

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ İLE KATKILANDIRILMIŞ  
ALÜMİNAT/SİLİKAT BAZLI BAZI İŞİLDAR MALZEMELERİN  
TERMOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Zehra ÖZDEMİR**

**Fizik Anabilim Dalı**

**HAZİRAN 2025**



**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ İLE KATKILANDIRILMIŞ  
ALÜMİNAT/SİLİKAT BAZLI BAZI İŞİLDAR MALZEMELERİN  
TERMOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Zehra ÖZDEMİR  
( 180882202 )**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erdem UZUN**

**HAZİRAN 2025**



## TEZ ONAYI

Zehra ÖZDEMİR tarafından hazırlanan NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ İLE KATKILANDIRILMIŞ ALÜMİNAT / SİLİKAT BAZLI BAZI IŞILDAR MALZEMELERİN TERMOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: :

*Doç Dr. Erdem UZUN*

Jüri Üyeleri

İmza:

*Unvanı, Adı ve Soyadı  
Prof. Dr. Yasemin YILDIZ YARAR*

*Unvanı, Adı ve Soyadı  
Prof. Dr. İbrahim YILMAZ*

*Unvanı, Adı ve Soyadı  
Prof. Dr. Esra ÖZTÜRK*

*Unvanı, Adı ve Soyadı  
Doç Dr. Erdem UZUN*

*Unvanı, Adı ve Soyadı  
Doç Dr. Mehmet Emin KORKMAZ*

Tez Savunma Tarihi: 18/06/2025

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof.Dr. Murat MAYDA**  
**Enstitü Müdürü**



## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

(İmza)

Zehra ÖZDEMİR





*Anneme,*



## ÖNSÖZ

Uzun ve yorucu fakat her anından zevk aldığım doktora tez çalışmamı tamamlayarak akademik kariyer için önemli bir adım atmış oluyorum. Bu çalışma süresinde bana destek ve yardımcı olan başta ailem ve hocalarım olmak üzere emeği geçenlerin isminden burada bahsederek bir nebze olsun minnettarlığımı dile getirmiş olacağıma inanıyorum. Eğitimimin her kademesinde maddi ve manevi tüm imkânlarını benim için seferber eden başta babam ve annem olmak üzere fedakâr aileme teşekkür ediyorum. Diğer taraftan lisans bitirme çalışması ile başlayıp doktora kadar beni yetiştiren, akademik karakterime yön veren ve kendisinin çalışma disiplinini her zaman örnek aldığım hocam Sayın Doç. Dr. Erdem UZUN'a teşekkür ediyorum.

Emeği geçen ve isminden söz edemediğim herkese yardımlarından, katkılarından ve desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Bu çalışma, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "02-D-23" nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Haziran 2025

Zehra Özdemir  
Fizik Öğretmeni



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Lüminesans .....	2
1.1.1 Fotolüminesans (Floresans ve Fosforesans) .....	6
1.2 Termolüminesans .....	10
1.3 Literatür Araştırması .....	12
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>19</b>
2.1 Kristaller ve Enerji Bant Seviyeleri.....	19
2.2 Termolüminesans Olay .....	22
2.3 Bir Tuzak – Bir Yeniden Birleşme Merkezi Modeli .....	25
2.4 Yarı Denge (Quasiequilibrium) Yaklaşımı .....	29
2.5 Birinci Mertebeden Kinetik Model .....	30
2.6 İkinci Mertebeden Kinetik Model .....	30
2.7 Genel Mertebeden Kinetik Model.....	31
2.8 Bilgisayarlı Işıldama Eğrisi Dekonvülasyonu (CGCD) .....	31
<b>3. MATERYAL VE METOT</b> .....	<b>33</b>
3.1 Termolüminesans Ölçüm Laboratuvarı .....	33
3.2 Tavlama Fırını .....	34
3.3 Alfa ve Beta Radyasyon Kaynakları ve Işınlama Sistemi .....	35
3.4 TL Okuyucu Sistem.....	36
3.5 TLD Okuyucu ve TLD wintest-400 Yazılım Programı Çalışma Prensipleri .....	38
3.6 Tuzak Parametrelerini Hesaplama Yöntemleri .....	39
3.6.1 Pik Pozisyonu Yöntemi .....	39
3.6.2 Artan Doz Yöntemi .....	39
3.6.3 Değişken Isıtma Hızları Yöntemi .....	40
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>43</b>
4.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler, Sistemler .....	43
4.1.1 Deney Malzemeleri .....	43
4.1.2 Numunelerin Deneylere Hazırlanması .....	43
4.1.3 Tavlama Süreci.....	44
4.1.4 Işınlama Süreci, Beta ve Alfa Işınlama Sistemleri.....	44
4.1.5 Işınlama Sistemi Güvenliği.....	45
4.1.6 Termolüminesans Ölçüm Sistemi .....	45
4.2 Deneysel Prosedür .....	46

4.3 Doğal Termolüminesans Işıldamanın Ölçülmesi.....	46
4.4 Termolüminesans Işıldama Eğrilerinin Ölçülmesi .....	47
4.5 Yeniden Kullanılabilirlik.....	49
4.6 Bilgisayarlı Işıldama Eğrisi Ayrıştırma (Computerized Glow Curve Deconvolution, GGCD) .....	54
4.7 Pik Pozisyonu ( $T_s$ - $T_m$ ) Yöntemi .....	57
4.8 Değişken Doz (VD) Yöntemi .....	61
4.9 Alfa Radyasyonunun Işıldama Eğrisine Etkisi.....	67
4.10 Fading Etkisi .....	73
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>89</b>



## KISALTMALAR

<b>TL</b>	: Termoluminesans
<b>LiF</b>	: Lityum Florür
<b>TLD</b>	: Termoluminesans Dozimetri
<b>CGCD</b>	: Bilgisayarlı Işıldama Eğrisi Dekonvülasyon
<b>PL</b>	: Fotoluminesans
<b>EL</b>	: Elektrolüminesans
<b>RT</b>	: Oda Sıcaklığı
<b>EPR</b>	: Elektron Paramanyetik Rezonans
<b>LNT</b>	: Sıvı Azot Sıcaklığı
<b>NTE</b>	: Nadir Toprak Elementleri
<b>ATP</b>	: Adenozin Tri Fosfat
<b>RC</b>	: Rekombinasyon Merkezi
<b>FOM</b>	: Figure Of Merit
<b>N<sub>1</sub></b>	: $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$
<b>N<sub>2</sub></b>	: $\text{Sr}_{2.99}\text{Ba}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$
<b>N<sub>3</sub></b>	: $\text{Sr}_{2.99}\text{Mg}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$
<b>N<sub>4</sub></b>	: $\text{Ba}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}: \text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$
<b>N<sub>5</sub></b>	: $\text{Ca}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}: \text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$
<b>N<sub>6</sub></b>	: $\text{Mg}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}: \text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$
<b>N<sub>7</sub></b>	: $\text{Sr}_{1.25}\text{Eu}_{0.5}\text{Dy}_{0.25}\text{SiO}_5$
<b>N<sub>8</sub></b>	: $\text{Sr}_{1.25}\text{Mg}_{0.1}\text{Eu}_{0.5}\text{Dy}_{0.25}\text{SiO}_5$
<b>N<sub>9</sub></b>	: $\text{Mg}_{1.25}\text{Eu}_{0.5}\text{Dy}_{0.25}\text{SiO}_5$
<b>EPR</b>	: Elektron Paramanyetik Rezonans



## SEMBOLLER

<b>E</b>	: Enerji Seviyesi
<b>E<sub>t</sub></b>	: Tuzak Enerji Seviyesi
<b>E<sub>C</sub></b>	: İletim Bandı
<b>E<sub>V</sub></b>	: Değerlik Bandı
<b>n<sub>c</sub></b>	: İletim Bandındanki Elektron Konsantrasyonu
<b>n<sub>v</sub></b>	: Değerlik Bandındanki Elektron Konsantrasyonu
<b>β</b>	: Isıtma Hızı (Oranı)
<b>I<sub>TL</sub></b>	: Termoluminesans Işıldama Şiddeti
<b>k</b>	: Boltzmann Sabiti
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>s</b>	: Frekans Faktörü (Kaçmaya Teşebbüs Etme Frekansı)
<b>n</b>	: Tuzakta Bulunan Elektron Sayısı
<b>b</b>	: Kinetik Mertebe



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 1.1</b> : Lüminesans türleri .....	<b>5</b>
<b>Çizelge 4.1</b> : Doktora tez çalışmasında kullanılan malzemeler .....	<b>43</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : N <sub>1</sub> numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri .....	<b>55</b>
<b>Çizelge 4.3</b> : N <sub>2</sub> numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri .....	<b>56</b>
<b>Çizelge 4.4</b> : N <sub>3</sub> numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri .....	<b>56</b>
<b>Çizelge 4.5</b> : N <sub>6</sub> numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri .....	<b>57</b>
<b>Çizelge 4.6</b> : Deneysel olarak ölçülen toplam elektron tuzak konsantrasyonu.....	<b>65</b>
<b>Çizelge 4.7</b> : N <sub>1</sub> numunesinin T <sub>mak</sub> değerlerinin $\alpha$ radyasyonu ile değişimi. ....	<b>68</b>
<b>Çizelge 4.8</b> : N <sub>2</sub> numunesinin T <sub>mak</sub> değerlerinin $\alpha$ radyasyonu ile değişimi. ....	<b>69</b>
<b>Çizelge 4.9</b> : N <sub>3</sub> numunesinin T <sub>mak</sub> değerlerinin $\alpha$ radyasyonu ile değişimi. ....	<b>70</b>
<b>Çizelge 4.10</b> : N <sub>6</sub> numunesinin T <sub>mak</sub> değerlerinin $\alpha$ radyasyonu ile değişimi. ....	<b>71</b>
<b>Çizelge 4.11</b> : N <sub>1</sub> numunesinin, $\beta$ ve $\alpha$ radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları.....	<b>71</b>
<b>Çizelge 4.12</b> : N <sub>2</sub> numunesinin, $\beta$ ve $\alpha$ radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları.....	<b>71</b>
<b>Çizelge 4.13</b> : N <sub>3</sub> numunesinin, $\beta$ ve $\alpha$ radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları.....	<b>72</b>
<b>Çizelge 4.14</b> : N <sub>6</sub> numunesinin, $\beta$ ve $\alpha$ radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları.....	<b>72</b>
<b>Çizelge 4.15</b> : N <sub>1</sub> numunesinin T <sub>mak</sub> değerlerinin $\alpha$ radyasyonu ile değişimi. ....	<b>72</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Stokes Kanunu ve ışınma şiddeti.....	3
Şekil 1.2: Lüminesans Olay. ....	4
Şekil 1.3: Lüminesans yayımlanma çeşitleri. ....	5
Şekil 1.4: Temel durum ve uyarılmış durum elektron spin gösterimleri.....	7
Şekil 1.5: Örnek bir Jablonski diyagramı. ....	8
Şekil 1.6: Işıldama süresine ( $\tau_c$ ) göre fosforesans olayının sınıflandırılması. ....	10
Şekil 2.1 : Kusursuz yapıdaki saf bir kristalde enerji band diyagramı. ....	20
Şekil 2.2 : Noktasal kristal kusurlarının şematik gösterimi. ....	21
Şekil 2.3 : (a) Schottky Kusuru, (b). Frenkel Kusur.....	22
Şekil 2.4 : Termolüminesans olayın şekille basit bir gösterimi. ....	23
Şekil 2.5 : Delokalize enerji seviyeleri .....	24
Şekil 2.6 : OTOR modelinin önerdiği enerji seviyeleri ve izinli geçişler. ....	26
Şekil 3.1 : TL ölçüm sistemi. ....	34
Şekil 3.2 : Tavlama fırını. ....	35
Şekil 3.3 : $\text{Sr}^{90}$ - $\text{Y}^{90}$ beta ve $^{241}\text{Am}_{146}$ alfa ışınlama kaynakları.....	36
Şekil 3.4 : TL okuyucu sistem. ....	37
Şekil 3.5 : TLD yazılımı ekran görüntüsü.....	37
Şekil 3.6 : TLD okuyucu ve TL wintest-400 programı algoritması. ....	38
Şekil 4.1 : Standart numune altlıkları. ....	44
Şekil 4.2 : Termolüminesans laboatuvarında bulunan NEB-224 Alan Monitörü. ....	45
Şekil 4.3 : RaDos RA-60S kişisel elektronik dozimetre.....	45
Şekil 4.4 : Numunelerin doğal TL ışıldama eğrileri. ....	46
Şekil 4.5 : $N_1$ , $N_2$ , $N_3$ ve $N_6$ numunelerinin TL ışıldama eğrileri.....	47
Şekil 4.6 : $N_4$ , $N_5$ , $N_7$ , $N_8$ ve $N_9$ numunelerinin TL ışıldama eğrileri.....	47
Şekil 4.7 : $N_4$ ve $N_5$ numunelerinin yüksek doz TL ışıldama eğrileri. ....	48
Şekil 4.8 : $N_1$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ve tavlانmadan kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri. ....	49
Şekil 4.9 : $N_2$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ve tavlانmadan kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri. ....	50
Şekil 4.10 : $N_3$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ve tavlانmadan kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri. ....	50
Şekil 4.11 : $N_6$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ve tavlانmadan kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri. ....	51
Şekil 4.12 : Aynı ışınlama koşulları altında ve tavlانmadan elde edilen ışıldama eğrilerinin, eğri altında kalan toplam alanlarının, her döngüdeki değişimi. ....	51
Şekil 4.13 : Her döngü sonunda tavlانmış $N_1$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri .....	52
Şekil 4.14 : Her döngü sonunda tavlانmış $N_2$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri .....	52

Şekil 4.15 : Her döngü sonunda tavllanmış $N_3$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri.....	53
Şekil 4.16 : Her döngü sonunda tavllanmış $N_6$ numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri.....	53
Şekil 4.17 : Her döngü sonunda tavllanmış ve aynı koşullarda ışınlanmış numunelerin, eğri altında kalan toplam alanlarının değişimi. ....	54
Şekil 4.18 : $N_1$ numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi. ....	55
Şekil 4.19 : $N_2$ numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi. ....	55
Şekil 4.20 : $N_3$ numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi. ....	56
Şekil 4.21 : $N_6$ numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi. ....	57
Şekil 4.22 : $N_1$ numunesinin $T_s - T_m$ deney sonuçları. ....	59
Şekil 4.23 : $N_2$ numunesinin $T_s - T_m$ deney sonuçları. ....	59
Şekil 4.24 : $N_3$ numunesinin $T_s - T_m$ deney sonuçları. ....	59
Şekil 4.25 : $N_6$ numunesinin $T_s - T_m$ deney sonuçları. ....	60
Şekil 4.26 : $N_1$ numunesinin $T_s - T_m$ analizi. ....	60
Şekil 4.27 : $N_2$ numunesinin $T_s - T_m$ analizi. ....	60
Şekil 4.28 : $N_3$ numunesinin $T_s - T_m$ analizi. ....	61
Şekil 4.29 : $N_6$ numunesinin $T_s - T_m$ analizi. ....	61
Şekil 4.30 : $N_1$ numunesinin VD analizi. ....	62
Şekil 4.31 : $N_2$ numunesinin VD analizi. ....	62
Şekil 4.32 : $N_3$ numunesinin VD analizi. ....	63
Şekil 4.33 : $N_6$ numunesinin VD analizi. ....	63
Şekil 4.34 : $N_1$ numunesinin VD verilerinin CGCG analizi. ....	64
Şekil 4.35 : $N_2$ numunesinin VD verilerinin CGCG analizi. ....	64
Şekil 4.36 : $N_3$ numunesinin VD verilerinin CGCG analizi. ....	64
Şekil 4.37 : $N_6$ numunesinin VD verilerinin CGCG analizi. ....	65
Şekil 4.38 : $N_1$ numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi. ....	66
Şekil 4.39 : $N_1$ numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi. ....	66
Şekil 4.40 : $N_2$ numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi. ....	66
Şekil 4.41 : $N_2$ numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi. ....	66
Şekil 4.42 : $N_3$ numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi. ....	66
Şekil 4.43 : $N_3$ numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi. ....	66
Şekil 4.44 : $N_6$ numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi. ....	67
Şekil 4.45 : $N_6$ numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi. ....	67
Şekil 4.46 : $\alpha$ ve $\beta$ radyasyonu ile ışınlanmış $N_1$ numunesinin ışıldama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir. ....	68
Şekil 4.47 : $\alpha$ ve $\beta$ radyasyonu ile ışınlanmış $N_2$ numunesinin ışıldama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir. ....	69
Şekil 4.48 : $\alpha$ ve $\beta$ radyasyonu ile ışınlanmış $N_3$ numunesinin ışıldama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir. ....	69
Şekil 4.49 : $\alpha$ ve $\beta$ radyasyonu ile ışınlanmış $N_5$ numunesinin normalize edilmiş ışıldama eğrisi. ....	70
Şekil 4.50 : $\alpha$ ve $\beta$ radyasyonu ile ışınlanmış $N_6$ numunesinin ışıldama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir. ....	70
Şekil 4.51 : $N_1$ numunesinin fading deneyleri. ....	74
Şekil 4.52 : $N_1$ numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi. ....	74
Şekil 4.53 : $N_2$ numunesinin fading deneyleri. ....	74
Şekil 4.54 : $N_2$ numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi. ....	75

<b>Şekil 4.55</b> : N3 numunesinin fading deneyleri.....	<b>75</b>
<b>Şekil 4.56</b> : N3 numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi. ....	<b>75</b>
<b>Şekil 4.57</b> : N6 numunesinin fading deneyleri.....	<b>76</b>
<b>Şekil 4.58</b> : N6 numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi. ....	<b>76</b>
<b>Şekil 4.59</b> : N1 numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları .....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.60</b> : N2 numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları. ....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.61</b> : N3 numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları. ....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.62</b> : N6 numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları. ....	<b>78</b>





## ÖZET

Doktora Tezi

### NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ İLE KATKILANDIRILMIŞ ALÜMİNAT/SİLİKAT BAZLI BAZI IŞILDAR MALZEMELERİN TERMOLÜMINESANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Zehra Özdemir

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Ana Bilim Dalı

Danışman: Unvanı, Doç. Dr. Erdem UZUN

Haziran, 2025, 89 sayfa

Bu doktora tez çalışmasında, nadir toprak elementleriyle katkılanmış ve yüksek sıcaklıklarda katı hal reaksiyonu ile sentezlenmiş alüminat ve silikat bazlı ışıldar malzemelerin bazı termolüminesans ve dozimetrik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla örnekler beta radyasyonu ile ışınlanarak termolüminesans ışıldama eğrileri kaydedilmiştir. Işıldama eğrileri  $T_M$ - $T_S$ , ilave doz ve bilgisayarlı ışıldama eğrisi dekonvülasyon yöntemleri ile analiz edilmiştir. Malzemelerin, görece düşük sıcaklıklarda 2 adet ve yüksek sıcaklık bölgesinde bir adet olmak üzere 3 bağımsız ışıldama pikine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bilgisayarlı ışıldama eğrisi dekonvülasyon yöntemi, yüksek sıcaklık bölgesindeki ışıldama pikinin, birbirinden bağımsız 7 adet ışıldama pikinin bir süperpozisyonu olduğunu göstermiştir. Bu piklerin temel tuzak parametreleri hesaplanmış ve pik 1 ve 2'nin birinci mertebeden kinetik parametrelere sahip oldukları, diğer ışıldama piklerinin ise genel mertebeden kinetik parametrelere sahip oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelerin fading ölçümleri yapılmış ve düşük sıcaklık bölgesindeki piklerin kısa süre içerisinde gözden kaybolmasına rağmen yüksek sıcaklık bölgesindeki ışıldama piklerinin 540 gün gibi uzun bir bekleme süresi sonunda bile hala ölçülebildiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Termolüminesans, alüminat, silikat, nadir toprak elementleri, dekonvülasyon



## ABSTRACT

Ph.D. Thesis

### INVESTIGATION OF THERMOLUMINESCENCE PROPERTIES OF SOME ALUMINATE/SILICATE BASED PHOSPHORS DOPED WITH RARE EARTH ELEMENTS

Zehra Özdemir

Karamanoğlu Mehmetbey University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics

Supervisor: Associate Prof. Dr. Erdem Uzun

June, 2025, 89 pages

This doctoral thesis investigated some thermoluminescence and dosimetric properties of aluminate and silicate-based phosphors doped with rare earth elements and synthesized by solid-state reaction at high temperatures. For this purpose, samples were irradiated with beta radiation and thermoluminescence luminescence glow curves were recorded. Luminescence curves were analyzed using  $T_M-T_S$ , additive dose, and computerized glow curve deconvolution methods. The materials were observed to have 3 independent glow peaks, 2 at relatively low temperatures and 1 at high-temperature regions. However, the computerized glow curve deconvolution method showed that the glow peak in the high-temperature region is a superposition of 7 independent luminescence glow peaks. The fundamental trap parameters of these peaks were calculated and it was observed that peaks 1 and 2 have first-order kinetic parameters, while the other luminescence peaks have general-order kinetic parameters. In addition, feeding measurements of the samples were made and it was observed that although the peaks in the low-temperature region disappeared rapidly, the luminescence peaks in the high-temperature region could still be measured even after a long waiting period of 540 days.

**Keywords:** Thermoluminescence, aluminate, silicate, rare earth, deconvolution.



## 1. GİRİŞ

Bazı yarıiletken ve/veya dielektrik kristaller, radyasyona maruz kaldıklarında bir miktar enerjiyi depolayabilmekte ve bu enerjiyi termolüminesans (TL) mekanizma ile kontrollü bir şekilde yayımlayabilmektedir. Termolüminesans olay, kristal yapı içinde sıkışmış yük taşıyıcılarının (elektron-boşluk) ısıl uyarılma yolu ile serbest kalması ve ardından bu yük taşıyıcılarının denge durumlarına dönerken görünür bölgede ışık yayımlanması olarak tanımlanabilir. Termolüminesans olaya dayanan analiz teknikleri, radyasyon dozimetrisi, arkeolojik tarihlendirme, katı hal fiziği uygulamaları, malzeme bilimi, optik ve elektronik gibi birçok bilimsel ve teknolojik alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, TL özellik gösteren kristallere nadir toprak elementleri (NTE) ilave edildiğinde, TL özelliklerinde olumlu değişiklikler meydana gelebilmektedir. NTE katkı iyonları ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ , vb...) kristal yapıda mevcut olan tuzak konsantrasyonlarını etkileyebilmekte veya yeni tuzak seviyeleri meydana getirebilmektedir. Bu değişiklikler, kristale yeni ve teknolojik uygulama alanlarına sahip bazı optoelektronik özellikler kazandırabilmektedir. NTE ile katkılandırılmış malzemelerin çevre dostu olmaları, düşük maliyetleri ve yüksek performansla sahip olmaları, teknolojik araçların geliştirilmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Savunma sanayisinde, elektrikli araçlarda, LCD (Liquid Crystal Display) ekranlarda, beyaz ışık teknolojisinde, radyasyon dozimetri malzemelerinin geliştirilmesinde ve daha birçok teknolojik ve endüstriyel alanda NTE kullanımı yaygındır. Türkiye, NTE rezervleri açısından dünyanın önde gelen ilk beş ülkesi içinde yer almaktadır (**U.S. Geological Survey, 2023**). Türkiye'nin En büyük NTE proje sahası, 694 milyon tonluk rezerv ile Eskişehir-Beylikova bölgesidir (**Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020**). NTE rezervlerinin işletilmesiyle kullanıma hazır hale gelecek olan NTE'nin, ülke kalkınmasına çok önemli katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, NTE ile katkılandırılmış ışıldar malzemelerin bazı yapısal karakteristiklerini ve dozimetrik özelliklerini TL analiz tekniğiyle inceleyerek, literatürde yer alan bu konu ile ilgili çalışmalara katkıda bulunmaktır.

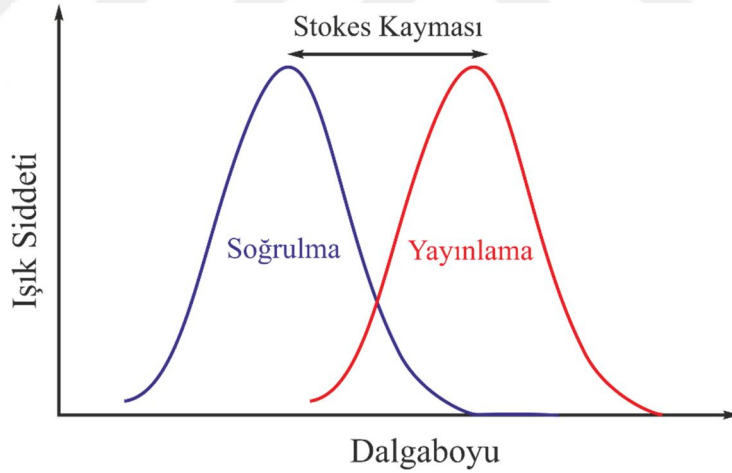
Bu tez çalışmasında,  $Sr_3Al_2O_6:Eu^{3+}, Ho^{3+}$ ,  $Sr_{2.99}Ba_{0.01}Al_2O_6:Eu^{3+}, Ho^{3+}$ ,  $Sr_{2.99}Mg_{0.01}Al_2O_6:Eu^{3+}, Ho^{3+}$ ,  $Ba_3Al_8O_{15}:Eu^{3+}, Dy^{3+}$ ,  $Ca_3Al_8O_{15}:Eu^{3+}, Dy^{3+}$ ,  $Mg_3Al_8O_{15}:Eu^{3+}, Dy^{3+}$ ,  $Sr_{1.25}Eu_{0.5}Dy_{0.25}SiO_5$ ,  $Sr_{1.25}Eu_{0.5}Dy_{0.25}SiO_5$ ,  $Mg_{1.25}Eu_{0.5}Dy_{0.25}SiO_5$  gibi NTE ilave edilmiş bazı alüminat ve silikat bazlı ışıldar (fosfor) malzemelerin TL özellikleri incelenmiştir. Bu numuneler, yüksek sıcaklıkta katı hal reaksiyonu metoduyla üretilmişlerdir. Numune sentezine ait ayrıntılar, DTA/TG, X-ışını kırınım ve fotoluminesans (PL) ölçüm sonuçları daha önceki çalışmalarda rapor edilmiştir (**Öztürk, 2016a, 2016b, 2017**).

## 1.1 Lüminesans

Lüminesans (ışıldama) terimi “Lüminescenz” olarak ilk defa 1888 yılında Alman fizikçi ve bilim tarihçisi Eilhardt Wiedemann tarafından, sıcaklık artışıyla meydana gelmeyen tüm ışık olaylarını tanımlamak için kullanılmıştır. Lüminesans, Wiedemann’a göre, akkor haline getirilen malzemedan yayılan ışık tayflarından farklı olarak, malzemenin ısıya maruz kalmadan soğuk ışığa yapabilme yeteneğidir (**E. Wiedemann, 1889; Wiedemann, 1888**). Bin yılı aşkın bir süredir bilinen bu olguya ilk olarak eski Çin literatüründe rastlanmıştır. Eski Çin kaynaklarında, özel bir tür inci kabuğu kullanılarak hazırlanan boyalar ile yapılan resimlerin, karanlıkta parladığından söz edilmektedir (**Harvey, 1957**). Ayrıca, birçok doğa olayında da lüminesans yayımlanmayı gözlemlemek mümkündür. Lüminesans yayımlanmanın arkasındaki fiziksel mekanizmanın henüz teorik olarak açıklanamadığı bu dönemlerde, kutup ışıklarından deniz canlılarına, deniz yosunlarından ağaç köklerine kadar canlı ve cansız birçok varlıkta gözlemlenen zayıf ışıklar, bilim dünyasının ilgisini çekmiştir (**Vij, 1998**).

Diğer taraftan, 1603 yılında keşfedilen ilk lüminesans madde Bologna Taşı olarak kabul edilmektedir. Meraklı bir ayakkabıcı ve kısmi zamanlı alşimist (simyacı) olan Vincentinus Cascariolo, Bologna şehri yakınlarındaki Monte Paderno kasabasında çıktığı bir yürüyüş sırasında ilgisini çeken bazı ağır taşları toplamış ve daha sonra bu taşları kömür ocağında kalsine etmiştir. Kalsine edilen bu taşların ışığa maruz kaldıktan sonra karanlıkta parladıklarını gözlemlemiştir. Böylece ilk yapay inorganik “ışıldar” terimi 17. yüzyılda Bolognalı Casciarolo tarafından kullanılmıştır (**Harvey, 1957**). Ancak, bu önemli taşı bulan kişinin keşfini tam açıklayamadan hayatını kaybetmesiyle birlikte, taşın ışıldama özelliğine sahip olabilmesi için hazırlanma

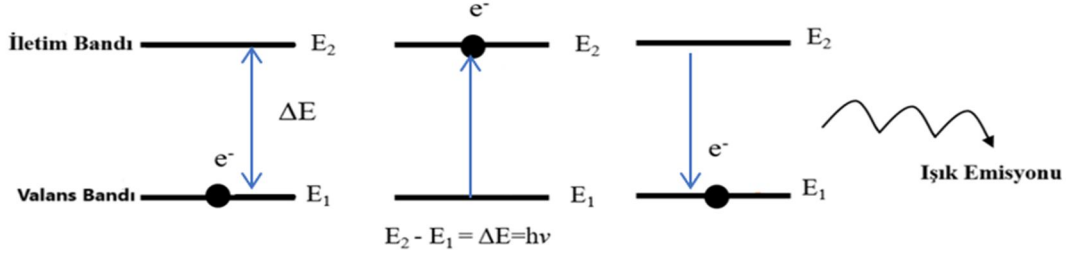
süreci bir sır olarak kalmıştır. 1642 yılında Pietro Poterino taşın nasıl ışıldar hale geleceğini tüm ayrıntıları ile açıklamıştır (Serra ve Paltrinieri, 2016). Bologna taşı üzerine yapılan çalışmalar, kalsine edilen Bologna taşının baryum sülfat içerdiğini göstermiştir. Bologna taşında gözlemlenen ışıldama, kömür ile indirgenen baryum sülfatın ( $BaSO_4 + 2C \rightarrow BaS + 2CO_2$ ), iyi bir ışıldar malzeme olan baryum sülfite dönüşmesi ile ortaya çıkmaktadır (Blanc ve diğerleri, 2023). Lüminesans olgusuyla ilgili ilk kapsamlı araştırmaların, 17. Yüzyılın başlarından itibaren yapıldığı ve yayımlandığı bilinmektedir (Hölsä, 2009). Işıldar (phosphor) kelimesi ise Yunanca “ışık taşıyıcı” (Phos “ışık” + Phoros “getiren”) anlamına gelmektedir ve ışıldar veya lüminesans malzemeleri tanımlamak için kullanılmaktadır (Farnau, 1913; Murthy ve Virk, 2013). Lüminesans yayımlanma, ışığın (uyarıcı ışık) madde tarafından soğurulması ve uyarıcı ışığın dalga boyundan farklı bir dalga boyunda ışığın yayımlanması olayıdır. Bu mekanizma Stokes Yasası olarak bilinmektedir (Stokes, 1854). Stokes yasası, kristalin yayımladığı lüminesans yayımlanmanın dalga boyunun, soğurduğu radyasyonun dalga boyundan daha büyük olacağını ifade eder (bkz. Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Stokes Kanunu ve ışımaya şiddeti (McKeever, 1985).

Lüminesans olay; bir malzemenin çevresinde bulunan enerji kaynaklarından enerji soğurması ve bunu fotonlar şeklinde yayması olarak ifade edilmektedir. Yayımlanan ışımının dalga boyu, soğurulan radyasyonun enerjisinden bağımsız, fakat yayımlanan malzemenin cinsine bağlıdır (bkz. Şekil 1.2) (Chen ve McKeever, 1997; McKeever, 1985).

Lüminesans yayımlanma, uyarılmaya neden olan dış enerji kaynağına bağlı olarak isimlendirilebilmektedir (bkz. Şekil 1.3);



**Şekil 1.2:** Lüminesans Olay.

**Fotolüminesans:** Bir maddenin *foton* soğurması sonucu ışık yaymasıdır. Bu olay genellikle floresans ve fosforesans olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Floresans ışıltamada, malzeme, uyarılmayı takiben  $10^{-8}s$  içerisinde ışık yaymaya başlar ve uyarıcının ortadan kaldırılmasının ardından saniyeler içerisinde ışığın yayımlanması tamamlanır. Fosforesans ışıltamada ise uyarılma ortadan kalktıktan günler sonra bile ışıltama devam edebilir.

**Elektrolüminesans:** Kristalin, bir dış elektrik alan kullanılarak uyarılması neticesinde ışıltaması olayıdır. Son zamanlarda W-Led teknolojilerinde gündeme gelen elektrolüminesans ışıltama birçok teknolojik cihazda kullanılmaktadır.

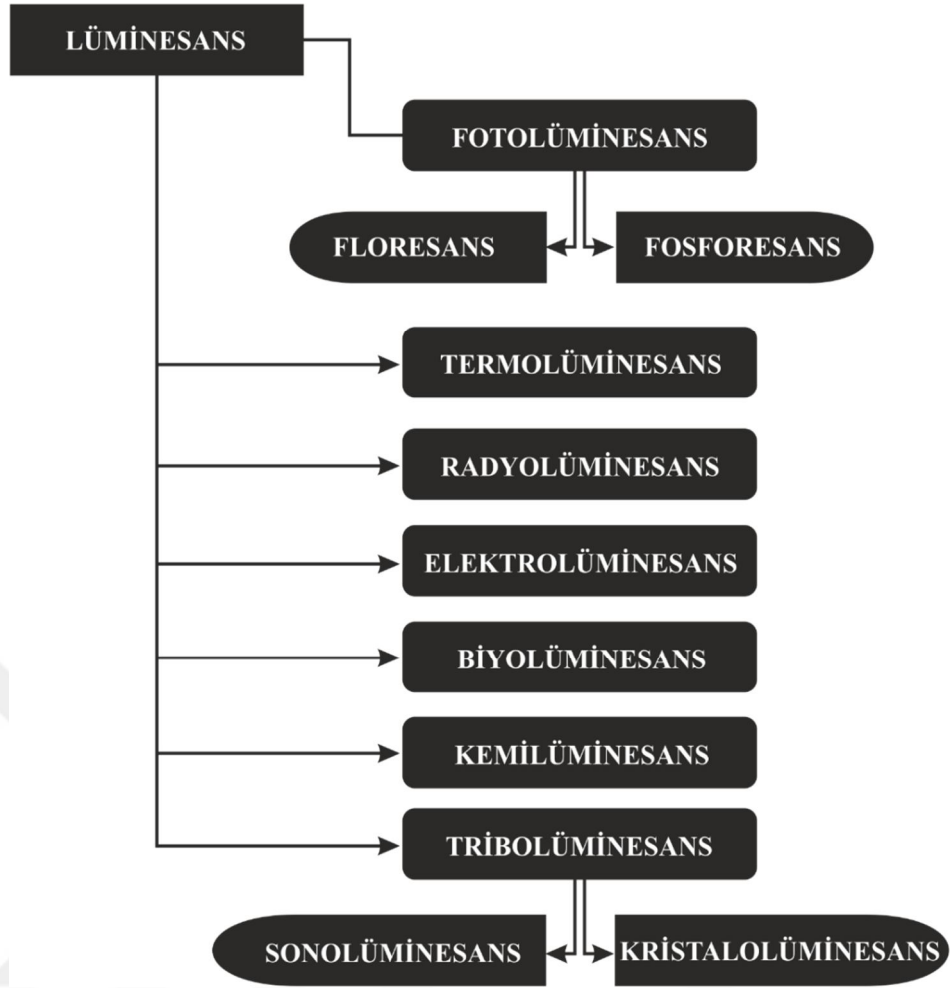
**Tribolüminesans:** Mekanik bir kuvvetin (sıkıştırma, çizilme vb.) etkisiyle ışıltama olarak bilinir.

**Kemilüminesans:** Kimyasal bir reaksiyon ile malzemenin ışıltama yapabilme kabiliyetidir. Kimyasal bir reaksiyon sonucu, reaksiyondan çıkan bazı ürünlerin elektronik olarak uyarılmış durumda oluştuğu ve daha sonra foton yayımlayarak temel duruma geçmeleri olarak özetlenebilir. Özellikle biyolojik sistemlerde *biyolüminesans* olarak adlandırılan bu olay, ateşböcekleri ve deniz organizmalarında görülür.

**Radvolüminesans:** Bir maddenin iyonlaştırıcı radyasyona (örneğin, X-ışınları, alfa, beta veya gama ışınları) maruz kalması sonucunda ışık yaymasıdır.

**Termolüminesans:** Önceden iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmış bir kristalin, ısıtıldığında ışımaya başlaması olarak bilinir. Kristalde depolanan enerjinin, ısı enerjisi yardımı ile serbest kalmasıdır. Uygulama alanları oldukça yaygındır; örneğin arkeolojik tarihlendirme, radyasyon dozimetresi ve malzeme karakterizasyonu gibi alanlarda TL olaydan faydalanılmaktadır.

Lüminesans yayımlanma, malzemelerin uyarılma mekanizmalarına göre isimlendirilir. Bunlar Çizelge 1.1 :’de özetlenmiştir.



**Şekil 1.3:** Lüminesans yayımlanma çeşitleri.

**Çizelge 1.1 :** Lüminesans türleri (McKeever, 1985)

Lüminesans Tipi	Maddenin Uyarılma Türü
Fotolüminesans (floresans/ fosforesans)	Işığın absorpsiyonu
Radyolüminesans	İyonize radyasyon (X - ışınları, alfa, beta, gama)
Katodoluminesans	Katot ışınları (elektron demeti)
Elektrolüminesans	Elektrik alan
Termolüminesans	Isıl uyarım
Kemilüminesans	Kimyasal reaksiyon
Biyolüminesans	Biyokimyasal reaksiyon (canlı ortamda)
Tribolüminesans	Sürtünme ve elektrostatik kuvvetler
Sonolüminesans	Ultrases
Galvanolüminesans	Işık emisyonuna bir elektrik akımının eşlik etmesiyle
Kristalolüminesans	Işığın emisyonuna bazı kristallerin kristalizasyonla eşlik etmesi

Optik ve aydınlatma teknolojilerinin bir uygulaması olarak, lüminesans özellikli camlar, enerji verimliliğinin yüksek olması, çevre dostu ve uygun maliyetli olmalarından dolayı ışıldar malzeme olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Bu malzemelerin özellikle evropiyum, samaryum, terbiyum, seryum ve manganez gibi NTE ile katkılandırılmaları neticesinde yüksek verimli ışıldar malzemelerin elde edilebildiği bilinmektedir (**Blanc ve diğerleri, 2023**).

### 1.1.1 Fotolüminesans (Floresans ve Fosforesans)

Floresans ve fosforesans ışıldama, malzemenin elektromanyetik radyasyona verdiği tepki süresine göre birbirinden ayrılır. Floresans ışıldama, uyarılmış durumdaki bir elektronun temel duruma geçişi sırasında spin değerinde bir değişim olmadığında gözlemlenir. Buradaki elektronik geçişler izinli ve spin değişikliği gerektirmeden meydana gelir. Işığın soğurulması ve yayımlanması hemen hemen eş zamanlıdır. Bundan dolayı floresans, neredeyse bu iki olayın aynı anda gerçekleşmesi ile oluşan bir süreç olarak tanımlanır. Elektronların geçişleri spin-izinli geçişler olduğu için floresans olayı oldukça hızlı oluşur ve bu tür geçişlerden sorumlu uyarılmış durumların ortalama ömürleri genellikle  $10^{-8}$  saniyeden daha kısadır (**Murthy ve Virk, 2013**).

Eğer elektronun iki enerji seviyesi arasındaki geçişi sırasında spini değişir ise uyarılmış durumdan temel duruma geçiş daha yavaş olur (**McKeever, 1985**). Bu durum, fosforesans ışıldama olarak adlandırılır. Farklı spin değerlerine sahip durumlar arasında gerçekleşen elektronik geçişler genellikle “spin-yasaklı”dır ve daha nadir gözlemlenirler. Ancak, spin-yörünge etkileşmesinin artmasıyla spin-yasaklı geçişlerin oranı da artar (**McKeever, 1985**).

Floresans malzemelerde, uyarılmanın ardından genellikle  $t < 10^{-8}$  saniye içerisinde kısa süreli ışıldama gözlemlenirken, fosforesans malzemelerde  $t > 10^{-8}$  saniyelik daha uzun süreli bir ışıldama gözlemlenir. Dikkat edilirse, lüminesans, gerek floresans gerekse fosforesans yayımlanma, atomların yörüngelerindeki elektronik geçişler ile ilgilidir. Bu nedenle, çalışmamızın bu kısmında, elektronların geçişleri ile ilgili bazı temel fiziksel ilkelerden söz etmek faydalı olacaktır.

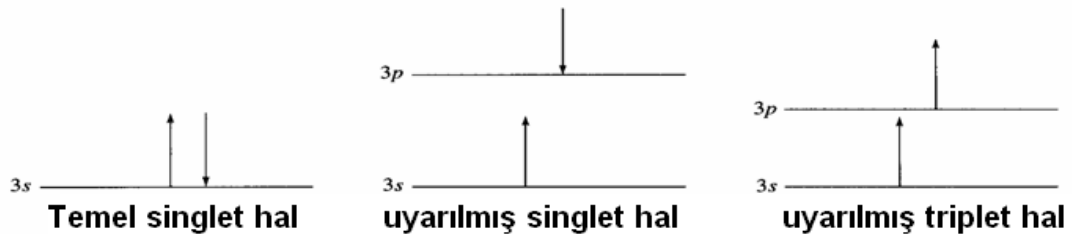
Burada söz edilecek ilk ilke elektronların yörüngelere yerleşme düzenini açıklayan Pauli dışlama ilkesidir (Pauli’s Exclusion Principle). Wolfgang Pauli tarafından 1925 yılında ortaya atılan Pauli dışlama ilkesi, kuantum mekaniğinin temel ilkelerinden birisidir. Bu ilke sadece, elektron gibi yarı-m-tam sayı spinli parçacıklar (fermionlar)

için geçerlidir ve atomların yapısını anlamamızda kritik bir rol oynar. Bu ilkeye göre, bir yörüngede bulunan iki elektronun spinleri eşleşerek zıt yönlerde yönelir, yani elektronların spinleri anti paralel olur. Spin çiftlenmesi olarak da bilinen bu durumda, yörüngedeki elektronların net spin kuantum sayısı sıfır olur (**Pauli, 1994**). Bu durum temel singlet (tekli) hal olarak adlandırılır. Molekülde, yörüngedeki elektronlardan biri dışarıdan soğurduğu enerji ile bir üst enerji seviyesine uyarılabilir. Burada uyarılmış elektron spinini muhafaza eder ve temel durumdaki haliyle aynı kalır. Böylece uyarılmış singlet hal oluşmuş olur (bkz. Şekil 1.4). Pauli dışlama ilkesine göre, singlet durumdaki uyarılmış elektron floresans ışına yoluyla temel haldeki esas yörüngesine geri dönebilir. Diğer taraftan, eğer bir elektron temel halden uyarılırken spini değişir ise, yeni spini artık temel durumda kalan diğer elektronunkiyle aynı olur (bkz. Şekil 1.4). Bu durum triplet hal olarak adlandırılır ve uyarılmış elektronun spininin, temel durumda kalan eşleşmemiş elektronun spini ile paralel olduğu anlamına gelmektedir (**Darvell, 2018**).

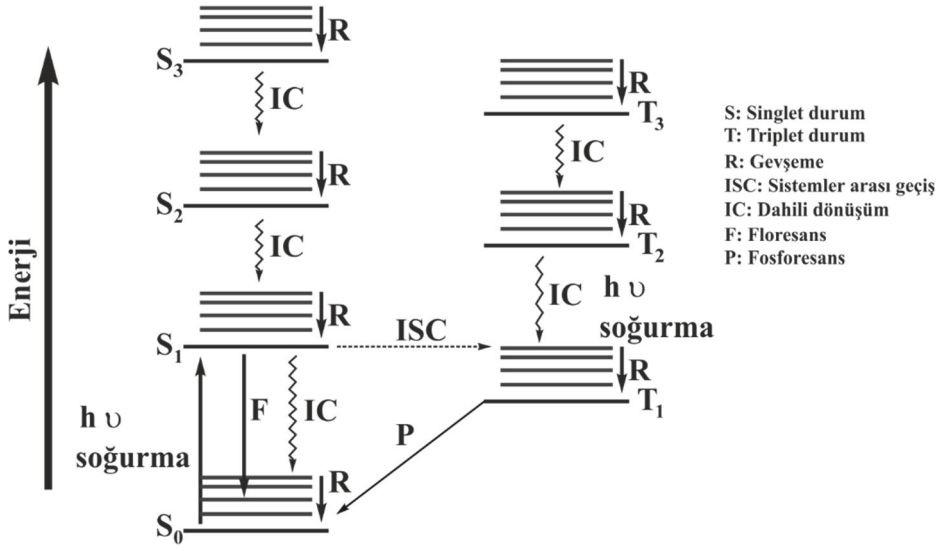
Fotoluminesans olayı açıklamak için Jablonski diyagramını kullanmak oldukça yaygındır. Bu diyagram, hem ışınımlı hem de ışınımsız geçişlerin, enerji seviyeleri üzerinde gösterilmesiyle elde edilmektedir. Ayrıca molekül içerisinde elektronik durumları, frekans düzeylerini ve enerji seviyeleri arasındaki geçiş trafiğini gösteren bir diyagramdır. Elektronik durumlar;

- spinin değerine göre yatay geçişli,
- enerjilerine göre dikey geçişli

olarak gruplandırılarak gösterilmektedir (**Jablonski, 1933**). Jablonski diyagramında ışımali geçişlerin (floresans ve fosforesans) yanı sıra ışınımsız geçişler de (titreşimsel, iç dönüşüm ve sistemler arası geçiş gibi...) görselleştirilebilir (bkz. Şekil 1.5).



**Şekil 1.4:** Temel durum ve uyarılmış durum elektron spin gösterimleri (**Darvell, 2018**).



Şekil 1.5: Örnek bir Jablonski diyagramı (George ve diğerleri, 2014)

Elektromanyetik radyasyonun kristal içerisinde soğurulması yaklaşık olarak  $10^{-15}$  saniyede gerçekleşmektedir. Bunu takip eden süreçte meydana gelen ışınımsız geçişler şunlardır;

- **Titreşimsel gevşeme** (vibrational transition): Uyarılmış bir elektronun titreşim enerjisinin bir kısmını aynı veya farklı bir moleküldeki başka bir elektrona kinetik enerji şeklinde vermesidir. Böylece, uyarılmış iyonlar en düşük elektronik titreşim seviyesine kadar kinetik enerji kaybeder. Bu süreç yaklaşık olarak  $10^{-12}$  ile  $10^{-10}$  saniye gibi bir zaman aralığında meydana gelmektedir (Mitrić, 2022). Bu durum, Jablonski diyagramında titreşim seviyeleri arasında eğri bir ok olarak gösterilir.
- **Dahili dönüşüm** (internal conversion): Yüksek enerjili singlet veya triplet halden, daha düşük enerjili bir singlet veya triplet seviyesine ışınımsız geçiş meydana gelmektedir. Burada geçişler, aynı spin büyüklüklerinin olduğu seviyeler arasında meydana gelir. Bu içsel dönüşüm yaklaşık olarak  $10^{-11}$  ile  $10^{-9}$  saniye gibi bir zaman aralığında gerçekleşmektedir (Albani, 2008).
- **Sistemler arası geçiş** (inter-system crossing): Her uyarılmış S durumu için, daha düşük enerjili bir uyarılmış T durumu vardır. Eğer uyarılmış S durumundaki bir elektronun spini, temel singlet durumundaki elektronun spini ile paralel ise bu durumda, bu elektronun temel singlet duruma dönüşü “yasaklı” hale gelir. Böylece elektron, S seviyelerinden T seviyelerine geçiş yapabilir. Bu süreç, yaklaşık  $10^{-10}$  ile  $10^{-8}$  saniye gibi bir zaman aralığında meydana gelmektedir.

Işınımlı geçişlerde, ilk ve son durumda elektronik seviyeler arası spin değişmediğinden bu geçişler izinlidir ve  $S_1$ 'den  $S_0$ 'a elektron geçişinde floresans ışınımına meydana gelir. Buradaki geçişler izinli olduğundan floresans olay çok hızlı şekilde meydana gelmektedir. Triplet durum  $T_1$ 'den singlet durum  $S_0$ 'a geçişte yayımlanan ışınım ise fosforesanstır ve ışınımın gerçekleşmesi uzun zaman alabilir.

Fosforesans ışıldama, kısa ve uzun ömürlü olarak iki kısımda incelenmektedir. Eğer ışıldamanın yarı ömrü ( $\tau_c$ ),  $10^{-4}$  s'den kısa ( $\tau_c < 10^{-4}$ ) ise kısa süreli fosforesans, eğer ışıldamanın yarı ömrü  $10^{-4}$  s'ye eşit veya daha uzun ise ( $\tau_c \geq 10^{-4}$ ) uzun süreli fosforesans olarak adlandırılmaktadır (bkz. Şekil 1.6). TL ışıldamaya konu olan malzemeler için bu süre dakikalar ve hatta yıllar ( $\approx 10^9$  yıl) olabilmektedir. TL olay sırasında incelenen ışıldama, uzun süreli fosforesans ışıldama sınıfına dâhil edilmektedir (Murthy ve Virk, 2013).  $\tau_c$  malzemeye has bir özelliktir ve lüminesans yayımlanmanın gecikmesi, yarı kararlı enerji düzeylerinde elektronların tuzaklanmış olmasından kaynaklanmaktadır.

Son yıllarda yeni lüminesans malzeme üretmek için yapılan araştırmalar iki ana başlık altında yoğunlaşmıştır; matris malzeme seçimi ve katkı iyonlarının (geçiş metal iyonları veya lantanit iyonları) seçimidir. Özellikle yayımlama (emisyon) spektrumlarının verimliliği açısından NTE katkılı ışıldar malzemeler tercih edilmektedir. Böylece yayımlanan ışıldamanın süresi uzatılabilmektedir. Işıldamanın yarı ömrü, Arrhenius denklemine göre, denklem (1.1):

$$\tau_c = s^{-1} \exp(E / kT) \quad (1.1)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada;

$\tau_c$  : ortalama ömür (elektronun tuzakta geçirdiği süre)

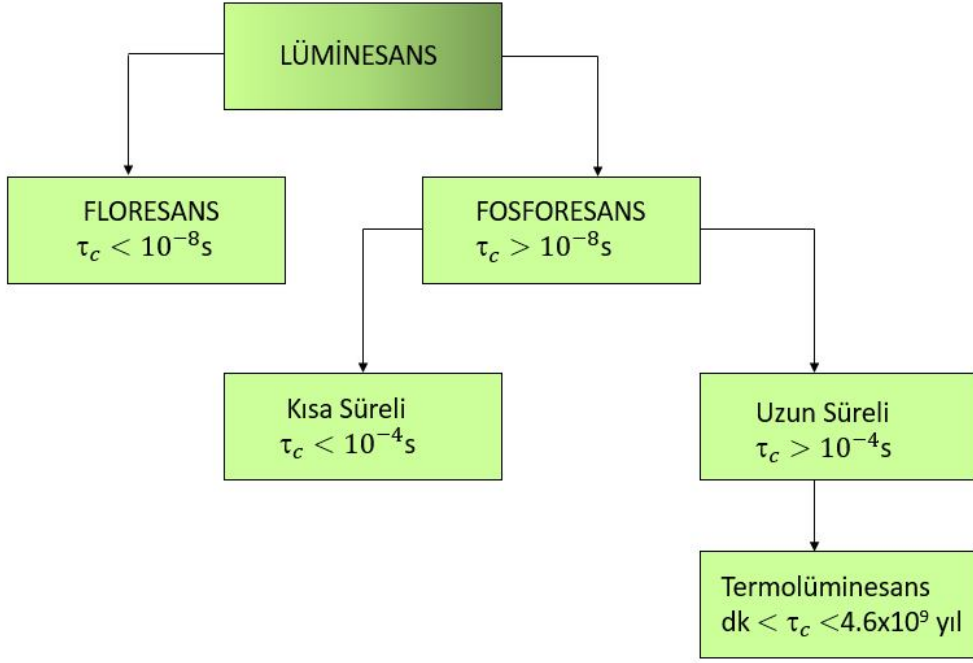
$s$  : frekans faktörü ( $s^{-1}$ ),

$E$  : termal aktivasyon enerjisi (eV). (Tuzak derinliği olarak da ifade edilir.)

$k$  : Boltzmann sabiti ( $eVK^{-1}$ )

$T$  : lüminesans olayın gerçekleşeceği sıcaklıktır (K).

Denklemden, fosforesans ışıldama süresinin T sıcaklığına üstel olarak bağlı olduğu görülmektedir.



**Şekil 1.6:** Işıldama süresine ( $\tau_c$ ) göre fosforesans olayının sınıflandırılması (McKeever, 1985).

## 1.2 Termolüminesans

Termolüminesans olay, yalıtkan ya da yarıiletken bir maddenin iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında enerji depolaması, ardından bu maddenin ısıya maruz kaldığında ise depolanan enerjinin ışıldama olarak yayımlanmasıdır. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan madde, serbest yük taşıyıcıların (elektron ve boşluk) tuzaklar tarafından yakalanması ile enerji depolamış olur. Daha sonra, malzeme kontrollü olarak ısıtıldığında tuzaklara yakalanan yük taşıyıcılar serbest kalır ve malzemeden görünür bölgede veya görünür bölge yakınlarında ışık yayımlanır. Bu bağlamda TL olay, maddenin enerjiyle etkileşim biçimini anlamamıza katkı sağlayan bir süreçtir.

17. yüzyılda yaşamış olan Boyle, 27 Ekim 1663'te kaydettiği "Observations upon a diamond that would shine remarkably, in the dark." başlıklı gözleminde, önceden ısıtılan elmasın karanlık bir odada ışımaya yaptığını rapor etmiştir (Boyle, 1664). Yaptığı bu gözlemlerle, çürümüş odun, balık ya da Bolonya taşı gibi maddelerin doğal ışımaya maruz kalmasından veya maddelerin tahribatı sonucu açığa çıkan ışımaya farklı olarak; uygun bir maddeye küçük bir mekanik işlem uygulandığında, ışığın üretilebileceğini gözlemlemiştir. Elmas gibi değerli taşların ışık yaymaları, bilim dünyasında ilgi çeken bir alan haline geldiğinden, Boyle'nin şahit olduğu olay, TL mekanizmasının anlaşılmasında ve bu olgunun bilimsel açıdan derinlemesine araştırılmasında öncü bir

adım olmuştur. Bu gözlemler, enerjiyi depolayan ve gerektiğinde serbest bırakan kristaller üzerine yapılan modern çalışmalara da temel oluşturmuştur (**Harvey, 1957**).

Diğer taraftan TL ışılda, siyah cisim ışımasından tamamen farklı fiziksel mekanizmalara dayanmaktadır. Planck yasasına göre ısınan cisim sıcaklık ile doğrudan ilişkili olarak elektromanyetik bir ışılda yapar. Bu olay siyah cisim ışıması olarak adlandırılır. Sıcaklığın artmasıyla salınan ışımaların dalga boyları da değişmektedir. Düşük sıcaklıklarda, elektromanyetik spektrumda daha düşük enerjili ışımalar gözlemlenirken, yüksek sıcaklıklarda daha yüksek enerjili ışımalar gözlemlenmektedir. Oysa TL olay, iyonlaştırıcı radyasyon gibi bir dış enerji kaynağının etkisiyle oluşmaktadır. Maddenin önce dışarıdan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalması ve bu enerjiyi depolaması gerekmektedir. Daha sonra bu enerji ısı yardımı ile serbest bırakılır.

Termolüminesans olay en iyi kristal formundaki maddelerde gözlemlenebilir. Kristal yapıya sahip olan malzemenin geçmişten günümüze kadar maruz kaldığı radyasyon miktarı, uygun koşullarda TL olay yardımıyla ölçülebilmektedir. Kısacası TL olay, geçmişin radyasyon izlerini, yayımlanan ışıktan faydalanılarak tayin edebilen fiziksel bir süreçtir. TL malzemelerin ısıtılmasıyla gözlemlenen ışıldamanın şiddeti, sıcaklıkla eş zamanlı olarak ölçülür ve kaydedilir. Termolüminesans ışılda eğrisi olarak adlandırılan bu eğri, kristal kusurlarının veya katkı atomlarının, yük taşıyıcılar için oluşturdukları tuzak seviyeleri ve tuzakların temel parametreleri hakkında bilgi verir. Örneğin lüminesans merkezlerinin enerji seviyelerinin belirlenebilmesi için malzemenin TL ışılda eğrileri incelenebilir. Bunun yanı sıra yarıiletken veya yalıtkan malzemelerin kusurları hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak istenirse TL tekniğinin yanında fotolüminesans (PL) deneyleri veya elektron spin rezonans (ESR) ölçümleri gibi farklı birçok teknik uygulanabilir (**Yazıcı, 1996**).

Termolüminesans özellik gösteren malzemeler, kristal formundadırlar ve iletim bandı ile değerlik bandı birbirleri ile örtüşmemektedir. Bir başka ifade ile kristal, yalıtkan veya yarıiletkendir. Yalıtkan ve yarıiletken malzemelerde enerji-bant diyagramları, iyonlaşmış elektronların, enerji seviyeleri arasındaki geçişlerinin ve bu geçişlerin ışık yayılımıyla ilişkisinin anlaşılmasında faydalıdır. Kristal formunda bulunan yalıtkan veya yarıiletkenlerde enerji-bant diyagramı, bir maddeyi oluşturan atom ve moleküllerin enerji seviyelerini ve bu seviyeler arasında yük taşıyıcı geçişlerini görselleştiren diyagramlardır (**Daniels, 1953**). Mükemmel saflıktaki ve kusursuz

yapıdaki kristaller için enerji-bant diyagramı, değerlik bandı, iletkenlik bandı ve bu bantlar arasında kalan yasak bant bölgesinden oluşur. Bir yük taşıyıcının değerlik bandından iletim bandına geçebilmesi için belli bir enerjiye sahip olması gerekir. Bu enerjinin büyüklüğü, iki seviye arasında bulunan bant boşluğu olarak da bilinen yasak enerji bant aralığına eşit veya ondan büyük olmalıdır.

Hiçbir kristal kusuru bulunmayan ve katkılanılmamış yarıiletken veya yalıtkanlarda, elektronların enerji seviyeleri yasak enerji bölgesinde olamaz. Ancak, gerçek bir kristal yapıda örgü kusurları bulunmaktadır. Bu kusurlar yasak enerji bant aralığında yeni elektron enerji seviyelerinin oluşmasına sebep olur. Bu yeni enerji seviyeleri literatürde yük taşıyıcı kusurlar olarak tanımlanır. Isı yoluyla veya iyonlaştırıcı radyasyon gibi etkenler ile kristal örgüdeki atomlar arası kimyasal bağlar kopabilir ve bu bağlardaki elektronlar serbest kalabilir. Bu elektronlar, sahip oldukları enerji ile değerlik bandından iletim bandına geçerler ve arkalarında bir boşluk bırakırlar. Bu süreç elektron-boşluk çiftlerinin oluşumu olarak adlandırılır. Sürecin tam tersi meydana gelirse, buna da yeniden birleşme diğer bir deyişle elektron-boşluk çiftinin rekombinasyonu adı verilir. Yasak enerji aralığında oluşan tuzak enerji seviyelerinin konsantrasyonunu, konumunu, derinliğini ve meydana gelen yük taşıyıcı geçiş trafiğini anlamak için birçok model ileri sürülmüştür (**Chen ve McKeever, 1997; Furetta, 2010; McKeever, 1985; McKeever ve Chen, 1997**).

### 1.3 Literatür Araştırması

İlk yapay ışıldarın, BaS, 1604 yılında sentezlenmesinin ardından yapay ışıldar malzeme araştırmaları yeni TL dozimetre uygulamaları için gün geçtikçe daha da ön plana çıkmıştır (**Ray, 1991**). 1980'li yıllara kadar, TL araştırmalarının genellikle yeni ve dozimetrik amaçlarla kullanılabilir malzemelerin sentezi üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Örneğin, Mieke ve Nink, Mg ve Ti ile katkılanılmış LiF:Ti ve LiF:Mg örneklerinin TL ışıldama eğrilerini incelemişler ve aralarındaki bazı farklılıkları ortaya koymuşlardır. LiF:Ti numunesi için 120°C ve 170°C'de iki ışıldama pikinin gözlemlendiği, ancak LiF:Mg, Ti katkılanmış örneklerde ise beş farklı ışıldama pikinin gözlemlendiği bildirilmiştir. Bununla birlikte, 120°C'deki ışıma pikinin hızla sönmüldüğü, 170°C'deki ışıldama pikinin ise dozimetri uygulamaları için daha uygun olduğu belirtilmiştir. En dikkat çekici fark ise LiF:Ti'nin ışıldama eğrisinin LiF:Mg, Ti'ye kıyasla yaklaşık üç kat daha şiddetli olmasıdır (**Mieke ve**

**Nink, 1979).** Bu çalışmalar Harshaw Chemical Co. Tarafından geliştirilerek, LiF kristali üzerinde yapılan araştırmalar neticesinde TLD-100 gibi ürünler ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle Mg ve Ti ile katkılanmış LiF kristalinden üretilen TL dozimetrelerin (TLD) pratik uygulamaları bilim dünyasında oldukça önem kazanmıştır. LiF(Mg, Cu, P), LiF(Mg, Cu, B) ve LiF(Mg, Cu, Si) ışıldar bileşikleri üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle LiF(Mg, Cu, P) Harshaw TLD-100 dozimetrisi olan LiF ışıldarına göre hassasiyetinin 23-25 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir (**Da-Ke ve diğerleri, 1984; Nakajima ve diğerleri, 1978; Shoushan ve diğerleri, 1986).** Sun ve arkadaşları, farklı yöntemler ile sentezlenmiş LiF(Mg, Cu, P) kristalinin ışıldama eğrileri üzerindeki farklılıkları incelemişler ve pik şiddetlerinin kristalin üretim süreçlerine bağlı olarak değiştiğini bildirmişlerdir. Ayrıca tavlama sürecinin bazı piklerin gözden kaybolmasına neden olduğu bildirilmiştir (**Sun ve diğerleri, 1988).**

Radyasyon dozimetrisi alanındaki geniş uygulama potansiyellerinin keşfedilmesinin ardından alkali toprak elementlerine olan ilgi de artmıştır. Özellikle, Dy katkılı CaSO<sub>4</sub>, daha yüksek lüminesans verimlilikleri ve duyarlılıkları sebebiyle TL dozimetrisinde giderek daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. CaSO<sub>4</sub> yüksek radyasyon hassasiyeti nedeniyle TLD uygulamaları için yaygın olarak tercih edilen bir ışıldardır. Literatürde, CaSO<sub>4</sub>'ün NTE ile katkılandırılması ile elde edilen bileşiklerinin lüminesans özelliklerinin incelendiği birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Örneğin, Dy katkılı CaSO<sub>4</sub> ışıldarı, Na<sup>+</sup> gibi yük dengeleyici iyon ile katkılandığında, bu katkının CaSO<sub>4</sub> ışıldarındaki Dy<sup>3+</sup> iyonlarının TL, PL ve elektrolüminesans (EL) özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır ve ek olarak, Dy<sup>3+</sup> iyonlarının CaSO<sub>4</sub>'ün ışıldama eğrisi üzerindeki karakteristik etkileri bildirilmiştir (**Mulla ve Pawar, 1984).**

**Dhopte ve diğerleri (1991)** Eu'nun CaSO<sub>4</sub>'ün ışıldama eğrisi üzerindeki rolünü araştırmışlar ve Eu<sup>3+</sup> ve Eu<sup>2+</sup> katkısının UV ve gamma ışını kaynaklı TL ışıldama süreçlerinde kritik bir rol oynadığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte, **Dhopte ve diğerleri (1991)** CaSO<sub>4</sub>:Eu ışıldarının UV ve RPL (ışıkla yeniden aydınlatma) dozimetrisi için doğrusal doz-yanıt karakteristiği gösterdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, çeşitli yöntemlerle hazırlanan CaSO<sub>4</sub>:Eu ışıldarlarının ışıldama eğrilerini incelemişler ve farklı sentezlenme mekanizmalarının ışıldama eğrisini etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Yaygın olarak kullanılan bir diğer TL dozimetri malzemesi, tungstat ve bileşikleridir. **Born ve diğerleri (1970)**, çeşitli tungstat bileşiklerinde gözlemlenen ışıldamanın sönümlenme sürelerini, lüminesans verimlerinin ortam sıcaklığına bağımlılığını, yayımlanan ışığın spektral bileşimini ve TL ışıldama eğrisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, tüm lüminesans özellikleri açıklayan, birleşik bir lüminesans modeli ileri sürmüşlerdir. Yazarlar ayrıca saf ve  $10^{-3}\%$  Sm,  $10^{-3}\%$  Pb,  $10^{-4}\%$  Pb katkılı tek kristal  $\text{CaWO}_4$ 'ün luminesans ve TL özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmalarında, tungstatlarda gözlemlenen doğal luminesansın bu katkıların yapılması ile gözden kaybolduğunu bildirmişlerdir (**Born ve diğerleri, 1970**).

Diğer taraftan, lantanit serisindeki on üç iyonun tümü ile ayrı ayrı katkılanmış  $\text{CaF}_2$ , X-ışınlarına ve  $\gamma$ -ışınlarına maruz bırakılarak TL özellikleri incelenmiştir. NTE ile katkılanmanın,  $\text{CaF}_2$ 'nin ışıldama eğrisinde yeni pik ortaya çıkarmadığı, sadece pik şiddetlerini etkilediği rapor edilmiştir (**Merz ve Pershan, 1967**). Ayrıca, Eu ile katkılanan  $\text{CaF}_2$ 'nin, X-ışınına maruz bırakıldıktan sonra TL özellikleri incelenmiş ve bu kristal yapıya  $\text{Eu}^{2+}$  katkısının, kristalin TL ışıldama eğrisinde 92 K ve 240 K'de iki yeni pik oluşumuna sebep olduğu ileri sürülmüştür. Bu emisyon ek olarak,  $\text{Eu}^{3+}$  iyonlarından kaynaklanan ışıldamaların gözlemlendiği bildirilmiştir (**Ward ve Whippey, 1973**). Bununla birlikte, x-ışını ile ışınlanmış  $\text{CaF}_2:\text{Me}$  (Me: Mn, Co, Ni) tek kristalinin PL ve TL eğrileri analiz edilmiş, ışıldama eğrisinin 5 pik ihtiva ettiği rapor edilmiştir. Gözlemlenen piklerden 4 tanesinin Me iyonlarından kaynaklandığı ileri sürülmüştür (**Alcala ve Alonso, 1979; Alonso ve Alcalá, 1980**).

Diğer taraftan, Cu katkılı çinko sülfür  $\text{ZnS}:\text{Cu}$ , birçok elektronik cihazda, floresan lambalarda, trafik levhalarında, katot ışını tüpleri gibi birçok alanda uzun ışık yayma özelliğiyle tercih edilen önemli ışıldarlardan biri haline gelmiştir. Örneğin,  $\text{CaS}$ ,  $\text{SrS}$ ,  $\text{ZnS}:\text{Cu}$ ,  $\text{ZnS}:\text{Co}$  gibi sülfat bazlı veya NTE katkılı çinko sülfürler birçok araştırmaya konu olmuştur.  $\text{CaS}$  bileşiği, 31 farklı aktivatör ile katkılanarak lüminesans özellikleri incelenmiş ve her bir aktivatörün kendine özgü emisyon piki ürettiği ileri sürülmüştür. Matsuzawa ve arkadaşları, sentezledikleri  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  ışıldarının çok parlak ve uzun süreli yeşil renkli bir ışıldamaya sahip olduğunu ve  $\text{Dy}^{3+}$  iyonunun  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  sistemine yardımcı aktivatör olarak dahil edilmesinin, fosforesans, TL ve fotoiletkenlik özelliklerini etkileyen ana bileşen olduğunu bildirmişlerdir (**Matsuzawa ve diğerleri, 1996**). Burrus ve arkadaşları strontium chlorsilicate (yeşil emisyon), calcium chlorsilicate (mavi emisyon) ve calcium bromsilicate (sarı-yeşil

emisyona) bileşiklerinin lüminesans özelliklerini incelemişler ve yayımlanan ışıltıdanın üretim sürecine hassasiyet ile bağılı olduğunu bildirmişlerdir (**Burrus ve diğlerleri, 1971**).

Diğler taraftan, son yıllarda NTE ile katkılanmış alüminat bazlı ışıltıdarlar, güneş ışığı altında uzun süreli lüminesans özelliğı göstermeleri nedeniyle teknoloji dünyasının ilgisini çekmiştir (**Burrus ve diğlerleri, 1971; Zúñiga-Rivera ve diğlerleri, 2017**). NTE katkılı alüminat ışıltıdarlar, çinko sülfürden yaklaşık olarak 10 kat daha fazla lüminesans verimliliğine sahiptirler, kimyasal kararlılıkları yüksektir ve çevre dostu malzemelerdir (**Kim ve diğlerleri, 2016; Saines ve diğlerleri, 2006**). Ayrıca, UV veya görünür ışık ile uyarılan  $\text{SrAl}_x\text{O}_y:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  ışıltıdarları, ışınlama bittikten sonra 15 saatten fazla fosforesans ışıltıdamaya yaparlar. Bu tür ışıltıdarların en büyük dezavantajı ise, neme karşı duyarlı olmaları ve lüminesans özelliklerinin giderek bozulmasıdır (**Anesh ve diğlerleri, 2014**).  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  ve  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  ile ayrı ayrı katkılanmış stronsiyum alüminat örneklerinin beta radyasyonuna maruz kaldıktan sonraki lüminesans, TL ve IR uyarılı lüminesans özellikleri incelenmiş, Dy ve Nd ile katkılanan örneklerin, zamanla kademeli olarak azalsa da 220 saat sonra bile gözlemlenebilen ışıltıdamaya yaptıkları rapor edilmiştir (**Zúñiga-Rivera ve diğlerleri, 2017**).  $\text{Eu}^{2+}$  ve NTE ( $\text{R}^{3+}$ ) katkılı alüminat ışıltıdarlar ( $\text{MAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+} \text{R}^{3+}$  M = Ca ve Sr) sentezlenerek  $\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  için mavi,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  için ise yeşil renkli fosforesans ışıltıdamalar gözlemlendiğı bildirilmiştir (**Palilla ve diğlerleri, 1968**). Bununla birlikte, son yıllarda,  $\text{Sr}_2\text{Al}_6\text{O}_{11}:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Sr}_5\text{Al}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Sm}^{2+}$  gibi NTE ile katkılanmış stronsiyum alüminatların farklı fazları geliştirilmiştir (**Jiang ve diğlerleri, 2007; Lehmann, 1972; Lin ve diğlerleri, 2001a; Lin ve diğlerleri, 2001b; Matsuzawa ve diğlerleri, 1996**).

Alkali toprak katkılı alüminat ışıltıdarlar, lantanit elementleri ile aktive edildiğinde, gözlemlenen emisyon spektrumları lantanitlerin  $4f - 5d$  geçişlerine dayanmaktadır (**Marin ve Jaque, 2021; Qin ve diğlerleri, 2017**). Özellikle  $\text{Eu}^{2+}$  katkılı üç yüzden fazla inorganik bileşikte, morötesine (UV) yakın bölgeden kırmızıya kadar geniş bir ışık yayımlanma (emisyon) spektrumu gözlenmiştir. Bu durum,  $\text{Eu}^{2+}$  iyonlarının etkili bir aktivatör olarak kullanılabileceğini göstermektedir (**Dorenbos, 2003**).

Alkali toprak alüminatlar arasında bulunan stronsiyum alüminat, NTE için en uygun matris kristallerden biridir (**Sahu ve diğerleri, 2015**). Son on yılda yapılan araştırmalar, NTE ile katkılanan stronsiyum alüminat ve izotoplarına yüksek lüminesans verimlilik ve kimyasal kararlılık özelliklerinin kazandırıldığını ve bu kazanımların bilim dünyasının dikkatini çektiğini göstermektedir (**Anesh ve diğerleri, 2014**). Bu fosforların, NTE ile etkili biçimde bütünleşerek uzun süreli ışımaya yapabilmesi nedeniyle, başta acil durum işaret sistemleri, aydınlatma uygulamaları ve diğer lüminesans cihazları olmak üzere yaygın kullanım alanları bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda katkı iyonlarının, ana kristal bileşenlerin ve katkı malzemelerinin iyonik yarıçaplarına bağlı olarak yerleştiğine dair kanıtlara rastlanmıştır.  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  ışıldar bileşiminde,  $\text{Eu}^{2+}$  ve  $\text{Sr}^{2+}$  iyonlarının iyonik çapları birbirine oldukça yakındır (sırasıyla 1.20 Å ve 1.21 Å). Bu benzerlik,  $\text{Eu}^{2+}$  iyonlarının  $\text{Sr}^{2+}$  iyonlarının yerini alma olasılığının yüksek olduğunu gösterir ve bu durum, EPR (Elektron Paramanyetik Rezonans) yöntemiyle de doğrulanmıştır (Aroz ve diğerleri, 2012). Ayrıca,  $\text{Eu}^{3+}$  iyonunun stronsiyum alüminat kristalinde kolaylıkla  $\text{Eu}^{2+}$  iyonuna indirgenebildiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, ışıldarın yapısal özellikleri ve aktivasyon mekanizmaları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (**Clabau ve diğerleri, 2005**).

Öte yandan TLD çalışmaları haricinde TL olay, kristallerin birçok özelliğinin araştırılmasında da kullanılan bir yöntemdir. TL tekniği, mineralojik analizlerde, seramik endüstrisinde kullanılan feldspatların kalite kontrolünde ve bu malzemelerin fosforesans mekanizmalarının aydınlatılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca TL, yüksek enerjili radyasyona maruz kalan kristal yapıda enerji depolanmasını ve bu yüksek enerji bombardımanının üretebileceği kristal hasarını incelemenin bir yoludur. Doğal kayaç ve minerallerin maruz kaldıkları jeolojik doz TL tekniği ile ölçülebilmektedir. Diğer taraftan, arkeolojik bir malzemenin yaş tayininin yapılabilmesi için, malzemenin TL ölçümleri ve analizleri çok iyi veriler sunmaktadır. Literatürde TL ile yaş tayini konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. TL tarihleme yönteminde, başta kuvars, feldspatlar, zirkon ve polimineral örnekler olmak üzere çeşitli mineraller yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, antik dönemlerden itibaren malzemelerin (örneğin çanak çömlek) maruz kaldığı iyonlaştırıcı radyasyon dozlarının malzemede depolanması prensibine dayanır. Malzemelerin kontrollü ısıtılmasıyla elde edilen TL ışımaya eğrilerinin analizi ve uygun matematiksel modellerin

(kinetik modeller) uygulanmasıyla yaş tayini yapılabilmektedir. Çeşitli tortul kayaçlarda da TL tarihlendirme uygulandığı bilinmektedir (**Aitken, 1985; Singhvi ve Mejdahl, 1985; Wintle ve Huntley, 1982**). Huntley ve arkadaşları, tortul birikintilerinin tarihlendirilmesinde TL yönteminin kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır (**Huntley ve diğerleri, 1989**). Aynı araştırma grubu, zirkon örnekleri üzerinde yaptıkları benzer çalışmaların sonuçlarını da yayınlamıştır. Söz konusu makalede, çeşitli feldspatların zamana bağlı lüminesans spektrum ölçüm sonuçları detaylı şekilde rapor edilmiştir. Elde edilen spektrumlar, tarihlendirme tekniğinin geliştirilmesi için iyi bir örnektir. Çalışmada 514.5 veya 632.8 nm ışık uyarımlı bazı doğal feldspatlar için 400-620 nm aralığında elde edilen lüminesans spektrumları ölçülmüştür. En parlak numunelerin, aynı numunelerin TL spektrumlarında gözlemlenenlere benzer şekilde, 570 ve 470 nm'de merkezlenen geniş emisyon bantlarının gözlemlendiği Na açısından zengin plajiyoklazlar ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) olduğu belirtilmiştir.

Termolüminesans olayın uygulandığı bir diğer alan ise biyolojik mekanizmalardır. **Strehler ve Arnold (1951)** bir ateşböceğinin ışıldama yapmasını inceleyerek, enerji açısından zengin fosfatın (ATP-adenozin tri fosfat) fotosentetik oluşumunu analiz etmeye çalışırken, ışığın kloroplastlar tarafından salındığını ileri sürmüşlerdir. **Arnold ve Sherwood (1957)** bir diğer çalışmada, kurutulmuş kloroplastlarda TL ışıldamayı gözlemleyip TL ışıldama eğrisi kaydetmişlerdir. Bunlara ilave olarak **Tollin ve Calvin (1957)** biri 50°C ile 60°C arasında ve diğeri 140°C ile 150°C arasında olmak üzere iki ışıldama piki veren kurutulmuş kloroplastların TL bulgularını ortaya koymuşlardır. **Arnold ve Azzi (1968)** yeşil alg türlerinde TL ışıldama eğrilerinin elde edildiği bildirilmişlerdir. Literatürde, biyolojik mekanizmalarda gözlemlenen TL olayını inceleyen birçok makale ve derleme bulunmaktadır (**Daniels, 1953**).



## 2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde TL olay ile ilgili temel kavramlar, yaklaşımlar ve teoriler hakkında bilgi verilecektir.

### 2.1 Kristaller ve Enerji Bant Seviyeleri

Katı bir maddede atom dizilimleri, atomların birbirine çok yakın bir şekilde bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Genelde kararlı halde olan bu yapılarda atomlar simetrik ve periyodik bir düzen içerisinde yerleşirler. Bu muntazam yerleşime **örgü dizilimi** ve oluşan periyodik dizilimlerin sergilediği yapıya da **kristal** adı verilir. Modern atom modeline göre atomda bulunan elektronlar belli enerji seviyelerine sahip orbitallere yerleşmişlerdir. Kuantum mekanik yasalar çerçevesinde, yalıtılmış tek bir atomun elektronları sürekli enerji değerleri içermezler ve kesikli enerji değerleri alabilirler (**Kittel, 2004**).

Atomlar birbirlerinden yeterince uzakta iken birbirleriyle etkileşmezler. Ancak atomlar birbirlerine belirli bir mesafeden (yaklaşık olarak  $10^{-8}$  cm) daha yakınlaştıklarında, atomik orbitallerdeki elektronlar birbirleriyle etkileşmeye başlar. Bu etkileşme, komşu atomların güçlü elektriksel alanlarından kaynaklanmaktadır. Böylece iki veya daha fazla atomun bir araya gelerek oluşturdukları moleküler yapılarda, atomik orbitaller birbirleriyle örtüşerek hibritleşirler (**Kittel, 2004**). Kristal formlarda birbirlerine yakın sıralanan atom sayılarının çokluğu düşünüldüğünde bu atomların orbital sayılarının büyüklüğü de o kadar çarpıcıdır. Çok sayıda özdeş atomun, kristal bir form oluşturmak için bir araya gelmesi durumunda, atomların birbirine yakın konumlanan orbitalleri, birbirlerine yakınlaşarak etkileşime girer. Neredeyse tüm kristal formlarda atomların bu yakın dizilimlerinden kaynaklı değerlik (valans) bant elektronlarının örtüşük seviyelerinin enerjileri bir süreklilik içinde yeni bir enerji bandı gibi düşünülebilir (**Kittel, 2004**). Oluşan elektronların yeni sistemi Pauli'nin dışlama ilkesine uyar. Kristal yapılarıdaki atomların dış elektron kabuklarına denk gelen enerji seviyeleri birbirleriyle etkileşim sonucu değişime uğrar. Böylece tek bir atoma ait olan ayrık (süreksiz) enerji seviyeleri yerine, kristal yapı bir enerji

bandına sahip olur ve bu kristal yapı, enerji bandı birbirine yakın çok sayıda ayrık seviyelerden oluşmaktadır. Kristal formdaki yapılarda atom sayısının çokluğundan dolayı bu ayrık seviyeler, izin verilen enerji değerlerinin sürekli bir dağılımı (enerji bandı) şeklinde yorumlanmasına yol açar. Kristal içerisinde oluşan bu enerji bantlarında elektronlar hareket ederler. Ancak, atomların iç orbitalleri arasında birbirleri ile bu kadar yakın örtüşmeler oluşmaz.

Bir kristal yapıdaki değerlik elektronlarının enerji seviyelerinin oluşturduğu enerji bandına **değerlik bandı** ( $E_V$ ), bu elektronların uyarılması sonucu geçtiği enerji seviyelerinden oluşan banda ise **iletim bandı** ( $E_C$ ) adı verilir. Değerlik bandı ile iletim bandı arasında **yasak bant** ( $E_g$ ) olarak bilinen bir enerji boşluğu bulunur. Yalıtkanlarda ve saf yarıiletkenlerde elektronların enerjisi bu yasak bant aralığında bulunamaz. Şekil 2.1 :’de bu enerji bant yapısı ve yasak bant bölgesini açıklayan basit bir enerji bant diyagramı gösterilmektedir.



**Şekil 2.1 :** Kusursuz yapıdaki saf bir kristalde enerji band diyagramı.

İletim bandındaki elektronların en küçük enerji seviyesi  $E_C$  iletim bandı tabanını temsil eder.  $E_V$  ise değerlik bandındaki enerji seviyesidir ve değerlik bandın tavan kısmını yani en büyük enerji seviyesini temsil eder.  $E_g$  ise yasak bant enerji aralığını ifade eder.

Değerlik bandından uyarılan bir elektron iletim bandına geçer ve ardında bir boşluk bırakır. İletim bandında hareket eden bu elektronun elektriksel bir akım oluşturduğu kabul edilir. Benzer şekilde değerlik bandında kalan boşlukları elektronlar doldurur ve böylece boşluklar sanki hareket ediyormuş gibi bir elektriksel akım meydana geldiği kabul edilir. Buradaki elektron hareketi sol istikamette olduğundan bırakılan boşluklar sağ istikamete doğru hareket ediyormuş gibi algılanmaktadır (**Caferov, 1998**). Kristal yapıda bu elektron boşluk geçişleri boydan boya bant yapılarında olabileceği gibi yasak bant enerji seviyesinde elektron tuzakları ve yeniden birleşme merkezleri gibi yerleşmiş bölgelerde de gerçekleşebilir.

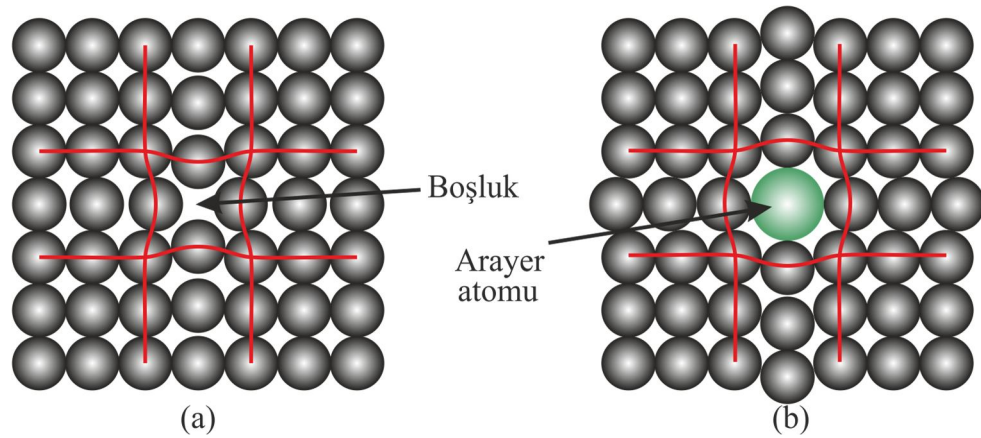
Eğer kristal tam olarak saf ise bütün atomlar örgü noktalarında konumlanmış durumdadır. Saf bir kristal ancak mutlak sıfır sıcaklığında ise kusursuz formda bulunabilir. Fakat gerçek kristallerde kristal örgü kusurları kaçınılmaz hale gelir. Çünkü mutlak sıfır sıcaklığı dışındaki sıcaklıklarda kristal örgü kafesinde atomik ve elektronik kusurları oluşur. Kristal yapılarıdaki kusurlar malzemenin elektrik veya manyetik özelliklerini etkileyebilir. Meydana gelen bu kusurlar, elektron enerji seviyelerine etki ederek yasak bant aralığında tuzak olarak adlandırılan yeni enerji seviyeleri oluşturur. Tuzak enerji seviyeleri kristal örgü kafesinde yük taşıyıcıları yakalayabilen tuzaklar olarak tanımlanır. Bundan dolayı kusurlar malzemenin yapısal özelliklerinin incelenmesinde ve anlaşılabilmesinde önemli rol oynamaktadır. Kristal bir yapıdaki malzemenin sahip olduğu elektron ve boşluklardan dolayı yapısında meydana gelen kusurlara **elektronik kusur** denir (McKeever, 1985).

Kristal yapılarda kusurlar:

- Noktasal kusurlar,
- Çizgisel kusurlar,
- Düzlemsel kusurlar

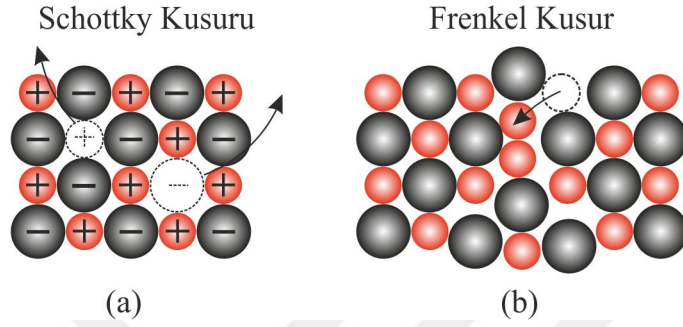
olarak sınıflandırılır.

**Noktasal kusurlar;** kristal örgüde bir atomun bulunması gereken konumunda bulunmayıp yerinde boşluk bulunması durumu (atom boşluğu kusuru) olarak tanımlanabilir (Şekil 2.2 :a). Atom veya iyonun örgü noktasında olması gereken yerde bulunmayıp örgü noktaları arasındaki hacimsel boşluklara yerleşmesi durumuna da **ara yer atom kusuru** denir (Şekil 2.2 :b).



**Şekil 2.2 :** Noktasal kristal kusurlarının şematik gösterimi.

İyonik bağı kristallerin kafes yapısında, bir anyon eksik ise bir katyon; bir katyon eksik ise bir anyon elektriksel yük dengesinin korunması için kafesten ayrılır ve boş nokta çifti oluşur. Bu duruma **Schottky kusuru** adı verilir (Şekil 2.3 :a). Walter H. Schottky tarafından bu kristal kusuru keşfedilmiştir. Bir iyonun normal kafes konumundan bir arayer konumuna atlaması ile boş kafes noktası-arayer atomu çifti oluşur. Bu duruma **Frenkel kusuru** adı verilir (bkz. Şekil 2.3 :b) (Caferov, 1998).



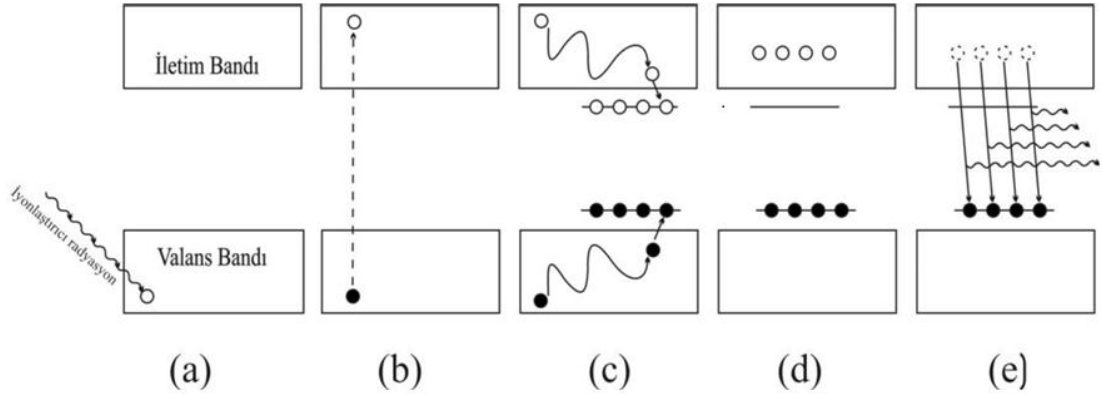
**Şekil 2.3 :** (a) Schottky Kusuru, (b). Frenkel Kusur

**Çizgisel kusurlar;** dislokasyon olarak da adlandırılan kusurlardır. Kristal malzemenin üretiminde veya doğada oluşumu sırasında kristalin üzerinde meydana gelen basınçla örgü düzleminin uç kısımlarındaki atomlar sıkışık hale gelirken, örgü kenar atomları kaymaya zorlanır. Bu kusur kenar dislokasyonu olarak adlandırılır. Ayrıca kristaller birbirleriyle açı yaparak birleşirken kristal yüzeyinde düzlemsel kusur oluşumuna da sebep olabilir (Kelly ve Knowles, 2012).

## 2.2 Termoluminesans Olay

Termoluminesans olay sırasında meydana gelen fiziksel mekanizmalar şu şekilde özetlenebilir: İlk olarak, malzemenin dışarıdan aldığı enerji değerlik bandındaki elektronlara enerji kazandırarak onların iletim bandına yükselmesine neden olur. Bu süreçte, iletim bandında serbest elektronlar ve değerlik bandında oluşan serbest boşluklar hareket ederler. Bu süreç sonunda elektron-boşluk çiftleri yeniden birleşebilir ya da yasak enerji bant aralığındaki tuzak enerji seviyeleri tarafından yakalanırlar. Tuzak enerji seviyeleri tuzak derinlikleri hakkında bilgi verir. Tuzaklara yakalanan elektronlar, ortam sıcaklığı ve tuzak derinliği gibi bazı parametrelere bağlı olarak belli bir müddet bu tuzaklarda hapsolürlar. Malzeme kontrollü şekilde ısıtılmaya başlandığında tuzaklanan yük taşıyıcılar tuzaklardan kurtulacak enerjiye ulaştıklarında tuzaklardan kaçarak yine iletkenlik bandına geçerler. İşte bu elektronlar

kristal içerisinde zıt yüklü taşıyıcıları ile birleşirse bir foton yayımlanır. Bu ışınımlı olay TL mekanizmasının temelini oluşturur (bkz. Şekil 2.4 :).



**Şekil 2.4 :** Termoluminesans olayın şekille basit bir gösterimi (Uzun, 2008).

Sistem artık kararsız durumdan denge durumuna dönerken dışarıya salınan lüminesans sıcaklık ile ilişkili bir fonksiyon olarak kaydedilir ve bu ışılda verisi **ışılda eğrisi** (glow curve) olarak adlandırılır.

Bir elektronun tuzakta kalma süresi  $\tau$  olarak sembolize edilir ve denklem (2-1) ile verilir.

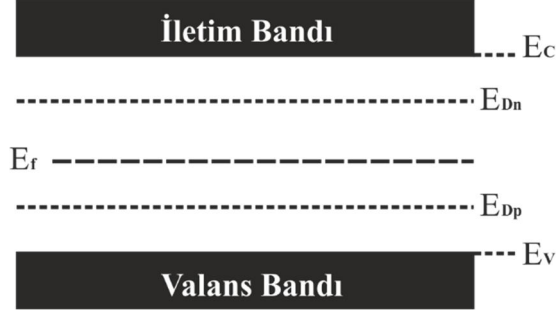
$$\tau = s^{-1} \exp(E/k.T) \quad (2-1)$$

Burada  $s$  elektronun tuzaktan kaçmaya teşebbüs etme frekansı,  $E$  tuzak enerji seviyesi,  $T$  sıcaklık ve  $k$  Boltzmann sabitidir ( $k = 1.38 \times 10^{-23} J / K$ ). Enerjisi düşük ve değerlik bandına yakın seviyeler belli sıcaklıkta tuzak enerji seviyesi olmaya daha yatkındırlar. Enerjisi kısmen daha yüksek ve yasak enerji bandının orta kısımlarında konumlanan tuzaklar ise yeniden birleşme (rekombinasyon) merkezleri gibi davranmaktadır (bkz. Şekil 2.5 :). Ayrıca ısısal uyarım sürecinde sıcaklık sabit olarak arttırılır ise zamana bağlı bir matematiksel ifade ile tanımlanabilir, denklem (2. 2);

$$T = T_0 + \beta.t \quad (2. 2)$$

Burada,  $T_0$ , ilk sıcaklık,  $\beta$  ısıtma hızı-oranı ( $^{\circ}C / s$ , heating rate) ve  $t$  (s) zaman olarak bilinir.

Isıl uyarım sürecinde uyarılan ve tuzaklardan serbest kalan yük taşıyıcıların kendi delokalize enerji seviyelerine geçme olasılığı yeniden birleşme olasılığından büyüktür.



**Şekil 2.5 : Delokalize enerji seviyeleri (McKeever ve Chen, 1997).**

Belli bir sıcaklıkta serbest kalan yük taşıyıcıların tekrar tuzaklanma olasılığı ile lüminesans merkezlerinde zıt yüklerle yeniden birleşme olasılığının birbirine eşit olduğu bir enerji seviyesinin var olduğu kabul edilir. Bu seviye demarkasyon seviyesi olarak tanımlanır. Elektronlar için  $E_{Dn}$  ve boşluklar için  $E_{Dp}$  olarak tanımlanmıştır. 0 K sıcaklığında fermi enerji seviyesinin üstünde bulunan bütün enerji seviyeleri tamamen boş olarak kabul edilir. Tuzak enerji seviyeleri, fermi enerji seviyesi üzerinde olduğu için, sıcaklığın sabit ve malzemenin termodinamik dengede olduğu durumda tamamen boş olarak kabul edilebilir.

Şimdi, tüm tuzak seviyelerindeki yük taşıyıcı konsantrasyonlarını hesaplayalım. Bunun için bir enerji seviyesindeki durum yoğunluğu fonksiyonunu  $N(E)$  tanımlayarak başlayalım.  $N(E)$ , kristal yapıda oluşan lokalize enerji seviye durumlarının yoğunluğunu hesaplayan fonksiyondur. Yük taşıyıcılar Fermi-Dirac istatistiğine uydukları için  $N(E)$  hesaplanırken Fermi Dirac fonksiyonu kullanılmalıdır. Fermi Dirac fonksiyonu denklem (2. 3) ile verilir.

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} \quad (2. 3)$$

Diğer taraftan, elektronların tuzaklara yakalanma tesir kesiti  $\sigma_n$  ve serbest yük taşıyıcılarının rekombinasyon merkezlerinde yeniden birleşme tesir kesiti  $\sigma_{mn}$  ile sembolize edilsin. Ayrıca yük taşıyıcıların tuzaklardan kaçma olasılıkları  $p_e$  ve  $p_p$  olarak ifade edilsin. Bir yük taşıyıcının  $E$  derinlikli bir tuzaktan T sıcaklığında kurtulma olasılığı,  $p$ , denklem (2. 4) ile hesaplanabilir.

$$p = s. \exp(-E/k.T) \quad (2. 4)$$

Yük taşıyıcıların yoğunluk değişimleri için yukarıda belirtilen tanımlara bağlı olarak oluşturulan matematiksel ifadeler denklem (2. 5) ve (2. 6) ile verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\frac{dn_c}{dt} = & \int_{E_{Dn}}^{E_c} p_n(E).N(E).f(E).d(E) \\
& - n_c.V_n \int_{E_{Dn}}^{E_c} \sigma_n(E).N(E).(1-f(E)).d(E) \\
& - n_c.V_n \int_{E_{Dp}}^{E_f} \sigma_{mn}(E).N(E).(1-f(E)).d(E)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dn_v}{dt} = & \int_{E_V}^{E_{Dp}} p_p(E).N(E).(1-f(E)).d(E) \\
& - n_v.V_p \int_{E_V}^{E_{Dp}} \sigma_p(E).N(E).f(E).d(E) \\
& - n_v.V_p \int_{E_F}^{E_{Dn}} \sigma_{np}(E).N(E).f(E).d(E)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

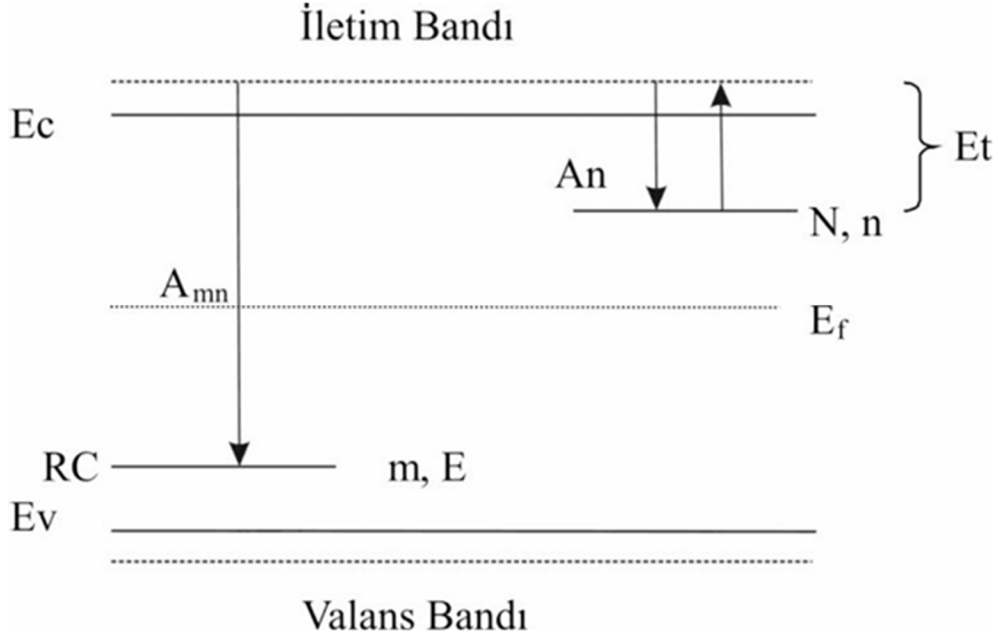
Bu iki ifade OTOR modelinde yük taşıyıcı trafiğinin matematiksel tanımlarını yapabilmek için kullanılacaktır.

### 2.3 Bir Tuzak – Bir Yeniden Birleşme Merkezi Modeli

Bir tuzak bir yeniden birleşme modeline göre bir TL malzeme, değerlik bandı, iletim bandı, elektron ve boşlukların yakalandığı birer tuzak enerji seviyesinden oluşmaktadır. Bu modelde iletim bandına yakın elektronların yakalandığı enerji seviyesi  $E_t$  ve boşlukların yakalandığı değerlik bandına yakın tuzak enerji seviyesi ise  $E$  olarak adlandırılmıştır. Bu model, yük taşıyıcılar için sadece bir adet tuzak enerji seviyesi barındırdığından “bir-tuzak-bir-yeniden-birleşme-merkezi modeli” olarak bilinir.

Tuzaklara yakalanan elektron konsantrasyonunu denklem (2. 7) ile ifade edilebilir.

$$n = \int_{E_{Dn}}^{E_c} N(E).f(E).dE \tag{2.7}$$



**Şekil 2.6 :** OTO modelinin önerdiği enerji seviyeleri ve izinli geçişler (Uzun, 2008).

Şekil 2.6 :’da gösterilen kısaltmalar aşağıdaki gibidir:

$N$ : kristalde bulunan elektron tuzaklarının konsantrasyonu ( $cm^{-3}$ )

$n$ : Tuzaklara yakalanan elektron konsantrasyonu ( $cm^{-3}$ )

$n_c$  : iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu ( $cm^{-3}$ )

$E_t$ : Tuzaktaki elektronların aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) (eV)

$s$  : frekans faktörü ( $s^{-1}$ )

$A_n$ : elektronların yeniden tuzağa yakalanma olasılığı

$A_{mn}$ : Rekombinasyon merkezlerinde (birim zamanda ve birim hacimde) yeniden birleşme olasılığı.

Toplam tuzak konsantrasyonundan ( $N$ ), tuzaklara yakalanan elektron konsantrasyonu çıkarılır ise ( $N - n$ ), boş olan tuzak konsantrasyonları bulunmuş olur, denklem (2. 8).

$$N - n = \int_{E_{Dn}}^{E_c} N(E) \cdot (1 - f(E)) \cdot dE \quad (2. 8)$$

Rekombinasyon merkezlerindeki boşluk konsantrasyonu ise  $m$  ile ifade edilir ve denklem (2. 9) ile hesaplanır.

$$m = \int_{E_{Dp}}^{E_f} N(E) \cdot [1 - f(E)] \cdot dE \quad (2. 9)$$

Önemle belirtilmelidir ki, ısıl uyarım sürecinde temel varsayım, yalnızca tuzak seviyelerindeki elektronların serbest kaldığı, buna karşılık değerlik bandındaki boşlukların (hole'ların) ısıl uyarıma maruz kalmadığı veya etkileşmenin ihmal edilebilir düzeyde olduğudur. Bu nedenle, TL olay sırasında elde edilen ışımaya eğrisinin tuzaklardan salınan elektronlarla ilişkili olduğu kabul edilir.

Kristal yapı, iyonlaştırıcı radyasyonu soğurduğunda, değerlik bandındaki elektronların bazıları serbest kalarak iletim bandına geçerler. Böylece iletim bandında serbest elektronlar ve değerlik bandında serbest boşluklar oluşur. Bu zıt yüklü taşıyıcılar daha sonra kararlı duruma dönebilmek için ya yeniden birleşme yoluyla dışarı enerji vererek lüminesans yayımlanmaya sebep olurlar ya da yasak enerji bandı aralığındaki tuzak enerji seviyelerine yakalanırlar. Fakat yarıiletken veya yalıtkan kristallerde serbest yüklerin tuzaklara yakalanma olasılıkları daha yüksektir. Yukarıda verilen denklemler yeniden düzenlenir ise iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonundaki değişim, denklem (2. 10);

$$\frac{dn_c}{dt} = \underbrace{n \cdot s \cdot \exp\{-E_t/k.T\}}_{\text{tuzaktan serbest kalan elektron konsantrasyonu}} - \underbrace{\frac{n_c(N-n)A_n}{\text{serbest kalan elektronlardan tekrar tuzaklara yakalananların konsantrasyonu}}} - \underbrace{\frac{n_c \cdot m \cdot A_{mn}}{\text{iletim bandındaki elektronların rekombinasyon konsantrasyonu}}} \quad (2. 10)$$

olarak bulunur. Değerlik bandında bulunun elektron konsantrasyonundaki değişim ise aşağıdaki gibidir, denklem (2. 11);

$$\frac{dn_v}{dt} = 0 \quad (2. 11)$$

Denklem (2. 10), iletim bandındaki elektron konsantrasyonunu göstermektedir. Tuzaklarda bulunan elektron konsantrasyonlarında meydana gelen değişim ise denklem (2. 12) ile hesaplanabilir.

$$\frac{dn}{dt} = \underbrace{\frac{n_c \cdot (N-n)A_n}{\text{serbest kalan elektronlardan tekrar tuzaklara yakalananların konsantrasyonu}}} - \underbrace{\frac{n \cdot s \cdot \exp\{-E_t/k.T\}}{\text{tuzaklardaki elektronlardan ısıl olarak serbest kalanların konsantrasyonu}}} \quad (2. 12)$$

Yeniden birleşme merkezlerindeki boşluk konsantrasyonunda meydana gelen değişim hızı ise, denklem (2. 13);

$$\frac{dm}{dt} = -n_c \cdot m \cdot A_{mn} \quad (2. 13)$$

olarak benzer şekilde tanımlanır.

Buradan iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonunda meydana gelen değişim ise, denklem (2. 14);

$$\frac{dn_c}{dt} = \frac{dm}{dt} - \frac{dn}{dt} \quad (2. 14)$$

olarak ifade edilebilir. Yük nötralizasyon denklemi ise Deklem (2. 15)'deki gibi ifade edilir.

$$n_c + n = m \quad (2. 15)$$

Kristal sisteminin denge durumuna geçişi sırasında yayımlanan ışımaya yoğunluğu yani TL sinyal şiddeti aşağıdaki gibi ifade edilebilir, denklem (2. 16);

$$I_{TL} = \eta \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2. 16)$$

Burada  $\eta$  , ışınımlı geçiş verimliliğini (radiative efficiency) ifade eder. Bu terim, eğer yeniden birleşme merkezlerine geçişlerin hepsi ışınımlı ise ve yayımlanan tüm fotonlar detektör tarafından kaydedilmiş ise  $\eta=1$  olarak alınır. Sistemin denge durumuna geçişi sırasında ortama salınan TL ışıldama yoğunluğu, denklem (2. 17) ile verilebilir (**Chen ve McKeever, 1997; Chen ve Pagonis, 2011; McKeever, 1985**).

$$I_{TL} = n_c \cdot m \cdot A_{mn} \quad (2. 17)$$

Termolüminesans olay bir tuzak bir yeniden birleşme modeli (OTOR) kullanılarak açıklanırken, modele göre, yük taşıyıcı trafiğine bazı kısıtlamalar getirilmiştir. Buna ilave olarak, ısı uyarım işlemi sabit ısıtma hızında ( $\beta$ ) gerçekleştirildiği durumda bile iletim bandında bulunan serbest elektron konsantrasyonunu ve TL sinyal şiddetini hesaplamak kolay değildir. Çünkü bu değişkenleri hesaplayan denklemler, genellikle analitik çözümleri yapılamayan birinci mertebeden lineer diferansiyel denklemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Bütün yük konsantrasyonlarının anlık değişimi zaman ve sıcaklık bağımlılığına sahiptirler. Sabit ısıtma hızında, sıcaklık ve zaman arasında doğrusal bir ilişki vardır ( $T = T_o + \beta \cdot t$ ). Diğer taraftan, yük taşıyıcı konsantrasyonlarının geçmişteki durumları da önemlidir. Sıcaklığa ve zamana bağımlı olarak yük taşıyıcı konsantrasyonları  $n_c[T(t)]$ ,  $n[T(t)]$ ,  $m[T(t)]$  biçiminde ifade

edilebilir. Unutulmamalıdır ki, diferansiyel denklemlerin çözülebilmesi için başlangıç değerlerinin ( $n_{co}$ ,  $n_o$  ve  $m_o$ ) bilinmesi gereklidir.

#### 2.4 Yarı Denge (Quasiequilibrium) Yaklaşımı

Bu yaklaşım ile OTOR modeli için ileri sürülen diferansiyel denklemlerde bazı sadeleştirmeler yapılması amaçlanmıştır. İletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonunda gözlemlenen değişme hızının, rekombinasyon merkezlerindeki boşluk konsantrasyonu ve tuzaklardaki elektron konsantrasyonunda gözlemlenen değişiminden çok çok küçük olduğu varsayılır. İlave olarak başlangıçtaki serbest yük taşıyıcı konsantrasyonunun sifıra eşit olduğu varsayılır. Böylece, ısıtma işlemi sırasında delokalize bantlarda yük taşıyıcı birikimi oluşamaz. Bu yaklaşımın matematiksel ifadesi şu şekildedir, denklem (2. 18);

$$\left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dm}{dt} \right|, \left| \frac{dn}{dt} \right| \quad (2. 18)$$

Yarı denge yaklaşımına göre  $I_{TL}$ 'nin yeni ifadesi şu şekilde olur, denklem (2. 19), (2. 20), (2. 21);

$$-\frac{dn}{dt} \sim -\frac{dm}{dt} = I_{TL} \quad (2. 19)$$

$$I_{TL} = \frac{n \cdot s \cdot \exp\left(-\frac{E_t}{k.T}\right) \cdot m \cdot \sigma_{mn}}{[(N - n) \cdot \sigma_n + m \cdot \sigma_{mn}]} \quad (2. 20)$$

$$I_{TL} = n \cdot s \cdot \exp\left(-\frac{E_t}{k.T}\right) \cdot \left[1 - \frac{(N - n) \cdot \sigma_n}{(N - n) \cdot \sigma_n + m \cdot \sigma_{mn}}\right] \quad (2. 21)$$

Yukarıda verilen TL ışıltama denklemleri **general one trap** (GOT) modeli olarak tanımlanmaktadır. Denklem (2. 21)'e bakıldığında ikinci terim serbest elektronların tekrar tuzaklara yakalanmama olasılığını vermektedir. Bu olasılık 1'e yaklaştığında TL ışıltama şiddetinin en yoğun hali elde edilir. Kinetik model yaklaşımlarında bu denklemden yola çıkarak bazı yeni çıkarımlar yapılmıştır (**Chen ve McKeever, 1997; Chen ve Pagonis, 2011; McKeever, 1985**).

## 2.5 Birinci Mertebeden Kinetik Model

**Randall ve Wilkins (1945a, 1945b)** tarafından önerilen bu model, TL olayının temel prensiplerini basit bir çerçevede açıklar. Model, elektronların bir tuzak içerisinde yarı kararlı bir durumda tutulduğunu varsayar. Isıtma süreci, tuzaklardaki elektronları serbest bırakır ve bu elektronlar doğrudan rekombinasyon merkezine ulaşarak TL ışıdamaya neden olur.

Bu modele göre, TL şiddeti ( $I_{TL}$ ), şu denklemle ifade edilir, denklem (2. 22):

$$I_{TL} = n \cdot s \cdot \exp \left\{ -E_t / k \cdot T \right\} \quad (2. 22)$$

Burada:

- **s**: Frekans faktörü,
- **n**: Tuzakta bulunan elektron sayısı,
- **$E_t$** : Aktivasyon enerjisi,
- **k**: Boltzmann sabiti,
- **T**: Mutlak sıcaklık.

Randall-Wilkins modeli, TL olayının temel ısıl uyarım prensibini açıklasa da, gerçek malzemelerdeki karmaşık tuzak sistemlerini tam anlamıyla temsil edemez.

## 2.6 İkinci Mertebeden Kinetik Model

**Garlick ve Gibson (1947)**'nin öne sürdüğü ikinci dereceden kinetik model, elektron ve boşlukların rekombinasyon sürecindeki etkileşimlerini ele alır. Bu model, TL şiddetinin ( $I$ ), serbest kalan elektronların ve rekombinasyon merkezindeki boşlukların yoğunluğu ile orantılı olduğunu varsayar. Isıl enerji verilme sürecinde tuzaklardan serbest bırakılan elektronların tekrar tuzaklara hapsolme olasılığının yeniden birleşme olasılığı ile karşılaştırıldığında gözle görülecek şekilde büyük olduğunu kabul etmiştir. Bu modelde tuzakların doyuma ulaşmadığı varsayılır, denklem (2. 23).

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = s' \cdot n^2 \exp \left\{ -\frac{E_t}{k \cdot T} \right\} \quad (2. 23)$$

## 2.7 Genel Mertebeden Kinetik Model

**May ve Partridge (1964)** birinci derecen ve ikinci dereceden kinetik modellerin basit kaldığı TL olayının daha karmaşık durumlarını modellemek için genel mertebeden kinetik modeli öne sürmüşlerdir, denklem (2. 24).

$$I_{TL} = n^b \cdot s'' \cdot \exp\left\{-\frac{E}{k \cdot T}\right\} \quad (2. 24)$$

Burada  $s''$ ,  $m^3 (b-1) s^{-1}$  boyutundadır.  $b$  ifadesi genel mertebeden kinetik model parametresi olarak tanımlanır. Değer olarak 1 ya da 2 olmak zorunda değildir ( $1 \geq b \geq 2$ ).  $b$  parametresinin 1'e eşit olduğunda denklemin Randal-Wilkins modeline dönüştüğü, 2'ye eşit olduğunda ise Garlik-Gibson modeline dönüştüğü görülmektedir. Bu model, farklı kinetik derecelere sahip malzemeler için TL şiddetini öngörebilir ve malzeme özelliklerini incelemek için daha esnek bir yaklaşım sunar.

## 2.8 Bilgisayarlı Işıldama Eğrisi Dekonvülasyonu (CGCD)

TL ışıldama eğrileri genellikle karmaşık bir yapıda olup üst üste binmiş ve birbirinden ayırt edilemeyen birden fazla ışımaya pikinden meydana gelmektedirler. Bu ışıldama eğrileri tuzaklardan serbest kalan yük taşıyıcılarının rekombinasyonu sonucu salınan ışımaların kaydedilmesiyle oluşmaktadır. Karmaşık ışıldama eğrilerinin birbirinden ayrıştırılarak tuzak parametrelerinin hesaplanabilmesi sürecinde “**Bilgisayarlı Işıldama Eğrisi Dekonvülasyonu**” (Computerized Glow Curve Deconvolution, CGCD) yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. CGCD aslında, TL sürecinde kaydedilmiş birbirine yakın veya üst üste binmiş ışıldama eğrilerin matematiksel fonksiyonlar yardımıyla ayırt edilmesini sağlar. Öncelikle, deneysel olarak kaydedilen TL ışıldama eğrisinin pik sayısı tahmin edilir. Her bir pik için uygun bir TL model ve tuzak parametreleri seçilerek sistemin sıcaklık ve zaman değişkenleri ile simülasyonu (benzeşimi) yapılır ve bir sayısal ışıldama eğrisi elde edilir. Bu sayısal ışıldama eğrisinin deneysel ışıldama eğrisine uygunluğunun bir ölçüsü olarak FOM (figure of merit) değeri hesaplanır. FOM değeri ne kadar düşük olursa, deneysel eğri ile teorik eğri arasındaki uyum o kadar iyi olur. Dekonvülasyon sürecinde tuzak parametrelerinde ufak ayarlamalar yapılarak FOM değerinin kabul edilebilir bir düzeye indirgenmesi sağlanır. Bu süreç eğriler arasında en iyi uyum elde edilene kadar

devam ettirilir. Ayrıştırma tamamlandığında üst üste binmiş ışıldama pikleri gözle görülür hale gelir ve piklere ait tuzak parametreleri hesaplanmış olur.



### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak incelenen numunelerin doğal TL ışıldama eğrileri ölçülmüş ve ardından her biri aynı dozda radyasyona maruz bırakılarak TL ışıldama eğrileri kaydedilmiştir. Termolüminesans analizler için uygun pik şiddetine ve düşük fading (solma) oranına sahip olan numuneler belirlenmiş ve TL yöntemler ile analiz edilmiştir. 2. aşamada, numunelere yeniden kullanılabilirlik testleri uygulanmış, bu prosedür tavlama işlemi yapılarak tekrar edilmiştir. 3. aşamada deneysel olarak elde edilen ışıldama eğrileri CGCD metodu ile analiz edilmiştir. Bu yöntemde ışıldama eğrisini oluşturan bireysel pikler bir bilgisayar programı kullanılarak birbirlerinden ayrıştırılmıştır. Böylece, ışıldama eğrisini oluşturan bireysel piklerin TL tuzak parametreleri belirlenmiş ve çizelge halinde sunulmuştur. Bununla birlikte, bireysel piklerin TL tuzak parametreleri Pik Pozisyonu  $T_s - T_m$  ve Değişken Doz yöntemleriyle de analiz edilmiştir. Ayrıca, alfa ve beta radyasyonunun ışıldama eğrisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son olarak numunelerin uzun süreli fading karakteristikleri gözlemlenmiştir. Bu bölümde tez çalışmamız sırasında kullanılan deney sistemleri, malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve deneysel koşullar hakkında bilgi sunulacaktır.

#### 3.1 Termolüminesans Ölçüm Laboratuvarı

Tez için yapılan bütün deneyler Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Fizik Bölümü Termolüminesans Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sisteminin genel bir fotoğrafı Şekil 3.1’de verilmiştir.

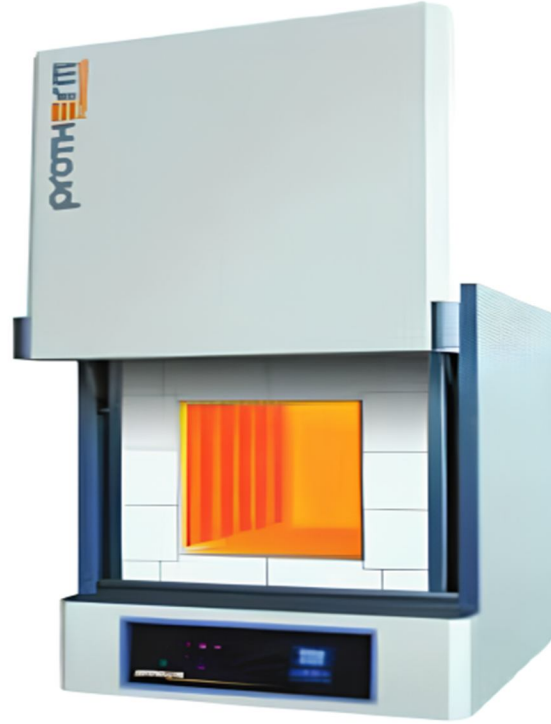
Ölçümler, düşük enerjili ışık (kırmızı ışık) ile kısmi olarak aydınlatılmış, karanlık bir laboratuvar ortamında ve oda sıcaklığında ( $\sim 20 \pm 5^\circ\text{C}$ ) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan bazı cihazların özellikleri aşağıda sunulmuştur.



**Şekil 3.1** : TL ölçüm sistemi.

### **3.2 Tavlama Fırını**

TL çalışmalarımızda sıcaklığı 1350°C'ye kadar yükseltilebilen, Protherm marka kül fırını kullanılmıştır. Bu fırında malzeme sentezleme işlemi gerçekleştirilmemiş, sadece malzemelere TL ölçümleri öncesinde tavlama prosedürü uygulanmıştır. Fırının sıcaklığı anlık olarak ölçülebilmekte ve dijital bir ekran tarafından görüntülenebilmektedir. Ayrıca, çalışma sıcaklığı yine dijital ekran sayesinde kontrol edilebilmekte ve böylece materyalin sıcaklık kontrolü kolay bir şekilde sağlanmaktadır. Bütün tavlama işlemleri atmosfer basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan tavlama işlemleri sırasında yüksek sıcaklıkta ortaya çıkması muhtemel gazlar kapalı devre otomatik bir egzoz sistemi ile güvenli bir şekilde dışarı tahliye edilmektedir. Böylece güvenlik riski oluşturabilecek etkenlerin önüne geçilmiş olmaktadır. Tavlama fırınının görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Tavlama fırını.

### 3.3 Alfa ve Beta Radyasyon Kaynakları ve Işınlama Sistemi

Bu deneysel çalışma kapsamında  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  beta radyasyon kaynağı ve  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$ -radyasyon kaynağı kullanılmıştır. Her iki izotop, Little More Scientific Engineering (U.K.) firmasından temin edilen 9022 model Automatic Irradiator System içerisine konumlandırılmıştır.

Tüm  $\beta$  ışınlamaları  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ -radyasyon kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynağın aktivitesi  $\approx 100$  mCi'dir ve bu değer üretici firma tarafından (Eckert & Ziegler) 18 Aralık 2012 tarihinde ölçülmüş ve sertifikalandırılmıştır (No: CO 142730-SK 257). Tüm alfa ışınlamaları  $^{241}\text{Am}$  radyasyon kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynağın aktivitesi  $\approx 4$  MBq'dir ve bu değer üretici firma tarafından (Eckert & Ziegler) 18 Aralık 2012 tarihinde ölçülmüş ve sertifikalandırılmıştır (No: CO 7-2910-AM241).

$^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ -radyasyon kaynağından  $^{90}\text{Sr}$ 'un  $^{90}\text{Y}$ 'a bozunumu neticesinde 0.54 MeV enerjili ve  $^{90}\text{Y}$ 'un  $^{90}\text{Zr}$ 'a bozunumu neticesinde 2.27 MeV enerjili  $\beta$ -parçacıkları yayımlanmaktadır.  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$ -radyasyon kaynağından  $^{241}\text{Am}$ 'un  $^{237}\text{Np}$ 'a bozunumu neticesinde 5.378 MeV (%1.4), 5.443 MeV (%12.8), 5.486 MeV (%85.2), 5.512 MeV (%0.2), 5.544 MeV (%0.2) enerjili ve  $^{237}\text{Np}$ 'un  $^{233}\text{Pa}$ 'a bozunumu neticesinde 4.766

MeV (%9.3), 4.771 MeV (%23.2) ve 4.788 MeV (%47.64) enerjili  $\alpha$ -parçacıkları yayımlanmaktadır.

Alfa ve beta ışınlama sistemleri bilgisayar yardımı ile kontrol edilmektedir. Materyalin hangi tür radyasyona maruz bırakılacağı (alfa veya beta), kaç saniye süre ile ışınlanacağı, ışınlamanın ne zaman başlatılacağı, kaç adet materyalin kaynak plağına yerleştirildiği, vakum seviyesi ve hangi konuma yerleştirildikleri gibi deneysel bilgiler program ara yüzü sayesinde sisteme kolayca bildirilebilmektedir. Planlanan ışınlama süresinin bitiminde ise radyasyon kaynağı ile numune arasındaki bağlantı bir otomatik deklanşör (shutter) sistemi sayesinde kapatılmakta ve ışınlama sonlandırılmaktadır. Şekil 3.3'de ışınlama sisteminin genel bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.3 :  $Sr^{90}$ - $Y^{90}$  beta ve  $^{241}Am_{146}$  alfa ışınlama kaynakları.

### 3.4 TL Okuyucu Sistem

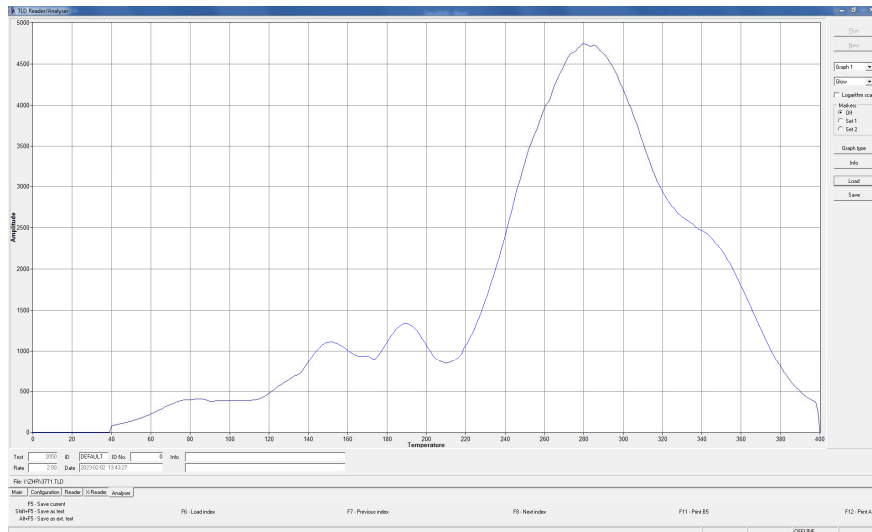
Deneyisel çalışmalar için RA'04 model Manual TLD Reader sistemi kullanılarak ışıldar malzemelerin TL ışıldama eğrileri kayıt edilmiştir. Şekil 3.4'de TL okuma sisteminin genel bir görüntüsü verilmiştir. TL okuma sistemi iki temel kısımdan oluşur:

- TLD okuyucu
- Tld\_wintest5\_400 bilgisayar program yazılımı.



Şekil 3.4 : TL okuyucu sistem.

TLD okuyucu sistem ile değişik boyut ve formlardaki malzemelerin TL ölçümü yapılabilmektedir. Sistem, bir foto çoğaltıcı tüp ve bir numune ısıtıcıdan oluşmaktadır. Isıtma sistemi, numunenin üzerine konulduğu ve ısıtıldığı örnek taşıyıcı, örnek taşıyıcı ile temasta bulunan termokupl (termocouple) ve optik bir filtreden oluşmaktadır. Isıtma hızı bilgisayar aracılığıyla kontrol edilebilmektedir. Numune ısıtıcı, örnekleri  $\beta = 0.5 - 10^{\circ}\text{C}/\text{s}$  ısıtma hızlarında ve  $400 \pm 1^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Şekil 3.5 :’de RA-04 manuel TLD Reader-Analyser sisteminin, bu tez çalışması sırasında kaydedilen bir ekran görüntüsü sunulmuştur.

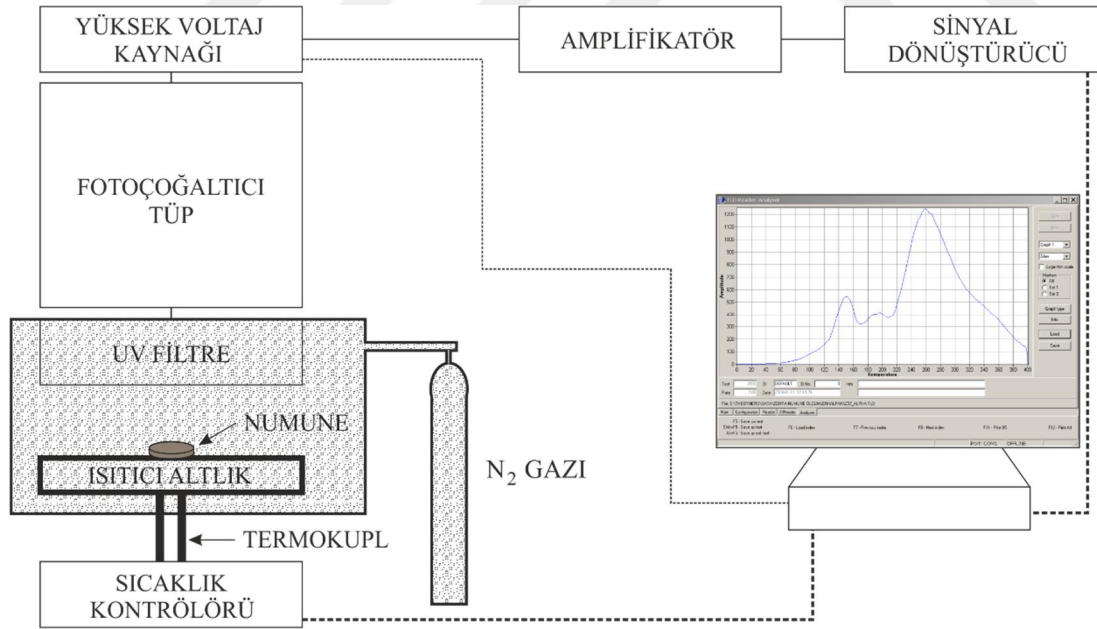


Şekil 3.5 : TLD yazılımı ekran görüntüsü.

### 3.5 TLD Okuyucu ve TLD wintest-400 Yazılım Programı Çalışma Prensibi

TLD okuyucu ve Tld\_wintest5\_400 yazılımını barındıran bilgisayar sistemi RS-232 seri portu ile birbirlerine veri aktarımını gerçekleştirmektedir. TLD okuyucuda incelenen malzemelere ait veriler Tld\_wintest5\_400 bilgisayar programı yardımı ile cihazdan alınmakta, dijital olarak depolanmakta ve anlık olarak grafiği çizilmektedir. TLD okuyucu sistem numunenin ısıtılmasını sağlayan bir iç plaka hazne, optik filtre, foto-çoğaltıcı tüp ve elektronik devrelerden oluşmaktadır. Numunenin yerleştirildiği açılıp kapanabilir iç plaka haznesinin alt kısmında numunenin ısıtılmasını sağlayan bir rezistans sistemi ve numuneyle temas halinde bulunan bir çift termokupl bulunmaktadır. TLD okuyucu sistemde farklı boyut ve formlarda bulunan malzemelerin TL ışıltama eğrileri ölçülebilmektedir. TLD okuyucunun bir diğer özelliği ise ısıtma oranının ayarlanabilmesidir. Isıtma oranı  $\beta$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) 0.5 ila 10  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  aralığında değiştirilebilmektedir. Diğer taraftan, bu sistemde TL ışıltama eğrileri 40-400  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında ölçülebilmektedir.

Genel olarak TLD okuyucu ve Tld\_wintest5\_400 bilgisayar programından oluşan sisteminin çalışma şeması Şekil 3.6 :’da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.6 : TLD okuyucu ve TL wintest-400 programı algoritması.

Sistem kullanıcıya, sıcaklığı 3 farklı aralıkta ve istenilen oranlarda (sıcaklık-zaman profili) değiştirme imkânı sağlamaktadır. Sıcaklık-zaman profili araştırmacının ihtiyacına göre değiştirilebilmektedir ve 3 temel kısımdan oluşur: ön tavlama, TL

ölçüm ve tavlama. Bu temel unsurlar birbirinden bağımsız şekilde ayarlanabilmektedir. Yazılım, zaman-sıcaklık ayarlarının bilgisayar üzerinden yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu ayarlar yapıldıktan sonra TL okuma işlemi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen veriler bilgisayara aktarılmakta ve burada depolanmaktadır. Malzemenin kontrollü şekilde ısıtılmasıyla yayımlanan elektromanyetik ışınım, foto çoğaltıcı tüpte akım oluşturmada ve oluşan akım foto çoğaltıcı sistemle yükseltgenmektedir. Bu akım malzemedeki salınan ışınımın şiddeti ile orantılıdır. Sistemde sıcaklık kontrollü bir şekilde artırıldığından numunedeki salınan ışınım, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kayıt altına alınır. Kaydedilen grafik ışıltama eğrisi olarak tanımlanmaktadır.

### **3.6 Tuzak Parametrelerini Hesaplama Yöntemleri**

#### **3.6.1 Pik Pozisyonu Yöntemi**

Pik pozisyonu ( $T_s - T_m$ ) yöntemi, ışıltama eğrisindeki pik sayısının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan deneysel bir tekniktir. Bu yöntem ile birbirine çok yakın veya üst üste binmiş ve birbirlerinden ayırt edilemeyen ışıltama pikleri ayrıştırılabilmektedir. Bilindiği gibi, bireysel bir TL ışıltama piki çoğunlukla asimetric (bazı malzemelerde simetric) çan eğrisi biçimlidir. Numune (incelenecek ışıltama pikinin düşük sıcaklık bölgesinde kalmak koşulu ile) bir  $T_s$  sıcaklığına kadar, sabit bir ısıtma hızında, ısıtılır ve ardından oda sıcaklığına kadar soğutulur. Bu adımda, incelenen ışıltama pikine yakın (pikin düşük sıcaklık tarafında yerleşmiş olan) piklerin sönmelenmesi hedeflenmektedir. Böylece incelenen pik ışıltama eğrisi üzerinde daha belirgin hale getirilmiş olur. Bir sonraki adımda, aynı koşullarda tüm ışıltama eğrisi kaydedilir. ışıltama eğrisinin maksimumu,  $T_m$ , ve buna karşı gelen sıcaklık,  $T_s$ , kaydedilir. Bu adımlar, numune yeniden ışınlanarak farklı bir  $T_s$  sıcaklığı için tekrarlanır.  $T_s$  sıcaklığı her bir döngüde yaklaşık 2-3 °C kadar arttırılmalıdır. Son aşamada  $T_m$ 'nin  $T_s$ 'ye göre grafiği çizilir. Bu grafik, genellikle basamaklı bir yapıya sahiptir. Eğrideki her bir plato, farklı bir ışıltama pikini temsil eder (McKeever, 1985).

#### **3.6.2 Artan Doz Yöntemi**

Artan doz, ya da değişken doz (Variable Dose, VD) yöntemi, TL ışınım pikinin kinetik mertebesinin ( $b$ ) hesaplanmasında kullanılmaktadır. VD yönteminde; malzeme farklı

doz değerlerinde ışınlanmakta ve ışıltama pikinde meydana gelen değişim izlenmektedir.

Randall-Wilkins modeline (**Randall ve Wilkins, 1945a, 1945b**) göre, birinci mertebeden kinetik parametrelere sahip bir ışıltama piki için maksimum olma koşulu denklem (3. 1) ile verilebilir (**Chen ve McKeever, 1997; Pagonis ve diğerleri, 2006**).

$$\frac{\beta \cdot E}{k \cdot T_m^2} = s \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T_m}\right) \quad (3. 1)$$

Bu eşitliğe göre; **b**'nin 1'e eşit olması durumunda  $T_m$  yalnızca  $\beta$  ile değişmeli ve sabit bir  $\beta$  için, diğer bütün deneysel parametrelerden bağımsız olmalıdır. **May ve Partridge (1964)** modeline göre, genel mertebeden kinetik parametrelere sahip bir ışıltama piki için maksimum olma koşulu denklem (3. 2) ile verilebilir (**Chen ve McKeever, 1997; Pagonis ve diğerleri, 2006**).

$$\frac{\beta E}{k T_M^2} = \frac{s'}{n_o^{1-b}} \exp\left(-\frac{E}{k T_M}\right) \left[1 + (b - 1) \frac{2k T_M}{E}\right] \quad (3. 2)$$

Ancak, **b** > 1 olduğu durumlarda artan radyasyon dozu ile  $T_m$  düşük sıcaklık bölgesine doğru hareket edecektir.

VD yönteminde, malzeme farklı dozlarda ışınlanır ve radyasyon dozunun  $T_m$  üzerindeki etkisi incelenir.  $T_m$ 'nin doz ile değişmediği durumda, ışıltama piki birinci mertebeden (**b** = 1);  $T_m$ 'nin doz ile değiştiği durumda ise ışıltama pikinin daha yüksek bir kinetik mertebeden (**b** > 1) olduğu sonucuna ulaşılır.

### 3.6.3 Değişken Isıtma Hızları Yöntemi

Değişken ısıtma hızları (Various Heating Rate, **VHR**) yönteminde,  $\beta$  ile  $T_m$  arasındaki ilişkiden faydalanılır. VHR yönteminde, farklı  $\beta$  değerleri için malzemenin ışıltama eğrileri ölçülür ve  $T_m$ 'nin değişimi dikkatlice izlenir.

Bu yöntem ile temel tuzak parametrelerinden E ve s hesaplanabilmektedir. VHR yönteminin matematiksel temeli, ışıltama pikinin maksimum olma koşuluna dayanmaktadır. Birinci mertebeden kinetik parametrelere sahip bir ışıltama piki için maksimum olma koşuluna denklem (3. 1) göre  $T_m$ , başlangıçta tuzaklara yakalanmış elektron konsantrasyonundan ( $n_o$ ) bağımsız, ancak  $\beta$  ile değişmektedir. Kinetik mertebesi **b** > 1 olan bir TL pik söz konusu ise;  $\beta$  doğrusal bir oranda artacak

biçimde seçilir ve her bir durumda ışıltama eğrileri ölçülürse,  $T_m$ 'nin sabit bir f faktörü kadar değiştiği gözlemlenir (**Chen ve Winer, 1970**). İşte bu değişim yardımı ile tuzak parametreleri hesaplanır. Burada, iki farklı deneysel yaklaşım kullanılmaktadır;

i) Numunenin ışıltama eğrisi farklı iki ısıtma hızında ( $\beta_1, \beta_2$ ) ölçülür,  $T_{m1}$  ve  $T_{m2}$  belirlenir. Deneysel ölçümler denklem (3.2)'de kullanılarak E hesaplanır (**Rasheedy, 2005**).

$$E = k \cdot \frac{T_{m1} \cdot T_{m2}}{T_{m1} - T_{m2}} \ln \left[ \frac{\beta_1}{\beta_2} \cdot \left( \frac{T_{m2}}{T_{m1}} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

ii) Birinci mertebeden maksimum olma koşulu denklem (3. 1) yeniden düzenlenirse denklem (3.3) elde edilir.

$$\ln \left[ \frac{T_m^2}{\beta} \right] = \frac{E}{k} \cdot \left( \frac{1}{T_m} \right) + \ln \left[ \frac{E}{k \cdot s} \right] \quad (3.3)$$

Burada, birçok  $\beta$  için  $\ln(T_m^2/\beta)$  nın  $(1/k \cdot T_m)$ 'ye göre grafiği çizilirse eğim E'ye eşit olur. Buradan E hesaplanır. Eğrinin yatay eksenini kestiği nokta  $\ln(E/k \cdot s)$ 'ye eşit olur ve buradan da s değeri hesaplanabilir.

Benzer tartışmalar genel mertebeden kinetik parametrelere sahip ışıltama eğrileri için yapılabilir. Bu durumda,  $\ln \left[ I_m^{b-1} (T_m^2/\beta)^b \right]$  nın  $(1/k \cdot T_m)$ 'ye göre grafiği çizilirse eğim E'ye eşit olur. Burada,  $b$  ışıltama pikinin kinetik mertebesi,  $I_m$  ise  $T_m$ 'deki pik şiddetidir. Eğrinin yatay eksenini kestiği nokta  $\ln[(N^{b-1}/s) \cdot (E/b \cdot k)^b]$ 'ye eşit olur ve buradan da s değeri hesaplanabilir. Burada N, toplam elektron tuzak konsantrasyonudur ve deneysel olarak ölçülebilir (**Chen ve Haber, 1968; Furetta ve diğerleri, 1999; McKeever, 1985**).



## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Deneyleerde Kullanılan Malzemeler, Sistemler

#### 4.1.1 Deney Malzemeleri

Bu doktora tez çalışmasında, NTE ile katkılanmış ve yüksek sıcaklıklarda katı hal reaksiyonu ile sentezlenmiş alüminat ve silikat bazlı ışıldarların bazı TL ve dozimetrik özellikleri araştırılmıştır. İlgili malzemeler Çizelge 4.1 :’de listelenmiş ve gereksiz tekrardan kaçınmak için numaralandırılmıştır.

**Çizelge 4.1 :** Doktora tez çalışmasında kullanılan malzemeler

Kod No.	Malzeme
N <sub>1</sub>	Sr <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> : Eu <sup>3+</sup> , Ho <sup>3+</sup>
N <sub>2</sub>	Sr <sub>2.99</sub> Ba <sub>0.01</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> : Eu <sup>3+</sup> , Ho <sup>3+</sup>
N <sub>3</sub>	Sr <sub>2.99</sub> Mg <sub>0.01</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> : Eu <sup>3+</sup> , Ho <sup>3+</sup>
N <sub>4</sub>	Ba <sub>3</sub> Al <sub>8</sub> O <sub>15</sub> : Eu <sup>3+</sup> , Dy <sup>3+</sup>
N <sub>5</sub>	Ca <sub>3</sub> Al <sub>8</sub> O <sub>15</sub> : Eu <sup>3+</sup> , Dy <sup>3+</sup>
N <sub>6</sub>	Mg <sub>3</sub> Al <sub>8</sub> O <sub>15</sub> : Eu <sup>3+</sup> , Dy <sup>3+</sup>
N <sub>7</sub>	Sr <sub>1.25</sub> Eu <sub>0.5</sub> Dy <sub>0.25</sub> SiO <sub>5</sub>
N <sub>8</sub>	Sr <sub>1.25</sub> Mg <sub>0.1</sub> Eu <sub>0.5</sub> Dy <sub>0.25</sub> SiO <sub>5</sub>
N <sub>9</sub>	Mg <sub>1.25</sub> Eu <sub>0.5</sub> Dy <sub>0.25</sub> SiO <sub>5</sub>

Stronsiyum alüminat esaslı N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub> ve N<sub>3</sub> ışıldar sistemleri, alüminat esaslı N<sub>4</sub>, N<sub>5</sub> ve N<sub>6</sub> ışıldar sistemleri ve silikat esaslı Eu<sup>3+</sup> katkılı Sr<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> ve Mg<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> (N<sub>7</sub>, N<sub>8</sub> ve N<sub>9</sub>) ışıldar sistemleri katı hal reaksiyonu yöntemi ile sentezlenmiş, sentez detayları, DTA/TG, X-ray kırınım ve fotoluminesans özellikleri literatürde bildirilmiştir (Öztürk, 2016a, 2016b, 2017).

#### 4.1.2 Numunelerin Deneylere Hazırlanması

Toz formundaki numuneler; 8±0.1 mg tartılarak, çapı 6.50 mm, yüksekliği 1 mm ve et kalınlığı 0.05 mm olan saf alüminyum kaplara (bkz. Şekil 4.1 : alt) yerleştirilmiştir. Basit titreşim ile sarsılarak homojen bir kalınlık dağılımı sağlanmaya çalışılmış ve ardından yaklaşık 10 kg/cm<sup>2</sup> basınç ile 5 s süre boyunca preslenmiştir. Uygulanan bu adımlar sayesinde, diğer deneysel işlemler boyunca toz numunelerde bir kütle kaybı

meydana gelmesinin önlenmesi amaçlanmıştır. Her bir deney döngüsü sonrası, numune yeniden tartılarak kütle kaybı yaşanıp yaşanmadığı kontrol edilmiştir.



**Şekil 4.1 :** Standart numune altlıkları.

#### **4.1.3 Tavlama Süreci**

Toz formundaki numuneler, üzerlerinde, sentezlenmelerinden deney aşamasına kadar geçen sürede, oluşması muhtemel çevresel radyasyon etkilerini gidermek için tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Tavlama işlemleri Termoluminesans Ölçüm Laboratuvarlarında bulunan Protherm marka manuel yüksek sıcaklık fırınında ve 550°C sıcaklıkta 15 dakika süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Tavlama işleminin ardından karanlık bir odaya alınan örneklerin, oda sıcaklığına ( $\sim 20 \pm 5^\circ\text{C}$ ) kadar doğal yollarla soğuması beklenmiştir.

#### **4.1.4 Işınlama Süreci, Beta ve Alfa Işınlama Sistemleri**

Deneyel çalışmalardaki tüm ışınlama işlemleri, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik Bölümü Termoluminesans Ölçüm Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Işınlama işlemleri, yaklaşık oda sıcaklığında ( $\sim 20 \pm 5^\circ\text{C}$ ) gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğuyan ışıldar numuneler ışınlama işlemine tabi tutulmuştur.

Radyasyon kaynakları bilgisayar tarafından kontrol edilebilen, 9010 Optical Dating System (Bkz. Şekil 3.3) içerisine yerleştirilmiştir. Işınlama süresi bilgisayar ortamında manuel olarak sisteme girilmekte ve bu süre sonunda otomatik olarak sonlandırılmaktadır. Bu tez çalışması sırasına  $\beta$ -ışınlama kaynağının doz hızı, silindirik şekilli kaynaklar için geometrik faktörler (Voss, 2001) ve ışınlama geometrisi göz önünde bulundurularak 6.07 Gy/dakika olarak hesaplanmıştır.

$\alpha$  ışınlama işlemleri bir vakum odası içerisinde gerçekleştirilmiştir.  $\alpha$  radyasyonunun hava içerisindeki ortalama serbest yolunun kısa olması nedeniyle, ışınlanacak numuneler öncelikle bir vakum odasına yerleştirilmiş ve vakum pompası yardımı ile  $p < 0.1$  mb basınç seviyesine ulaşıldıktan sonra ışınlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.5 Işınlama Sistemi Güvenliği

Işınlama sisteminin bulunduğu laboratuvar NÜKEN TENMAK'dan temin edilen NEB-224 Alan Monitörü (bkz. Şekil 4.2 :) ile sürekli olarak izlenmektedir. Bununla birlikte Termolüminesans Laboratuvarında çalışma yapan tüm araştırmacıların RaDos RA-60S kişisel dozimetre kullanmaları sağlanmıştır, (bkz. Şekil 4.3 :).



Şekil 4.2 : Termolüminesans laboatuvarında bulunan NEB-224 Alan Monitörü.



Şekil 4.3 : RaDos RA-60S kişisel elektronik dozimetre.

#### 4.1.6 Termolüminesans Ölçüm Sistemi

Deneyisel çalışmalardaki TL ölçümlene işlemleri Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik Bölümü Termolüminesans Ölçüm Laboratuvarlarında bulunan RA-04 manuel TLD Reader-Analyser sistemi kullanılmıştır.

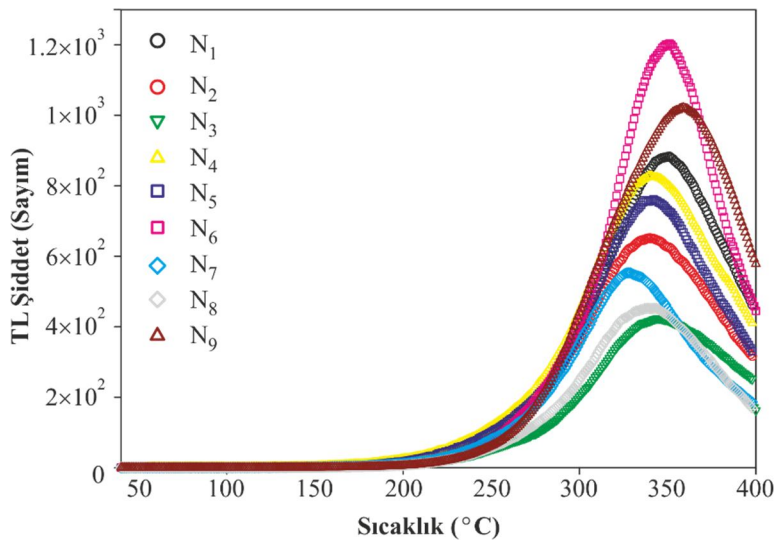
## 4.2 Deneysel Prosedür

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm TL deneylerde genel olarak aşağıda listelenen basamaklar takip edilmiştir;

- Toz formundaki örnekler  $8\text{ mg}$  olarak tartılmış ve alüminyum altlıklara yerleştirilmiştir.
- Örnekler  $10\text{ kg/cm}^2$  basınç altında  $5\text{ s}$  süre ile preslenmiştir.
- Örnekler  $550\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $15\text{ dakika}$  süre ile tavllanmışlardır (doğal ışıldama eğrisi deneyleri hariç)
- $90\text{Sr} - 90\text{Y}$   $\beta$ -radyasyon kaynağı ile belirli sürelerde ışınlanmışlardır.
- RA-04 manuel TLD Reader-Analyser ile ışıldama eğrileri ölçülmüştür.

## 4.3 Doğal Termoluminesans Işıldamanın Ölçülmesi

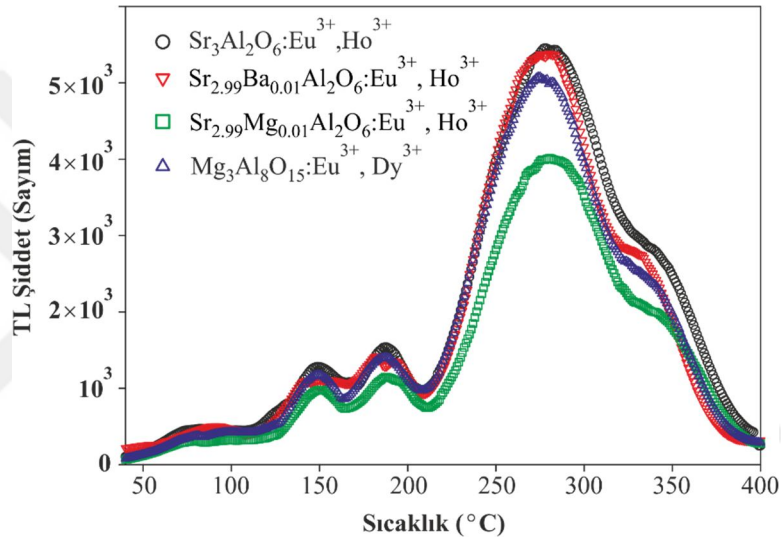
Numuneler, herhangi bir ısı işleme veya ışınlamaya maruz kalmadan önce, ışıldama eğrileri  $40 - 400\text{ }^\circ\text{C}$  aralığında ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 4.4 :’de sunulmuştur. Diğer taraftan, aynı numunelerin başka herhangi bir işlem uygulanmadan (ışınlama ya da tavlama) ışıldama eğrileri yeniden ölçüldüğünde Şekil 4.4 :’de gözlemlenen piklerin tamamen ortadan kalktığı görülmüştür.



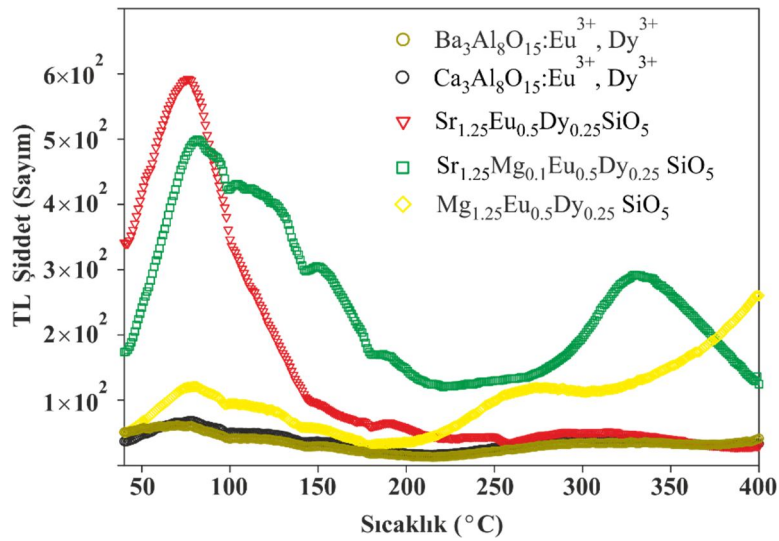
Şekil 4.4 : Numunelerin doğal TL ışıldama eğrileri.

#### 4.4 Termoluminesans Işıldama Eğrilerinin Ölçülmesi

Bu tez çalışması kapsamında TL özellikleri incelenen malzemelerin ışıldama eğrilerinin elde edilmesi için; öncelikle malzemeler Bölüm 4.1.3 'de açıklandığı şekilde, tavlama işlemine tabi tutulmuş ve ardından 300 s süre ile radyasyona maruz bırakılmıştır. Işınlamanın ardından TL ışıldama pikleri ölçülmüştür. Işınlamanın sonlandırılması ile TL okuma işleminin başlaması arasında, radyasyon güvenliği ve sistemin hazır hale getirilebilmesi nedeniyle, yaklaşık 60 s süre bulunmaktadır. TL okuma işlemi  $2^{\circ}\text{C} / \text{s}$  sabit ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ilk ışıldama eğrisi Şekil 4.5 : ve Şekil 4.6 : 'da sunulmuştur.



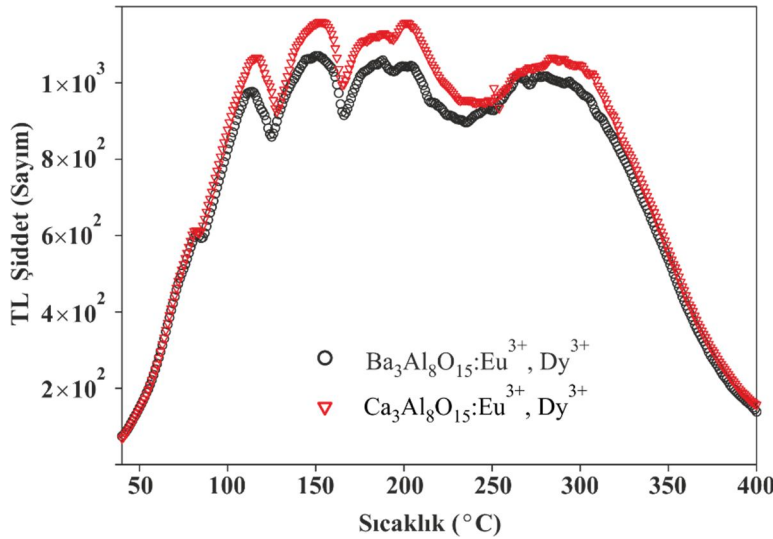
Şekil 4.5 : N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub> ve N<sub>6</sub> numunelerinin TL ışıldama eğrileri.



Şekil 4.6 : N<sub>4</sub>, N<sub>5</sub>, N<sub>7</sub>, N<sub>8</sub> ve N<sub>9</sub> numunelerinin TL ışıldama eğrileri.

$N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  ve  $N_6$  numunelerinin TL ışıltama eğrileri incelendiğinde, birbirinden bağımsız en az üç pikten meydana geldiği görülmektedir. Birinci pik  $151 \pm 2$  °C’de, ikinci pik  $190 \pm 2$  °C’de ve üçüncü yani ana pik ise  $280 \pm 2$  °C civarında ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, en şiddetli pikin yüksek sıcaklık bölgesinin uç kısmında, bağımsız bir pikin varlığı görülebilir. Diğer taraftan, ışıltama eğrisinin düşük sıcaklık bölgesinde ve pik 1 ile pik 2’nin ötesinde, şiddeti düşük piklerin varlığı da tespit edilmiştir.

$N_4$ ,  $N_5$ ,  $N_7$ ,  $N_8$  ve  $N_9$  numunelerinin TL ışıltama eğrileri incelendiğinde (Şekil 4.6 :),  $N_7$  ve  $N_8$  numaralı numuneler hariç oldukça zayıf ışıltama piklerine sahip oldukları görülmüştür. Buna karşın,  $N_7$  ve  $N_8$  numaralı numunelerin, düşük sıcaklık bölgesinde ( $T_m < 100^\circ\text{C}$ ) nispeten yüksek şiddetli piklere sahip oldukları, ancak bu piklerin kısa bir bekleme süresi (~1 saat) içerisinde tamamen gözden kaybolduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan,  $N_4$ ,  $N_5$ ,  $N_7$ ,  $N_8$  ve  $N_9$  numuneleri daha yüksek radyasyon dozlarında ışıltanmış ve analiz edilebilecek pik şiddetlerine ulaşım ulaşamadıkları test edilmiştir. Bu numuneler, 1 saat boyunca  $\beta$  radyasyonu ile ışıltanmış ve elde edilen ışıltama eğrilerinden bazıları Şekil 4.7 :’de verilmiştir. Bununla birlikte,  $N_4$ ,  $N_5$ ,  $N_7$ ,  $N_8$  ve  $N_9$  numunelerinin ışıltama eğrisindeki karmaşık yapı ve pik şiddetlerinin zayıf olması nedeniyle, bu tez çalışması kapsamında, TL yöntem ile deneysel olarak analiz edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır.



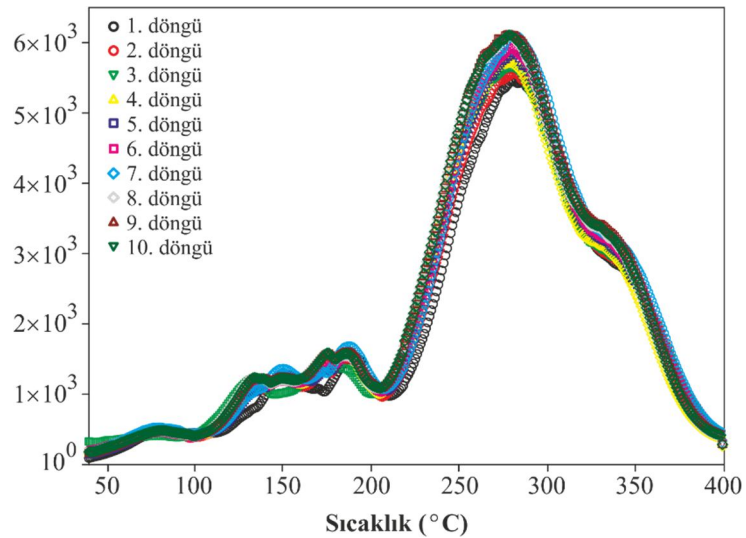
**Şekil 4.7 :**  $N_4$  ve  $N_5$  numunelerinin yüksek doz TL ışıltama eğrileri.

#### 4.5 Yeniden Kullanılabilirlik

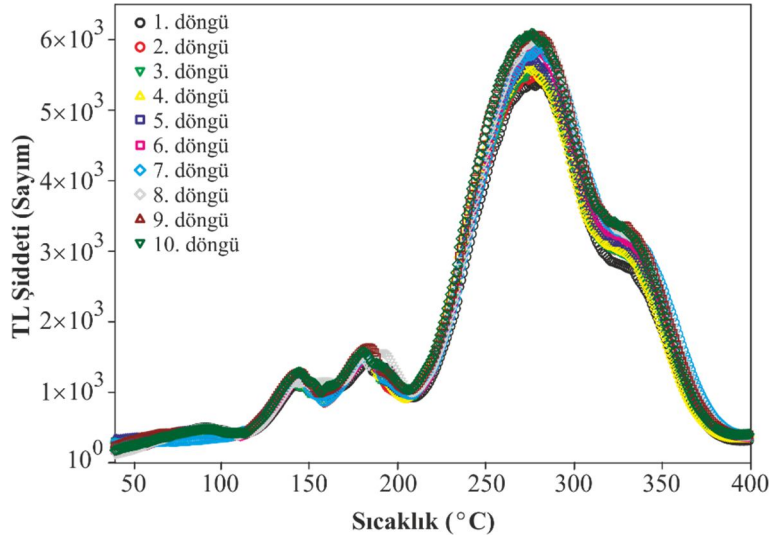
Bir ışıldar numunenin aynı doz şartlarında aynı TL ışıldama eğrilerini üretmesi malzemenin kullanılabilirliği açısından önemlidir. Bu nedenle, numunelerin ardışık ışınlama-okuma işlemlerinde kararlı davranması gerekmektedir. Bu amaçla malzemeler bir dizi ışınlama-okuma işlemine tabi tutularak her bir adımda, deneysel hatalar da göz önünde bulundurularak, özdeş ışıldama eğrilerine sahip olup olmadıkları incelenmiştir. Yeniden kullanılabilirlik testleri için tüm örnekler aşağıdaki deneysel basamaklar uygulanmıştır;

- Örnek belirli bir doz (süre) ile ışınlanmıştır.
- Işıma eğrisi kaydedilmiştir.
- İlk iki basamak, başka bir işlem yapılmadan (tavlama vb.), aynı doz koşullarında tekrar edilmiştir.

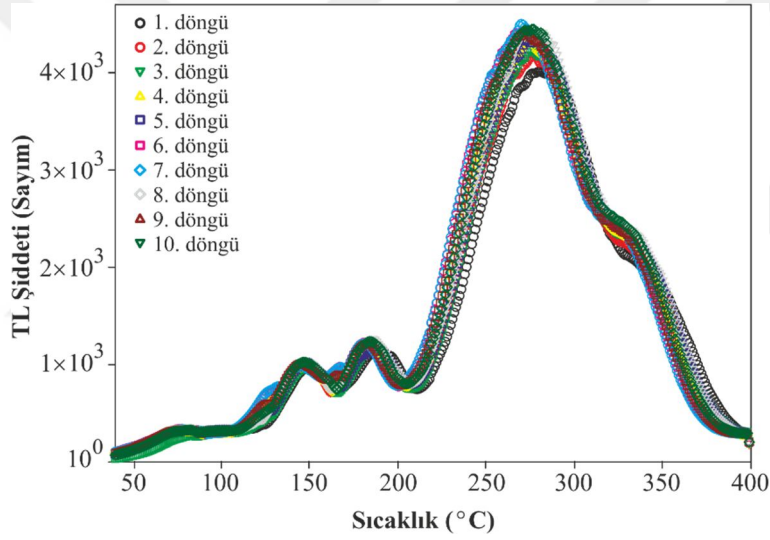
Öncelikle örnekler 300 s süre ile radyasyona maruz bırakılmış ve yukarıdaki izlek uygulanmıştır. Bu işlem 10 defa tekrar edilmiş ve elde edilen ışıma eğrileri  $N_1$  için Şekil 4.8 :’de,  $N_2$  için Şekil 4.9 :;  $N_3$  için Şekil 4.10 : ve  $N_6$  için Şekil 4.11 :’de sunulmuştur.



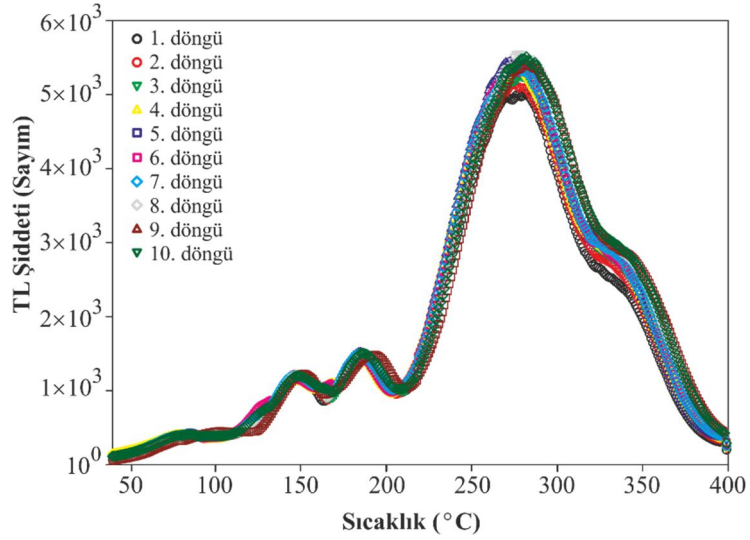
**Şekil 4.8 :**  $N_1$  numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ve tavlansız kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri.



**Şekil 4.9 :** N<sub>2</sub> numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ve tavlanmadan kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri.

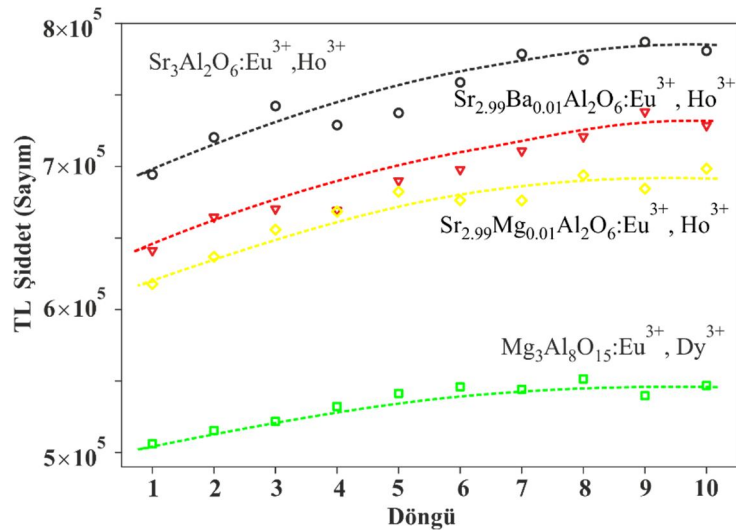


**Şekil 4.10 :** N<sub>3</sub> numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ve tavlanmadan kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri.



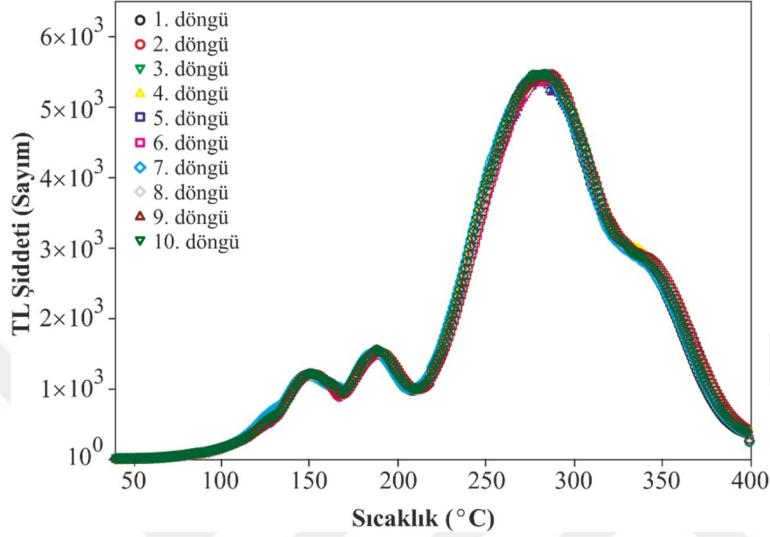
**Şekil 4.11** :  $N_6$  numunesinin aynı ışılama koşulları altında ve tavlansmadan kaydedilen ardışık ışıldama eğrileri.

Yeniden kullanılabilirlik, ışıldama eğrisinin altında kalan toplam alan yardımıyla da incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.12 : ile verilmiştir. Şekil 4.8 : , Şekil 4.9 : , Şekil 4.10 : ve Şekil 4.11 : 'den açıkça görülebileceği üzere, malzemenin ışılama pik yoğunluklarının, her bir döngü sonrasında arttığı ve yaklaşık 10 döngü sonunda bir dengeye yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç malzemelerin tavlama işlemi uygulanmadığında kalıntı radyasyon etkilerinin bir sonraki ölçümde ışıldama eğrisini etkilediğini ortaya koymuştur. Bu durum, Şekil 4.12 : 'de daha çarpıcı olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan, TL okuma işlemi sırasında deney sisteminin ulaşabildiği maksimum sıcaklığın (bizim sistemimizde maksimum  $400^{\circ}\text{C}$  ve 60 s'dir) tavlama işlemi için yeterli olmadığı gözlemlenmiştir.

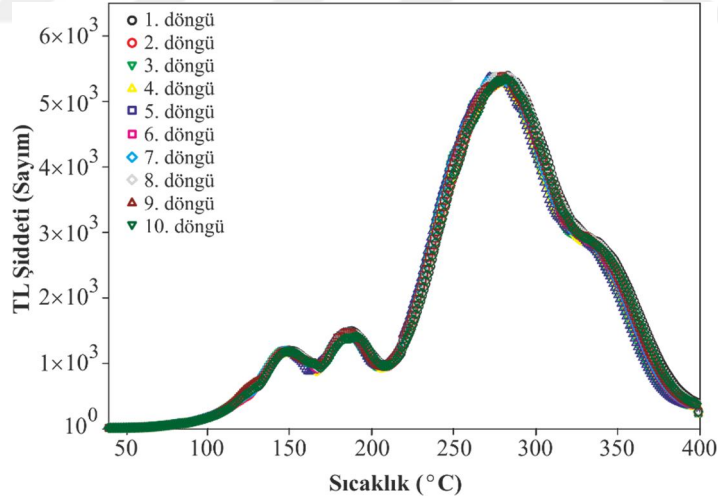


**Şekil 4.12** : Aynı ışılama koşulları altında ve tavlansmadan elde edilen ışıldama eğrilerinin, eğri altında kalan toplam alanlarının, her döngüdeki değişimi.

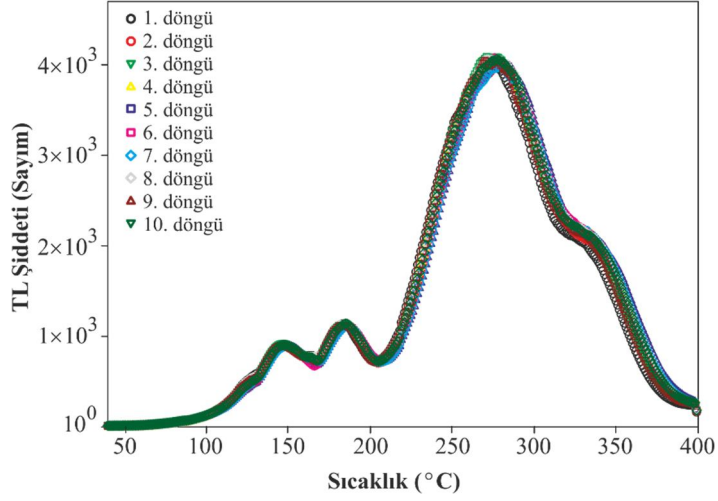
Yeniden kullanılabilirlik deneyleri her döngü sonrasında 550°C’de 15 dakika tavlama yapılarak tekrar edilmiştir. Numuneler 300 s süre ile ışınlanmış TL ışıldama eğrileri kaydedilmiş, tavllanmış ve bu döngü 10 kez tekrar edilmiştir. Elde edilen ışıma eğrileri  $N_1$  için Şekil 4.13 :’de,  $N_2$  için Şekil 4.14 :**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**’de,  $N_3$  için Şekil 4.15 :’de ve  $N_6$  için Şekil 4.16 :’da sunulmuştur.



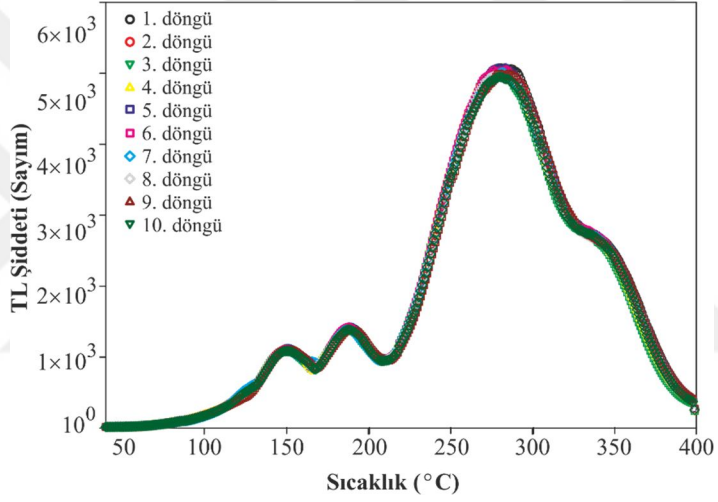
**Şekil 4.13 :** Her döngü sonunda tavllanmış  $N_1$  numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri



**Şekil 4.14 :** Her döngü sonunda tavllanmış  $N_2$  numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri

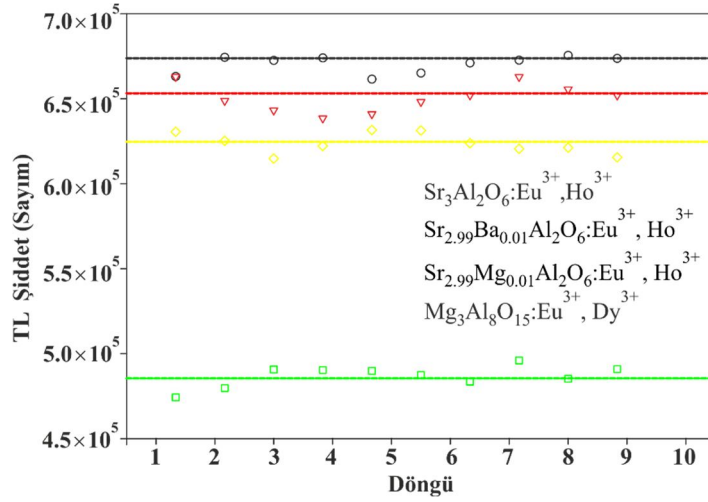


**Şekil 4.15 :** Her döngü sonunda tavlanmış  $N_3$  numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri



**Şekil 4.16 :** Her döngü sonunda tavlanmış  $N_6$  numunesinin aynı ışınlama koşulları altında ardışık ışıldama eğrileri

Malzemelerin yeniden kullanılabilirliği, ışıldama eğrilerinin altında kalan alan hesaplanarak incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.17 : ile verilmiştir.



**Şekil 4.17** : Her döngü sonunda tavllanmış ve aynı koşullarda ışınlanmış numunelerin, eğri altında kalan toplam alanlarının değişimi.

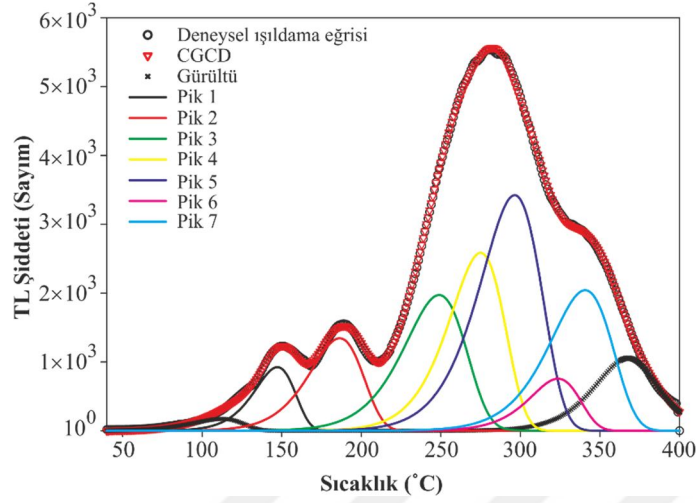
Bu sonuçlar, ardışık TL okuma işlemi sonrasında malzeme üzerinde kalan bir önceki ışınlamaya ait etkilerin, 550°C’de 15 dakika tavlama işlemi ile giderilmiş olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, ışıldama eğrisinin 80°C’ye kadar olan kısmında gözlemlenen piklerin, ışınlama işleminin tamamlanmasından sonra (saniyeler içerisinde) hızla sönümlendiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, malzemeler ışındandıktan hemen sonra, oda sıcaklığından ön tavlama sıcaklığına kadar, (80°C),  $\beta=2^\circ\text{C/s}$  oranında ısıtılarak 20s süreyle ısıl tavlama işlemi uygulanmıştır. Böylece 80°C’ye kadar gözlemlenen küçük piklerin ışıldama eğrisi üzerindeki etkileri giderilmiş olmaktadır.

#### 4.6 Bilgisayarlı Işıldama Eğrisi Ayırıştırma (Computerized Glow Curve Deconvolution, GGCD)

Bu çalışmada CGCD yöntemi, KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) tarafından geliştirilmiş olan TLAnal (**Chung ve diğerleri, 2005**) programı kullanılarak deneysel ışıldama eğrilerinin analizleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel ışıldama eğrilerinin davranışlarını açıklamak için, iyi bilinen, birinci mertebeden (**Randall ve Wilkins, 1945a, 1945b**) ve genel mertebeden (**May ve Partridge, 1964; Partridge ve May, 1965**) kinetik modeller seçilmiştir. Deneysel ışıldama eğrileri CGCD yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçlar  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  ve  $N_6$  için sırasıyla Şekil 4.18 ; Şekil 4.19 ; Şekil 4.20 ; ve Şekil 4.21 :’de sunulmuştur.

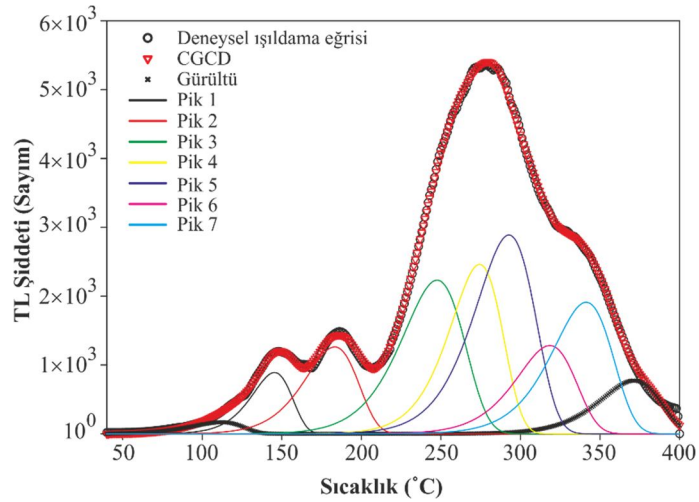
Diğer taraftan CGCD yöntemi ile ölçülen temel tuzak parametreleri Çizelge 4.2 ; Çizelge 4.3 ; Çizelge 4.4 ; ve Çizelge 4.5 :’de sunulmuştur.



Şekil 4.18 :  $N_1$  numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi.

Çizelge 4.2 :  $N_1$  numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri.

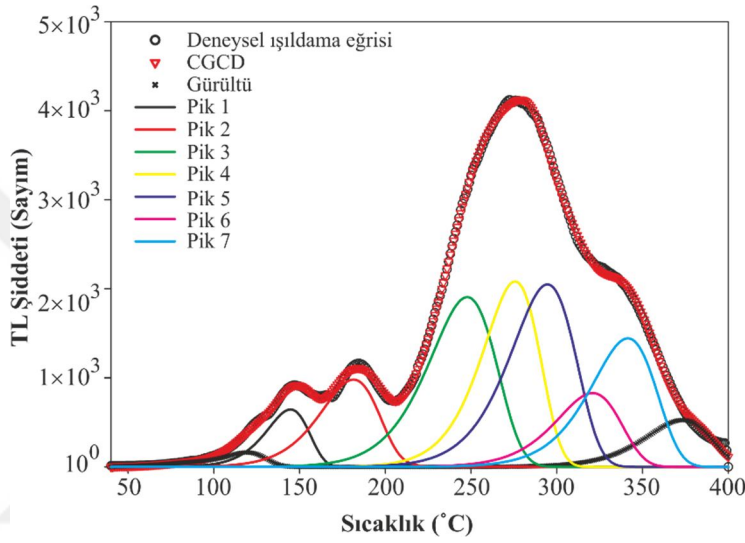
Pik No	E (eV)	$s(s^{-1})$	b	$T_{\text{mak}}(^{\circ}\text{C})$
1	$1.16 \pm 0.07$	$1.5 \pm 0.9 \times 10^{13}$	$1.01 \pm 0.09$	$146 \pm 2$
2	$1.05 \pm 0.06$	$4.0 \pm 0.9 \times 10^{10}$	$1.01 \pm 0.08$	$186 \pm 2$
3	$1.17 \pm 0.09$	$2.1 \pm 0.8 \times 10^{10}$	$1.07 \pm 0.09$	$249 \pm 2$
4	$1.45 \pm 0.08$	$2.5 \pm 0.9 \times 10^{12}$	$1.06 \pm 0.07$	$275 \pm 2$
5	$1.40 \pm 0.08$	$3.0 \pm 0.8 \times 10^{11}$	$1.02 \pm 0.09$	$294 \pm 2$
6	$1.62 \pm 0.09$	$5.5 \pm 0.8 \times 10^{12}$	$1.01 \pm 0.06$	$324 \pm 2$
7	$1.60 \pm 0.08$	$1.5 \pm 0.8 \times 10^{12}$	$1.12 \pm 0.09$	$341 \pm 2$



Şekil 4.19 :  $N_2$  numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi.

**Çizelge 4.3 :** N<sub>2</sub> numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri.

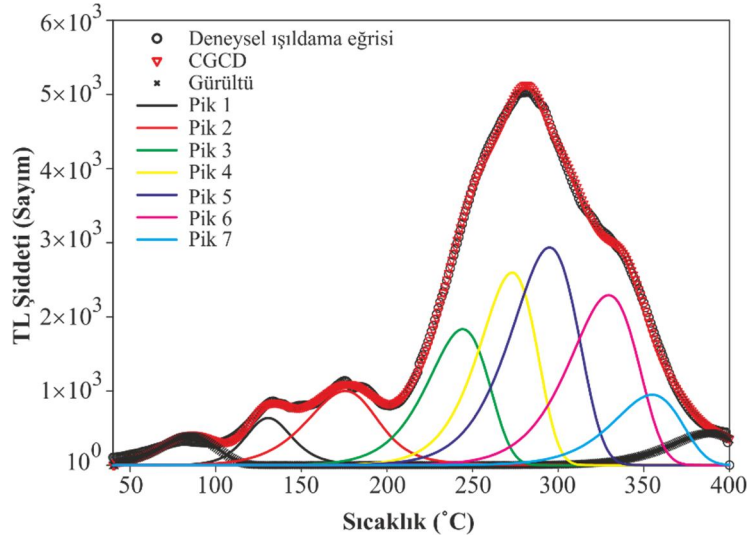
Pik No	E (eV)	s(s <sup>-1</sup> )	b	T <sub>mak</sub> (°C)
1	1.16±0.07	1.5±0.9×10 <sup>13</sup>	1.10±0.08	145±2
2	1.05±0.06	4.0±0.9×10 <sup>10</sup>	1.07±0.08	183±2
3	1.17±0.09	2.1±0.8×10 <sup>10</sup>	1.09±0.05	248±2
4	1.45±0.08	2.5±0.9×10 <sup>12</sup>	1.06±0.08	274±2
5	1.40±0.08	3.0±0.8×10 <sup>11</sup>	1.01±0.04	293±2
6	1.62±0.09	5.5±0.8×10 <sup>12</sup>	1.12±0.04	320±2
7	1.60±0.08	1.5±0.8×10 <sup>12</sup>	1.07±0.07	341±2



**Şekil 4.20 :** N<sub>3</sub> numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi.

**Çizelge 4.4 :** N<sub>3</sub> numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri.

Pik No	E (eV)	s(s <sup>-1</sup> )	b	T <sub>mak</sub> (°C)
1	1.16±0.07	1.5±0.9×10 <sup>13</sup>	1.42±0.08	145±2
2	1.05±0.06	4.0±0.9×10 <sup>10</sup>	1.01±0.09	181±2
3	1.17±0.09	2.1±0.8×10 <sup>10</sup>	1.29±0.08	248±2
4	1.45±0.08	2.5±0.9×10 <sup>12</sup>	1.09±0.09	276±2
5	1.40±0.08	3.0±0.8×10 <sup>11</sup>	1.01±0.07	295±2
6	1.90±0.09	5.5±0.8×10 <sup>12</sup>	1.04±0.07	321±2
7	1.60±0.08	1.5±0.8×10 <sup>12</sup>	1.06±0.09	341±2



Şekil 4.21 : N<sub>6</sub> numunesinin ışıldama eğrisinin CGCD analizi.

Çizelge 4.5 : N<sub>6</sub> numunesinin ışıldama piklerinin TL tuzak parametreleri.

Pik No	E (eV)	s(s <sup>-1</sup> )	b	T <sub>mak</sub> (°C)
1	1.16±0.07	1.5±0.9×10 <sup>13</sup>	1.42±0.08	144±2
2	1.05±0.06	4.0±0.9×10 <sup>10</sup>	1.01±0.09	176±2
3	1.17±0.09	2.1±0.8×10 <sup>10</sup>	1.29±0.08	244±2
4	1.45±0.08	2.5±0.9×10 <sup>12</sup>	1.09±0.07	273±2
5	1.40±0.08	3.0±0.8×10 <sup>11</sup>	1.01±0.07	295±2
6	1.90±0.09	5.5±0.8×10 <sup>12</sup>	1.04±0.07	329±2
7	1.60±0.08	1.5±0.8×10 <sup>12</sup>	1.06±0.09	355±2

CGCD analizleri incelendiğinde, örneklerin ışıldama eğrilerindeki pik 1 ve pik 2'nin bireysel pikler olduğu doğrulanmaktadır. Bununla birlikte, ana pikin gerçekte 3 farklı bireysel pikin süper pozisyonu olduğu görülmektedir. Ayrıca, ana pikin yüksek sıcaklık bölgesinde gözlemlenen çıkıntının, birbirinden bağımsız, fakat yakın konumlarda yerleşik 2 farklı pikin üst üste binmesi sonucu oluştuğu görülmüştür. Böylece, düşük sıcaklık bölgesinde kalan (80°C'ye kadar) ve 400°C sıcaklığın ötesindeki bölgeler hariç, deney malzemelerinin birbirlerinden bağımsız 7 farklı pikten oluştuğu ortaya konulmuştur.

#### 4.7 Pik Pozisyonu (T<sub>s</sub>-T<sub>m</sub>) Yöntemi

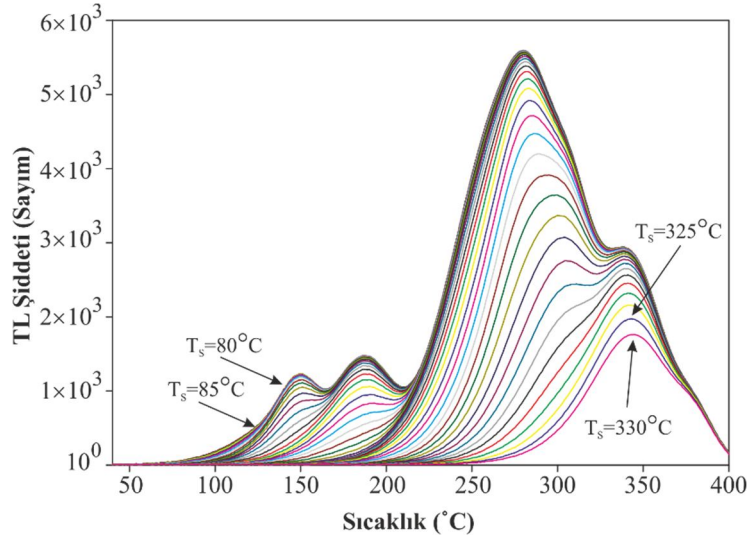
İşıldama eğrisinde birbirine yakın konumlarda ortaya çıkan ve bu nedenle de birbirlerinden ayırt edilemeyen ışıldama pikleri, bu yöntemle belirlenebilmektedir. T<sub>s</sub> - T<sub>m</sub> yönteminde, örnek, incelenecek ışıldama pikine göre düşük sıcaklık bölgesinde kalacak bir sıcaklığa (T<sub>s</sub>) kadar ısıtılır. Eğer T<sub>s</sub> süperpoze olmuş piklerden

birisinin maksimumuna ( $T_m$ ) karşılık gelir veya geçerse, bu pik sönümlenir ve ışıldama eğrisi üzerindeki etkisi azalır/kaybolur. Numune, oda sıcaklığına kadar soğutulur ve ışıldama eğrisi ölçülerek  $T_m$  belirlenir ve kaydedilir. Tüm basamaklar yeni bir  $T_s$  için tekrar edilir. Bu çalışma kapsamında  $T_s - T_m$  yöntemi ile ışıldama eğrisinin incelenmesinde aşağıdaki deneysel süreç uygulanmıştır.

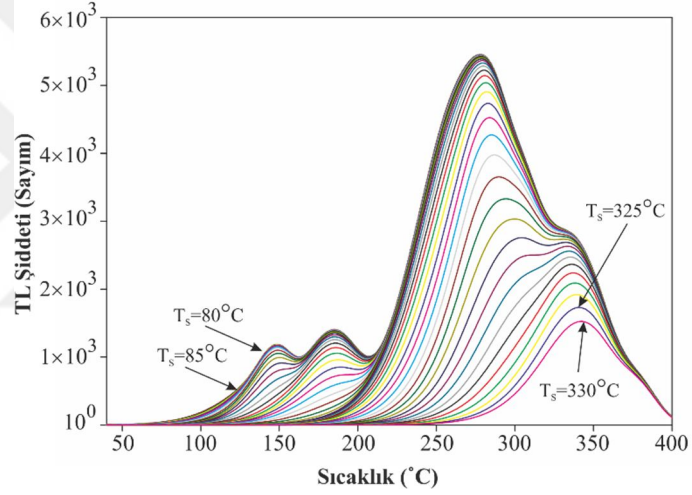
- Her bir örnek 4.1.3 başlığı altında detayları verildiği gibi tavllanmış ve ardından, 4.1.4 başlığı altında detayları verildiği gibi, 5 dakika süre ile ışınlanmıştır.
- Numuneler incelenen ışıldama pikinin düşük sıcaklık bölgesinde kalacak biçimde seçilen bir  $T_s$  sıcaklığına kadar  $2\text{ }^\circ\text{C/s}$  ısıtma hızında ısıtılmış ve bu sıcaklığa ulaştığında, oda sıcaklığına kadar soğutulmuşlardır.
- ışıldama eğrisi kaydedilirken  $T_m$  ölçülmüştür.
- Farklı bir  $T_s$  için süreç yenilenmiştir.

$T_s$  sıcaklıkları  $80\text{-}300\text{ }^\circ\text{C}$  aralığında ve  $5\text{ }^\circ\text{C}$  adımlarla değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.22 :, Şekil 4.23 :, Şekil 4.24 : ve Şekil 4.25 : 'de verilmiştir. Her bir  $T_s$  sıcaklığı için kaydedilen ışıldama eğrilerinden  $T_m$  sıcaklıkları ölçülmüş ve  $T_s - T_m$  grafiği  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  ve  $N_6$  için sırasıyla Şekil 4.26 :, Şekil 4.27 :, Şekil 4.28 : ve Şekil 4.29 : 'da verilmiştir.

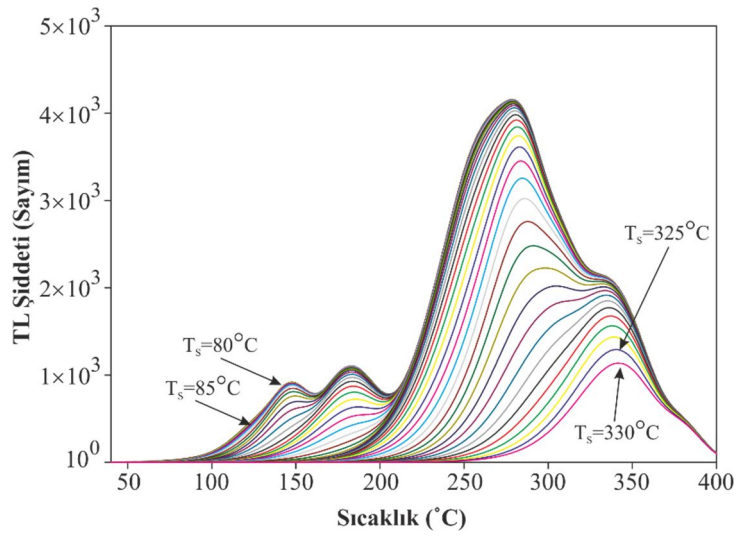
TL teoriye göre ( **Chen ve McKeever, 1997; McKeever, 1985**)  $T_s - T_m$  eğrisindeki her bir plato bir ışıldama pikini temsil eder. Eğer incelenen malzemede, sıcaklık ekseninde birbirlerinden ayırt edilebilecek kadar uzağa yerleşmiş birçok pik mevcut ise merdiven biçiminde basamaklı bir eğri elde edilir. Ancak, ışıldama eğrisi, pikler birbirinden ayırt edilemeyecek kadar karmaşık ise bu basamaklı yapı yerini eğimli platolara bırakır. Bu tez çalışması kapsamında incelenen sonuçlar  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  ve  $N_6$  kodlu numuneler için  $T_s - T_m$  grafiğinin ( $300\text{s}$  ışınlama ve  $2\text{ }^\circ\text{C/s}$  okuma oranında);  $136\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  civarında ve  $175\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  civarında birbirinden bağımsız 2 ışıldama pikine sahip olduğunu işaret etmektedir. Diğer taraftan  $281\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  civarındaki ana pik ise görece düşük sıcaklıklarla kararlı bir platoya sahiptir ancak, yüksek sıcaklıklarda ise eğimli bir platoya sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle ana pikin, birkaç bireysel pikin süperpozisyonu olduğu düşünülmektedir.



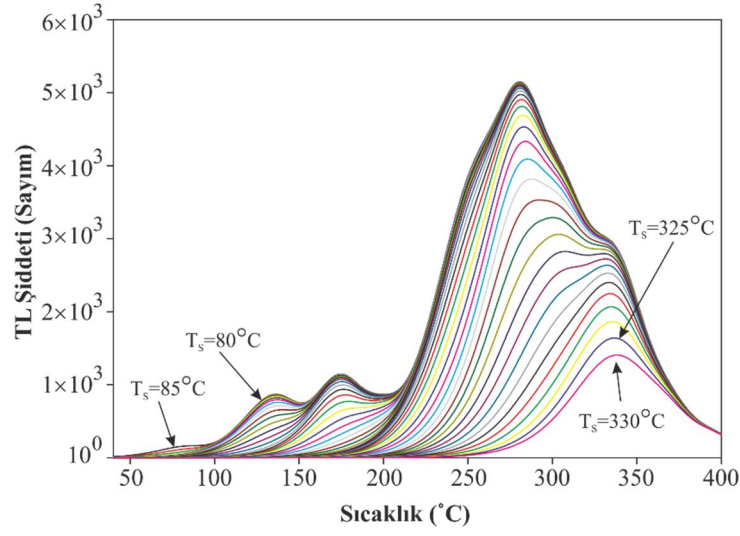
Şekil 4.22 :  $N_1$  numunesinin  $T_s - T_m$  deney sonuçları.



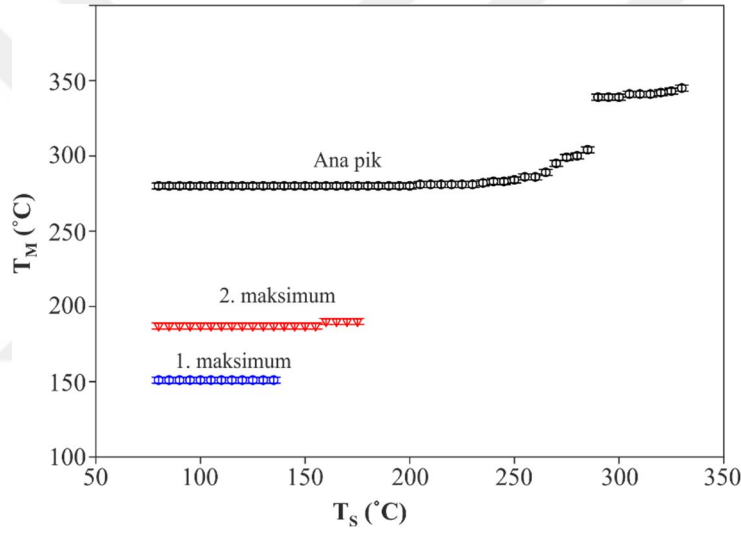
Şekil 4.23 :  $N_2$  numunesinin  $T_s - T_m$  deney sonuçları.



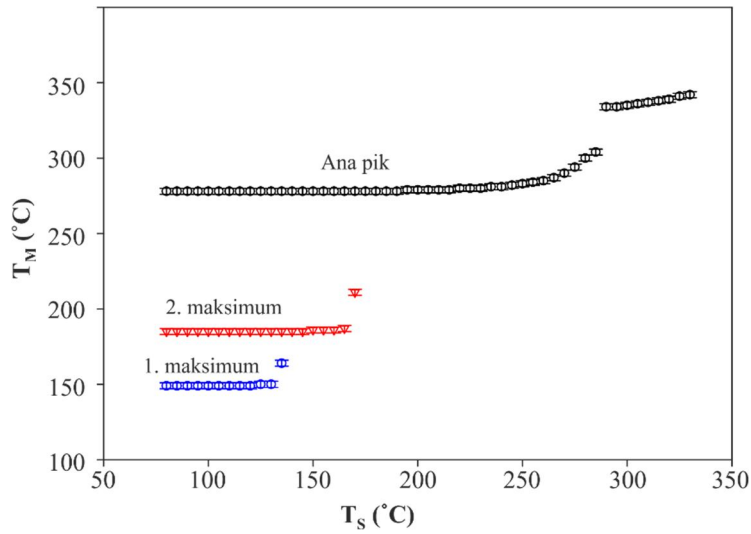
Şekil 4.24 :  $N_3$  numunesinin  $T_s - T_m$  deney sonuçları.



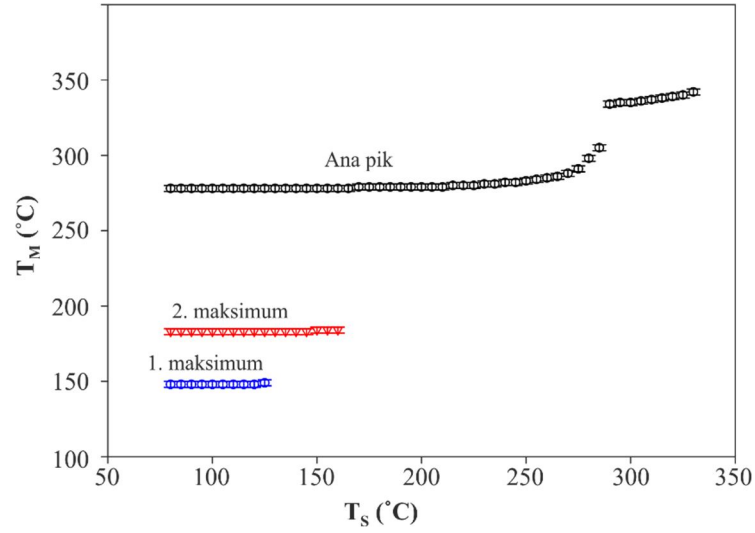
Şekil 4.25 :  $N_6$  numunesinin  $T_s - T_m$  deney sonuçları.



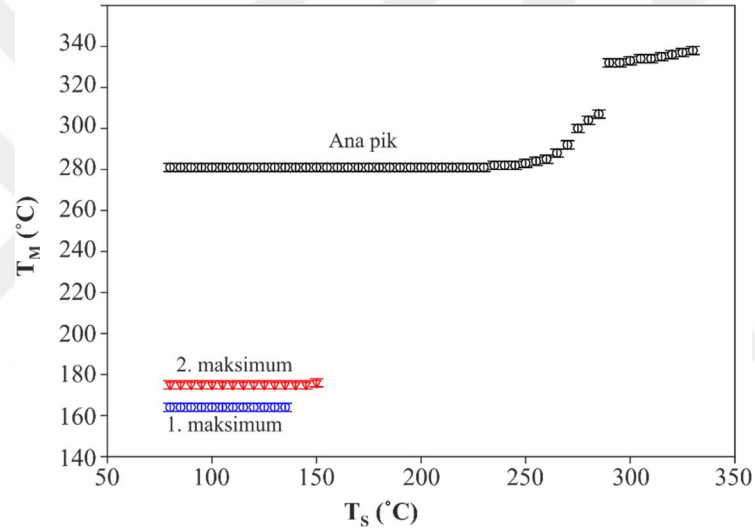
Şekil 4.26 :  $N_1$  numunesinin  $T_s - T_m$  analizi.



Şekil 4.27 :  $N_2$  numunesinin  $T_s - T_m$  analizi.



Şekil 4.28 :  $N_3$  numunesinin  $T_s - T_m$  analizi.

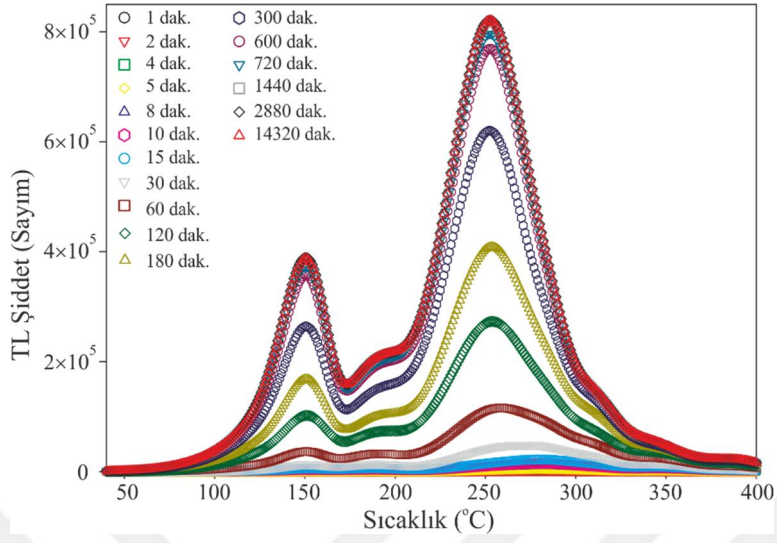


Şekil 4.29 :  $N_6$  numunesinin  $T_s - T_m$  analizi.

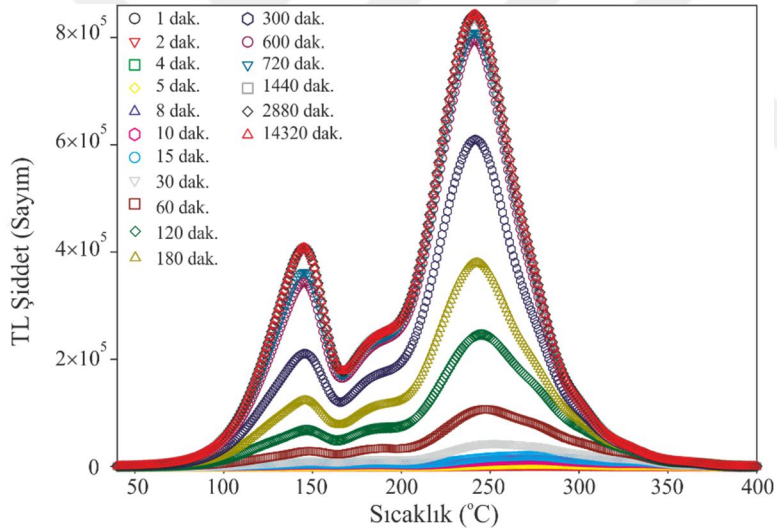
#### 4.8 Değişken Doz (VD) Yöntemi

Bu yöntem, ışıltama eğrisindeki piklerin maksimum sıcaklıklarında ( $T_m$ ), artan radyasyon dozu ile meydana gelen değişimin izlenmesine dayanmaktadır. Randall-Wilkins modeline (Randall ve Wilkins, 1945a, 1945b) göre birinci mertebeden kinetik parametrelere sahip bir elektron tuzağı tarafından üretilen pikin  $T_m$  değeri radyasyon dozundan etkilenmemeli ve sabit kalmalıdır. Diğer taraftan genel mertebeden kinetik modele göre (May ve Partridge, 1964; Partridge ve May, 1965) ise; kinetik mertebesi 1'den büyük bir elektron tuzağı tarafından üretilen ışıltama pikinin  $T_m$  değeri radyasyon dozu ile değişmektedir. VD yöntemi ile ışıma pikinin kinetik mertebesinin belirlenebilmesi için farklı radyasyon dozlarında ışıltanmış ve

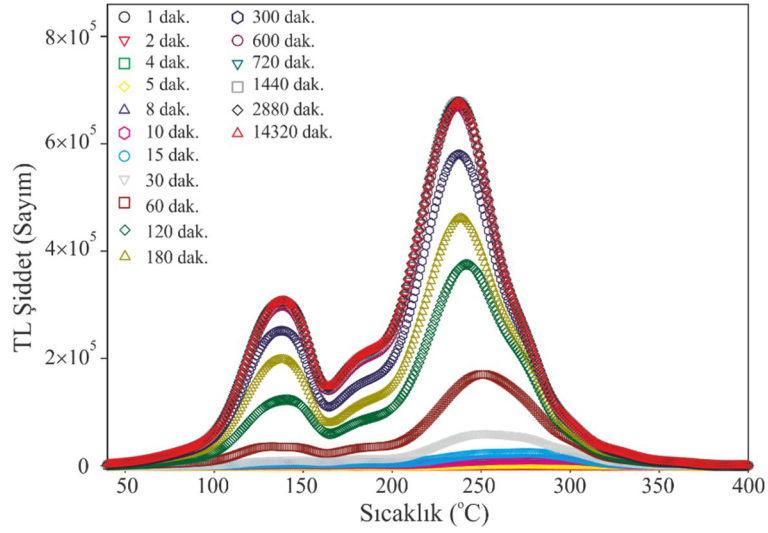
elde edilen ışıma eğrileri  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  ve  $N_6$  için Şekil 4.30 :, Şekil 4.31 :, Şekil 4.32 : ve Şekil 4.33 :’de sunulmuştur.



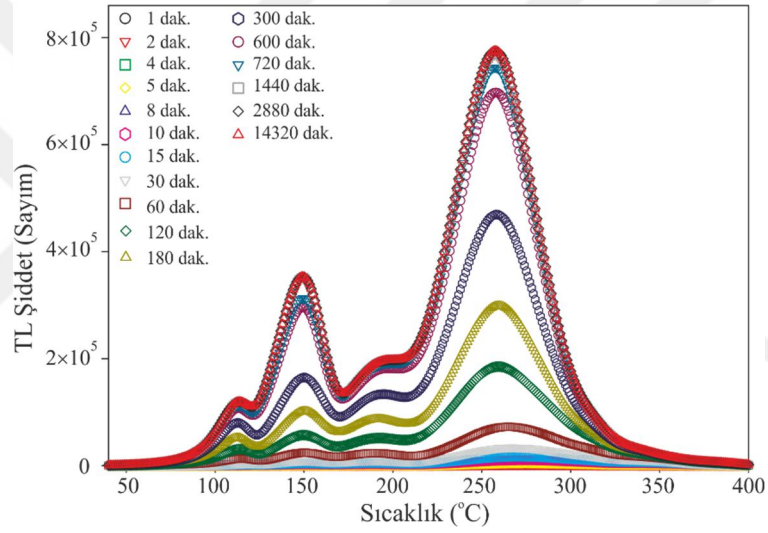
Şekil 4.30 :  $N_1$  numunesinin VD analizi.



Şekil 4.31 :  $N_2$  numunesinin VD analizi.



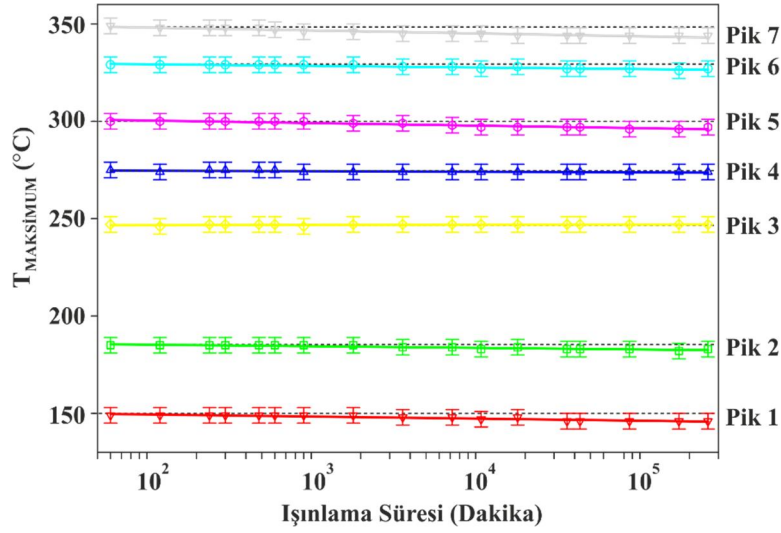
Şekil 4.32 :  $N_3$  numunesinin VD analizi.



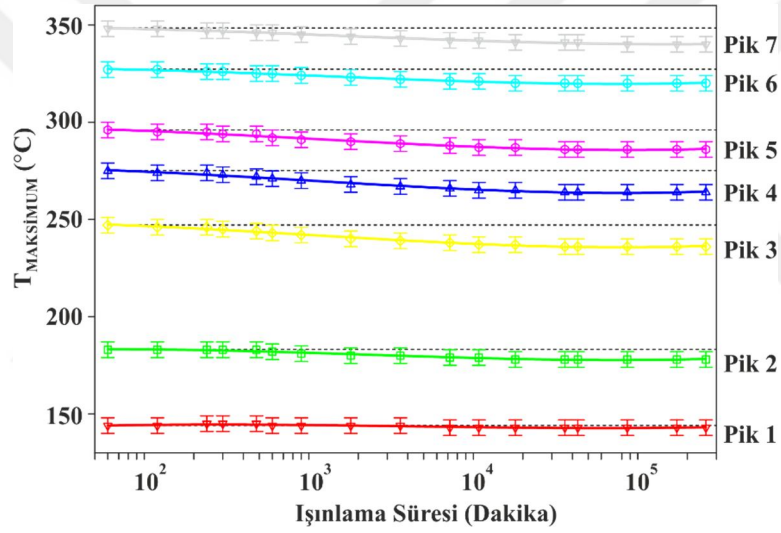
Şekil 4.33 :  $N_6$  numunesinin VD analizi.

Şekil 4.30 :, Şekil 4.31 :, Şekil 4.32 : ve Şekil 4.33 : incelendiğinde artan ışınlama dozu ile ışıldama eğrilerinin şiddetlerinin arttığı görülmektedir. Diğer taraftan, dikkatli bir gözlemci, ışınlama dozu arttıkça ana ışıldama pikinin düşük sıcaklık bölgesine doğru hareket ettiğini fark edebilir. İlâveten, yeterince yüksek ışınlama dozlarında ise, ışıldama eğrisindeki artışın yavaşladığı ve hatta doyuma (saturasyona) ulaştığı gözlemlenmiştir.

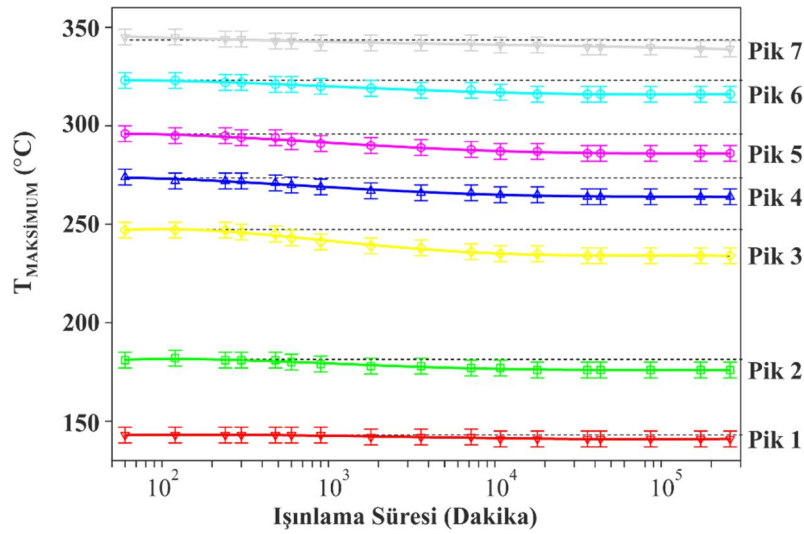
İşıldama eğrileri üzerinde daha detaylı analiz yapılabilmesi için VD deneylerinden elde edilen ışıldama eğrileri CGCD programı ile analiz edilmiş ve sonuçlar  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  ve  $N_6$  için sırasıyla, Şekil 4.34 :, Şekil 4.35 :, Şekil 4.36 : ve Şekil 4.37 :'da sunulmuştur.



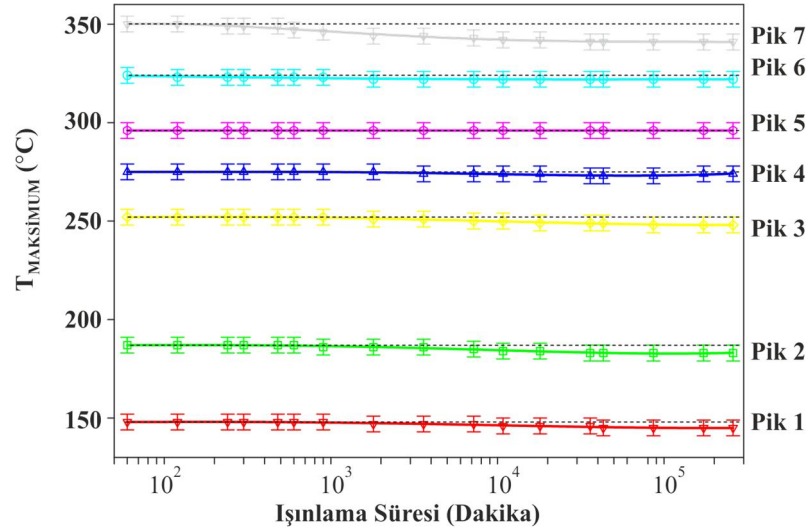
Şekil 4.34 :  $N_1$  numunesinin VD verilerinin CGCG analizi.



Şekil 4.35 :  $N_2$  numunesinin VD verilerinin CGCG analizi.



Şekil 4.36 :  $N_3$  numunesinin VD verilerinin CGCG analizi.

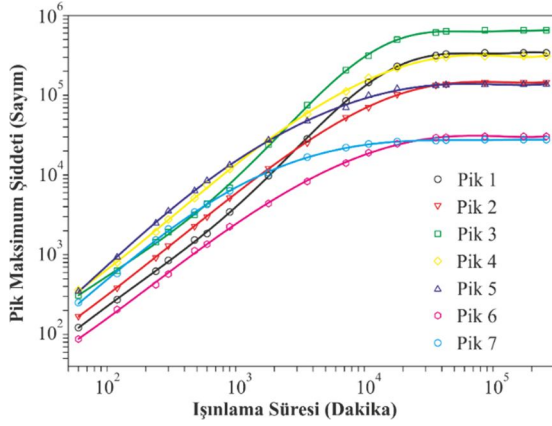


Şekil 4.37 :  $N_6$  numunesinin VD verilerinin CGCG analizi.

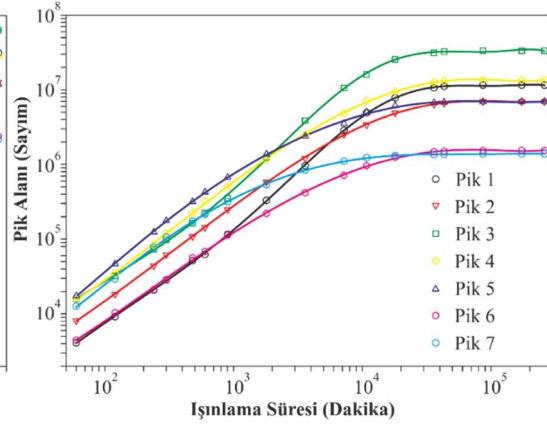
Şekil 4.34 :, Şekil 4.35 :, Şekil 4.36 : ve Şekil 4.37 : incelendiğinde,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  ve  $N_6$  numunelerinin ışıltama piklerine (pik 1 hariç) ait  $T_m$  sıcaklıklarının, artan ışıltama dozu ile düşük sıcaklık bölgesine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Bu değişimlerden bazıları deneysel hata sınırları içerisinde kalsa da genel bir azalma eğilimi olarak değerlendirilebilir. Diğer taraftan,  $N_1$  numunesine ait ışıltama pik maksimum şiddetlerinin ( $I_m$ ) radyasyon dozu ile değişimi Şekil 4.38 :, pik alanlarının ( $I_A$ ) doz ile değişimi Şekil 4.39 ;;  $N_2$  numunesindeki  $I_m$ 'lerin artan doz ile değişimi Şekil 4.40 :,  $I_A$ 'ların artan doz ile değişimi Şekil 4.41 ;;  $N_3$  numunesindeki  $I_m$ 'lerin artan doz ile değişimi Şekil 4.42 :,  $I_A$ 'ların artan doz ile değişimi Şekil 4.43 ;;  $N_6$  numunesindeki  $I_m$ 'lerin artan doz ile değişimi Şekil 4.44 :,  $I_A$ 'ların artan doz ile değişimi Şekil 4.45 : 'de sunulmuştur. Grafiklerden açıkça görülebilir ki, maksimum pik şiddeti ve pik alanı, artan ışıltama dozu ile artmaktadır. Tuzaklarda bulunan elektron konsantrasyonunun değerindeki değişim, pik maksimum sıcaklığını doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte, hem pik maksimum şiddetlerinin ve hem de alanlarının, artan ışıltama dozu ile doyuma ulaştığı görülmektedir. Böylece, her bir tuzak seviyesindeki toplam elektron tuzak konsantrasyonları deneysel olarak ölçülebilmiştir (Çizelge 4.6 :).

Çizelge 4.6 : Deneysel olarak ölçülen toplam elektron tuzak konsantrasyonu.

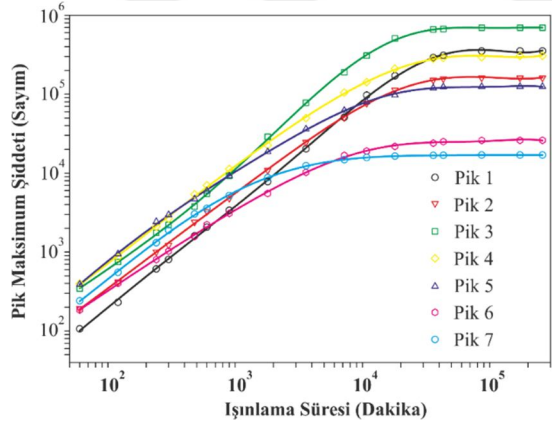
	Pik 1 ( $\times 10^7$ )	Pik 2 ( $\times 10^6$ )	Pik 3 ( $\times 10^7$ )	Pik 4 ( $\times 10^7$ )	Pik 5 ( $\times 10^6$ )	Pik 6 ( $\times 10^6$ )	Pik 7 ( $\times 10^6$ )
N1	1.15	6.96	3.34	1.35	6.95	1.54	1.39
N2	1.17	7.52	3.43	1.28	6.05	1.28	7.69
N3	0.79	6.33	2.87	0.89	4.18	1.29	1.26



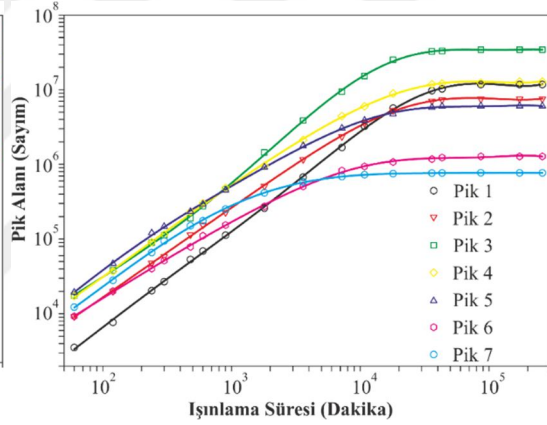
Şekil 4.38 :  $N_1$  numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi.



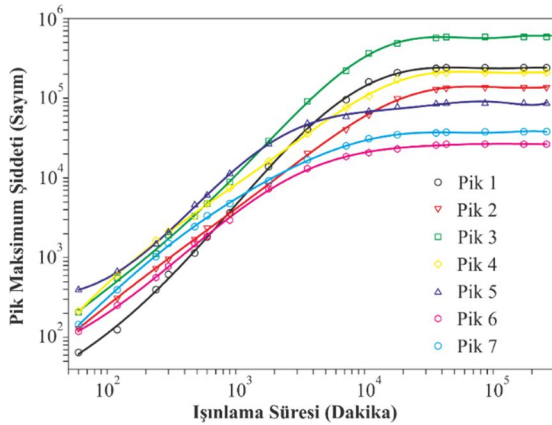
Şekil 4.39 :  $N_1$  numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi.



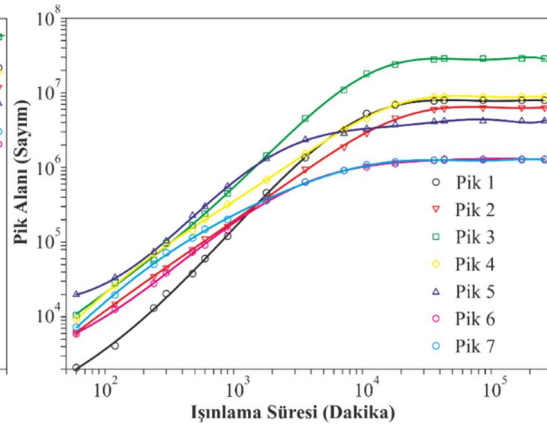
Şekil 4.40 :  $N_2$  numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi.



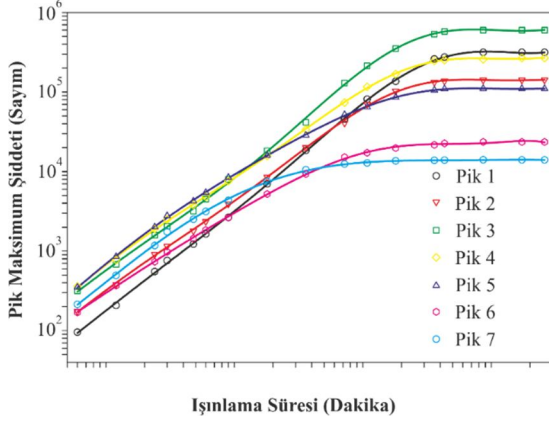
Şekil 4.41 :  $N_2$  numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi.



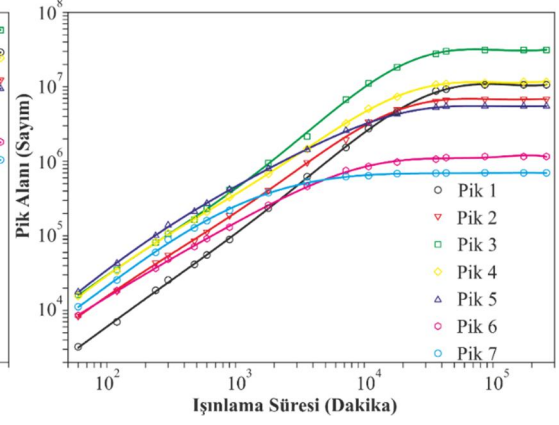
Şekil 4.42 :  $N_3$  numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi.



Şekil 4.43 :  $N_3$  numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi.



**Şekil 4.44 :**  $N_6$  numunesine ait ışıldama pik şiddetlerinin artan doz ile değişimi.



**Şekil 4.45 :**  $N_6$  numunesine ait ışıldama pik alanlarının artan doz ile değişimi.

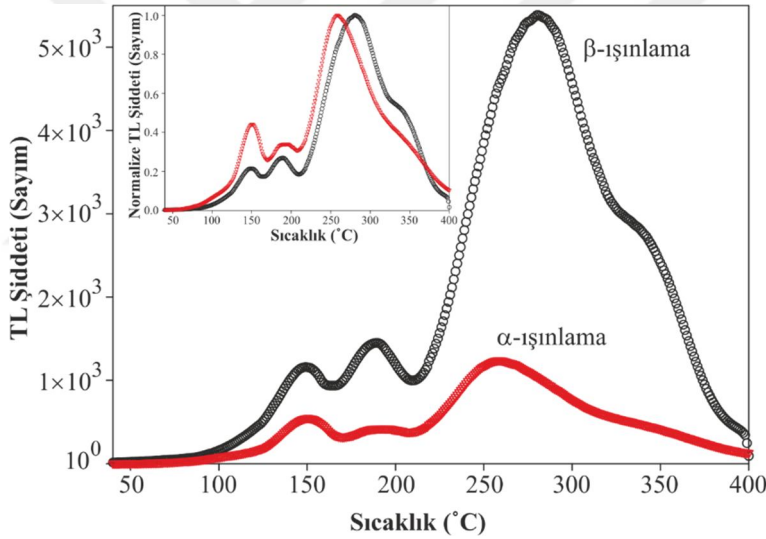
#### 4.9 Alfa Radyasyonunun Işıldama Eğrisine Etkisi

Bu çalışmada, alfa ve beta radyasyonu ile ışınlanmış numunelerin ışıldama eğrileri karşılaştırılmış ve radyasyon cinsinin ışıldama eğrisi üzerinde meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Farklı radyasyon çeşitlerinin malzemelerin ışıldama eğrilerinde bazı farklılıklar ortaya çıkardığı literatürde bildirilmiştir (**Bos ve diğerleri, 1995; Uzun ve diğerleri, 2016; Uzun ve diğerleri, 2018**). Malzemeler vakum odasında ( $p < 1$  mb) 1 saat süre alfa radyasyonu ile ışınlanış ve bu süre sonunda ışıldama eğrileri kaydedilmiştir. Sonuçlar, aynı numunenin beta radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrileri ile birlikte, Şekil 4.46 :, Şekil 4.47 :, Şekil 4.48 :, Şekil 4.49 : ve Şekil 4.50 : de sunulmuştur. Şekil 4.49 :’da, bu tez çalışması kapsamında ışıldama eğrisi analiz edilemeyecek kadar zayıf ve karmaşık olan  $N_5$  numunesinin, alfa ve beta radyasyonu ile ışılama sonrası elde edilen ışıldama eğrileri verilmiştir. Numunenin alfa radyasyonu ile ışınlanması sonrası elde edilen ışıldama eğrisi, beta radyasyonunda olduğu gibi oldukça karmaşıktır ve bu nedenle analiz edilememiştir.

Bununla birlikte, pik şiddetlerini kıyaslayabilmek için eğriler normalize edilmiştir. Ayrıca deneysel olarak ölçülen tüm ışıldama eğrileri CGCD yöntemi ile analiz edilmiş ve her bir bireysel ışıldama pikinin  $T_m$  değerlerinin alfa ve beta radyasyonu ile değişimi Çizelge 4.7 :, Çizelge 4.8 :, Çizelge 4.9 : ve Çizelge 4.10 : ile verilmiştir.

Alfa radyasyonu ve beta radyasyonu ile ışınlanmış örneklerin normalize edilmiş pik şiddetleri kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Alfa radyasyonu ile ışınlanan örneklerde birinci ve ikinci pik şiddetinin, ana pik şiddetine oranlarının (beta radyasyonu ile

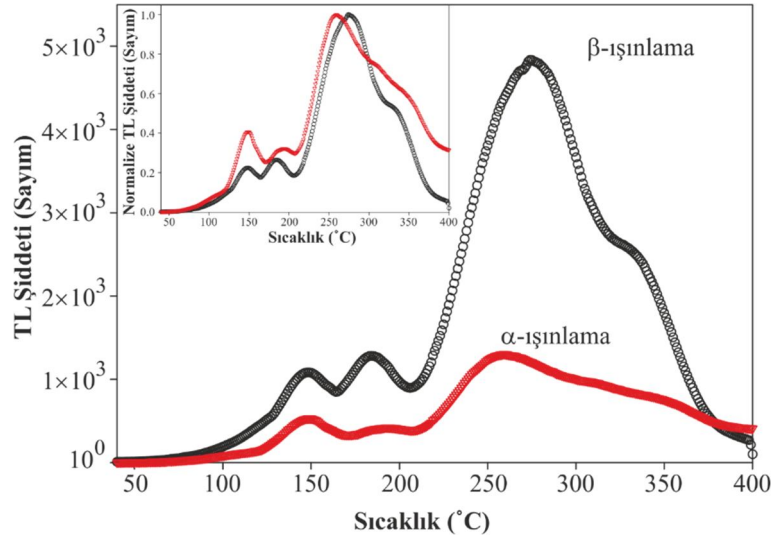
ışınlanmış örneklerin oranlarına göre) arttığı görülmektedir. Örneğin,  $\beta$  radyasyonu ile ışınlanmış  $N_1$  numunesinin ışıldama eğrisinde ana pikin şiddeti, pik 1 ve pik 2 den sırasıyla 4.65 ve 3.71 kat daha büyüktür. Oysa  $\alpha$  radyasyonu ile ışınlanmış  $N_1$  numunesinin ışıldama eğrisinde ana pikin şiddeti, pik 1 ve pik 2 den sırasıyla 2.26 ve 2.93 kat büyüktür. Ana pik şiddetinin, pik 1 ve pik 2'nin pik şiddetlerine oranı Çizelge 4.15 : 'de verilmiştir. Buna ek olarak, incelenen tüm numunelerde, alfa radyasyonu ile ışınlanmış örneklerin ışıldama eğrilerindeki ana pikin, düşük sıcaklık bölgesine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Buna karşın, ışıldama eğrisinde bireysel olarak ortaya çıkan pik 1 ve pik 2'nin  $T_m$  sıcaklıklarının değişmediği gözlemlenmiştir. Yalnızca ana pikte görülen bu etki, bireysel ışıldama piklerinin sıcaklık ekseninde düşük sıcaklık bölgesine doğru kayması ile açıklanamaz, çünkü Çizelge 4.7 :, Çizelge 4.8 :, Çizelge 4.9 : ve Çizelge 4.10 : 'dan açıkça görülebileceği gibi bireysel piklerin alfa radyasyonu ile yer değiştirmesi rastgele ve deneysel hata sınırları içerisindedir.



**Şekil 4.46 :**  $\alpha$  ve  $\beta$  radyasyonu ile ışınlanmış  $N_1$  numunesinin ışıldama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir.

**Çizelge 4.7 :**  $N_1$  numunesinin  $T_{mak}$  değerlerinin  $\alpha$  radyasyonu ile değişimi.

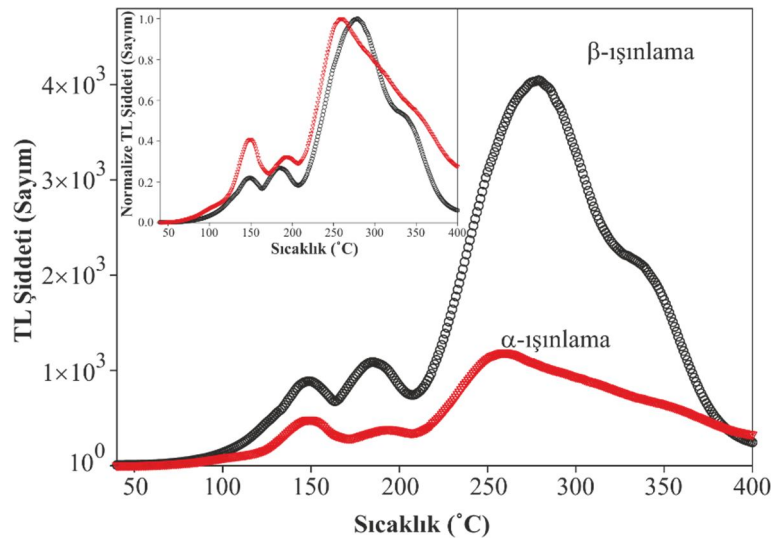
Pik No	$T_{mak}(^{\circ}C)$ $\beta$ radyasyonu	$T_{mak}(^{\circ}C)$ $\alpha$ radyasyonu
1	146±2	148±2
2	186±2	186±2
3	250±2	250±2
4	275±2	278±2
5	294±2	293±2
6	324±3	324±3
7	341±3	343±3



**Şekil 4.47 :**  $\alpha$  ve  $\beta$  radyasyonu ile ışınlanmış  $N_2$  numunesinin ışıltama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir.

**Çizelge 4.8 :**  $N_2$  numunesinin  $T_{\text{mak}}$  değerlerinin  $\alpha$  radyasyonu ile değişimi.

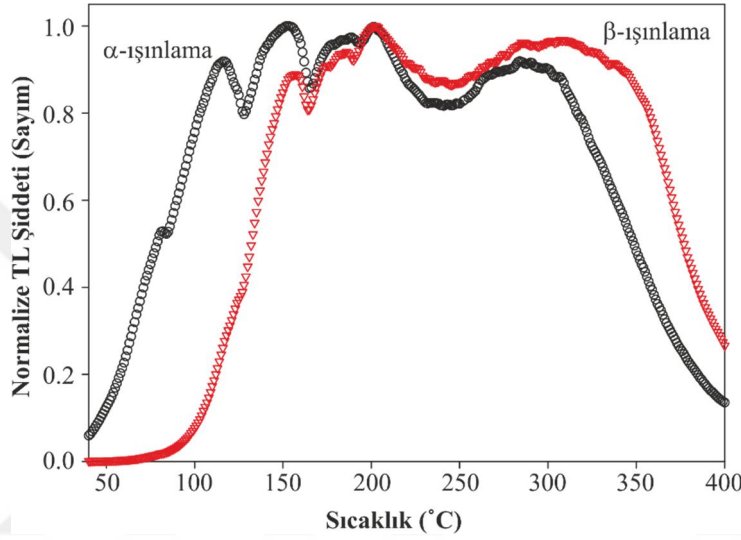
Pik No	$T_{\text{mak}}(^{\circ}\text{C})$ $\beta$ radyasyonu	$T_{\text{mak}}(^{\circ}\text{C})$ $\alpha$ radyasyonu
1	145±2	147±2
2	182±2	185±2
3	248±2	248±2
4	275±2	274±2
5	293±2	294±2
6	324±3	321±3
7	341±3	342±3



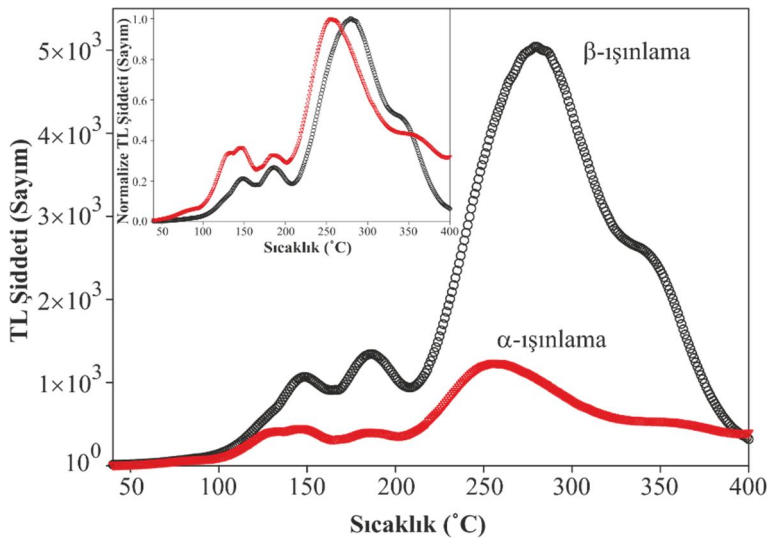
**Şekil 4.48 :**  $\alpha$  ve  $\beta$  radyasyonu ile ışınlanmış  $N_3$  numunesinin ışıltama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir.

**Çizelge 4.9 :**  $N_3$  numunesinin  $T_{\text{mak}}$  değerlerinin  $\alpha$  radyasyonu ile değişimi.

Pik No	$T_{\text{mak}}(^{\circ}\text{C})$ $\beta$ radyasyonu	$T_{\text{mak}}(^{\circ}\text{C})$ $\alpha$ radyasyonu
1	145±2	147±2
2	183±2	186±2
3	248±2	248±2
4	276±2	276±2
5	294±2	294±2
6	319±3	319±3
7	341±3	341±3



**Şekil 4.49 :**  $\alpha$  ve  $\beta$  radyasyonu ile ışınlanmış  $N_5$  numunesinin normalize edilmiş ışıldama eğrisi.



**Şekil 4.50 :**  $\alpha$  ve  $\beta$  radyasyonu ile ışınlanmış  $N_6$  numunesinin ışıldama eğrileri. Küçük grafik pik şiddetlerinin normlanması ile çizilmiştir.

**Çizelge 4.10 :** N<sub>6</sub> numunesinin T<sub>mak</sub> değerlerinin α radyasyonu ile değişimi.

Pik No	T <sub>mak</sub> (°C) β radyasyonu	T <sub>mak</sub> (°C) α radyasyonu
1	144±2	144±2
2	184±2	181±2
3	249±2	249±2
4	278±2	278±2
5	295±2	295±2
6	338±3	335±3
7	353±3	359±3

Diğer taraftan, ana piki oluşturan bireysel piklerden görece düşük sıcaklık bölgesinde ortaya çıkanların pik şiddetlerinde bir artış olduğu ve böylece ana pikin düşük sıcaklık bölgesine doğru kaydığı düşünülmektedir. CGCD analizlerinden, alfa ve beta radyasyonu ile ışınlanmış örneklerdeki birbirinden bağımsız her bir bireysel pikin alanları Çizelge 4.11 ;, Çizelge 4.12 ;, Çizelge 4.13 : ve Çizelge 4.14 :’de sunulmuştur. Çizelgelerden görülebileceği gibi, β radyasyonu ile ışınlanmış örneklerde, en şiddetli pik alanına sahip olan bireysel 5’inci pik iken; α radyasyonu ile ışınlanmış örneklerde ise en şiddetli pik alanına sahip olan bireysel 3’üncü piktir. Böylece, α radyasyonu ile ışınlanmış malzemelerde gözlemlenen; ana pikin düşük sıcaklık bölgesine kayması, değişen pik şiddetleri ile açıklanabilmektedir. Diğer taraftan, α radyasyonunun madde içerisine nüfuz edebilme oranı (doğrusal enerji transfer katsayısı ile ters orantılı), β radyasyonunda 100 kat daha azdır. Böylece, β radyasyonu, malzeme içerisinde daha derinlere nüfuz ederek buradaki tuzaklarla (pik 5 gibi -1.40±0.08 eV-) daha fazla etkileşebilirken, α radyasyonu daha sık bölgede yerleşmiş olan tuzakları (pik 3 gibi -1.17±0.09 eV-) daha şiddetli etkileyebilmektedir.

**Çizelge 4.11 :** N<sub>1</sub> numunesinin, β ve α radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları

Pik No	Norm. Alan β radyasyonu	Norm. Alan α radyasyonu
1	0.16	0.33
2	0.35	0.39
3	0.55	1.00
4	0.68	0.43
5	1.00	0.34
6	0.16	0.28
7	0.60	0.43

**Çizelge 4.12 :** N<sub>2</sub> numunesinin, β ve α radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları.

Pik No	Norm. Alan $\beta$ radyasyonu	Norm. Alan $\alpha$ radyasyonu
1	0.18	0.29
2	0.40	0.32
3	0.76	1.00
4	0.78	0.33
5	1.00	0.62
6	0.35	0.50
7	0.64	0.41

**Çizelge 4.13 :** N<sub>3</sub> numunesinin,  $\beta$  ve  $\alpha$  radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları.

Pik No	Norm. Alan $\beta$ radyasyonu	Norm. Alan $\alpha$ radyasyonu
1	0.20	0.30
2	0.44	0.32
3	0.95	1.00
4	0.89	0.48
5	1.00	0.49
6	0.38	0.72
7	0.70	0.08

**Çizelge 4.14 :** N<sub>6</sub> numunesinin,  $\beta$  ve  $\alpha$  radyasyonu ile ışınlanmış ışıldama eğrisindeki bireysel piklerin, en şiddetli pike göre normalize edilmiş alanları.

Pik No	Norm. Alan $\beta$ radyasyonu	Norm. Alan $\alpha$ radyasyonu
1	0.18	0.20
2	0.40	0.28
3	0.76	1.00
4	0.78	0.25
5	1.00	0.51
6	0.35	0.08
7	0.64	0.51

Diğer taraftan, bu sonucu destekleyici bir diğer kanıt ise  $\alpha$  ve  $\beta$  radyasyonu ile ışınlanmış örneklerin ışıldama eğrilerindeki ana pikin, pik1 ve pik 2'ye oranlarında gözlemlenen değişmedir.

**Çizelge 4.15 :** N<sub>1</sub> numunesinin T<sub>mak</sub> değerlerinin  $\alpha$  radyasyonu ile değişimi.

Numune	$I_{ana}/I_{pik-1}$ $\beta$ radyasyonu	$I_{ana}/I_{pik-1}$ $\alpha$ radyasyonu	$I_{ana}/I_{pik-2}$ $\beta$ radyasyonu	$I_{ana}/I_{pik-2}$ $\alpha$ radyasyonu
N <sub>1</sub>	4.65	2.26	3.71	2.93
N <sub>2</sub>	4.46	2.50	3.78	3.11
N <sub>3</sub>	4.57	2.45	3.72	3.10
N <sub>6</sub>	4.72	2.74	3.76	3.00

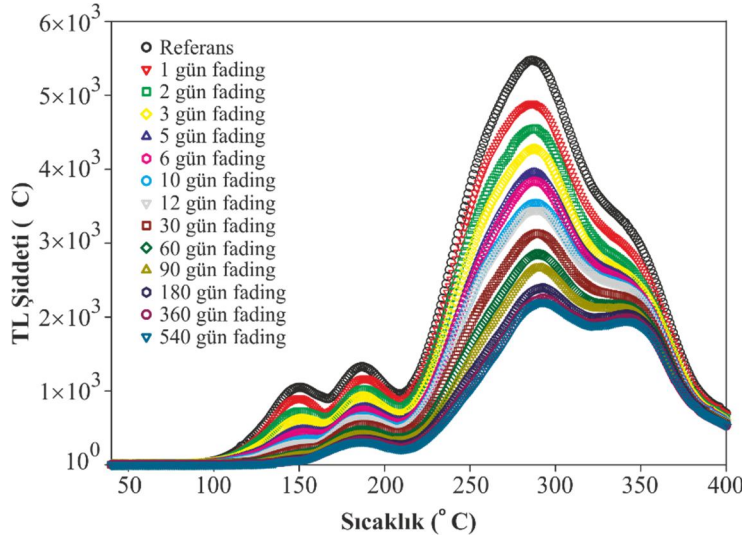
#### 4.10 Fading Etkisi

Termoluminesans malzemelerin kullanım alanlarını kısıtlayan en önemli parametre fading (solma) oranıdır. Fading, malzemedeki yayınlanan TL sinyallerinin okunmadan önce çeşitli mekanizmalarla sönümlenmesi olarak tanımlanabilir. Fading olayı, TL sinyalin sönümlenme mekanizmasının türüne bağlı olarak isimlendirilmektedir. Bunlardan ilki sıcaklıktır. TL malzeme ışılandıktan sonra eğer yüksek sıcaklığa maruz kalırsa, TL ışıldama şiddeti sıcaklık ile orantılı olarak sönümlenir. Buna, normal fading denir. Fading olayı ısı etkisi olmadan da gözlenebilmektedir ve bu durumda gözlemlenen fading anormal fading olarak isimlendirilir. Anormal fading, kristal iyonize olmayan bir radyasyon kaynağına maruz kalırsa da gözlenebilir. Diğer taraftan, TL malzeme herhangi bir dış etkene maruz kalmaksızın, kuantum mekanik tünelleme mekanizması ile de anormal fading gözlenebilmektedir (**Uzun ve diğerleri, 2011**).

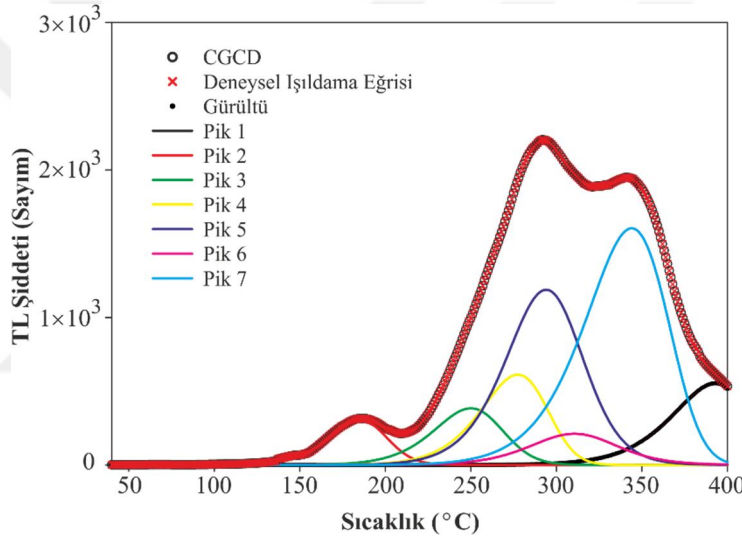
Bu çalışmada deney malzemelerinin fading özellikleri aşağıdaki deneysel basamaklar kullanılarak ölçülmüştür;

- Toz formundaki numuneler öncelikle Bölüm 4.1.3 'de açıklandığı şekilde, tavlama işlemine tabi tutulmuş ve ardından 300 s süre ile radyasyona maruz bırakılmıştır.
- Işıldama eğrileri elde edilmiştir.
- Malzemeler yeniden tavlama işlemine tabi tutulmuş ve ardından aynı ışınlama koşullarında yeniden ışınlanmışlardır.
- Numuneler oda sıcaklığında, kuru ve karanlık bir ortamda; herhangi bir radyasyon ve ısı kaynağına maruz kalmayacak şekilde belirli sürelerde depolanmışlardır.
- Belirlenen sürenin sonunda ışıldama eğrileri yeniden ölçülmüştür.

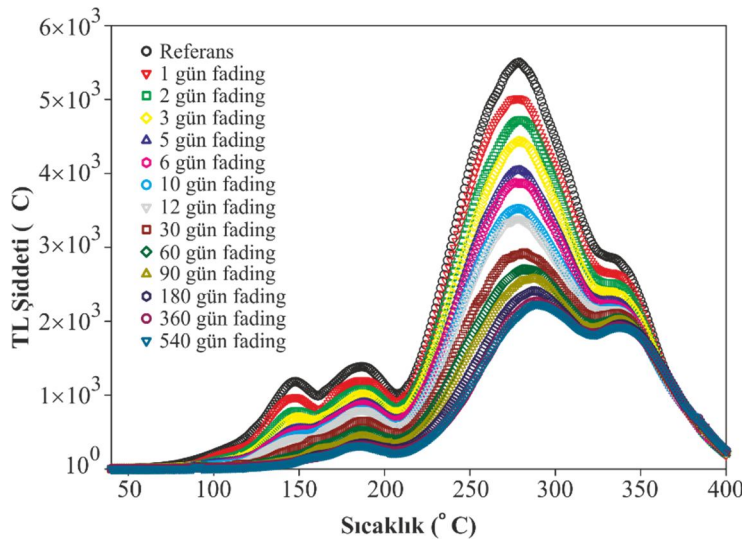
Depolama; 1, 2, 3, 5, 6, 10, 12, 30, 60, 90, 180, 360 ve 540 gün olarak seçilmiştir. Bu süreler sonrasında örneklerin ışıldama eğrileri ölçülmüş ve sırasıyla Şekil 4.51 :, Şekil 4.53 :, Şekil 4.55 : ve Şekil 4.57 : 'de sunulmuştur. Fading deneylerinden, her bir bekleme süresi sonunda malzemelerin pik şiddetlerinde bir sönümlenme olduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu fading oranlarının hangi tür (normal-anormal) fading kapsamında değerlendirilmesi gerektiğinin anlaşılabilmesi için detaylı bir analiz yapılmıştır. Bu amaçla, her bir ışıldama eğrisi CGCD tekniği ile analiz edilmiş ve karmaşadan kaçınabilmek amacıyla sadece 540 günlük fading deneylerinin analiz sonuçları Şekil 4.52 :, Şekil 4.54 :, Şekil 4.56 : ve Şekil 4.58 : 'de sunulmuştur.



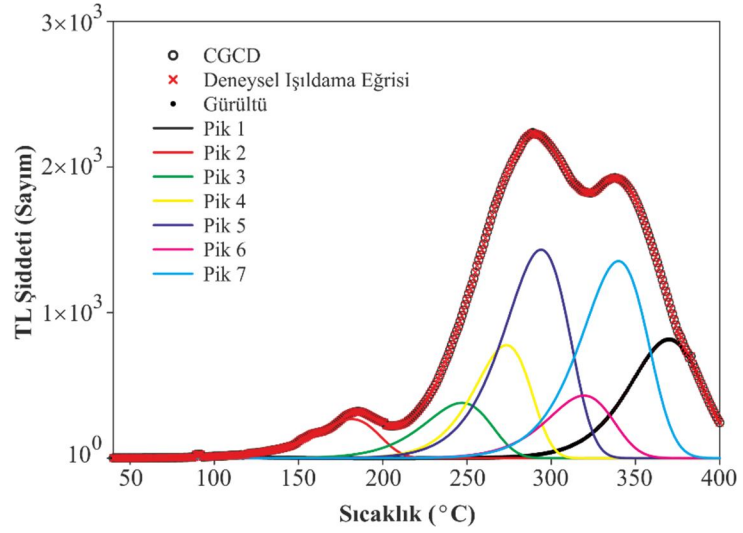
Şekil 4.51 :  $N_1$  numunesinin fading deneyleri.



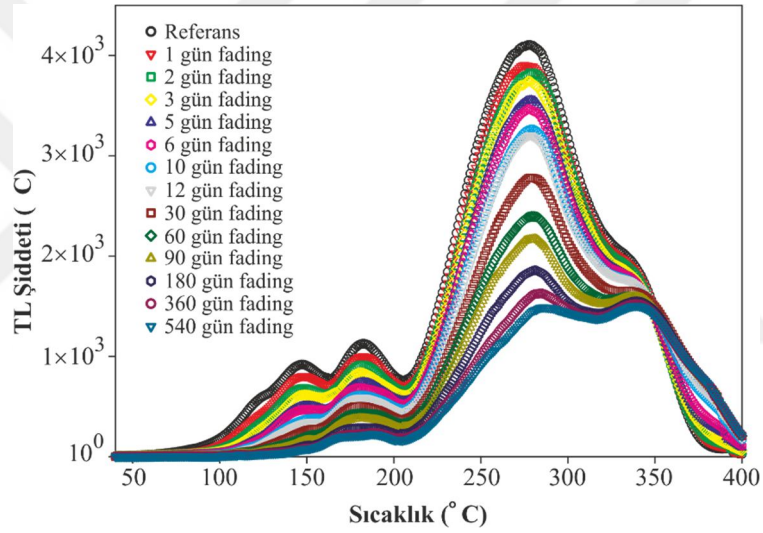
Şekil 4.52 :  $N_1$  numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi.



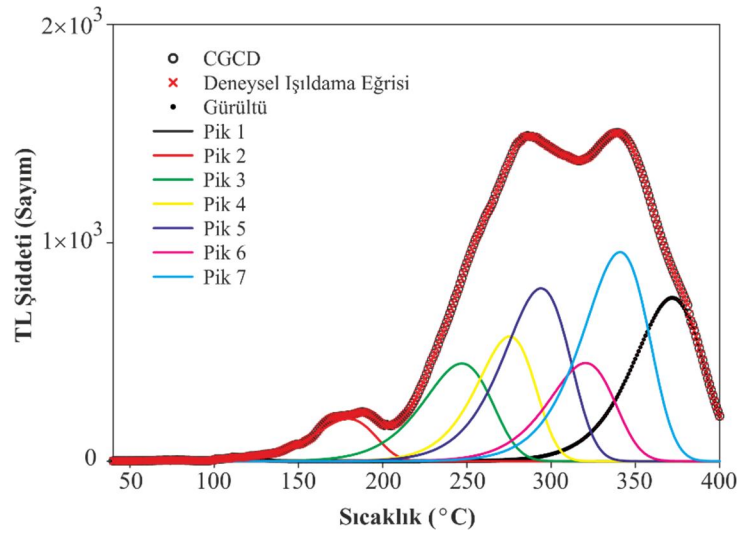
Şekil 4.53 :  $N_2$  numunesinin fading deneyleri.



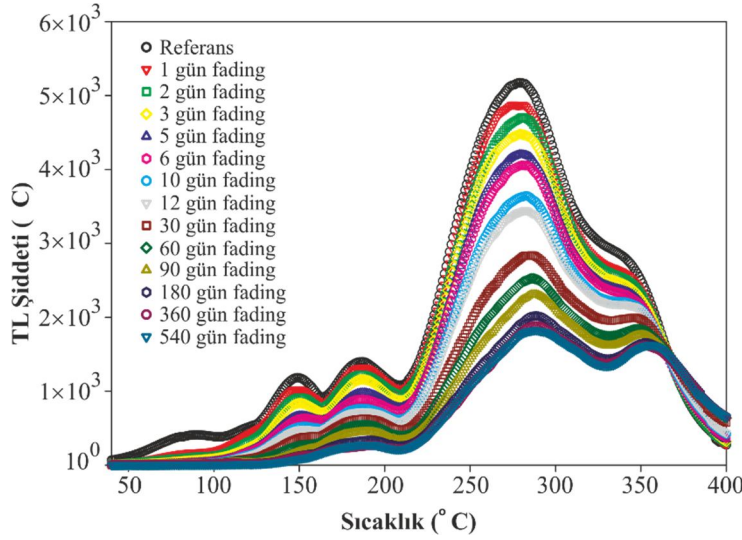
Şekil 4.54 :  $N_2$  numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi.



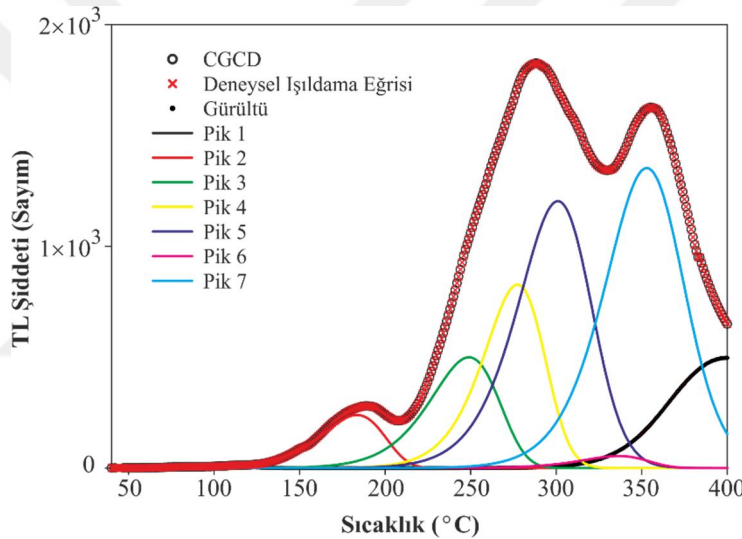
Şekil 4.55 :  $N_3$  numunesinin fading deneyleri.



Şekil 4.56 :  $N_3$  numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi.



Şekil 4.57 :  $N_6$  numunesinin fading deneyleri.



Şekil 4.58 :  $N_6$  numunesinin 540 günlük fading deney sonuçlarının CGCD yöntemi ile analizi.

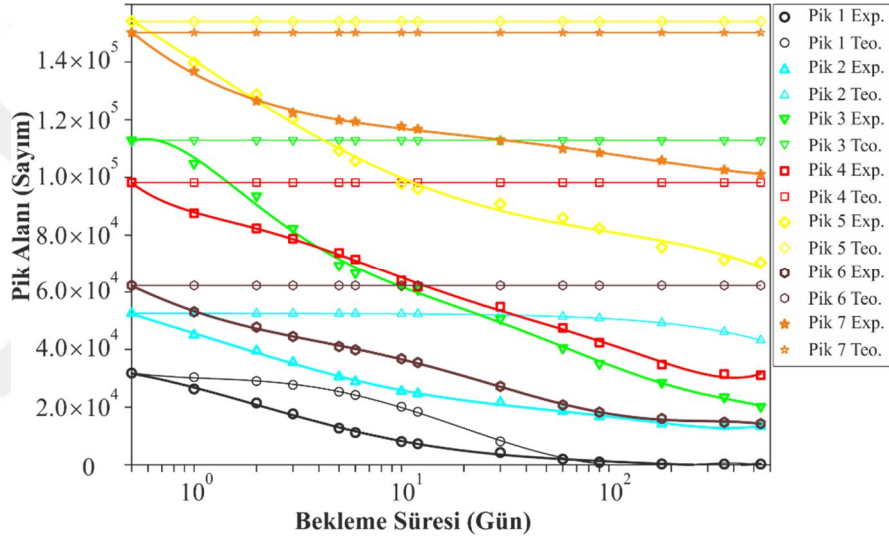
Termodinamik yasalar çerçevesinde, bir elektronun aktivasyon enerjisi  $E$  olan bir tuzaktaki ortalama ömrü denklem 4.1 ile verilir (McKeever, 1985).

$$\tau = s^{-1} \cdot \exp(E/k.T) \quad (4.1)$$

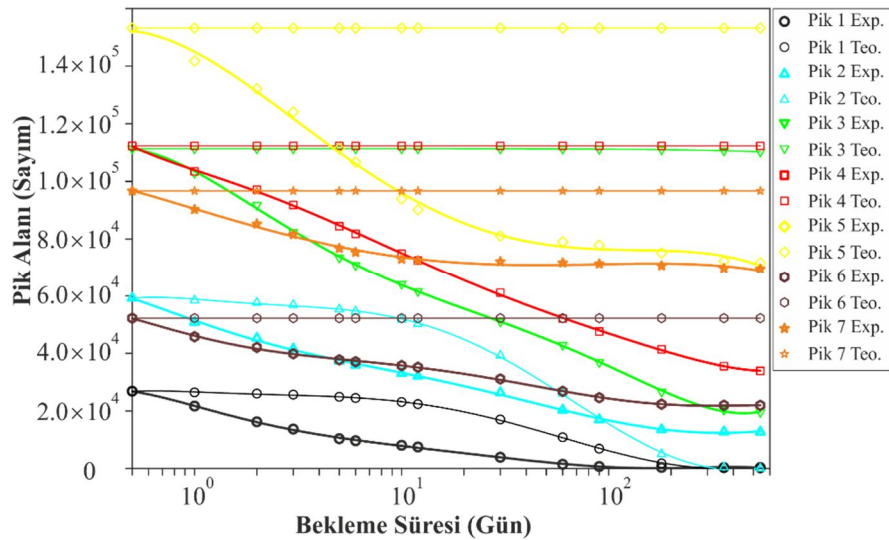
Burada,  $s$ , frekans faktörü,  $T$  sıcaklık ve  $k$  Boltzmann sabitidir. Denklem 4.1 kullanılarak her bir pike karşılık gelen tuzaklardaki elektronların yarı ömürleri ve beklenen normal fading oranları hesaplanmıştır. Tüm fading deneylerine ait CGCD analizlerinin sonuçları ve hesaplanan fading oranları Şekil 4.59 :, Şekil 4.60 :, Şekil 4.61 : ve Şekil 4.62 :'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Her bir tuzak seviyesindeki elektronlar için ortalama ömür ( $\tau$ ) ve bozunma sabiti ( $\lambda$ ), numunelere ait tuzak parametreleri Çizelge 4.2 :, Çizelge 4.3 :, Çizelge 4.4 : ve Çizelge 4.5 :'den alınarak, denklem 4. 1 yardımı ile hesaplanmıştır. Bu parametreler ve referans ışılama eğrisindeki pik alanları kullanılarak her bir tuzak seviyesi için beklenen (normal) fading oranları hesaplanmıştır.

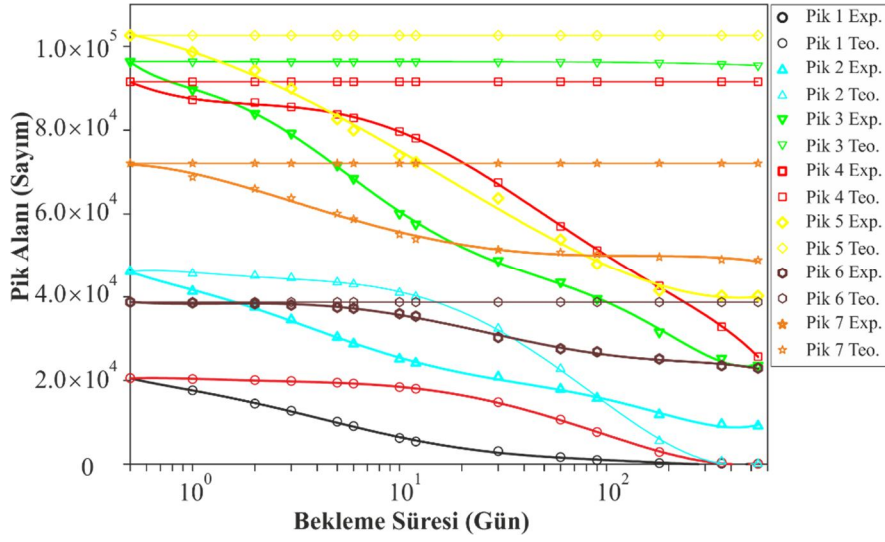
CGCD analizlerinden; her bir bağımsız ışılama pikinin beklenenden daha yüksek oranlarda fadinge uğradığı gözlemlenmiştir. Örnekler fading deneylerinin ilk aşamasında, oda sıcaklığında ( $\sim 20 \pm 5^\circ\text{C}$ ), doğrudan ya da dolaylı olarak ışığa ya da herhangi bir iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmadan depolanmışlardır. Buna rağmen beklenenden daha yüksek oranlarda fadinge uğradıkları gözlemlenmiştir.



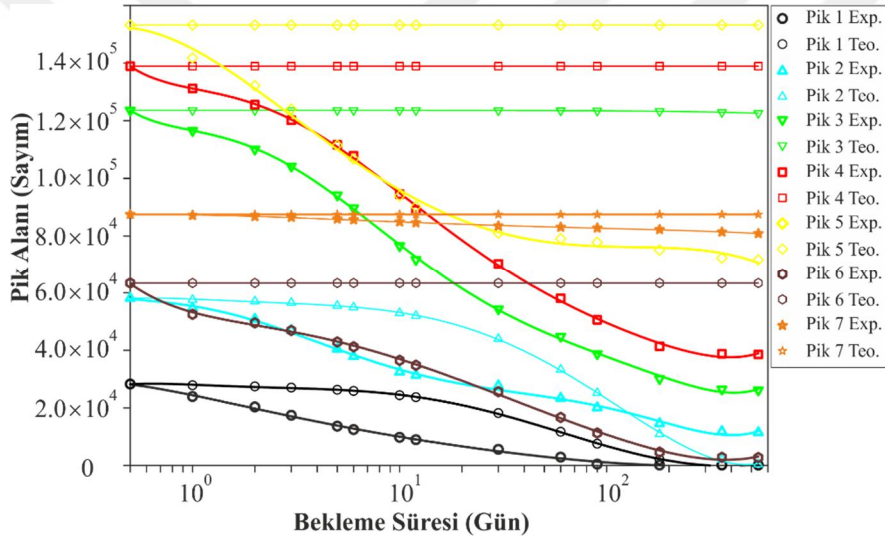
Şekil 4.59 :  $N_1$  numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları



Şekil 4.60 :  $N_2$  numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları.



Şekil 4.61 :  $N_3$  numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları.



Şekil 4.62 :  $N_6$  numunesi için deneysel ve beklenen fading sonuçları.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_{2.99}\text{Ba}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_{2.99}\text{Mg}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Ba}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Ca}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Mg}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_{1.25}\text{Eu}_{0.5}\text{Dy}_{0.25}\text{SiO}_5$ ,  $\text{Sr}_{1.25}\text{Eu}_{0.5}\text{Dy}_{0.25}\text{SiO}_5$ ,  $\text{Mg}_{1.25}\text{Eu}_{0.5}\text{Dy}_{0.25}\text{SiO}_5$ , alüminat ve silikat bazlı ışıldar malzemelerinin TL özellikleri analiz edilmiştir. Bu amaçla farklı TL metotları ile ışıldama eğrileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. NTE ve diğer katkıların, sentezlenen ışıldar malzemelerinin TL ışıldama eğrilerinde değişimlere yol açıp açmadığı araştırılmıştır.

Düşük radyasyon dozuna maruz kaldığı halde analiz edilebilir düzeyde TL sinyali yayımlayabilen numunelerin alüminat bazlı örnekler olduğu ( $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_{2.99}\text{Ba}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_{2.99}\text{Mg}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Mg}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ ) tespit edilmiştir. Diğer taraftan silikat bazlı örneklerin analiz edilebilecek şiddette ışıldama eğrisine sahip olmadıkları gözlemlenmiştir. Bu durum doygunluk seviyesindeki ışınlama dozları için de gözlemlenmiştir. Bu nedenle,  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_{2.99}\text{Ba}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_{2.99}\text{Mg}_{0.01}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$  ve  $\text{Mg}_3\text{Al}_8\text{O}_{15}:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$  ışıldar malzemelerinin üzerinde daha ayrıntılı TL çalışmaları yapılmıştır.

İncelenen  $N_1$  numunesi  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$  formunda olup en şiddetli ışıldama eğrilerinden birine sahiptir (bkz. Şekil 4.5 :). Bu yapıya  $\text{Ba}_{0.01}$  ilavesinin ( $N_2$ ) TL ışıldama eğrisinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı (bkz. Şekil 4.5 :) ancak, PL spektrum şiddetinde önemli bir artışa sebep olduğu (**Öztürk, 2016a**) tarafından bildirilmiştir. Literatürde,  $\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$  bileşiğine yapılan Sr katkısının TL mekanizma için boşluk yani yeniden birleşme merkezlerinin konsantrasyonunu artırdığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır (**Matsuzawa ve diğerleri, 1996**).  $N_1$  numunesinde Sr'nin yanı sıra Ba katkısının yapılması ile üretilen  $N_2$  numunesinin TL ışıldama eğrisinde, yeni piklerin oluşmasına ya da var olan pik şiddetlerinde kayda değer bir değişikliğe neden olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak kesin bir sonuca ulaşabilmek için katkı oranının artırıldığı durumların da incelenmesini önermekteyiz.  $N_2$  numunesindeki diğer her şey aynı kalmak koşulu ile malzeme  $\text{Ba}_{0.01}$  ilavesinin yerine  $\text{Mg}_{0.01}$  ile

katkılandığında ( $N_3$ ), malzemenin ışıldama eğrisinin şiddetinin,  $N_1$  numunesine göre, yaklaşık %20 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.5 :). Buna karşın,  $N_3$  numunesinin PL spektrum şiddetinde kayda değer bir artış (**Öztürk, 2016a**) tarafından rapor edilmiştir.

$N_4$ ,  $N_5$ , ve  $N_6$  numuneleri ( $X = Ba, Ca, Mg$ ) $_3Al_8O_{15}:Eu^{3+}, Dy^{3+}$  yapısında olup, bunlar içerisinde sadece  $N_6$  numunesi ( $X = Mg$ ), TL ışıldama eğrisinde birbirinden ayırt edilebilen şiddetli ışıldama piklerine sahiptir. Ek olarak,  $N_6$  numunesinin ışıldama eğrisinin şiddeti,  $N_1$  numunesinin ışıldama şiddetinden yaklaşık %5 civarında daha azdır. Diğer taraftan,  $N_4$  numunesinde  $X$  yerine  $Ba$  veya  $Ca$  katkısı yapıldığında, ışıldama eğrisinin şiddetinin analiz edilemeyecek oranda azaldığı görülmektedir.

$N_1, N_2, N_3$  ve  $N_6$  numunelerinin CGCD metodu kullanılarak TL ışıldama eğrileri analiz edilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Her bir numunenin 7 adet bireysel TL piki olduğu gözlemlenmiştir.
- $Sr_3Al_2O_6:Eu^{3+}, Ho^{3+}$ , ( $N_1$ ),  $Sr_{2.99}Ba_{0.01}Al_2O_6:Eu^{3+}, Ho^{3+}$ , ( $N_2$ ) ve  $Sr_{2.99}Mg_{0.01}Al_2O_6:Eu^{3+}, Ho^{3+}$ , ( $N_3$ ) ışıldar malzemelerinin yedi adet ışıldama pikinin de, deneysel hata sınırları içerisinde kalacak biçimde, aynı sıcaklıkta konumlandığı, yapılan TL analizleri ile ortaya konulmuştur (Çizelge 4.2 :, Çizelge 4.3 : ve Çizelge 4.4 :).
- ışıldama piklerinin aynı sıcaklıkta konumlanması, bunların esasında ana matris malzemesinden ( $Sr_nAl_2O_6:Eu^{3+}, Ho^{3+}$ ) kaynaklandığını, yani  $Ba$  ve  $Mg$  safsızlıklarının yeni bir pik oluşturmadığını düşündürmektedir.
- $Ba$  ilavesinin ışıldama eğrisindeki var olan pik şiddetlerinde önemli bir fark oluşturmazken,  $Mg$  ilavesinin ise ana pik şiddetini azalttığı gözlemlenmiştir.
- $Mg_3Al_8O_{15}:Eu^{3+}, Dy^{3+}$  ( $N_6$ ) ışıldar malzemesinde ise yine yedi adet bağımsız TL pik olduğu, pik 1, 2 ve ana pikin (pik 3-5) sıcaklığının diğer alüminat bazlı bileşiklerle ( $N_1, N_2$  ve  $N_3$ ) aynı sıcaklıkta konumlandığı görülmüştür. Diğer taraftan pik 6 ve 7 ise daha yüksek sıcaklıklarda konumlanmışlardır.
- $N_6$  ışıldarındaki  $Dy^{3+}$  ilavesi pik1-5 üzerinde önemli bir etki yapmazken pik 6 ve 7'nin sıcaklıklarını arttırmaktadır.

$T_S-T_M$  prosedürü her bir malzemeye 51 kez uygulanarak pik analizleri detaylandırılmıştır.  $T_S-T_M$  metodu kullanılarak TL ışıldama eğrileri analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Her bir malzeme için 1. maksimum, 2. maksimum ve ana pikten oluşan ışıldama eğrisi kaydedilmiş ve tepe noktalarının konumlandığı sıcaklıklar ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar CGCD yöntemi ile uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

Yüksek doz ışınlamalarından elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- Işıldama piklerini oluşturan tüm tuzaklar yüksek dozlarda doygunluğa ulaşmış, böylece yük taşıyıcı tuzak konsantrasyonları deneysel olarak ölçülebilmıştır.
- Literatürde yayınlanan çalışmalarda (**Alonso ve Alcalá, 1980; Da-Ke ve diğerleri, 1984; Dhopte ve diğerleri, 1991; Marin ve Jaque, 2021; Matsuzawa ve diğerleri, 1996; T. Nakajima, 1983; Toshiyuki Nakajima ve diğerleri, 1978; Qin ve diğerleri, 2017; Shoushan ve diğerleri, 1986**) genellikle, TL ışıldama eğrileri ve pikleri ile bu piklere ait parametreler düşük dozlarda incelenmekte ve raporlanmaktadır. Ancak, aynı malzemeye ait bazı ışıldama piklerinin sadece yüksek dozlarda gözlemlenebildiğine dair çalışmalar mevcuttur (**Uzun ve diğerleri, 2024; Uzun ve diğerleri, 2023**). Bu sebeple malzemeler yüksek dozlarda ışınlanmış ve ışıldama eğrileri analiz edilerek yeni piklerin ortaya çıkmadığı doğrulanmıştır.

Fading deneylerinden elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- Deneysel numunelerde hem normal hem de anormal fading birlikte gözlemlenmiştir.
- Toz formundaki numunelerde 540 gün bekleme süresi sonunda kayda değer ve analiz edilebilecek şiddete uzun süreli TL ışıldama eğrisi elde edilebilmiştir. Bu sonucun, incelenen malzemelerin teknolojik uygulamalarda kullanılabilirliğe dair umut verici olduğu düşünülmektedir.
- Uzun süreli TL ışıldama, tuzak seviyelerinin derin olması (bkz. Çizelge 4.2 :- 4-4) ile açıklanabilmektedir. Derin tuzak seviyelerinin, uzun süreli fosforesans ışıldama ile sonuçlandığı (**Matsuzawa ve diğerleri, 1996**) literatürde yayınlanan birçok çalışmada bildirilmiştir.
- Sunulan tez çalışması kapsamında ayrıntılı olarak incelenen ışıldarların her birinin ışıldama eğrilerinde, iyi tanımlanmış, ardışık kullanımda kararlı davranan ve şiddetli bir ana pik bulunduğu gözlemlenmiştir. Buna ilave olarak, ana pikin 540 günlük bekleme süresi sonrasında hala kolayca ölçülebilir olduğu bu tez çalışması neticesinde ortaya konmuştur. Sonuç olarak, incelenen

ışıldarların, radyasyon dozimetri malzemesi olarak kullanılabilirliğinin yanı sıra, uzun süreli ışıldama ihtiyacı duyulan alanlar için de uygun bir aday oldukları düşünülmektedir. Doktora sonrası çalışmalarımızın bu yönde devam ettirilmesi planlanmaktadır.



## KAYNAKLAR

- Aitken, J. M. (1985). *Thermoluminescence Dating* (Us ed. edi.). London: Academic Pr.
- Albani, J. R. (2008). *Principles and Applications of Fluorescence Spectroscopy*.  
*Principles and Applications of Fluorescence Spectroscopy*.  
doi:10.1002/9780470692059
- Alcala, R. ve Alonso, P. J. (1979). Luminescence in x-irradiated CaF<sub>2</sub>:Co. *Journal of Luminescence*, 20(1), 1–8. doi:10.1016/0022-2313(79)90017-6
- Alonso, P. J. ve Alcalá, R. (1980). Thermoluminescence of 3d-ions doped CaF<sub>2</sub>. *Journal of Luminescence*, 21(2), 147–152. doi:10.1016/0022-2313(80)90014-9
- Anesh, M. P., Gulrez, S. K. H., Anis, A., Shaikh, H., Ali Mohsin, M. E. ve AL-Zahrani, S. M. (2014). Developments in Eu<sup>+2</sup>-Doped Strontium Aluminate and Polymer/Strontium Aluminate Composite. *Advances in Polymer Technology*, 33(S1), 8–11. doi:10.1002/adv.21436
- Arnold, W. ve J. R. Azzi. (1968). Chlorophyll Energy Levels and Electron Flow in Photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 61(1), 29–35. <https://www.jstor.org/stable/58854> adresinden erişildi.
- Arnold, W. ve Sherwood, H. K. (1957). Are Chloroplasts Semiconductors? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 43(1), 105–114. doi:10.1073/pnas.43.1.105
- Blanc, W., Gyu Choi, Y., Zhang, X., Nalin, M., Richardson, K. A., Righini, G. C., ... Petit, L. (2023). The past, present and future of photonic glasses: A review in homage to the United Nations International Year of glass 2022. *Progress in Materials Science*, 134(December 2022), 101084. doi:10.1016/j.pmatsci.2023.101084
- Born, G., Hofstaetter, A., Scharmann, A. ve Schwarz, G. (1970). Luminescence mechanism of tungstate phosphors. *Journal of Luminescence*, 1–2(C), 641–650. doi:10.1016/0022-2313(70)90077-3
- Bos, A. J. J., De Jong, R. W. ve Meijvogel, K. (1995). Effects of type of radiation on glow curve and thermoluminescence emission spectrum of CaF<sub>2</sub>:Tm. *Radiation Measurements*, 24(4), 401–405. doi:10.1016/1350-4487(95)91005-S
- Boyle, R. (1664). *Experiments and Considerations Touching Colours* (First.). London: Royal Society.  
<https://ia804609.us.archive.org/0/items/b30334214/b30334214.pdf> adresinden erişildi.
- Burrus, H. L., Nicholson, K. P. ve Rooksby, H. P. (1971). Fluorescence of Eu<sup>2+</sup>-activated alkaline earth halosilicates. *Journal of Luminescence*, 3(6), 467–476. doi:10.1016/0022-2313(71)90027-5
- Caferov, T. (1998). *Yarıiletken Fiziği-1*. (First, Ed.). İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Chen, R. ve Haber, G. A. (1968). Calculation of glow curves' activation energies by numerical initla rise methods. *Chemical Physics Letters*, 2(7), 483–485. doi:10.1016/0009-2614(65)80017-3

- Chen, R. ve Winer, S. A. A. (1970). Effects of Various Heating Rates on Glow Curves. *Journal of Applied Physics*, 41(13), 5227–5232. doi:10.1063/1.1658652
- Chen, Reuven ve McKeever, S. W. S. (1997). *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena. Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*. World Scientific. doi:https://doi.org/10.1142/27811
- Chen, Reuven ve Pagonis, V. (2011). *Thermally and Optically Stimulated Luminescence: A Simulation Approach. Thermally and Optically Stimulated Luminescence: A Simulation Approach*. doi:10.1002/9781119993766
- Chung, K. S., Choe, H. S., Lee, J. I., Kim, J. L. ve Chang, S. Y. (2005). A computer program for the deconvolution of thermoluminescence glow curves. *Radiation Protection Dosimetry*, 115(1–4), 343–349. doi:10.1093/rpd/nci073
- Clabau, F., Rocquefelte, X., Jobic, S., Deniard, P., Whangbo, M.-H., Garcia, A. ve Le Mercier, T. (2005). Mechanism of Phosphorescence Appropriate for the Long-Lasting Phosphors  $\text{Eu}^{2+}$ -Doped  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  with Codopants  $\text{Dy}^{3+}$  and  $\text{B}^{3+}$ . *Chemistry of Materials*, 17(15), 3904–3912. doi:10.1021/cm050763r
- Da-Ke, W., Fu-Yin, S. ve Hong-Chen, D. (1984). A High Sensitivity LiF Thermoluminescent Dosimeter-LiF(Mg, Cu, P). *Health Physics*, 46(5), 1063–1067. doi:10.1097/00004032-198405000-00006
- Daniels, F. (1953). Thermoluminescence as a Research Tool Author ( s ): Farrington Daniels , Charles A . Boyd , Donald F . Saunders Published by : American Association for the Advancement of Science Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/1680489>. *Science, New Series*, 117(3040), 343–349.
- Darvell, B. W. (2018). Resin Restorative Materials. *Materials Science for Dentistry* içinde (ss. 143–191). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-101035-8.50006-7
- Dhopte, S. M., Muthal, P. L., Kondawar, V. K. ve Moharil, S. V. (1991). On the role of europium in  $\text{CaSO}_4 : \text{Eu}$  phosphor. *Journal of Luminescence*, 50(3), 187–195. doi:10.1016/0022-2313(91)90042-T
- Dorenbos, P. (2003). Energy of the first  $4f^7 \rightarrow 4f^65d$  transition of  $\text{Eu}^{2+}$  in inorganic compounds. *Journal of Luminescence*, 104(4), 239–260. doi:10.1016/S0022-2313(03)00078-4
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, T. C. (2020). Nadir Toprak Elementleri Raporu. *Sanayi Genel Müdürlüğü-Sektörel Raporlar*, 1(1).
- Farnau, E. F. (1913). Luminescence. *The Journal of Physical Chemistry*, 17(8), 637–656. doi:10.1021/j150143a001
- Furetta, C., Kuo, C. H. ve Weng, P. S. (1999). Fading prediction in thermoluminescent materials using computerised glow curve deconvolution (CGCD). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 423(1), 183–189. doi:10.1016/S0168-9002(98)01203-0
- Furetta, Claudio. (2010). *Handbook of Thermoluminescence. Handbook of Thermoluminescence*. doi:10.1142/9789812838926
- Garlick, G. F. J. ve Gibson, A. F. (1947). Electron traps and dielectric changes in phosphorescent solids. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 188(1015), 485–509. doi:10.1098/rspa.1947.0021
- George, C., Anna, B. D., Herrmann, H., Weller, C., Vaida, V., Donaldson, D. J., ... Ammann, M. (2014). Emerging Areas in Atmospheric Photochemistry. V. F. McNeill ve P. A. Ariya (Ed.), *Atmospheric and Aerosol Chemistry* içinde (ss. 1–53). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/128\_2012\_393

- Harvey, E. N. (1957). *A history of luminescence from the earliest times until 1900*. (E. N. Harvey, Ed.) (1st bs.). Philadelphia: Philadelphia, American Philosophical Society.  
[https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://archive.org/download/historyoflumines00harv/historyoflumines00harv\\_bw.pdf&ved=2ahUKEwjFw5mPupqLAXvtJEQIHQgdL5UQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw2fE60\\_nQfiVavwsaPN71nv](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://archive.org/download/historyoflumines00harv/historyoflumines00harv_bw.pdf&ved=2ahUKEwjFw5mPupqLAXvtJEQIHQgdL5UQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw2fE60_nQfiVavwsaPN71nv) adresinden erişildi.
- Hölsä, J. (2009). Persistent Luminescence Beats the Afterglow: 400 Years of Persistent Luminescence. *The Electrochemical Society Interface*, 18(4), 42–45. doi:10.1149/2.F06094IF
- Huntley, D. J., McMullan, W. G., Godfrey-Smith, D. I. ve Thewalt, M. L. W. (1989). Time-dependent recombination spectra arising from optical ejection of trapped charges in feldspars. *Journal of Luminescence*, 44(1–2), 41–46. doi:10.1016/0022-2313(89)90019-7
- Jablonski, A. (1933). Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes. *Nature*, 131(3319), 839–840. doi:10.1038/131839b0
- Jiang, H., Zhang, L., Huang, Y., Jia, D. ve Guo, Z. (2007). Synthesis and optical properties of ultra-fine  $\text{Sr}_5\text{Al}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{3+}$  nanorod phosphor from a low-heating-temperature solid-state precursor method. *Materials Science and Engineering: B*, 145(1–3), 23–27. doi:10.1016/j.mseb.2007.09.046
- Kelly, A. ve Knowles, K. M. (2012). Crystal Structures. *Crystallography and Crystal Defects* içinde (ss. 85–122). Wiley. doi:10.1002/9781119961468.ch3
- Kim, D., Kim, H.-E. ve Kim, C.-H. (2016). Effect of Composition and Impurities on the Phosphorescence of Green-Emitting Alkaline Earth Aluminate Phosphor. *Plos One*, 11(1), e0145434. doi:10.1371/journal.pone.0145434
- Kittel, C. (2004). Chapter 7: Energy Bands. *Introduction to Solid State Physics* içinde (8th Editio., ss. 161–185). United States of America: John Wiley & Sons, Inc. <http://metal.elte.hu/~groma/Anyagtudomany/kittel.pdf> adresinden erişildi.
- Lehmann, W. (1972). Activators and co-activators in calcium sulfide phosphors. *Journal of Luminescence*, 5(2), 87–107. doi:10.1016/0022-2313(72)90044-0
- Lin, Y., Tang, Z., Zhang, Z., Wang, X. ve Zhang, J. (2001). Preparation of a new long afterglow blue-emitting  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ -based photoluminescent phosphor. *Journal of Materials Science Letters*, 20(16), 1505–1506. doi:10.1023/A:1017930630889
- Lin, Yuanhua, Tang, Z. ve Zhang, Z. (2001). Preparation of long-afterglow  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}$ -based luminescent material and its optical properties. *Materials Letters*, 51(1), 14–18. doi:10.1016/S0167-577X(01)00257-9
- Marin, R. ve Jaque, D. (2021). Doping Lanthanide Ions in Colloidal Semiconductor Nanocrystals for Brighter Photoluminescence. *Chemical Reviews*, 121(3), 1425–1462. doi:10.1021/acs.chemrev.0c00692
- Matsuzawa, T., Aoki, Y., Takeuchi, N. ve Murayama, Y. (1996). A New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . *Journal of The Electrochemical Society*, 143(8), 2670–2673. doi:10.1149/1.1837067
- May, C. E. ve Partridge, J. A. (1964). Thermoluminescent kinetics of alpha-irradiated alkali halides. *The Journal of Chemical Physics*, 40(5), 1401–1409. doi:10.1063/1.1725324
- McKeever, S. W. S. (1985). *Thermoluminescence of Solids. Thermoluminescence of Solids*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511564994

- McKeever, S. W. S. ve Chen, R. (1997). Luminescence models. *Radiation Measurements*, 27(5–6), 625–661. doi:10.1016/S1350-4487(97)00203-5
- Merz, J. L. ve Pershan, P. S. (1967). Charge Conversion of Irradiated Rare-Earth Ions in Ca F<sub>2</sub> . II. Thermoluminescent Spectra. *Physical Review*, 162(2), 235–247. doi:10.1103/PhysRev.162.235
- Mieke, S. ve Nink, R. (1979). LiF: Ti as a material for thermoluminescence dosimetry (TLD). *Journal of Luminescence*, 18–19(Part 1), 411–414. doi:10.1016/0022-2313(79)90151-0
- Mitrić, J. (2022). 2 - Properties and characterization of rare-earth-activated phosphors. V. Dubey, N. Dubey, M. M. Domańska, M. Jayasimhadri ve S. J. Dhoble (Ed.), *Rare-Earth-Activated Phosphors* içinde (ss. 43–58). Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89856-0.00014-6
- Mulla, M. R. ve Pawar, S. H. (1984). Spectral studies on luminescence of Dy<sup>3+</sup> in CaSO<sub>4</sub> phosphors. *Journal of Luminescence*, 31–32, 239–241. doi:10.1016/0022-2313(84)90259-X
- Murthy, K. V. R. ve Virk, H. S. (2013). Luminescence Phenomena: An Introduction. *Defect and Diffusion Forum*, 347, 1–34. doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.347.1
- Nakajima, T. (1983). The Effect of Pulverisation of Irradiated Materials on Their Thermoluminescence Emission. *Radiation Protection Dosimetry*, 6(1–4), 356–358. doi:10.1093/rpd/6.1-4.356
- Nakajima, Toshiyuki, Murayama, Y., Matsuzawa, T. ve Koyano, A. (1978). Development of a new highly sensitive LiF thermoluminescence dosimeter and its applications. *Nuclear Instruments and Methods*, 157(1), 155–162. doi:10.1016/0029-554X(78)90601-8
- Öztürk, E. (2016a). The effect of Ba/Mg impurities on the phase formation and photoluminescence properties of (Sr<sub>3-x</sub>M<sub>x</sub>)Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>:Eu<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup> (M = Ba, Mg) phosphors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126(2), 365–369. doi:10.1007/s10973-016-5546-z
- Öztürk, E. (2016b). Investigations of M<sub>3</sub>Al<sub>8</sub>O<sub>15</sub>:Eu<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup> (M = Ba, Ca, Mg) phosphors. *Materials Science-Poland*, 34(2), 412–417. doi:10.1515/msp-2016-0047
- Öztürk, E. (2017). Photoluminescence Properties of Eu<sup>3+</sup>-activated Silicate Phosphors. *High Temperature Materials and Processes*, 36(6), 635–640. doi:10.1515/htmp-2015-0263
- Pagonis, V., Kitis, G. ve Furetta, C. (2006). *Numerical and Practical Exercises in Thermoluminescence*. (V. Pagonis, G. Kitis ve C. Furetta, Ed.). New York, NY: Springer New York. doi:10.1007/0-387-30090-2
- Palilla, F. C., Levine, A. K. ve Tomkus, M. R. (1968). Fluorescent Properties of Alkaline Earth Aluminates of the Type MA<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Activated by Divalent Europium. *Journal of The Electrochemical Society*, 115(6), 642. doi:10.1149/1.2411379
- Partridge, J. A. ve May, C. E. (1965). Anomalous Thermoluminescent Kinetics of Irradiated Alkali Halides. *The Journal of Chemical Physics*, 42(2), 797–798. doi:10.1063/1.1696015
- Pauli, W. (1994). Exclusion Principle and Quantum Mechanics. C. P. Enz ve K. von Meyenn (Ed.), *Writings on Physics and Philosophy* içinde (ss. 165–181). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-02994-7\_20
- Qin, X., Liu, X., Huang, W., Bettinelli, M. ve Liu, X. (2017). Lanthanide-Activated

- Phosphors Based on 4f-5d Optical Transitions: Theoretical and Experimental Aspects. *Chemical Reviews*, 117(5), 4488–4527.  
doi:10.1021/acs.chemrev.6b00691
- Randall, J. T. ve Wilkins, M. H. F. (1945a). Phosphorescence and electron traps - I. The study of trap distributions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 184(999), 365–389.  
doi:10.1098/rspa.1945.0024
- Randall, J. T. ve Wilkins, M. H. F. (1945b). Phosphorescence and electron traps II. The interpretation of long-period phosphorescence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 184(999), 390–407. doi:10.1098/rspa.1945.0025
- Ray, B. (1991). Phosphors and Luminescence. *Electronic Materials* içinde (ss. 211–223). Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4615-3818-9\_15
- Sahu, I. P., Bisen, D. P., Brahme, N., Tamrakar, R. K. ve Shrivastava, R. (2015). Luminescence studies of dysprosium doped strontium aluminate white light emitting phosphor by combustion route. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(11), 8824–8839. doi:10.1007/s10854-015-3563-5
- Saines, P. J., Elcombe, M. M. ve Kennedy, B. J. (2006). Lanthanide distribution in some doped alkaline earth aluminates and gallates. *Journal of Solid State Chemistry*, 179(3), 613–622. doi:10.1016/j.jssc.2005.10.043
- Serra, R. ve Paltrinieri, G. (2016). La pietra fosforica bolognese. *Quaderni del Museo Civico di Storia Naturale di Ferrara*, 4(2014), 33–36.  
storianaturale.comune.fe.it/modules/core/lib/d.php?c=deQX7 adresinden erişildi.
- Shoushan, W., Goulong, C. ve Fang, W. (1986). Newly Developed Highly Sensitive LiF (Mg,Cu,P) TL Chips with High Signal-to-Noise Ratio. *Radiation Protection Dosimetry*, 14(3), 223–227. doi:10.1093/oxfordjournals.rpd.a079651
- Singhvi, A. K. ve Mejdahl, V. (1985). Thermoluminescence dating of sediments. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements (1982)*, 10(1–2), 137–161.  
doi:10.1016/0735-245X(85)90020-1
- Stokes, G. G. (1854). On the change of refrangibility of light. - No. II. *Abstracts of the Papers Communicated to the Royal Society of London*, 6(June 1848), 333–335. doi:10.1098/rspl.1850.0124
- Strehler, B. L. ve Arnold, W. (1951). Light Production By Green Plants. *Journal of General Physiology*, 34(6), 809–820. doi:10.1085/jgp.34.6.809
- Sun, F., Dai, G., Yuan, S. ve Song, S. (1988). The thermoluminescence (TL) characteristics of LiF (Mg, Cu, P) phosphor and its application in radiation dosimetry. *Journal of Luminescence*, 40–41(C), 881–882. doi:10.1016/0022-2313(88)90480-2
- Tollin, G. ve Calvin, M. (1957). The Luminescence of Chlorophyll-Containing Plant Material. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 43(10), 895–908. <http://www.jstor.org/stable/89396> adresinden erişildi.
- U.S. Geological Survey. (2023). *Mineral Commodity Summaries 2023 - Aluminum Data Release*. doi:<https://doi.org/10.5066/P9WCYUI6>
- Uzun, E. (2008). *Characterization of Thermoluminescent Properties of Seydisehir Alumina and Investigation of Properties of Dose Response*.  
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=CwVIqqBuz1VkysVpueogATImNAB8uMeq6IOdNGZ6zaSNQkmkAQBc-ws3R2tddivgC> adresinden erişildi.

- uzun, E., Öztürk, E., Kalaycioglu Ozpozan, N. ve Karacaoglu, E. (2016). Thermoluminescence and photoluminescence properties of  $Mn^{4+}$ ,  $Pr^{3+}$ ,  $Nd^{3+}$  and  $Eu^{3+}$  in  $MgAl_2Si_2O_8$ . *Journal of Luminescence*, 173, 73–81. doi:10.1016/j.jlumin.2015.12.043
- Uzun, E., Öztürk, E. ve Ozpozan, N. K. (2018). Thermoluminescence properties of  $La^{3+}$ ,  $Gd^{3+}$ ,  $Dy^{3+}$  and  $Ho^{3+}$  co-doped  $MgAl_2Si_2O_8:Mn^{4+}$ . *Luminescence*, 33(8), 1346–1357. doi:10.1002/bio.3552
- Uzun, E., Yarar, Y. ve Yazici, A. N. (2011). Electron immigration from shallow traps to deep traps by tunnel mechanism on Seydiehir aluminas. *Journal of Luminescence*, 131(12), 2625–2629. doi:10.1016/j.jlumin.2011.06.020
- UZUN, E., Yildiz, E. ve Öztürk, E. (2024). Beta radiation-induced thermoluminescence in pure and rare earth doped  $ZrO_2$  prepared by pechini-type sol-gel. *Optical Materials*, 155(June), 115869. doi:10.1016/j.optmat.2024.115869
- Uzun, E., Yıldız, E. ve Öztürk, E. (2023). Photoluminescence and thermoluminescence properties of pure and rare-earth-doped  $ZrO_2$  prepared by Pechini-type sol-gel. *Luminescence*, 38(12), 2034–2047. doi:10.1002/bio.4592
- Vij, D. R. (1998). *Luminescence of Solids*. (D. R. Vij, Ed.) Springer. Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4615-5361-8
- Voss, J. T. T. (2001). *Los Alamos Radiation Monitoring Notebook (C. 2000)*. <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-00-2584> adresinden erişildi.
- Ward, R. W. ve Whippey, P. W. (1973). Thermoluminescence and X-Ray Stimulated Luminescence of  $CaF_2:Eu$  Crystals. *Canadian Journal of Physics*, 51(4), 382–388. doi:10.1139/p73-049
- Wiedemann, E. (1889). Zur Mechanik des Leuchtens. *Annalen der Physik*, 273(6), 177–248. doi:10.1002/andp.18892730602
- Wiedemann, Eilhard. (1888). Ueber Fluorescenz und Phosphorescenz I. Abhandlung. *Annalen der Physik*, 270(7), 446–463. doi:10.1002/andp.18882700703
- Wintle, A. G. ve Huntley, D. J. (1982). *Thermoluminescence dating of sediments*. *Quaternary Science Reviews (C. 1)*. doi:10.1016/0277-3791(82)90018-X
- Yazıcı, N. A. (1996). *Thermal and optical characteristics of radiation induced defect centers in alkali Halide crystals (TLD-100)*. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=Mir2lXQK1dkmQ9Ige3PZbqbq4m0bLlKoJ4JKicOqOw3XQchY9AZB1QYAr2Xh72L2> adresinden erişildi.
- Zúñiga-Rivera, N. J., Salas-Castillo, P., Chernov, V., Díaz-Torres, L. A., Meléndrez, R., García-Gutierrez, R., ... Barboza-Flores, M. (2017). Thermally and optically stimulated luminescence in long persistent orthorhombic strontium aluminates doped with Eu, Dy and Eu, Nd. *Optical Materials*, 67, 91–97. doi:10.1016/j.optmat.2017.03.040

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Zehra ÖZDEMİR

**Doğum Tarihi ve Yeri** :

**E-posta** :

### Öğrenim Durumu:

**Lise** :

**Lisans:** 2011, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

**Yüksek lisans:** 2013, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

**Yabancı Dil ve Düzeyi:** İngilizce, İleri Düzey

### Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Fizik Öğretmeni

### Tezden Üretilmiş Proje ve Bütçesi:

Nadir Toprak Elementleri ile Katkılandırılmış Alüminat/Silikat Bazlı Fosforların Termoluminesans Özelliklerinin İncelenmesi, KMÜ, BAP: Bütçe. 23.798,97.TL

### Yüksek Lisans / Doktora Tezinden Üretilen Yayınlar, Sunumlar ve Patentler:

- Özdemir Z., Uzun E., 2024. Investigation of the Thermoluminescent Glow Curves of Some RE-Doped Aluminate/Silicate-Based Phosphorus, *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, Volume 13, Issue 6 (Nov.-Dec. 2024), PP. 48-52