun $400-1000 \text{ mg.cm}^{-2}$ altındaki dokularda veya kritik organlardaki emilen doz eşdeğerinin belirlenmesi. Bunlar gama ışınları, x ışınları($>15 \text{ keV}$) ve nötronlardır.

Doku Dozimetrisi: $5-10 \text{ mg.cm}^{-2}$ derinlikteki dokular tarafından maruz kalınan radyasyon doz eşdeğerinin belirlenmesi. Bunlar beta parçacıkları ve x ışınlarıdır($<15 \text{ keV}$).

Bu uygulamanın ilk amacı doku eşdeğerliliğidir. Yani, belirli bir insan dokusunun emeyeceği radyasyon dozuyla aynı radyasyon dozunu emen bir TLD malzemesi aranır. Aynı zamanda bu TLD malzemesinin radyasyonun enerjisinden bağımsız olarak daha spesifik olması, yani insan dokusunun gösterdiğiyle aynı enerji bağımlılığını göstermesi beklenir. Bu dozimetrlilerin doz eşdeğeri aralığı yaklaşık olarak 10^{-5} Sv ile 10^{-1} Sv arasındadır.

Çevresel Dozimetri

Sanayileşmiş ülkelerde, çevreye yayılan radyasyonun izlenmesi için kullanılan dozimetri çeşididir. Maruz kalınan doz oranları düşük olduğundan dolayı(yaklaşık $5-10 \text{ Gy}$ eşdeğer dozlar) uzun süre maruz bırakılması gerekir. Bu nedenle bu TLD malzemelerin yüksek hassasiyet ve uzun süren kararlılık özelliklerine sahip olması gerekir. Bu dozimetrliler nükleer santrallerden radyonüklidlerin çıkması,

düşük seviyeli atık bertarafı, nükleer yakıtların yeniden işlenmesinden kaynaklanan kirlenme, nükleer santral kazaları vb. durumlar için kullanılmaktadır. Bunların dışında, insanlı uzay uçuşlarının başlamasından bu yana kozmik ışınlardan yayılan radyasyondan dolayı uzayda bu dozimetrlere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Çevresel dozimetrlere, kozmik ışınlardaki enerjili protonlar (1-1000 Mev) ve güneş rüzgarlarından gelen ağır yüklü parçacıkların neden olduğu radyasyon dozlarını belirlemek için son zamanlarda birkaç insanlı uzay uçuşlarında kullanılmıştır.

Tıbbi Dozimetri

Küçük boyutlu ve yüksek hassasiyetli TLD malzemelerinin kullanıldığı bu dozimetrlere klinik çalışmalarda tanı ve tedavi sırasında hastayı iyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakmadan insan vücudunda uygun yerlere yerleştirilerek kullanılmaktadır. Yerleştirilen bu dozimetrlere daha sonra alınarak analiz edilir ve bu sayede doktorlar iç organlara verilen gerçek dozları belirleyerek ek tedavileri reçete edebilirler. Tıbbi dozimetrlere, tanısal radyoloji ve radyoterapi alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. X ışınları, gama ışınları, beta parçacıkları, protonlar, nötronlar ve diğer ağır yüklü parçacıklar bu alanda maruz kalınan radyasyon çeşitleridir. Doz eşdeğer aralığı, radyolojide 5-10 ile 1 Sv ve radyoterapide 10 Sv' ye kadardır. Bu dozimetrlere yüksek hassasiyetli, mümkün olduğunca küçük boyutlu olmaları ve yüksek dozlar kullanıldığı için geniş bir doz aralığında doğrusal bir doz tepkisi vermesi beklenir.

Retrospektif Dozimetri

Bu dozimetrlere, dünyada kazara kirlenmiş bölgelerde geçmişe dönük radyasyon dozunu ölçmek ve değerlendirmek için kullanılmaktadır. Kullanıldığı önemli yerler arasında, Çernobil(Ukrayna), Techa Nehri(Rusya), Hiroşima ve Nagazaki(Japonya), Nevada Bomba Testi(ABD) sahası bulunmaktadır. Kazara kirlenmiş bölgelerde bulunan çanak, çömlek, fayans, porselen ve diğer seramik malzemelerden çıkartılabilecek olan kuvars ve feldispat bileşenlerinin maruz kaldığı radyasyon doz miktarları çeşitli TL dozimetri teknikleri kullanılarak belirlenebilir. Bu teknikler arasında en yaygın olanları, tarihlendirme uygulamaları için geliştirilenlerdir [27].

1.5. Lüminesans Malzemesi: LaB_3O_6 (Lantanyum Tri-Borat)

Borat tabanlı malzemeler, çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleriyle birçok uygulamada kullanılmaya uygun oldukları için uzun zamandır ilgi çekici olmaktadır. Bu malzemeleri ilgi odağı yapan en temel özellikleri, geniş dalga boyu spektrumunda yüksek şeffaflıkları, büyük elektronik bant aralığı ve lüminesans ömürleri, termal, kimyasal ve optik kararlılıkları, güçlü lazer hasarı toleransları ve düşük hazırlama sıcaklıklarına sahip olmalarıdır. Ayrıca, geniş elektronik bant aralıkları nedeniyle borat tabanlı malzemeler, uyarılmış durumların radyasyon dışı rekombinasyon olasılığını en aza indirirerek lüminesans verimliliğini artırdıkları için lüminesans merkezleri için mükemmel ana kafes yapılarına sahiptirler. Aynı zamanda boratlar, genellikle lüminesans üretmek için aktivatör olarak kullanılan nadir toprak ve geçiş metal iyonları için etkili konak malzemelerdir [29].

Son yıllarda birçok alanda kullanılan nadir toprak elementleriyle katkılanmış borat malzemeler, araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Borat atomları iki tip hibritleşmiş orbitale sahip oldukları için birçok tipte kristal yapı oluşturabilirler. Aynı zamanda, bu malzemeler geniş bant aralıkları nedeniyle mükemmel ana malzemeler haline gelmişlerdir (Peng ve Wondraczek, 2010 ;Gawande ve ark.,2016). Özellikle optoelektronik çalışmalarda en önemli malzemeler haline gelmiş ve bunun dışında dozimetrik uygulamalarda da kullanım alanına sahiptirler. Aynı zamanda, borat kristalleri fosforlar için oldukça önemli hale gelmişlerdir. Bu malzemeler, ultraviyole (UV) gibi şeffaflık, yüksek radyasyon hasar eşiği, çevresel dayanıklılık ve kimyasal kararlılık gibi ilginç optik özelliklere sahiptir (Baumer ve ark., 2004; Fuchs ve ark., 2009). Floresan lambalar, gösterge panelleri ve ışık yayan diyotlar gibi lantanit katkılı borat yapıları çok yüksek UV şeffaflığına ve yüksek termal kararlılığa sahiptir. Bu yapılarla ilgili olarak dozimetrik çalışmalar da yapılmıştır (Küçük ve ark.,2015). Son yıllarda, çeşitli borat yapılarından oluşan konak malzemeler, çeşitli yöntem ve teknikler kullanılarak yapılan çalışmalarda başarıyla sentezlenmiştir [30].

Bunlar arasında LaB_3O_6 , önemli borat konak fosforlarından biridir ve lantan iyonu ve borat kristalinin yapısı nedeniyle kararlı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Bu fosforda, La^{3+} iyonu bant aralığındaki yük transfer sürecini etkileyerek ışık yoğunluğunun artmasını sağlar. Bor ve oksijen atomları, yüksek lüminesans kararlılığı gösteren çeşitli borat grupları oluşturmak için hidritleşmeler yoluyla birleşir. Nd^{3+} , Eu^{3+} , Gd^{3+} , Pr^{3+} vb. gibi nadir toprak iyonlarıyla katkılanır

LaB₃O₆, yüksek lüminesans verimliliklerinden dolayı LD için bir lazer kristali veya fototerapi uygulaması için bir lamba fosforu olarak kullanılmasının yanısıra radyasyon ölçümü için lüminesans dozimetresi olarak kullanılması da bir süredir araştırılmaktadır [31].

LaB₃O₆ kristali, A'nın lantanit olduğu AB₃O₆ geniş mineral ailesinin bir üyesidir. *C 2 / c* 'lik bir uzay grubuna ve monoklinik bir kristal yapıya sahiptir. Guohua ve diğerleri (2004), katı hal lazerlerinin yapımında spektroskopik parametreleri hesaplayarak Czochralski tekniği ile LaB₃O₆: Nd³⁺ kristalini inceleyerek LD pompalaması için umut verici bir aday lazer kristali olduğunu belirtmişlerdir. LaB₃O₆, Gawande ve ark. (2016), yanma sentez tekniğini kullanarak sentezlediği Bi³⁺ ve Gd³⁺ katkılı boratların özelliklerini inceleyerek bu malzemelerin, fototerapi alanında lamba fosforları olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Baumer ve ark. (2004) Czochralski yöntemi ile sentezleyerek, fotolüminesans ve termolüminesans özelliklerinin araştırmışlar ve LaB₃O₆ fosforundaki radyasyon kaynaklı kusur tiplerini de tanımlamışlardır. Elde ettikleri verilere göre, katkısız LaB₃O₆ tek kristalindeki, β -ışınlamasından sonra 300-600 K aralığında TL parıltı eğrisinde bir maksimum göstermediğini belirtmişlerdir. Fakat, Halefoglul ve ark. (2020), yanma yoluyla sentezledikleri Eu³⁺ katkılı LaB₃O₆'nın verilen beta dozuna (20 Gy'e kadar) karşı iyi doğrusallığa sahip olduğunu ve çevresel TL için umut vadeden bir malzeme olduğunu belirtmiştir. Görüldüğü gibi, Eu, Sm, Gd ve Tb dahil olmak üzere iki değerlikli ve üç değerlikli lantanit iyonlarının geniş spektrumu, elektron tuzaklarını ve tuzak merkezlerini etkiledikleri için konak borat malzemeler için oldukça önemlidir. Bunlar arasında, çeşitli Tb³⁺ katkılı borat örneklerinin dozimetrik verileri, fotolüminesans (PL) özellikleri ve güçlü ışık üretimi nedeniyle dikkat çekmektedir.

Borat malzemeler, bireysel radyasyon izleme, çevresel izleme ve retrospektif dozimetri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda araştırmacılar tarafından ilgi görmektedir. Yumuşak dokular için etkili atom numarası (Z_{eff}) 7,22'ye yakın olan borat bileşikler, benzersiz özellikleri onları çevresel ve tıbbi dozimetri için uygun malzemeler haline getirmektedir. Ancak, LaB₃O₆'nın Z_{eff} 'i 44'tür ve bu, kemiğin Z_{eff} 'inden bile önemli ölçüde daha büyük olmasından dolayı malzemenin dozimetrik özellikleri incelenirken, yüksek doz vb. dozimetri alanları önceliklendirilir [12].

1.6.Literatür Özeti

Borat malzemeler, düşük sentez sıcaklıkları, geniş bant aralıkları, oldukça fazla bulunan yapı tipleri nedeniyle lüminesans malzemeler için en iyi konak malzeme olarak görülmektedir. Nadir toprak elementleriyle katkılandırılmış boratlar ise kimyasal kararlılık, yüksek vakumlu ultraviyole şeffaflığı ve büyük optik hasar eşiği özelliklerinden dolayı oldukça avantajlı durumdadır. Lantanyum boratlar iyi aşınma önleme ve sürtünme azaltma özelliklerinden dolayı optik iletişim, tıp ve radar sistemlerindeki uygulamalarda oldukça popülerdir. Lüminesans malzemeler için konak olarak sıklıkla kullanılan lantanyum boratlar; La_3BO_6 , LaBO_3 ve LaB_3O_6 ' lardır [11]. Lantan boratların nadir toprak elementleriyle katkılandırılmasıyla bunların karakteristik ve optik özellikleri üzerine yapılan literatür çalışmaları aşağıda özet olarak verilmiştir.

Halefoğlu (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yanma yöntemi kullanılarak LaB_3O_6 Eu^{3+} konak materyali düşük sıcaklıkta sentezlenmiş ve yapısal özellikleri XRD, SEM ve EDX kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca örneğin (PL) ve termolüminesans (TL) gibi diğer lüminesans özellikleri de gözlemlenmiştir. Bu çalışma, borat fosforlarının dozimetrik uygulamalarda kullanılmasına önemli katkı sağlamakla birlikte literatürde $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$ konak materyalinin TL özelliklerinin analiz edildiği ilk çalışmadır [31].

Portakal-Uçar ve ark., yanma reaksiyonu ile farklı konsantrasyonlarda Tb^{3+} katkılayarak LaB_3O_6 fosfor malzemeleri sentezlemişlerdir. Faz bileşimi ve yüzey morfolojisini, X ışını kırınımı(XRD) ve taramalı elektron mikroskobu(SEM) ile belirlemişlerdir. Dozimetrik özellikleri (doz tepkisi, tekrarlanabilirlik, solma ve ısıtma hızı etkisi) belirlemek ve $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Tb}^{3+}$ fosforunun kinetik parametrelerini (E_a , s ve b) hesaplamak için TL ölçümlerini incelenmişlerdir. Kinetik parametreler, çeşitli ısıtma hızları (VHR), $T_M - T_{\text{durma}}$, ilk yükselme (IR) ve bilgisayarlı ışıma eğrisi ayrıştırma(CGCD) yöntemleri kullanılarak belirlenmiş ve TL ışıma piklerinin ömrü makul derecede dayanıklı olarak kabul edilmiştir. $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Tb}^{3+}$ (%5,0) fosforu elde edilen sonuçlara göre umut verici bir malzeme olduğu belirlenmiştir [12].

Xiao Wu ve arkadaşları (2020), Dy^{3+} katkılı LaB_3O_6 fosforlarını katı hal yöntemi ile sentezlemişler ve çeşitli teknikler kullanarak analiz etmişlerdir. $\text{LaB}_3\text{O}_6:0,02\text{Dy}^{3+}$ fosforlarının sıcaklığa bağlı fotolüminesans özellikleriyle birlikte bu

materyalin iyi bir termal kararlılığa sahip olduğu ve aktivasyon enerjisi değerinin 0,203 eV olduğu ortaya koyulmuştur. Numunenin CIE koordinatları (0.313, 0.339) olarak hesaplanmış ve bu değerlerin standart beyaz ışığa oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{x Dy}^{3+}$ fosforlarının beyaz LED (w-LED) uygulamaları için umut vaad edici adaylar olduğu ifade edilmiştir [32].

Chuanxiang Qin ve arkadaşları (2013), $\text{LaBO}_3: \text{Eu}^{3+} (\text{Tb}^{3+})$ nanofiberlerini elektrospinning yöntemiyle sentezlemiş ardından kalsinasyon işlemi uygulamışlardır. UV ışığıyla uyarıldığında, $\text{LaBO}_3: \text{Eu}^{3+}$ nanofiberlerinin emisyonu, Eu^{3+} iyonunun $5D_0 - 7F_2$ (614 nm, kırmızı) geçişine; $\text{LaBO}_3: \text{Tb}^{3+}$ nanofiberlerinin emisyonu ise Tb^{3+} iyonunun $5D_4 - 7F_5$ (543 nm, yeşil) geçişine dayanmaktadır. Çalışmada nanofiberlerin aynı bileşime sahip toz örneklerine kıyasla katkılanmış nadir toprak element iyonlarına (bu çalışmada Eu^{3+} ve Tb^{3+}) bağlı olarak güçlü lüminesans özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, $\text{LaBO}_3: \text{Eu}^{3+} (\text{Tb}^{3+})$ fosforlarının optik dedektörler ve tam renkli görüntüleme cihazları gibi uygulamalar için umut vaad ettiği raporlanmıştır [33].

Li Guan ve arkadaşları (2010), $\text{M}_3\text{BO}_6: \text{Eu}^{3+}$ (M = La, Y) fosforlarını 1150 °C'de katı hal reaksiyon yöntemi ile sentezlemiş ve bu fosforların lüminesans özellikleri incelemişlerdir. Lüminesans malzemelerin yapısal karakterizasyonu X-ışını toz kırınımı (XRD) analizi ile gerçekleştirilmiştir. Fotolüminesans ölçümleri sonucunda, $\text{La}_3\text{BO}_6: \text{Eu}^{3+}$ fosforunun UV ışığı ile uyarıldığında yaklaşık 612 nm ile 626 nm dalga boyu aralığında merkezlenen parlak kırmızı emisyon sergilediğini gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı uyarım ve ölçüm koşulları altında $\text{La}_3\text{BO}_6: \text{Eu}^{3+}$ fosforunun, $\text{Y}_3\text{BO}_6: \text{Eu}^{3+}$ fosforuna kıyasla daha yüksek lüminesans yoğunluğuna sahip olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, $\text{La}_3\text{BO}_6: \text{Eu}^{3+}$ fosforunun beyaz LED uygulamalarında kırmızı emisyon sağlayan potansiyel bir fosfor malzemesi olduğu ifade edilmiştir [34].

AB Gawande ve arkadaşları (2016), $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Bi}, \text{Gd}$ ve $\text{YBaB}_9\text{O}_{16}: \text{Bi}, \text{Gd}$ fosforlarını, yanma sentez yöntemi ile hazırlanmışlardır. Sentezlenen tüm örneklerin faz analizleri toz X-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve fotolüminesans özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, bu fosforların fototerapi amaçlı aydınlatma sistemlerinde kullanılmak için umut vaad ettiği sonucuna varılmıştır [35].

M. Oğlakçı ve arkadaşları (2023), yanma yöntemi ile hazırlanan katkısız ve Ce^{3+} katkılı LaB_3O_6 fosforlarının TL özelliklerini rapor etmişlerdir. Sentezlenen fosforların faz analizleri spektroskopik yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. TL ışıma eğrileri kullanılarak fosforların doz tepkisi, yeniden kullanılabilirlik özellikleri ve sinyal kaybı incelenmiş, elde edilen veriler doğrultusunda kinetik parametreler farklı analiz yaklaşımlarıyla (değişen ısıtma hızları (VHR), $T_M - T_s$ yöntemi, başlangıç artışı (IR) ve ışıma eğrisinin dekonvolüsyonu) hesaplanmıştır. Bulgular, dozimetrik TL piklerinin kısa süreli depolama sonrası önemli bir değişiklik göstermediği ve $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Ce}^{3+}$ (%1)'in dozimetrik bir malzeme olarak yeniden kullanılabilirlik özelliğinin oldukça iyi olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, (%1) Ce^{3+} katkılı LaB_3O_6 fosforunun yeniden kullanılabilirlik açısından yüksek performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlara göre, $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Ce}^{3+}$ (%1) fosforu dozimetrik amaçlı uygulamalarda kullanılmaya elverişli bir fosfor malzemesi olarak değerlendirilmektedir [36].

Xiuqin Lin ve arkadaşları (2005), Pr^{3+} katkılı LaB_3O_6 tek kristalini Czochralski yöntemiyle büyütmüş ve kristalin absorpsiyon ile floresans spektrumlarını ölçmüşlerdir. Ayrıca floresans bozunma eğrisi kaydedilerek, floresans ömrü bu eğri üzerinden hesaplanmıştır. Elde edilen optik veriler doğrultusunda, $\text{Pr}^{3+}: \text{LaB}_3\text{O}_6$ tek kristalinin mikroçip lazer ortamlarında kullanılmak üzere potansiyel bir aday olabileceği ifade edilmiştir [37].

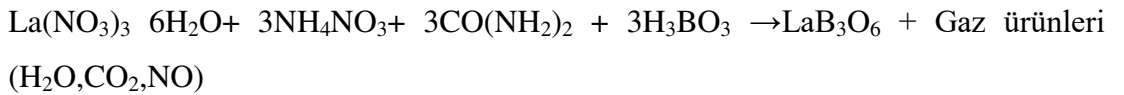
İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1. Yanma yöntemi

Yanma sentezi yöntemi, toz halindeki karışımın preslendikten sonra tepkimeye girmeyen bir atmosferde ateşlenerek yeterli ısı meydana geldiğinde kimyasal reaksiyonun (ekzotermik reaksiyon) başlaması ve kendi kendine ilerlemesidir [38]. Bu yöntem, daha uzun bir süreç gerektiren katı hal ve sol jel yöntemine alternatif olarak, 1980'lerin sonlarında, homojen, kristalin ve ince tane boyutlu fosforların üretimi için keşfedilmiştir. Yanma yöntemi, uygun oksitleyici (metal nitratlar, amonyum nitrat vb.) ve organik yakıtlar (üre, karbohidraz veya gliserin) kullanılarak hızlı, ekzotermik ve kendi kendine ilerleyen kimyasal bir reaksiyon sürecidir. Reaksiyon gerçekleşirken, ürünlerin oluşumu esnasında yüksek miktarda ısı açığa çıkar. Alüminyum nitrat ve karbohidrazdan, alüminyum oksit eldesi negatif entropiye sahip oldukça yüksek ekzotermik reaksiyona bir örnektir. 1990'ların sonlarında, çeşitli araştırma grupları, oksit bazlı fosforların üretimi için yanma sentezi reaksiyonunu kullanmışlardır ve bu teknik birçok çalışma için oldukça ilgi çekici hale gelmiştir. Kısa sürede iyi kristalize olmuş, ince boyutlu oksit fosforların yanma senteziyle elde edilmesi, bu yöntemin katı hal ve sol jel yöntemlerine göre en önemli avantajlarıdır [39].

Bu tez çalışmasında, yanma reaksiyonu esnasında yakıt olarak, NH_4NO_3 ve $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ kullanılacaktır. Başlangıç maddeleri olarak, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NH_4NO_3 , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ve H_3BO_3 kullanılması planlanmaktadır. Bu maddeler stokiometrik olarak aşağıda verilen reaksiyon doğrultusunda tartılıp, bir agat havanda birlikte öğütülüp ardından bir cam behere yerleştirilir. Reaksiyon şu şekilde gerçekleşir.



Karışım manyetik bir karıştırıcıya yerleştirilerek ısıtılıp aynı anda karıştırılır. Homojen bir sıvı çözeltinin oluşması sağlanır. Karışım daha sonra karıştırıcıdan çıkarılıp yanma reaksiyonunun gerçekleşmesi için birkaç dakika boyunca 550°C 'lik

bir fırında bekletilir. Yanma reaksiyonu bu süreçte gerçekleşir. Sonuçta köpük formunda hacimli bir ürün oluşur. Bu ürün öğütülmesi çok kolaydır, öğütüldükten optimum koşulların belirlenmesi için 900 ila 1200°C arasındaki sıcaklıklarda 4 saat sinterlenir. Optimum üretim şartları sıcaklığa bağlı olarak elde edildikten sonra, belirli ısı işlem rejiminde kontrollü bir şekilde saf ve $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Re}^{+3}$ (Tb^{+3} , Dy^{+3} , Sm^{+3}) katkılı fosforlarının eldesi sağlanacaktır. Ardından yanma yöntemiyle elde edilen tüm malzemelerin, kristallliğini araştırmak için toz X-ışını kırınımı (XRD), kristal yapı analizi ve element bileşimini keşfetmek için SEM-EDS (enerji dağılımlı spektroskopi), titreşim modlarını gözlemleyebilmek için Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR), spektroskopisi yöntemlerinden yararlanılacaktır. Ardından sentezlenen malzemelerin termoluminesans (TL) özellikleri incelenecek olup bu malzemelerin dozimetrik amaçla kullanılabilirliği araştırılacaktır.



Şekil 2.1. Agat Havan



Şekil 2.2. Alümina Kroze



Şekil 2.3. Elektrikli Isıtıcı Manyetik Karıştırıcı



Şekil 2.4. Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü TL/OSL Medikal Fizik laboratuvarında bulunan Nabertham (P330) Marka kül fırın

2.2. X-Işını Kırınımı (XRD)

X-Işını Kırınım tekniği, materyallerin karakterizasyonu için kullanılan bir yöntemdir. Malzemenin iyi bir şekilde tanımlanması ya da malzemenin atomik yapısını tayin etmek için araştırmacılara hızlı ve güvenilir sonuçlar sağlar. Özellikle ince tanecikli yapıların ve karışımların belirlenmesi için faydalıdır. Eğer örnek bir karışımsa, XRD verileri, örneğin içerdiği element veya bileşikler ve bunların oranını tayin etmek için kullanılabilir. Ayrıca mevcut malzemenin kristallik derecesi, kristallerin yapısı, boyutları ve yönlenmeleri, amorf (camsı) madde miktarı gibi özellikler de elde edilebilecek diğer bilgiler olarak sınıflandırılabilir. Söz konusu analiz yöntemi malzemeye farklı açılarda X-ışını gönderilip, bu ışınların belirli şartları sağlayan düzlemlerden yansıması temeline dayanır. X-ışını, her bir malzemede, malzemenin kristal yapısına ve atomların nasıl dizildiğine bağlı olarak, farklı şekilde kırılır. İncelemede kullanılan X-ışınları vakum altında bir tüp içerisinde üretilir. Tüp içerisindeki sıcak bir flamente akım uygulandığında filamentten büyük bir elektron yayılımı olur. Genellikle 15-60 kV'lık bir yüksek gerilim uygulanarak hızlandırılan elektronlar hedefe çarpar ve x-ışınları üretilmiş olur. Oluşan bu X-ışınlarının dalga boyu hedefin karakteristiğini gösterir. X-ışınları toplanır ve ince toz haline getirilmiş (10 mikron'dan daha küçük) örnek üzerine gönderilir ve bir dedektör yardımıyla X-ışını sinyali tespit edilir.

Yanma sentez yöntemiyle sentezlenen katkılı ve katkısız LaB_3O_6 örneklerinin XRD ölçümleri Çukurova Üniversitesi ÇÜMERLAB Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan PANALYTİCAL EMPYREAN XRD marka cihaz ile yapılmıştır. Sentezlenen fosforların X ışını ölçümleri, sinterlenmiş tabletler agat havanda öğütölüp toz haline getirilerek yapılmıştır.



Şekil 2.5. Çukurova Üniversitesi ÇÜMERLAB Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan PANALYTİCAL EMPYREAN XRD marka cihaz

2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak yüzey resmini görüntüleyen bir elektron mikroskobu türüdür. Söz konusu bu elektronlar numunedeki atomlarla etkileştiğinde numune yüzeyi hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretilir. İlgili dedektörler aracılığıyla toplanan bu sinyaller bilgisayar ekranına aktararak görüntü elde edilir. Bu yöntem kullanılarak bir yüzeyin görüntüsü 500.000 kata kadar büyütebilir. Cihaz sayesinde malzemelerin yüzey yapıları detaylı olarak incelenebilir.

Bu tez çalışmasında, katkılı ve katkısız LaB_3O_6 örneklerinin SEM ölçümleri Celal Bayar Üniversitesi DEFAM Yüzey Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan ZEİSS marka GEMİNİ 500 model SEM-EDX marka cihaz ile yapılmıştır.

2.4. EDS(Enerji Dispersiv Spektrum)

SEM cihazı ile birlikte kullanılan bir analiz sistemidir. Malzemenin analiz edilmesi için yüksek enerjili elektronların malzeme üzerine gönderilmesiyle uygulanan bir tekniktir. Gönderilen elektronların malzemedeki atomların ilk yörüngelerindeki elektronları uyarabilecek kadar yüksek enerjiye sahip olmaları gerekir. Uyarılan elektronlar temel hale dönerken karakteristik X ışın yayınlanır. Bu ışınlar, her elementin atomu için karakteristik enerjilere sahiptir. Elektron mikroskoplarının içerisinde malzemenin elektronlar ile etkileşmesi sonucu yayınlanan X-ışınlarını toplayan dedektörlerin yardımıyla malzemenin kimyasal bileşimi belirlenebilmektedir [40].



Şekil 2.6. Celal Bayar Üniversitesi DEFAM Yüzey Karakterizasyon Laboratuvarında Bulunan ZEİSS marka GEMİNİ 500 model SEM-EDX cihazı

2.5. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Kızıl ötesi (IR) spektroskopisi, organik veya inorganik bileşiklerin karakterize edilmesinde kullanılan bir tür titreşim spektroskopisi olup kızılötesi ışığın incelenen madde tarafından soğurulması temeline dayanır. Bu enerji elektronik uyarma yapamaz. Moleküldeki bağları bozmaya da yetmez. Ancak normal koşullarda, moleküllerdeki atomlar statik olmayıp sürekli hareket ettikleri için bükülür ve titreşirler. Moleküllerin bu titreşim hareketleri de kızılötesi bölgede absorpsiyonu (soğurmayı) indükler. Moleküler titreşimin molekülün elektrik dipol momentinde bir değişikliğe neden olması gerekir ki absorpsiyon gerçekleşsin. Yani ikiden fazla atom içeren bir molekülde (heteronükleer diatomik molekülde) bulunan kimyasal bağlar

kızılötesi ışınları absorplayarak spektrum oluşturabilirken tek cins atomlu (H_2 , Cl_2 veya O_2 gibi) (homonükleer diatomik) moleküller dipol içermedikleri için kızılötesi spektrumları oluşturmazlar. Bu durum kızılötesi spektroskopisi için seçim kuralıdır. Sonuç olarak, polar moleküller IR ışınlarını soğurur (IR-aktif), apolar (kutupsuz) moleküller IR ışınlarını soğurmazlar (IR-aktif değil). IR-aktif bir molekül kızılötesi radyasyona maruz bırakıldığında belirli bir frekansta pik verebilmesi için uygulanan IR radyasyonunun enerjisinin molekülün titreşimin enerjisiyle eşleşmesi gerekir. Bu noktada absorpsiyon gerçekleşir ve o frekansta pik gözlenir.

IR spektrometresinin iki ana türü vardır. Bunlar; klasik IR spektroskopisi ve Fourier Dönüşümlü IR spektroskopisi (FTIR)dir. Klasik IR spektroskopisi geleneksel bir yöntemdir, FTIR spektroskopisi ise Fourier dönüşümü adı verilen matematiksel bir işlem kullanarak daha hassas ve hızlı analiz sağlar. FTIR cihazları genellikle $4000-400\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında çalışır ve bu bölge orta kızılötesi (MIR) bölgesidir [41].

Bu çalışmada kullanılan saf ve katkılı LaB_3O_6 fosforlarının FT-IR ölçümleri Celal Bayar Üniversitesi DEFAM Yüzey Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan FT-IR cihazında alınmıştır.

2.6. Termoluminesans Sistemi (TL)

Termoluminesans olayı (TL), herhangi bir radyasyona maruz kalmış yarı iletken ya da yalıtkan malzemelerin, yasak enerji aralığında çeşitli nedenlerle oluşmuş (safsızlıklar) kusur bölgelerinde tuzaklanan taşıyıcıların termal olarak bırakılması olayıdır. Dolayısıyla TL olayı temelde malzemenin iyonlaştırıcı radyasyon kaynağına maruz bırakılması ve ardından doğrusal bir ısıtma hızıyla ısıtılması esasına dayanır. İyonlaştırıcı radyasyon sebebiyle malzemede soğurulan enerji, ışık şeklinde (genellikle görünür ışık) serbest bırakılır. Dolayısıyla, yayınlanan ışığın miktarı malzemenin maruz kaldığı radyasyon doz miktarı ile orantılıdır. Burada yayınlanan fotonlar (ışık), bir foto dedektör yardımıyla algılanıp, zaman veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bir veya daha fazla tepeden oluşan bir eğri şeklinde kaydedilir. Kaydedilen bu TL ışıma eğrisinin (parıldama eğrisi) analizi, tuzak derinliği, frekans faktörü ve yeniden birleşme spektrumları gibi bazı yararlı bilgiler verir. TL metodu arkeolojik örneklerin yaşlarının belirlenmesinde ve personel dozimetri ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan bir metottur. Örneğin

personel dozimetrelerin mesleki kullanımı dahilinde ortaya çıkan iyonize radyasyonu izlemek ve kişinin aldığı dozun uluslararası kuruluşlar tarafından güvenli kabul edilen sınırlar içinde tutulduğunun belirlenmesi için TL dozimetreleri (TLD) kullanılır. TLD, maruz kalınan radyasyon dozunun belirlenmesinde kullanılması, ucuz ve ulaşılabilir olması gibi bazı önemli özelliklere sahiptir [42-44].

Bu çalışmada, yanma yöntemi ile sentezlenmiş olan LaB_3O_6 , LaB_3O_6 : xSm (x = % 1, % 2, % 3, % 4 ve % 5 kütlece), LaBO_3 : xTb (x = % 1, % 2 ve % 3 kütlece) ve LaBO_3 : xDy (x = , % 1, % 2, % 3, % 4 ve % 5 kütlece) fosforlarının tuzak parametrelerinin belirlenebilmesi için ısıtma hızı yöntemi ve bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi kullanılmıştır. Bunun dışında, bu fosforlara doz yanıt deneyi ve tekrar kullanılabilirlik deneyi uygulanmıştır. Örneklerin TL ölçümleri Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında Bulunan HARSHAW 3500 marka TLD okuyucu cihazında alınmıştır (Şekil 2.7).

TL ışıma eğrilerini elde etmek için kararlı haldeki elektronlar radyasyon ile uyarılarak kararsız hale getirilmelidir. Bu çalışmada, β kaynağı olarak Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarı'nda bulunan, 28 yıl yarı ömre ve 590 MBq aktiviteye sahip $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı kullanılmıştır (Şekil 2.8). β kaynağının katkılı ve katkısız lantanyum tri-boratlar için doz hızı 11.07 mGy/s dir.



Şekil 2.7. Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında Bulunan HARSHAW 3500 marka TLD okuyucu



Şekil 2.8. Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında Bulunan Beta Kaynağı

2.7. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması İçin Yöntemler

Termolüminesans çalışmalarında kullanılan analiz yöntemleri temel olarak, herhangi bir materyalin tuzak yapısını anlamaya ve belirlemeye yöneliktir. Bu yöntemler ile TL ölçümleri sonucunda elde edilen ışıma eğrilerinden tuzak parametrelerinin hesaplanması ile malzemelerin örgü yapılarındaki tuzaklar hakkında bilgi sağlanmaktadır. Her bir kusur bir enerji (E), frekans faktörü (s) ve kinetik bir mertebeye (b) sahip parametrelerden oluşmaktadır. E parametresi, kristalin örgü yapısındaki yarı kararlı bir enerji düzeyinden tuzaklanmış bir elektronun tuzaktan kurtulabilmesi için tuzaga verilmesi gereken aktivasyon enerjisidir. Bu aktivasyon enerjisi tuzak derinliği olarak da tanımlanır. Kristalin örgü yapısındaki tuzak bir kutu olarak düşünülürse s parametresi, elektronun bu tuzaktan kaçmak için kutunun duvarlarına birim zamandaki titreşim sayısına (çarpma sayısı) kaçma frekansı (frekans faktörü) olarak tanımlanabilir (Mott ve Gurney, 1940; Mott ve Stoneham, 1977). b parametresi ise, kristalin örgü yapısındaki yarı kararlı bir enerji düzeyinden tuzaklanmış bir elektronun tuzaktan kurtulduktan sonra tekrar tuzaklanıp tuzaklanamayacağını ifade eder. Dozimetrik amaçlı sentezlenmiş bir malzemenin TL ölçümleri sonucunda elde edilen ışıma eğrilerinden bu parametrelerinin belirlenebilmesi için birçok deneysel/teorik yöntemler geliştirilmiştir (Aitken, 1998;

Azorín, 1986; Randall ve Wilkins 1945; Chen ve McKeever, 1997; Chen ve Pagonis, 2011; Kirsh, 1992; McKeever, 1985; Pagonis ve ark., 2006)[19].

Bu tez çalışmasında, yanma yöntemi ile sentezlenmiş olan LaB_3O_6 , LaB_3O_6 : $x\text{Sm}$ ($x = \% , \% 1, \% 2, \% 3, \% 4$ ve $\% 5$ kütlece), LaB_3O_6 : $x\text{Tb}$ ($x = \% , \% 1, \% 2, \% 3, \% 4$ ve $\% 5$ kütlece) ve LaB_3O_6 : $x\text{Dy}$ ($x = \% , \% 1, \% 2, \% 3, \% 4$ ve $\% 5$ kütlece) fosforlarının tuzak parametrelerinin belirleyebilmek amacıyla farklı ısıtma hızları yöntemi, bilgisayarla ısıtma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi uygulanmıştır.

2.7.1. Farklı Isıtma Hızı Yöntemi

Hoogenstraaten tarafından önerilen farklı ısıtma hızları (VHR) yöntemi, katkısız ve katkılı LaB_3O_6 fosforlarının E ve s gibi kinetik parametrelerini hesaplamak için kullanılmıştır. Bu yöntemde, ısıtma hızının artırılmasıyla maksimum sıcaklıkların (T_m) yüksek sıcaklıklara doğru kayması beklenir. Isıtma hızı yöntemi, birinci dereceden kinetiğe sahip TL ısıtma eğrileri için önerilmiştir, fakat yapılan çalışmalar incelendiğinde diğer kinetik mertebedeki piklere de uygulanabildiği tespit edilmiştir. Bu yöntemde kinetik parametreler, $\ln(T_m^2/\beta)$ ve $(1/T_m)$ arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanılarak elde edilir. Hoogenstraaten'ın VHR yöntemi ile E ve s değerleri aşağıda verilen denklem (3.1) kullanılarak hesaplanır.

$$\ln (T_m^2/\beta) = (E/k) (1/T_m) + \ln (E/ks) \quad (3.1)$$

Burada T_m (K), her β (K/s) ısıtma hızındaki maksimum pik sıcaklığı, $s(s^{-1})$ frekans faktörü, E (eV) aktivasyon enerjisi ve k boltzman sabiti olup değeri 8.617×10^{-5} (eV/K)'dir. Denklem (3.1)'deki sıcaklık değerleri Kelvin birimine çevrilmiştir. Bu denklem, $\ln(T_m^2/\beta)$ 'nin $(1/T_m)$ 'ye karşı grafiği çizildiğinde elde edilen doğrunun eğiminin (E/k) 'ya kesişimin $\ln (E/ks)$ 'ye eşit olduğunu ifade eder. Böylelikle, E ve s değerleri hesaplanabilir [45].

2.7.2. Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemi

Bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma yöntemi, tuzak parametrelerin hesaplamasında kullanılan bir diğer yöntemdir. Bu yöntemde, bazı bilgisayar programları kullanılarak TL ışıma eğrileri bireysel pik bileşenlerine ayrılarak ek bir işlem yapılmadan pik parametreleri anında bulunulabilir. Bu yöntemin uygulanmasında, GLOCANIN, TLAnal, GlowFit gibi birçok bilgisayar programı kullanılır. Bu tez çalışmasında GlowFit programı kullanılmıştır. Bu program Hollanda'daki Delft Reaktör Enstitüsü'nde geliştirilmiş olup, TL ışıma eğrilerini dokuz farklı tepeye kadar ayırabilmektedir. Aynı zamanda çok pikli ışıma eğrilerine de uygulanabilmektedir. Bu yöntemle herhangi bir ek işlem olmadan pik parametreleri kısa süre içerisinde hesaplanır. Elde edilen sonuçlarda eğer uygunluk derecesi veya değer katsayısı ("uygunluk katsayısı" figure of merit, FOM: $\frac{\sum |TL_{deneysel} - TL_{fit}|}{\sum TL_{fit}}$ olarak tanımlanmaktadır.), %0.0 ile %2.5 arasında çıkarsa elde edilen kinetik parametreler fiziksel olarak anlamlı olacaktır. Aşağıda birinci derece fonksiyonu tanımlayan denklem verilmiştir:

$$I(T) = \sum_{i=1}^n I_i(T) + a + b \exp(T) \quad (3.2)$$

$I(T)$ uyarılmış toplam ışıma eğrisi; a, diskin ve dozimetrelerin gürültü katsayısıdır [24].

2.8. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyi

İyi bir dozimetrik bir malzemenin her defasında aynı şartlar altında aynı radyasyon dozunun verilmesinin ardından herhangi bir zamanda ya da ardarda TL okuma döngüsü sonrasında aynı şiddet ile cevap vermesi gerekir. Bu şekilde cevap veren malzeme dozimetrik açıdan güvenilir ve tekrar tekrar kullanılabilir bir malzemedir. Bundan dolayı, tekrarlanabilirlik özelliği dozimetrik malzemenin sahip olması gereken en önemli özelliklerden biridir. İyi bir dozimetrik malzemenin yeniden kullanılabilirliği, aynı doz ve okuma koşulu altında tekrarlanan ölçümler için % 5 güven aralığı içerisinde olmalıdır (Furetta, 2003).

Bu tez çalışmasında örnekler 10 dk beta ışınına maruz bırakılarak oda sıcaklığından 400 °C'ye kadar TL okuması yapılmıştır. Aynı işlem 7 kez tekrarlanmış ve elde edilen verilerin sıcaklığı karşı TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir [46].

2.9. Doz Yanıt Yöntemi

Bu yöntemle, dozimetrik bir fosforun maruz kaldığı radyasyon miktarıyla TL ışıma eğrisi altında kalan alan arasındaki ilişki elde edilir. (Vij, 1998). İyi bir TLD fosforunda, maruz kaldığı doz ile ışıma eğrileri arasında lineer bir olması beklenir. Ayrıca dozimetrik bir malzeme, maruz bırakılan doz aralığında çok duyarlı olmalı ve bu radyasyon miktarı aralığında herhangi bir saturasyon belirtisi göstermemelidir [47].

Doz yanıt yönteminde, termolüminesans ölçümleri sonucunda elde edilen ışıma eğrilerindeki her bir ışıma tepesinin kinetik mertebesini (b) belirlenir. Öncelikle, verilmek istenen radyasyon doz aralığından malzemeye bir radyasyon dozu verilir ve ardından TL ışıma eğrileri elde edilir. Elde edilen TL ışıma eğrilerinden tepe maksimum şiddetine karşılık gelen tepe maksimum sıcaklığı (T_m) belirlenir. Sırasıyla her doz için döngü tekrarlanır ve her bir doz değerinin tepe sıcaklıklarına etkisi kaydedilir. Birinci dereceden kinetiğe sahip T_m sıcaklığının sabit ısıtma hızında artan radyasyon dozundan bağımsız olması gerekir. Artan radyasyon dozuyla T_m sıcaklığının düşük sıcaklıklara doğru kayması ise TL ışıma piklerinin ikinci veya genel dereceden kinetiğe sahip olduğunu göstermektedir [46].

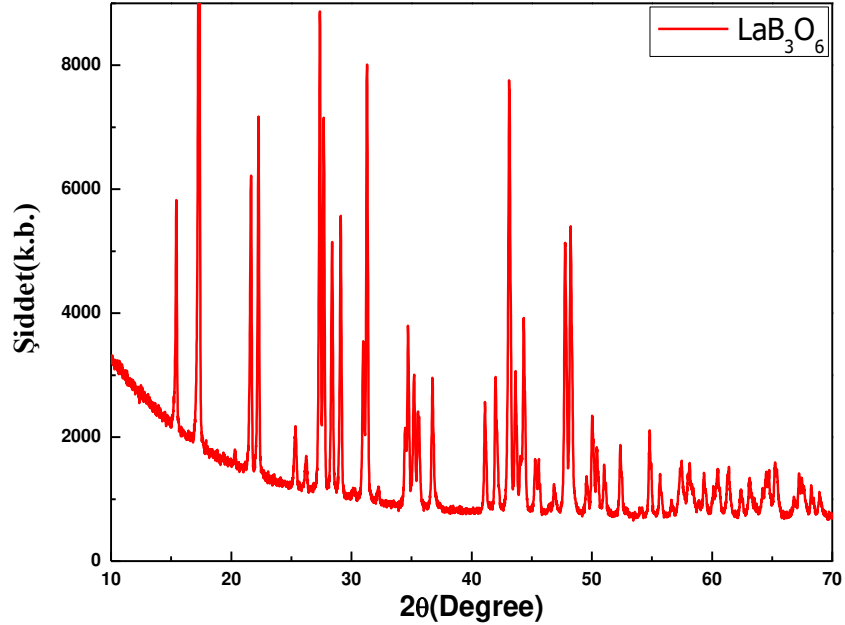
Dozimetrik malzemelerin doz-cevap özelliklerinin belirlenmesi bu malzemelerin hangi alanda ve ne amaçla kullanılabileceğini belirlemektedir. Bu amaçla katkısız ve katkılı LaB_3O_6 'ın lineer bir doz-yanıt eğrisine hangi radyasyon dozu aralığında sahip olduğunu belirlemek için örnekler farklı dozlarda beta ışını radyasyonuna maruz bırakılıp TL ölçümleri alındıktan sonra elde edilen ışıma eğrileri analiz edilmiştir. Malzeme, ısıtma hızı 2 c/s de sabit tutularak 5, 10, 15, 20 ve 30 dk lık brta ışınlamasına maruz bırakılmış ve TL okumaları gerçekleştirilmiştir. Farklı doz oranları ile ışınlanarak elde edilen TL ışıma eğrileri ve diğer analiz sonuçları Bölüm 3.4.1'de verilmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

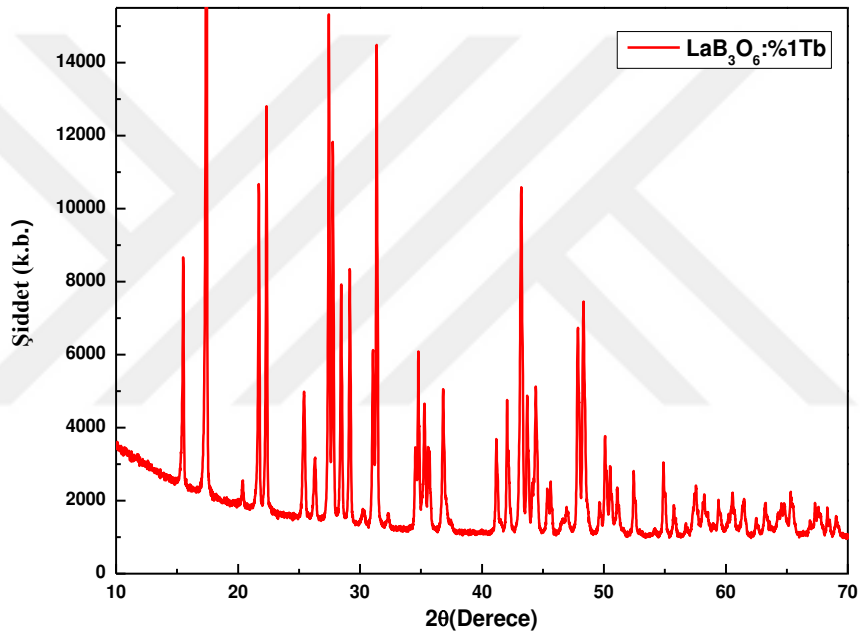
3.1. Katkılı, Katkısız ve Kodlanmış LaB_3O_6 'ün X-ışını kırınım Desenleri

X ışınlarının hedef malzemeye çarptırılmasıyla elde edilen XRD desenleri malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi verir. Hem yanma yöntemi ile sentezlenen katkısız ve Sm^{+3} , Dy^{+3} ve Tb^{+3} katkılı LaB_3O_6 (%1 kütlece) örneklerinin kristal yapısı hakkında bilgi edinebilmek hem de katkıların ana yapıyı ne derece değiştirdiği hakkında fikir sahibi olabilmek için XRD analizleri yapılmıştır. Analizler için Panalytical marka X-ışınları Kırınımı cihazı kullanılmış ve oda sıcaklığında, $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ aralığında elde edilen kırınım desenleri aşağıda verilmiştir. Elde edilen kırınım deseninin standart PDF (ICSD 98-002-3609) kartıyla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm katkısız ve katkılı LaB_3O_6 tozlarının kaydedilen kırınım tepeleri, JCPDS kart numarası (ICSD 98-002-3609) ile iyi uyuşmaktadır. Fosforlar C 1 2/c 1 uzay grubu a: 9.94 Å, b: 8.16Å, c: 6.49 Å birim hücre parametreleriyle monoklinik bir yapıda kristalleşmiştir.

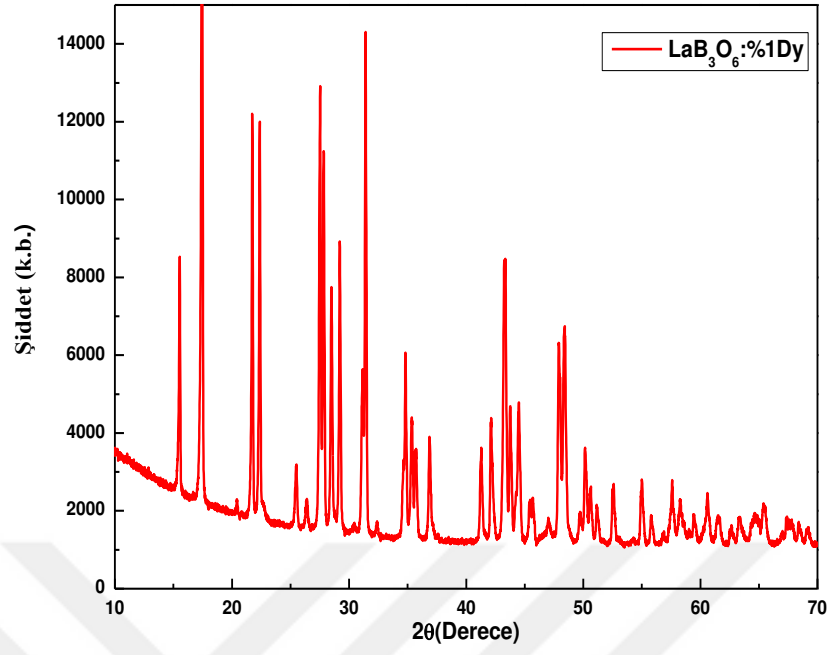


Şekil 3.1. Katkısız LaBO_3 'e ait XRD grafiği sonucu

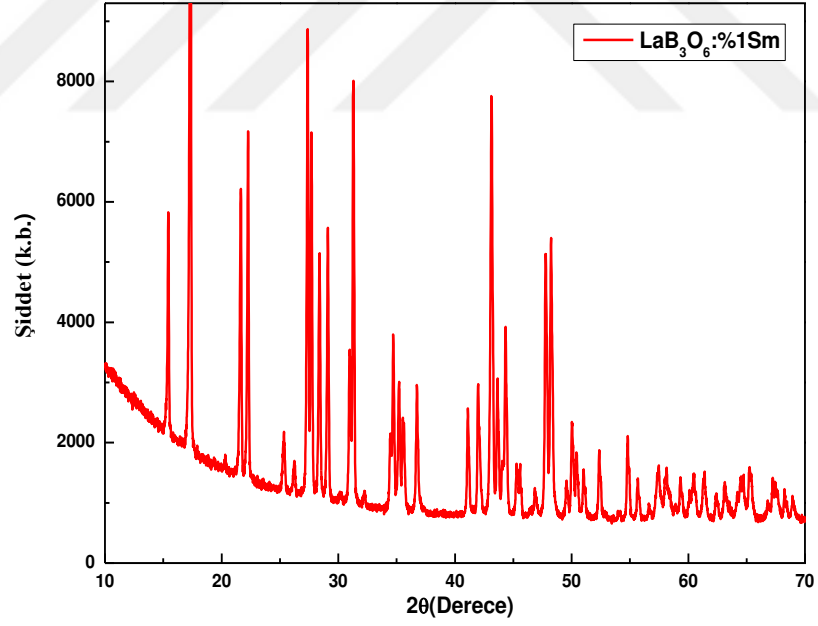
Şekilde yanma yöntemi kullanılarak sentezlenen LaB_3O_6 örneğine ait kırınım deseni görülmektedir. Oda sıcaklığında elde edilen bu kırınım deseni standart pdf (ICSD 98-002-3609) kartıyla kıyaslanarak sentez süreci sonunda ortaya çıkan ürünlerin istenilen fazda olması hedeflenmiştir. LaB_3O_6 referans sistemi, C1 2/c 1 uzay grubu ve kafes parametreleri: $a = 9,949 \text{ \AA}$, $b = 8,161 \text{ \AA}$, $c = 6,499 \text{ \AA}$ olan Monoklinik bir yapı ortaya koymuştur. Tüm XRD bulguları, ICSD’de listelenen bu referansın kırınım deseniyle uyuşmaktadır. Buradan hareketle katkısız LaB_3O_6 kristalinin mükemmel bir kristal yapıya dönüştüğü ve bu sıcaklıkta ideal kristal fazda olduğu açıkça görülmektedir.



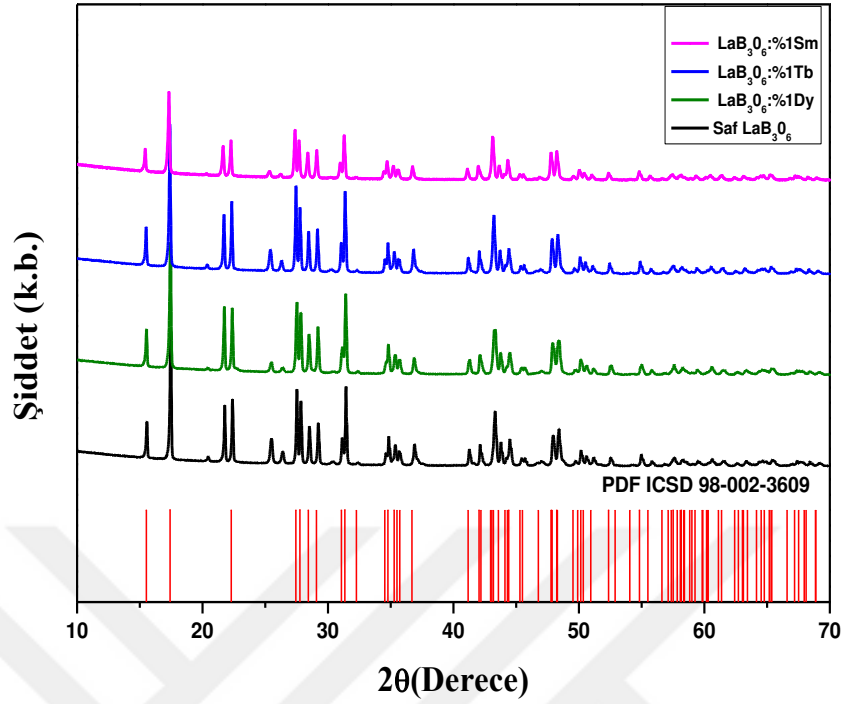
Şekil 3.2. $\text{LaB}_3\text{O}_6 : \%1 \text{ Tb}^{+3}$ örneğine ait XRD spektrumu



Şekil 3.3. LaB_3O_6 : %1 Dy^{+2} örneğine ait XRD spektrumu



Şekil 3.4. LaB_3O_6 : %1 Sm^{+3} örneğine ait XRD spektrumu

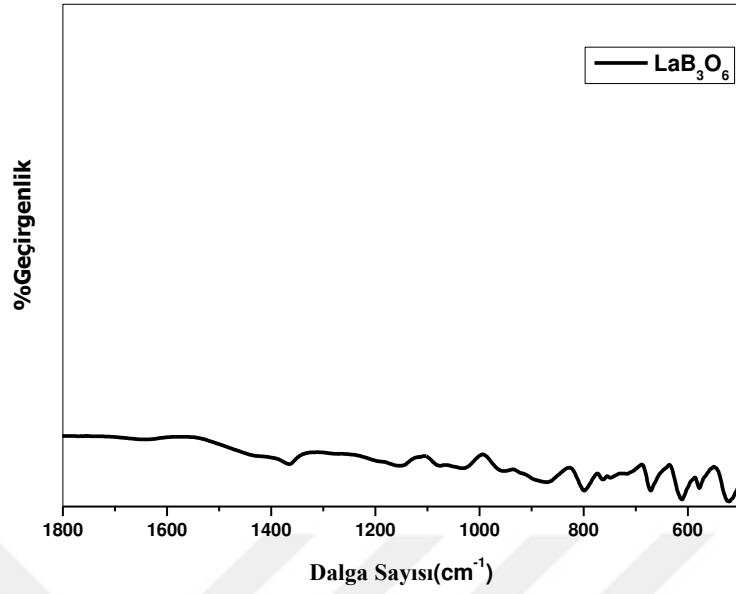


Şekil 3.5. Saf LaB₃O₆ ve LaB₃O₆ : Dy⁺², LaBO₃:Tb⁺³, LaBO₃:Sm⁺³ örneklerine ait XRD spektrumu

Şekillerde sırasıyla PDF kartıyla katkılanmış LaB₃O₆: Dy⁺², LaB₃O₆: Tb⁺³, LaB₃O₆: Sm⁺³ örneklerine ait kırınım desenleri verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi, yapıda kayda değer bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu da Dy⁺³, Tb⁺³ ve Sm⁺³ iyonlarının yapıya katkılanmasıyla kristal yapıda bir değişikliğin olmadığı anlamına gelmektedir. Bu çalışma için istenilen bir durumdur. Katkılanmış iyonlar kristal yapıda herhangi bir değişikliğe neden olmadan istenilen atomun yerini almıştır.

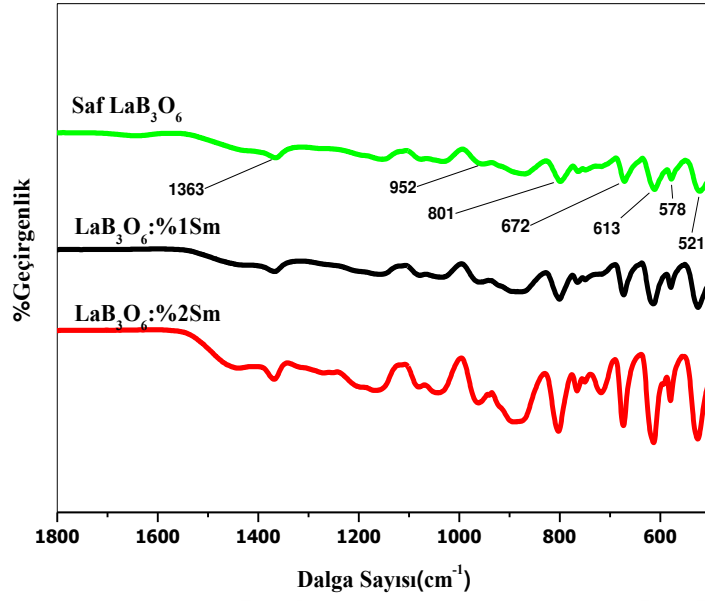
3.2. Katkılı ve Katkısız LaB₃O₆'ün ATR-FTIR Analizleri

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, malzeme içerisindeki BO₃⁻³ gruplarının titreşim modlarını analiz ederek malzemenin yerel yapısal özellikleri hakkında bilgi sağlar. Katkısız ve katkılı (%1 ve %2 Sm; %1,%3 ve %4 Tb; %1,%2 Dy kütlece) LaB₃O₆ örneklerine ait ATR- FTIR analizleri şekillerde verilmiştir. (BO₃⁻³) birimlerine ait karakteristik titreşim modları 1800-500 cm⁻¹ aralığında konumlanmıştır.



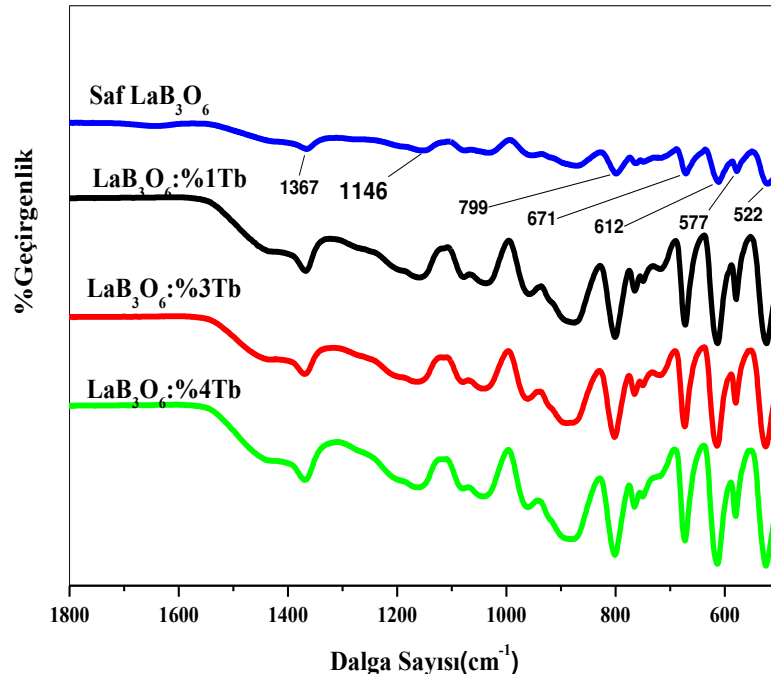
Şekil 3.6. Katkısız LaB₃O₆' ün karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR Spektrumları

LaB₃O₆ kristal toz malzemesinde genel olarak BO₃⁻³ birimlerine ait titreşim modları açıkça gözlemlenmiştir. 1366 cm⁻¹ civarındaki bant, üçgen BO₃ birimlerindeki B-O bağlarının asimetrik gerilme modu ile ilişkilendirilirken, 868 cm⁻¹' deki bant simetrik gerilme modu kabul edilebileceği gibi, tetrahedral BO₄ birimlerindeki B-O bağlarının gerilme titreşimlerini gösterebileceğiyle ilgili literatür de mevcuttur. Ayrıca 670 cm⁻¹ de belirlenen bant, düzlem dışı bükülme moduna karşılık gelirken, 525 ve 612 cm⁻¹' de gözlenen bantlar ise BO₃⁻³ grubunu düzlem içi bükülme modlarını temsil etmektedir.

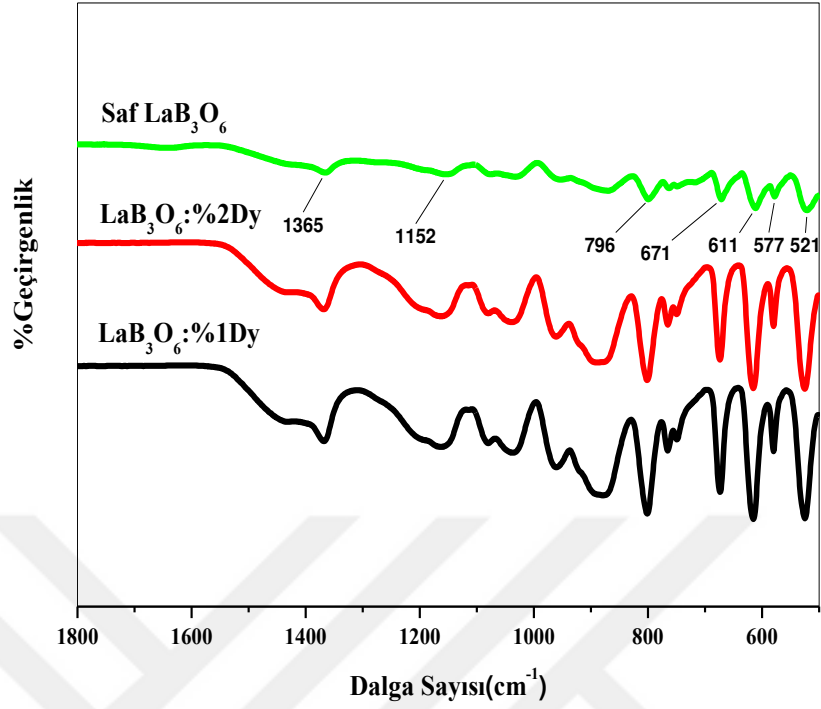


Şekil 3.7. LaB_3O_6 :%1Sm ve LaB_3O_6 :%2 Sm nin karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR spektrumları

%1 Sm ve %2 Sm katkılama miktarlarına sahip LaB_3O_6 numunelerinin FT-IR spektrumları borat gruplarının titreşim modlarında farklılıklar ortaya koymaktadır. Emilim bantları, %2 ağırlıktaki Sm^{+3} örneğinde daha düşük dalga sayılarına doğru hafife kaymaktadır. Daha büyük Sm^{+3} konsantrasyonu, borat ağında daha belirgin bozulmalara yol açabilir.



Şekil 3.8. LaB_3O_6 :%1Tb, LaB_3O_6 :%3Tb ve LaB_3O_6 :%4Tb nin karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR spektrumları



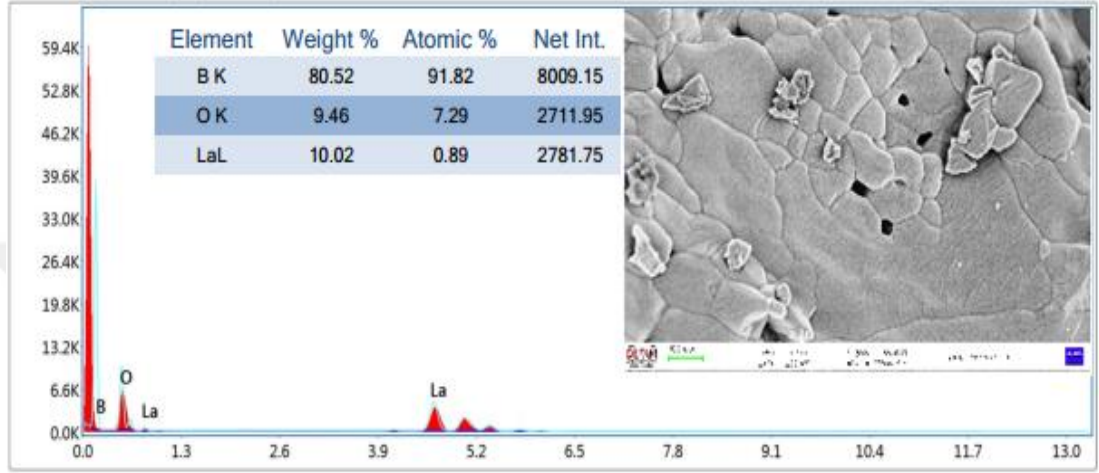
Şekil 3.9. LaB_3O_6 :%1Dy ve LaB_3O_6 :%2Dy nin karakteristik titreşim modlarını gösteren FTIR spektrumları

LaB_3O_6 : Dy örneklerinde, Dy iyonlarının dahil edilmesi sonucu spektrumda 1163 cm^{-1} , 1042 cm^{-1} , 963 cm^{-1} de yeni bantlar gözlenmiştir. Yeni bantların ortaya çıkması, katkı maddesinin borat ağındaki etkisini yansıtır. Yani Dy^{+3} iyonlarının, borat ağının yerel yapısını etkileyerek bor atomlarının koordinasyon ortamını değiştirdiğini göstermektedir.

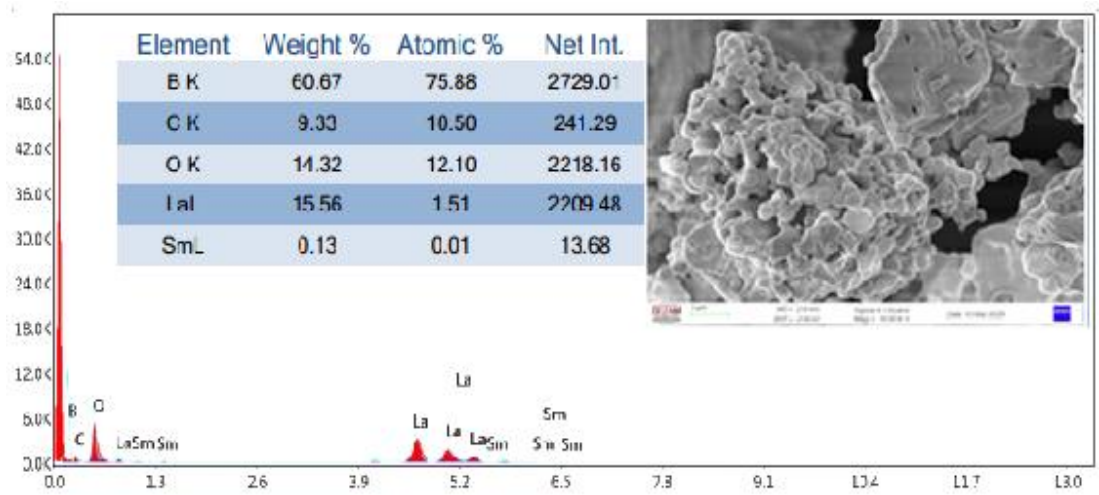
3.3. Katkılı LaB_3O_6 'ün SEM-EDX Analizleri

Örneklerin SEM görüntüleri, üniversitemiz bünyesindeki Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (DEFAM) da alınmıştır. Bu görüntüler için Zeiss Gemini 500 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Cihaz üzerinde bulunan dedektörler (SE, InLens, STEM, BSD, VPSD) ve sahip olduğu sıcaklık ($25\text{--}1050^\circ\text{C}$) ataçmanı sayesinde birçok farklı alandaki örneklerin yüksek büyütmelerdeki görüntülerini alma kabiliyetine sahiptir. LaB_3O_6 örneklerinin SEM görüntülerini almak için SE (Secondary Electron) dedektörü kullanılmış ve örnekler

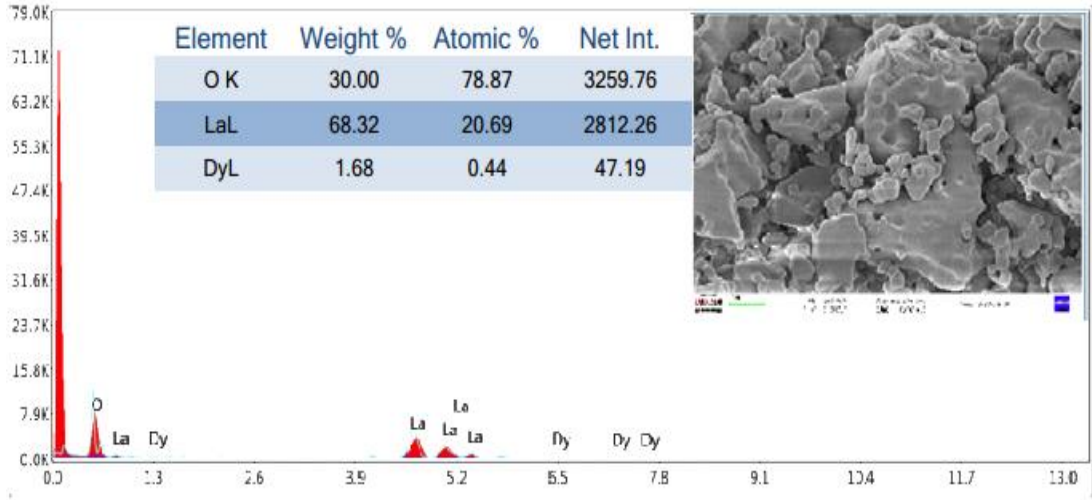
Al içerdiği için kaplama yapmaya gerek kalmamıştır. 5.9-7.5mm aralığında değişen çalışma mesafelerinde (working distance) ve 10kX-50kX arasında değişen büyütmelerde 15keV hızlandırma potansiyeli (EHT; electron High Tension) uygulanan elektronlar yardımıyla SEM görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntüler, mikro yapı analizine katkı sağlamaktadır.



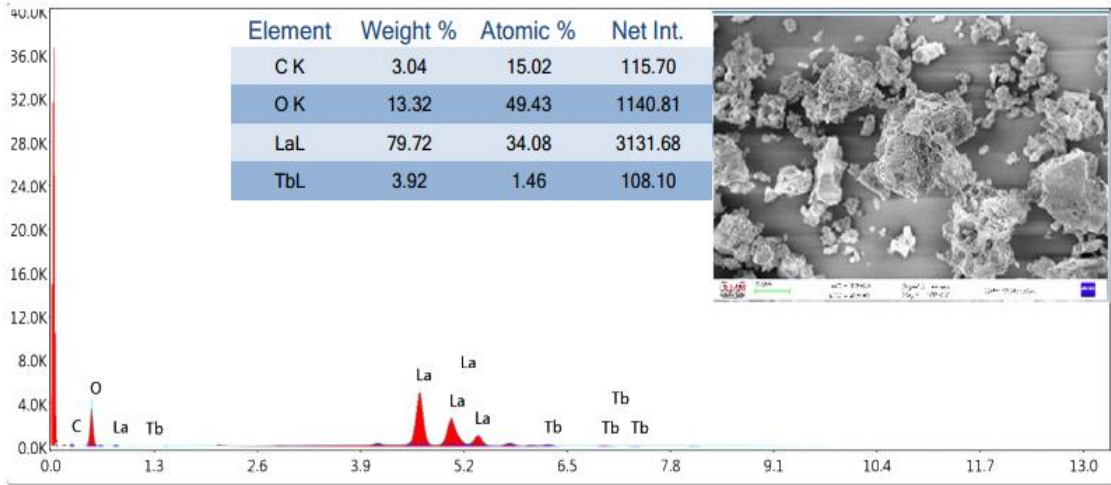
Şekil 3.10. Katkısız LaB_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri



Şekil 3.11. %2 Sm iyonu ile katkılandırılmış LaB_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri



Şekil 3.12. %1Dy iyonu ile katkılandırılmış LaB_3O_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri



Şekil 3.13. %4 Tb^{+3} iyonu ile katkılandırılmış LaB_3O_6 'e ait SEM görüntüsü ve EDX Ölçümleri

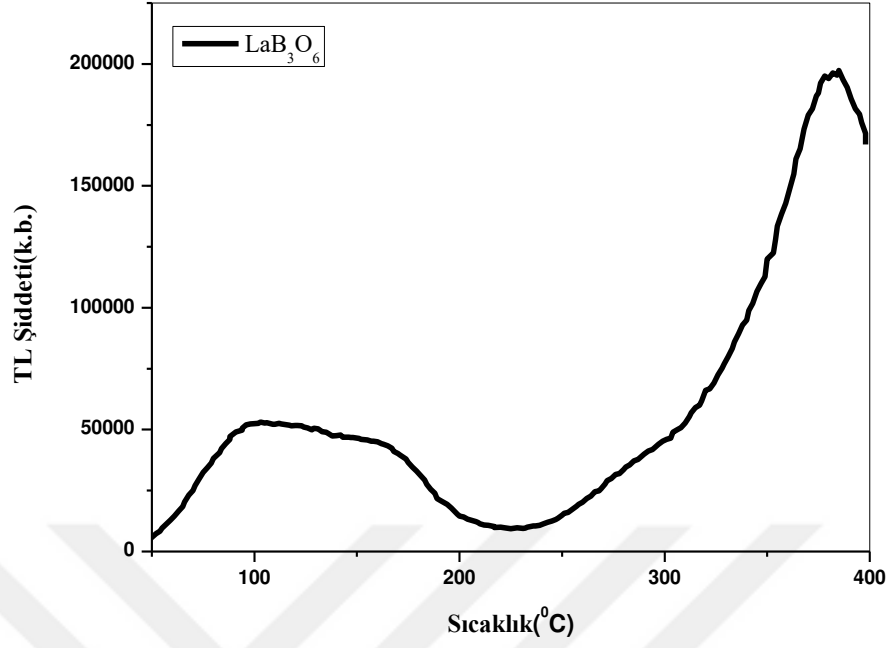
Katkısız ve katkılı LaB_3O_6 fosforlarının parçacık dağılımını, parçacık boyutlarını belirleyebilmek ve bu malzemelerin nano boyutta görüntülerini elde edebilmek için SEM tekniği, kullanılan fosforların element içeriğini ve bu elementlerin miktarını belirleyebilmek için de EDX tekniği kullanılmıştır. Malzemelerin SEM görüntüleri ve EDX spektrumları Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de görüldüğü gibi bir arada verilmiştir. Katkısız ve katkılı LaB_3O_6 fosforlarına ait SEM görüntüleri incelendiğinde, katkısız örneğe ait görüntünün

katkılı örneklerle göre parçacıkların daha homojen dağıldığı, boşlukların çok daha küçük ve az sayıda olduğu ve kümelenmenin olmadığı görülmektedir. Katkılı örneklerin SEM görüntülerinde ise farklı boyutlardaki parçacıkların öbekler şeklinde kümeler oluşturduğu görülmektedir. Bunun nedeni malzemeleri sentezleme esnasında katkı elementlerinin malzemenin her noktasına eşit dağılmaması ve bu yüzden homojen yapıya sahip olmamalarıdır. Buna rağmen Sm, Dy ve Tb iyonlarının malzemeye iyi bir şekilde entegre oldukları söylenebilir. Örneklerin EDX spektrumları incelendiğinde ise örnekleri oluşturan tüm elementlerin pik yansımaları görülmektedir. Bu da malzemelerin sentezlenirken kullanılan elementler dışında başka bir element kullanılmadığını göstermektedir.

3.4. Termolüminesans (TL) Analizleri

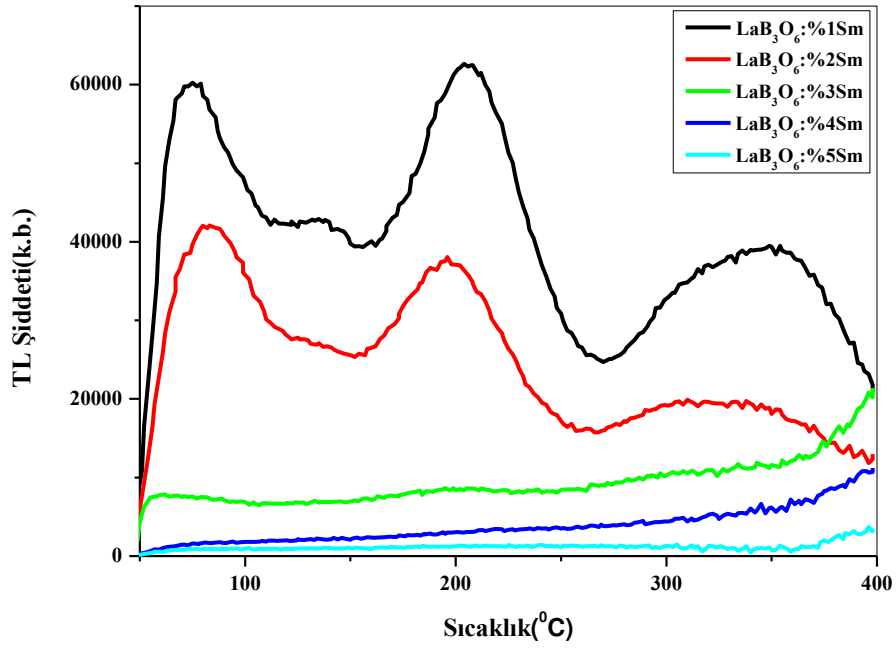
Termolüminesans, radyasyona maruz kalmış malzemenin yasak enerji bant aralığındaki tuzaklanan elektronların termal olarak salınımı ile meydana gelmektedir. Bu tuzaklardaki taşıyıcıların ömrü sıcaklık değişimiyle artabilmektedir. Malzeme ısıtılması sonrası elde edilen parıldama eğrilerinin analizi tuzak derinliği, frekans faktörü parametreleri ve yeniden birleşme spektrumları gibi bazı bilgiler vermektedir.

Bu çalışmada TL ölçümü için Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında Bulunan HARSHAW 3500 marka TLD okuyucu kullanılmıştır. Saf ve katkılı LaB_3O_6 örnekler 10 dk β ışınlama sonrası TLD okuyucuya yerleştirilmiş, ısıtma hızı 2 °C/s olacak şekilde 400 °C'ye kadar ısıtılmış ve elde edilen ışıma eğrilerinden TL pikleri belirlenmiştir. Buna göre, katkısız ve nadir toprak elementi katkılı tüm LaB_3O_6 tabanlı fosforlara ait TL eğrileri aşağıda verilmiştir.



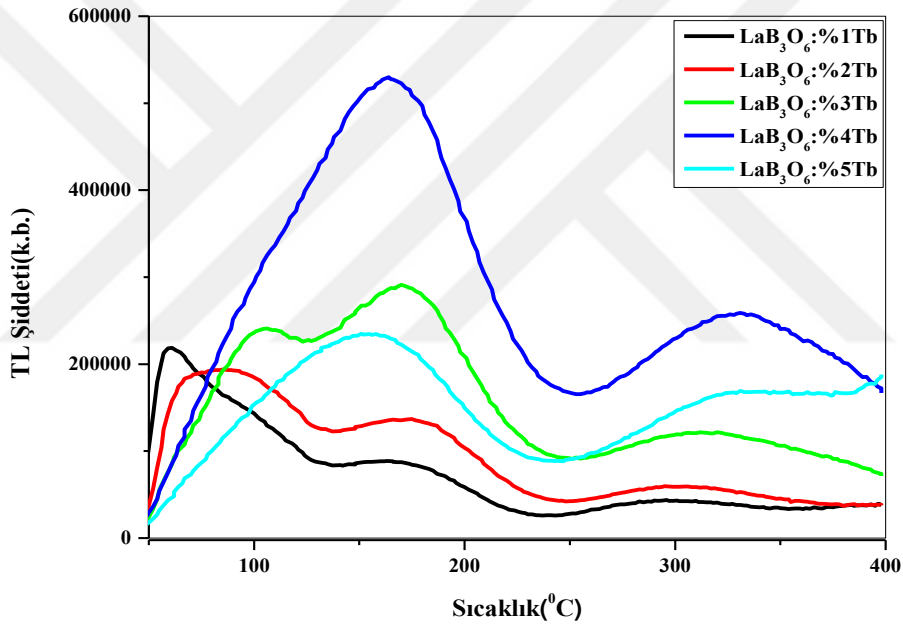
Şekil 3.14.Katkısız LaB₃O₆ örneğinin TL spektrumu

Katkısız LaB₃O₆ örneğinin Şekil 3.14’de görüldüğü gibi, düşük yaklaşık (~100-200°C), ve yüksek yaklaşık (~400°C civarı) sıcaklık bölgelerinde iki ışıma piki bulunmaktadır.



Şekil 3.15.Katkılı LaB₃O₆:Sm³⁺ (%1, %2, %3, %4 ve %5 kütlece) örneklerin TL spektrumu

Farklı kütle yüzdellerinde (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) Sm^{3+} katkılanmış LaB_3O_6 bileşiğinin termolüminesans (TL) spektrumu (Şekil 3.14), TL yoğunluğunun katkı miktarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. %1 Sm^{3+} katkılı örnek için 100°C civarında düşük sıcaklık piki, 200°C civarında orta sıcaklık piki, 300-400°C civarında yüksek sıcaklık piki gözlenmiştir. Sm^{3+} katkılanmasıyla birlikte düşük sıcaklık ve orta sıcaklık piklerine ait tepe noktaları belirgin şekilde artarken, yüksek sıcaklık bölgesindeki (~350°C) TL sinyali, katkı miktarı arttıkça baskılanır. Sm^{3+} için optimum katkı oranı %1-2 iken, belirli bir seviyeden sonra TL veriminin azaldığı söylenebilir.

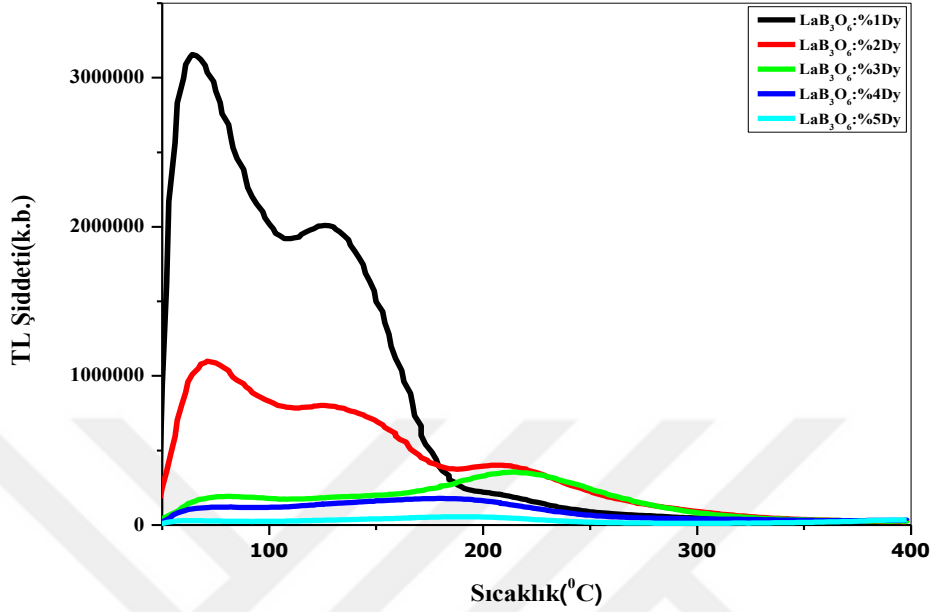


Şekil 3.16. Katkılı $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Tb}^{+3}$ (%1, %2, %3, %4 ve %5 kütlece) örneklerin TL spektrumu

Şekil 3.16'ya göre $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Tb}^{+3}$ malzemesinin parıldama eğrisi üç tane termolümineans pikinden oluşmaktadır. Bunlardan bir tanesi, 75-100°C civarında düşük sıcaklık piki ikincisi 150-200°C civarında orta sıcaklık piki diğeri de yaklaşık 300-350°C de bulunan yüksek sıcaklık pikidir.

Tb^{+3} katkılı bu örnek için katkı iyonu konsantrasyonu değiştiğinde farklı davranışlar ortaya çıktığı söylenebilir. Düşük sıcaklık piki %1 ve %2 Tb katkısında daha belirgin, orta sıcaklık pikinin %3 ve %4 Tb içeren örneklerde maksimuma

ulaştığı görülmektedir. %4 ve %5 Tb katkılı örneklerin ise yüksek sıcaklık piki daha güçlüdür.



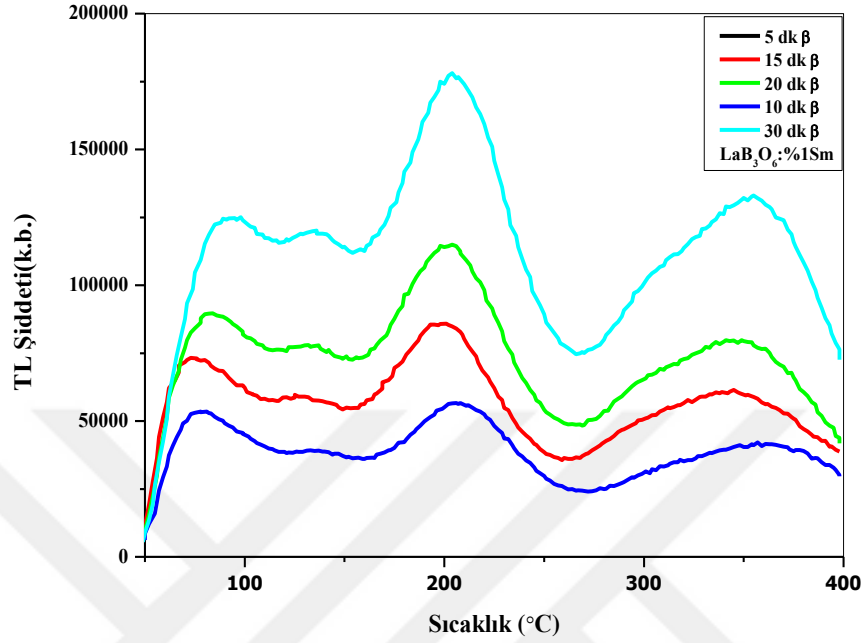
Şekil 3.17. Katkılı LaB₃O₆:Dy³⁺ (%1, %2, %3, %4 ve %5 kütlece) örneklerin TL spektrumu

Şekil 3.17’de farklı kütle yüzdellerinde (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) Dy³⁺ katkılanmış LaB₃O₆ örnekleri için TL yoğunluğunun katkı miktarına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. %1 Dy katkılı örnekte yaklaşık 90°C civarında düşük sıcaklık piki gözlenirken, yüksek sıcaklıkta (200-400°C) belirgin bir TL sinyali gözlenmiyor. Daha yüksek Dy³⁺ konsantrasyonlarında ise düşük sıcaklık pikinin şiddeti azalmaktadır.

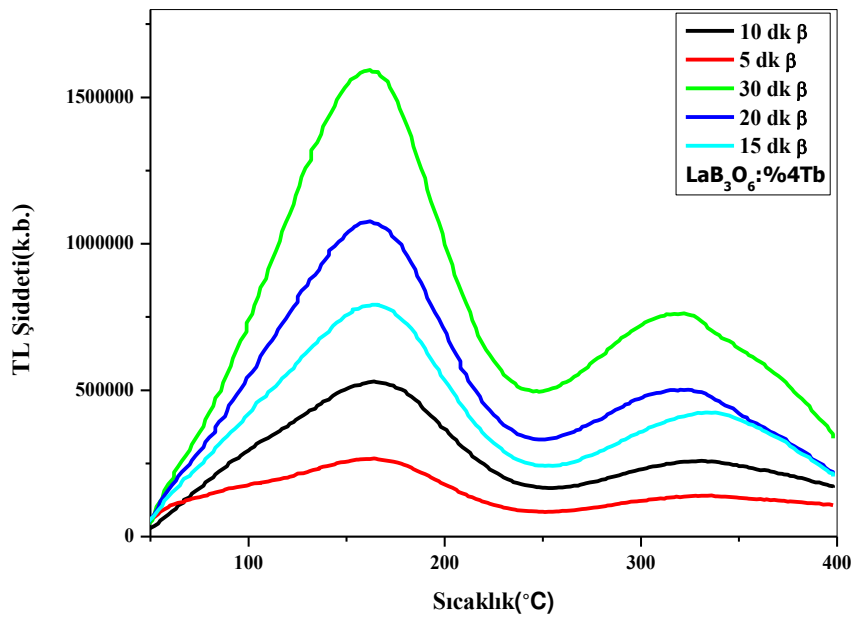
3.4.1. Doz Yanıt Deneyi İle İlgili Bulgular

Çeşitli doz miktarlarına maruz bırakılan kütlece %1 Sm³⁺ katkılı LaB₃O₆, %1 Dy katkılı LaB₃O₆, %4 Tb katkılı LaB₃O₆ fosforlarının TL ölçümleri Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında, 2 °C/s ısıtma hızı kullanılarak oda sıcaklığından 400 °C’ye kadar yapılmıştır. Artan radyasyon dozu miktarına bağlı olarak, elde edilen TL ışıma eğrilerinin hem altından kalan alanların hem de ışıma tepelerinin şiddetlerinin arttığı görülmüştür ve bu da genellikle beklenen bir durumdur. Bunun sebebi, bir dozimetrik malzeme uzun süre radyasyona

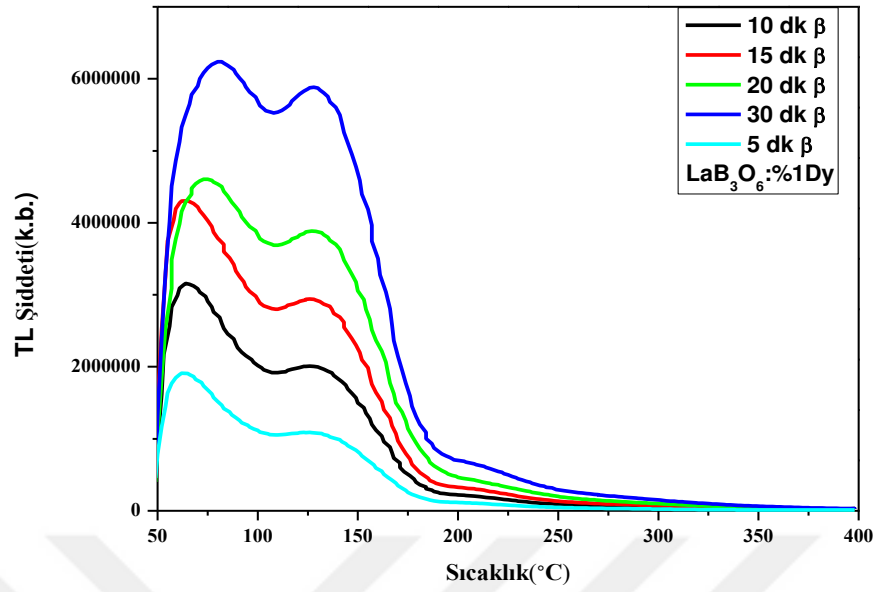
maruz kalırsa, derin tuzaklarda elektron yakalama olasılığı artar ve malzemenin pik şiddetinde artış gözlenir.



Şekil 3.18. LaB_3O_6 : %1 Sm^{+3} fosforunun farklı doz oranlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri



Şekil 3.19. LaB_3O_6 : %4 Tb^{+3} fosforunun farklı doz oranlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri

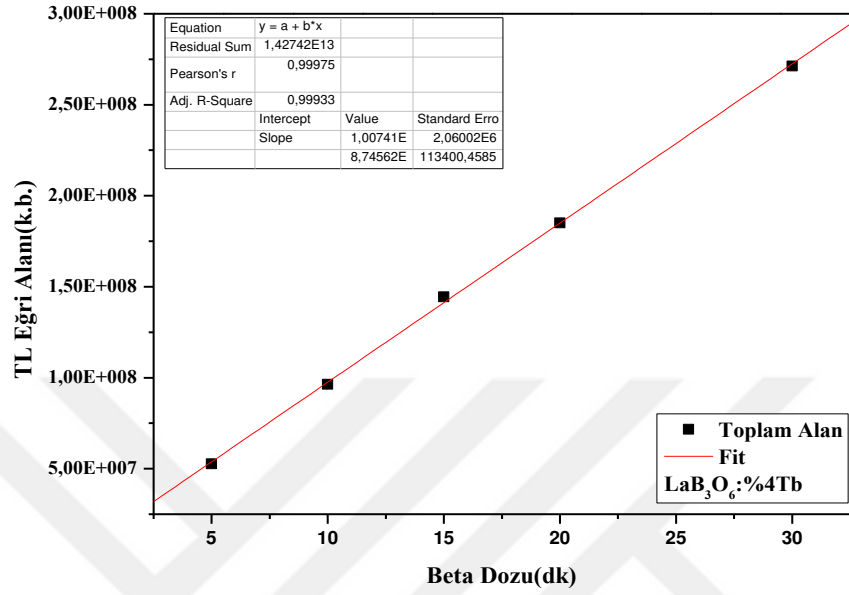


Şekil 3.20. LaB₃O₆: %1 Dy⁺³ fosforunun farklı doz oranlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrileri

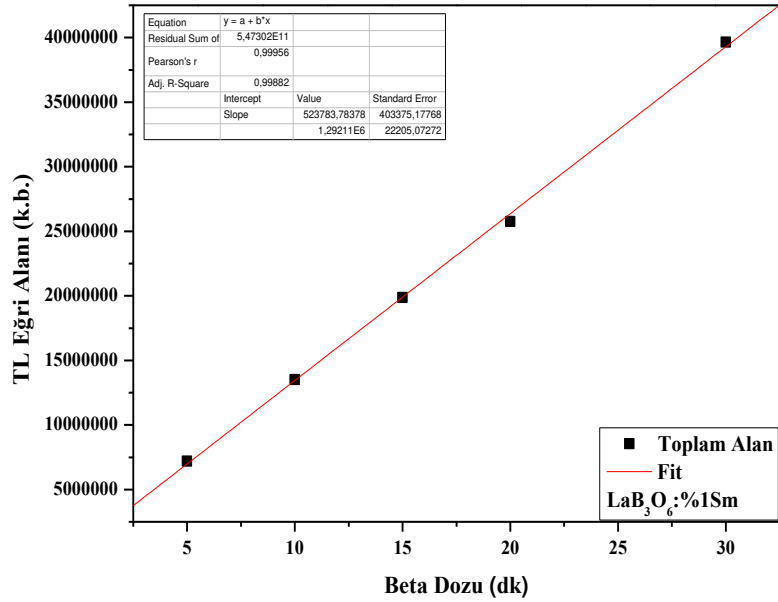
Katkılı LaB₃O₆ fosforlarının farklı dozlarda beta radyasyon kaynağına maruz bırakılmasının ardından elde edilen TL ışıma eğrilerinde de (Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20) görüldüğü gibi, fosforların maruz kaldığı beta dozunun artmasıyla TL ışıma eğrisini oluşturan tepelerin şiddeti de artmaktadır. Maksimum piklerin hemen hemen üst üste gelmiş olması ile malzemelerin kararlı bir yapıya sahip oldukları söylenebilir. Artan ışınlama süresi ile TL ışıma eğrilerinin şiddetinde artış gözlenmesinin nedeni de, bir dozimetrik malzeme uzun süre radyasyona maruz kalırsa, derin tuzaklarda elektron yakalama olasılığı artar ve malzemenin pik şiddetinde artış gözlenmesidir.

Herhangi bir TL dozimetresinde TL şiddeti ile soğurulan doz arasında lineer bir ilişki sergilemesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada katkılı ve katkısız LaB₃O₆ fosforlarının farklı doz oranlarına maruz bırakılmasıyla elde edilen TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlar hesaplanarak TL doz-cevap eğrileri elde edilerek, eğim (b=lineerlik faktörü) hesaplanmıştır. 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, elde edilen çeşitli beta doz aralıklarında, katkısız LaB₃O₆ fosforunun düşük dozlarda alt-lineer ve süper-lineer, yüksek dozlarda ise liner bir

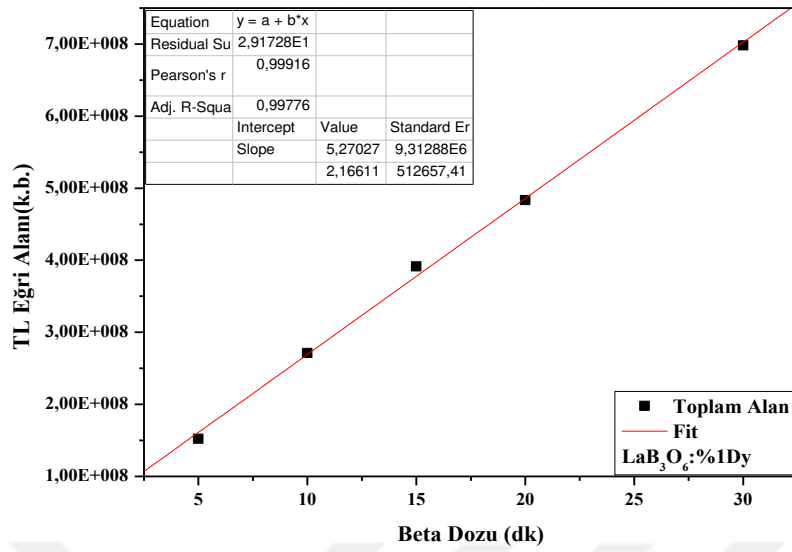
cevap sergilediği görülmektedir. Sm, Tb ve Dy nadir toprak elementleriyle katkılı LaB_3O_6 fosforlarının ise doz-cevap eğrileri incelendiğinde lineer bir cevap sergilediği görülmektedir. Ayrıca grafikler üzerinde lineer fit denklemleri verilmiştir.



Şekil 3.21. LaB_3O_6 :%4 Tb^{+3} fosforunun doz yanıt eğrisi



Şekil 3.22. LaB_3O_6 :%1 Sm^{+3} fosforunun doz yanıt eğrisi

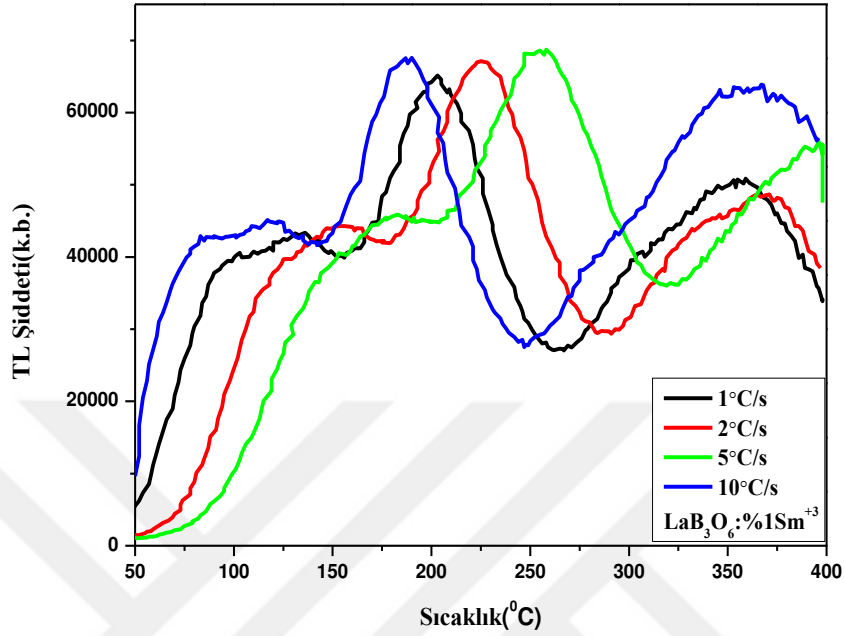


Şekil 3.23. LaB₃O₆:%1 Dy⁺³ fosforunun doz yanıt eğrisi

3.4.2. Farklı Isıtma Hızları Deneyi ile İlgili Bulgular

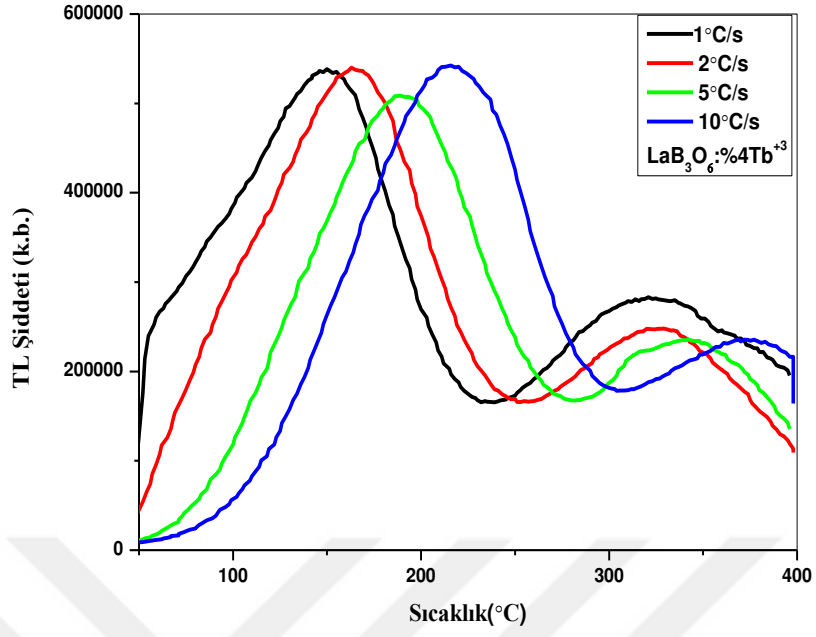
Farklı ısıtma hızları deneyi, TL ışıma eğrisinin şeklini ve tepe sıcaklıklarını etkileyen ve tuzak parametrelerinin hesaplanması için en önemli parametrelerden biridir. Bu yöntemde malzemeye sabit bir radyasyon dozu verilerek belirlenen bir ısıtma hızında TL okuma işlemi gerçekleştirilir. Doz miktarı sabit tutularak farklı ısıtma hızlarında TL okuması yapılır ve ışıma eğrileri kaydedilir. Numunelerin bir dizi farklı ısıtma hızlarıyla elde edilen TL ışıma eğrilerini kullanarak, aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü (s) gibi tuzak parametrelerinin değerlerinin hesaplandığı bu yöntem Hoogenstraten yöntemi olarak da bilinmektedir (Hoogenstraten, 1958). Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarında yapılan bu deneyde, LaB₃O₆:%1Sm⁺³, LaB₃O₆:%4Tb⁺³, LaB₃O₆:%1Dy⁺³ fosforları 10 dk beta dozuna maruz bırakılmalarının ardından 1, 2, 5 ve 10 °C/s'lik farklı ısıtma hızları kullanılarak TL ışıma eğrileri elde edilmiş ve aşağıda verilmiştir. Elde edilen TL ışıma eğrileri incelendiğinde (Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26) ısıtma hızının artmasıyla TL ışıma eğrilerinin tepe noktası sıcaklıkları yüksek sıcaklık tarafına doğru kaydığı görülmektedir. TL ışıma eğrilerindeki, artan ısıtma hızına bağlı olarak yüksek sıcaklıklara doğru kayma gözlenmesi literatürde ısısal gecikme (temperature lag) olarak bilinmektedir (Kitis ve ark., 1993; Kitis ve Tuyn, 1999). Bu gecikme, ısıtma işlemi sağlayan ısı çift ile

örnek arasındaki sıcaklık farkına dayanmaktadır. Yüksek ısıtma hızlarında bu farkın oluşma olasılığı daha fazladır.



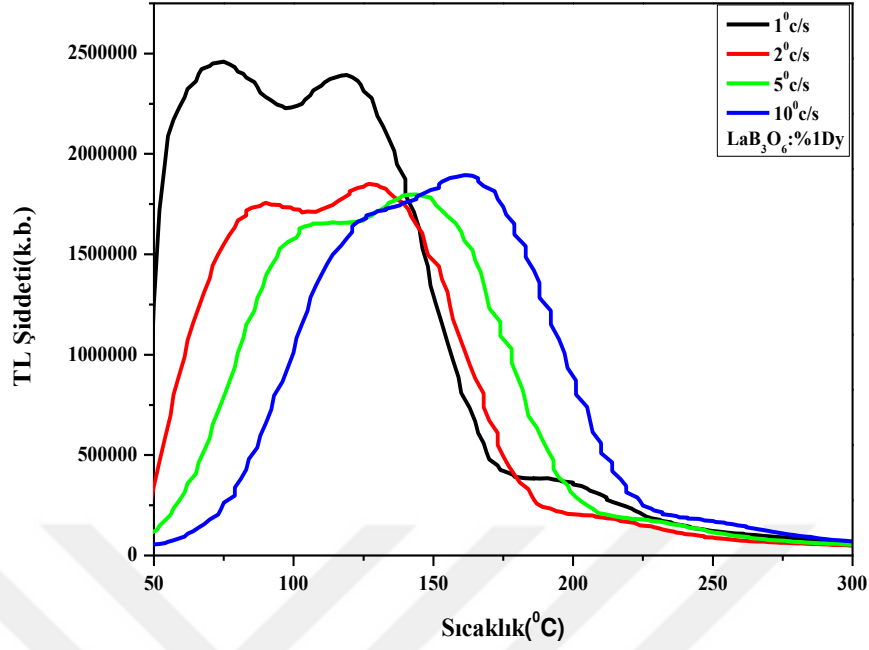
Şekil 3.24. 1-10 °C/s ısıtma hızı ile elde edilen LaB₃O₆: %1Sm⁺³ fosforunun TL ısıtma eğrileri

Şekilde görüldüğü gibi %1 Sm katkılı LaB₃O₆ fosforunun Tepe 1 de ısıtma hızları arttıkça malzemelerin TL şiddetlerinde azalma görülmektedir. Tepe 1 deki azalmanın sebebi termal sönümlemeden kaynaklanmaktadır. Isıtma hızları arttıkça malzemenin tuzaklarından kurtulan elektron sayısı da artmaktadır. Bu durum elektronların birbirleri ile rekabet etmesini sağlar ve böylece ısıtma merkezlerindeki yeniden birleşme verimi azalmaktadır. Buda tepe yüksekliklerinin azalmasına ve yüksek sıcaklık bölgesine doğru kaymasına sebep olmuştur.



Şekil 3.25. 1-10 °C/s ısıtma hızı ile elde edilen $\text{LaB}_3\text{O}_6:4\text{Tb}^{+3}$ fosforunun TL ışıma Eğrileri

$\text{LaB}_3\text{O}_6:4\text{Tb}^{+3}$ fosforunun farklı ısıtma hızlarında elde edilen TL ışıma eğrileri (Şekil 3.25) incelendiğinde ise Tepe 1 de ışıma şiddetlerinde düzgün bir artış veya azalma gözlemlenmemektedir. Tepe 2 deki ısıtma hızının artmasıyla ışıma şiddetindeki azalma ise literatürde termal sönümlleme olarak kabul görmüş ve ısıtma hızının artmasıyla lüminesans şiddetinin azalması olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.26. 1-10 °C/s ısıtma hızı ile elde edilen $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Dy}^{+3}$ fosforunun TL ışıma eğrileri

Farklı ısıtma hızları uygulanan $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Dy}^{+3}$ fosforunun TL ışıma eğrisinde (Şekil 3.26) Tepe 1 de artan ısıtma hızıyla TL ışıma şiddetinin azaldığı görülmektedir.

Farklı ısıtma hızları yönteminde, ısıtma hızının artması ile piklerin yüksek sıcaklıklara doğru kayması örnek ile ısıtıcı tabla arasındaki termal gradiyentten kaynaklandığından, gerçek sıcaklık değerleri için düzeltme yapılması gerekmektedir (Kitis and Tuyn, 1998).

$$T_{Mj} = T_{Mi} - c \ln\left(\frac{\beta_i}{\beta_j}\right) \quad (4.1)$$

T= fosforesans olayının gerçekleştiği mutlak sıcaklık (K)

β = sabit ısıtma hızı (K/s)

Farklı ısıtma hızları ile elde edilen değerler kullanılarak her bir malzemenin c sabiti için değerler hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler kullanılarak düzeltilmiş sıcaklık yani gerçek sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Her bir malzemenin ışıma

eğrilerindeki Tepe 2 değerleri için deneysel sıcaklık ve düzeltilmiş sıcaklık değerleri aşağıdaki Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.1. LaB₃O₆: %1Sm³⁺ fosforu için Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel düzeltilmemiş ve düzeltilmiş T_m değerleri

Isıtma Hızı β (°K/s)	Tepe 1		Tepe 2	
	Düzeltilmemiş (°K)	Düzeltilmiş(°K)	Düzeltilmemiş (°K)	Düzeltilmiş(°K)
1	378	378	461	461
2	391	390,89	476	476
5	424	407,9	498	495,4
10	455	420,82	531	510,2

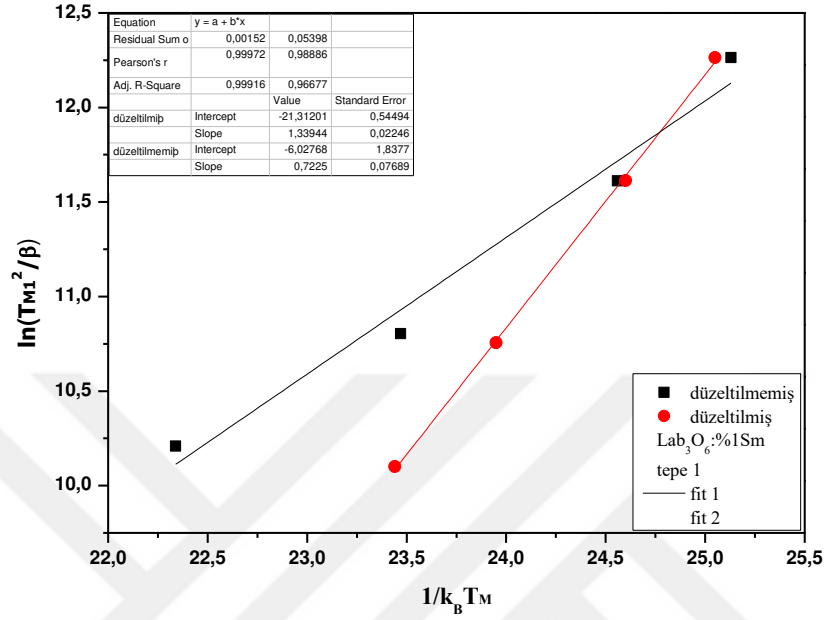
Tablo 3.2. LaB₃O₆: %4 Tb fosforu için Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel düzeltilmemiş ve düzeltilmiş T_m değerleri

Isıtma Hızı β (°K/s)	Tepe 1		Tepe 2	
	Düzeltilmemiş (°K)	Düzeltilmiş(°K)	Düzeltilmemiş (°K)	Düzeltilmiş (°K)
1	421	421	594	594
2	438	408,05	605	605
5	462	460,6	623	619,3
10	489	477,6	650	630,2

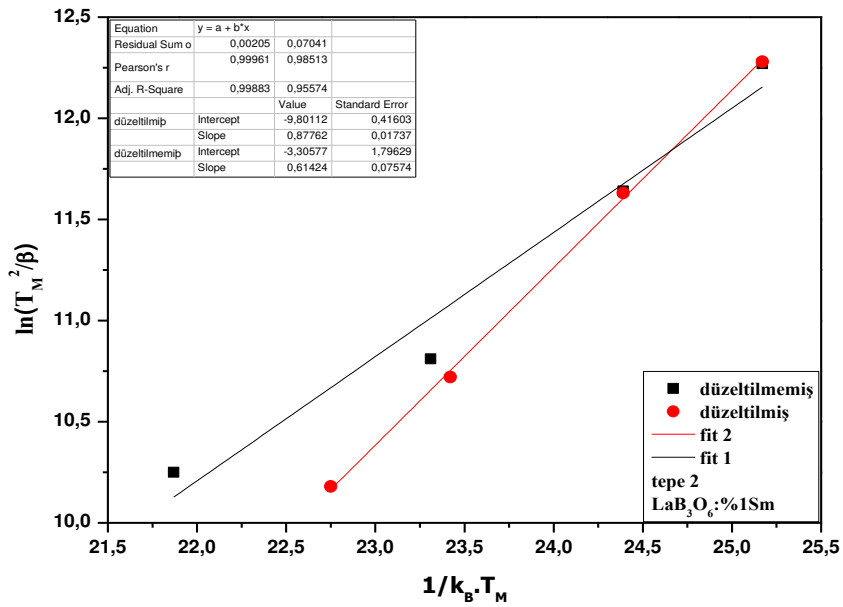
Tablo 3.3. LaB₃O₆: %1 Dy⁺³ fosforu için Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel düzeltilmemiş ve düzeltilmiş T_m değerleri

Isıtma Hızı β (°K/s)	Tepe 1		Tepe 2	
	Düzeltilmemiş (°K)	Düzeltilmiş(°K)	Düzeltilmemiş (°K)	Düzeltilmiş (°K)
1	346	346	390	390
2	361	360,8	400	400
5	383	380,4	417	413,01
10	399	395,3	434	423

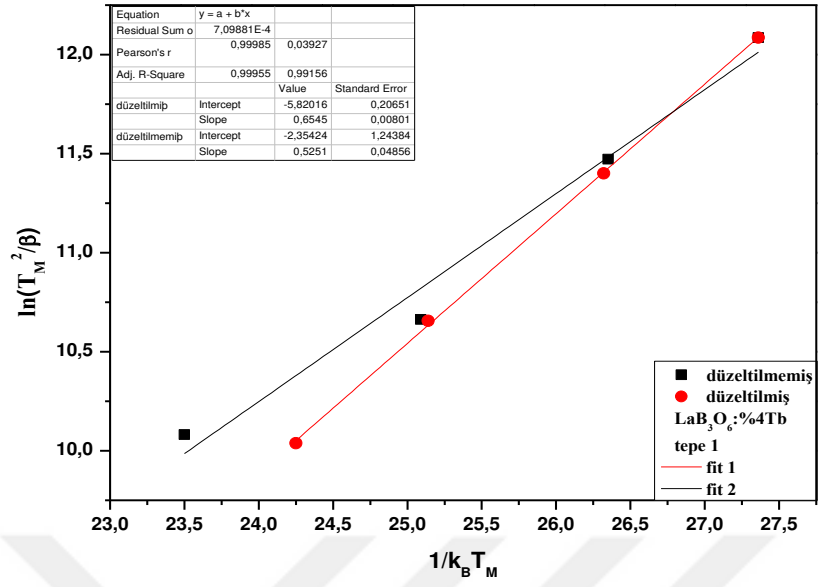
Her bir malzeme için farklı ısıtma hızlarından bulunmuş düzeltilmiş sıcaklıklar ile $\ln(T_m^2/\beta)$ karşılık $1/T_m$ değerleri hesaplanmış ve çıkan sonuçlar grafiklendirilmiştir. Bunlar Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29 gösterilmiştir.



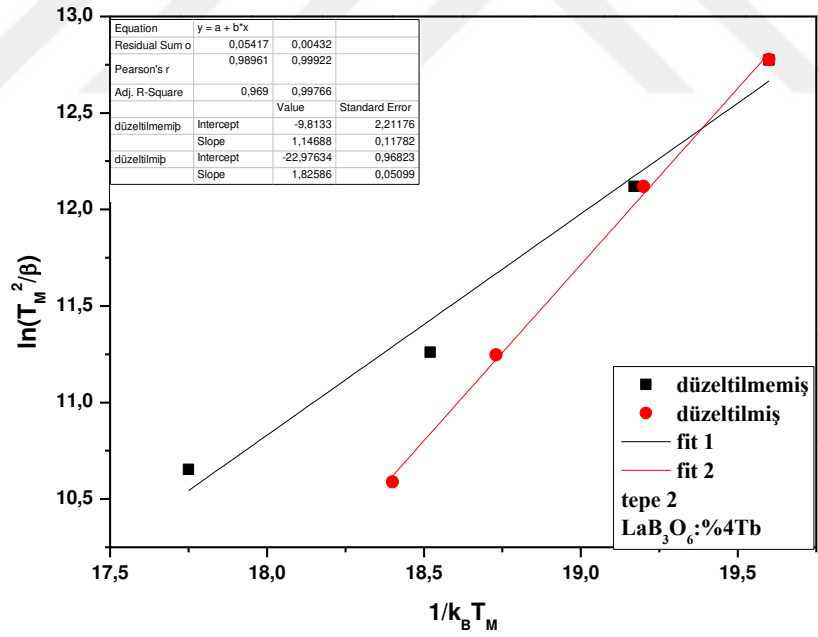
Şekil 3.27. $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Sm}^{+3}$ Fosforunun Tepe 1 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının $\ln(T_m^2/\beta)$ Karşılık $1/k_B T_m$ Grafiği



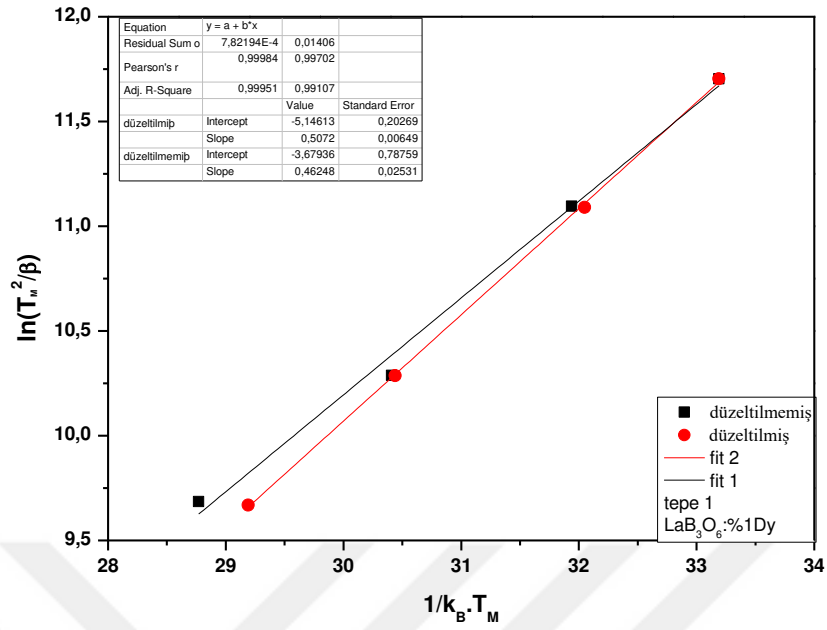
Şekil 3.28. $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Sm}^{+3}$ Fosforunun Tepe 2 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının $\ln(T_m^2/\beta)$ Karşılık $1/k_B T_m$ Grafiği



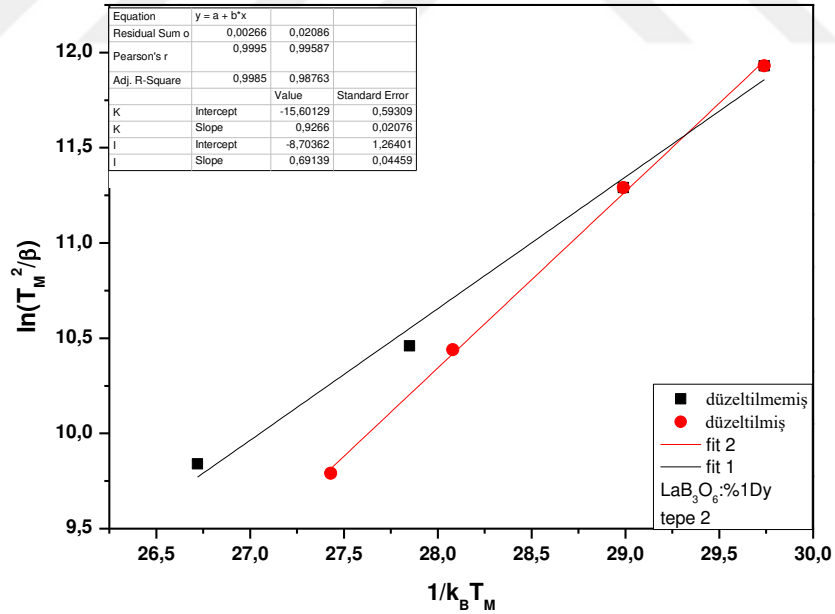
Şekil 3.29. LaB₃O₆: %4 Tb⁺³ Fosforunun Tepe 1 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının $\ln(T_m^2/\beta)$ Karşılık $1/k_B T_m$ Grafiği



Şekil 3.30. LaB₃O₆: %4 Tb⁺³ Fosforunun Tepe 2 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının $\ln(T_m^2/\beta)$ Karşılık $1/k_B T_m$ Grafiği



Şekil 3.31. LaB₃O₆:%1 Dy⁺³ Fosforunun Tepe 1 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının $\ln(T_m^2/\beta)$ Karşılık $1/k_B T_m$ Grafiği



Şekil 3.32. LaB₃O₆:%1 Dy⁺³ Fosforunun Tepe 2 için Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Sıcaklıklarının $\ln(T_m^2/\beta)$ Karşılık $1/k_B T_m$ Grafiği

Farklı ısıtma hızları yönteminde, E ve s kinetik parametreleri, $\ln(Tm^2/\beta)$ ve $(1/Tm)$ arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanılarak elde edilmektedir. Bu yöntemde, kinetik parametreler, aşağıda verilen denklem (4.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\ln\left(\frac{Tm^2}{\beta}\right) = \left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{1}{Tm}\right) + \ln\left(\frac{E}{ks}\right) \quad (4.2)$$

Burada Tm (K) maksimum pik sıcaklığı, β (K/s) kullanılan ısıtma hızı, s (s^{-1}) frekans faktörü, E (eV) aktivasyon enerjisi, k boltzman sabiti(eV/K)'dir.

Sıcaklık düzeltmesi yapılmış T_M değerleri ile deneysel T_M değerleri kullanılarak LaB_3O_6 : %1Sm³⁺, LaB_3O_6 :%1 Dy⁺³, LaB_3O_6 :%4 Tb fosforlarının TL ışıma eğrilerindeki Tepe 2 değerleri için aktivasyon enerjisi (E) ve frekans faktörü (s) değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar, Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.4. LaB_3O_6 : %1 Sm³⁺ fosforu Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel ve düzeltilmiş Tm değerleri kullanılarak hesaplanan tuzak parametreleri

Maksimum1	Düzeltilmemiş	Düzeltilmiş
s (Hz)	$3,49 \times 10^6 s^{-1}$	$2,88 \times 10^{13} s^{-1}$
E (ev)	0,00924 eV	1,33944 eV
Maksimum2		
s (Hz)	$1,95 \times 10^5 s^{-1}$	$1,85 \times 10^8 s^{-1}$
E (Ev)	0,61424 eV	0,87762 eV

Tablo 3.5. LaB_3O_6 : %4 Tb fosforu Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel ve düzeltilmiş Tm değerleri kullanılarak hesaplanan tuzak parametreleri

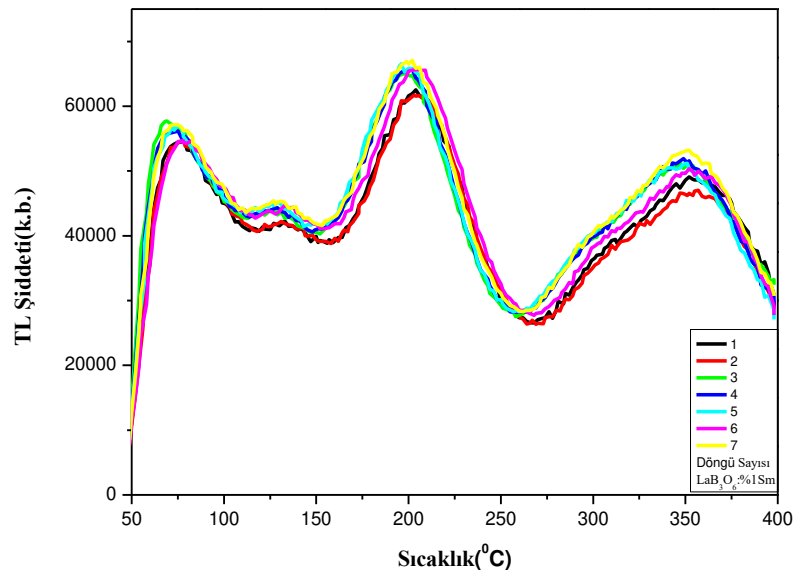
Maksimum1	Düzeltilmemiş	Düzeltilmiş
s (Hz)	$6,41 \times 10^4 s^{-1}$	$2,56 \times 10^6 s^{-1}$
E (ev)	0,5251 eV	0,6545 eV
Maksimum2		
S (Hz)	$2,43 \times 10^8 s^{-1}$	$2,05 \times 10^{14} s^{-1}$
E (Ev)	1,14688 eV	1,82586 eV

Tablo 3.6. LaB₃O₆: %1 Dy³⁺ fosforu Tepe 1 ve Tepe 2 için deneysel ve düzeltilmiş Tm değerleri kullanılarak hesaplanan tuzak parametreleri

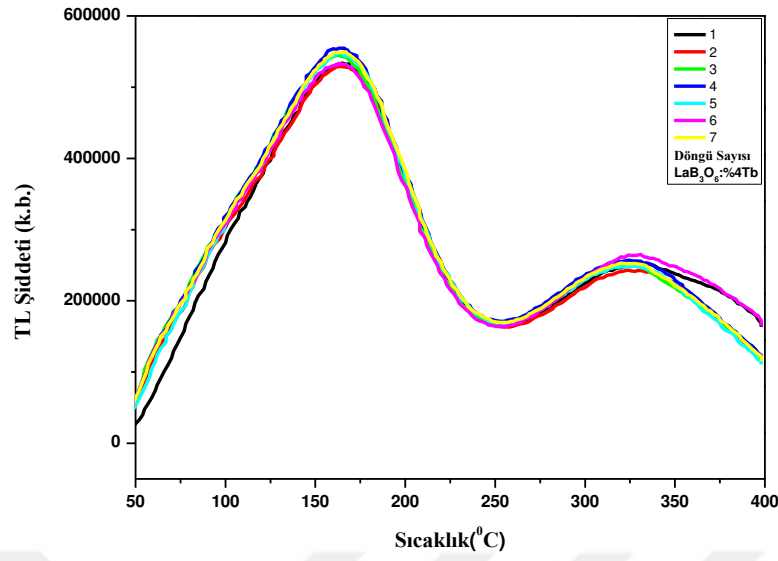
Maxima 1	Düzeltilmemiş	Düzeltilmiş
s (Hz)	$6,41 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$	$2,56 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
E (ev)	0,5251 eV	0,6545 eV
Maxima 2		
S (Hz)	$2,43 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$2,05 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$
E (Ev)	1,14688 eV	1,82586 eV

3.4.3. Yeniden kullanılabilirlik

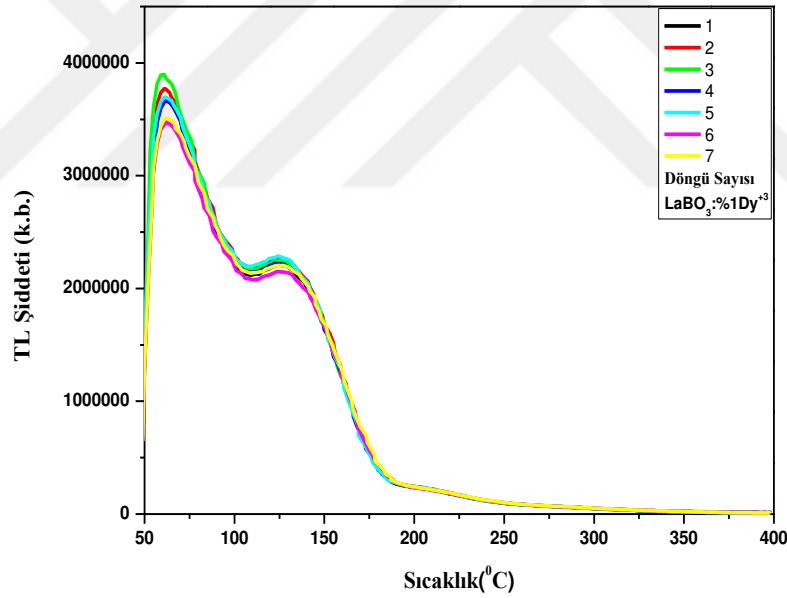
Yeniden kullanılabilirlik, bir TL malzemesinin dozimetri uygulamasında kullanılabilmesi için sahip olması gereken en önemli aşamalardan biridir. TLD malzemesinin her seferinde aynı şartlar altında aynı radyasyon dozuna maruz bırakılmasının ardından herhangi bir anda veya ardışık TL okumasında malzemenin aynı TL şiddeti ile cevap vermesi gerekir. Bu da o malzemenin iyi bir dozimetrik malzeme olduğunu, güvenilirliğini ve yeniden kullanılabilir olduğunu göstermektedir. İyi bir dozimetrik malzemenin yeniden kullanılabilirliği, aynı doz ve okuma koşulu altında tekrarlanan ölçümler % 5’den az standart bir sapmaya sahip olmalıdır (Furetta, 2003). Bu çalışmada, LaB₃O₆: %1Sm³⁺, LaB₃O₆: %1 Dy³⁺, LaB₃O₆: %4 Tb fosforların tekrar kullanılabilirliğini değerlendirmek için yapılan test, aynı koşullar altında 10 dk beta radyasyon dozuna maruz bırakılarak 2 °C/s⁻¹ ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 400 °C’ye kadar TL okumaları sonucunda ışıma eğrileri çizilmiş (Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35) ve bu döngü 7 kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.33. LaB₃O₆: %1 Sm örneğine her döngü için elde edilen TL ışıma eğrileri



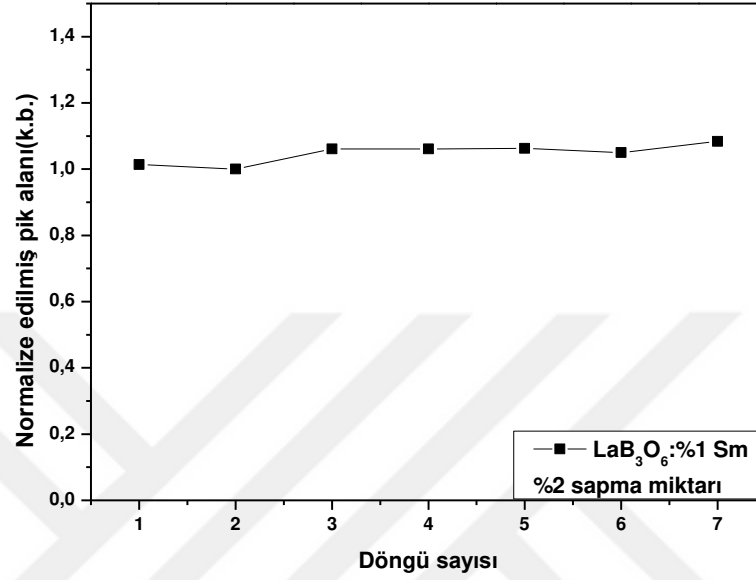
Şekil 3.34. LaB₃O₆:%4 Tb örneğinde her döngü için elde edilen TL ışıma eğrileri



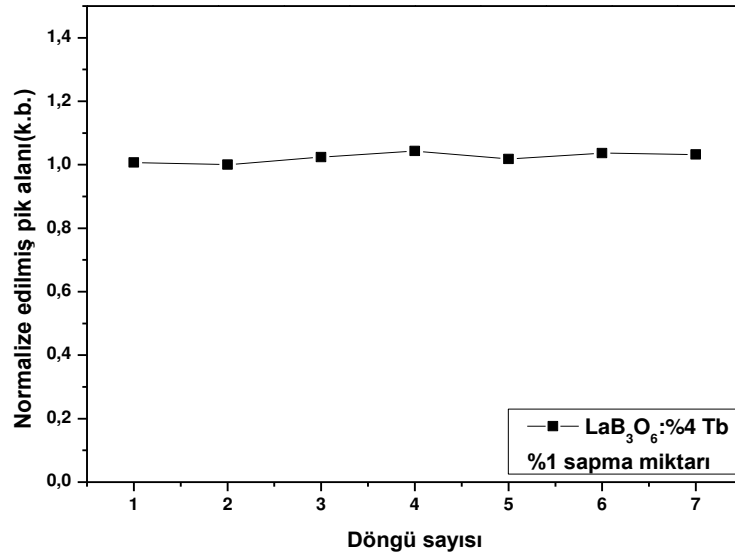
Şekil 3.35. LaB₃O₆:%1 Dy örneğinde her döngü için elde edilen TL ışıma eğrileri

Elde edilen ışıma eğrileri altında kalan alan değerleri normalize edilerek, döngü sayısına karşılık normalize edilmiş pik alanı grafikleri çizilmiştir (Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38). Şekillerde TL şiddetlerinde yer yer çok küçük sapmaların olduğu görülmekte olup bu sapma miktarları LaB₃O₆: %1Sm³⁺ fosforu için %2, LaB₃O₆: %4 Tb³⁺ fosforu için %1, LaB₃O₆: %1Dy³⁺ fosforu için ise %2 olarak hesaplanmıştır. Katkılı LaB₃O₆ fosforlarının 7 döngü sonucunda elde edilen TL

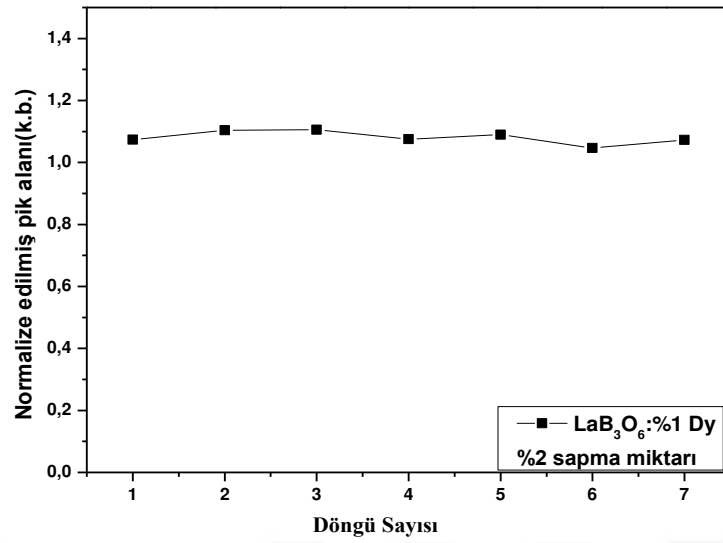
şiddetlerindeki bu sapma miktarlarının kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu söylenebilir. Bu sonuçlar doğrultusunda bu örneklerin dozimetrik açıdan yeniden kullanılabilirlik özelliğine sahip olduğu ve radyasyon doz ölçümlerinde tekrar tekrar kullanılabilirmelerinin mümkün olduğu söylenebilir.



Şekil 3.36. LaB₃O₆: %1Sm³⁺ fosforunun normalize edilmiş pik alanına karşı döngü sayısı grafiği



Şekil 3.37. LaB₃O₆: %4 Tb³⁺ fosforunun normalize edilmiş pik alanına karşı döngü sayısı grafiği

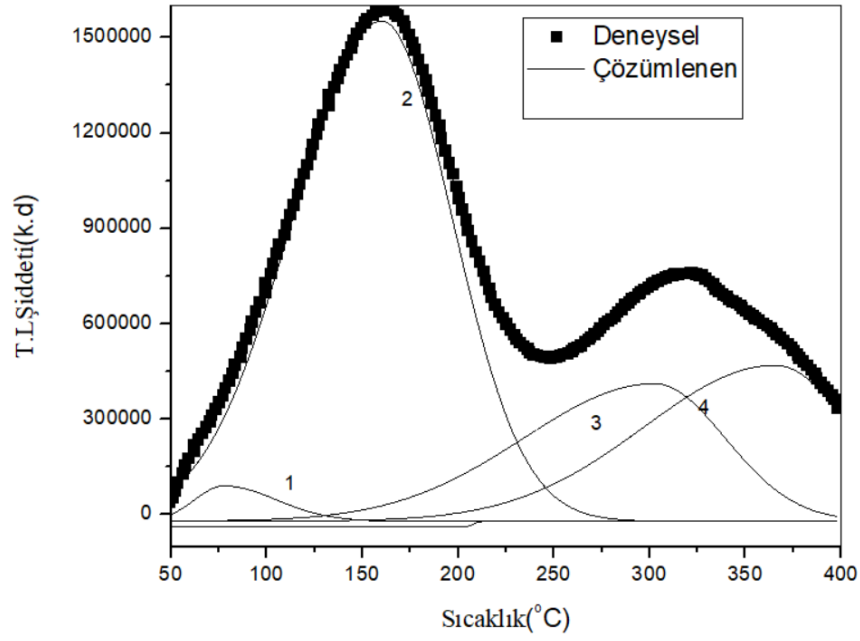


Şekil 3.38. LaB₃O₆: %1Dy³⁺ fosforunun normalize edilmiş pik alanına karşı döngü sayısı grafiği

3.4.4. Bilgisayarla Işıma Eğrisi Ayrıştırma (CGCD) Yöntemi ile İlgili

Bulgular

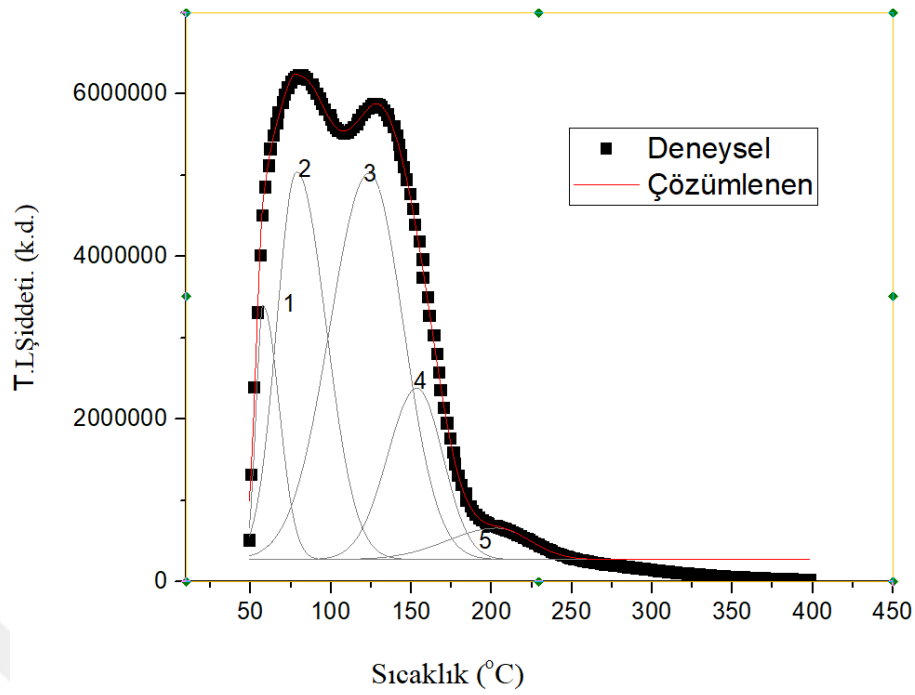
Her enerji seviyesi tek bir tepe ile temsil edilse de, deneysel TL parıldama eğrilerinde genellikle üst üste binen tepeler gözlemlenir. CGCD yöntemi, TL parıldama eğrisi emisyonunda bu bireysel tepeleri belirlemek için kullanılan bir araçtır. Her bir örnek için parıldama eğrilerinin farklı sayıda TL tepesinden oluştuğu tespit edilmiş ve CGCD yaklaşımıyla incelenmiştir. 10 dk beta ışını radyasyonuna maruz bırakılan LaB₃O₆: %1Sm³⁺, LaB₃O₆: %4 Tb³⁺ ve LaB₃O₆: %1Dy³⁺ fosforlarının elde edilen TL ışıma eğrileri üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Şekil 3.39, Şekil 3.40 ve Şekil 3.41). Her bir örnek için E ve s değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.7, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’de verilmiştir.



Şekil 3.39. LaB_3O_6 : Tb^{+3} (%4) fosforuna ait TL parıldama eğrisi CGDC analiz eğrileri

Tablo 3.7. LaB_3O_6 : Tb^{+3} 'ün çözömlenen eğrilerinin PS Metodu ile elde edilen kinetik parametreler

Pik	$T_m(^{\circ}\text{C})$	T_1	T_2	τ	δ	ω	μ_g	γ	$E_{avg}(\text{eV})$	$s(s^{-1})$
1	91	58	113	33	22	55	0.4	0.66667	0.419 ± 0.0093	2.31×10^4
2	159	105	204	54	45	99	0.455	0.833	0.394 ± 0.0354	1.42×10^6
3	303	222	345	81	42	123	0.341	0.518	0.300 ± 0.0210	1.89×10^3
4	365	284	410	81	45	126	0.357	0.555	0.414 ± 0.0100	1.30×10^7

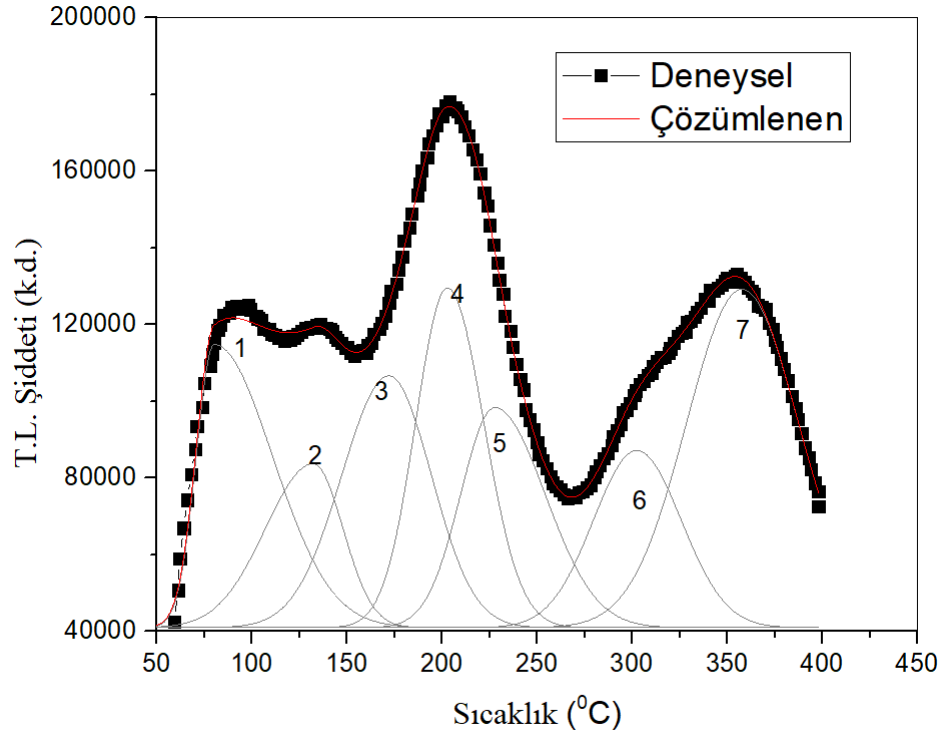


Şekil 3.40. $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Dy}^{+3}$ (%1) fosforuna ait TL parıldama eğrisi CGDC analiz eğrileri

Tablo 3.8. $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Dy}^{+3}$ 'ün çözümlenen eğrilerinin PS Metodu ile elde edilen kinetik parametreler.

Pik	$T_m(^{\circ}\text{C})$	T_1	T_2	τ	δ	ω	μ_g	γ	$E_{av}(\text{eV})$	$s(s^{-1})$
1	57	52	69	5	12	17	0.7	2.4	1.26 ± 0.0076	4.77×10^{11}
2	78	63	100	15	22	37	0.59	1.46	0.433 ± 0.0014	6.7×10^4
3	124	95	148	29	24	53	0.452	0.827	0.662 ± 0.0213	5.18×10^3
4	154	132	172	22	18	40	0.45	0.818	1.032 ± 0.0110	9.96×10^{10}
5	202	167	226	35	24	59	0.406	0.685	0.728 ± 0.0084	2.0×10^6

$\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Dy}^{+3}$ (%1) fosforunun TL ışıma eğrisi 2 pikden oluşurken, CGDC yöntemi ile analiz edildiğinde pik sayısının 4'e çıktığı görülmektedir. Bu fosforun düşük maksimum sıcaklıklar (57°C , 78°C) için düşük aktivasyon enerjileri (0,433 eV, 1,426 eV) hesaplanmıştır.



Şekil 3.41. $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Sm}^{+3}$ (%1) fosforuna ait TL parıldama eğrisi CGDC analiz eğrileri

Tablo 3.9. $\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Sm}^{+3}$ 'ün çözümlenen eğrilerinin PS Metodu ile elde edilen kinetik parametreler

Pik	$T_m(^{\circ}\text{C})$	T_1	T_2	τ	δ	ω	μ_g	γ	$E_{avg}(\text{eV})$	$s(s^{-1})$
1	80	68	116	12	36	48	0.75	3	1.44 ± 0.4469	4.87×10^{19}
2	132	102	150	30	18	48	0.375	0,6	0.532 ± 0.0176	1.57×10^5
3	172	143	199	29	27	56	0.482	0.931	0.881 ± 0.019	4.91×10^8
4	202	182	225	20	23	43	0.53	1,15	$1,585 \pm 0.0409$	5.36×10^{15}
5	228	206	258	22	30	52	0.577	1,363	$1,637 \pm 0.0918$	2.22×10^{15}
6	301	275	330	26	29	55	0,527	1,115	$1,762 \pm 0.0316$	1.84×10^{14}
7	357	323	392	34	35	69	0,507	1,029	$1,576 \pm 0.0043$	1.87×10^{11}

$\text{LaB}_3\text{O}_6: \text{Sm}^{+3}$ örneğine ait, TL spektrumu ile kinetik parametreler uyumludur. Örneğin (80°C, 132°C) düşük sıcaklık pikleri için nispeten düşük aktivasyon enerjisi (0.532-1.44 eV) ve düşük frekans faktörleri (10^5 - 10^8 s⁻¹) hesaplanmış. Yani

genel olarak düşük sıcaklık pikleri daha kısa ömürlü TL merkezine, yüksek sıcaklık pikleri ise daha, uzun ömürlü TL merkezlerine karşılık gelir.



BEŞİNCİ BÖÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, TL dozimetrisi için malzeme geliştirmek amacıyla kütlece % 1, % 2, % 3, % 4, ve % 5 Sm, Dy, Tb nadir toprak elementleri yanma sentezi yöntemi ile LaB_3O_6 fosforuna katkılандırılmıştır. Fosforların sentezlenmesi Çukurova Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan örnekler Celal Bayar Üniversitesi DEFAM Yüzey Karakterizasyon Laboratuvarında SEM-EDX, FTIR ve XRD analizleri ile karakterize edilmiştir. Örneklerin XRD desenlerinin neredeyse standart pdf (ICSD 98-002-3609) kartıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

FTIR, malzemenin kimyasal bağları arasında oluşan salınım, gerilmeler ve bükülme gibi ilgili bilgileri verir. Katkılı ve katksız LaB_3O_6 fosforlarına ait FTIR spektrumları Bölüm 3.2’ de verilmiştir. Bu analiz yönteminde, katkılı ve katksız LaB_3O_6 fosforlarında kimyasal bağlar arasındaki güçlü titreşimlerden dolayı farklı pikler gözlemlenmiş, bu da katkılандırılmış elementlerin etkilerinin varlığını ortaya koymaktadır. Bölüm 3.2’de katkılı ve katksız fosforlardan elde edilen FTIR spektrumları karşılaştırılması yapılmış ve katkılı LaB_3O_6 fosforların katkı malzemesinden dolayı oluşan farklı pikler gözlenmiştir.

Sm, Dy ve Tb katkılı LaB_3O_6 fosforlarının yüzey parçacık dağılımını ve katkılama oranının yapısal özelliklere etkisini belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) tekniğı kullanılmıştır. Bölüm 3.3’te katkılı fosforların SEM görüntüleri verilmiş ve bu görüntülerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde, parçacıklar eşit dağılmadığı için homojen olmayan durumlar gözlenirse de katkılандırılan elementlerin kristal yapıya iyi bir şekilde entegre olduğu söylenebilir. Yanma sentez yöntemi ile Sm, Dy ve Tb nadir toprak elementleri ile katkılандırılan LaB_3O_6 fosforlarını içeriğindeki elementleri ve bu elementlerin miktarlarını belirleyebilmek için enerji dağılımı spektroskopisi (EDX) tekniğı kullanılmıştır. Bölüm 3.3’te, katkılı fosforların SEM-EDX görüntüleri birlikte verilmiştir. EDX spektrumları incelendiğinde katkılı fosforları oluşturan elementlerin tümüne ait piklerin varlığı gözlemlenmiş olup, sentezleme sürecinde kullanılan elementlerin dışında başka bir elementin varlığı tespit edilmemiştir.

Katkısız ve katkılı LaB_3O_6 fosforlarının TL ölçümleri Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Lüminesans Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Kütlece % 1, % 2, % 3, % 4, ve % 5 Sm, Dy, Tb katkılı LaB_3O_6 fosforlarının TL ölçümleri sonrasında elde edilen ışıma eğrileri incelendiğinde TL dozimetrleri için en uygun malzemelerin LaB_3O_6 : %1Sm, LaB_3O_6 : %4Tb ve LaB_3O_6 : %1Dy olduğu tespit edilmiştir. Bu örneklerin kinetik parametrelerini hesaplamak amacıyla doz yanıt, farklı ısıtma hızları ve bilgisayarla ışıma eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemleri kullanılmış, malzemelerin güvenilirliğini test etmek için ise tekrarlanabilirlik yöntemi uygulanmıştır.

Doz yanıt yöntemi ile Saf LaB_3O_6 , LaB_3O_6 :%1Sm, LaB_3O_6 :%4Tb ve LaB_3O_6 :%1Dy fosforları farklı radyasyon dozlarına maruz bırakıldıktan sonra her defasında örneklerin TL ölçümleri alınarak TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular, Bölüm 3.4.1'de verilmiştir. Katkısız ve katkılı fosforların farklı dozlarda elde edilen ışıma eğrileri incelendiğinde, artan radyasyon miktarıyla ışıma eğrilerinin altında kalan alanlarda da artış olduğu görülmüştür ve bu beklenen bir durumdur. Örneklerin doz-yanıt eğrileri çizilerek, lineerlik faktörü (b) hesaplanmıştır. Doz-yanıt eğrileri incelendiğinde katkılı LaB_3O_6 fosforların lineer bir durum sergilediği görülmektedir.

Farklı ısıtma hızları yöntemi ile katkılı LaB_3O_6 örnekleri 10 dk beta ışını radyasyonuna maruz bırakılmaları sonrası 1,2,5 ve 10 $^{\circ}\text{C/s}$ lik farklı ısıtma hızları uygulanarak TL ışıma eğrileri kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular Bölüm 3.4.2.'de verilmiştir. Örneklerle ait TL ışıma eğrilerindeki her bir tepe için kinetik parametreler E ve s değerleri hesaplanmış olup, değerler Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da verilmiştir. Örneklerin TL ışıma eğrileri incelendiğinde ışıma piklerinin ısısal gecikme ve ısısal sönüm durumlarından etkilendiği belirlenmiştir. Her üç örnekde de, ısısal gecikmeden dolayı ışıma eğrilerinin tepe sıcaklıklarının artan ısıtma hızıyla yüksek sıcaklığa doğru kaydığı gözlenmiştir. Isısal sönüm etkisi ile de LaB_3O_6 :%1Sm fosforunun ışıma eğrisinde Tepe 1 ve LaB_3O_6 :%4Tb fosforunun ışıma eğrisindeki Tepe 2'nin tamamı ısıtma hızının artmasıyla tepe şiddetlerinin azaldığı görülmüştür. Isısal sönüm teorisinin aksine ışıma eğrileri incelendiğinde, ısıtma hızının artmasıyla bazı TL piklerinin beklenmedik bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

CGCD yöntemi kullanılarak, 10 dk beta ışınına maruz bırakılarak 2 °C/s ısıtma hızında 400 °C'ye kadar ısıtılan örneklerin kaydedilen TL ışıma eğrileri analiz edilmiştir. Örneklerle ait ışıma eğrileri analiz edildiğinde, bir birine çok yakın ve iç içe girmiş $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Sm}$ örneğine ait 7 ışıma tepesi, $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%4\text{Tb}$ ' ye ait 4 ışıma tepesi, $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Dy}$ 'ye ait 5 ışıma tepesinden oluştukları tespit edilmiştir. Analiz sonucu elde edilen her bir ışıma tepesi için ışıma eğrisinin tepe maksimum şiddetine karşılık gelen tepe sıcaklıkları kullanılarak aktivasyon enerjileri ve frekans faktörleri hesaplanmış olup Tablo 3.7, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9' de verilmiştir.

Örneklerin TL dozimetlerinde kullanılabilirlikleri için güvenilirliklerini ve kararlılıklarını test edebilmek amacıyla tekrar kullanılabilirlik deneyi uygulanmıştır. Bu deney kapsamında, $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Sm}$, $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%4\text{Tb}$ ve $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Dy}$ aynı şartlar altında her defasında 10 dk beta ışını radyasyonuna maruz bırakılarak ardarda 7 kez TL ölçümleri alınarak ışıma eğrileri kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular Bölüm 3.4.3.'te verilmiş olup, her üç örnek içinde 7 döngü sonrası elde edilen TL ışıma eğrilerinin altında kalan alanlar karşılaştırıldığında önemli ölçüde sapma olmadığı gözlenmiştir. Örneklerin her döngü için TL ışıma eğrileri altında kalan alanlar hesaplanarak, her üç örneğinde ilk döngüden son döngüye kadar %5'in altında sapma gösterdikleri tespit edilmiştir. Bu sapmalarda deneysel hata sınırları içerisinde.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre, $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Sm}$, $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%4\text{Tb}$ ve $\text{LaB}_3\text{O}_6\text{:}\%1\text{Dy}$ fosforlarının iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip oldukları ve geniş bir doz aralığında lineer yanıt verdikleri belirlenmiştir. Bu özellikleri, söz konusu fosforları termoluminesans (TL) dozimetrisi açısından umut vadeden adaylar haline getirmekte ve bu malzemeler üzerinde daha detaylı araştırmalar yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Örneğin, farklı sentez yöntemlerinin uygulanmasıyla bu fosforların TL hassasiyetleri karşılaştırılabilir ve optimum üretim koşulları belirlenebilir. Ayrıca, bu tezde kullanılan farklı ısıtma hızı yöntemi, CGCD yöntemi, pik şekli yöntemlerine ek olarak, başlangıç artış yöntemi, izotermal bozunma yöntemi gibi alternatif yaklaşımlar da kullanılarak tuzak parametreleri daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra, aynı fosfor örneklerinin farklı radyasyon kaynakları ile ışınlaması durumunda oluşan TL ışıma eğrilerinin analizi, malzemelerin farklı dozimetri senaryolarına uygunluklarını belirlemek açısından faydalı olacaktır. Sonuç olarak, bu tez kapsamında incelenen LaB_3O_6 tabanlı fosforların, hem geliştirilmeye açık ve üzerinde çalışılması gereken

malzemeler hemde gösterdikleri TL performansları ile gelecekteki dozimetrik uygulamalarda kullanılabilecek umut vadeden malzemeler olduğu gör÷lmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Gizem, E., Investigation of Optical Chemical Sensing Potential of Rare Earth Doped Phosphors, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, İzmir (2017).
- [2] Sönmez, S. , Aydınlatmada kullanılan ışıldar maddelerin sentezi ve incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Mersin (2011).
- [3] Gökçe S., Keskin I.Ç. , Katı M.I., Kibar R. , Çetin A. , Tuncer Arslanlar Y., “Kinetic Parameters and Luminescence Properties of Rare Earth (Tb, Nd) Doped and Transition Metal (Mn) Doped/co-doped YAlO_3 Prepared Via Sol-gel Method”, Journal of Luminescence, 119883,261, 2023.
- [4] Singh V., Ravita, Kaur S., Rao A.S., Jeong H., “ Green-emitting Tb^{3+} doped LaP_3O_9 phosphors for plasma display panel”, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 244 , 167323, 2021.
- [5] Küçük N., Yaman D., “Dispersiyum Katkılı Çinko Borat Fosforların Dozimetrik Özellikleri”, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 011103, 67-74, 2018.
- [6] Halefoğlu Y.Z., Oğlakçı M., Yüksel M., Canımoğlu A., Topaksu M., Can N., “Structural And Spectroscopic Properties Of LaAlBO_3 Doped With Eu^{3+} İons”, Applied Radiation And Isotopes, 154, 1-7, 2019.
- [7] Kurt Z.A., Aközcan S., Termoluminesans Dozimetreler ile Doz Dağılımlarının İncelenmesi, Kırıkkaleli University journal of engineering and science, 3, 132-141, 2017.
- [8] Dinçer O., Ege A., “Synthesis and luminescence of Tb^{3+} doped lithium borate (LiBO_2)”, Journal of Luminescence, 138, 174-178, 2013.

- [9] Hızal Abacı Ö. C., Mete E. , Esenturk O., Yılmaz A., “Tunable Optical Properties and DFT Calculations of RE⁺³ Codoped LaBO₃ Phosphors.”, Optical Materials, 98, 109487, 2019.
- [10] Kıpçak A. S., “Low Temperature Solid-State Synthesis And Characterization of LaBO₃”, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, Vol. 21, No. 2, 2016.
- [11] Hu S., Gu C., Lu S., Hong Y., Wu Q., Fu M., Xiong P., Wang Y., “UVA-emitting composite film based on LaB₃O₆:Ce³⁺ phosphor for X-ray imaging”, Dyes and Pigments, Volume 215, July 2023, 111216.
- [12] Portakal-Uçar Z.G., Oglakci M., Correcher V., Sonsuz M., Can N., Halefoglu Y.Z., Topaksu M., “A thermoluminescence study of Tb³⁺ doped LaB₃O₆: Dosimetric characteristics and kinetic parameters”, Journal of Luminescence Volume 253, January, 119493, 2023.
- [13] Nayar R., Tamboli S., Sahu A. K., Nayar V., Dhoble S. J., “Synthesis and Luminescence Characterization of LaBO₃:Dy³⁺ Phosphor for Stress Sensing Application”, J Fluoresc, 27, 251–261, 2017.
- [14] Işık S., Lantanit Katkılı Borat Taneciklerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Lüminesans Özellikleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Adana, 2014.
- [15] (<https://www.etimaden.gov.tr/bor-elementi>)
- [16] Vij D. R., Sin N., “Luminescence and Related Properties of II-VI Semiconductors” Nova Science Publishers, Commack, NY, 1998.
- [17] Dramić M., Luminescence Thermometry: Methods, Materials, and Applications, Woodhead Publishing, 2018.

- [18] Çetin, A., Farklı metalik iyonlarla bombalanan ZnO örneklerinin fiziksel ve yapısal özelliklerinin nükleer, lüminesans ve diğer teknikler kullanılarak incelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, İzmir, 2007.
- [19] McKeever, S.W.S., Thermoluminescence of Solids. Cambridge University Press, England, 450pp, 1985.
- [20] Ohnenstetter D., Pagel M., Blanc P., Barbin V., Cathodoluminescence in Geosciences editör, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [21] Güvener, E., Katkılandırılmış Baryum Alüminat Fosforların Sentezi ve Termolüminesans Özelliklerinin Karakterizasyonu, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [22] Zwinkels J. C., Luminescence, National Research Council Canada, Ottawa, ON, Canada, 2022.
- [23] Vij D.R., Luminescence of solids, 1998, Plenum Press, New York, 426 pp.
- [24] Katı M. İ., Sam G., Keskin İ. Ç., Türemiş M., Çetin A., Kibar R., “Pembe Spodümenin Termolüminesans Özelliklerinin İncelenmesi ve Kinetik Parametrelerinin Hesaplanması”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 3, No: 2, 2016 (258-271).
- [25] Akçam G., Lepidolit ve Turmalinin Lüminesans Özelliklerinin ve Kinetik Parametrelerinin İncelenmesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [26] Sam G., Spodumenin Lüminesans ve Optik Soğurma Özelliklerinin İncelenmesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [27] Chen, R., McKeever, S.W.S., “Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena. World Scientific Publishing”, Singapore, s: 559, 1997.

[28] Erdemli D., Farklı İyon Katkılı Lityum Tetraborat Fosforların Optiksel Özelliklerinin ve Termolüminesans Mekanizmalarının İncelenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı, Doktora Tezi, İzmir, 2019.

[29] Yaman D., Disporsiyum Katkılı Çinko Borat Fosforların Termolüminesans Yöntemi Kullanılarak Dozimetrik Özelliklerinin İncelenmesi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2017.

[30] Oğlakçı M., AkçaÖzalp S., Portakal-Uçar Z.G., Correcher V., Benavente J.F., Sonsuz M., Can N., Halefoğlu Y.Z., Topaksu M., “Nd³⁺ katkılı lantan tri-borat fosforunun termolüminesans çalışması”, Alaşım ve Bileşikler Dergisi, Cilt 1013, 2025, 178570.

[31] Halefoğlu Y.Z., “Yanma yöntemi kullanılarak sentezlenen LaB₃O₆: Eu³⁺ fosforunun lüminesans özellikleri ve karakterizasyonu”, Uygulamalı Radyasyon ve İzotoplar, Cilt 148, Haziran 2019, Sayfalar 40-44.

[32] Wu X. , Jiang C., Liang Z. , Wang Q. , Feng J. , Zhu D., Pan S., Lin Z., Tan D., Mu Z., “Beyaz ışık yayan diyotlar için LaB₃O₆ : Dy³⁺ fosforlarının fotolüminesans özellikleri”, Cilt 216 ,Ağustos 2020, 164877.

[33] Qin C., Qin L. , Chen G. , Lin T., “Tek boyutlu Eu³⁺ ve Tb³⁺ katkılı LaBO₃ nanofiberler: Üretim ve geliştirilmiş lüminesans performansları”, Malzeme Mektupları, Cilt 106 , 2013, Sayfalar 436-438.

[34] Guan L., Wang L., Chen W. , Jin L. , Li X. , Guo Q. , Yang Z. , Fu G., “Kırmızı fosforun (M₃BO₆ :Eu³⁺ (M=La, Y)) üretimi ve lüminesans özellikleri”, Nadir Topraklar Dergisi, Cilt 28, Aralık 2010, Sayfalar 295-298.

[35] Gawande A.B., Sonekar R.P., Ummanvvar S.K., “Fototerapi uygulamaları için dar bantlı UVB yayan borat fosforları LaB₃O₆: Bi, Gd ve YBaB₉O₁₆ : Bi ,Gd'nin yanma sentezi”, Cilt 127, Sayı 8 ,Nisan 2016, Sayfalar 3925-3927.

[36] Oğlakçı M., Portakal- Uçar Z.G., Akça-Özalp S., Correcher V., Benavente J.F., Sonsuz M., Kan N., Halefoğlu Y.Z., Topaksu M., “Dozimetri uygulamaları için Ce³⁺

katkılı lantan tri-borat fosforunun termolüminesans davranışı”, Seramik Uluslararası, Cilt 49, Sayı 22, Bölüm B ,2023, Sayfalar 36092-36102.

[37] Lin X., Xiong F., Çen Y., Gong X., Liao J., Huang Y., “Pr³⁺: LaB₃O₆ tekkristalinin büyümesi ve spektralözellikleri”, Kristal Büyüme Dergisi, Cilt 280, Sayılar 1–2, 2005, Sayfalar 113-117.

[38] Ergin M., Garip M., Özdemir Ö., “İndirgen Yanma Sentezi Yöntemi ile Ti-Al-B Esaslı Kompozit Üretimi”, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2014, sayfa 489-490.

[39] Halefoğlu Y.Z., Işık S., “Yanma yöntemi ile lantanit katkılı borat nano taneciklerin sentezi ve lüminesans özelliklerinin incelenmesi”, Bor Dergisi, 79 - 86, 2018.

[40] Kuş O, Cu Katkılı ZnS Nanoyapıların Üretilmesi Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ağustos, 2019.

[41] Deniz E, Çiğ Sığır Eti Karışımlarında Farklı Türlerle Ait Etlerin Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi (FT-IR) Spektroskopisi İle Belirlenmesi, Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2018.

[42] Mahesh K., Weng P.S., Furetta C., “Thermoluminescence in Solids and Its Applications”, Nuclear Technology Pub, 306 pp, 1989.

[43] McKeever S.W.S., Moscovitch M. and Townsend, “Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses. Journal of Radiological Protection”, P.D. (1995), 16, No. 4.

[44] Sonsuz, M., Katkısız ve Evropiyum (Eu⁺³) Katkılı LaBO₃ Kristallerinin Termolüminesans Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana, 2022.

[45] Akça S., YBO₃ Fosforunun Termolüminesans Dozimetrik Pikinin Kinetik Parametreleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 2020, 15(1): 100-109.

[46] Sarıkcı S., Samaryum (Sm^{3+}) ve Evropiyum (Eu^{3+}) Katkılanmış SrGd_2O_4 'ün Karakterizasyonu ve Termolüminesans Özelliklerinin Belirlenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana, 2022.

[47] Akın A., Dy ve Li Katkılanmış CaSO_4 ile Dy Katkılanmış CaB_4O_7 Termolüminesans Malzemelerin Kinetik Parametrelerinin İncelenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Nükleer Bilimler Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009.



