ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EUROPYUM (Eu) KATKILI GADALONYUM LUTESYUM OKSİT ŞEFFAF SERAMİK SİNTİLATÖR HAZIRLANMASI

Özlem ABAY

FİZİK ANABİLİM DALI

ANKARA
2021

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EUROPYUM (Eu) KATKILI GADALONYUM LUTESYUM OKSİT ŞEFFAF SERAMİK SİNTİLATÖR HAZIRLANMASI

Özlem ABAY

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Serap SAFRAN
II. Danışman: Doç. Dr. Erhan AKSU

Sintilatörler, parçacıkların ve diğer radyasyon çeşitlerinin algılanmasını sağlayan saydam malzemelerdir. Sintilatörler bir enerji tarafından uyarıldıktan sonra, bu enerjiyi görünür ışığa dönüştürürler. Bu tez çalışmasında Eu^{+3} (europyum) katkılı (Gd, Lu)$_2O_3$ (gadalonyum lutesyum oksit) fazına sahip yeni nesil şeffaf seramik sintilatör malzemesi çözelti yanma yöntemi ile iki seri halinde üretilmiştir. İlk seride Lu_2O_3 miktarı %10, % 20, % 40, % 80, %95 olacak şekilde 5 farklı, ikinci seride ise Lu_2O_3 miktarı %130, % 150 olacak şekilde değiştirilerek 2 farklı (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkları üretildi.

Hazırlanan seramik tozların karakterizasyon işlemi ve optik özellikleri için fotolüminesans spektroskopisi (PL), x-ışını difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Yapıdaki mevcut fazları belirlemek ve tane boyutlarını elde etmek için toz X-ışını desenleri alınmıştır. Uyarma ve emisyon spektrumları, fotolüminesans spektroskopisi (PL) kullanılarak karakterize edilmiştir. Yüzey morfolojisi için x1500 büyütmede SEM görüntüleri alınmıştır.

Üretilen seramik tozlar içinden uygun karakterizasyona sahip olanlar seçildi ve toz metalurjisi yöntemi ile parçacıklara şekil vermek için kalıplarda istenilen teknik değerlere uygun basınçlarda sıkıştırıldı. Toz parçacıkları arasında bağlantıyı kurmak amacıyla sıkıştırılmış toz karışım belirli bir sıcaklıkta sinterlendi. Yoğunluğu artırmak ve yüksek şeffaflığı sağlamak için sinterlenmiş seramik diskler sıcak izostatik presleme (HIP) işlemine tabi tutularak amaçlanan şeffaf seramik sintilatör malzemesi üretilmeye çalışılmıştır.

Üretilen bu yeni nesil şeffaf seramik sintilatör malzemesi ile tıbbi amaçlı kullanılan X-ışını görüntüleme sistemlerinde dedektör malzemesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır.

Ocak 2021, 99 sayfa

Anahtar Kelimeler: (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3}, şeffaf seramik sintilatör, sintilasyon

ABSTRACT

Master Thesis

PREPARATION OF EUROPIUM (Eu) DOPED GADOLINIUM LUTETIUM OXIDE TRANSPARENT CERAMIC SCINTILLATOR

Özlem ABAY

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serap SAFRAN
Co- Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erhan AKSU

Scintillators are transparent materials that allow particles and other types of radiation to be detected. After being stimulated by an energy, scintillators convert this energy into visible light. In this thesis, a new generation transparent ceramic scintillator material with Eu^{+3} (europium) doped $(Gd, Lu)_2O_3$ (gadalonium lutetium oxide) phase was produced in two series by solution combustion method. In the first series Lu_2O_3 amount was cahanged %10, % 20, % 40, % 80, %95 and, in the second series Lu_2O_3 amount was cahanged %130, %150 particle powders were produced.

Photoluminescence spectroscopy (PL), x-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM) were used for the characterization process and optical properties of the prepared ceramic powders. Powder X-ray patterns were taken to determine existing phases in the structure and to obtain grain sizes. Excitation and emission spectra were characterized using photoluminescence spectroscopy (PL). SEM images were taken with x1500 magnitude for the surface morphology.

Each set of powder with appropriate characterization was ground and pressed into pellets 13 mm in diameter under suitable pressure by using a hydraulic press. The compacted powder mixture was sintered at a specific temperature to establish the connection between powder particles. In order to increase the density and provide high transparency, the sintered ceramic discs are subjected to hot isostatic pressing (HIP) process to produce the intended transparent ceramic scintillator material.

This new generation transparent ceramic scintillator material is intended to be used as a detector material in medical X-ray imaging systems.

january 2021, 99 pages

Key Words: $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$, transparent ceramic scintillator, scintillation

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada yardım ve desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden her zaman yararlandığım, her konuda beni yönlendiren Saygıdeğer hocam sayın Doç. Dr. Serap SAFRAN'a (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) ve eş danışmanım Doç. Dr. Erhan AKSU'ya (TENMAK-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü) en derin saygılarımla teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında malzemelerin üretimi ve karakterizasyon çalışmalarında bana yardım edip yol gösteren kıymetli çalışma arkadaşlarım Dr. Haydar DİŞBUDAK (TENMAK), Dr. Selen Nimet GÜNER GÜRBÜZ (TENMAK-Radyasyon ve Malzeme Teknolojisi Birimi) ve Kimyager İsmail OKUMUŞ'a (TENMAK) en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, bana inanan ve güvenen sevgili eşim Bekir ABAY'a, ablam Ayşe ÇİFTÇİ COŞGUN'a ve biricik kızım İrem ABAY'ya şükranlarımı sunarım.

Özlem ABAY
Ankara, Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
TEŞEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER DİZİNİ ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
2. TEMEL KAVRAMLAR **6**
2.1 Radyasyon Nedir? **6**
2.2 Radyasyon Tipleri **8**
2.2.1 Alfa radyasyonu **8**
2.2.2 Beta radyasyonu **9**
2.2.2.1 β^- bozunması veya elektron yayınımı **9**
2.2.2.2 β^+ bozunması veya pozitron yayınımı **10**
2.2.2.3 Çekirdeğin elektron yakalaması **10**
2.2.3 Gama radyasyonu **11**
2.2.4 Nötronlar **12**
2.3 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi **12**
2.3.1 Alfa parçacıklarının madde ile etkileşimi **12**
2.3.2 Beta parçacıklarının madde ile etkileşimi **14**
2.3.3 Gama radyasyonun madde ile etkileşimi **15**
2.3.3.1 Fotoelektrik olay **16**
2.3.3.2 Compton saçılması **17**
2.3.3.3 Çift oluşum **19**
2.3.3.4 Gama radyasyonu lineer zayıflatma katsayısı **20**
2.3.4 Nötronların madde ile etkileşimi **21**
2.3.4.1 Nötronların etkileşim mekanizmaları **22**
2.3.4.2 Elastik saçılma **22**
2.3.4.3 Elastik olmayan saçılma **23**

2.4 Radyasyon Dedektörleri 23
2.4.1 Gazlı dedektörler 24
2.4.1.1 Yeniden birleşme 26
2.4.1.2 İyon odası 26
2.4.1.3 Orantılı sayaç 26
2.4.1.4 Geiger-Müller bölgesi 26
2.4.1.5 Deşarj bölgesi 27
2.4.2 Yarı iletken dedektörler 27
2.4.3 Sintilasyon dedektörleri 29
2.4.3.1 Organik sintilatörler 30
2.4.3.1.1 Organik kristal sintilatörler 32
2.4.3.1.2 Organik sıvı sintilatörler 33
2.4.3.1.3 Plastik sintilatörler 33
2.4.3.2 İnorganik sintilatörler 35
2.4.3.2.1 İnorganik kristal sintilatörler 35
2.4.3.2.2 İnorganik seramik sintilatörler 37
2.5 Lüminesans 38
3. SERAMİK SİNTİLATÖR MALZEME SENTEZLEME YÖNTEMLERİ 40
3.1 Tek Kristal Sintilatör Üretimi (Czochralski veya Bridgement Yöntemleri) 40
3.2 Polikristal Seramik Malzemelerin Üretimi 40
3.2.1 Seramik tozların sentezi 40
3.3 Şeffaf Seramik Sintilatör Malzemesinin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmesi 42
3.3.1 Presleme 42
3.3.1.1 Tek eksen presleme 42
3.3.1.2 İzostatik presleme 43
3.3.1.2.1 Soğuk izostatik presleme (CIP) 44
3.3.1.2.2 Sıcak izostatik presleme (HIP) 45
3.3.2 Sinterleme 46
4. MATERYAL VE YÖNTEM 48
4.1. Hammadde ve Üretim Yöntemi 48
4.1.1 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların çözelti yanma sentezi ile üretimi ve kalsinasyon işlemi 49
4.1.1.1 Çözelti yanma yöntemi 49

4.1.1.2 Etüv işlemi 50

4.1.1.3 Kalsinasyon işlemi 51

4.1.1.4 Karakterizasyon işlemi 53

4.1.2 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör parçacıklara toz metalurjisi yönteminin uygulanması 53

4.1.2.1 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör parçacıklara tek eksen pres işlemi 54

4.1.2.2 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere CIP işlemi uygulaması 54

4.1.2.3 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere sinterleme işlemi 55

4.1.2.4 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere HIP işlemi uygulanması 56

4.1.2.5 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere zımparalama ve parlatma işlemi 57

5. ARAŞTIRMA BULGULARI 59

5.1 İlk Seri Olarak Üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ Parçacıklara Ait Ölçümler 59

5.1.1 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların XRD analizleri 59

5.1.2 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklarına ait parçacık boyutlarının hesaplanması 63

5.1.3 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklarının PL analizleri 69

5.1.4 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların toz metalurjisi yöntemi sonrasında yoğunluk yüzdesinin hesaplanması 76

5.1.4.1 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan tek eksen pres işlemi 76

5.1.4.2 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan CIP işlemi 76

5.1.4.3 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan sinterleme işlemi 77

5.2 İkinci Seri Olarak Üretilen Lu_2O_3 Miktarı % 130 ve 150 Olan Parçacıklar 78

5.2.1 İkinci seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı % 130 ve 150 olan parçacıkların XRD analizleri 79

5.2.2 İkinci seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı % 130 ve 150 olan parçacıkların PL analizleri 81

5.2.3 İkinci seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı % 130 ve % 150 olan parçacıkların toz matalurjisi yöntemi sonrasında yoğunluk yüzdesi hesaplanması 83

5.2.3.1 İkinci seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan tek eksen pres işlemi 83
5.2.3.2 İkinci seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan CIP işlemi..... 84
5.2.3.3 İkinci seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan sinterleme işlemi..... 85
5.2.3.4 İkinci seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan HIP işlemi 87
5.2.3.5 İkinci seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara HIP işlemi sonrasında XRD analizi..... 88
5.2.3.6 İkinci seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara HIP işlemi sonrasında SEM analizi..... 89
6. TARTIŞMA VE SONUÇ..... 91
KAYNAKLAR 95
ÖZGEÇMİŞ..... 99

SİMGELER DİZİNİ

A	Kütle numarası
α	Alfa
β	Beta
γ	Gama
ρ	Yoğunluk
τ	Soğurma katsayısı
μ	Lineer zayıflatma katsayısı
μ_m	Kütle zayıflatma katsayısı
λ	Dalgaboyu
E_X	Geri tepen çekirdeğin uyarılma enerjisi
F	Kuvvet
n	Nötron
p	Proton
Z	Atom numarası

Kısaltmalar

CIP	Soğuk izostatik pres
CT	Bilgisayarlı Tomografi
HIP	Sıcak izostatik pres
IR	Kızılötesi
PL	Fotolüminesans
PMT	Fotoçoğaltıcı Tüp
RE	Nadir toprak elementi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UV	Ultraviyole
XRD	X-Işını Difraktometresi
Zeff	Effektif atom numarası

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektromanyetik radyasyonun enerji spektrumu 7
Şekil 2.2 Radyoaktif bozunmada gama ışınlarının yayımlanması 11
Şekil 2.3 Alfa parçacıklarının kaynaktan çıktıktan sonar izlediği yol 13
Şekil 2.4 Farklı alfa kaynaklarının havada kat ettikleri mesafeye bağlı malzeme içerisinde meydana getirdikleri iyon çifti miktarı 13
Şekil 2.5 Beta parçacığının yayımladığı bremsstrahlung ışıması 14
Şekil 2.6 Gama fotonlarının malzeme ile etkileşim mekanizmaları 16
Şekil 2.7 Fotoelektrik olayı 17
Şekil 2.8 Compton saçılması 18
Şekil 2.9 Çift oluşumu 19
Şekil 2.10 Gelen radyasyonun madde tarafından tutulması 21
Şekil 2.11 Elastik saçılma 22
Şekil 2.12 Elastik olmayan saçılma 23
Şekil 2.13 Gazlı dedektör sistemi 25
Şekil 2.14 Gazlı dedektörlerin çalışma bölgeleri 25
Şekil 2.15 Geiger - Müller dedektörü 27
Şekil 2.16 Yarıiletken dedektör şeması 29
Şekil 2.17 Sintilatör çeşitleri 30
Şekil 2.18 Bir molekülün tipik enerji diyagramı 31
Şekil 2.19 İnorganik kristaller için bant şeması 36
Şekil 2.20 Sintilatör malzemeler 37
Şekil 2.21 Jablonski Diyagramı 38
Şekil 3.1 İzostatik presleme a. tek eksenli pres, b. soğuk izostatik pres 43
Şekil 3.2 Soğuk izostatik presleme 44
Şekil 3.3 Sıcak izostatik presleme 45
Şekil 3.4 Sinterleme ile boyun oluşumu 47
Şekil 3.5 Gözenek yapısının değişimi 47
Şekil 4.1 Numune sentez adımları, a. Çözelti hazırlanması, b. Organik gazı çıkışı, c. Jelleşme işlemi 50
Şekil 4.2 Jelleşme işlemi, a. Jelleşen malzeme, b. Etüv cihaz, c. Etüv'den çıkartılan malzeme 51
Şekil 4.3 Kalsinasyon işlemi, a. Kalsinasyon yapılacak malzeme, b. 500 ^{0}C'de Bekletilen malzeme, c. Kalsinasyon işleminden sonra elde edilen parçacıklar 52
Şekil 4.4 Seramik tozlar, a. Agatta öğütülen seramik tozlar, b. Hassas terazi c. Kod verilerek şişelenen parçacıklar 52
Şekil 4.5 Şekil verme işlemi, a. Kalıp, b. Tek eksen pres makinesi, c. Peletlenmiş malzeme 54
Şekil 4.6 CIP işlemi, a. Sızdırmazlığın sağlanmış malzeme, b. CIP makinesi, c. CIP işlemi sonrası malzeme 55
Şekil 4.7 Sinterleme işlemi, a. Sinterleme öncesi seramik sintilatör malzemeler, b. Sinterleme cihazı, b. Sinterleme sonrası seramik sintilatör malzemesi 56

Şekil 4.8 HIP işlemi, a. HIP'e girecek malzeme ve gömme tozu, b. Gömme tozu ile kapatılmış malzeme, c. HIP cihazına konulmuş malzeme 57
Şekil 4.9 HIP işlemi sonrası seramik sintilatör malzemeler 57
Şekil 4.10 Zımparalama ve parlatma işlemi sonrası seramik sintilatör malzemeler 58
Şekil 5.1 Lu010-800, Lu010-900 ve Lu010-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği 60
Şekil 5.2 Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği 60
Şekil 5.3 Lu040-800, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği 61
Şekil 5.4 Lu080-800, Lu080-900 ve Lu080-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği 61
Şekil 5.5 Lu095-800, Lu095-900 ve Lu095-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği 62
Şekil 5.6 Lu_2O_3 miktarı % 10 olan $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara a.800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri 63
Şekil 5.7 Lu_2O_3 miktarı % 20 olan $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara a. 800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri. 64
Şekil 5.8 Lu_2O_3 miktarı % 40 olan $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara a. 800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri 65
Şekil 5.9 Lu_2O_3 miktarı % 80 olan $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara a.800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000^0 C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri 66
Şekil 5.10 Lu_2O_3 miktarı % 95 olan $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara a. 800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri 67
Şekil 5.11 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları 68
Şekil 5.12 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara ait a. Uyarılma b. Emisyon pikler 69
Şekil 5.13 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu010-800, b. Lu010-900, c. Lu010-1000 parçacıkları 70
Şekil 5.14 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu020-800, b. Lu020-900, c. Lu020-1000 parçacıkları 71
Şekil 5.15 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu040-800, b. Lu040-900, c. Lu040-1000parçacıkları 72
Şekil 5.16 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu080-800, b. Lu080-900, c. Lu080-1000 parçacıkları 73
Şekil 5.17 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu095-800, b. Lu095-900, c. Lu095-1000 parçacıkları 74
Şekil 5.18 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklarının kalsinasyon sıcaklığına bağlı olarak verilen 612 nm' deki emisyon yoğunlukları 75
Şekil 5.19 Sinterleme sonrası Lu020-800 ve Lu020-900 kodlu malzemelerin XRD grafiği 78
Şekil 5.20 C1, C2, C3 ve C4 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği 80

Şekil 5.21 E1 ve E2 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıkta sonra ölçülen XRD grafiği 80
Şekil 5.22 $\lambda_{em.}$=612nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. C1=C3, b. C2=C4 parçacıkları 82
Şekil 5.23 $\lambda_{em.}$=612nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. E1, b. E2 parçacıkları 82
Şekil 5.24 Seramik sintilatör malzemelere uygulanan sinterleme sıcaklığı ve süresi..... 85
Şekil 5.25 C1, C2, C3 ve C4 kodu verilen seramik sintilatör malzemelere HIP, zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında ölçülen XRD grafiği..... 88
Şekil 5.26 E1 ve E2 kodu verilen seramik sintilatör malzemelere HIP, zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında ölçülen XRD grafiği..... 89
Şekil 5.27 Seramik sintilatör malzemelerinin SEM görüntüsü a. C3, b. C4, c.E1, d.E2 90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Elektromanyetik spektrumda farklı tipteki elektromanyetik radyasyonların enerji ve dalga boyları 8
Çizelge 2.2 Nötronların enerjiye bağlı sınıflandırılması 12
Çizelge 2.3 Organik sintilatör çeşitlerinin özelliklerinin karşılaştırılması 32
Çizelge 2.4 Bazı radyasyon tipleri ve dedeksiyonda kullanılan plastik sintilatör çeşitleri 34
Çizelge 4.1 Elementler ve ağırlıkları ile bileşiklerin saflıkları ve atomik ağırlıkları 48
Çizelge 4.2 Yaklaşık 10 gram numune hazırlığı için başlangıçta reaksiyona girecek madde miktarları 49
Çizelge 4.3 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara verilen kodlar 53
Çizelge 4.4 Zımparalama ve parlatma işlemi aşamaları 58
Çizelge 5.1 Lu010-800, Lu010-900 ve Lu010-1000 kodlu $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları 64
Çizelge 5.2 Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodlu $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları 65
Çizelge 5.3 Lu040-800, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodlu $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları 66
Çizelge 5.4 Lu080-800, Lu080-900 ve Lu080-1000 kodlu $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları 67
Çizelge 5.5 Lu095-800, Lu095-900 ve Lu095-1000 kodlu $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları 68
Çizelge 5.6 CIP sonrası elde edilen yoğunluk yüzdesi değerleri 76
Çizelge 5.7 Sinterleme sonrası elde edilen yoğunluk yüzdesi değerleri 77
Çizelge 5.8 Lu_2O_3 miktarı % 130 ve 150 olan $(Gd, Lu)_2O_3: Eu^{+3}$ parçacıklara verilen kodlar 79
Çizelge 5.9 C1,C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu parçacıklara ait parçacık boyutları 81
Çizelge 5.10 C1, C2, C3, C3, E1 ve E2 kodlu parçacıklarının 612 nm'deki emisyon yoğunlukları 83
Çizelge 5.11 Tek eksen pres işlemi sonrası C1, C2, C3, C3, E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri 84
Çizelge 5.12 CIP işlemi sonrası C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri 84
Çizelge 5.13 C1, C2, C3 ve C4 kodlu malzemelere uygulanan sinterleme sıcaklığı ve süreleri 85
Çizelge 5.14 Sinterleme işlemi sonrası C1, C2, C3 ve C4 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri 86
Çizelge 5.15 Sinterleme işlemi sonrası E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri 86
Çizelge 5.16 HIP işlemi sonrası C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri 87

1. GİRİŞ

Sintilatörler, parçacıkların ve diğer radyasyon çeşitlerinin algılanmasını sağlayan saydam malzemelerdir. Radyasyon bir sintilatöre çarptığında, malzeme radyasyon enerjisinin bir kısmını emer ve bir ışık parlaması oluşturarak görünür ışığa dönüştürür. En küçük sintilasyon miktarı bile, son teknoloji ürünü foto dedektörlerde bir sinyali tetikleyebilir. Sintilasyon dedektörleri tıbbi görüntüleme, bagaj tarama, petrol ve doğalgaz arama, nükleer güç istasyonlarının izlenmesi ve yüksek enerji fiziği gibi çeşitli alanlarda kullanılır (Pla-Dalmau 2009).

1895 yılında Willhelm Conrad Röntgen'in x-ışınlarının keşfiyle, x-ışınları tespiti ve araştırılması için farklı malzemeler kullanılmaya başlandı. İlk sintilatör olarak nitelendirilebilecek olan ZnS (Çinko Sülfür) Crookes ve Rutherford tarafından, Uranil tuzları ise Becquerel tarafından x-ışınlarının yapısını daha iyi inceleyebilmek için kullanıldı. Bunların sonucu olarak insanlık yeni ve daha verimli sintilatör malzemeler aramaya başladı (Blasse ve Grabmaier 1994).

Sintilatör malzemelerin görüntüleme amacıyla kullanımı ile ilgili 1948 yılında Hofstadter tarafından geliştirilen talyum katkılı sodyum iyodür (NaI:Tl) üretildi. Bu malzeme patenti alınan ilk sintilatör malzeme olarak tarihe geçti. NaI:Tl günümüzde bile geniş kullanım alanı bulan bir sintilatördür. Büyük bir NaI:Tl plaka, birkaç fotoçoğaltıcı tüp (PMT) tarafından okunmakta olup, görüntülerin nispeten hassas bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Bu buluş, nükleer tıp görüntüleme alanında benzersiz bakış açıları sunarak, daha sonraki çalışmalara öncülük etmiştir. Bizmut germanyum oksit (BGO)'in sintilasyon özellikleri 1973 yılında Weber ve Monchamp tarafından keşfedilmiştir. BGO γ-ışını medikal görüntüleme pazarının çok büyük bir bölümünde kullanılmaktadır. Sintilatör malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar ile günümüzde seramik sintilatör malzemeler ön plana çıkmaktadır. Bu alanda özellikle nadir toprak elementleri elektronik özelliklerinden dolayı dikkat çekmektedir (Lecoq vd. 2017).

Sintilatörler günümüzde tıbbi görüntüleme cihazlarında, astrofizik, parçacık ve yüksek enerji fiziğinde, güvenlik taramaları, tahribatsız muayene ve diğer radyasyon ölçümlerinde kullanılmaktadır (Greskovich ve Duclos 1997). Bunlar arasında tıbbi görüntüleme en önemli uygulama alanlarından biridir. Şu anda, tıbbi görüntüleme ekipmanları arasında gadalonyum oksit sülfür (Gd_2O_2S:Pr, Ce, F), itrium gadalonyum oksit ($(Y,Gd)_2O_3$:Eu, Pr), kadmiyum tungestat ($CdWO_4$) gibi malzemeler x-ışını görüntüleme cihazlarında, bizmut germanyum oksit (BGO), seryum katkılı lutesyum itrium oksiorthosilikat LYSO ($Lu_{1,8}Y_{0,2}SiO_5$:Ce), lutesyum oksiorthosilikat LSO (Lu_2SiO_5), talyum katkılı sezyum iyodür (CsI:TI), gadalonyum oksiorthosilikat GSO (Gd_2SiO_5) gibi malzemeler ise pozitron emisyon tomografi (PET) cihazında kullanılmaktadır.

1990'larda katkılanmış nadir toprak elementlerinin oksitleri, sintilatör malzemeleri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Skandiyum (Sc, atom numarası 21), itriyum (Y, atom numarası 39) ve lantanit serisi elementler [lantanit' den (La, atom numarası 57)'den lutesyum'a (Lu, atom numarası 71)] nadir toprak elementleri (Rare-Earth (RE)) olarak adlandırılırlar ve bu elementlerin oksitlerine nadir toprak oksitleri denir. Bu oksitler camları renklendirmek için katkı maddesi, camlarda morötesi (UV) emici malzeme, kimyasal reaksiyonlarda katalizör, fosforesans maddelerde aktivatör ve/veya hassaslaştırıcı, optik fiberlerde katkı maddesi, üç renkli floresan lambalarda ışık yayıcı ve nükleer reaktörlerde nötron emici olarak pek çok farklı uygulamada geniş kullanım alanlarına sahiptir (Mahajan 2010).

Eu^{+3} (europyum) katkılı Lu_2O_3 (lutesyum oksit) ve Gd_2O_3 (gadalonyum oksit) malzemeler radyografi, lazerler ve optik lensler gibi uygulamalarda benzersiz potansiyele sahip iyi bilinen sintilasyon malzemeleridir (Roy vd. 2013).

Lu, Gd, Eu gibi nadir toprak elementlerinin oksitleri genellikle monoksit (REO), dioksit (REO_2) ve sesquioksit (RE_2O_3) olmak üzere üç farklı yapıda bulunurlar. Nadir toprak elementlerinin çoğunda, üç değerli iyonların (RE^{+3}) oluşturduğu sesquioksit yapı, termal ve kimyasal olarak en kararlı yapıdır. Lu^{+3} iyonlarının 4f orbitalleri tamamen dolu, RE^{+3}

iyonlarının (Ce^{+3}'dan Yb^{+3}'ya) 4f orbitalleri kısmen dolu iken, RE^{+3} iyonlarının (Sc^{+3}, Y^{+3}, La^{+3}) 4f orbitalleri boştur. Lantanit RE^{+3} iyonlarının (La^{+3}'den Lu^{+3}'a) temel durum elektronik konfigürasyonları $[Xe]4f^n$ (n=0-14) şeklinde simgelenmiştir. RE^{+3} iyonları, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde ya da görünür bölge yakınında, kendi temel durum elektronik konfigürasyonlarından kaynaklanan emisyon geçiş enerjilerine sahiptir (Blasse 1979). Bundan dolayı, bu iyonların emisyon pikleri, görünür spektral bölgede veya bu bölge yakınındadır. RE^{+3} iyonlarını içeren nadir toprak sesqui oksitleri (RE_2O_3) bu iyonlara ait karakteristik, keskin emisyon pikleri gösterir. RE^{+3} iyonları, geniş bir renk yelpazesinde emisyon yaptığı ve oksitleri çok kararlı olduğu için, bu nadir toprak oksitleri optik özellikleri açısından bakıldığında iyi lüminesans malzemelerdir. Nadir toprak sesqui oksitleri, elektronik konfigürasyonlarından kaynaklanan mükemmel dielektrik özellikleri ile de bilinirler (Kwo vd. 2000).

Lu_2O_3 kübik kristalin yapıya sahip ilgi çekici sesquioksitlerin bir çeşididir. Yüksek performanslı sintilasyon dedektörleri için umut verici bir kristal materyal olarak son zamanlarda bilim insanlarının ilgisini çekmiştir (Seeley vd. 2013). Lu_2O_3'in üstünlüğü onun yüksek efektif atom numarası (Z_{eff} =69) ile yüksek yoğunluğa (9,43g/cm^3) sahip olması nedeniyle iyonlaştırıcı radyasyonun tespiti için olağanüstü güce sahip bir malzemedir (Zych 2002). Son zamanlarda, yüksek çözünürlükte çalışan bilgisayarlı tomografi (CT) cihazlarının dedektör ekranlarının geliştirilmesi için Eu^{+3} katkılı Lu_2O_3 ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Roy vd. 2013). Lu_2O_3:Eu seramik sintilatörün dijital x-ışını görüntüleme teknolojisi alanı içerisinde uygulamaları, CsI:TI ile karşılaştırılabilir ışık çıkışı ve 611 nm'deki emisyon dalga boyu ile spektral duyarlılığa daha iyi uyduğu bulunmuştur (Zych vd. 2002).

Lu_2O_3 çok yüksek ergime noktasına (Tm=2500°C) sahip olduğundan, tek kristal olarak üretilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, sinterleme ve sıcak izostatik pres işlemi gibi yöntemler ile tozlardan polikristalin Lu_2O_3:Eu (europyum katkılı lutesyum oksit) malzemeler elde edilmektedir (Roy vd. 2013).

Tek kristal sintilatörlerin aksine yaygın olarak kullanılan polikristal şeffaf seramik sintilatörler düşük maliyetli, yüksek yoğunluklu ve aktif iyonların homojen dağılması

gibi çeşitli avantajlar sunması nedeniyle tercih edilmektedir. Kübik faz europyum katkılı gadalonyum oksit (Gd_2O_3:Eu) mükemmel bir sintilatördür. Europyum katkılı gadalonyum oksit (Gd_2O_3:Eu)'in ham maddesi europyum katkılı lutesyum oksit (Lu_2O_3:Eu)' ten daha ucuzdur. Gd_2O_3' ün efektif atom numarası Z_{eff}=69 ve yüksek yoğunluğu (7,64 g/cm^3) ile ana malzeme olarak Lu_2O_3 ile benzerdir. Lu_2O_3:Eu ve Gd_2O_3:Eu fosfor görüntüleri kıyaslandığında Gd^{+3}'ın düşük elektronegatifliği nedeniyle güçlü fotolüminesans özellik gösterir. Ancak, Gd_2O_3'in 1260 ^{0}C'de kübik fazdan monoklinik faza dönüşmesi nedeniyle hazırlanması zordur (Warshaw ve Roy 1961).

Europyum katkılı gadolinyum lutesyum oksit (Lu, Gd)$_2O_3$:Eu^{+3} katı çözeltisi, x-ışını dedeksiyon teknolojisinde bir seramik sintilatör olarak geliştirilmiştir. (Lu, Gd)$_2$0$_3$:Eu^{+3} kübik yapısını koruduğu ve katı çözelti içindeki Lu oranının %40'a eşit olması durumunda yoğun ışıldamaya sahip saydam bir seramik sintilatör malzeme olarak üretilmiştir (Qin vd. 2009).

Europyum katkılı lutesyum oksit (Lu_2O_3:Eu^{+3}), Gd_2O_3 ile kullanıldığında fotolüminesans etkisinin artığı ve sintilasyon cevap süresinin azaldığı görülmüştür (Lu vd. 2013). (Lu, Gd)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarının üretimi ve karakterizasyonu üzerine araştırmalar yapılmıştır. Ancak (Lu,Gd)$_2O_3$:Eu^{+3} seramikleri üzerindeki çalışmalar Lu_2O_3:Eu^{+3} seramiklerinkinden çok daha azdır (Cao vd. 2017).

Şeffaf seramik sintilatör tozlarını hazırlamak için çok ince, küçük boyutta ve küresel tozların olması çok önemlidir. Gerekli tozları üretmek için yanma metodu, sol-jel metodu ve birlikte çöktürme metodu gibi çeşitli ıslak kimyasal sentez teknikleri kullanılmaktadır. Yanma metodu ile şeffaf seramiklere uygun olan yüksek kimyasal saflıkta ve spesifik yüzeyli oldukça ince homojen tozlar üretilebilir. Ayrıca, bu metot düşük maliyeti, yüksek enerji verimliliği ve yüksek üretim hızı gibi özelliklere sahiptir. Yanma metodu şeffaf seramik tozlarını ve diğer boyuta lüminesans materyalleri sentezlemek için kullanılmaktadır (Wu vd. 2010).

Bu çalışmada, $(Gd,Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ fazına sahip yeni nesil şeffaf seramik sintilatör malzemesi sentezlenmesi için, bugüne kadar birçok çalışmada kullanılan katı hal yöntemi dışında, daha kolay, ucuz ve verimli olan çözelti yanma yöntemi ile iki seri halinde $(Gd,Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklar üretilmiştir. İlk seride Lu_2O_3 miktarı % 10, % 20 , % 40, % 80, %95 olacak şekilde değiştirilerek 5 farklı $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$, ikinci seride ise Lu_2O_3 miktarı % 130, % 150 olacak şekilde değiştirilerek 2 farklı $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklar sentezlenmiştir. İlk seri olarak üretilen parçacıklar 800, 900 ve 1000^0C'de, ikinci seri olarak üretilen parçacıklar ise 900 ve 1000^0C sıcaklıklarda 2 saat kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ toz malzemeler x-ışını difraktometresi XRD, fotolüminesans (PL), taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazları ile karakterizasyonu ve optik özellikleri incelenmiştir. Sentezlenen parçacıklar toz metalurjisi yöntemi ile parçacıklara şekil vermek için kalıplarda istenilen teknik değerlere uygun basınçlarda sıkıştırılarak disk haline getirildi. Disk haline getirilen malzemeler farklı basınçlarda soğuk izostatik presleme (CIP) işlemine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklıklarda oksijen ortamında sinterlenen malzemeler TÜBİTAK SAGE'ye gönderilerek argon gazı ortamında sıcak izostatik pres (HIP) işlemlerine tabi tutulmuştur. Son olarak elde edilen diskler her iki yüzeyi parlatılarak cilalandı.

Elde edilen şeffaf seramik sintilatör malzemeler ileri teknoloji malzemeler olup, bu alanda yapılacak diğer çalışmalar neticesinde elde edilecek bilgi birikimi ve teknikler ile tıbbi görüntüleme cihazlarında sintilatör olarak kullanılmasının önü açılmış olacaktır.

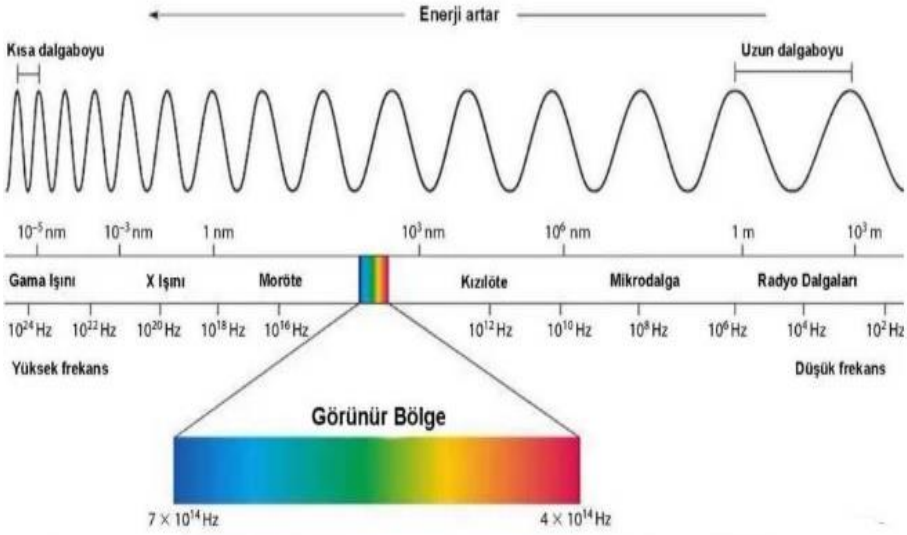
2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1 Radyasyon Nedir?

Radyasyon, kararsız atom çekirdeklerinin kararlı hale gelmek için yaptıkları ışımalardır. Bu ışımalar çekirdek kaynaklı olduğu için nükleer radyasyon olarak adlandırılır (Yener 2006).

Radyoaktif maddelerden açığa çıkan radyasyon temel olarak parçacık radyasyon ve elektromanyetik radyasyon olmak üzere olarak ikiye ayrılır. Alfa (α), beta (β^+, β^-) ve nötron bozunmaları parçacık radyasyonuna örnektir ve aynı zamanda nükleer (çekirdek) kaynaklı radyasyonlardır. Parçacık radyasyon belirli bir kütle ve enerjiye sahip taneciklerin yüksek hızla kazandıkları kinetik enerji olarak tanımlanır. Elektromanyetik radyasyon ise, gama (γ) ve x-ışınlarını içerir (Demir 2011). Gama terimi genelde çekirdek tarafından yayınlanan radyasyon için. X ışını terimi ise atomik elektronun geçişlerinden kaynaklanan radyasyon için kullanılır. Elektromanyetik radyasyonların frekansları çok yüksek, dalga boyları da çok kısadır. Elektromanyetik radyasyonların yükü ve kütleleri olmadığı için parçacık radyasyonlarından farklıdır ve ışık hızı ile hareket ederler (Lamarsh ve Baratta 2001).

Şekil 2.1'deki elektromanyetik spektrumda radyo dalgaları, mikro dalgalar, kızılötesi dalgalar, görünür ışık, morötesi dalgalar, x-ışınları ve gama ışınlarının bu spektrumda yer aldığı görülür. Elektromanyetik dalgaları birbirinden ayıran en önemli özelliği frekansları, dalga boyları ve enerjileridir.



Şekil 2.1 Elektromanyetik radyasyonun enerji spektrumu (Anonim 2020a)

Elektromanyetik spektrumda gama ve x-ışınlarının enerjileri çok yüksek ve dalga boyları en kısa olan radyasyon çeşididir. Görülebilir ışığın enerjisi birkaç eV'tur. X-ışınları ve gama ışınlarının enerjileri çok yüksek olduğu için madde ile etkileşmeleri elektromanyetik spektrumda diğer radyasyonlardan ayrılmaktadır.

Elektromanyetik spektrumda görülen mor ötesi (ultraviyole) radyasyonun üstünde enerjileri olanlara iyonlaştırıcı, mor ötesi radyasyonun altında enerjileri olanlara ise iyonlaştırıcı olmayan radyasyon denir (Demir 2011).

Çizelge 2.1'de elektromanyetik spektrumda farklı tipteki elektromanyetik radyasyonların enerji ve dalga boyları verilmektedir. İyonize olmayan radyasyonların enerjileri 20 eV'tan daha düşük olup bu ışınların etkisi iyonize radyasyonlardan tamamen faklıdır.

Çizelge 2.1 Elektromanyetik spektrumda farklı tipteki elektromanyetik radyasyonların enerji ve dalga boyları (Demir 2011)

Tip	Enerji (eV)	Dalga boyu
Elektrik güç	$< 10^{-11}$	10^{15} Å
Radyo, TV, radar	10^{-9} -10^{-3}	10^{-1} - 10^{5} cm
Kızılötesi	10^{-3} - 2	10^{-4} - 10^{-1} cm
Görünür ışık	2 - 3	4000 - 7000 Å
Mor ötesi	3 -25	50 - 4000 Å
X-ışınları	20 - 10^{5}	10^{-1} - 50 Å
γ ışınları	10^{4} - 10^{6}	10^{-2} - 1 Å

2.2 Radyasyon Tipleri

2.2.1 Alfa radyasyonu

Çekirdekte proton sayısı nötron sayısına göre çok fazla olduğunda, çekirdek kararsız durumdan karalı hale gelmek için alfa parçacığı yayımlamaktadır. Bu bozunmanın nedeni itici Coulomb kuvvetidir. Alfa parçacığı olarak adlandırılan yapı aslında atom çekirdeği tarafından yayınlanan pozitif yüklü helyum (${}_2^4He$) çekirdeğidir. Alfa bozunumu denklem (2.1) ile ifade edilir.

$$ {}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_{2}^{4}He \qquad (2.1) $$

Bu bozunumda çekirdek iki nötron ve iki proton kaybeder. Alfa bozunumu sonrasında atom numarası iki, kütle numarası 4 azalır (Nolan 2014).

2.2.2 Beta radyasyonu

Radyoaktif çekirdek içinde parçacık sayılarının dengesiz olması durumunda, bir protonun bir nötrona, bir nötronun bir protona dönüşmesi olayı meydana gelebilmekte veya çekirdek bir elektron yakalayabilmektedir. Bu olay beta bozunması olarak nitelenmektedir.

Eğer proton nötrona dönüşüyorsa, çekirdek içinde pozitif yük bir birim azalmakta ve protonlar arasındaki itme kuvveti azalmaktadır. Bunun aksine, çekirdek içinde bir nötron protona dönüşüyorsa çekirdek içindeki pozitif yükler bir birim artmakta ve protonlar arasındaki itme kuvveti artmaktadır. Bu şekilde, çekirdek içindeki itme kuvvetindeki artış veya azalış, çekirdek içinde denge sağlayarak, çekirdeğin kararlı hale geçmesini sağlamaktadır.

Böylece, beta bozunması üç yolla gerçekleşebilmektedir: β^- bozunması veya elektron yayınımı, β^+ bozunması veya pozitron yayınımı ve çekirdeğin elektron yakalaması (Chandra 2011).

2.2.2.1 β^- bozunması veya elektron yayınımı

Çekirdekteki kararsızlık nötron sayısının fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdek içindeki bir nötron, bir protona dönüşmekte ve fazla enerji çekirdek dışına bir elektron ve bir antinötrino parçacıkları yayınımı ile olmaktadır. β^- bozunması denklem (2.2) ile ifade edilebilmektedir.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \nu^- \qquad (2.2) $$

Bozunum sonrasında çekirdeğin kütle numarası değişmezken, atom numarası bir artmaktadır. Elektron ve antinötrino arasındaki enerji paylaşımı rastgele olduğundan, elektronlar farklı kinetik enerjilere sahip olmaktadır.

2.2.2.2 β^+ bozunması veya pozitron yayınımı

Çekirdekteki kararsızlık proton sayısının fazlalığından kaynaklanıyorsa; çekirdek içindeki bir proton, bir nötrona dönüşmekte ve fazla enerji çekirdek dışına pozitron ve nötrino yayınımı ile gerçekleşmektedir. Pozitron pozitif yüklü elektrondur. Kütlesi ve madde ile etkileşimi elektronla aynıdır. β^+ bozunması denklem (2.3) ile ifade edilebilmektedir.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + e^{+} + \nu \qquad (2.3) $$

Çekirdeğin pozitron yayınlaması sonrasında, çekirdeğin kütle numarası değişmez ancak atom numarası bir azalmaktadır (Chandra 2011). Elektron yayımlanmasında olduğu gibi pozitron yayınımı da bir spektrum şeklinde meydana gelmektedir.

2.2.2.3 Çekirdeğin elektron yakalaması

Bu bozunumda çekirdek içindeki bir proton, yörünge elektronlarından birini yakalayarak bir nötrona dönüşmektedir. Bu dönüşüm sonucunda sadece nötrino yayınımı olmaktadır. Çekirdeğin elektron yakalaması denklem (2.4) ile ifade edilebilmektedir.

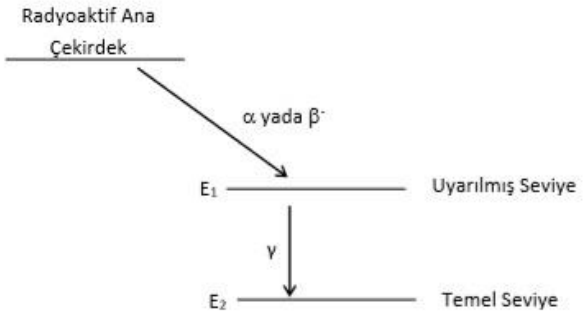
$$ {}^{A}_{Z}X + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \nu \qquad (2.4) $$

Çekirdeğin yörüngeden yakaladığı elektron sonrasında, yörüngede meydana gelen boşluğu bir üst seviyeden bir elektronun geçişi doldurmaktadır. Bu geçiş ile karakteristik X ışını yayınımı olmaktadır. Bu ışınlar madde içinde Auger elektronlarının oluşumuna da neden olmaktadırlar (Chandra 2011).

2.2.3 Gama radyasyonu

Bir çekirdeğin radyoaktif bozunması sırasında ürün çekirdek en düşük enerji seviyesinde yani temel durumda olmayabilmektedir. Diğer bir deyişle, ürün çekirdek temel durumun üstünde bir enerjide uyarılmış seviyede kalmaktadır. Oluşumundan çok kısa bir zaman sonra, yaklaşık 10^{-14} saniyede, uyarılmış çekirdek fazla enerjisini gama ışınları adı verilen elektromanyetik radyasyon şeklinde yayımlayabilmektedir.

Bu ışınlar x-ışınlarıyla benzer özelliklere sahip olup, kısa dalga boylu ve girici ışınlardır. Dalga boyları 10^{-9} ile 10^{-11} cm arasında değişmektedir. Gama ışınları foton olarak yayımlanmaktadır. Foton enerjisi, şekil 2.2'de gösterilen temel seviye ile uyarılmış seviyenin enerjileri arasındaki farka eşit olmaktadır.



Şekil 2.2 Radyoaktif bozunmada gama ışınlarının yayımlanması (Lamarsh ve Baratta 2001)

Foton enerjisi, denklem (2.5)'de verilmiştir.

$$E_\gamma = E_1 - E_2 \tag{2.5}$$

Eğer enerji aktarımı bir uyarılmış seviyeden temel seviyeye doğrudan doğruya oluyorsa, bir foton bütün uyarılma enerjisini taşımaktadır (Lamarsh ve Baratta 2001).

2.2.4 Nötronlar

Nötronlar protonlarla birlikte atom çekirdeği içindeki temel parçacıklardan biridir. Kütlesi protona yaklaşık olarak eşittir, ancak net yükleri yoktur. Nötronlar sahip oldukları enerji miktarına göre farklı adlandırılmaktadırlar. Çizelge 2.2'de nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması verilmiştir.

Nötron kaynaklarından çıkan nötronlar yüksek enerjili grupta yer almaktadır. Nötronlar farklı maddelerle etkileşerek enerjilerini kaybetmekte ve böylece düşük enerjili nötronlar elde edilmektedir.

Çizelge 2.2 Nötronların enerjiye bağlı sınıflandırılması (Martin 2006)

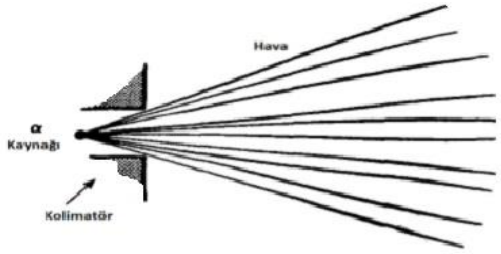
Nötron Tipi	**Enerji**
Soğuk nötronlar	< 0,003 eV
Yavaş (temel) nötronlar	0,003 eV-0,4 eV
Yavaş (epitermik) nötronlar	0,4 eV-100 eV
Orta nötronlar	100 eV-200 eV
Hızlı nötronlar	200 keV-10 MeV
Yüksek enerjili nötronlar	>10 MeV

2.3 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

2.3.1 Alfa parçacıklarının madde ile etkileşimi

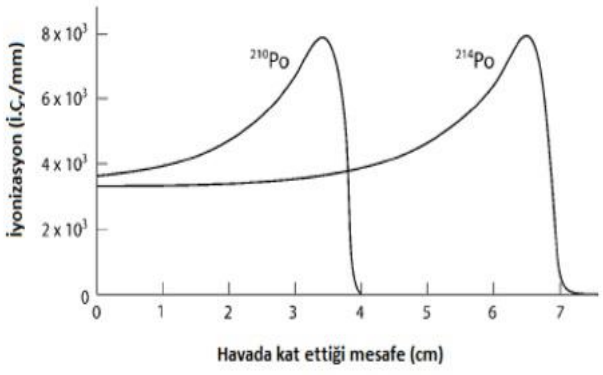
Alfa parçacıkları madde içerisinden geçerken sahip oldukları pozitif yük ile yörünge elektronların sahip olduğu negatif yük arasındaki Coulomb kuvveti ile etkileşmektedirler. Alfa parçacıklarının uyguladığı bu çekim kuvveti ile elektronlar bir üst enerji seviyesine geçebildikleri gibi, yörüngeden kopup serbest hale de geçebilmektedirler. Meydana gelen her etkileşme sonucu alfa parçacığının enerjisi

azalmakta ve belli bir mesafede durdurulmaktadırlar. Şekil 2.3'de kaynaktan çıkan alfa parçacıklarının izlediği yol verilmektedir. Bu yol yaklaşık olarak doğrusaldır. Çünkü etkileşmelerde alfa parçacığı kayda değer bir saçılmaya uğramamaktadır.



Şekil 2.3 Alfa parçacıklarının kaynaktan çıktıktan sonar izlediği yol (Knoll 2002)

Alfa parçacıklarının madde içinde tamamen soğuruldukları mesafe olan "menzil" tanımı yapılmaktadır (Knoll 2002). Bu bağlamda, alfa parçacıklarının menzili kısa olmaktadır. Malzeme içerisinde tüm enerjisini kaybeden alfa parçacıkları, iki yörünge elektronu alarak helyum atomuna dönüşmektedir. Şekil 2.4'de iki farklı alfa kaynağının hava içerisinde oluşturdukları iyonizasyonun havada kat ettikleri mesafe ile değişimi görülmektedir. Burada verilen alfa kaynakları ^{210}Po (5,304 MeV) ve ^{214}Po (7,687 MeV)'dir.



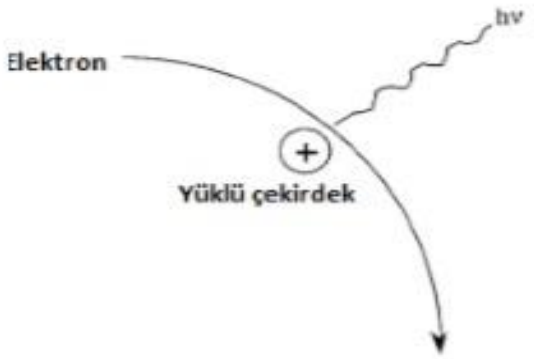
Şekil 2.4 Farklı alfa kaynaklarının havada kat ettikleri mesafeye bağlı malzeme içerisinde meydana getirdikleri iyon çifti miktarı (Martin 2006)

2.3.2 Beta parçacıklarının madde ile etkileşimi

Beta parçacıkları çekirdekten yayınlanırken yüksek hıza sahip değillerdir. MeV mertebelerinde enerjiye sahip olan beta parçacıkları ışık hızına yakın bir hızla hareket ederler. Beta parçacıkları malzeme içerisinde geçerken genellikle iyonizasyon ve bremsstrahlung ışıması yaparak enerjilerini kaybederler.

Beta parçacıkları malzeme içerisinden geçerken yörünge elektronları üzerine oluşturduğu Coulomb kuvveti etkisi ile iyonizasyona veya yörünge elektronlarının uyarılmasına neden olmaktadırlar.

Beta parçacıklarının ikinci önemli enerji kaybettiği olay Bremsstrahlung ışımasıdır. Beta parçacığı çekirdeğin yakınından geçerken ivmelenmesi nedeni ile Bremsstrahlung fotonlarının yayımlanmasına neden olmaktadır. Meydana gelen ışıma miktarı, malzemenin atom numarası arttıkça artmaktadır. Şekil 2.5'de Bremsstrahlung fotonunun yayımlanması görülmektedir.



Şekil 2.5 Beta parçacığının yayımladığı Bremsstrahlung ışıması (Martin 2006)

Beta parçacıklarının malzeme içerisindeki menzili, beta parçacıklarının enerjisi ve malzemenin atom numarasına bağlı olarak değişmektedir. Beta parçacıklarının enerjisi

$0{,}01 \leq E_\beta \leq 2{,}5$ MeV aralığında olduğunda menzil (R), cm^2/g cinsinden denklem (2.6)'da verildiği gibi hesaplanabilmektedir (Martin 2006).

$$R = 412E_\beta^{1,262-0,0954\ln E_\beta} \tag{2.6}$$

Malzeme içerisinden geçen beta parçacıklarının miktarı üstel bir fonksiyona bağlı olarak malzeme kalınlığı ile azalmaktadır. Denklem (2.7)'de bu fonksiyon verilmiştir.

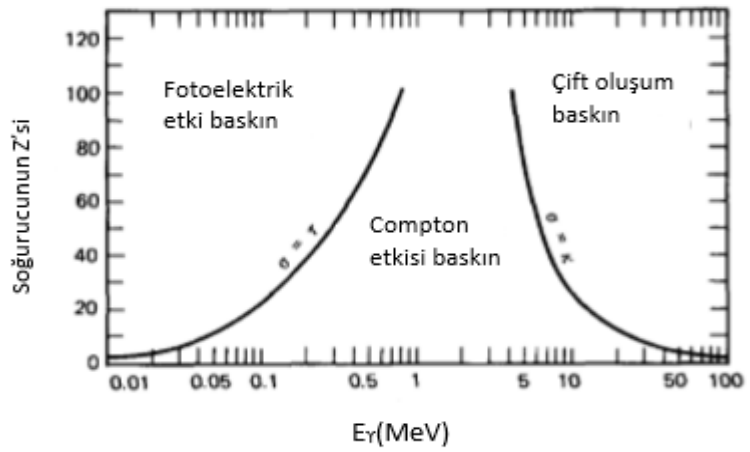
$$N(\chi) = N(0).e^{-\mu_\beta^{(\rho x)}} \tag{2.7}$$

Burada N(0) ve N(χ) sırası ile malzemeye gelen ve malzemeden geçen beta parçacıklarının sayısı, μ_β beta zayıflatma katsayısı, ρ malzemenin yoğunluğu ve x malzeme kalınlığıdır (Martin 2006).

2.3.3 Gama radyasyonun madde ile etkileşimi

Gama fotonları, içinden geçtikleri ortamın atomları ile etkileşime girerek soğurulabileceği gibi saçılmaya da uğrayabilirler. Gama fotonlarının madde ile etkileşimi çoğunlukla üç temel şekilde olmaktadır. Bunlar fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum olaylarıdır.

Gama radyasyonunun madde ile etkileşimi, şekil 2.6'da görüldüğü gibi fotonun enerjisi ve etkileşime girdiği maddenin atom numarasına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.6 Gama fotonlarının malzeme ile etkileşim mekanizmaları (Knoll 2002)

Gelen radyasyonun enerjisine göre (Şekil 2.6) fotoelektrik olayının olma ihtimali atom numarasına (Z) bağlı olarak artmaktadır. Compton olayı gama ışınlarının frekansına bağlı olarak 0,1-10 MeV enerjileri arasında olma ihtimali daha baskındır. Çift oluşum olayı 1,02 MeV'lik enerjilerde olabilir ancak yüksek enerjilerde daha baskındır.

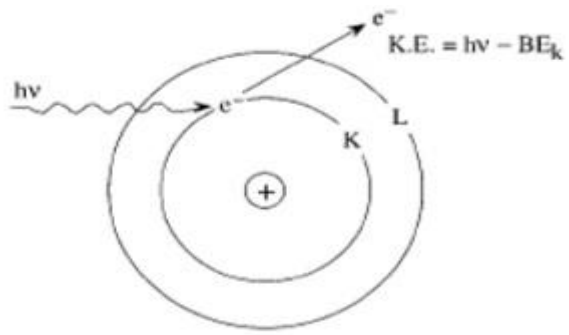
2.3.3.1 Fotoelektrik olay

Fotoelektrik olayda, gelen γ ışını tüm atomla etkileşir, γ ışını yok olur ve atomik elektronlardan biri atomdan fırlatılır. Bu süreçte atom geri teper, ancak taşıdığı kinetik enerji çok küçüktür. Fırlatılan fotoelektronun kinetik enerjisi foton enerjisi ile elektronun atoma bağlanma enerjisinin farkı kadardır; bu bağlanma enerjisi söz konusu elektrona karşılık gelen atomun iyonizasyon enerjisidir (Lamarsh ve Baratta 2001). Bu enerjinin ifadesi denklem (2.8)'de verilmiştir.

$$\text{K.E.} = h\nu - E_{\text{bağlanma}} \tag{2.8}$$

Şekil 2.7'de görüldüğü üzere K.E. yörüngeden kopan elektronun kinetik enerjisi, hν gelen fotonun enerjisini ve $E_{\text{bağlanma}}$ ise elektronun yörünge bağlanma enerjisini temsil etmektedir.

Bir γ ışını alt yörüngedeki bir elektronu kopartırsa, atomik yapıdaki boşluk daha sonra dış elektronlardan birinin boş konuma geçişi yoluyla doldurulur. Bu geçişe atomun karakteristiği olan x-ışınlarının veya bir Auger elektronunun yayınlanması eşlik eder (Lamarsh ve Baratta 2001).



Şekil 2.7 Fotoelektrik olay (Martin 2006)

Fotoelektrik olay soğurma katsayısı τ, denklem (2.9) ile verilmiştir.

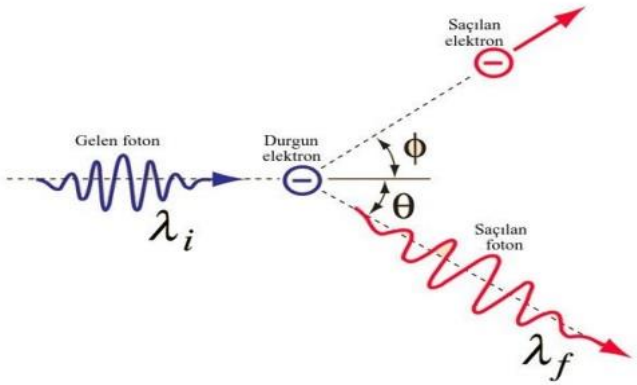
$$\tau \sim \text{sabit}\ (Z^5/E_f^3) \tag{2.9}$$

Burada Z, soğuran malzemenin atom numarası, E_f ise malzeme tarafından soğurulan fotonun enerjisidir. Bu eşitliğe göre fotoelektrik olayının görülmesi yüksek atom numaralı malzemelerde ve düşük enerjili fotonlarda daha baskın olmaktadır (Martin 2006).

2.3.3.2 Compton saçılması

Compton saçılması hem enerji hem de momentum korunacak şekilde, bir fotonun bir elektron tarafından esnek saçılmasıdır (Lamarsh ve Baratta 2001). Compton olayı, özellikle gama foton enerjisinin 0,5–10MeV aralığındaki değerlerinde baskın olduğu görünmektedir. Compton olayında, gama fotonu ile atoma zayıf bağlı dış yörünge elektronu veya serbest elektron arasındaki etkileşim olmaktadır. Bu etkileşimde, gama fotonu, elektronla etkileşmesi sonucu enerjisinin bir kısmını elektrona aktarmaktadır.

Etkileşme sonucunda gama fotonunun enerjisi azalır, daha büyük bir dalgaboyu ile yeni bir doğrultuda yoluna devam eder (Martin 2006). Şekil 2.8'de görüldüğü üzere, enerjisi E ve dalga boyu λ_i olan gelen foton, Θ açısıyla saçılır ve saçılan fotonun enerjisi E´ ile ifade edilir. Gelen foton tarafından çarpılan elektron geri teper. Geri tepen elektron bir miktar kinetik enerji kazanır.



Şekil 2.8 Compton saçılması (Anonim 2020b)

Compton etkileşmesi sonrasında fotonun dalga boyunda meydana gelen fark denklem (2.10)'da verilmiştir.

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) = 0{,}024264(1 - \cos\theta)\ \text{Å} \qquad (2.10)$$

Burada λ_i ve λ_f sırası ile etkileşmeden önce ve etkileşmeden sonra gama fotonunun dalga boylarını temsil etmektedir. h/m_0 c ise Compton dalga boyu olarak ifade edilmektedir.

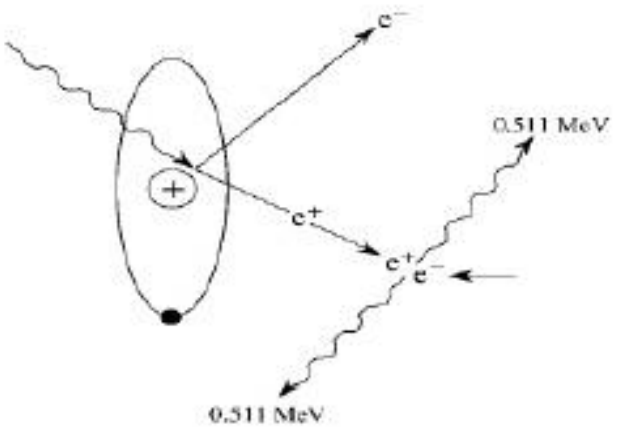
Compton etkileşme katsayısı σ, denklem (2.11)'de verilmiştir.

$$\sigma \sim \text{sabit}\ (Z/E_f) \qquad (2.11)$$

Burada Z, fotonun etkileştiği malzemenin atom numarası, E_f ise malzeme tarafından soğurulan fotonun enerjisidir (Martin 2006).

2.3.3.3 Çift oluşum

Fotonların madde ile etkileşme yollarından üçüncüsü de çift oluşum olayıdır. Enerjisi 1,02 MeV'den büyük olan bir foton, bir atomun çekirdeği ile etkileştiğinde yok olur ve onun yerine elektron - pozitron çifti oluşur. Genelde çift oluşum sadece yüksek enerjili fotonlar için önem kazanmaktadır. Şekil 2.9'da çift oluşum şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9 Çift oluşum (Martin 2006)

Elektron çifti oluşumunun arkasından gerçekleşen bir başka olay elektron çifti yok olması (anhilasyon) olayıdır. Çift oluşumdan sonra elektron ve pozitron enerjisini uyarma, iyonizasyon ve Bremstrahlung ile ortama bırakır. Pozitron tüm enerjisini kaybettiğinde bir elektronla birleşerek yok olur ve her biri 0,511 MeV enerjili zıt yönlere giden iki foton (anhilasyon radyasyonu) meydana gelir. Bu fotonlar yeniden fotoelektrik veya Compton olayları ile soğurucuda etkileşir (Yener 2006).

Çift oluşum etkileşim katsayısı K, denklem (2.12)'de verilmiştir.

$$K \sim \text{sabit}. Z^2. (E_f - 1{,}022) \quad (2.12)$$

Burada Z, fotonun etkileştiği malzemenin atom numarası, E_f ise malzeme tarafından soğurulan fotonun enerjisidir (Martin 2006).

2.3.3.4 Gama radyasyonu lineer zayıflatma katsayısı

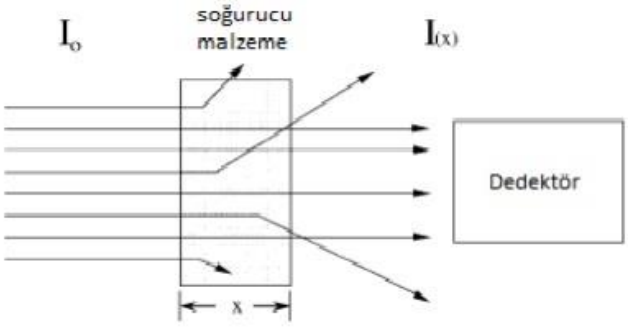
Gama fotonları madde içinden geçerlerken soğrulurlar ve soğrulma şiddetleri üstel olarak azalmaktadır. Maddenin dx gibi küçük bir kalınlığındaki soğurulması denklem (2.13)'de verildiği üzere o noktadaki radyasyon şiddetiyle orantılı olmaktadır.

$$dI = -\mu. I. dx \quad (2.13)$$

Burada, I fotonun şiddetini (cm^2/s) ve μ orantı sabiti (cm^{-1}) olup verilen radyasyon için soğurucunun lineer zayıflatma katsayısıdır. Malzeme üzerine gelen foton demetinin dar bir demet olduğu kabul edilirse, tek enerjili gama ışın şiddeti I_o, x cm kalınlığındaki maddeden geçtiğinde yayımlanan I_x şiddeti denklem (2.14) ile verilir (Lamarsh ve Baratta 2001).

$$I_x = I_0. e^{-\mu x} \quad (2.14)$$

Şekil 2.10'da bu durum şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.10 Gelen radyasyonun madde tarafından tutulması (Martin 2006)

Lineer zayıflatma katsayısı, soğurucunun yoğunluğundan doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle soğurucu için daha geniş bir kullanım olarak kütle zayıflatma katsayısı tanımlanmaktadır. Kütle zayıflatma katsayısı denklem (2.15) eşitliği tanımlanmaktadır.

$$\text{Kütle zayıflatma katsayısı } (\mu_m) = \frac{\mu}{\rho} \tag{2.15}$$

Burada μ, lineer zayıflatma katsayısını ve ρ ise soğurucunun yoğunluğunu göstermektedir. Soğurucu bir bileşik ise kütle zayıflatma katsayısı denklem (2.16) ile hesaplanmaktadır (Knoll 2002).

$$(\frac{\mu}{\rho})_c = \sum_i w_i \ (\frac{\mu}{\rho})_i \tag{2.16}$$

Burada w_i , bileşiğin içindeki i elementinin ağırlık faktörünü temsil etmektedir.

2.3.4 Nötronların madde ile etkileşimi

Nötronlar gama ışınları gibi yükü olmadığından yani elektriksel bakımdan yüksüz olduklarından, bir atomdaki elektronlardan veya çekirdeğin pozitif yükünden etkilenmezler. Bunun sonucu olarak, nötronlar atomik elektron bulutundan geçerek, doğrudan çekirdek ile etkileşir. Nötron çekirdeğe yaklaştığı zaman, yüklü parçacıkların

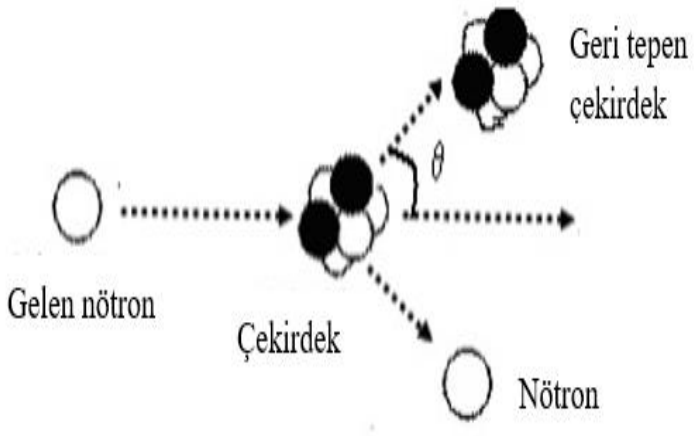
aksine bir Coulomb bariyeri ile karşılaşmaz. Kısacası, nötronlar atomlarla değil çekirdekle çarpışır (Tsoulfanidis ve Landsberger 2011).

2.3.4.1 Nötronların etkileşim mekanizmaları

Nötronların malzeme ile etkileşiminde, temelde iki farklı etkileşim söz konusudur. Bunlar nötronun çekirdek tarafından saçılması ve soğurulmasıdır.

2.3.4.2 Elastik saçılma

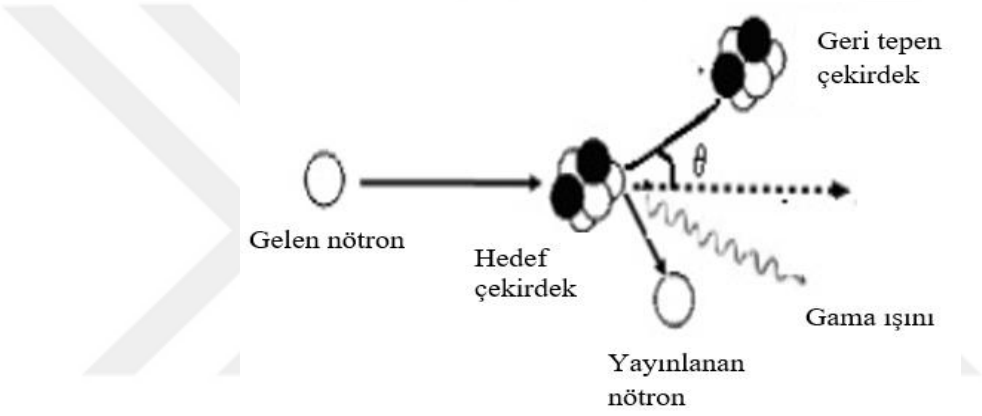
Hızlı nötronlar çekirdek ile etkileşime girdiğinde elastik saçılma yoluyla enerjilerini kaybetmektedirler. Elastik saçılma (n, n) reaksiyonu ile gerçekleşmektedir. Buna göre, çekirdek ile etkileşime giren nötron, kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktardıktan sonra kendi geliş doğrultusundan saparak farklı bir doğrultuda çekirdekten uzaklaşır (Topal 2019). Elastik saçılmada iki parçacığın toplam kinetik enerjisi korunur. Nötronun kaybettiği enerjinin oranı, çekirdeğin kütlesi nötronun kütlesine yaklaştıkça artmaktadır (Hallenbeck 1994). Şekil 2.11'de elastik saçılmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.11 Elastik saçılma (Şenyiğit 2011)

2.3.4.3 Elastik olmayan saçılma

Bu saçılmada, nötron çekirdek ile etkileşime girdiğinde, çekirdek uyarılmış durumda bırakılır ve bu çekirdek daha sonra gama veya radyasyonun diğer formları ile bozunur. Nötronun çekirdeği uyarması için yeterince enerjiye (1MeV veya fazla) sahip olması gerekir. Bu eşik enerjinin altında sadece elastik saçılma olur (Topal 2019). Elastik olmayan saçılma (n, n´), (n, 2n´) gibi reaksiyonların oluştuğu durumda ortaya çıkan saçılmadır (Hallenbeck 1994). Şekil 2.12'de elastik olmayan saçılmanın şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.12 Elastik olmayan saçılma (Şenyiğit 2011)

2.4 Radyasyon Dedektörleri

Herhangi bir ortamda bir atomun çekirdeğinden yayınlanan radyasyonun varlığı doğrudan anlaşılamaz ancak ortam içinden geçerken ortamın atomlarıyla yaptığı etkileşmeler sayesinde anlaşılabilir. Bu etkiler kimyasal, iyonizasyon ve parıltı şeklinde olabilir. Bu etkileri anlaşılabilecek hale getiren cihazlara radyasyon dedektörleri denir (Krane 2001).

Radyasyon enerjisinin dedeksiyon ortamında soğurulması ve elektrik pulslarına dönüştürülmesi birkaç farklı şekilde gerçekleşir. Dedektörler de buna göre tasarlanmış yapılara sahiptir ve bu nedenle temel çalışma prensibi bakımından birkaç sınıfta

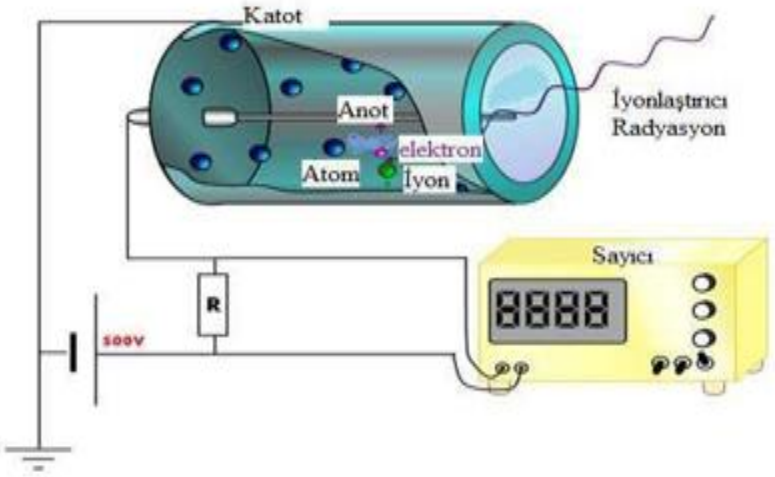
incelenir. Bu çalışma prensipleri genel olarak; radyasyon enerjisinin iyon çiftlerine dönüştürülmesi, ışık fotonlarına dönüştürülmesi ve elektron-deşik çiftlerine dönüştürülmesi şeklinde sıralanır (Şahmaran 2011).

2.4.1 Gazlı dedektörler

Gazlı dedektörlerin çalışması gaz ortamını geçen radyasyonun meydana getirdiği iyonlaşmanın ölçülmesine dayanır. (Tsoulfanidis 2011). Gazlı dedektörler iyonizasyon dedektörleri olarak da adlandırılır. Radyasyonun oluşturduğu iyonizasyon akımını ölçer. Radyasyonun bir gaz içerisinden geçerken iyonizasyonla oluşturacağı elektronların toplanması esasına dayanır.

Genellikle birkaç santimetre çapında, 7-8 cm boyunda silindirik bir cam tüpün iç çeperi özel bir malzeme ile kaplanır. Tüp içerisine düşük basınçlı asal bir gaz veya gaz karışımı konulur. Tüp ekseni boyunca yerleştirilen tel (anot) ile tüpün iç çeperi (katot) arasına bir potansiyel fark uygulanarak tüp içinde telden çepere doğru bir elektrik alanı oluşturulur. İyonlaştırıcı radyasyon gaz molekülleri ile etkileşerek gazı iyonlarına ayırır. Bu şekilde meydana gelen elektronlar elektrik alan etkisi ile hızlandırılarak anoda, pozitif yüklü hale geçen atomlar da katoda doğru hareket ederler. Böylece iki zıt kutup arasında bir iyon veya iyonizasyon akımı meydana gelir. Oluşan bu akımın şiddeti gelen radyasyonun şiddeti ile orantılı olarak değişir. Gaz içinde bir elektron-iyon çifti oluşturmak için gerekli olan enerji ortalama 30-35 elektron volttur (Yener 2006).

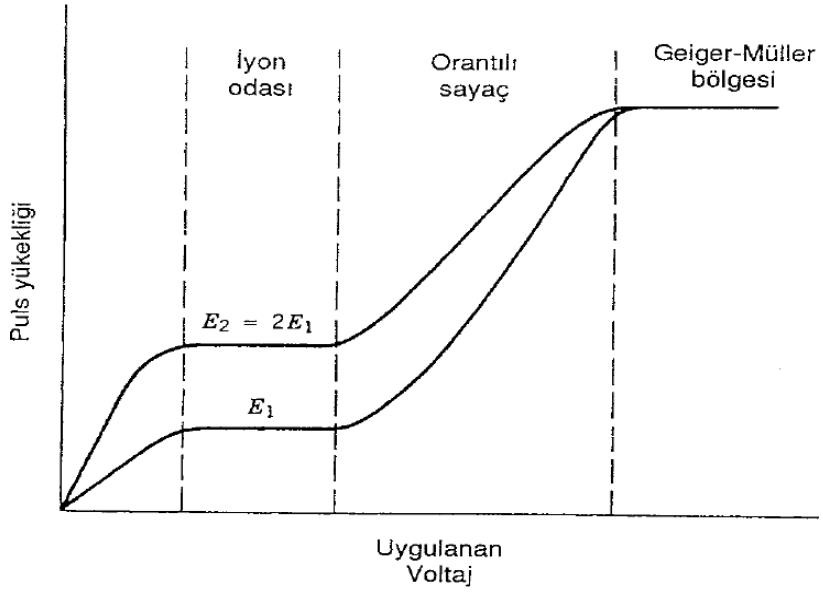
Normalde bir gaz atomunu iyonlaştırmak için gerekli olan enerji daha azdır ama radyasyonun gaz ile olan tüm etkileşmeleri iyonizasyonla sonuçlanmaz. Bu nedenle enerjisinin bir kısmı eksitasyonla kaybedilir. Bir iyon çiftinin meydana gelmesi için gereken 30-35 MeV'lik enerji yalnız iyonizasyonda değil, eksitasyonda kullanılan enerjiyi de içermektedir (Knoll 1989).



Şekil 2.13 Gazlı dedektör sistemi (Anonymous 2020a)

Dedektörde tüpün ekseni boyunca uzanan anot teli ile katot arasına uygulanan potansiyel farkı değiştirildiğinde iyon çiftlerinin kazanacağı kinetik enerji ve oluşacak ikincil iyon sayısı dolayısı ile anotta toplanan elektron sayısı değişir (Yener 2006).

Şekil 2.14'de gazlı dedektörün farklı özelliklerde çalıştığı voltaj aralıklarına göre çalışma bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Gazlı dedektörlerin çalışma bölgeleri (Olçay 2007)

2.4.1.1 Yeniden birleşme

Başlangıçta iyonlar küçük bir voltaj etkisi altında olduklarından elektrotlarda toplanma yerinde tekrar birleşirler. Bu bölgede toplanan yük ile radyasyonun oluşturduğu iyonizasyon arasında bir ilişki kurulamaz.

2.4.1.2 İyon odası

Radyasyonun oluşturduğu bütün elektronlar bir puls verecek şekilde toplanmıştır. Bu durumda tüp voltajı, ikincil iyonizasyonla oluşan iyon çiftlerinin yeniden birleşme ile kaybedilenlere eşit olmasını sağlayacak düzeydedir. Bu bölgede yeni yük üretimi olmaz. İyonizasyon bölgesinde çıkış sinyalinin yüksekliği gelen radyasyonun dedektörde kaybettiği enerji ile orantılıdır.

2.4.1.3 Orantılı sayaç

Radyasyon gaz içinde iyon çifti oluşturur ve elektrik alan iyonları hızlandırır. Eğer bir elektron 30 eV veya daha yüksek enerji kazanırsa yeni bir iyon çifti yaratabilir. Böylece elektron ve iyon çifti kontrollü bir şekilde artar.

Elektrotlarda toplanan elektron ve iyon sayısı, radyasyon tarafından üretilen iyon çifti sayısı ile orantılıdır yani radyasyonun enerjisi ile orantılıdır. Elektrik alan anoda yakın yerde kuvvetlidir, çoğalma burada olur (Şahmaran 2011). Bu bölgede parçacık kimliği belirlenmesi ve enerji ölçümü mümkündür.

2.4.1.4 Geiger-Müller bölgesi

Tüp voltajı yükseltilirken hızlanan iyon çiftlerinin art arda oluşturduğu ikincil iyonların yanında, iyonizasyon ve eksitasyon sonucu gaz atomlarında oluşan boşlukların dış yörüngelerden elektronlarla doldurulması esnasında yayınlanan fotonların anot çeperinden kopardığı elektronlar da gaz çoğalmasına katkıda bulunur. Voltajın belli bir

değerine gelindiğinde avalanj (çığ) tüpün her noktasına yayılarak gaz çoğalma faktörü 10^{10} kadar yükseltilmiştir. Bundan sonra voltaj yükseltilmeye devam edilse de belli bir voltaj aralığında ikincil iyonizasyon sayısında, dolayısıyla toplam yük sayısında bir değişme olmaz. Bu durumda radyasyonun enerjisi ve türü ne olursa olsun çıkışta elde edilen pulslar aynı yüksekliktedir. Bu dedektörler Geiger Müller sayaçları olarak bilinir (Şahmaran 2011).

Bu bölgede parçacık kimliği ve enerji belirlenemez. Bu tür sayıcılarda sadece gelen parçacık sayısı hakkında bilgi alınabilir.



Şekil 2.15 Geiger Müller dedektörü

2.4.1.5 Deşarj bölgesi

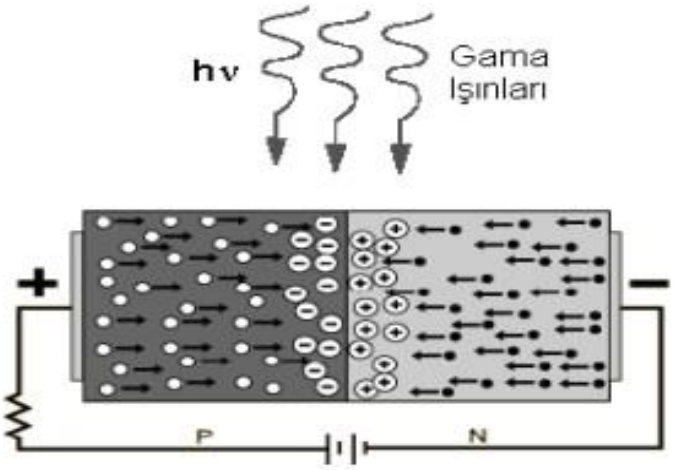
Geiger Müller bölgesinden sonra voltaj daha da artırılsa bile gaz içinde ark meydana gelir ve sürekli deşarj olur (Şekil 2.15). Bu bölgede Geiger sayıcı olarak çalışılamaz. El'de edilen sayımlarla gelen radyasyon arasında bir ilişki kurulamaz.

2.4.2 Yarı iletken dedektörler

Yarı iletken atomları kovalent bağlı kristal yapılı malzemeler olup elektriksel iletkenlik özellikleri yalıtkan ve iletkenler arasında kaldığından yarı iletken malzemeler olarak adlandırılmıştır (Ahmed 2007).

Yarı iletken dedektörlerin çalışma prensibi gazlı dedektörlerde olduğu gibi doğrudan yük toplama esasına dayanır (Yener 2006). Bir gama ışını yarı iletken dedektöre çarptığında enerjisini bırakarak ve çarptığı atomdan enerji yüklü bir elektron koparark yok olur. Böylece yarı iletkende iyonizasyon ile iki çeşit taşınır yük meydana getirilmiş olur. Bunlar negatif yüklü elektronlar ve pozitif yüklü deşik (boşluklar) dir. Dedektörde oluşan zıt yüklerin negatif ve pozitif elektrotlara doğru hızla çekilmesini sağlamak amacı ile bir voltaj uygulanır. Bu sayede elektronlar zıt yüklü olan pozitif elektrota, boşluklar ise negatif yüklü elektrota doğru çekilirler. Yarı iletkene gelen her gama ışını için bu olay tekrarlanır. Böylece gama ışını yarı iletken dedektörde doğrudan elektronik sinyal haline dönüşmüş olur (Early and Sodee 1985).

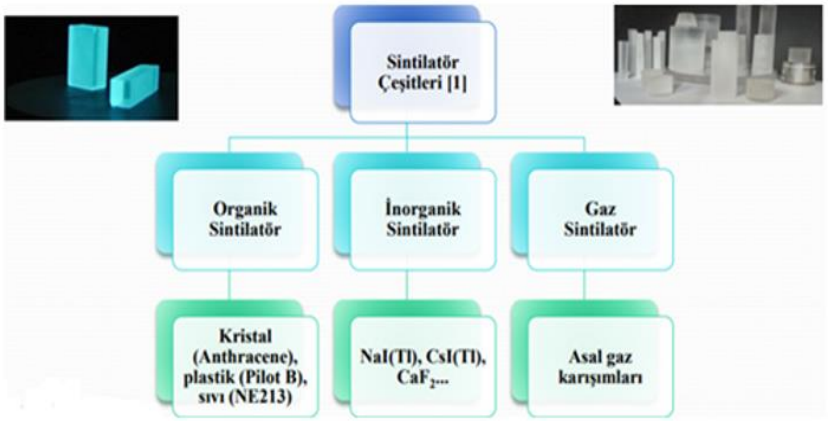
Bir yarı iletken dedektör yapmak için negatif yük (elektron) veya pozitif yük (deşik) taşıyıcıları fazla olan p ve n tipi materyallerin birbirine temas ettirilmesi ile oluşturulur. Ters besleme altında dedektörde, elektron ve deşikten arınmış bir hassas bölge oluşturulur. Dedektör veriminin yüksek olması için derin bir hassas bölge, derin bir hassas elde etmek için de oldukça saf madde gerekir. Eklem içine giren ve enerjisi yarı iletkenin bant aralığı enerjisinde daha yüksek olan bir foton, valans bandındaki bir elektronu iletkenlik bandına yükseltir. Böylece elektron ve deşik çifti üretmiş olur. İçerde meydana gelen elektrik alan, elektronları eklemin pozitif elektroda, deşikleride negatif elektrota doğru sürüklenmesine neden olur. Bu işlem bir sayaç ile sayılabilen bir pulsun oluşmasını sağlar. Şekil 2.16'da yarı iletken dedektör gösterilmektedir. Gama ışını dedeksiyonu için yaygın kullanılan dedektörler Ge(Li) ve Si(Li) dedektörleridir (Öcal 2017).



Şekil 2.16 Yarıiletken dedektör (Öcal 2017)

2.4.3 Sintilasyon dedektörleri

Sintilatörler x-ışınlarını görünür ışığa dönüştüren genellikle yüksek yoğunluklu lüminesans malzemelerdir. Lüminesans olayı ilk olarak 1888' de Alman Fizikçi Eilhard Wiedenmann tarafından tanımlanmıştır. Wiedenmann lüminesans terimini maddeden, ısıdan kaynaklı olmayan ışık emisyonu olarak tanımlamıştır. Günümüzde lüminesans olayı maddenin dış bir enerji kaynağı tarafından uyarılması ve bu absorblanan uyarılma enerjisinin ışık olarak yayımlanması olarak tanımlanır (Weber 2002). Yayınlanan bu enerji yalnızca görünür ışık olarak değil yakın ultraviyole ve yakın kızılötesi ışınlar olarak da yayınlanabilir. Günümüzde sintilatörler tıbbi teşhis cihazlarında, dozimetrelerde, nükleer tıp, yüksek enerji fiziği gibi alanlarda kullanılmaktadır. Sintilatör malzemeler genel olarak yapılarına göre farklı kategorilerde incelenirler. Aşağıda farklı sintilatör malzemeler yapılarına göre sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.17 Sintilatör çeşitleri (Anonim 2020c)

İdeal bir sintilasyon maddesinin özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır:

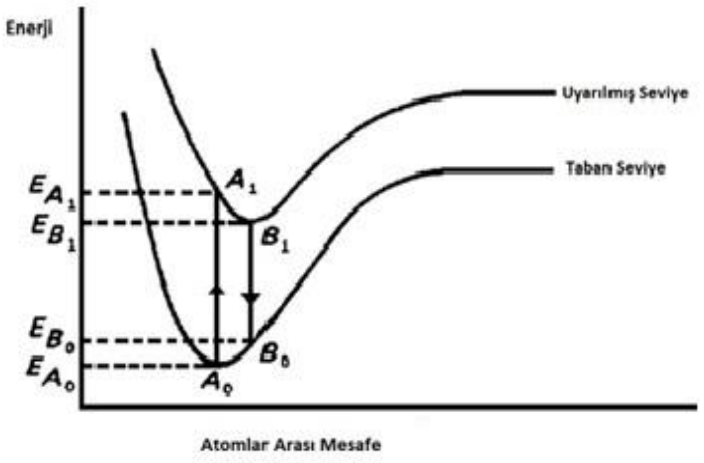
- Yüklü parçacıkların kinetik enerjilerini yüksek bir sintilasyon etkinliği ile dedekte edilebilecek ışığa çevirmelidir,
- Bu dönüşüm doğrusal olmalıdır yani, ışık verimi soğurulan enerji ile geniş bir aralıkta orantılı olmalıdır,
- Işığın etkin bir şekilde toplanması için ortam kendi salınımının dalga boyuna geçirgen olmalıdır,
- Hızlı sinyal pulslarının oluşumu için oluşan lüminesansın (ışıldama) azalım zamanı kısa olmalıdır,
- Materyalin optik kalitesi iyi olmalı ve istenilen boyutta dedektör yapılabilmelidir,
- Sintilasyon ışığının fotoçoğaltıcı tüpe (PM tüp) etkin bir şekilde aktarımı için kırılma indeksi camın indeksine yakın olmalıdır (Anonim 2020d).

2.4.3.1 Organik sintilatörler

Sintilasyon olayı molekülün enerji seviyesindeki geçişler ile gerçekleşir ve sintilatörün fiziksel yapısından bağımsızdır (katı, sıvı veya gaz halinde olabilir veya polimerlerin içine katılabilir). Uyarılma enerjisi atomlar arasındaki uzaklığın fonksiyonudur. Çekme

ve itme kuvvetlerin ortak etkisiyle bir minimum potansiyeli vardır. Yanıt (lüminesans) süreleri son derece hızlıdır (10ns) ve düşük ışık verimlidir. Uyarılma enerjisi bir molekülden diğerine transfer edilir. Sintilasyon etkinliğinin arttırılması için organik sintilatör bir çözücünün içerisine katılır. Radyasyon önce çözücüde soğurulur ve enerji sintilatöre transfer edilir. Çözücü-sintilatör karışımına bazen sintilatörden salınan dalga boyunu değiştiren bir madde daha ilave edilir. Böylelikle sintilatörün kendi ışığını soğurması önlenir ve PM tüpte uygun ışık oluşturulur. Çok düşük atom numaraları nedeniyle gama spektrumlarında fotopik yoktur, fakat hidrojen içerdikleri için hızlı nötron dedeksiyonuna elverişlidirler.

Moleküllerin enerji soğurmasında iki yol vardır. Elektronlar daha yukarı seviyelere uyarılabilirler ya da moleküldeki atomlar birbirine göre titreşirler. Bir molekülün potansiyel enerjisinin, atomlar arası mesafe ile değişimini şekil 2.18'deki gibi olduğunu kabul edelim.



Şekil 2.18 Bir molekülün tipik enerji diyagramı (Tsoulfanidis 2011)

Molekülün taban durumu minimum potansiyel enerjiye eşdeğer olan A_0 noktasıdır. Sintilatörden geçen iyonize edici radyasyon moleküle enerji verir ve molekülü uyarılmış duruma yükseltir yani, A_0 ve A_1 arasında geçiş meydana gelir. A_1 konumu minimum enerji noktası değildir. Molekül örgü titreşimleriyle enerji kaybedecektir (bu enerji ısı

enerjisi olarak verilir) ve enerji seviyesi B_1 noktasına kayacaktır. B_1 noktası hala uyarılmış seviyedir ve bazı durumlarda (E_{B1}–E_{B0}) enerjisine sahip olan bir foton yayımlanmasıyla B_1- B_0 geçişi meydana gelecektir. Bu geçiş 10^{-8} saniye mertebesine sahip bir zamanda meydana gelir. Yayımlanan foton enerjisinin (E_{B1}–E_{B0}), uyarılmaya neden olan (E_{A1} -E_{A0}) enerjisinden küçük olduğuna dikkat edelim. Bu fark çok önemlidir çünkü sintilatörün yayımlama spektrumu, sintilatörün soğurma spektrumuyla tamamen aynıdır ve bu durumda sintilasyon meydana gelmez (Tsoulfanidis 2011). Çizelge 2.3'de bazı organik sintilatörlerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Organik sintilatör çeşitlerinin özelliklerinin karşılaştırılması

Materyal	**Maksimum salınımın dalga boyu (nm)**	**Sintilasyon verimi (%)**	**Azalım zamanı (µs)**	**Yoğunluk (10^3 kg/m^3)**
Antrasan	445	100	~30	1,25
Trans-Sitilben	385	~60	4-8	1,16
NE 102	350-450	~65	5	1,06
NE 110	350-450	60	2	1,06
NE 2013 (sıvı)	350-450	~60	2	0,867
PILOT B	350-450	68	2	1,06
PILOT Y	350-450	64	~3	1,06

2.4.3.1.1 Organik kristal sintilatörler

Organik kristal sintilatörler benzen halka yapısı barındıran hidrokarbonlardan oluşur. Bu malzemelerin lüminesans süresi en fazla birkaç nanosaniyedir. Mekanik olarak iyi özelliklere sahip olmalarına rağmen enerjiye tepkileri anizotropiktir. Yapılarında karbon, hidrojen, oksijen gibi hafif elementlerin yüksek oranda bulunması nedeniyle enerji soğurma oranları oldukça düşüktür. Ayrıca kolayca işlenemez, büyük boyutlarda sentezlenemezler. Bu sebepten dolayı pek fazla tercih edilmemektedirler.

2.4.3.1.2 Organik sıvı sintilatörler

Organik sıvı sintilatörler bir veya birden fazla organik sintilatörün organik bir çözücü içinde çözünmesi ile oluşturulur. Önemli organik çözücüler; polistiren (C_8H_8), toluen (C_7H_8), hekzametilbenzen ($C_{12}H_{18}$) ve ksilen (C_8H_{10}), önemli sıvı sintilatörler; p-Terfenil (C_8H_{14}), PPO (CH_3CHCH_2O) ve PBD ($C_{20}H_{14}N_2O$)'dır. Organik sıvı sintilatörlerin avantajları; hızlı floresan özelliği (3-4 ns), katkı eklenebilirliğidir. Dezavantajı ise sıvının kapalı bir sistemde bulunması nedeniyle istenilen boyut ve şekillerde tasarlanmasının zor olması, sıvı organiklerin yüksek yanıcılık özelliği ve safsızlıklara (özellikle oksijen) karşı hassasiyetidir (Gülenç 2018).

Sıvı sintilatör ile dedeksiyonda genellikle organik bileşik olarak hazırlanan örnek organik bir çözücü içine karıştırılarak çözülür. Örnekten salınan radyasyon çözücünün molekülleri ile etkileşerek iyonizasyona ve eksitasyona neden olur. Ayrıca iyonlaşmış moleküllerin tekrar birleşmeleri sonucunda da uyarılmış moleküller oluşur. Bunlar sıvı içinde difüzyonla hareket ederken çarpışmalarla birbirlerine enerji aktarırlar. Bu şekilde uyarılma enerjisi bütün sıvıya yayılır. Uyarılma potansiyelleri çözücüye göre daha küçük olan radyoaktif bileşik yani aktivatör molekülleri ile bu enerjiyi soğurur. Tekrar taban düzeye geçerken sintilasyon meydana gelir. Sıvı sintilatörler çoğunlukla beta sayımında kullanılırlar (Yener 2006).

2.4.3.1.3 Plastik sintilatörler

Plastik sintilatörlerin içinde floresans gösteren katkıyı barındıran katı plastik esaslı malzemeleri tanımlar. Bu malzemelerde lüminesans özelliği yapıya katılan aktivatör ile sağlanır. Plastik sintilatörler yüksek şiddette ışık emisyonu, hızlı floresans gibi iyi optik özellikler gösterir. Ancak malzemenin yapısı itibarıyla şekillendirilip istenilen tasarıma uygulanabilmesi plastik sintilatörlerin en önemli avantajıdır (Taylı 2018).

Plastik sintilatörler, molekül yapısında, benzen halkasının dizimsel olarak bulunmasıyla karakterize edilir. Plastik sintilatörler, organik floresans bileşiklerinin, katılaşan polimer

bir malzeme içinde çözündürülmesiyle oluşan katıya yakın çözeltilerden elde edilirler. Plastik sintilatörlerin çoğunluğu, sintilasyon ışığını verebilen, polistiren (PVB-polyvinylebenzene) ve poliviniltoluen (PVT-diğer adı, polymethylstyrene) esaslı plastiklerden üretilirler. PVB veya PVT plastik sintilatörlere, genel amaçlı radyasyon dedeksiyon ölçümü için kullanılan BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416, BC-454 (ağırlıkça %5 B katkılanmış) dedektörleri örnek verilebilir (Çizelge 2.4). Bunlardan BC-400 ve BC-404 plastik sintilatörler, 30 yıldan fazladır kullanılmaktadır. Plastik sintilatör malzemeler, en çok güvenlik denetimi, yurt savunmasında, kara sınır kapılarında ve limanlarda veya özel alanlara giriş-çıkışlarda, hareketli veya duran araçların radyasyon taraması için alarm verici dedektörler olarak yaygınlaşmıştır (Engin 2012).

Çizelge 2.4 Bazı radyasyon tipleri ve dedeksiyonda kullanılan plastik sintilatör çeşitleri (Anonymous 2020b)

RADYASYON	**SİNTİLATÖR**
<100 keV x-ışınları	BC-404
100 keV-5 MeV gama ışınları	BC-408
>5 MeV gama ışınları	BC-400/BC-416
Hızlı nötronlar	BC-408/BC-412
Alfa ve beta	BC-400/BC-404
Yüklü parçacıklar, kozmik ışınlar, müonlar ve protonlar	BC-408/BC-412/BC-416

Plastik sintilatörlerin avantajları sıralanacak olursa;

- Bozunma süresi nano saniye mertebesindedir,
- Hızlı tepki verirler,
- Kolay üretilirler,
- Kristallerden daha ucuzdur,
- İstenilen boyut ve şekillerde tasarlanabilirler,

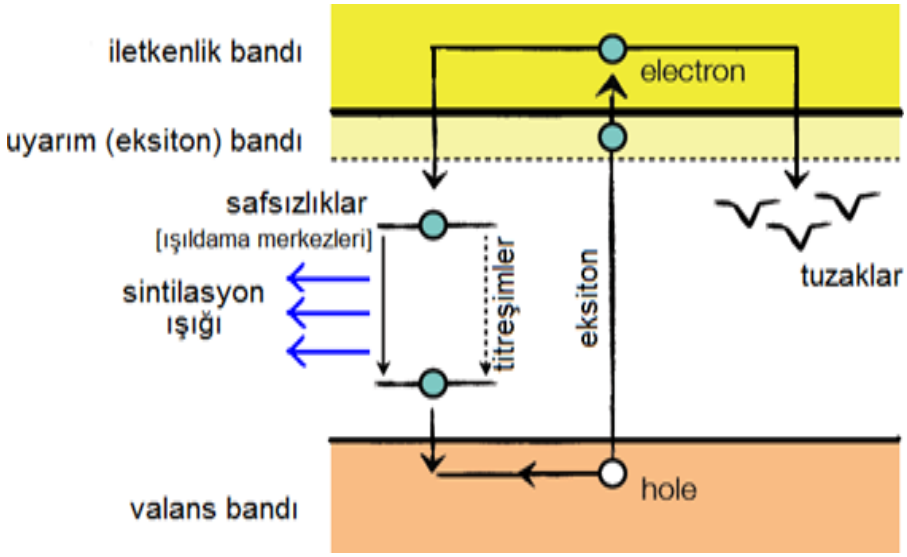
- Nötronların ve yüklü parçacık dedeksiyonu uygulamalarında kullanılabilir,
- Hava, su ve birçok kimyasal ile tepkimeye girmezler, bu sebeple dedektöre gelen radyasyon ile doğrudan temas halinde bulunabilirler.

2.4.3.2 İnorganik sintilatörler

2.4.3.2.1 İnorganik kristal sintilatörler

Saf kristalin yapıda ya da az miktarda safsızlık içeren sintilatör kristaller bu kategoride toplanır. İnorganik kristal sintilatörler gama ışınlarını yakalamada çok iyi performansa sahiptirler, yüksek şiddette ışık yayımlarlar ve yüksek yoğunluklara sahiptirler. Sintilasyon mekanizması malzemelerde kristal kafesin yapısına bağlıdır. NaI benzeri saf bir inorganik kafes yapısında elektronlar sadece belirli enerji bantlarında bulunabilirler. Saf kristallerde elektronlar yasak enerji bantlarında veya bant aralıklarında bulunamazlar. Saf kristallerde soğrulan enerji valans bandındaki elektronları iletim bandına taşır. Bu elektronlar düşük enerji konumuna dönmek için foton yayımlarlar (Lecoq vd. 2006). NaI(TI), CsI(TI), BGO, $CdWO_4$, GSO:Ce gibi sintilatörler bu grubun en çok bilinen sintilatör çeşitlerindendir.

Şekil 2.19'da kristal sintilatördeki enerji durumu elektronların bulunduğu enerji düzeyleri göz önüne alınarak gösterilmiştir. Valans bandı bağlı elektronların bulunduğu enerji durumunu, iletkenlik bandı ise serbest elektronların bulunduğu enerji durumunu gösterir. Bir elektronu iletkenlik bandına çıkarmak için elektrona belli bir enerji aktarmak gerekir. Bu enerjinin büyüklüğü yasak bant genişliğini verir. Bu bant genişliği yarı iletkenlerde 1 eV, yalıtkanlarda ise 7-8 eV civarındadır.



Şekil 2.19 İnorganik kristaller için bant şeması

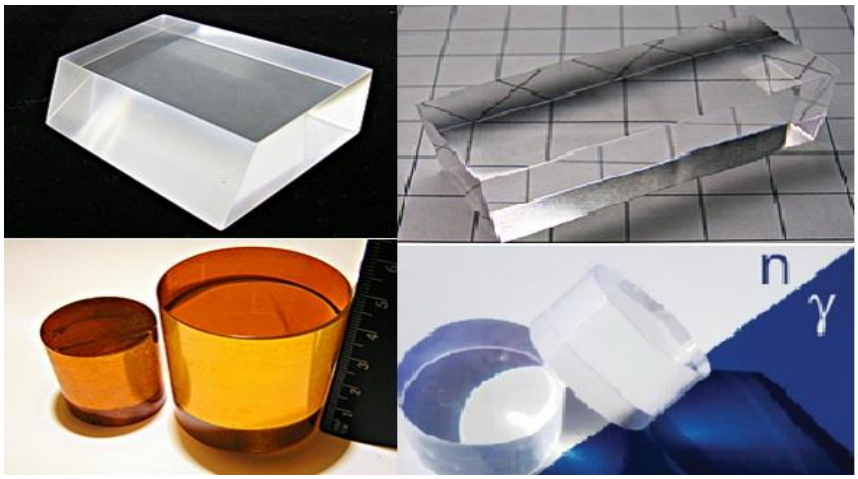
Dedektöre gelen radyasyon kristal atomları ile etkileşmeler yaparak enerji kaybederken kristal atomlarını uyararak elektronlar uyarılmış düzeye çıkmasını sağlar veya kristalden elektron kopartarak elektron-boşluklardan (deşik) oluşan yük çiftleri meydana gelmesine neden olur. Kristale bir potansiyel fark uygulanarak elektriksel alan oluşturulduğunda elektronların bu alana ters yönde hareket ederler. İletkenlik bandındaki elektron valans bandındaki boşluk birleşmesi sırasında veya uyarılmış düzeydeki elektron taban duruma geçerken kristale aktarılan radyasyon enerjisinin bir kısmı o bölgede bir foton olarak açığa çıkmaktadır. Oluşan bu fotonlar, kristal tarafından soğurularak kristal titreşimi sonucu ısıya dönüşür ya da kristalden kaçar. İşte kristalin dedektör olarak kullanılmasında bu kaçan fotonlardan yararlanılmak istenir (Yener 2006).

Kristale eser miktarda uygun bir safsızlık (aktivatör) eklenirse. Eklenen aktivatörler kristalin valans ve iletkenlik bandı arasında yeni enerji düzeyleri oluşmasına neden olur. Katkılı kristalde aktivatör atomları radyasyonun koparark iletkenlik bandında bulunan elektronları tuzaklayarak veya uyarılmış durumdaki elektronun taban düzeye geçerken yayınladığı bir fotonu soğurarak uyarılmış hale geçer. Aktivatörün bant yapısı kristalden farklı olduğu için uyarılmış aktivatör atomundan taban düzeye geçerken salınan parıldama fotonu kristal tarafından soğurulamaz. Kristalde oluşan bu fotonlar foto

çoğaltıcı tüp ile bir sinyale dönüştürülerek dedektöre gelen radyasyonun dedekte etmiş oluruz (Yener 2006).

2.4.3.2.2 İnorganik seramik sintilatörler

Genellikle inorganik kristal sintilatörlerin içerisinde tanıtılan bu grup yakın geçmişe kadar inorganik tek kristal sintilatörlerin gölgesinde kalmıştır. Ancak basit yöntemlerle üretilebildikleri ve optik özelliklerinin özellikle x-ışını soğurma konusunda yüksek yoğunluklarından ötürü çok iyi sonuçlar vermesi sonucunda seramik sintilatör malzemeler arasında son dönemde üzerinde en çok çalışılan sintilatör gruplarından biri olmuştur. Klasik bir inorganik yapıda tek kristalli sintilatör üretiminde kullanılan sentez yöntemleri, pahalı olmalarının yanı sıra uzun süren sentez süreleri ve üretilen kristalin boyutunun kısıtlı olması yönünden verimsizdir. Bu sintilatör malzemelerin yerine saydam seramikler ve camların kullanılması ile sentezindeki bu olumsuzluklardan uzaklaşılmıştır. Ancak cam sintilatörler ışık emisyonu açısından kristalin yapıdaki malzemelere oranla daha zayıf özelliktedirler. Diğer yandan çok kristalli (polikristal) seramik sintilatörler kristalin özelliklerini koruyabilen, yüksek çözünürlüklü radyasyon dedektörlerinde kullanılabilecek kadar verimli ve üretimi daha kolay olan malzemelerdir. Şekil 2.20'de farklı sintilatör malzemeler verilmiştir.

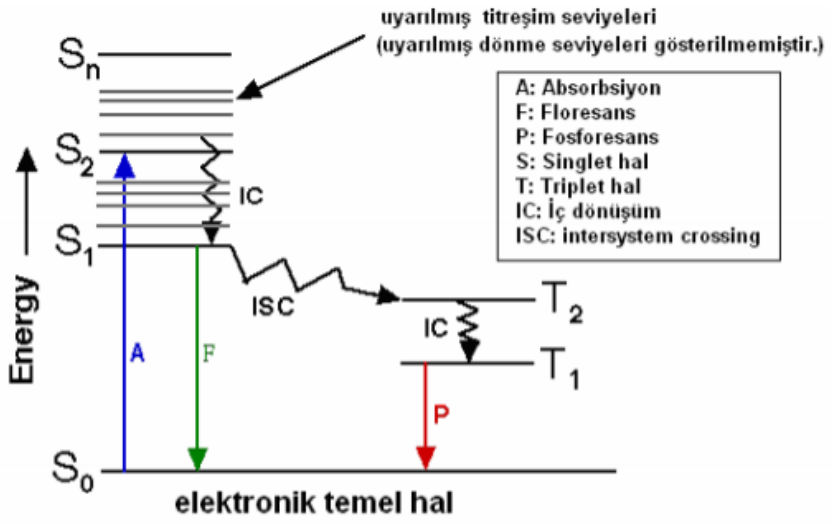


Şekil 2.20 Sintilatör malzemeler (Anonymous 2020c)

2.5 Lüminesans

Belirli bir kaynak tarafından uyarılmış elektronun soğurulduğu enerji ile daha yüksek enerjili bir banda geçişi ve ardından soğurulduğu bu enerjiyi yakın UV (ultraviyole), yakın IR (kızılötesi) veya görünür ışık olarak yayımlayarak daha düşük enerjili bir banda geçiş olayına lüminesans denir. Tarihin farklı dönemlerinde farklı milletler tarafından yazılmış kaynaklar insanlığın uzun süredir lüminesansın varlığından haberdar olduğunu göstermektedir. İnsanlığın lüminesans ile tanışıklığı eski olmasına rağmen bu olayı ilk tanımlayan Eilhard Wiedemann (1888) olmuştur. Wiedemann, lüminesans gösteren malzemeleri Yunanca'da ışık taşıyan anlamına gelen fosfor olarak tanımlamıştır (Virk 2015).

Şekil 2.21'de Jablonski Diyagramı üzerinden lüminesansın oluşum mekanizması gösterilmiştir. İlk olarak uyarılan elektronlar soğuruldukları enerji miktarına bağlı olarak temel enerji seviyelerinden daha yüksek enerji seviyelerine taşınırlar. Bu noktada elektronlar iç dönüşüm yaparak S_1 enerji seviyesine düşerler. İç dönüşüm olayı herhangi bir foton yayımlamadan, elektronun titreşim yaparak enerjisini düşürmesi olarak tanımlanır. Bu noktada S_1 seviyesindeki elektron soğurmuş olduğu enerjiyi ışık olarak yayımlayarak temel enerji seviyesine döner. Bu olay floresans olarak tanımlanır.



Şekil 2.21 Jablonski Diyagramı (Çapan 2008)

Bu şekilde uyarılmış bir elektronun spinin ters dönmesiyle sistemler arası geçiş gözlenebilir. Şekil 2.21'de singlet durumdan titreşim seviyelerine uygun olan bir triplet duruma geçiş gösterilmiştir. Geçiş gerçekleştikten sonra uyarılmış elektron tekrar iç dönüşüm geçirir ve ardından soğurduğu enerjiyi yayımlayarak temel enerji seviyesine geri döner. Bu olaya ise fosforesans denir. Ancak triplet halden singlet hale geçiş ihtimali singlet–singlet geçiş ihtimalinden çok daha azdır. Triplet haldeki elektron bu seviyede singlet halde daha uzun süre kalır. Bu nedenle elektronu uyaran enerji kesilse bile yayınım devam eder (Skoog vd. 2006).

Lüminesans uyarılma enerjisine ya da lüminesansın oluşma yöntemine göre farklı türleri bulunmaktadır. Bunlar;

- Fotolüminesans: Uyarılma elektromanyetik radyasyon tarafından yapıldığı zaman ortaya çıkan emisyon olarak tanımlanır.
- Radyolüminesans: Malzemenin bir x-ışın kaynağı ile uyarılmasıyla ışıma yapma durumuna denir.
- Biyolüminesans: Lüminesansın canlı bir organizma tarafından açığa çıkarıldığı olaydır. Bazı canlılar yapılarında bulundurdukları ışık yayıcı moleküllerin kimyasal reaksiyonlarla uyararak lüminesans yaparlar. Ateşböceği gibi böcekler, bazı mantarlar, fenerbalıkları ve hatta bazı bakteriler bu reaksiyonu kontrol edebilirler.
- Tribolüminesans: Mekanik bir olay veya mekanik olay sonucu ortaya çıkan elektrik enerjisi ile oluşan fosforesans türüdür. Bazı mineraller çizildikleri ya da darbe aldıkları zaman parlar.
- Katodolüminesans: Madde bir elektron demeti tarafından uyarıldığı zaman yayımlanan ışığı tanımlamak için kullanılırlar. Katodolüminesans taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskoplarında (TEM) malzemenin bileşiminin ve optik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan bir olaydır.

3. SERAMİK SİNTİLATÖR MALZEME SENTEZLEME YÖNTEMLERİ

Son yıllarda, yeni nesil şeffaf seramik malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu konusunda yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Yüksek çevresel ve radyasyon kararlılığının yanı sıra, yüksek foton verimi, kısa bozunma süresi ve kısa ışıma özellikleri bu malzemeleri mevcut ticari sintilatör malzemelere alternatif malzeme olarak çekici hale getirmiştir. Ancak bu malzemeler, iyi bilinen ticari sintilatör malzemelere kıyasla, düşük üretim maliyeti iri ve hacimli şekilde imal edilmektedir.

Tek kristal ve şeffaf polikristal seramik malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir.

3.1 Tek Kristal Sintilatör Üretimi (Czochralski veya Bridgement Yöntemleri)

Bu yöntemde oksit bileşenler katkı malzemeler ile karıştırılarak eriyik haline getirilir. Tek kristal sintilatör malzemesi, eriyiğin tohum (seed) malzemesi kullanılarak, çok hassas ve kontrollü bir şekilde katılaştırılmasıyla elde edilir. Üretilen tek kristalin yüzeyleri daha sonra parlatılır. Tek kristal üretimi çok hassas, uzun süreli ve pahalı bir işlemdir.

3.2 Polikristal Seramik Malzemelerin Üretimi

3.2.1 Seramik tozların sentezi

Seramik tozların sentezi için kullanılan yöntemler şunlardır;

- Alev sprey piroliz yöntemi: Bu yöntemde oksit metal tozları ve katkılar uygun organik dağıtıcı maddeler içerisinde homojen bir şekilde karıştırmaya tabi tutulur. Hazırlanan süspansiyon aleve püskürtülerek nano parçacıklar elde edilir. Bu yöntem karmaşık işlemler gerektirir.

- Sol-jel yöntemi: Islak kimyasal yöntemlerden biri olan sol-jel yöntemiyle seramik tozlar elde edilir. Bu yöntemde elde edilmek istenen sintilatör malzemesinin nitratlarının sulu çözeltisi hazırlanır. Yanma işlemini başlatacak üre gibi kimyasallar çözeltiye eklenir. Çözelti ısıtılarak jel haline getirilir ve jel haline getirildikten sonra yaklaşık 300-400 ^{o}C sıcaklıkta yanma işlemi meydana gelir. Yanma sonrası elde edilen tozlar etüvde kurutulur. Tozlar kurutulduktan sonra kül fırında (kare fırın) kalsinasyon işlemine tabi tutulur.
- Birlikte çöktürme (Co-Precipitation) yöntemi: Uygun birleşiğin oksitleri nitrik asit (HNO_3) içerisinde çözünür ve katkılar ilave edilir. Elde edilen çözeltiye amonyak (NH_3) ve/veya amonyum bikarbonat (NH_4HCO_3) belirli bir hızla damlatılır. Damlatma sonrasında, elde edilen süspansiyon yaşlandırma işlemine tabi tutulur. Bu yöntemde, damlatma yaşlandırma boyunca, çözeltinin pH değeri 7-12 arasında tutulmaya çalışılır. Çözelti içerisinde bulunan nano parçacıklar ortamdan nitratların uzaklaştırılabilmesi için saf alkol ile en az 3 defe yıkanır. Her bir yıkama işlemi sonrasında parçacıklar santrifüj ile çözeltiden ayrılır ve kurutulur. Tozlar kurutulduktan sonra kül fırın (kare fırın) kalsinasyon işlemine tabi tutulur.
- Pechini Yöntemi: Seçilen uygun oksitler sıcak nitrik asit (HNO_3) içinde çözünür ve istenilen katkı maddeleri (genelde, Ce veya Eu) elde edilen çözeltiye ilave edilir. Daha sonra belirli bir süre beklenir çözelti tamamen berraklaşana kadar manyetik karıştırıcı ile karıştırılır. Daha sonra deiyonize suda çözünmüş sitrik asit ($C_6H_8O_7$) elde edilen çözeltiye ilave edilir. Homojen bir solüsyon elde edene kadar karıştırılır. Son çözeltiye polietilen glikol (polyetylene glycol-PEG) ilave edilir ve bir süre karıştırılır. Daha sonra, elde edilen çözelti ısıtılarak jel haline getirilir. Oluşan jel etüvde kurutularak agatta öğütülür ve kalsinasyon işlemine tabi tutulur.
- Çözelti yanma yöntemi (solution combustion synthesis): Seçilen uygun oksitleyici nitratların (metal nitratlar, amonyum nitrat vb.) ve organik yakıtlar (üre, karbohidraz veya gliserin) ile oluşturduğu çözeltiler kullanılarak sentezlenmektedir. Yöntem sıcaklığın etkisi ile gerçekleşen reaksiyonun yapıda ekzotermik bir reaksiyon oluşması sonucu kendi kendine devam etmesi ve buna

bağlı kendiliğinden devam eden reaksiyon sonucunda toz malzemelerin oluşmasına dayanmaktadır.

- Bilyalı (Ball mill) değirmen yöntemi: İstenilen birleşiğin metal oksit tozları stokiyometrik oranlarda tartılarak etanol ortamında bilyalı değirmende (Ball mill) karıştırılır. Karıştırma sonrasında elde edilen çamur kurutulur ve tozlar elenir.

3.3 Şeffaf Seramik Sintilatör Malzemesinin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmesi

Toz metalurjisi, parçacıkların oda sıcaklığında istenilen şekli verebilecek kalıplar içine konularak teknik değerlere uygun basınçlarda sıkıştırılır ve parçacıklar arasındaki birleşmeyi kolaylaştırmak için sıkıştırılmış toz karışımın ergime noktasının altında bir sıcaklıkta sinterlenmesi işlemine dayanır.

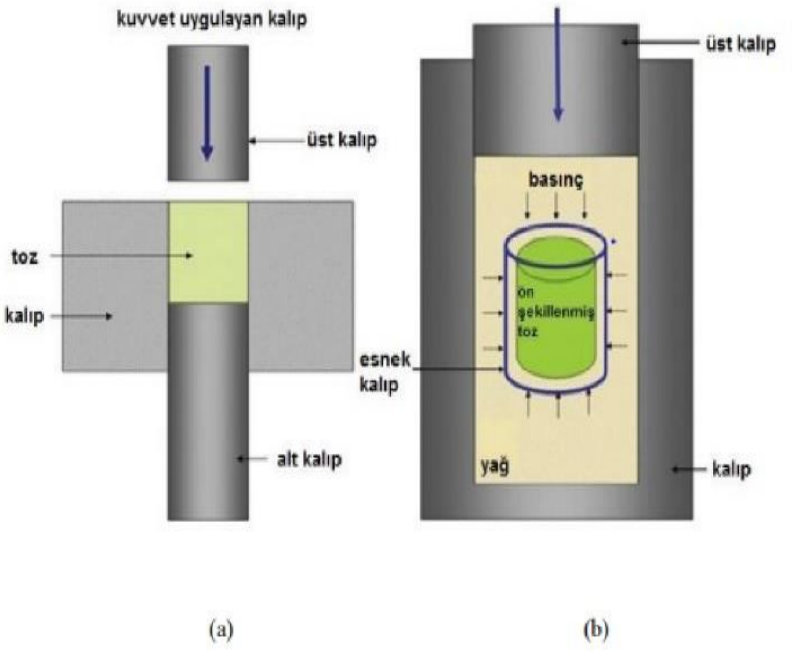
3.3.1 Presleme

3.3.1.1 Tek eksen presleme

Kuru halde bulunan seramik tozları bir kalıp içerisine konularak tek eksenli yük altında sıkıştırılır. Tek eksen presleme yöntemi şematik olarak şekil 3.1'de verilmiştir.

Tek eksen presleme işleminde piston ve kalıp yüzeyi ile tozlar ve kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünme nedeni ile uygulanan basınç tüm tozlara eşit olarak dağılmasını engellemektedir. Özellikle yükseklik/genişlik oranı (L/D; L=Yükseklik, D=Genişlik) büyük olan malzemelerde homojen olmayan yoğunluk dağılımına sebep olmaktadır. İçyapıda meydana gelen homojen olmayan yoğunluk dağılımı nedeniyle preslenmiş parçalar sinterleme işlemi sırasında farklı boyutsal daralma miktarları nedeniyle şekilsel bozuklukların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu bozuklukların giderilmesi için düşük basınçlarda preslenen malzemeler soğuk veya sıcak izostatik presleme işlemi yapılır. Soğuk veya sıcak izostatik presleme işlemi bir akışkan yardımı ile yüksek basınç altında sıkıştırma sağlayan sistemler ile homojen dağılımlı ve yüksek yoğunluklu

parçalara dönüştürülürler (Kumar ve Balasubramanian 2008, Wang vd. 2014, Liu vd. 2014).



Şekil 3.1 İzostatik presleme a. Tek eksenli pres b. Soğuk izostatik pres (Seo vd. 2010)

3.3.1.2 İzostatik presleme

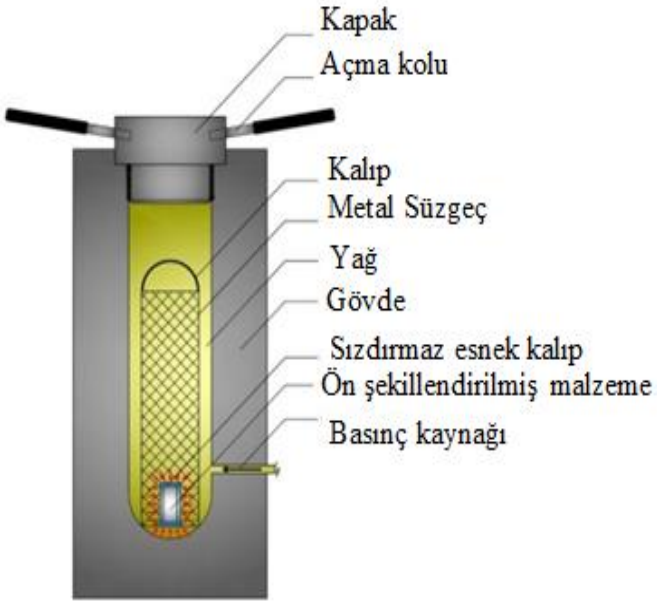
Presleme işlemi izostatik (eş eksenel) ortamda gerçekleşmesi nedeniyle basınç homojen bir şekilde dağılmaktadır. İzostatik presleme sonucunda homojen bir yoğunluklu elde edilmektedir. Tek eksenli presin aksine izostatik preslemede, kalıp duvarı ile pres arasında sürtünmeden doğan kalıcı gerilmeler oluşmamaktadır (Henderson vd. 2000).

İzostatik presleme işlemi, ön şekillendirilmiş bir toz kütlesine veya bir parçaya bütün yönlerden eşit olarak basınç uygulanılması ile gerçekleştirilen bir şekil verme yöntemidir. Eşit basınç uygulaması ile taneler arasındaki temas noktaları artarak reaksiyonun ilerlemesi hızlanmaktadır. Bu yöntemde kalıp iç yüzeyi ile sürtünmeyi de azaltmaktadır. Oda sıcaklığında yapılan izostatik presleme işlemi soğuk izostatik presleme (CIP) olarak adlandırılırken, yüksek sıcaklıkta yapılan izostatik presleme işleminde sıcak izostatik presleme (HIP) olarak adlandırılmaktadır. CIP işlemi ile yoğun

hale getirilmiş olan malzemeye, CIP işlemi sonrasında HIP işlemi uygulandığında daha yüksek yoğunluğa sahip ürünler elde edilir.

3.3.1.2.1 Soğuk izostatik presleme (CIP)

Soğuk izostatik presleme (CIP) işleminde, tek eksen presleme işlemi sonrasında ön şekillendirilmesi yapılmış malzeme esnek bir kalıp içine konularak sızdırmaz hale getirilir (Yang vd. 2004). Yağ veya su gibi bir sıvının olduğu CIP'in içine sızdırmazlığı sağlanan malzeme konularak sıkıştırılır. CIP'te 1400 MPa'a kadar sıkıştırma basınçları mümkün olmasına rağmen, genellikle 420 MPa altındaki basınçlarda yapılır (Ekşi ve Sarıtaş 2001).



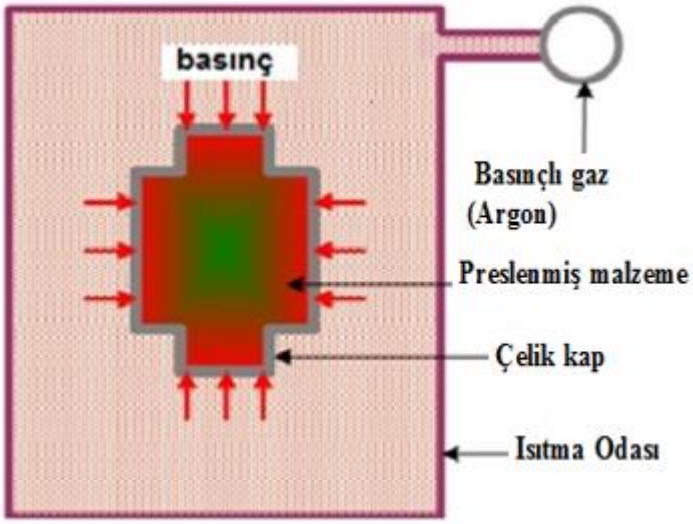
Şekil 3.2 Soğuk izostatik presleme (Seo vd. 2010)

CIP işlemi sırasında sistem sıvılara ait Pascal prensibi göre çalışır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi dışarıdan bir hidrolik sistemle basınç uygulanır (German 2005). Bu yöntem ile yalnızca basit şekiller değil aynı zamanda karmaşık şekilli parçalar da kolaylıkla sıkıştırılarak ham yoğunlukları arttırılabilir. CIP işleminden sonra yoğunluğu arttırılan numunenin istenen nihai özellikleri (mekanik özellikler, yoğunluk gibi)

vermesi için her hangi bir sinterleme metoduyla (basınçsız sinterleme, sıcak presleme vb.) sinterlenmesi gerekir.

3.3.1.2.2 Sıcak izostatik presleme (HIP)

HIP işlemi eş eksenli uygulanan basınçla birlikte basınç kabının ısıtılarak tozların daha az kuvvetle ve daha yüksek yoğunlukta şekillendirilmesidir. HIP yönteminde toz kütlenin sıkıştırılarak şekillendirilmesi ve sinterlenmesi aynı anda gerçekleşmektedir. Ayrıca HIP'de basınç geçirici ortam olarak çeşitli inert gazlar kullanılırken, CIP'de sıvılar kullanılmaktadır.



Şekil 3.3 Sıcak izostatik presleme (Kopeliovich 2012)

Seramik malzemelerin yoğunluğunu arttırmak için genellikle HIP'e başvurulur. HIP yönteminde yoğunluk toz malzemenin hareketi ile gerçekleşmekte ve bu işlem daha az sıcaklıklarda ve daha kısa sürede sağlanmaktadır. HIP kinetiğine etki eden parametreler basınç, toz boyutu, sıcaklık ve malzemenin mekanik davranışıdır.

Klasik yöntemler ile malzemede meydana gelen gözeneği ortadan kaldırabilmek için gerektiğinden fazla yüksek sıcaklık ve basınç altında uzun süre malzemeyi tutmak yerine daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürede işlem yapıldığı için HIP işleminin

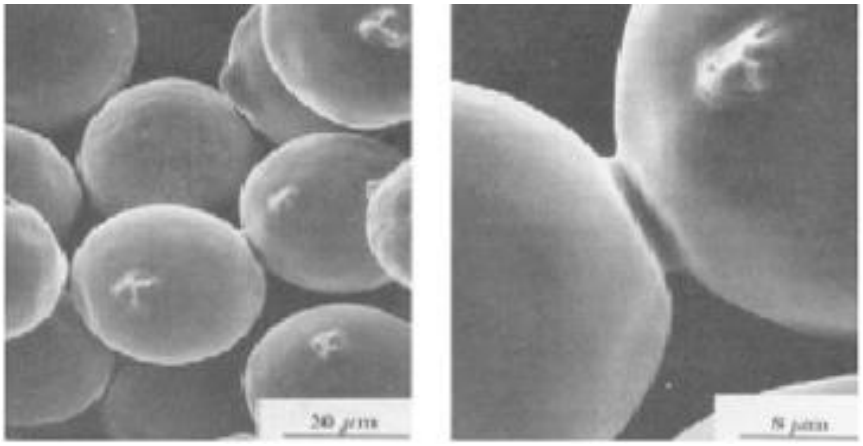
önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu sayede hem mikro yapının tane boyutu küçük olmakta hem de enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

3.3.2 Sinterleme

Sinterleme işlemi, parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışına ve birçok özelliği geliştiren ısıl işlemdir. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle oluşur. Sinterleme, yüksek sıcaklıklarda atomların yayınımı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Toz üretimi malzemeye enerji vererek yüzey alanı veya yüzey enerjisi yaratma işlemidir. Sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilir. Birim hacimdeki yüzey enerjisi parçacık boyutu azaldıkça arttığından küçük boyuttaki parçacıklar daha hızlı sinterlenir (Öztürk S ve İçin K 2015).

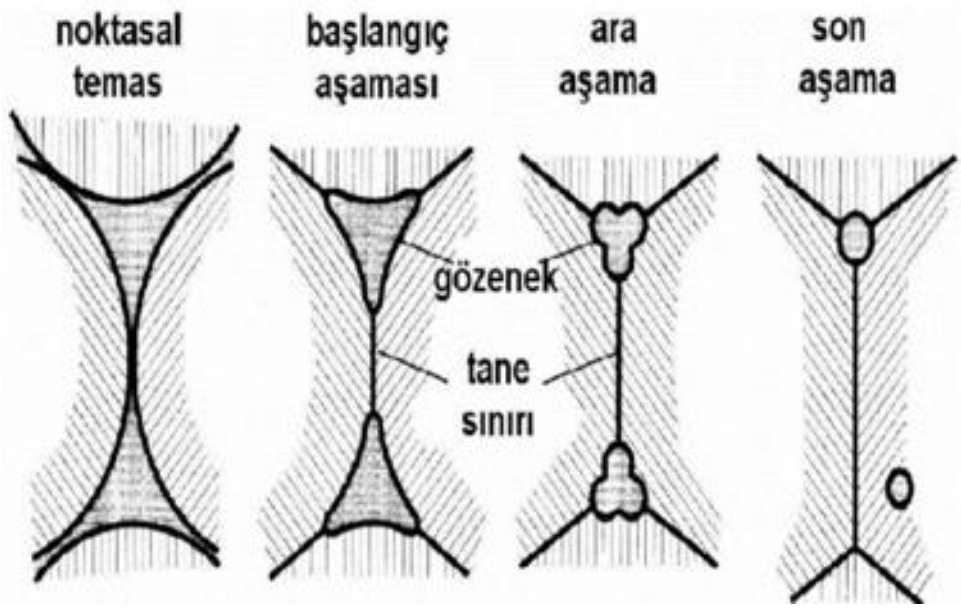
Toz parçacıkların toz konumundan kaynaklanan yüksek yüzey enerjisini ortadan kaldıran atom hareketleri sayesinde sinterlenir. Birim hacim başına yüzey enerjisi, parçacık çapı ile ters orantılıdır. Yüzey enerjisi tipik olarak yüzey alanı üzerinden değerlendirilir. Bu nedenle yüksek özgül yüzey alanına sahip daha küçük olan parçacıkların daha fazla enerjisi vardır ve daha hızlı sinterlenirler (Arıtman 2014).

Mikro yapısal ölçekte bakıldığında bağlanma parçacık temas noktalarındaki kohezif (parçaları birleştirerek bir bütün oluşturmak) boyun büyümesi ile meydana gelir. Şekil 3.4'de sinterleme küreleri arasındaki katıhal boyun oluşumunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.4 Sinterleme ile boyun oluşumu (Arıtman İ 2014)

Partiküllerin noktasal temasıyla başlayan sinterleme işlemi sırasında meydana gelen gözenek yapısının değişimi şekil 3.5'de gösterilmiştir. Boşluk hacmi giderek azalır ve boşluklar daha küresel bir hale gelir. Boşluk küreselleşmesi oluşurken boşlukların yerini tane sınırları almaktadır (Öztürk S ve İçin K 2015).



Şekil 3.5 Gözenek yapısının değişimi (Öztürk S ve İçin K 2015)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Hammadde ve Üretim Yöntemi

Bu çalışma kapsamında lantanit grubundan olan Eu^{+3} (europyum) katkılı $(Gd, Lu)_2O_3$ (gadolonyum lutesyum oksit) seramik sintilatör malzemesinin sentezlenmesi için çözelti yanma yöntemi kullanılmıştır.

İlk seri olarak adlandırılan lutesyum oksit miktarı % 10, % 20, % 40, % 80, % 95 olan ve ikinci seri olarak adlandırılan lutesyum oksit miktarı % 130 ve % 150 olacak şekilde üretilen europyum katkılı gadalonyum lutesyum oksit ($(Gd,Lu)_2O_3:Eu^{+3}$) başlangıç tozları hazırlanmış ve çözelti yanma yöntemi ile $(Gd,Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ toz numuneler üretilmiştir. Gd_2O_3 (% 99,99 saflıkta, Sigma Aldrich marka), Lu_2O_3 (% 99,99 saflıkta, Alfa Aesar marka) ve Eu_2O_3 (% 99,99 saflıkta, Alfa Aesar marka) nadir toprak elementi oksitleri ile nitrik asit (HNO_3) (Sigma Aldrich marka) ve polietilen glikol (PEG-200) (Sigma Aldrich marka) kullanılmıştır.

Numune hazırlamada kullanılan elementlerin ağırlıkları, bileşiklerin saflıkları ve atom ağırlıkları çizelge 4.1' de verilmektedir.

Çizelge 4.1 Elementler ve atomik ağırlıkları ile bileşiklerin saflıkları ve atomik ağırlıkları

Element	**Atomik Ağırlığı (g/mol)**	**Bileşik**	**Saflık(%)**	**Atom ağırlığı (g/mol)**	**Rengi**	**Ergime Sıcaklığı**
Gd	157,25	Gd_2O_3	99,90	362,50	Beyaz	2420 ^{0}C
Lu	174,97	Lu_2O_3	99,99	397,93	Beyaz	2490 ^{0}C
Eu	151,96	Eu_2O_3	99,99	351,93	Beyaz	2350 ^{0}C
O	15,99					

İlk seride üretilecek olan lutesyum oksit miktarı % 10, % 20, % 40, % 80 ve % 95 olacak şekilde yaklaşık 10 gram $(Gd,Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ başlangıç tozu için çizelge 4.2'de reaksiyona girecek madde miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.2'de verilen malzeme kodları sırası ile matris elementinin simgesi (Lu) ve lutesyum oksit malzemesinin katkılama miktarı (% 10 için 010, %20 için 020, % 40 için 040, % 80 için 080 ve % 95 için 095) olarak verilmektedir.

Çizelge 4.2 Yaklaşık 10 gram numune hazırlığı için başlangıçta reaksiyona girecek madde miktarları

Katkı Oranı	**10 %**	**20 %**	**40 %**	**80 %**	**95 %**
Malzeme kodu	**Lu010**	**Lu020**	**Lu040**	**Lu080**	**Lu095**
Gd_2O_3	8,3969 g	8,4306 g	7,3673 g	5,3009 g	4,5459 g
Lu_2O_3	0,3547 g	1,0888 g	2,1567 g	4,2321 g	4,9903 g
Eu_2O_3	0,4838 g	1,0888 g	0,4768 g	0,4678 g	0,4645 g
Toplam	9,2354 g	10,6082 g	9,9918 g	10,0008 g	10,0007 g

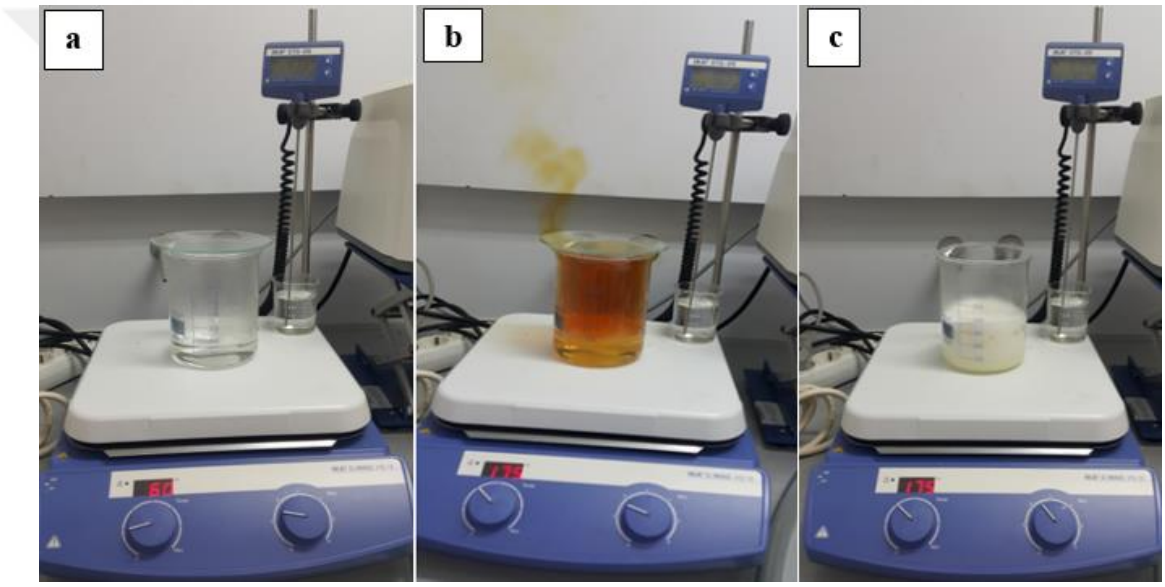
4.1.1 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların çözelti yanma sentezi ile üretimi ve kalsinasyon işlemi

$(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklarının üretiminin tüm aşamaları TEMAK-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Malzeme Sentez Laboratuvarında yapılmıştır. Kullanılan cam malzemeler saf su ve etil alkol ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Gadalonyum oksit, lutesyum oksit ve europyum oksit miktarları çizelge 4.2'deki ağırlıklarda hassas terazi ile tartılmıştır. Parçacıkların çözelti yanma yöntemi ile üretimi ve kalsinasyon aşaması basamakları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

4.1.1.1 Çözelti yanma yöntemi

Stokiyometrik oranda hazırlanan başlangıç toz karışımı sentezleme işleminde öncelikle konak olarak kullanılan malzemeler ısıtmalı manyetik karıştırıcı kullanılarak nitrik asit

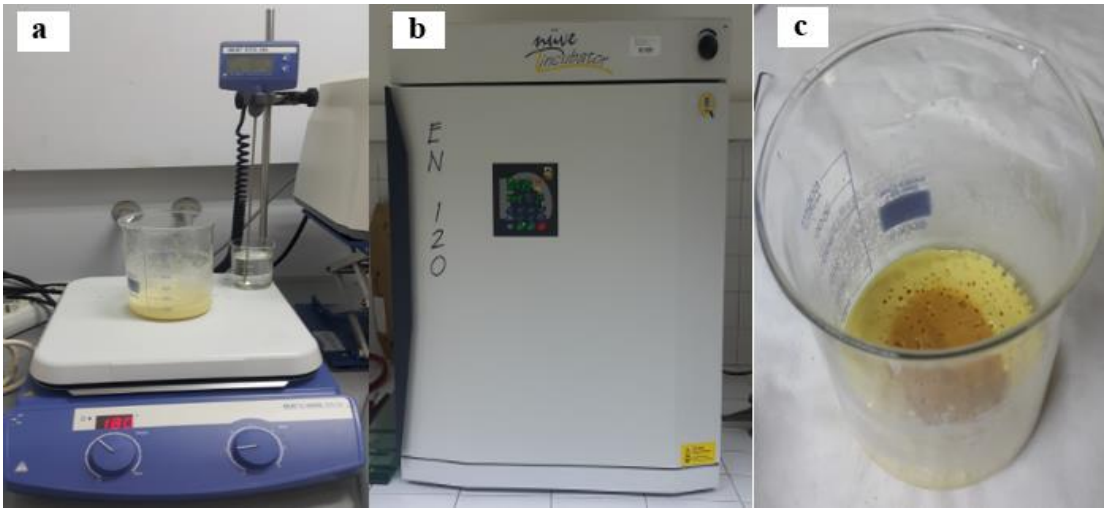
ve saf su içinde çözünmüştür. Konak malzemeler tamamen çözündükten sonra katkı malzemesi eklenmiştir. Sıcaklık artışı kademeli olarak yapılmış ve katkı malzemesi çözelti içinde çözünene kadar manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaya devam edilmiştir. Çözünme işlemi bittikten sonra jelleşme işleminin oluşması için karışıma polietilen glikol (PEG-200) eklendi ve jelleşme işlemi sırasında karışımdaki organiklerin atılması esnasında gaz çıkışı meydana geldi. Gaz çıkışı bittikten sonra malzeme manyetik karıştırıcı ile karıştırmaya devam edildi ve malzemenin jelleştiği görüldü (Şekil 4.1). Jelleşmede tüm çözelti hacmini kapsayan gözenekli bir ağ yapı oluştu. Jelleşme noktasında viskozitenin de oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.1 Numune sentez adımları, a. Çözelti hazırlanması, b. Organik gaz çıkışı, c. Jelleşme işlemi

4.1.1.2 Etüv işlemi

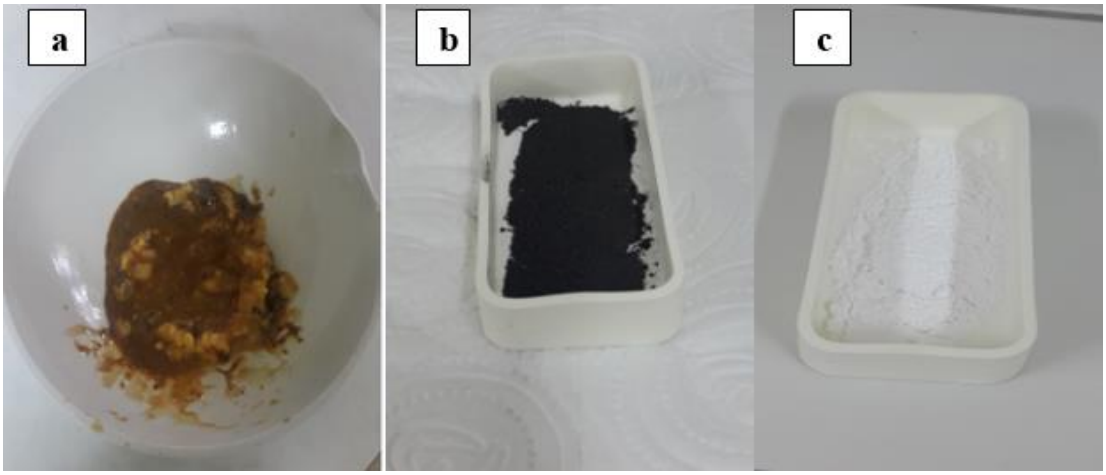
Çözelti tamamen jel haline geldikten sonra ürünü kurutmak için 80 ^{0}C sıcaklıkta 12 saat etüvde (Nuve Icubator marka, EN 120 model cihaz) bekletildi (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Jelleşme işlemi, a. Jelleşen malzeme, b. Etüv cihaz, c. Etüv'den çıkartılan Malzeme

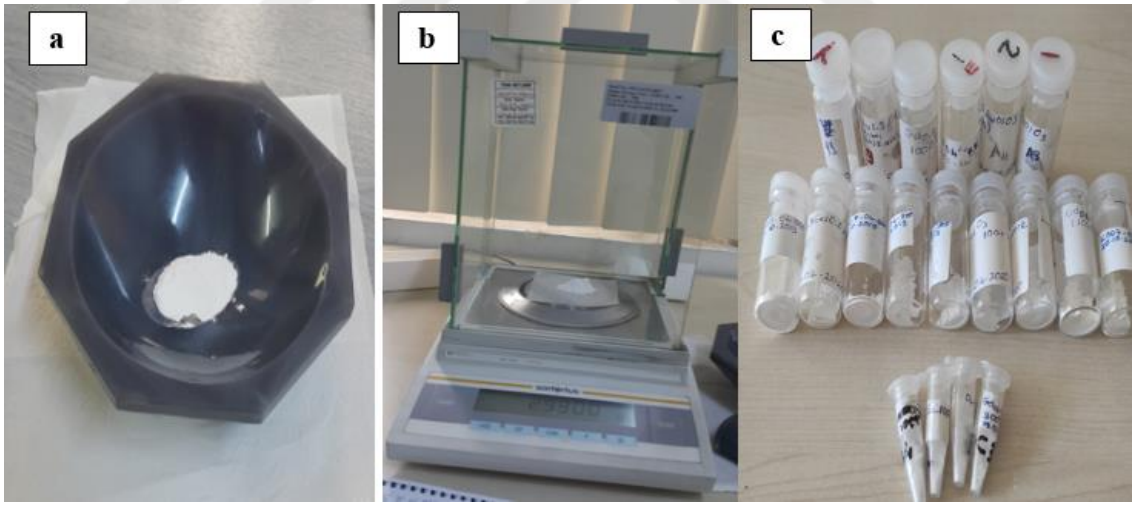
4.1.1.3 Kalsinasyon işlemi

Etüv'de kurutulan malzeme agat havanda öğütüldükten sonra sıcaklık yardımı ile yapıda mevcut su, CO, CO_2 ve diğer gazların uzaklaştırılması için kül fırında (Carbolite marka cihaz) kalsinasyon işlemi yapıldı. Kalsinasyon işlemi açık hava atmosferinde sıcaklık elle kademeli olarak artırıldı. Sıcaklık 350 ^{0}C'ye geldiğinde yapıda mevcut CO, CO_2 gibi gazlar bitene kadar bu sıcaklıkta ortalama 2 saat bekletildi. Gaz çıkışı bittikten sonra sıcaklık kademeli olarak 500 ^{0}C'ye çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 30 dakika bekletildikten sonra kalsinasyon fırını kapatılarak malzeme soğumaya bırakıldı. Soğuyan malzeme agat havan ile öğütüldükten sonra 3 eşit parçaya bölünerek alümina kroze kaba konuldu ve 800, 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıkta kül fırında 2 saat kalsinasyon işlemi uygulandı. Kalsinasyon işlemi sonunda beyaz renkli istenen kompozisyona uygun parçacıklar elde edildi (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Kalsinasyon işlemi, a. Kalsinasyon yapılacak malzeme, b. 500 ^{0}C'de bekletilen malzeme, c. Kalsinasyon işleminden sonra elde edilen parçacıklar

Farklı sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılan parçacıklar agat havanda öğütüldü, üretilen malzemeler tartıldı ve yeni kodlar verilerek şişelendi (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Seramik tozlar, a. Agatta öğütülen seramik tozlar, b. Hassas terazi, c. Kod verilerek şişelenen parçacıklar

Üretilen parçacıklara verilen malzeme kodları sırası ile matris elementinin simgesi (Lu), lutesyum oksit malzemesinin katkılama miktarı (% 10 için 010, % 20 için 020, % 40 için 040, % 80 için 080 ve % 95 için 095) ve kalsinasyon sıcaklığı (800, 900 ve 1000 ^{0}C) olarak vermektedir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara verilen kodlar

Malzeme kodları	Açılımı
Lu010-800	%10 Lu_2O_3 olan, 800 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu010-900	%10 Lu_2O_3 olan, 900 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu010-1000	%10 Lu_2O_3olan, 1000 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu020-800	%20 Lu_2O_3 olan, 800 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu020-900	%20 Lu_2O_3 olan, 900 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu020-1000	%20 Lu_2O_3 olan, 1000 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu040-800	%40 Lu_2O_3 olan, 800 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu040-900	%40 Lu_2O_3 olan, 900 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu040-1000	%40 Lu_2O_3 olan, 900 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu080-800	%80 Lu_2O_3 olan, 800 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu080-900	%80 Lu_2O_3 olan, 900 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu080-1000	%80 Lu_2O_3 olan, 1000 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu095-800	%95 Lu_2O_3 olan, 800 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu095-900	%95 Lu_2O_3 olan, 900 ^{0}C-2 saat kalsinasyon
Lu095-1000	%95 Lu_2O_3 olan, 1000 ^{0}C-2 saat kalsinasyon

4.1.1.4 Karakterizasyon işlemi

Üretilen seramik tozlarının kristal yapısı X-ışını difraktometre (XRD) (Bruker D8 Advance marka cihaz), optik özellikleri fotolüminesans spektroskopi (PL) (Varıan marka, Cary Explice model cihaz) ve makro yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Jeol marka, JSM-6060LV model cihaz) cihazları kullanılarak incelenmiştir.

4.1.2 (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} polikristal seramik sintilatör parçacıklara toz metalurjisi yönteminin uygulanması

Çözelti yanma yöntem ile sentezlenen seramik parçacıkların şekil verilmesi ve şeffaflığın sağlanması için toz metalurjisi yöntemi uygulanmıştır.

4.1.2.1 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör parçacıklara tek eksen pres işlemi

Polikristal seramik parçacıklara sinterleme öncesi son şeklini vermek ve istenen oranda gözeneklilik sağlamak amacıyla üretilecek parça şekline göre hazırlanmış kalıplar içerisinde tek eksenli pres makinesi ile sıkıştırılırlar. Parçacıklara tek eksenli pres makinesi ile şekil verilmesi işlemi TEMAK-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Malzeme Üretim Laboratuvarında yapılmıştır. Bu çalışmada üretilen parçacıklar kalıp (Specac marka kalıp) içine konularak belli bir basınç altında tek eksenli pres (Specac marka cihaz) makinesi ile disk (pelet) haline getirildi (Şekil 4.5).

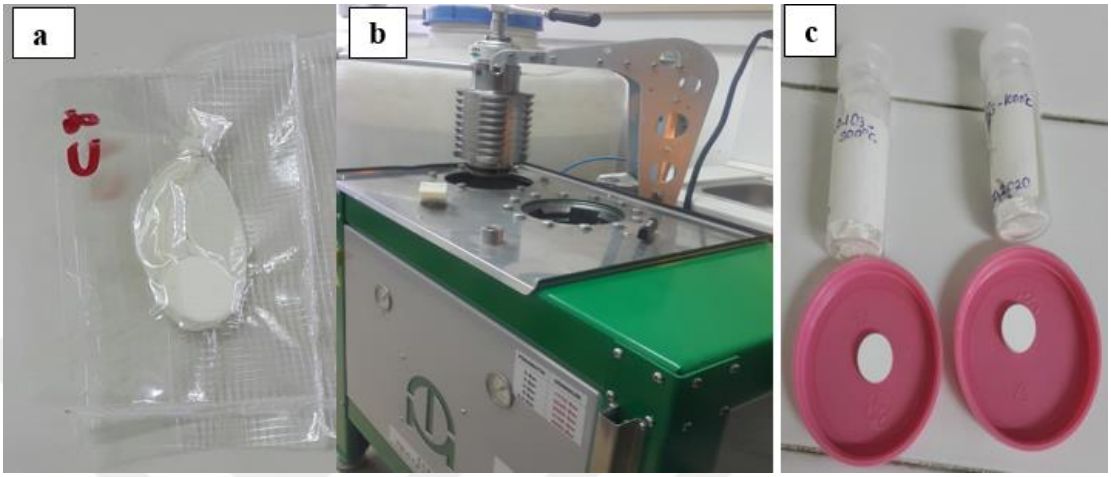


Şekil 4.5 Şekil verme işlemi, a. Kalıp, b. Tek eksen pres makinesi, c. Peletlenmiş malzeme

4.1.2.2 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere CIP işlemi uygulaması

CIP işlemi TEMAK-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Malzeme Şekillendirme Laboratuvarında yapılmıştır. Pelet haline getirilen seramik sintilatör malzemeler esnek bir kalıp içine konularak sızdırmazlığı sağlandı. Peletlenmiş malzemeyi esnek bir kalıp içine koyarken kalıp içindeki havayı almak için vakumlama cihazı ile içindeki hava alınarak ağzı kapatıldı. Malzeme CIP (Tm-C.I.P./Tayfun-1 marka cihaz) cihazı içine konuldu ve belli bir basınç altında soğuk izostatik presleme (CIP) işlemi yapıldı (Şekil 4.6). CIP'de basınç geçirici olarak su ve bor yağından oluşan malzeme kullanıldı. CIP

işlemi sonrasında malzemenin yoğunluğunu ve elde edilen yoğunluğun yüzdesini hesaplamak için CIP yapılan malzemeler tartıldıktan sonra verniyeli kumpas ile çapı ve kalınlığı ölçüldü.



Şekil 4.6 CIP işlemi, a. Sızdırmazlığı sağlanmış malzeme, b. CIP makinesi, c. CIP işlemi sonrası malzeme

4.1.2.3 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere sinterleme işlemi

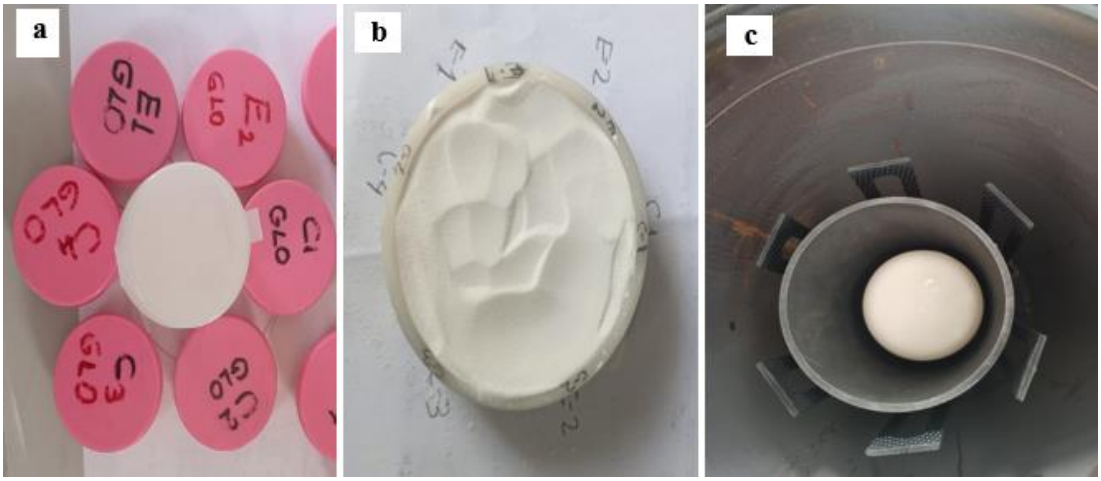
Sinterleme işlemi TEMAK-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Malzeme Isıl işlem Laboratuvarında yapılmıştır. Sinterleme işlemi oksijen (O_2) gaz akışı altında sinterleme (Protherm Furnaces marka cihaz) fırınında 1650 ve 1700 ^{0}C sıcaklıkta ve farklı ısıl işlem sürelerinde yapıldı. HIP öncesi yoğunluk yüzdesi değeri %91'den daha büyük olan seramik sintilatör malzemeler elde edilmeye çalışıldı. Malzemeler alümina kroze kaba konularak sinterleme fırınının tam ortasına gelecek şekilde yerleştirildi (Şekil 4.7). Sinterleme işlemi sonrasında malzemenin yoğunluğunu ve elde edilen yoğunluğun yüzdesini hesaplamak için sinterlenmiş malzemeler tartıldıktan sonra verniyeli kumpas ile çapı ve kalınlığı ölçüldü.



Şekil 4.7 Sinterleme işlemi, a. Sinterleme öncesi seramik sintilatör malzemeler, b. Sinterleme cihazı, c. Sinterleme sonrası seramik sintilatör malzemesi

4.1.2.4 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere HIP işlemi uygulanması

HIP işlemi TÜBİTAK-SAGE'de bulunan HIP cihazı ile yapıldı. Sinterleme işlemi sonucunda yoğunluk yüzdesi değeri %91'den büyük olan seramik sintilatör malzemeler HIP işlemi için seçildi. HIP işlemine girecek olan malzemeler için gömme tozu hazırlandı. Gömme tozu olarak adlandırılan malzeme gadalonyum lutesyum oksit içeren parçacıklardan oluşmaktadır. Alümina kap içine sinterlenmiş seramik sintilatör malzemeleri konuldu ve üzeri gömme tozu ile kapatıldıktan sonra HIP cihazına konuldu. HIP işlemi 200 MPa basınçta, 1650 ^{0}C sıcaklıkta ve 4 saatte yapıldı. HIP işleminde seramik sintilatör malzemeleri sıkıştırılarak şekillendirilmesi ve belli bir sıcaklıkta sinterlenmesi aynı anda gerçekleşti (Şekil 4.8). HIP işleminde basınç geçirici olarak argon gazı kullanıldı. HIP işlemi sonrasında malzemenin yoğunluğunu ve elde edilen yoğunluğun yüzdesini hesaplamak için HIP işlemi yapılmış malzemeler tartıldıktan sonra verniyeli kumpas ile çapı ve kalınlığı ölçüldü.



Şekil 4.8 HIP işlemi, a. HIP'e girecek malzeme ve gömme tozu, b. Gömme tozu ile kaplanmış malzeme, c. HIP cihazına konulmuş malzeme

HIP işlemi sonrasında elde edilen seramik sintilatör malzemeler şekil 4.9'daki gibidir.



Şekil 4.9 HIP işlemi sonrası seramik sintilatör malzemeler

4.1.2.5 $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ polikristal seramik sintilatör malzemelere zımparalama ve parlatma işlemi

Zımparalama ve parlatma işlemi TEMAK-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Isıl işlem Laboratuvarında yapılmıştır. HIP'ten çıkan malzemelerin yoğunluğu ve elde edilen yoğunluğun yüzdesini hesaplandıktan sonra zımparalama (Struer marka, Labopol-5 model) makinesi ile çizelge 4.4'te verilen malzemeler ile zımparalama ve parlatma işlemi üretilen seramik sintilatör malzemelerin her iki yüzüne uygulandı.

Çizelge 4.4 Zımparalama ve parlatma işlemi aşamaları

Zımparalama	**Zımpara yüzey malzemesi**	**Aşındırıcı-Yağlayıcı tipi**
1.Aşama	MD-Piano 220	Su
2.Aşama	MD-Piano 500	Su
3.Aşama	MD-Largo 9 µm	DiaPro Allegro/Largo 9 µm
4.Aşama	MD-Largo 3 µm	DiaPro Allegro/Largo 3 µm
Parlatma	**Parlatma yüzey malzemesi**	**Aşındırıcı tipi**
1.Aşama	MD-Dur 3 µm	DiaPro Dur 3 µm
2.Aşama	MD-Chem	OP-S 0.04 µm

Malzemelere çizelge 4.4'de verilen zımparalama ve parlatma işlemleri aşamalı olarak malzemenin her iki yüzüne uygulandı ve elde edilen seramik sintilatör malzemeleri şekil 4.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.10 Zımparalama ve parlatma işlemi sonrası seramik sintilatör malzemeler

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

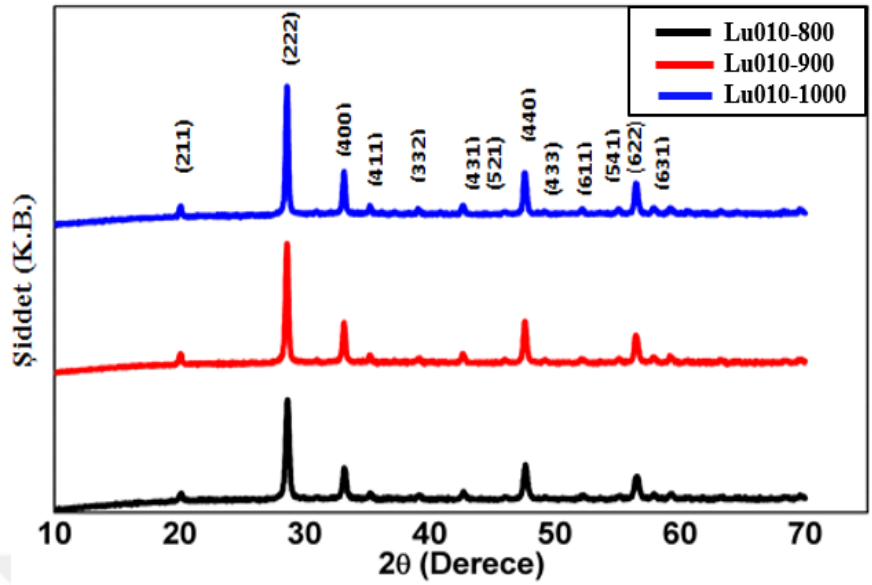
5.1 İlk Seri Olarak Üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ Parçacıklara Ait Ölçümler

Lutesyum oksit (Lu_2O_3) miktarı % 10, % 20, % 40, % 80 ve % 95 olacak şekilde değiştirilerek çözelti yanma yöntemi ile üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklar 800, 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda 2 saat kalsinasyon işlemi sonucunda faz yapısı, parçacıkların tahmini boyutunun tespiti ve lüminesans özelliklerinin incelenmesi için ölçümler alınmıştır. Ölçüm sonuçları ayrıntılı bir şekilde aşağıda verilmiştir. Hazırlanan numunelere ait Lu_2O_3 katkılama miktarı, kalsinasyon ve sinterleme sıcaklıklarının seramik sintilatör malzemesi üzerine etkisi açıklanmıştır.

5.1.1 İlk seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların XRD analizleri

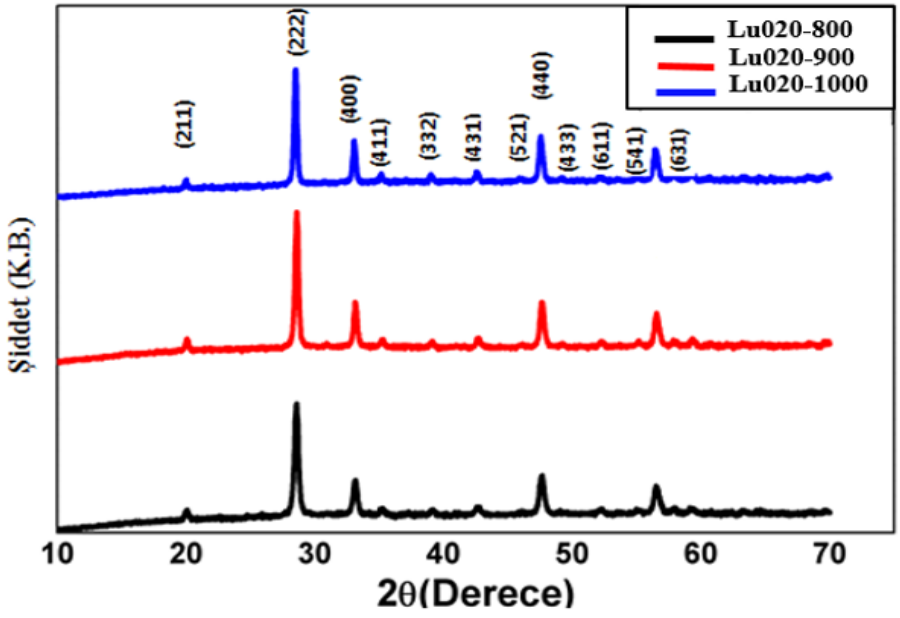
Çözelti yanma yöntemiyle üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların kristal yapısını incelemek ve ana fazın yanında oluşabilecek safsızlıkları belirlemek için x-ışını kırınım yöntemi kullanılmıştır. Parçacıkların yapısal analizleri, Rıgaku marka D/Max-IIIC model x-ışını difraktometresi (Cu K_α 40kV, 30mA, λ= 1, 5406 Å) ile x-ışını toz kırınım (XRD) ölçümleri alınmıştır. Ölçümler $10^0 < 2\Theta < 70^0$ derece arasında 0,02 derece/dakika adımlarla kaydedilmiştir. Ayrıca XRD'de elde edilen desenlerde piklerin indislenmesi ve yapı parametrelerinin belirlenmesi için XRD-PDXL programı kullanılmıştır.

Lu_2O_3 miktarı % 10 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen Lu010-800, Lu010-900 ve Lu010-1000 kodları verilen parçacıklara ait x-ışını kırınım desenleri şekil 5.1'de verilmiştir.



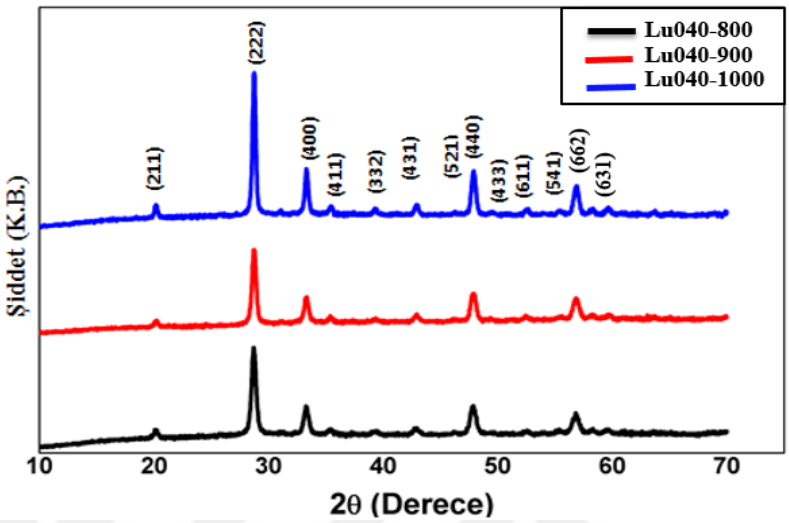
Şekil 5.1 Lu010-800, Lu010-900 ve Lu010-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği

Lu_2O_3 miktarı % 20 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodu verilen parçacıklara ait x-ışını kırınım desenleri şekil 5.2'de verilmiştir.



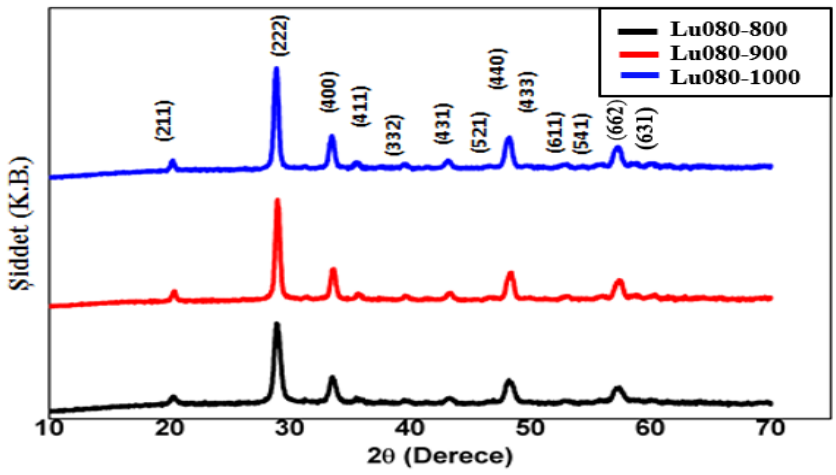
Şekil 5.2 Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği

Lu_2O_3 miktarı % 40 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen Lu040-800, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodları verilen parçacıklara ait x-ışını kırınım desenleri şekil 5.3'te verilmiştir.



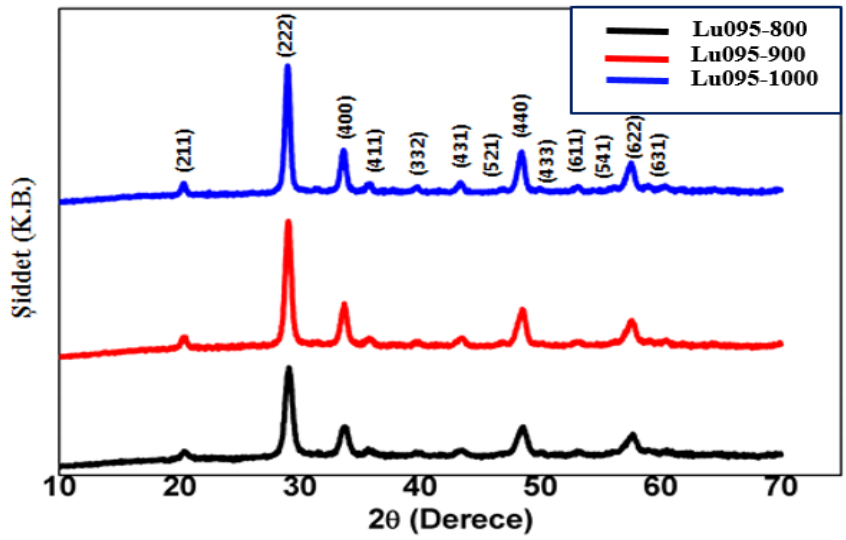
Şekil 5.3 Lu040-800, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği

Lu_2O_3 miktarı % 80 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen Lu080-800, Lu080-900 ve Lu080-1000 kodları verilen parçacıklara ait x-ışını kırınım desenleri şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.4 Lu080-800, Lu080-900 ve Lu080-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği

Lu_2O_3 miktarı % 95 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen Lu095-800, Lu095-900 ve Lu095-1000 kodları verilen parçacıklara ait x-ışını kırınım desenleri şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5 Lu095-800, Lu095-900 ve Lu095-1000 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği

İlk seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı % 10, % 20 ve % 40 olan şekil 5.1- 5.3'te elde edilen XRD analizi sonucunda; tozların tüm kırınım pikleri Gd_2O_3'e ait olan JCPDS kart no:00-043-1014'de rapor edilen standart verilerle tutarlı, hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip olduğu bulunmuş ve birim hücre parametresinin a=10,81 Å olarak hesaplanmıştır. Lu_2O_3 miktarı % 80 ve % 95 olduğunda ise şekil 5.4 -5.5' de elde edilen x-ışını kırınım desenleri analizi sonucunda; tozların tüm kırınım pikleri Lu_2O_3'e ait olan JCPDS kart no:00-043-1021'de rapor edilen standart verilerle tutarlı, hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip olduğu belirlenmiş ve birim hücre parametresinin a=10,39 Å olarak hesaplanmıştır. İlk seri olarak üretilen ve kalsinasyon işlemi yapılan tozlarda ikinci faz ya da saflığı bozan yapıların olmadığı tespit edildi.

Ayrıca kalsinasyon sıcaklığının artması ile kırınım piklerinin şiddeti daha yüksek ve daha keskin olduğu görülmektedir. Piklerin şiddetinin yüksek ve keskin olması parçacık boyutlarının büyüdüğü anlamına gelmektedir. Parçacık boyutunun küçülmesiyle XRD pik şiddetinde azalma dolayısıyla piklerde genişlemeye sebep olmaktadır.

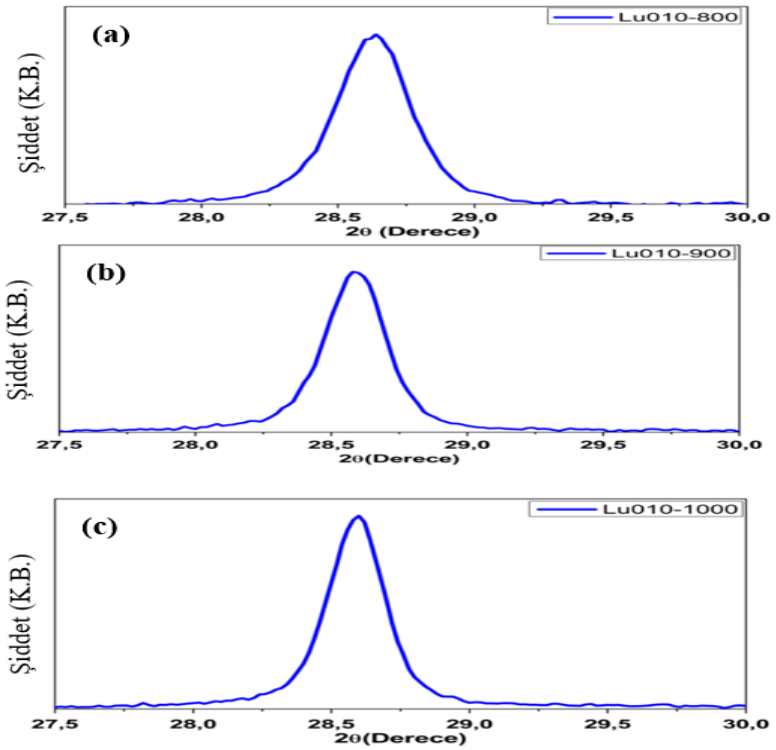
5.1.2 İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu $^{+3}$ parçacıklarına ait parçacık boyutlarının hesaplanması

XRD kırınım deseninden faydalanılarak yaklaşık parçacık boyutu hesabı Scherrer formülü ile yapılmıştır. Scherrer formülü denklem (5.1)'de verilmektedir.

$$D = \frac{0{,}89\ \lambda}{B\ \mathrm{Cos}\theta} \tag{5.1}$$

Burada λ, Cu-K_α radyasyonunun dalga boyu; B, kırınım pikinin FWHM değeri ve Θ, kırınım açısı olarak verilmektedir.

Lu_2O_3 miktarı % 10 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarına ait parçacık boyutunun bulunması için XRD grafiğinden elde edilen (222) ana kırınım çizgileri şekil 5.6'da verilmiştir.



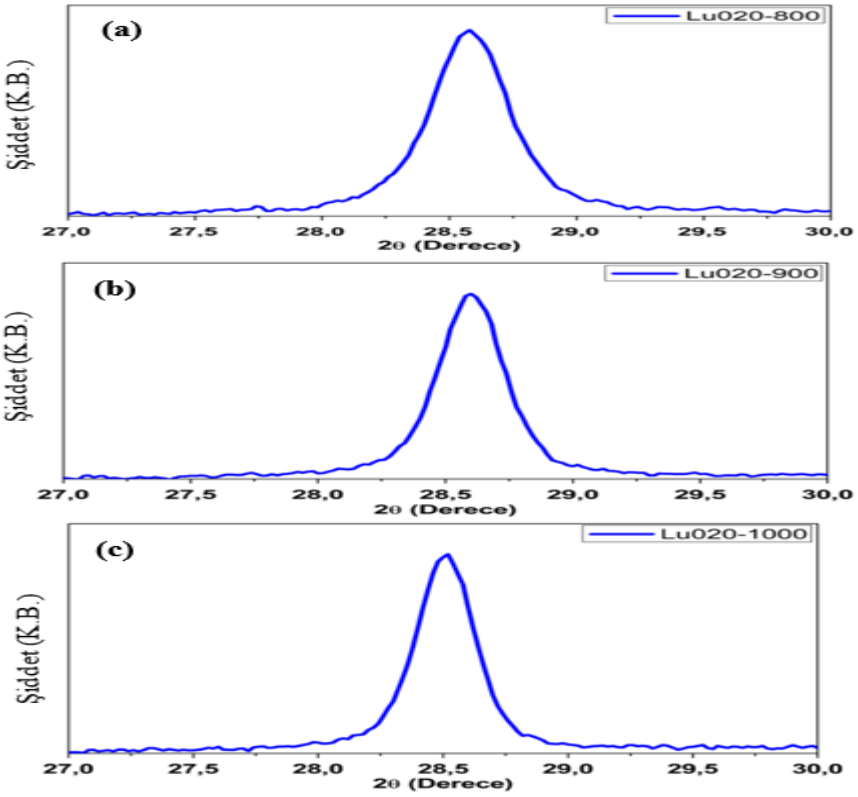
Şekil 5.6 Lu_2O_3 miktarı %10 olan (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara a. 800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri

Denklem (5.1)'i ve şekil 5.6'da verilen kırınım pikleri kullanılarak hesaplanan parçacık boyutu çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Lu010-800, Lu010-900 ve Lu010-1000 kodlu $(Gd,Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları

Malzeme Kodu	**Lu010-800**	**Lu010-900**	**Lu010-1000**
2Θ (Derece)	28,64	28,58	28,60
FWHM(Radyan)	0,006612	0,005197	0,004718
Parçacık Boyutu(nm)	**23,6**	**29,9**	**33,0**

Lu_2O_3 miktarı % 20 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklarına ait parçacık boyutunun bulunması için XRD grafiğinden elde edilen (222) ana kırınım çizgileri şekil 5.7'de verilmiştir.



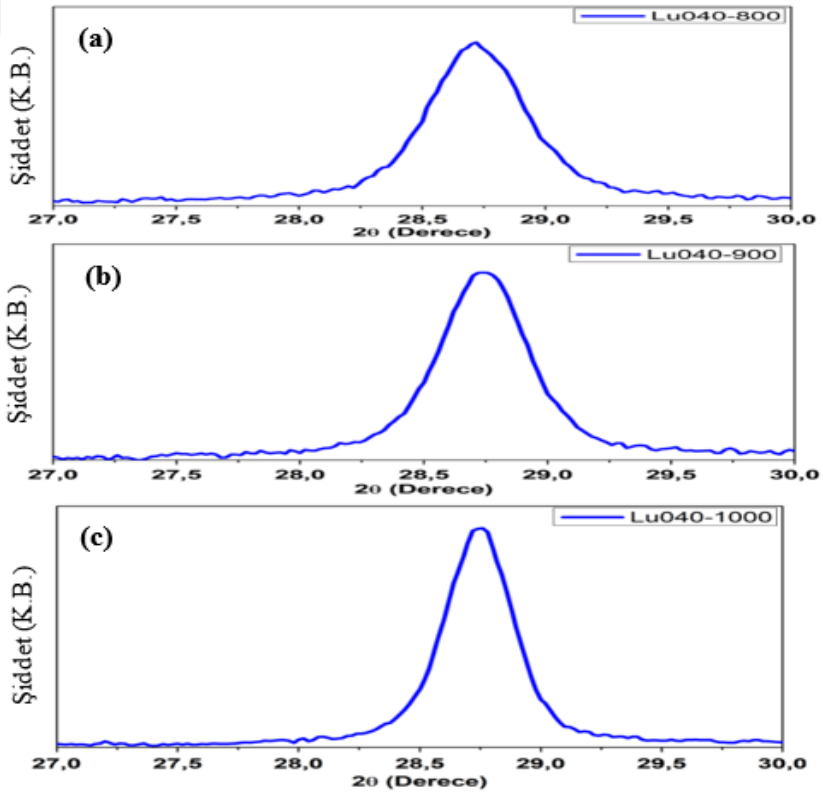
Şekil 5.7 Lu_2O_3 miktarı %20 olan $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara a. 800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri

Denklem (5.1)'i ve şekil 5.7'da verilen kırınım pikleri kullanılarak hesaplanan parçacık boyutu çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodlu $(Gd,Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıkların parçacık boyutları

Malzeme Kodu	**Lu020-800**	**Lu020-900**	**Lu020-1000**
2Θ (Derece)	28,58	28,60	28,52
FWHM(Radyan)	0,007425	0,005940	0,005643
Parçacık Boyutu(nm)	**20,9**	**26,2**	**27,6**

Lu_2O_3 miktarı % 40 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklarına ait parçacık boyutunun bulunması için XRD grafiğinden elde edilen (222) ana kırınım çizgileri şekil 5.8'de verilmiştir.



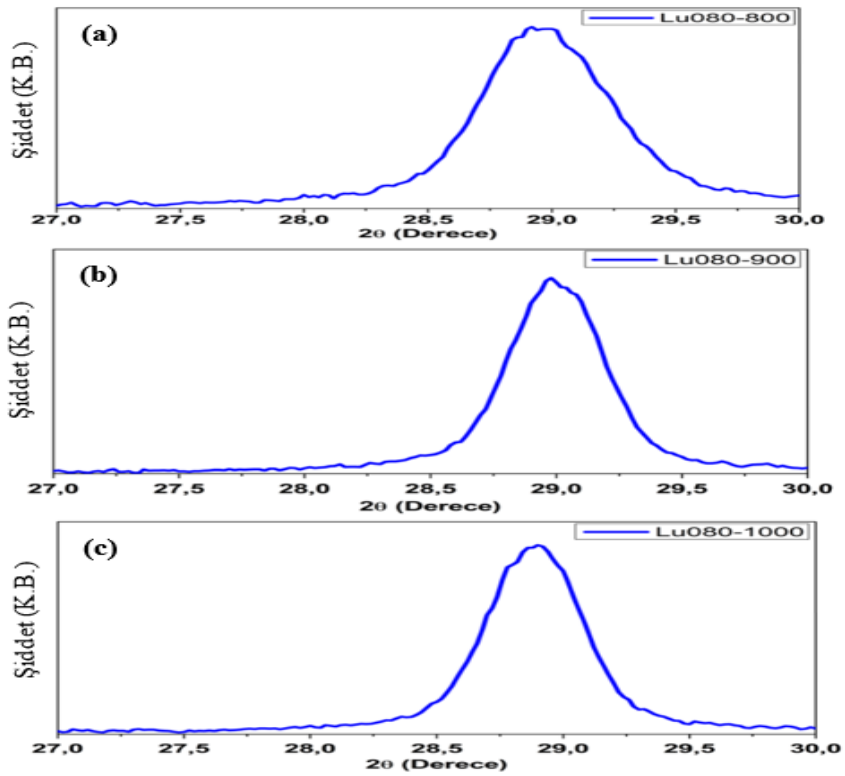
Şekil 5.8 Lu_2O_3 miktarı %40 olan $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara a. 800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri

Denklem (5.1)'i ve şekil 5.8'de verilen kırınım pikleri kullanılarak hesaplanan parçacık boyutu çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Lu040-800, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodlu (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkların parçacık boyutları

Malzeme Kodu	**Lu040-800**	**Lu040-900**	**Lu040-1000**
2Θ (Derece)	28,72	28,74	28,76
FWHM(Radyan)	0,009504	0,008465	0,006386
Parçacık Boyutu(nm)	**16,4**	**18,4**	**24,4**

Lu_2O_3 miktarı % 80 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarına ait parçacık boyutunun bulunması için XRD grafiğinden elde edilen (222) ana kırınım çizgileri şekil 5.9'da verilmiştir.



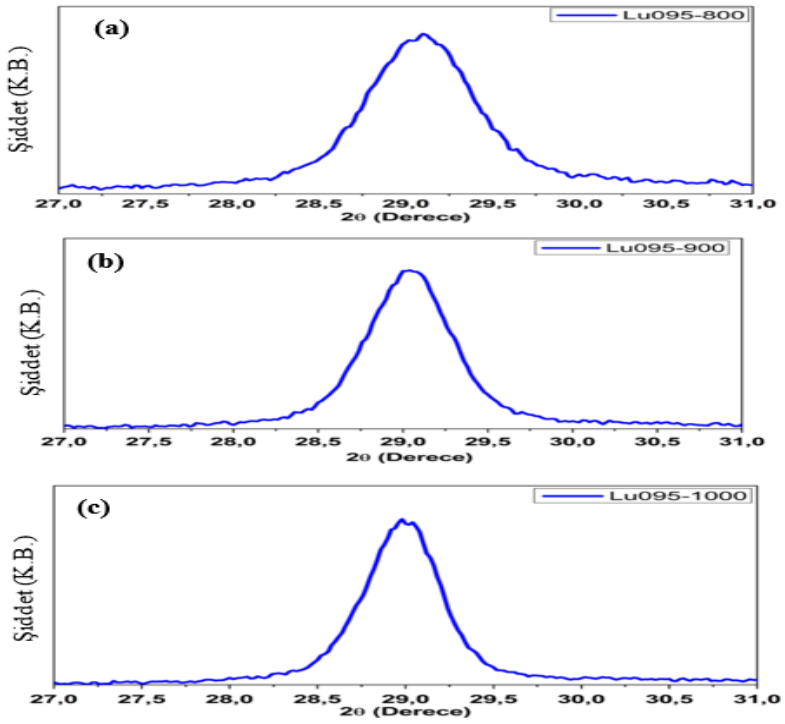
Şekil 5.9 Lu_2O_3 miktarı %80 olan (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara a. 800 ^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri

Denklem (5.1)'i ve şekil 5.9'da verilen kırınım pikleri kullanılarak hesaplanan parçacık boyutu çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 Lu080-800, Lu080-900 ve Lu080-1000 kodlu (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkların parçacık boyutları

Malzeme Kodu	**Lu080-800**	**Lu080-900**	**Lu080-1000**
2Θ (Derece)	28,92	28,98	28,90
FWHM(Radyan)	0,001175	0,008465	0,008465
Parçacık Boyutu(nm)	**13,3**	**16,4**	**18,4**

Lu_2O_3 miktarı % 95 olan 800, 900 ve 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarına ait parçacık boyutunun bulunması için XRD grafiğinden elde edilen (222) ana kırınım çizgileri şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 Lu_2O_3 miktarı %95 olan (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara a. 800^{0}C, b. 900 ^{0}C, c. 1000 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi sonucunda ölçülen (222) ana kırınım çizgileri

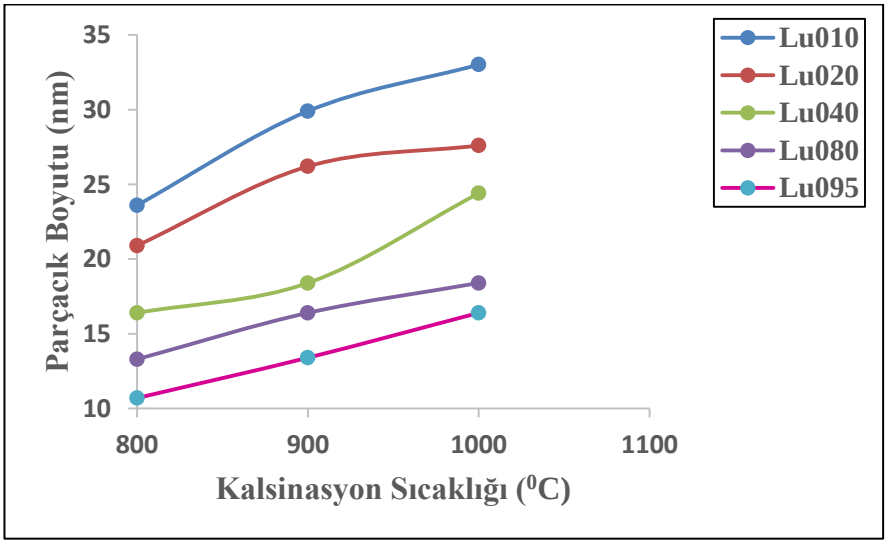
Denklem (5.1)'i ve şekil 5.10'da verilen kırınım pikleri kullanılarak hesaplanan parçacık boyutu çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5 Lu095-800, Lu095-900 ve Lu095-1000 kodlu (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkların parçacık boyutları

Malzeme Kodu	**Lu095-800**	**Lu095-900**	**Lu095-1000**
2Θ (Derece)	29,10	29,04	28,98
FWHM (Radyan)	0,014603	0,011682	0,009504
Parçacık Boyutu(nm)	**10,7**	**13,4**	**16,4**

Genel olarak kalsinasyon sıcaklığı, 800 ^{0}C'den 1000 ^{0}C'ye çıkarıldığı zaman (222) kırınım çizgisine ait pik genişliğinin daraldığı ve yaklaşık tane boyutunun büyüdüğü net bir şekilde görülmektedir.

Lu_2O_3 miktarı % 10, % 20, % 40, % 80 ve % 95 olacak şekilde değiştirilerek çözelti yanma yöntemi ile üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara ait Scherrer formülü kullanılarak hesaplanan yaklaşık parçacık boyutları şekil 5.11'deki gibi elde edildi.

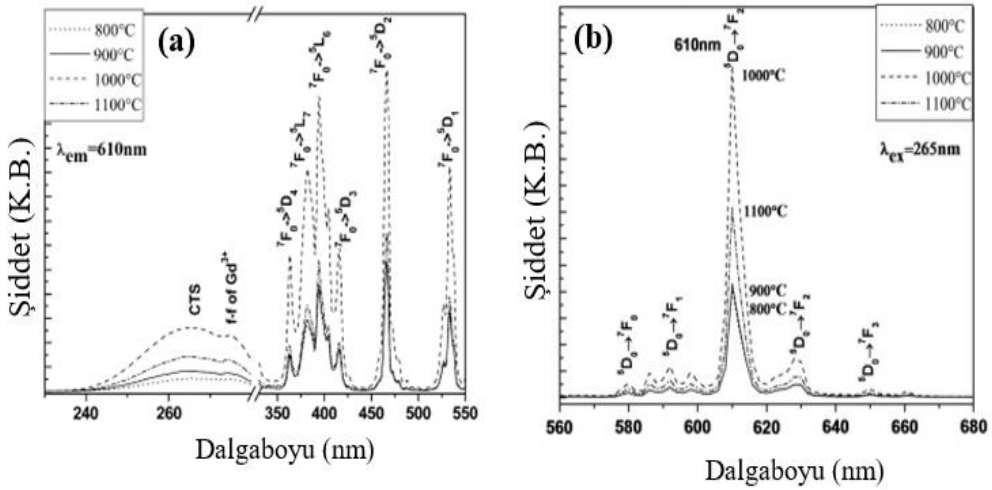


Şekil 5.11 (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkların parçacık boyutları

Şekil 5.11'den elde edilen sonuçlara göre kalsinasyon sıcaklıkları azaldığında ve (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3}'daki Lu_2O_3 miktarı arttıkça parçacık boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir.

5.1.3 İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarının PL analizleri

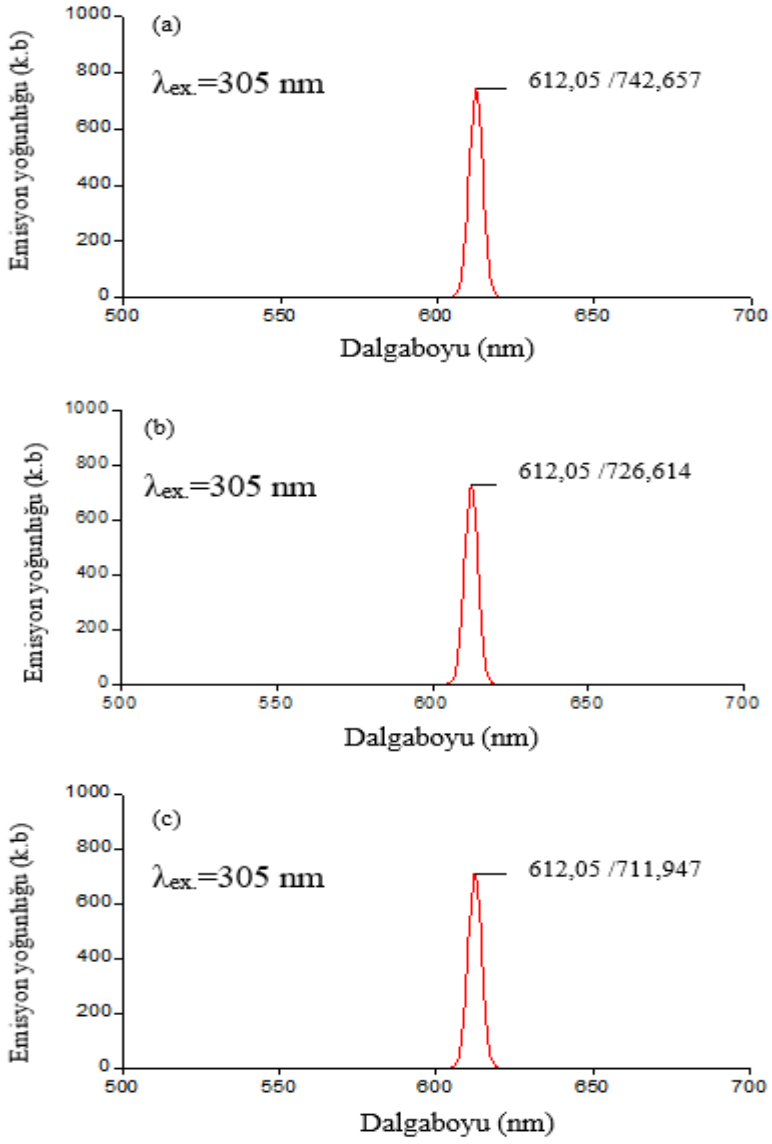
Yanma yöntemiyle üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkların fotolüminesans (PL) uyarma ve emisyon spektrumu (Varian marka, Cary Explice model) floresans spektrometre cihazı kullanılarak ölçüldü. Şekil 5.12'de Eu^{+3}'un tipik uyarılma ve emisyon spektrumunu göstermektedir. 612 nm'de emisyon dalgaboyu olan uyarılma spektrumu sırasıyla 265, 305, 313, 363, 381 ve 395 nm'deki uyarma tepelerinden oluşur. 265 nm'deki geniş bant O^{2-}'nin 2p yörüngesinden Eu^{+3}'un 4f yörüngesine elektron geçişine aittir. 305 ve 313 nm'deki pikler $Gd^{+3} \rightarrow Eu^{+3}$ enerji transferi sonucunda Gd^{+3}'un f-f iç geçişinden kaynaklanır. 363, 381 ve 395 nm'de bulunan pikler Eu^{+3} içerisindeki 4f→4f geçişlerine ($^7F_o \rightarrow {}^5D_4$, $^7F_o \rightarrow {}^5L_2$ ve $^7F_o \rightarrow {}^5L_6$) aittir. Emisyon spektrumunda ise seramik tozlar 265 nm'de uyarıldığında Eu^{+3}'un $^5D_o \rightarrow {}^7F_2$ geçişinden kaynaklanan 610 nm ana emisyon pikine karşılık gelir. Şekil 5.13.b'de verilen emisyon pikleri Eu^{+3}'un $^5D_o \rightarrow {}^7Fj$ (j=0, 1, 2, 3…) geçişlerinden kaynaklanır. 590 nm'ye yakın emisyonun $^5D_o \rightarrow {}^7F_1$ manyetik dipol geçişinden kaynaklanır. 630 ve 650 nm'deki diğer enerji geçişi tepe noktaları ise $^5D_o \rightarrow {}^7F_3$ ve $^5D_o \rightarrow {}^7F_4$ geçişine ait olan piklerdir.



Şekil 5.12 (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarına ait a. Uyarılma, b. Emisyon pikleri

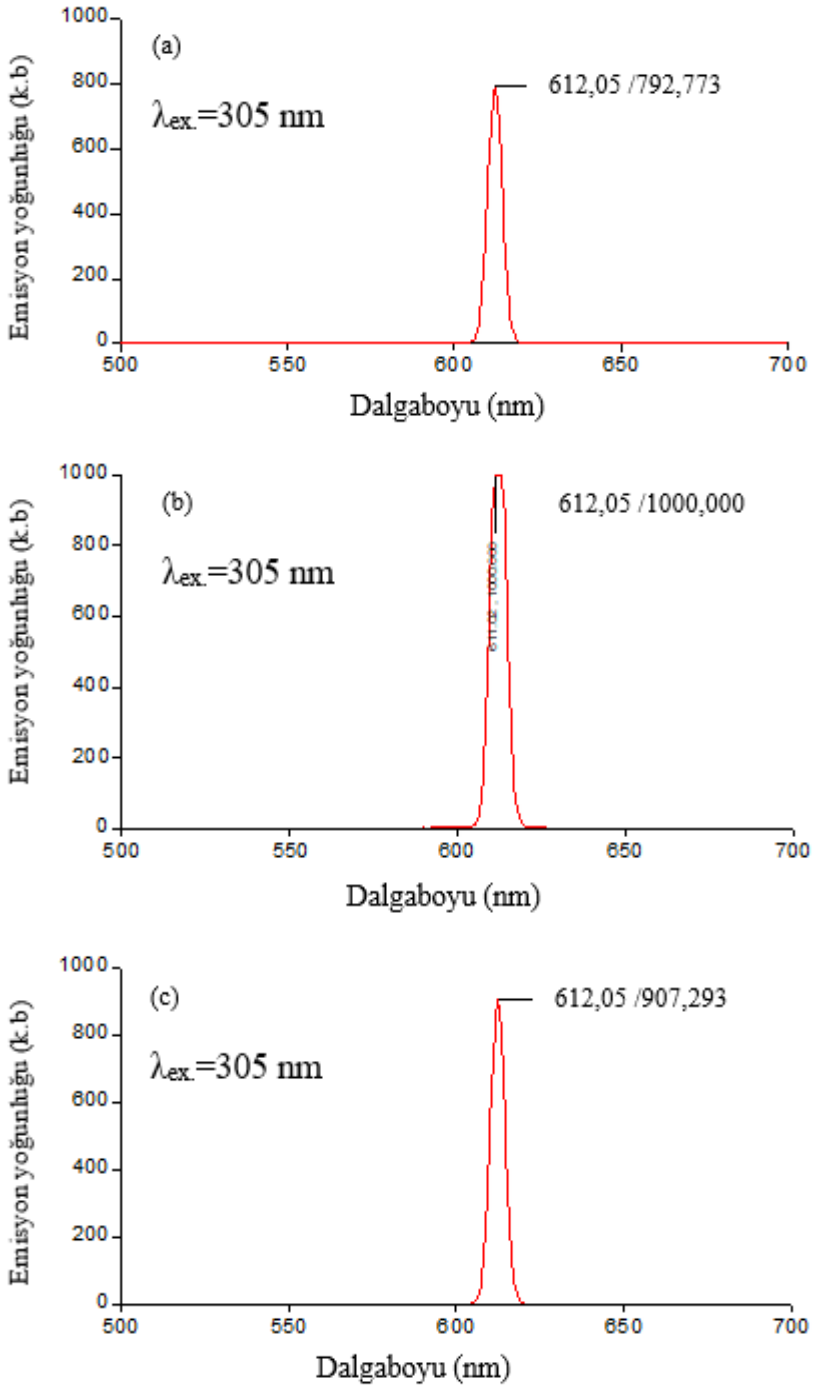
PL ölçümler alınmadan önce 20 ml metanol içine 6 mg üretilen parçacıklardan konularak ölçüm alınmıştır. Ayrıca (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkları 305 nm'de uyarıldığında europyuma ait olan görünür bölgede 612 nm emisyon piki elde edilmiştir.

Lu010-800, Lu010-900 ve Lu010-1000 kodlu parçacıklarının 305 nm'de uyarılması sonucunda oluşan 612 nm emisyon piki ve yoğunluğu (ışık fotonu) şekil 5.13'de verilmiştir.



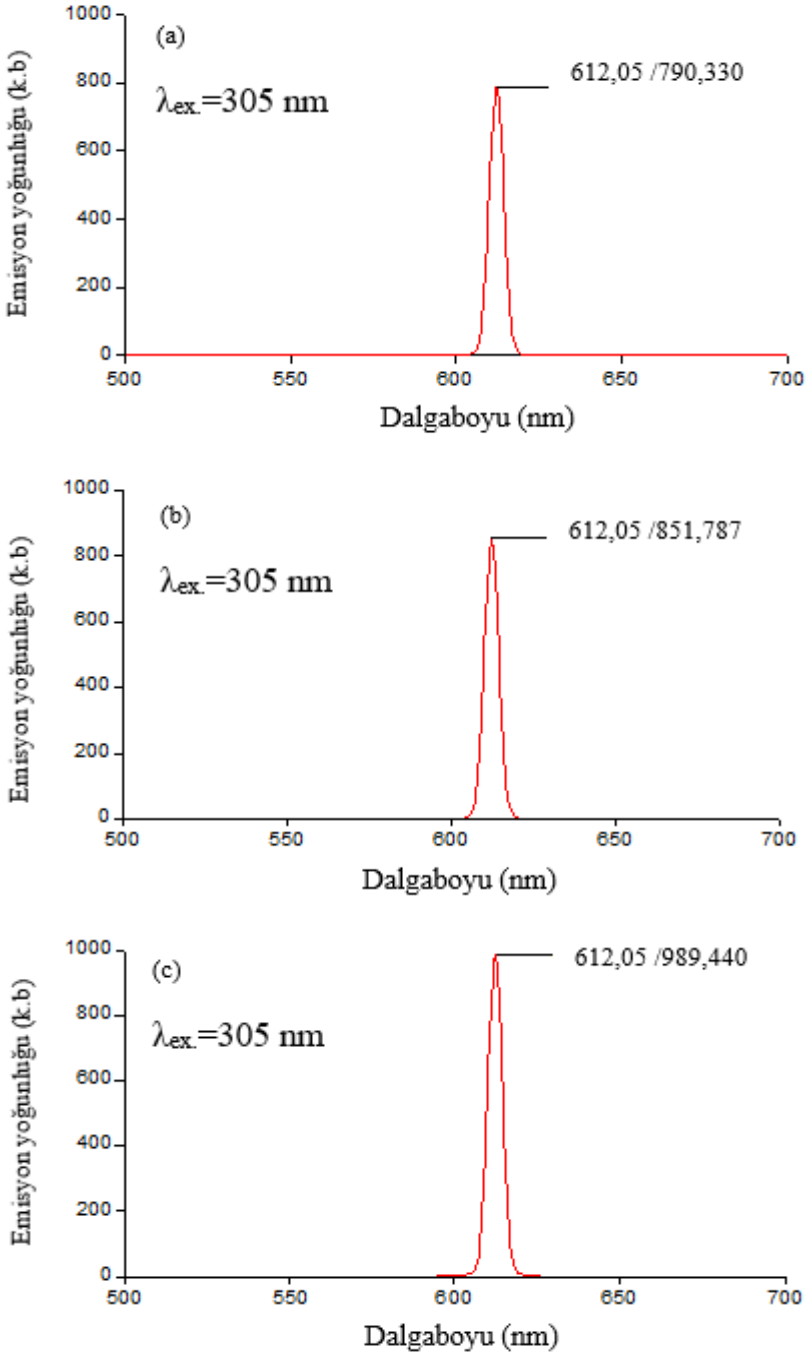
Şekil 5.13 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu010-800, b. Lu010-900, c. Lu010-1000 parçacıkları

Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodlu parçacıklarının 305 nm'de uyarılması sonucunda oluşan 612 nm emisyon piki ve yoğunluğu şekil 5.14'de verilmiştir.



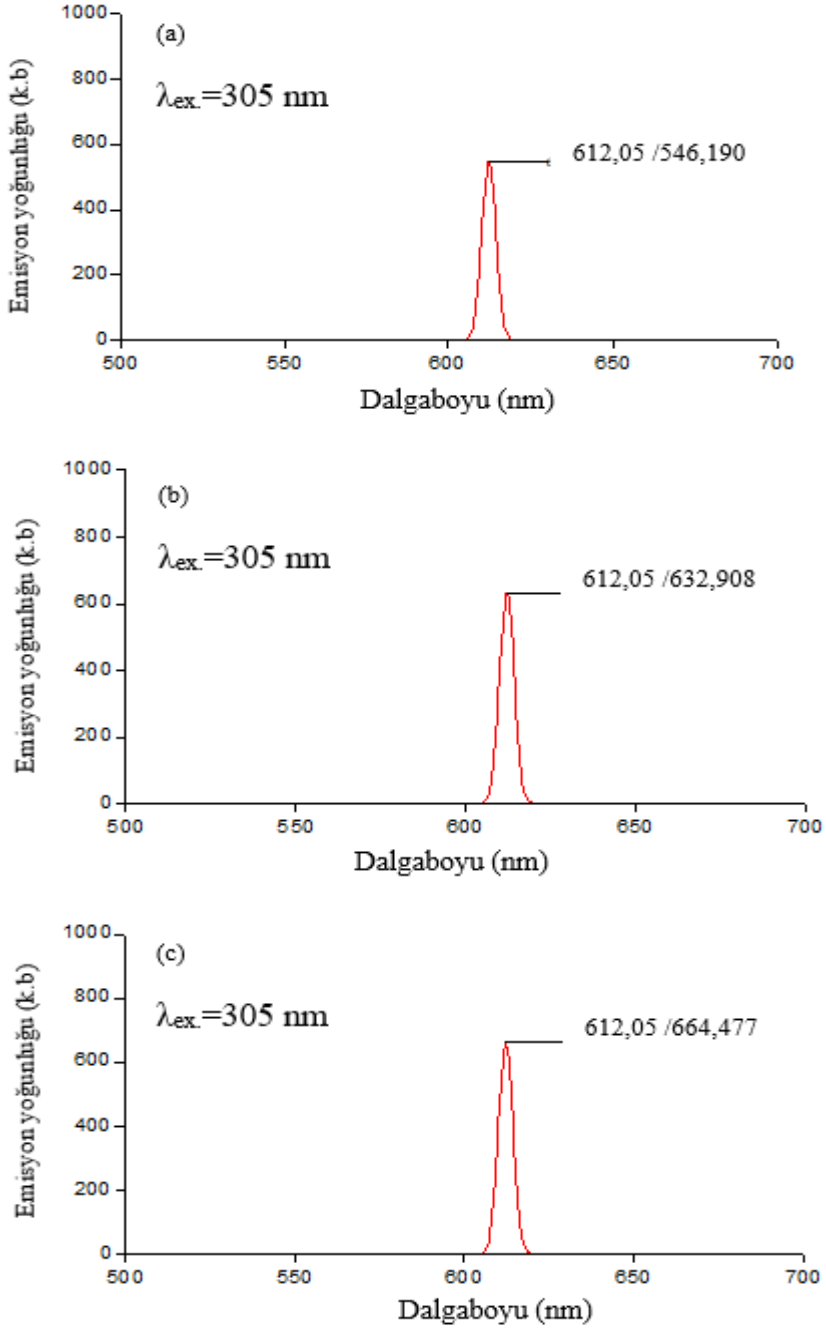
Şekil 5.14 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu020-800, b. Lu020-900, c. Lu020-1000 parçacıkları

Lu040-800, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodlu parçacıklarının 305 nm'de uyarılması sonucunda oluşan 612 nm emisyon piki ve yoğunluğu şekil 5.15'de verilmiştir.



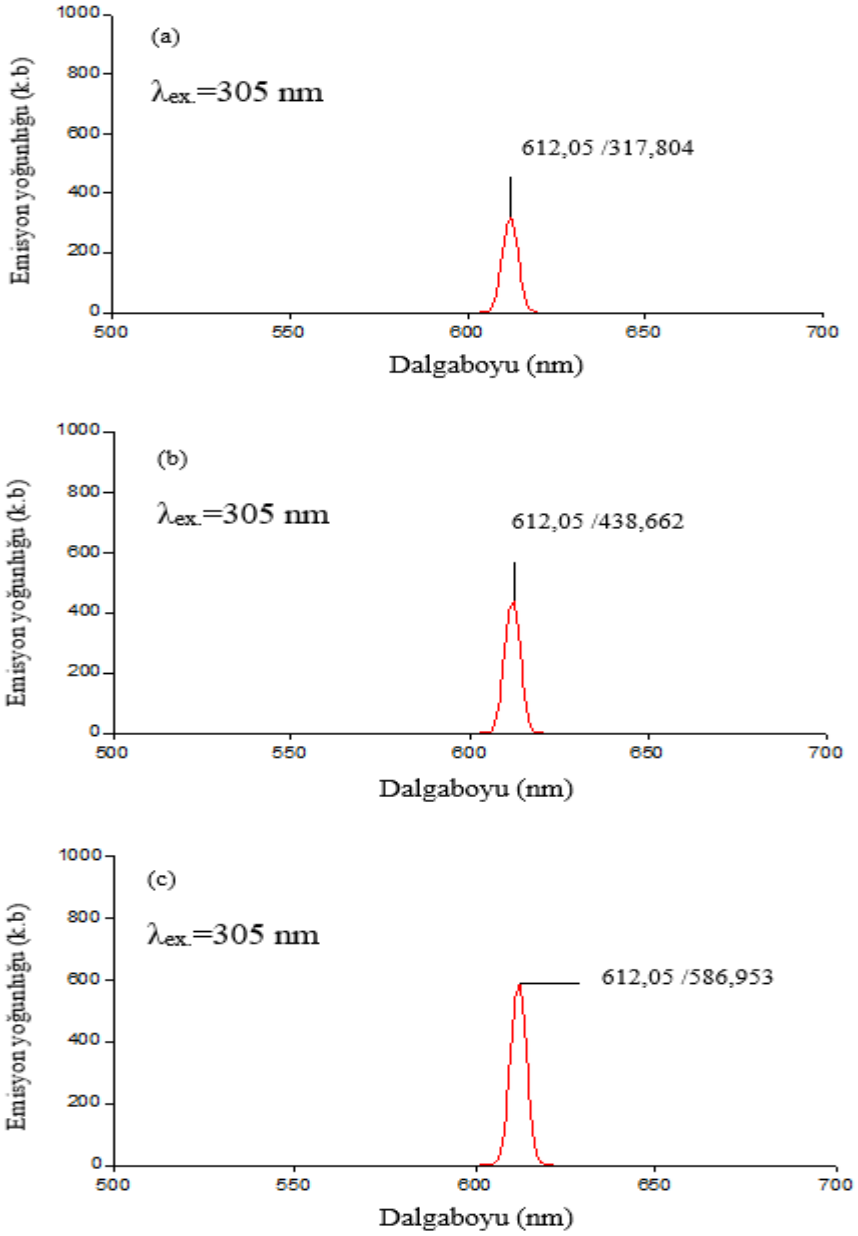
Şekil 5.15 λem.=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu040-800, b. Lu040-900, c. Lu040-1000 parçacıkları

Lu080-800, Lu080-900 ve Lu080-1000 kodlu parçacıklarının 305 nm'de uyarılması sonucunda oluşan 612 nm emisyon piki ve yoğunluğu şekil 5.16'de verilmiştir.



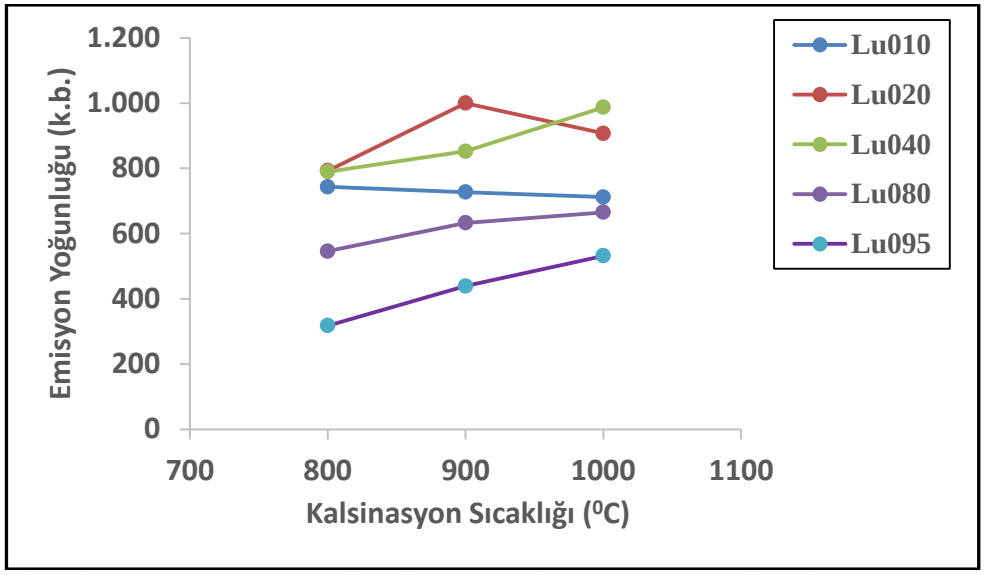
Şekil 5.16 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu080-800, b. Lu080-900, c. Lu080-1000 parçacıkları

Lu095-800, Lu095-900 ve Lu095-1000 kodlu parçacıklarının 305 nm'de uyarılması sonucunda oluşan 612 nm emisyon piki ve yoğunluğu şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. Lu095-800, b. Lu095-900, c. Lu095-1000 parçacıkları

Şekil 5.13-17'de elde edilen parçacıklara ait emisyon yoğunlukları şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.18 İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarının kalsinasyon sıcaklığına bağlı olarak verilen 612 nm'deki emisyon yoğunlukları

(Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkları 305 nm'de uyarıldığında Eu^{+3}'un $^5D_o \rightarrow {}^7F_2$ geçişinden kaynaklanan 612 nm'de görünür bölgede ışık (sintilasyon) fotonları vermektedir. Emisyon yoğunluğu ne kadar fazla olursa malzemede oluşan ışık (sintilasyon) fotonları da o kadar fazla olacaktır. Yapılan PL analizi sonucunda 800 ^{0}C'de kalsinasyon işlemi yapılan parçacıkların emisyon yoğunluklarının en düşük olduğu, kalsinasyon sıcaklığı 900 ve 1000 ^{0}C olduğunda ise en yüksek emisyon yoğunluğuna sahip parçacıklar elde edilmiştir. İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3}'deki Lu_2O_3 miktarı % 20 ve % 40 olan parçacıklarının emisyon yoğunluğunun maksimum olduğu, Lu_2O_3 miktarı % 10 ve % 80 olduğunda emisyon yoğunluğunun azaldığı ve % 95 olduğunda ise emisyon yoğunluğun en düşük olduğu tespit edilmiştir.

İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklardan en fazla emisyon yoğunluğuna sahip olan Lu020-900, Lu020-1000, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodlu parçacıklardır.

5.1.4 İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkların toz metalurjisi yöntemi sonrasında yoğunluk yüzdesinin hesaplanması

Lutesyum oksit (Lu_2O_3) miktarı % 10, % 20, % 40, % 80 ve % 95 olacak şekilde değiştirilerek üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıkların XRD ve PL sonuçlarına göre şeffaf seramik sintilatör malzemesi üretmek için en uygun olan Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodlu malzemelere toz metalurjisi yöntemi uygulanıldı.

5.1.4.1 İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara uygulanan tek eksen pres işlemi

Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 kodlu malzemelerin ağırlıkları yaklaşık 700 mg olacak şekilde tartıldı ve 13 mm çaplı kalıpta 275 MPa basınç altında pelet haline getirildi.

5.1.4.2 İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara uygulanan CIP işlemi

Tek eksenli pres makinesi ile pelet haline getirilerek şekil verilen seramik sintilatör malzemeleri. CIP cihazında 270 MPa yüksek basınçta izostatik olarak sıkıştırıldı ve sinterleme öncesi maksimum ham yoğunluk elde edilmeye çalışıldı. CIP sonrasında hesaplanan yoğunluk yüzdesi değerleri çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 CIP sonrası elde edilen yoğunluk yüzdesi değerleri

Malzeme Kodları	Kütle (g)	Kalınlık (cm)	Çap (cm)	Hacim (cm3)	Yoğunluk (g/cm3)	Yoğunluk Yüzdesi (%)
Lu020-800	0,690	0,133	1,280	0,171	4,036	48
Lu020-900	0,722	0,128	1,288	0,167	4,337	52
Lu020-1000	0,690	0,122	1,278	0,156	4,423	53

5.1.4.3 İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara uygulanan sinterleme işlemi

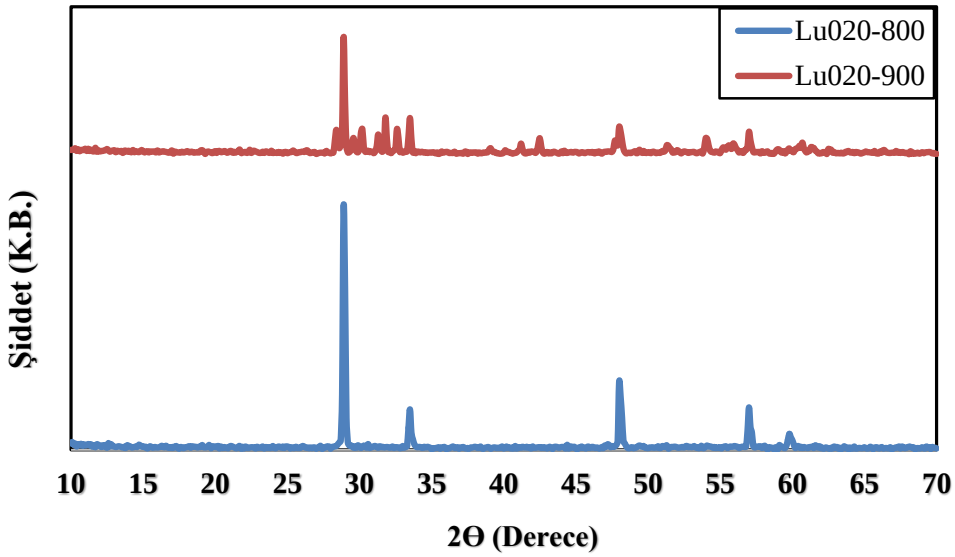
CIP işlemi ile her yönden eşit olarak sıkıştırılarak yoğunluğu arttırılan seramik sintilatör malzemelerin istenen nihai özellikleri (mekanik özellikler, yoğunluk gibi) vermesi için sinterleme işlemi yapıldı.

Sinterleme fırını seçilen Lu020-800 kodlu malzemesi için 4 saate 1650 ^{0}C'ye çıkacak, 1650 ^{0}C'de 20 saat kaldıktan sonra soğumaya geçilecek şeklinde programlandı. Seçilen Lu020-900 kodlu ikinci malzemeye ait sinterleme koşulu ise 3 saate 1600 ^{0}C'ye çıkacak, 1600 ^{0}C'de 4 saat kaldıktan sonra soğumaya geçilecek şeklinde programlandı. Yüksek sıcaklıkta malzemede meydana gelebilecek oksijen kaybını önlemek için sıcaklık 600 ^{0}C'ye geldiğinde oksijen gazı verilmeye başlandı. Sinterleme fırını soğumaya geçtiğinde yaklaşık 600 ^{0}C'ye geldiğinde oksijen gazı kapatıldı. Sinterleme sonrasında hesaplanan yoğunluk yüzdesi değeri çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 Sinterleme sonrası elde edilen yoğunluk yüzdesi değeri

Malzeme Kodları	**Sinterleme Koşulları**			**Sinterleme Sonrası Yoğunluk Hesabı**	
	1.Aşama	2.Aşama	3.Aşama	Yoğunluk (g/cm^3)	Yoğunluk Yüzdesi (%)
Lu020-800	4 saatte 1650 ^{0}C sıcaklığa gelecek	20 saat 1650^{0}C'de bekleyecek	1650^{0}C'de 20 saat bekledikten sonra soğumaya geçecek	6,941	83
Lu020-900	3 saatte 1600^{0}C sıcaklığa gelecek	4 saat 1600^{0}C'de bekleyecek	1600^{0}C'de 4 saat bekledikten sonra soğumaya geçecek	7,301	86

Sinterleme sonrasında seçilen bu iki malzemenin kristal yapısını incelemek ve ana fazın yanında oluşabilecek safsızlıkları belirlemek için XRD'si çekildi. Elde edilen XRD kırınım deseni şekil 5.19'daki gibidir.



Şekil 5.19 Sinterleme sonrası Lu020-800 ve Lu020-900 kodlu malzemelerin XRD grafiği

Sinterleme işlemi sonrasında Lu020-800 ve Lu020-900 kodlu malzemelerin XRD analizi sonucunda; malzemelerin hacim merkezli kübik kristal yapıdan taban merkezli monoklinik kristal yapıya dönüştüğü tespit edildi. Yapıdaki bu faz değişiminin sebebi Gd_2O_3'in 1260 ^{0}C'de kübik fazdan monoklinik faza dönüşmesidir. İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} malzemelerinde Gd_2O_3 miktarı fazla olmasından dolayı 1260 ^{0}C'den daha yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi yapıldığında yapının kübik fazdan monoklinik faza dönüştüğü tespit edildi. (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} seramik sintilatör malzemesi üretmek istiyorsak üreteceğimiz malzemenin kübik fazda olması yani başka bir fazın oluşmaması için Gd_2O_3 miktarını azaltmak gerektiği sonucuna varıldı. Çalışmalarımızın bundan sonraki aşamalarında ikinci seri olarak adlandırdığımız Lu_2O_3 miktarı %130, % 150 olacak şekilde değiştirilerek 2 farklı (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} tozlar üretildi.

5.2 İkinci Seri Olarak Üretilen Lu_2O_3 Miktarı % 130 ve 150 Olan Parçacıklar

Bundan sonraki çalışmalarımızda (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} seramik sintilatör malzemesi üretilebilmesi için; ikinci seri olarak adlandırdığımız lutesyum oksit (Lu_2O_3) miktarını % 130 ve 150 olan yeni parçacıklar çözelti yanma yöntemi ile üretildi ve üretilen

parçacıkların toz matalurjisi yöntemi uygulanılarak şeffaf seramik sintilatör malzemelerinin üretilmesine çalışıldı.

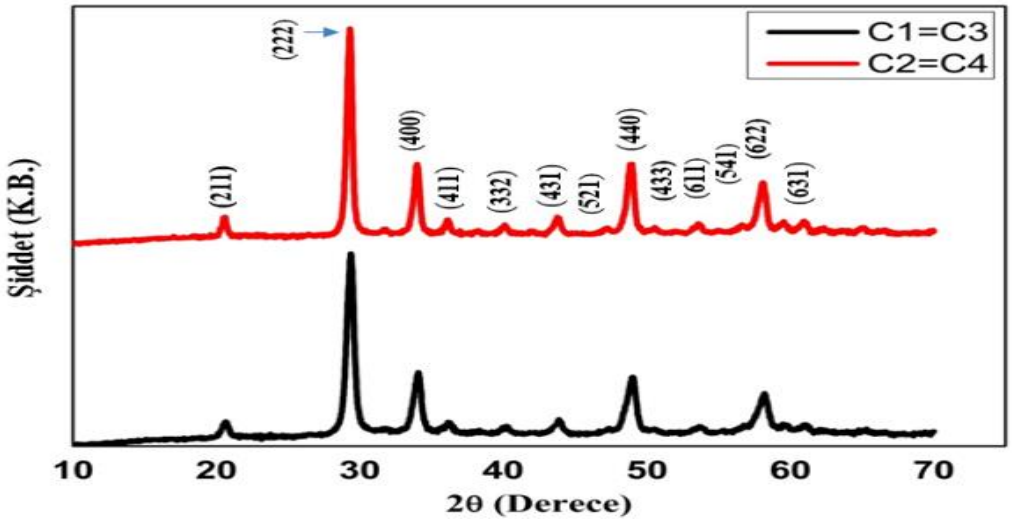
Lu_2O_3 miktarı % 130 ve 150 olacak şekilde değiştirilerek üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara 900 ve 1000 ^{0}C'de 2 saat kalsinasyon işlemi yapıldıktan sonra üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarına verilen kodlar çizelge 5.8'de verilmektedir. Sinterleme işleminde sinterleme sıcaklığı ve süresini belirlemek için C1=C3 ve C2=C4 aynı malzemeden ikişer tane üretildi.

Çizelge 5.8 İkinci seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı %130 ve 150 olan (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara verilen kodlar

Malzeme Kodları	**Kod Açılımı**
C1	Lu2O3 miktarı % 130 olan, 9000C-2 saat kalsinasyon
C2	Lu2O3 miktarı % 130 olan, 10000C-2 saat kalsinasyon
C3	Lu2O3 miktarı % 130 olan, 9000C-2 saat kalsinasyon
C4	Lu2O3 miktarı % 130 olan, 10000C-2 saat kalsinasyon
E1	Lu2O3 miktarı % 150 olan, 9000C-2 saat kalsinasyon
E2	Lu2O3 miktarı % 150 olan, 10000C-2 saat kalsinasyon

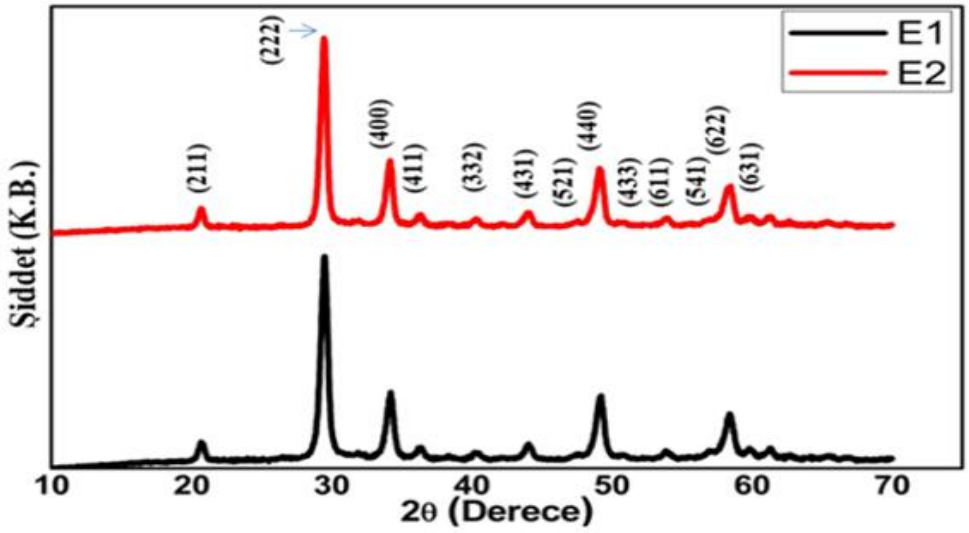
5.2.1 İkinci seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı % 130 ve 150 olan parçacıkların XRD analizleri

Lu_2O_3 miktarı % 130 olan 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak elde edilen C1, C2, C3 ve C4 kodlu parçacıklara ait XRD kırınım desenleri şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.20 C1, C2, C3 ve C4 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği

Lu_2O_3 miktarı % 150 olan 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak elde edilen E1 ve E2 kodlu parçacıklara ait XRD desenleri şekil 5.21'da verilmiştir.



Şekil 5.21 E1ve E2 kodu verilen parçacıklara kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra ölçülen XRD grafiği

Şekil 5.20 ve şekil 5.21'den elde edilen C1=C3, C2=C4, E1 ve E2 kodlu parçacıklara ait x-ışını kırınım desenleri analizi sonucunda; tozlara ait olan tüm kırınım pikleri Lu_2O_3'in JCPDS kart no:03-065-3172'de rapor edilen standart verilerle tutarlı, hacim merkezli

kübik kristal yapıya sahip olduğu ve birim hücre parametresinin a=10,396 Å olduğu bulundu. C1=C3, C2=C4, E1 ve E2 kodlu parçacıklarda ikinci faz ya da saflığı bozan yapıların olmadığı tespit edildi. Kalsinasyon sıcaklığı artığında kırınım piklerin şiddetinin arttığı ve kırınım piklerinin daha keskin olduğu görülmektedir. Bu durum parçacık boyutunun büyüdüğü anlamına gelmektedir.

Denklem (5.1)'i ve şekil 5.20 ile şekil 5.21'deki kırınım pikleri kullanılarak hesaplanan parçacık boyutları çizelge 5.9'da verilmiştir.

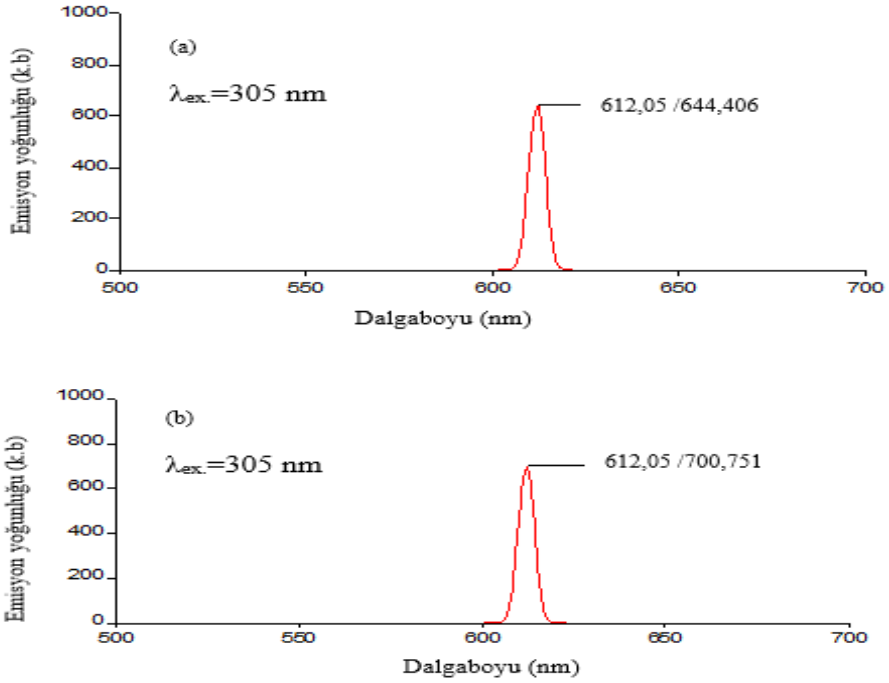
Çizelge 5.9 C1, C2, C3,C4, E1 ve E2 kodlu parçacıklara ait parçacık boyutları

Malzeme Kodları	**Parçacık Boyutu (nm)**
C1=C3	14,0
C2=C4	18,7
E1	14,2
E2	15,7

Çizelge 5.9'da elde edilen sonuçlara göre C1=C3, C2=C4, E1 ve E2 kodlu parçacıklarının kalsinasyon sıcaklıkları artıkça parçacık boyutunun artığı ve Lu_2O_3 miktarı arttıkça parçacık boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir.

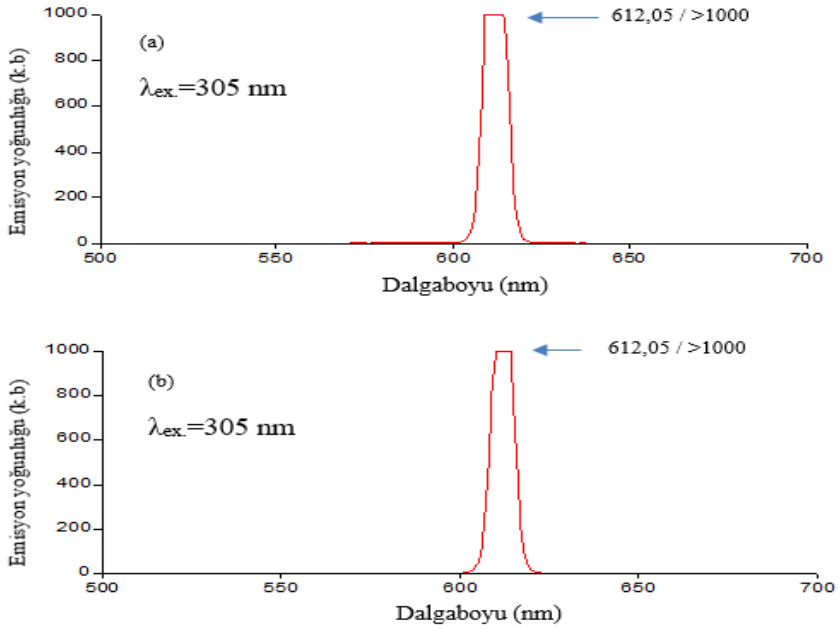
5.2.2 İkinci seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı % 130 ve 150 olan parçacıkların PL analizleri

C1=C3 ve C2=C4 kodlu parçacıkları 305 nm'de uyarılması sonucunda oluşan 612 nm emisyon piki ve yoğunluğu şekil 5.22'de verilmiştir. İkinci seri olarak üretilen malzemelerin emisyon pik şiddeti çok yüksek olduğu için ilk seri olarak üretilen PL sonuçları skala 5'te ölçülmüş iken bu ikinci seri malzemeler için skala aralığı 2,5'e düşürülerek emisyon pik şiddetleri ölçülmüştür. Buna bağlı olarak skala değerini düşürülerek ölçülen ikinci seri malzemelerin emisyon yoğunluk değerleri 2,5 kat daha fazla olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.22 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. C1=C3,b. C2=C4 parçacıkları

E1 ve E2 kodlu parçacıkları 305 nm'de uyarılması sonucunda oluşan 612 nm emisyon piki ve yoğunluğu şekil 5.23'de verilmiştir.



Şekil 5.23 $\lambda_{em.}$=612 nm emisyon piki ve yoğunluğu, a. E1, b. E2 parçacıkları

Şekil 5.22 ve şekil 5.23' de verilen parçacıklarına ait emisyon yoğunlukları çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10 C1, C2, C3, C3, E1 ve E2 kodlu parçacıklarının 612 nm'deki emisyon yoğunlukları

Malzeme Kodları	**Emisyon Yoğunluğu (k.b.)**
C1=C3	644
C2=C4	700
E1	>1000
E2	>1000

(Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3}'deki Lu_2O_3 miktarı % 130 ve % 150 olan parçacıklara ait; Lu_2O_3 miktarı ve kalsinasyon sıcaklığı arttığında emisyon yoğunluğunun da arttığı tespit edilmiştir. Üretilen ilk ve ikinci seri (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarına ait PL sonuçlarına göre emisyon şiddeti en fazla olan E1 ve E2 kodlu malzemelerin olduğu tespit edilmiştir.

5.2.3 İkinci seri olarak üretilen Lu_2O_3 miktarı % 130 ve % 150 olan parçacıkların toz matalurjisi yöntemi sonrasında yoğunluk yüzdesi hesaplanması

C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu parçacıklara toz matalurjisi yöntemiyle yapılan işlemler aşağıda sırayla verilmiştir.

5.2.3.1 İkinci seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara uygulanan tek eksen pres işlemi

C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodları verilen parçacıklar yaklaşık olarak 1,500 g tartılarak 13 mm çapındaki kalıp içinde 55 MPa basınç altında tek eksen pres işlemi yapıldı ve şekil verilen malzemelere ait hesaplanan yoğunluk yüzdesi değerleri çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.11 Tek eksen pres işlemi sonrası C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri

Malzeme Kodları	Kalsinasyon Koşulları	Kütle (g)	Kalınlık (cm)	Çap (cm)	Hacim (cm^3)	Yoğunluk (g/cm^3)	Yoğunluk Yüzdesi(%)
C1	900 ^{0}C (2 saat)	1,5030	0,265	1,318	0,361	4,16	49
C2	1000 ^{0}C (2 saat)	1,5020	0,252	1,297	0,333	4,51	53
C3	900 0C (2 saat)	1,5006	0,266	1,313	0,360	4,17	49
C4	1000 ^{0}C (2 saat)	1,4988	0,254	1,306	0,340	4,41	52
E1	900 ^{0}C (2 saat)	1,4997	0,284	1,309	0,382	3,93	46
E2	1000 ^{0}C (2 saat)	1,5028	0,263	1,304	0,351	4,28	50

5.2.3.2 İkinci seri olarak üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ parçacıklara uygulanan CIP işlemi

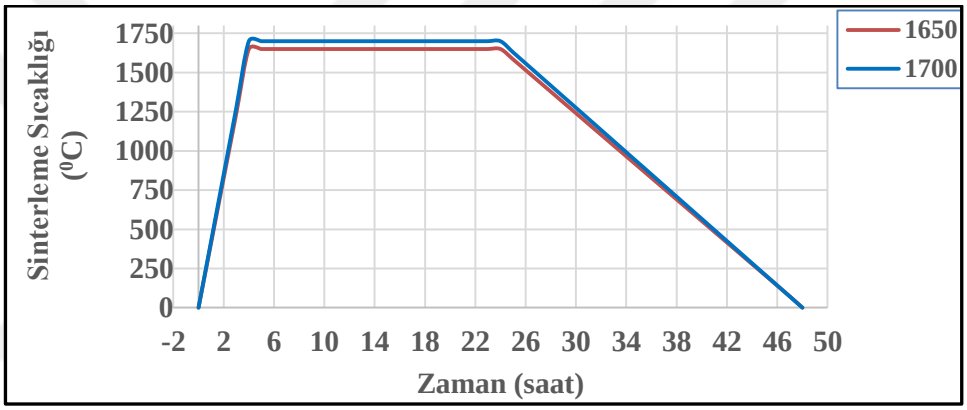
Tek eksenli pres makinesi ile pelet haline getirilerek şekil verilen seramik sintilatör malzemeleri. CIP cihazında 300 MPa basınç altında malzemeler izostatik olarak sıkıştırıldı ve sinterleme öncesi maksimum ham yoğunluğu elde etmeye çalışıldı. CIP sonrasında hesaplanan yoğunluk yüzdesi değeri çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12 CIP işlemi sonrası C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri

Malzeme Kodları	Kalsinasyon Koşulları	Kütle (g)	Kalınlık (cm)	Çap (cm)	Hacim. (cm^3)	Yoğunluk (g/cm^3)	Yoğunluk Yüzdesi (%)
C1	900^{0}C (2 saat)	1,5030	0,260	1,217	0,303	4,96	58
C2	1000^{0}C (2 saat)	1,4994	0,250	1,220	0,292	5,13	61
C3	900^{0}C (2 saat)	1,4980	0,261	1,218	0,304	4,93	58
C4	1000^{0}C (2 saat)	1,4941	0,251	1,222	0,294	5,08	60
E1	900^{0}C (2 saat)	1,4976	0,276	1,200	0,312	4,80	57
E2	1000^{0}C (2 saat)	1,5023	0,255	1,210	0,293	5,13	60

5.2.3.3 İkinci seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara uygulanan sinterleme işlemi

CIP işlemi sonrasında elde edilen yoğunluk yüzdesi değeri yaklaşık olarak % 57-61 olan seramik sintilatör malzemeler üretildi. Lu_2O_3 miktarı %130 olan 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak üretilen C1, C2, C3 ve C4 malzemelere sinterleme işlemi yapıldı. Sinterleme işlemi sonrasında malzemelerin yoğunluk yüzdesi değerinin en az % 91'e çıkarmak için sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresini değiştirilerek istenilen yoğunluk yüzdesi değeri elde edilmeye çalışıldı. Malzemelere uygulanılan sıcaklık ve süre değişim grafiği şekil 5.24'deki gibidir.



Şekil 5.24 Seramik sintilatör malzemelerine uygulanan sinterleme sıcaklığı ve süresi

Lu_2O_3 miktarı % 130 olan C1, C2, C3 ve C4 kodlu malzemelere çizelge 5.13'de verildiği gibi sinterleme sıcaklıkları uygulanmıştır.

Çizelge 5.13 C1, C2, C3 ve C4 kodlu malzemelere uygulanan sinterleme sıcaklığı ve süreleri

Malzeme Kodları	Kalsinasyon Koşulu	Sinterleme		
		1. Aşama	2. Aşama	3. Aşama
C1	900 ^{0}C (2 saat)	4 saatte 1650 ^{0}C sıcaklığa gelecek	20 saat 1650 ^{0}C'de bekleyecek	1650^{0}C'de 20 saat bekledikten sonra soğumaya geçecek
C3	900 ^{0}C (2 saat)	4 saatte 1700 ^{0}C sıcaklığa gelecek	20 saat 1700 ^{0}C'de bekleyecek	1700^{0}C'de 20 saat bekledikten sonra soğumaya geçecek
C2	1000 ^{0}C (2 saat)	4 saatte 1650 ^{0}C sıcaklığa gelecek	20 saat 1650 ^{0}C'de bekleyecek	1650^{0}C'de 20 saat bekledikten sonra soğumaya geçecek
C4	1000 ^{0}C (2 saat)	4 saatte 1700 ^{0}C sıcaklığa gelecek	20 saat 1700 ^{0}C'de bekleyecek	1700^{0}C'de 20 saat bekledikten sonra soğumaya geçecek

C1, C2, C3 ve C4 kodlu malzemelere çizelge 5.13' te verilen sinterleme sıcaklıkları uygulandıktan sonra seramik sintilatör malzemeler tartıldı ve verniyeli kumpas ile çapı ve kalınlığı ölçüldükten sonra yoğunluk yüzdesi değerleri hesaplandı. Hesaplanan değerler çizelge 5.14' deki gibidir.

Çizelge 5.14 Sinterleme işlemi sonrası C1, C2, C3 ve C4 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri

Malzeme Kodları	**Kalsinasyon Koşulu**	**Sinterleme Koşulu**	**Kütle (g)**	**Kalınlık (cm)**	**Çap (cm)**	**Hacim (cm^3)**	**Yoğunluk (g/cm^3)**	**Yoğunluk Yüzdesi (%)**
C1	900 ^{0}C (2 saat)	1650 0C'de 20 saat	1,4827	0,229	1,046	0,1967	7,54	89
C3	900 ^{0}C (2 saat)	1700 ^{0}C'de 20 saat	1,4772	0,218	1,034	0,1830	8,07	95
C2	1000 ^{0}C (2 saat)	1650 ^{0}C'de 20 saat	1,4801	0,229	1,4801	0,2010	7,36	87
C4	1000 ^{0}C (2 saat)	1700 ^{0}C'de 20 saat	1,4840	0,210	1,050	0,182	8,15	96

C1, C2, C3 ve C4 kodlu malzemelerin Çizelge 5.14'te sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak elde edilen yoğunluk yüzdesi değerlerine bakıldığında sinterleme sıcaklığı 1700 ^{0}C'de 20 saat uygulandığında % 92'den daha büyük yoğunluk yüzdesi değeri elde edildi. $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$'deki Lu_2O_3 miktarı % 130 olan seramik sintilatör malzemeler için sinterleme sıcaklık değerinin 1700 ^{0}C'de 20 saat olduğu tespit edildi.

Sinterleme sıcaklığını ve süresini tespit edildikten sonra Lu_2O_3 miktarı % 150 olan E1 ve E2 kodlu malzemelere 1700 ^{0}C' de 20 saat sinterleme işlemi yapıldı ve sinterleme işlemi sonucunda elde edilen yoğunluk yüzdesi değeri çizelge 5.15'de verilmiştir.

Çizelge 5.15 Sinterleme işlemi sonrası E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri

Malzeme Kodları	**Kalsinasyon Koşulu**	**Sinterleme Koşulu**	**Kütle (g)**	**Kalınlık (cm)**	**Çap (cm)**	**Hacim (cm^3)**	**Yoğunluk (g/cm^3)**	**Yoğunluk Yüzdesi (%)**
E1	900 ^{0}C (2 saat)	1700^{0}C'de 20 saat	1,4738	0,239	0,989	0,183	8,07	95%
E2	1000 ^{0}C (2 saat)	1700^{0}C'de 20 saat	1,4856	0,231	1,030	0,192	7,72	91%

Lu_2O_3 miktarı % 150 olan 900 ve 1000 ^{0}C sıcaklıklarda kalsinasyon işlemi yapılarak elde edilen E1 ve E2 kodlu malzemelerin tespit edilen sinterleme sıcaklığı uygulandığında yoğunluk yüzdesi değeri istenilen yoğunlukta çıkmıştır.

5.2.3.4 İkinci seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara uygulanan HIP işlemi

Sinterleme işleminden sonrasında malzeme içerisindeki boşlukları azaltmak, yoğunluğu ve malzemenin ışık geçirgenliğini artırmak amacı ile sıcak izostatik presleme işlemi yapıldı. İkinci seri olarak üretilen C3, C4, E1 ve E2 kodlu malzemeler istenilen yoğunluk yüzdesine sahip olduğu için sıcak izostatik pres işlemi için seçildi. 200 MPa basınçta 1650 ^{0}C'de 6 saat HIP işlemi uygulandı. Ayrıca üretilen C1 ve C2 kodlu malzemelerinin yoğunluk yüzdesi değeri uygun olmadığı halde HIP işlemi uygulandı.

HIP işleminden sonra seramik sintilatör malzemeleri tartıldı ve verniyeli kumpas ile çapı ve kalınlığı ölçüldükten sonra yoğunluğu ve yoğunluk yüzdesi değerleri hesaplandı. Hesaplanan değerler çizelge 5.16'deki gibidir.

Çizelge 5.16 HIP işlemi sonrası C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu seramik sintilatör malzemelerine ait yoğunluk yüzdesi değerleri

Malzeme kodları	Kütle (g)	Kalınlık (cm)	Çap (cm)	Hacim (cm^3)	Yoğunluk (g/cm^3)	Yoğunluk Yüzdesi (%)
C1	1,4857	0,231	1,039	0,1957	7,59	89
C2	1,4460	0,232	1,025	0,1913	7,56	89
C3	1,4786	0,219	1,017	0,1778	8,32	97
C4	1,4846	0,219	1,036	0,1845	8,05	95
E1	1,4761	0,228	0,984	0,1732	8,52	99
E2	1,4869	0,219	1,019	0,1785	8,32	98

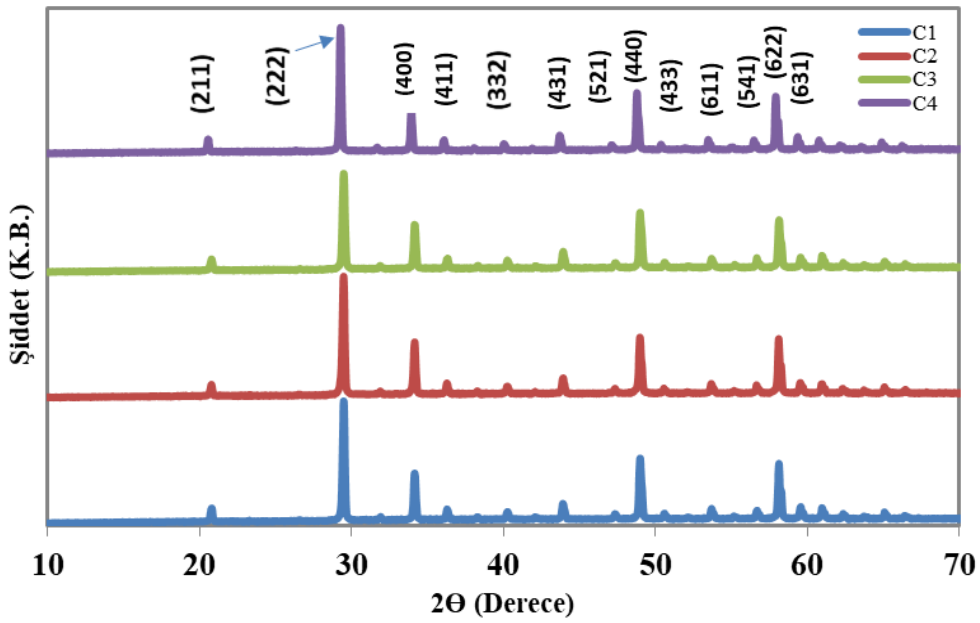
HIP işlemi sonrasında C3, C4, E1 ve E2 kodlu malzemeler yarı şeffaf olarak üretildi ve istenilen yoğunluk yüzdesi değeri elde edildi. Üretilen malzemelere ışık altında

bakıldığında ışığı geçirdiği görüldü. Malzemenin yarı şeffaf üretilmesinin sebebi HIP işlemi için uygulanan (1650 ^{0}C' de 6 saat) sıcaklık ve sürenin yetersiz olmasından kaynaklandığı sonucuna varıldı.

5.2.3.5 İkinci seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2$O$_3$:Eu^{+3} parçacıklara HIP işlemi sonrasında XRD analizi

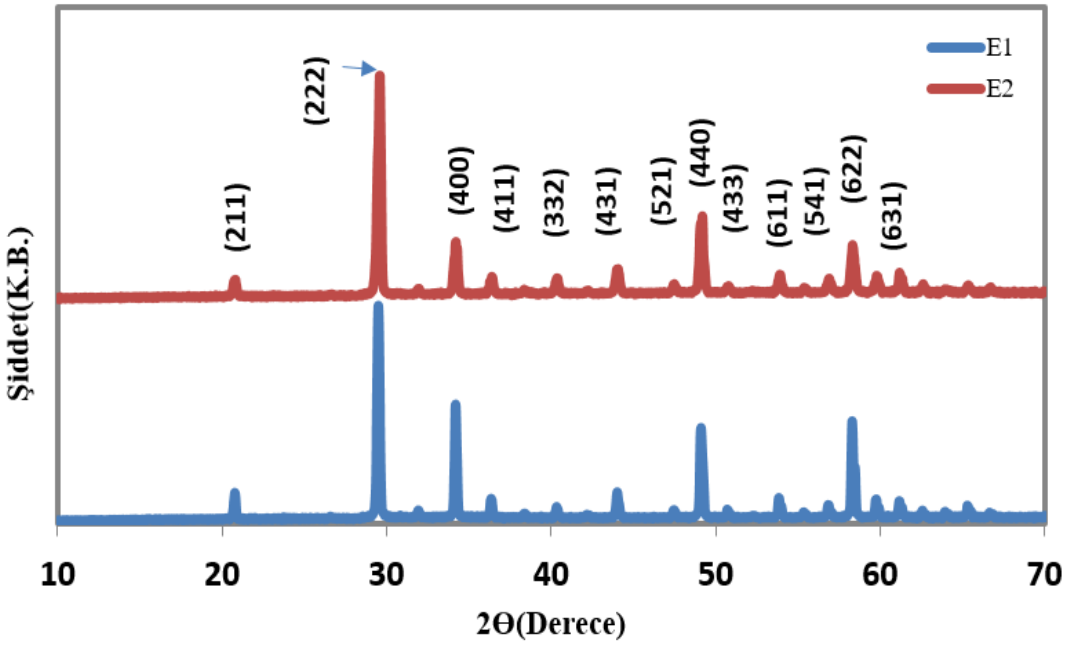
Üretilen polikristal seramik sintilatör malzemelerinin HIP, zımparalama ve parlatma işlemleri sonrasında ikinci bir fazın oluşup oluşmadığını araştırmak amacı ile XRD analizi yapıldı.

HIP, zımparalama ve parlatma işlemleri sonrasında Lu_2O_3 miktarı %130 olan C1, C2, C3 ve C4 kodlu malzemelerin x- ışını kırınım deseni şekil 5.25'de verilmiştir.



Şekil 5.25 C1, C2, C3 ve C4 kodu verilen seramik sintilatör malzemelere HIP, zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında ölçülen XRD grafiği

HIP, zımparalama ve parlatma işlemleri sonrasında Lu_2O_3 miktarı % 150 olan E1 ve E2 kodu verilen x- ışını kırınım deseni şekil 5.26'de verilmiştir.



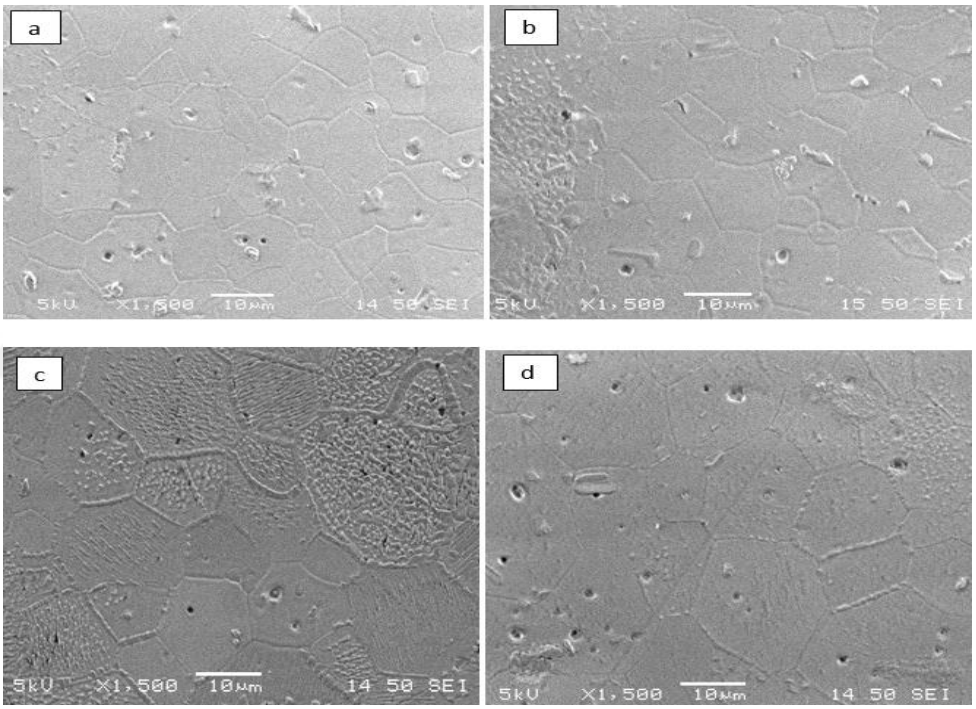
Şekil 5.26 E1 ve E2 kodu verilen seramik sintilatör malzemelere HIP, zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında ölçülen XRD grafiği

Şekil 5.25 ve şekil 5.26'da C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodlu malzemelere yapılan XRD analizi sonucunda; tozlara ait olan tüm kırınım pikleri Lu_2O_3'a ait olan JCPDS kart no:00-043-1021'de rapor edilen standart verilerle tutarlı, hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip olduğu ve birim hücre parametresinin a=10,39 Å olduğu bulundu. Üretilen seramik sintilatör malzemelerde HIP işlemi sırasında uygulanan yüksek sıcaklığa rağmen ikinci bir fazın oluşmadığı tespit edildi.

5.2.3.6 İkinci seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara HIP işlemi sonrasında SEM analizi

Üretilen seramik sintilatör malzemelerin makro yapısını araştırmak amacıyla SEM görüntüsü alındı. HIP işlemi sonrasında zımparalama ve cilalama işlemi yapıldığı için malzemelerin SEM'e girmeden önce termal dağlama işlemi uygulandı. Parlatmadan sonra malzemeye mikroskop ile bakıldığında kalıntılar, porozite, çatlak, yüzeydeki diğer benzeri kusurlar görülebileceği için malzemelere ilk olarak optik mikroskop ile bakıldı. Optik mikroskopla bakıldığında malzeme hakkında herhangi bir şey görülemedi. Parlatılmış numunenin yüzeyi ışığı eşit bir şekilde dağıttığından yapıdaki ayrıntılar ayırt

edilemedi. Termal dağlama işlemi sayesinde üretilen malzemelerin makroyapı ayrıntıları hakkında bilgi almamızı sağlamaktadır. Termal dağlama işlemi için üretilen seramik sintilatör malzemeleri alümina kroze kaba koyuldu ve sinterleme fırınının tam ortasına yerleştirildi. Sinterleme fırınını termal dağlama yapılması için 135 dakikada 1450 ^{0}C sıcaklığa gelecek, 1450 ^{0}C sıcaklığa geldiğinde 4 saat kaldıktan sonra soğumaya geçecek şekilde program yapıldı. Termal dağlama sırasında C1 ve C2 kodlu malzemeler sıcaklığın etkisiyle parçalandığı, C3, C4, E1 ve E2 kodlu malzemelerin termal olarak dağlandı. C3, C4, E1 ve E2 kodlu malzemelerin SEM görüntüleri şekil 5.27'deki gibidir.



Şekil 5.27 Seramik sintilatör malzemelerinin SEM görüntüsü a. C3, b. C4, c.E1, d.E2

Şekil 5.27'de sırasıyla C3, C4, E1 ve E2 seramik sintilatör malzemelerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Üretilen malzemelerdeki Lu_2O_3 miktarına bağlı olmamakla birlikte tüm malzemelerde porozite gözlenmiştir. Seramik sintilatör malzemelerin tane boyutu 5–25µm arasında ve poligonal taneler içermektedir. Seramik sintilatör malzemelerinde tane sınırlarının yeteri kadar oluşmadığı görüldü. Bunun sebebi HIP sıcaklığının ve süresinin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında farklı stokiyometriye sahip iki seri (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklar üretilmiştir. Çözelti yanma yöntemi ile toz üretiminden sinterleme proseslerine kadar uzanan üretim yöntemi takip edilmiştir. İlk seride Lu_2O_3 miktarı % 10, % 20, % 40, % 80, % 95 ve ikinci seride Lu_2O_3 miktarı %130 ve % 150 olacak şekilde 7 farklı (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklar üretilmiştir. XRD ve PL cihazları kullanılarak karakterizasyon işlemi yapılmış ve toz metalurjisi yöntemi ile şeffaf seramik sintilatör malzemesi üretilmeye çalışılmıştır.

İlk seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara ait sonuçlar aşağıda verilmektedir;

- Lu_2O_3 miktarı % 10, % 20 ve % 40 olan parçacıklara ait XRD analizi sonucunda; tozların tüm kırınım pikleri Gd_2O_3'e ait olduğu ve birim hücre parametresinin a=10,81 Å olduğu bulunmuştur. Lu_2O_3 miktarı % 80 ve % 95 olduğunda ise; tüm kırınım pikleri Lu_2O_3'e ait olduğu ve birim hücre parametresinin a=10,39 Å olduğu bulunmuştur. Lu_2O_3 miktarı artıkça birim hücre parametresinin küçüldüğü ve üretilen tozların hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip olduğu bulunmuştur.
- İlk seri olarak üretilen tozlarda ikinci faz ya da saflığı bozan yapıların olmadığı tespit edildi.
- Kalsinasyon sıcaklığının artması ile kırınım piklerinin şiddeti daha yüksek ve daha keskin olduğu görülmektedir. Piklerin şiddetinin yüksek ve keskin olması parçacık boyutlarının büyüdüğü anlamına gelmektedir. Parçacık boyutu büyük olan parçacıkların XRD pikleri daha keskin ve pik genişlikleri küçük parçacık boyutlarına sahip parçacıklara göre daha dar olmaktadır. Parçacık boyutunun küçülmesiyle XRD pik şiddetinde azalma dolayısıyla piklerde genişlemeye sebep olmaktadır.
- Kalsinasyon sıcaklıkları artıkça parçacık boyutlarının büyüdüğü, (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3}'daki Lu_2O_3 miktarı arttıkça parçacık boyutunun küçüldüğü tespit edildi.

- Emisyon spektrumunda üretilen parçacıklar 305 nm'de uyarıldığında Eu^{+3}'un $^5D_o \rightarrow {}^7F_2$ geçişinden kaynaklanan 612 nm'de görünür bölgede emisyon pikini verdiği görülmüştür. 612 nm'deki emisyon yoğunlukları kalsinasyon sıcaklığı 800 ^{0}C'de en düşük, 900 ve 1000 ^{0}C olduğunda ise emisyon yoğunluğunun arttığı tespit edildi. Yapılan çalışmada Lu_2O_3 miktarı % 20 ve % 40 olduğunda emisyon yoğunluğu maksimum olduğu tespit edildi.
- (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} tozlardan en fazla emisyon yoğunluğuna sahip olan Lu020-900, Lu020-1000, Lu040-900 ve Lu040-1000 kodlu tozlardır. Bu tozlar toz metalurjisi yöntemi uygulanılması için seçildi.
- Pelet haline getirilen Lu020-800, Lu020-900 ve Lu020-1000 parçacıkları 270 MPa altında CIP işlemi uygulandığında elde edilen yoğunluk yüzdesi % 48-55 arasında olduğu bulundu.
- Malzemelere yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi uygulandıktan sonra malzemelerin XRD analizi sonucunda malzemenin hacim merkezli kübik kristal yapıdan taban merkezli monoklinik kristal yapıya dönüştüğü tespit edildi. Yapıdaki bu faz değişiminin sebebi Gd_2O_3'in 1260 ^{0}C'de kübik fazdan monoklinik faza dönüşmesidir. (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} malzemelerinde Gd_2O_3 miktarı fazla olmasından dolayı 1260 ^{0}C'den daha yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi yapıldığında yapının kübik fazdan monoklinik faza dönüştüğü tespit edildi. Bundan sonraki aşamalarda (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} seramik sintilatör malzemesi üretmek istiyorsak üreteceğimiz malzemenin kübik fazda olması yani başka bir fazın oluşmaması için Gd_2O_3 miktarını azaltmak gerektiği sonucuna varıldı.

İkinci seri olarak üretilen (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklara ait sonuçlar aşağıda verilmektedir;

- C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodları verilen parçacıkların XRD analizi sonucunda; tozlara ait olan tüm kırınım pikleri Lu_2O_3'e ait olduğu ve birim hücre parametresinin a=10,39 Å olduğu bulunmuştur.
- Üretilen tozlarda ikinci faz ya da saflığı bozan yapıların olmadığı tespit edildi.

- Kalsinasyon sıcaklığı artığında kırınım piklerin şiddetinin arttığı ve kırınım piklerinin daha keskin olduğu görülmektedir. Bu durum parçacık boyutunun büyüdüğü anlamına gelmektedir.
- (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarının kalsinasyon sıcaklıkları artıkça parçacık boyutunun artığı ve Lu_2O_3 miktarı arttıkça parçacık boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir.
- Emisyon spektrumunda seramik tozlar 305 nm'de uyarıldığında Eu^{+3}'un $^5D_o \rightarrow {}^7F_2$ geçişinden kaynaklanan 612 nm'de görünür bölgede emisyon pikini verdiği görülmüştür. C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodları verilen parçacıkların Lu_2O_3 miktarı ve kalsinasyon sıcaklığı arttığında emisyon yoğunluğunun da arttığı tespit edilmiştir. Üretilen ilk ve ikinci seri (Gd, Lu)$_2O_3$:Eu^{+3} parçacıklarına ait PL sonuçlarına göre en iyi emisyon pik şiddetine E1 ve E2 kodlu malzemelerin sahip olduğu tespit edildi.
- C1, C2, C3, C4, E1 ve E2 kodları verilen parçacıklar yaklaşık olarak 1,500 g tartılarak 13 mm çapında kalıp içinde 55 MPa basınç altında tek eksen pres işlemi yapıldığında yoğunluk yüzdesi değeri yaklaşık olarak % 50 olarak bulundu.
- CIP cihazında 300 MPa basınç altında malzemeler izostatik olarak sıkıştırıldı ve elde edilen yoğunluk yüzdesi değeri ortalama olarak % 59 olarak bulundu.
- Pelet haline getirilen seramik sintilatör malzemelere farklı sinterleme sıcaklıkları uygulandığında yoğunluk yüzdesi değerlerini % 92'ye çıkaran sinterleme sıcaklık değeri oksijen gaz akışı altında 20 saat 1700 ^{0}C'de sinterleme sıcaklığı olduğu tespit edildi.
- 200 MPa basınç altında 1650 ^{0}C'de 6 saat HIP işlemi sonrasında C3, C4, E1 ve E2 kodlu malzemeler yarı şeffaf olarak üretildi ve istenilen yoğunluk yüzdesi değeri elde edildi. Malzemelere bir ışık altında bakıldığında ışığı geçirdiği görülmüştür. Malzemenin yarı şeffaf üretilmesinin sebebi HIP işlemi için uygulanan (1650 ^{0}C' de 6 saat) sıcaklık ve sürenin yetersiz olmasından kaynaklandığı sonucuna varıldı. HIP sonrası malzemelerin XRD analizi yapıldığında hacim merkezli kübik kristal yapının korunduğu ve HIP işlemi sırasında uygulanan yüksek sıcaklığa rağmen ikinci bir fazın oluşmadığı tespit edildi.

Yukarıda elde edilen sonuçlar kullanılarak ileri teknoloji malzemesi olan ve x-ışınları görüntüleme cihazlarında şeffaf seramik sintilatör malzemesi olarak kullanılması amaçlanan Europyum katkılı Gadalonyum Lutesyum Oksit ($(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$) malzemesi Lu_2O_3 miktarı %150 olan malzemelerdir. Çünkü bu malzemelerin XRD analizi sonucunda; malzeme yüksek sıcaklıklara maruz kalsa bile kübik kristal yapısını koruduğu, ikinci faz ya da saflığı bozan yapıların oluşmadığı ve parçacık boyutunun en küçük olduğu tespit edildi. PL analizi sonucunda ise 305 nm'de uyarılan parçacıklar Eu^{+3}'un $^5D_o \rightarrow {}^7F_2$ geçişinden kaynaklanan 612 nm'de görünür bölgede en yüksek şiddette ışık (sintilasyon) fotonları oluşturduğu tespit edilmiştir. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak; 55 MPa basınç altında tek eksen pres işlemi, 300 MPa basınç altında CIP işlemi, 20 saat 1700 ^{0}C'de sinterleme sıcaklığı uygulandığında yoğunluk yüzdesi değeri ortalama %93 olduğu ve 200 MPa basınç altında 1650 ^{0}C'de 6 saat HIP işlemi uygulandığında ise yoğunluk yüzdesi değerinin ortalama %98 olduğu tespit edildi. HIP işlemi sonrasında üretilen $(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$ malzemesi yarı şeffaf olarak üretildi. Malzemenin yarı şeffaf olarak üretilmesinin nedeni son aşama olan 1650 ^{0}C'de 6 saat HIP sıcaklığının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. HIP sıcaklığını ve süresini artırarak Europyum katkılı Gadalonyum Lutesyum Oksit ($(Gd, Lu)_2O_3:Eu^{+3}$) şeffaf seramik sintilatör malzemesi üretilebileceği sonucuna varıldı.

KAYNAKLAR

Ahmed, S. N. 2007. Physics and Engineering of Radiation Dedection. Academic Press, 800s., USA.

Anonim. 2020a. Web Sitesi: https://muhendistan.com/elektromanyetik-radyasyon-nedir/, Erişim tarihi: 04.11.2020

Anonim. 2020b. Web Sitesi: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/122228/mod_resource/content/0/Hafta%20/1.pdf, Erişim tarihi: 04.11.2020

Anonim. 2020c. Web Sitesi: https://docplayer.biz.tr/152811073-Parcacik-dedektorlerine-giris-i-prof-dr-cuneyt-celiktas-ege-universitesi-fen-fakultesi-fizik-bolumu-bornova-izmir-turkiye.html, Erişim Tarihi: 04.11.2020

Anonim. 2020d. Web Sitesi: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/59939/mod_resourc/content/0/Konu%204%20Sintilasyon%20dedekt%C3%B6rleri.pdf, Erişim Tarihi: 04.11.2020

Anonymous. 2020a. Web Sitesi: https://pdfslide.net/documents/geigermueller-tube.html, Erişim Tarihi: 04.11.2020

Anonymous. 2020b. Web Sitesi: https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf, Erişim Tarihi: 04.11.2020

Anonymous. 2020b. Web Sitesi: https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf, Erişim Tarihi: 04.11.2020

Anonymous. 2020c. Web Sitesi: http://www.amcrys.com, Erişim Tarihi: 04.11.2020

Arıtman, İ. 2014. Soğuk izostatik presleme ile üretilen Al/Sicp metal matrisli kompozitlerde faktör etkileşimlerinin mekanik özelliklere etkisi ve karakterizasyon çalışmaları. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 127, İzmir.

Blasse, G. 1979. Chemistry and physics of R-activated phosphors, Handbook on the physics and chemistry of rare earths. K.A. Gschneidner, Jr. and L. Eyring (eds), 237-274, North-Holland.

Blasse, G. and Grabmaier, B. C. 1994. Luminescent Materials. Springer Verlag, 232 s., Berlin.

Cao, M., Xu, J., Hu, C., Kou, H., Shi, Y., Chen, H. and Li, J. 2017. Fabrication and characterizations of $(Lu,Gd)_2O_3:Eu^{+3}$ scintillation ceramics. Ceramics International, 43(2), 2165–2169.

Chandra, R. 2011. Nuclear Medicine Physics: The Basics, Lippincott Williams and Wilkins, 208, Philadelphia.

Çapan, A. 2008. 3-Hidroksiflavon türevlerinin sentez ve mikroheterojenik sistemlerle etkileşimlerinin floresans spektroskopi yöntemi ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, 56, İstanbul.

Demir, M. 2011. Nükleer Tıp Fiziği ve Klinik Uygulamaları. İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Yayını, 388 s., İstanbul.

Duclos, S. J., Greskovich, C. D., Lyons, R. J., Vartuli, J. S., Hoffman, D. M., Riedner, R. J. and Lynch, M. J. 2003. Development of the HiLight™ scintillator for computed tomography medical imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 505(1-2), 68–71.

Early, P.J. and Sodee, D.B., 1985. Principles and Practice of Nuclear Medicine. Mosby Year Book Inc, 983p., New York.

Ekşi A. ve Sarıtaş S. 2002. Effects of powder hardness and particle size on the densification of cold ısostatically pressed powders. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 26(5), 377-384.

Engin, Y. 2012. Yaklaşık doku eşdeğeri olan BC-408 plastik sintilatörün radyolojik bölgedeki 40-120 KeV x ışınlarına ve 60-1333 KeV gama ışınlarına karşı tepkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Medikal Fizik Anabilim Dalı, 113, Ankara.

German, M.R. 2005. Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing. Metal Powder Industries Federation, 528 p., New Jersey.

Gilmore, R.G. 2011. Practical Gamma-Ray Spectrometry. John Wiley and Sons Inc, 408 p., USA.

Greskovich, C. and Duclos, S. 1997. Ceramic scintillators. Annuel Review of Materials Science, 27(1), 69-88.

Gülenç, N.E. 2018. Monte Carlo yöntemi kullanılarak organik sintilatör optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 41, İstanbul.

Hallenbeck, W.H. 1994. Radiation Protection. Lewis Pub., 265 p., New York.

Henderson, R. J., Chandler, H. W., Akisanya, A. R., Barber, H. and Moriarty, B. 2000. Finite element modelling of cold isostatic pressing. Journal of the European Ceramic Society, 20(8), 1121-1128.

Knoll, G. F. 1989. Radiation Detection and Measurement. John Wiley and Sons Inc., 784 p., USA.

Knoll, G. F. 2002. Radiation Detection and Measurement. John Wiley and Sons Inc., 829 p., USA.

Krane, K. S. 2001. Nükleer Fizik 1.Cilt. Palme yayınevi, 418 s., Ankara.

Krane, K. S. 2002. Nükleer Fizik 2.Cilt. Palme yayınevi, 839 s., Ankara.

Kumar S. and Balasubramanian V. 2008. Developing a mathematical model to evaluate wear rate of AA7075/SiC_p powder metallurgy composites. Wear, 264(11-12), 1026-1034.

Kwo, J., Hong, M., Kortan, A. R., Queeney, K. T., Chabal, Y. J., Mannaerts, J. P., Boone, J. J., Krajewski, A. M., Sergent, A. and Rosamilia, J.M. 2000. High ε gate dielectrics Gd_2O_3 and Y_2O_3 for silicon. Appied Physics Letters, 77(1), 130-132.

Lamarsh, J.R. and Baratta A.J. 2001. Introduction to Nuclear Engineering. Pearson, 783 p., USA.

Lecoq, P., Gektin, A. and Korzhik M. 2017. Inorganic Scintillators for Detector Systems. Springer International Publishing, 408 p., New York.

Lecoq, P., Annenkov, A., Gektin, A., Korzhik, M. and Pedrini, C., 2006. Inorganic Scintillators for Detector Systems. Springer International Publishing, 251p., New York.

Liu, Y. Q., Wei, S. H., Fan, J. Z., Ma, Z. L. and Zuo, T. 2014. Mechanical properties of a low thermal expansion aluminum/silicon composite produced by powder metallurgy. Journal of Materials Science & Technology, 30(4), 417-422.

Louis, C., Lebbou, K., Flores-Gonzalez, M. A., Bazzi, R., Hautefeuille, B., Mercier, B. and Tillement, O. 2004. Correlation of the structure and the luminescence properties of Eu^{+3}-doped Gd_2O_3 oxide between fiber single crystal and the nano-size powders. Journal of Crystal Growth, 265(3-4), 459–465.

Lu, B., Li, J.G. and Sakka, Y. 2013. Controlled processing of $(Gd, Ln)_2O_3$:Eu (Ln = Y, Lu) red phosphor particles and compositional effects on photoluminescence. Science and Technology of Advanced Materials, 14(6), 1-10.

Mahajan, S. V. 2010. Ultra-small rare-earth oxide nanocrystals: development, film assembly, optical and dielectric studies. Doktora Tezi, Vanderbilt University, Interdisciplinary Materials Science, 142, Nashville.

Martin, B. R. 2006. Nuclear and Particle Physics. Wiley, 428 p., London.

Nolan, P.J. 2014. Fundamentals of Modern Physics. Physics Curriculum, 325, USA.

Olçay, İ. 2007. Radyasyon dedeksiyonunda kullanılan yarı-iletken dedektör tipleri özellikleri ve kullanım alanları. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 58, Niğde.

Öcal, E. 2017. $LaBr^{+3}$ NaI ve $CeBr^{+3}$ NaI sintilatörlerin Paris projesi kapsamında performanslarının karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 55, Niğde.

Öztürk S ve İçin K, 2015. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü. 16, Trabzon.

Pla-Dalmau, A. 2009. Explane it in 60 seconds:scintillators. symmetrymagazine, 1-1.

Qin, L. S., Wu, Y. T., Shi, H. S., Chai, W. X., Shu, K. Y., Ren, G. H. and Chen, X. F. 2009. Effects of doping Lu_2O_3 into Gd_2O_3 on phase transformation and luminescence. IEEE Transactions on Nuclear Science, 56(5), 2979–2982.

Roy, S., Topping, S. and Sarin, V. 2013. Growth and characterization of Lu_2O_3:Eu^{+3} thin films on single-crystal yttria-doped zirconia. Journal of Operations Management, 65(4), 557-561.

Seeley, Z., Cherepy, N. and Payne, S. 2013. Two-step sintering of $Gd_{0.3}Lu_{1.6}Eu_{0.1}O_3$ transparent ceramic scintillator. Optical Materials Express, 3(7), 908-912.

Seo, Y., Yun, K., Kim, H. and Park, S. 2010. Adaptability of zirconia core fabricated by cold isostatic pressing. The Journal of Korean Academy of Prosthodontics, 48(2), 143-150.

Skoog, D.A., Holler, F.J and Crouch, S.R. 2006. Principles of Instrumental Analysis. Cengage Learning, 1056 p., USA.

Şahmaran, T. 2011. Pozitron emisyon tomografi-bilgisayar tomografi (PET–BT) uygulamalarında hastanın aldığı radyasyon dozunun belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı, 123, İzmir.

Şenyiğit, M. 2011. Nükleer reaksiyonlar sonucu açığa çıkan gamma ışınları ve nötronların germanyum dedektör sistemi ile etkileşmeleri. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 125, Ankara.

Taylı, T. 2018. Seramik sintilatörlerin optik özelliklerinin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 39, İstanbul.

Topal, M. 2019. Parafin ve metal tozu dolgulu epoksi reçinesi üretimi ve nötron zırhlama parametrelerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 73, Ağrı.

Tsoulfanidis, N. and Landsberger, S. 2011. Measurements and Detection of Radiation. CRC Press, 485 p., New York.

Virk, H.S. 2015. History of luminescence from ancient to modern times. Defect and Diffusion Forum, 361,1-13.

Wang, Z., He, W., Shi, Y. and Zhang, Y. 2014. Experimental based full process simulation of alumina selective laser processed parts densified by cold isostatic pressing and solid state sintering. Journal of the European Ceramic Society, 34(7), 1853–1863.

Warshaw, I. and Roy, R. 1961. Polymorphism of the rare earth sesquioxides. The Journal of Physical Chemistry, 65(11), 2048–2051.

Wu, Y. T., Qin, L. S., Shi, H. S., Zhang, Y., Yang, Y. X. and Shu, K. Y. 2010. Preparation of europium doped gadolinium lutetium oxide solid solution transparent ceramics and its optical properties. IEEE Transactions on Nuclear Science, 57(3), 1343–1347.

Yang H. C., Kim J. K. and Kim K. T. 2004. Rubber isostatic pressing and cold isostatic pressing of metal powder. Materials Science and Engineering: A, 318(1-2), 41-49.

Yener, G. 2006. Nükleer Radyasyon Fiziği-II Ders Notları. Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı, İzmir.

Zych, E. 2002. Concentration dependence of energy transfer between Eu^{+3} ions occupying two symmetry sites in Lu_2O_3. Journal of Physics: Condensed Matter, 14(22), 5637–5650.

Zych, E., Hreniak, D. and Strek, W. 2002. Spectroscopy of Eu doped Lu_2O_3 based X-ray phosphor. Journal of Alloys and Compounds, 341(1-2), 385–390.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özlem ABAY

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 12 Ocak 1972

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Sincan Lisesi (1990)

Lisans : Ankara Üniversitesi-Fen Fakültesi-Fizik Bölümü (1996)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı(2021)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Hava Kuvvetleri Komutanlığı-3.Ana Jet Üs Komutanlığı	Sistem Uygulama Programcısı	1998-2000
Türkiye Atom Enerjisi Kurumu	Fizikçi	2000-2019
Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu	Fizikçi	2019-Devam ediyor