

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**BeO DOZİMETRELERİN TL, OSL VE ESR TEKNİKLERİ
ARASINDAKİ KORELASYONU VE MAMOGRAFİ
SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Engin AŞLAR

MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI

**ANKARA
2020**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Engin AŞLAR tarafından hazırlanan “BeO Dozimetrelerin TL, OSL ve ESR Teknikleri Arasındaki Korelasyonu ve Mamografi Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Medikal Fizik Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Eş Danışman : Dr. Georgios S. POLYMERIS

Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Niyazi MERİÇ
Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü

Prof. Dr. Ülkü SAYIN
Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü

Doç. Dr. Turan OLGAR
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR
Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

Adı Soyadı: Engin AŞLAR

İmza:



ÖZET

Doktora Tezi

BeO DOZİMETRELERİN TL, OSL VE ESR TEKNİKLERİ ARASINDAKİ KORELASYONU VE MAMOGRAFİ SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Engin AŞLAR

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Eş Danışman: Dr. Georgios S. POLYMERIS

Termolüminesans (TL), Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) ve Elektron Spin Rezonans (ESR) teknikleri dozimetri ve tarihlendirme alanları başta olmak üzere bir çok alanda soğurulan dozun belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden TL ve OSL teknikleri ile materyalin tuzak yük mekanizması araştırılırken, ESR tekniği sayesinde materyalin kristal yapısı ve buna bağlı olarak kusurlar ve safsızlıklar hakkında bilgi edinilmektedir. Çoğu kristal farklı kusur ve safsızlıklara sahiptir ve bunlar daima TL ya da OSL sinyalleri ile ilişkili değildirler. Bu amaçla, bu üç tekniğin birbirleriyle olan korelasyonunun araştırılması sayesinde hem TL ve OSL sinyallerinin birbirleri arasındaki ilişki hem de bu kusur ve safsızlıkların TL ve OSL sinyalleri ile olan ilişkisi bulunabilmektedir. Böyle bir korelasyonun varlığı halinde ESR merkezlerinin oranının artırılabilmesi ile lüminesans veriminin artırılabilmesi ve ölçülebilen minimum dedekte edilebilen doz değerlerinin düşürülebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, yaygın kişisel dozimetre olarak bilinen Thermalox 995 BeO dozimetresinin TL, OSL ve ESR özellikleri kapsamlı olarak araştırılmıştır. Thermalox 995 BeO dozimetreler için termal sönümlenme olayı iki farklı filtre (Hoya U340 ve BG-39) kullanılarak incelenmiştir. Termal sönümlenme parametreleri (W ve C), TL ölçümleri sayesinde elde edilmiş ve termal sönümlenme olayının TL kinetik parametreleri ve tuzak belirleme metodları üzerindeki etkileri detaylı olarak ele alınmıştır. Kademeli tavlama (step annealing) ve ağartma (bleaching) deneyleri gerçekleştirilerek TL pikleri, OSL bileşenleri ve ESR merkezleri için mümkün korelasyon kurulmuştur. Ayrıca, Radkor Personal Dozimetre firmasından satın alınan BeO dozimetrelerin TL ve OSL sinyalleri detaylı olarak araştırılarak Thermalox 995 BeO dozimetresi ile olan farklılıkları araştırılmıştır.

BeO dozimetrelerin mamografi sistemlerinde dozimetrik olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, dozimetrelerin tekrarlanabilirliği, doz cevap eğrileri ve mamografideki klinik dozimetrik nicelikler; geri saçılım faktörü (BSF), yüzey giriş dozu (ESD), yüzey hava kerma (ESAK) ve ortalama glandüler doz değerleri (MGD) hesaplanmıştır. Benzer aşamalar LiF:Mg,Ti (TLD-100) dozimetreler ve iyon odası kullanılarak gerçekleştirilmiş ve BeO dozimetrelerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. BeO dozimetrelerin mamografi sisteminde ortalama glandüler doz değerini (MGD) belirlemede alternatif dozimetre olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

2020, 168 sayfa

Anahtar Kelimeler: Berilyum oksit (BeO), Termolüminesans (TL), Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL), Elektron Spin Rezonans (ESR), korelasyon, mamografi, ortalama glandüler doz (MGD), termal sönümlenme

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

CORRELATION OF BeO DOSIMETERS BETWEEN TL, OSL AND ESR TECHNIQUES AND INVESTIGATION OF USAGE IN MAMMOGRAPHY SYSTEMS

Engin AŞLAR

Ankara University Institute of Nuclear Sciences

Medical Physics Department

Supervisor: Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Co- Supervisor: Dr. Georgios S. POLYMERIS

Thermoluminescence (TL), Optically Stimulated Luminescence (OSL) and Electron Spin Resonance (ESR) techniques are used to determine the absorbed dose in many areas, especially dosimetry and dating. While TL and OSL techniques are used to investigate the trap-charge mechanism of the material, ESR technique provides information about the crystal structure of the material and the related defects and impurities. Most crystals have different defects and impurities and are not always associated with TL or OSL signals. For this purpose, the correlation of these three techniques with each other by investigating the relationship between TL and OSL signals as well as the relationship between these defects and impurities TL and OSL signals can be found. In the presence of such a correlation, it is important to increase the luminescence efficiency by increasing the proportion of ESR centers and to extend the minimum detectable dose values that can be measured.

In this thesis, TL, OSL and ESR properties of Thermalox 995 BeO dosimeter, commonly known as personal dosimeter, have been investigated extensively. The thermal quenching phenomena for Thermalox 995 BeO dosimeters was investigated using two different filters (Hoya U-340 and BG-39). Thermal quenching parameters (W and C) were determined by using TL measurements and the effects of thermal quenching phenomena on TL kinetic parameters and trap determination methods are studied. Step annealing and bleaching experiments were performed and possible correlation was established for TL peaks, OSL components and ESR centers. In addition, TL and OSL signals of BeO dosimeters purchased from Radkor Personal Dosimetry Company were investigated in detail and compared with the Thermalox 995 BeO dosimeter.

The dosimetric usage of BeO dosimeters in the mammography system was investigated. For this purpose, reproducibility of dosimeters, dose response curves and clinical dosimetric quantities in mammography; back scatter factor (BSF), entrance surface dose (ESD), entrance surface air kerma (ESAK) and mean glandular dose (MGD) were calculated. Similar steps were performed using LiF: Mg, Ti (TLD-100) dosimeters and ion chamber and compared with the results obtained from BeO dosimeters. It was concluded that BeO dosimeters can be used as an alternative dosimeter to determine the mean glandular dose value (MGD) in the mammography system.

2020, 168 pages

Key Words: Beryllium oxide (BeO), thermoluminescence (TL), optically stimulated luminescence (OSL), electron spin resonance (ESR), correlation, mammography, mean glandular dose (MGD), thermal quenching

TEŞEKKÜR

Doktora çalıőmam sűresince, her tűrlű bilgi ve deneyimleri ile beni yűnlendiren, bana yol gűsteren ve her konuda beni destekleyen danıőman hocam sayın Prof. Dr. Niyazi MERİÇ'e sonsuz teőekkűrlerimi sunuyorum.

Tez çalıőmam boyunca engin bilgi birikimi ile bu alanda geliőimime katkı sunan, bilimsel anlamda her daim yardımcı olan eő danıőmanım sayın Dr. George S. POLYMERIS'e, çok teőekkűr ederim.

Her daim bilimsel olarak tartıőma fırsatı bulduėum, çalıőmalarımnda bilgi ve űnerileri ile her fırsatta bana destek olan sayın Doç. Dr. Eren ŐAHİNER'e çok teőekkűr ederim.

Tezim sűresince yapmıő oldukları tavsiye ve yűnlendirmeleriyle tezime katkı sunan tez izleme komitesi űyeleri sayın Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER'e ve sayın Prof. Dr. Ŭlkű SAYIN'a çok teőekkűr ederim.

Yardımlarından dolayı baőta Arő. Gűr. İbrahim DEMİREL olmak űzere, Nűkleer Bilimler Enstitűsű personeline teőekkűr ederim.

Çalıőmalarım boyunca desteklerini her zaman yanımda hissettiėim annem, babam ve ablam Dr. Deniz AŐLAR ŐNER'e sonsuz teőekkűrlerimi sunuyorum.

2228-B BİDEB burs programı kapsamında doktora boyunca maddi olarak bana destek olan TŬBİTAK'a teőekkűrlerimi sunuyorum.

Engin AŞLAR

Ankara, 2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	7
2.1 Lüminesans	7
2.2 Termolüminesans (TL).....	8
2.3 Bir Tuzak-Bir Rekombinasyon Merkezi Modeli	9
2.3.1 Birinci mertebe kinetik	12
2.3.2 İkinci mertebe kinetik	13
2.3.3 Genel mertebe kinetik.....	14
2.4 Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL)	15
2.4.1 OSL teorik model	16
2.5 Termal Asistan OSL (TA-OSL).....	19
2.6 Elektron Spin Rezonans (ESR).....	21
2.6.1 Elektron Spin Rezonans (ESR) teorik yaklaşım	22
2.6.2 g faktörü	25
2.6.3 Aşırı ince yapı olayı	28
2.7 TL Tuzak Parametrelerinin Belirlenmesi için Kullanılan Metotlar	30
2.7.1 Başlangıçtaki artış yöntemi (Initial rise method)	30
2.7.2 Farklı ısıtma hızları yöntemi (Various heating rate method)	31
2.7.3 Pik şekli yöntemi (Peak shaped method)	32
2.7.4 Kesikli ışımaya eğrisi tekniği (Fractional glow technique)	32
2.7.5 T_{max} - T_{stop} yöntemi	33
2.7.6 İzotermal bozunum yöntemi	34
2.7.7 Dekonvolüsyon yöntemi (CGCD)	35
2.8 Termal Sönümlenme (Thermal Quenching) Olayı	37
2.9 Mamografi Sistemi ve Dozimetrik Uygulamalar	43
2.9.1 Meme anatomisi ve meme kanseri	43

2.9.2 Mamografi	45
2.9.3 Ortalama glandüler dozun (MGD) belirlenmesi	46
2.10 BeO Materyalinin Genel Özellikleri ve TL, OSL ve ESR ile İlgili Çalışmalar	47
2.11 TL, OSL ve ESR Korelasyonu	50
3. MATERYAL VE YÖNTEM	53
3.1 Materyal	53
3.1.1 Kullanılan dozimetreler	53
3.1.2 Risø TL/OSL okuyucu	54
3.1.3 Harshaw 3500 ve 4500 TLD okuyucuları	56
3.1.4 Tavlama üniteleri	58
3.1.5 Bruker EMX ESR spektroskopisi	59
3.1.6 GE Healthcare Alpha RT mamografi cihazı	61
3.1.6.1 Polimetil metakrilat (PMMA) fantomlar	61
3.1.6.2 10X6-6M mamografi sistemi için kullanılan iyon odası	62
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
4.1 Thermalox 995 BeO Dozimetresi Termal Sönümlenme Çalışması	63
4.2 Thermalox 995 BeO Dozimetresi TL Kinetik Çalışması	74
4.2.1 Kesikli ışınma eğrisi tekniği sonuçları	74
4.2.2 Pik şekli metodu sonuçları	76
4.2.3 Farklı ısıtma hızları metodu sonuçları	77
4.2.4 İzotermal bozunum yöntemi sonuçları	78
4.2.5 Dekonvolüsyon yöntemi (CGCD) sonuçları	80
4.3 Thermalox 995 BeO Dozimetresi TL, OSL ve ESR Korelasyonu	86
4.3.1 Thermalox 995 BeO ESR analizi	88
4.3.2 Thermalox 995 BeO OSL analizi	91
4.3.3 Thermalox 995 BeO SEM ve EDX analizi	91
4.3.4 TL, OSL ve ESR sinyallerinin kademeli tavlama (step annealing) deneyi sonuçları	93
4.3.5 Thermalox 995 BeO ESR doz cevap ve sönüm (fading) çalışması.....	97
4.3.6 ESR izotermal ve ağartma (bleaching) deneyi sonuçları	98

4.3.7 Thermalox 995 BeO TL, OSL ve ESR korelasyon sonuçları	102
4.3.7.1 2. TL piki, OSL C ₁ bileşeni ve 1. ESR merkezi (Al ⁺²).....	102
4.3.7.2 3. TL piki, OSL C ₂ bileşeni ve 3. ESR merkezi (İzotropik O ⁻ merkezi)...	105
4.3.8 ESR merkezlerinin aktivasyon enerjilerinin belirlenmesi	105
4.3.9 Thermalox 995 BeO transfer olayı	106
4.3.10 Thermalox 995 BeO TA-OSL sinyalinin incelenmesi	107
4.4 Radkor BeO Dozimetresi TL ve OSL Kinetik Çalışması	111
4.4.1 Radkor BeO tavlama çalışması	112
4.4.2 Dekonvolüsyon metodu (CGCD) sonuçları	113
4.4.3 Kesikli ışımaya eğrisi tekniği sonuçları	114
4.4.4 Radkor BeO TL doz cevap eğrisi	115
4.5 Radkor BeO OSL Çalışması	116
4.5.1 Radkor BeO OSL doz cevap eğrisi	116
4.5.2 Radkor BeO ağartma (bleaching) deneyi sonuçları.....	117
4.5.3 Radkor BeO T _{max} -T _{stop} deneyi	118
4.6 Radkor BeO Termal Sönümlenme Olayının İncelenmesi	121
4.7 Radkor ve Thermalox 995 BeO Dozimetrelerinin Karşılaştırılması.....	123
4.7.1 TL ve OSL sinyallerinin kıyaslanması	123
4.7.2 Minimum dedekte edilebilen doz (MDD) değerinin incelenmesi	124
4.7.3 Radkor BeO EDX ve XRD analizi	125
4.8 Mamografi Sistemi Kalite Kontrol Testleri.....	127
4.8.1 Tüp çıkış testi ve tüp çıkışının tekrarlanabilirlik testi.....	127
4.8.2 Yarı değer kalınlığının (HVL) belirlenmesi	129
4.8.3 Tüp gerilim (kVp) doğruluğu ve tekrarlanabilirliği	130
4.9 Mamografi Sisteminde Dozimetri	131
4.9.1 Dozimetrelerin kalibrasyonu	131
4.9.2 Tekrarlanabilirlik	133
4.9.3 Doz cevap eğrisi	133
4.9.4 Mamografi sisteminde kliniksel niceliklerin belirlenmesi.....	134
4.9.4.1 Geri saçılım faktörü (BSF)	134
4.9.4.2 Yüzey giriş dozu (ESD)	136

4.9.4.3 Ortalama glandüler doz (MGD)	138
5. SONUÇ	142
KAYNAKLAR	147
EK 1 Ortalama Glandüler Doz (MGD) Hesabı İçin Gerekli Faktörler	163
ÖZGEÇMİŞ	165



SİMGELER DİZİNİ

β	Isıtma Hızı
E	Aktivasyon Enerjisi
s	Frekans Faktörü
τ	Yaşam ömrü
GOK	Genel Mertebe Kinetik
b	Kinetik Mertebe Terimi (GOK'a Göre)
R	Kinetik Mertebe Terimi (Lambert-W Fonksiyonuna Göre)
E_g	Yasak Band Aralığı
k	Boltzmann Sabiti
n_c	Elektronların Konsantrasyonu
m	Hol Konsantrasyonu
R	Rekombinasyon Merkezi
T	Tuzak Merkezi
A_m	Rekombinasyon Olasılığı
A_n	Tekrar Tuzaklanma Olasılığı
N	Elektron Tuzaklarının Konsantrasyonu
n	Tuzaklanmış Elektronların Konsantrasyonu
n_0	$t = 0$ anındaki Tuzaklanmış Toplam Elektronların Sayısı
I_{TL}	Termolüminesans Şiddeti
I_{OSL}	Optik Uyarmalı Lüminesans Şiddeti
T	Mutlak Sıcaklık
μ_g	Simetri Faktörü
ϕ	Foton Akısı
σ	Fotoiyonizasyon Tesir Kesiti
T_m, T_{max}	Maksimum Sıcaklık
T_{stop}	Durma Sıcaklığı

T_m^d	Düzeltilmiş Sıcaklık Değeri
f	Verim Normalizasyon katsayısı
$f(d)$	Supralineerlik İndeksi
g	g Faktörü
g_{\perp}	g Faktörünün Paralel Bileşeni
g_{\parallel}	g Faktörünün Dik Bileşeni
μ_B	Bohr Manyetonu
B_0	Rezonans Manyetik Alanı
$\eta(T)$	Termal Lüminesans Verimi
W, C	Termal Sönümlenme Parametreleri
$I_q(T)$	Sönümlenmiş Pik Şiddeti
$I_{uq}(T)$	Sönümlenmemiş Pik Şiddeti
η_m	Maksimum Termal Lüminesans Verimi
CGCD	Dekonvolüsyon Yöntemi
FOM	Figure of Merit
Mo	Molibdenyum
Rh	Rodyum
W	Tungsten
Gy	Gray
ESD	Entrance Surface Dose (Yüzey Giriş Dozu)
ESAK	Entrance Surface Air Kerma (Yüzey Giriş Hava Kerma)
BSF	Backscatter Factor (Geri Saçılım Faktörü)
MGD	Ortalama Glandüler Doz
K	Hava Kerma
kVp	KiloVoltaj Pik
mAs	Mili Amper Saniye
AEC	Otomatik Işınlama Kontrolü
PMMA	PoliMetil Metakrilat
EUREF	European Reference Organisation For Quality Assurance Breast Screening And Diagnostic Services

HVL	Yarı Değer Kalınlığı
ACR	American College Of Radiology
IPEM	Institute of Physics and Engineering In Medicine
TL	Termolüminesans
OSL	Optik Uyarmalı Lüminesans
ESR	Elektron Spin Rezonans
TA-OSL	Termal Asistan OSL
TLD	Termolüminesans Dozimetre
OSLD	Optik Uyarmalı Lüminesans Dozimetre
MDD	Minimum Dedekte Edilebilen Doz
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD	X-ray Diffraction (X-Işımı Kırınım Yöntemi)
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis (Enerji Dağılımlı X-Işımı Spektroskopisi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Floserans ve fosforesans olayının şematize edilmiş hali	7
Şekil 2.2 Bir tuzak-bir rekombinasyon merkezine dayanan TL modeli	9
Şekil 2.3 Farklı OSL uyarım modları; a) Işık şiddetinin uyarım boyunca sabit tutulduğu CW-OSL, b) Işık şiddetinin lineer olarak arttığı LM-OSL, c) Işık şiddetinin pulslu olarak değiştiği POSL (Bøtter-Jensen vd. 2003).....	15
Şekil 2.4 Zeeman olayı	22
Şekil 2.5 ESR spektrumları (Ranby ve Rabek 1977) a) Soğurma, b) 1. türev, c) 2. türev	24
Şekil 2.6 a) NaCl'deki F merkezi; b) MgO'deki V merkezi (Weil ve Bolton 2007).....	27
Şekil 2.7 $S=1/2$ ve $I=1/2$ spin sistemi için izotropik aşırı ince yapı sabiti durumunda enerji seviyeleri ve oluşan spektrum (Jackson ve Hargreaves 2009)	29
Şekil 2.8 Meme anatomisinin kesit görünüşü (Patrick 2006)	44
Şekil 3.1 Tez boyunca kullanılan dozimetreler; a) Thermalox 995 BeO, b) Radkor BeO, c)Innovacera çubuk BeO, d) Thermo Scientific LiF:Mg,Ti (TLD-100)	53
Şekil 3.2 Risø TL/OSL DA-20 okuyucu	54
Şekil 3.3 Risø TL/OSL okuyucuda bulunan üç farklı filtrenin (Hoya U-340, BG-39 ve BG-3) geçirim karakteristikleri (Anonymous 2017)	55
Şekil 3.4 Elsec 9010 ışınlayıcı ünitesi	56
Şekil 3.5 a)Harshaw 3500, b) Harshaw 4500 TLD okuyucu	57
Şekil 3.6 a) Protherm Kül fırını, b) PTW Freiburg Theldo Fırın.....	58
Şekil 3.7 Dozimetrelerin tavlama ve saklanması için kullanılan çelik tabla	59
Şekil 3.8 a) X-Band Bruker ESR spektrometre, b) Kavite	60
Şekil 3.9 ESR spektrometresinin bileşenleri	60
Şekil 3.10 GE Healthcare Alpha RT mamografi cihazı	61
Şekil 3.11 Meme eşdeğeri PMMA (polimetilakrilat) fantomlar	62
Şekil 3.12 10X6-6M Radcal İyon odası	62
Şekil 4.1 Thermalox 995 BeO TL ısıtma eğrisi	63
Şekil 4.2 Farklı ısıtma hızlarının TL ısıtma eğrisi üzerindeki etkisi a) U-340 filtre; b) BG-39 filtre	64
Şekil 4.3 Normalize pik alanlarının ısıtma hızlarına göre değişimi	65
Şekil 4.4 Fit işlemi sonucunda elde edilen örnek W ve C parametreleri için 2. ve 3. pike ait verim eğrileri.....	67

Şekil 4.5 Thermalox 995 BeO dozimetre için 2. ve 3. pikin sönümlenmemiş TL sinyallerinin farklı ısıtma hızlarına göre integral değerlerinin sapması ($\sigma_{A_{uq}}$).....	69
Şekil 4.6 Her iki filtre konfigürasyonunda 2. ve 3. pik için kabul edilen aralıktaki W ve C değerlerine ait TL ışıma eğrisi yeniden yapılandırma (rekonstrüksiyon) örnekleri	70
Şekil 4.7 2.ve 3. pik için termal sönüm verim eğrilerinin kendisi ve birinci türevi.....	72
Şekil 4.8 Kesikli ışıma eğrisi tekniği sonuçları, a) 100 ve 400°C aralığında sönümlenmiş ve yeniden yapılandırılmış verilere göre aktivasyon enerjisi plato bölgeleri ..	76
Şekil 4.9 Farklı ısıtma hızları (0.25 ve 2K/s) arasındaki $\ln(T_m^2/\beta) - 1/kT_m$ grafiği, a) Rekonstrüksiyon işleminden önce (sönümlenmiş TL verilerine göre), b) Rekonstrüksiyon işleminden sonra (sönümlenmemiş TL verilerine göre).....	78
Şekil 4.10 a) İzotermal Bozunum (IB) eğrilerinin zamanla değişimi, b) 160 °C ve 280 °C sıcaklıklarında $(I_0/I)^{b-1/b} - 1$ 'nin zamanla değişimi, c) 2. pik için 150 ve 180 °C; 3. pik için 260 ve 290 °C sıcaklıklarında $b=1.05$ ve $b=1.2$ kinetik mertebeye terimler için $((I_0/I)^{b-1/b} - 1$ 'nin zamanla değişimi; d) $\ln(m)$ 'in $1/kT$ 'ye göre değişimi	79
Şekil 4.11 Kirsh ve Chen (1991)'e göre Denklem (2.52) aracılığı ile izotermal bozunum eğrilerinden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri	80
Şekil 4.12 İkinci ve üçüncü piklerin Lambert- W fonksiyonuna göre dekonvolüsyonu..	82
Şekil 4.13 1 kGy $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ile ışınlanmış BeO ESR spektrumu, a) Oklar, 1. merkeze ait ESR çizgileri, b) 2. merkez	89
Şekil 4.14 Thermalox 995 BeO OSL eğrisi ve dekonvolüsyonu	91
Şekil 4.15 BeO için SEM görüntüleri (a) Thermalox 995 BeO, (b) Innocevara çubuk BeO dozimetre	92
Şekil 4.16 TL piklerinin kademeli tavlama (step annealing) deneyi sonuçları, a) Ağartılmış ve ağartılmamış 2. TL piki, b) Ağartılmış ve ağartılmamış 3. TL piki	93
Şekil 4.17 OSL bileşenlerinin kademeli tavlama (step annealing) deney sonuçları	94
Şekil 4.18 ESR merkezlerinin kademeli tavlama deney sonuçları, a) 1. merkez; b) 2. merkez	96
Şekil 4.19 a) İki farklı sıcaklıkta (180 ve 200°C) 3. merkezin ESR spektrumu, b) 3. merkezin kademeli tavlama deney sonuçları	96
Şekil 4.20 5-2000 Gy arasında $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile ışınlanmış çubuk BeO dozimetresinin artan doz ile ESR şiddetinin değişimi (doz cevap), a) 1. merkez, b) 2. merkez, c) 3. merkez	98
Şekil 4.21 ESR merkezlerinin zamanla sönüm deneyi, a) 1. merkez, b) 2. merkez, c) 3. merkez	99

Şekil 4.22 İzotermal bozunum eğrileri, a) 1. merkez, b) 2. merkez, c) 3. merkez	99
Şekil 4.23 ESR merkezleri için için Arrhenius grafiği aracılığı ile aktivasyon enerjileri	100
Şekil 4.24 ESR merkezlerinin mavi ışık (2 mW/cm^2) altındaki davranışları (ağartma davranışı)	101
Şekil 4.25 Farklı OSL uyarım zamanlarına göre TL ışımaya eğrilerinin değişimi, c) T_{stop} sıcaklıklarına göre oda sıcaklığında elde edilen CW-OSL eğrileri	103
Şekil 4.26 Rekonstrüksiyon işlemi ve TL ışımaya eğrileri, a) Şekil 4.25a'da elde edilen 3. pik için RTL grafiklerinin rekonstrüksiyonu, b) Şekil 4.16'da elde edilen 2. pik (TL_A-TL_B) TL şiddet değerlerinin rekonstrüksiyon ile düzeltilmiş ve düzeltilmemiş hallerinin T_{stop} sıcaklığına göre	103
Şekil 4.27 Ortak kademeli tavlama deneyi sonuçları, a) 2. TL piki, C_1 bileşeni, 1. ve 2. ESR merkezi, b) 3. TL piki, C_2 bileşeni, 3. ESR merkezi	104
Şekil 4.28 a) Farklı uyarım sıcaklıklarında (25 ve $280 \text{ }^\circ\text{C}$) CW-OSL ölçümleri, b) C_1 bileşeni (kırmızı noktalar) ve C_2 bileşeni (mavi kareler) toplam sinyal şiddet değerlerinin OSL sıcaklıklarına göre değişimi	107
Şekil 4.29 a) Seçilmiş üç farklı sıcaklık değeri (170 , 190 ve $220 \text{ }^\circ\text{C}$) için TA-OSL eğrileri; b) Toplam alan değerlerine göre elde edilen TA-OSL şiddet değerlerinin uyarım sıcaklığına göre değişimi	109
Şekil 4.30 Thermalox 995 BeO dozimetresi 0.1 ile 110 Gy doz değerindeki toplam alana göre TA-OSL sinyalinin doz cevap eğrisi	110
Şekil 4.31 a) Radkor BeO TL ışımaya eğrisi, b) Radkor BeO OSL eğrisi	111
Şekil 4.32 a) 3 Gy ışınlanmış Radkor BeO dozimetrelerin 20 dakika boyunca farklı tavlama sıcaklıkları (400 ile $800 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında) fırınlanması sonrasında elde edilen OSL eğrileri, b) Farklı tavlama sıcaklıklarındaki Toplam OSL alan şiddet değerleri	112
Şekil 4.33 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 1 Gy ışınlanmış Radkor BeO dozimetresinin dekonvolüsyonu	113
Şekil 4.34 Radkor BeO dozimetresi için kesikli ışımaya eğrisi tekniği sonuçları.....	114
Şekil 4.35 a) Radkor BeO dozimetre için artan doza karşı ($0.11-6.6 \text{ Gy}$) TL ışımaya eğrilerinin değişimi, b) Pik alan değerlerine göre doz cevap eğrisi	115
Şekil 4.36 Radkor BeO dozimetresinin OSL dekonvolüsyonu.....	116
Şekil 4.37 a) BeO Radkor dozimetre için artan doza karşı ($0.11-6.6 \text{ Gy}$) normalize OSL eğrilerinin değişimi, b) OSL bileşenlerinin (C_1 ve C_2) alan değerlerine göre doz cevap eğrisi	117
Şekil 4.38 a) OSL sonrası (2 , 5 , 10 , 25 , 50 , 100 , 200 , 350 ve 500s) elde edilen RTL ışımaya eğrileri, b) OSL sonrası elde edilen TL piklerinin ağartma süresine göre değişimi	118

Şekil 4.39 a) Radkor BeO dozimetresinin farklı T_{stop} sıcaklıklarına göre (150-400°C) TL ışımaya eğrilerinin davranışı, b) T_{stop} sıcaklıklarına göre TL pik alanlarının şiddet değişimi	119
Şekil 4.40 a) Radkor BeO dozimetresinin farklı T_{stop} sıcaklıklarına göre (150-400°C) OSL eğrilerinin davranışı, b) T_{stop} sıcaklıklarına göre TL pik alanlarının şiddet değişimi	119
Şekil 4.41 Radkor BeO ağartılmış ve ağartılmamış TL piklerinin T_{stop} sıcaklığına göre değişiminin incelenmesi, a) 1. pik, b) 2. pik, c) 3. pik, d) 4. pik.....	120
Şekil 4.42 Radkor BeO için a) Artan ısıtma hızlarına göre TL ışımaya eğrileri, b) İntegral (tüm alan) TL ışımaya eğrisinin alan değişimi	121
Şekil 4.43 Radkor BeO için artan ısıtma hızlarına göre TL piklerinin alan şiddet değerlerinin değişimleri, a) 1. pik, b) 2. pik, c) 3. pik	122
Şekil 4.44 Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreler için a) Normalize TL ışımaya eğrileri, b) Normalize OSL bozunum eğrileri	123
Şekil 4.45 Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için XRD grafikleri	126
Şekil 4.46 Tüp çıkışı ölçüm düzeneği	127
Şekil 4.47 Mamografi sisteminde dozimetrelerin (TLD-100 ve BeO) kalibrasyonu için kurulan ışınlama düzeneği	132
Şekil 4.48 28kVp ve 63mAs değerinde Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda dozimetrelerinin tekrarlanabilirlik sonuçları; a) Radkor BeO, b) Thermalox 995 BeO	133
Şekil 4.49 BeO dozimetreler için Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda doz cevap eğrisi	134
Şekil 4.50 Geri saçılım faktörünün (BSF) belirlenmesi için dozimetrelerin havadaki ışınlama düzeneği, a) TLD-100, b) BeO dozimetreler	135
Şekil 4.51 Yüzey giriş dozlarının (ESD) belirlenmesi için kurulan deney düzeneği; a) TLD-100, b) BeO dozimetreler	137

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 TA-OSL ölçüm protokolü (Polymeris ve Kitis 2012)	20
Çizelge 2.2 ESR’de kullanılan frekans aralıkları	24
Çizelge 2.3 Genel merteye için c_{γ} ve b_{γ} sabitlerinin değerleri	32
Çizelge 3.1 Risø TL/OSL- DA-20 okuyucu genel özellikleri (Anonymous 2017)	55
Çizelge 3.2 Harshaw 3500 ve 4500 okuyucu genel özellikleri	57
Çizelge 4.1 2. ve 3. pik için elde edilen termal sönümlenme parametreleri (W ve C).....	68
Çizelge 4.2 Yeniden yapılandırma işlemi (rekonstrüksiyon) öncesi ve sonrası 2. ve 3. piklerin aktivasyon enerjileri ve frekans faktörlerinin değişimi.....	83
Çizelge 4.3 ESR ölçümlerinde kullanılan ölçüm parametreleri	89
Çizelge 4.4 Thermalox 995 ve Innocevara çubuk BeO dozimetreler için SEM-EDX analizi sonuçları	92
Çizelge 4.5 Radkor BeO dozimetresi için dekonvolüsyon ve kesikli ışınma eğrisi tekniği sonuçları	115
Çizelge 4.6 Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için TL ve OSL durumlarında minimum dedekte edilebilen (MDD) doz değeri	125
Çizelge 4.7 Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için EDX analizi sonuçları	126
Çizelge 4.8 Farklı X ışını enerjilerine göre tüp çıkışı değerleri.....	128
Çizelge 4.9 Farklı tüp gerilim değerlerinde elde edilen HVL değerleri (mm Al)	129
Çizelge 4.10 Tüp gerilimi, kVp doğruluğu	130
Çizelge 4.11 Dozimetrelerin mamografi sistemindeki okuma ve tavlama protokolleri	131
Çizelge 4.12 TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için farklı PMMA fantom kalınlıklarına göre elde edilen geri saçılım faktörleri (BSF).....	136
Çizelge 4.13 TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO BeO dozimetreleri için farklı PMMA fantom kalınlıklarında elde edilen sayım değerleri ve yüzey giriş doz değerleri (ESD)	137
Çizelge 4.14 İyon odası, TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için ESAK değerleri	138
Çizelge 4.15 İyon odası, TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için ortalama glandüler doz (MGD) değerleri	139
Çizelge 4.16 Dozimetrelerden elde edilen MGD değerlerinin iyon odasına göre minimum ve maximum sapma değerleri	139
Çizelge 1 PMMA fantom ile simüle edilmiş meme için g faktörü (Dance vd. 2000) 163	
Çizelge 2 PMMA fantom ile simüle edilmiş meme için c dönüşüm faktörü (Dance vd. 2000)	163
Çizelge 3 Farklı tüp gerilim ve hedef filtre kombinasyonları için HVL ölçümleri (EUREF 2006)	164
Çizelge 4 Klinik olarak kullanılan spektrumlar için s faktörü (Dance vd. 2000)	164
Çizelge 5 PMMA kalınlığına göre ortalama glandüler doz değerleri (EUREF 2006)	164

1. GİRİŞ

Lüminesans olayı, bir materyalin dış bir kaynaktan soğurduğu enerjiyi görünür bölgede ışık olarak yayınlaması olarak tanımlanır. Yayınlanan ışığın dalga boyu lüminesans materyalinin karakteristik bir özelliğidir. Yayınlanan lüminesans genellikle görünür bölgede olmasına karşın ultraviyole ve kızılötesi dalga boylarında da lüminesans oluşmaktadır (McKeever 1985).

Doğrudan ya da dolaylı olarak iyonize radyasyona maruz kalmış materyalin ya da dokunun aldığı soğurulan dozun belirlenmesi için kullanılan cihazlara dozimetre denir. Dozimetreler, anlık doz seviyelerini ölçen aktif dozimetreler ve bir takım ön işlemlerden sonra belirli periyotlarla toplam doz bilgisi veren pasif dozimetreler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Aktif dozimetrelerin boyutlarının pasif dedektörlere göre büyük olmaları, pahalı olmaları ve sadece X ve gama ışınlarını ölçebilmeleri gibi dezavantajları yüzünden; canlı üzerinde istenilen noktalarda ölçüm imkanı sağlayan, küçük boyutlu, maliyet olarak daha ucuz ve kolay elde edilebilir pasif dozimetreler aktif dozimetrelere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik ve kalem dozimetreler, aktif dozimetre tipine; termolüminesans ve optik uyarmalı lüminesans dozimetreler (TLD, OSLD) ise pasif dozimetre tiplerine örnek olarak verilebilir (Stabin 2007, Ahmed 2007, Mahdiraji vd. 2016).

İyonize radyasyonun dozimetre ile etkileşimi, dozimetrenin yapısında bulunan doğal ya da yapay yolla oluşmuş safsızlık ya da kusurların iyonize radyasyonla olan etkileşimine dayanır. Materyale gelen radyasyonun meydana getirdiği yüklerin bu safsızlık ya da kusurlarda tuzaklanması ve tuzaklanan bu elektronların termolüminesans (TL) tekniğinde ısı (TL) ya da optik uyarmalı lüminesans (OSL) tekniğinde ışıkla uyarımı ile yüklerin tuzaklar arası geçişi sayesinde lüminesans elde edilmektedir. TL ve OSL tekniklerinin yanı sıra Elektron Spin Rezonans (ESR) tekniği ile paramanyetik özelliğe sahip materyallerin manyetik alanla olan etkileşimleri sonucu materyalin kristal yapısı ve dozimetrik özellikleri incelenebilmektedir.

TL olayı, 1600'lü yıllarda ısınan elmaştan yayınlan ışığın tespiti sayesinde Robert Boyle tarafından keşfedilmiştir. 1950'li yıllarda Daniels ve arkadaşları tarafından LiF materyalinin termoluminesans dozimetre olarak kullanılabilir ilk materyal olduğu keşfedilmiştir (Daniels vd. 1953). OSL olayı ise ilk olarak Antonov-Romanovski ve arkadaşları tarafından 1956 yılında radyasyon dozimetresinde kullanılabilir bir teknik olarak öne sürülmüş; 1985'li yıllarda Huntley ve arkadaşları tarafından sedimentlerden çıkarılan kuartz mineralinin yaş tahmini için kullanılabilirliği gösterilmiştir (Huntley vd. 1985). ESR tekniği ise Zavoisky tarafından 1945 yılında keşfedilmiş ve 1960'lı yıllarda ilk olarak Bradshaw vd. (1962) tarafından dozimetrik uygulamalarda kullanılabilirliği gösterilmiştir.

TL, OSL ve ESR teknikleri kişisel dozimetri, çevresel dozimetri, geriye dönük/kaza dozimetrisi, arkeolojik ve jeolojik tarihlendirme, uzay dozimetrisi ve radyasyonun tıbbi uygulamaları olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Her üç teknik sonucunda elde edilen lüminesans ve ESR şiddetlerinin uygun doz hızı bilinen radyasyon kaynağındaki davranışının incelenmesi ile materyalin soğurduğu doz değeri elde edilmektedir.

İyonlaştırıcı radyasyonun bulunduğu ortamlarda (hastane, nükleer reaktörler, hızlandırıcılar, gıda ve baharat ışınlamaları gibi) bireyin maruz kaldığı doz seviyelerinin takip edilmesi ve maruz kalınan doz değerlerinin uluslararası atom enerjisi tarafından belirlenen limit değerlerin altında tutulması gerekmektedir. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) radyasyon güvenliği yönetmeliği gereği, radyasyon alanlarından denetimli alanlarda dozimetre takılması zorunlu tutulmaktadır. Doz değerleri, TAEK veya akredite olan dozimetre şirketleri aracılığı ile 2 aylık periyotlar halinde ölçülmektedir. Günümüzde iyonize radyasyonun kullanımının artması ile dozimetrelerin kullanımı da gün geçtikçe artmakta, dozimetrik çalışmalar üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır (Mahdiraji vd. 2016, www.taek.gov.tr, 2019).

Dozimetre alanı, ilgilenilen dozimetrelerin TL, OSL ya da ESR gibi tekniklerle tuzak geçişlerinin ve kristal yapılarının anlaşılması sonucunda ortaya çıkmış bir uygulama alanıdır. Bir materyal dozimetre olarak kullanılmadan önce bu materyalin

tekrarlanabilirlik, doz cevap ilişkisi, termal sönüm, enerji bağımlılığı, toksik olmama gibi birçok faktörün detaylı olarak araştırılması gerekmektedir. Bu amaçlarla, TL, OSL, ESR, SEM, XRD gibi teknikler dozimetrelerin lüminesans mekanizması ve kristal yapısının detaylı olarak anlaşılması için kullanılmaktadır.

Termal ve optik uyarım sonucunda elde edilen TL ve OSL sinyalinin birbirleri ile olan ilişkileri materyaldeki lüminesans mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Böylece, elde edilen TL ve OSL sinyallerinin kaynağının aynı tuzaklardan mı yoksa farklı tuzaklardan mı kaynaklandığı ya da materyaldeki sığ ve derin tuzakların varlığı hakkında önemli bilgiler edinilmektedir. Elde edilen bu veriler ışığında TL ve OSL sinyallerinin oluşum mekanizmaları daha iyi anlaşılmalıdır. Bu bilgiler sayesinde minimum dedekte edilebilir doz (MDD) değerleri genişletilebilmekte ve doz hesaplamalarında kullanılacak yeni ölçüm protokollerinin geliştirilmesine olanak sağlayabilmektedir. Ayrıca, ESR tekniği sayesinde materyalin kristal yapısının incelenerek materyaldeki safsızlık ve kusurlar belirlenebilmektedir. Bu üç tekniğin (TL, OSL ve ESR) korelasyonu sayesinde ESR merkezlerinin, TL ve OSL sinyalinden sorumlu olan elektron ya da hol tuzakları ile ilişkisi kurulmaktadır. Böyle bir korelasyonunun varlığı durumunda, TL ve OSL sinyallerinden sorumlu ESR merkezlerinin miktarının artırılması ile lüminesans veriminin artırılacağı öngörülmektedir (Vij 1998, Yukihara ve McKeever 2011, Chen ve Pagonis 2011). Pratik olarak bu işlemler, daha etkin ve verimli doz değerlendirmelerinin yapılabilmesine olanak sağlar.

Lüminesans veriminin artan sıcaklıkla azalması, termal sönümlenme olarak bilinir. Lüminesans verimindeki bu düşüş, sıcaklığın artması ile ışımsız geçişlerin oranının artması ile açıklanmaktadır (Curie 1963, Bøtter-Jensen vd. 2003). Bir materyalde termal sönümlenmenin varlığı farklı ısıtma hızlarında gerçekleştirilen TL ya da farklı okuma sıcaklıklarında yapılan OSL ölçümlerinin incelenmesi ile anlaşılabilir. Termal sönümlenme olayını tarif eden iki parametreden W parametresi OSL ölçümleri ile belirlenebilirken, W ve C parametrelerinin her ikisi TL ölçümleri ile elde edilebilmektedir. Termal sönümlenme olayından yalnızca TL piklerinin şekilleri değil aynı zamanda TL kinetik parametreleri de (E , s ve b) önemli ölçüde etkilenmektedir. Böyle bir durumda termal sönüme uğramış TL ışımaya eğrileri ile doz değerlendirmesi

yapmak hatalı sonuçlar doğurabilecektir. Bu yüzden termolüminesans (TL) dozimetri ya da tarihlendirme alanlarında kullanılacak olan materyallerin öncelikle termal sönüm olayına uğrayıp uğramadığının araştırılması gerekmektedir.

Berilyum oksit (BeO) materyali, yüksek ısı iletim kapasitesi (285 W/mK), yüksek elektriksel direnci, yüksek erime sıcaklığı (2570 °C), termal şoklara karşı dayanıklılığı, 2000 °C'ye kadar kimyasal yapısının kararlı olması gibi özellikleri sayesinde ticari alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik endüstrisinde devre elemanları için ısı dağıtan bir bileşen, yüksek şoklara dayanabildiği için ısı çift (termokupl) ve eritme kabı olarak kullanılmaktadır (Bulur ve Göksu 1998). Bunun yanı sıra, BeO materyalinin etkin atom numarasının 7.13 ve dokunun etkin atom numarasının 7.42 olması sebebiyle BeO yaklaşık doku eşdeğeri kabul edilmekte ve kişisel radyasyon dozimetresi olarak kullanılmaktadır. BeO dozimetreler, yaygın kişisel dozimetre olarak kullanımının yanı sıra medikal ve çevresel dozimetre olarak da kullanılmaktadır. Medikal sahada radyoterapi, proton terapi gibi alanlarda hedef organ ve organ dışı saçılan dozların ölçülmesinde; radyasyon kazası durumunda, çevrenin aldığı doz değerlerinin hesaplanmasında; astronotların uzayda aldığı dozların değerlendirilmesinde; iki boyutlu doz dağılımı sayesinde radyasyon alanlarının belirlenmesi ve materyal testi gibi bir çok alanda uygulama alanları bulunmaktadır (Woda vd. 2012, Şahin vd. 2015;2019, Santos vd. 2013, Mukherjee vd. 2017, Mukherjee 2015, Jahn vd. 2010, 2015). BeO'in yaklaşık doku eşdeğeri olması nedeniyle özellikle medikal alanda hasta dozlarının belirlenmesindeki kullanımı büyük önem taşımaktadır. BeO'in kişisel ve radyoterapi alanlarında dozimetre olarak kullanımı yaygın olarak görülürken, görüntüleme sistemlerindeki çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Dozimetrelerin lüminesans özellikleri; katkılanırılan elemente, içerdiği safsızlıklara ve üretim koşullarına bağılı olarak değışim gösterebilmektedir. Örneğın, farklı firmalardan alınan aynı tipteki dozimetreler ile elde edilen lüminesans özellikleri birbirlerinden farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, satın alınan dozimetrelerin lüminesans sinyali detaylı olarak araştırılmalı, literatür ile kıyaslanmalı ve olası farklılıklar incelenmelidir.

Meme kanserinin erken aşamada tespiti için en etkin görüntüleme tekniğinin mamografi görüntüleme sistemleri olduğu bilinmektedir. Mamografi sistemleri, x-ışınları kullanılarak insan memesinin olası tümör görüntülerini elde etmesine dayanmaktadır. Mamografi çekimlerinde bir hastanın aldığı doz meme karakteristiğine (boyut, yoğunluk vb.) bağlı olarak değişse de ortalama 1-2 mGy mertebesindedir (Beir 1990, Dance vd. 1999, 2000). Bu doz görel olarak küçük olmasına karşın memede bulunan glandüler dokuda mamografi çekimi sonucunda kanser tetikleme riski bulunmaktadır. Meme için radyolojik riski değerlendirmek için referans değer olarak ortalama glandüler doz (MGD) değeri alınmaktadır (ICRP 1987, Dance vd. 1999,2000). Ortalama glandüler doz değeri doğrudan belirlenememekte, meme yüzeyinde ölçülen hava kerma ve Monte-Carlo simülasyonu aracılığı ile elde edilen faktörler ile belirlenmektedir (Dance vd. 1990, 2000; Wu vd.1994, Sobol ve Wu 1997; Boone vd.1999,2002).

Bu tez çalışması kapsamında, Thermalox 995 BeO dozimetreler için termal sönümlenme olayı incelenerek termal sönüm katsayıları olan W ve C parametreleri belirlenmiştir. BeO dozimetresi için C parametresi literatürde ilk defa belirlenmiştir. Thermalox 995 BeO dozimetreler için TL kinetik parametreleri (E , s ve b), çeşitli tuzak parametre belirleme yöntemleri kullanılarak termal sönümlenme düzeltmesinin olduğu ve olmadığı her iki durum için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Böylece termal sönümlenme olayının TL pikleri ve TL kinetik parametreler üzerindeki etkileri detaylı olarak ele alınmıştır. Thermalox 995 BeO dozimetrelerin TL, OSL ve ESR sinyalleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Kademeli tavlama (step annealing) ve ağartma (bleaching) deneyleri gerçekleştirilerek TL pikleri, OSL bileşenleri ve ESR merkezlerinin birbirleriyle olan ilişkileri araştırılarak bunlar arasındaki mümkün korelasyon kurulmuş, ESR merkezlerinin ağartma ve zamanla sönüm davranışları ilk defa literatürde incelenmiştir. Bunun yanı sıra, Radkor Personel Dozimetre Şirketinden satın alınan BeO dozimetreler için TL kinetik parametreler, termal sönümlenme olayı, TL-OSL arasındaki ilişki ve minimum dedekte edilebilen doz (MDD) değeri belirlenmiş ve bu işlemler Thermalox 995 BeO ile gerçekleştirilerek birbirleri ile kıyaslanmıştır. Tezin son kısmında BeO dozimetrelerin mamografi sistemlerinde dozimetrik olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, literatürde ilk defa BeO dozimetreler kullanılarak mamografi sisteminde tekrarlanabilirlik, doz cevap eğrileri ve mamografideki klinik dozimetrik nicelikler; geri saçılım faktörü (BSF), yüzey giriş hava

kerma (ESAK), yüzey giriş dozu (ESD) ve ortalama glandüler doz (MGD) değerleri belirlenmiştir. Benzer aşamalar TLD-100 dozimetreler ve iyon odası kullanılarak (ESAK ve MGD) gerçekleştirilmiş ve BeO dozimetrelerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

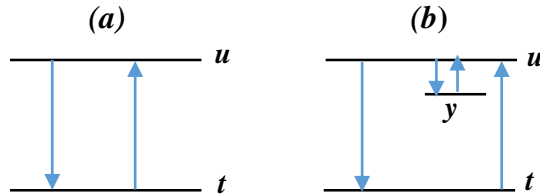


2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Lüminesans

Lüminesans, bir materyalin dış bir kaynaktan soğurduğu enerjiyi görünür bölgede ışık olarak yayınlamasını tarif eden bir süreçtir. Lüminesans olayı, materyallerin yaklaşık 600 °C'nin üstüne ısıtılması ile ortaya çıkan akkor ışığı ile karıştırılmamalıdır. Akkorlaşma, fononlar aracılığı ile atomların titreşmesi sonucu Wien kayma yasasına (artan sıcaklıkla yayınının mavi bölgeye kayması) uyarken, lüminesans olayı uyarılmış durumda bulunan valans elektronlarının uyarılması ve taban durumuna dönme olayı ile ilişkilidir. Akkorlaşma sıcak ışık ya da siyah cisim olarak adlandırılırken, lüminesans soğuk ışık olarak adlandırılır (McKeever 1985, Lakshmanan 2008).

Radyasyonun malzeme tarafından soğurulduktan sonra malzemenin yayınım yapması için geçen sürenin, 10^{-8} s'den küçük olduğu durumlar *floresans* olayı, 10^{-8} s'den büyük olduğu durumlar ise *fosforesans* olarak tanımlanır (Chen ve McKeever 1997). Şekil 2.1, floresans ve fosforesans olayını göstermektedir.



Şekil 2.1 a) Floresans, b) fosforesans olayının şematize edilmiş hali

Şekil 2.1a uyarılmış durumda (u) bulunan bir elektronun taban durumuna (t) geçişinden yayınlanan ışık floresans olayını, yarı kararlı (y) bir seviyenin varlığında uyarılmış durumda olan bir elektronun taban durumuna dönüşü ise fosforesans olayını (Şekil 2.1b) temsil etmektedir (Chen ve McKeever 1997).

Lüminesans materyaller, yasak enerji aralığı $<3\text{eV}$ olan yarı iletken ya da yasak enerji aralığı $>3\text{eV}$ olan yalıtkanlar olarak iki sınıfta toplanabilir (Lakshmanan 2008). Lüminesans olayı, bu olayı başlatmak için gerekli enerjiye göre farklı adlandırılır. Bu olay, sıcaklık ile gerçekleşmişse termolüminesans (TL), ışık ile gerçekleşmişse, optik uyarımlı lüminesans (OSL), X, gama ışınları ve beta parçacıkları gibi iyonize radyasyonla gerçekleşmişse, radyolüminesans; mekanik enerji ile meydana gelmişse triboluminesans; ses ile meydana gelmişse sonolüminesans ve biyokimyasal enerji ile meydana gelmişse biyolüminesans olarak adlandırılmaktadır (McKeever 1985).

Lüminesans, günlük yaşantıda floresans ışıktan manyetik rezonans görüntüleme (MR) alanındaki dijital radyografi, ışık yayan diyotlar (LED), katı hal lazerleri, elektronik bileşenlerde dahil olmak üzere bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Thirumalai 2016). Bunun yanı sıra lüminesans olayı, katı hal dozimetresi olarak iyonize radyasyonun ölçümünde kullanılmaktadır. Termolüminesans (TL) ve optik uyarımlı lüminesans (OSL) teknikleri; retrospektif (geriye dönük) dozimetri, jeolojik ve arkeolojik tarihlendirme alanları başta olmak üzere bir çok alanda soğurulan dozun belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

2.2 Termolüminesans (TL)

Termolüminesans (TL), yarı iletken ya da yalıtkan bir yapıya sahip olan katı bir materyalin ısıtılması sonucunda ortaya çıkan lüminesans olarak tanımlanır (Bos 2007). Termolüminesans olayının bir diğer tanımı McKeever 2000'e göre dengedeki TL materyalinin enerji soğurması (iyonize radyasyon ya da UV) ile yarı kararlı bir duruma geçmesi ardından ısı uygulanarak sistemin tekrar denge durumuna dönmesi ile tarif edilmektedir. Yayınlanan ışık (lüminesans) uyarılmış durumdaki yüklerin yarı kararlı seviyeden taban durumuna geçişinin bir sonucu olarak verilmektedir.

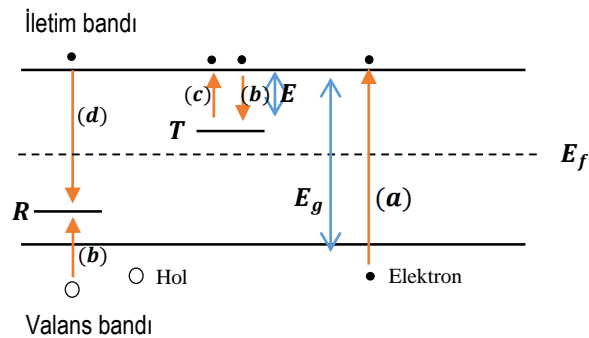
Termolüminesans (TL) olayı, bir malzemenin ısıtılması sonucu kendiliğinden ortaya çıkan akkor ışığından (siyah cisim ışıması) farklıdır. Termolüminesans olayı, öncelikle malzemenin radyasyon aracılığı ile enerji soğurması ve bunun ardından termal uyarım sonucunda lüminesans elde edilmesine dayanmaktadır (Bos 2007). Bir materyalde

termolüminesans (TL) olayının gözlenebilmesi için; ilk şart ilgilenilen materyalin yarı iletken ya da yalıtkan özellik göstermesidir. Metal malzemeler TL özelliğine sahip değildirler. İkinci gereksinim ise materyalin iyonize radyasyona maruz kaldığı süre boyunca enerji soğurabilmesi gerekmektedir. Son olarak, soğurulan bu enerjinin ışık olarak yayımlanabilmesi için malzemenin ısı ile uyarılması gerekmektedir (McKeever 1985).

TL dozimetredeki esas amaç, materyalin birim kütlesine verilen enerjinin (doz) materyal tarafından ne kadarının soğurulduğunun saptanmasıdır. Bu amaçla bilinen bir radyasyon dozunun materyale verilmesi sonucunda elde edilen lüminesansın bulunması ile materyalde soğurulan dozun ölçümü sağlanmış olur (McKeever vd. 1995).

2.3 Bir Tuzak-Bir Rekombinasyon Merkezi Modeli

Termolüminesans (TL) olayı, enerji band modeli aracılığı ile açıklanabilmektedir. İdeal bir kristalde, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerde elektronlar valans bandında bulunurlar. Elektronların bulunabileceği iletim bandı, valans bandından yasak band aralığı (E_g) ile ayrılır. Ancak, kristalde bulunan kusurlar ya da safsızlıklar var ise elektronlar yasak enerji aralığında bulunabilme olasılığına sahip olurlar. Basit bir TL modeli Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Bir tuzak-bir rekombinasyon merkezine dayanan TL modeli

Burada, T ile gösterilen seviye, fermi seviyesi üzerinde yer alır ve bir elektron tuzağı görevi görmektedir. R seviyesi ise bir hol tuzağı olarak adlandırılır ve rekombinasyon merkezi olarak işlev görmektedir. Gelen radyasyonun enerjisi, enerji band aralığından (E_g) fazla ise valans bandındaki elektronlar iyonize olarak iletim bandında serbest elektronlar, valans bandında serbest holler meydana getirirler ((a) geçişi). İletim bandına çıkan elektronların hollerle doğrudan rekombinasyonu sonucunda ($<10^{-8}$ s) yayınlanan ışık *radlyoluminesans* olarak adlandırılır. Ancak, yarı iletken ve yalıtkanlarda yüklerin önemli bir kısmı tuzaklarda tuzaklanırlar: Elektronlar T 'de ve holler R 'de tuzaklanırlar ((b) geçişi). Tuzaklanmış bir elektronunun tuzaklandığı tuzaktan birim zamanda kurtulma olasılığı, Denklem (2.1)'de Arrhenius eşitliği ile verilir:

$$p = s e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2.1)$$

Burada, s , sıcaklıktan bağımsız, örgü titreşim frekansı mertebesinde ve birimi s^{-1} olan frekans faktörü ; E , elektronun bulunduğu tuzaktan iletim bandına çıkması için gerekli enerji miktarı olup tuzak derinliği ya da aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır ve birimi eV olarak verilir; k , Boltzmann sabiti olup değeri 8.1617×10^{-5} eV/K'dir ve T mutlak sıcaklık olup birimi Kelvin ile verilir.

İyonize radyasyon materyale geldiğinde malzemede yaratılan elektronlar ve holler çiftler halinde eşit sayıda oluşur. Bu yüzden R tuzağında elde edilen tuzaklanmış hollerin sayısı elektronlarla aynı olmalıdır. R ve T tuzaklarındaki elektronlar ve hollerin konsantrasyonu denge dışı bir durumu (non-equilibrium state) temsil etmektedir. Bu durum yarı kararlı bir durumdur. Dengeye ulaşma durumu Denklem (2.1) ile verilen durumdaki E ve s parametreleri ile ilişkili olup sonsuz bir süre boyunca denge dışı durum varlığını sürdürebilir. Dengeye gelme durumu materyalin, ışınlama sırasındaki sıcaklıktan daha yüksek bir sıcaklığa ulaşması ile hızlandırılır. Bu durum elektronların tuzaktan kurtularak iletim bandına çıkma olasılığını yani (c) geçişini artırır. Yükler, iletim bandı aracılığı rekombinasyon merkezinde (R), rekombinasyona uğrayana kadar tuzaktan iletim bandına hareket ederler. Rekombinasyon merkezi, elektron ve hollerin birleşmesi sonucu bu merkezi uyarılmış durumda bırakan bir lüminesans merkezi olarak da bilinir. Bu merkezin uyarılmış durumdan taban durumuna dönerken yayınladığı ışık

termoluminesans (TL) olarak adlandırılır. Elde edilen birim zamandaki TL şiddeti $I_{TL}(t)$, R 'de bulunan elektron ve hollerin rekombinasyon hızı ile ilişkilidir (Denklem 2.2).

$$I_{TL}(t) = -\frac{dm}{dt} \quad (2.2)$$

Burada, m , R 'de bulunan hollerin konsantrasyonudur. Denklemdeki negatif işaret, hollerin zamanla azaldığını göstermektedir. Burada her rekombinasyonun bir foton, her üretilen fotonun da dedekte edildiği varsayılmıştır. Rekombinasyon hızı $\left(\frac{dm}{dt}\right)$, iletim bandındaki elektronların konsantrasyonu (n_c) ve hollerin konsantrasyonu (m) cinsinden verilebilir (Denklem 2.3).

$$I_{TL}(t) = -\frac{dm}{dt} = n_c mA_m \quad (2.3)$$

Burada A_m , birim zaman ve birim hacim başına sıcaklıktan bağımsız olan sabit bir rekombinasyon olasılığıdır. Tuzaklanmış elektronların konsantrasyonunun değişim hızı $\left(\frac{dn}{dt}\right)$, tuzaktan kurtulma olasılığından tekrar tuzaklanma olasılığının farkı ile verilir (Denklem 2.4):

$$-\frac{dn}{dt} = np - n_c(N - n)A_n \quad (2.4)$$

Burada N , elektron tuzaklarının konsantrasyonu ve A_n tekrar tuzaklanma olasılığı olup birimi m^3s^{-1} olarak verilir. Benzer olarak iletim bandındaki serbest elektronların konsantrasyonunun değişim hızı, $\left(\frac{dn_c}{dt}\right)$ Denklem (2.5) ile ifade edilir:

$$\frac{dn_c}{dt} = np - n_c(N - n)A_n - n_c mA_m \quad (2.5)$$

Denklem (2.3)-(2.5), bir elektron tuzağı ve bir rekombinasyon merkezi olması durumunda tuzaklanmış bir elektronun uyacağı yük mekanizmasını tarif etmektedir. Denklem (2.3)-(2.5) analitik olarak bilinen fonksiyonlar cinsinden çözülemezler. Analitik bir ifade geliştirmek için bazı varsayımlar yapmak gereklidir. Chen ve Mckeever (1997)

tarafından iletim bandında bulunan serbest elektron konsantrasyonunun yarı durağan kabul edilerek yarı denge (quasi equilibrium) varsayımı önerilmiştir. Bu varsayım Denklem (2.6)'daki gibi verilir.

$$\left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dn}{dt} \right| ; \left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dm}{dt} \right| \quad (2.6)$$

Bunun yanı sıra tuzaklanmış elektron ve holler ışınlama esnasında çiftler halinde oluştuğu için, yüklerin nötralliğinden dolayı $n_c + n = m$ olmalıdır. $n_c \approx 0$ için $n \approx m$ elde edilir. Bu durumda Denklem (2.2) aynı zamanda Denklem (2.7) ile verilir.

$$I_{TL}(t) = -\frac{dm}{dt} \approx -\frac{dn}{dt} \quad (2.7)$$

$\frac{dn_c}{dt} \approx 0$ için Denklem (2.3) ve (2.4) aracılığı ile $I_{TL}(t)$ ifadesi Denklem (2.8)'deki halini alır:

$$I_{TL}(t) = \frac{mA_m n s e^{-E/kT}}{(N-n)A_n + mA_m} \quad (2.8)$$

2.3.1 Birinci mertebe kinetik

Denklem (2.8), ek varsayımlar olmadan analitik olarak çözülemez. Bu durumda Randall ve Wilkins (1945a,b) tarafından ısıtma işlemi esnasında tekrar tuzaklanma olasılığının önemsiz olduğu ($mA_m \gg (N-n)A_n$) varsayılmıştır. Bu varsayım altında Denklem (2.8), Denklem (2.9)'a dönüşür:

$$I_{TL}(t) = -\frac{dn}{dt} = s n e^{-E/kT} \quad (2.9)$$

Sıcaklık sabit tutulursa, p sabit hale gelir ve Denklem (2.9)'un çözülmesi ile $I_{TL}(t)$ ifadesi Denklem (2.10) ile verilir:

$$I_{TL}(t) = I_0 e^{-tp} \quad (2.10)$$

Burada, I_0 , $t = 0$ anındaki şiddet değeridir. Sabit sıcaklıkta, bozunum zamanın üstel bir fonksiyonu halini alır. Eğer p terimi sıcaklıktan bağımsız değilse Denklem (2.9)'daki diferensiyel denklem tekrar çözüldüğünde Denklem (2.11) elde edilir:

$$I_{TL}(t) = -\frac{dn}{dt} = n_0 s e^{-\frac{E}{kT(t)}} \times \exp\left[-s \int_0^t e^{-\frac{E}{kT(t')}} dt'\right] \quad (2.11)$$

Burada, n_0 , $t = 0$ anında tuzaklanmış toplam elektronların sayısıdır. Denklem (2.11)'e göre sıcaklık arttıkça şiddet değeri başlangıçta artmakta ardından bir maksimuma ulaştıktan sonra azalma uğramaktadır. Bunun sonucunda elde edilen pik şekli 1. mertebe “ışınma eğrisi” olarak adlandırılır. Sıcaklık, zamanla lineer olarak artarsa ($T(t)=T_0+\beta t$; β , ısıtma hızı), lüminesans şiddeti $I_{TL}(t)$ sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Denklem (2.12) halini alır:

$$I_{TL}(T) = -\frac{dn}{\beta dt} = n_0 \frac{s}{\beta} e^{-\frac{E}{kT(t)}} \times \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{kT'}} dT'\right] \quad (2.12)$$

Denklem (2.12), tek bir pik için birinci mertebe Randall-Wilkins piki olarak bilinir. Elde edilen pik asimetriktir. Pikin yarı yükseklikteki genişliğine göre tanımlanan simetri faktörü (μ_g), birinci mertebe kinetik için 0.42 değerine eşittir (Halperin ve Braner 1960).

2.3.2 İkinci mertebe kinetik

Tuzaktan çıkan elektronlar için tekrar tuzaklanma olasılığının baskın ($mA_m \ll (N - n)A_n$) (Garlick ve Gibson 1948) ve tuzakların saturasyondan uzakta olduğu ($n \gg N$ ile $n = m$) varsayımları altında Denklem (2.8) ifadesi Denklem (2.13)'e dönüşür:

$$I_{TL}(t) = -\frac{dn}{dt} = \frac{sA_m}{NA_n} n^2 e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2.13)$$

Burada, n 'nin ikinci kuvveti ile verilen terim bu eşitliğin ikinci mertebeden bir denklem olduğunu gösterir. Rekombinasyon ve tekrar birleşme olasılığının eşit olduğu ($A_m = A_n$) ve sıcaklığın lineer olarak arttığı düşünülürse, Denklem (2.13)'ün integrali ve integral

sınırlarında $t \rightarrow T$ yapıldığında lüminesans şiddeti, ikinci mertebe kinetik için Denklem (2.14) ile verilir.

$$I_{TL}(T) = -\frac{dn}{\beta dt} = \frac{n_0^2 s}{N \beta} e^{-\frac{E}{kT}} \times \left[1 + \frac{n_0 s}{N \beta} \times \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{kT'}} dT' \right]^{-2} \quad (2.14)$$

Denklem (2.14), ikinci mertebe kinetik için Garlick ve Gibson (1948) TL eşitliği olarak bilinir. Bu durumda elde edilen eğri, birinci mertebe kinetiğin aksine simetrik kabul edilebilir. Eğrinin yüksek sıcaklıktaki düşük sıcaklıktaki kısmından daha geniştir. Pikin yarı yükseklikteki genişliğine göre tanımlanan simetri faktörü (μ_g) ikinci mertebe kinetik için 0.52'ye eşittir.

2.3.3 Genel mertebe kinetik

Birinci ve ikinci mertebe kinetik, belirli varsayımlar altında elde edilmiştir. Bu varsayımların olmadığı durumda, TL piki birinci ve ikinci kinetik mertebe durumlarının her ikisine de uymaz. May ve Partridge (1964) bu gibi durumlarda genel mertebe kinetik için deneysel bir ifade türetmişlerdir. Buna göre $I_{TL}(t)$, Denklem (2.15) ile verilir.

$$I_{TL}(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s' e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2.15)$$

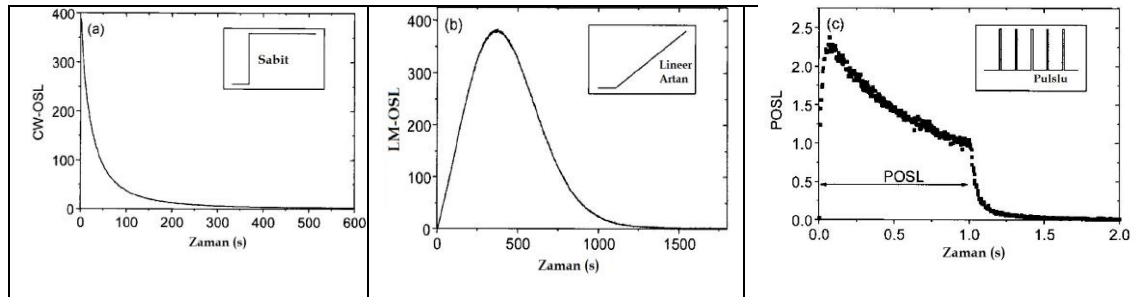
Burada, s' , $m^{3(b-1)}s^{-1}$ boyutundadır ve b genel mertebe kinetik olarak tanımlanır. Bu terim, 1 ya da 2 arasında bir değere sahip olup her daim 1 ya da 2 olmasına gerek yoktur. Denklem (2.15)'in integrali alınır ve integral sınırlarında $t \rightarrow T$ yapıldığında ($b \neq 1$ olmadığı durumda)

$$I_{TL}(T) = -\frac{dn}{\beta dt} = \frac{s''}{\beta} n_0 e^{-\frac{E}{kT(T)}} \times \left[1 + (b-1) \frac{s''}{\beta} \times \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{kT'}} dT' \right]^{-\frac{b}{b-1}} \quad (2.16)$$

elde edilir. Burada, $s''=s'n_0^{b-1}$ ve birimi s^{-1} 'dir. Denklem (2.20)'de $b = 1$ alınır, birinci mertebe kinetiğe Denklem (2.12)'ye, $b = 2$ alınır ikinci mertebe kinetiğe Denklem (2.14)'e dönüşür.

2.4 Optik Uyarımlı Lüminesans (OSL)

Optik uyarımlı lüminesans (OSL), ışınlanmış yarı iletken ya da yalıtkan malzemenin ışığa maruz kalması sonucunda açığa çıkan lüminesans olarak tanımlanır. OSL şiddeti, örnek tarafından soğurulan radyasyon dozunun bir fonksiyonudur. Bu ilişki OSL olayının radyasyon dozimetri metodu olarak kullanılmasını sağlar. TL mekanizmasında olduğu gibi malzemenin iyonize radyasyon soğurması ile birlikte elektron ve hol çiftleri yaratılır. Oluşan bu elektron ve holler malzeme içerisinde daha önceden yer alan kusurlar/safsızlıklarda tuzaklanırlar. Malzemenin ışıkla uyarımı sonucunda tuzaklanmış elektronlar enerji soğurur ve iletim bandına geçişler meydana gelir. Işık ile uyarım sonucu tuzaktan serbest kalan elektronların hollerle yeniden birleşme merkezlerinde birleşmesi lüminesans merkezini uyarılmış durumda bırakarak taban durumuna dönmesi sonucunda lüminesans meydana gelir. OSL olayı, fotolüminesans olayı ile karıştırılmamalıdır. Fotolüminesans olayında malzemenin ışığı soğurması ile materyaldeki elektron taban durumundan uyarılmış duruma geçmekte, ardından uyarılmış durumda bulunan elektron taban durumuna geçerken ilk durumdaki fotonun dalga boyundan daha uzun dalga boyunda lüminesans yayınımları ile sonuçlanmaktadır (Bøtter-Jensen vd. 2003).



Şekil 2.3 Farklı OSL uyarım modları; a) Işık şiddetinin uyarım boyunca sabit tutulduğu CW-OSL, b) Işık şiddetinin lineer olarak arttığı LM-OSL, c) Işık şiddetinin pulslu olarak değiştiği POSL (Bøtter-Jensen vd. 2003)

OSL ölçümlerinde, TL'nin aksine incelenen materyal farklı uyarım modları ile uyarılabilmektedir. Şekil 2.3'de materyalin farklı uyarım modlarında uyarılması sonucunda elde edilen OSL eğrileri verilmiştir. Uyarım kaynağının ışık şiddetinin uyarım boyunca sürekli olarak sabit tutulduğu "Sürekli dalga OSL" (CW-OSL) yöntemini (Şekil 2.3a), ışık şiddetinin zamanla doğrusal olarak arttırıldığı "Lineer modüle OSL" (LM-OSL) yöntemini (Şekil 2.3b) ve ışık şiddetinin pulslu olarak değiştiği ve pulslar arasında OSL'nin elde edildiği "Puls OSL" (P-OSL) yöntemini (Şekil 2.3c) ifade etmektedir (Bøtter-Jensen vd. 2003).

OSL tekniği okuma işleminin optik olarak gerçekleşmesi sayesinde herhangi bir ısı işlemine gerek duymaması sayesinde TL tekniğine göre bir avantaj olarak görülebilmektedir. Ayrıca, kuartz, Al_2O_3 ve BeO gibi materyallerde gözlemlenen termal sönümlenme olayının yol açtığı lüminesans veriminin düşmesine OSL tekniği ile önüne geçilebilmektedir (Bøtter-Jensen vd. 2003). Ancak materyalin OSL tekniği ile tuzaklarının tamamının boşaltılmadığı durumlarda materyal üzerine ısı işlemi uygulanmaktadır. TL tekniğinde OSL tekniğine bir avantaj olarak materyaller yeterli şartlarda yapılan ısıtma işlemleri ile tuzaklarındaki elektronların boşalması ile fototransfer olaylarının önüne geçilebilmektedir.

2.4.1 OSL teorik model

TL durumuna benzer olarak ışınlama ve sonrasında materyalin ışıkla uyarılması işlemi lineer olmayan denklemler ile ifade edilir. OSL sinyalinin zamanla olan ilişkini anlamak için birkaç varsayımda bulunmak gereklidir. Bunlardan ilki sistemin bir tuzak ve bir hol merkezi içerdiğini kabul etmektir. Tuzaklanmış holler, rekombinasyon merkezi görevi görürler ve elektronlar ile hollerin birleşmesi sonucu lüminesansa yol açar. Bu modelde, TL kinetiğinde olduğu gibi, yük dengesinin sağlanması için $n_c + n = m_v + m$ olmalıdır. Burada n_c ve n , sırasıyla iletim bandındaki elektronların ve elektron tuzaklarının konsantrasyonunu; $m_v + m$ ise sırasıyla valans bandındaki hollerin ve hol tuzaklarının konsantrasyonunu göstermektedir.

Işınlama işleminin sonunda termal denge koşulunun sağlandığı düşünülürse, (n_c ve $m_v=0$) ışıqla uyarım başlangıcında ($t=0$ anında) $n_0=m_0$ olacaktır. Işıqla uyarım işlemi esnasında, valans bandından geçişler olmayacağı için herhangi bir t zamanı boyunca yük nötrallığı; $n_c+n=m$ olacaktır. Bu durumda iletim bandındaki serbest elektronlar için, elektron ve hole konsantrasyonunun değişim hızı için denklemler TL durumundakine benzer olarak Denklem (2.17-19) ile verilir.

$$\frac{dn_c}{dt} = -\frac{dn}{dt} + \frac{dm}{dt} \quad (2.17)$$

$$\frac{dn}{dt} = np - n_c(N - n)A_n \quad (2.18)$$

$$\frac{dm}{dt} = n_c mA_m = \frac{n_c}{\tau} \quad (2.19)$$

Burada p terimi TL için Denklem (2.1) ile ifade edilirken, OSL durumunda, p terimi gelen foton akısı (ϕ) ve fotoiyonizasyon tesir kesiti (σ) terimlerinin çarpımı ile verilir (Denklem 2.20)

$$p = \phi \times \sigma \quad (2.20)$$

TL durumunda olduğu gibi yarı denge yaklaşımı yapılır ($\frac{dm}{dt} = \frac{dn}{dt}$) ve tekrar tuzaklanma olasılığı ihmal edilirse,

$$I_{OSL} = -\frac{dm}{dt} = -\frac{dn}{dt} = np \quad (2.21)$$

elde edilir. Denklem (2.21)'in integrali alınırsa,

$$I_{OSL} = -n_0 p e^{-tp} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad (2.22)$$

elde edilir. Burada, τ_d , CW-OSL bozunum sabitidir. Bu durumda, birinci merteye kinetik modeli, malzemeye uygulanan ışık şiddetinin artması ile OSL şiddetinin üstel olarak azaldığını gösterir. Tüm tuzaklardaki elektronlar bittiğinde OSL şiddeti sıfır değerini almaktadır (McKeever 1985, Bøtter-Jensen vd. 2003). OSL şiddeti için elde edilen Denklem (2.22) ifadesi kısıtlı bir durumdur ve tekrar tuzaklanmanın önemsiz olduğu bir durumu ifade etmektedir. Ancak, elde edilen deneysel CW-OSL bozunum eğrileri, basit bir eksponansiyel bozunum göstermemekte farklı bozunum yapısına sahip olabilmektedir. Tekrar tuzaklanma olasılığının önemli olduğu durumda elde edilen OSL şiddeti Denklem (2.23)'deki gibi verilir (Chen ve McKeever 1997):

$$I_{OSL} = np - n_c(N - n)A_n \quad (2.23)$$

$N \gg n$, ve $R = A/A_m \gg n/(N - n)$ durumu altında,

$$I_{OSL} = \frac{n^2 p}{NR} = -\frac{dn}{dt} \quad (2.24)$$

elde edilir. Denklem (2.24)'in integrali alınırsa Denklem (2.25) elde edilir:

$$I_{OSL} = I_0 \left(1 - \frac{n_0 p t}{NR}\right)^{-2} \quad (2.25)$$

Burada, $I_0 = \frac{n_0^2 p}{NR}$ dir. En genel durum için $I_0 = \frac{n_0^b p}{NR}$ e eşittir ve genel mertebeden OSL şiddeti, Denklem (2.26) ile verilir:

$$I_{OSL}(t) = I_0 \left(1 - \frac{n_0 p t}{NR}\right)^{\frac{b}{1-b}} \quad (2.26)$$

Bu ifade yaşam ömrü cinsinden tanımlanırsa, Denklem (2.26), (2.27) halini alır (Kitis ve Pagonis 2008), $b \neq 1$ olmadığında;

$$I_{OSL}(t) = I_0 \left(1 + (b - 1) \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{-b}{b-1}} \quad (2.27)$$

Burada, τ , tuzaklanmış elektronun uyarıldıktan sonra lüminesans merkezinde yeniden birleşmesi için geçen süre olarak bilinir ve yaşam ömürü olarak adlandırılır. Denklem (2.27)'de kinetik mertebeye terimi 1.00001 ile 2 arasında değer almaktadır.

2.5 Termal Asistan OSL (TA-OSL)

Elektron tuzak merkezleri, 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda termal olarak uyarılabilmektedir. Ancak geniş band yasak aralığına sahip materyallerde çok derin tuzaklar (VDT) bulunabilmektedir. Bu tuzaklara, 500°C'den daha yüksek sıcaklıklarda uyarım yapılarak ulaşılması mümkün olabilmektedir. Günümüz ticari TL okuyucularının ulaşabildiği sıcaklık değeri 700°C olmasına karşın, materyalin yüksek sıcaklıklara ısıtılması ile hassasiyet değişimleri olabilmekte ve en önemlisi yüksek sıcaklık değerlerine doğru (600°C) siyah cisim ışıması baskın hale gelerek TL ölçümleri ile içiçe geçebilmektedir (Polymeris vd. 2010, Sahiner 2015, Chen ve Pagonis 2019).

Benzer şekilde, çok derin tuzakların foto iyonizasyon tesiri kesiti oda sıcaklığında çok düşük olduğu için oda sıcaklığında çeşitli uyarım dalga boyları kullanılarak gerçekleştirilen OSL ölçümleri ile de çok derin tuzaklara erişmek mümkün değildir. Diğer bir zorluk ise, çeşitli materyallerde (Al_2O_3 , kuartz ve BeO gibi) sıcaklığın artması ile artan termal sönümlenme olayının etkisidir (Chen ve Pagonis 2019).

Bu amaçla, incelenen materyal, 500°C sıcaklıklarına kadar ısıtılmaksızın VDT sinyalini ölçebilmek amacıyla Polymeris vd. 2010 tarafından deneysel bir teknik önerilmiştir. Bu teknikte, çok derin tuzaklardan kaynaklanan OSL sinyali, termal ve optik uyarımın birleşimi ile sağlanmaktadır ve Termal asistan OSL (TA-OSL) olarak adlandırılmaktadır. TA-OSL sinyalinin değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 2.1'deki 8 adım uygulanmaktadır.

Çizelge 2.1 TA-OSL ölçüm protokolü (Polymeris ve Kitis 2012)

-
0. Küçük bir değerde test dozunun uygulanması (Materyal daha önce tavllanmış)
 1. 1°C/s 'lik ısıtma hızı kullanarak TL ölçümü ($400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ arasında)
 2. Büyük bir değerde D_i dozunun uygulanması
 3. 1. adımdaki şartlarda TL ölçümü
 4. 60s boyunca izotermal TL ölçümü
 5. T_i uyarım sıcaklığının sabit tutulması ve arttırılması; bu sıcaklıkta CW-OSL ölçümünün gerçekleştirilmesi
 6. 1. ve 3. adımdaki şartlarda artakalan TL ölçümü (Residual TL)
 7. 0. Adımdaki test dozunun uygulanması
 8. 1,3 ve 6 adımdaki şartlarda artakalan TL ölçümü
-

Bu protokolda, birinci adım TL hassasiyetinin TA-OSL'den önce ve sonraki değişimleri incelenmektedir. 3. adım TL okuması yapılarak TL ışımaya eğrisinde görülen tüm sığ ve derin tuzaklardaki elektronların boşalmasını ve böylece materyalde çok derin tuzakların (VDT) kalmasını sağlar. 4. adımın amacı cihazdaki ısıtıcı ünitenin (planchet) sıcaklığını oda sıcaklığına düşürmek ve 2. adımda materyalin yüksek doza maruz kalması sonucu oluşabilecek saturasyon etkilerini fotoçoğaltıcı tüp aracılığı ile kontrol etmektedir. 5. adım, düzenli olarak artan TA-OSL ölçümlerini göstermektedir. 6. Adımdaki ise artakalan TL (RTL) sinyali elde edilmektedir. Bu TL sinyali, çok derin tuzaklardan açığa çıkan elektronların iletim bandı aracılığı ile sığ tuzaklara foto transfer oluşturarak PTTL sinyali verip vermediğinin kontrol edilmesi içindir. Sonuncu 8. aşamada ise, 0.ve 7. adımda verilen test dozuna karşı elde edilen TL sinyalleri karşılaştırılır.

Tüm termal asistan sürecinde, sinyal şiddeti artan uyarım sıcaklığı ile artmaktadır. Bu özellik TA - OSL sinyali ile geleneksel OSL sinyali arasındaki deneysel temel farktır. Farklı artan uyarım sıcaklıkları için izotermal TA - OSL ölçümü, çeşitli materyallerin izotermal TA-OSL sinyalinin ölçülmesi, çeşitli materyallerin TA-OSL sinyalini araştırmak için kullanılan standart bir yaklaşımdır (Chen ve Pagonis 2019).

TA-OSL çalışmalarının amaçlarından ilki, artan uyarım sıcaklığına karşı sinyalin artışı izleyerek sinyalin termal asistan davranışını araştırmaktadır. İkinci amaç ise, 5. adımda verilen izotermal TA-OSL sinyali için optimum uyarım sıcaklığının (T_i) belirlenmesidir. Bu parametre, her bir materyal için deneysel olarak doğrulanmalıdır. Çok derin

tuzaklardan açığa çıkan yükün sığ veya ana dozimetrik TL piklerine geri tuzaklanmasını önlemek için dikkat edilmelidir. TA-OSL sinyali için uyarım sıcaklığı (T_i) tüm materyaller için 180-220°C sıcaklık aralığındadır (Chen ve Pagonis 2019). Üçüncü bir amaç ise, termal asistan sürecin hızı/oranını incelemektir. Bu hız, termal aktivasyon enerjisi (veya alternatif olarak termal asistan enerjisi), E_A (eV cinsinden) ile verilen Arrhenius denklemi ile ifade edilir. Tüm durumlarda, VDT'lerden kaynaklanan TA - OSL sinyalinin aktivasyon enerjisi değeri 2 eV'un üzerindedir. E_A değeri, çok derin tuzaklardan yüklerin serbest kalması için gereken saf termal enerji formunda sağlanan niceliktir. E_A değeri, TA - OSL ölçüm sıcaklıklarındaki VDT'in taban durumu ile ilişkili tüm olası titreşim enerjisi ile ilişkili kuantumlarının durumlarının toplamını ifade etmektedir.

Termal asistan enerjisini belirlemek için kullanılan teorik ifade, TA-OSL uyarım mekanizmasını açıklamada yararlıdır. Yüksek sıcaklıklarda, aktivasyon tipi bağımlılığı $\exp(-E_A/kT)$, verilen tuzakların gerçek yapısına bağlı olarak aktivasyon enerjileri (E_A) ile önemli bir rol oynar.

Çok derin tuzakların araştırılması dozimetri ve tarihlendirme alanında önemli fırsatlar doğurur. Çok derin tuzakların varlığı ile dozimetride yüksek doz değerlendirmeleri yapılabilir ve tarihlendirme alanında bu tuzaklardan elde edilen sinyaller aracılığı ile yaş sınırları genişletilebileceği görülmüştür (Şahiner 2015, Polymeris 2016, Şahiner 2017, Şahiner vd. 2017)

2.6 Elektron Spin Rezonans (ESR)

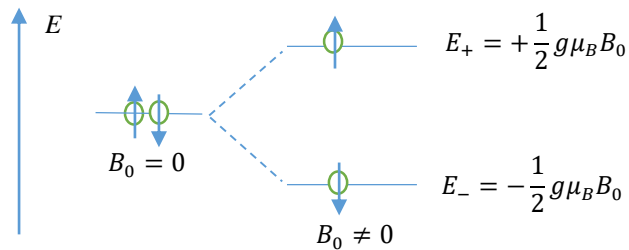
Elektron spin rezonans (ESR) ya da elektron paramanyetik rezonans (EPR) paramanyetik durumdaki (net spin açısal momentuma sahip olan) sistemlere uygulanabilen bir spektroskopi tekniğidir. ESR spektroskopisi kavramsal olarak nükleer manyetik rezonans (NMR) sistemine benzerlik göstermektedir. Her iki teknik de elektromanyetik radyasyon ile manyetik momentler arasındaki etkileşime dayanmaktadır. Etkileşme NMR'da çekirdeğin manyetik momenti ile ilişkili iken, ESR'de elektronun manyetik momenti ile ilişkilidir (Weil ve Bolton 2007).

Paramanyetik olmayan atom ya da moleküller iyonize radyasyon sonrasında paramanyetik hale gelebilmektedir. Oluşan iyonize elektronlar diğer atomlar tarafından tuzaklandığında; elektron fazlası (tuzaklanmış elektron merkezi) ve elektron eksikliği olan atomlar (tuzaklanmış hol merkezi) oluşmaktadır. Bu durumda oluşan çiftlenmemiş elektronlar net bir manyetik momente sahiptirler ve dış bir manyetik alan altında yönelime sahip olup uygulanan mikrodalga enerjisi ile dedekte edilebilir hale gelirler. Örneğin, alkali halojen olan tuz (NaCl) iyonize radyasyon sonrasında örgü yapısında değişikliğe uğrar. Radyasyon sonrasında, negatif iyon boşluğunda elektronlar tuzaklanabilir. Bu durum F merkezi olarak adlandırılır. F merkezindeki elektron görünür bölgedeki ışığı soğurarak renkli hale gelir. Bu yüzden renk merkezi olarak da bilinir. Bazı minerallerin doğal radyasyona maruz kalması sonucunda yapısında benzer elektron ve hol merkezleri oluşmaktadır. Oluşan bu elektron ve hol merkezlerin incelenmesi ile zirkon elementinin yaşı hesaplanabilmektedir (Ikeya 1993).

ESR spektroskopisi, katı, sıvı ve gaz fazlarına sahip durumdaki serbest radikaller, geçiş iyonları, çeşitli kusur merkezine sahip sistemlerde kullanılmak üzere fizik, kimya, biyoloji, jeoloji ve arkeoloji, tıp, tarihlendirme ve radyasyon dozimetresi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ikeya 1993, Weil ve Bolton 2007).

2.6.1 Elektron Spin Rezonans (ESR) teorik yaklaşım

Bir elektron manyetik alan içerisine konulduğunda, elektronun spin manyetik momenti ile manyetik alan arasındaki etkileşmeden dolayı enerji seviyeleri yarılmaya uğrar (Şekil 2.4). Manyetik alandaki bu yarımla Zeeman olayı olarak bilinir.



Şekil 2.4 Zeeman olayı

Elektron için spin hamiltoniyeni Eşitlik (2.28) ile verilir:

$$\hat{H}_s = g\mu_B B \hat{S}_z \quad (2.28)$$

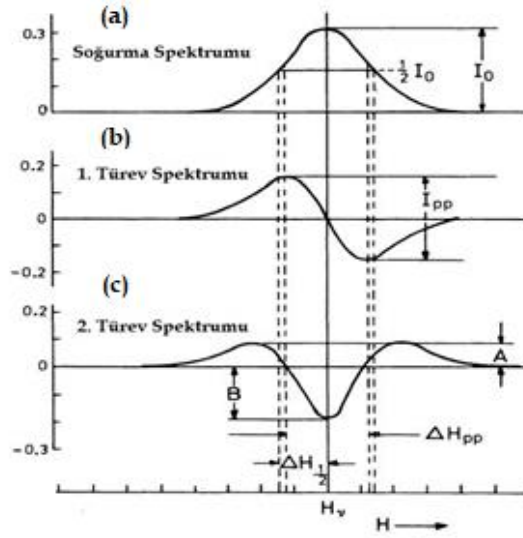
Burada, g , g faktörü olup değeri, serbest elektron için 2.00232'ye eşittir, μ_B Bohr manyetonudur ve değeri $\frac{e\hbar}{2m_e} = 9.274 \times 10^{-28} \text{J/G}$ 'dur. B uygulanan manyetik alandır ve birimi Gauss ya da Tesla olarak verilir. S_z ise spin açısal momentumun z yönündeki bileşenidir. Elektron spin enerji seviyeleri, \hat{H}_s 'nin $m_s = \pm \frac{1}{2}$ 'li öz değerlerine karşı gelen spin öz fonksiyonlarına uygulanması ile enerji öz değerleri (E_{\pm}) Eşitlik (2.29) aracılığı ile elde edilir:

$$\hat{H}_s \left| \pm \frac{1}{2} \right\rangle = \pm \frac{1}{2} g\mu_B B \left| \pm \frac{1}{2} \right\rangle = E_{\pm} \left| \pm \frac{1}{2} \right\rangle \quad (2.29)$$

Buna göre iki farklı seviyedeki elektron için enerji değerleri $E_{\pm} = \pm \frac{1}{2} g\mu_B B$ bulunur. Elektronun sahip olduğu enerjiler arasındaki enerji farkı, gelen fotonun enerjisine ($h\nu$) eşit olduğu durumda bir soğurma gerçekleşir. Bu olay *rezonans* olayı olarak bilinir. Bu olayın gerçekleşebilmesi için Eşitlik (2.30) sağlanmalıdır:

$$\Delta E = E_+ - E_- = h\nu = g\mu_B B_0 \quad (2.30)$$

Rezonans olayı iki şekilde gerçekleşir: Bunlardan ilki dışarıdan uygulanan manyetik alanın sabit kaldığı, mikrodalga frekansının değişmesi ile ya da mikrodalga frekansın sabit kaldığı manyetik alanın değişmesi ile gerçekleştirilir. Genellikle, manyetik alanın değişmesi, frekansın değişmesinden pratik olarak daha kolay elde edildiği için manyetik alan değişimi tercih edilir. Şekil 2.5'de rezonans sonucunda elde edilen soğurma, 1. ve 2. mertebe türev spektrumları verilmiştir. Genellikle ESR spektrumlarında 1. derece türev spektrumu kullanılır. 1.derece türev spektrumu, soğurma spektrumuna göre daha iyi bir görüntü (rezolüsyon) sağlar. Bu durumda elde edilen spektrumdan rezonans manyetik alanı, g faktörü, aşırı ince yapı sabiti gibi faktörler kolaylıkla belirlenebilmektedir.



Şekil 2.5 ESR spektrumları (Ranby ve Rabek 1977) a) Soğurma, b) 1. türev, c) 2. türev

Rezonans olayının gerçekleşmesi için kullanılan kaynağın enerjisi mikrodalga bölgesindedir. Mikrodalga bölgesinin farklı frekans aralığında kullanımlarına göre L, S, X, K, Q, W gibi adlarla isimlendirilir (Çizelge 2.2). ESR spektrometrelerinde en yaygın kullanılan band X band'dır (Rieger 2007).

Çizelge 2.2 ESR'de kullanılan frekans aralıkları

Bant	ν (GHz)	λ (cm)	B_0 (G) Elektron için
L	1.1	27	390
S	3.0	10	1070
X	9.5	3.2	3400
K	24	1.2	8600
Q	35	0.85	12500
W	95	0.31	34000

Termal dengede spin popülasyonu, iki Zeeman seviyesi arasında bölüşülür ve Maxwell-Boltzmann kanununa göre Eşitlik (2.31)'deki gibi verilir:

$$\frac{n_+}{n_-} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}} = e^{-\frac{g\mu_e B_0}{kT}} \quad (2.31)$$

Burada n_+ ve n_- sırasıyla m_s değerinin $+\frac{1}{2}$ ve $-\frac{1}{2}$ e sahip spin konsantrasyonunu göstermektedir. Genel sıcaklık ve manyetik alan değerleri için Eşitlik (2.31)'deki ekponansiyel ifade seriye açılığında,

$$\frac{n_+}{n_-} \approx 1 - \frac{g_e \mu_e B_0}{kT} \quad (2.32)$$

elde edilir. $n_- \approx n_+ \approx \frac{N}{2}$ için, seviyeler arası fark, Denklem (2.33) ile verilir:

$$n_- - n_+ \approx N \frac{g_e \mu_e B_0}{2kT} \quad (2.33)$$

Denklem (2.33)'e göre, ESR'de net soğurma (hassaslık), toplam spin sayısı (N) ve uygulanan manyetik alan değeri ile artmakta, sıcaklığın artması ile azalmaktadır (Jackson ve Hargreaves 2009).

2.6.2 g faktörü

ESR spektrometreleri farklı frekans aralıklarında (X, K, Q bantları vb.) çalışabilir. Bunun sonucunda ESR spektrumunda elde edilen ESR çizgisinin konumu frekansa göre belirlenemez. Bunun yerine, rezonans koşulunda dış manyetik alan değeri ve mikrodalga frekansı aracılığı ile ifade edilen “ g faktörü” kullanılır. ESR sinyalinin g değeri, çiftlenmemiş elektronun farklı çevrelerde farklı değerler alarak serbest elektronun g değerinden farklılık gösterir. Bu farklılık; λ , spin yörünge etkileşme parametresi ve L yörüngesel açısal momentum olmak üzere elektronun spin-yörünge etkileşmesinden kaynaklanmaktadır (Ranby ve Rabek 1977; Ikeya 1993).

g faktörü Eşitlik (2.34) ile verilir.

$$g = \frac{h\nu}{\mu_B B_0} \quad (2.34)$$

Burada ν , mikrodalga frekansı (GHz), B , rezonans manyetik alan (mT)'dir. Bilinmeyen bir sinyalin g faktörü, bilinen standart sinyalin g faktörü kullanılarak belirlenir. Bilinen standart bir sinyalin g faktörü (g_1) ve rezonans manyetik alanı (B_{01}), bilinmeyen sinyalin g faktörü (g_2) ve rezonans manyetik alanı (B_{02}) ise rezonans koşulu yazıldığında, Eşitlik (2.35) elde edilir:

$$g_1 B_{01} = g_2 B_{02} = h\nu \quad (2.35)$$

Eşitlik (2.35)'de g_2 yalnız bırakılırsa,

$$g_2 = g_1 \frac{B_{01}}{B_{02}} = g_1 \frac{B_{01}}{B_{01} - \Delta B} \quad (2.36)$$

elde edilir. Burada, ΔB , manyetik alan değişimidir ve $B_{01} - B_{02}$ ile verilir. Buna göre bilinmeyen sinyalin g değeri (g_2), g_1 cinsinden Eşitlik (2.37) ile verilir.

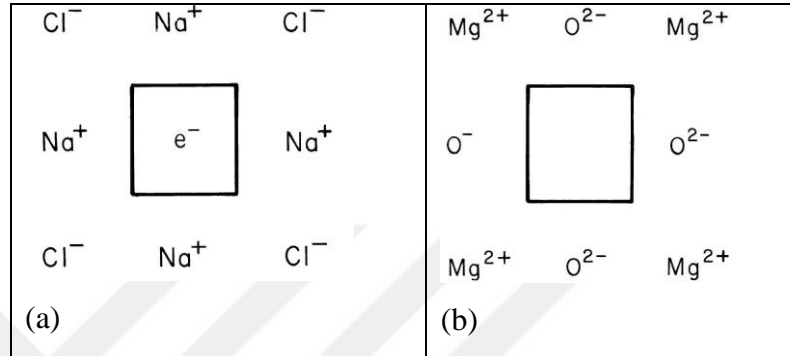
$$g_2 = \frac{g_1}{\left(1 - \frac{\Delta B}{B_{01}}\right)} \quad (2.37)$$

Genellikle, rezonans manyetik alanı 9.4 GHz için 3400 G civarında elde edilir. En yaygın kullanılan standart materyal DPPH (Diphenyl-picryl-hydrazyl) materyalidir. Bu materyal için g değeri 2.0036'ya eşittir. Bunun haricinde diğer standart materyaller, peroxyamine disulfonate ($g=2.0053$), tetracyanoxy methane ($g=2.0026$) ve tanol ($g = 2.0055$) molekülleridir (Ikeya 1993).

g faktörünün değeri genellikle 2.0 civarındadır ve 0.0002 ile 0.0005 gibi bir hata ile belirlenebilmektedir. Serbest elektron için g değeri 2.0023'e eşittir. g değeri, serbest elektronun g değerinden daha büyük değere sahip olan radikaller, hol merkezi (elektron eksikliği olan) olarak g değeri daha küçük olanlar ise elektron merkezi (elektron fazlalığı olan) olarak tanımlanmaktadır (Ikeya 1993).

g faktörünün değeri dışarıdan uygulanan manyetik alanın yönüne göre farklılık gösterebilir. Manyetik alanın yönünün değişimine bağlı sistemler anizotropik olarak adlandırılır. Bu durum, kristal, kübik, eksenel ve rombik sisteme sahip olmak üzere üç kategoride incelenebilir.

- i. *Kübik sistem:* Bu durumda ESR özelliklerinde anizotropi gözlemlenmez. Tüm esas eksen bileşenleri birbirine eşittir.
- ii. *Eksenel olmayan sistem:* Bu durumda doğrusal dönme simetrisi vardır. Anizotropi, B manyetik alanının dik olması dışında gözlemlenir.
- iii. *Rombik sistem:* Bu durumda her yön için anizotropi vardır. Bu durum ortorombik olarak da bilinir.



Şekil 2.6 a) NaCl'deki F merkezi; b) MgO'deki V merkezi (Weil ve Bolton 2007)

Şekil 2.6a'da NaCl için kübik simetriye sahip F merkezi modeli, negatif iyon boşluğunda elektron oktahedral yapının merkezinde yer alır. Bu durumdaki g değeri, izotropiktir. Şekil 2.6b'de ise X ışınları ile ışınlanmış MgO materyalinde oluşan V merkezi görülmektedir. Normalde MgO kristalinde Mg²⁺ ve O²⁻ iyonları oktahedral simetrisine sahiptir. Ancak, X ışınlarının uygulanması ile bir elektron magnezyum iyon boşluğu yakınındaki oksijen iyonundan iyonlaştırılır. Bu durumda magnezyum boşluğundan O⁻ iyonuna küçük bir yer değişme meydana gelir (Şekil 2.6b). Bu O⁻ iyonu çiftlenmemiş bir elektron taşır ve eksenel bir simetrisinin oluşmasına yol açar. z yönü kristal eksen yönü seçildiğinde MgO kristali z eksenine dik ve paralel olduğu duruma göre farklı g değerleri elde edilir. Manyetik alana dik olduğu durumda, g faktörünün dik bileşeni, $g_{\perp} = \frac{h\nu}{\mu B_{\perp}}$; paralel bileşeni ise $g_{\parallel} = \frac{h\nu}{\mu B_{\parallel}}$ ile verilir. Burada B_{\perp} ve B_{\parallel} değerleri, simetri eksenine (z eksenine) dik ve paralel durumda elde edilen rezonans manyetik alan değerleridir (Weil ve Bolton 2007).

- Kübik durum için g faktörleri, her yönelim boyunca aynıdır; bu yüzden $g_{xx} = g_{yy} = g_{zz} = g_{izo}$ elde edilir.
- Eksenel durum için ; $g_{zz} = g_{II}$ değerine, $g_{\perp} = g_{xx} = g_{yy}$ 'e eşittir. Bu durumda g değerinin en genel hali; $g(\theta) = (g_{II}^2 \cos^2 \theta + g_{\perp}^2 \sin^2 \theta)^{1/2}$ ile verilir.
- Ortorombik sistemlerde ise; $g_{xx} \neq g_{yy} \neq g_{zz}$ 'dir. Bu durumdaki en genel g faktörü ise $g(\theta, \phi) = (g_{zz}^2 \cos^2 \theta + g_{xx}^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi + g_{yy}^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi)^{1/2}$ olarak verilir (Ikeya 1993).

2.6.3 Aşırı ince yapı olayı

Çiftlenmemiş elektronun manyetik momenti ile çekirdeğin manyetik momenti arasındaki etkileşme aşırı ince yapı olayı olarak bilinir. $S = \frac{1}{2}$ ve $I = \frac{1}{2}$ durumu için Hamiltoniyen Eşitlik (2.38) ile verilir:

$$H = H_{EZ} - H_{NZ} - H_{HFS} \quad (2.38)$$

EZ=Elektron Zeeman terimi, NZ=Nükleer Zeeman terimini ve HFS= Aşırı ince yapı etkileşmesini göstermektedir. Eşitlik (2.38)'in açık hali,

$$\hat{H} = g\mu_B B S_z - g_N \mu_N B I_z + hSaI \quad (2.39)$$

ile verilir. Burada, a , izotropik aşırı ince yapı sabitini gösterir ve birimi Hertz ya da Gauss olarak ifade edilir ve g izotropik ve dış manyetik alan z yönündedir. İkinci mertebe terimler (D,E) ihmal edilirse, enerji seviyeleri Eşitlik (2.40) ile verilir:

$$E(m_S, m_I) = g\mu_B B m_S - g_N \mu_N B m_I + ham_S m_I \quad (2.40)$$

Buna göre iki spin sistemi için m_S ve m_I 'nin değerlerine göre dört mümkün durum vardır:

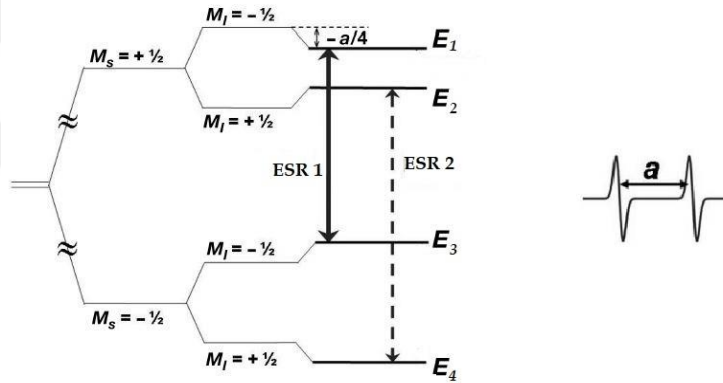
$$E_1 \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} g \mu_B B_0 + \frac{1}{2} g_N \mu_N B_0 + \frac{1}{4} ha$$

$$E_2 \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} g \mu_B B_0 - \frac{1}{2} g_N \mu_N B_0 - \frac{1}{4} ha$$

$$E_3 \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right) = -\frac{1}{2} g \mu_B B_0 + \frac{1}{2} g_N \mu_N B_0 + \frac{1}{4} ha$$

$$E_4 \left(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right) = -\frac{1}{2} g \mu_B B_0 - \frac{1}{2} g_N \mu_N B_0 + \frac{1}{4} ha$$

Elde edilen enerji seviyelerinden seçim kuralına göre nükleer manyetik moment (m_I)'nin değerinin değişmediği, m_S değerinin ± 1 değerine eşit olduğu durumlar izinlidir. Bu durumdaki geçişler sonucunda, spektrumda birbirinden a kadar uzaklıkta iki ESR çizgisi (ESR₁ ve ESR₂) elde edilir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 $S=\frac{1}{2}$ ve $I=\frac{1}{2}$ spin sistemi için izotropik aşırı ince yapı sabiti durumunda enerji seviyeleri ve oluşan spektrum (Jackson ve Hargreaves 2009)

Bir elektronun spini I olan n tane eş değer çekirdek ile etkileşmesi sonucunda ESR spektrumunda birbirinden eşit uzaklıkta $2nI + 1$ tane ESR çizgisi elde edilir. Elde edilen ESR spektrumlarının şiddet değerleri $(1 + x)^n$ 'in binom açılım katsayıları ile verilir. Bunun yanı sıra birbirine eş değer olmayan iki çekirdek olması durumunda elektronun çekirdeklerle etkileşimi durumunda ESR spektrumu daha kompleks bir yapı halini alır. Enerji seviyeleri birinci protondan dolayı (a_1 sabiti ile), ikinci protondan dolayı (a_2 sabiti

ile) yarılmaya uğrar. Bu durumda dört mümkün geçiş meydana gelir ve eşit şiddette iki adet ikili ESR çizgisi meydana gelir.

En genel olarak, her biri n eşdeğer çekirdek sayısı ve m eşdeğer çekirdek kümesinden oluşan bir radikal için, toplam ESR çizgisi sayısı, $N = (2n_1I_1 + 1)(2n_1I_1 + 1) \dots (2n_nI_n + 1)$ ile verilir (Jackson ve Hargreaves 2009).

2.7 TL Tuzak Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Metotlar

2.7.1 Başlangıçtaki artış yöntemi (Initial rise method)

Termoluminesans ışıma eğrilerinin ilk artış kısmının eksponansiyel olarak değiştiği varsayılır (Garlick ve Gibson 1948):

$$I(T) = \text{sabit} \times e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2.41)$$

Denklem (2.41)'in logaritması alınıp $\ln I$ 'ya karşılık $1/kT$ grafiğinin eğimi aracılığı ile aktivasyon enerjisi belirlenir. Materyalin sıcaklığının yavaşça arttırıldığı durumda elektron konsantrasyonunun (n) yaklaşık olarak sabit kaldığı kabul edilir. Bu metod için gerekli koşul, $\ln I - 1/kT$ grafiğindeki T sıcaklığının belirlenmesinde ışıma eğrisindeki maksimum lüminesans şiddetinin %10-15'ine karşı gelen şiddet değerindeki sıcaklık değerine kadar olmalıdır. Bu yöntem kinetik mertebeden bağımsızdır.

Başlangıçtaki artış yöntemi, diğer piklerden ayırt edilmiş tekli piklere uygulanabilir. Üst üste geçmiş piklerden oluşan ışıma eğrilerinde tek pik elde etmek için "termal ayıklama tekniği" (thermal cleaning) kullanılır (Nicholas ve Woods 1964). Bu teknikte materyal, ışıma eğrisindeki ilk pik değerinin ötesinde bir sıcaklık değerine ısıtılır ve böylece bu pikten sorumlu tuzaklar boşaltılmış olur. Materyal hızlıca soğutulur ve bir sonraki pikin maksimum sıcaklığına ısıtılır ve bu işlem tüm pik boyunca devam edilir. Ancak, iç içe geçmiş pikler için bir sonraki pikin tamamen temizlenme işlemi problemler yaratabilir. Bu durumda hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri, örneğin ısıtıldığı sıcaklığa ve piklerin iç içe geçmişliğinin mertebesine bağlı olarak değişkenlik gösterecektir

(McKeever 1985). Bu yüzden başlangıçtaki artış yönteminin tekli pikler için uygulanması önerilir.

2.7.2 Farklı ısıtma hızları yöntemi (Various heating rate method)

Isıtma hızının (β) sıcaklığa bağlı değişimi Denklem (2.11)'in türevi alındıktan sonra türevinin sıfır olduğu noktada $T = T_m$ alınır, 1. mertebe kinetik için Denklem (2.42); en genel mertebe kinetik için Denklem (2.43) elde edilir (Hoogenstraaten 1958, Chen ve Winer 1970).

$$\frac{\beta E}{kT_m^2} = s e^{-\frac{E}{kT_m}} \quad (2.42)$$

$$\frac{\beta E}{kT_m^2} = s[1 + (b - 1)\Delta_m]e^{-\frac{E}{kT_m}} \quad (2.43)$$

Burada, $\Delta_m = \frac{2kT_m}{E}$ dir. Birinci mertebe kinetik için, $\ln(T_m^2/\beta)$ 'nin $1/kT_m$ 'ye göre değişimi sonucunda elde edilen eğim değeri aktivasyon enerjisini (E), ara değeri ise $\ln(E/sk)$ 'yi verir. E değeri belirlendikten sonra, frekans faktörü (s), grafiğin ara değeri aracılığı ile belirlenir.

Genel mertebe kinetik için, $1 + (b - 1)\Delta_m$ terimi yaklaşık sabit kabul edilerek $\ln(T_m^2/\beta)$ 'nin $1/kT_m$ 'ye göre grafiğin eğiminden aktivasyon enerjisi (E) elde edilir. Ayrıca, maksimum TL şiddeti cinsinden genel mertebe kinetik için Denklem (2.11)'in diferensiyalinin alınıp maksimum TL şiddetinin (I_m) ısıtma hızı (β) ile ilişkisi Denklem (2.44) ile verilir:

$$I_m^{b-1} \left(\frac{T_m^2}{\beta}\right)^b = \left(\frac{E}{bks}\right)^b e^{-\frac{E}{kT_m}} \quad (2.44)$$

$\ln(I_m^{b-1} \left(\frac{T_m^2}{\beta}\right)^b)$ 'nin $\frac{1}{kT_m}$ 'ye göre grafiğinin eğiminden aktivasyon enerjisi (E) elde edilir. Ancak, aktivasyon enerjisi belirlemeden önce kinetik mertebe terimi (b) belirlenmelidir.

Bu sebepten dolayı Denklem (2.43), Denklem (2.44)'e göre daha kullanışlıdır (McKeever 1985).

2.7.3 Pik şekli yöntemi (Peak shaped method)

Pik şekli yöntemi, kısmi ya da tüm pik analizi yerine ışıma eğrisinin iki ya da üç noktası aracılığı ile pikin şekline dayalı olan bir yöntemdir. Bu noktalar, pikin şiddet değerinin maksimum olduğu sıcaklık noktası, T_m ile maksimum şiddet değerinin yarıya indiği yükseklikteki düşük sıcaklık değeri, T_1 ve yüksek sıcaklık değeri, T_2 noktalarıdır. Elde edilen TL pikinin şekli, kinetik mertebeye (b) terimine bağlı olduğu için bu metod kinetik mertebeye bağlıdır. Aktivasyon enerjisi (E) için en genel ifade Chen (1969b) tarafından Denklem (2.45)'de verilmiştir.

$$E = c_\gamma \left(\frac{kT_m^2}{\beta} \right) - b_\gamma (2kT_m) \quad (2.45)$$

Burada, γ terimi, ω , τ ya da δ 'ya eşittir. c_γ ve b_γ terimleri genel mertebeye kinetik için Çizelge 2.3'de verilmiştir (Chen ve Kirsch 1981).

Çizelge 2.3 Genel mertebeye için c_γ ve b_γ sabitlerinin değerleri

γ	c_γ	b_γ
τ	$1.51+3(\mu_g-0.42)$	$1.58+4.2(\mu_g-0.42)$
δ	$0.976+7.3(\mu_g-0.42)$	0
ω	$2.52+10.2(\mu_g-0.42)$	1.0

2.7.4 Kesikli ışıma eğrisi tekniği (Fractional glow technique)

Termal ayıklama işleminin tekrarlı olarak uygulanması sonucunda tuzak enerji dağılımlarını veren bir analiz yöntemi önerilmiştir (Gobrecht ve Hofmann 1966). Bu yöntem, aynı zamanda başlangıçtaki artış yöntemine (initial rise technique) benzer olarak sıcaklıktaki artış birkaç derecelik artışlarla olduğu durumda lüminesans şiddetinin yaklaşık olarak sabit kaldığı duruma dayanır. Bu durumda, her bir sıcaklıkta elde edilen

şiddet değeri toplam ışıma şiddetinin bir kısmı olacaktır. Bu yüzden bu metod kesikli ışıma eğrisi olarak adlandırılır. Her bir döngü esnasında açığa çıkan elektronların sayısı aynı periyot boyunca yayınlanan ışık şiddetinin toplamı olacaktır. Böylece, aynı ortalama E değerine sahip olan ışık toplamlarının her birinin eklenmesiyle, tuzakların enerji spektrumu üretilebilir. Her bir sıcaklıkta elde edilen lüminesans şiddetinin logaritmasının $1/kT$ 'ye göre grafiği sayesinde aktivasyon enerjisi değeri elde edilir. Elde edilen aktivasyon enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişiminde elde edilen her bir plato bölgesi her biri tuzaga ait aktivasyon enerjisini temsil eder.

Kesikli ışıma eğrisi tekniğinin temel zorluğu ise deneysel olarak bir çok ölçüm alınması gerektiğidir. Bunun sonucunda elde edilen birçok verinin işleme zorluğunun olduğudur. Deneysel boyunda kullanılan ısıtma hızının kısa döngülerde olması için oldukça yüksek seçilmesi gerekir (bu durumda yalnızca birkaç tuzak etkilenir). Bu durum ise örnek ile örneği ısıtan ısıtma şeridinin arasında çok iyi bir termal iletim olmasını gerektirir. Ayrıca, daha yüksek ısıtma hızlarının seçilmesi, numune boyunca bir termal gradyan oluşmasına yol açabilir.

2.7.5 T_{\max} - T_{stop} yöntemi

T_{\max} - T_{stop} yöntemi termolüminesans piklerinin seçilmiş bir sıcaklık değerinin (T_{stop}) artması ile pik konumlarının (T_{\max}) değişiminin incelenmesine dayanır. Birinci mertebeye kinetiğe uyan pikler için, pikler başlangıçtaki tuzaklanmış elektron konsantrasyonundan bağımsız olduğu için pikin maksimum sıcaklık konumu, T_{\max} değeri değişmeyecektir. Ancak birinci mertebeye uymayan kinetikler için başlangıç durumundaki tuzaklanmış yük konsantrasyonu artan sıcaklıkla değişeceği için pik konumunda kaymalar meydana gelir. Bu yöntem önceden ışınlanmış materyalin ilk pikin düşük bölgesindeki artış bölgesindeki sıcaklığa karşı gelen T_{stop} sıcaklığına kadar lineer olarak ısıtılması ile başlamaktadır. Ardından materyal oda sıcaklığına soğutulur. Sonrasında materyal aynı ısıtma hızı ile kalan ışıma eğrisini elde etmek için tekrar ısıtılır. Elde edilen ışıma eğrisinde ilk pikin maksimum sıcaklığının, T_{\max} konumu kaydedilir. Bu süreç artan T_{stop} sıcaklıkları ile tüm ışıma eğrisi tamamlana dek devam eder. Bütün işlem

tamamlandığında T_{\max} - T_{stop} eğrisi oluşturulur. Oluşan bu eğride her bir plato bölgesi bir pikin varlığına karşı gelmektedir (McKeever 1980 b,c).

2.7.6 İzotermal bozunum yöntemi

İzotermal metot, ilgilenilen materyalin sıcaklığının sabit tutulup lüminesans şiddetinin zamanla değişiminin incelenmesine dayanır. Sabit bir sıcaklıktaki lüminesans şiddeti Denklem (2.46) ile verilir (Randall ve Wilkins 1945b).

$$I(t) = I_0 \exp[-s \exp(-\frac{E}{kT}) t] \quad (2.46)$$

Burada, I_0 , $t=t_0$ 'daki başlangıç şiddetidir ve $I_0 = n_0 s \exp(-\frac{E}{kT})$ 'e eşittir. Elde edilen bu eşitliğe göre sabit sıcaklıkta lüminesans şiddeti zamanla eksponansiyel olarak azalmaktadır. $\ln(\frac{I}{I_0})$ 'ın zamana (t) göre grafiğinin eğimi, $m = s \exp(-\frac{E}{kT})$ değerini verir. Farklı birkaç sıcaklık değerinde (pikin maksimum sıcaklığına ulaşmadan) bu işlem gerçekleştirilir ve sonrasında $\ln(m)$ değerinin $1/kT$ 'ye göre grafiği çizdirilirse, elde edilen grafiğin eğimi aracılığı ile aktivasyon enerjisi (E) belirlenir.

Genel mertebe kinetik için izotermal TL sinyalinin bozunumu Denklem (2.47) ile verilir (May ve Partridge 1964, Manam ve Sharma 2005) :

$$\left(\frac{I_0}{I}\right)^{\frac{b-1}{b}} = 1 + n_0^{b-1} (b-1) s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) t \quad (2.47)$$

Burada, I_0 , $t=t_0$ 'daki başlangıç şiddeti; n_0 is tuzaklanmış elektronların konsantrasyonu, $s' = \frac{s}{n_0^{b-1}}$ frekans faktörü ve b kinetik mertebedir. $\left(\frac{I_0}{I}\right)^{(b-1)/b} - 1$ 'nin zamana (t) göre grafiği lineerdir ve eğimi, $m = s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$ 'e eşittir. Birinci mertebe kinetikte olduğu gibi $\ln(m)$ 'in $1/kT$ 'ye göre grafiğinin eğiminden aktivasyon enerjisi (E), ara değerinden $\ln(s(b-1))$ ise frekans faktörü hesaplanır. Bu metot için ön koşul kinetik mertebe (b) değerinin bulunmasıdır. Kinetik mertebe değerinin optimum, b değeri $\left(\frac{I_0}{I}\right)^{(b-1)/b} - 1$ 'in

zamana (t) göre grafiğinin en iyi lineerliği veren değer olarak seçilir. Seçilen değer yardımıyla aktivasyon enerjisi belirlenir.

İzotermal metodunda elde edilen eğrilerin analizinde kullanılan ikinci bir yaklaşım Kirsh ve Chen (1991) tarafından verilmiştir. Bu yaklaşıma göre izotermal eğrileri Denklem (2.48) ile analiz edilir:

$$I(t) = I_0 \left[1 + (b - 1) \frac{t}{\tau} \right]^{-\frac{b}{b-1}}, \quad b \neq 1 \quad (2.48)$$

Buradaki terimler daha önceki kesimlerde açıklanmış olup, $\tau, \frac{1}{\lambda}$ 'ya eşit olup ömür olarak adlandırılır. İzotermal eğrilerin Denklem (2.48)'e fit edilmesi sonucunda iki fit parametresi τ ve b elde edilir. Fit sonucunda elde edilen ömür (τ) değerlerinin logaritmasının seçilen sıcaklıklardaki değişimine bakıldığında lineer bir grafik elde edilir; Elde edilen grafiğin eğimi, aktivasyon enerjisi değerini (E) verir.

2.7.7 Dekonvolüsyon yöntemi (CGCD)

Dekonvolüsyon metodu, deneysel TL ışıma eğrilerinin Kitis vd. (1998) tarafından TL diferansiyel denklemlerin nümerik olarak çözülmesi sonucunda elde edilen Denklem (2.49)'daki teorik TL şiddet ifadesine fit edilmesi işlemidir. Dekonvolüsyon metodu özellikle TL ışıma eğrisinin birden fazla iç içe geçmiş piklerden oluştuğu durumlarda önem kazanmaktadır. Fit işlemi genel mertebe kinetik için Denklem (2.49) aracılığı ile gerçekleştirilir. Bu fit işlemi, GOK (General Order of Kinetic) olarak da bilinmektedir.

$$I(T) = I_m b^{\frac{b}{b-1}} \exp\left(\frac{E}{kT} \frac{T-T_m}{T_m}\right) \left[(b-1)(1-\Delta) \frac{T^2}{T_m^2} \exp\left(\frac{E}{kT} \frac{T-T_m}{T_m}\right) + Z_m \right]^{-\frac{b}{b-1}} \quad (2.49)$$

Burada $\Delta = \frac{2kT}{E}$, $\Delta_m = \frac{2kT_m}{E}$ ve $Z_m = 1 + (b-1)\Delta_m$ ile verilir. Elde edilen fitin uygunluğu Figure of Merit (FOM) değeri Denklem (2.50) ile kontrol edilir (Balian ve Eddy 1977):

$$FOM = \sum_i \frac{|Y_{deney} - Y_{Fit}|}{A} \quad (2.50)$$

Burada, Y_{deney} ve Y_{fit} sırasıyla deneysel ve fit edilmiş eğrideki verileri; A ise fit edilmiş eğrinin alan değerini göstermektedir. Elde edilen FOM değerinin düşüklüğü yapılan fit işleminin başarısını gösterir.

Bir tuzak ve bir rekombinasyon merkezi durumunda TL'ye ait diferensiyel denklemler Lambert fonksiyonu ($W(z)$) aracılığı ile analitik olarak çözülebilmektedir. Bir tuzak ve bir rekombinasyon modelinin bir çözümü olarak Kitis ve Vlachos (2012) tarafından türetilen eşitlik, Denklem (2.51) ile verilir:

$$I(T) = \frac{N \cdot R}{(1-R)^2} \cdot \frac{p(t,T)}{W(z)+W(z)^2} \quad (2.51)$$

Burada, N toplam tuzak konsantrasyonunu, $W(z)$, Lambert fonksiyonunu (Corless vd. 1996) ve $R=A_n/A_m$ 'ye eşittir ve kinetik mertebeyi göstermektedir. Burada, A_n ve A_m terimleri sırasıyla tekrar tuzaklanma ve rekombinasyon olasılıklarıdır. TL durumunda, $p(T) = s \cdot \exp(-E/kT)$ olmak üzere Lambert fonksiyonunun z argümanı Denklem (2.52) ile verilir. CW-OSL durumunda Eşitlik (2.51)'deki $p(t, T)$ ifadesi λ değerini alır ve Lambert fonksiyonunun z argümanı Eşitlik (2.53) ile verilir.

$$z = \exp\left(\frac{R}{1-R} - \ln\left(\frac{1-R}{R}\right) \cdot \frac{s}{\beta \cdot (1-R)} \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{kT}} dT\right) \quad (2.52)$$

$$z = \exp\left(\frac{R}{1-R} - \ln\left(\frac{1-R}{R}\right) + \frac{At}{1-R}\right) \quad (2.53)$$

Denklem (2.53)'de verilen A ifadesi, $\sigma \times I_0$ 'a eşit olup optik uyarım olasılığıdır. Burada, σ ise OSL tesir kesiti ve I_0 uyarım şiddetidir. Denklem (2.54) ve (2.55), Sadek vd. (2014b) tarafından maksimum şiddet (I_m) ve sıcaklık (T_m) cinsinden verilir:

$$I(T) = I_m \exp\left(-\frac{E}{kT} \cdot \frac{T_m - T}{T_m}\right) \cdot \frac{W(z_m)+W(z_m)^2}{W(z)+W(z)^2} \quad (2.54)$$

$$z = \exp\left(\frac{R}{1-R} - \ln\left(\frac{1-R}{R}\right) + \frac{E \cdot \exp\left(\frac{E}{kT_m}\right)}{kT_m^2(1-1.05 \cdot R^{1.26})} \cdot F(T, E)\right) \quad (2.55)$$

Denklem (2.51, 2.53), Lambert fonksiyonuna göre OSL eğrilerinin fit işlemi için Denklem (2.54-2.55) ise TL ışıma eğrilerinin fit işleminde kullanılan analitik ifadeleri göstermektedir. Lambert fonksiyonuna göre OSL durumunda fit işlemi sonucunda A ve R değeri elde edilirken, TL durumunda fit işlemi sonucunda E ve R değeri elde edilir. R değeri genel mertebe kinetikte yer alan b terimine karşı gelmektedir. R değeri 0'a eşit olduğunda, birinci mertebe kinetiği; 1 eşit olduğunda ikinci mertebe kinetiğe karşı gelmektedir. R değeri 0 ile 1 değerinde değişen bir niceliktir. Denklem (2.55)'da yer alan $F(T,E)$ teriminin işlevi, TL modellerinde yer alan üstel integraldır ve eksponansiyel integral fonksiyonu cinsinden ifade edilir (Chen ve McKeever 1997, Kitis vd. 2006):

$$F(T, E) = \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{kT}} dT = T \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) + \frac{E}{k} \cdot E_i\left[-\frac{E}{kT}\right] \quad (2.56)$$

Frekans faktörü ise, Denklem (2.57) aracılığı ile hesaplanır: (Kitis ve Vlachos 2012, Sadek vd. 2015)

$$\frac{\beta E}{kT_m^2} = \left[\frac{1}{1-R} \cdot \frac{1+2W[\exp(z_m)]}{(1+W[\exp(z_m)]^2)} \right] \cdot s \cdot \exp\left(\frac{E}{kT_m}\right) \quad (2.57)$$

Genel mertebe kinetikte olduğu gibi fitin uygunluğu FOM değeri Denklem (2.50) ile kontrol edilir.

2.8 Termal Sönümlenme (Thermal Quenching) Olayı

Termal sönümlenme olayı, materyalin sıcaklığının artması ile ışımsız geçişlerin artmasının sebep olduğu lüminesans veriminde meydana gelen azalma olarak tanımlanır. Lüminesans verimi sıcaklığa bağlı olarak Denklem (2.58) ile verilir (Curie 1963).

$$\eta(T) = \frac{1}{1+Ce^{-\frac{W}{kT}}} \quad (2.58)$$

Burada, W ve C , termal sönümlenme parametreleri olarak adlandırılır; T ise mutlak sıcaklıktır. W parametresi, Mott-Seitz ve Schön-Klasens modellerine göre iki farklı şekilde açıklanabilir. Mott-Seitz modeline göre, W , uyarılmış durumdaki bir elektronun

fononlar aracılığıyla ışımaz olarak taban durumuna geçmesi için gerekli aktivasyon enerjisi olarak tanımlanırken (Dexter vd. 1955), Schön-Klasens modeline göre ise tuzaklanmış hollerin termal olarak açığa çıkması için gerekli aktivasyon enerjisi olarak tanımlanmaktadır. W parametresinin birimi eV olarak verilir. C ise ışımaz geçiş olasılığının ışımalı geçiş olasılığına oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir sabittir (Bøtter-Jensen vd. 2003, Pagonis vd. 2010).

Termal sönümlenme etkisinin varlığı, farklı ısıtma hızlarında ölçülen termoluminesans ışımaya eğrilerinin altında kalan alan değerlerinin değişimi incelenerek belirlenebilir. Işıma eğrisi altında kalan alan değerlerindeki olası bir düşüş, termal sönümlenmenin varlığına işaret etmektedir. Termal sönümlenmenin varlığında sadece ışımaya eğrileri altında kalan alan değerleri değil aynı zamanda TL kinetik parametrelerin özellikle aktivasyon enerjisi (E) ve kinetik merteye teriminin (b) termal sönümlenme olayından en fazla etkilenen parametreler olduğu Chen ve McKeever (1997), Kitis (2002), Subedi vd. (2010) ve Aşlar vd. (2017b) tarafından rapor edilmiştir.

Termal sönümlenme olayı, TL ışımaya eğrilerinin farklı ısıtma hızlarındaki davranışının incelenmesi ile belirlenebildiği gibi farklı okuma sıcaklıklarında elde edilen OSL eğrilerinin incelenmesi ile de belirlenebilmektedir. Ancak bu durumda, termal sönümlenme parametrelerinden sadece W parametresi elde edilmekte, ışımaz geçişlerle ilişkili olan C parametresi belirlememektedir.

Termal sönümlenme olayının özelliklerinin (W ve C parametreleri) iyi bilindiği iki materyal kuartz ve $Al_2O_3:C$ materyalleridir. Kuartz ve $Al_2O_3:C$ materyallerinin termal sönümlenme olayının etkileri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalara göre tavllanmış doğal kuartz materyali için termal sönümlenme parametreleri W ve C , sırasıyla 0.64 eV ve 2.8×10^7 (Wintle 1975); $Al_2O_3:C$ materyali için ise, W ve C , sırasıyla 1.56 eV ve 2.4×10^{17} (Kitis vd. 1994) olarak elde edilmiştir. Tavllanmış sentetik kuartz materyali için Petrov ve Bailiff (1997) tarafından yapılan çalışma sonucunda W ve C , sırasıyla 0.78 eV ve 3.1×10^{10} bulunmuştur. Akselrod vd. (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada $Al_2O_3:C$ için ise, W ve C , sırasıyla 1.08 eV ve 3.6×10^{12} olarak elde edilmiştir.

Termal sönümlenme parametrelerinin TL metoduyla belirlenmesi için uygulanacak prosedürler aşağıdaki şekildedir (Subedi vd. 2011, Aşlar vd. 2017a).

- I. Adım: Farklı ısıtma hızlarında elde edilen Tüm TL ışımaya eğrilerinin CGCD yöntemi ile piklerine ayrıştırılması işlemi (dekonvolüsyonu)*
- II. Adım: Pikler için sıcaklık gecikmesi (temperature lag) düzeltilmesi*
- III. Adım: Deneysel verim değerlerinin analiz edilmesi*
- IV. Adım: Termal sönümlenme parametrelerinin (W ve C) belirlenmesi*
- V. Adım: TL piklerinin yeniden yapılandırılması (rekonstrüksiyon işlemi) ve sönümlenmemiş TL ışımaya eğrilerinin dekonvolüsyonu*
- VI. Adım: W ve C değerlerinin kabul kriterleri*

I. Adım: Dekonvolüsyon Analizi (CGCD)

İncelenecek olan materyalin farklı ısıtma hızlarında elde edilen TL ışımaya eğrileri Denklem (2.49)'a göre fit edilir. Fit sonucunda, TL ışımaya eğrisindeki bulunan her pik için maksimum sıcaklık (T_m) ve pik altındaki alan değerleri (A) kaydedilir. Bu işlem tüm ısıtma hızları için elde edilen TL ışımaya eğrileri için tekrarlanır.

II. Adım: Sıcaklık gecikmesi (temperature lag) düzeltilmesi

Isıtma işlemi sırasında ısı çiftleri (thermocouple) ısıtma şeridinin (heating strip) sıcaklığını ölçmektedir, ısıtılan numunenin gerçek sıcaklığını vermemektedir. Isıtma şeridinin sıcaklığı ile numunenin sıcaklığı arasındaki bu fark, sıcaklık gecikmesi (temperature lag) olarak bilinir (Gotlib vd. 1984, Betts ve Townsend 1993, Piters ve Bos 1994). Sıcaklık değişiminin önemli olduğu deneylerde, ısıtma şeridinin sıcaklığı ile numune sıcaklığı arasındaki farkın olması hatalı sonuçlar doğmasına yol açacaktır. Bu gibi durumlarda bu etkiyi en aza indirmek için Kitis ve Tyun (1998) tarafından Denklem (2.59)'un kullanılması önerilmiştir.

$$T_j = T_i - c \ln \left(\frac{\beta_i}{\beta_j} \right) \quad (2.59)$$

Bu eşitlikte, T_i en düşük ısıtma hızının kabul edildiği durumda ($\beta_i = 0.25 \text{ K/s}$) elde edilen maksimum pik sıcaklığı; T_j ise β_j ısıtma hızlarına karşı gelen sıcaklık gecikmesi yapılmış değeridir. c ise T_{m1} ve T_{m2} en düşük iki ısıtma hızına karşı gelen maksimum sıcaklık değerleri olmak üzere $\frac{T_{m2}-T_{m1}}{\ln 2}$, ye eşit bir sabittir. Düzeltilmiş sıcaklık değeri ısıtma eğrisindeki her pik için Eşitlik (2.59) kullanılarak belirlenir.

III.Adım: Deneysel verim değerlerinin belirlenmesi

Birinci adımda ısıtma eğrisindeki her bir pik için dekonvolüyon analizi sayesinde elde edilen maksimum sıcaklık değeri (T_m) ikinci adımda Denklem (2.59)'e göre düzeltme uygulanarak düzeltilmiş sıcaklık değeri (T_m^d) elde edilmişti. ısıtma eğrisindeki her pik için dekonvolüsyon sonucunda elde edilen pik alanı değerleri (A), Denklem (2.60)'da yerine konularak deneysel verim değerleri, η (T_m^d) belirlenir.

$$\eta (T_m^d) = \frac{A(\beta_j)}{A(\beta_i)} \quad (2.60)$$

Burada, $A(\beta_j)$, kullanılan ısıtma hızlarında elde edilen piklerin alan değerlerini, $A(\beta_i)$ ise en düşük ısıtma hızında elde edilen pik alan değerini gösterir. Her bir pik için $\beta_j = \beta_i$ alındığında deneysel verim değeri 1'e eşit olur. Fakat bu durum sadece en az kararlı olan TL pikleri için geçerli olabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda oluşan pikler için sönümlenmemiş TL pik şiddeti bilinmediği için buna karşılık gelen deneysel verim değeri de bilinemeyecektir. Bu sebeple, Denklem (2.60) dışarıdan sayılar atanabilen bir f faktörü ile revize edilir ve deneysel verim değeri Denklem (2.61)'e dönüşür:

$$\eta (T_m^d) = \frac{A(\beta_j)}{f \cdot A(\beta_i)} \quad (2.61)$$

Buradaki f parametresi, 1'den büyük sayılar alan pozitif bir sayıdır ve Eşitlik (2.61) daima 1'den küçüktür ve f parametresi, verim normalizasyon parametresi olarak adlandırılır. f parametresinin seçimi ve doğruluğu ileriki bölümlerde verilmiştir.

IV.Adım: *Termal sönümlenme parametrelerinin (W ve C) belirlenmesi*

Denklem (2.58) ve Denklem (2.61)'deki verim ifadeleri birbirine eşitlendiğinde Denklem (2.62) elde edilir. f parametresinin değerlerinin el ile girilerek iki fit parametresi olan W ve C parametreleri Denklem (2.62) aracılığı ile elde edilir.

$$\frac{A(\beta_j)}{A(\beta_{min}) \cdot f} = \frac{1}{1 + Ce^{-\frac{W}{kT_m}}} \quad (2.62)$$

İncelenecek olan veri seti, Eşitlik (2.62) kullanılarak her bir f parametresi için fit edilir. Fit işleminin uygunluğu Denklem (2.50)'de verilen FOM değeri ile kontrol edilir. Her bir f değeri için W ve C değerleri, fite karşı gelen FOM değeri ile bulunur: Bu durumda elde edilen FOM değeri özel olarak $FOM_{2.62}$ olarak adlandırılır.

V. Adım: *TL piklerinin yeniden yapılandırılması (rekonstrüksiyonu) ve sönümlenmemiş TL ışına eğrisinin dekonvolüsyonu*

Sönümlenmemiş TL şiddeti Denklem (2.63) ile verilir:

$$I_q(T) = I_{uq}(T) \cdot \eta(T) \quad (2.63)$$

Burada $I_{uq}(T)$ ve $I_q(T)$ sırasıyla, sönümlenmemiş ve sönümlenmiş TL ışına eğrileridir. Sönümlenmemiş TL şiddeti bilinmemektedir. Bu durumda, sönümlenmemiş TL ışına eğrisinin hem şekil hem de şiddet olarak belirlenmesi işlemi, sönümlenmiş TL piki ışına eğrisinin yeniden yapılandırması (rekonstrüksiyon) olarak bilinir (Dallas vd. 2008).

Sönümlenmemiş ışıma eğrisi $I_{uq}(T)$, Denklem (2.64) aracılığı ile belirlenir:

$$I_{uq}(T) = \frac{I_q(T)}{\eta(T)} \quad (2.64)$$

Rekonstrüksiyon işleminde, Denklem 2.60 ve 2.62’de kullanılan pik alan değerleri yerine tüm ışıma eğrisi kullanılmıştır. Rekonstrüksiyon prosedürüne göre, sönümlenmiş ışıma eğrisindeki her bir veri daha önce 4. adım aracılığı belirlenen W ve C parametrelerinin kullanılması ile elde edilen verim değerine bölünerek sönümlenmiş TL pik şiddeti $I_{uq}(T)$ elde edilir. Yeniden yapılandırma işlemi sonucunda elde edilen sönümlenmemiş TL pikleri için elde edilen pik alanı değerlerinin artan ısıtma hızlarına göre elde değişmemesi beklenir. Diğer bir deyişle, pik alanları kullanılan ısıtma hızlarına göre invaryant kalmalıdır.

VI. Adım: W ve C değerlerinin kabul kriterleri

Termal sönümlenme işleminde W ve C parametrelerinin belirlenmesi işlemi; ışıma eğrisinin piklerine ayırt edilmesi ve sıcaklık gecikmesi düzeltilmesinden sonra (1 ve 2. adımlar), her aritmetik f değeri için Denklem (2.62)’ye göre fit gerçekleştirilir (3. adım). Bunun sonunda her bir aritmetik f değeri için $FOM_{2.62}$ ile birlikte bir W ve C çifti elde edilir. Elde edilen W ve C değerleri Eşitlik (2.63)’e göre rekonstrüksiyon işlemine tabi tutulur ve bunun sonucunda sönümlenmemiş TL pikleri elde edilir. Elde edilen sönümlenmemiş TL pikleri Denklem (2.49)’a göre dekonvole edilerek her bir pik için pik alan değerleri (A_{uq}) bulunur. Bu dekonvolüsyon işlemindeki fitin uygunluğu FOM_{uq} ile verilir.

Bu işlemler tüm ısıtma hızları üzerinden, W ve C değerleri için Eşitlik 2.62’deki fit işleminde edilecek düşük $FOM_{2.62}$ değerlerine kadar devam ettirilir. Fiziksel olarak termal sönümlenme parametrelerinin anlamı A_{uq} sönümlenmemiş pik alan değerlerinin farklı ısıtma hızlarında aynı olmasıdır. Bu yüzden, W ve C ’nin seçiminde yatan en önemli kriter, rekonstrüksiyon işlemi sonucunda elde edilen piklerin farklı ısıtma hızlarında elde edilecek A_{uq} alan değerlerinin tekrarlanabilir olmasıdır. Bu alan değerlerinin tekrarlanabilirliği, tüm ısıtma hızı aralığı boyunca σA_{uq} değerlerinin standart sapması ile

kontrol edilir. Bunun yanı sıra W ve C değerlerinin fiziksel anlamlı değerlerinin seçilebilmesi için gerekli üçüncü kriter yeniden yapılandırılmış TL piklerinin dekonvolüsyonu için verilen FOM_{uq} değeridir. Sonuç olarak, $FOM_{2.62}$, FOM_{uq} değerlerinin küçük değerler alması ($<5\%$) ve σA_{uq} değerinin tekrarlanabilir olduğu durumda elde edilen W ve C parametreleri termal sönümlenme parametresi olarak kabul edilir; diğer durumlarda reddedilir. Bunun sonucunda, termal sönümlenme parametreleri dar bir aralıkta birbirine yakın değerler veren bir aralıkta ifade edilmiş olur.

Termal sönümlenmenin TL pikleri üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için, verim ifadesinin birinci türevi (değişim hızı) incelenmelidir. Maksimum değişim hızı ise Denklem (2.58)'in ikinci türevinin alınması ile elde edilir:

$$\eta_m = 0.5 + \frac{kT_{\eta_m}}{W} \quad (2.65)$$

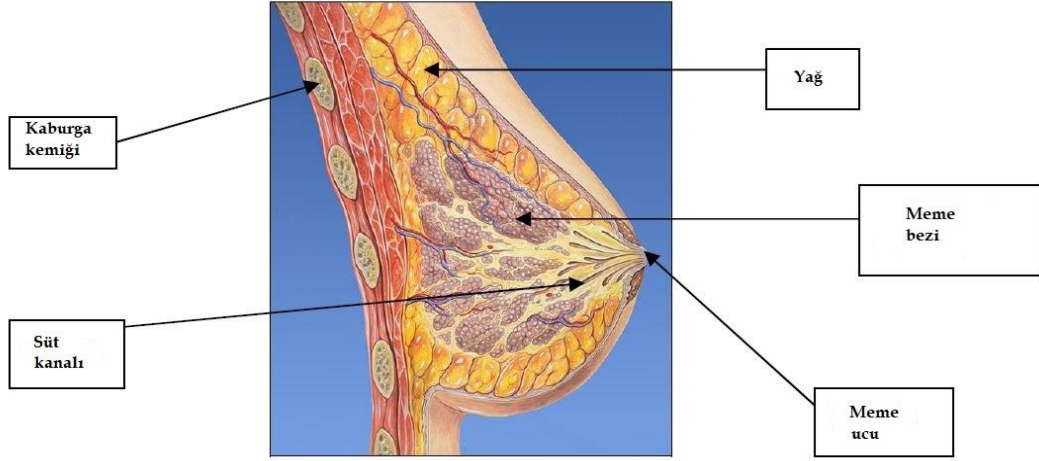
Burada, T_{η_m} , maksimum η_m değerine karşı gelen sıcaklık değeridir. Genellikle $kT_{\eta_m} \ll W$ olduğu için, Dallas vd. (2008) $Al_2O_3:C$ için W ve C parametreleri için $\eta_m=0.54\pm 0.007$ olarak elde etmişlerdir. Böylece, termal sönümlenmenin pikler üzerindeki etkisi iki bölgeye ayrılabilir. Bunlardan ilki, $0.54 < \eta(T) < 1$ bölgesi, diğeri ise $\eta(T) < 0.54$ olduğu bölgedir. Bahsedilen ilk bölgede, değişim hızının hızla arttığı, ikinci bölgede ise değişimin hızının azalarak sifıra gittiği görülür. $\eta(T) < 0.54$ olduğu bölgede termal sönümlenme etkisinin daha baskın ve sıcaklık kaymalarının daha fazla olduğu bilinmektedir. $\eta(T) < 0.54$ olduğu bölgedeki TL ışımaya eğrilerinin baskın termal sönümlenme etkisinden dolayı TL ışımaya eğrilerinin ve pik maksimum sıcaklıklarının daha fazla kaydığı rapor edilmiştir (Dallas vd. 2008).

2.9 Mamografi Sistemi ve Dozimetrik Uygulamalar

2.9.1 Meme anatomisi ve meme kanseri

Genel olarak, erişkin bir kadının memesi glandüler doku ve yağdan oluşur. Herhangi bir kemik veya kas içermez (Bushberg vd. 2002, Martini vd. 2006, Zeidan 2009). Her meme, meme bezlerinin kanallarının vücuda açıldığı bir meme ucuna sahiptir. Şekil 2.8'de

memenin anatomisinin kesit görünüşünü verilmiştir. Kadın memesinin asıl fonksiyonu yeni doğan bebekler için süt üretmektir. Meme bezleri, sudan ve kan dolaşımından alınan besinler aracılığı ile süt üretir (Martini vd. 2006).



Şekil 2.8 Meme anatomisinin kesit görünüşü (Patrick 2006)

Memenin büyüklüğü ve şekli, adet döngüsü, hamilelik ve yaş gibi faktörlerin zaman içerisinde değişmesiyle değişebilmektedir (Martini vd. 2006). Bazı kadınların memelerinde diğerlerinden daha fazla glandüler doku vardır. Bu çoğunlukla daha genç kadınların daha yaşlı kadınlara oranla daha fazla glandüler dokuya sahip olması ile dolayısıyla yaş ile ilişkilidir (Dance vd. 1999, Martini vd. 2006).

Meme kanseri, kadınlar için tüm kanser türlerinin ikinci önde gelen ölüm nedenidir (<https://www.who.int/cancer/>, 2019). 2002 global kanser istatistiklerine göre dünya çapında kadınlarda teşhis edilen tüm kanser türlerinin %23'ünü oluşturmaktadır (Parkin vd. 2005). Türkiye'de 1987-2008 yılları arasında yaklaşık 23,000 kişinin meme kanseri yüzünden öldüğü rapor edilmiştir (Doğan ve Toprak 2014). 2017 yılında ise rapor edilen verilere göre Amerika'da 1,688,780 kişide yeni meme kanseri vakası sayısı tespit edilmiş ve meme kanseri yüzünden öngörülen ölüm oranı 600,290 kişi olduğu tahmin edilmektedir (Siegel vd. 2017). Meme kanserinin erken aşamalarda tespiti her yıl bir çok kişinin hayatını kurtarmaktadır. Ancak, diğer kanser türlerinde olduğu gibi, çoğu durumda kanserin erken aşamalarında hastalığın belirtileri yoktur, belirtiler sonraki

aşamalarda kitle vb. meydana geldikten sonra anlaşılabilir (https://www.cancer.gov/, 2019). Meme kanserinin kesin sebebi tam olarak bilinmemesine rağmen meme kanseri sebebiyle ortaya çıkan ölümleri azaltmak için geliştirilen en etkin yöntemin mamografik görüntüleme olduğu kabul edilmektedir (Nyström vd.1993, Smith vd. 2004).

2.9.2 Mamografi

Mamografi, X ışınları kullanılarak insan memesinin görüntüsünü elde etmek için kullanılan sistemdir (Dance vd. 1999, Bushberg vd. 2002). Mamografide kullanılan X ışınlarının enerjisi 22-35 kVp arasındadır. X ışınları, memenin lifli, yağlı ve glandüler dokuya sahip kısımlarını gösterir. İki tip mamografik görüntüleme (mamogram) vardır. Bunlardan ilki, meme kanseri belirtisi olmayan kadınlar için erken dönemde kanseri tespit etmek amacıyla yapılan tarama mamogramıdır. Bu taramada memenin yan ve üstten görüntüleri iki farklı açıda çekilir. Diğer bir mamogram ise, memede var olan kitle, meme ucundaki akıntı ya da ağrı gibi durumlarda hastanın şikayeti üzerine yapılan diagnostik mamogramdır (Bushberg vd. 2002, Zeidan 2009).

Mamografi sisteminde optimum X ışınları enerjisini elde etmek için, istenilen enerjide karakteristik X ışınlarını elde etmek için özel hedef materyali ve Bremstrahlung radyasyonunun sebep olduğu düşük ve yüksek enerjili X ışınlarını ortadan kaldırmak için uygun filtreler kullanılır. Diğer X ışın görüntüleme sistemlerine kıyasla düşük atom numarasına sahip hedef materyaller kullanılmaktadır. X ışın tüpünde, Molibdenyum (Mo), Rodyum (Rh) ya da Tungsten (W) hedef atom olarak kullanılır (Dance 1987, Bushberg vd. 2002, Jamal ve Mclean 2003). Mamografi cihazı özelliklerinin materyal ve metot kısmında detaylı olarak yer verilmiştir.

Ortalama boyutlu bir memenin mamografi muayenesinde almış olduğu ortalama soğurulan doz 1-2 mGy mertebesindedir (Beir 1990, Dance vd. 1999, Dance vd. 2000). Bu doz görece olarak küçük olmasına karşın radyasyona hassas dokuların bu dozu alması sonucunda kanser tetikleme riski bulunmaktadır. Bu nedenle, radyasyona bağlı kanser riskini en aza indirmek için hastanın aldığı dozu en aza indirmek gereklidir (Dance vd.

1999, Heywang-Kobrunner vd. 2002). Teşhis sürecinde canlı içi (in vivo) ölçümler ile muayene ya da tedavi süresince hastaya verilen dozun ölçümleri gerçekleştirilebilir. Bu ölçümler, cilt üzerine veya hastanın içine hedefe çok yakın yerleştirilerek yapılabilir. Hastanın olmadığı durumda ise ölçümler fantom kullanılarak gerçekleştirilir (Dance vd. 1999, Warren-Forward ve Duggan 2004, Aznar 2005).

Hastaya verilen doz, kullanılan tekniğe (anot/filtre kombinasyonu), tüp akımına ve meme karakteristiğine (yoğunluk/kalınlık) bağlı olarak değişmektedir (Wu vd. 1994, Boone 1999, Dance vd. 2009). Meme dokusu için radyasyona karşı en hassas olduğu doku, glandüler doku olarak bilinmekte ve Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) tarafından meme için radyolojik risk, ortalama glandüler dozun (MGD) almış olduğu doz ile karakterize edilmektedir (ICRP 1987). Ortalama glandüler doz (MGD) değeri doğrudan ölçülememekte ancak giriş yüzey dozu (memenin en üst kısmında soğurulan doz) ve derin dozlar aracılığı ile türetilmektedir (Dance vd. 1999, Di Maria vd. 2011).

2.9.3 Ortalama glandüler dozun (MGD) belirlenmesi

Glandüler doku meme dokusunda radyasyona karşı en hassas doku olarak bilinmektedir. Meme için radyolojik risk ortalama glandüler doz değeri ile verilmektedir (ICRP 1987). Ortalama glandüler dozun bilinmesi, mamografi çekiminde kullanılan X ışın spektrumlarının optimizasyonu ve hastanın aldığı dozların azaltılması için ek protokoller geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Ortalama glandüler doz (MGD) doğrudan belirlenemekte, meme yüzeyinde ölçülen hava kerma ve Monte-Carlo simülasyonlarından elde edilen faktörler aracılığı ile hesaplanmaktadır. Canlı hasta olmadığı durumlarda meme eşdeğeri fantomlar kullanılmaktadır. Ortalama glandüler doz (MGD) değeri Dance vd. 1990, 2000; Wu vd. 1994, Sobol ve Wu 1997; Boone vd.1999,2002 farklı yaklaşımlarla belirlenmektedir. Ortalama glandüler doz (MGD), Denklem (2.66) aracılığı ile belirlenir (Dance vd. 1999, 2000):

$$D = K \times g \times c \times s \quad (2.66)$$

Burada, K meme yüzeyinde geri saçılım etkisinin olmadığı durumda belirlenen yüzey giriş hava kerma değeri (ESAK); g değeri ESAK değerinden %50 glandüler doku için MGD'ye geçiş katsayısı (HVL'ye bağlı); c , memenin glandilüritesini hesaba katan faktör (HVL'ye bağlı) ve s 'de farklı x-ışın spektrumlarının kullanılması (Mo/Mo, Mo/Rh gibi) durumunda gerekli olan düzeltme faktörünü göstermektedir (Dance vd. 2000). Bu faktörler, Dance vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada ile bu faktörler farklı fantom kalınlıklarına göre tablolar halinde sunulmuştur.

2.10 BeO Materyalinin Genel Özellikleri ve TL, OSL ve ESR ile İlgili Çalışmalar

BeO materyali, yüksek ısı iletim kapasitesi ve yüksek elektriksel direnç, 2000°C'ye kadar kimyasal yapısının kararlı olması, kolay elde edilebilir olması gibi özellikleri sayesinde ticari alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik endüstrisinde devre elamanlarının ısılarını dağıtarak soğutucu bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Yüksek termal iletimi ve ısı şoklara dayanıklılığı sayesinde ısı çift (termokupl) ve seramik eritme kaplarında kullanılmaktadır (Bulur ve Göksu 1988). Bunun yanı sıra etkin atom numarasın 7.13 olması nedeniyle yaklaşık doku eşdeğeri (7.35-7.65) kabul edildiği için radyasyon dozimetresi olarak ilgi çekici bir materyaldir (Bos 2001). BeO dozimetresinin kullanımı personel, medikal ve çevresel dozimetre alanlarındaki kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır (Sommer vd. 2007, Yukihara 2011).

BeO kristali, bir dörtyüzlünün merkezindeki katyon bölgesinde her bir berilyum atomunu çevreleyen dört oksijen atomu ve her bir oksijen atomunu çevreleyen berilyum atomlarından oluşan vürtzit bir yapıdan oluşmaktadır. Berilyum atomunun yer aldığı bölgede aksenal bağların bazal bağlara eşit olmaması sebebiyle birbirine eşit olmayan iki çeşit bağ oluşmaktadır. Bunun sonucunda bu bölgelere safsızlıklar yerleşmektedir. BeO materyalinde oluşması beklenen merkezler F ve F^+ merkezleri (farklı yük durumlarında anyon boşlukları) ve V merkezleridir (katyon boşluklarında tuzaklanmış holler). BeO'de yaygın olarak görülen safsızlıklar Mg, Si, Ca, B ve Al elementleridir (Bøtter-Jensen vd. 2003).

BeO materyalinin lüminesans özellikleri ilk defa Albrecht ve Mandeville (1956) tarafından, TL özellikleri ise ilk olarak Moore (1957) tarafından araştırılmıştır. Tochilin vd. (1969) BeO dozimetresinin TL özellikleri, doz cevap eğrisi, sönüm ve enerji bağımlılığı gibi özellikleri detaylı olarak araştırmıştır. Scarpa (1970) tarafından üç farklı tipteki BeO için TL ışıma eğrileri, sönüm, doz cevap özellikleri ve ışığa karşı davranışları incelenmiştir. BeO materyalinin 5, 220 ve 340 °C sıcaklıklarında (ısıtma hızı 5 °C/s'de) üç pikten oluştuğu ve 220°C'deki pikin ana dozimetrik pik olarak kabul edilmektedir (Bulur ve Göksu 1998). BeO'in TL ışıma eğrisindeki pikler için TL kinetik parametreleri Bacci vd. (1989) tarafından ilk defa araştırılmıştır. Nieto vd. (2016) tarafından ikinci TL piki için izotermal bozunum yöntemi ile kinetik parametreler incelenmiştir. Aşlar vd. 2017a tarafından BeO için termal sönümlenme parametreleri (*W* ve *C*) hesaplanmıştır. Bu çalışmada, *C* parametresi literatürde ilk defa hesaplanmıştır. Buna ek olarak, Aşlar vd. 2017b tarafından TL piklerinin kinetik parametreleri, kesikli ışıma eğrisi tekniği, farklı ısıtma hızları yöntemi, pik şekli metodu, dekonvolüsyon metodu ve izotermal yöntemleri ile belirlenmiş ve ilk defa BeO dozimetresinde termal sönüm olayının pikler üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Buna ek olarak termal sönümlenme olayının TL pikleri ve kullanılan TL metotları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

BeO'in TL piklerinin ışıktan etkilendiği Tochilin vd. (1969) tarafından rapor edilmiştir. Bu çalışmadan sonra BeO'in ışığa karşı hassaslığı nedeniyle BeO'in OSL dozimetresi olarak kullanılabilirliği üzerine olan araştırmalar artmıştır. Rhyner ve Miller (1970) tarafından optik uyarmalı lüminesans özellikleri araştırılmış ve optik uyarmalı lüminesans dozimetre (OSLD) olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Ancak, BeO materyalinin OSL özellikleri kapsamlı olarak Bulur ve Göksu (1998) tarafından araştırılmıştır. Bunun sonucunda optik uyarım yoluyla radyasyon dozunu belirlemede kullanabilecek uygun bir materyal olduğu öne sürülmüştür. Bulur ve Göksu 1998 tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada BeO'in uyarım spektrumu 400 ile 700 nm dalga boyları arasında farklı sıcaklıklarda incelenmiş, uyarım spektrumunun artan uyarım dalga boyu ile azalarak 420 ile 550 nm arasında geniş bir pik gösterdiği ve 435 nm'de maksimum değere ulaştığı rapor edilmiştir. BeO'in TL emisyonunun 335 nm civarında olduğu Mckeever vd. 1995 tarafından rapor edilmiştir.

Bulur ve Yeltik (2010), Yukihara (2011), Bulur ve Saraç (2013), Yukihara vd. (2016) tarafından BeO dozimetresinin OSL sinyali incelendiğinde OSL sinyalinin en az iki bileşenden oluştuğu görülmüştür. Elde edilen OSL sinyalinin 310 ve 370 nm’de olmak üzere iki emisyon bandı ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Yukihara 2011, Bulur ve Saraç 2013). Bulur ve Göksu (1998) tarafından OSL sinyalinin okuma sıcaklığı ile olan ilişkisi 50 ile 120°C arasındaki sıcaklıklarda incelenmiş; OSL sinyal şiddetinin artan okuma sıcaklığı ile azaldığı görülmüştür. Bu durum materyalin termal sönümlenme olayına uğradığını göstermiştir. Bunun yanı sıra, aynı çalışmada OSL öncesi ve sonra TL sinyalleri incelendiğinde TL ışımaya eğrisindeki 1. ve 2. piklerin ışıktan etkilendiği görülmüştür. BeO materyalinde yaklaşık 520°C civarında en az bir derin tuzakın olabileceği ve bu derin tuzaklardan TL ve OSL tuzaklarına yük geçişlerinin olduğu foto transfer TL ve OSL sinyallerinin oluşmasına yol açtığı görülmüştür. Sommer vd. (2007) tarafından OSL doz cevabının 5µGy ile 5 Gy arasında lineer davranış gösterdiği ve 1µGy mertebesindeki dozların BeO dozimetrelere ile ölçülebileceği gösterilmiştir. BeO’in OSL sinyalinin zamanla olan sönümü, Sommer vd. (2007) tarafından araştırılmış; ışınlama sonrası birinci günün sonunda 30 dakikaya kıyasla %6’lık bir sönüm ve 50°C’lik ortam sıcaklığında saklandığında 6 aya kadar % 1’den daha az bir sönüm meydana geldiği gösterilmiştir.

BeO materyalinin TL ve OSL özellikleri arasındaki ilişki kademeli tavlama (step annealing) deneyleri ile araştırılmıştır. Bunun sonucunda, BeO TL piklerinden 1. ve 2. piklerin ışıktan etkilendiği, 3. pikin ise ışıktan etkilenmediği rapor edilmiştir. OSL sinyalinin 250 °C’ ye kadar yapılan ön ısıtma işlemlerinden etkilenmediği gösterilmiştir. OSL sinyalinin kaynağının 340°C civarındaki tuzaktan kaynaklanabileceği öne sürülmüştür (Bulur ve Göksu 1988, Bulur ve Yeltik 2010, Yukihara 2011). Fakat Bulur ve Saraç (2013) tarafından yapılan çalışmada 10 Gy değerinde ışınlanan BeO dozimetrelere tek bir bozunum gösteren OSL sinyal termal kararlılığının aksine materyalin OSL sinyal davranışının iki aşamada bozunduğu görülmüştür. Benzer bir sonuç Aşlar vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada BeO dozimetrelere benzer OSL termal kararlılık eğrilerinde elde edilmiştir.

BeO materyalinin ESR özellikleri ilk olarak tek kristal BeO için Reinberg (1964) ve Schirmer (1968) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada BeO dozimetreler, 6 MeV'lik elektronlarla ışınlanmış bunun sonucunda dörtlü ve yedili ESR çizgileri elde edilmiştir. Bu spektrumların ışınlama sonrası berilyum atomunun yerini alan nükleer spini 3 ve $\frac{3}{2}$ olan ^{10}B ve ^{11}B elementlerinden kaynaklandığı rapor edilmiştir. Tek kristal BeO için diğer bir çalışma Herve ve Maffeo (1970) tarafından yürütülmüş; kristal eksenine göre elde edilen ESR spektrumunun kaynağının V merkezi (katyon bölgesinde tuzaklanmış O^- iyonu) olduğu rapor edilmiştir. Duvarney vd. (1971) tarafından BeO seramiğinin ESR özellikleri üzerindeki çalışmaları neticesinde BeO'nin ESR spektrumunun spini $\frac{5}{2}$ olan alüminyum atomundan kaynaklandığı görülmüştür. Herve ve Maffeo 1970 3 MeV'lik enerjideki elektronlar ile düşük sıcaklıklarda (1.5-4.2K) tek kristal BeO dozimetresinin ışınlanması sonucu, kristal eksenine manyetik alana paralel olduğu durumda $g_{\perp} = 2.0149$ ve $g_{\parallel} = 2.0028$ değerlerinde iki ESR çizgisi gözlemlenmiş ve bu iki ESR çizgisinin kaynağının V merkezi olarak bilinen dört komşu oksijen iyonunun birinde tuzaklanan hol merkezinin (katyon bölgesinde tuzaklanan O^- iyonu) olarak atanmıştır. BeO ile ilgili ESR çalışması Watanabe vd. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda oda sıcaklığında iki farklı ESR merkezi belirlenmiştir. Bu merkezler Al^{+2} ve O^- iyonlarından kaynaklandığı görülmüştür. Bunun yanı sıra tavlama çalışmaları sonucunda izotropik özellik gösteren yeni bir merkez elde edilmiştir. Bu merkez izotropik özellik gösteren O^- iyonu olarak atanmıştır.

2.11 TL, OSL ve ESR Korelasyonu

Tuzaklanmış yüklerin termal olarak uyarılması durumunda elde edilen lüminesans, TL olarak; optik olarak sağlanıyorsa OSL olarak bilinmektedir. Her iki olayda da tuzaklanmış elektronlar tuzaklardan çıkmakta ve rekombinasyon merkezlerine ulaşarak lüminesans oluşturmaktadır. Her iki olayda tuzaklara sağlanan enerji dışında birbirleri ile ayrılmaz bir şekilde ilişkilidir (Yukihara ve McKeever 2011). TL ve OSL arasındaki bu ilişki teorik bakış açısından önemli olmasının yanı sıra aynı zamanda TL ve OSL sinyallerine katkıda bulunan tuzak merkezlerinin iletim bandına göre ne kadar derin olduğunu anlamada önemlidir. Bu durumun anlaşılması tuzakların termal kararlılığının bilinmesine yol açar. TL / OSL korelasyonları diğer tuzak merkezlerinin (örneğin sığ ya da derin

tuzaklar) OSL süreci üzerindeki etkisinin anlaşılmasına yardımcı olur. Böylece, bütünleştirilmiş TL/OSL deneyleri OSL sürecinin daha iyi kavranmasına ve materyaldeki tuzak merkezleri ile olan ilişkisini anlamayı mümkün kılmaktadır. Bu amaçla yapılan deneyler, TL eğrileri üzerinde ağartma (bleaching) etkilerinin ve OSL eğrilerinin termal tavlama etkilerinin araştırılmasını içermektedir (Yukihara ve McKeever 2011).

Elektron spin rezonans (ESR) ölçümleri, çiftlenmemiş elektronlara sahip paramanyetik özellik gösteren materyallerin araştırılmasına dayanır. ESR sistemi, tuzaklanmış elektronlar ve TL, OSL mekanizması ile ilgili bilgiler sağlayabilmektedir. Tuzaklanmış elektronlar karakteristik ESR çizgileri oluşturmaktadır. Oluşan bu ESR sinyalinin şiddeti tuzaklanmış elektron sayısı ile orantılıdır. Prensipte olarak, ESR sistemi, TL ve OSL'ye göre kristalin yapısı hakkında doğrudan bilgi sağlayabilmektedir. ESR çalışmaları sonucunda lüminesans merkezlerinin mekanizması, merkezlerin çevre atomlarla olan ilişkisi ve ışınlama esnasında ortaya çıkan paramanyetik merkezlerin karakteristiğini anlamaya yardımcı olmaktadır (Vij 1998). ESR spektroskopisinin uygulandığı çok çeşitli paramanyetik materyeller arasında yaygın olarak ilgilenilen durum katı materyallerdeki safsızlık merkezlerinin araştırılmasıdır (Chen ve Pagonis 2011).

Materyalde bulunan safsızlık merkezleri, yük taşıyıcı ya da rekombinasyon merkezi görevi görerek TL ya da OSL sinyalleri ile ilişkili olabilirler. ESR spektroskopisi, kristalde bulunan safsızlıkları tespit edebilme yeteneğine sahip bir teknik olduğu için, eş zamanlı TL, OSL ve ESR ölçümleri bu teknikler arasında doğrudan bir ilişkinin kurulabileceğini göstermektedir. Sıcaklık ya da ışıkla uyarım sonucunda, ESR sinyali tuzakların kararsız hale geldiği bir sıcaklık ya da ışık sonucunda düşüş gösterecektir. Bu düşüş, paramanyetik safsızlıklardan termal ya da ışıkla yüklerin boşalması ya da buna alternatif olarak rekombinasyon merkezi görevi durumundaki paramanyetik safsızlıkların dolmasına yol açar. Her iki durumda TL, OSL ve ESR sinyalleri arasında bir korelasyon elde edilmektedir (Chen ve Pagonis 2011).

TL ve OSL arasındaki korelasyon, lüminesans araştırma konusundaki çeşitli malzemelerdeki tuzak yük mekanizması süreçlerini anlama yönünde büyük önem taşımaktadır. Pratik olarak, bu bilgi, TL piklerinin ve OSL bileşenlerinin etkili bir şekilde

tavlanması/ağartılması ile dedekte edilebilen minimum doz limitinin (MDD) geliştirilmesine ve ölçüm protokollerinin optimizasyonuna yardımcı olmaktadır. TL, OSL ve ESR arasındaki korelasyon ile TL ve OSL sinyallerinden sorumlu olan safsızlıklar veya katkı edilen elementler korelasyon aracılığı ile belirlenebilmektedir. Korelasyonun bir sonucu olarak, ESR'de belirlenen safsızlıkların miktarının artırılması ile TL pikleri ve OSL bileşenlerinin şiddeti arttırılacak böylece lüminesanas verimi arttırılabilecektir. Böyle bir korelasyon, daha yüksek verime sahip dozimetrik materyallerin üretilmesine olanak sağlamada öncü çalışmalar olarak değerlendirilebilir. TL, OSL ve ESR korelasyon çalışmalarını, NaCl (Takeuchi vd. 1979), LiF:Mg,Ti (Stoebe vd. 1980, Bilski vd .2014), CaSO₄ (Nambi vd. 1974), CaF₂:N (Polymeris vd. 2006), Al₂O₃:C (Akselrod ve Akselrod 2002), Li₂B₄O₇:Ag,Gd (Özdemir vd .2018), K-Feldsparlarda TL ve IRSL korelasyonu, (Sfampa vd. 2019), farklı orjine sahip kuartz materyalleri için (Kitis vd. 2010) olarak özetlenebilir.

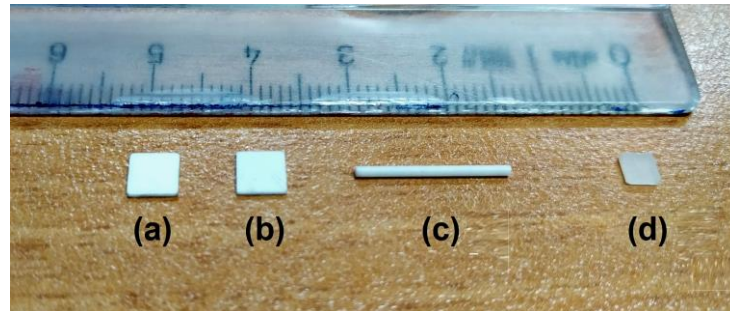
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Kullanılan dozimetreler

Termoluminesans (TL), optik uyarmalı lümiensans (OSL) ve mamografi sisteminde iki farklı firmadan (Brush Wellman Inc., Amerika ve Radkor Personel Dozimetre şirketi, Türkiye) alınan BeO seramik malzemeleri kullanılmıştır. Her iki malzemede 4 mm×1 mm boyutlarında kare çip şeklinde seramik formdadır. ESR ölçümlerinde kullanılan BeO materyali ise, Innovacera Advanced Materials şirketi, Çin menşeli olup boyutları 15 mm uzunluğunda ve 1 mm çapında çubuk seramik malzemedir. BeO materyalinin genel özellikleri Bölüm 2.10'da verilmiştir.

LiF:Mg, Ti (TLD-100) dozimetreler (Thermo Scientific, Amerika), 3.2 x 3.2 x 0.9 mm boyutlarında kare çip şeklinde olup mamografi sisteminde doz ölçümlerinde karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. LiF:Mg,Ti (TLD-100) dozimetreler, yüksek ışık şiddeti, doku eşdeğeri kabul edilmesi ($Z_{etkin}=8.12$), geniş bir aralık boyunca lineer doz cevap aralığı (10 μ Gy mertebesinden 1 Gy'e kadar), iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olması sayesinde bireysel dozimetrede tüm vücut ile cilt dozunun belirlenmesinde ve medikal alanda (radyoterapi, radyoloji) ölçümlerde maruz kalınan dozları belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Tez boyunca kullanılan tüm dozimetreler, Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.1a ve b Thermalox 995 ve Radkor BeO'i; 3.1c Çubuk Innovacera BeO'i ve 3.1d LiF:Mg,Ti (TLD-100) dozimetrelerini göstermektedir.



Şekil 3.1 Tez boyunca kullanılan dozimetreler; a) Thermalox 995 BeO, b) Radkor BeO, c) Innovacera çubuk BeO, d) Thermo Scientific LiF:Mg,Ti (TLD-100)

Thermalox 995 BeO ve Radkor BeO dozimetreleri TL, OSL ve mamografi ölçümlerinde; Innovacera firmasına ait çubuk BeO ESR ölçümlerinde ve LiF:Mg,Ti (TLD-100) mamografi ölçümlerinde kullanılmıştır. Kullanılan materyallerin okuma parametreleri, tavlama prosedürleri ve gerekli protokoller ilgili bölümlerde açıklanmıştır.

3.1.2 Risø TL/OSL okuyucu

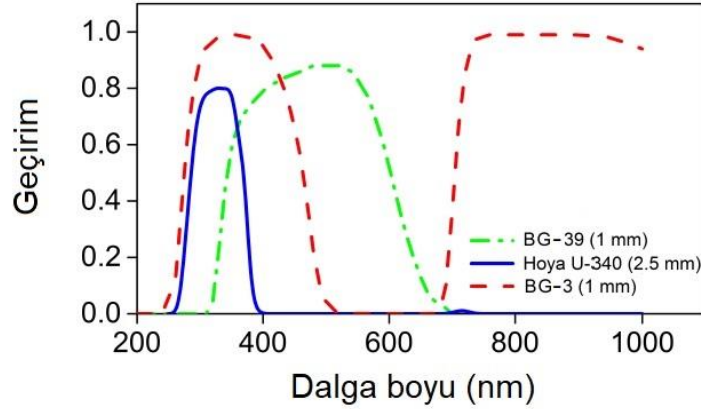
Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Retrospektif dozimetri laboratuvarında bulunan Risø TL/OSL DA-20 cihazı, ışık dedeksiyon sistemi (fotoçoğaltıcı tüp), iki farklı lüminesans uyarım modu (TL ve OSL) ve dahili $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ışınlama kaynağından oluşmaktadır. Cihaz ile ayrı ayrı TL ve OSL okuması yapılabildiği gibi her iki modun kombinasyonunda da ölçüm alınabilmektedir. Yayımlanan ışık fotoçoğaltıcı tüp ve uygun filtrelerin kullanımı sayesinde dedekte edilir. Risø TL/OSL okuyucu retrospektif kaza dozimetresi, lüminesans araştırması, arkeolojik ve jeolojik tarihlendirme, ışınlanmış gıda tespiti gibi araştırma alanlarında kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de Risø TL/OSL DA-20 okuyucusu, Şekil 3.3’de U-340 ve BG-39 filtrelerine ait geçirim dalga boyları ve Çizelge 3.1’de ise cihazın genel özellikleri verilmiştir. Bu cihaz BeO dozimetrelerin TL ve OSL okumalarında kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Risø TL/OSL DA-20 okuyucu

Çizelge 3.1 Risø TL/OSL- DA-20 okuyucu genel özellikleri (Anonymous 2017)

Özellikler	Risø TL/OSL DA-20 Okuyucu
TL	<ul style="list-style-type: none"> Maksimum Sıcaklık: 700°C Isıtma Hızı: 0.1 K/s ile 10 K/s arasında Isıtma şeridi Azot akışı (> 200°C , Çıkış basıncı: 2.5 bar)
OSL	<ul style="list-style-type: none"> Sürekli dalga modu uyarım modu (CW-OSL) ve linear modüle uyarım modu (LM-OSL) Mavi Led: Dalga boyu 470 nm (YYTG = 20 nm); toplam güç değeri: 50 mW/cm²(Toplam 28 adet) Kızılötesi Led (IR): Dalga boyu 870 nm, toplam güç değeri: 145 mW/cm² (Toplam 21 adet)
Filtreler	<ul style="list-style-type: none"> Hoya U-340 (270-380 nm, YYTG 80 nm, 7.5 mm kalınlık) BG-39 (340-610 nm, YYTG 250 nm, 1 mm kalınlık) Mavi filtre paketi (2 mm Schott BG 39 ve 4 mm Corning 7-59'in birleşimi)
Fotoçoğaltıcı tüp (PMT)	<ul style="list-style-type: none"> Bialkali EMI 9235QB Maksimum dedeksiyon verimi, 200 ve 400 nm dalga boyunda
Dahili ışınlama ünitesi	<ul style="list-style-type: none"> ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta kaynağı (Maksimum enerji: 2.27 MeV; Başlangıç aktivitesi: 1.48 GBq) Kuartzdaki doz hızı: $\cong 0.1$ Gy/s (20.01.2020)
Örnek kapasitesi	<ul style="list-style-type: none"> 48 örnek kapasiteli örnek karoseli Çapı 9.7 mm olan paslanmaz çelik disk ya da kap



Şekil 3.3 Risø TL/OSL okuyucuda bulunan üç farklı filtrenin (Hoya U-340, BG-39 ve BG-3) geçirim karakteristikleri (Anonymous 2017)

Elsac 9010 Işınlayıcı Ünitesi

Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği lüminesans tarihlendirme laboratuvarında bulunan Elsac 9010, OSL modunda okuma ünitesi ve harici ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta kaynağı

ışınlama ünitesine sahiptir. Örnek tepsisi; 10 mm çaplı, 0,5 mm bölmelerde toplam 64 disk (numune) alabilmektedir.



Şekil 3.4 Elsec 9010 ışınlayıcı ünitesi

Alüminyum üzerindeki doz hızı 0.025 Gy/s (10.08.2019) olan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ışınlama ünitesine sahiptir. Şekil 3.4'de Elsec 9010 cihazının ışınlama ünitesi görülmektedir (Sponer vd. 1990). Bu cihaz ESR ölçümlerinde yüksek dozdaki (>500Gy) ışınlamalar için kullanılmıştır.

3.1.3 Harshaw 3500 ve 4500 TLD okuyucuları

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Bireysel dozimetri laboratuvarında bulunan Harshaw 3500 ve 4500 TLD cihazları termoluminesans yöntemi ile dozimetrelerin okunma işlemi için kullanılmaktadır. Harshaw 3500 TLD cihazı ile sadece tekli dozimetreler okunabilirken, Harshaw 4500 TLD cihazı ile çip şeklindeki dozimetreler ve TLD kart dozimetreler okunabilmektedir. Çip dozimetreler indüksiyon ile ısıtma işlemine tabi tutulurken, kart dozimetreler için azot gazı ile yapılmaktadır. Her iki cihazda temel olarak materyalin yerleştirildiği bölme, filtre ve fotoçoğaltıcı tüpten (PMT) oluşmaktadır. Örneklerin koyulduğu bölmede bulunan ısıtma şeridi sayesinde örnekler ısıtılır, ısıtılma sonucu açığa çıkan ışığın fotoçoğaltıcı tüpte bulunan fotokatod yüzeyine çarpması ile oluşan elektronlar fotoçoğaltıcı tüp (PMT) içerisindeki dinotlar aracılığı ile çoğaltılıp akım değerine dönüştürülmesi ile materyalin soğurmuş olduğu doz hakkında bilgi elde edilir.



Şekil 3.5 a) Harshaw 3500, b) Harshaw 4500 TLD okuyucu

Cihazda, ölçüm parametreleri (maksimum sıcaklık, ısıtma hızı vb.) WinREMS programı ile kontrol edilmektedir. Her iki cihazda dozimetreler (çip, yuvarlak, çubuk vb. biçimlerde) ve toz numunelerin TL ölçümlerinde kullanılmaktadır. Şekil 3.5’de Harshaw 3500 ve 4500 TLD cihazları, Çizelge 3.2’de ise cihazların genel özellikleri verilmiştir. Bu cihazlar TLD-100 dozimetrelerin okuma işlemlerinde kullanılmıştır.

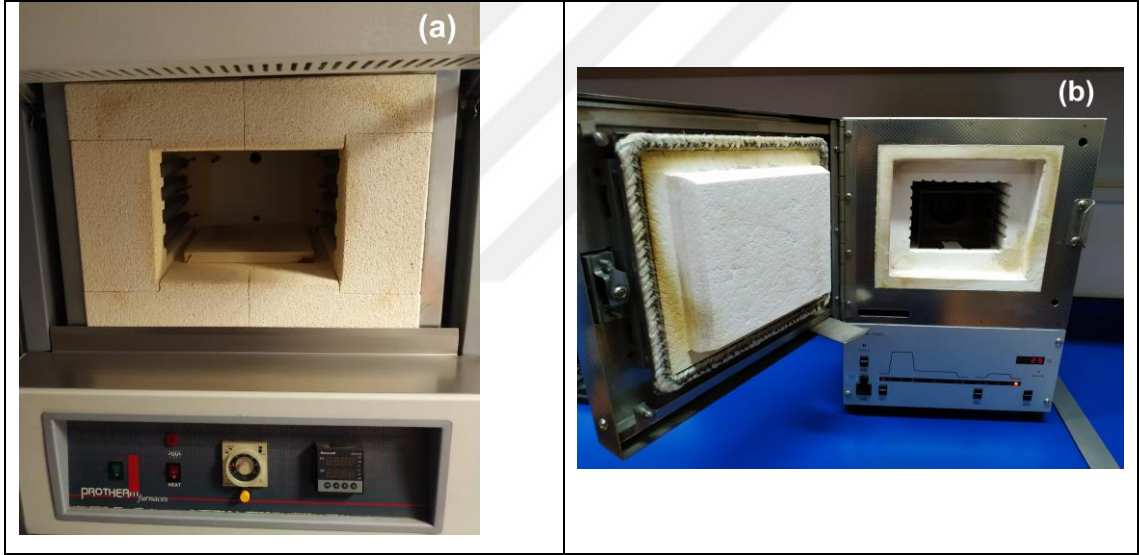
Çizelge 3.2 Harshaw 3500 ve 4500 okuyucu genel özellikleri

Özellikler	Harshaw TLD 3500	Harshaw TLD 4500
Ölçüm öncesi bekleme süresi	30 dk.	20 dk.
Kararlılık	10 doğal sayım değerinin standart sapması 1 μ Gy’den daha iyi	10 doğal sayım değerinin standart sapması <1 μ Gy
Okuma süresi (Standart TLD-100 için)	35 sn.	35 sn.
Elektrik gücü	220/240V AC \pm 10%, 50Hz	220/240 VAC \pm 10%, 50Hz.
İşletim sıcaklığı	15° ile 40°C	15° ile 40°C
Lineerlik	%1’den daha iyi	%1’den daha iyi
Maksimum sıcaklık	400°C	600°C
Isıtma hızı	1 ile 50 °C/s	1 ile 50 °C/s

3.1.4 Tavlama üniteleri

a) Protherm PFL 110/6 kül fırını genel özellikleri

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Retrospektif dozimetri laboratuvarında bulunan Kül fırını, ısı işlemlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan bir cihazdır. Bu cihaz, darbelere karşı dayanıklı tuğla tasarımı, kolay kullanıcı ara yüzü, kontrol cihazı seçeneği, hızlı ısınma süresi, homojen ısı dağılımı, özel üretim alüminyum oksitten yapılan taban koruma plakası gibi özelliklere sahiptir. Fırının güç değeri: 2 kW, iç hacmi 6.3 litre, cihazın ulaştığı maksimum sıcaklık 1100 °C olup bu sıcaklığa gelmesi için geçen süre 45 dakikadır (Şekil 3.6a). Kül fırını BeO dozimetrelerin tavlama aşamasında kullanılmıştır.

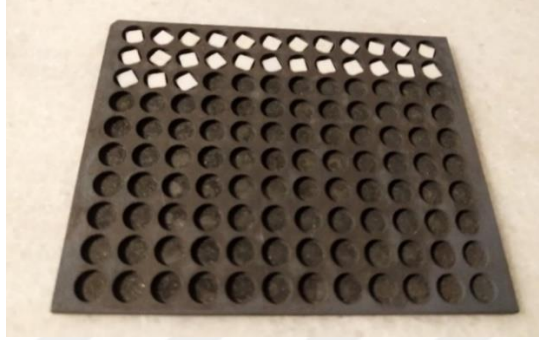


Şekil 3.6 a) Protherm Kül fırını, b) PTW Freiburg TLDO Fırın

b) PTW Freiburg TLDO Oven fırın genel özellikleri

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü bireysel dozimetri laboratuvarında bulunan PTW Freiburg TLDO Oven marka fırın dozimetrelerin tavlama ve ön ısıtma işlemlerinde kullanılmaktadır (Şekil 3.6b). Cihaz yazılımında bulunan Theldo bilgisayar programı aracılığı ile istenilen sıcaklık değerine ayarlanabildiği gibi TLD-100 için ön ısıtma ve tavlama içeren standart iki program bulunmaktadır. Cihazın ulaştığı

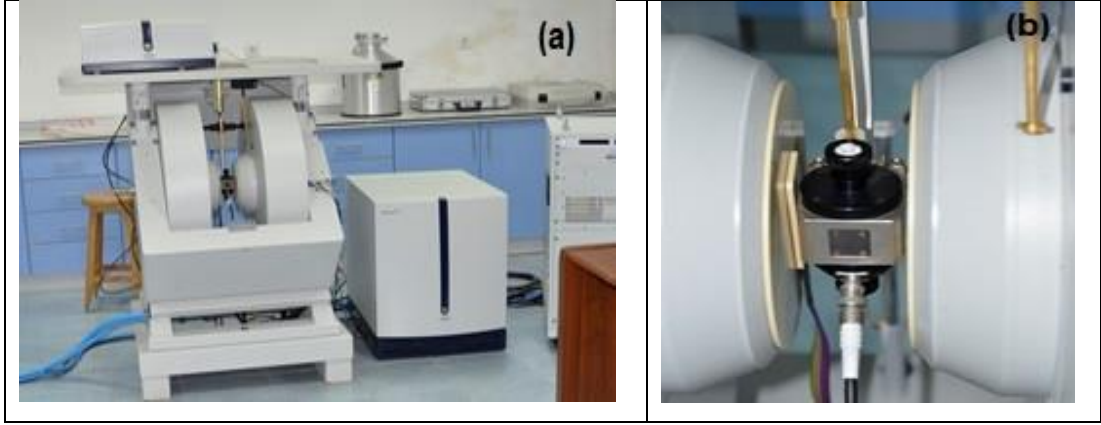
maksimum sıcaklık: 400°C; iç kısmında bulunan raflar paslanmaz çelik ve yalıtım malzemesi olarak seramik elyaf malzeme içermektedir (Anonymous 1998). Dozimetrelerin tavlama işlemleri dozimetreler için özel olarak tasarlanan toplam 120 dozimetre alabilen çelik tablalarla ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). TLDO fırın, TLD-100 dozimetrelerin tavlama ve ön ısıtması aşamalarında kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Dozimetrelerin tavlama ve saklanması için kullanılan çelik tabla

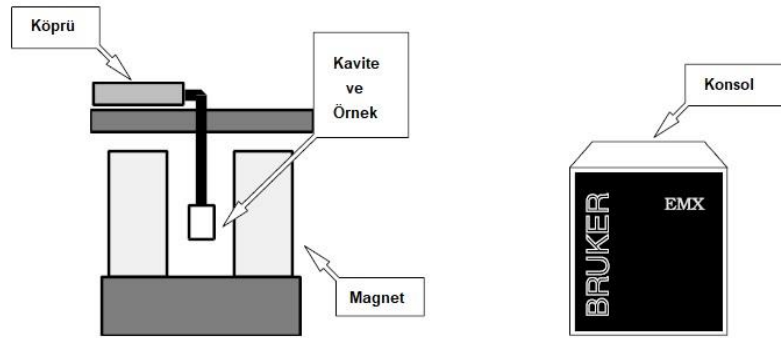
3.1.5 Bruker EMX ESR spektroskopisi

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Elektron Spin Rezonans (ESR) laboratuvarında bulunan Bruker EMX ESR spektrometre, 9.1-9.9 GHz frekans aralığında X banda karşı gelen incelenecek olan materyalin koyulduğu bir kavite, mikrodalga kaynağının ve dedektörünün bulunduğu mikrodalga köprüsü, magnetler ve bir güç kaynağından oluşur (Şekil 3.8a,b). ESR cihazı ile oda sıcaklığı ya da sıvı azot sıcaklığında ölçüm alınabilmektedir. Kristal yapıdaki katı, sıvı ve gaz malzemeler ile ölçüm alınabilmektedir. Kavite içine yerleştirilen kuvars tüplere (3 mm iç çap, 150 mm uzunluk ve duvar kalınlığı yaklaşık 0.1 mm) koyulan örnekler aracılığı ile ölçümler gerçekleştirilmektedir (Weber vd. 1998).



Şekil 3.8 a) X-Band Bruker ESR spektrometre, b) Kavite

ESR spektrometresinin bileşenleri Şekil 3.9’da verilmiştir. Sistem, mikrodalga köprüsü, kavite, magnet ve konsoldan oluşmaktadır. Mikrodalga köprüsü içinde mikrodalga kaynağı ve dedektör bulunmaktadır. Mikrodalga kavite, silindirik ya da dikdörtgen biçiminde örnekten çıkan zayıf sinyalleri yükseltmek ve rezonansa getirmek için gerekli metal bir kutudur. Konsol ünitesi ise sinyal işleme ve elektronik kontrolünün yapıldığı ünedir. Sistemde manyetik alan, güç kaynağı tarafından verilen akım sayesinde magnetlerde oluşturulur. Manyetik alan değeri, magnetler arasında yerleştirilen Hall probu aracılığı ile ölçülür (Weber vd. 1998).



Şekil 3.9 ESR spektrometresinin bileşenleri

3.1.6 GE Healthcare Alpha RT mamografi cihazı

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Mamografi laboratuvarında bulunan GE Healthcare Alpha RT MGF-101 mamografi cihazı, X ışın tüpü, anot malzemesi, uygun filtreler, memenin sıkıştırılmasını sağlayan destek ve detektörden oluşmaktadır. Mamografi cihazı, düşük enerjili X ışınlarının dokuda soğurulması sayesinde meme görüntüsü elde ederek erken aşamada meme kanserinin teşhisinde kullanılan cihazdır. Bu cihaz, molibdenyum anot filtresi ile molibdenyum (0.03 mm) ve rodyum (0.025 mm) olmak üzere iki farklı filtre kombinasyonuna sahiptir. Çalışma gerilim değeri, 20-35 kV, \pm 1.5 kV aralığındadır. Akım değeri olarak 0.03 mm odakta verdiği değer, 2-500 mAs aralığında, maksimum mA değeri; odak 0.3 mm'de 150mA iken, odak 0.1 mm'de 45 mA'dir. Ölçüm süresi ise; odak 0.3 mm'de 0.05s-5s iken, odak 0.1 mm'de 0.05s-10s'dir (Anonymous 2007). Şekil 3.10'da Alpha RT MGF-101 mamografi cihazı görülmektedir.



Şekil 3.10 GE Healthcare Alpha RT mamografi cihazı

3.1.6.1 Polimetil metakrilat (PMMA) fantomlar

Fantomlar, doku eşdeğeri kabul edilen malzemelerden yapılarak insan vücudunun radyasyona karşı verdiği tepkinin benzerini vermesi sayesinde insan vücudunda

radasyon dozunu ölçmenin zor olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Şekil 3.11’de mamografi sisteminde meme dokusunu simüle eden 3 farklı kalınlıklarda (0.5cm, 1cm, 2cm) Polimetil metakrilat (PMMA) fantomlar görülmektedir. Bu çalışmada PMMA fantomlar, yüzey giriş dozlarının (ESD) belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Meme eşdeğeri PMMA (polimetilakrilat) fantomlar

3.1.6.2 10X6-6M mamografi sistemi için kullanılan iyon odası

İyon odaları kalibrasyon çalışmalarında ya da kalite kontrol amaçlı testlerde hava kerma değerlerini ölçmek için kullanılmaktadır. Mamografi sistemlerinde paralel plakalı özel olarak tasarlanmış iyon odaları kullanılmaktadır.



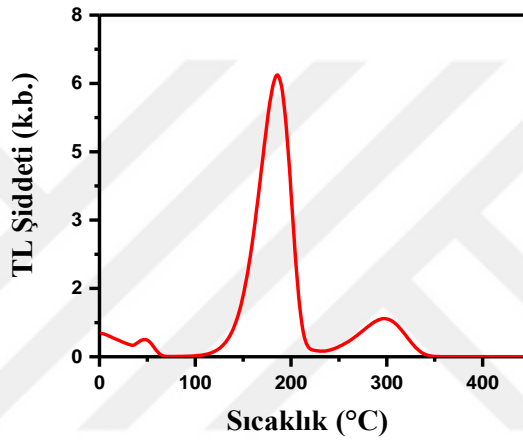
Şekil 3.12 10X6-6M Radcal iyon odası (<http://radcal.com/10x6-6m-mammography-ion-chamber>, 2019)

Şekil 3.12’de mamografi için kullanılan 10X6-6M iyon odası ve ölçüm cihazı görülmektedir. 10X6-6M iyon odası, doz hızı, 2 $\mu\text{R/s}$ - 10 R/s (20 nGy/s - 88 mGy/s); poz (exposure) değeri: 10 μR - 59 kR (100 nGy - 516 Gy), enerji bağımlılığı ise 10 keV ile 40 keV arasında $\pm 5\%$ ve metalize polyester pencereye sahiptir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Thermalox 995 BeO Dozimetresi Termal Sönümlenme Çalışması

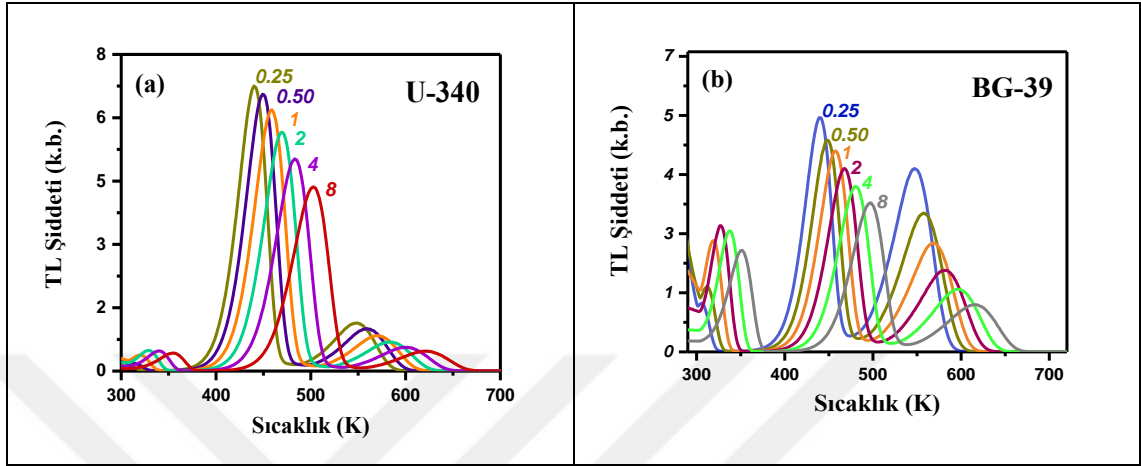
Thermalox 995 BeO dozimetrelerin $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 'lik ısıtma hızında 600°C 'ye ısıtılması sonucunda elde edilen TL ışınma eğrisi Şekil 4.1'de verilmiştir. Buna göre BeO dozimetresi $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ısıtma hızında 49, 187 ve 298°C sıcaklıklarında olmak üzere üç ayrık TL pikinden oluşmaktadır (Aslar vd. 2017b). TL ışınma eğrisinde görülen 2. pik ($\sim 187^{\circ}\text{C}$) dozimetrik pik olarak kabul edilmektedir (Bulur ve Göksu 1988).



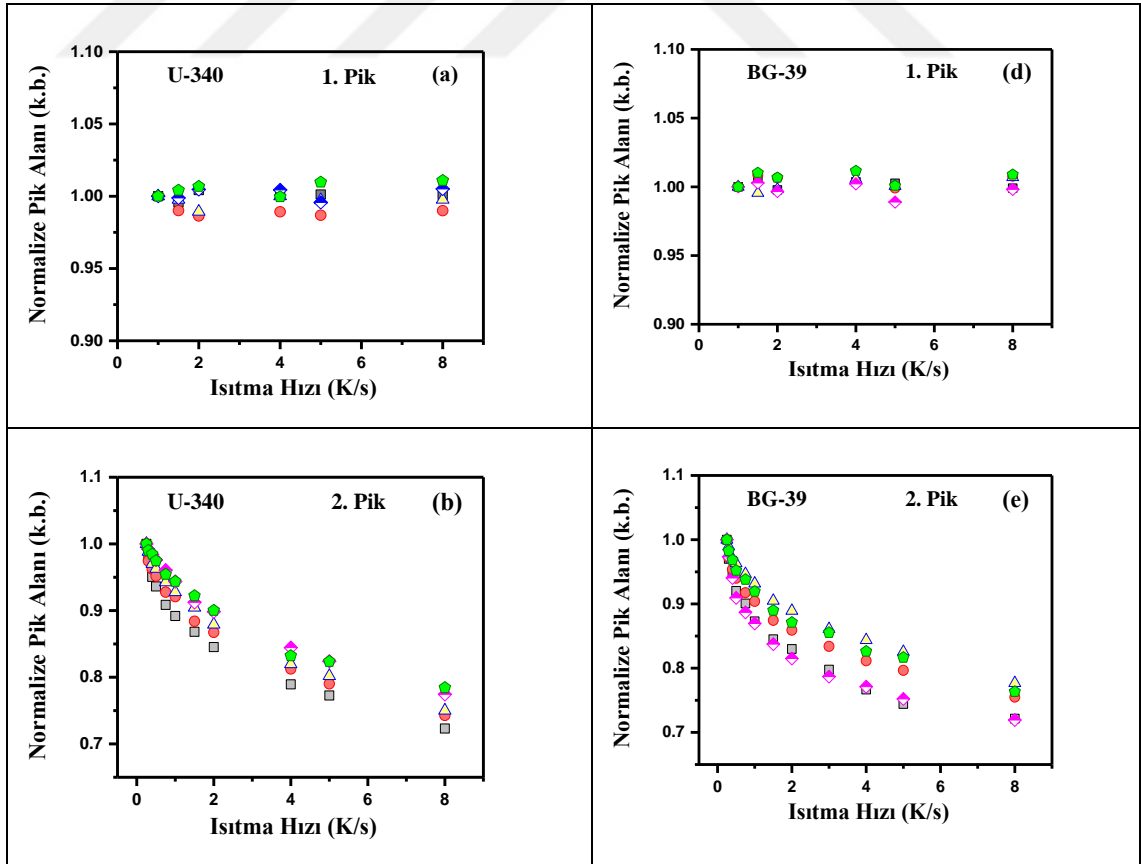
Şekil 4.1 Thermalox 995 BeO TL ışınma eğrisi

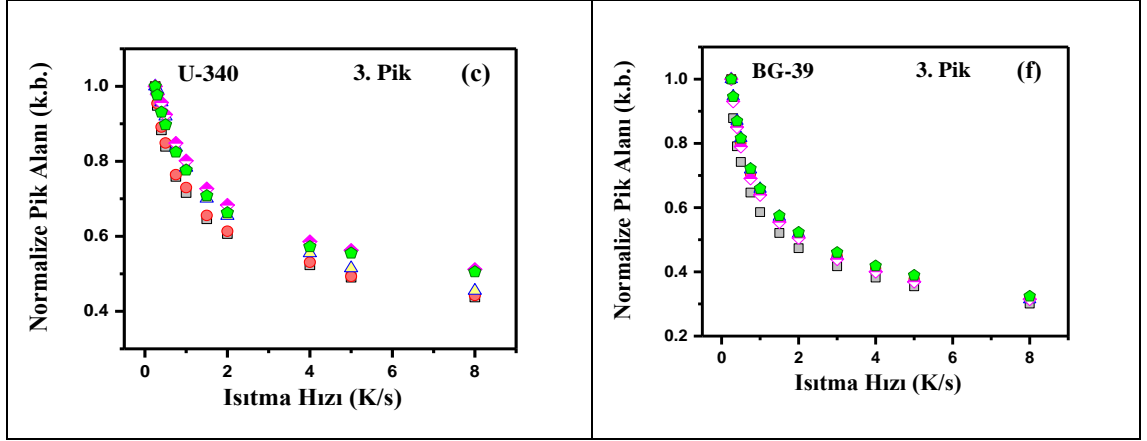
Thermalox 995 BeO dozimetresi için W ve C parametrelerinin belirlenmesi için Bölüm 2.8'de verilen altı adım uygulanmıştır. W ve C parametresi belirlenmeden önce dozimetredeki termal sönümlenmenin varlığı, tekrarlanabilirliği olan beş dozimetre kullanılarak aynı doz değerinde (3.25 Gy) farklı ısıtma hızlarında (0.25 ile 8 K/s) elde edilen ışınma eğrilerinin incelenmesi ile araştırılmıştır. Bu işlem Risø TL/OSL okuyucuda iki farklı filtre (Hoya U340 ve BG-39) kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.2'de 0.25, 0.50, 1, 2, 4 ve 8 K/s ısıtma hızları sonucunda elde edilen (iki farklı filtre için) TL ışınma eğrileri verilmiştir. Şekle göre artan ısıtma hızlarına göre TL ışınma eğrileri daha yüksek sıcaklıklara doğru kaymalar göstermiş ve piklerin şiddet değerleri her iki filtre konfigürasyonunda azalım göstermiştir. Ancak, sığ TL pik olan 1. pikte her iki filtre konfigürasyonunda alan değerleri değişmemiştir. Bu yüzden 1. pikte termal sönümlenme olayı gözlemlenmemiştir. Şekil 4.2a incelendiğinde 2. pikin U-340 filtresindeki

maksimum şiddet değeri, BG-39 filtresindeki göre daha fazladır. Diğer taraftan, 3. pikin BG-39 filtresindeki maksimum şiddet değeri 2. pikin U-340 filtresindeki değerine çok yakındır (Şekil 4.2b).



Şekil 4.2 Farklı ısıtma hızlarının TL ışımaya eğrisi üzerindeki etkisi a) U-340 filtre; b) BG-39 filtre





Şekil 4.3 Normalize pik alanlarının ısıtma hızlarına göre değişimi, a-c: Hoya U-340 filtresi; d-f: BG-39 filtresi; a-d: 1.pik; b-e: 2.pik; c-f: 3.pik

Denklem 2.64 yardımıyla en düşük ısıtma hızına karşı gelen (0.25 K/s) pik alan şiddet değeri üzerinden 0.25-8 K/s arasındaki ısıtma hızlarında elde edilen pik alanlarının değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir. Burada, 0.25 K/s ısıtma hızına karşı gelen şiddet değerinin termal sönümlenme etkisinin olmadığı varsayılarak diğer tüm değerler bu değere normalize edilerek verilmiştir. Şekil 4.3'de (a-c); Hoya U-340 filtresine göre, (d-f) BG-39 filtresine göre elde edilen grafikleri göstermektedir. Burada, a ve b grafikleri 1. pike; c ve d grafikleri 2. pike; e ve f grafikleri ise 3. pike aittir.

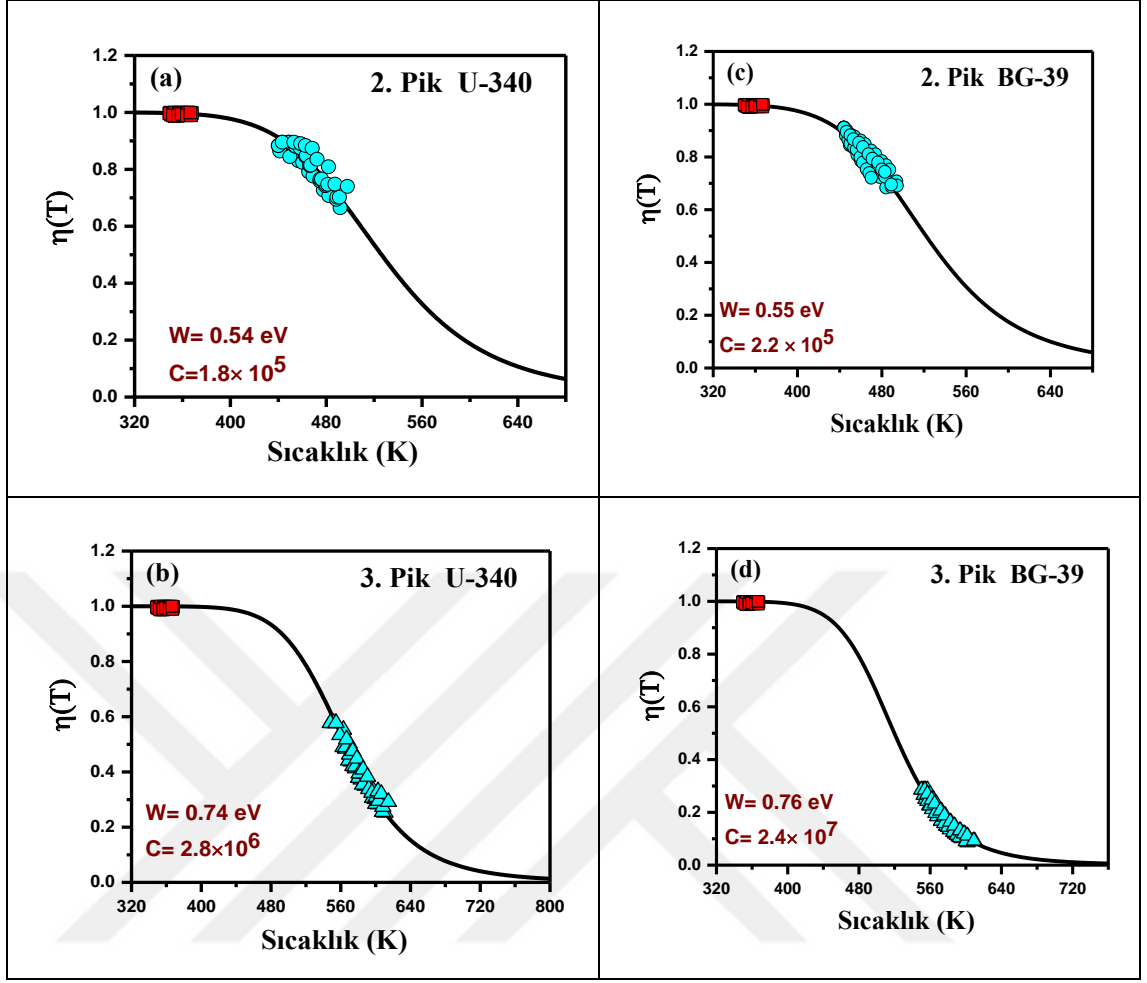
Şekil 4.3 incelendiğinde 1. pikte pik alan değerinin artan ısıtma hızı ile değişmediği gözlemlenmiştir. Bu durum her iki filtre konfigürasyonu için de geçerlidir. Ancak 2. ve 3. pikler için her iki filtre durumunda artan ısıtma hızları ile alan değerleri düşmektedir. Bunun sonucu olarak her iki pikin de termal sönümlenme olayından etkilendiği görülmüştür. Şekil 4.3b ve c grafiklerine göre ısıtma hızı 0.25'den 8°C/s ye yükseldiğinde ikinci pikin şiddet değerinin %25 oranında, 3. pik için ise %50 oranında bir düşüş meydana geldiği görülmüştür. Artan ısıtma hızı ile 3. pikin şiddet değerinin 2. pikinden daha hızlı bozunmakta olduğu ve 3. pikin termal sönümlenme etkisinin en fazla BG-39 filtresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçta, iki pik birbirlerinden farklı termal sönümlenme verimine sahiptir ve 3. pik için termal sönümlenme etkisi daha fazladır. Şekil 4.3f'ye göre, 8 K/ s ısıtma hızı ile kıyaslandığında tüm sinyal değeri 2,5 kat azalmaktadır. Bu azalma sebebiyle Şekil 4.3, termal sönümlenme parametrelerinin

belirlenmesi için 3. adımda yer alan f , sabitinin seçiminin gerekli olduğunu göstermektedir.

Termal sönümleme parametrelerinin (W ve C) belirlenmesi

Dekonvolüsyon sonuçlarına göre, farklı ısıtma hızları için (0.25 ile 8 K/s) maksimum sıcaklık değerindeki (T_m^d) kayma, 2. pik için 50 K iken 3. pik için 57 K elde edilmiştir. Bu sıcaklık bölgesi verim eğrisinin tüm bölgesini kapsamaz. Ayrıca, her bir pik için dar sıcaklık bölgesinde, verim değerleri ($\eta(T)$) küçük değerler aralığında yer alır. Bu dar sıcaklık bölgesinde fit edilmesi sonucunda özellikle W ve C değerlerinin beklenen daha büyük belirlenmesine yol açacaktır. Böyle bir durum, CaCO_3 için Kalita ve Wary (2015) tarafından rapor edilmiştir. Bu gibi durumlarda, Denklem (2.62)'nin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Her iki filtre konfigürasyonlarında ilk pik termal sönümlemeye uğramadığından, ilk pikin termal sönümleme verimi kararlı olarak kabul edilebilir ve bu sıcaklık aralığında verim değeri 1'e eşit olarak alınabilir. Denklem 2.64'den görülebileceği gibi her iki pik (2. ve 3. pik) için ilgilenilen sıcaklık bölgesindeki verim değerinin 1'den küçük olması nedeniyle f parametresinin önemi büyüktür. f değeri yalnızca 2 ve 3. pikler için değişim gösterirken 1. pik için f değeri 1'e eşittir.

Denklem (2.62) aracılığı ile tekrarlanabilirliği olan 5 örnek üzerinden, 1.pikin deneysel verileri fit işlemine dahil edilerek her bir filtre kombinasyonunda, fit işlemleri tüm 5 örneğin deneysel verilerini içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Fit işlemi sırasında, Denklem (2.60)'da, 2. pikin oda sıcaklığından 480 K, 3. pik için 630K'ya kadar geniş bir sıcaklık bölgesini kaplayarak toplamda yaklaşık 80 deneysel verim değeri, $\eta(T)$ elde edilmiştir. Şekil 4.4'de her iki TL piki için örnek fit işlemi ve bu fit işlemi sonucunda elde edilen örnek W ve C değerleri gösterilmiştir. Grafikteki geometrik şekiller, deneysel verileri; sürekli eğri ise $\eta(T)$ verim ifadesini göstermektedir. Şekil 4.4 (a-b), Hoya U-340 filtresinde 2. pik için $W=0.54$ eV ve $C=1.8 \times 10^5$ ($FOM_{2.62}=2.9\%$), 3. pik için $W=0.74$ eV ve $C=2.8 \times 10^6$ ($FOM_{2.62}=3.6\%$)'e karşılık gelmektedir. BG-39 filtresinde 2. pik için $W=0.55$ eV ve $C=2.2 \times 10^5$ ($FOM_{2.62}=3.1\%$); 3. pik için $W=0.76$ eV ve $C=2.4 \times 10^7$ ($FOM_{2.62}=4.6\%$) eşit bulunmuştur.



Şekil 4.4 Fit işlemi sonucunda elde edilen örnek W ve C parametreleri için 2. ve 3. pike ait verim eğrileri; (a-b) ve (c-d) U-340 ve BG-39 filtresi durumunda, (a-c); 2. pik ve (b- d) ise 3. pike ait verileri; sürekli eğri $\eta(T)$ içim fit eğrilerini; kare ve üçgen geometrik şekiller ise deneysel verileri göstermektedir

TL piklerinin yeniden yapılandırılması (rekonstrüksiyon işlemi) ve sönümlenmemiş TL ışımaya eğrilerinin dekonvolüsyonu

Yeniden yapılandırma (rekonstrüksiyon) işlemi Bölüm 2.8'de V. Adımda verilen Denklem (2.63) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rekonstrüksiyon (yeniden yapılandırma) işlemi ile sönüme uğramamış TL ışımaya eğrisi elde edilmiştir. Verim eğrisi $\eta(T)$, elde edilen tüm W ve C değerleri için, tüm sıcaklık bölgesi boyunca oda sıcaklığı ile 600°C arasında değerlendirilmiştir. Daha önce Bölüm 2.8'de açıklandığı gibi üç kriteri sağlayan $FOM_{2,62}$, FOM_{uq} ve σA_{uq} W ve C değerleri kabul edilerek Çizelge 4.1'de verilmiştir.

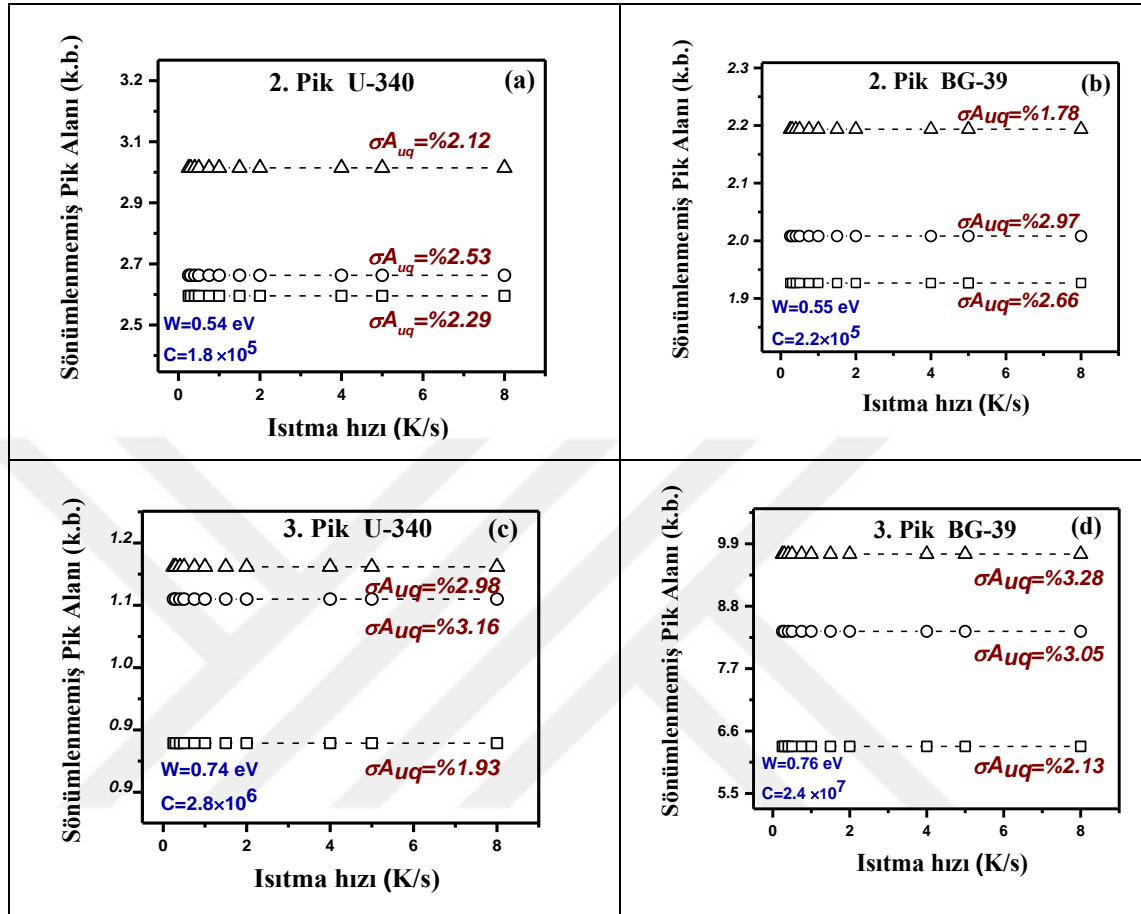
Çizelge 4.1. 2. ve 3. pik için elde edilen termal sönümlenme parametreleri (W ve C)

Filtre	2. pik		3.pik		$FOM_{2.62}$
	$W(eV)$	C	$W(eV)$	C	
$U-340$	0.54 - 0.66	$1.8 \times 10^5 - 2.4 \times 10^6$	0.74 - 0.86	$2.8 \times 10^6 - 2.1 \times 10^7$	%2.9-%3.6 (2.pik)
$BG-39$	0.55 - 0.66	$2.2 \times 10^5 - 2.6 \times 10^6$	0.76 - 0.88	$2.4 \times 10^7 - 1.2 \times 10^8$	%3.1-%4.6 (3.pik)

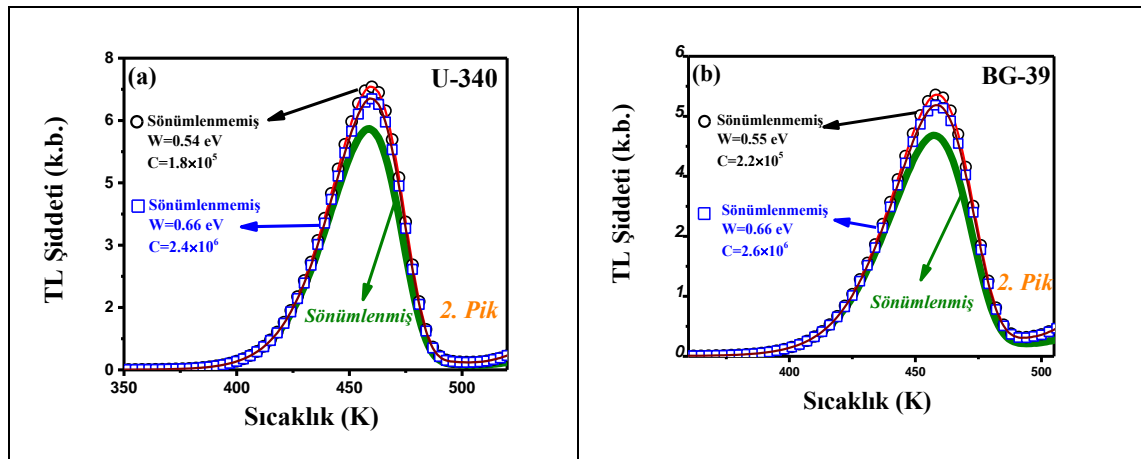
Çizelge 4.1’de görüleceği gibi her TL piki için tek bir termal sönümlenme parametreleri (W ve C) yerine, tüm kriterleri sağlayan W ve C değerleri bir aralık içinde verilmiştir. Bulunan hata ise, W için 0.07 eV, C için ise 5×10^4 ’dür. Şekil 4.5 yeniden yapılandırılmış 2. ve 3. pikler için ışıma eğrisi altında kalan pik alan değerlerinin ısıtma hızı ile değişimini göstermektedir. Şekildeki integral değerleri (A_{uq}), yeniden yapılandırma sonucunda elde edilen ışıma eğrilerinin Denklem (2.49)’a göre dekonvolüsyonu sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4.5’deki sönümlenmemiş veriler, minimum ve maksimum pik alanlarını gösteren üç BeO dozimetresi için verilmiştir.

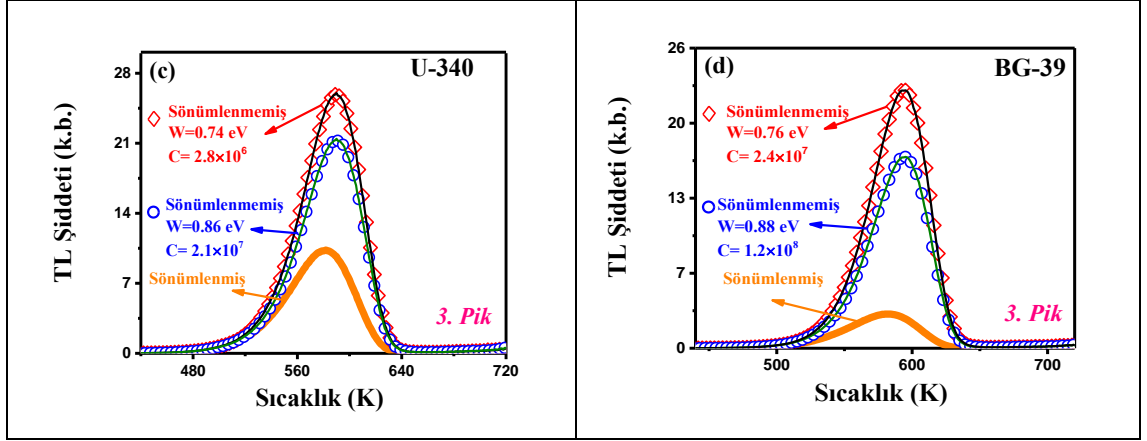
Termal sönümlenme olayının etkisinin temel olarak deneysel doğrulaması, artan ısıtma hızlarında elde edilen alan değerlerinin azalması olduğundan, yeniden yapılandırma işleminin doğruluğu temel olarak her pik için tüm ısıtma hızları üzerinden yeniden yapılandırılmış alan değerleri üzerindeki küçük bir standart sapma ile verilmesine bağlıdır. Her iki filtre konfigürasyonunda her örnek için pik alan değerlerinin standart sapma değerleri (σA_{uq}) %4’ten azdır ve bu değerler W ve C parametrelerinin kabul edilebilir bölgelerde bulunduğunu göstermiştir. Her iki filtre konfigürasyonunda 2. ve 3. pike karşılık gelen aralıklar içindeki kabul edilen W ve C değerlerine göre elde edilen TL ışıma eğrilerinin rekonstrüksiyonu işlemi sonucunda elde edilen TL ışıma eğrileri Şekil 4.6’da verilmiştir. Sönümlenmiş TL eğrisi, sürekli çizgi ile gösterilirken, rekonstrüksiyon edilmiş TL pikleri, kare ve yuvarlaklar ile gösterilmiştir. Rekonstrüksiyon edilmiş TL piklerinin dekonvolüsyonuna karşı gelen eğri, noktalardan (kare) geçen sürekli çizgi olarak verilmiştir. Rekonstrüksiyonu işlemi her iki pik için her iki filtre konfigürasyonunda Çizelge 4.1’de verilen minimum ve maksimum iki W , C seti kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sönümlenmemiş TL ışıma eğrileri Denklem

(2.49) aracılığı ile dekonvole edilmiştir. Dekonvolüsyon sonucunda elde edilen FOM değerleri %1.1 altındadır.



Şekil 4.5 Thermalox 995 BeO dozimetre için 2. ve 3. pikin sönmülmemiş TL sinyallerinin farklı ısıtma hızlarına göre integral değerlerinin sapması (σ_{Auq}). Kesikli çizgiler, her örnek için iki bütünleşik değer ortalamasını temsil eder. Üç farklı geometrik şekil, 3 farklı BeO dozimetresine aittir.





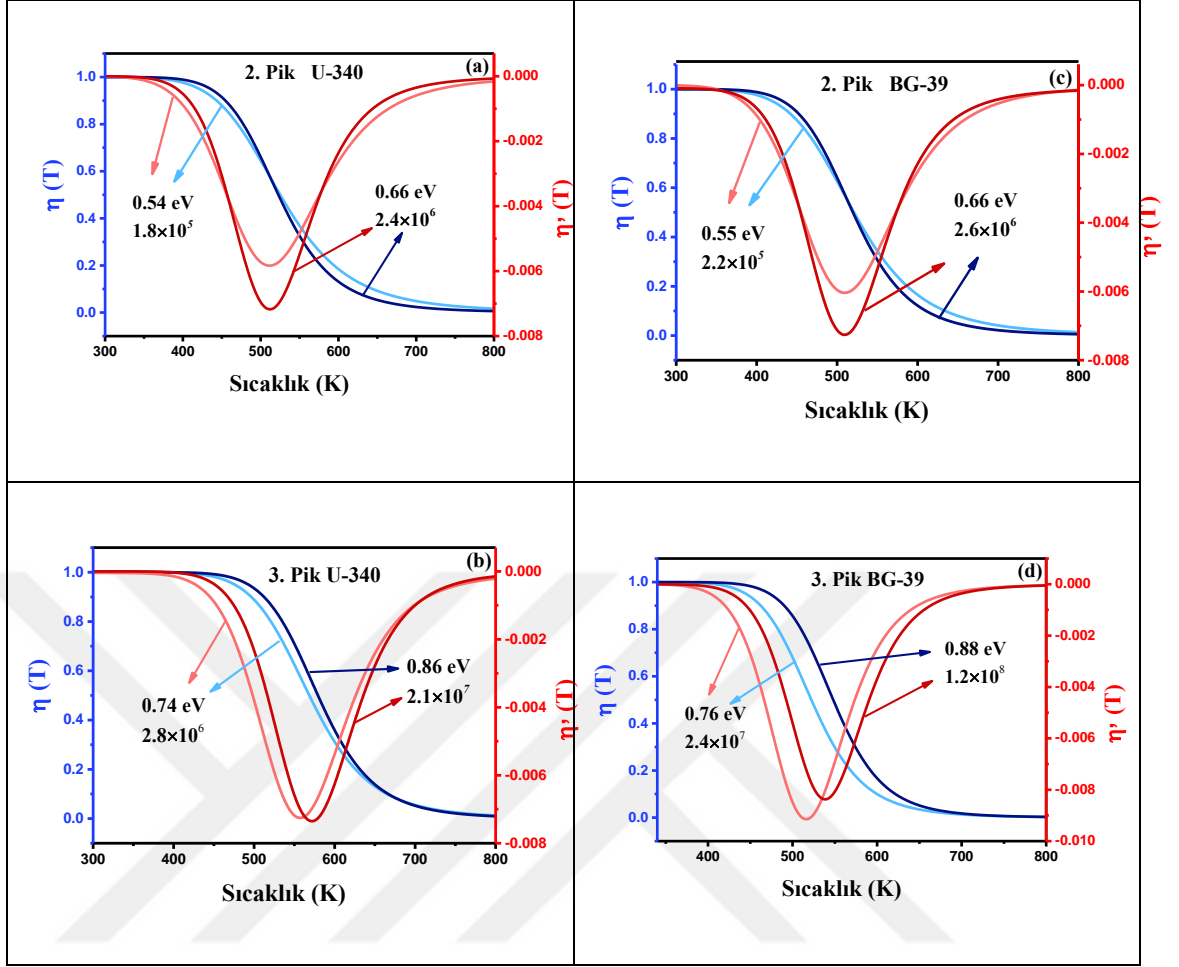
Şekil 4.6 Her iki filtre konfigürasyonunda 2. ve 3. pik için kabul edilen aralıktaki W ve C değerlerine ait TL ışınma eğrisi yeniden yapılandırma (rekonstrüksiyon) örnekleri. (a-c): U340, (b-d):BG-39 filtresine ait ölçüm sonuçlarını, (a-b):2. pik, (c-d): 3. pike ait verileri göstermektedir.

Çizelge 4.1’de her bir TL pikinin termal sönümlenme etkisi, dar bir aralık içinde değişen farklı bir termal söndürme parametresi seti (W ve C) ile tanımlanmaktadır. Elde edilen bu değerler 2 ve 3. pik için birbirlerinden farklıdır. Bu durum her iki filtre için de geçerlidir. Bu deneysel özellik, her iki pikin farklı rekombinasyon merkezleri aracılığı ile lüminesans verdiği ile ilgili ciddi bir kanıt göstermiştir. 2. pik için elde edilen W ve C parametreleri, iki filtre konfigürasyonunda aynı elde edilmiştir. Bu durumda 3. pikin W parametresi için de geçerlidir. Ancak, 3. pik için elde edilen C parametresi, BG-39 filtresi için U 340 filtresinde elde edilen değerden bir merteye daha büyüktür. Bu durum, BG-39 filtresinde 3. pikin termal sönümlenme etkisinin daha fazla olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu çalışmada 2. pik için elde edilen W parametresi, filtreden bağımsız olarak 0.55-0.66 eV aralığındadır. Literatürde, Bulur ve Göksu (1998) tarafından 0.52 eV, Bulur ve Yeltik (2010) tarafından 0.55-0.59 eV, Yukihara (2011) tarafından 0.56 eV, Bulur ve Saraç (2013) tarafından 0.56-0.59 eV olarak bulunmuştur. Bahsedilen bu çalışmalarda elde edilen W parametresi, BeO’in OSL analizleri kullanılarak bulunmuştur. Bu çalışmada bulunan W parametresi ise TL ölçümleri kullanılarak hesaplanmış ve bunun sonucunda 2. pik için elde W parametresinin yukarıda bahsedilen çalışmalarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. OSL eğrisi ve 2. TL pikinin analizi sonucunda elde edilen W parametresinin birbirleri ile uyumlu olması, OSL sinyalinin 2. TL piki ile ilişkili

olabileceğini göstermektedir. Bunun yanı sıra Coşkun (2019) tarafından yapılan çalışmada Eşitlik 2.62'deki f parametresi kullanılmadan, TL ışımaya eğrileri yardımıyla W ve C değerleri hesaplanmıştır. Bunun sonucunda, W ve C değerleri sırasıyla 2. pik için 0.61 eV ve 1.50×10^6 , 3. pik için ise 0,84eV ve 8.10×10^6 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Çizelge 4.1 ile kıyaslandığında verilen sınırlar içerisinde olup bu çalışma ile uyumludur. 3. pik için elde edilen termal sönümlenme parametreleri, 2. pikle kıyaslandığında önemli derecede büyüktür. Her iki pik içinde elde edilen değerler kuartz ve $Al_2O_3:C$ ile karşılaştırılabilir niteliktedir.

Termal sönümlenme çalışması sonucunda elde edilen W parametresi dar bir aralıkta değişim gösterirken, C parametresi her pik için en az bir merteye farklılık gösterecek şekilde daha geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. C parametresi Pagonis vd. (2010)'a göre ışımaz geçiş olasılığının (A_{NR}) ışımalı geçiş olasılığına (A_R) oranı olarak tanımlanan boyutsuz sabittir. A_{NR} , Boltzman faktörü ile tarif edilen sıcaklığa bağımlı bir nicelikken, A_R , sıcaklıktan bağımsızdır. C , parametresi tek başına A_{NR} ve A_R faktörleri hakkında bir bilgi sağlamamaktadır. Şekil 4.7'de minimum ve maksimum W ve C ikilisi kullanılarak termal sönümlenme verimi ve onun türevi her iki pik ve her iki filtre konfigürasyonu için elde edilmiştir. Dallas vd. (2008) ve Subedi vd. (2011)'e göre, C parametresi, termal sönümlenme veriminin belirlenmesi için en önemli parametredir. Bu yüzden her pik için elde edilen C parametresinin geniş bir aralıkta yer alması, termal sönümlenme eğrilerinin birbirlerinden önemli ölçüde farklılık yaratması beklenir. Ancak, Şekil 4.7'de C geniş bir aralıkta yer almasına karşın, her pik ve her filtre konfigürasyonu için minimum ve maksimum W ve C değerleri için elde edilen verim eğrileri, özellikle piklerin meydana geldiği sıcaklık bölgelerinde birbirlerinden farklılık göstermemişlerdir (Şekil 4.7'a-c). Yalnızca 3. pik için BG-39 filtresinde termal verim eğrisi birbirlerinden önemli bir değişim göstermektedir. Fakat bu değişim ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu durum Şekil 4.6'da 2. pik için minimum ve maksimum W ve C değerlerine göre yeniden yapılandırılmış TL ışımaya eğrilerinin birbirlerinden farklı olmadığını göstermiştir. Bu durum aynı zamanda Hoya U-340 filtresindeki 3. pik için de geçerlidir.



Şekil 4.7 2.ve 3. pik için termal sönüm verim eğrilerinin kendisi ve birinci türevi; (a-b) U-340 ve (c-d) BG-39 filtresi durumunda elde edilen verileri göstermektedir. (a-c) 2. pik; (b-d) 3. pik için elde edilen verilere karşı gelmektedir. pikler için elde edilen minimum ve maksimum W ve C parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Açık ve koyu mavi renkteki verim eğrisinin kendisini; açık ve koyu kırmızı renkteki eğri, verim eğrisinin birinci türevini göstermektedir.

Termal sönümlenmenin TL pikleri üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için Denklem 2.59'da verilen eşitlik ile incelenmiştir. 2. ve 3. piklerin artan ısıtma hızı karşısındaki sıcaklık kayması U-340 filtresi için 50 K ve BG-39 filtresi için 57 K'dir. Çizelge 4.1 de verilen her bir termal sönümlenme parametresi için 2. pik $0.54 < \eta(T) < 1$ bölgesinde, 3. pik için ise $\eta(T) < 0.54$ bölgesindedir. Bu durum tüm W ve C değerler için geçerlidir. $\eta(T) < 0.54$ olduğu bölgelerde termal sönümlenmenin daha baskın ve sıcaklık kaymalarının daha fazla olduğu bilinmektedir. Buna göre, 2. pikin 3. pike göre daha fazla termal sönümlenmeye uğradığı; BG-39 filtresi için termal sönümlenme veriminin 0.54

değerinden daha düşük olduğu sonucu çıkarılır. $\eta(T) < 0.54$ durumundaki sıcaklık aralığında termal sönümlenme baskın olmasından dolayı termal sönüme uğramış TL ışımaya eğrilerinde dekonvolüsyon analizi daha büyük hata vermiştir. Bu yaklaşımlar altında, 3. pik için toplam alan değeri tekrarlanabilirliğinin daha az oluşu ($\sigma_{A_{uq}}$ büyük) bu durumu açıklamaktadır. Sonuç olarak, $\eta(T)$ ve $\eta_m(T)$ özellikleri sebebiyle, toplam alan değerlerinin tekrarlanabilirliğinin az oluşu belirlenen termal sönümlenme parametrelerini değiştirmemektedir.

Yapılan bu çalışma, literatürde ilk defa iki farklı spektral emisyon dalga boyu bölgelerine sahip filtreler ile (Hoya U-340 ve BG-39) BeO için termal sönümlenme parametreleri, W ve C değerleri TL ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir. BeO dozimetreler, 0.25 ile 8 K/s ısıtma hızları kullanılarak TL eğrileri elde edilmiştir. Analiz prosedürü, termal sönüme uğramış TL ışımaya eğrilerinin dekonvolüsyonu, sıcaklık gecikmesi düzeltilmesi, termal sönümlenme parametrelerini değerlendirilmesi, rekonstrüksiyon işlemini içerir. Rekonstrüksiyon işlemi a) BeO için W, C değerlerinin fiziksel olarak seçiminin mümkün olması, b) gerçek sönümlenmemiş TL ışımaya eğrisinin elde edilmesi, c) her bir pik için TL kinetik parametrelerinin düzeltilmesini sağlamaktadır. Sönümlenmemiş şiddet ve $\eta(T)$ ifadesinin her ikisinin değerinin bilinmediği durumlarda doğrudan W ve C parametrelerinin değerlendirmek mümkün değildir. Bu sebeple, verim eğrisinin değerini daha fazla azaltmak için aritmetik f sabiti önerilmiştir. f değerinin seçimi, Denklem (2.50) sonucunda elde edilen FOM değeri ve rekonstrüksiyon işlemi sonucunda elde edilen FOM değerlerinin küçüklüğü ile sağlanmıştır. Tüm kriterleri sağlayan W ve C değerleri kabul edilmiş diğerleri kabul edilmemiştir. Ana dozimetrik pik için (2. pik) kullanılan filtreden bağımsız olarak W değeri 0.54-0.66 (± 0.07) eV ve C değeri 1.8×10^5 - 2.6×10^6 ($\pm 4 \times 10^5$) bulunmuştur. 3. pik için W değeri kullanılan filtreden bağımsız olarak 0.74-0.88 eV (± 0.07) eV ve C değeri ise Hoya U-340 için 2.8×10^6 - 2.1×10^7 ve BG-39 filtresi için 2.4×10^7 ile 1.2×10^8 ($\pm 4 \times 10^5$) bulunmuştur. Her iki pik için elde edilen W, C değerlerinin farklı olması iki pikin birbirlerinden farklı rekombinasyon merkezleri sayesinde luminesans vermesi ile ilişkili ciddi bir kanıt sunmuştur.

4.2 Thermalox 995 BeO Dozimetresi TL Kinetik Çalışması

Thermalox 995 BeO dozimetresi için TL kinetik parametreleri, aktivasyon enerjisi (E), frekans faktörü (s), kinetik merteye (b) terimleri; kesikli ışıma eğrisi tekniği (fractional glow techniques), pik şekli methodu (peak shape method), farklı ısıtma hızları yöntemi (various heating rates method), izotermal bozunum yöntemi (isothermal decay method) ve dekonvolüsyon (deconvolution) metodları aracılığı ile araştırılmıştır. Ardından, termal sönümlenme olayının TL kinetik parametreleri üzerindeki etkisinin araştırılması için Çizelge 4.1’de verilen termal sönümlenme parametreleri kullanılarak, ortalama W ve C değerleri 2. pik için, $W=0.60$ eV ve $C=1.3 \times 10^6$, 3. pik için ise $W=0.80$ eV ve $C=1.2 \times 10^7$ seçilip TL ışıma eğrileri rekonstrüksiyon yöntemi ile yenide yapılandırılmış ve böylelikle sönümlenmemiş TL ışıma eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen sönümlenmemiş TL ışıma eğrileri için sönümlenmiş TL ışıma eğrilerindeki analizlere benzer olarak kesikli ışıma eğrisi, pik şekli, farklı ısıtma hızları, izotermal bozunum ve dekonvolüsyon yöntemleri kullanılarak TL kinetik parametreleri tekrar hesaplanmıştır. Bunun sonucunda, TL kinetik parametrelerinin termal sönümlenme düzeltilmesi yapılmış ve yapılmamış sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca kullanılan tuzak parametre belirleme metodlarının da termal sönümlenme olayından etkilenme oranları araştırılmıştır.

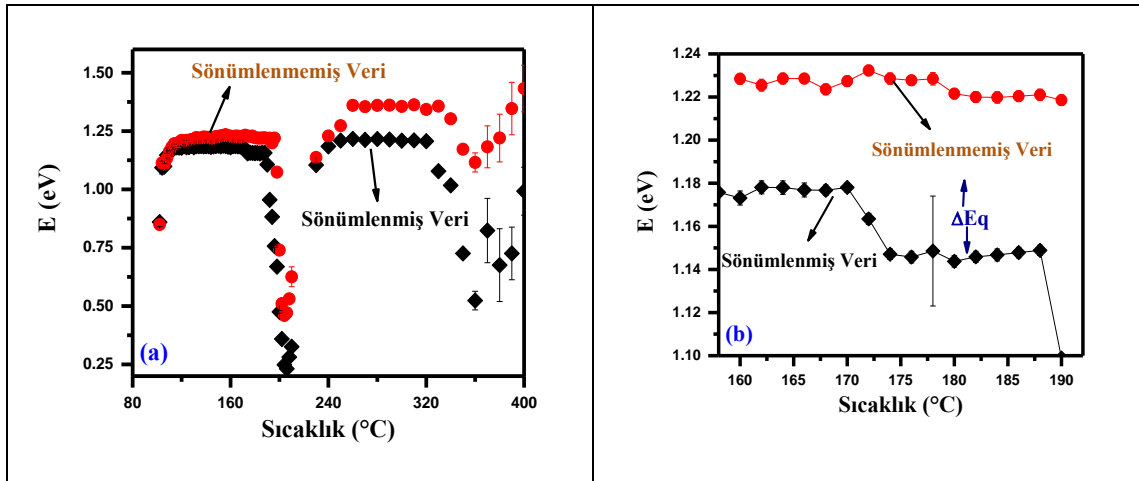
4.2.1 Kesikli ışıma eğrisi tekniği sonuçları

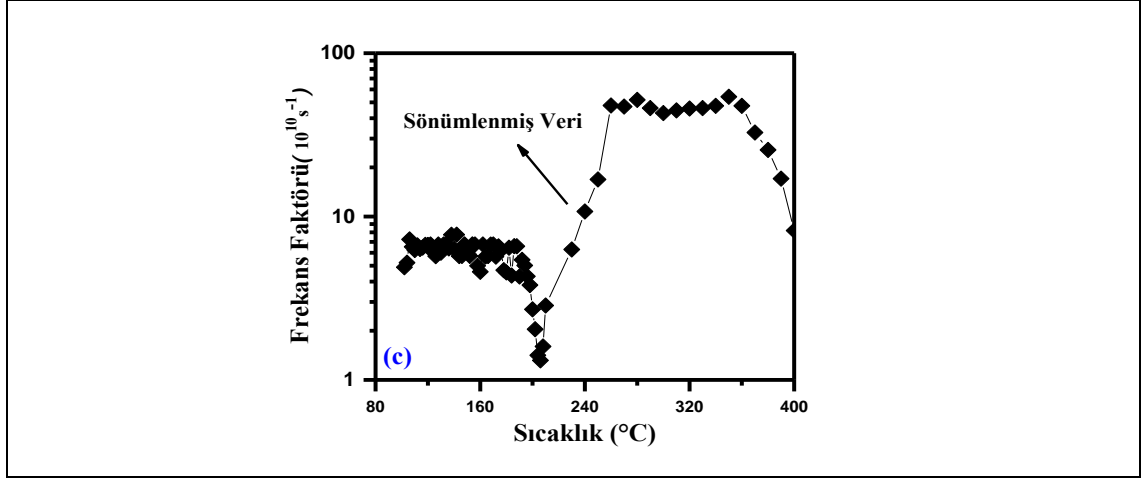
Thermalox 995 BeO dozimetreler Bölüm 2.7.4’de belirtildiği gibi kesikli ışıma eğrisi tekniği aracılığı ile aktivasyon enerjileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için, dozimetre 100 °C’den başlanarak 2. pik bölgesinde 2°C’lik sıcaklık artışları ile 3. pik bölgesinde ise 10°C’lik artışlarla 400 °C sıcaklığına kadar ısıtılarak gerçekleştirilmiştir.

Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8a’ya göre termal sönümlenmiş TL ölçümleri için (siyah kareler ile gösterilen) 2. ve 3. piklere karşı gelen iki farklı plato bölgesi elde edilmiştir. Bunlardan, 110 ve 190 °C arasında ilk plato 2. pike karşılık gelirken, 240 ve 320 °C arasındaki ikinci plato ise 3. pike karşı gelmektedir. Bu sonuçlar ışığında, elde edilen aktivasyon enerjileri, 2. pik için 1.18 ± 0.01 eV; 3. pik için ise 1.23 ± 0.02 eV bulunmuştur. Şekil 4.8b, Şekil 4.8a’nın 160 ve 190°C sıcaklıkları

arasında detaylı bir gösterimini içerir. Bu şekle göre, sönümlenmiş ölçümlerdeki analiz sonucunda, ana dozimetrik pik sıcaklık bölgesine karşı gelen bu bölgedeki iki ayrık alt platolar dozimetrik pikin karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. İkinci plato, 174 ve 188 °C arasında bulunmaktadır. Ancak, daha yüksek sıcaklıklarda oluşan, ikinci platoya göre 2. pikin aktivasyon enerjisi, ilk platoya göre elde edilen aktivasyon enerjisinden (ΔE_q) 0.024 eV kadar düşüktür.

Rekonstrüksiyon sonucunda elde edilen verilere göre (kırmızı noktalar), 2. pik için 120 ile 200 °C arasında ve 3. pik için 260 ile 340 °C arasında iki ayırt edici plato bölgesi görülmektedir (Şekil 4.8 a,b) Rekonstrüksiyon işlemi sonrasında, aktivasyon enerjileri, 2. pik için 1.23 ± 0.03 eV, 3. pik için ise 1.38 ± 0.04 eV olarak bulunmuştur. 2. pikin tuzak parametreleri termal sönümden çok az etkilenmiştir. Ayrıca, bu platoların sıcaklık aralıkları, her iki pik içinde daha yüksek bir sıcaklığa doğru kaymaktadır. Şekil 4.8b, sönümlenmiş verilerdeki sonuçların aksine, yeniden yapılandırılmış verilerde 2. pikin herhangi bir karmaşık bir yapıya sahip olması için yeterli bir kanıt olmadığını ortaya koymuştur. Sönümlenmiş verilerdeki analize dayanarak elde edilen iki alt plato bölgesi, termal sönümlenme etkisine atfedilebilecek deneysel bir hata olarak düşünülmektedir. Şekil 4.8c, her bir sıcaklık bölgelerine karşı elde edilen aktivasyon enerjisine karşı frekans faktörlerinin sıcaklıkla olan değişimini göstermektedir. Bu grafikteki değerler sönümlenmiş deney verilerine göre elde edilmiştir. Rekonstrüksiyon edilmiş frekans faktörü değerleri grafikte verilmemiştir. Kesikli ışımaya eğrisi tekniğine göre elde edilen değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.





Şekil 4.8 Kesikli ışıma eğrisi tekniği sonuçları, a) 100 ve 400°C aralığında sönümlenmiş ve yeniden yapılandırılmış verilere göre aktivasyon enerjisi plato bölgeleri; b) 150-190°C sıcaklık aralığındaki detaylı aktivasyon enerjisi-sıcaklık grafiği; c) 100 ve 400°C aralığında sönümlenmiş verilere göre frekans faktörü plato bölgeleri

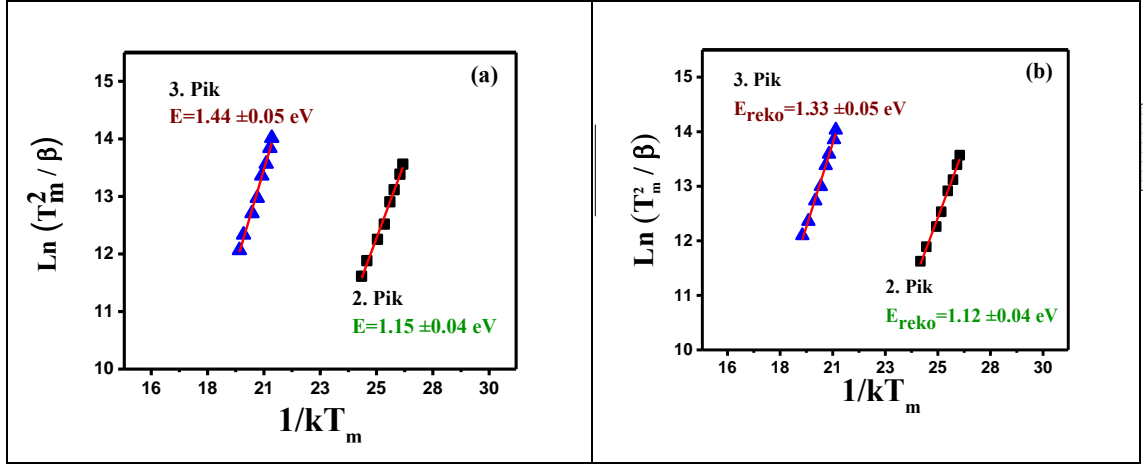
4.2.2 Pik şekli metodu sonuçları

Thermalox 995 BeO TL ışıma eğrisine göre (Şekil 4.1), simetri faktörü (μ_g), δ 'nın ω 'ya oranı ile verilir. Buna göre, 2. pik için rekonstrüksiyon işleminden önce ve sonra μ_g değeri 0.42 ± 0.01 'e eşit bulunmuştur. 3. pik için ise rekonstrüksiyon işleminden önce 0.41 ± 0.02 iken rekonstrüksiyon işleminden sonra 0.42 ± 0.01 elde edilmiştir. Bu durum her iki pikin birinci merteye kinetiğe uyduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, piklerin kinetik mertebesinin termal sönümlenmenin varlığından etkilenmediği söylenebilir. Elde edilen sonuçlar Subedi vd. (2010) tarafından rapor edilen birinci mertebeye uyan TL piklerinin termal sönümlenme olayından önemli ölçüde etkilenmediği durumuyla uyumludur. Ayrıca bu metotta da ikinci pikin ikili bir yapıdan oluştuğu gözlenmemiştir. Aktivasyon enerjileri Denklem (2.45) ve Çizelge 2.3 aracılığı ile hesaplandığında, 2. pik için; $E_\tau = 1.05 \pm 0.04$ eV, $E_\delta = 1.04 \pm 0.13$ eV ve $E_\omega = 1.05 \pm 0.07$ eV iken, 3. pik için $E_\tau = 1.13 \pm 0.04$ eV, $E_\delta = 1.15 \pm 0.09$ eV ve $E_\omega = 1.14 \pm 0.06$ eV elde edilmiştir. Frekans faktörleri 2. pik için; $s_\tau = 3.9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $s_\delta = 2.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ ve $s_\omega = 2.9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$; 3. pik için ise $s_\tau = 3.8 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $s_\delta = 5.8 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ve $s_\omega = 4.7 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler sönümlenmiş veriler içindir.

Sönümlenmemiş veriler kullanılarak rekonstrüksiyon işlemi yapıldıktan sonra elde edilen aktivasyon enerjileri, 2. pik için $E_{\tau}=(1.10\pm 0.05)$ eV, $E_{\delta}=(1.06\pm 0.15)$ eV, $E_{\omega}=(1.09\pm 0.08)$ eV; 3. pik için $E_{\tau}=(1.27\pm 0.04)$ eV, $E_{\delta}=(1.25\pm 0.12)$ eV, $E_{\omega}=(1.28\pm 0.07)$ eV bulunur. Frekans faktörleri ise, 2. pik için; $s_{\tau}=6.4 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $s_{\delta}=2.4 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ ve $s_{\omega}=7.9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$; 3. pik için ; $s_{\tau}=4.9 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, $s_{\delta}=4.1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ve $s_{\omega}=6.1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Aktivasyon enerjileri düşünüldüğünde, 2. pik için rekonstrüksiyon öncesi ve sonrasında aktivasyon enerjileri fazla bir değişim göstermezken, 3. pik için rekonstrüksiyon öncesinde aktivasyon enerjisi düşük elde edilmiştir. Her iki pik için frekans faktörleri termal sönümlenmeden önemli ölçüde etkilenmiştir. Özellikle 3. pik için frekans faktörü rekonstrüksiyon işleminden önce yaklaşık 2 kat daha düşük elde edilmiştir. Sönümlenmiş ve sönümlenmemiş verilere göre elde edilen değerler Çizelge 4.2’de (bkz. 83. syf) verilmiştir.

4.2.3 Farklı ısıtma hızları metodu sonuçları

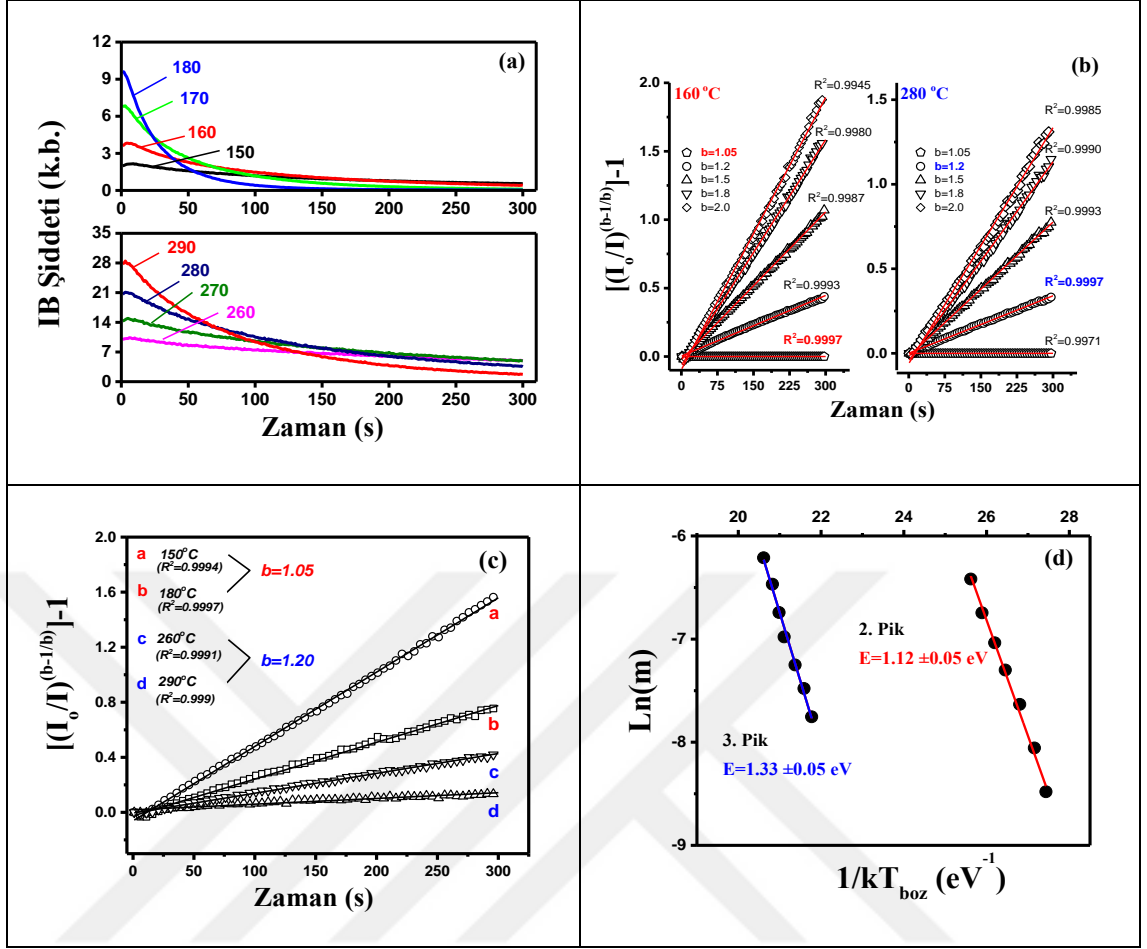
Şekil 4.9a Thermalox 995 BeO için sönümlenmiş TL ışıma eğrilerinin her bir pik için $\ln(T_m^2/\beta)$ ’nin $1/kT_m$ ’ye karşı oluşturulan grafiklerini göstermektedir. Sıcaklık gecikmesi (temperature lag) etkisinden kurtulmak için 0.25 ile 2°C/s’lik ısıtma hızlarında deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen grafiğin eğimi ve ara değeri hesaplandığında aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü, 2. pik için $E=(1.15 \pm 0.04)$ eV, $s=2.43 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$; 3. pik için ise $E=(1.44 \pm 0.05)$ eV ve $s=2.1 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Bunun yanı sıra rekonstrüksiyon edilmiş aktivasyon enerjileri Şekil 4.9b’de verilmiştir. Rekonstrüksiyon edilmiş TL ışıma eğrilerinde, maksimum sıcaklık değeri değişime uğramaktadır. 2. pik için elde edilen aktivasyon enerjisi değeri rekonstrüksiyon işleminden sonra önemli bir değişiklik göstermemiş olup $E_{reko}=(1.13 \pm 0.04)$ eV elde edilmiştir. Ancak, 3. pik için rekonstrüksiyon işleminden sonra dikkate değer sonuçlar elde edilmiştir. 3. pikin aktivasyon enerjisi rekonstrüksiyon işleminden önce (1.44 ± 0.05) eV iken rekonstrüksiyondan işleminden sonra $E_{reko}=(1.33\pm 0.04)$ eV bulunmuştur. Frekans faktörleri, rekonstrüksiyon işleminden öncesinde ve sonrasında 2. pik için aynı mertebede elde edilirken, 3. pik için rekonstrüksiyon işleminden sonra frekans faktörü iki mertebeye daha yüksek elde edilmiştir. Elde edilen tüm değerler Çizelge 4.2’de (bkz. 83. syf) sunulmuştur.



Şekil 4.9 Farklı ısıtma hızları (0.25 ve 2 °C/s) arasındaki $\ln(T_m^2/\beta)-1/kT_m$ grafiği, a) Rekonstrüksiyon işleminden önce (sönümlenmiş TL verilerine göre), b) Rekonstrüksiyon işleminden sonra (sönümlenmemiş TL verilerine göre)

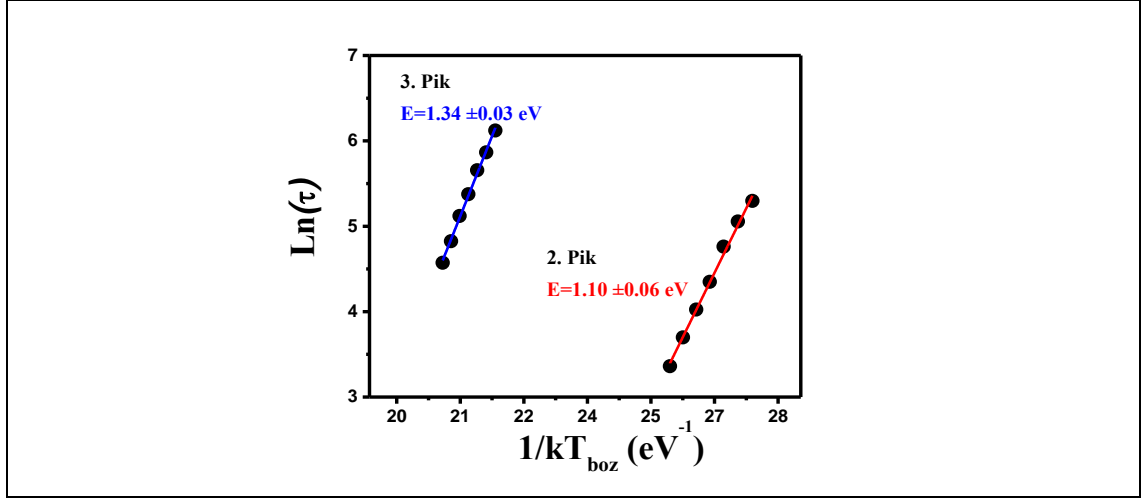
4.2.4 İzotermal bozunum yöntemi sonuçları

Bölüm 2.7.6’da belirtildiği gibi artan sabit sıcaklıklarda tutularak lüminesans şiddetinin zamanla olan değişimleri sonucunda elde edilen bozunum eğrileri Şekil 4.10a’da verilmiştir. Şekil 4.10b’de ise 2. ve 3. pikler için seçilmiş 160 °C ve 280 °C sıcaklıklarındaki $(\frac{I_0}{I})^{(b-1)/b} - 1$ ’nin zamana göre grafikleri verilmiştir. May ve Partridge (1964)’e göre, $(\frac{I_0}{I})^{(b-1)/b} - 1$ zamana göre grafiği çoğu durumda lineer bir grafik oluşturur. Ancak belirli kinetik mertebeler (b) için grafikler optimize edilir. Şekil 4.10c’de, 150, 180, 260 ve 290 °C sıcaklıklarına göre 2. pik için kinetik mertebesi 1.05 iken, 3. pik için ise 1.20’ye eşit olduğu durumda grafikler optimum lineerliği (R^2 değerleri kontrol edilerek) vermiştir. Grafiğin eğimi sonucunda elde edilen aktivasyon enerjileri 2. pik için (1.12 ± 0.05) eV, 3. pik için (1.33 ± 0.05) eV olarak elde edilmiştir (Şekil 4.10d). Frekans faktörleri ise grafiğin ara değeri aracılığı ile 2. pik için $1.01 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, 3. pik için $5.4 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Sonuçlar Çizelge 4.2’de (bkz. 83. syf) verilmiştir.



Şekil 4.10 a) İzotermal bozunum (IB) eğrilerinin zamanla değişimi, b) 160 °C ve 280°C sıcaklıklarında $(I_0/I)^{b-1/b}-1$ 'nin zamanla değişimi, c) 2. ve 3. pikler için $b=1.05$ ve $b=1.20$ kinetik mertebesinde 150 ve 180 °C ile 260 ve 290°C sıcaklıklarında $(I_0/I)^{b-1/b}-1$ 'nin zamanla değişimi, d) $\ln(m)$ 'in $1/kT$ 'ye göre değişimi

İzotermal bozunum yönteminde ikinci bir yaklaşım olan Kirsh ve Chen (1991)'e göre Denklem (2.48) aracılığı ile gerçekleştirilen fit işlemi sonucunda elde edilen *FOM* değerleri $T_{boz}=150-180$ °C aralığında % 1.13 ile % 1.41 ; $T_{boz}=260-290$ °C aralığında ise % 1.55 ile % 1.93 aralığında elde edilmiştir. Fit sonucunda elde edilen kinetik mertebesinin (*b*), her iki pik için de birinci mertebe kinetiğe uyduğu görülmüştür. $\ln(\tau) - 1/kT$ grafiği yardımı ile hesaplanan aktivasyon enerjileri, 2. ve 3. pik için sırasıyla (1.10 ± 0.06) eV ve (1.34 ± 0.03) olarak bulunmuştur (Şekil 4.11). Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de (bkz. 83. syf) sunulmuştur.



Şekil 4.11 Kirsh ve Chen (1991)'e göre Denklem (2.48) aracılığı ile elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri

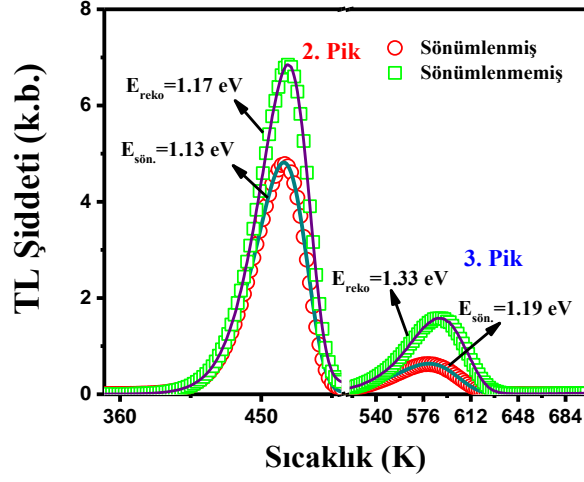
İzotermal yönteminde rekonstrüksiyon işlemi sonrasında elde edilen aktivasyon enerjileri rekonstrüksiyon işleminden öncekilerle aynı sonuçları vermiştir. İzotermal ölçümlerinde rekonstrüksiyon işlemi yapılırken, her bir ölçüm sıcaklığındaki $\eta(T)$ değerine karşı gelen bir sabite bölünür. Bu nedenden dolayı her iki durumda da yalnızca I_0 değerini değiştirecek, diğer fit parametreleri sabit kalacaktır. Ancak, May ve Partridge (1964) tarafından verilen analiz durumunda optimum eğrilerin elde edilmesi için b değeri az miktarda değişim göstermektedir (2. pik için $b=1.10$, 3. pik için $b=1.30$). Kirsh ve Chen (1991)'e göre, elde edilen kinetik mertebeler, 1.05-1.10 olarak bulunmuştur. Sonuçta, izotermal bozunum metodunda sıcaklık değeri sabit tutulduğu için termal sönümlenme etkisi kinetik parametrelerin üzerinde bir değişikliğe yol açmamıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.2'de (bkz. 83. syf) verilmiştir.

4.2.5 Dekonvolüsyon yöntemi (CGCD) sonuçları

TL deneysel verileri Bölüm 2.7.7'de verilen Denklem (2.49)'daki en genel mertebeye kinetik (GOK) ve Denklem (2.54-2.55)'deki Lambert-W fonksiyonuna fit edilerek iki yaklaşım altında dekonvolüsyon işlemi gerçekleştirilmiştir. En genel mertebeye kinetik (GOK) için gerçekleştirilen fit işlemi Şekil 4.6'da verilmişti. Sönümlenmiş TL ışıma eğrisi durumunda her iki filtre konfigürasyonunda 2. pikin aktivasyon enerjisi 1.13 ± 0.03 eV, rekonstrüksiyon işleminden sonra ise 1.16 ± 0.02 eV bulunmuştur. 3. pik için her iki

filtre konfigurasyonunda rekonstrüksiyon işleminden önce aktivasyon enerjisi 1.17 ± 0.03 eV, rekonstrüksiyon işleminden sonra Hoya U-340 için 1.28 ± 0.04 eV, BG-39 için 1.44 ± 0.05 eV olarak bulunmuştur. Kinetik merteye terimi rekonstrüksiyon öncesinde ve sonrasında kinetik merteye terimi 1'e eşittir. Sönümlenmiş TL ışıma eğrilerinin GOK modeline göre fiti sonucunda elde edilen FOM değeri %2.3 iken, rekonstrüksiyon sonrasında sönümlenmemiş TL ışıma eğrilerinin fit sonucunda FOM değeri %1.1 elde edilmiştir. Sonuç olarak, rekonstrüksiyon edilmiş TL pikleri için aktivasyon enerjileri artan ısıtma hızlara göre küçük miktarda artış göstermektedir. Bu durum ışıma eğrileri için sıcaklık gecikmesinin (temperature lag) tamamen düzeltilemeyeceğini göstermiştir.

Şekil 4.12'de ise ikinci yaklaşım olarak 2. ve 3. pik için Hoya U-340 filtre konfigurasyonunda BeO dozimetrelerin Lambert-W fonksiyonu aracılığı gerçekleştirilen dekonvolüsyon sonucunu göstermektedir. Kırmızı açık çemberler sönümlenmiş deneysel verileri, açık kare şekilleri rekonstrüksiyon edilmiş verileri ve çizgiler ise gerçekleştirilen fit eğrilerini göstermektedir. Dekonvolüsyon işlemi boyunca elde edilen FOM değerleri %1.2 ile 1.6 arasındadır. Aktivasyon enerjileri, 2. ve 3. pik için sırasıyla (1.13) eV ve (1.19) eV olarak bulunmuştur. Frekans faktörleri ise 2. pik için $1.1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, 3. pik için $8.4 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Rekonstrüksiyon işlemi sonucunda elde edilen aktivasyon enerjileri, 2. ve 3. pik için sırasıyla 1.17 ve 1.33 eV olarak elde edilmiştir. Lambert-W fonksiyonunda yer alan kinetik mertebeyi temsil eden R değeri, 2. pik için 0.07; 3. pik için ise 0.11 bulunmuştur. Sonuç olarak, FOM değerleri hata olarak ele alındığında her iki pikinde birinci merteye kinetiğe uyduğunu görülmüştür. Elde edilen değerler Şahiner (2017) tarafından yapılan çalışmadaki sonuçlarla uyum içerisindedir. GOK modeli ve Lambert-W fonksiyonuna göre gerçekleştirilen dekonvolüsyon işlemi sonucunda elde edilen aktivasyon enerjileri rekonstrüksiyon işlemi öncesi ve sonrasında birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar Çizelge 4.2'de (bkz. 83. syf) verilmiştir.



Şekil 4.12 2. ve 3. piklerin Lambert- W fonksiyonuna göre dekonvolüsyonu. Kırmızı çember: sönümlenmiş verilere, yeşil kareler: sönümlenmemiş (rekonstrüksiyon) verilere karşı gelmektedir. Eğriler ise fit işlemini göstermektedir.

Rekonstrüksiyon işleminde sonrasında 2. ve 3. pikler için aktivasyon enerjileri sırasıyla 1.17 ve 1.33 eV bulunmuştur. R değerleri ise 2. ve 3. pikler için değerleri sırasıyla 0.10 ve 0.15 bulunmuştur. Frekans faktörlerindeki değişim ise, 2. pikte bir merteye, 3. pikte ise iki merteye bir artışa sebep olmuştur. Her iki pik durumunda rekonstrüksiyon işleminden sonra yapılan fit sonucundaki FOM değerleri azalım göstermiştir.

Çizelge 4.2 Yeniden yapılandırma işlemi (rekonstrüksiyon) öncesi ve sonrası 2. ve 3. piklerin aktivasyon enerjileri ve frekans faktörlerinin değişimi; “a.d.”, yeniden yapılandırma sonrasında değerlerin aynı kaldığını gösterir.

	2. pik (192 °C, $\beta=1$ °C/s)				3. pik (308 °C, $\beta=1$ °C/s)			
	Deneysel (sönümlenmiş)		Yeniden yapılandırılmış (sönümlenmemiş)		Deneysel (sönümlenmiş)		Yeniden yapılandırılmış (sönümlenmemiş)	
Metot	$E(eV)$	$s(s^{-1})$	$E_{reko}(eV)$	$s_{reko}(s^{-1})$	$E(eV)$	$s(s^{-1})$	$E_{reko}(eV)$	$s_{reko}(s^{-1})$
Pik Şekli	$E_{\tau} = 1.05 \pm 0.04$ $E_{\delta} = 1.04 \pm 0.13$ $E_{\omega} = 1.05 \pm 0.07$	$s_{\tau} = 3.9 \times 10^{10}$ $s_{\delta} = 2.5 \times 10^{10}$ $s_{\omega} = 2.9 \times 10^{10}$	$E_{\tau} = 1.10 \pm 0.05$ $E_{\delta} = 1.06 \pm 0.15$ $E_{\omega} = 1.09 \pm 0.08$	$s_{\tau} = 6.4 \times 10^{10}$ $s_{\delta} = 2.4 \times 10^{10}$ $s_{\omega} = 7.9 \times 10^{10}$	$E_{\tau} = 1.13 \pm 0.04$ $E_{\delta} = 1.15 \pm 0.09$ $E_{\omega} = 1.14 \pm 0.06$	$s_{\tau} = 3.8 \times 10^9$ $s_{\delta} = 5.8 \times 10^9$ $s_{\omega} = 4.7 \times 10^9$	$E_{\tau} = 1.27 \pm 0.04$ $E_{\delta} = 1.25 \pm 0.12$ $E_{\omega} = 1.28 \pm 0.07$	$s_{\tau} = 4.9 \times 10^{11}$ $s_{\delta} = 4.1 \times 10^{11}$ $s_{\omega} = 6.1 \times 10^{11}$
Farklı Isıtma Hızları	1.15±0.04	$s = 2.43 \times 10^{11}$	1.13±0.04	$s = 2.3 \times 10^{11}$	1.44±0.05	$s = 2.1 \times 10^{10}$	1.33±0.04	$s_{\tau} = 1.4 \times 10^{12}$
İzotermal Bozunum[*]	1.12 ±0.05	$s = 1.01 \times 10^{11}$	a.d	a.d	1.33 ±0.05	$s = 5.4 \times 10^{11}$	a.d	a.d
İzotermal Bozunum [**]	1.10 ±0.06	-	a.d	-	1.34 ±0.03	-	a.d	-
Kesikli Işıma	1.18 ±0.01	$s = 5.1 \times 10^{10}$	1.23 ±0.03	$s = 9.6 \times 10^{10}$	1.23 ±0.02	$s = 6.7 \times 10^{11}$	1.38 ±0.04	$s = 4.7 \times 10^{12}$
Dekonvolüsyon (Lambert-W.)	1.13 Fom(%): 1.60	$s = 1.1 \times 10^{11}$	1.17 Fom(%): 0.62	$s = 3.2 \times 10^{12}$	1.19 Fom(%): 1.62	$s = 8.4 \times 10^{11}$	1.33 Fom(%): 0.21	$s = 4.1 \times 10^{13}$
Dekonvolüsyon (GOK)	1.13 Fom(%): 2.20	$s = 1.3 \times 10^{11}$	1.16 Fom(%): 1.10	$s = 2.8 \times 10^{12}$	1.17 Fom(%): 2.23	$s = 5.4 \times 10^{11}$	1.28 Fom(%): 0.90	$s = 9.8 \times 10^{12}$

* May ve Partridge, 1964 ile Manam ve Sharma, 2005 yaklaşımlarına dayanır.

** Kirsh ve Chen, 1991 yaklaşımına dayanır.

Tüm analiz metotlarına göre 2. ve 3. pikler birinci mertebe kinetiğe uymaktadır, sadece izotermal bozunum metodunda May ve Partridge (1964) yaklaşımına göre 3. pik için kinetik mertebe terimi 1.20 elde edilmiştir. Ancak bu değer birinci mertebe kinetik değeri olarak kabul edilebilir (Kitis vd. 1998). Diğer teknikler sonucunda rekonstrüksiyon işleminden sonra da kinetik mertebe terimi birinci mertebeye uyduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2’de 6 farklı yöntem kullanılarak rekonstrüksiyondan önce ve sonra elde edilen aktivasyon enerjileri ve frekans faktörleri birbirleriyle uyumludur. Uygulanan 6 metot içerisinde yalnızca izotermal metot termal sönümlenmeden etkilenmemiştir. Rekonstrüksiyon sonuçlarına göre aktivasyon enerjisi değerleri farklı ısıtma hızları yönteminde en düşük değerini almış, diğer 3 teknikte aktivasyon enerjileri ve frekans faktörü değerleri artış göstermiştir. 2. pik için, sönümlenmiş TL verilerine göre TL kinetik parametreleri %2-5 arasında daha düşük elde edilmiştir. Ancak, 3. pik için sönümlenmiş TL verilerine göre pik analiz edildiğinde bu durumun pik şekli ve dekonvolüsyon metoduna göre %10-12 arasında, farklı ısıtma hızları yöntemine göre ise %7-10 aralığında daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür. Frekans faktörü için, tüm metotlar dikkate alındığında 2. pik için %10-20 aralığında daha düşük sonuçlar elde edilirken, 3. pik için bu durumun iki mertebe daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür. Çizelge 4.2’ye tüm metotlar için elde edilen frekans faktörü değerleri rekonstrüksiyon öncesinde ve sonrasında birbirleriyle uyumludur.

Metotlar arasında rekonstrüksiyon sonrasında aktivasyon enerjisinin düşük elde edildiği yöntem farklı ısıtma hızlarına dayanan yöntem olmuştur. Bu durum, aktivasyon enerjisinin belirlenmesinin maksimum sıcaklığa (T_m) dayanması ile ilişki olduğu düşünülmektedir. Çünkü belirlenen maksimum sıcaklık değerleri elde edilirken sıcaklık gecikme (temperautre lag) düzeltilmesi yapılmamıştır. Rekonstrüksiyon işlemi sonucunda maksimum sıcaklık daha yüksek değerlere kayma gösterirken, sıcaklık gecikme düzeltilmesi yapılırsa maksimum sıcaklık değerindeki kayma daha az olacaktır. Eğer artan ısıtma hızları kullanılıyorsa, sıcaklık gecikme düzeltilmesi yapılması büyük önem taşımaktadır. Çizelge 4.2’ye göre farklı ısıtma hızları metoduna göre sadece aktivasyon enerjisi rekonstrüksiyon işleminden sonra düşük elde edilirken, frekans faktörü değeri rekonstrüksiyon işlemi sonrası iki mertebe daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum

aktivasyon enerjisinin sıcaklık gecikmesine daha hassas olduğu, frekans faktörünün logaritmik formül aracılığı ile hesaplandığından daha az etkilendiğini göstermiştir. Aşlar vd. (2017a)'e göre 2. ve 3. pik için termal verim değerleri, $\eta(T)$, 0.67 ve 0.41'dir. 3. pik için termal verim değeri, 0.54 değerinden daha düşüktür. Bu durum Dallas vd. (2008)'e göre termal sönümlenmenin etkin olduğu aralığı temsil etmektedir. Bu yüzden gerçekleştirilen tüm metotlarda 3. pik, 2. pike göre termal sönümlenme olayından daha fazla etkilenmiştir.

Rekonstrüksiyon işleminden sonra 2. pik için ortalama aktivasyon enerjileri ve frekans faktörleri, $1.14 \pm 0.07 \text{eV}$, $(9.9 \pm 0.4) \times 10^{10} \text{s}^{-1}$; 3. pik için ise $1.34 \pm 0.08 \text{eV}$, $(6.9 \pm 0.6) \times 10^{11} \text{s}^{-1}$ bulunmuştur. Ortalama değerler tüm metotlar dikkate alınarak hesaplanmış; frekans faktörünün ortalama değerler hesaplanırken dekonvolüsyon metodu diğer metotlara göre frekans faktörü bir merteye fazla bulunduğu için dahil edilmemiştir. Bacci vd. (1989) tarafından yapılan çalışmada fit işlemine göre 2. pik için kinetik merteye 1.5, 3. pik için ise 1 bulunmuştur. Bu çalışmada, aktivasyon enerjileri ve frekans faktörleri, 2. pik için $1.41 \pm 0.004 \text{eV}$, $(0.9 \pm 0.1) \times 10^{14} \text{s}^{-1}$; 3. pik için $1.35 \pm 0.002 \text{eV}$, $(4.4 \pm 0.2) \times 10^9 \text{s}^{-1}$ elde edilmiştir. Nieto vd. (2016)'ya göre, yalnızca izotermal metodu kullanılarak 2. pikin aktivasyon enerjisi, frekans faktörü ve kinetik merteye terimi araştırılmıştır. Buna göre, $E = 1.01 \text{eV}$, $s = 1.8 \times 10^9 \text{s}^{-1}$ ve $b = 2$ elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında bulunan değerler, 2. pik için Bacci vd. (1989)'e göre uyumlu değilken, kinetik terim dahil edilmediği takdirde Nieto vd. (2016) tarafından bulunan sonuçlarla uyumludur. 3. pik için elde edilen sonuçlar Bacci vd. (1989) ile uyumludur.

Sonuç olarak, dozimetrik pik olan 2. pikin termal sönümlenme olayından düşük mertebeye etkilendiği ve bu yüzden rekonstrüksiyon işlemi ve sonrasında elde edilen değerlerin birbirlerinden çok fark etmediği, ancak 3. pikin aktivasyon enerjisi ve kinetik merteye teriminin yaklaşık olarak %15 oranında, frekans faktörlerinin ise rekonstrüksiyon uygulanmamış haline göre iki merteye daha düşük sonuç verdiği görülmüştür. Tuzak parametrelerinin hesaplanmasında izotermal yöntem hariç diğer metotların termal sönümlenme düzeltmesine ihtiyacı olduğu ve rekonstrüksiyon sonucu sayesinde TL kinetik parametrelerinin iyileştirilebileceği görülmüştür. Bu çalışma, özellikle termal verim değerinin 0.54'den küçük olduğu durumlardaki TL pikleri için

termal sönümlenmenin TL kinetik parametrelerde yarattığı değişiklikleri anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

4.3 Thermalox 995 BeO Dozimetresi TL, OSL ve ESR Korelasyonu

Thermalox 995 BeO dozimetresinin TL pikleri, OSL sinyali ve ESR merkezleri arasındaki korelasyonu kademeli tavlama (step annealing) ve ağartma (bleaching) deneyleri yardımı ile araştırılmıştır. ESR merkezleri için ağartma (bleaching) deneyleri, termal aktivasyon enerjileri ve merkezlerin ömürleri araştırılmıştır. Bunun yanı sıra, BeO'in termal asistan OSL (TA-OSL) sinyali analiz edilerek transfer olayının etkileri araştırılmıştır.

TL ve OSL çalışmalarında kullanılacak olan dozimetreler, Risø TL/OSL okuyucuda bulunan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile 30 Gy'de ışınlanmıştır. ESR ölçümlerinde kullanılan çubuk BeO dozimetre, Atom Enerjisi Kurumu Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığında bulunan doz hızı 1674 Gy/saat olan ^{60}Co kaynağı aracılığı 1 kGy olacak şekilde ışınlanmış; daha sonra dozimetrelere $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile aynı doz verildiğinde elde edilen ESR spektrumunda bir farklılık yaratmadığı için ilerleyen kısımlarda ışınlamalar Elsec 9010 cihazında yer alan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Korelasyonunun araştırılması amacıyla dozimetreler, toplamda 4 protokolden oluşan işleme tabi tutulmuştur. Kademeli tavlama (step annealing) deneyleri, aşağıdaki protokollere göre uygulanmıştır. Uygulanan protokoller Bölüm 2.7.5'de verilen $T_{stop} - T_{max}$ yönteminin genişletilmiş halleri olarak görülebilir. 1. protokol doğrudan $T_{stop} - T_{max}$ yöntemine doğrudan benzerken, 2. protokolda 1. protokolden farklı olarak TL okumasından önce OSL işlemi yapılmaktadır. Bu protokolün amacı OSL işleminin TL tuzaklarındaki etkilerinin araştırılmasıdır. ESR merkezlerinin ışıkla ve zamanla olan ilişkisinin araştırılması amacıyla ağartma (bleaching) ve izotermal bozunum deneyleri 3. ve 4. protokole göre gerçekleştirilmiştir.

1. Protokol: T_{stop} - T_{max} deney protokolü

1.01	Test Dozu
1.02	TL ışıma eğrisindeki her pik için TL ölçümü ile ilk hassasiyeti (Isıtma hızı = $1^{\circ}\text{C} / \text{s}$, sadece TL için)
1.1	Test Dozu
1.2	T_{stop} sıcaklığına kadar ilk TL ölçümü ve oda sıcaklığına kadar soğuma
1.3	TL, OSL / ESR ölçümü
1.4	T_{stop} 'un $150-400^{\circ}\text{C}$ aralığında 10°C 'lik adımlarla arttırılarak 1.1-1.3 adımlarını tekrarlanması
1.5	Test dozu ve son hassasiyet kontrolü (Isıtma hızı = $1^{\circ}\text{C} / \text{s}$, sadece TL için)

1. protokol, bağımsız bir şekilde TL, OSL ve ESR'ye uygulanmıştır. Protokolün 1.3 adımında, TL okumaları ısıtma hızı $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ olacak şekilde 500°C 'ye kadar ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. Bu TL okuması artı kalan (RTL) ölçümünü ifade etmektedir. 1.3 adımındaki OSL ölçümleri sürekli dalga uyarım modunda %50 optik gücünde mavi ışıkla 120 s uyarılarak elde edilmiştir. ESR ölçümleri ise Çizelge 4.3'de verilen parametrelere göre oda sıcaklığında yapılmıştır.

2. Protokol: T_{stop} - T_{max} ve CW-OSL ağartma işlemi deney protokolü

2.01	Test Dozu
2.02	TL ışıma eğrisindeki her pik için TL ölçümü ile başlangıç hassasiyeti (Isıtma hızı = $1^{\circ}\text{C} / \text{s}$)
2.1	Test Dozu
2.2	T_{stop} sıcaklığına kadar ilk TL ölçümü ve oda sıcaklığına kadar soğuma
2.3	CW-OSL ölçümü (oda sıcaklığında, 400 s)
2.4	500°C 'ye kadar TL ölçümü (Isıtma hızı = $1^{\circ}\text{C} / \text{s}$); (RTL ölçümü)
2.5	T_{stop} 'un $150-400^{\circ}\text{C}$ aralığında 10°C 'lik adımlarla arttırılarak 2.1-2.4 arasındaki adımların tekrarlanması
2.6	Test dozu ve her pik için (2 ve 3. pik) hassasiyetin kontrol edilmesi

3. Protokol: ESR izotermal bozunum deney protokolü

3.1	Test Dozu
3.2	Farklı tavlama süreleri (t_{tavlama}) için materyalin sabit T_{tavlama} sıcaklığında tavllanması
3.3	Oda sıcaklığında ESR ölçümü
3.4	BeO dozimetrelerin 600 ° C’de 1 saat tavllanması
3.5	T_{tavlama} sıcaklığını artırılması ile 3.1-3.3 adımlarının tekrarlanması

3. protokolde, izotermal bozunma süreleri (t_{tavlama}), 2, 4, 8, 16, 32 ve 60 dakikalık süreleri; izotermal tavlama sıcaklıkları ise (T_{tavlama}), 100, 125, 150, 175, 225, 275 ve 300°C’yi içerir.

4. Protokol: ESR izotermal bozunum deneyi

4.1	Test Dozu
4.2	Farklı zamanlar için, $t_{\text{uyarım}}$ mavi ışık altında numunenin uyarılması
4.3	Oda sıcaklığında ESR ölçümü
4.4	Artan uyarım süreleri ($t_{\text{uyarım}}$) boyunca 4.1 - 4.3 arasındaki adımlarının tekrarlanması

Ağartma süreleri ($t_{\text{uyarım}}$), 2, 4, 8, 16, 32 ve 60 dakikadır. 3. merkez ağartma protokolü, materyal 250 °C’de 3 dakika boyunca ısıtıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Tüm TL ışımaya eğrileri ve CW-OSL bozunum eğrileri TL için Denklem (2.49) ve OSL için Denklem (2.27)’ye göre fit edilmiştir.

4.3.1 Thermalox 995 BeO ESR analizi

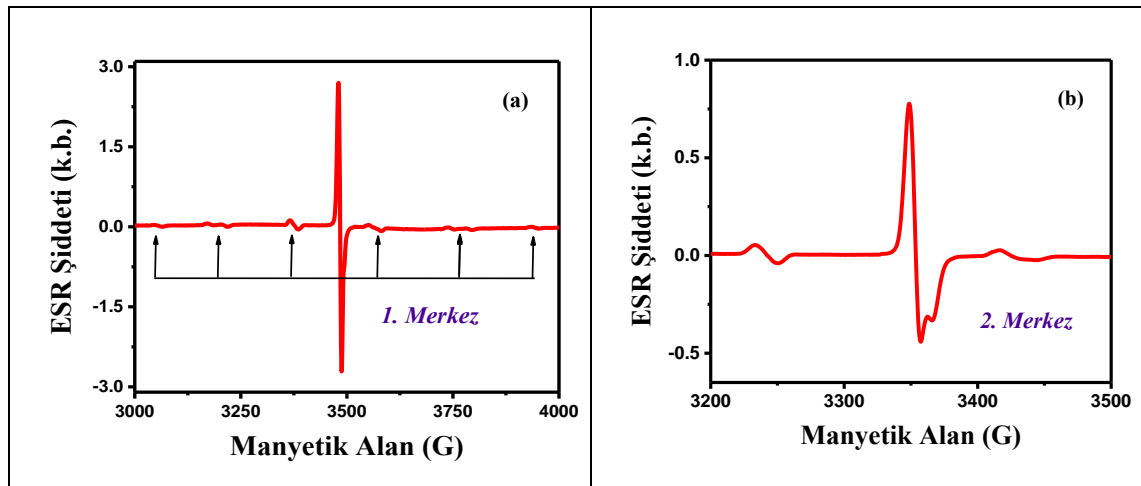
BeO materyali ışınlanmamış durumda ESR spektrumu göstermezken, ışlandıktan sonra ESR spektrumu elde edilmiştir. ESR sinyali ölçüm parametrelerinin optimizasyonu için gerekli olan optimum mikrodalga güç değeri, 0.1 mW değerinden başlanarak maksimum 40 mW olacak şekilde farklı güç değerlerinde ölçüm alınmış bunun sonucunda 2 mW olarak bulunmuştur. Ardından bulunan bu güç değeri sabit tutularak farklı modülasyon genliği taramaları sonucunda modülasyon genliği 1G olarak belirlenmiştir. Çalışma boyunca kullanılan ESR ölçüm parametreleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çalışma

boyunca, ESR spektrumundaki g faktörü ve aşırı ince yapı sabiti değerleri (A), Win-EPR Simfonia simülasyon programı aracılığı ile belirlenmiştir.

Çizelge 4.3 ESR ölçümlerinde kullanılan ölçüm parametreleri

Mikrodalga gücü (mW)	20
Modülasyon genliği (mT)	0.2
Zaman sabiti (ms)	327.68
Dönüşüm zaman sabiti (ms)	320
Tarama zamanı (s)	327.68
Tarama sayısı	3
Mikrodalga frekansı (GHz)	~9.84
Örnekleme sayısı	1024
Modülasyon frekansı (KHz)	100

BeO materyali, 1 kGy doz değerinde TAEK'te 1674 Gy / saat doz hızında ^{60}Co kaynağı kullanılarak yapılan ışınlamanın ardından elde edilen ESR spektrumu, aynı dozda beta kaynağı ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) kullanılarak ışınlanmış BeO materyalinden elde edilen ESR spektrumu ile kıyaslandığında her iki spektrumda oluşan merkez sayısı ve şekil bakımından bir fark olmadığı görülmüştür. Kolay elde edilebilirliği açısından ışınlamalar $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13'de 1 kGy $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ile ışınlanmış BeO'nin ESR spektrumu görülmektedir.

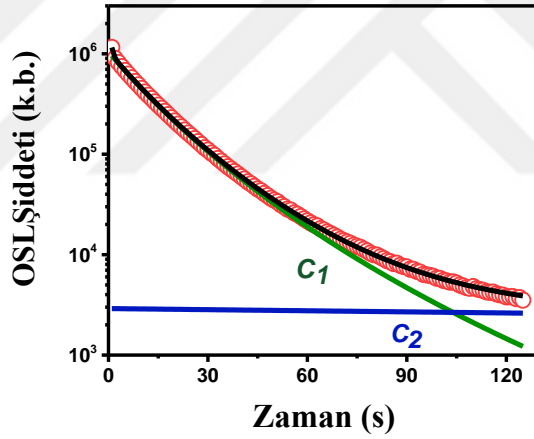


Şekil 4.13 1 kGy $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ile ışınlanmış BeO ESR spektrumu, a) Oklar, 1. merkez; b) 2. merkez

Bu spektrum incelendiğinde BeO materyalinin iki adet ESR spektrumundan oluştuğu görülmektedir. Birincisi, serbest elektron için verilen rezonans bölgesi yakınında şiddetli bir ESR çizgisi, diğeri ise altılı bir yapıdan oluşan ESR çizgileridir (Şekil 4.13). Altılı ESR çizgisi Şekil 4.13a'da oklar ile gösterilmiştir. Altılı ESR çizgisinin g faktörü incelendiğinde eksenel simetrik g faktörü özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu merkez için g faktörünün dik ve paralel bileşenleri sırasıyla, $g_{\perp} = 2.011$ ve $g_{\parallel} = 2.005$ olarak bulunmuştur. Buna karşı gelen aşırı ince yapı sabitinin dik ve paralel bileşenleri ise sırasıyla $A_{\perp} = 177.5$ G ve $A_{\parallel} = 207.4$ G olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler ışığında altılı ESR sinyali veren grubun $5/2$ spin sayısına eşit olan alüminyum atomundan kaynaklanabileceği öngörülmüştür. Işınlanmamış BeO materyalinin ESR spektrumu vermemesinden dolayı, materyalde alüminyum atomunun Al^{+3} formunda olduğu (paramanyetik olmayan) ve ışınlama sonrasında Al^{+2} (paramanyetik) iyonuna dönüşerek ESR spektrumu verdiği sonucuna varılmıştır. Al^{+2} atomu ile BeO elektronlarının aşırı ince yapı etkileşimlerinden kaynaklanarak toplam altılı ESR sinyali oluşturduğu görülmüştür. Elde edilen aşırı ince yapı sabitleri ve ESR sinyal şekilleri DuVarney vd. (1971) ve Watanabe vd. (2010) ile uyumludur. Al^{+2} merkezi, ESR spektrumunda 1. merkez olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.13b'de manyetik alan değerinin 3400 ile 3500 G olduğu değerler arasında merkezde ESR çizgisi elde edilmiştir. Bu ESR çizgisi ise 2. merkez olarak adlandırılmıştır. Bu merkez incelendiğinde aşırı ince yapı özelliği göstermeyen eksenel simetrik bir g tensörüne sahip olduğu görülmüştür. Bu merkez için g faktörünün dik ve paralel bileşenleri $g_{\perp} = 2.0198$ ve $g_{\parallel} = 2.0117$ olarak elde edilmiştir. Benzer değerler tek kristal BeO için oda sıcaklığında eksenel kusur için $g_{\perp} = 2.0168$ ve $g_{\parallel} = 2.0028$ ve eksenel olmayan kusur için $g_{\perp} = 2.0175$ ve $g_{\parallel} = 2.0028$ olarak elde edilmiş ve bu merkez dört komşu oksijen iyonunda tuzaklanan hol (V merkezi) olarak atanmıştır (Herve ve Maffeo 1970). Benzer değerler, merkezdeki ESR sinyali için $g_{\perp} = 2.0178$ ve $g_{\parallel} = 2.0096$ olarak Watanabe vd. (2010) tarafından elde edilmiştir. 2. merkez için bu çalışmada elde edilen g faktörünün dik bileşeni, (g_{\perp}) yukarıda bahsedilen çalışmalarla uyumlu iken, g faktörünün paralel (g_{\parallel}) bileşenin değeri az farklılık göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen g_{\parallel} değeri literatürde farklı ana materyalde anizotropik özellik gösteren O^{-} iyonu (Samoilovich ve Tsinober 1970) değeri ile uyumludur. Bu değerlendirmeler altında 2. merkez anizotropik özellik gösteren O^{-} iyonu olarak atanmıştır.

4.3.2 Thermalox 995 BeO OSL analizi

Thermalox 995 BeO dozimetresi için sürekli dalga uyarım modunda oda sıcaklığında 120 s mavi ışık ile uyarım sonucunda elde edilen CW-OSL eğrisi Şekil 4.14’de verilmiştir. OSL eğrisinin dekonvolüsyonu Eşitlik (2.51)’de verilen Lambert W fonksiyonuna göre fit edilmiştir. Bu fit sonucunda OSL eğrisinin iki bileşenden (C_1 ve C_2) oluştuğu görülmüştür. Bu bileşenler için ömür (τ) ve tesir kesiti (σ) ifadeleri belirlenmiştir. C_1 ve C_2 için ömür değerleri sırasıyla, 23.8 s ve 2463 s; tesir kesitleri ise 8.43×10^{-19} ve $3.95 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ elde edilmiştir. OSL için kinetik merteye terimleri, C_1 bileşeni için ($R=0.043 \pm 0.005$) ve C_2 için ($R=0.14 \pm 0.05$) bulunmuştur. Bu değerler, her iki bileşenin de birinci mertebe kinetiğe uyduğunu göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen kinetik parametreler ve bileşenler; Bulur ve Yeltik (2010) tarafından rapor edilen değerler ile uyumludur.

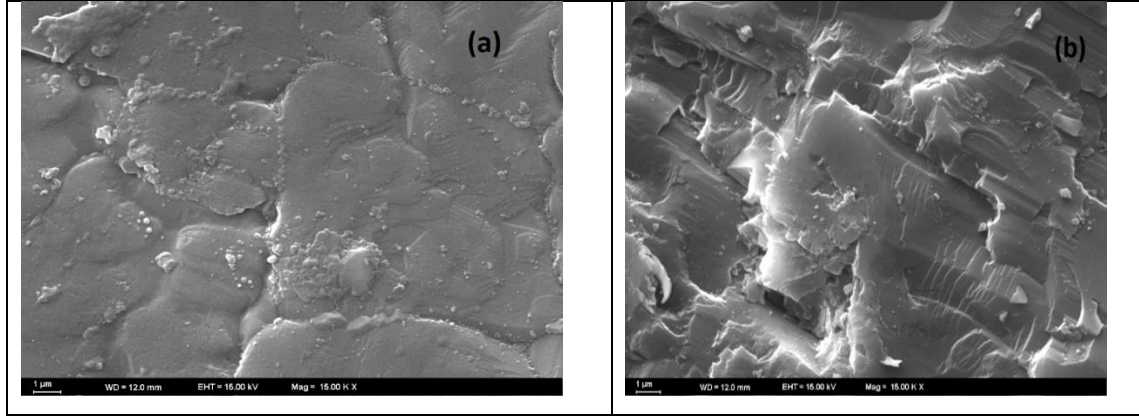


Şekil 4.14 Thermalox 995 BeO OSL eğrisi ve dekonvolüsyonu

4.3.3 Thermalox 995 BeO SEM ve EDX analizi

TL ve OSL ölçümlerinde kullanılan Thermalox 995 BeO dozimetresi ve ESR ölçümlerinde kullanılan çubuk BeO dozimetresi için SEM görüntüleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra dozimetrelerin içeriğinin elementel olarak karşılaştırılması amacıyla EDX analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.15a, Thermalox 995 BeO’ye ait SEM görüntüsünü, Şekil 4.15b, Innovacera çubuk BeO dozimetresinin SEM görüntüsünü göstermektedir. Bu iki BeO materyalinin SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey

topolojisinde farklılık görülmektedir. Thermalox 995 BeO pürüzsüz bir yüzey görüntüsüne sahipken, BeO çubuk dozimetresi, girintili bir yüzey yapısı göstermiştir.



Şekil 4.15 BeO için SEM görüntüleri (a) Thermalox 995 BeO, (b) Innocevara çubuk BeO dozimetre

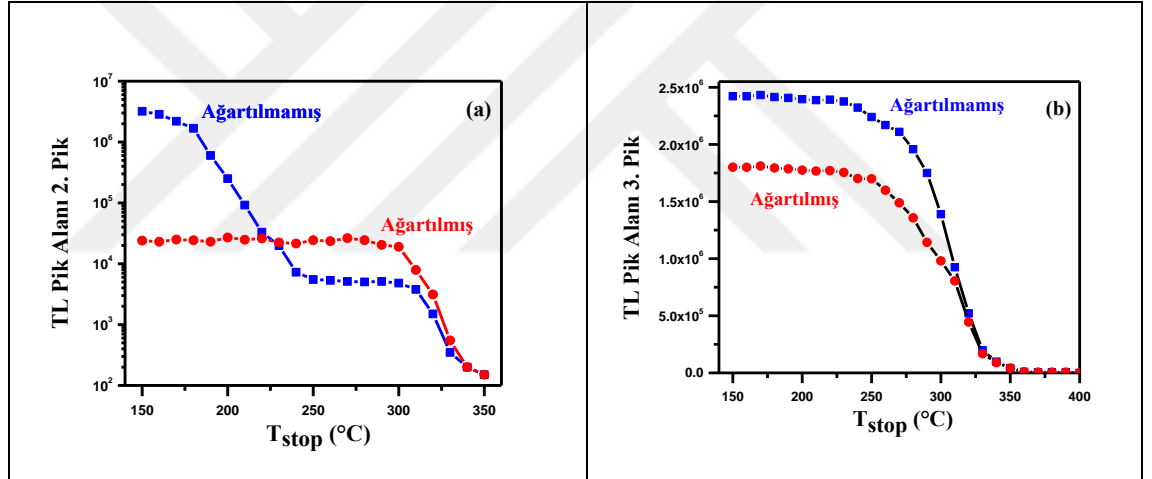
Çizelge 4.4, iki dozimetre için EDX analizine göre materyalin jeokimyasını göstermektedir. Genel olarak iki materyalinde benzer element içeriğine sahip olduğu görülmüştür. BeO sentez teorisine göre sodyum içeriği önemli olup, TL ışına eğri yapısında değişikliklere sebep olabilmektedir (McKeever vd. 1995). Innocevara çubuk BeO dozimetresinin sodyum içeriği Thermalox 995 BeO dozimetresine göre düşük olmasına karşın TL ışına eğrilerinin yapısında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiş olup TL ışına eğrisinin 2 pikten oluştuğu görülmüştür (Aşlar vd. 2019).

Çizelge 4.4 Thermalox 995 ve Innocevara çubuk BeO dozimetreler için SEM-EDX analizi sonuçları

<i>EDX Analizi</i>	<i>Thermalox 995 (normalize kütle %)</i>	<i>Çubuk BeO (normalize kütle %)</i>
Oksijen	97.64	93.63
Karbon	0.19	0.04
Silikon	0.22	0.53
Alüminyum	0.18	0.83
Boron	0.75	0.42
Magnezyum	0.26	0.50
Kalsiyum	0.09	0.44
Sodyum	0.56	0.23
Mangan	0.11	0.54

4.3.4 TL, OSL ve ESR sinyallerinin kademeli tavlama (step annealing) deneyi sonuçları

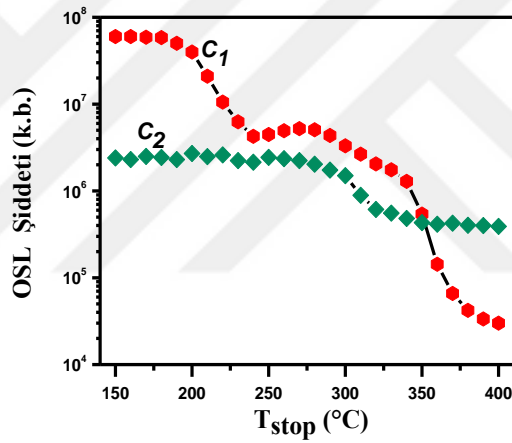
TL ve OSL sinyalleri için kademeli tavlama deneyleri, Bölüm 4.3’de verilen 1. ve 2. protokollere göre gerçekleştirilmiştir. 1. protokol kapsamında TL sinyali için elde edilen ağartılmamış TL sinyali, OSL işleminin uygulanmadığı duruma karşı gelmektedir. 2. protokole göre elde edilen ağartılmış TL sinyali, OSL işlemi uygulandıktan sonra elde edilen TL sinyaline karşı gelmektedir. 1. ve 2. protokolde 1.3 ve 2.4 adımında elde edilen arta kalan TL (RTL) ışımaya eğrileri Denklem (2.49)’a göre dekonvole edilerek 2. ve 3. piklerin altında kalan alan değerleri kaydedilir. Yapılan bu işlem kullanılan tüm T_{stop} sıcaklıkları için uygulanır. Şekil 4.16’da 2. ve 3. piklerin, ağartılmış ve ağartılmamış TL sinyallerinin artan T_{stop} sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Şekildeki her bir nokta, pik altında kalan alan değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.16 TL piklerinin kademeli tavlama (step annealing) deneyi sonuçları, a) Ağartılmamış ve ağartılmış 2. TL piki, b) Ağartılmamış ve ağartılmış 3. TL piki

Şekil 4.16a'ya göre 2. pikin ağartılmamış TL pik alanı sinyal şiddet değeri (mavi eğri), iki adımda bir bozunum gösterirken, ağartılmış TL sinyali (kırmızı eğri) tek adımda bir bozunum göstermektedir. Ağartılmamış ve ağartılmış TL sinyalleri incelendiğinde ağartılmamış pik alan değerinin uygulanan OSL işlemi (ağartma işlemi) ile hızlı bir düşüş göstermiştir. 2. pik için ilk düşüş 160°C'de başlamakta ve 240°C'de bir platoya erişmektedir. 250°C ile 300°C arasındaki plato bölgesini takiben ikinci bir düşüş

meydana gelmektedir. Ağartılmış 2. TL pik alan şiddet değeri yaklaşık olarak 300°C'ye kadar sabit iken 300°C'den sonra bir düşüş göstermiştir. Genel olarak, ağartılmış TL sinyalinin ağartılmamış TL sinyalinden daha düşük olması beklenirken, 240°C'den yüksek sıcaklık değerlerinde ağartılmış 2. TL pikinin alan şiddet değeri ağartılmamış TL şiddetinden daha yüksek elde edilmiştir. Bu artışın sebebinin OSL işlemi sonrasında (ağartma/bleaching) o bölgedeki tuzaklara fototransfer olayıyla yük transfer olduğu düşünülmektedir. Bu olay, Bölüm 4.3.10'da BeO'in TA-OSL sinyallerinin detaylı incelenmesi ile araştırılmıştır. 3. pik için Şekil 4.16b'den görüleceği gibi tek bozunum göstermektedir. TL pik alan şiddeti 290°C'ye kadar sabitken, artan T_{stop} sıcaklığı ile azalmaktadır. Bu durumda elde edilen ağartılmış TL şiddeti daima ağartılmamış TL şiddetinden azdır.



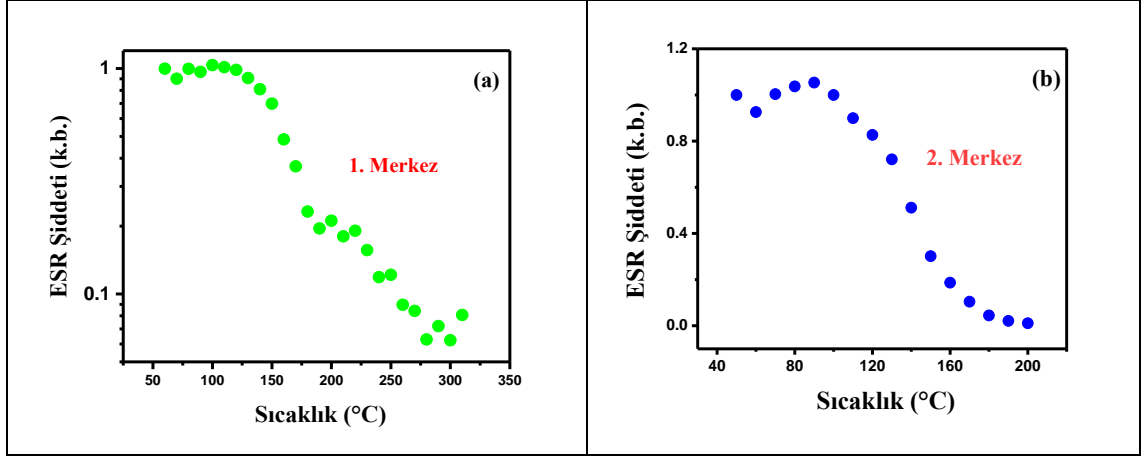
Şekil 4.17 OSL bileşenlerinin kademeli tavlama (step annealing) deney sonuçları

2. protokol 2.3 adımında elde edilen CW-OSL eğrilerinin dekonvolüsyon ile her bir T_{stop} sıcaklığında C_1 ve C_2 bileşenlerinin alan değerleri belirlenmiş ve kademeli tavlama (step annealing) deney sonuçları Şekil 4.17'de verilmiştir. Her iki bileşen de düşük sıcaklıklarda karar bir davranış sergilerken T_{stop} sıcaklığı arttıkça, C_1 bileşeni için 190-250 °C bir düşüş görülmüş ve 250-300 °C arasındaki bölgede bir plato gözlenerek tekrar bu bileşen bozunuma uğramaktadır. C_1 bileşeni iki aşamalı bir bozunum gerçekleştirilerek 400 °C'de tamamen yok olmaktadır. C_2 bileşeni ise 290 °C'ye kadar geniş bir plato bölgesinde sabit bir davranış gösterip ardından 300-350 °C sıcaklık aralığında küçük bir azalış göstermiştir. OSL bileşenlerinin kademeli tavlama sonuçları, Şekil 4.17'ye göre 400 °C'ye kadar ısıtma sonucunda C_1 bileşeni tamamen yok olurken, C_2 bileşeni yok

olmamaktadır. Şekil 4.16 ve 4.17'ye göre Hoya U-340 filtresinde CW-OSL sinyal şiddeti toplam TL sinyal şiddetinden daha büyüktür. Bu durum BeO dozimetrenin termal sönümlenmeye uğraması ile ilişkilidir (Aşlar vd. 2017a).

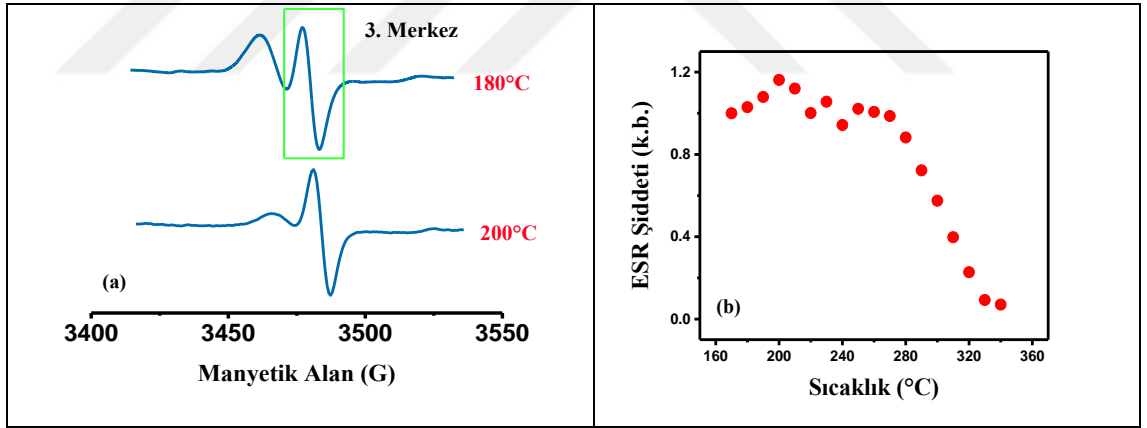
BeO dozimetresinin OSL sinyalinin kademeli tavlama davranışı (step annealing) toplam OSL şiddeti cinsinden Bulur ve Göksu (1998), Watanabe vd. (2010), Bulur ve Yeltik (2010); Yukihara (2011); Bulur ve Saraç (2013) tarafından incelenmiştir. Şekil 4.17'den görülebileceği gibi OSL sinyalinin C_1 bileşeni, 175 ve 225 °C sıcaklık bölgeleri arasında, bir mertebe azalım göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen bu sonuç yukarıda bahsedilen çalışmalar ile uyuşmamaktadır. Daha önce literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda, OSL sinyalinin yaklaşık olarak 300°C'ye kadar sabit kaldığı ve OSL sinyalinden 340°C civarındaki tuzakların sorumlu olduğu rapor edilmiştir. Ancak bu durum, dozimetrelerin ışınlandığı test doz değerlerinin 1 Gy olduğu durumda elde edilmiştir. Fakat, Bulur ve Saraç (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 50 Gy ışınlanmış BeO materyalinin 150 ve 220 °C sıcaklık aralığında azalışa geçerek plato bölgesine ulaştığı ve ardından 300°C'den sonra tekrar düşüş gösterdiği görülmüştür. Bulur ve Saraç (2013) tarafından elde edilen OSL sinyalinin kademeli tavlama sıcaklık davranışının elde edilen C_1 bileşenin tavlama davranışı ile (Şekil 4.17) uyumlu olduğu görülmüştür. Bulur ve Saraç (2013) benzer tavlama davranışının 10 Gy'den yüksek dozlarda meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada C_1 bileşeni için elde edilen tavlama davranışının, dozimetrelerin yüksek doz değerlerinde ışınlanması (30 Gy) sonucunda elde edildiği düşünülmektedir.

Şekil 4.18, Bölüm 4.3'de 1. protokole göre, ESR merkezlerinin kademeli tavlama (step annealing) deneyi sonuçlarını göstermektedir. Buna göre 1. ESR merkezinin artan sıcaklık değerlerine göre iki adımda bozunduğu; ilk bozunumun 110 °C ile 200 °C arasında, diğer bozunumun ise 200 °C'den başlayarak 300 °C'de sona erdiği görülmüştür (Şekil 4.18a). 2. merkezin kademeli tavlama deneyi sonuçlarına göre, merkezin 90°C'ye sabit kaldığı 100 °C'den sonra tek adımda bozunarak yaklaşık 200 °C'de tamamen yok olduğu görülmüştür (Şekil 4.18b).



Şekil 4.18 ESR merkezlerinin kademeli tavlama deney sonuçları, a) 1. merkez ; b) 2. merkez

Bunun yanı sıra, oda sıcaklığında ESR spektrumunda elde edilmemiş ancak tavlama deneyleri esnasında yeni bir merkez ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu yeni merkez 180 °C ve üstü sıcaklıklarda görülmektedir. Şekil 4.19a’da bu merkezin iki farklı sıcaklıktaki (180 ve 200°C) ESR spektrumları verilmiştir.



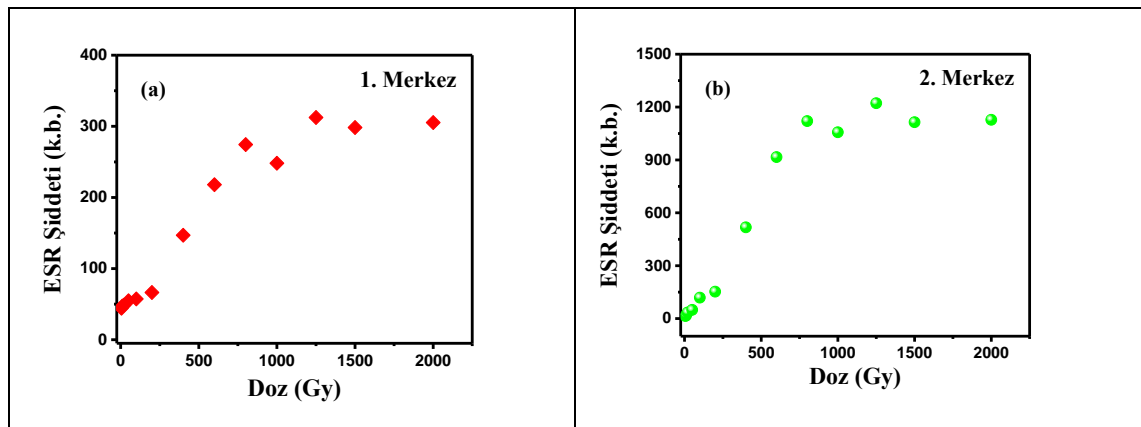
Şekil 4.19 a) İki farklı sıcaklıkta (180 ve 200°C) 3. merkezin ESR spektrumu, b) 3. merkezin kademeli tavlama deney sonuçları

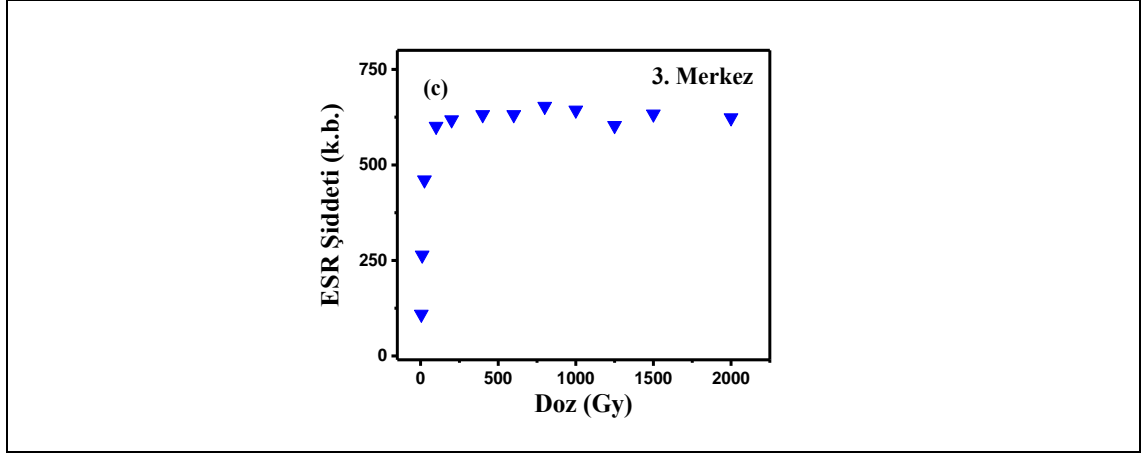
3. merkez olarak adlandırılan bu merkezin izotropik g tensörüne sahip olduğu ve değerinin 2.0127’ye eşit olduğu bulunmuştur. Bu merkez aşırı ince yapı özelliği göstermemektedir. Şekil 4.19b’de 3. ESR merkezinin kademeli tavlama (step annealing) deney sonuçları verilmiştir. Buna göre, merkezin tavlama davranışının 260 °C’ye kadar sabitken, 260 °C’den sonra bozunumu başlamakta ve 340 °C civarında tamamen yok olduğu görülmüştür.

2. merkezin oda sıcaklığında baskın olmasından dolayı 3. merkezin oda sıcaklığında ESR spektrumunda elde edilemediği düşünülmektedir. 3. merkez ancak 2. merkezin yok olduktan sonra yaklaşık 180°C sıcaklığından sonra gözlemlenmiştir. Aynı durum Watanabe vd. 2010 tarafından yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir. Literatürde $\text{LiAl}_5\text{O}_8:\text{Tb}$ (Singh ve Rao 2008) ve MgAl_2O_4 (Ibarra vd. 1991) atomları için izotropik g değerine sahip O^- merkezlerinin g değerlerinin, sırasıyla 2.0089 ve 2.0110 olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen g değeri dikkate alındığına benzer önceki çalışmalarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle, 3. ESR merkezi izotropik özelliğe sahip olan O^- merkezi olarak atanmıştır. Bu değerler Watanabe vd. (2010) tarafından verilen çalışmalarla uyum içerisinde dir.

4.3.5 Thermalox 995 BeO ESR doz cevap ve sönüm (fading) çalışması

BeO dozimetresi, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 5-2000 Gy arasında ışınlanarak ESR spektrumundaki her bir merkez için artan doz ile ESR şiddetinin değişimi araştırılmıştır. Şekil 4.20'de üç ESR merkezin için elde edilen şiddet değerinin artan doz ile ilişkisi verilmiştir. 5Gy'in altında herhangi bir ESR spektrumu gözlenememiş; 5Gy'den sonra ESR spektrumu elde edilmiştir. Şekil 4.20 a ve b incelendiğinde 1. ve 2. ESR merkezlerin birbirlerine benzer doz cevap davranışı gösterdiği görülmektedir. Her iki merkez de yaklaşık olarak 750 Gy'e kadar artış gösterirken, 750 Gy'den sonra satüre hale gelmektedir. 3. ESR merkezi diğer iki merkeze göre daha farklı bir doz cevap ilişkisine sahiptir. Bu merkez, artan dozla ESR şiddetinin 100 Gy'e kadar arttığı ve sonrasında satürasyona uğradığı görülmüştür (Şekil 4.20c).



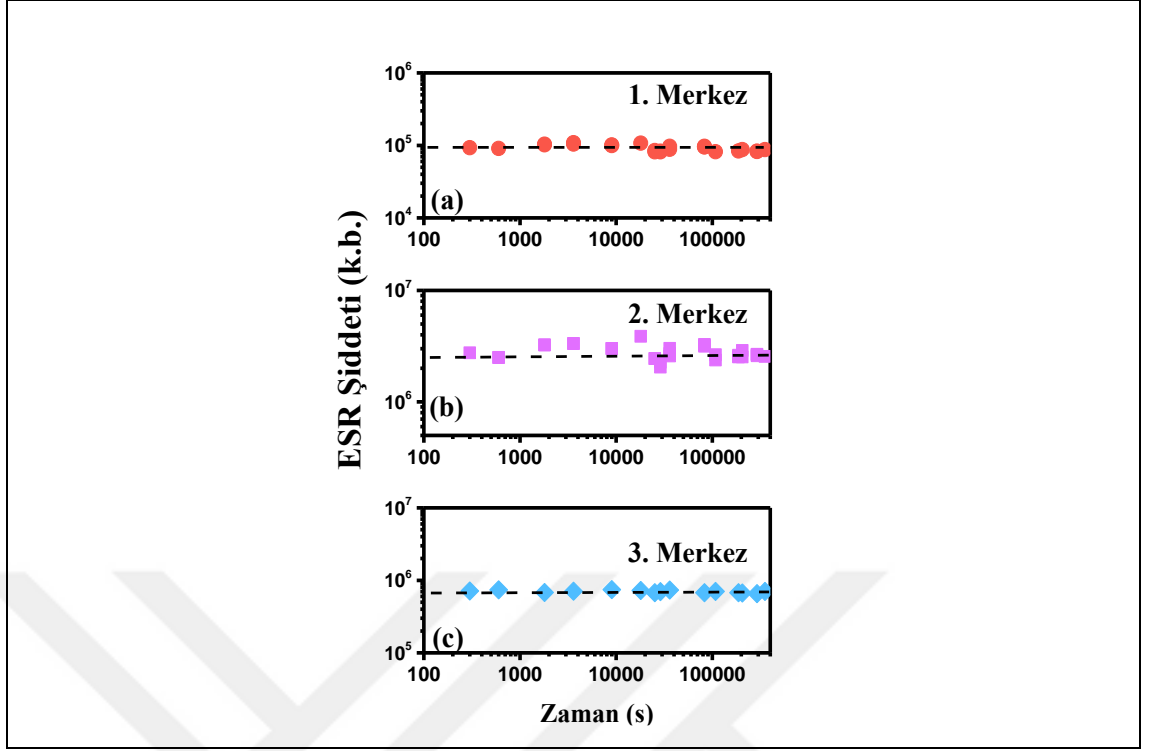


Şekil 4.20 5-2000 Gy arasında $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile ışınlanmış çubuk BeO dozimetresinin artan doz ile ESR şiddetinin değişimi (doz cevap); a) 1. merkez, b) 2. merkez, c) 3. merkez

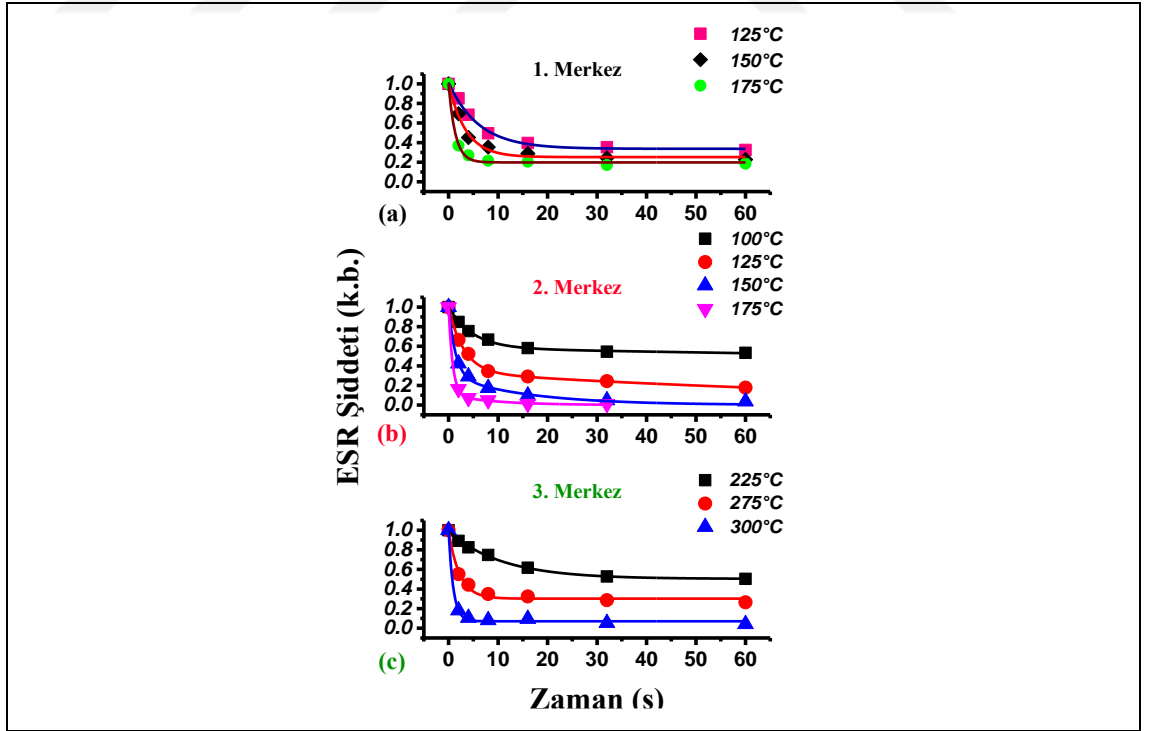
BeO dozimetrelerin ESR merkezlerinin zamanla olan değişimini incelemek amacıyla dozimetreler $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile 1.2 kGy değerinde ışınlanmıştır. Işınlanan dozimetrelerin ESR şiddet değerinin 4 gün boyunca olan şiddet değişimi incelenmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında karanlık ortamda alınmıştır. Şekil 4.21’de üç ESR merkezinin zamana karşı elde edilen ESR şiddet değişimleri verilmiştir. Buna göre, üç ESR merkezinde şiddet değerlerinin 4 gün boyunca değişmediği görülmüştür.

4.3.6 ESR izotermal ve ağartma (bleaching) deneyi sonuçları

Üç ESR merkezinin izotermal bozunum davranışı, 125°C ile 300°C sıcaklıkları arasında 60 dakika zaman aralıkları boyunca araştırılmıştır. Şekil 4.22’de her bir ESR merkezinin tavlama süresine karşı ESR şiddet değişimi verilmiştir. Şekilde verilen çizgiler fit eğrisini gösterirken, geometrik noktalar (kare, üçgen, daire) ise deneysel verileri temsil etmektedir.



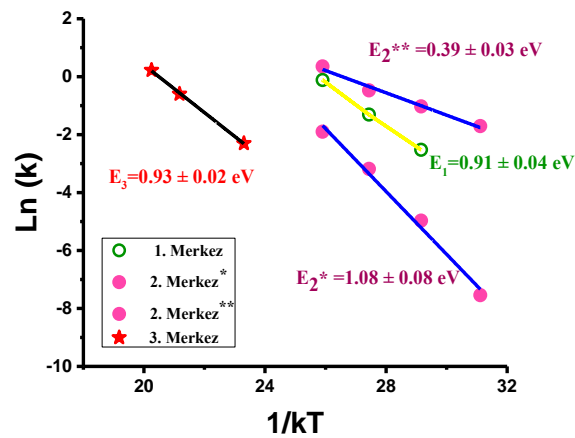
Şekil 4.21 ESR merkezlerinin zamanla sönüm deneyi, a) 1. merkez, b) 2. merkez, c) 3. merkez



Şekil 4.22 İzotermal bozunum eğrileri; a) 1. merkez, b) 2. merkez, c) 3. merkez

Tavlama sıcaklığı veya tavlama süresi arttıkça, ilgili ESR sinyalinin şiddeti azalmaktadır. Yapılan tavlama işlemi, ESR spektrumundaki g faktörü, aşırı ince yapı sabitleri gibi deneysel parametrelerde herhangi bir değişikliğe yol açmamıştır. 1. merkez (Al^{+2} merkezi) için tavlama sıcaklıkları; 125, 150 ve 175 °C’de; 2. merkez (anizotropik O^- merkezi) için 100, 125, 150 ve 175 °C’lerde ve 3. merkez (izotropik O^- merkezi) için 225, 275 ve 300 °C sıcaklıkları seçilerek izotermal eğriler elde edilmiştir. Şekil 4.22’deki izotermal bozunum eğrilerine dayanarak, merkezlerin uyduğu uygun kinetikler araştırılmıştır. Deneysel verilerini fit etmek için birinci, ikinci ve genel mertebeye kinetik denklemleri içeren çeşitli ifadeler kullanılmıştır. Bu fit işlemlerinin sonunda, birinci mertebeden bozunum eğrisinin (yani üstel bozulma), 1. ve 3. merkezler için (Al^{+2} ve izotropik O^- merkezi) elde edilen deneysel verilerini fit ettiği; 2. merkezin ise (anizotropik O^- merkezi) iki adet birinci mertebeden bozunum eğrisinin toplamına fit olduğu görülmüştür.

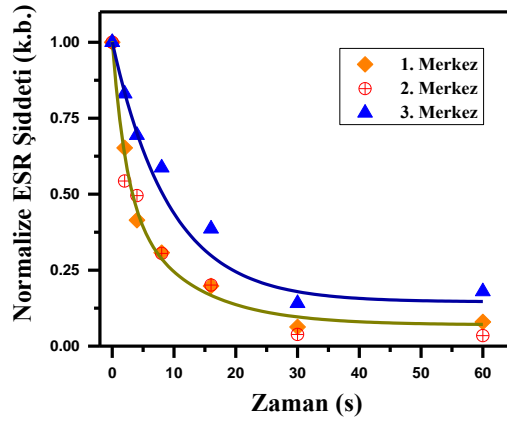
Oda sıcaklığında her bir ESR merkezine ait aktivasyon enerjileri ve ömür ifadeleri Arrhenius grafiğinin ($\ln I - 1/kT_{tavlama}$) kullanılması ile belirlenmektedir. Birinci dereceden kinetiğe göre $k(T)$ ifadesi sıcaklıkla üstel bir azalmaya, $k(T) = k_0 \times \exp(-E/k_B T)$ göstermektedir. Burada, k_B , Boltzmann sabitidir, k_0 , frekans faktörü ve T , mutlak sıcaklıktır. $\ln[k(T)]$ ’nin $1/kT$ ’ye göre grafiği lineer bir grafik verir. Bu grafiğin eğimi aktivasyon enerjisini, ara değeri ise $\ln(k_0)$ ’ı vermektedir. Ortalama ömür (τ) ise T oda sıcaklığı olmak üzere, $\tau = 1 / (k = k_0^{-1} \exp(\frac{E}{k_B T}))$ aracılığı ile hesaplanır (Ikeya 1993).



Şekil 4.23 ESR merkezleri için Arrhenius grafiği aracılığı ile elde edilen aktivasyon enerjileri

Şekil 4.23’de her bir ESR merkezi için eğim aracılığı ile belirlenen aktivasyon enerjileri görülmektedir. İzotropik özelliğe sahip O^- merkezi için aktivasyon enerjisi (0.93 ± 0.02) eV iken, anizotropik özellik gösteren O^- merkezi için iki adet aktivasyon enerjisi değerleri sırasıyla (1.08 ± 0.08) eV ve (0.39 ± 0.03) eV elde edilmiştir. Son olarak, Al^{+2} merkezi için aktivasyon enerjisi (0.91 ± 0.04) eV elde edilmiştir. Ortalama ömür (τ), anizotropik özelliğe sahip O^- merkezi için 1.21×10^1 yıl ve 2.42×10^2 dakika; izotropik özelliğe sahip O^- merkezi için 1.05×10^1 yıl ve Al^{+2} merkezi için 1.18 yıl bulunmuştur.

ESR merkezlerinin, ışıkla olan etkisinin araştırılması amacıyla, BeO dozimetre 2 mW/cm^2 çıkış gücüne sahip mavi ışığa 60 dakika boyunca maruz bırakılarak merkezlerin şiddet değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.24, üç ESR merkezinin 60 dakika boyunca olan şiddet değişimini göstermektedir. Buna göre, üç merkezinde ışıktan etkilendiği görülmüştür. 1. merkez olan Al^{+2} merkezinin 60 dakika sonundaki şiddet değeri başlangıçtaki şiddet değerine göre %77 azalma göstermiştir. 3. merkez olan izotropik O^- merkezi için de benzer bir düşüş gözlenmiştir. Yapılan deney sonucunda mavi ışıktan en fazla etkilenen merkezin 60 dakika sonunda başlangıçtaki şiddet değerine göre %97 oranında azalarak 2. merkez olan anizotropik O^- merkezi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.24 ESR merkezlerinin mavi ışık (2 mW/cm^2) altındaki davranışları (ağartma davranışı)

Tüm ESR merkezleri ışığa karşı duyarlı olduklarından, tüm merkezlerin OSL sinyali ile ilişki olabileceği sonucuna varılmıştır. Şekil 4.24’de 1. ve 3. merkezlerin bozunum eğrileri (ağartma eğrileri) Denklem (2.55)’e göre fit edilmiş bunun sonucunda bozunum

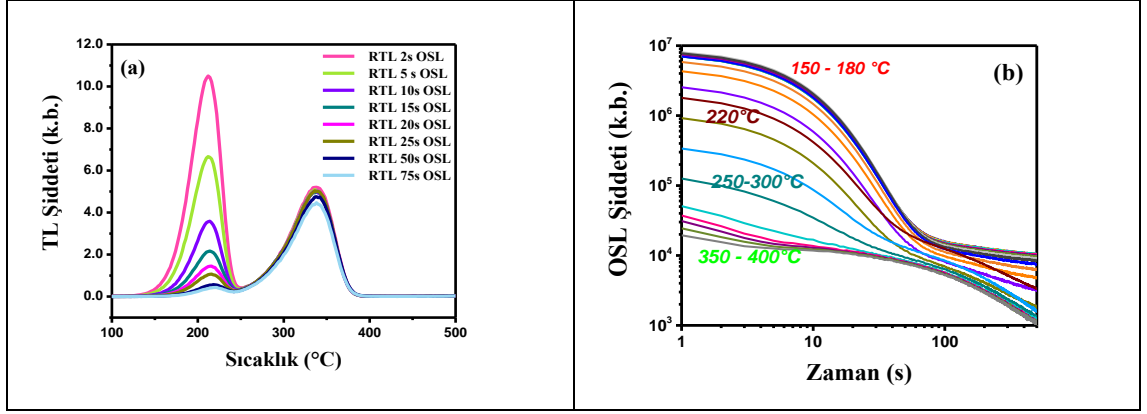
davranışının bir bileşene sahip bir bozunumdan kaynaklandığı görülmüştür. Ağartma (bleaching) işleminde elde edilen kinetik merteye terimi ağartma işlemi yorumlamada yardımcı olacak önemli parametrelerden biridir. Yapılan fit işlemi sonucunda, 1. ESR merkezi için $R_1 = 0.102 \pm 0.013$ ve 3. ESR merkezi için $R_3 = 0.22 \pm 0.09$ olarak elde edilmiştir. 2. merkez için elde edilen deneysel veriler sadece bir bozunum eğrisi kullanılarak fit işleminin yapılamayacağını göstermiştir.

4.3.7 Thermalox 995 BeO TL, OSL ve ESR korelasyon sonuçları

4.3.7.1 2. TL piki, OSL C₁ bileşeni ve 1. ESR merkezi (Al⁺²)

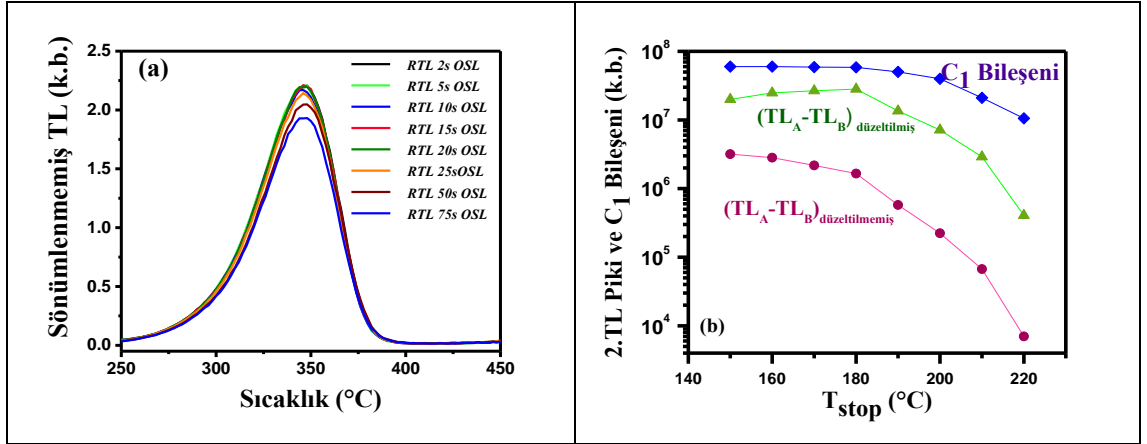
BeO dozimetrelerin 1. ve 2. TL piklerinin optik uyarımı sonucunda bozunduğu, 3. pikin ise ışıktan etkilenmediği bilinmektedir. OSL sinyalinin kaynağının sadece 3. TL pikinin olduğu Bulur ve Göksu (1998) ve Bulur ve Yeltik (2010) tarafından rapor edilmiştir. Ancak bu çalışmada, 2. ve 3. TL piklerinin her ikisinin de ağartmaya (bleaching) uğradığını fakat bunun farklı oranlarda olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.25a). Şekle göre, 2. TL piki küçük uyarım sürelerinde bile oldukça kolay bir şekilde ağartılmaktadır. 3. TL piki ise 50 - 75 s'lik bir uyarımdan sonra ağartma işlemi (bleaching) etkili olmaya başlamaktadır (Şekil 4.25a). Bunun yanı sıra, 3. TL pikinin ağartma (bleaching) kabiliyeti, termal sönümlenme olayından da etkilenmektedir (Aşlar vd. 2017a, Bulur ve Yeltik 2010). Termal sönümlenme olayının etkisinin düzeltilmesi için Çizelge 4.1'de verilen W ve C parametreleri kullanılarak pikler üzerinde yeniden yapılandırma işlemi (rekonstrüksiyon) uygulanmıştır. Şekil 4.25a'da elde edilen RTL eğrilerine rekonstrüksiyon uygulanarak Şekil 4.26a'da 3. TL pikinin ağartma davranışı ayrıntılı olarak verilmiştir.

240°C'den daha yüksek T_{stop} sıcaklıkları için ağartılmış 2. TL pikinin şiddeti ağartılmamış TL şiddetine kıyasla daha yüksek olması 3. TL pikinin ağartma kabiliyeti ile ilişkilidir (Şekil 4.16a). Bu özellik, materyalde fototransfer olayının gerçekleştiğine dair bir kanıt sunmaktadır. Ayrıca, transfer olayının etkisinin varlığını destekleyen bir başka kanıt, 1. OSL bileşenin (C_1) 240-270°C sıcaklık aralığındaki şiddet değerinde küçük miktarda bir artış gözlenmesidir (Şekil 4.17).



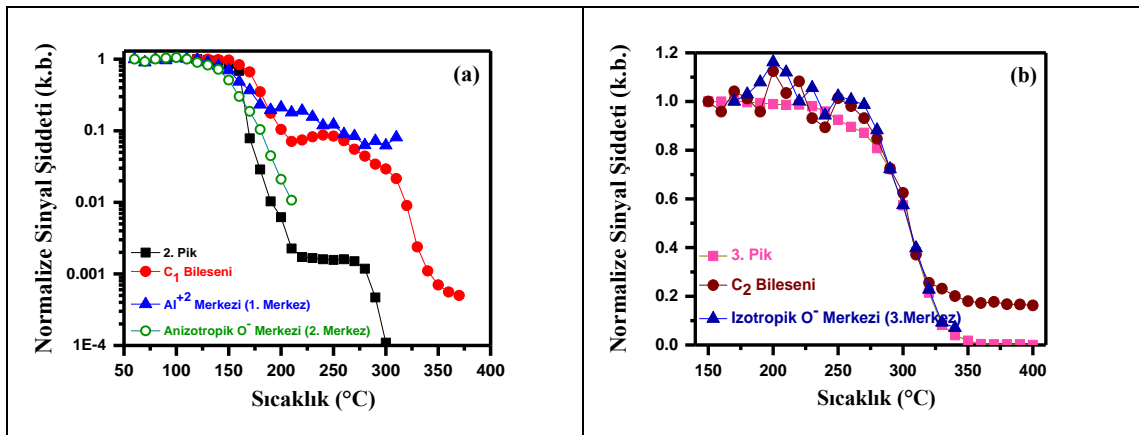
Şekil 4.25 Farklı OSL uyarım zamanlarına göre TL ışınma eğrilerinin değişimi, c) T_{stop} sıcaklıklarına göre oda sıcaklığında elde edilen CW-OSL eğrileri

Elde edilen bu bulgular Yukihara vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada 250-275°C ön ısıtma sıcaklıklarında benzer bir artış olduğu durumu ile uyumludur. BeO materyalinde fototransfer olayının varlığı ilk olarak Bulur ve Göksu (1998) tarafından ortaya atılmış; Bulur (2007) ve Yukihara (2019) tarafından detaylı olarak araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda 3. TL piki ile ilişkili tuzak merkezinin transfer olmuş yüklerin kaynağı olduğu rapor edilmiştir.



Şekil 4.26 Rekonstrüksiyon işlemi ve TL ışınma eğrileri, a) Şekil 4.25a'da elde edilen 3. pik için RTL grafiklerinin rekonstrüksiyonu, b) Şekil 4.16'da elde edilen 2. pik durumunda $(TL_A - TL_B)$ TL şiddet değerlerinin rekonstrüksiyon ile düzeltilmiş ve düzeltilmemiş hallerinin T_{stop} sıcaklığına göre değişimi (A: ağartmaya uğramış; B: ağartmaya uğramamış veriler) ve Şekil 4.17'de verilen C_1 bileşenin T_{stop} sıcaklığına göre değişimi

Elde edilen bu verilerin ışığında OSL bileşeni olan C_1 bileşeni ile 2. TL pikinin birbirileri ile ilişkili olduğu görülmüştür. Şekil 4.14'deki OSL analizine göre, herhangi bir sıcaklık işlemi yapılmadan OSL sinyaline iki bileşenin toplam katkıları; C_1 bileşeni için % 92 ve C_2 bileşenin % 8'dir ve bu iki sinyal şiddet bakımından birbirlerinden bir merteye farklılık göstermektedir. Şekil 4.17'de C_1 bileşeni 240°C sıcaklıkta bir merteye azalmaktadır (Şekil 4.16a'da TL pikinin yok olduğu sıcaklık değeri). Şekil 4.18'de verilen Al^{+2} iyonunun (1. merkez) kademeli tavlama davranışının, iki aşamalı olarak azaldığı görülmektedir. İlk bozunma 100-170 °C arasında, bunu takiben ikinci bozunma 180 -240 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bu sonuçlar, Watanabe vd. (2010) tarafından elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Şekil 4.27a, 2. TL pikini (kareler), C_1 bileşeni (noktalar) ile 1. ve 2. ESR merkezleri (sırasıyla üçgen ve çember) için elde edilen kademeli tavlama sonucunu göstermektedir. Şekildeki tüm değerler başlangıç şiddetine normalize edilerek verilmiştir. 2. TL pikinin 180-200 °C'den yüksek sıcaklıklarda tamamen yok olmasından sonra 2. ESR merkezinin haricinde tüm sinyallerin bozunumunda ikinci bir plato gözlenerek iki aşamada bozunmuştur. Bu sıcaklık aralığındaki plato bölgesi, 2. TL piki ve C_1 bileşeni için hemen hemen aynı iken 1. ESR merkezi için düşük sıcaklıklara kaydığı görülmüştür. Bu sıcaklık bölgesi aralığında yükler, daha derin tuzaklardan 2. TL piki, C_1 bileşeni ve Al^{+2} merkezinden sorumlu merkeze transfer olmaktadır. Şekil 4.16a, 4.17, 4.18a, 4.27a'ye göre, 180-200°C'den daha yüksek sıcaklıklardaki geniş plato bölgesi hem 2. TL pikinin hem de C_1 bileşenin bozunma karakteristiği ile ilişkili olarak transfer edilen yüklerin kaynağının yalnızca 3. TL piki olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.27 Ortak kademeli tavlama deneyi sonuçları, a) 2. TL piki, C_1 bileşeni, 1. ve 2. ESR merkezi, b) 3. TL piki, C_2 bileşeni, 3. ESR merkezi

Yukarıda bahsedilen tüm özellikler, C_1 bileşeninin ve ana dozimetrik pik olan 2. TL piki arasında mümkün bir korelasyonun olduğunu ve her iki lüminesans sinyalinin, Al^{+2} merkezine atfedilen 1. ESR merkezi ile ilişkilendirebileceğini göstermiştir. Al^{+2} merkezinin ağartılma (bleaching) kabiliyeti, literatürde ilk kez rapor edilmiştir (Şekil 4.24). Ayrıca, 1. ESR merkezinin ağartma bozunum kinetiğinin ($R_1 = 0.102 \pm 0.013$) ve C_1 bileşeni için elde edilen bozunum kinetiği ($R = 0.043 \pm 0.005$) ile benzerlik gösterdiği bulunmuştur. Elde edilen bu iki sinyalin ağartma bozunum kinetiğinin benzer davranış sergilmesi bu iki sinyal arasındaki korelasyonun varlığını doğrulamaktadır.

4.3.7.2 3. TL piki, OSL C_2 bileşeni ve 3. ESR merkezi (İzotropik O^- merkezi)

3. TL piki, C_2 bileşeni ve 3. ESR bileşenin kademeli tavlama (step annealing) deneyi sonuçlarına göre üç merkezde tek adımda, sırasıyla 240-350 °C (Şekil 4.16b), 270-330 °C (Şekil 4.17) ve 260- 330 °C (Şekil 4.19b) sıcaklık aralıklarında bozunmaktadır. Şekil 4.27b, bu üç sinyal için ilk şiddet değerine göre normalize edilmiş kademeli tavlama (step annealing) deneyi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.16b, 4.17, 4.19b ve 4.27b'ye göre, O^- iyonu olarak atanan 3. ESR merkezinin 3. TL pikinin bozunumundan sorumlu tuzak ile ilişkili olabileceği öngörülmektedir. Buna ek olarak, bu bileşenin C_2 bileşeni ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu korelasyon Şekil 4.22'de literatürde ilk defa sunulan 3. ESR merkezinin ağartma eğrisi; diğer iki ESR merkezinin ağartılmasından daha yavaştır. Bu sonuç, Şekil 4.25a ve 4.26a'ya göre 3. TL piki için gözlemlenen daha düşük ağartma hızı ile örtüşmektedir. Ayrıca 3. ESR merkezinin ağartma bozunum kinetiği ($R_3 = 0.22 \pm 0.09$), C_2 bileşenin bozunum kinetiği ($R = 0.14 \pm 0.05$) ile uyum içerisindedir. Şekil 4.17'ye göre, 3. TL piki tamamen yok olsa bile OSL eğrileri varlığını sürdürmektedir.

4.3.8 ESR merkezlerinin aktivasyon enerjilerinin belirlenmesi

ESR merkezlerinin aktivasyon enerjileri Arrhenius eşitliği ile tüm merkezler için hesaplanmıştır. Anizotropik özellik gösteren ve iki ayrı birinci mertebe kinetik ifadesinin toplamına uyan O^- merkezi için aktivasyon enerji değerleri, (0.39 ± 0.03) ve (1.08 ± 0.08) eV olarak, Al^{+2} merkezi ve izotropik özellik gösteren O^- merkezi için aktivasyon enerjileri sırası ile (0.91 ± 0.04) ve (0.93 ± 0.02) eV olarak elde edilmiştir. TL ısıma eğrilerinin

dekonvolüsyon sonuçlarına göre, aktivasyon enerjileri 2. pik için (1.11 ± 0.04) eV, 3. pik için (1.24 ± 0.04) eV bulunmuştur. ESR merkezlerinin aktivasyon enerjileri ile TL piklerinin aktivasyon enerjileri karşılaştırılması, bu merkezler ve pikler arasındaki korelasyona ilave bir bilgi sağlamamaktadır. TL ışımaya eğrilerinin dekonvolüsyonuna göre elde edilen aktivasyon enerji değerleri, frekans faktörlerine bağlı 0.2-0.3 eV'lik enerji farklılıkları göstermektedir.

O⁻ merkezinin (anizotropik) düşük değere sahip olan aktivasyon enerjisi, oda sıcaklığında görünmeyen ancak sıcaklık arttıkça daha baskın hale gelen 3. ESR merkezinin kısmi bozunumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, 2. ESR merkezinin düşük aktivasyon enerjisi, anizotropik O⁻ merkezinin bir hol merkezi olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, Şekil 4.27a'ya göre, 2. merkezin kademeli tavlama davranışına göre, anizotropik O⁻ merkezinin 2. TL piki ile ilişkili olabileceği öngörülmektedir. Şekil 4.27a ve ikinci merkezin kademeli tavlama deney sonuçlarına (Şekil 4.18b) göre anizotropik O⁻ merkezi hem 2. TL piki hem de C₁ bileşeni ile ilişkilidir. Elde edilen sonuçlar Watanabe vd. (2010) tarafından elde edilen sonuçlarla uyumlu bulunmuştur.

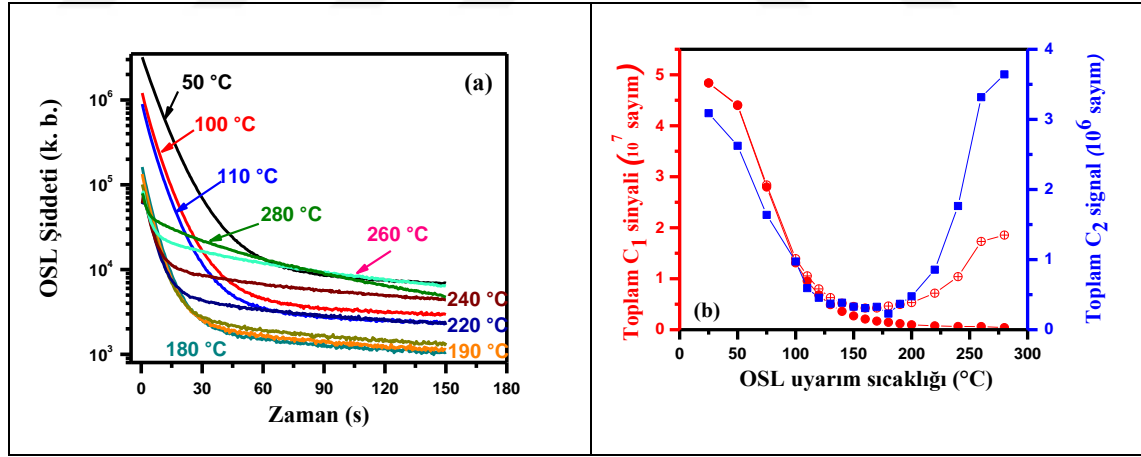
4.3.9 Thermalox 995 BeO transfer olayı

Teorik olarak, ağartılmamış sinyal ile ağartılmış sinyal arasındaki farkın OSL nedeniyle ağartma işlemi sonucunda kaybolan TL sinyaline karşı gelmesi ve ölçülen OSL sinyalin bunu temsil etmesi beklenir. Ancak, ölçümün gerçekleştirildiği Hoya U-340 filtresinin emisyon dalga boylarında, toplam CW-OSL sinyalinin şiddetinin, TL şiddetinden bir mertebede daha fazla olduğu görülmüştür. Bu yüksekliğin sebebinin, termal sönümlenme etkisinin varlığına ve sinyalin daha yüksek sıcaklıktaki piklerden kaynaklanan fototransfer olayının yol açtığı düşünülmektedir. 2. TL piki ile C₁ bileşeni arasında uygun bir korelasyon bulunduğu için, Şekil 4.26b'de 2. pik için Çizelge 4.1'de verilen ortalama W ve C parametreleri kullanılarak termal sönümlenme düzeltilmesi uygulanmış ve uygulanmamış iki sinyal arasındaki fark ($TL_A - TL_B$) ve C₁ bileşeni için elde edilen sinyalin T_{stop} sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. 240 °C'den yüksek sıcaklıklar için transfer olayının etkisi açıktır; Şekil 4.26b, $TL_A > TL_B$ olduğu sıcaklık aralığı ile sınırlanmıştır. Rekonstrüksiyon işleminden sonra elde edilen düzeltilmiş $TL_A - TL_B$ farkı,

C_1 bileşeni ile daha uyumlu bir değer haline gelmiş ancak yine de, düzeltilmiş TL_A - TL_B sinyal farkı, C_1 bileşeni için elde edilen sinyale eşit çıkmamıştır. Bu sonuç, bu farklılığın sebebinin tek nedenin termal sönümlenme olayı olmadığını göstermiştir. Bunun sebebinin BeO dozimetresinin fototransfer yoluyla derin tuzaklardan tuzaklara yük transferi olduğu düşünülmektedir. BeO dozimetresinde derin tuzakların varlığı, Bulur (2007) tarafından çalışmada gösterilmiştir. Bu çalışmada, 400-625 °C sıcaklık değerleri arasında TL ışımaya eğrisi incelenmiş ve 550°C civarında geniş bir TL sinyalini gözlemlenerek fototransfere sebep olan derin tuzakların varlığı rapor edilmiştir.

4.3.10 Thermalox 995 BeO TA-OSL sinyalinin incelenmesi

500 °C'den yüksek sıcaklıklarda gözlemlenen çok derin tuzakların (VDT) varlığı, termal asistan OSL (TA-OSL) sinyali yardımıyla incelenebilmektedir (Polymeris 2016). Şekil 4.28a, 25 ile 280 °C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilen CW-OSL ölçümlerini göstermektedir. Bu eğriler dekonvole edilerek elde edilen toplam OSL bileşenlerinin (C_1 ve C_2) şiddet değerlerinin uyarım sıcaklığına karşı değişimi Şekil 4.28b'de verilmiştir.



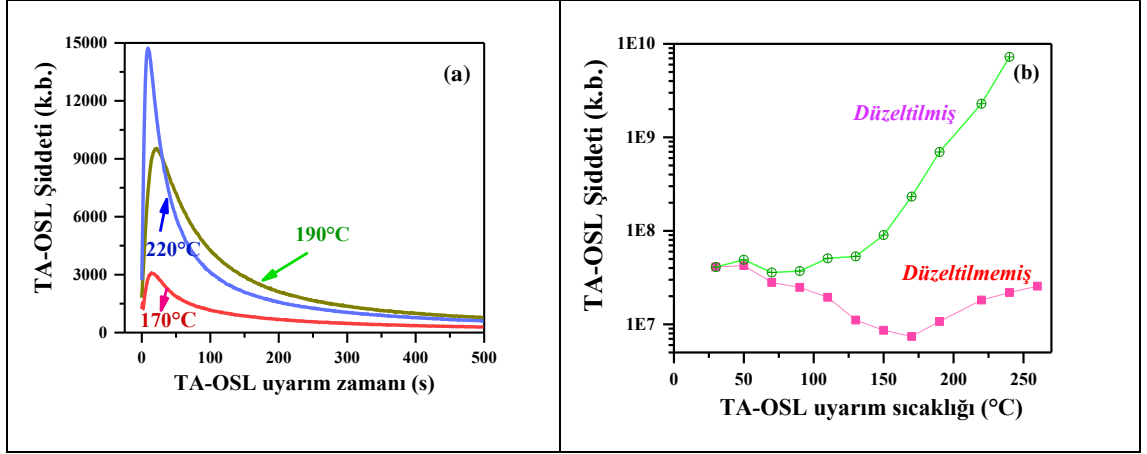
Şekil 4.28 a) Farklı uyarım sıcaklıklarında (25 ve 280 °C) CW-OSL ölçümleri, b) C_1 bileşeni (kırmızı noktalar) ve C_2 bileşeni (mavi kareler) toplam sinyal şiddet değerlerinin OSL sıcaklıklarına göre değişimi; OSL sinyali düşük sıcaklıkta ölçüldüğü için, açık noktalar rekonstrüksiyona uğramış C_1 bileşeni sinyalidir.

Şekil 4.28a'da, standart OSL teorisi ile uyumlu olarak OSL eğrilerinin eğimi 180 °C'ye kadar artarken artan sıcaklık arttıkça şiddet değerlerinin azaldığı görülmektedir (Yukihara

ve McKeever 2011). Ancak, uyarım sıcaklığı arttıkça, OSL eğrileri, şiddet bakımından değişime uğramaktadır. Standart OSL teorisinin aksine, her iki bileşenin şiddet değeri 190 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda artış göstermektedir. Bu artış, yeniden yapılandırma (rekonstrüksiyon) işlemi olmadan bile C₂ bileşeni için oldukça belirgindir (Şekil 4.28b'deki mavi kareler). Ancak bu durum C₁ bileşeni için, sadece yeniden yapılandırmadan (rekonstrüksiyon) işleminden sonra belirgin hale gelmektedir (Şekil 4.28b'deki kırmızı açık noktalar).

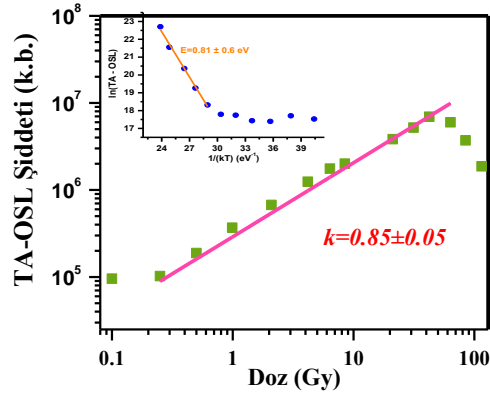
Elde edilen sonuçlara göre derin tuzaklardan her iki TL pikine (2 ve 3.) transfer gerçekleşmektedir. Transfer oranı, uyarım sıcaklığı arttıkça artmaktadır. Derin tuzaklardan transfer oranı, 3. TL pikinden sorumlu tuzak için oldukça yüksektir. Bu olay, C₂ bileşenin kademeli tavlama davranışını açıklamaktadır. C₁ bileşeni, sönmülmüş TL'ye kıyasla niceliksel olarak çok farklı olmasına rağmen, 2. ve 3. TL pikleri var olduğunda mevcuttur. TL sinyali 400 °C'de yok olduğunda bu bileşen de yok olacaktır. Diğer yandan, C₂ bileşeni derin tuzaklardan sürekli transfer nedeniyle, TL sinyali tamamen yok olsa bile göreceli olarak yüksek şiddette mevcut olmaya devam edecektir. C₂ bileşeni ancak daha derinde yer alan tuzaklardaki elektronlar tükendiğinde yok olacaktır.

OSL sinyalinin artan uyarım sıcaklığı ile artışı, tüm termal asistan uygulamalarında bilinen bir özelliktir (Chen ve McKeever 1997). Bu özellik, BeO dozimetresinde TA-OSL sinyalinin varlığını göstermiştir. Dozimetreler için öncelikle TA-OSL sinyalleri için optimum uyarım sıcaklığı Bölüm 2.5'de Çizelge 2.1'deki protokol aracılığı ile belirlenmiştir. Bu protokolda, 1. adımda maksimum sıcaklık 600°C, test dozu 5 Gy ve *T_i* uyarım sıcakları ise 25-260°C arasında araştırılmıştır. Çizelge 2.1'de verilen protokol uygulandığında oda sıcaklığından 260°C sıcaklığına pik şekline benzer TA-OSL sinyalleri elde edilmiştir (Şekil 4.29a). Bu şekil çok derin tuzaklardan (VDT) ana dozimetrik pik (2.pik) ve 3. piklere şiddetli transfer olayının olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.29 a) Seçilmiş üç farklı sıcaklık değeri (170, 190 ve 220 °C) için TA-OSL eğrileri; b) Toplam alan değerlerine göre elde edilen TA-OSL şiddet değerlerinin uyarım sıcaklığına göre değişimi; düzeltilmiş ve düzeltilmemiş veriler termal sönümlenme düzeltmesi olduğu ve olmadığı durumları göstermektedir.

Optimum uyarım sıcaklık değeri sinyal/gürültü oranının maksimum verecek değer 220°C olarak seçilmiştir. Daha sonraki TA-OSL deneylerinde bu değer sabit tutularak işlemler gerçekleştirilmiştir. TA-OSL sinyalinin altında kalan alan değerleri dikkate alınarak artan uyarım sıcaklıklarına göre değişimi Şekil 4.29b'de verilmiştir. Termal sönümlenme düzeltmesi yapılmadan sinyallerin azaldığı görülmektedir. Termal sönümlenme düzeltmesi yani rekonstrüksiyon Çizelge 4.1'de ikinci pik için ortalama W ve C parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiş bunun sonucunda artan uyarım sıcaklığı ile artan TA-OSL şiddet değerleri elde edilmiştir. TA-OSL sinyalinin dozimetlerde kullanımının esas amacı materyalde bulunan çok derin tuzakların (VDT) kullanılması sayesinde yüksek doz seviyelerine ulaşılabilmesi ve bu sayede yüksek doz değerlendirmeye fırsat sunmasıdır. Bu amaçla, BeO TA-OSL sinyalinin doz cevap eğrisi $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6.5, 9, 15, 30, 43, 65, 85 ve 110 Gy doz değerlerinde araştırılmıştır (Şekil 4.30). Şekildeki iç kısımda farklı Arrhenius grafiği görülmektedir. Bu grafik aracılığı ile E_A termal asistan aktivasyon enerjisi elde edilmiştir.



Şekil 4.30 Thermalox 995 BeO dozimetresi 0.1 ile 110 Gy doz değerindeki toplam alana göre TA-OSL sinyalinin doz cevap eğrisi

TA-OSL doz cevap eğrisi, $I = A \times D^k$ eşitliğine fit edilmiştir. Bu fit sonucunda Şekil 4.30'dan görüleceği gibi k (lineerlik katsayısı) değeri 0.85 ± 0.05 elde edilmiştir. k değerinin 1'e eşit olduğu durumlar lineerliği, 1'den küçük ve büyük olması ise sırasıyla lineeraltı (sublineer) ve lineerüstü (supralineer) davranışa uyduğunu göstermektedir. TA-OSL sinyali için k değerinin 1'den küçük olması sublineer bir davranış gösterdiğini kanıtlamıştır. Soni vd. 2013a tarafından yapılan çalışmada $Al_2O_3:C$ dozimetresinin TA-OSL sinyali 10 kGy'e kadar lineer davranış göstermiştir. Bunun yanısıra, kuartz mineralinin TA-OSL doz cevap eğrileri Kitis vd. 2010, Şahiner 2015 tarafından incelenmiş ve kGy mertebesinde doz değerlerinin ölçülebileceği ve buna bağlı olarak daha yaşlı örneklerin tarihlendirilebileceği rapor edilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise BeO dozimetresinin TA-OSL sinyalleri 0.1 ile 110Gy arasında lineer olmayan bir davranış sergilemiştir. E_A , termal asistan aktivasyon enerjisi ise 0.81 ± 0.6 eV olarak elde edilmiştir.

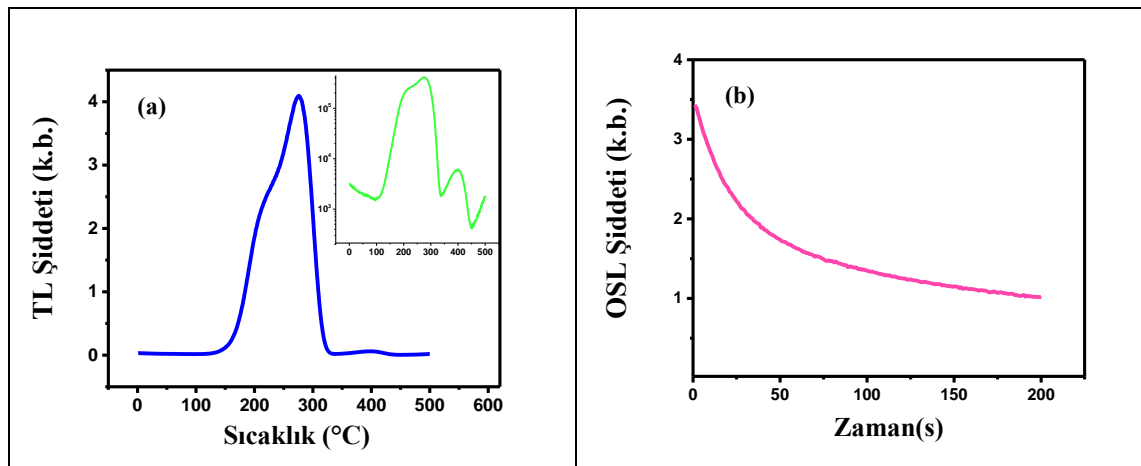
Sonuç olarak, 2. ve 3. TL pikleri, C_1 ve C_2 CW-OSL bileşenleri, 1. 2. ve 3. ESR merkezleri arasındaki uygun korelasyon araştırılmıştır. Derin tuzaklardan sığ tuzaklara şiddetli fototransfer olayı sebebiyle sinyal şiddetlerine dayalı niceliksel korelasyon kullanılmamıştır. Korelasyon, yukarıda bahsedilen sinyallerin ağartma (bleaching) ve kademeli tavlama (step annealing) davranışları incelenerek gerçekleştirilmiştir. ESR merkezlerinin ağartma (bleaching) ve kademeli tavlama (step annealing) olayları literatürde ilk defa gerçekleştirilmiştir. Korelasyon sonucunda, C_1 bileşenin 2. TL piki ile 1. ve 2. ESR merkezleri (Al^{+2} ve anizotropik O^- merkezleri, sırasıyla) ilişkili

olabileceği görülmüştür. 3. TL piki ile C₂ bileşeni ve 3. ESR merkezi (izotropik O⁻ merkezi) arasında güçlü bir korelasyonun olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, derin tuzaklardan 2. ve 3. TL pikine ve 3. TL pikinden 2. TL pikine transfer olayı gözlemlenmiştir. Rekonstrüksiyon işlemi ve TA-OSL sinyallerinin incelenmesi sonucunda, transfer olayının 3. TL pikine karşı gelen tuzaga etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle, TL pikleri yok olsa bile OSL eğrileri ölçülebilmektedir.

4.4 Radkor BeO dozimetresi TL ve OSL Kinetik Çalışması

Radkor Personel Dozimetre Şirketinden satın alınan BeO dozimetrelerin tavlama sıcaklığı, TL, OSL özellikleri, doz cevap eğrileri, minimum ölçülebilen doz değerleri, kademeli tavlama (step annealing) deneyleri, TL ve OSL sinyalleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu dozimetreler tüm çalışma boyunca Thermalox 995 BeO dozimetrelerden farkını belirtmek amacıyla Radkor BeO olarak adlandırılmıştır.

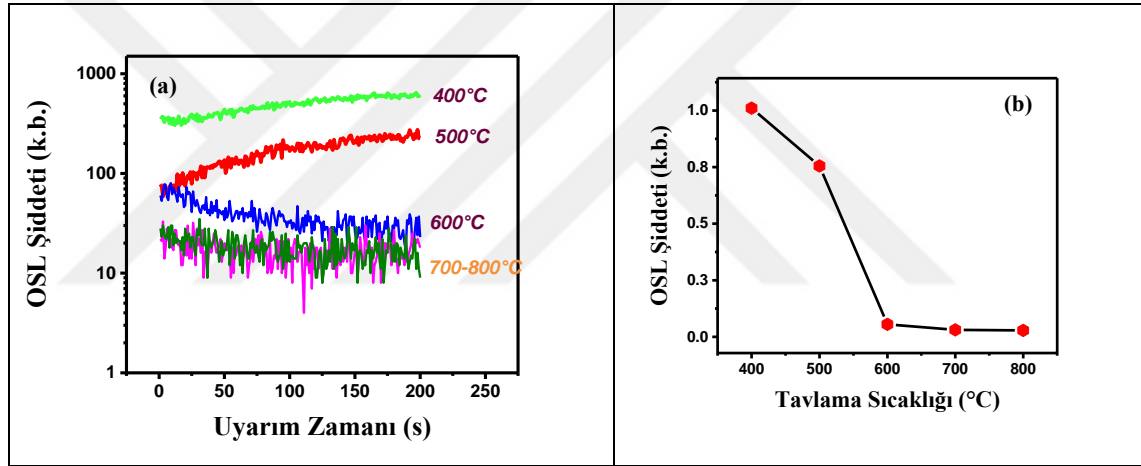
Şekil 4.31a, ⁹⁰Sr/⁹⁰Y kaynağı ile 1 Gy ışınlanan Radkor BeO'nin 500°C'ye kadar 2°C/s'lik ısıtma hızı ile ısıtılması sonucunda elde edilen TL ışınma eğrisi görülmektedir. Şekilde grafiğin iç kısmında yer alan grafik logaritmik ölçekte çizdirilmiştir. Şekil 4.31b, dozimetrenin mavi ışık ile sürekli dalga modunda %50 optik gücünde 200s boyunca uyarım sonucunda elde edilen OSL eğrisini göstermektedir.



Şekil 4.31 a) Radkor BeO TL ışınma eğrisi, b) Radkor BeO OSL eğrisi

4.4.1 Radkor BeO tavlama çalışması

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 3 Gy ışınlanmış BeO dozimetreler fırında 400 ile 800 °C sıcaklıkları arasında 20 dakika boyunca fırınlanmış bunu takiben hızlı soğumaya bırakılmıştır. Ardından dozimetreler ışığa maruz bırakılmadan Risø TL/OSL okuyucuda 40% optik gücünde 200s boyunca mavi ışık altında uyarılarak OSL eğrileri elde edilmiştir. Farklı tavlama sıcaklığına göre elde edilen OSL eğrileri Şekil 4.32a’da verilmiştir. Her bir sıcaklık değeri için üç adet dozimetre kullanılmış ve her bir tavlama sıcaklığında elde edilen OSL eğrilerinin toplam alan şiddeti değerleri daha önceden belirlenmiş kalibrasyon katsayıları ile çarpılarak bulunmuştur (Şekil 4.32b). Şekilde toplam OSL şiddet değerleri 400°C’de elde edilen toplam OSL şiddetine normalize edilerek oluşturulmuştur.



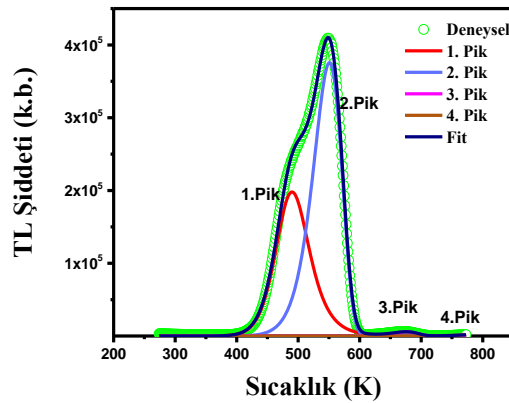
Şekil 4.32 a.) 3 Gy ışınlanmış Radkor BeO dozimetrelerin 20 dakika boyunca farklı tavlama sıcaklıkları (400 ile 800 °C aralığında) ile tavlama sonrasında elde edilen OSL eğrileri, b) Farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen toplam OSL alan şiddet değerleri

Şekil 4.32a’ya göre dozimetreler, 400 ile 600°C arasında OSL sinyali vermiştir. Bu sonuç, bu sıcaklık değerleri arasında dozimetredeki tuzakların tam olarak boşalmadığını göstermektedir. Şekil 4.32a’dan görülebileceği gibi Radkor BeO dozimetresinin TL ışınma eğrisindeki piklerin 500 °C sonunda bittiği görülürken (Şekil 4.31a), 500°C’de tavlama dozimetrelerin OSL sinyali verdiği görülmektedir. Bu sonuç, Radkor dozimetresinde ışık ile uyarım sonucunda derin tuzaklardan OSL tuzaklarına yük transferinin olduğu yani fototransfer OSL olayının varlığını göstermiştir. Şekil 4.32b’den görülebileceği gibi

tavlama sıcaklığının artması ile OSL sinyal şiddeti düşmekte ve 700 ile 800°C aralığında doğal sayım (background) değerine ulaşmaktadır. Bu sebeple Radkor dozimetreler için tavlama sıcaklığı 700 ile 800°C arasından seçilmelidir. Bu çalışma sonunda Radkor BeO için optimum tavlama sıcaklığı 750°C sıcaklığında 20 dakika seçilmiş ve tüm çalışma boyunca kullanılmıştır.

4.4.2 Dekonvolüsyon metodu (CGCD) sonuçları

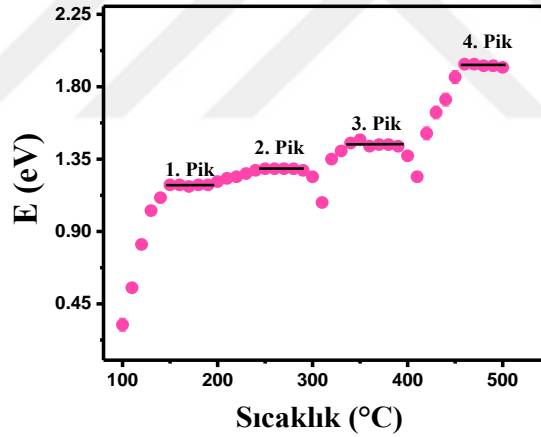
TL kinetik parametrelerinin araştırılması amacıyla $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 1 Gy ışınlanan Radkor BeO dozimetrelerin TL ışıma eğrisi, Bölüm 2.7.7'de verilen Denklem (2.49) aracılığı ile ışıma eğrisi dekonvole edilmiştir. Şekil 4.33, Radkor BeO dozimetrenin dekonvolüsyon işlemi göstermektedir. Burada, yeşil renkle gösterilen açık çemberler deneysel verileri, koyu mavi çizgi fit eğrisini göstermektedir. Dekonvolüsyon işlemi sonucunda TL ışıma eğrisinin 4 adet pikten oluştuğu görülmüştür. Fit işleminde elde edilen FOM değeri %3'dür. Elde edilen pikler için aktivasyon enerjileri sırasıyla, 1. pik için, 1.08 eV; 2. pik için, 1.07 eV; 3. pik için, 1.67 eV ve 4. pik için, 1.83 eV olarak bulunmuştur. İkinci ve üçüncü pikler için kinetik merteye terimi 1 iken, birinci ve dördüncü pikler için kinetik merteye teriminin 2 olduğu görülmüştür. Buna göre birinci ve dördüncü piklerin ikinci merteye kinetiğe, ikinci ve üçüncü piklerin birinci merteye kinetiğe uyduğu görülmüştür. Frekans faktörleri ise, dört pik için sırasıyla 1.2×10^{10} ; 2.3×10^8 ; 2.9×10^{11} ve $9.3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen tüm değerler Çizelge 4.5'de sunulmuştur.



Şekil 4.33 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 1 Gy ışınlanmış Radkor BeO dozimetresinin dekonvolüsyonu

4.4.3 Kesikli ışıma eğrisi tekniği sonuçları

Radkor BeO dozimetreler 100°C'den başlanarak 10°C'lik sıcaklık artışları ile 500°C'ye kadar ısıtılarak Bölüm 2.7.4'de belirtildiği gibi her bir sıcaklık değerinde $\ln I - 1/kT$ grafiği oluşturularak grafiğin eğimi aracılığı ile aktivasyon enerjisi değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.34'de her bir sıcaklık değerine göre elde edilen aktivasyon enerjisine karşın sıcaklık grafiği görülmektedir. Elde edilen şekle göre, 160-200°C, 230-270°C, 330-380°C ve 450-490°C sıcaklık aralıklarında olmak üzere 4 adet plato bölgesi elde edilmiştir. Elde edilen her bir plato materyaldeki toplam pikleri göstermektedir. Bu yöntemle göre hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri, 1. pik için, 1.18 ± 0.03 eV; 2. pik için 1.26 ± 0.03 eV; 3. pik için 1.49 ± 0.04 eV ve 4. pik için, 1.93 ± 0.04 eV olarak bulunmuştur. Frekans faktörleri ise, 1. pik için 1.6×10^6 s⁻¹, 2. pik için 1.2×10^7 s⁻¹, 3. pik için 3.4×10^6 s⁻¹ ve 4. pik için 6.7×10^7 s⁻¹ elde edilmiştir. Tüm değerler Çizelge 4.5'de özet halinde verilmiştir.



Şekil 4.34 Radkor BeO dozimetresi için kesikli ışıma eğrisi tekniği sonuçları

Çizelge 4.5'e göre her iki metota göre elde edilen aktivasyon enerji değerleri, 1. ve 2. pik hariç diğer pikler için uyumlu elde edilmiştir. Elde edilen frekans faktörleri ise, kesikli ışıma eğrisinde dekonvolüsyon yöntemine göre daha düşük elde edilmiştir. Farklılığın sebebinin Radkor BeO dozimetrelerde her bir pikin termal sönümlenme olayından etkilenme oranlarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Metotlar arası bu farklılığın giderilmesi için Radkor BeO için termal sönümlenme parametrelerinin belirlenip piklere termal sönümlenme düzeltilmesi (rekonstrüksiyon) yapılması gerekmektedir. Ancak bu durumda elde edilen termal

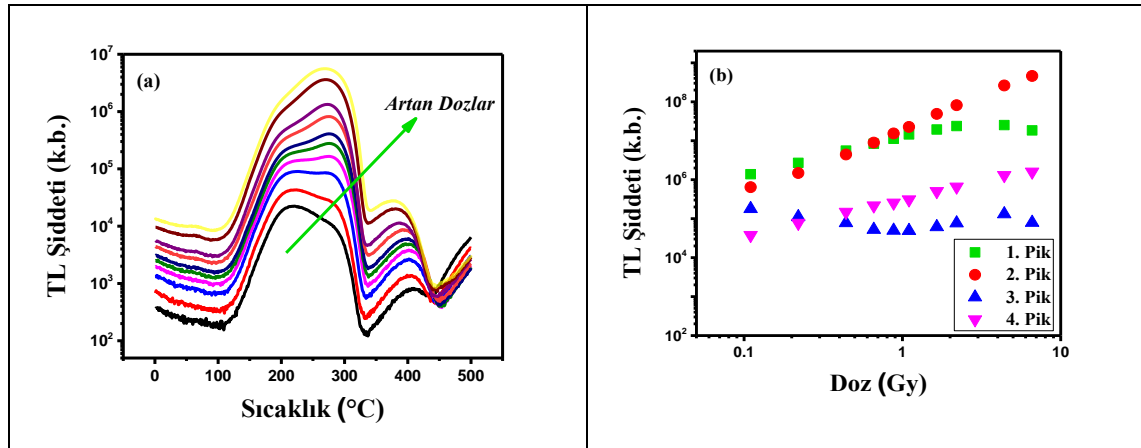
sönümlenmemiş TL piklerinin kinetik parametreleri kıyas açısından doğru bir şekilde değerlendirilebilecektir.

Çizelge 4.5 Radkor BeO dozimetresi için dekonvolüsyon ve kesikli ışımaya eğrisi sonuçları

	1. pik	2. pik	3. pik	4. pik	Metot
$E(eV)$	1.08	1.07	1.67	1.83	Dekonvolüsyon FOM:%3
$s (s^{-1})$	1.2×10^{10}	2.3×10^8	2.9×10^{11}	9.3×10^9	
b	2	1	1	2	
$E(eV)$	1.18 ± 0.03	1.26 ± 0.03	1.49 ± 0.04	1.93 ± 0.04	Kesikli ışımaya eğrisi
$s (s^{-1})$	1.6×10^6	1.2×10^7	3.4×10^6	6.7×10^7	
b	-	-	-	-	

4.4.4 Radkor BeO TL doz cevap eğrisi

Dozimetreler $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 0.11 Gy ile 6.6 Gy arasında ışınlanmış ve ardından $2^\circ\text{C}/\text{s}$ 'lik ısıtma hızı ile 500°C 'ye ısıtılması sonucunda TL ışımaya eğrileri elde edilmiştir. Artan dozlar karşı elde edilen TL ışımaya eğrileri Şekil 4.35a'da görülmektedir. Şekil 4.35a'da elde edilen her bir doz değerindeki ışımaya eğrileri Denklem (2.49) aracılığı ile dekonvole edilerek pik altında kalan alan değerleri belirlenmiştir. Bunun sonucunda artan doza karşılık TL piklerinin doz ile ilişkisi (doz cevap) Şekil 4.35b'de verilmiştir.

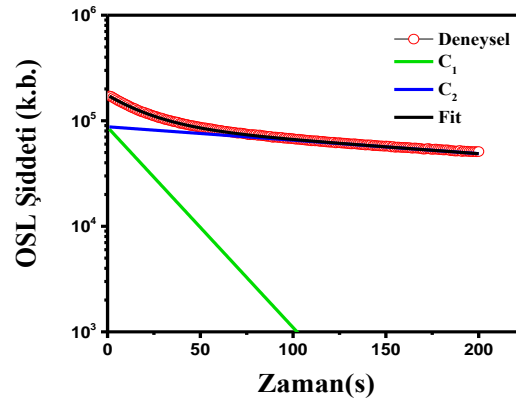


Şekil 4.35 a) Radkor BeO dozimetresi için artan doza karşı (0.11-6.6 Gy) TL ışımaya eğrilerinin değişimi, b) Pik alan değerlerine göre doz cevap eğrisi

Şekil 4.35b'deki TL pikleri için $f(D)$ supralineer indeksi ile hesaplandığında, 1. ve 3. pik için sırasıyla 1.1 ve 0.6 Gy'e kadar lineer olduğu görülmüştür. Diğer piklerin ise daha düşük dozlarda lineerlikten saparak supralineer davranış gösterdiği görülmüştür.

4.5 Radkor BeO OSL Çalışması

Radkor BeO dozimetreler 1.1 Gy $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile ışınlanmış ve ardından mavi ışık ile sürekli dalga modu ile 200s'lik uyarım sonucunda OSL eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen OSL eğrisi ile Denklem (2.27) ile verilen GOK modeline göre dekonvolüsyon sonucunda iki bileşenden oluştuğu (C_1 ve C_2) görülmüştür (Şekil 4.36). Yapılan fit işlemi sonucunda elde edilen FOM değeri yaklaşık olarak % 0.3 civarındadır. Fit sonucunda her iki bileşen için fit parametreleri; yaşam ömrü, tesir kesitleri ve kinetik merteye terimleri elde edilmiştir. Bileşenlerin ömürleri, birinci ve ikinci bileşen için sırasıyla, $\tau_1=44$ ve $\tau_2=533$ s; tesir kesitleri sırasıyla, $\sigma_1=9.4\times 10^{-20}$ cm² ve $\sigma_2=8.3\times 10^{-21}$ cm² bulunmuştur. Elde edilen bileşenlerin toplam alan şiddetine göre oranı C_1 için %26 iken, C_2 için %74'dir. Kinetik merteye terimi (b), C_1 bileşeni için 2, C_2 için ise 1 elde edilmiştir. Bu durumda ilk bileşenin ikinci merteye, ikinci bileşenin ise birinci merteye kinetiğe uyduğu görülmüştür.

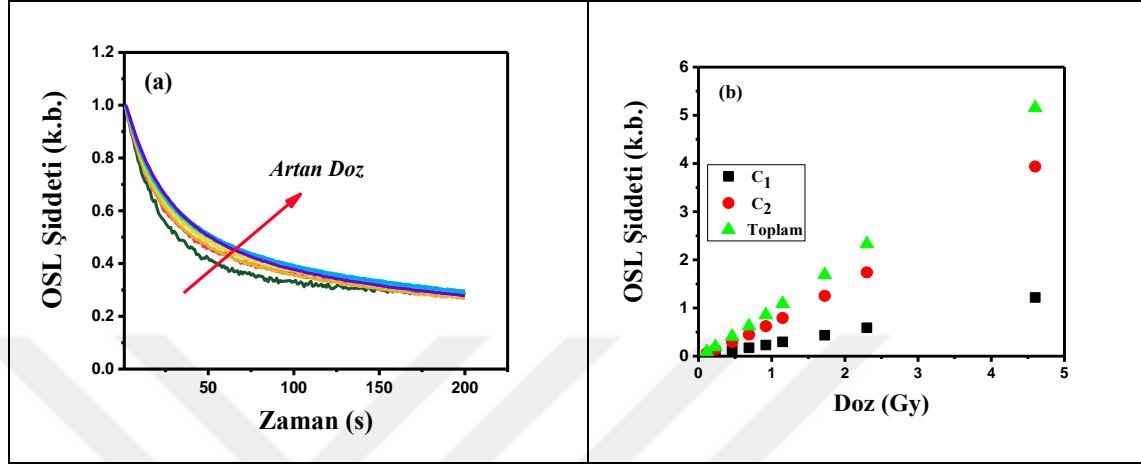


Şekil 4.36 Radkor BeO dozimetresinin OSL dekonvolüsyonu

4.5.1 Radkor BeO OSL doz cevap eğrisi

Dozimetreler, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 0.11 Gy ile 6.6 Gy arasında ışınlanmış ve ardından 200s boyunca mavi ışık altında sürekli dalga modunda OSL eğrileri elde edilmiştir. Artan

dozlara karşı gelen OSL eğrileri Şekil 4.37a’da verilmiştir. Şekil 4.37a’da elde edilen her bir doz değerindeki OSL eğrileri GOK modeline göre dekonvole edilerek her bileşenin altında kalan alan değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu alan değerlerinin artan doz ile ilişkisi (doz cevap) Şekil 4.37b’de verilmiştir.

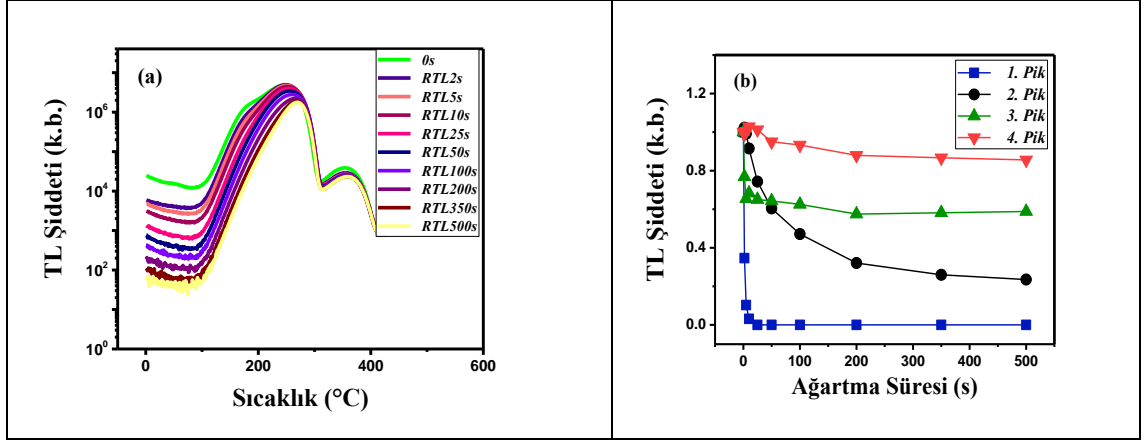


Şekil 4.37 a) BeO Radkor dozimetre için artan doza karşı (0.11-6.6 Gy) normalize OSL eğrilerinin değişimi, b) OSL bileşenlerinin (C_1 ve C_2) alan değerlerine göre doz cevap eğrisi

Şekil 4.37b’de bileşenler için elde edilen doz cevap eğrisi $f(D)$ supralineerlik indeksi ile araştırıldığında, C_1 bileşenin 1.5 Gy’e kadar, C_2 bileşenin 0.9 Gy’e kadar lineer bir davranış gösterdiği ardından supralineer bölgenin başladığı görülmüştür.

4.5.2 Radkor BeO ağartma (bleaching) deneyi sonuçları

Radkor BeO dozimetreler $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 1.1 Gy doz değerinde ışınlanmış; ardından farklı sürelerde (2, 5, 10, 25, 100, 200, 350 ve 500s) mavi ışık altında uyarım süresi sonunda CW-OSL eğrileri elde edilmiştir. OSL okuma işlemlerini takiben dozimetreler ısıtma hızı $2^\circ\text{C}/\text{s}$ ile 500°C ’ye kadar ısıtılarak TL okuması yapılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen arta kalan TL ışımaya eğrileri (RTL) Şekil 4.38a’da verilmiştir. Şekildeki (0s), OSL işleminin uygulanmadığı durumda elde edilen TL ışımaya eğrisini göstermektedir. Her bir ağartma işlemi sonucunda elde edilen arta kalan TL ışımaya eğrileri (RTL), ağartma işleminin etkisinin pikler üzerinde etkisini görebilmek amacıyla Denklem (2.49) kullanılarak dekonvole edilmiştir. Bunun sonucunda OSL işleminin dört pik üzerindeki etkisi, pikler altında kalan alanlar aracılığı ile araştırılmıştır (Şekil 4.38b).



Şekil 4.38 a) OSL sonrası (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 350 ve 500s) elde edilen RTL ışınma eğrileri, b) OSL sonrası elde edilen TL piklerinin ağartma süresine göre değişimi

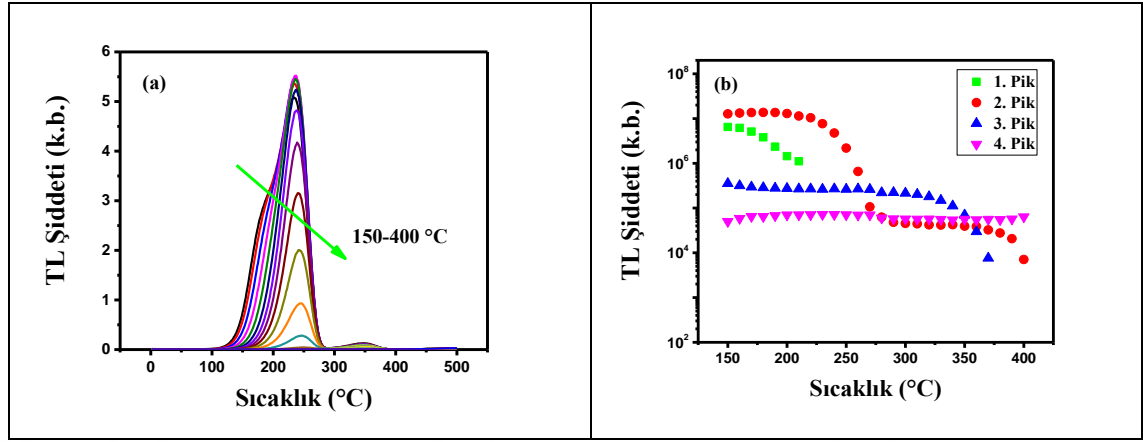
Şekil 4.38a'ya göre OSL uyarım süresinin artması ile elde edilen RTL ışınma eğrilerinin şiddetinin OSL işleminin uygulanmadığı duruma göre (0s) azaldığı görülmüştür. Her bir uyarım sonucunda elde edilen RTL eğrilerinin dekonvolüsyonu sonucunda piklerin alan değerlerinin azalım miktarları Şekil 4.38b'de verilmiştir. Şekle göre, 1. TL pikinin çok küçük uyarım zamanlarında bile hızlıca tükendiği (ağartılabildiği) görülmektedir. İkinci ve üçüncü piklerin 500s uyarım sonucunda; ikinci pik şiddet değerinin başlangıçtakine göre %50 kadar azaldığı, üçüncü pik için ise %75 kadar azaldığı görülmektedir. 4. TL pikinin ise 500s boyunca OSL işleminden önemli bir şekilde etkilenmediği görülmüştür.

4.5.3 Radkor BeO T_{max} - T_{stop} deneyi

Radkor BeO dozimetrelerin TL piklerinin artan sıcaklıklarla olan ilişkisi ve aynı zamanda OSL işleminin TL pikleri ile olan ilişkisinin anlaşılması amacıyla, Bölüm 4.3'de 1. protokol aracılığı ile araştırılmıştır. Bu protokolde 1.3 adımında elde edilen arta kalan TL ışınma eğrileri (RTL) elde edilirken kullanılan ısıtma hızı $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 'dir. T_{stop} sıcaklığına karşı elde edilen TL ışınma eğrileri Şekil 4.39a'da verilmiştir.

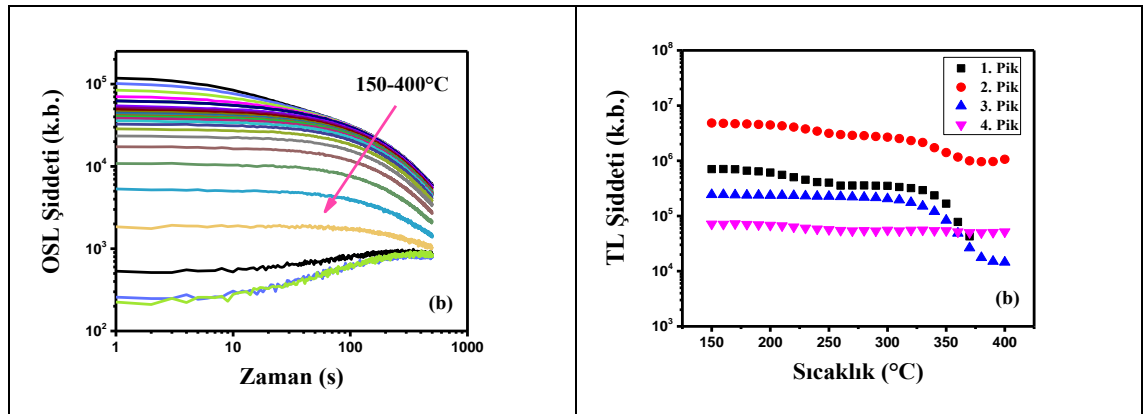
Şekil 4.39a'ya göre artan T_{stop} sıcaklık değerleri için TL ışınma eğrisinin şiddetinin azaldığı görülmüştür. Bu etkinin daha iyi anlaşılabilmesi için artan T_{stop} sıcaklığında elde edilen her bir TL ışınma eğrisi Denklem (2.49) aracılığı ile dekonvole edilerek ışınma eğrisindeki

dört pikin altında kalan alan değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.39b, 150-400°C arasında değişen T_{stop} sıcaklıklarındaki pik alan şiddetlerinin değişimini göstermektedir.



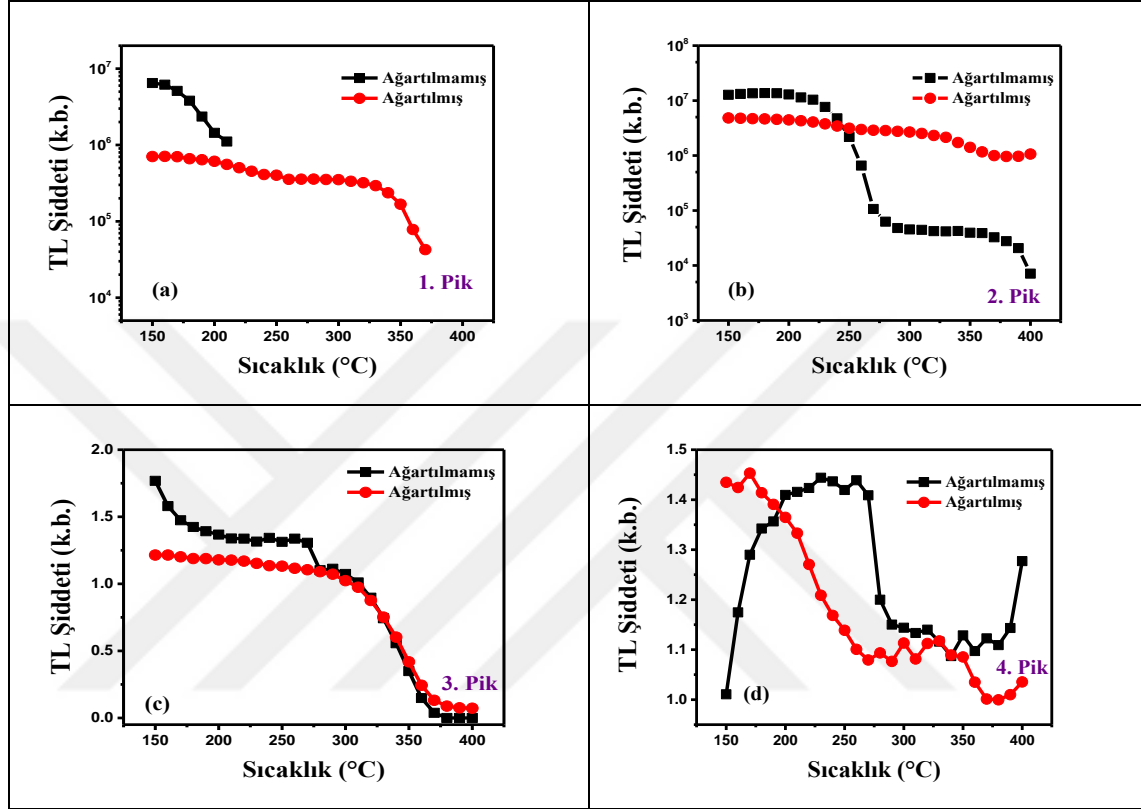
Şekil 4.39 a) Radkor BeO dozimetresinin farklı T_{stop} sıcaklıklarına göre (150-400°C) TL ışınma eğrilerinin davranışı, b) T_{stop} sıcaklıklarına göre TL pik alanlarının şiddet değişimi

Yukarıda uygulanan $T_{max}-T_{stop}$ deneyine ek olarak OSL işleminin TL tuzakları ile olan ilişkisinin anlaşılabilmesi amacıyla, Bölüm 4.3’de verilen 2. protokol uygulanmıştır. Bu protokolda TL ve RTL okumaları 2 °C/s’lik okuma hızı ile OSL okumaları ise mavi ışık altında 200s’lik uyarım sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4.40a’da artan T_{stop} sıcaklıklarında elde OSL eğriler görülmektedir. Dozimetrelerin farklı T_{stop} sıcaklıklarına ısıtılması ve ardından OSL işleminin akabinde uygulanan RTL ölçümlerinin dekonvolüsyonu sonucunda elde edilen piklerin alan değerlerine göre değişimi Şekil 4.40b’de verilmiştir.



Şekil 4.40 a) Radkor BeO dozimetresinin farklı T_{stop} sıcaklıklarına göre OSL eğrilerinin değişimi, b) OSL işlemi sonrasında TL pik alanlarının T_{stop} sıcaklığı ile değişimi

OSL okumasının olmadığı durum (ağartılmamış), Şekil 4.39b’de ve OSL işleminin uygulandığı durum (ağartılmış), Şekil 4.40b’de verilmişti. OSL işleminin TL üzerindeki etkisinin net olarak ifade edilmesi amacıyla her pik için ağartılmış ve ağartılmamış durumların T_{stop} sıcaklığına göre değişimi tek grafikte Şekil 4.41’de verilmiştir.



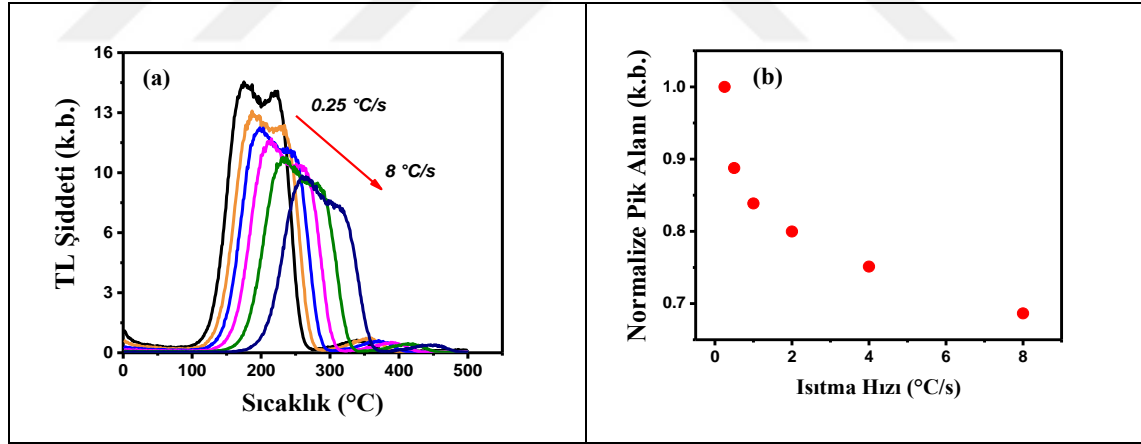
Şekil 4.41 Radkor BeO ağartılmış ve ağartılmamış TL piklerinin T_{stop} sıcaklığına göre değişiminin incelenmesi, a) 1. pik, b) 2. pik, c) 3. pik, d) 4. pik

Şekil 4.41a,b ve c’ye göre Radkor BeO dozimetresindeki üç pikte ışıktan etkilenmektedir. Dördüncü pikin ışıkla olan ilişkisi diğer piklere göre farklıdır. Dördüncü pik derin tuzaklarla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. O yüzden daha detaylı araştırmalar (TA-OSL gibi) yapılmalıdır. Şekle göre, ağartılmış sinyalin ağartılmamışa göre en fazla düşüş gösterdiği yani ışıktan en fazla etkilenen pikin ilk pik olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, 2. pik 200°C civarında yok olmasına karşın OSL işleminden sonra tekrar pik oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum 1. pik için güçlü bir fototransfer olayının gözlemlendiğini göstermektedir. Benzer şekilde 2. pik için 250°C sıcaklığından sonra ağartılmış sinyal ağartılmamış sinyal şiddetinden büyük elde edilmiştir. Bu durumda benzer şekilde derin tuzaklardan 2. pike fototransfer yoluyla yük akışının olduğunu

göstermektedir. Sonuç olarak, Radkor BeO dozimetresinin OSL sinyalinin 1,2 ve 3. piklerle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

4.6 Radkor BeO Termal Sönümlenme Olayının İncelenmesi

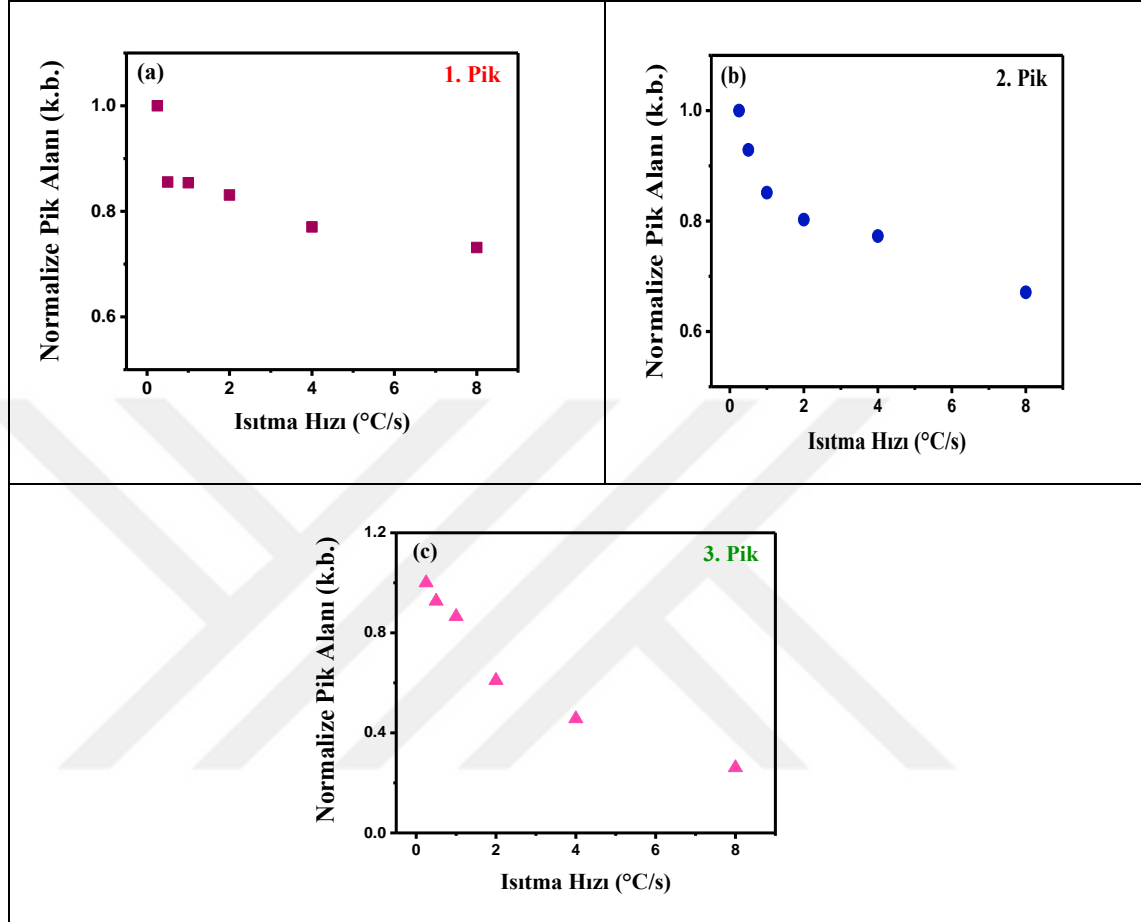
Radkor BeO dozimetresi için termal sönümlenme olayı, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile 0.5 Gy ışınlanmış dozimetrelerin farklı ısıtma hızları ile (0.25, 0.5, 1, 2, 4 ve 8) 500°C 'ye kadar ısıtılması sonucunda TL ışımaya eğrileri elde edilerek değerlendirilmiştir (Şekil 4.42a). Şekilden görüleceği gibi TL ışımaya eğrileri artan ısıtma hızlarına göre artan sıcaklık değerlerine kaymaktadır. Termal sönümlenme olayının varlığının anlaşılabilmesi amacıyla farklı ısıtma hızlarında elde edilen ışımaya eğrilerinin altında toplam alan değeri Şekil 4.42b'de verilmiştir. Termal sönümlenme etkisinin ihmal edilebileceği $0.25^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ısıtma hızında elde edilen alan değerine normalize edilerek Şekil 4.42b oluşturulmuştur. Bu durumda $8^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ısıtma sonucunda elde edilen alan değeri, $0.25^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 'de elde edilenden %35 daha azdır. Bu sonuç, Radkor BeO dozimetresinin termal sönümlenmeye uğradığı göstermiştir.



Şekil 4.42 Radkor BeO için a) Artan ısıtma hızlarına göre TL ışımaya eğrileri, b) İntegral (tüm alan) TL ışımaya eğrisinin alan değişimi

Termal sönümlenmenin etkisinin daha iyi anlaşılması amacıyla ışımaya eğrisinde görülen her bir pik için pik altında kalan alan değerlerinin değişimleri incelenmiştir. Her bir ısıtma hızında elde TL ışımaya eğrileri Denklem (2.49)'a göre fit edilerek, pik altında kalan alan değerleri bulunmuştur. Şekil 4.43'de her pik için artan ısıtma hızlarına göre pik alanındaki

değişimler görülmektedir. Dördüncü TL pikinin artan ısıtma hızlarına göre pik alan şiddet değerlerinde bir değişim gözlenemediği için grafikte verilmemiştir.



Şekil 4.43 Radkor BeO için artan ısıtma hızlarına göre TL piklerinin alan şiddet değerlerinin değişimleri, a) 1. pik, b) 2. pik, c) 3. pik

Şekil 4.43'e göre Radkor BeO dozimetresinin her üç pikinin de termal sönümlenme olayından etkilendiği görülmüştür. Şekle göre 3. pikin termal sönümlenme olayından en fazla etkilendiği, 1. pikin ise en az etkilendiği görülmüştür.

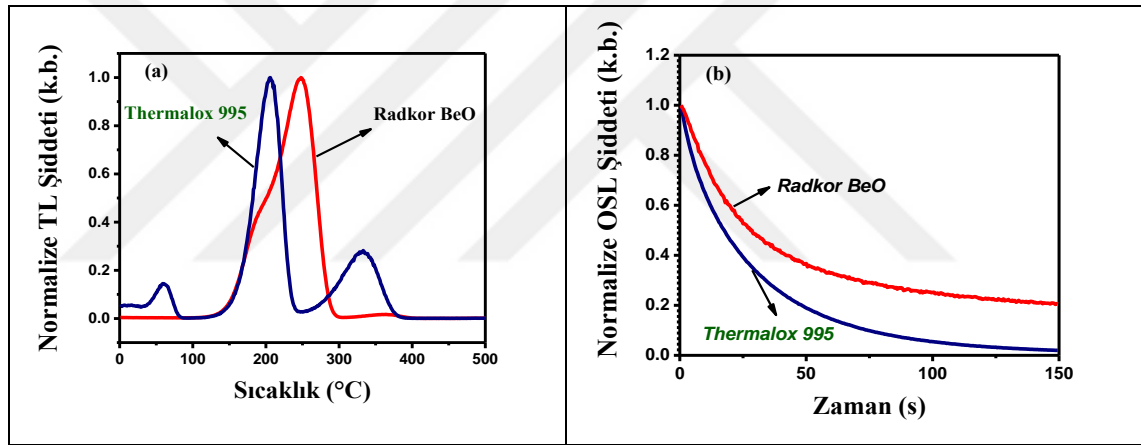
Radkor BeO dozimetresi gibi iç içe geçmiş piklere sahip dozimetrelerde termal sönümlenme parametrelerinin belirlenebilmesi işlemi tekli piklere sahip olan Thermalox 995 BeO'e göre analiz süreci ve izlenecek yol bakımından önemli farklılıklara sahiptir. Fit işlemlerinin zorluğu, düzeltme faktörleri ve Eşitlik (2.62)'de verilen W ve C parametrelerinin belirlenmesi için önemli yer tutan f parametresi bu dozimetre için

belirlenebilmesi ve bu faktörün her üç pik için uygun bir fit yapıp yapmadığının kontrolü, piklerin tekrar yapılandırılması ve doğruluğu gibi işlemlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

4.7 Radkor ve Thermalox 995 BeO Dozimetrelerinin Karşılaştırılması

4.7.1 TL ve OSL sinyallerinin kıyaslanması

Şekil 4.44'de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı ile 1 Gy ışınlanmış iki dozimetrenin normalize TL ve OSL eğrileri aynı grafikte verilmiştir. İki dozimetrenin TL grafikleri birbirlerinden oldukça farklıdır. Özellikle Thermalox 995'in ana dozimetrik piki bir pikten oluşurken, Radkor BeO dozimetresinin iki pikten oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.44 Radkor ve Thermalox 995 BeO için a) Normalize TL ışınma eğrileri, b) Normalize OSL bozunum eğrileri

Aynı doz değerinde ışınlanmış her iki dozimetrenin TL ışınma eğrisi altında kalan şiddet değerleri kıyaslandığında Radkor BeO dozimetresinden elde edilen TL şiddetinin Thermalox 995 BeO'den elde edilenden yaklaşık 10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, dozimetreler için OSL eğrisi altında kalan toplam alan şiddetleri incelendiğinde, Thermalox 995 BeO dozimetrelerden elde edilen şiddet değerinin Radkor BeO'den elde edilenden 6 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

4.7.2 Minimum dedekte edilebilen doz (MDD) değerinin incelenmesi

Minimum dedekte edilebilen (MDD) doz değerinin belirlenmesi için fırında 750°C’de tavllanmış üç adet Radkor BeO dozimetrelerden doğal sayım değeri belirlenmiş; bu değerlerin standart sapması bulunmuştur. Aynı dozimetreler tekrar fırında tavllanmış Risø TL/OSL okuyucu tarafından verilebilen minimum dozda ışınlanarak sayım değerleri elde edilmiştir. Minimum dedekte edilebilen doz (MDD) değeri, Eşitlik (4.1) aracılığı ile belirlenmiştir (Hirning 1992):

$$MDD = 3\sigma_{Dogal} \quad (4.1)$$

Burada, σ_{Dogal} tavllanmış dozimetrelerin okuma değerlerinin (doğal sayım değeri) standart sapması olarak verilir. Bu okuma değerin doz birimine dönüştürülebilmesi için kalibrasyon katsayısı, (Φ_b) Eşitlik (4.2) aracılığı ile bulunur:

$$\Phi_b = \frac{D_b}{M} = \frac{D_b}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - M_{0i})} \quad (4.2)$$

Burada, D_b , dozimetrelere verilen doz değeri, M_i , i .ci dozimetrenin okuma değeri, M_{0i} , i .ci dozimetrenin doğal sayım değeri, N ise ölçüm sayısını göstermektedir. MDD değeri, σ_{Dogal} değerinin üç katının kalibrasyon katsayısı Φ_b ile çarpılması sonucu belirlenmiştir. Dozimetrelerden şiddet değeri (doğal sayım, bilinen dozdaki davranışı) elde edilirken TL ve OSL eğrilerinin altındaki toplam alan şiddeti dikkate alınmıştır. Bahsedilen bütün işlemler her iki dozimetre türü (Radkor BeO ve Thermalox 995) için her iki ölçüm modunda (TL ve OSL) gerçekleştirilmiştir. TL okumaları, 2°C/s’lik ısıtma hızı ile 500°C’ye kadar ısıtılarak; OSL ölçümleri ise 120°C’de 45s ön ısıtma işleminin ardından 150s boyunca sürekli dalga modunda mavi ışık altında gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.6’da her iki dozimetre için bulunan MDD değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6’dan görüleceği gibi Radkor BeO dozimetreler kullanılarak TL modunda minimum dedekte edilebilen doz değerinin 50 µGy olduğu görülmüştür. Bu değer, TL

modunda Radkor BeO dozimetre kullanmanın Thermalox 995'e kıyasla daha düşük doz değerlerinin belirlenebilmesi açısından önem teşkil etmektedir.

Çizelge 4.6 Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için TL ve OSL durumlarında elde edilen minimum dedekte edilebilen (MDD) doz değerleri

<i>MDD</i>	<i>TL</i>	<i>OSL</i>
<i>Radkor BeO</i>	50 μ Gy	100 μ Gy
<i>Thermalox 995 BeO</i>	500 μ Gy	15 μ Gy

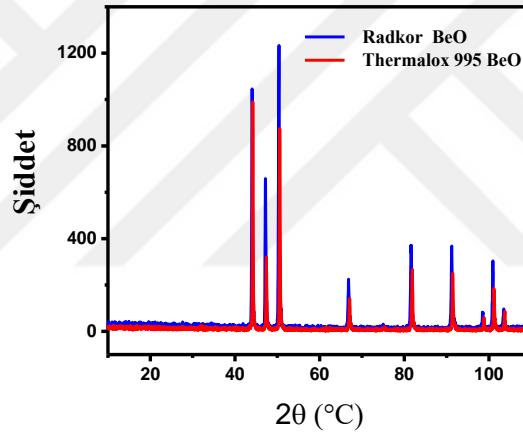
Diğer taraftan Thermalox 995 dozimetrelerin ise OSL modunda Radkor BeO'ya göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle doz değerlendirmelerinde TL metodu ile Radkor BeO kullanılması önerilirken, OSL metodu ile Thermalox 995 BeO'nin kullanılmasının daha düşük dozları değerlendirebilme açısından önem arz ettiği sonucuna varılmıştır. Bu sebeple, mamografi ölçümlerinde Radkor BeO dozimetreler TL modunda, Thermalox 995'ler ise OSL modunda kullanılmıştır.

4.7.3 Radkor BeO EDX ve XRD analizi

Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri element içeriğinin tespiti için EDX analizi ile incelenmiştir. Buna göre Çizelge 4.7'de EDX analizi sonuçları verilmektedir. Radkor BeO dozimetre Thermalox 995 BeO ile genel içerik olarak benzer elementler içermektedir, ancak Radkor BeO dozimetre içerisinde oksijen ve krom elementi yüzdeleri Thermalox 995'de elde edilenden daha fazladır. Şekil 4.45'de Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetrelerinin XRD grafikleri verilmiştir. Dozimetreler için XRD pikleri kıyaslandığında her iki dozimetrenin de aynı kristal yapı özelliği gösterdiği BeO fazına ait olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7 Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için EDX analiz sonuçları

<i>EDX Analizi</i>	<i>Radkor BeO (normalize kütle %)</i>	<i>Thermalox 995 (normalize kütle %)</i>
O	94.47	97.36
Cr	2.84	0.34
C	1.62	1.36
Fe	0.53	0.26
Sn	0.29	0.36
Si	0.20	0.19
Mg	0.03	0.04
Al	0.01	0.08



Şekil 4.45 Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri XRD grafikleri

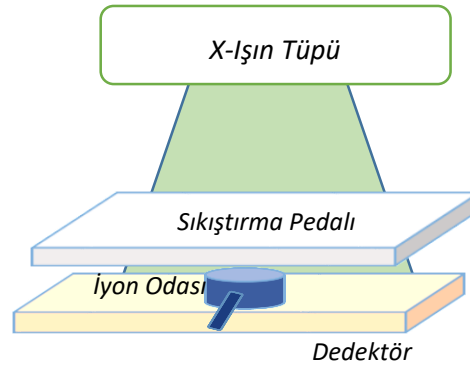
Şekil 3.1'de a ve b ile gösterilen aynı boyutta ve tipteki (seramik form) iki BeO dozimetre farklı lüminesans özellikleri göstermiştir (Şekil 4.44). İki dozimetrenin farklı TL ve OSL lüminesans verimine sahip olduğu görülmüştür. Bunun sonucu olarak elde edilen minimum dedekte edilebilen (MDD) doz değerleri de farklıdır. Gerçekleştirilen XRD analizi, her iki dozimetrenin benzer kristal faza sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 4.45). Radkor BeO dozimetresinin TL ve OSL eğrilerinde görülen bu farklılığın sebebinin ilk üretim anındaki dozimetrelerin pelet hale getirilmesi için kullanılan sıcaklık, basınç farklılıklarından yani ilk üretim koşullarından ya da dozimetreye katkılandırılan elementlerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

4.8 Mamografi Sistemi Kalite Kontrol Testleri

4.8.1 Tüp çıkışı testi ve tüp çıkışının tekrarlanabilirlik testi

Mamografi sisteminde X ışın tüpü ve jeneratör performansının değerlendirilmesi amacıyla tüp çıkışının belirlenmesi gereklidir. X ışın tüpünün çıkışı, tüpe uygulanan gerilim, tüp akımı ve ışınlama süresi ile değişkenlik gösterir. Tüp çıkışı ayrıca kullanılan hedef filtre kombinasyonu ve farklı demet kalitelerinde farklılık göstereceği için doz hesaplanmalarından önce bu test gerçekleştirilmelidir. Bu testler mamografi sistemlerinde kullanılan iyon odaları ile gerçekleştirilir. İstenilen hedef filtre kombinasyonunda genellikle 28kVp ve (50-100 mAs) tüp akımı olacak şekilde ayarlanarak iyon odasından ışınlama değeri kaydedilir (Akyol 2004). Ters kare düzeltmesi yapılarak 100 cm'deki odak-dedektör mesafesindeki değerin hesaplanması ile ilgilenilen hedef filtre kombinasyonunda tüp çıkış değeri elde edilmiş olur. Mamografi ölçümlerinde dozimetre kullanılacaksa, tüp çıkış değerleri sıkıştırma pedalının varlığında, diğer durumlarda sıkıştırma pedalı olmadan belirlenir. EUREF 2006 protokollerine göre, 28kVp molibdenyum hedef ve molibdenyum filtre için 100 cm odak-dedektör mesafesindeki tüp çıkışı değeri 40-75 $\mu\text{Gy}/\text{mAs}$ aralığında ve 30 $\mu\text{Gy}/\text{mAs}$ değerinden küçük olmamalıdır.

Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda 63mAs sabit tüp akım değerinde iyon odası meme tablasından 4.5 cm yükseklikte olacak şekilde Şekil 4.46'daki gibi merkez noktaya yerleştirilmiş ve 22 ile 32 kVp arasında tüp çıkışı, sıkıştırma pedalının varlığında belirlenmiştir.



Şekil 4.46 Tüp çıkışı ölçüm düzeneği

Tüp çıkış değerinin belirlenmesi için üç ışınlama yapılmış bu ışınlamaların ortalamaları alınarak 100 cm’de tüp çıkış değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.8). Klinikte yaygın olarak kullanılan, 28 kVp için tüp çıkışı 100 cm’de 32.82 $\mu\text{Gy}/\text{mAs}$ bulunmuştur. Elde edilen bu değer, EUREF 2006 protokollerinde önerilen sınırlar içerisinde dir.

Çizelge 4.8 Farklı X ışını enerjilerinde tüp çıkışı değerleri

<i>kVp</i>	<i>Işınlama_{ort}</i> (μGy)	<i>Tüp Çıkışı</i> ($\mu\text{Gy}/\text{mAs}$)
22	2576.3	12.37
24	3696.6	17.75
26	5033.3	24.17
28	6712.4	32.82
30	8239.0	39.56
32	10039.3	48.20

Tüp çıkışının tekrarlanabilirlik testi, mamografi sisteminin gerçekleştirilen ışınlama sisteminde elde edilen değerlerin birbirine yakınlığını değerlendirmek amacıyla yapılır. Sabit tüp gerilimi (kVp) ve tüp akımı (mAs) değerlerinde gerçekleştirilen ışınlamalar sonucunda elde edilen değerlerin birbirine yakın olması (tüp çıkışının tekrarlanabilir olması), klinik çalışmalarda hasta dozu ve tetkik açısından büyük önem arz etmektedir. Bu test için, X ışın demeti tüm iyon odasını Şekil 4.46’daki gibi yerleştirilir. Sabit tüp gerilim (kVp) ve tüp akımı (mAs) değerlerinde art arda üç defa ışınlama yapılarak tekrarlanabilirlik Eşitlik (4.3)’e göre hesaplanır:

$$\%T = \frac{(\mu\text{Gy}/\text{mAs})_{\text{maks.}} - (\mu\text{Gy}/\text{mAs})_{\text{min.}}}{(\mu\text{Gy}/\text{mAs})_{\text{ort.}}} \quad (4.3)$$

Yapılan ışınlamalarda tekrarlanabilirlik, %0.2 bulunmuştur. Bu değer %5 değerinden küçük olduğu için (IPSM 1994) kabul edilebilirdir.

4.8.2 Yarı değer kalınlığının (HVL) belirlenmesi

Radyasyon şiddetini yarı değerine indiren kalınlık, yarı değer kalınlığı (HVL) olarak adlandırılır. Mamografi sisteminde yarı kalınlık değeri %99'luk saflığa sahip alüminyum plakalarla ile gerçekleştirilir. Bu test için ölçüm sisteminde meme sıkıştırma pedalının varlığında yapılır. İyon odası Şekil 4.46'daki gibi konumlandırılır. Sabit tüp gerilimi ve tüp akımında ölçüm alınır. Öncelikle herhangi bir alüminyum tabaka olmadan ışınlama yapılarak 0 mm kalınlıktaki hiçbir soğurucunun olmadığı ışınlama değeri kaydedilir. Ardından iyon odası üzerine farklı kalınlıklarda alüminyum kalınlıkları 0.1 mm'den başlanarak arttırılarak ölçümler alınır. Hiçbir alüminyum kalınlığının olmadığı durumda elde edilen ışınlama değerinin yarısı elde edilene kadar bu işlem devam ettirilir. HVL değeri Eşitlik (4.4) aracılığı ile belirlenmiştir:

$$HVL = \frac{x_a \ln\left(2\frac{I_2}{I_0}\right) - x_b \ln\left(2\frac{I_1}{I_0}\right)}{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} \quad (4.4)$$

Burada x_a ve x_b başlangıçtaki şiddet değerinin yarıya düştüğü değer alt ve üst noktasında elde edilen alüminyum kalınlıkları, I_1 ve I_2 ise başlangıçtaki şiddet değerinin yarıya düştüğü değerler arasında kalan şiddet değerleridir.

Çizelge 4.9 Farklı tüp gerilim değerlerinde elde edilen HVL değerleri (mm Al)

<i>kVp</i>	<i>HVL (mmAl)</i>
22	0.27
24	0.30
26	0.33
28	0.35
30	0.37
32	0.39

Çizelge 4.9'da HVL değerleri Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda meme sıkıştırma pedalının varlığında belirlenmiştir. Klinik olarak mamografi çekimlerinde yaygın kullanılan Mo/Mo hedef filtre durumunda sıkıştırma pedalının varlığında 28 kVp tüp

geriliminde HVL alüminyum kalınlığı değeri 0.35' mm elde edilmiştir. Bu değeri, Ek 1'de verilen Çizelge 3 ile uyumludur.

4.8.3 Tüp gerilim (kVp) doğruluğu ve tekrarlanabilirliği

Bu test için doğruluğu ± 1.5 kVp ve 0,5 kVp kesinliğe sahip kVp sensörü kullanılır. kVp sensörü meme tablası üzerine yatay konumda yerleştirilerek ölçüm alınır. Sistemden ayarlanan kVp değeri ile sensör tarafından ölçülen değer arasındaki farkın %5 olması kabul edilebilir. kVp değerinin tekrarlanabilirlik katsayısı 0.02'ye eşit ya da 0.02'den küçük olmamalıdır (ACR 1999).

Tüp gerilimi, kVp'nin doğruluğu, kVp probu ile Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda sabit 32 mAs için meme sıkıştırma pedalının varlığında üç ışınlama sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Çizelge 4.10'da sistemden ayarlanan kVp değerleri ile sensör tarafından ölçülen kVp değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.10 Tüp gerilimi, kVp doğruluğu

<i>kVp</i> _{Ayarlanan}	<i>kVp</i> _{Ölçülen}	<i>Fark (%)</i>
22	21.8	0.9
24	24.0	0.0
26	26.2	0.8
28	28.3	1.1
30	30.5	1.7
32	32.7	2.2

Işınlamanın tekrarlanabilirliği, iyon odası aracılığı ile Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda 28kVp, 40 mAs ölçüm parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. İyon odası Şekil 4.46'daki gibi konumlandırılarak üç ışınlanma gerçekleştirilmiş; bunun sonucunda 4.962, 4.959 ve 4.969 mGy değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin tekrarlanabilirliği, Eşitlik (4.3) aracılığı ile %0.1 elde edilmiştir. Işınlamanın doğrusalılığı ise Eşitlik (4.5) aracılığı ile %0.7 olarak bulunmuştur.

$$\%L = \frac{[(\mu Gy/mAs)_{maks.} - (\frac{Gy}{mAs})_{min.}]^{1/2}}{(\mu Gy/mAs)_{ort.}} \times 100 \quad (4.5)$$

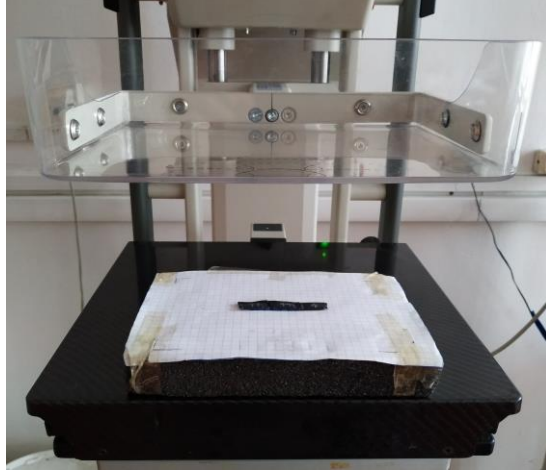
4.9 Mamografi Sisteminde Dozimetri

4.9.1 Dozimetrelerin kalibrasyonu

Ölçüm için kullanılacak dozimetreler, TLD-100, Radkor BeO ve Thermalox 995 BeO, klinik olarak yaygın kullanılan 28 kVp tüp geriliminde ve Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda meme sıkıştırma pedalının varlığında 63 mAs tüp akımında ışınlanarak kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir dozimetre tipi için farklı okuma ve tavlama prosedürleri uygulanmıştır. Dozimetreler, meme tablasından kaynaklı geri saçılım etkisinin olmaması için saçılım etkisi göstermeyen yaklaşık ≈ 2.6 cm kalınlığa sahip boyutları 17×12 cm² dikdörtgen şeklindeki sünger üzerine koyularak ışınlanmıştır. Dozimetreler sünger üzerine yerleştirilen kağıt üzerinde meme tablasından 6 cm mesafede ve ışınlama merkezinin orta hattında dozimetreler hep aynı noktaya gelecek şekilde yan yana 3'er adet koyularak ışınlamalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.47). BeO dozimetreler ışıktan etkilendiği için ışık geçirmeyen paketlere koyularak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Dozimetreler için okuma ve tavlama prosedürleri Çizelge 4.11'e göre yapılmıştır.

Çizelge 4.11 Dozimetrelerin mamografi sistemindeki okuma ve tavlama protokolleri

Dozimetre türü	<i>Işınlama Öncesi</i>	<i>Işınlama Sonrası</i>	
	Tavlama	Ön Isıtma	Okuma İşlemi
<i>TLD-100</i>	400°C'de 1saat+ 100°C'de 2saat (Fırında)	100°C'de 10 dakika (Fırında)	350°C'ye 10°C/s'lik ısıtma hızı ile 30s boyunca TL okuması
<i>Radkor BeO</i>	750°C'de 20 dakika (Fırında)	-	500°C'ye 2°C/s'lik ısıtma hızı ile TL okuması
<i>Thermalox 995 BeO</i>	750°C'de 20 dakika (Fırında)	120°C de 45s (Cihazda)	%50 uyarım gücünde 120s mavi ışıkla uyarım ile OSL okuması



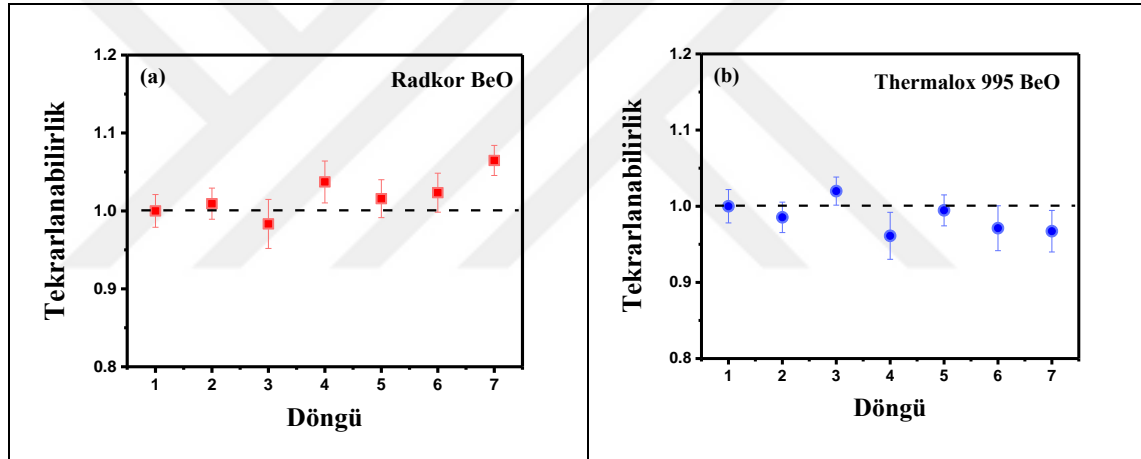
Şekil 4.47 Mamografi sisteminde dozimetrelerin (TLD-100 ve BeO) kalibrasyonu için kurulan ışınlama düzeneği

Kalibrasyon öncesi 76 adet TLD-100 yukarıda bahsedilen koşullarda ışınlanmış, bunların arasından 48 dozimetre, birbirilerinden %4 sapacak şekilde, Radkor BeO dozimetrelerinden 48 adet dozimetre arasından 24 dozimetre birbirinden yaklaşık %8 sapacak şekilde, Thermalox 995 BeO için ise 24 dozimetreden 12 dozimetre birbirinden yaklaşık %7 sapacak şekilde ölçüm için kullanıma hazır hale getirilmiştir. Dozimetreler için element düzeltme faktörleri (ECC) dozimetreler için elde edilen ortalama sayım değerinin her bir dozimetrede elde edilen sayım değerine bölünmesi ile belirlenmiştir.

Dozimetrelerden hesaplanan şiddet değerlerinden doza geçilmesi için gerekli faktör olan okuyucu kalibrasyon faktörü (RCF) belirlenmesi için dozimetreler tavlandıktan sonra dozimetreler 28 kVp ve 63 mAs değerinde Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda ışınlanmış ardından ECC değerleri ile çarpılarak sayım değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sayım değerlerinin ortalaması, dozimetrelerin koyulduğu mesafedeki tüp çıkış değerlerine göre o noktada hesaplanan doz değerine bölünerek RCF değeri belirlenmiştir. Buna göre, TLD-100 için RCF değeri (36.54 ± 1.46) nC/mGy, Radkor BeO için (3890 ± 234) sayım/mGy ve Thermalox 995 BeO için (4092 ± 208) sayım/mGy elde edilmiştir. RCF faktöründeki hatalar, üç dozimetrenin sonucunda elde edilen değerlerin standart sapması olarak verilmiştir. Dozimetrelerden doz değerlendirme işlemi, ışınlama sonucunda dozimetrelerden elde edilen sayım değerlerinin ECC ile çarpılıp RCF faktörüne bölünmesi belirlenmiştir.

4.9.2 Tekrarlanabilirlik

Mamografi sisteminde dozimetrelerin tekrarlanabilirliğinin test edilmesi amacıyla, tavllanmış üç adet dozimetre, 28 kVp ve 63 mAs ışınlama parametrelerinde Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda yedi defa okunarak elde edilen değerlerin tekrarlanabilirliği kontrol edilmiştir. Her bir okumayı takiben artık dozların silinmesi amacıyla dozimetreler tavlansak bir sonraki okuma döngüsüne hazır hale getirilmiştir. Işınlamalar, kalibrasyon kısmında bahsedildiği gibi Şekil 4.47'deki düzeneğine göre dozimetreler hep aynı noktaya gelecek şekilde yan yana dizilerek ışınlanmıştır. Şekil 4.48, 28kVp ve 63 mAs değerinde Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda Radkor BeO ve Thermalox 995 BeO için tekrarlanabilirlik sonuçlarını göstermektedir. Bunun sonuçlara göre, her iki dozimetrede ilk okuma değerine göre yaklaşık ± 5 aralığında değişim göstermiştir.

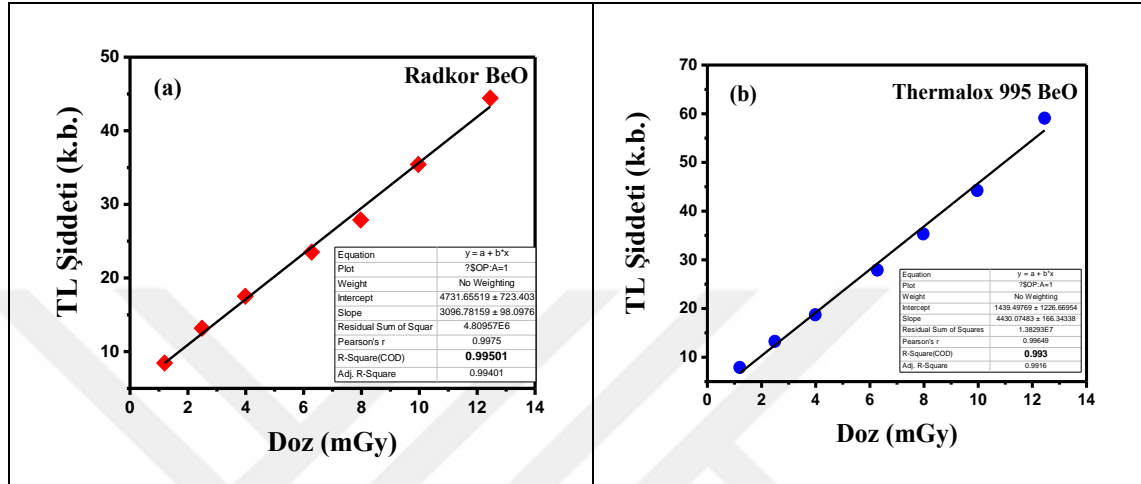


Şekil 4.48 28kVp ve 63mAs değerinde Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda dozimetrelerinin tekrarlanabilirlik sonuçları; a) Radkor BeO, b) Thermalox 995 BeO

4.9.3 Doz Cevap Eğrisi

Mamografi sisteminde ışınlanan dozimetrelerin lüminesans şiddeti ile doz arasındaki ilişkinin anlaşılması amacıyla doz-cevap deneyi gerçekleştirilmiştir. Radkor BeO ve Thermalox 995 BeO dozimetreler, Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda 28 kVp sabit değerinde 10 mAs ile 125mAs aralığında (hava kerma değerleri 1.2-12.45mGy) ışınlanarak dozimetrelerin bu değerlerdeki davranışı incelenmiştir. Her bir ışınlamada 3 adet dozimetre kullanılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak doz cevap eğrisi

oluşturulmuştur (Şekil 4.49). Elde edilen doz cevap ilişkisine göre her iki dozimetrede 1.2 ile 12.45 mGy hava kerma değerleri arasında lineer davranış göstermiştir. Radkor BeO için lineer fit sonucunda elde edilen, R^2 değeri, 0.995 iken Thermalox 995 için 0.993 elde edilmiştir.



Şekil 4.49 BeO dozimetreler için Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda doz cevap eğrisi

4.9.4 Mamografi sisteminde kliniksel niceliklerin belirlenmesi

4.9.4.1 Geri saçılım faktörü (BSF)

Geri saçılım faktörü, ortalama glandüler doz (MGD) değerinin belirlenebilmesi için gerekli olan yüzey giriş doz değerinden (ESD), ESAK değerine geçilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Geri saçılım faktörü (BSF), Eşitlik (4.6) aracılığı ile belirlenir:

$$BSF = \frac{I_{Fantom}}{I_{Hava}} \quad (4.6)$$

Burada I_{Fantom} , kullanılan fantomun yüzeyindeki noktada dozimetrelerden alınan şiddet değeri, I_{Hava} ise aynı noktada fantomun olmadığı durumda dozimetrelerden alınan şiddet değeridir. BSF değeri, üç adet dozimetre kullanılarak her bir dozimetrenin ECC faktörleri çarpımı ile üç dozimetreden elde edilen şiddet değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Farklı kalınlıklara (2, 4, 5 ve 6 cm) sahip 12.5×10 cm boyutlarındaki PMMA kesit fantomlar üzerine dozimetreler yerleştirilerek I_{Fantom} değerleri belirlenmiştir. I_{Fantom} , ana x ışın demetinden kaynaklanan ve bunun yanı sıra fantomdan saçılan x ışını demetlerinden gelen fotonları içermektedir. Dozimetreler her seferinde fantom üzerine meme duvarından 6 cm uzaklıkta ve fantomun merkezinde belirlenen yerlere koyularak ışınlanmıştır. Sadece ana X ışın demetinden gelen fotonların dikkate alındığı durumda elde edilecek şiddet değeri olan I_{Hava} ölçümleri ise dozimetreler geri saçılımın olmadığı ince izole bant üzerine yine meme duvarından 6 cm uzaklık ve merkezde konumlanacak şekilde ışınlanmıştır (Şekil 4.50).



Şekil 4.50 Geri saçılım faktörünün (BSF) belirlenmesi için dozimetrelerin havadaki ışınlama düzeneği; a) TLD-100, b) BeO dozimetreler

Fantom üzerindeki ışınlamalar yarı otomatik mod (AEC modunda); tüp geriliminin (kVp) sabit tutulduğu tüp akımının (mAs) ise artan fantom kalınlığına göre arttırılması sonucu elde edilmiştir. Her bir kalınlıkta sistemin verdiği mAs değerleri kaydedilmiştir. Havadaki ölçümler, aynı sabit kVp değerinde ve her bir kalınlıkta sistemden elde edilen en yakın mAs değerine manuel olarak ayarlanmıştır. Fantom ışınlamaları durumunda sistemin verdiği mAs değerine ulaşmak için bir önceki kesimde dozimetreler için elde edilen doz cevap eğrilerinden dozimetrelere düzeltme faktörü uygulanarak her bir fantom kalınlığındaki havadaki şiddet değerleri elde edilmiştir. Sonuçta, artan fantom kalınlıklarında elde edilen I_{Fantom} ve I_{Hava} değerlerinin Eşitlik (4.6)'da yerine koyulması ile BSF değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12 TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için farklı PMMA fantom kalınlıklarına göre elde edilen geri saçılım faktörleri (BSF)

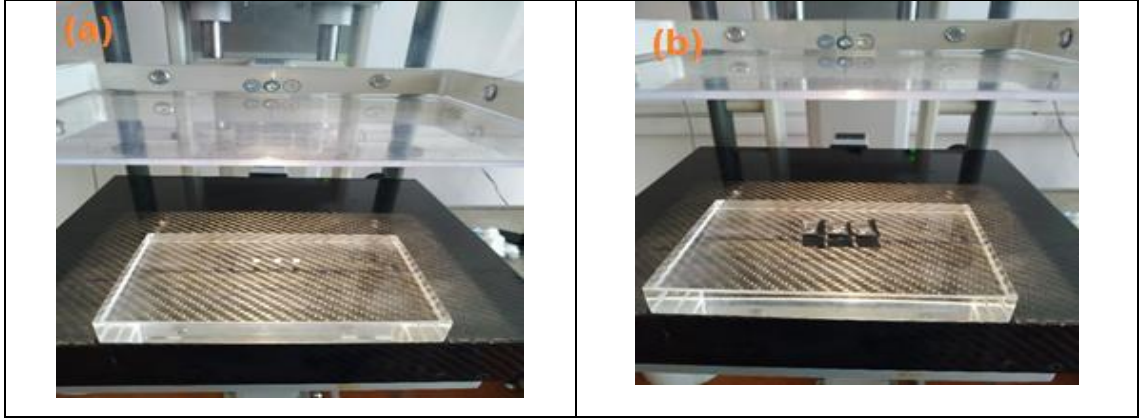
PMMA Kalınlığı (cm)	TLD-100	Radkor BeO	Thermalox 995 BeO
2	1.06±0.02	1.16±0.05	1.12±0.03
4	1.09±0.03	1.15±0.03	1.10±0.04
5	1.10±0.03	1.11±0.03	1.13±0.05
6	1.07±0.04	1.14±0.05	1.14±0.06
<i>Ortalama BSF</i>	1.08±0.03	1.14±0.04	1.12±0.05

*BSF değerindeki hata, 3 dozimetrenin ortalama değerinden standart sapma alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.12'ye göre ortalama geri saçılım faktörleri (BSF), TLD-100 için 1.08±0.03; Radkor BeO için 1.14±0.04; Thermalox 995 BeO için 1.12±0.05 elde edilmiştir. TLD-100 için elde edilen BSF faktörü Jansen vd. (1994), Zoetelief vd. (1996), Kramer (2001), Camargo-Mendoza vd. (2011) verilen çalışmalarla uyumlu bulunmuştur. BeO için elde edilen BSF faktörleri, TLD-100 için elde edilen BSF faktörlerine göre daha büyüktür. Bu durumun BeO dozimetresinin TLD-100'e göre farklı boyutlarda olması ve farklı enerji cevaplarına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.9.4.2 Yüzey giriş dozu (ESD)

Yüzey giriş dozu (ESD), fantom yüzeyinde bulunan dozimetrelerin gelen ana X ışını demetinden ve fantom tarafından saçılan fotonlar tarafından soğurulan toplam dozu ifade etmektedir. Farklı fantom kalınlıklarındaki (2, 4, 5 ve 6 cm) yüzey giriş dozunun değişimi için BSF değerinin belirlenmesi aşamasında olduğu gibi fantom üzerine üç adet dozimetre konularak dozimetrelerin uygun kalibrasyon faktörlerinin (ECC, RCF) uygulanması ile elde edilen değerlerin ortalaması kullanılarak ESD değerleri belirlenmiştir. Dozimetreler, fantom üzerine meme duvarından 6 cm uzakta ve fantom üzerinde önceden belirlenen merkez noktalara yerleştirilerek ışınlamalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.51).



Şekil 4.51 Yüzey giriş dozlarının (ESD) belirlenmesi için kurulan deney düzeneği; a) TLD-100, b) BeO dozimetreler

Dozimetreler aracılığı ile ESD değerleri, Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda 28kVp sabit tüp geriliminde artan fantom kalınlığına karşı artan mAs değerler ile yarı otomatik AEC modunda ışınlanarak elde edilmiştir. Işınlama sonucunda dozimetrelerden elde edilen şiddet değerleri ECC ve RCF faktörleri yardımıyla doz değerine dönüştürülerek her bir fantom kalınlıklarında yüzey giriş dozları hesaplanarak Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13 TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için farklı PMMA fantom kalınlıklarında elde edilen sayım değerleri ve yüzey giriş doz değerleri (ESD)

PMMA Fantom Kalınlığı (cm)	TLD-100 (mGy)	Radkor BeO (mGy)	Thermalox995 (mGy)
2	1.07±0.06	2.03±0.12	1.67±0.07
4	3.80±0.18	4.81±0.45	3.93±0.13
5	8.18±0.42	7.68±0.82	8.05±0.28
6	16.98±0.69	17.21±1.14	17.09±0.47

*ESD değerindeki hata, 3 dozimetrenin ortalama değerinden standart sapma olarak hesaplanmıştır.

Ortalama glandüler dozun (MGD) belirlenebilmesi için geri saçılımın olmadığı ESAK doz değeri, yüzey giriş dozunun (ESD) geri saçılım faktörüne (BSF) bölünmesi ile elde edilir. Her bir dozimetre için bulunan yüzey giriş dozlarından ESAK değerine geçiş her

bir kalınlıktaki Çizelge 4.12’de verilen geri saçım faktörleri (BSF) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.14’de verilmiştir.

Çizelge 4.14 İyon odası, TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için ESAK değerleri

PMMA Fantom Kalınlığı (cm)	İyon Odası (mGy)	TLD-100 (mGy)	Radkor BeO (mGy)	Thermalox 995 BeO (mGy)
2	1.080±0.001	1.01±0.08	1.75±0.18	1.49±0.10
4	3.320±0.002	3.49±0.26	4.18±0.50	3.57±0.25
5	6.950±0.003	7.44±0.58	6.92±0.99	7.12±0.56
6	15.220±0.006	15.87±1.24	15.10±1.66	14.99±1.20

*ESAK değerindeki hata, ESD ve BSF değerindeki hatalar dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.13 ve 4.14 farklı PMMA fantom kalınlıklarında elde edilen ESD ve ESAK değerlerini göstermektedir. ESD ve ESAK değerleri artan fantom kalınlığına göre artmaktadır. İyon odası ile ESAK değerleri, iyon odası fantom üzerine koyulup ışınlanarak elde edilmiştir. Bu anlamda tüp çıkışından farklıdır. İyon odasından belirlenen ESAK değerindeki hata, iyon odası ile alınan üç ölçümün ortalama değerinden standart sapması olarak verilmiştir. Her üç dozimetre türü için elde edilen ESD ve ESAK değerleri birbirleri ile uyumludur. Ancak, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için 2 cm fantom kalınlığında elde edilen ESD ve ESAK değerleri TLD-100 ve iyon odasından (sadece ESAK) elde edilen değere göre yüksek çıkmıştır. Bu yüksekliğin sebebinin, geometri ve ışınlama koşullarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

4.9.4.3 Ortalama glandüler doz (MGD)

Ortalama glandüler doz (MGD), Bölüm 2.9.3’de Denklem (2.66)’da verilen yüzey giriş hava kerma değeri (ESAK) ve Dance vd. (2000) tarafından verilen g, c ve s faktörleri aracılığı ile belirlenmiştir. Bir önceki bölümde elde edilen ESAK değerleri ve sistemin HVL’si aracılığı ile Mo/Mo hedef filtre kombinasyonunda Ek 1’de verilen Çizelge 1, 2 ve 4’den belirlenen g, c ve s faktörlerinin çarpılması ile ortalama glandüler doz (MGD) değerleri her bir fantom kalınlığında belirlenmiştir. Çizelge 4.15’de iyon odası, TLD-100,

Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreleri için elde edilen ortalama glandüler doz (MGD) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.15 İyon odası, TLD-100, Radkor ve Thermalox 995 BeO dozimetreler için ortalama glandüler doz (MGD) değerleri

PMMA Fantom Kalınlığı (cm)	İyon Odası (mGy)	TLD-100 (mGy)	Radkor BeO (mGy)	Thermalox 995 BeO (mGy)
2	0.407±0.004	0.38±0.03	0.66±0.07	0.56±0.04
4	0.721±0.002	0.75±0.06	0.91±0.11	0.77±0.06
5	1.242±0.011	1.33±0.11	1.24±0.18	1.27±0.11
6	2.293±0.021	2.39±0.20	2.27±0.26	2.26±0.19

* MGD'deki hata, ESAK değerindeki hata ve HVL değerinin ±0.01 değiştiği varsayılarak belirlenen *g*, *c* ve *s* faktörlerindeki hatalar dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.16'da ise iyon odası referans alınarak dozimetrelerden elde edilen MGD değerlerinin iyon odasından elde edilen değere göre minimum ve maksimum sapmaları verilmiştir.

Çizelge 4.16 Dozimetrelerden elde edilen MGD değerlerinin iyon odasına göre minimum ve maksimum sapma değerleri

İyon odası MGD değerine göre sapma (% min-max)	TLD-100	Radkor BeO	Thermalox 995 BeO
2	(%0.0-14.6)	(%43.9-78.0)	(%19.4-19.5)
4	(%5.0-13.8)	(%9.7-43.1)	(%1.4-15.3)
5	(%3.2-17.7)	(%16.1-16.1)	(%7.3-8.8)
6	(%5.2-13.9)	(%10.9-12.6)	(%4.8-10.9)

* Minimum ve maksimum hata değerleri, MGD değerlerinin, hata sınırının maksimum ve minimum değerleri hesaplanarak bulunmuştur.

Çizelge 4.15'e göre, farklı PMMA kalınlıklarında elde edilen MGD değerleri, hata sınırları içerisinde kendi aralarında uyumlu bulunmuştur. BeO dozimetreleri için 2 cm fantom kalınlığında elde edilen değer iyon odasından elde edilen değere göre yüksek

oluşu, ölçüm geometrisi ve deneysel olarak ışınlama farklılıklarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ortalama glandüler doz (MGD) değerleri, EUREF 2006 protokolüne göre Ek 1’de verilen Çizelge 5’de verilen kabul edilebilir seviye değerlerinin altında bulunmuştur. Ayrıca, Thermalox 995 BeO dozimetrelere, Radkor BeO dozimetrelere kıyasla iyon odasından elde edilen değerlere daha yakın sonuçlar göstermiştir. Çizelge 4.16’da incelendiğinde TLD-100 dozimetrelere 2 ile 6 cm fantom kalınlıklarında iyon odalarına göre minimum ve maksimum sapmaları (%0.1- 17.7) arasındadır. Radkor BeO dozimetrelere için 2 cm’deki değer dahil edilmediği durumda bu sapmalar (%9.7-43.1) arasındadır. Thermalox 995 BeO için (%1.4-19.5) aralığında bulunmuştur. İyon odasında göre en az sapma gösteren dozimetre tipi TLD-100 olmuştur.

Mamografi sistemlerinde ortalama glandüler doz (MGD) değerinin belirlenmesi amacıyla LiF:Mg,Ti (TLD-100) dozimetrelere bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Wochos vd. (1978) tarafından yapılan çalışmada MGD belirlenmesindeki hatanın %20 civarında olduğunu rapor etmişlerdir. Lopez Pineda vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ise MGD’deki bütünleşik hataların %10 olduğu rapor edilmiştir. Camargo-Mendoza vd. (2011) TLD’ler ile hava kerma, yüzey giriş dozu ve derin dozları değerlendirmiş ölçüm hatalarının %5-10 arasında olduğunu rapor etmişlerdir.

Bu çalışmada TLD-100 ile elde edilen ortalama glandüler doz değerleri (MGD) hata sınırları içerisinde yukarıda bahsedilen çalışmalarla uyumlu çıkmıştır. Bunun yanısıra literatürde BeO dozimetrelere mamografi sistemlerinde MGD’nin hesaplanması ile ilgili bir çalışma yoktur. Ortalama glandüler doz değerini hesaplamada OSL dozimetre olarak $Al_2O_3:C$ dozimetrelere kullanılabilmesi Aznar (2005) tarafından rapor edilmiştir. Aznar (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada MGD doz değerleri hasta ölçümlerinde elde edilmiş ve raporlanmıştır. Bunun haricinde Rocha vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, 4.5’cmde ACR fantom kullanılarak $Al_2O_3:C$ dozimetrelere aracılığı ile MGD değeri hesaplanmış ve hesaplanan değer iyon odasından elde edilene göre yaklaşık %3’lük bir sapma gösterdiği rapor edilmiştir.

Meme glandüler dokusu, radyasyona karşı en hassas doku olduğu ve mamografi için radyolojik risk ölçüsü olarak verilmektedir. Ortalama glandüler doz (MGD) değerinin

bilinmesi x ışın sistemlerinin optimizasyonu ve hasta dozlarının azaltılmasına olanak sağlayabilir. Mamografi sisteminde ortalama glandüler doz hesabında TLD-100 gibi TL dozimetreler yaygın bir şekilde kullanılırken, optik uyarmalı lüminesans dozimetrelerin kullanımı üzerine olan araştırmalar oldukça kısıtlıdır. Bu alışma kapsamında BeO dozimetrelerin (Radkor ve Thermalox 995) mamografi sisteminde kullanılabilirliği literatürde ilk defa araştırılmıştır. BeO dozimetrelerin iyi bir tekrarlanabilirliğe ve doz cevaba sahip olduğu görölmüş ve dozimetreler farklı PMMA fantom kalınlıklarında kullanılarak BSF, ESD, ESAK ve MGD değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar birbirleriyle ve EUREF protokolünde verilen kabul edilebilir seviyelerdedir.



5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında yaygın kişisel dozimetre olarak kullanılan ticari adı Thermalox 995 olan BeO dozimetresinin termoluminesans (TL), optik uyarmalı luminesans (OSL) ve elektron spin rezonans (ESR) özellikleri detaylı olarak araştırılmıştır. İlk olarak, Thermalox 995 BeO dozimetresi için, termal sönümlenme olayı iki farklı dalga boyu geçirim karakteristiğine sahip filtreler (Hoya U-340 ve BG-39) kullanılarak araştırılmıştır. Bunun için farklı ısıtma hızlarında elde edilen TL ışınım eğrilerinin dekonvolüsyonu sonucunda pik alan şiddet değerlerinin değişimine bakılarak her bir pikin termal sönüm davranışı incelenmiştir. Termal sönüm olayının daha derin analizi ve pikler üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla termal sönümlenme parametrelerinin (W ve C) belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için 6 adım uygulanmıştır. Bunlar, TL ışınım eğrilerinin dekonvolüsyonu, sıcaklık gecikme düzeltmesi, verim değerlerinin belirlenmesi, sönümlenmemiş TL ışınım eğrilerinin elde edilmesi (rekonstrüksiyon) ve son olarak W ve C parametrelerinin kabul kriterlerinin içeren aşamalardır. Her iki filtre kombinasyonu için elde edilen W ve C parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Yapılan termal sönümlenme çalışması ile literatürde ilk defa BeO dozimetresinin 2. ve 3. piki için termal sönümlenme parametreleri elde edilmiş ve ışınmasız geçişler hakkında bilgi veren C parametresi bulunmuştur.

Termal sönümlenme olayının TL kinetik parametreler ve kullanılan tuzak belirleme yöntemleri üzerindeki etkisi Thermalox 995 BeO için araştırılmıştır. Bu kapsamda, TL kinetik parametreler, dekonvolüsyon yöntemi, kesikli ışınım eğrisi tekniği, pik şekli yöntemi, izotermal bozunum yöntemi ve farklı ısıtma hızları metotları ile incelenmiştir. Bunun sonucunda 2. TL pikinin termal verim değerinin $0.54 < \eta(T) < 1$ arasında değerler aldığı, 3. TL pikinin termal verim değerinin ise $\eta(T) < 0.54$ bölgesinde olduğu görülmüştür. Termal sönümlenme olayının $\eta(T) < 0.54$ bölgesindeki pikler için daha etkin olduğu bilinmektedir. Bu durumda, 3. pikin 2. pike göre termal sönümlenme olayından daha fazla etkilendiğini ortaya çıkmıştır. Bu etkinin detaylı olarak analizi için W ve C parametreleri kullanılarak pikler yeniden yapılandırılmış (rekonstrüksiyon) ve bunun sonucunda sönümlenmemiş TL ışınım eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen sönümlenmemiş TL ışınım eğrileri aracılığı ile TL kinetik parametreler tekrar hesaplanmış; termal

sönümlenme olayından etkilenmeyen yöntemin izotermal bozunum yöntemi olduğu görülmüştür. Termal sönümlenme olayından en fazla etkilenen 3. pikin termal sönümlenme düzeltilmesi olmadığı durumda pik şekli ve dekonvolüsyon metotları (Lambert-W) dikkate alındığında %10-12, farklı ısıtma hızları yönteminde ise %7-10 arasında kinetik parametreler daha düşük elde edilmiştir. 2. pik için ise bu oran %2-5 arasındadır. Frekans faktörü için, tüm metotlar dikkate alındığında düzeltme yapılmadığı durumda 2. pik için %10-20 aralığında daha düşük sonuçlar elde edilirken, 3. pik için iki mertebe daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuç olarak, tuzak parametrelerinin hesaplanmasında izotermal yöntem hariç diğer metotların termal sönümlenme düzeltilmesine ihtiyacı olduğu ve rekonstrüksiyon sonucunda TL kinetik parametrelerinin iyileştirilebileceği görülmüştür. Termal sönümlenme olayının pikler üzerindeki etkisi, ilgilenilen pikin termal verim değerinin 0.54 değerinden uzaklaştıkça arttığı görülmüştür.

Thermalox 995 BeO dozimetresinin OSL özellikleri dekonvolüsyon yönetimi ile araştırılmış ve bunun sonucunda OSL eğrisinin iki bileşenden oluştuğu (C_1 ve C_2) görülmüştür. Bu bileşenler için yaşam ömürleri ve fotoiyonizasyon tesir kesitleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra TA-OSL sinyallerinin varlığı araştırılmış; BeO'de çok derin tuzaklarının varlığı gösterilmiştir. BeO için ışınlanmamış durumda ESR spektrumu gözlemlenememişken, 1kGy $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ve ^{60}Co gama kaynağı ile ışınlanması durumunda oda sıcaklığında ESR spektrumu elde edilmiştir. Bunun sonucunda oda sıcaklığında iki ayrı merkeze ait ESR sinyali elde edilmiştir. Bunun yanı sıra 180°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda yeni bir merkez ortaya çıkarak toplamda üç adet ESR merkezi tespit edilmiştir. Elde edilen TL pikleri, OSL bileşenleri ve ESR merkezlerinin birbirleriyle olan korelasyonu her bir TL piki, OSL bileşeni ve ESR merkezi için kademeli tavlama (step annealing) ve ağartma (bleaching) deneyleri gerçekleştirilerek araştırılmıştır. Bunun sonucunda, 2. TL pikinin, C_1 OSL bileşeni ile ilişkili olduğu ve bu sinyallerin kaynağının alüminyum merkezinden (Al^{+2}) ve anizotropik özellik gösteren oksijen (O^\cdot) merkezlerinden kaynaklanabileceği görülmüştür. 3. TL pikinin ise C_2 OSL bileşeni ile ilişkili olduğu ve elde edilen bu sinyallerin kaynağının ise izotropik özellik gösteren oksijen merkezinin (O^\cdot) sorumlu olabileceği gösterilmiştir. Bu korelasyon kapsamı çerçevesinde literatürde ilk defa BeO için elde edilen merkezlerin izotermal bozunum, ağartma (bleaching) davranışı ve termal aktivasyon enerjileri elde edilmiştir.

Thermalox 995 BeO dozimetresinin haricinde, Radkor Personel Dozimetre Şirketinden satın alınan BeO dozimetrelerin TL ve OSL sinyalleri kapsamlı olarak araştırılmış ve Thermalox 995 BeO'in TL ve OSL sinyalleri ile olan farklılıkları incelenmiştir. TL özellikleri dekonvolüsyon ve kesikli ışığa eğrisi tekniği ile OSL özellikleri ise dekonvolüsyon metodu ile incelenmiştir. Termal sönmelenme olayı ve TL ile OSL arasındaki ilişki $T_{max} - T_{stop}$ deneyleri aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Minimum dedekte edilebilen doz (MDD) değeri, TL ve OSL doz cevap davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, Radkor BeO dozimetrelerin TL sinyali ile minimum dedekte edilebilen doz değerinin $50\mu\text{Gy}$ olduğu (Çizelge 4.6) ve Radkor BeO dozimetrelerden elde edilen TL şiddet değerinin aynı doz değerinde Thermalox 995 BeO'e göre 10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. OSL modunda ise aynı doz değerinde Thermalox 995 BeO dozimetrelerden elde edilen şiddet değeri Radkor BeO dozimetrelere göre 6 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

BeO dozimetrelerin sağlık fiziğinde bir uygulaması olarak dozimetrelerin mamografi sisteminde kullanılabilirliği farklı kalınlıklarda PMMA fantomlar kullanılarak araştırılmıştır. BeO dozimetrelerin iyi bir tekrarlanabilirliğe ($\pm\%5$) ve doz cevaba ($R^2=0.99$) sahip olduğu görülmüştür. Mamografi sistemi için önemli bir parametre olan ve radyolojik riski temsil eden ortalama glandüler doz (MGD) değeri literatürde ilk defa BeO dozimetreler (Radkor ve Thermalox 995) kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, geri saçılım faktörleri (BSF), yüzey giriş hava kerma (ESAK), yüzey giriş dozları (ESD) belirlenmiştir (Çizelge 4.12,13,14). Benzer işlemler LiF:Mg,Ti (TLD-100) dozimetreler ve iyon odası kullanılarak (ESAK ve MGD için) tekrarlanmıştır (Çizelge 4.15). TLD-100 dozimetresi ile belirlenen BSF faktörlerinin literatürdeki değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür. BeO dozimetresi için elde edilen BSF faktörlerinin TLD-100'den elde edilene göre daha büyük olduğu bunun sebebinin dozimetrenin boyutlarının farklı olması ve enerji cevabının farklı oluşundan kaynaklanabileceği öngörülmüştür. Elde edilen ESD ve ESAK değerlerinin artan PMMA fantom kalınlıkları ile arttığı görülmüştür. Genel olarak tüm dozimetrelerden elde edilen ESD ve ESAK değerleri hata sınırları içerisinde birbirleri ile uyumlu iken, yalnızca 2 cm fantom kalınlığında BeO dozimetreler (Radkor ve Thermalox 995) kullanılarak elde edilen değerler TLD-100 ve iyon odasında göre yüksek çıkmıştır. Bunun sebebinin deneysel ışınlama koşullarındaki hatalardan

kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Elde edilen MGD değerlerinin hata sınırları içerisinde birbirleri ile uyumlu olduğu ve EK 1, Çizelge 5’de verilen EUREF protokolüne göre kabul edilebilir seviyeler arasında olduğu görülmüştür. İyon odası kullanılarak elde edilen MGD değeri referans olarak alındığında, TLD-100’lerin maksimum sapmasının yaklaşık olarak %14, Radkor BeO dozimetrelerin yaklaşık olarak %46 (2 cm’deki değer dahil edilmediğinde) ve Thermalox 995 BeO’un ise yaklaşık %20 olduğu görülmüştür.

Termal sönümlenme çalışmaları neticesinde, doz belirlemede kullanılacak olan materyal ile doz değerlendirme işlemine geçilmeden önce termal sönümlenme olayının varlığının detaylı olarak araştırılması öngörülmektedir. Özellikle dozimetrik piklerin termal sönüme uğradığı durumlar büyük önem taşımaktadır. Böyle bir durumda elde edilecek TL verileri termal sönüm sebebiyle düşük değerler vereceğinden belirlenen doz değerlerinde kayıplar yaşanacaktır. Bu kayıplar, termal verim değerinin 0.54 değerinden daha düşük değerlere ulaştığı durumlarda daha da artacaktır. Sonuç olarak, yapılan doz değerlendirme işlemleri gerçek değerinden daha düşük bulunacaktır. Bunun yanı sıra, termoluminesans olayını tarif eden TL kinetik parametreleri (E, s, b) de termal sönümlenme olayından dolayı daha düşük elde edilecektir. Bu hataların önüne geçilebilmesi için termal sönümlenme olayına maruz kalan pik ve/veya pikler için ilk olarak W ve C parametreleri belirlenmeli; ardından bu parametreler kullanılarak yeniden yapılandırma (rekonstrüksiyon) işlemi aracılığı ile sönümlenmemiş TL piklerine ulaşılmalıdır. Sönümlenmemiş pikler ile işlemler yapılması daha güvenli ve doğru sonuçların doğmasına yol açacaktır. Bahsedilen bu nedenlerden dolayı, dozimetre ve tarihlendirme gibi alanlarda kullanılacak olan materyalin termal sönümlenme olayı detaylı olarak araştırılmalı ve termal sönümlenme olayı dikkate alınarak uygun okuma protokolleri geliştirilmelidir.

TL, OSL sinyali ve ESR spektrumunun korelasyonu çalışması neticesinde, lüminesans tuzak-yük mekanizması ve kristal yapının anlaşılması amacı ile büyük önem taşımaktadır. Materyaldeki TL piklerinin ışığın etkisi ile olan davranışı ya da tersi olarak OSL sinyalinin sıcaklıkla olan ilişkisi lüminesans olayının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. TL ve OSL sinyalleri arasındaki ilişkinin araştırılması materyaldeki tuzakların davranışlarını açıklayacağından doz hesaplamalarında kullanılacak olan materyaller açısından büyük önem taşımaktadır. TL ve OSL korelasyonuna ek olarak, ESR olayının her iki yöntemle olan ilişkinin araştırılması sayesinde ise TL ve OSL

sinyallerinden sorumlu merkezler (safsızlık/kusur) bulunabilmektedir. Bu merkezlerin sıcaklık ve ışık ile davranışının bilinmesi; belirlenen merkezlerin miktarının artırılması ile lüminesans veriminin artması sağlanabilir. Lüminesans veriminin artması ile daha düşük doz değerlerinin ölçümü mümkün hale getirilebilecektir. Böylece, doz değerlendirme işlemlerinde yeni okuma protokolleri geliştirilerek daha hassas ve etkin bir şekilde doz değerlendirilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Dozimetrelerin lüminesans özellikleri, ilk üretim anındaki basınç, sıcaklık vb. gibi fiziksel olaylar, tavlama, yüksek dozlarda ışınlama ve kristal içerisine katkılanırlan elementlerden dolayı değişim gösterebilmektedir. Bunun yanı sıra, aynı elementel içerik ve özelliğe sahip olmasına rağmen farklı firmalardan alınan aynı tipteki dozimetreler dahi farklı lüminesans özellikleri gösterebilmektedir. Bu yüzden satın alınan dozimetrelerle doğrudan doz değerlendirme işlemlerine geçilmeden önce bir takım ön işlemlere tabi tutularak lüminesans özellikleri araştırılmalı ve daha önce literatürde bilinen özellikleri ile kıyaslanmalıdır. Dozimetreler ile doz değerlendirmesi yapılırken aynı tipte ve aynı firmadan satın alınan dozimetreler kullanılmalıdır. Böylece ortaya çıkacak olan farklılıklar en aza indirgenmiş olacaktır.

Meme kanserinin teşhisi için en etkin yöntem olarak bilinen mamografi sistemlerinde hastaya verilen doz, meme karakteristiğine göre değişim göstermektedir. Ortalama meme glandüler doz (MGD) değeri belirli limitler arasında olması gerekmektedir. Elde edilen verilen ışığında, ortalama glandüler dozun (MGD) belirlenmesinde, BeO dozimetreler kolay kullanım (hızlı okuma ve hızlı tavlama koşulları), kolay erişilebilirlik, düşük maliyet ve en önemlisi doku eşdeğeri olması gibi özellikleri sayesinde mamografi sistemlerinde alternatif dozimetre olarak kullanılabilceği öngörülmektedir. Bunun yanı sıra, BeO dozimetreler, fiber optik kablolar aracılığı ile anlık olarak canlı içi (*in vivo*) doz ölçümlerinde önemli bir potansiyele sahiptir. Böylece, BeO dozimetresi gelecek uygulamalar için mamografide muayene esnasında anlık olarak alınan doz değerlerini belirlemede kullanılabilceği öngörülmektedir. Canlı içi (*in vivo*) anlık lüminesans dozimetre ile hastaların çekim esnasında fazla doza maruz kalıp kalmadığı anlaşılabilir ve geliştirilecek olan bu sistem medikal görüntüleme sistemlerinde doz optimizasyonuna katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, S.N.2007. Physics and Engineering of Radiation Detection, Elsevier, 784p. USA.
- Akselrod, A.E. and Akselrod, M.S. 2002. Correlation between OSL and the distribution of TL traps in Al₂O₃:C. Radiat. Prot. Dosim., 100, 217–220.
- Akselrod, M.S., Larsen,N.A., Whitley, V. and McKeever, S.W.S. 1998. Thermal quenching of F-center luminescence in Al₂O₃:C. J. Appl. Phys. 84, 3364-3373.
- Akyol, O. 2004. Mamografik İncelemelerde Glandüler Doku Dozunun ve Görüntü Kalitesinin Farklı Sistemlerde ve Işınlama Parametrelerinde Ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara.
- Albrecht, H. O. and Mandeville, C. E. 1956. Storage of energy in BeO. Phys Rev., 101, 1250.
- American College of Radiology (ACR) 1999. Mammography, quality control manual.
- Anonymous. 1998. TLD-Oven Instruction manual. PTW-Freiburg Germany.15 pages.
- Anonymous. 2007. Alpha RT Operation Instructions. General electric company Inc, Hungary, 74 pages.
- Anonymous. 2017. Risø TL/OSL-DA-20 Reader User Manual. DTU Nutech, Denmark, 57 pages.
- Antonov-Romanovsky, V. V., Keirum-Markus, I. F., Poroshina, M. S. and Trapeznikova, Z. A. 1956. IR stimuable phosphors. In Conference of Academy of Sciences of the USSR on the Peaceful Uses of Atomic Energy, USAEC Report AEC-tr-2435 Pt. 1, 239-250.
- Aşlar, E., Şahiner, E., Polymeris, G.S. and Meriç, N. 2017b. Determination of trapping parameters in BeO ceramics in both quenched as well as reconstructed thermoluminescence glow using various analysis methods. Appl. Radiat. Isot., 129,142-151.

- Aşlar, E., Meriç, N., Şahiner, E., Erdem, O., Kitis, G. and Polymeris, G.S. 2019. A correlation study on the TL, OSL and ESR signals in commercial BeO dosimeter yielding intense transfer effects. *Journal of Luminescence*, 214, 116533.
- Aşlar, E., Meriç, N., Şahiner, E., Kitis, G. and Polymeris, G.S., 2017a. Calculation of thermal quenching parameters in BeO ceramics using solely TL measurements. *Rad. Meas.* 103, 13-25.
- Aznar, M. C. 2005. Real-time in vivo luminescence dosimetry in radiotherapy and mammography using Al₂O₃:C. Ph.D. thesis, RisØ-National Laboratory, 115p., Denmark.
- Bacci, C., Bernardi, P., Damilano, A., Furetta, C. and Rispoli, B. 1989. Kinetics parameters in BeO thermoluminescent material. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 22, 1751-1757.
- Balian, H.G. and Eddy, N.W. 1977. Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectral peaks. *Nucl. Instr. and Meth* 145, 389-395.
- Beir, V. 1990. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. Technical report, National Research Council (US), Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, National Academy Press (US), Washington.
- Betts, D.S. and Townsend, P.D. 1993. Temperature distribution in thermoluminescence experiments. II: some calculational models. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 26, 849-857.
- Bilski, P., Marczewska, B., Twardak, A., Mandowska, E and Mandowski, A. 2014. OSL signal of lithium fluoride and its relationship with TL glow-curves, *Radiation Measurements*, 71, 61-64.
- Boone J. M. 2002. Normalized glandular dose (DgN) coefficients for arbitrary X-ray spectra in mammography: computer-fit values of Monte Carlo derived data. *Med. Phys.* 29(5), 869–875.

- Boone, J.M. 1999. Glandular breast dose for monoenergetic and high-energy X-ray beams: Monte Carlo assessment. *Radiology*, 213, 23-37.
- Bos, A.J.J. 2001. High sensitivity thermoluminescence dosimetry. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 184, 3–28.
- Bos, A.J.J. 2007. Theory of thermoluminescence. *Radiation Measurements*, 41, S45-S56.
- Bøtter-Jensen, L., McKeever, S.W.S. and Wintle, A.G. 2003. *Optically stimulated luminescence dosimetry*. Elsevier, 374 p., Amsterdam.
- Bradshaw, W. W., Cadena, D. G., Crawford, G. W. and Spetzler, H. A. 1962. The use of alanine as a solid dosimeter, *Radiat. Res.* 12:11-21.
- Bulur, E. 2007. Photo-transferred luminescence from BeO ceramics. *Radiat. Meas.* 42, 334-340.
- Bulur, E. and Göksu, H. Y. 1998. OSL from BeO ceramics: new observations from an old material. *Radiat. Meas.* 29, 639-650.
- Bulur, E. and Saraç, B.E. 2013. Time-resolved OSL studies on BeO ceramics. *Radiat. Meas.* 59, 129-138.
- Bulur, E. and Yeltik, A. 2010. Optically stimulated luminescence from BeO ceramics: An LM-OSL study, *Radiat. Meas.*, 45, 29–34.
- Bushberg, J. T., Seibert, J.A., Leidholdt, E. M. and Boone, J. M. 2002. *The essential physics of medical imaging*. Lippincott williams & wilkins, 1048p., Philadelphia.
- Camargo-Mendoza, R., et al., 2011. Measurement of some dosimetric parameters for two mammography systems using thermoluminescent dosimetry. *Radiat. Meas.* 46 (12), 2086-2089.
- Chen, R. 1969b. Glow curves with general order kinetics. *J. Electrochem. Soc.*, 116, 1254-1257.
- Chen, R. and Kirsh, Y. 1981. *Analysis of thermally stimulated processes*. Pergamon Press, 361p., Oxford.

- Chen, R. and McKeever, S.W.S. 1997. Theory of thermoluminescence and related phenomena. World Scientific, 576p., Singapore.
- Chen, R. and Pagonis V. 2011. Thermally and optically stimulated luminescence: a simulation approach, Wiley, 434 p., New Jersey.
- Chen, R. and Pagonis, V. 2019. Advances in Physics and Applications of Optically and Thermally Stimulated Luminescence. World Scientific, Singapur, 528 p.
- Chen, R. and Winer, S.A.A. 1970. Effects of various heating rates on glow curves. J. Appl. Phys., 41, 5227-5232.
- Corless, R.M., Gonnet, G.H., Hare, D.G.E., Jeffrey, D.J. and Knuth, D.E. 1996. On the Lambert W function. Adv. Comput. Math., 5, 329-359.
- Coşkun, S. 2019. Berilyum oksit (BeO) Dozimetrelerde OSL ölçüm parametrelerinin doz cevap özelliklerine göre optimizasyonu, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 91s.
- Cruse, K.W. and Gammage, R.B. 1975. Improvements in the use of ceramic BeO for TLD. Health. Phys., 29, 739-746.
- Curie, D. 1963. Luminescence in Crystals. Methuen Pub., 332p., London.
- Dallas, G. I., Afouxenidis, D., Stefanaki, E. C., Tsagas, N. F., Polymeris, G. S., Tsirliganis, N. C. and Kitis, G. 2008. Reconstruction of the thermally quenched glow curve of Al₂O₃:C. Phys. Stat. Sol.(a), 205, 1672-1679.
- Dance, D. R. 1987. A method for reconstruction of diagnostic x-ray spectra from measurements of attenuation. Phys. Med. Biol. 1987, 32, 1631-1638.
- Dance, D.R. 1990. Monte Carlo calculation of conversion factors for the estimation of mean glandular breast dose, Phys.Med.Biol., 35, 1211-1219.
- Dance, D.R., Skinner, C.L., Carlsson, G.A. 1999. Breast dosimetry. Appl. Radiat. Isot. 50, 185–203.
- Dance, D.R., Skinner, C.L., Young, K.C., Beckett, J.R. and Kotre, C.J. 2000, Additional factors for the estimation of mean glandular dose using the UK mammography protocol, Phys.Med.Biol., 45, 3225-3240.

- Dance, D.R., Young, K.C. and van Engen, R.E. 2009. Further factors for the estimation of mean glandular dose using the United Kingdom, European and IAEA breast dosimetry protocols. *Physics in Medicine and Biology*, 54, 4361-72.
- Daniels, F., Boyd, C.A. and Saunders, D.F. 1953. Thermoluminescence as a Research Tool. *Science*, 117, 3040, 343-349.
- Dexter, D.L., Klick, C.C. and Russell, G.A. 1955. Criterion for the occurrence of luminescence. *Phys. Rev.*, 100, 603-605.
- Di Maria, S, Barros, S., Bento, J., Teles, P., Figueira, C., Pereira, M., Vaz, P. and Paulo, G. 2011. TLD measurements and Monte Carlo simulations for glandular dose and scatter fraction assessment in mammography: A comparative study, *Radiat. Meas.* 46, 1103-1108
- Doğan, N. and Toprak, D. 2014. Female breast cancer mortality rates in Turkey. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 15(18), 7569-73.
- DuVarney, R.C., Garrison, A.K. and Harem, S.B. 1971. Electron paramagnetic resonance study of Al^{+3} in BeO. *Phys. Status Solidi B*45, 259.
- EUREF. 2006. European guidelines for quality assurance in breast cancer screening and diagnosis. fourth edition, Belgium.
- Garlick, G.F.J. and Gibson, A.F. 1948. The electron trap mechanism of luminescence in sulphide and silicate phosphors. *Proc. Phys. Soc.*, 60, 574–589.
- Gobrecht, H. and Hofmann, D. 1966. Spectroscopy of traps by fractional glow technique. *J. Phys. Chem. Solids*, 27, 509-522.
- Gotlib, V.I., Kantorovich, L.N., Grebenshikov, V.L., Bichev, V.R. and Nemiro, E.A. 1984. The study of thermoluminescence using the contact method of sample heating. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 17, 2097-2114.
- Halperin, A. and Braner, A.A. 1960. Evaluation of thermal activation energies from glow curves. *Phys. Rev.*, 117 (2), 408–415.
- Herve, A. and Maffeo, B. 1970. EPR identification of V_1 centers in irradiated BeO. *Phys. Lett.*, 32A , 247.

- Heywang-Kobrunner, S. H., Dershaw, D.D., and Schreer, I. 2002. Diagnostic breast imaging: mammography, sonography, magnetic resonance imaging, and interventional procedures. *European radiology*, 12(8),2127.
- Hirning, C.R. 1992. Detection and determination limits for thermoluminescence dosimetry. *Health Physics*, 62(3), 223–227.
- Hoogenstraten W. 1958. Electron traps in ZnS phosphors. *Philips Res. Rep.*, 13, 515-562.
- Huntley, D. J., Godfrey-Smith, D. I. and Thewalt, M. L. W. 1985. Optical dating of sediments. *Nature* 313, 105-107.
- Ibarra, A., López, F.J. and de Castro, M.J. 1991. V centers in MgAl₂O₄ spinels, *Phys.Rev.* B44, 7256.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 1987. Statement from the 1987 Como meeting of the ICRP. ICRP Publication 52, *Annals of the ICRP* 17(4).
- Ikeya, M. 1993. New applications of electron spin resonance dating, dosimetry and microscopy, World Scientific, 520 p., Singapore.
- IPSM (Institute of Physical Sciences in Medicine).1994. The commissioning and routine testing of mammographic x-ray systems, 2nd edn. Topic Group Report 59. IPSM, York.
- Jackson, S. D. and Hargreaves, J. S. J. 2009. Metal oxide catalysis, Wiley-VCH, 887 p., Weinheim.
- Jahn, A., Sommer, M. and Henniger, J. 2010. 2D-OSL-dosimetry with beryllium oxide. *Radiat. Meas.*, 45 (3-6), 674-676.
- Jahn, A., Sommer, M., Ullrich, W., Wickert, M. and Henniger, J. 2013. The BeOmax system-Dosimetry using OSL of BeO for several applications. *Radiat. Meas.*, 56, 324-327.

- Jamal, N. and Mclean, D. 2003. A study of mean glandular dose during diagnostic mammography in Malaysia and some of the factors affecting it. *The British Journal of Radiology*, 76, 238-245.
- Jansen, J. Th., Dierker, J. and Zotelief J. 1994. Calculation of air-kerma to average glandular dose conversion factors for mammography units employing various target-filter combinations Proc. 10th Sci. Symp. of the Belgian Society of Hospital Physicists ed B Schanken and J Vanregemorter (Antwerp: BVZF/SBPH), 67–76.
- Kalita, J.M. and Wary, G. 2015. Thermal quenching in calcite and evaluation of quenching parameters from composite glow curve by a computerized resolved peak technique. *Journal of Luminescence* 160, 134–137.
- Kirsh, Y. and Chen, R. 1991. Analysis of the blue phosphorescence of X-irradiated albite using a TL-like presentation. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. D.*, 18, 37-40.
- Kitis, G. 2002. Confirmation of the Influence of Thermal Quenching on the Initial Rise Method in α -Al₂O₃:C. *Phys. Status Solidi A*, 191, 621.
- Kitis, G. and Pagonis, V. 2008. Computerized curve deconvolution analysis for LM-OSL. *Rad. Meas.* 43, 737-741.
- Kitis, G. and Tuyn, J.W.N. 1998. A simple method to correct for the temperature lag in the TL glow-curve measurements. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31, 2065–2073.
- Kitis, G. and Vlachos, N.D. 2012. General semi-analytical expressions for TL, OSL and other luminescence stimulation modes derived from the OTOR model using the Lambert W-function. *Radiat. Meas.* 48, 47-54.
- Kitis, G., Kiyak, N., Polymeris, G.S. and Tsirliganis, N.C. 2010. The correlation of fast OSL component with the TL peak at in quartz of various origins. *Journal of Luminescence*, 130(2), 298-303.
- Kitis, G., Kiyak, N.G., Polymeris, G.S. and Pagonis, V. 2010. Investigation of OSL signals from very deep traps in unfired and fired quartz samples *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 268, 592-598.

- Kitis, G., Chen, R., Pagonis, V., Carinou, E. and Kamenopoulou, V. 2006. Thermoluminescence under an exponential heating function: I. Theory. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 39, 1500-1507.
- Kitis, G., Gomez-Ros, J.M. and Tuyn, J.W.N. 1998. Thermoluminescence glow-curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31, 2636–2641.
- Kitis, G., Papadopoulos, J.G., Charalambous, S. and Tuyn, J.W.N. 1994. The influence of heating rate on the response and trapping parameters of α -Al₂O₃:C. *Radiat. Prot. Dosim.*, 55, 183-190.
- Kramer, R., Drexler, G., Petoussi-Hens, N., Zankl, M., Regulla, D., Panzer, W., 2001. Backscatter factors for mammography calculated with Monte carlo methods. *Phys. Med. Biol.* 46, 771-781.
- Lakshmanan, A. 2008. Luminescence and display phosphors: phenomena and applications. Nova Science Pub Inc, 315p., New York.
- López-Pineda, E., Ruiz-Trejo, C. and Brandan, M.E. 2014. A mammographic phantom to measure mean glandular dose by thermoluminescent dosimetry. *Radiat. Meas.*, 71, 297-299.
- Mahdiraji, G.A., Dermosesian, E., Ghomeishi, M. and Mahamd Adikan, F.R.2016. Photonic Sensors: Glass Optical Fibers as Dosimeters. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering,
- Manam, J. and Sharma, S.K. 2005. Evaluation of trapping parameters of thermally stimulated luminescence glow curves in Cu-doped Li₂B₄O₇ phosphor. *Radiat. Phys. Chem.*, 72, 423-427.
- Martini, F. H., Nath, J. L. and Bartholomew, E. F. 2006. Fundamentals of anatomy & Physiology. Pearson PLC,1298p., London.
- May, C.E. and Partridge, J.A., 1964. Thermoluminescence kinetics of alpha irradiated alkali halides. *J. Chem. Phys.*, 40, 1401–1415.
- McKeever, S W.S. 2000. Luminescence dosimetry: recent developments in theory and applications. 13. National Congress on Solid State Dosimetry, 23-39.

- McKeever, S. W. S. 1985. Thermoluminescence of solids. Cambridge University Press,, 392 p., New York.
- McKeever, S. W. S., Moscowitch, M. and Townsend, P. D. 1995. Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses. Nuclear Technology Pub, 210p., United Kingdom.
- McKeever, S.W.S. 1980b. Thermoluminescence in LiF: analysis of the glow-curves. Nucl.Instrum. Meth., 175,19-20.
- McKeever, S.W.S. 1980c. The analysis of thermoluminescence glow-curves from meteorites. Mod. Geol., 7, 105-114.
- Moore, L.E. 1957. Thermoluminescence of sodium sulfate and lead sulfate and miscellaneous sulfates, carbonates and oxides. J. Phys. Chem., 61, 636-639.
- Mukherjee, B. 2015. LiBe-14: A novel microdosimeter using LiF and BeO thermoluminescence dosimeter pairs for clinical and aerospace applications, Radiat. Meas., 72, 31-38.
- Mukherjee, B., Fuentes, C. and Lambert, J. 2017. Out-of-field dosimetry and 2nd cancer risk assessment of child patients under proton therapy using a TLD-based microdosimeter. Radiat. Meas. 106, 336-340.
- Nambi, K. S. V., Bapat, V. N., and Ganguly, A. K. 1974. Thermoluminescence of CaSO₄ doped with rare earths, J. Phys. C: Sol. St. Phys. 7, 4403.
- National Cancer Institutes (NCI), Web sitesi. <https://www.cancer.gov/>, Erişim Tarihi:12.09.2019.
- Nicholas, K.H. and Woods, J. 1964. The evaluation of electron trapping parameters from conductivity glow curves in cadmium sulphide. British Journal of Applied Physics, 15 (7), 783-95.
- Nieto, J. A., Vega, C.A., Montalvo, T.R. and Cabrera, E.T. 2016. Determination of the kinetic parameters of BeO using isothermal decay method. Appl. Radiat. Isot., 108, 8-11.

- Nyström, L., Rutqvist, L.E., Wall, S., Lindgren, A., Lindqvist, M., Rydén, S., Andersson, I., Bjurstam, N., Fagerberg, G., Frisell, J. et al. 1993. Breast cancer screening with mammography: overview of Swedish randomised trials. *The lancet*, 17;341(8851),973–978.
- Özdemir, A., Kurt, K. and Yeğingil, Z. 2018. Optically Stimulated Luminescence (OSL) dosimetric properties of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag,Gd}$ and its relationship with thermoluminescence (TL) glow-curves. *Journal of Alloys and Compounds*, 751, 159-169.
- Pagonis, V., Ankjrgaard, C., Murray, A.S., Jain, M., Chen, R., Lawless, J. and Greilich, S. 2010. *J. Lumin.*, 130, 902.
- Parkin, D.M., Bray, F., Ferlay, J., Pisani, P. 2005. Global cancer statistics 2002. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 55(2),74–108.
- Patrick, L. Breast normal anatomy cross-section. 2006. Web sitesi: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Breast_anatomy_normal.jpg, Erişim Tarihi: 20.10.2019.
- Petrov, S.A. and Bailiff, I.K.1997. Determination of trap depths associated with TL peaks in synthetic quartz (350-550K). *Radiat. Meas.*, 27, 185-191.
- Piters, T. M. and Bos, A.J.J. 1994. Effects of non-ideal heat transfer on the glow curve in thermoluminescence experiments. *J.Phys. D: Appl. Phys.*, 27, 1747-1756.
- Polymeris, G.S. and Kitis, G. 2012. Thermally assisted photo transfer OSL from deep traps in $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ grains exhibiting different TL peak shapes. *Appl. Radiat. Isot.*,70,. 2478–248.
- Polymeris, G.S. 2016. Thermally assisted OSL (TA-OSL) from various luminescence phosphors; an overview. *Radiat. Meas.*, 90, 145-152.
- Polymeris, G.S., Kitis, G. and Tsirliganis, N.C. 2006, Correlation between TL and OSL properties of $\text{CaF}_2:\text{N}$. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 251(1), 133-142.

- Polymeris, G.S., Raptis, S., Afouxenidis, D., Tsirliganis, N.C. and Kitis, G. 2010. Thermally assisted OSL from deep traps in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$, *Radiat. Meas.*45, 519-522.
- Protherm Furnaces, Web sitesi. <http://www.prothermfurnaces.com/chamber-furnaces/plf-series>. Erişim Tarihi: 20.09.2019.
- Radcal, Web sitesi. <http://radcal.com/10x6-6m-mammography-ion-chamber>. Erişim Tarihi: 20.09.2019.
- Ranby, B. and Rabek, J. F.1977. ESR spectroscopy in polymer research. Springer, 410 p.,Germany.
- Randall, J.T. and Wilkins, M.H.F. 1945a. Phosphorescence and electron traps: I. the study of trap distributions. *Proc. R. Soc. London A* 184, 366–389.
- Randall, J.T. and Wilkins, M.H.F. 1945b. Phosphorescence and electron traps: II. The interpretation of long-period phosphorescence. *Proc. R. Soc. London A* , 184, 390–407.
- Reinberg, A.R. 1964. Electron spin resonance of boron in single-crystal BeO. *J. Chem. Phys.* 41, 850.
- Rhyner, C.R and Miller, W.G. 1970. Radiation dosimetry by optically-stimulated luminescence of BeO, *Health Phys.*,18(6):681-4.
- Rieger, P.H. 2007. Electron spin resonance analysis and interpretation. The Royal Society of Chemistry, 281 p., Cambridge.
- Rocha, F.D.G., Villani, D., Campos, V.P., Nogueira, M.S., Goulart, M.E., Sichito, V.A. and Campos, L.L. 2019. Performance of TL and OSL techniques using CaSO_4 and Al_2O_3 dosimeters for mean glandular dose (MGD) and entrance surface skin dose (ESD) determination in a digital mammographic unit as alternative dosimeters. *Radiation Physics and Chemistry*, 155, 48-52.
- Sadek, A.M., Eissa, H.M. Basha, A.M. and Kitis, G. 2014b. Development of the peak fitting and peak shape methods to analyze the thermoluminescence glow-

curves generated with exponential heating function. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B 330, 103 – 107.

Sadek, A.M., Eissa, H.M. Basha, A.M., Carinou, E., Askounis, P. and Kitis, G. 2015. The deconvolution of thermoluminescence glow-curves using general expressions derived from the one trap-one recombination (OTOR) level model. Appl. Radiat. Isot., 95, 214–221.

Samoilovich, M.I. and Tsinober, L.I. 1970. Characteristics of radiation color centers and microisomorphism in crystals, Sov. Phys. Crystallogr. 14, 656-666.

Santos, A. M. C., Mohammadi, M., Asp, J., Monro, T. M. and Afshar V., S. 2013. Characterisation of a real-time fibre-coupled beryllium oxide (BeO) luminescence dosimeter in X-ray beams, Radiat. Meas., 53-54, 1-7.

Scarpa, G. 1970. The dosimetric use of beryllium oxide as a thermoluminescent material: a preliminary study. Phys. Med. Biol., 15, 667-672.

Schirmer, O.F. 1968. The structure of the paramagnetic lithium center in zinc oxide and beryllium oxide, J. Phys., Chem. Solids 29, 1407.

Sfampa, I. K. , Polymeris, G. S., Pagonis V. and Kitis. G. 2019. Correlation between isothermal Tl and Irsl in K-Feldspars of various types. Radiation Physics and Chemistry, 165, 108386.

Siegel, R.L., Miller, K.D. and Jemal, A. 2017. Cancer statistics, 2017, CA: A Cancer Journal for Clinicians, 67(1), 7–30.

Singh, V. and Rao, T.K.G. 2008. Studies of defects in combustion synthesized europium-doped LiAl_5O_8 red phosphor. J. Solid State Chem., 181, 1387.

Smith, RA., Duffy, SW., Gabe, R., Tabar, L., Yen, AM., Chen, TH. 2004. The randomized trials of breast cancer screening: what have we learned?. Radiologic Clinics of North America, 42(5), 793–806.

Sobol, W. T. and Wu, X. 1997. Parametrization of mammography normalized average glandular dose tables. Med. Phys. 24(4), 547–554.

- Sommer, M., Freudenberg, R. and Henniger, J. 2007. New aspects of a BeO-based optically stimulated luminescence dosimeter, *Radiat. Meas.*, 42, 617-620.
- Soni, A., Mishra, D.R., Bhatt, B.C., Gupta, S.K., Rawat, N.S., Kulkarni, M.S. and Sharma, D.N. 2013a. Thermally assisted OSL: a potent tool for improvement in minimum detectable dose and extension of dose range of Al₂O₃:C, *Geochronometria*, 40, 258.
- Spooner, N.A, Aitken M.A., Smith, B. W., Franks, M. and Mcelroy, C. 1990. Archaeological dating by infrared-stimulated luminescence using a diode array. *Radiation Protection Dosimetry*, 34, 83-86.
- Stabin, M.G. 2007. *Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics*, Springer, 378p., Germany.
- Stoebe, T G., Wolfenstine, J. B., and Las, W. C. 1980. Impurities and thermoluminescence titanium-related defects In *Lif : Mg, Ti. J. Phys. Colloques* 41, C6-265-268.
- Subedi, B., Kitis, G. and Pagonis, V. 2010. Simulation of the influence of thermal quenching on thermoluminescence glow-peaks. *Phys. Status Solidi A*, 207(5), 1216–1226.
- Subedi, B., Oniya, E., Polymeris, G.S., Afouxenidis, D., Tsirliganis, N.C. and Kitis, G. 2011. Thermal quenching of thermoluminescence in quartz samples of various origin. *Nucl. Instrum. Meth B*, 269, 572–581.
- Şahin, S., Tanır, A.G., Meriç, N. and Aydınkarahaliloğlu, E. 2015. Measurement of radiation dose with BeO dosimeters using optically stimulated luminescence technique in radiotherapy applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 03, 31-36.
- Şahin, S., Şahiner, E. Göksel, F and Meriç, N. 2019. Comprehensive evaluation of electron radiation dose using beryllium oxide dosimeters at breast radiotherapy. *Journal of Radiotherapy in Practice*, 1-7.

- Şahiner, E. 2015. Paleosismolojik Çalışmalarda TL/OSL ve ESR Yöntemlerinin Kullanılması: Kütahya-Simav ve Kuzey Anadolu Fay Hattı. Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği, Doktora Tezi, Ankara, 216s.
- Şahiner, E. 2017. Deconvolution analysis of thermoluminescent glow curves in various commercial dosimeters using two different approaches in the framework of the one trap, one-recombination model, Turkish Journal of Physics 41,477 - 490.
- Şahiner, E., Meriç, N. and Polymeris, G.S. 2017. Thermally assisted OSL application for equivalent dose estimation; comparison of multiple equivalent dose values as well as saturation levels determined by luminescence and ESR techniques for a sedimentary sample collected from a fault gouge, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 392, 21–30.
- Şahiner, E., Erturaç, M.K. and Meriç, N. 2017. Termal-Asistan Optik Uyarmalı Lüminesans (TA-OSL) Tekniğiyle Milyon Yıl Mertebesindeki Jeolojik Örneklerin Tarihlendirilmesi: Gediz Taraçaları, Kula/Manisa, Türkiye Jeoloji Bülteni, 60, 489-506.
- Takeuchi, N., Adachi, M., and Inabe, K. 1979. A thermoluminescent center in X-irradiated NaCl:Cu⁺ single crystals. J. Lumines. 18/19,897-900.
- Thermo Fisher Scientific, Web sitesi. <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/4500TLDDS3>, Erişim Tarihi: 20.09.2019.
- Thermo Fisher Scientific, Web sitesi. <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/3500TLDDS3>, Erişim Tarihi: 20.09.2019.
- Thirumalai, J., 2016. Luminescence: An outlook on the phenomena and their applications. Intech, 2016, 388 p., Croatia.
- Tochilin, E., Goldstein, N. and Miller, W.G. 1969. Beryllium oxide as a thermoluminescent dosimeter. Health. Phys., 16, 1-7.

- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK). Web sitesi. <https://www.taek.gov.tr>, Erişim Tarihi: 05.08.2019
- Vij, D.R. 1998. *Luminescence of Solids*. Springer, 427p., Germany.
- Warren-Forward, H.M. and Duggan, L. 2004. Towards in vivo TLD dosimetry in mammography. *The British Journal of Radiology*, 77, 426-432.
- Watanabe, S., Gundu Rao, T.K., Page, P.S. and Bhatt, B.C. 2010. TL, OSL and ESR studies on beryllium oxide, *J. Lumin.*, 130, 2146-2152.
- Weber, R.T., Jiang, J., Barr, D.P. 1998. *Bruker EMX USER'S manual version 2.0.*, Bruker Instruments, Inc., USA.
- Weil, J.A. and Bolton J.R. 2007. *Electron paramagnetic resonance elementary theory and practical applications*. John Wiley & Sons, Inc., 688 p.,USA.
- Wintle, A.G. 1975. Thermal quenching of thermoluminescence in quartz. *Geophys. J. Roy. Astronom. Soc.*, 41, 107-113.
- Wochos, J.F., Fullerton, G.D., DeWerd, L.A., 1978. Mailed thermoluminescent dosimeter determination of entrance skin exposure and half-value layer in mammography. *Am. J. Roentgenol.* 131 (4), 617-619.
- Woda, C., Kaisera, J.C., Urso, L. and Greiter, M. 2012. An environmental BeO-OSL dosimeter for emergency response. *Radiat. Meas.*, 47(8), 609.613.
- World Health Organization (WHO), 2018; <https://www.who.int/cancer/PRGlobocanFinal.pdf> / Erişim tarihi: 12.09.2019.
- Wu, X., Gingold, E.L., Barnes, G.T. and Tucker, D.M. 1994. Normalized average glandular dose in molybdenum target-rhodium filter and rhodium target-rhodium filter mammography," *Radiology* 193(1), 83–89.
- Yukihara, E. G. 2011. Luminescence properties of BeO optically stimulated luminescence (OSL) detectors, *Radiat. Meas.*, 46, 580-587.
- Yukihara, E. G. and McKeever, S.W.S. 2011. *Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications*, Wiley, 378 p., New Jersey.

Yukihara, E.G. 2019. Observation of strong thermally transferred optically stimulated luminescence (TTOSL) in BeO. *Radiat. Meas.*, 121, 103-108.

Yukihara, E.G., Andrade, A.B. and Eller, S. 2016. BeO optically stimulated luminescence dosimetry using automated research readers. *Radiat. Meas.*, 94, 27-34.

Zeidan, M. 2009. Assessment of Mean Glandular Dose in Mammography, Master thesis, University of Canterbury Christchurch, New Zealand, 75p.

Zoetelief, J., Fitzgerald, M., Leitz, W., Säbel, M., 1996. European Protocol on Dosimetry in Mammography. European Commission Report 16263 EN (Luxembourg: European Commission).



EK 1: Ortalama Glandüler Doz (MGD) Hesabı İçin Gerekli Faktörler

Çizelge 1 PMMA fantom ile simüle edilmiş meme için *g* faktörü (Dance vd. 2000)

PMMA Kalınlığı (mm)	Eşdeğer meme kalınlığı (mm)	<i>g</i> faktörü (mGy/mGy)							
		HVL (mmAl)							
		0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
20	21	0.329	0.378	0.421	0.460	0.496	0.529	0.559	0.585
30	32	0.222	0.261	0.294	0.326	0.357	0.388	0.419	0.448
40	45	0.155	0.183	0.208	0.232	0.258	0.285	0.311	0.339
45	53	0.130	0.155	0.177	0.198	0.220	0.245	0.272	0.295
50	60	0.112	0.135	0.154	0.172	0.192	0.214	0.236	0.261
60	75	0.088	0.106	0.121	0.136	0.152	0.166	0.189	0.210
70	90		0.086	0.098	0.111	0.123	0.136	0.154	0.172
80	103		0.074	0.085	0.096	0.106	0.117	0.133	0.149

Çizelge 2 PMMA fantom ile simüle edilmiş meme için *c* dönüşüm faktörü (Dance vd. 2000)

PMMA Kalınlığı (mm)	Eşdeğer meme kalınlığı (mm)	Eşdeğer meme glandüleritesi	<i>c</i> faktörü						
			HVL (mmAl)						
			0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
20	21	97	0.889	0.895	0.903	0.908	0.912	0.917	0.921
30	32	67	0.940	0.943	0.945	0.946	0.949	0.952	0.953
40	45	41	1.043	1.041	1.040	1.039	1.037	1.035	1.034
45	53	29	1.109	1.105	1.102	1.099	1.096	1.091	1.088
50	60	20	1.164	1.160	1.151	1.150	1.144	1.139	1.134
60	75	9	1.254	1.245	1.235	1.231	1.225	1.217	1.207
70	90	4	1.299	1.292	1.282	1.275	1.270	1.260	1.249
80	103	3	1.307	1.299	1.292	1.287	1.283	1.273	1.262

Çizelge 3 Farklı tüp gerilim ve hedef filtre kombinasyonları için HVL ölçümleri (* Veriler PMMA sıkıştırma pedalındaki azalımı içermektedir) (EUREF 2006)

Farklı Hedef filtre durumları için HVL (mmAl) Ölçümleri					
<i>kV</i>	Mo + 30 µm Mo	Mo +25 µm Rh	Rh +25 µm Rh	W +50 µm Rh	W +0.45 µm Al
25	0.33 ± 0.02	0.40 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.52 ± 0.02	0.31 ± 0.02
28	0.36± 0.02	0.42 ± 0.02	0.43 ± 0.02	0.54 ± 0.02	0.37± 0.02
31	0.39 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.48 ± 0.02	0.56 ± 0.02	0.42± 0.02
34		0.47 ± 0.02		0.59 ± 0.02	0.47± 0.02
37		0.50 ± 0.02			0.51± 0.02

Çizelge 4 Klinik olarak kullanılan spektrumlar için s faktörü (Dance vd. 2000)

Spektrum	s faktörü
Mo/Mo	1.000
Mo/Rh	1.017
Rh/Rh	1.061
Rh/Al	1.044
W/Rh	1.042

Çizelge 5 PMMA kalınlığına göre ortalama glandüler doz değerleri (EUREF 2006)

PMMA Kalınlığı (cm)	Eşdeğer meme kalınlığı (cm)	Kabul (mGy)	Ulaşılabilir (mGy)
2.0	2.1	≤1.0	≤0.6
3.0	3.2	≤1.5	≤1.0
4.0	4.5	≤2.0	≤1.6
4.5	5.3	≤2.5	≤2.0
5.0	6.0	≤3.0	≤2.4
6.0	7.5	≤4.5	≤3.6
7.0	9.0	≤6.5	≤5.1

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Engin AŞLAR

Doğum Yeri: Ankara

Doğum Tarihi: 30.05.1988

Medeni Hali: Bekar

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu

Lise: Ankara Keçiören Bağlum Lisesi (2005)

Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü (2010)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü (2013)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü 2014 -

Yayınlar (SCI)

1. E. Aşlar, E. Şahiner, G. S. Polymeris, N. Meriç. 2020. Feasibility in determining of entrance surface dose (ESD) and mean glandular dose (MGD) using OSL from BeO dosimeters in mammography. Radiation Physics and Chemistry (Under Review).
2. G. S. Polymeris, M. Başdoğan, G. Çakal, E. Aşlar, N. Meriç. 2019. Gamma dose rate effects in luminescence signals of various artificial, well established dosimetric phosphors. Radiation Measurements (Revision).
3. E. Aşlar, N. Meriç, E. Şahiner, O. Erdem, G. Kitis, G.S. Polymeris. 2019. A correlation study on the TL, OSL and ESR signals in commercial BeO dosimeter yielding intense transfer effects. Journal of Luminescence, 214, 116533.
4. A. Ozdemir, G.S. Polymeris, E. Şahiner, E. Aşlar, V. Guckan, V. Altunal, N. Meriç, Z. Yegingil. 2019. Evaluation of thermoluminescence trapping parameters in Li₂B₄O₇ co-doped with Ag⁺ and Gd³⁺ using various experimental techniques. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 461, 70-76.

5. N. Meriç, E. Aşlar, E. Şahiner, Y. K. Kadioğlu, G. S. Polymeris. 2018. Step annealing and fading studies on EPR signals of Durango apatite for various grain size fractions at the edge of the nano-scale; comparison with the corresponding luminescence results. *Radiation Measurements*, 120, 241-246.
6. G.S. Polymeris, E. Şahiner, E. Aşlar, G. Kitis, N. Meriç. 2018. Deconvolution of isothermal TA – OSL decay curves from sedimentary quartz using combinations of various contemporary models. *Radiation Measurements*, 119, 93-101.
7. E. Aşlar, N. Meriç, E. Şahiner, G. Kitis, G.S. Polymeris. 2017a. Calculation of thermal quenching parameters in BeO ceramics using solely TL measurements. *Rad. Meas.* 103, 13-25.
8. E. Aşlar, E. Şahiner, G.S. Polymeris, N. Meriç. 2017b. Determination of trapping parameters in BeO ceramics in both quenched as well as reconstructed thermoluminescence glow using various analysis methods. *Appl. Radiat. Isot.*, 129, 142-151.

Uluslararası Kongre Sunum

1. E. Aşlar, G.S. Polymeris, E. Şahiner, Y.K. Kadioğlu, N. Meriç, “Thermoluminescence and optically stimulated luminescence properties of a BeO dosimeter with double main dosimetric glow peak structure”, 19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD19), 15-20 September 2019, Hiroshima, Japan.
2. N. Meriç, M. Başdoğan, G. Çakal, E. Aşlar, E. Şahiner, G. S. Polymeris, “Gamma dose rate effects in luminescence signals of various dosimetric phosphors”, 19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD19), 15-20 September 2019, Hiroshima, Japan.
3. G. S. Polymeris, G. Kitis , E. Aşlar , E. Şahiner , N. Meriç, “ Thermally assisted optically stimulated luminescence (TA – OSL) in BeO dosimeter; the role of thermal quenching”, 19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD19), 15-20 September 2019, Hiroshima, Japan.
4. Y.K. Kadioğlu, S. Geranmayeh, E. Aşlar, E. Şahiner, G.S. Polymeris, N. Meriç, “Comparison of luminescence properties of various porcelain-based items from Turkey towards their effective use in accidental retrospective dosimetry”, 19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD19), 15-20 September 2019, Hiroshima, Japan.
5. E. Aşlar, G. S. Polymeris, E. Şahiner, G. Kitis, N. Meriç. “Trapped charge mechanisms’ correlation in BeO dosimeter”. The 5th Asia Pacific Conference on

Luminescence and Electron Spin Resonance Dating (APLED2018) in Beijing, China, 15-17 October 2018.

6. N. Meriç, E. Aşlar, E. Şahiner, Y.K. Kadioglu, G.S. Polymeris, “Fading studies on EPR signals of Durango apatite for various grain size fractions in the nano-scale; comparison with the corresponding luminescence results”, 15th International Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating (LED2017), 11-15 September 2017, Cape Town, South Africa.
7. E. Aşlar, N. Meriç, G. Kitis, G.S. Polymeris. “Thermal Quenching Study of the Luminescence Signal in BeO Dosimeter”. LumiDoz 10 International Conference on Luminescence and ESR Dosimetry, 5 – 7 September 2016, Adana, Turkey.
8. E. Aşlar, F. S. Sakuçoğlu, G. S. Polymeris, N. Meriç, “Dosimetric study on ten different commercial glass objects using ESR technique”, the xx-international scientific conference of young scientists and specialists, (AYSS-2016). 14-18 March 2016, Dubna, Rusya.
9. E. Aşlar, E. Şahiner, N. Meriç, G. S. Polymeris, G. Kitis. “De-convolution analysis of naturally thermally assisted OSL signal from quartz” LumiDoz 8 International Conference on Luminescence and ESR Dosimetry, 27 – 29 August 2014, Ankara, Turkey.

Ulusal Kongre Sunum

1. E. Aşlar, “Farklı Işıma Eğrisine Sahip BeO Dozimetrelerin Lüminesans Özelliklerinin ve Mekanizmasının Araştırılması”, II. Nükleer Bilimler Lisansüstü Öğrenci Kongresi, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü. 03-05 Mayıs 2019. Ankara.
2. E. Aşlar, “BeO Kristalinin Tuzak Yük Yapısının Lüminesans Yöntemler İle İncelenmesi”, Nükleer Bilimler Lisansüstü Öğrenci Kongresi, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü. 1-13 Mayıs 2018. Ankara.
3. E. Şahiner, N. Meriç, E. Aşlar, G. S. Polymeris ; “Preliminary results towards the de-convolution analysis of thermally assisted optically stimulated luminescence (TA-OSL) in natural quartz” The German LED conference on Luminescence and ESR dating; Rauschholzhausen / Gießen / Germany; 14 -16. November 2014.

Projeler

1. Berilyum oksit (BeO) lüminesans dozimetrelerin doz limitlerinin araştırılması ve mamografi sistemlerinde kullanılması. BAP Bağımsız Proje (Proje Kodu:18B0204001) 2018-2019.

Burslar

1. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2228-B Bideb Bursu, 2013-2017.

Sertifikalar, Kurslar, Çalıştaylar

1. II. The International Nuclear Summer School, Ankara University Institute of Nuclear Sciences, The State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Ukraine, 1-7 July 2019. Kiev, Ukraine.
2. Türkiye-Ukrayna Nükleer Eğitim İşbirliği Çalıştayı, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, 20-21 Şubat 2017. Ankara.
3. Intercontinental Nuclear Institute (INI) 2016, Education, Training and Nuclear Knowledge Management, Prague, Czech Republic, Massachusetts, America, Kurs, 27.06.2016 -22.07.2016.
4. Nükleer Bilimler ve Uygulamaları Kış Semineri, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, 4-11 Şubat 2016. Çankırı.
5. Inter-Regional Training Course On Safeguards and Security Aspects of Nuclear Material Accounting and Control at Facilities, Nuclear Material Accounting, İstanbul, Kurs, 09.06.2015 -18.06.2015.
6. Nükleer Adli Bilimler Yaz Okulu, Ankara üniversitesi Nükleer ve Adli Bilimler Enstitüsü, 7-14 Eylül 2014. Antalya.