

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Necmettin NUR

**AMETİSTLERİN TERMOLÜMINESANS YÖNTEMİYLE
DOZİMETRİK KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİZ EDİLMESİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2010

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AMETİSTLERİN TERMOLÜMİNESANS YÖNTEMİYLE
DOZİMETRİK KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİZ EDİLMESİ**

Necmettin NUR

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez 22/10/2010 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Zehra YEĞİNGİL
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Eda EŞKUT
ÜYE

.....
Prof. Dr. Ramazan ESEN
ÜYE

.....
Prof. Dr. Necmeddin YAZICI
ÜYE

.....
Prof. Dr. Seyhan TÜKEL
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

**Prof. Dr. İlhami YEĞİNGİL
Enstitü Müdürü**

Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FEF2006D11

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Sevgili eşime ve yakın zamanda hayatını kaybeden anneme...

ÖZ

DOKTORA TEZİ

AMETİSTLERİN TERMOLÜMINESANS YÖNTEMİYLE DOZİMETRİK KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİZ EDİLMESİ

Necmettin NUR

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Zehra YEĞİNGİL
Yıl: 2010, Sayfa:171
Jüri : Prof. Dr. Zehra YEĞİNGİL
: Prof. Dr. Ramazan ESEN
: Prof. Dr. Eda EŞKUT
: Prof. Dr. A. Necmettin YAZICI
: Prof. Dr. Seyhan TÜKEL

Bu çalışmada Balıkesir-Dursunbey Güğü Köyü civarından alınmış doğal ametist örneklerinin dozimetrik malzeme olarak kullanımının araştırılması amacıyla dozimetrik karakteristikleri termolüminesans yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Ametist örneklerinin termolüminesans (TL) özelliklerinin incelenmesi sırasında $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta ve ^{60}Co gama kaynakları kullanılmıştır. Böylece iki radyasyon kaynağının kullanımıyla elde edilen TL ışınma eğrilerinin özellikleri analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla XRF ile kimyasal analiz, XRD ile fiziksel analiz, uygun tavlama sıcaklığının ve süresinin belirlenmesi, ışınlama öncesi tavlama sıcaklığının TL hassasiyetine etkisi, TL ışınma eğrilerinin incelenmesi ve CGCD yöntemi ile analizleri, CGCD ve farklı ısıtma hızları yöntemi ile tuzak parametrelerinin hesaplanması, doz cevabı, enerji cevabı, tekrar kullanılabilirlik, yüksek dozun ametistin hassasiyetine etkisi ve anormal sönüm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ametist örneklerinin tekrar kullanıldığında TL şiddetindeki hassasiyet değişiminin %4'ten az olduğunu, örneklerin oda sıcaklığında bekletilmeleri sonucu TL şiddetinde %14'lük azalma meydana geldiğini, örneklerin 10 Gy ile 1 kGy arasında lineer bir doz cevap eğrisine sahip olduğunu ve ametistlerin yüksek radyasyon dozu uygulamalarında dozimetrik malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Ametist, Doz Cevabı, Gama Işını, Beta Işını, TLD Dozimetresi.

ABSTRACT

PhD THESIS

ANALYSING DOSIMETRIC CHARACTERISTICS OF AMETHYSTS USING THERMOLUMINESCENCE TECHNIQUE

Necmettin NUR

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. Zehra YEĞİNGİL
Year: 2010, Pages:171
Jury : Prof. Dr. Zehra YEĞİNGİL
: Prof. Dr. Ramazan ESEN
: Prof. Dr. Eda EŞKUT
: Prof. Dr. A. Necmettin YAZICI
: Prof. Dr. Seyhan TÜKEL

In this study the dosimetric characteristics of some natural amethyst samples collected from Balıkesir-Dursunbey are investigated by using thermoluminescence technique for the purpose of determining the suitability of them as dosimetric materials. Both a $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta source and a ^{60}Co gamma source are used to analyse the TL glow curves obtained by irradiating the samples with beta particles and gamma rays. In this study, various experiments have been carried out for the investigation of the dosimetric properties of amethyst samples. Briefly, these experiments can be outlined as: XRD and XRF analyses, determining the annealing conditions, the effects of pre-irradiation annealing procedures on TL sensitivity, the investigation of the characteristics of TL glow curves and analyzing by the CGCD method, determination of trap parameters by the CGCD method and the Various Heating Rate Method, the dose response, the energy response, effects of the high dose on TL sensitivity, reproducibility and fading properties of the amethyst samples. The results obtained have shown that using the amethyst samples repeated times will change the TL sensitivity as an amount of less than 4%. The amethyst samples stored at the room temperature for the different time intervals and the reduction of 14% was recorded in TL intensity. The studied samples have linear dose responses for the absorbed doses ranging between 10 Gy and 1 kGy. Consequently, we investigated that amethyst samples can be used in high dose applications of radiation as dosimetric materials.

Keywords: Amethyst, Dose Response, Gamma Rays, Beta Rays, TLD Dosimeters.

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışması boyunca bana yardımcı olan ve yol gösteren danışmanım Prof.Dr. Zehra YEĞİNGİL'e, çalışmalarımda bana yardımcı olan Gaziantep Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. A. Necmeddin YAZICI ve Arş. Gör. Dr. Hüseyin TOKTAMIŞ'a, Adıyaman Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Mustafa TOPAKSU'ya ve Mersin Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Kasım KURT'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ramazan ESEN, Doç. Dr. CebraİL GÜMÜŞ ve diğer tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim. Aynı çalışma grubunda yer alan Tamer DOĞAN, Mehmet YÜKSEL, Neslihan SARIGÜL'e ve diğer grup arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Jüri üyelerine, Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür'ü Prof. Dr. İlhami YEĞİNGİL'e ve Fen Bilimleri Enstitüsü'nün tüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunuyorum.

Doktora çalışmam boyunca benden yardımlarını, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen eşim Arife NUR'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER	SAYFA
ÖZ.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVI
1. GİRİŞ.....	1
2. TERMOLÜMİNESANS TEORİSİ.....	7
2.1. Lüminesans Olayı.....	7
2.2. Kristal Kusurları.....	13
2.2.1. İçsel veya Doğal Kusurlar.....	14
2.2.2. Dışsal veya Safsızlık Kusurları.....	16
2.2.3. İyonlaştırıcı Radyasyonun Alkali Halojenürlerde Meydana Getirdiği Kusurlar	17
2.3. Basit Termolüminesans Modeli.....	20
2.4. Termolüminesans Kinetikleri.....	21
2.4.1. Birinci Derece Kinetik.....	21
2.4.2. İkinci Derece Kinetik.....	24
2.4.3. Genel Mertebeden Kinetik.....	27
2.5. Termolüminesans Dozimetri.....	29
2.5.1. Kişisel Dozimetri.....	29
2.5.2. Çevresel Dozimetri.....	30
2.5.3. Klinik Dozimetri	31
2.5.4. Yüksek Doz.....	32
2.6. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması ile İlgili Yöntemler.....	33
2.6.1. Tepe Şekli Yöntemi.....	34
2.6.2. İzotermal Sönüm Yöntemi.....	35
2.6.3. CGCD Yöntemi.....	36
2.6.4. Başlangıçtaki Artış Yöntemi.....	38

2.6.5. Farklı Isıtma Hızları Yöntemi.....	39
2.7. Doz Cevabı.....	42
2.8. Enerji Cevabı.....	43
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	47
3.1. Ametistin Yapısı ile İlgili Çalışmalar	47
3.2. Ametistin ve Bazı Doğal Malzemelerin Dozimetrik Özellikleri ile İlgili Çalışmalar	51
4. MATERYAL ve METOD	55
4.1. Materyal	55
4.1.1. Ametistin fiziksel, kimyasal ve jeolojik özellikleri.....	55
4.1.2. Kullanılan Cihazlar.....	56
4.1.2.1. TL Ölçüm Sistemi.....	56
4.1.2.1.(1) IR ve Mavi Işık Kaynağı.....	58
4.1.2.1.(2) Fotokatlandırıcı Tüpü.....	60
4.1.2.1.(3) Filtreler.....	60
4.1.2.1.(4) Radyasyon Kaynakları.....	64
4.1.2.1.(5) Isıtma Sistemi.....	67
4.1.2.1.(6) Kontrolör.....	69
4.1.3. Fırın.....	69
4.1.4. Agat Havan.....	70
4.1.5. Elekler.....	71
4.2. Yöntem	71
4.2.1. Ametist Örneklerinin Hazırlanması	71
4.2.2. Örneklerin X-Işını Floresans Yöntemi (XRF) ile kimyasal analizleri	74
4.2.3. X-Işını Toz Kırınım Yöntemi (XRD).....	75
4.2.4. Tavlama Sıcaklığının ve Süresinin Belirlenmesi Deneyi.....	76
4.2.5. Işınlama Öncesi Tavlama Sıcaklığının TL Hassasiyetine Etkisi.....	77
4.2.6. TL Işıma Eğrilerinin İncelenmesi ve CGCD Yöntemi ile Ayrıştırılması	78
4.2.7. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması.....	79

4.2.7.1. CGCD Yöntemi ile E ve s Değerlerinin Hesaplanması.....	79
4.2.7.2. Farklı Isıtma Hızları Yönteminin Kullanımı İle E ve s Değerlerinin Hesaplanması.....	80
4.2.8. Doz Cevabı.....	80
4.2.9. Enerji Cevabı.....	81
4.2.10. Tekrar Kullanılabilirlik.....	81
4.2.11. Yüksek Dozun Ametistin TL Hassasiyetine Etkisi.....	82
4.2.12. Anormal Sönüm	82
5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	85
5.1. X-Işını Floresans Yöntemiyle Analizler (XRF).....	85
5.2. X-Işını Toz Kırınım Yöntemiyle Analizler (XRD)	86
5.3. Tavlama Sıcaklığının ve Süresinin Belirlenmesi Deneyi Sonuçları.....	89
5.4. Işınlama Öncesi Tavlama Sıcaklığının TL Hassasiyetine Etkisi Sonuçları	97
5.5. TL Işıma Eğrilerinin İncelenmesi ve CGCD Yöntemi ile Ayrıştırılması..	110
5.6. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması.....	115
5.6.1. CGCD Yöntemi ile Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması.....	116
5.6.2. Farklı Isıtma Hızları Yöntemi ile E ve s Değerlerinin Hesaplanması	119
5.7. Doz Cevap	125
5.8. Enerji Cevabı.....	132
5.9. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyi Sonuçları.....	139
5.10. Yüksek Dozun Ametistin Hassasiyetine Etkisi.....	142
5.11. Anormal Sönüm Sonuçları.....	143
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	149
KAYNAKLAR.....	161
ÖZGEÇMİŞ.....	171

ŞEKİL DİZİNİ**SAYFA**

Şekil 2.1.	TL ve OSL yöntemlerinin Enerji-seviyesi gösterimi (Aitken, 1998).....	8
Şekil 2.2.	Flöresans olayı.....	10
Şekil 2.3.	Fosforesans olayı.....	11
Şekil 2.4.	Doğal bir ametist örneğinden elde edilmiş lüminesans ışıma eğrisi.....	12
Şekil 2.5.	İdeal bir kristalin üç boyutlu yapısı.....	14
Şekil 2.6.	İçsel kusurları bulunan gerçek bir kristalin yapısı.....	15
Şekil 2.7.	Yerine geçmeye ait iki değerlikli katyon safsızlığı Mg^{2+}	16
Şekil 2.8.	(a) yerini boşaltmış bir alkali iyonu, (b) birleşik bir yapı oluşturmak üzere iyonların çekimi.....	17
Şekil 2.9.	Gerçek bir kristalde V , V_k ve V_3 merkezleri.....	18
Şekil 2.10.	Kristal katılarda yaygın elektronik geçişler.....	21
Şekil 2.11.	Eşitlik 2.6'nın çözümü. T_M , tuzaklanmış elektronların başlangıçtaki yoğunluğu (n_0)'dan bağımsızdır.....	23
Şekil 2.12.	I, birinci derece için ışıma tepe noktası şekli, II, ikinci dereceden ışıma tepe noktası şekli.....	26
Şekil 2.13.	TLD'lerin kullanıldığı alanlar	29
Şekil 2.14.	LiF ($Z_{etkin}=8.14$) ve CaF_2 ($Z_{etkin}=16.3$) ve $Z_{etkin}=55$ olan bir materyal için teorik olarak elde edilmiş bağıl foton enerji cevabı	46
Şekil 4.1.	Risø TL/OSL cihazının genel görünümü.....	57
Şekil 4.2.	Risø TL/OSL cihazının şematik gösterimi	57
Şekil 4.3.	Deneylerde kullanılan 48 örnek haznesine sahip döner tabla ile örneklerin yerleştirildiği kenarlıklı ve kenarlıksız diskler.....	58
Şekil 4.4.	IR ve Mavi LED'lerin dizilişi (üstte) ve bu LED'lere ait yayılım dalgı boyuna ait grafik (altta).....	59
Şekil 4.5.	EMI 9235QB fotokatlandırıcı tüpünün kuantum verimliliğinin foton dalgı boyuna göre grafiğı.....	60
Şekil 4.6.	Tortusal Kuvars ve K-feldispatlara ait yanınım spektrumu.....	60

Şekil 4.7.	Risø TL/OSL cihazında bulunan üç algılama filtresinin geçirgenlik karakteristikleri.....	62
Şekil 4.8.	Hoya U-340 ve mavi filtre paketinin geçirgenlik karakteristikleri ile kuvars ve feldispatın yayınım spektrumları..	63
Şekil 4.9.	Radyasyon kaynağının bulunduğu ve pnömomatik sistemle açılıp kapanan kurşun muhafaza.....	65
Şekil 4.10.	⁶⁰ Co izotopunun bozunumu	66
Şekil 4.11.	Alcyon II marka ⁶⁰ Co kaynağı	67
Şekil 4.12.	Isıtma biriminin a) ölçüme hazır pozisyondaki b) örnek tablası yerinde iken görüntüsü	68
Şekil 4.13.	a) Set edilen sıcaklığa karşı gerçek sıcaklığın grafiği b) gerçek ve set edilen sıcaklık arasındaki sistematik sapmanın grafiği	68
Şekil 4.14.	Bir Windows komut programı tarafından yönetilen kontrolör....	69
Şekil 4.15.	Ametist örneklerinin tavlansında kullanılan Nobertherm marka fırın.....	70
Şekil 4.16.	Ametist örneklerinin toz kristal haline getirilmesinde kullanılan agat havan.....	70
Şekil 4.17.	Ametist örneklerinin tanecik boyutuna göre ayrıştırılmalarında kullanılan Retsch marka elekler	71
Şekil 4.18.	Balıkesir Dursunbey ilçesinden alınmış doğal ametist örneği...	72
Şekil 4.19.	Panalytical Axios Advanced model X-ışını Floresans Spektromesi.....	75
Şekil 4.20.	Bruker AXS D8 Advance model XRD ölçüm cihazı	76
Şekil 5.1.	Tavlansmamış ametist örneği kullanılarak elde edilen XRD analiz sonucu.....	87
Şekil 5.2.	450 °C'de 90 dakika tavlansmış örneğine ait XRD analiz sonucu	87
Şekil 5.3.	450 °C'de 90 dakika ve 700 °C'de 4 dakika tavlansmış ametist örneğine ait XRD analiz sonucu.....	88
Şekil 5.4.	Tavlansmamış ametist örneklerine ait doğal TL ışına eğrileri	90

Şekil 5.5.	Tavlanmamış ametist örneklerinden elde edilen doğal TL ışımaya eğrilerinin CGCD yöntemi ile analiz sonuçları.....	92
Şekil 5.6.	Farklı sürelerde 250 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri	93
Şekil 5.7.	Farklı sürelerde 300 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri.....	94
Şekil 5.8.	Farklı sürelerde 350 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri.....	94
Şekil 5.9.	Farklı sürelerde 400 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri.....	95
Şekil 5.10.	Farklı sürelerde 450 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri.....	95
Şekil 5.11.	Farklı sürelerde 500 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri.....	96
Şekil 5.12.	Farklı sürelerde 550 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri.....	96
Şekil 5.13.	Farklı sürelerde ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış ametist örneklerine ait tavlama sıcaklığına karşı normalize edilmiş toplam sayım grafiği.....	98
Şekil 5.14.	a) 250 °C’de 0.5 h tavllanmış ve 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş ve TL ışımaya eğrisinin CGCD yöntemi ile alt tepelerine ayrılması, TL okuması 700 °C’ye kadar gerçekleştirilmiştir (FOM=%6.2) b) aynı TL eğrisinin 50 °C ile 375 °C arasındaki bölümü kullanılarak gerçekleştirilen CGCD analiz sonucu (FOM=%1.19).....	98
Şekil 5.15.	250 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	101
Şekil 5.16.	300 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	101
Şekil 5.17.	350 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	102

Şekil 5.18.	400 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	102
Şekil 5.19.	450 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	103
Şekil 5.20.	500 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	103
Şekil 5.21.	550 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	104
Şekil 5.22.	Farklı sıcaklık ve sürelerde tavllanmış ametist örneklerine 200 Gy beta dozu verilmiş ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri kullanılarak 4.+5. tepe için elde edilmiş tavlama sıcaklığına bağlı hassasiyet değişim grafiği.....	106
Şekil 5.23.	Farklı sürelerde ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış ametist örneklerine 200 Gy beta dozu verilerek, 4.+5. tepe için elde edilmiş tavlama sıcaklığına karşı tepe yüksekliğinin grafiği.....	106
Şekil 5.24.	4. tepe + 5. tepe için elde edilen farklı tavlama sıcaklığı ve süresine bağlı hassasiyet değişim grafiği.....	107
Şekil 5.25.	Farklı sürelerde 450 °C tavllanmış ve arkasından 200 Gy’lik beta dozu verilmiş ametist örnekleri için, 4. ve 5. tepenin toplamından oluşan tepeye ait tavlama süresine karşılık TL hassasiyetinin değişim grafiği, burada TL hassasiyetindeki değişim maksimum % 15’dir.....	108
Şekil 5.26.	Tavlama sonrası (a) 2 kGy ve (b) 200 Gy’lik beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri	111
Şekil 5.27.	600 Gy ile 25 kGy aralığında beta dozu verilmiş ametist örneklerine ait tepe sıcaklığının verilen doza karşılık değişim grafiği. Elde edilen tepe sıcaklıkları arasındaki değişim en fazla % 5’lik sapma içerisindedir.....	112
Şekil 5.28.	Tavlama sonrası (a) 200 Gy ve (b) 2 kGy beta dozu verilmiş 30 mg’lık toz ametist örneğinin CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış grafiği.....	114

Şekil 5.29.	200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrisinin (a) GlowFit programı (M. Puchalska ve P. Bilski, 2006) ile ve (b) Tamtam programı (Bos ve ark, 1993) ile analizi.....	117
Şekil 5.30.	Tavlama sonrası 200 Gy'lik beta dozu verildikten sonra farklı ısıtma hızları kullanılarak elde edilen TL ışıma eğrileri.....	120
Şekil 5.31.	CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış tepelerin farklı ısıtma hızına karşılık tepe sıcaklıklarının grafiği.....	121
Şekil 5.32.	CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış tepelerin farklı ısıtma hızına karşılık tepe yüksekliğinin grafiği.....	121
Şekil 5.33.	(a) Farklı ısıtma hızları yönteminde kullanılan tepeler (b) her tepe için elde edilen $Ln(T_m^2/\beta)$ 'nin $1/T_m$ 'ye karşı grafiği.....	123
Şekil 5.34.	Ametist örneklerine tavlama sonrası (a) 1 Gy ile 20 Gy arası, (b) 40 Gy ile 200 Gy arası beta dozu verilerek elde edilen TL eğrileri.....	127
Şekil 5.35.	Ametist örneklerine tavlama sonrası (a) 400 Gy ile 2 kGy arası, (b) 4 kGy ile 25 kGy arası beta dozu verilerek elde edilen TL ışıma eğrileri	128
Şekil 5.36.	30 mg'lık toz ametist örneklerine 1 Gy ile 25 kGy arası beta dozu verilerek elde edilen 1. tepe, 2.+3. tepe ve 4.+5. tepe için elde edilen doz cevap eğrileri.....	129
Şekil 5.37.	30 mg'lık toz ametist örneklerine 1 Gy ile 25 kGy arası beta dozu verilerek elde edilen 4.+5. tepelere ait doz cevap eğrisi üzerinde lineer, supralineer ve doygunluk bölgeleri.....	130
Şekil 5.38.	(a) Rocha ve arkadaşları (2003) tarafından elde edilen doz cevap eğrisi ile (b) bu çalışmada elde edilen doz cevap eğrisinin karşılaştırılması.....	131
Şekil 5.39.	Gama kaynağı (^{60}Co) kullanılarak tavlama sonrası 10 Gy ile 1 kGy arasında ışınlanmış ametist örneklerinden 2°C/s 'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilen TL ışıma eğrileri.....	133

Şekil 5.40.	Gama kaynağı (^{60}Co) kullanılarak tavlama sonrası 10 Gy ile 1 kGy arasında doz verilmiş ametist örneklerinden 10 °C/s'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	133
Şekil 5.41.	Tavlama sonrası ^{60}Co kaynağıyla 600 Gy'lik gama dozu verilmiş ametist örneklerinden 2 °C/s ve 10 °C/s'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	134
Şekil 5.42.	^{60}Co gama kaynağı kullanılarak elde edilen doz cevap eğrisi.....	135
Şekil 5.43.	Tavlama sonrası 100 Gy'lik beta ve gama dozları verilmiş ametist örneklerinden elde edilen TL ışımaya eğrilerinin karşılaştırılması.....	136
Şekil 5.44.	Beta kaynağından soğurulan dozun örnek diskinin çapına bağlı olarak değişimi a) 200 Gy beta dozu verilmiş 10mm çapındaki örneğin iç kısmı ile dış kısmına ait TL ışımaya eğrilerinin karşılaştırılması b) elde edilen bu iki örneğe 200 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilen TL eğrileri	139
Şekil 5.45.	Aynı ametist kristallerine tavlama sonrası 100 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	141
Şekil 5.46.	4.+5. tepe için elde edilen çevirim başına TL hassasiyetinin değişim grafiği.....	141
Şekil 5.47.	5 kGy'lik yüksek beta dozundan önce (ilk okuma) ve sonra (son okuma) 20 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri.....	143
Şekil 5.48.	30 mg'lık toz ametist örneklerine 100 Gy'lik beta dozu verilmesinin arkasından farklı bekleme süreleri sonrasında elde edilen TL ışımaya eğrileri.....	144
Şekil 5.49.	30 mg'lık toz ametist örneğine 100 Gy'lik beta dozu verilmesini takiben 1 saat beklemenin arkasından elde edilen TL ışımaya eğrisinin CGCD yöntemi ile ayrıştırılması.....	145
Şekil 5.50.	Bekleme süresine bağlı olarak tepelerin TL şiddetinin değişimi.	145
Şekil 5.51.	4. + 5. tepe için normalize edilmiş tepe yüksekliğinin bekleme süresine bağlı olarak değişim grafiği.....	146

TABLolar DİZİNİ	SAYFA
Tablo 2.1. Lüminesans olayının bazı tipleri ve uyarılma yöntemleri.....	9
Tablo 4.1. Örnek tipine ve kullanılan lüminesans metoduna göre filtrelerin sınıflandırılması.....	63
Tablo 5.1. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış ametist örneklerine ait XRF sonuçları.....	85
Tablo 5.2. Ametist örneklerinin kristal birim hücre parametreleri ile ilgili XRD analizi sonuçları.....	88
Tablo 5.3. Farklı ısıtma hızları yöntemi ve CGCD analizi sonucu elde edilen E ve s değerlerinin karşılaştırılması.....	125
Tablo 5.4. 1 Gy ile 25 kGy arası beta dozu verilen ametist örneklerinin doz cevap oranları ($f(D)$).....	130

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
$Al_2O_3:C$: Karbon katkılı alüminyum oksit
$Al_2O_3:Mg$: Magnezyum katkılı alüminyum oksit
$Al_2O_3:Mg,Y$: Magnezyum ve itriyum katkılı alüminyum oksit
$Al_2O_3:Si,Ti$: Silisyum ve titanyum katkılı alüminyum oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
$CaSO_4:Dy$: Disprosiyum katkılı kalsiyum sülfat
$CaSO_4:Mn$: Manganez katkılı kalsiyum sülfat
$CaSO_4:Sm$: Samaryum katkılı kalsiyum sülfat
$CaSO_4:Tm$: Tulyum katkılı kalsiyum sülfat
CaF_2	: Kalsiyum florür
$CaF_2:Dy$: Disprosiyum katkılı kalsiyum florit
$CaF_2:Mn$: Manganez katkılı kalsiyum fluorit
CGCD	: Bilgisayarlı Işıma Eğrisi Ayırıştırma Yöntemi (Computerized Glow Curve Deconvolution)
cps	: Her bir saniyedeki sayım
Cr_2O_3	: Krom (III) oksit
CuO	: Bakır (II) oksit
EDX	: Enerji Saçınımlı X-Işını Spektrometresi
FOM	: Değer katsayısı (Figure of Merit)
ICRP	: Uluslararası Radyasyondan Korunma Ajansı (International Commission on Radiological Protection)
Fe_2O_3	: Demir (III) oksit
FeO	: Demir (II) oksit
Ga_2O_3	: Galyum (III) oksit
K_2O	: Potasyum oksit
$LiBO_2$: Lityum metaborat
$Li_2B_4O_7:Mn$: Manganez katkılı lityum borat
$LiB_4O_7:Cu$: Bakır katkılı lityum borat

LiF	: Lityum florür
LiF:Mn,Ti	: Manganez ve titanyum katkılı lityum florür
LiF:Mg,Cu,P	: Magnezyum bakır ve fosfor katkılı lityum florür
MgB ₄ O ₇ :Dy	: Disporsiyum katkılı magnezyum borat
MgB ₄ O ₇ :Mn	: Manganez katkılı magnezyum borat
MgO	: Magnezyum oksit
NaCl	: Sodyum klorür
Na ₂ O	: Sodyum oksit
PbO	: Kurşun (II) oksit
PM	: Fotokatlandırıcı
Sb ₂ O ₃	: Antimon (III) oksit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO ₂	: Silisyum dioksit
SnO ₂	: Kalay (IV) oksit
TL	: Termolüminesans
TLD	: Termolüminesans Dozimetresi
XRD	: X-Işını Toz Kırınımı
XRF	: X-Işını Flöresans
β	: Beta
γ	: Gama
μ	: Mikron
a.u.	: Keyfi birim
b	: Kinetik mertebe
eV	: Elektron volt
E	: Enerji seviyesi
Gy	: Gray
kGy	: Kilo Gray
k	: Boltzmann sabiti
K	: Kelvin
s	: Frekans faktörü
Sv	: Sievert

T_m : Tepe sıcaklığı
 I : Işıma şiddeti
 Z_{etkin} : Etkin atom numarası

1. GİRİŞ

Termolüminesans (TL) dozimetrisi günümüzde, soğurulan dozun ölçümünde kullanılan önemli bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Termolüminesansın çevresel, kişisel ve klinik uygulamalardaki öneminden dolayı şu anki çalışmalar daha çok yeni ve yüksek performanslı TL dozimetrelerinin üretilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Pasif dozimetrelerin küçük ve ucuz olmalarının yanı sıra buldukları yerde herhangi bir elektronik güç kaynağına ihtiyaç duymamaları ve yüksek dozlar için de kullanılabilmesi gibi birçok avantajları vardır. Termolüminesans dozimetreleri (TLD) iyonize radyasyon dozunun ölçülmesinde kullanılan pasif dozimetre tiplerinden biridir (Rendell ve ark, 1993).

Radyoaktivite uygulamaları günümüz yaşantısına birçok alanda girmiş durumdadır. Radyoaktivite enerji üretiminden sağlık alanına, sanayiden gıda sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Radyasyon uygulamaları son yıllarda medikal ve eczacılık ürünlerinin steril hale getirilmesinde, suların arıtılmalarında, gıdaların dezenfeksiyonunda ve materyal testleri gibi ve daha birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Radyasyon uygulamaların hayatımızdaki öneminin artmasıyla beraber radyasyona maruz kalan canlı organizmaların veya herhangi bir malzemenin aldığı radyasyon miktarının ölçülmesi de önem kazanan bir bilim alanı olmuştur.

Termolüminesans yönteminin radyasyon dozimetrisinde yeni bir teknik olarak kullanılabilmesi ilk kez Wisconsin Üniversitesi'nden Farrington Daniels ve araştırma grubu tarafından önerilmiştir (Daniels ve ark., 1953; Cameron ve ark., 1968). Işınlanmış bir materyal enerji depolar ve bu enerji, malzeme ısıtıldığı zaman tekrar açığa çıkartılabilir. Yalıtkan kristaller için termal yolla uyarılmış yüklerin denge konumuna yeniden geçişleri sırasında ışımaya (lümİnesans) meydana gelir. Fotokatlandırıcı tüpler çok düşük miktardaki ışığı bile ölçmeye yetecek hassasiyete sahiptirler. Bu sayede TL süreci kristalin radyasyon geçişinin belirlenmesinde kullanılacak hassas bir metod olarak karşımıza çıkmaktadır.

Termolüminesans (TL) yöntemi geçmişten günümüze birçok aşamadan geçerek gelişmiştir. Termolüminesans kavramı ilk kez 17. yy'da Robert Boyle

(1664) tarafından gözlenmiştir. Boyle, bir parça doğal elması karanlık bir odada avucunun içerisinde ısıttığı zaman elmasın parıldadığını gözlemlemiştir. Bu bilinen termolüminesans gözlemidir. Boyle'dan bu yana termolüminesansın gözlenmesinde kullanılan cihazlar günümüze kadar birçok aşamadan geçmiş ve çok hassas ölçümlerin yapılabildiği cihazlar geliştirilmiştir. Fakat bu hızlı gelişmelerin termolüminesans malzemeleri için de sağlandığı pek söylenemez (McKeever ve ark., 1995). Şu anda kullanılan termolüminesans dozimetresi (TLD) materyallerinin birçoğu çok uzun zamandır araştırmacılar tarafından bilinen malzemelerdir. Wiedermann ve Schmidt 19. yüzyılın sonlarında çok geniş bir çeşitliliğe sahip sentetik fosforlarla birçok deneme yapmışlardır (örneğin $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$). Deneyle sırasında birçok malzemenin TL özelliklerini ve örneklerin elektron demetiyle ışınlanmaları ve arkasından gerçekleştirilen ısıtma işlemi sırasında gözlenen lüminesans yayını arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Farrington Daniels 1950'li yıllarda atom bombası testleri sırasında LiF'ün (lityum florür) radyasyon dozimetresi olarak kullanımı ile ilgili başarılı uygulamalar gerçekleştirmiştir (Moorhead ve ark., 1952). Kullandığı LiF materyalinin formu, günümüze kullanılan TLD-100'ün formuna oldukça yakındır. Daniels'in grubu ne yazık ki LiF örneklerindeki safsızlıklar ile TL yayını arasındaki ilişkinin henüz farkında değildiler. Bu ilişki ancak sonraki zamanlarda anlaşılmıştır. 19. yüzyılın sonları ile 20. yüzyılın başları arasında materyallerin fosforesans özellikleri ve bu özelliklerin soğurulan radyasyon ile arasındaki bağıntı üzerine çalışmalar artmıştır (Rutherford, 1913). Materyallerin X ışınları, β parçacıkları, elektron demetleri ve gama ışınları ile ışınlanmalarından sonra ısıtılmalarıyla elde edilen TL yayınımları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Maria Curie (1961) bu araştırmalar arasında önemli sonuçlar elde etmiştir. Curie, fluorit (CaF_2) mineralinin radyum kaynağı ile ışınlanmasının ardından TL ışınması elde ettiğini yayınlamıştır. CaF_2 'in termolüminesans özellikleri 1920'li yıllardan sonra birçok araştırmacı tarafından incelenmeye devam edilmiştir (Lind ve ark., 1923; Wick ve ark., 1924; Wick, 1924). Sentetik materyallerin TL özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalar da bu yıllarda hız kazanmıştır. Özellikle $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ fosforu üzerine özel çalışmalar yapılmış ve manganezin lüminesans sinyalini arttırıcı bir etki yarattığı fark edilmiştir (Wick ve ark., 1928). Ayrıca $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ fosforunun

kullanılmasıyla TL yöntemi, UV dozunun ölçülmesi alanında da uygulanmaya başlanmıştır (Lyman, 1935).

Daha önce de bahsedildiği gibi sentetik materyallerin TL özellikleri ilk ciddi çalışma Wiedemann ve Schmidt tarafından (1895) gerçekleştirilmiştir. Mn katkılanmış kalsiyum sülfat üzerine özel bir ilgi duyulmuştur fakat bu çalışmaların amacı iyi bir dozimetrik malzeme elde etmek değil sadece radyasyon araştırmaları gerçekleştirmektir. Bu sebeple $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ fosforunun dozimetrik malzeme olarak kullanımının incelenmesi 1951 yılına kadar yapılmamıştır (Watanabe, 1951). Benzer bir şekilde fluoritin termoluminesans yayını 1898'den (Trowbridge ve ark., 1898) itibaren iyi bilinmesine karşın 1960'ların başlarına kadar bu mineralin TL dozimetresi olarak kullanımı ile ilgili ciddi bir öneri gelmemiştir (Schayes ve ark., 1965).

TL dozimetreleri gibi özel uygulamalar için materyal arayışıyla ilgili ciddi araştırmalar 1950'lerde Daniels ve arkadaşlarının (1953) çalışmalarıyla başlamıştır. Bu yıllarda en çok gelecek vadeden materyal LiF'dür. Bir süre sonra LiF mineralinin bilinen özelliklerinin materyal içerisindeki Mg ve Ti safsızlıkların katkısıyla şekillendiği anlaşılmıştır. Bu özellik Cameron ve arkadaşları (1963;1968) tarafından ortaya konmuştur. Böylece bu çalışmaların sonucunda Harshaw Chemical Company tarafından 1963 yılında TLD-100 dozimetresi üretilmiştir (McKeever, 1995).

Daniels'in grubu, LiF ile ilgili çalışmalarını kısa bir süre sonra bırakarak günümüzde TLD materyalleri arasında oldukça bilinen Al_2O_3 üzerinde çalışmaya başlamışlardır (Rieke ve ark., 1954). O dönemde güvenilir dozimetrik materyallerin elde edilmesi amaçlanıyordu ve araştırmaların çoğu yüksek oranda optiksel materyaller üzerinde yoğunlaşmıştır. Safir formunda olan Al_2O_3 , bir süre için bütün şartları sağlamış gibi görünmüştür. Fakat bu mineralin hassasiyetinin düşük olmasından dolayı araştırmacılar farklı yeni materyallerin incelenmesine yoğunlaşmışlardır (McKeever, 1995).

Berilyum oksidin dozimetrik özellikleriyle ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır (Moore, 1957). Fakat büyük ilgi uyandıran bir sonraki materyal mangan katkılı kalsiyum florit ($\text{CaF}_2:\text{Mn}$) olmuştur. $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ ile ilgili ilk çalışma Ginther ve arkadaşları (1957) tarafından bildirilmiştir. Mangan varlığından dolayı CaF_2

materyalinin termoluminesans hassasiyetini çok yüksek bir düzeydedir. Ayrıca $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ mineralinin kusur yapısı basit bir yapıdadır ve böylece basit bir ışımaya eğrisine sahiptir. $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ minerali dozimetri alanında başarılı bir şekilde uygulama alanı bulmuş ve başarısını günümüze kadar sürdürmüş ilk TLD materyalidir (McKeever, 1995).

1960'lı yıllarda birçok yeni TLD materyali incelenmeye başlanmıştır: $\text{CaSO}_4:\text{Sm}$ (Kraysnaya ve ark., 1961), $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ (Schulman ve ark., 1965), $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (Binder ve ark., 1968), $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ ve $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (Yamashita ve ark., 1968). Ayrıca CaF_2 ve $\text{LiF}:\text{Mn,Ti}$ (Cameron ve ark., 1968; Cameron ve ark., 1963). $\text{LiF}:\text{Mn,Ti}$ mineralinin radyasyonla etkileşme sürecinin insan dokusuna eşdeğer olmasından dolayı yeniden ilgi odağı olmuştur. Bu yıllardan itibaren $\text{LiF}:\text{Mn,Ti}$ minerali TLD materyalleri arasında en çok bilinen ve kullanılan materyal olmuştur. Bu yıllarda üzerinde çalışılan bir diğer önemli materyal ise magnezyum oksittir (MgO) (Thomas ve ark., 1964).

1970'li yıllarda önceki yıllarda çalışılmış ama kısa süre içerisinde terk edilmiş bazı materyaller geliştirilmeye çalışılmıştır. Al_2O_3 TLD literatüründe yeniden yer bulmuş fakat bu defa $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Mg,Y}$ (Janas ve ark., 1976) ve $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Si,Ti}$ (Metha ve ark., 1976) şeklinde geliştirilmiştir. CaF_2 'nin farklı bir formu $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ üzerinde yeni çalışmalar yapılmış (Lucas ve ark., 1977) ve sonuçlar 5. Uluslararası Luminesans Dozimetri Kongresi'nde (5th International Conference on Luminescence Dosimetry) rapor edilmiştir. Bir süre sonra da $\text{LiB}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ (Takenaga ve ark., 1980) ve $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$ (veya Tm) (Prokic, 1980) materyalleri ile ilgili sonuçları yayınlamışlardır. Bu materyal ile ilişkili olan $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ minerali de daha yakın zamanda çalışılmıştır (Prokic, 1993).

Nakajima ve arkadaşları (1978) 1980'li yılların başlarında $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ materyalinin termoluminesans özellikleri ile ilgili çalışmalarını yayınlamışlardır. Önceleri bu konu çok fazla dikkat çekmemiş olsa da Beijing'te bulunan Katı Dozimetrik ve Dedektör Laboratuvarında, şu anda GR-200 olarak bilinen $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ TLD materyalinin üretildiği rapor edildiğinde ilgileri üzerine çekmiştir. Bu materyalin en son üretilen ve hassasiyeti oldukça yüksek olan TLD-100'den 50 kat daha hassas olduğu rapor edilmiştir (McKeever, 1995). Bu çalışmayı yine

hassasiyeti oldukça yüksek olan $Al_2O_3:C$ materyali izlemiştir (Akselrod ve ark., 1990).

Termolüminesans dozimetri (TLD) sistemleri, sürekli olarak geliştirilmekte ve ilerlemektedir (Ranogajec, 2002). Termolüminesans dozimetreleri (TLD) değişik biçimlerde olabilir, toz halinden (ezilmiş kristaller) katı biçimlerine kadar, genellikle bir ana yapı içerisine gömülmüş veya bir ana yapıdan çıkarılmış biçimdedirler. Çoğu zaman doğal bir kristalin safsızlık konsantrasyonu kristal boyunca değişiklik göstermektedir. Bu sebeple doğal kristallerin doğrudan dozimetre olarak kullanımı enderdir.

Bir malzemenin dozimetre olarak kullanılabilmesi için birçok özelliğe sahip olması gerekir. İyi bir dozimetrik malzemedan, yüksek verimlilikte bir ışık yayılımı vermesi, yeterli depolama yeteneğine sahip olması, kullanılan TL ölçüm sistemindeki detektörün yüksek oranda tepki verdiği bant aralığı civarında TL yayılım spektrumuna sahip olması, basit tuzak dağılımına sahip, lineer bir doz cevap eğrisine sahip, pahalı olmayan ve çevre koşullarına dayanıklı olması beklenir (Soliman ve ark, 2009).

Dozimetreler, radyasyon verme işlemleri sırasında uyulan standartların gerektirdiği ve bu konudaki kalite programlarının temelinde yer alan aletlerdir. Verilen radyasyon dozlarındaki hataların en aza indirilebilmeleri için doğru bir şekilde ölçülmeleri gerekmektedir. Böylece verilmesi planlanan radyasyon dozu ile verilen doz miktarı arasında sapma olup olmadığı takip edilebilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda soğurulan doz oranı 50 Gy ile 10 kGy aralığında bir bölgeyi içerir. Bu tarz uygulamalarda 50 ile 450 Gy aralığındaki düşük dozlar için Fricke dozimetreleri (demir sülfat dozimetreleri) kullanılabilirken, 500 Gy'den 10 kGy'e kadar verilen yüksek dozlar elektron spin rezonans veya lüminesans teknikleri kullanılarak (McLaughlin ve ark, 1989) ölçülebilir. Bu konuda yeni teknik ve materyallerin geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar birçok ülkede yapılmaktadır (Farrar, 2000; McLaughlin ve ark, 1989) Dozimetrik materyaller arasında kuvars en popüler malzemelerden biridir. Kuvarsın çeşitli uygulamaları arasından termolüminesans (TL) dozimetresi (de Lima ve ark, 2002; Hashimoto ve ark, 1998), tarihlendirme (Huntley ve ark, 1988; McKeever, 1991) ve elektronik enstrümantasyon sayılabilir.

Doğal kuvarsın TL ışımaya eğrisi 100 °C ile 450 °C arasında gözlenen birçok tepeden oluşmaktadır (de Lima ve ark, 2002; Santos ve ark, 2001). Doğal ametistlerin yapılarındaki safsızlıkların oranının değişken olma olasılığından dolayı materyalin TL karakteristiklerinde değişiklikler olur. Bu da tepelerin değişik sıcaklıklarda gözlenmesine yol açar (Azorin ve ark, 1982). Bazı araştırmacılar örneğin ışığa maruz kalmasının 200 °C tepesini azalttığını göstermiştir (McKeever, 1991).

α -Kuvarsın (α -SiO₂) mor türevi olup popüler bir maden olan ametistin karakteristik özellikleri ve teknolojiye uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda gözle görünür bir şekilde artmıştır (Balitsky ve ark., 2000; Cortezao ve ark., 1998). Literatürde doğal ametistlerin yayılım spektrumları ile ilgili fazla çalışma bulunmamasına rağmen sentetik ametistlerin yayılım spektrumları incelendiğinde 740-750 nm ile 350 nm civarında yayıma sahip oldukları bildirilmiştir (Zhang ve ark., 1994).

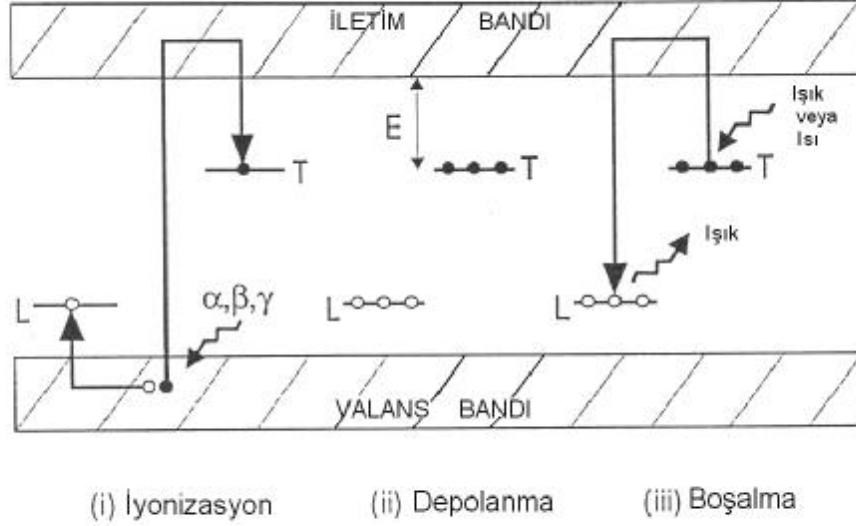
Bu çalışmada Balıkesir-Dursunbey Güğü Köyü civarından alınmış doğal ametist örneklerinin dozimetrik malzeme olarak kullanımının araştırılması amacıyla termoluminesans özellikleri incelenmiştir. Ametist örneklerinin TL özelliklerinin incelenmesi için hem ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta kaynağı hem de ⁶⁰Co gama kaynağı kullanılmıştır. Böylece farklı enerjili radyasyon kaynaklarının kullanımıyla elde edilen TL ışımaya eğrilerinin karşılaştırılması da sağlanmıştır. Yapılan çalışmada ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla XRF ile kimyasal analiz, XRD ile fiziksel analiz, uygun tavlama sıcaklığının ve süresinin belirlenmesi, ışınlama öncesi tavlama sıcaklığının TL hassasiyetine etkisi, TL ışımaya eğrilerinin incelenmesi ve CGCD yöntemi ile analizleri, CGCD ve farklı ısıtma hızları yöntemi ile tuzak parametrelerinin hesaplanması, doz cevabı, enerji cevabı, tekrarlanabilirlik, yüksek dozun ametistin hassasiyetine etkisi ve anormal sönüm deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2. TERMOLÜMİNESANS TEORİSİ

2.1. Lüminesans Olayı

Işık yayılımı, atom veya moleküllerin düşük enerji seviyesinden yüksek enerji seviyesine geçmesine bağlıdır; uyarılma enerjisi akkor telde olduğu gibi ısısal ya da flüoresan lambasında olduğu gibi ısısal olmayan bir enerji olabilir. Isısal olmayan enerjinin ışığa dönüştürüldüğü değişik yöntemlerinin hepsine birden lüminesans denir. Lüminesans kavramı, bu yüzyılın ortalarından günümüze kadar radyasyon dozimetrelerinde (insan vücudunun maruz kaldığı radyasyon miktarını ölçen cihazlar) ya da arkeolojik örneklerin ve jeolojik tortuların yaşlarını hesaplamak için kullanılmaktadır. Biriken radyasyon dozunu bulmak ya da tarihlendirme olayını gerçekleştirmek henüz açığa çıkmamış olan lüminesansın geçmiş bir zamanda sıfırlanmış olmasına bağlıdır. Bu sıfırlama, radyasyon dozimetreleri, arkeolojik çömler, tuğlalar ve porselen gibi materyallerin ısıtılması ile ya da jeolojik tortuların gün ışığına maruz kalmalarıyla gerçekleşir. Bu sıfırlamadan sonra, gözlenecek lüminesans sinyalleri insan yapımı radyasyon kaynaklarından ya da toprakta doğal olarak bulunan zayıf kaynaklardan yayılan radyasyona maruz kalarak tekrar elde edilir. Radyasyon kaynaklı lüminesans kavramı fotolüminesans, fosforesans gibi lüminesans kavramlarından farklı tutulmalıdır. Çünkü bunlar doza bağlı değildir ve bu yüzden tarihlendirme ya da dozimetrik amaçla kullanım için uygun değildir.

Böylece lüminesans, önceden iyonize radyasyona maruz bırakılmış minerallerin ya optiksel ya da ısısal olarak uyarılmalarıyla gerçekleşir. Radyasyona maruz kalma sırasında, radyasyon enerjisi kristal örgülerde birikir ve depolanır; bu depolanma kristal örgülerdeki kusurlarda tuzaklanmış elektronlar cinsindedir. Uyarılma sırasında, tuzaklanmış yükler serbest kalır ve sonuç olarak lüminesans sinyali sıfıra gider. Şekil 2.1'de, lüminesans kavramı için enerji diyagramı verilmiştir: (i) kristalin nükleer radyasyona maruz kalması yolu ile iyonizasyon (ii) radyasyon enerjisinin depolanması (iii) uyarılma (Aitken 1998).



T= Elektron tuzağı

L= Işıma merkezi

Şekil 2.1. TL ve OSL yöntemlerinin Enerji-seviyesi gösterimi (Aitken, 1998). i) Elektron ve deşiklerin nükleer radyasyona maruz kalmalarıyla birlikte, T ve L kusurlarına yükseltgenmeleri. ii) Radyasyon enerjisinin zamanın fonksiyonu olarak depolanması (sızıntılar ihmal edilirse, elektronların tuzaklardaki yaşam süreleri depolanma süresinden çok daha uzun olmalıdır). Elektronların bu yaşam süreleri, tuzak seviyesinin iletim bandına uzaklığını veren tuzak derinliği E'ye bağlıdır. iii) Örnek ısı veya ışık yolu ile uyarıldığında, elektronlar tuzakları terk etmeye başlar ve lüminesans merkezlerine ulaşırlar (L). Eğer böyle olursa, bu merkezlerdeki yeniden birleşme sonucunda foton (TL veya OSL) yayılır.

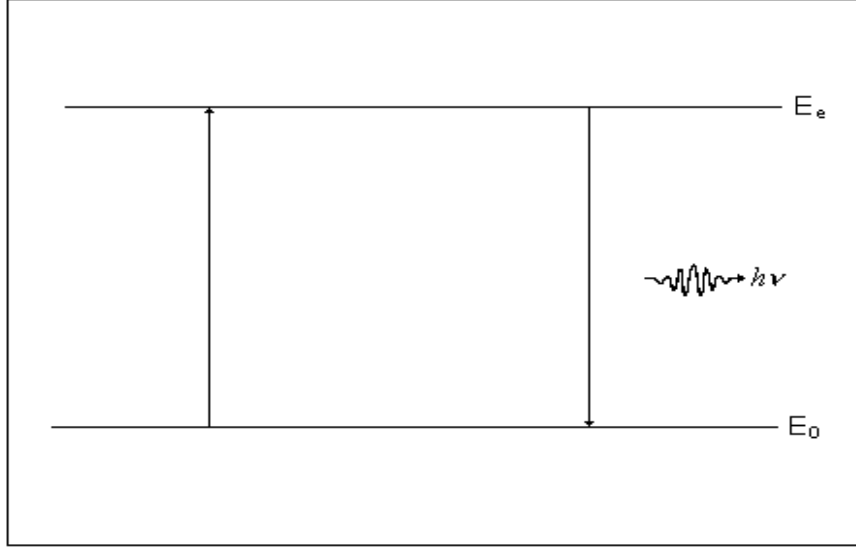
Lüminesans yayını, elektromanyetik spektrumun genellikle UV(mor ötesi), görünür ve IR(kızıl ötesi) bölgesini kapsar. Radyasyona maruz kalan bir materyalin üzerine gelen enerjinin bir kısmı materyal tarafından soğurulur ve sonuçta daha uzun dalga boyuna sahip bir foton yayılır (Stoke's kanunu). Bu fotonun dalga boyu lüminesans materyalinin bir karakteristiğidir. Dolayısıyla gelen radyasyonun karakteristiğine bağlı değildir. Lüminesans dozimetrelere açısından maruz kalınan radyasyon enerjisinin depolanmasını sağlayabilmek önemlidir. Bu da genellikle katalizör olarak adlandırılan safsızlık atomları ve kristal yapı kusurlarına bağlıdır.

Bazı lüminesans tipleri ve bu tiplere ait uyarılma yöntemleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir (Furetta ve ark., 1998).

Tablo 2.1. Bazı lüminesans tipleri ve uyarılma şekilleri (Furetta ve ark., 1998)

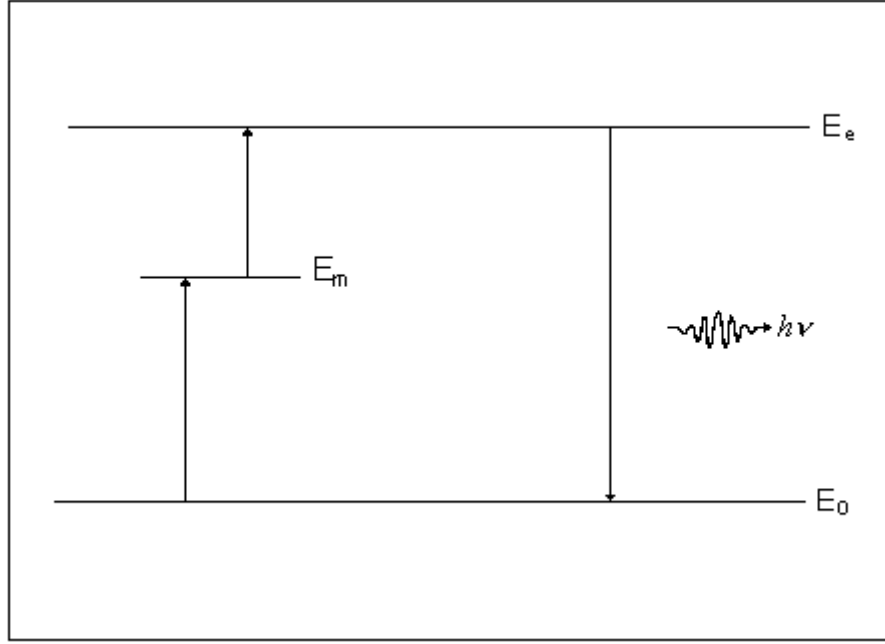
LÜMİNESANS OLAYI	UYARILMA ŞEKİLLERİ
Biyolüminesans	Biokimyasal reaksiyon enerjisi
Katodalüminesans	Katot ışınları
Kimyasal lüminesans	Kimyasal etkileşim kaynaklı enerji
Elektrolüminesans	Elektriksel alan
Fotolüminesans	U.V., görünür ve kızıl ötesi ışık
Piezolüminesans	Basınç (10 ton m ⁻²)
Tribolüminesans	Sürtünme
Radyolüminesans	İyonlaştırıcı radyasyon
Sonolüminesans	Ses dalgaları
Floresans Fosforesans Termolüminesans	İyonlaştırıcı radyasyon, U.V. ve görünür ışık

Yukarıdaki tabloda yer alan son üç lüminesans olayında ışık yayınının meydana geldiği zaman aralığı incelendiğinde aralarında farklılık olduğu görülür. İlk olarak floresansı ele alırsak; floresans maddenin radyasyon soğurmasından sonra 10^{-8} saniyeden daha az bir sürede ışığın yayılması durumundaki lüminesans olayı olarak tanımlanabilir. Floresans olayının bir diğer farklı özelliği de madde üzerindeki uyarılma işleminin süresi kadar devam etmesidir. Dolayısı ile uyarılma işlemi bittiğinde ışık yayınının gözlenmesi de duracaktır. Ayrıca floresans sürecinin sona erme zamanı sıcaklıktan bağımsızdır. Floresansın bitiş zamanı, uyarılmış bir E_e enerji seviyesinden E_0 taban enerji durumuna geçiş olasılığı ile belirlenir. Bu olayın işleyişi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Floresans olayı (Furetta ve ark., 1998)

Bir diğer süreç olan fosforesans olayı ise 10^{-8} 'den daha uzun bir sürede meydana gelir. Fosforesans süreci, materyalin uyarıcı kaynak uzaklaştırıldıktan sonra da gözlemlenmeye devam edebilir. Floresanstan farklı olarak fosforesansın bitiş zamanı sıcaklığa bağlıdır. Fosforesans olayı, bir elektronun E_0 taban enerji durumundan E_m elektron tuzağına (yarı kararlı durum) uyarılmasının ardından geçen bir t süresi sonrasında, çeşitli uyarıcı etkiler yardımı ile tekrar iletim bandına geçiş hemen ardından E_0 taban enerji durumuna dönmesi durumunda gözlemlenebilir (Şekil 2.3.). Şekilde görüldüğü gibi E_m 'den E_0 'a doğrudan bir geçiş yoktur. Bir elektron uyarıldığında E_m 'den E_e seviyesine geçerek buradan E_0 taban enerji seviyesine dönerken bir foton yayar. Böylece fosforesans olayı gerçekleşmiş olur. Bu fosforesans yayını tuzaklanmış durumda hiçbir yük kalmayana kadar azalan bir yoğunlukla devam edecektir.



Şekil 2.3. Fosforesans olayı (Furetta ve ark., 1998)

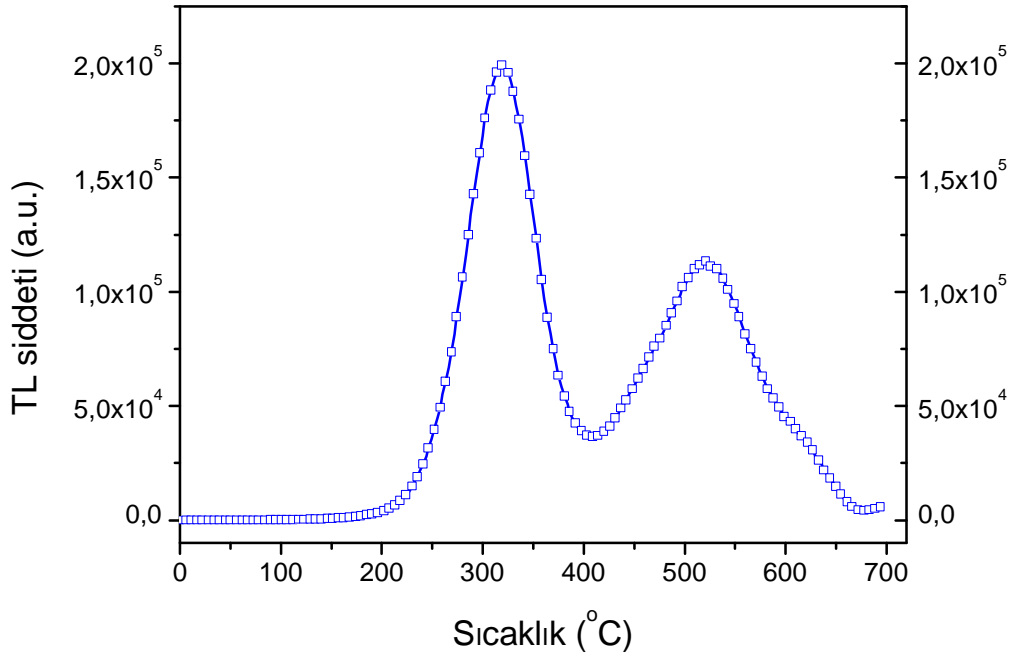
Elektronun E_0 taban enerji seviyesinden uyarılması ile lüminesans olayının meydana gelmesi arasındaki gecikme süresi çok kısa ise (10^{-4} saniyeden daha az bir sürede) floresans ve fosforesans arasındaki farkı ayırt etmek zordur. Bunu kontrol etmenin tek yolu lüminesans olayının sıcaklığa bağlı olup olmadığının incelenmesidir. Eğer materyal daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılırsa E_m 'den E_e 'ye geçiş oranında artış meydana gelecektir. Sonuç olarak fosforesans daha parlak olacaktır ve tuzaklanmış durumdaki elektronların sayısının daha hızlı azalmasından dolayı fosforesansın bitiş zamanı da daha hızlı olacaktır. Bu durumda sıcaklığa bağlı olarak lüminesans şiddetinin arttığı ve ışımaya süresinin azaldığı fosforesans sürecini termolüminesans (TL) olarak adlandırabiliriz. Termolüminesans olayında uyarım ve ışık yayılımı arasında geçen süre birkaç dakikadan 10^{10} yıla kadar değişebilmektedir (Furetta ve ark., 1998).

Kısaca, termolüminesans olarak adlandırılan ısısal olarak uyarılmış lüminesans (TL), 1950'lerde (Daniels ve ark., 1953) yeterince duyarlı ve güvenilir fotokatlandırıcı (PM) tüplerinin piyasaya sürülmesinden sonra, yaygın olarak, nükleer radyasyon dozunu ölçmekte kullanıldı. TL yöntemi 1960'lı yılların

başlarında arkeolojik tarihlendirmede (Aitken ve ark., 1968; Mejdahl, 1969), 1980'lerin başlarında da jeolojik tarihlendirmede kullanıldı (Wintle ve ark., 1980). Termolüminesans ile tarihlendirmede kullanılan bu metot ve yöntemler Aitken tarafından (1985) yeniden derlendi.

TL genellikle, örneğin sabit bir oranla belli bir sıcaklığa kadar (örneğin 500 °C) ısıtılmasıyla ve lüminesans yayılımının sıcaklığın fonksiyonu olarak kaydedilmesiyle gözlenir. TL sinyalleri "Işıma eğrisi" olarak adlandırılır ve bu eğriler örnek içerisinde yer alan elektron tuzaklarına bağlı, değişik sıcaklıklarda ortaya çıkan farklı tepeler olarak kendilerini gösterirler. Bu tuzakların oluşmasından örgü yapısındaki kusurlar sorumludur. Örneğin tipik bir kusur, negatif bir iyonun yerinden uzaklaşması ve elektron tuzağı gibi davranan bir negatif iyon boşluğu yaratmasıyla oluşabilir. Bir kez tuzaklanan bir elektron, sonunda ısısal örgü titreşimi ile rahatsız edilecektir. Sıcaklığın artmasıyla bu titreşimler giderek güçlenecek ve rahatsızlık hızlıca artacaktır. Ardından belli bir enerji seviyesine sahip tuzakların içerisindeki tuzaklanmış elektronlar hızlıca serbest kalacaklardır. Bazı elektronlar daha sonra, sonuçta ışık yayılımı (TL) gerçekleştirecek şekilde, ışımaya merkezlerindeki tuzaklanmış "deşikler" ile birleşirler. Doğal bir ametist kristalinden elde edilen tipik bir TL ışımaya eğrisi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Şekilde farklı enerji seviyelerdeki tuzaklara karşılık gelen TL tepeleri açıkça görülmektedir.

TL ışımaya eğrisinin pürüzsüz, sürekli bir görünümü vardır. Fakat dikkatli incelendiğinde, değişik seviyelerdeki tuzaklardan ısısal yolla uyarılmış elektronlardan ileri gelen, bir dizi üst üste gelmiş tepelerden oluştuğu görülür. Derin tuzaklardaki elektronların ömürleri sığ tuzaklardakine göre daha uzundur. Normal olarak 200 °C nin altında ışımaya yol açan tuzaklar dozimetre uygulamaları için pek elverişli değildir. Bu tuzaklardaki elektronlar uzun bir süre sonunda ortam sıcaklığında bile yerlerinden ayrılabilirler (anormal sönüm). Dozimetre uygulamaları için uygun ışımaya tepeleri genellikle 300 °C ve üzerinde elde edilir. Buna rağmen, oda sıcaklığında bazı feldispatların yüksek sıcaklık TL tepesinin anormal (yani beklenmedik) düşüşü gözlenmiştir. Bu durum kuantum mekaniksel tünelleme etkisi olarak açıklanmıştır (Wintle, 1973).



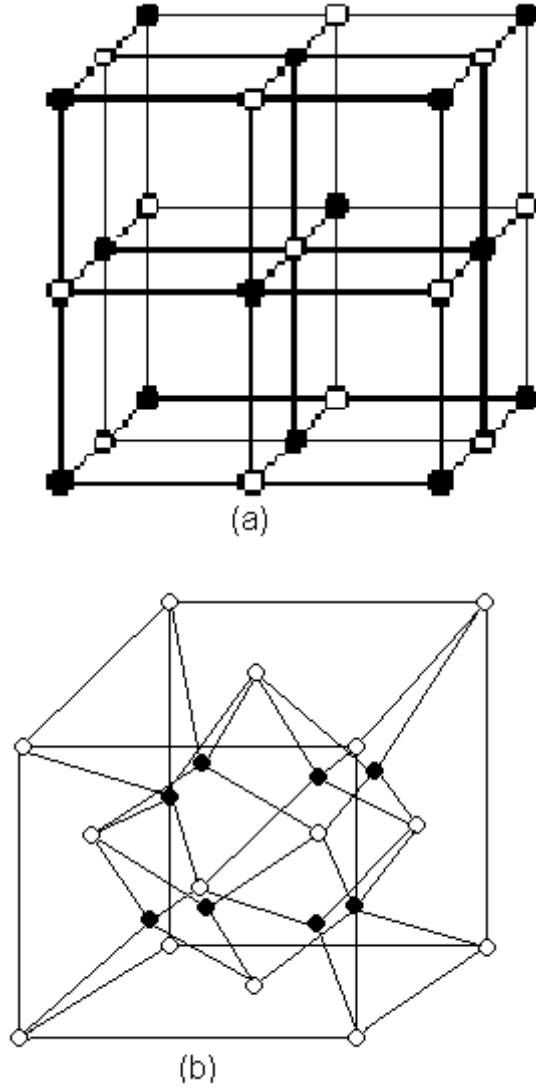
Şekil 2.4. Doğal bir ametist örneğinden elde edilmiş lüminesans ışıma eğrisi

2.2. Kristal Kusurları

Termolüminesans dozimetresi alanında ilgilenilen malzemeler prensip olarak yalıtkanlardır. Bu yalıtkanların iletim bandında gözlenebilecek olan yükleri, sadece radyasyon enerjisinin soğurulması sonucu yükseltgenen elektronlardır. Bu tip yalıtkanlara örnek olarak kübik yapıdaki alkali halojenürler verilebilir (LiF ve NaCl).

Bir kristal yapısal olarak atom veya moleküllerin 3-katlı periyotlarla bir araya gelmeleri sonucu oluşur. Gerçek bir kristalde bu periyodiklik ısısal titreşimlerden dolayı bozulabilir ve böylece yapı kusursuzluğunu kaybetmiş olur.

Alkali halojenürler yapısal olarak ve barındırdıkları kusurlar bakımından gerçek bir kristalin yapısını anlayabilmek için en uygun malzemelerdir. Şekil 2.5'te ideal bir kristal olan LiF ve CaF₂'ün yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.5. İdeal bir kristalin üç boyutlu yapısı a) LiF (• Li, o F) b) CaF₂ (• Ca, o F) (Furetta ve ark., 1998)

Gerçek bir kristal temel olarak üç tip kusura sahiptir. Bunlar sırası ile içsel veya doğal kusurlar, dışsal veya safsızlık kusurları ve iyonlaştırıcı radyasyonun alkali halojenürlerde meydana getirdiği kusurlar olmak üzere 3 ana başlık altında incelenmektedir.

2.2.1. İçsel veya Doğal Kusurlar

Bu kusurların temel özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

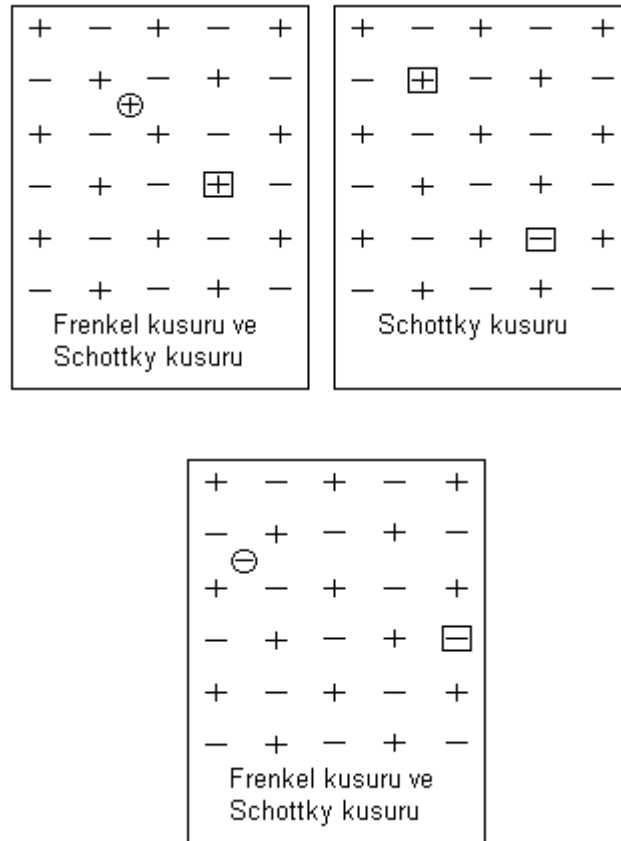
a) Boşluklar veya olması gereken yerde olmayan atomlar dolayısı ile oluşan kusurlardır (Schottky kusurlar). Bir atom yerinden çıkartıldığı zaman meydana gelen bir kusurdur.

b) Araya girme veya Frenkel kusuru: Bu tür kusurlar, örgüye ait olmayan bir noktaya yerleşmiş bir X atomundan meydana gelir.

c) Yerine geçme kusurları: Bu tip kusurlara örnek olarak bir alkali iyonunun bulunması gereken yerdeki halojen iyonları verilebilir.

d) Tüm kusurların hepsinin birlikte olduğu kusurlar.

Yukarıda bahsedilen kusur tipleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. İçsel kusurları bulunan gerçek bir kristalin yapısı (örneğin LiF). + alkali iyon (Li^+), - halojen iyon (F^-), \oplus alkali iyon boşluğu, \ominus halojen iyon boşluğu, \oplus örgüye ait olmayan bir noktadaki alkali iyon, \ominus örgüye ait olmayan bir noktadaki halojen iyon (Furetta ve ark., 1998)

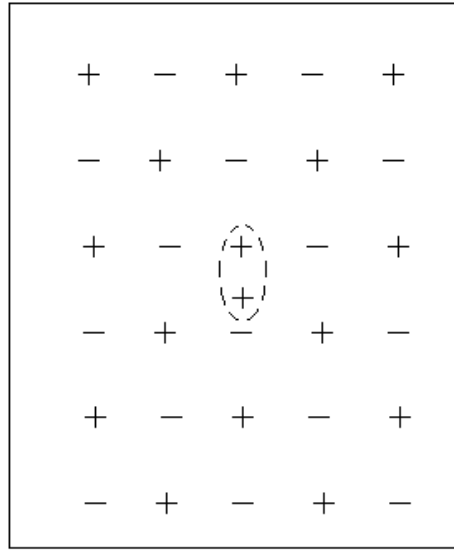
2.2.2. Dışsal veya Safsızlık Kusurları

Bir X kristali içerisinde bulunan Y kimyasal safsızlıkları bu tip kusurlara örnek olarak verilebilir. Bu kusurların oluşum şekilleri aşağıda verilmektedir.

a) X ve Y'den oluşan bir yapıda Y atomunun X atomunun yerine geçmesi ile meydana gelen kusurlar.

b) Kusursuz bir kristalde bulunan bir Y atomunun örgüye ait olmayan bir yerde bulunması ile oluşan kusur (ara yer kusuru) .

Bu safsızlıklar kristalde meydana gelen erime, difüzyon veya kristal içerisine başka bir iyonun yerleştirilmesi yolu ile oluşabilmektedir. Şekil 2.7'de LiF kristali içerisindeki Li^+ iyonunun yerini alan Mg^{2+} katyonunun davranışı bu kusurlara örnek olarak verilebilir.

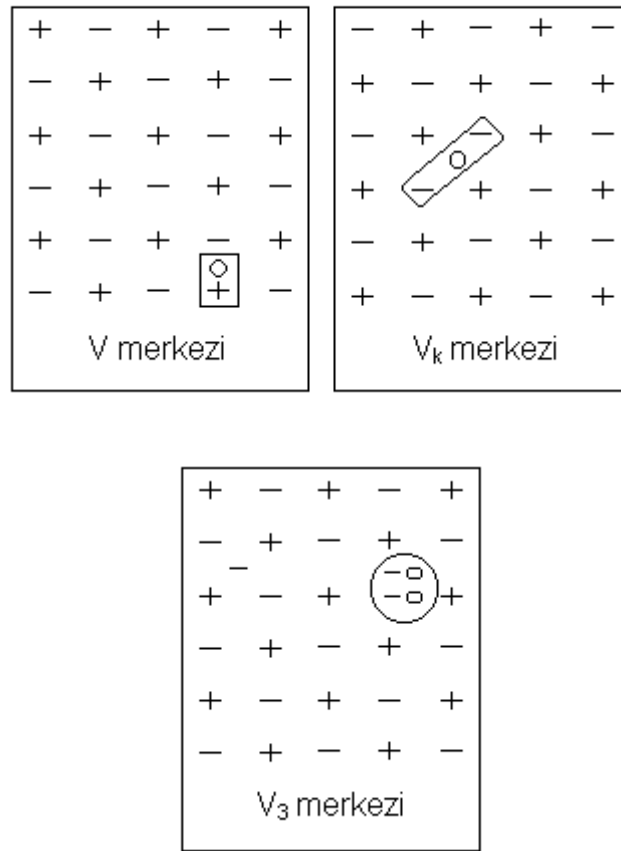


Şekil 2.7. Yerine geçmeye ait iki değerlikli katyon safsızlığı Mg^{+2} (Furetta ve ark., 1998)

Kimyasal safsızlıkların mekanizmasının anlaşılması amacıyla Şekil 2.8.'deki şekiller incelenebilir. Şekilde 2.8. (a)'da boşluk yoğunluğu üzerinde iki değerlikli iyonun etkisi görülmektedir. Bu durumda, pozitif yük safsızlığının dengelenmesi amacıyla bir alkali iyonu atılmalıdır. Şekil 2.8. (b)'de ise iki değerlikli katyon safsızlığının bir yerel pozitif yük ve katyon boşluğunun da bir yerel negatif yük

deneysel bir veri henüz yoktur. Mümkün olan diğer deşik merkezi çeşitleri aşağıdaki gibidir:

- Bir deşik, bir negatif iyon çifti ile tuzaklandığında V_k merkezi meydana gelir.
- Bir halojen iyonun yerini yüksüz bir halojen molekülünün almasıyla oluşan yapıya V_3 merkezi denir. Şekil 2.9'da bu merkezler ile ilgili örnekler yer almaktadır.



Şekil 2.9. Gerçek bir kristalde V , V_k ve V_3 merkezleri (Furetta ve ark., 1998)

TL materyallerinin yüksek dozlarda radyasyona tutulmaları sırasında istenmeyen kusurlar meydana gelebilmektedir. Bu durum termolüminesans dozimetresi (TLD) uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır (Furetta ve ark., 1998).

Fotonlar, elektronlar, nötronlar, yüklü ve yüksüz parçacıklar ile yapılan bombardımana bağlı olarak örgü içerisindeki atomların yer değiştirmesi sonucu kusurlar meydana gelir. Bu kusurların sayısı ışınlama akısı ve ışınlama süresi ile orantılıdır. Bununla birlikte, yerini terk edip araya giren atom ile onun oluşturduğu boşluğun yeniden birleşme olasılığı artmaktadır. Bu sebeple uzun ışınlama süresi sonucunda meydana gelen kusurların sayısı dereceli bir şekilde azalacaktır.

Işınlama sırasında iyonlaşma hasarı olarak adlandırılan bir mekanizma ile negatif iyon boşlukları da oluşabilmektedir. Bu mekanizma iyonlaşma elektronu ve deşiklerinin yeniden birleşimiyle ilgilidir. Bir elektron-deşik çifti (eksiton) bir negatif örgü iyonu üzerinde yeniden birleşme gerçekleşinceye kadar tuzaklanmış şekilde kalabilir. Yeniden birleşme sırasında açığa çıkan enerji negatif iyona transfer olur. Bu enerji, geride deşik ve arayer atomlarının kaldığı çarpışmalara sebep olmaktadır. Sonuçta ‘F’ merkezleri ve arayer atomları (yerini terk edip aralara yerleşen atom) ortaya çıkmaktadır.

Işınlama işlemi öncesinde gerçek kristal boşluklar, ikili boşluklar, kristal örgüde araya giren atomlar ve/veya iyonlar, kristal örgüde araya giren safsızlıklar gibi farklı türlerde kusurlara sahiptir. Bunlardan bazıları elektron ve deşikler için bir tuzak gibi davranırlar. Işınlama süresince, iyonlaşma sonucu oluşan elektron ve deşikler bu kusurlarda tuzaklanırlar veya elektronlar tuzaklanmış olan deşiklerle yeniden birleşirler. Yeniden birleşme olasılığı tuzaklanma olasılığından çok daha büyüktür ve bu sebeple ışınlama sonucunda yüklerin sadece bir kısmı tuzaklanmış olarak kalırlar.

Sadece bir tür yüklü tuzakın oluşumu aşağıdaki ifadeyle tanımlanabilir:

$$\frac{dn}{dt} = \Phi f(N_0 + kt - n) \quad (2.1)$$

Burada dn/dt yüklü tuzakların oluşum hızı, N_0 ışınlama öncesi kristalde var olan boş tuzakların yoğunluğu, k ışınlama süresince meydana gelen kusurların birim zaman başına oluşum hızı, kt bir t zamanı boyunca uygulanan ışınlama sebebi ile oluşan kusurların sayısı, n bir t zamanındaki yüklü tuzakların yoğunluğu, Φ doz

oranı, f yüklü tuzaklara dönüşmüş boş tuzakların kesridir. $t=0$ 'da $n=0$ durumu için Eşitlik 2.1'nin çözümü aşağıda verilmektedir:

$$n = (N_0 - \frac{k}{f\Phi}) [1 - \exp(-f\Phi - f)] + kt \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2 bir üssel ve bir lineer bileşen olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

Eşitlik 2.1 ışınlamadan önce var olan boş tuzak sayısının (N_0), ışınlama boyunca, ışınlamanın kendisi tarafından yok edilebileceği göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenebilir. Böylece, artan ve azalan kusur yoğunluğu, toplam doygunluk bileşeninin artmasına veya azalmasına yol açacaktır.

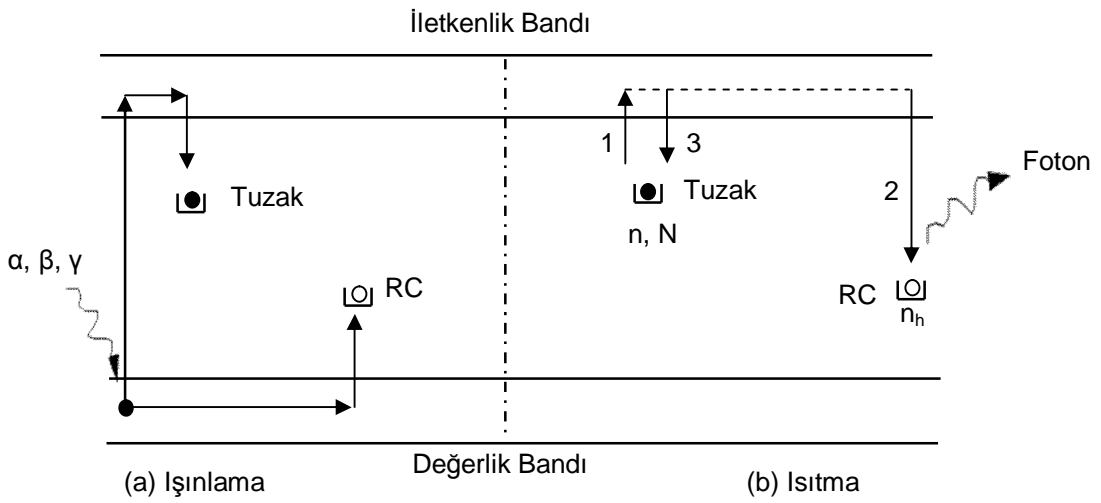
Işınlama sonlandığında, meydana gelen yüklü tuzaklar farklı mekanizmalar izleyebilir. Bu mekanizmalardan biri termolüminesans eşitliği ile tanımlanan ısısal sönmüldür. Bazen renk merkezlerinde bir artış da gözlenebilmektedir. Bu durum incelenen malzemenin iki veya daha fazla tuzak tipi içermesi durumunda gerçekleşir. Eğer yükler bir tip tuzaktan yükseltgenirse, yüklerin hepsi veya bir kısmı başka bir tuzak tarafından yeniden tuzaklanabilir. Bu durum bazı TL materyallerinde gözlemlenmiştir (Furetta ve ark., 1998).

2.3. Basit Termolüminesans Modeli

TL modeli en basit şekli ile iki lokalize enerji seviyesi barındıran bir model ile açıklanabilir. Bu modelde tek bir tuzak (T) ve tek bir yeniden birleşme merkezi (RC) olduğu varsayılır. Bu model Şekil 2.10'da verilmektedir. Şekilde N kristaldeki tuzakların toplam konsantrasyonu (m^{-3}), $n(t)$ t zamanı içinde kristaldeki doldurulan tuzakların konsantrasyonu ve $n_h(t)$, yeniden birleşme merkezindeki deşik tuzaklarının doluluk konsantrasyonudur. n_0 ise $t=0$ anında tuzaklarda bulunan tuzaklanmış elektron sayısıdır. Örnekler $b = dT/dt$ şeklinde lineer bir ısıtma hızı kullanılarak ısıtılarak bir TL okuması gerçekleştirilirken, örgüdeki titreşimin artmasıyla tuzaklardaki elektronlar yükseltgenerek iletim bandına geçerler (geçiş 1). İletim

bandına geçen bu elektronlar ya yeniden birleşme merkezi ile birleşirler (geçiş 2) ya da tekrar tuzaklanabilirler (geçiş 3). Bu durumda yayılan ışığın şiddeti (I_t) aşağıdaki denklem ile verilir:

$$I_t = -\frac{dn_h}{dt} \quad 2.3$$



Şekil 2.10. Enerji Band Modeli, (a) Işınlama sonucu uyarılan elektronların yarı kararlı enerji seviyelerinde bulunan tuzaklarda tuzaklanmaları, (b) Isısal yolla uyarılan elektronların yeniden birleşme merkezindeki deşikler ile birleşerek TL fotonu yayınlanması

2.4. Termoluminesans Kinetikleri

2.4.1. Birinci Derece Kinetik

Randall ve Wilkins (1945) ışımaya eğrisindeki her bir ışımamanın tepe noktası için bir matematiksel ifade kullanmıştır. Bu matematiksel ifadeler için göz önünde bulundurulmuş temel varsayımlar kısaca:

- Elektronların kendiliğinden serbest kalmasını önleyecek kadar düşük bir sıcaklıkta fosforun radyasyona tutulması,

- Örneklerin sabit bir ısıtma hızı kullanılarak ısıtılması.

Randall-Wilkins teorisi, birinci dereceden kinetiği temel alarak tek bir tuzak derinliğini göz önüne alır. Dolayısı ile elektronların tekrar tuzaklanma olasılığının çok küçük olduğu varsayılır. Bu durumda TL şiddeti I , herhangi bir sıcaklıkta, doğrudan tuzaktan kurtulan elektronların sayısı ile orantılıdır:

$$I(t) = -c \left(\frac{dn}{dt} \right) = cpn \quad (2.4)$$

Burada, c , 1 olarak alınabilen sabit bir sayıdır. Daha sonra,

$$n = n_0 \exp \left[-st \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \right]$$

ve

$$P = s \exp \left(-\frac{E}{kT} \right)$$

eşitlikleri göz önüne alınır ve bunlar 2.4 denkleminde yerine yazılırsa:

$$I(t) = n_0 s \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \exp \left[-st \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \right] \quad (2.5)$$

olur. Burada $I(t)$ herhangi bir t anında elde edilen lüminesans şiddeti, n_0 ise $t=0$ anında tuzaklarda bulunan tuzaklanmış elektron konsantrasyonu, T sıcaklık, E tuzakların enerji seviyeleri, s elektronların tuzaklardan kurtulma olasılığına bağlı frekans faktörü ve k Boltzmann sabitidir.

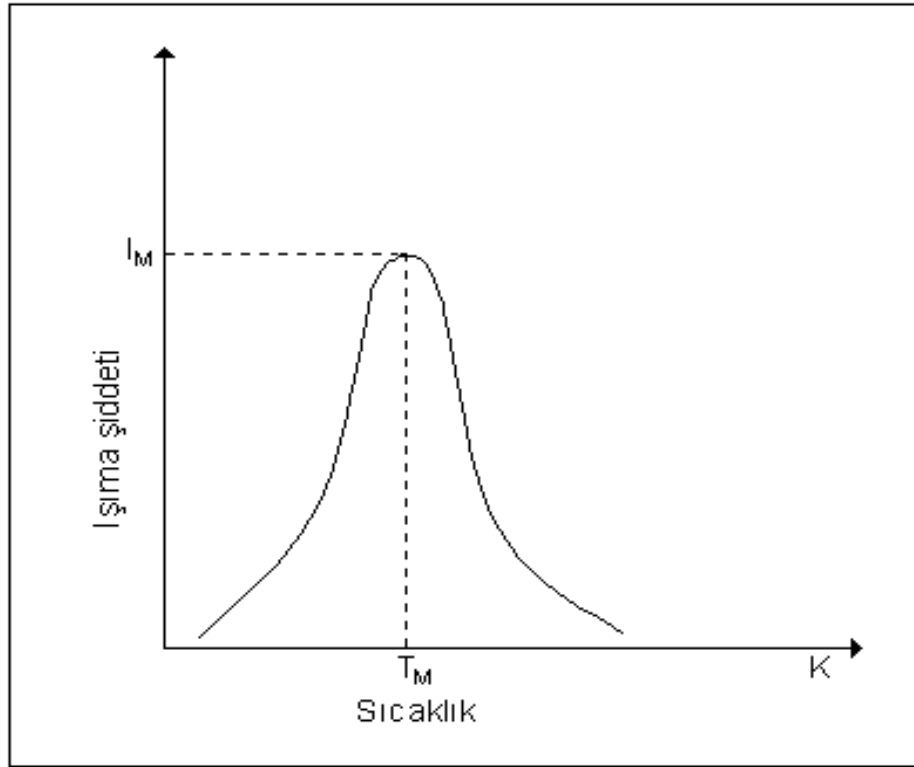
Isıtma hızı lineer olacak şekilde ele alınırsa; ($b = dT/dt$) kullanılarak

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = - \int_{t_0}^t s \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) dt \quad \text{denklemi tekrar düzenlenebilir ve sonuçta } n \text{ değeri için bir}$$

denklem elde edilir. Bulunan n ifadesi 2.4'de tekrar yazılırsa;

$$I(T) = n_0 s \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \exp \left[-\frac{s}{b} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{E}{kT'} \right) dT' \right] \quad (2.6)$$

Bu ifade nümerik çözüm kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca bu ifade, karakteristik bir tepe sıcaklığında (T_M) maksimum bir şiddete sahip çan şeklinde bir eğri verir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Eşitlik 2.6'nın çözümü. T_M , tuzaklanmış elektronların başlangıçtaki yoğunluğu olan n_0 'dan bağımsızdır (Furetta ve ark., 1998)

Denklem 2.6'da $T=T_M$ noktasında $\frac{dI}{dT} = 0$ olarak alınabilir. Bu şekilde önemli bir ilişki elde edilir. Bu eşitliğin logaritmik türevi alınacak olursa;

$$\frac{d(\ln I)}{dT} = \frac{1}{T} \frac{dI}{dT} \text{ olur.}$$

Buna göre Eşitlik 2.6'nın logaritmasını alınıp gerekli işlemler yapıldığında TL tepelerinin enerji seviyeleri, frekans faktörü ve ısıtma hızı arasında önemli bir eşitlik elde edilir:

$$\frac{bE}{kT_M^2} = s \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \quad (2.7)$$

Bu eşitlik kullanılarak farklı ısıtma hızları için deneysel sonuçlardan elde edilecek olan farklı T_M değerleri kullanılarak elde edilecek grafikten enerji seviyesi E ve frekans faktörü s rahatlıkla bulunabilir. Bu yöntem Farklı Isıtma Hızları Yöntemi olarak adlandırılmaktadır ve bu konu ilerideki bölümlerde daha detaylı bir şekilde işlenmiştir.

Eşitlik 2.7'den bazı önemli sonuçlar elde edebiliriz:

- Sabit bir ısıtma hızı için, E değeri artırıldığında veya s azaltıldığında, T_M yüksek sıcaklıklara doğru kaymaktadır.
- Bir tuzak için (E ve s sabit değer olarak alınmıştır) ısıtma hızı artarken, T_M daha yüksek sıcaklıklara doğru kayar.
- T_M , n_0 'dan bağımsızdır (dolayısı ile verilen dozdan da bağımsızdır).
- Toplam ışık miktarına S dersek, S ifadesini aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$S = \int_0^{\infty} I dt = -c \int_0^{\infty} \frac{dn}{dt} dt = -c \int_{n_0}^0 dn = cn_0 \quad (2.8)$$

Burada görüldüğü gibi S tuzaklanmış yüklerin başlangıçtaki sayısı ile doğru orantılıdır. Fakat ısıtma sürecinden bağımsızdır. Tuzaklanmış yüklerin sayısının radyasyon dozu ile orantılı olduğu bilinmektedir. Bu durumda S 'de radyasyon dozu ile orantılıdır. Bu özellik radyasyon dozimetresinde çok önemlidir (Furetta ve ark., 1998).

2.4.2. İkinci Derece Kinetik

İkinci dereceden kinetik ifadesi, yeniden tuzaklanmanın öne çıktığı bir durumu tanımlamak için kullanılır. Bu konu Garlick ve Gibson (1948) tarafından ele alınmış ve bir serbest yük taşıyıcısının TL merkezi ile yeniden birleşmesi veya tekrar tuzaklanması olasılıkları birlikte incelenmiştir. Bu durumda, eşitlik (2.9) kullanılmalıdır:

$$I(t) = \frac{dn}{dt} = -n^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.9)$$

Bu ifade, yeniden birleşme olasılığının 1'e eşit olduğu birinci derece kinetiği için elde edilen sonuçtan farklıdır çünkü birinci derece kinetikte yeniden birleşme olasılığı yoktur. Burada $s' = s/N$ ile gösterilir ve genellikle ön-üssel faktör olarak adlandırılır. s' , cm^3s^{-1} boyutunda bir sabit, $N(\text{cm}^{-3})$ ise tuzak yoğunluğudur.

Eşitlik 2.9'un integrali sabit T sıcaklığı için alınırsa aşağıdaki denklem elde edilir;

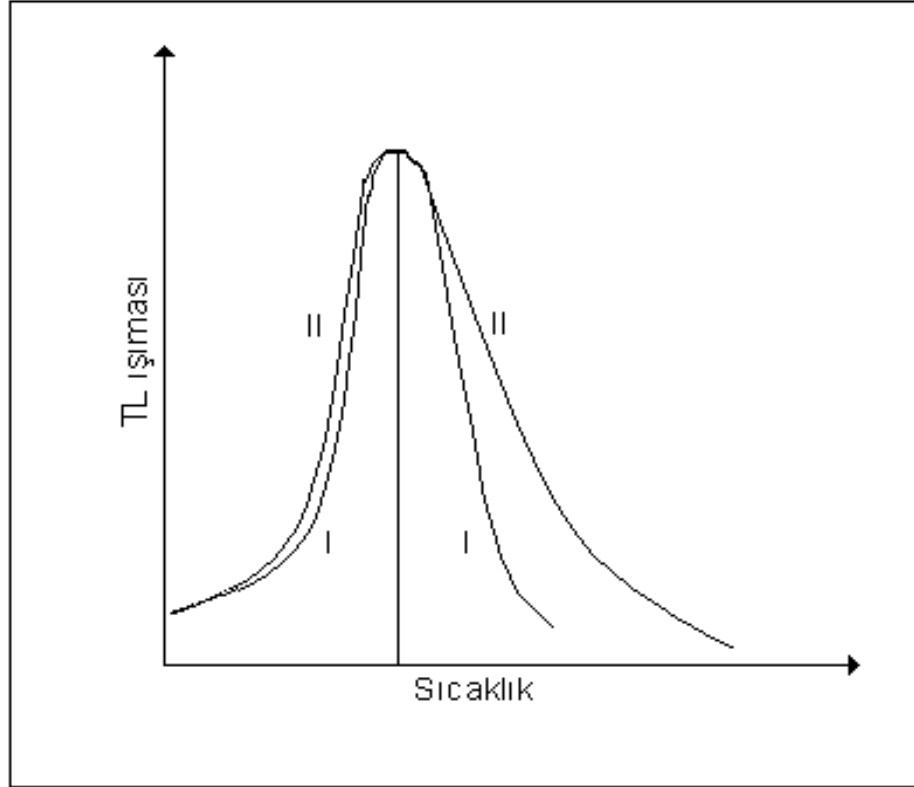
$$n = n_0 \left[1 + s' n_0 t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10) denklem (2.9)'da yerine koyulup sabit bir ısıtma hızı için ($dt = dT/b$) gerekli integraller alındığında $I(T)$ ışık şiddeti:

$$I(T) = n_0^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \left(\frac{s' n_0}{b}\right) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right]^{-2} \quad (2.11)$$

olarak elde edilir.

Kinetik mertebenin ışıma eğrisinin şekli üzerinde nasıl bir etki yarattığını gösterebilmek amacıyla Şekil 2.12'de birinci dereceden ve ikinci dereceden kinetik mertebeye sahip iki TL tepesi üst üste bindirilerek verilmiştir. Şekilde her örnek için tek tip tuzak ve dolayısı ile her örnek için sadece bir tepe mevcuttur. Şekilde görüldüğü gibi ikinci dereceden kinetiğe sahip örnek içerisindeki elektronların tekrar tuzaklanmaları TL sinyalinin sönümünü geciktirmektedir. Böylece ikinci derece kinetiğe sahip örnekten elde edilen eğrinin azalan kısmı daha uzundur. Bu fark birinci ve ikinci derece kinetik mertebesine sahip tepeleri ayırt edebilmemizi sağlayan önemli bir özelliktir.



Şekil 2.12. I, birinci derece kinetiğe sahip, II, ikinci dereceden kinetiğe sahip örnekte elde edilen tepelerin şekli. İki eğri arasındaki büyük fark, eğrinin alçalan kısmında görülmektedir (Furetta ve ark., 1998)

$I(T)$ 'nin önce logaritmasını daha sonra türevini alıp sıfıra eşitlersek;

$$\frac{bE}{2kT_M^2} \left[1 + \frac{s'n_0}{b} \int_{T_0}^{T_M} \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \right] = s'n_0 \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) \quad (2.12)$$

denklemini tepe sıcaklığına bağlı olarak elde edilir.

İkinci derece kinetiğin baskın olduğu durumlarda yeniden tuzaklanan elektronlardan kaynaklı gecikmeden dolayı T_M %1'lik bir dereceyle artış gösterir. Tuzaklanmış elektronların serbest kalması T_M sıcaklığının altındaki sıcaklık

değerlerinde gerçekleştiğinden ışık yayını, T_M 'nin altındaki sıcaklıklarda meydana gelir.

Sabit bir E değeri için β artırıldığında veya s' azaldığında T_M artmaktadır. Sabit bir β değeri için T_M , E ile doğru orantılı bir sonuç verir (Furetta ve ark., 1998).

2.4.3. Genel Mertebeden Kinetik

Birinci ya da ikinci dereceden kinetiğin yetersiz olduğu durumlarda genel mertebeden kinetik süreci kullanılmaktadır. Bu süreç deneysel olarak çalışılır ve daha önce anlatılan mertebelerin orta durumu olarak tanımlanabilir. Genel mertebeden kinetikte de tuzakların tek tip olduğu yani enerji seviyelerinin aynı olduğu varsayılır. Tek bir enerji seviyesinde bulunan yük taşıyıcılarının sayısının (n), n^b ile orantılı olduğunu düşünelim. Bu durumda tuzaklardan kurtulma olasılığı eşitlik (2.13) ile gösterilebilir (May ve ark., 1964; Ausin ve ark., 1972; Ward ve ark., 1972):

$$I(t) = \frac{dn}{dt} = -s''n^b \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.13)$$

Burada, s'' , ön-üssel faktördür. b ise genellikle 1 ve 2 arasında herhangi bir değer alır ve kinetik mertebesi olarak tanımlanır. s'' ön-üssel faktörü, $cm^{3(b-1)}s^{-1}$ boyutunda ifade edilir. s'' 'nin boyutları b mertebesi ile değişir. Ayrıca, $b=2$ olduğunda, s'' , s' 'ne indirgenir. Eşitlik 2.13 tekrar düzenlenip integrali alınacak olursa:

$$n = n_0 \left[1 + s(b-1)t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \right]^{\frac{1}{1-b}} \quad (2.14)$$

olur. Burada, $s = s''n_0^{b-1}$ olarak ifade edilirken birimi de saniye⁻¹ dir. Frekans faktörü olan s , verilen bir doz için sabittir fakat doz değiştirildiğinde s de değişir. Buna göre

lineer bir ısıtma hızı ($dT = bdt$) kullanılarak elde edilecek olan bir TL ışımaya eğrisinin şiddeti $I(T)$ ışımaya şiddeti gibi verilebilir:

$$I(T) = sn_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{s(b-1)}{b} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^{\frac{b}{b-1}} \quad (2.15)$$

Bu eşitlikte görüldüğü gibi burada verilen iki faktörün $I(T)$ 'ye katkısı gözlenebilmelidir;

- T ile sabit bir oranda artan üssel faktör,
- T artarken azalan ve köşeli parantez içerisinde gösterilen faktör.

Eşitlik 2.15'te $b=2$ olduğunda ikinci dereceden kinetik denklemi elde edilmiş olur. Fakat $b=1$ durumu için bu denklem geçerli değildir. Ancak $b \rightarrow 1$ için bu denklem birinci dereceden kinetik denkleme indirgenir. Bunların yanı sıra Eşitlik 2.13 tamamen deneysel sonuçlarla türetilmiştir. Diğer eşitlikler kullanılarak (Eşitlik 2.4 ve 2.9) 2.13 eşitliğini türetecek bir yaklaşım yoktur. Sonuç olarak genel dereceden kinetik için bir fiziksel model mevcut değildir.

Genel dereceden kinetik için maksimum yayınım eşitliği, Eşitlik 2.15'ten çıkartılabilir:

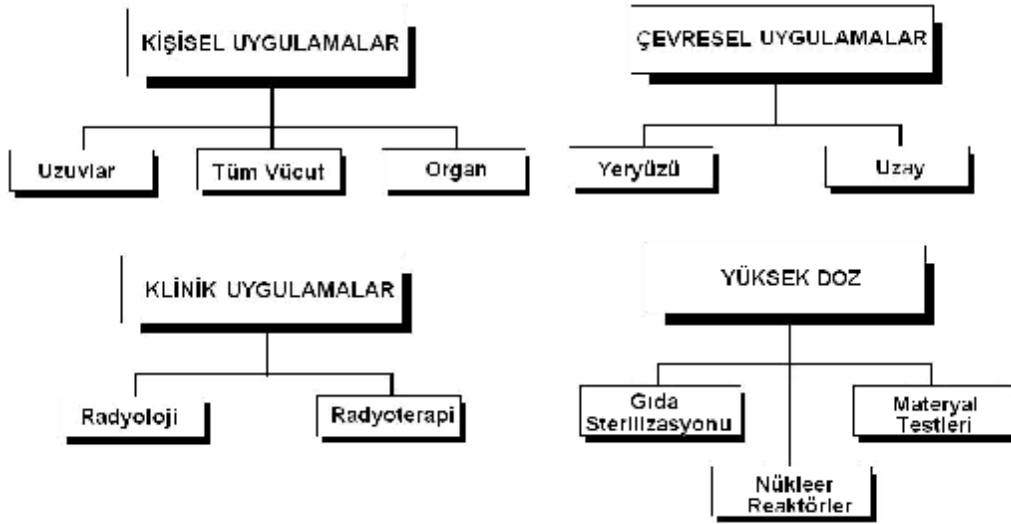
$$\frac{kT_M^2 bs}{bE} \exp\left(-\frac{E}{kT_M}\right) = 1 + \frac{s(b-1)}{b} \int_{T_0}^{T_M} \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \quad (2.16)$$

Sonuç olarak Eşitlik 2.7, 2.12 ve 2.16'dan elde edilen ilginç sonuçlar vardır:

- Eşitlik 2.7, n_0 başlangıç yoğunluğuna bağlı değildir. Birinci dereceden tepelerin yüksekliklerinin ışınlama dozlarına bağlı olarak değişmesi beklenemez.
- $b \neq 1$ olması durumunda ise (genel derece ve ikinci derece kinetik için), s , n_0 'a bağlı olduğundan T_M 'nin uyarılma dozuna bağlı olarak değişmesi beklenir (Furetta ve ark., 1998).

2.5. Termolüminesans Dozimetri

Hangi dozimetrik malzemenin hangi uygulama için en iyi sonucu verdiğini anlamak için dozimetrik malzeme ile yapılan çalışmaların incelenmesi gerekir. Bu bölümde termolüminesans dozimetrelerinin (TLD) geniş anlamda kullanıldığı uygulama alanları incelenmektedir. Şekil 2.13'te bu ana uygulama alanlarının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.13. TLD'lerin kullanıldığı Kişisel Dozimetri, Çevresel Dozimetri, Klinik Dozimetri ve Yüksek Doz Uygulamaları gibi genel alanların alt kategorileri ile birlikte gösterimi (McKeever ve ark., 1995)

2.5.1. Kişisel Dozimetri

Kişisel dozimetre uygulamalarında radyasyon ile ilişkili işlerde çalışan personelin rutin uygulamalar sırasında maruz kaldığı radyasyon miktarının ölçülmesi birincil hedeftir. Nükleer reaktör çalışanları, hastanelerdeki radyoterapi teknisyenleri ve nükleer atıklar ile ilgilenen işçiler bu guruba örnek olarak verilebilir. Burada radyasyon dozunun ölçülmesindeki amaç bu personelin maruz kaldığı radyasyon dozunun önceden belirlenmiş limitlerin altında tutmaya çalışmaktır. Bu limitler Uluslararası Radyasyon Korunma Ajansı (ICRP) gibi ajanslar temel alınarak

belirlenmektedir. Bu rutin doz belirleme uygulamasının yanı sıra radyoaktif kazalar sonucunda maruz kalınan radyasyon miktarının ölçülmesi de bu alana girmektedir. Tüm bu uygulamaların ana amacı her bireyin maruz kaldığı toplam radyasyon miktarının ICRP tarafından belirlenen ve izin verilen maksimum doz değerinin altında tutmaktır (McKeever ve ark., 1995).

Şekil 2.13'te belirtilen alt kategoriler aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- a) *Uzuv Dozimetresi*: Eller, kollar ve bacaklar gibi insan vücudunun uzuvlarının maksimum eşdeğer doz miktarının kullanılmasında kullanılır.
- b) *Tüm Vücut Dozimetresi*: İnsan vücudunun yüzeyinin altında yer alan organların içerisinde 1.0cm derinliğindeki eşdeğer dozun hesaplanmasında kullanılır. Burada ilgilenilen konu etki gücü yüksek radyasyon tipleridir. Başka bir deyişle gama ışınları, X-ışınları (>15 keV) ve nötronlardır.
- c) *Doku Dozimetresi (deri dozimetresi)*: Birkaç milimetre derinlikteki soğurulan eşdeğer doz ile ilgilenir. Bu kategoride ise etki gücü düşük olan (örneğin beta parçacıkları ve enerjisi <15 keV olan X ışınları) radyasyon tipleri ile ilgilenilir.

Sonuç olarak, TLD'lerin yukarıda bahsedilen alanlarda kullanılmasındaki en büyük gereksinim organların maruz kaldıkları eşdeğer dozların hesaplanması olduğu açıkça söylenebilir. Bu alanların ilgilendiği doz aralığı $\sim 10^{-5}$ Sv'ten 10^{-1} Sv'e kadar değişmekle beraber dozun belirsizliği $\pm \%10-20$ aralığında olmalıdır (McKeever ve ark., 1995).

2.5.2. Çevresel Dozimetri

Son yıllarda bilim, sağlık, sanayi ve politik çevreler, toplumların insan yapımı radyasyon kaynaklarından ileri gelen çevresel felaketlere verdikleri tepkilerin artmasıyla, dikkatlerini bu konuya daha çok vermeye başlamışlardır. Dünyanın geniş bir kitlesinde, nükleer santrallerde yapılan çalışmalar sırasında gaz formundaki radyonüklidlerin günden güne kaçması, düşük seviyeli atıkların atılımı, nükleer yakıtların kullanımı, nükleer santral kazaları ve nükleer enerji endüstrisinin yapmış

olduğu bazı aktiviteler sonucunda, bu çalışmaların olası çevresel zararları ile ilgili endişeler oluşmaya başlamıştır. Sonuçta çevresel radyasyon dozunun sürekli olarak ölçülmesi endüstrileşen ülkeler için önemli bir konu haline gelmiştir. Bu sebeple TLD'lerin çevresel radyasyonun ölçülmesindeki kullanımı önemlidir. Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da nükleer santrallerin kurulmakta olduğu bölgelere radyoaktivite seviyesinin belirlenmesi amacıyla TLD sistemleri yerleştirilmektedir. Böyle bir çalışmada kullanılan TLD'lerin kişisel dozimetri alanında kullanılanlara göre performans kriterlerinin farklı olması gerekmektedir. Burada doku eşdeğer doz söz konusu değildir. Buna karşın, maruz kalınan doz seviyesinin düşük olması (doz eşdeğeri tipik olarak 10^{-2} mSv civarındadır) uzun süren bir okuma zamanı gerektirir. Böylece kullanılacak olan TLD'lerin uzun süreler boyunca istikrarlı halde kalabilmesi yüksek orandaki hassasiyetlerini koruyabilmeleri oldukça önemlidir. Özellikle gama ışını yayan kaynaklar bu konuda üzerinde durulan ana kaynak tipleridir (McKeever ve ark., 1995).

Son zamanlardaki uzay uçuşlarının artması çevresel dozimetrenin bir alt kolu olan uzay dozimetrisine ilginin çoğalmasına yol açmıştır. Bu ilginin en büyük sebebi astronotların zararlı radyasyonla karşı karşıya kalmaları ve dolayısıyla maruz kalınan dozun ölçülmesinin gerekliliğidir. Ayrıca elektronik cihazların uzun süre boyunca radyasyona maruz kalmaları da bir diğer sebeptir. Çünkü bu cihazlar uzun süreli radyasyona maruz kaldıklarında sistemin çökmesine yol açacak kadar ciddi sorunlar yaşanmaktadır. Uzaysal radyasyonun kaynağı, ana bileşeni daha çok yüksek enerjili fotonlardan oluşan galaktik kozmik ışınlar ve güneş rüzgârlarından gelen ağır yüklü parçacıklardır. Yüksek enerjili radyasyonların etkisinin hesaplanabilmesi için TLD'ler son zamanlarda birçok uçuşta kullanılmaya başlanmıştır (McKeever ve ark., 1995).

2.5.3. Klinik Dozimetri

Son zamanlarda küçük boyuttaki TLD materyalleri teşhis ve tedavide oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Bu TLD'ler teşhis ve/veya tedavi sırasında hastanın vücudunun üzerine yerleştirilerek maruz kaldıkları iyonize radyasyonun miktarının

hesaplanması amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Radyasyona maruz kalan TLD daha sonra hastadan alınarak ölçümleri yapılmaktadır. Bu sayede fizikçiler kritik iç organlara ulaşan gerçek doz miktarını hesaplayabilmekte ve böylece tedaviye yön verebilecek bilgiler edinmektedirler. Bu tarz bir uygulamanın diğer radyasyon dozimetre tipleri ile gerçekleştirilmesi oldukça zordur.

İnsanlar klinik radyasyona iki alanda maruz kalırlar; bunlardan birincisi teşhis amaçlı radyoloji (ör. mamografide, dişçilikte ve genel tanı amaçlı çekilen filmler sırasında X ışınına maruz kalırlar), ikincisi de radyoterapidir (değişik tiplerdeki birinci seviyeden kanser terapileri). Bu alanlarda kullanılan radyasyon tipleri X ışınları (maksimum 10 keV civarında), gama ışınları (^{137}Cs veya ^{60}Co kaynaklı), elektronlar (40 MeV'a kadar), ağır yüklü parçacıklar ve nötronlardır. Kullanılan doz oranları radyoloji için 10^{-5} ile 10^{-2} Gy arasında değişirken radyoterapide 20 Gy'e kadar radyasyon dozu kullanılmaktadır. Radyasyon terapisi için hesaplanan dozdaki hata oranı $\pm \%3$ 'ten az olmalıdır. Aksi takdirde tedavi sürecinde sorunlar yaşanabilmektedir.

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

2.5.4. Yüksek Doz

TLD'lerin kullanıldığı bir diğer ana kategori ise yüksek doz oranlarındaki radyasyon miktarının (10^2 Gy'den 10^6 Gy'e kadar) ölçülmesidir. Yüksek doz uygulamalarına nükleer santrallerin içerisinde, gıdaların sterilizasyonunda veya malzeme testlerinde rastlamamız mümkündür. Geleneksel TLD'lerin bu doz aralıklarında kullanılması bazı limitlerden dolayı zor olabilir. Bu limitler kullanılan malzemenin doygunluğa ulaştığı doz miktarı ile paraleldir. Bu alanda kullanılan TLD materyallerinin (ör. LiF:Mg,Ti) özellikle yüksek sıcaklık tepeleri kullanılmaktadır.

Çünkü bu yüksek sıcaklık tepelerinin daha yüksek dozlarda doygunluğa ulaştığı görülmektedir. Alternatif olarak bazı araştırmacılar, TLD materyalinin okuma öncesi yüksek dozlara maruz bırakılması ile (radyoaktif hasar) doz hassasiyetlerinin azalacağını ve böylece bu özelliğin kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak TLD'lerin böyle yüksek uç noktalardaki dozların bulunduğu ortamlarda kullanılabilmeleri amacıyla sahip olmaları gereken özellikler biraz karmaşık olabilmektedir (McKeever ve ark., 1995).

2.6. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması ile İlgili Yöntemler

Tuzak parametrelerinin hesaplanması ile ilgili çalışmalar son yarım yüzyıldır önemli bir çalışma alanı olmuştur. Bu çalışmalar sonucunda ışına eğrilerinin kullanılarak tuzak parametrelerinin bulunması ile ilgili birçok metot geliştirilmiştir (Randal ve ark., 1945; Chen ve ark., 1997; Chen ve ark., 1970; Chen, 1969; Grossweiner, 1953)

Bir ışına eğrisinde yer alan bir tepe diğer tepelerden belirgin bir şekilde ayrıştırılabiliyorsa Tepe Şekli Yöntemi, İzotermal Sönüm Yöntemi, Başlangıçtaki Artış Yöntemi ve Farklı Isıtma Hızları yöntemi gibi deneysel metotlar tuzak parametrelerinin hesabında kullanılabilir. Fakat birçok dozimetrik malzeme için, elde edilen TL ışına eğrileri birden çok tepenin üst üste binmesiyle oluşabilmektedir. Böyle bir durumda, tuzak parametrelerin elde edilmesinde temel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi ısısal yolla kısmi temizleme yöntemi ve ikicisi de bilgisayarla ışına eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemidir. Fakat çoğu zaman ısısal yolla kısmi temizleme yönteminin kullanımıyla diğer tepelerin katkısını yok ederek, ilgilenilen tepenin tamamen izole hale getirilmesi oldukça zordur. Bu yüzden bilgisayarlı ışına eğrisi ayrıştırma programı, TL ışına eğrilerinin kullanılarak tuzak parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan ve son zamanlarda oldukça popüler olan bir yöntem haline gelmiştir (Bunghkhardt ve ark., 1977).

Yukarıda bahsedilen ve tuzak parametrelerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan bazı metotlar ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda yer almaktadır.

2.6.1. Tepe Şekli Yöntemi

Aktivasyon enerjisi E 'nin hesaplanmasında kullanılan yöntemlerden biri Tepe Şekli Yöntemidir. Bu yöntemde E 'nin hesaplanmasında ışıma eğrisindeki tepenin şeklinden faydalanılarak elde edilen parametreler kullanılmaktadır. Şekil parametreleri olarak bilinen bu parametreler tepenin maksimum noktasının sıcaklığı olan T_m , maksimum şiddetin yarı değerindeki genişlik $w=T_2-T_1$, maksimumun yüksek sıcaklık tarafındaki yarı genişlik değeri $d=T_2-T_m$, maksimumun düşük sıcaklık tarafındaki yarı genişlik değeri $t = T_m-T_1$ ve simetri faktörü $\mu_g = d/w$ dır.

TL eğrisinin kinetik mertebe (b) değeri tepenin şeklinden tahmin edilebilir. Fakat bu yöntemde dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta aktivasyon enerjisi hesaplanacak olan tepenin üst üste binmiş tepelerden oluşmamasının gerekmesidir. Başka bir deyişle bu yöntem sadece tek bir tepe için kullanılabilir. Chen (1969) çalışmasında, simetri faktörü μ_g 'nin aktivasyon enerjisi E ve frekans faktörü s 'nin değişimine duyarlı olmadığını fakat kinetik mertebeye bağlı olarak değiştiğini bulmuştur. Örneğin lineer olarak ısıtılması koşusuyla μ_g 'nin değerinin $b=1$ için 0.42'den $b=2$ için 0.52'ye kadar değiştiği gösterilmiştir.

Tepe Şekli Yöntemi ilk olarak Grossweiner (1953) tarafından geliştirilmiştir. Ardından Chen (1969) E değerini hesaplayabilmek amacıyla Halperin ve Braner'in (1960) denklemini geliştirmiştir;

$$\begin{aligned}
 E_t &= [1.51 + 3(m_g - 0.42)] \frac{kT_m^2}{t} - [1.58 + 4.2(m_g - 0.42)] 2kT_m \\
 E_d &= [0.976 + 7.3(m_g - 0.42)] \frac{kT_m^2}{d} \\
 E_w &= [2.52 + 10.2(m_g - 0.42)] \frac{kT_m^2}{w} - 2kT_m
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Burada E_t , E_d ve E_w sırasıyla t , d ve w değerlerinin kullanılmasıyla elde edilen aktivasyon enerjileridir. Bir tepenin ortalama enerjisi bu E_t , E_d ve E_w değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Eğer Tepe Şekli Yöntemiyle herhangi bir

tepenin aktivasyon enerjisinin ve kinetik mertebenin değeri hesaplanırsa frekans faktörü s 'nin değeri hesaplanabilir. Bu amaçla birinci dereceden kinetik için denklem (2.7) ve genel derece kinetik için denklem (2.16) kullanılarak aşağıdaki eşitlik bulunabilir.

$$s = \frac{bE}{kT_m^2} \left[\exp\left(-\frac{E}{kT_m}\right) \left(1 + (b-1) \frac{2kT_m}{E}\right) \right]^{b-1} \quad (2.18)$$

Burada Tepe Şekli Yöntemi ile herhangi bir tepe için bulunan E ve b değerleri yerlerine konarak frekans faktörü rahatlıkla hesaplanabilir.

2.6.2. İzotermal Sönüm Yöntemi

İzotermal Sönüm Yöntemi tuzak parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan farklı bir yöntemdir. Bu yöntemde TL okuması sırasında belli bir noktada sıcaklık sabit tutulur ve ışık yayılımı zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Genel olarak izotermal sönüm yönteminde aşağıdaki 1. dereceden denklem sabit T sıcaklığı için çözümlenebilir;

$$I(t) = -c \frac{dn}{dt} = c \frac{n_0}{t} \exp\left(-\frac{t}{t}\right)$$

Burada n_0 n 'nin başlangıçtaki değeri ve $t = s^{-1} \exp\left(\frac{E}{kT}\right)$ 'dir. Yukarıdaki denklem sabit bir T sıcaklığında ışık yayılımının t zamanına bağlı olarak üssel olarak azaldığını göstermektedir. $\ln(I)$ 'nin t 'ye göre grafiği çizildiğinde eğimi $m = s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$ olan bir eğri elde edilir. Buradan E ve s 'yi hesaplayabilmek için iki farklı sabit T_1 ve T_2 sıcaklığı için deneysel sonuçlar kaydedilmeli ve böylece iki farklı m_1 ve m_2 eğimi elde edilmelidir. Bu yolla elde edilen veriler ve aşağıdaki denklem kullanılarak aktivasyon enerjisi hesaplanabilmektedir:

$$E = \frac{k}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \ln\left(\frac{m_1}{m_2}\right) \quad (2.19)$$

İzotermal Sönüm Yöntemi daha yüksek kinetik mertebeye sahip eğriler için kullanışlı değildir. Kathuria ve Sunta (1979) tarafından kinetik mertebe değeri b 'nin termolüminesansın izotermal sönümünden faydalanılarak hesaplanabileceği bir metod önerilmiştir. Bu metoda göre eğer sönüm eğrisi örneğin sabit sıcaklıkta tutulmasıyla elde edilmişse, seçilen uygun b değerleri için $I^{\left(\frac{1}{b}-1\right)}$ 'in t 'ye göre grafiği düz bir çizgi verecektir. Böylece düz bir çizgi elde edene kadar farklı kinetik mertebe değerleri denendiğinde tepenin sahip olduğu b değeri bulunmuş olur.

2.6.3. CGCD Yöntemi

Işıma Eğrisi Ayırıştırma Yöntemi TL ışıma eğrilerinin tuzak parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Bu yöntemin diğer deneysel metotlara göre avantajı üst üste gelmiş karmaşık tepelerin ısısal işleme ihtiyacı duymadan ayrıştırılabilmesidir.

Bu çalışmada ametist kristal örneklerinde elde edilen ışıma eğrilerinin analizinde iki farklı CGCD programı kullanılmıştır. Birincisi Tamtam adı verilen ve Hollanda'da bulunan Delft Reaktör Enstitüsü'nde geliştirilen bir programdır (Bos ve ark, 1993). İkinci program ise Glowfit adı verilen ve Puchalska ve Bilski (2006) tarafından geliştirilen ve 1. dereceden tepelerin ayrıştırılmasında oldukça başarılı bir programdır. Her iki program da bir ışıma eğrisini dokuza kadar alt tepelerine aynı anda başarılı bir şekilde ayırabilmektedir. Tamtam programı ile Glowfit programının arasındaki temel fark, Tamtam programı ile hem birinci dereceden hem de genel dereceden kinetiğe sahip TL eğrileri ayrıştırılabilmesi mümkünken GlowFit programı ise sadece 1. dereceden kinetiğe sahip TL eğrilerinin ayrıştırılmasında kullanılabilir. Fakat Tamtam programı MSDOS ortamında çalışan bir programdır ve eğrilerin ayrıştırılması için daha çok çaba ve zaman gerekmektedir. GlowFit programı ise Microsoft Windows tabanlı bir program olup arayüz

programına sahip olup bu sayede bize rahat bir kullanım sunmakta ve böylece eğrilerin ayrıştırılması oldukça hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

CGCD yönteminde genel olarak iki farklı model kullanılabilir. Birinci modelde ışınım eğrisi aşağıdaki denklem kullanılarak birinci derece kinetiğe sahip bir eğriye yaklaştırılmaktadır. Bu denklem:

$$I(T) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[-\frac{s}{b} \frac{kT^2}{E} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) * (0.9920 - 1.620 \frac{kT}{E})\right] \quad (2.20)$$

şeklinde verilmektedir. Burada n_0 (m^{-3}) $t=0$ anındaki tuzaklanmış elektron yoğunluğu, s (s^{-1}) birinci dereceden kinetik için frekans faktörü, E (eV) aktivasyon enerjisi, T (K) sıcaklık, k (eV/K) Boltzmann sabiti ve b ($^{\circ}C/s$) ısıtma hızıdır. İkinci modelde ise ışınım eğrisi, genel derece kinetik mertebesine sahip bir eğriye aşağıdaki denklemin kullanımı ile yaklaştırılır;

$$I(T) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \left(-\frac{(b-1)s}{b} \frac{kT^2}{E} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) * (0.9920 - 1.620 \frac{kT}{E})\right)^{\frac{b}{b-1}}\right] \quad (2.21)$$

Burada n_0 (m^{-3}) $t=0$ anındaki tuzaklanmış elektron yoğunluğu, s (s^{-1}) ön-üssel faktör, E (eV) aktivasyon enerjisi, T (K) sıcaklık, k (eV/K) Boltzmann sabiti, b ($^{\circ}C/s$) ısıtma hızı ve b kinetik mertebedir.

Görülen tepelerin toplamı ve ardalın sinyallerinin katkısı aşağıda verilen bileşik ışınım eğrisi denkleminde indirgenebilir;

$$I(T) = \sum_{i=1}^n I_i(T) + a + b \exp(T) \quad (2.22)$$

burada $I(T)$ fit edilmiş toplam ışınım eğrisi, a örneğin elektronik gürültü katkısını ve fon sinyalinin katkısını verir.

Yukarıdaki denklem (2.22) ile başlayıp, en küçük kare yaklaşım prosedürü ve ayrıca değer katsayısı (FOM) kullanılarak fit sonuçlarının iyi olup olmadığı kontrol edilmektedir. Başka bir deyişle,

$$FOM = \sum_{i=1}^n \frac{|N_i(T) - I(T)|}{A} = \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta N_i|}{A} \quad (2.23)$$

burada $N_i(T)$ i. deneysel veri noktası (toplam n=350 veri noktası), $I(T)$ i. fit edilmiş nokta, ve A da fit edilmiş ışımaya eğrisinin altında kalan toplam alandır.

Birçok deneme sonucunda (Mahesh ve ark., 1989; Hsu ve ark., 1986) görülmüştür ki, eğer FOM değeri %0.0 ile %2.5 arasında ise eğri iyi fit edilmiştir, %2.5 ile %3.5 arasında ise fit doğrudur ve >%3.5 ise fit kötüdür denilebilir.

Deneysel olarak elde edilen TL ışımaya eğrisi ile programın yaklaşım yöntemi sonucu elde ettiği eğrinin birbiri ile uyumluluğunu grafiksel olarak gösterebilmek için program ayrıca şu fonksiyonu çizmektedir,

$$X(T) = \frac{N_i(T) - I_i(T)}{\sqrt{I_i(T)}} \quad (2.24)$$

bu denklem beklenen değeri 0 olan normal bir değişkendir ve $\delta^2(T)=I_i(T)$ olduğunda $\delta=1$ 'dir.

2.6.4. Başlangıçtaki Artış Yöntemi

Başlangıçtaki Artış Yöntemi aktivasyon enerjisinin hesaplanmasında oldukça yaygın olarak kullanılan basit bir yöntemdir. Burada aktivasyon enerjisi E tek bir TL tepesi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu metottaki temel dayanak, tepenin düşük sıcaklık tarafındaki bitiş noktasında tuzak, ışımaya merkezi ve birbirini etkileyen diğer bütün enerji seviyelerindeki değerlerin yaklaşık olarak sabit kabul edilebileceği varsayımıdır. Bundan dolayı bu bölgede, sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edilen şiddetin grafiği üssel artışa oldukça benzemektedir. Böylece TL eğrisi

$$I(T) = C \exp(-E/kT) \quad (2.25)$$

şeklinde bir denklem ile uyumludur. Burada C diğer tüm parametrelere ve seviyelerin doluluğuna bağlı bir sabit, E aktivasyon enerjisi (eV), k Boltzmann sabiti (eV/K) ve T sıcaklıktır (K).

$\ln(I)$ 'nın $1/T$ 'ye göre grafiği çizilecek olursa elde edilecek olan lineer eğrinin eğimi $-E/k$ 'ya eşit olacaktır. Böylece aktivasyon enerjisi E 'yi frekans faktörü s ile ilgili herhangi bir bilgiye ihtiyaç duymaksızın aşağıdaki şekilde elde etmek mümkün olacaktır;

$$E = -kd(\ln(I))/d(1/T) \quad (2.26)$$

E değeri hesaplandıktan sonra frekans faktörü (s) aşağıdaki denklemden elde edilebilir;

$$\frac{bE}{kT_m} = s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.27)$$

burada T_m maksimum şiddete karşılık gelen sıcaklık değeridir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta bu yöntemin sadece diğer tepelerden belirgin bir şekilde ayrılmış ve iyi bir şekilde oluşmuş tek bir tepe için kullanılabilirdir.

2.6.5. Farklı Isıtma Hızları Yöntemi

Termolüminesansta (TL) ışımaya eğrisi bazı deneysel parametrelerden etkilenmektedir. Işıma eğrisinin şeklini değiştiren ısıtma hızı bu deneysel değişkenler arasında oldukça önemli bir yere sahiptir (Ogundare ve ark., 2005). TL dozimetresinde soğurulan doz ve buna bağlı olarak elde edilen TL şiddeti ısıtma hızının değişiminden etkilenmektedir (Betts ve ark., 1993; Taylor ve ark., 1982). Bilim adamları tarafından birçok araştırma yapılarak farklı ısıtma hızlarında TL ışımaya eğrisindeki değişikliklerin sebepleri araştırılmıştır. Taylor ve Lilley (1982)

farklı ısıtma hızlarına bağlı olarak meydana gelen ışıma şiddetindeki değişikliklerin tuzak parametreleri arasında yer alan E (tuzak derinliği) ve s 'nin (frekans faktörü) hesaplanmasında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan birçok araştırmanın sonucunda ısıtma hızının artmasıyla TL şiddetinin azaldığı gözlenmiştir (Spooner ve ark., 2002). Bu olgu, sıcaklığın artışıyla etkinliği artan termal sönüm ile bağlantılı olarak açıklanmıştır. Lüminesansın termal sönümü olgusu lüminesans etkinliğinin sıcaklığın artmasına bağlı olarak azalması olayıdır.

Termal sönümü açıklayabilmek amacıyla, aşağıdaki lüminesans verimliliği denklemi kullanılabilir (Spooner ve ark., 2002).

$$h = [1 + C \exp(-W / kT)]^{-1} \quad (2.28)$$

burada W termal sönüme bağlı olarak lüminesans verimliliğinin aktivasyon enerjisi, k Boltzmann sabiti, $T(K)$ sıcaklık ve C bir sabittir. Ayrıca toplam TL şiddetinin Napierian logaritması şu şekilde yazılabilir;

$$\ln(\text{toplaml TL}) = (W / k)T_m^{-1} + F \quad (2.29)$$

burada F ısıtma hızından bağımsız bir sabit ve T_m maksimum tepe sıcaklığıdır. Böylece $\ln(\text{toplaml TL})$ 'in $1/T_m$ 'ye karşı grafiği çizilecek olursa W/k değeri eğimden bulunabilir. TL tepesinin sıcaklığı ısıtma hızının artmasıyla daha yüksek sıcaklıklara doğru kaymaktadır. Böylece düşük ısıtma hızlarında TL tepesi termal sönümün minimum olduğu bölgede gözlenirken, yüksek ısıtma hızlarında tepe termal sönümün güçlü olduğu noktada gözlenebilir (Nanjundaswamy ve ark., 2002). Barkani-Krachi ve ark. (2002) ısıtma hızının TL cevabına etkisi üzerine çalışmalar yapmışlar ve ısıtma hızının artmasıyla TL cevabının azaldığını göstermişlerdir. Ayrıca TL duyarlılığındaki bu azalmanın Mott-Seitz teorisinin kullanılmasıyla iyi bir şekilde açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Hornyak ve arkadaşları (1992) bu konu üzerinde incelemeler yapmış ve en düşük ısıtma hızından en yüksek ısıtma hızına doğru gidildikçe tepe sıcaklığının yaklaşık 42 °C kaydığını göstermiştir. Bunun yanı sıra

ısıtma hızının artmasıyla TL şiddetinin kademeli olarak azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu azalma 0.5 °C/s ile 4 °C/s arasındaki ısıtma hızları için büyük olasılıkla termal sönüme bağlı olarak %8 civarındadır.

Deneyle sırasında ölçülen sıcaklık ile örnek sıcaklığı, örnek ile ısıtıcı arasındaki temasa göre değişen termal gecikmeye bağlı olarak, birbirinden farklı olabilmektedir. Bu yüzden örnekte termal gecikmeyle beraber sıcaklıkta lineer bir artış meydana gelir ve böylece ışıma eğrisinden okunan T_m değeri gerçek değerinden sistematik olarak düşük olur. Sonuçta örnek kalınlığının, özellikle yüksek ısıtma hızlarında, sıcaklığın kademeli olarak artışı ve termal gecikme üzerinde önemli etkileri vardır (Kıyak ve ark., 2002).

Aktivasyon enerjisinin hesaplanmasında kullanılan bir diğer önemli yöntemlerden biri Farklı Isıtma Hızları Yöntemidir. Eğer bir örnek β_1 ve β_2 gibi iki farklı ısıtma hızları ile ısıtılırsa tepelerin maksimum sıcaklıkları değişecektir. Aşağıdaki denklem (2.36) ısıtma hızı β , aktivasyon enerjisi E , frekans faktörü s ve maksimum şiddete karşılık gelen sıcaklık T_m arasındaki bağıntıyı vermektedir.

$$\frac{bE}{kT_m} = s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.30)$$

Burada k Boltzmann sabitidir. Bu denklem her ısıtma hızı için yazılabilir. β_1 (ve T_{m1}) değerleri yazılarak elde edilen denklem ile β_2 (ve T_{m2}) yazılarak elde edilen denklemin oranı alınıp yeniden düzenlendiğinde, E 'nin hesaplanabilmesi için aşağıdaki basitleştirilmiş eşitlik elde edilebilir.

$$E = k \frac{T_{m1}T_{m2}}{T_{m1} - T_{m2}} \ln\left[\left(\frac{b_1}{b_2}\right)\left(\frac{T_{m2}}{T_{m1}}\right)^2\right] \quad (2.31)$$

Burada T_{m1} ve T_{m2} farklı iki ısıtma hızı kullanılarak (β_1 ve β_2) elde edilen tepe sıcaklıklarıdır. Farklı Isıtma Hızları Yönteminin en önemli avantajı sadece tepe maksimum noktasındaki verilerin (T_m , I_m) alınmasının yeterli olmasıdır. Çünkü bu değerler geniş bir tepenin daha küçük tepelerle çevirili olması durumunda bile ışıma

eğrisinden rahatlıkla ve doğru bir şekilde alınabilirler. Ayrıca bu yöntemin bir diğer avantajı da E 'nin hesaplanması sırasında, Başlangıçtaki Artış Yönteminde etki gösteren termal sönüm sorunu gibi bir sorundan etkilenmemesidir.

Birinci dereceden kinetik için farklı ısıtma hızları kullanıldığında aşağıdaki denklem elde edilmektedir:

$$\ln\left(\frac{T_m^2}{b}\right) = \left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{1}{T_m}\right) + \text{sabit} \quad (2.32)$$

Eğer $\ln((T_m^2/\beta))$ 'nin $(1/T_m)$ 'ye karşı grafiği çizilirse eğimi E/k olan bir düz eğri elde etmemiz gerekir ve bu eğim kullanılarak E değeri rahatlıkla hesaplanabilir. Ayrıca $1/T_m=0$ noktasındaki değer kullanılacak olursa $\ln(sk/E)$ denklemi için bir değer bulunmuş olur ve eğimden elde edilen E/k değeri burada yerine konacak olursa s frekans faktörü de hesaplanmış olur.

2.7. Doz Cevabı

İyi bir dozimetrik malzemenin farklı doz miktarlarına karşı aynı hassasiyetle cevap vermesi beklenir. Doz cevabı $F(D)$, TL şiddetinin soğurulan doza bağımlılığını fonksiyonel olarak ifade eden bir terimdir. İdeal dozimetrik bir malzeme geniş bir doz aralığında lineer bir doz cevabına sahip olmalıdır. Buna karşın birçok dozimetre materyalinde değişik etkilerden dolayı lineer olmayan eğriler gözlenir. Normal şartlarda bir dozimetrik malzemenin elde edilen doz cevap eğrisinde dozun artması ile beraber lineer, supralineer ve sublineer (doygunluk) bölgelere rastlanır. Normalize edilmiş doz cevap fonksiyonu (veya supralineerlik indeksi) $f(D)$ aşağıdaki denklem ile verilebilir:

$$f(D) = \frac{(F(D)/D)}{(F(D_1)/D_1)} \quad (2.33)$$

burada $F(D)$ herhangi bir D dozuna karşılık gelen doz cevabıdır ve $F(D_1)$ ise daha düşük bir D_1 doz değerine karşılık gelen doz cevabıdır. Böylece ideal bir dozimetre

için geniş bir bölgede (ör. $D=0$ Gy'den birkaç MGy'e kadar) $f(D)=1$ olması beklenir. Fakat birçok TLD materyalinde $f(D)=1$ şartı sadece dar bir doz aralığında (birkaç Gy'e kadar) sağlanmaktadır. Burada genellikle gözlenen, supralineerlik yani $f(D)>1$ olduğu durumdur. Sublineerlik ise daha çok doyumluğa ulaşılrken gözlenmekte olup $f(D)<1$ olarak tanımlanabilir (McKeever ve ark., 1995).

Bir dozimetrik malzemenin lineer doz cevap eğrisine sahip olduğu doz aralığının belirlenmesi, o malzemenin hangi alanlarda kullanılabileceğinin belirlenmesine yardımcı olur. Örneğin 10 Gy doz verildikten sonra doyuma ulaşan bir malzeme yüksek dozlar için kullanılamaz. Aynı şekilde düşük dozlar için lineer olmayan bir doz cevap eğrisine sahip bir malzemenin kişisel dozimetre malzemesi olarak kullanımı mümkün değildir.

2.8. Enerji Cevabı

Enerji cevabı soğurulan dozun enerjisinin değişimine bağlı olarak, aynı doz oranı için farklı TL şiddeti elde edilmesi olayıdır. Dolayısıyla birçok dozimetrik malzeme için, aynı doz miktarı fakat farklı radyasyon kaynakları ile örneğin ışınlanması sonucu elde edilecek olan TL ışınma şiddeti farklı olabilmektedir. Söz gelimi beta ve gama kaynakları kullanılarak aynı miktarda doz verilmiş örnekten farklı tepe yüksekliklerine sahip TL ışınma eğrileri elde edilebilir. Çünkü radyasyon kaynağından ileri gelen enerjinin soğurulması ve bunun sonucunda elde edilen TL şiddeti ilgili süreçler enerji bağımlıdır. Birçok materyal için 15 keV'un altında fotoelektrik olay baskındır. Daha yüksek enerjilerde ise (10 MeV'a kadar) düşük Z_{etkin} (etkin atom numarası) değerine sahip materyaller için Compton saçılması baskındır. Buna karşın yüksek Z_{etkin} değere sahip materyallerde fotoelektrik olay 100 keV'a kadar baskın olmaya devam etmektedir (McKeever ve ark., 1995).

Enerji cevabı, sabit bir doz için ölçülen TL şiddetinin soğurulan enerjinin fonksiyonu cinsinden değişmesi olarak tanımlanabilir. Bu değişim materyalin soğurma katsayısından kaynaklanmaktadır. Eğer foton ile ışınlama söz konusu ise soğurma katsayısı, materyalin kütle enerji soğurma katsayısı olarak adlandırılır ve kısaca μ_{en}/ρ olarak gösterilir. Böylece foton enerji cevabı $S_E(E)$;

$$S_E(E) = \frac{(m_{en}/r)_m}{(m_{en}/r)_{ref}} \quad (2.34)$$

olarak tanımlanır. Denklemden yer alan alt indisler TLD materyalini ve bir referans materyalini (normalde hava) temsil etmektedir. Bileşikler için soğurma katsayısı ise;

$$(m_{en}/r) = \sum_i (m_{en}/r)_i W_i \quad (2.35)$$

olarak gösterilebilir. Burada W_i i. elementin ağırlıkça kesridir.

Fotonların sahip olduğu enerji çift oluşumu, Compton saçılması veya fotoelektrik olayı süreçleri ile sıfırlanmaktadır. Yukarıda da bahsedildiği gibi bu süreçlerden hangisinin baskın olacağı sadece fotonun enerjisine değil aynı zamanda materyalin etkin atom numarasına da (Z_{etkin}) bağlıdır. Dolayısıyla kütle soğurma katsayısının fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu süreçlerine bağlı olan bileşenleri bulunmaktadır. Bu bileşenlerden ilki olan fotoelektrik bileşeni yaklaşık olarak Z_{etkin}^3 ile değişmektedir. Compton bileşeni ise Z_{etkin}/M (M burada TLD materyalinin molar kütesidir) ile doğru orantılı olarak değişmekte iken çift oluşumu bileşeni de Z_{etkin}^2 ile değişmektedir. Fotoelektrik etkileşimleri düşük enerjilerde baskınken, Compton olayı enerjinin artmasıyla beraber baskın hale gelir. Çift oluşumu ise sadece yüksek enerjilerde önemlidir ($E > \text{birkaç MeV}$). Bu süreçlerin kesin olarak hangi enerji değerlerinde baskın olacağı Z_{etkin} değeri tarafından belirlenmektedir. Düşük etkin atom numarasına sahip materyaller, ~25 keV'tan 10 MeV'a kadar enerjilere sahip fotonlarla ışınlandıklarında Compton saçılması enerjinin sıfırlanma mekanizmasındaki en baskın süreç olmaktadır (McKeever ve ark., 1995).

Foton enerji cevabının pratikte kullanılabilmesi için Bağlı Enerji Cevabı'nın (RER) tanımlanması gerekir. Bu Bağlı Enerji Cevabı bir ^{60}Co kaynağından yayılan 1.25 MeV'luk enerjiye sahip fotonlar temel alınarak tanımlanmaktadır;

$$(RER)_E = \frac{S_E(E)}{S_E(1.25MeV^{60}Co)} \quad (2.36)$$

LiF ve CaF₂ ve Z_{etkin}=55 olan bir materyal için teorik olarak elde edilmiş (RER)_E'nin E ye karşı çizilmiş bir grafiği Şekil 2.14'te verilmektedir. Normal şartlarda tercih edilen, enerji cevabının bu grafikte düz bir çizgi şeklinde gözlenmesidir. Bu sebeple düşük Z_{etkin} değerine sahip materyallerin tercih edilmeleri gerektiği açıkça görülmektedir. Bilindiği gibi TLD uygulamalarının en önemli amaçlarından biri insan dokusu tarafından soğurulan dozun hesaplanmasıdır. Bu sebeple TLD materyalinin doku eşdeğeri (başka bir deyişle Z_{etkin}=7.4) olması arzulanan bir durumdur. Örneğin lityum borat bu materyallerden biridir. LiF ise Z_{etkin}=8.14 değeri ile neredeyse doku eşdeğeridir. Herhangi bir materyalin etkin atom numarasını (Z_{eff}) hesaplayabilmek için aşağıdaki denklem kullanılabilir;

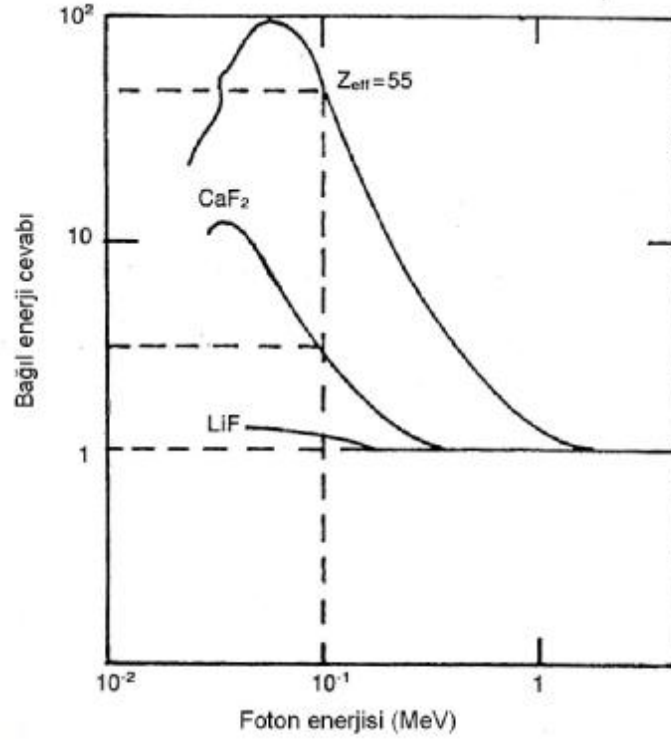
$$Z_{etkin} = \sqrt[2.94]{f_1(Z_1)^{2.94} + f_2(Z_2)^{2.94} + f_3(Z_3)^{2.94} + \dots} \quad (2.37)$$

burada f_n her elementin sahip olduğu elektron sayısının toplam elektron sayısına bölünmesiyle elde edilen kesir ve Z_n ise her bir elementin atom numarasıdır. Böylece herhangi bir dozimetrik materyalin etkin atom numarası bu formül kullanılarak hesaplanabilir.

TLD materyalinin β parçacıkları için göstermiş oldukları enerji cevabı daha karmaşıktır. Yüklü parçacıklar enerjilerini, birçok çarpışma ve ışımayla sonuçlanan etkileşimler sonucunda, küçük basamaklarla kaybederler. Buradaki en önemli parametre durdurma gücüdür, yani $dE/dx|_{E,Z_{etkin}}$ (x, materyal içerisindeki mesafedir). Görüldüğü gibi fotonlar için olduğu gibi beta parçacıklarının etkileşiminde de materyalin etkin atom numarası önemli bir rol oynamaktadır.

Bir materyal için, durdurma gücü enerji bağımlı olduğundan, elektronun materyal içerisine nüfuz etme menzilineki değişim β parçacığının enerjisine bağlıdır. Dolayısıyla TLD materyalinin kalınlığı β parçacığının menziline küçük ise soğurulan doz ve buna bağlı olarak elde edilen TL sinyali yine enerjiye bağlı olarak değişecektir. Genel olarak β parçacığının enerjisinin artmasıyla TL cevabında

artış gözlenmektedir. β parçacığının enerjisi materyalin kalınlığını aşmasına yetecek seviyeye geldiğinde TL cevabındaki artış sabitlenmektedir. Bu sebeple β parçacığı TLD'leri, $5-30 \text{ mg.cm}^{-2}$ kalınlığa sahip olacak şekilde ince materyaller kullanılarak üretilmektedir (McKeever ve ark., 1995).



Şekil 2.14. LiF ($Z_{\text{etkin}}=8.14$) ve CaF_2 ($Z_{\text{etkin}}=16.3$) ve $Z_{\text{etkin}}=55$ olan bir materyal için teorik olarak elde edilmiş bağıl foton enerji cevabı (referans materyali olarak hava kullanılmıştır) (McKeever ve ark., 1995)

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1. Ametistin Yapısı ile İlgili Çalışmalar

Cohen (1956) farklı jeolojik bölgelerden derlediği 6 ametist örneğinin 2000 ile 1400 Å olan dalga aralıklarında soğurma bantlarına rastladığını ancak tüm örneklerde 3400, 5400, ve 9500 Å civarında maksimum seviyeye ulaşan soğurma bantlarının element kirliliğinden kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Bu kirliliği ametistin renklenme nedeni olarak belirtmiştir. Ametistin renk merkezleri olarak kabul ettiği 3600 ve 5400 Å bantları oranın X ışınları uygulandığında belli bir süre artış gösterdiği daha sonra ise ilk halinden de düşük değerler sergilediği belirtilerek oranların aynı/yakın değerler gösterdiği bölgelerde benzer kirlilikler olduğuna işaret etmiştir.

Cohen ve ark., 1958 dört sentetik ve yedi doğal kuvars örneğinin kafes değişkelerini ölçmüşler ve a_0 ekseninin kirlilik içermeye çok fazla duyarlı olduğunu görmüşlerdir. Barry ve Moore (1964), ametistteki renk merkezlerinin α -kuvars yapısındaki Si^{+4} ün yerini alan Fe^{+3} tarafından ortaya çıktığını ve merkezlerin habercisi olan iyonize radyasyonların etkisi tarafından oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu Fe^{+3} merkezlerin, ametistin elektron paramanyetik yansımalarında baskın önemli bir rol almalarını sağladığını bildirerek, üç eşit Si^{+4} yerini düzensiz olarak Fe^{+3} tarafından işgal edildiğini ve bu durumda ametistin biaxial optik özelliğini açıkladığını belirtmişlerdir.

Lehman ve Moore (1966) doğal ve sentetik olan sarı ve mor renkli kuvarslarda yapılan EPR çalışmalarında biri Si^{+4} 'ün yerini alan diğeri ise atomlar arası boşluklara yerleşen Fe^{+3} merkezi ayırt etmiştir. Amertistin renginin atomlar arası boşluğa yerleşen demirden kaynaklı olduğunu belirtmiştir.

Schlesinger ve Cohen (1966), ametistlerde, Fe^{+3} atomlar arasındaki boşluktaki alkali iyonundan kaynaklanana 2250 Å bandı, $2 Li^+ + Fe^{+3}$ ve elektron kapanımından kaynaklı 3430 Å bandı, $2 Na^+ + Fe^{+3}$ ve elektron kapanımından kaynaklı 3570 Å bandı ve Fe^{+3} ve elektronik boşlukla ilişkili 5450 Å bandı olmak üzere dört bant tespit etmiştir.

Lehmann (1971), ametistteki mor renginin, Fe^{+4} ün yapıda Si^{+4} yerine geçtiğini ve Fe^{+2} de atomlar arasındaki boşluklarda olduğu zaman, gerçekleşebileceğini belirtmiştir.

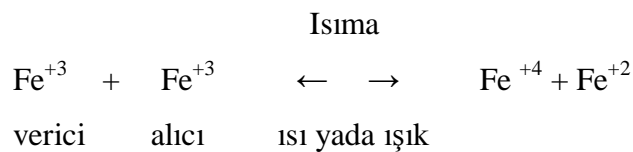
Lehman ve Bambauer (1973) kuvarsdaki mor renk için Si^{+4} atomunun yerini alan Fe^{+3} iyonu ve atomlar arası boşluğu dolduran Fe^{+2} iyonlarından oluşan bir model üzerinde çalışmıştır.

Cohen ve Hassan (1974), Si^{+4} iyonunun yerini alan Fe^{+4} iyonu ile atomlar arası boşlukta bulunan, Fe^{+3} iyonunun iyonize radyasyon uygulamasından sonra mor rengin oluşumu ile ilgili olduğunu kanıtlamıştır.

Hassan ve Cohen (1974), ametistin biaxial ve paleokrizma özelliklerinin, güçlü anizotropik renk merkezleri varlığı ve demir ile ortorombik ve düşük simetrisi ile ilgili olduğunu açıklamışlardır. Ametist renginin beyazlaşmasını sağlayan ısı ve optik uygulamaların her ikisinin de de biaxialliğin kaybolduğunu ametist kuvarsta görülen bu biaxial ve paleokrizma anomalilerinin renk merkezlerinin bir özelliği olduğu ve α -kuvars yapısının ait bir özellik olmadığını belirtmişlerdir.

Cohen ve Hassan (1974), Fe^{+2} ve Fe^{+3} iyonlarının her ikisinin de depolandığı sentetik α -kuvarslarda ve doğal ametistte çeşitli optik absorpsiyon bantlarının oluşması ve kaldırılmasındaki rollerini gözden geçirmişlerdir. Fe^{+3} iyonu içeren sentetik α -kuvarsın pozitif rhombohedral büyüme alanlarında, iyonize radyasyon ile ametistin renginin oluşumu üzerine olan katkısını kanıtlamışlardır.

Lehman (1975), sentetik kuvars ve ametistte demirin renk merkezleri üzerine bir tartışma yaparak, Barry (1965) e göre EPR çalışmaları ile açıkça yedek Fe^{+2} 'nin ametistin renk merkezinin başlangıcı olduğunu ve ayrıca ara Fe^{+3} 'in de katkıda bulunduğunu belirtmektedir. Ayrıca tek başına ara iyonların değil yedek Fe^{+3} 'ün de etken olduğunu belirten Lehman, ışık yada ısı ile Fe^{+3} birinin verici diğerinin de transfer edilen elektron alıcısı olarak davrandığından söz etmektedir.



Cohen (1975), Lehman (1975) in makalesine yanıt olarak Fe^{+2} nin bir ara değer olmasının ve 500 °C'nin üzerinde ısıtma da karasız kalmasının mümkün olamayacağını, eğer bu mümkün olsaydı, kation boşluklarının kuvars içerisinde nispeten daha düşük sıcaklıklarda oluşacağından söz etmektedir. Ayrıca Lehman'ın Fe_2O_3 'ün kahverengi partiküllerinin ametist içerisinde ara iyonlardan değil Fe^{+3} , den oluştuğu iddiasını ispatlanmadığını belirtmektedir.

Leoffler ve Burns (1976), ametistteki mor rengin Si^{+4} 'ün yerini alan Fe^{+3} , den kaynaklandığı modeli üzerinde durmuşlardır.

Cox, 1977' ye göre de, ametistteki saflığı bozan madde Fe'dir. Kuvars kristali içerisinde bulunan Fe^{+3} , kristalin radyasyona maruz kalması sonucu Fe^{+4} 'e dönüşür. Bu Fe için pek rastlanmayan bir denge durumudur. Doğal ametistlerde bu oksidasyon yine doğal radyasyona maruz kalma sonucunda oluşur.

Nassan K. (1981), "Doğal, ısıtılmış ve sentetik ametist, strin kuvars" adlı çalışmalarında ametist ve strindeki renk merkezlerinden, sentetik ametist ve strin kuvars büyümelerinden, doğal ametist strin kuvars özelliklerinden ve iyileştirilmiş örneklerden söz etmektedir.

Birsoy (1983), çalışmasına göre ametistlerde gözlenen 5500–5900 Å⁰ soğurulma bandının renk merkezi konsantrasyonu Fe, Mn ve Sb konsantrasyonları ile artmaktadır. Fe^{+3} , Al^{+3} 'ün yerini alabilmekte, buna karşın Fe^{+3} ise atomlar arasındaki boşluklarda yer almaktadır. Mn^{+2} , de atomlar arası boşlukta bulunmaktadır. Yük ve iyon yarıçapı bakımından Sb^{+5} hem Si^{+4} 'ün yerini alabilir hem de atomlar arası boşluğa geçebilir. Mn^{+3} ve Mn^{+2} , nin de, Fe iyonundan daha etkin olarak bu renge katkıda bulunmaktadır.

Fournier (1985a)'a göre kuvars, hidrotermal sistemde silikanın en kararlı biçimidir. Başlangıç sıcaklığı 200 – 340°C arasındaki bir hidrotermal çözeltinin yavaş soğumasıyla kuvars kristalleri ortaya çıkar. Öz şekilli veya düzgün biçimli kristaller nispeten yavaş değişen basınç ve sıcaklık koşullarında oluşur. Kuvarslar silika bakımından az doygun çözeltilerde gelişirler. Buna karşın amorf silika birikimi için hidrotermal çözeltinin silika bakımından aşırı doygun olması gerekir. Kalsedon ise ya hidrotermal çözeltiden çökeltme yoluyla ya da amorf silikanın kristalin malzemeye dönüşmesiyle oluşur ve bu oluşum 180 °C'in altında meydana gelir.

Ametist ise hidrotermal (sıcak suların) nispeten yüzeye yakın ortamlarda, oksijence zengin soğuk meteorik sularla karşılaşması sonucu oluşurlar. Bu oksitleyici koşullar altında ametiste mor rengini veren Fe^{+3} bulunmaktadır.

Cohen (1985) kuvarın uç ana rhombohedral yüzeylerin büyüdüğü ara Fe^{+3} kirliliği olan bu bölgelerde, demir içeriğinin Al^{+3} kirliliği içeriğinden fazla olması durumunda dumanlı renge bürünmesinin engellendiği ancak radyasyon varlığının dumanlı renge sebep olan tuzak alanlarının merkezini oluşturduğundan fazla demire rağmen dumanlı renk alabileceğini belirtmektedir. Demirin kuvars içerisinde Fe^{+2} , Fe^{+3} , Fe^{+4} şeklinde üç farklı değerde olabileceğini ve üç farklı değerde demirin de atomlar arası boşlukta yer alabileceğini ancak Fe^{+3} 'ün Si^{+4} 'ün de yerine geçeceğinden söz eder. Yüksek değerli iyon içeren demirin oyuklarda ve badem şekilli boşluklar ya da hidrotermal damarlar gibi yüzeye yakın şartlar altında büyüyen kuvarlarda bulunma eğiliminde iken iki değerlikli demirin derinlere yerleşen pegmatitik şartlar altında üretilen kuvarlarda hakim olduğunu belirtmektedir.

Adekeye ve ark (1986)' a göre, ametist renginin, atomlar arasında yer alan demirin yanı sıra iyonlaştırıcı ışımaya ve alüminyum da kuvars içerisinde bulunması sonucu oluşur.

Birsoy R.(1987) Doğal ametist ve renksiz kuvarların soğurma spektrumlarını incelemiş ve ametist örneklerinin 5500 °A'daki soğurma bandının, ametistlerin yapısında yer alan demir, mangan ve antimuan gibi kimyasal kirliliklerden kaynaklandığını bildirmiştir.

Zhang ve ark. (1994) çalışmalarında doğal ve sentetik ametistlerin kusur yapısının incelenmesi ve konsantrasyonunun belirlenmesi amacıyla termolüminesans ve katodolüminesans tekniklerini kullanmış ve elde edilen sonuçları sentetik kuvarstan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında ametist ve kuvar örneklerinin yayılım spektrumlarını da incelenmiştir. Ametist örneklerinin 740-750 nm'de karakteristik bir spektruma sahip olduklarını ve bu spektrumun ametist örneklerinde bulunan Fe iyonu safsızlıklarından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Ayrıca sentetik ametist örneklerinin oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda 350 nm civarında merkezlenmiş bir yayılım spektrumuna sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Cortezao ve ark. (1998) yayınlarında Brezilya ametist örneklerini termal uyarılmayla depolarizasyon akımları (TSDC) yöntemiyle incelemiş ve optiksel soğurma (OA) özelliklerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda ametistin, demir safsızlığına bağlı olarak, soğurma spektrumunun görünür gölgede bulunan üç ana tepeden oluştuğunu bildirmişlerdir. Kızılötesi bölgedeki soğurma spektrumunun ise, OH⁻ iyonuna bağlı olarak, iki tepeye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca ametist örneklerinin 673 ile 873 K'e kadar ısıtılması sonrasında renginin sarımsı bir hal aldığı fark etmişlerdir. Örneklerin ısıtılmasının sonucunda ultraviyole bölgede soğurma spektrumunun arttığını yayınlamışlardır.

Balitsky ve ark.(2000), ametist renginin dört değerlikli silikonla üç değerlikli demirin yer değiştirdiği kuvars yapısı içerisindeki ışınım merkezlerinin oluşumuyla ortaya çıktığını, pozitif şarjın eksikliği, kuvars içine alkali metal iyonlarının (Li⁺, Na⁺) ya da protonların (H⁺) sunulması ile dengelenmekte olduğunu, ametist rengin gelişiminin iyonlaştırıcı ışımaya ihtiyaç duyduğunu belirtmiştir.

Dedushenko ve ark. (2004) çalışmalarında renksiz kuvars örneklerini NH₄F solüsyonu içerisinde hidrotermal sentez yoluyla ⁵⁷Fe⁺³ ile katkılandırmışlardır. Sonuçta kristalin gama ışınlarıyla ışınlandığında mor renkli ametist şekline dönüştüğünü bildirmişlerdir. Kristalin rengindeki bu değişimi, Fe⁺³ iyonlarının Fe⁺⁴ iyonlarına dönüşümüyle açıklamışlardır.

Hatipoğlu (2004a), Türkiye' de bulunan süs taşı malzemeleri olan ametist, dumanlı kuvars, rubellit (pembe turmalin) ve kalsedon örnekleri renklenme ajanları araştırılmış ve mevcut renklerin koyuluğunu artırmak için kimyasal analizler yaparak gama beta ve nötron ışınları ile ışınlamıştır.

3.2. Ametistin ve Bazı Doğal Malzemelerin Dozimetrik Özellikleri ile İlgili Çalışmalar

Lee H. Y. ve ark. (1970) yaptıkları çalışmada Kore kuvarlarının gama ışınımı dozimetresi olarak kullanılıp kullanılamayacağını araştırmışlardır. Çalışmalarında ısıtma sıcaklığı tam olarak lineer tutulursa α-kuvarsına verilen

gamma dozunun sonuçta tek bir pik verdiğini ve bu pikin yüksekliğinin de verilen gamma dozu ile orantılı olduğunu belirttiler.

Hashimoto ve ark. (1998) Japon ikiz kuvarslarının kor kısmından (merkezinden) alınan örnekler ile dış kısmından örneklerin yayınım spektrumlarını ve termolüminesans özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgularda kuvarsların kor kısmından alınan örnekler ile dış kısmından alınan örneklerin yayınım spektrumları ile TL ışınım eğrilerinin farklı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu örneklerin 1000 °C'de 50 saat tavlama çalışmalarının sonucunda yayınım spektrumlarının ve TL eğrilerinin değişikliğe uğradığını bildirmişlerdir. Bunların yanı sıra kuvarsların dış kısmından alınan örneklerdeki alüminyum ve hidroksil iyonu konsantrasyonunun çok yüksek olmasının örneklerin TL hassasiyetinin düşük olmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Felicia D.G. Rocha ve ark. (2002), çalışmalarında yarı değerli Brezilya doğal taşı olan ametistlerin dozimetrik karakteristiklerini inceleyerek gamma-ışınım ölçümlerinde kullanılıp kullanılmayacağını incelediler. Ametistin bu dozimetrik karakteristiklerini incelerken termolüminesans yöntemini kullandılar. Örnekleri x-gamma ışınım demetleri ile test ederek, ametistlerin soğurulan doz ve ışınım enerjilerine bağımlılıkları ile yeniden uygulanabilirlik tepkilerini araştırdılar. Elde ettikleri ilk sonuçlara göre bu mineralin radyasyon uygulamalarında dozimetre olarak kullanılabileceğini belirttiler.

Kafadar (2004) "Sentetik Kuvars Kristalinin Dozimetrik ve Termolüminesans Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (TLD-900) ve sentetik kuvars kristalinin dozimetrik ve termolüminesans özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmada asitle yıkanmış sentetik kuvars kristalinin 0.02 Gy ile 2.5 kGy arasında beta ışını ile ışınladıktan sonra, termal ışınım eğrileri ve bu eğrileri oluşturan ışınım tepcilerinin kinetik parametreleri (kinetik derecesi b , aktivasyon enerjisi E ve frekans faktörü s), doz ekleme (AD-Additive Dose), tekrarlanan ilk yükselme (RIR Initial Rise), değişken ısıtma sıcaklığı oranı (VHR-Variou Heating Rates) ve bilgisayar ile ışınım eğrisi ayrışımı (CGCD-Computerised Glow-Curve Deconvolution) yöntemlerini kullanarak bulunmuştur. AD ve CGCD yöntemleriyle bu materyalin iç içe geçmiş en az yedi adet birinci dereceden ışınım tepciğinden

oluşturduğunu göstermiştir ve bu sıcaklıklar oda sıcaklığı ile 500°C arasında P1-P7 olarak belirtilmiştir. Kinetik parametre sonuçlarının uygulanan yöntemlere göre değişiklikler gösterdiği gözlenmiştir. Birinci ve ikinci ışımaya tepeciklerinin karanlık bir ortamda bir ay bekletildikten sonra tamamen söndüğü gözlenmiştir (Fading). Dördüncü, beşinci, altıncı ve yedinci ışımaya tepeciklerinin bu süreçten etkilenmediği fakat üçüncü tepeciğin şiddetinin ilk değerinin %27'sine düştüğü bildirmişlerdir. Bu çalışmada aynı zamanda CaSO₄:Dy'un ışımaya eğrileri doz ekleme (AD) metodu kullanılarak çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında CaSO₄:Dy'un iç içe geçmiş birinci dereceden 6 tane ışımaya tepeciğine sahip olduğu gözlenmiştir.

Teixeira M.I. ve ark. (2007) yaptıkları çalışmalarda Brezilyadan alınmış değişik yeşim taşlarının yüksek radyasyon dozları için dozimetre olarak kullanılıp kullanılamayacağını incelemişlerdir. Çalışmalarında yeşim taşlarını toz haline getirdikten sonra teflon ile karıştırdıktan sonra TL yayılım eğrilerini, 50 Gy'den 20 kGy'e kadar artan dozlar için elde etmişlerdir. TL eğrisinin 130 °C ve 190 °C de iki tepeye sahip olduğu bildirilmiştir. Sonuçta kullandıkları bu karışımın yüksek doz uygulamalarında dozimetre malzemesi olarak kullanılabileceğini yayınlamışlardır.

C. Soliman ve ark. (2009), çalışmalarında kumtaşlarının, termolüminesans tekniklerini kullanarak, gamma ışımaya dozimetresi olarak uygun olup olmadığını incelediler. Malzemenin özelliklerini sistematik olarak incelerken atomik absorpsiyon spektrometresi kullandılar. Bu sayede kumtaşının doğal ve laboratuvar dozu verilmiş şekliyle mavi termolüminesans yayılım bandını, tuzak derinliğini ve anormal sönüm durumunu incelediler. Kumtaşının doğal termolüminesans mavi yayılım bandının ~315 °C civarında geniş bir aralığa sahip olduğunu gösterdiler. Ayrıca gamma doz cevap eğrisindeki lineer bölgenin 1-50 Gy aralığında olduğunu, daha yüksek dozlarda ise eğrinin sublineer bir yapıya dönüştüğünü ve standart sapmanın tüm koşullarda ± %9'dan düşük olduğunu gösterdiler. Hem doğal hem de laboratuvar dozu verilmiş örnekler dikkate alındığında tuzak derinliklerinin birbirine yakın-ayrılmış pikler şeklinde kendini gösterdiğini gördüler. Örneğin anormal sönüm özelliğini incelediklerinde ise 1 haftadan fazla oda sıcaklığında bekletilen örneğin termolüminesans sinyalindeki düşüşün %7 den fazla olmadığını belirttiler. Sonuç

olarak doğal kumtaşının radyoaktif kazalarda ve sanayide dozimetre olarak kullanımının uygun olduğunu belirttiler.

Tugay ve ark. (2009) Akçakent'ten alınmış doğal kalsiyum fluorit (CaF_2) örneklerinin $30\text{ }^\circ\text{C}$ ile $450\text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki TL ışıma eğrilerini analiz etmişlerdir. Böylece doğal CaF_2 kristalinin dozimetrik malzeme olarak kullanımının uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Bu amaçla CaF_2 örneklerinin tavlama sıcaklığı, ısıtma hızı, tekrarlanabilirlik ve doz cevap özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçta yüksek tavlama sıcaklığı ve süresini $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika olarak, düşük tavlama sıcaklığı ve süresini de $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 24 saat olarak bulmuşlardır. Isıtma oranı ise $1\text{ }^\circ\text{C/s}$ olarak seçilmiştir. Ayrıca doğal CaF_2 kristalinin 0.5 ile 10 Gy arasında lineer bir doz cevap eğrisine sahip olduğunu yayınlamışlardır. Bunların yanı sıra CaF_2 kristalinin 100, 120, 215, 310, 350 ve $410\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tepe sıcaklıklarına sahip 6 tepeden oluştuğunu bildirmişlerdir.

4. MATERYAL ve METOD

4.1. Materyal

4.1.1. Ametistin fiziksel, kimyasal ve jeolojik özellikleri

Silis grubu mineraller doğada çok çeşitli formlarda bulunmaktadır. Bu minerallerden agat, opal, jasper, kalsedon, kuvars (dağ kuvarısı, sitrin, gül kuvarısı, dumanlı kuvars, krizopras ve ametist) en çok bilinenleridir. Bunlardan her biri içinde bulunduğu kayaç ve ortamlara bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Ametist, Kuvars (SiO_2) mineralinin makrokristalin çeşididir. Makroskobik kristaller ve mikro kristaller olarak iç tarafı agat ile çevrilmiş boşluklarda ve sıkça jeod (volkanik kayadaki boşluk) şeklinde silikatlı volkanikler içinde bulunurlar. Ametist kristallerinin özgül ağırlığı 2.65 g/cm^3 iken iyi tanelenmiş çeşitlerde 2.60 g/cm^3 'tür. Ametist kristallerinin Türkiye'deki en büyük rezervinin Balıkesir-Dursunbey Güğü köyü civarında olduğu bilinmektedir (Gürbüz, 2007).

Açık eflatun ile koyu mor arasında değişen renkleri ile bilinen ametistler silikat grubuna ait kuvars mineral türlerinden biridir. Renklenmenin sebebinin az miktardaki demirin yanı sıra manganez ile antumuan varlığı ve doğada maruz kaldığı radyasyonun da etkili olduğu birçok araştırmacı tarafından belirtilmektedir (Gürbüz, 2007).

Ametist farklı ısılarda renk değiştirir. Sıcaklık $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $500 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında iken renk genellikle kahverengimsi-sarı veya granat kırmızısına değişip, $575 \text{ }^\circ\text{C}$ üzerinde rengini kaybederek aytaşı benzeri bir görünüm almaktadır. Isıl işlem sonucu rengi kahverengimsi-sarıya dönüştürülerek doğada ender rastlanan sitrine dönüşmektedir. Bazı ametistler doğada daha açık renklerde, bazıları ise koyu renklerde bulunabilmektedir. Ancak koyu renkli olanların gün ışığında ısı gereksiz renge dönüşümünün açıldığı gözlenmiştir (Gürbüz, 2007).

Ametistler α -kuvarsın ($\alpha\text{-SiO}_2$) mor türevleridir (Balitsky ve ark., 2000; Zhang ve ark., 1994). Literatürde doğal ametistlerin yayılım spektrumları ile ilgili

fazla çalışma bulunmamasına rağmen sentetik ametistlerin yayınım spektrumları incelendiğinde 740-750 nm ile 350 nm civarında yayınımına sahip oldukları bildirilmiştir (Zhang ve ark., 1994).

4.1.2. Kullanılan Cihazlar

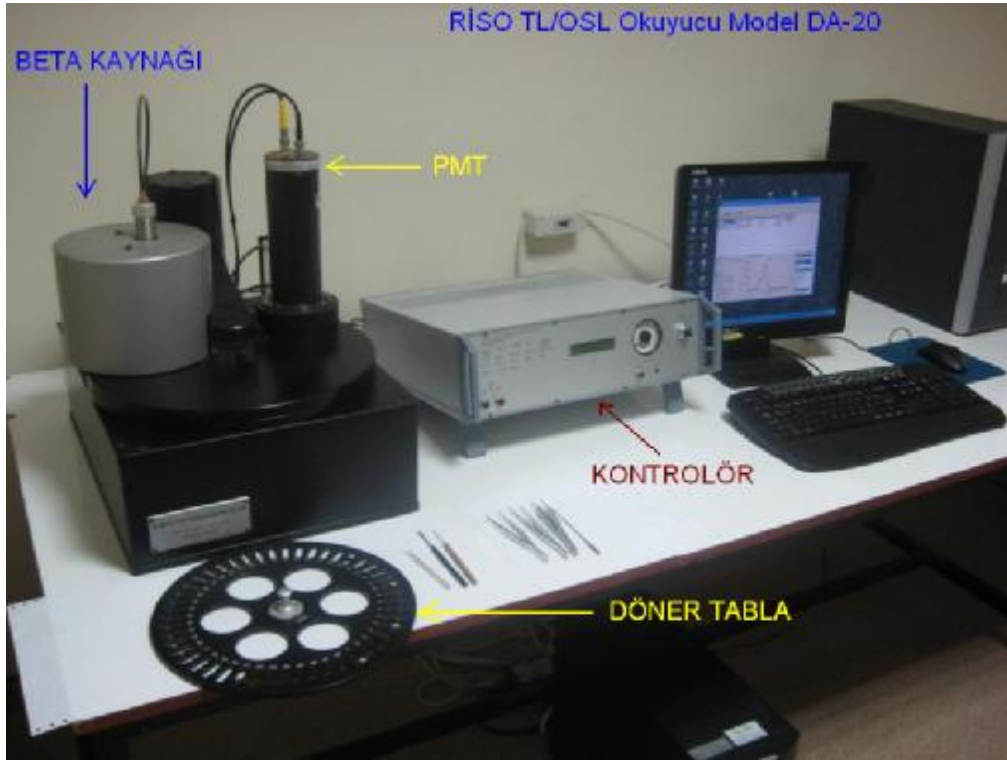
4.1.2.1. TL Ölçüm Sistemi

Bu çalışmada yapılan ölçümlerde Risø TL/OSL (model DA-20) cihazı kullanılmıştır. Risø'nun bu en son geliştirilen modeli hem TL hem de Optiksel Uyarılma ile Lüminesans (OSL) ölçümlerini bir arada yapabilmektedir. Bu TL/OSL cihazı tamamen bilgisayar kontrollüdür. Bu kontrolün sağlanabilmesi ve elde edilen ölçüm sonuçlarının analiz edilebilmesi için sırasıyla "Sequence" ve "Analyst" adı verilen iki program kullanılmaktadır. Şekil 4.1'de cihazın bir görüntüsü verilmektedir. Şekil 4.2'de ise cihazı oluşturan parçalar şematik olarak gösterilmektedir.

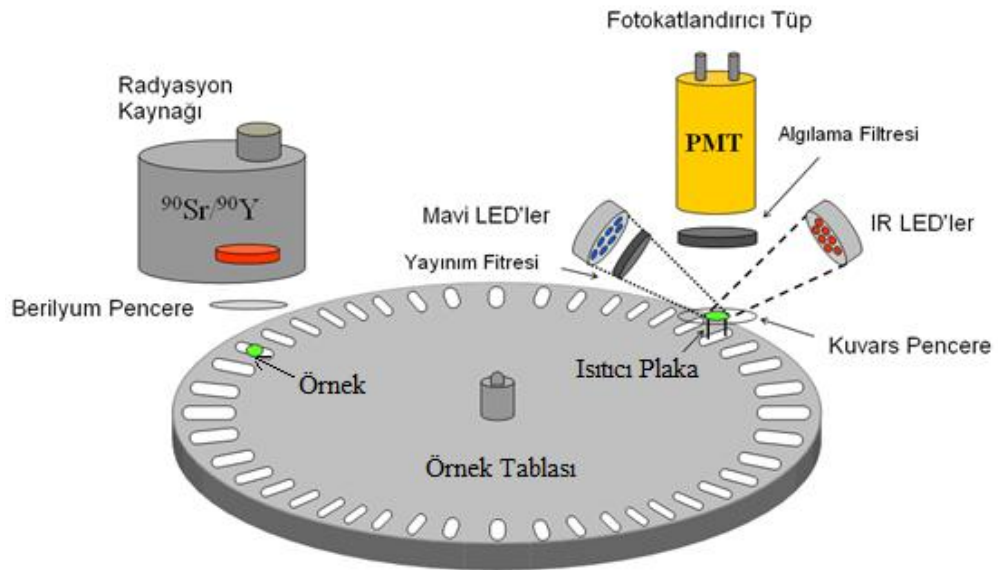
Risø TL/OSL otomatik ölçüm sistemi 48 örneğin sırasıyla;

- Oda sıcaklığı ile 700 °C arasında TL ölçümü yapılabilmektedir,
- Sürekli dalgada (CW) modunda değişik ışık kaynakları (IR ve mavi ışık) kullanarak OSL ölçümü yapılabilmektedir,
- Radyoaktif beta (β) kaynağı ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) yardımıyla örneklerin sırasıyla ışınlanmasına olanak tanımaktadır.

TL/OSL cihazının bir diğer avantajı da örneklerin OSL ve TL ölçümleri sırasında ön ısıtma işlemine tabi tutulabilmeleridir. Ayrıca OSL ölçümü, belirlenen bir ön ısıtma sıcaklığında örnek sıcaklığının sabit tutularak gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede kuvars gibi dozimetrik malzemelerin tuzak parametreleri ve karakteristiği ile ilgili çalışmaların yapılması mümkün olmaktadır.



Şekil 4.1. Risø TL/OSL cihazının genel görünümü



Şekil 4.2. Risø TL/OSL cihazının şematik gösterimi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, bir fotokatlandırıcı tüp ve uygun algılama filtrelerini barındıran ışık algılama sistemi tarafından örneklerden yayımlanan lüminesans şiddeti ölçülebilmektedir. Örnek odası, vakum ortamı veya azot akışı ile azot atmosferine sahip bir ortam sağlayacak biçimde tasarlanmıştır. Örnek odasında 48 örneğin bir arada okunmasını sağlayan örnek tablası bulunmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan 48 örnek haznesine sahip döner tabla ile örneklerin yerleştirildiği kenarlıklı ve kenarlıksız diskler

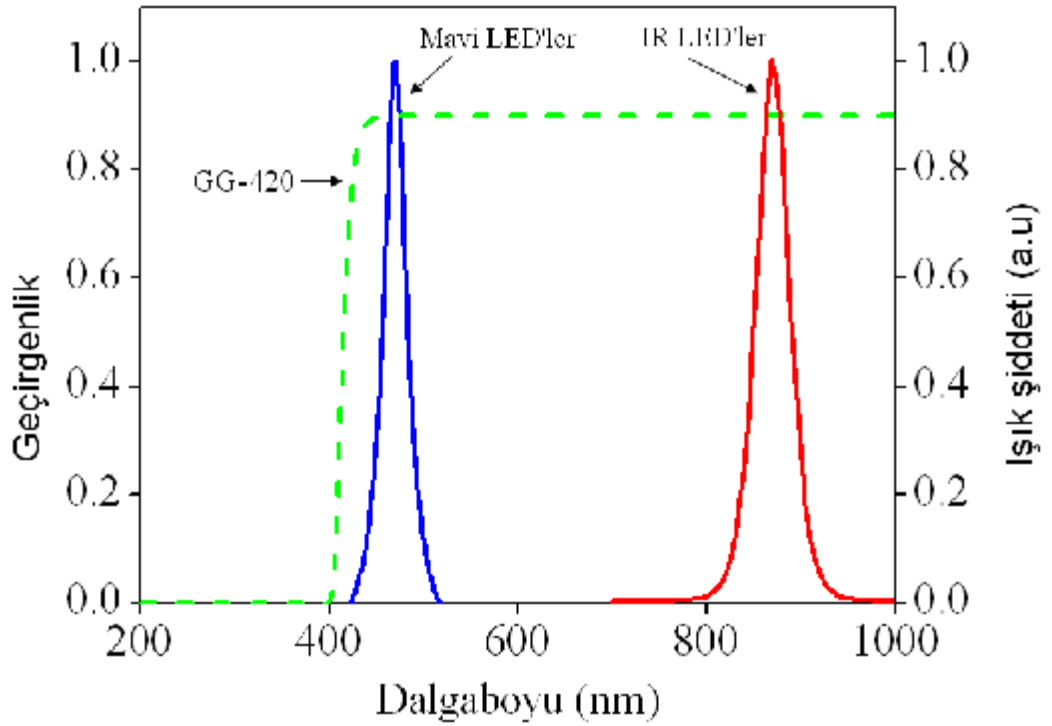
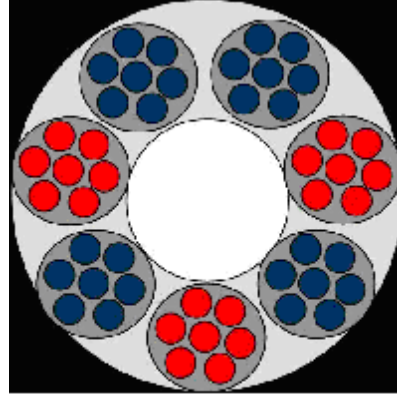
Risø TL/OSL cihazı 5 temel bölümden oluşmaktadır (bkz. Şekil 4.1) :

- IR ve Mavi Işık Kaynağı,
- PM Tüpü (Fotokatlandırıcı),
- Radyasyon Kaynağı,
- Isıtma sistemi,
- Kontrolör.

4.1.2.1.(1) IR ve Mavi Işık Kaynağı

TL/OSL cihazının içerisinde örneklerin hem IR hem de mavi ışık ile uyarılabilmesini sağlayan diyotlar (LED) bulunmaktadır. Bu LED’lerden hangisinin kullanılacağı cihazın arkasında bulunan düğmelerle önceden ayarlanmalıdır. Mavi LED’ler ve IR LED’ler sırası ile 40 mW/cm^2 , 135 mW/cm^2 ’lik ışırma gücüne sahiptir. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi Mavi LED’ler 450 nm civarında IR LED’leri ise 875 nm civarında dalga boyuna sahip ışık yaymaktadırlar. Böyle iki tip LED

kullanarak hem kuvars hem de feldispat kristallerinin uyarılmaları mümkün olmaktadır.



Şekil 4.4. IR ve Mavi LED'lerin dizilişi (üstte) ve bu LED'lere ait yayınım dalga boyuna ait grafik (altta)

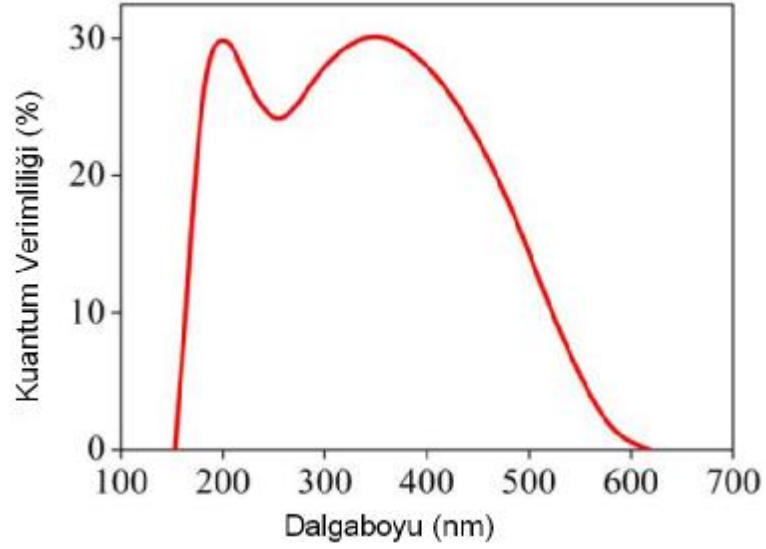
4.1.2.1.(2) Fotokatlandırıcı Tüpü

Lüminesans yayımını bir fotokatlandırıcı tüp (PMT) tarafından algılanmaktadır. PMT' deki ışığa karşı duyarlı eleman katottur. Katot ışık yayan bir malzeme ile kaplıdır; CsSb ve diğer alkali bileşikler bu materyal için oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Tipik olarak katoda görünür skalada bir foton çarptığında bu ışık demeti bir ile üç arasında elektron koparabilir. Fotokatot tarafından yayımlanan bu elektronlar dinotlar ile fotokatot arasındaki voltaj gerilim farkından dolayı dinotlara doğru hızlandırılırlar. Elektronlar yeterli hıza ulaşmış ise dinotlara çarpması sonucu yüzeyden ikincil elektronlar kopacaktır. Bu şekilde sayısı artan elektronlar bir akım oluşturur ve elde edilen bu akım kontrolör tarafından sayısal verilere çevrilir. Elde edilen akım değeri katoda çarpan ışığın yoğunluğuna bağlı olarak artacaktır. Böylece lüminesans sinyalindeki artışa bağlı olarak akım değeri de artacaktır. Bu şekilde lüminesans sinyalleri elektrik akımına çevrilerek önce kontrolöre, kontrolörden de bilgisayara aktarılmaktadır.

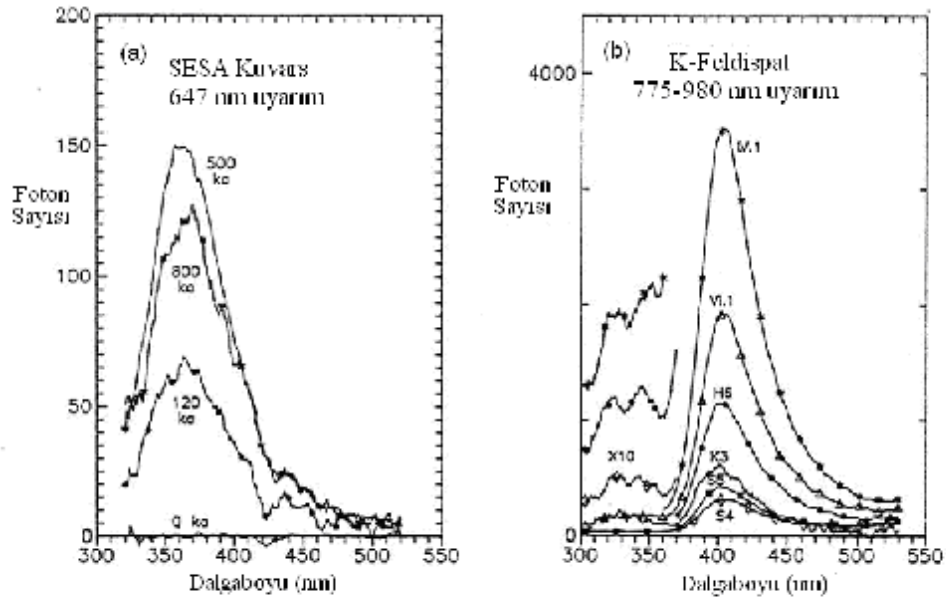
Risø TL/OSL okuyucusundaki standart PM tüpü Bialkali EMI 9235QB model numaralı bir fotokatlandırıcıdır. PM tüpünün kuantum verimliliğinin foton dalga boyuna karşı grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekilde PM tüpünün en verimli algılama aralığının dalga boyunun 200 nm ile 400 nm arasında olduğu görülmektedir. Şekil 4.6'da hem kuvars hem de K-feldispat kristallerinden elde edilen TL sinyalinin dalga boyunun sırasıyla 350 nm ve 410 nm civarında olduğu görülmektedir. Kristallerden yayımlanan bu lüminesans sinyalinin dalga boyu, bialkali EMI 9235QB PM tüpünün en verimli olduğu ölçüm aralığına girmektedir. Risø TL okuyucusunda PMT katodu ile örnek arasındaki mesafe 55 mm'dir.

4.1.2.1.(3) Filtreler

Risø Otomatik TL/OSL cihazının çalışması sırasında fotokatlandırıcı tüpün, uyarım ışık kaynağı ve diğer çevresel ışık kaynaklarından etkilenmemesi amacıyla optik filtreler kullanılmaktadır. Bu filtreler ölçümü yapılacak olan örneğin tipine ve kullanılacak olan TL/OSL yöntemine bağlı olarak seçilmelidir.



Şekil 4.5. EMI 9235QB fotokatlandırıcı tüpünün kuantum verimliliğinin foton dalga boyuna göre grafiği



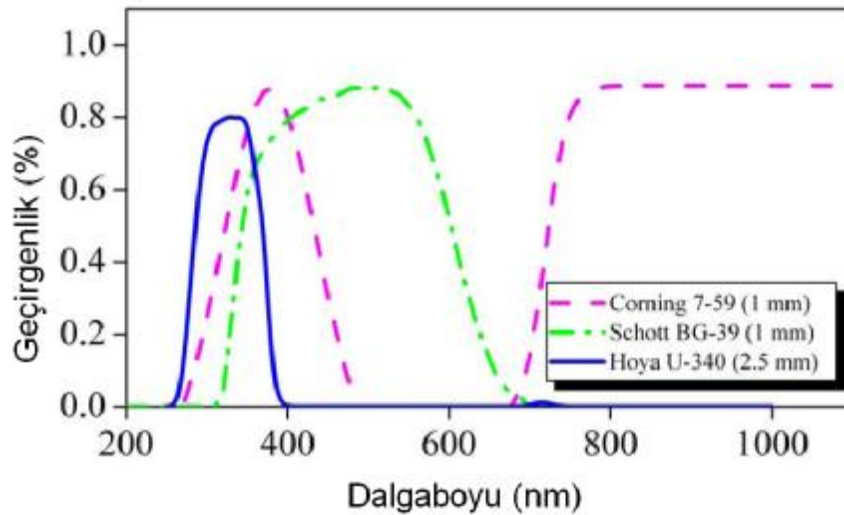
Şekil 4.6. Tortusal Kuvars ve K-feldispatlara ait yayılım spektrumu (Huntley ve ark, 1991) a) Güney Avustralya'dan alınmış birkaç tortusal kuvars örneğinin Kripton lazerinden elde edilen 647 nm ışık demeti ile uyarılması ile elde edilmiş yayılım spektrumu b) Birkaç tortusal feldispat örneğinin IR diyot uyarımı ile elde edilen yayılım spektrumu

OSL/TL ölçümü sırasında kullanılan uyarım kaynağından yayılan ışık miktarı, örnekten yayılan lüminesans ışığından $\sim 10^{18}$ mertebesinde daha büyüktür. Bu sebeple, yayımlanan lüminesansın ölçülebilmesi için, örnekten yansıyan uyarım ışığının doğrudan PMT' ye ulaşması önlenmelidir. Bu amaçla uygun filtreler kullanılmalı ve böylece spektral uyarım ile algılama penceresi birbirinden iyi bir şekilde ayrılmış olmalıdır.

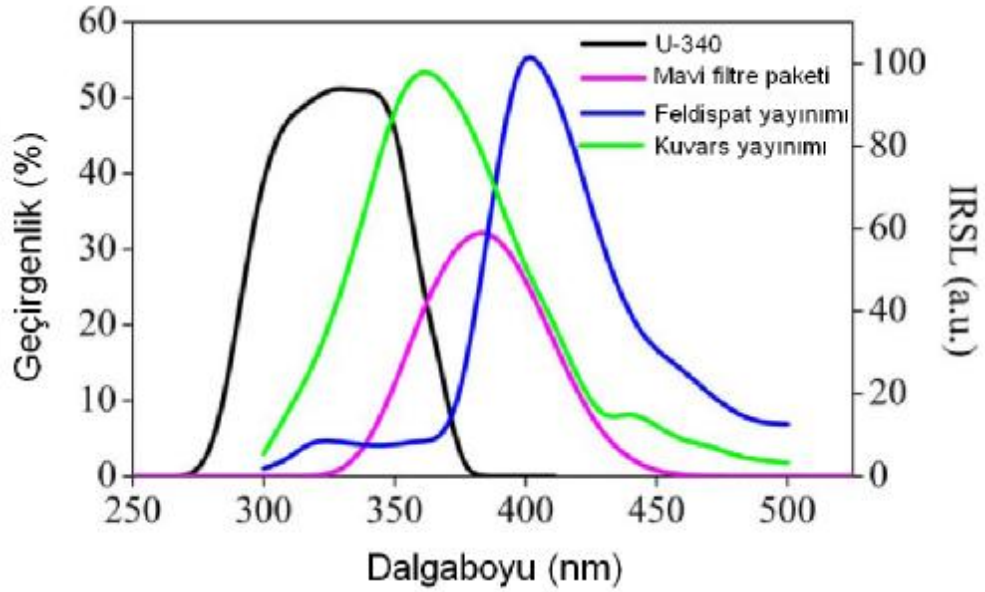
Risø TL/OSL okuyucusunda standart olarak 3 farklı algılama filtresi bulunmaktadır:

1. Hoya U-340 (7,5 mm kalınlık $\varnothing = 45$ mm)
2. Schott BG 39 (2 mm kalınlık $\varnothing = 45$ mm)
3. Corning 7-59 (4 mm kalınlık $\varnothing = 45$ mm)

Bu filtrelerin geçirgenlik karakteristikleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Kuvars kristalinin OSL yöntemi ile okunması sırasında genellikle Hoya U340 kullanılmaktadır. Buna karşılık feldispat kristalleri ise genellikle mavi filtre paketi olarak adlandırılan ve Schott BG-39 ile Corning 7-59 filtrelerinin birlikte kullanılması ile oluşturulan filtre kombinasyonu ile okunur. Bu mavi filtre paketinin geçirgenlik eğrisi ve kuvars ile feldispatın yayınım spektrumu Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Risø TL/OSL cihazında bulunan üç algılama filtresinin geçirgenlik karakteristikleri



Şekil 4.8. Hoya U-340 ve mavi filtre paketinin geçirgenlik karakteristikleri ile kuvars ve feldispatın yayılım spektrumları.

Örnek tipine ve kullanılacak lüminesans metoduna göre hangi filtrenin seçileceği Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Örnek tipine ve kullanılan lüminesans metoduna göre filtrelerin sınıflandırılması.

Örnek	Metod	Filtreler	Açıklama
Kuvars	TL	BG39 veya U-340	-
	OSL	U340	-
	Tek Tanecik Metodu	U340	-
Feldispat	TL	BG39 & 7-59	Mavi ışık seçeneği kontrol biriminden pasif edilmelidir.
	IRSL	BG39 & 7-59	
	Tek Tanecik Metodu	BG39 & 7-59	
İnce Tanecik	TL	BG39 veya U-340	Yalnızca IRLS için (mavi ışık seçeneği kontrol biriminden pasif edilmelidir)
	OSL	IRSL : BG39 & 7-59	
		IR+Mavi : U-340	

Bu çalışmada Hoya U-340 filtresi kullanılmıştır. Her ne kadar Schott BG-39 filtresinin geçirgenliği daha geniş bir spektruma denk geliyor olsa da yüksek dozlara çıkıldığında PM tüpünün doyuma ulaşmaması için Hoya U-340 filtresi tercih edilmiştir. Genelde Schott BG-39'un düşük dozlar için kullanımı daha yaygındır.

4.1.2.1.(4) Radyasyon Kaynakları

Bu çalışmada karşılaştırma amacıyla radyasyon kaynağı olarak iki farklı kaynak kullanılmıştır. Bunlardan ilki kullandığımız TL/OSL cihazındaki beta kaynağı olup ikincisi de Ç.Ü. Tıp Fakültesi Radyasyon Onkoloji Anabilim dalındaki ^{60}Co gama kaynağıdır. Bu kaynaklarla ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda verilmektedir.

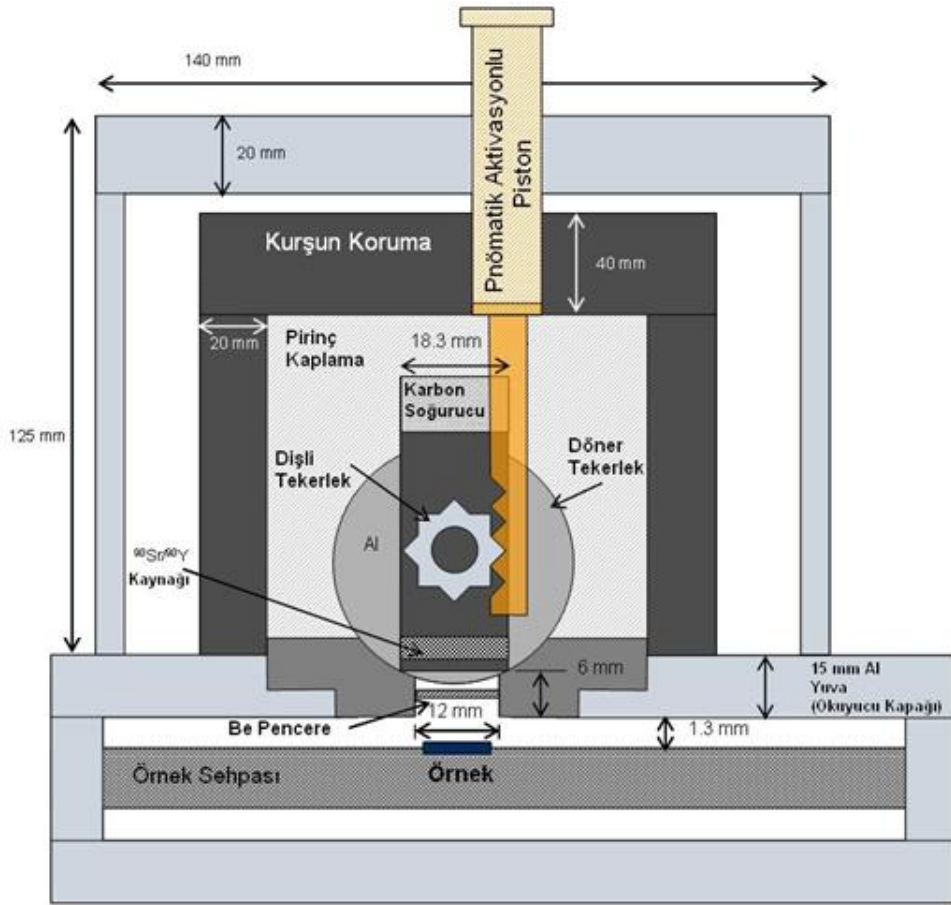
Beta ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) Kaynağı: TL/ OSL cihazında bulunan Beta ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) radyasyon kaynağı pnömatik bir kapağa sahip özel bir kurşun blok içerisine yerleştirilmiştir. Radyasyon kaynak modülünün içerisinde maksimum yarılanma ömrü 30 yıl olan, maksimum 2.27 MeV'lik enerjiye sahip β parçacıkları yayan ve 1.48 GBq'lık (40 mCi) aktiviteye sahip $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β kaynağı bulundurur. Kuvvars için örnek pozisyonundaki doz soğurma oranı 6.689 Gy/dak'dır.

Kaynak basınçlı havayla kontrol edilen dönen bir paslanmaz çelik tekerlek içerisine monte edilmektedir. Bu sistem ile örnek en az 1 saniye süresince ışınlanabilmektedir. Bu düzenek aracılığı ile kaynağı kapalı pozisyondan açık pozisyona getirmek 0,11 s sürmektedir (Markey ve ark, 1997). Bu açma kapama süresi bütün radyasyona tutma işlemleri için aynıdır ve uzun ışınlamalarda ihmal edilebilecek seviyededir. Kaynak ile örnek arası mesafe 7 mm'dir.

Şekil 4.9'da beta kaynağının şematik bir görüntüsü yer almaktadır. Kaynak kapalı pozisyonda (varsayılan pozisyon) iken yukarıya, karbon soğurucuya doğru bakacak şekilde ayarlanmıştır. Kaynak açık pozisyonuna getirildiğinde ise (ışınlama pozisyonu) aşağı doğru yönlendirilmektedir. 0.125 mm'lik bir Berilyum (Be) pencere ışınlayıcı ile ölçüm odası arasına yerleştirilmiştir. Bu pencere vakum ara yüzeyi olarak işlev görmektedir.

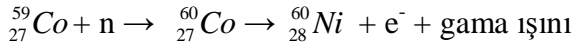
48 örneklik numune tablasındaki iki komşu örneğin merkezleri arasındaki mesafe 17 mm'dir. Bu yakın konumlanma, bir örneğin ışınlanması sırasında komşu

örneklerin de belli bir miktar doz soğurmalarına yol açmaktadır. Bu olay ışınlama çapraz-etkisi olarak adlandırılır. Thomsen ve ark. (2006) bu ışınlama çapraz-etkisini komşu iki örnek için 0.250 ± 0.003 , bir sonraki örnek için ise 0.014 ± 0.002 olacak şekilde ölçmüşlerdir. Bu değer hassas uygulamalar için göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple bu çalışmada örneklerin yan yana yerleştirilmemesine dikkat edilmiştir. Bir örnek ile diğeri arasında en az iki boşluk verilmiştir.

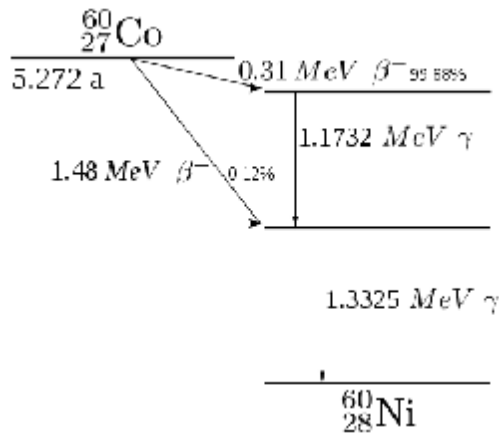


Şekil 4.9. Radyasyon kaynağının bulunduğu ve pnömomatik sistemle açılıp kapanan kurşun muhafaza

Gama (^{60}Co) Kaynağı: $^{60}_{27}\text{Co}$ izotopu, 5.27 yıllık yarılanma ömründen dolayı normal şartlarda doğada bulunmaz. Bu yüzden bu radyoaktif izotop yapay olarak üretilmektedir. $^{60}_{27}\text{Co}$ izotopu $^{59}_{27}\text{Co}$ 'un nötron bombardımanına tutularak radyoaktif hale gelmesi ile yapay olarak üretilmektedir. $^{60}_{27}\text{Co}$ izotopu bozunum sonucu kararlı bir izotop olan $^{60}_{28}\text{Ni}$ 'ye dönüşmektedir. Şekil 4.10'da kobalt-60'ın bozunumu ile ilgili şematik gösterim yer almaktadır. Kobalt-60'ın bozunum süreci ise aşağıdaki gibidir;



Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Balcalı Hastanesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı'nda bulunan ^{60}Co kaynağı Alcyon II markadır. Bu kaynağın örnek pozisyonundaki doz soğurma hızı 2.217 Gy/dakika olarak hesaplanmıştır. ^{60}Co izotopunun 2 farklı yayılım spektrumu vardır. Birincisi spektrumun enerjisi 1.17 MeV iken ikincisi de 1.33 MeV'tur. Fakat genellikle kaynağın enerjisi bu iki enerjinin ortalaması alınarak 1.25 MeV olarak kabul edilmektedir. Şekil 4.11'de ise ışın tedavisinde kullanılan Alcyon II marka gama kaynağının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.10. ^{60}Co izotopunun bozunumu



Şekil 4.11. Alcyon II marka ^{60}Co kaynağı

4.1.2.1.(5) Isıtma Sistemi

Şekil 4.12’de gösterilen ısıtma sisteminin temelde iki görevi vardır. Birincisi örneği ısıtmak, ikincisi örneği TL/OSL okuması için uygun konuma yükseltmektir. Bu sayede LED’lerden gelen ışık örneği aydınlatırken daha az dağılmaya uğramakta ve örnekten çıkan lüminesans ışığı da daha az kayıpla PM tüpüne ulaşmaktadır.

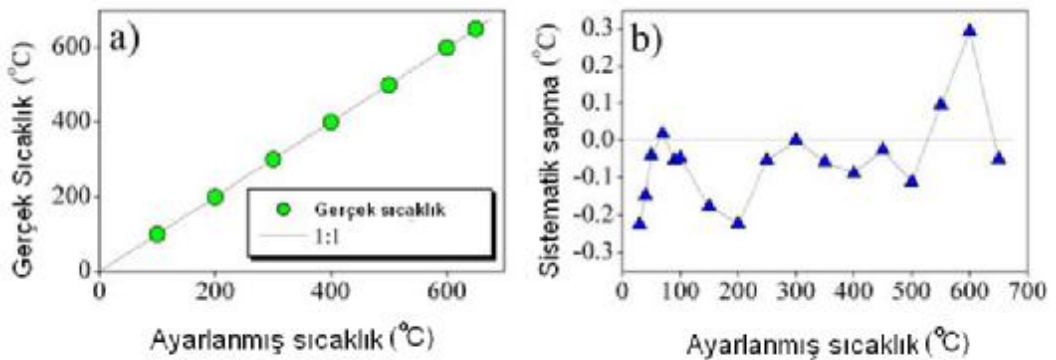
Isıtma sistemi TL ölçümünün 0.1 ile 10 °C/s arasında değişen lineer bir ısıtma oranıyla gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Örnek bu sistem sayesinde azot ortamı içerisinde lineer olarak 700 C°’ye kadar ısıtılabilir. Azotun akışı ısıtıcı şeridin ve örneğin ölçüm sonunda hızlı bir şekilde soğumasına yardımcı olmaktadır. Bu konu oldukça önemlidir çünkü hızlı soğumanın gerçekleşmediği durumda örneklerin TL hassasiyetinde bir azalma meydana

gelmektedir. Ayrıca azot ortamı ısıtıcı sistemin yüksek sıcaklıklarda oksitlenmesini önlemektedir. Bunların yanı sıra örneklerin azot atmosferinde ısıtılmaları örneğin TL hassasiyetinin korunmasını sağlamaktadır. Çünkü normal bir atmosfer ortamında örneklerin ısıtılması sırasında oksijen ve su buharı örnek içerisine difüzyon yolu ile nüfuz ederek örneklerin hassasiyetinde değişikliklere yol açabilmektedir (Aitken, 1985).



Şekil 4.12. Isıtma biriminin a) ölçüme hazır pozisyonundaki b) örnek tablası yerinde iken görüntüsü

Ayarlanan sıcaklık ile ısıtıcı elemanın gerçek sıcaklığı arasındaki sistematik sapma ısıtma sistemini kontrol eden yazılım tarafından düzeltilmektedir. Her bir ısıtma sisteminin kalibrasyonu kendine özgüdür. Kalibrasyondan sonra sistematik sapma tüm ayarlanan sıcaklık boyunca 0.25 °C aralığında sabitlenmektedir (Şekil 4.13)



Şekil 4.13. a) Ayarlanan sıcaklığa karşı gerçek sıcaklığın grafiği b) Gerçek ve ayarlanan sıcaklık arasındaki sistematik sapmanın grafiği

4.1.2.1.(6) Kontrolör

Kontrolörün (bkz. Şekil 4.14) bilgisayar tarafından kontrol edilmesini sağlamak amacıyla “Sequence” adı verilen Windows tabanlı bir yazılım kullanılmaktadır. Bu yazılım sayesinde ölçüm şartları oluşturulabilmekte ve bu şartlara göre TL/OSL okuması yapılabilmektedir. Kontrol programının en önemli özelliği içerisinde özel olarak geliştirilmiş bir komut dili çeviricisinin olmasıdır. Komut dili sistem donanımının ve veri kazanç metodlarının tam kontrolünü sağlayan yaklaşık 40 komut içermektedir. Komut editörü komutları kontrolörün anlayacağı düşük seviye komutlarına çevirerek ve bunların gerçekten gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğini kontrol ederek örnekten elde edilen verileri cihazdan alır. Böylece ölçüm sonuçları bilgisayar üzerinde kaydedilmiş olur.



Şekil 4.14. Bir Windows komut programı tarafından yönetilen kontrolör

4.1.3. Fırın

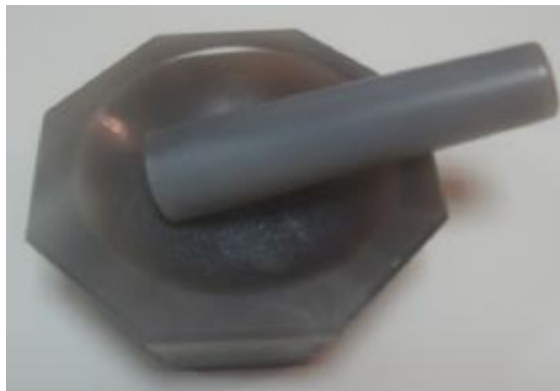
Bu çalışmada ametist örneklerinin tavlansında dijital kontrol sistemli Nobertherm marka bir elektrikli fırın kullanılmıştır (Şekil 4.15). Bu fırın malzemenin oda sıcaklığı ile maksimum 3000 °C arasında tavlansına olanak tanımaktadır. Dijital kontrolör sayesinde set değeri 1 °C'lik aralıklarla girilebilmektedir ve sıcaklık değeri göstergeden sürekli olarak izlenebilmektedir.



Şekil 4.15. Ametist örneklerinin tavlama için kullanılan Nabertherm marka fırın

4.1.4. Agat Havan

Ametist örneklerinin toz kristal şekline getirilmesi için agat havan kullanılmıştır. Bu havan çok sert bir malzemeden yapıldığından örneklerin kırılması aşamasında bulaşmayı minimuma indirmektedir. Aksi halde kırma işlemi sırasında kullanılan malzemelerin örneğe karışma ihtimali söz konusu olabilmektedir. Agat havanın görüntüsü Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.16. Ametist örneklerinin toz kristal haline getirilmesinde kullanılan agat havan

4.1.5. Elekler

Örnekler agat havanda kırıldıktan sonra Retsch marka test elekları (bkz. Şekil 4.17) kullanılarak 90-140 mikron arasından elenerek ölçüme hazır hale getirilmiştir. Eleme işlemi örneklerin tanecik boyutuna gruplandırılmalarına ve böylece homojen bir dağılım elde etmemize olanak tanımıştır.

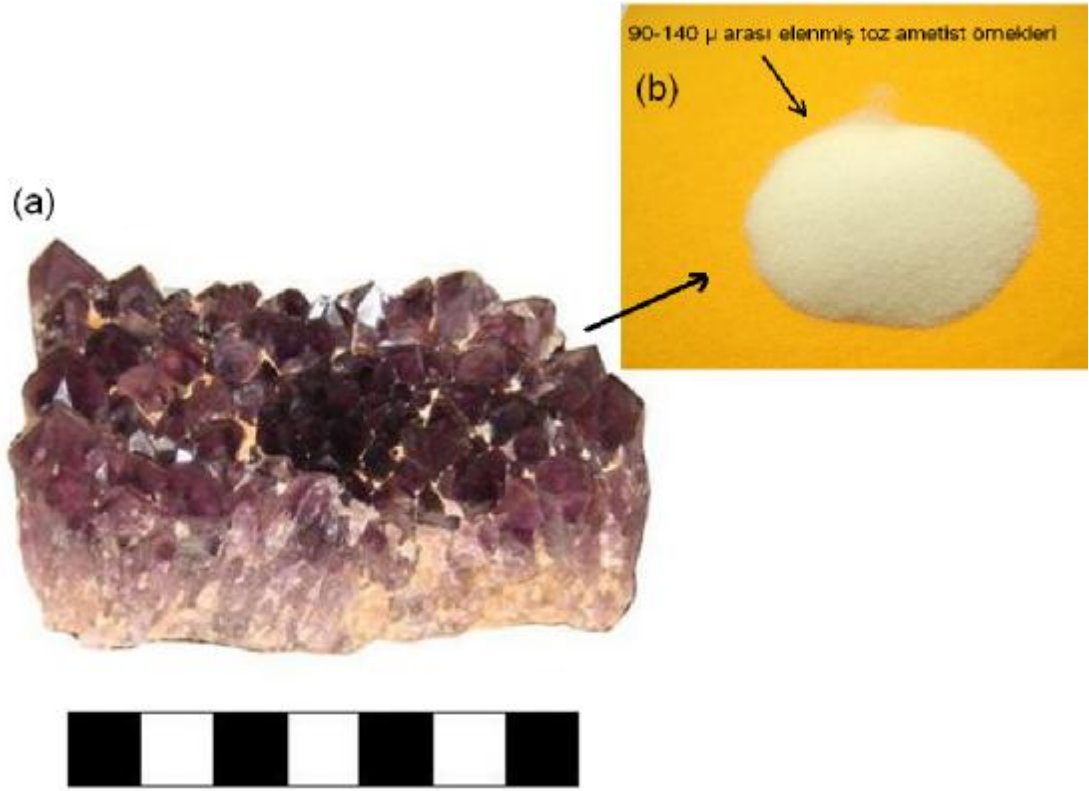


Şekil 4.17. Ametist örneklerinin tanecik boyutuna göre ayrıştırılmalarında kullanılan Retsch marka elekler

4.2. Yöntem

4.2.1. Ametist Örneklerinin Hazırlanması

Ametist örnekleri, Balıkesir ili Dursunbey ilçesi Güğü (Göğü) köyü yakınında yer alan Alaçam Madencilikten temin edilmiştir. Doğal ametist kristallerinin dozimetrik özelliklerinin incelenmesi çalışmaları ise Ç.Ü. Fizik Bölümü Termoluminesans Dozimetresi ve Medikal Fizik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan doğal ametist örneğinin görüntüsü Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Bu çalışmada kullanılan ve Balıkesir Dursunbey ilçesinden alınmış doğal ametist örneğinin (a) ilk alındığı andaki görüntüsü ve (b) temizlendikten sonra agat havanda ezilerek toz haline getirilmiş ve 90-140 mikron arası elenerek ölçüm için hazırlanmış halinin görüntüsü

Çalışmada kullanılan bu örnekler öncelikle saf su ile yıkanmış ve böylece farklı materyallerin örneğe bulaşma ihtimali önlenmiştir. Daha sonra örnekler etüvde 40 °C’de kurutulmuş ve agat havanda kırılarak 90-140 μ arasında elenmişlerdir. Örnekler bu şekilde hazırlandıktan sonra kenarlıklı disklerin içerisine homojen bir şekilde yerleştirilerek her biri ~30 mg olacak şekilde tartılmışlardır. Böylece örnekler ölçüm için hazır hale getirilmişlerdir.

İyi bir dozimetrik malzemede aranan bazı temel özellikler vardır. Söz konusu malzeme bu özelliklere sahipse, bu malzemenin iyi bir dozimetre malzemesi olarak kullanılması mümkündür. Bu özelliklerin bazıları temel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek verimlilikte bir ışık yayınımına sahip olması,
- Kullanılan detektörün yüksek oranda tepki verdiği bant aralığı civarında TL yayınım spektrumuna sahip olması,
- Yeterli doz depolama özelliği olması,
- Lineer bir doz tepkisi olması,
- Anormal sönüm değerinin düşük olması,
- Tekrarlanabilirlik özelliğinin olması,
- Basit tuzak dağılımına sahip olması,
- Pahalı olmaması,
- Çevre koşullarına dayanıklı olması.

Bu çalışmada ametistin iyi bir dozimetre malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağını anlamak amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sırasıyla şöyledir:

- Örneklerin X-Işını Floresans Yöntemi (XRF) ile kimyasal analizleri
- Örneklerin X-Işını Toz Kırınım Yöntemi ile fiziksel analizleri
- Tavlama sıcaklığının ve süresinin belirlenmesi
- Radyasyon ile ışınlama öncesi tavlama sıcaklığının TL hassasiyetine etkisi
- TL ışına eğrilerinin incelenmesi ve CGCD yöntemi ile ayrıştırılması
- Tuzak parametrelerinin hesaplanması
 - a) CGCD yöntemi ile E ve s değerlerinin hesaplanması
 - b) Farklı ısıtma hızları yöntemi ile E ve s değerlerinin hesaplanması
- Doz cevabı
- Enerji cevabı
- Tekrarlanabilirlik
- Yüksek dozun ametistin hassasiyetine etkisi
- Anormal Sönüm

Bu çalışmada aksi belirtilmediği sürece tavlama dendiğinde örneklere şu tavlama protokolünün uygulandığı anlaşılmalıdır: 450 °C’de 90 dakika tavlama + alüminyum blok üzerinde yarım saat soğutma + 80 °C’de 24 saat tavlama + alüminyum blok üzerinde yarım saat soğutma. Ayrıca tüm TL okumaları 2 °C/s’lik ısıtma oranıyla ve 700 °C’e kadar gerçekleştirilmiştir. Örneklerin fon sinyalleri her TL okumasından sonra ölçülmüştür. Fakat bu fon sinyallerinin değerinin sabit olduğu görülmüş ve bu sebeple hesaplamalara dâhil edilmemişlerdir.

4.2.2. Örneklerin X-Işını Floresans Yöntemi (XRF) ile kimyasal analizleri

Ametist örneklerinin kimyasal yapısının anlaşılması amacıyla Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi’nde bulunan Panalytical Axios Advanced model X-ışını Floresans Spektrometresi kullanılmıştır (Şekil 4.19). XRF analizi için ametist örnekleri agat havanda ezilip 40 µ’luk elek ile elenmişlerdir. Böylece her biri 6 mg olacak şekilde üç örnek hazırlanmıştır. Bu örneklerin her biri ametistlerin kimyasal yapısının tavlama sıcaklığına bağlı olarak nasıl değiştiğinin anlaşılması amacıyla farklı sıcaklıklarda tavlansmıştır. 1. örnek doğal ametistlerin kimyasal yapısının incelenmesi amacıyla tavlama işlemine tutulmadan hazırlanmıştır. 2. örnek ise doğal radyasyon dozunun silinmesinde kullanılan ve Bölüm 4.2.1’de bahsedilen tavlama protokolü kullanılarak tavlansmıştır. 3. örnek ise 2. örneğe uygulanan tavlama işlemine ek olarak 700 °C’de 4 dakika tavlansarak hazırlanmıştır. 3. örneğe uygulanan tavlama işlemi, rutin bir TL okuması sırasında örneğin maruz kaldığı sıcaklık değerinin bir benzerinin elde edilmesi amacıyla uygulanmıştır. Böylece tavlama işleminden sonra TL okuması yapılan örneklerin nasıl bir kimyasal yapı değişikliğine uğradığının gözlenmesi amaçlanmıştır. Bu üç örnek analiz edilmek üzere Erciyes Üniversitesi (E.Ü.) Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi’ne gönderilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.1’de verilmektedir.

4.2.3. X-Işını Toz Kırınım Yöntemi (XRD)

Ametist kristallerinin fiziksel yapısının incelenmesi amacıyla Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde bulunan Bruker AXS D8 Advance model XRD cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.20). Bu cihazın yüksek gerilim jeneratörü 20kV-60kV ve 6mA-80mA aralığında olup ve bilgisayar kontrollü olarak çalışma özelliğine sahiptir. XRD analizi için yaklaşık her biri 1 gr ağırlığında olacak şekilde agat havanda ezilmiş ve 40 μ 'luk elek ile elenmiş 3 grup toz ametist örneği hazırlanmıştır. Bu üç gruba, ametistlerin farklı sıcaklıklarda nasıl bir fiziksel değişime uğradıklarını gözleyebilmek amacıyla, Bölüm 4.2.2'de bahsedilen tavlama işlemleri uygulanmıştır. Örnekler E.Ü. Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.2'de verilmektedir.



Şekil 4.19. Panalytical Axios Advanced model X-ışını Floresans Spektromesi



Şekil 4.20. Bruker AXS D8 Advance model XRD ölçüm cihazı

4.2.4. Tavlama Sıcaklığının ve Süresinin Belirlenmesi Deneyi

Tavlama sıcaklığının belirlenmesi deneyi dozimetre uygulamalarında oldukça önemli bir yere sahiptir. Uygun tavlama sıcaklığı ve süresinin bulunması iki açıdan önemlidir. Birincisi örneğin doğada oluştuğu andan itibaren biriktirdiği radyasyon dozunun silinmesidir. Örneğe laboratuvar ortamında verilen ve TL okuması sırasında tamamen boşalmayan derin tuzaklardaki dozun silinmesi de aynı açıdan bakıldığında önemlidir. İkincisi ise tavlama sonucu kristalde bulunan tuzakların yeniden düzenlenerek daha kararlı bir yapıya dönüşmesinin sağlanmasıdır. Bazı dozimetrik malzemeler karmaşık bir tavlama protokolü gerektirmektedir. Örneğin LiF:Mg,Ti (florid) kristali bunlardan biridir. Bu kristal yüksek tavlama sıcaklığının ardından düşük bir tavlama sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır. Burada yüksek tavlama sıcaklığı özellikle dozimetrik tuzaklarda bulunan ve istenmeyen dozun silinmesi için uygulanmaktadır. Düşük sıcaklık tavlama ise düşük sıcaklık tuzaklarının kararlı hale gelmesi ve bazen yeniden yapılanmalarını (onarılmalarını) sağlamaktadır. Bununla beraber bu tavlama dozimetrik tuzakların hassasiyetini arttırmak ve termal veya optiksel sönüm yolu ile TL şiddetindeki olası kayıpların önüne geçmek için uygulanmaktadır. Tuzak sayısını etkileyen bir diğer faktör de soğuma hızıdır ve bu

faktörün TL hassasiyeti üzerinde olumlu etkileri vardır (Furetta, 2003). Rocha ve arkadaşlarının (2003) ametist kristali üzerine yaptıkları çalışmada uygun tavlama sıcaklığı 300 °C’de 75 dakika olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada ametist örnekleri için en uygun tavlama sıcaklığı ve zamanının belirlenmesi amacıyla her biri 90-140 µ arasında ve yaklaşık 30 mg olacak şekilde tartılarak, kenarlıklı diskler üzerine düzgünce dağıtılarak hazırlanmış örnekler kullanılmıştır. Bu örnekler üçerli guruba ayrılmışlardır. Bu örnekler hem yüksek sıcaklık hem de düşük sıcaklık tavlama uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık tavlama olarak bu grupların her birine sırasıyla 250, 300, 350, 400, 450, 500 ve 550 °C’lik sıcaklıklarda 0.5, 1, 1.5, 2, 6, 12 ve 24 saatlik sürelerde tavlama protokolü uygulanmıştır. Düşük sıcaklık tavlama için de tüm örnekler yüksek sıcaklık tavlama sonrası takiben 80 °C’de 24 saatlik tavlama protokolü uygulanmıştır. Her iki tavlama sonrasında da örneklerin hızlı bir şekilde soğumaları amacıyla alüminyum blok üzerinde yarım saat soğutulmuşlardır. Bu işlemden sonra örnekler hiçbir radyasyon dozu verilmeden TL okumaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.3’te verilmektedir.

4.2.5. Işınlama Öncesi Tavlama Sıcaklığının TL Hassasiyetine Etkisi

Örneklerin ışınlama öncesi uygun tavlama sıcaklığında tavlama TL hassasiyetini etkilediği çeşitli yayınlarda bildirilmiştir (Yang ve ark., 1990; Chen ve ark., 1997). Bölüm 4.2.1’de de bahsedildiği gibi uygun sıcaklık ve sürede gerçekleştirilen tavlama işlemi tuzak yapısının daha kararlı hale gelmesini sağlamaktadır. Bu durum TL hassasiyetinin maksimum verimlilikte ve minimum standart sapmaya sahip olmasını sağlamaktadır. Fakat bazen örnek için bulunan uygun tavlama sıcaklığı TL hassasiyetinin maksimum seviyede olmasını sağlayacak değerde olmayabilir. Burada maksimum TL hassasiyeti, minimum standart sapma ve istenmeyen dozun tuzaklardan silinmesi şartlarının üçünü de en iyi şekilde sağlayacak tavlama sıcaklığı seçilmelidir (Furetta, 2003).

Bu çalışmada ışınlama öncesi tavlama sıcaklığının TL hassasiyetine etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla her biri 90-140µ arası elenmiş ve 30mg olacak şekilde

tartılarak kenarlıklı disklerle yerleştirilmiş örnekler kullanılmıştır. Bu örnekler her biri 3 adet olacak şekilde gruplara ayrılmıştır. Daha sonra bu gruplar sırasıyla 250, 300, 350, 400, 450, 500 ve 550 °C'lik sıcaklıklarda 0.5, 1, 1.5, 2, 6, 12 ve 24 saatlik sürelerde tavlama protokolü uygulanmıştır. Düşük sıcaklık tavlama için de tüm örneklere yüksek sıcaklık tavlama sonrası takiben 80 °C'de 24 saatlik tavlama protokolü uygulanmıştır. Her iki tavlama sonrasında da örneklerin hızlı bir şekilde soğumaları amacıyla alüminyum blok üzerinde yarım saat soğutulmuşlardır. Tavlama işleminden sonra tüm örneklere 200 Gy'lik beta dozu verilmiş ve sığ tuzakların etkisini azaltmak amacıyla 1 günlük beklemenin ardından TL okumaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.4'te verilmektedir.

4.2.6. TL Işıma Eğrilerinin İncelenmesi ve CGCD Yöntemi ile Ayrıştırılması

Bir dozimetrik malzeme incelenirken, elde edilen TL ışına eğrileri üst üste binmiş tepelerden oluşan karmaşık bir yapıya sahipse, bu malzemenin dozimetrik özelliklerinin tam olarak belirlenebilmesi, TL eğrilerinin başarılı bir şekilde ayrıştırılmasına bağlıdır. Böylece herhangi bir TL ışına eğrisindeki tepelerin tek bir tepeden mi yoksa üst üste binmiş birkaç tepeden mi oluştuğu ayrıştırma sonucu anlaşılabilir. Bu da ayrıştırılan tepelerden hangisinin dozimetrik tepeler olarak kullanılabileceğini belirlememize yardımcı olmaktadır.

Ametist örneklerinden elde edilen TL ışına eğrileri Bölüm 2.6.3'te anlatılan bilgisayar programları ile gerçekleştirilmiştir. TL eğrilerinin CGCD yöntemi ile analizi yapılmadan önce bu eğrilerin barındırdığı TL tepelerinin kinetik mertebesine karar verilmiştir. Bu sebeple örneklere tavlama sonrası 600 Gy ile 25 kGy arasında değişen beta dozları verilmiştir. Bu yöntem birinci dereceden kinetik ile ilgili uygulanan basit bir testtir (bkz. Bölüm 2.4.1). Teoriye göre birinci dereceden kinetik mertebesine sahip eğriler ($b=1$) için tepe sıcaklığı sadece ısıtma oranının artması ile değişmektedir (McKeever, 1985). Böylece sabit 2 °C/s ısıtma oranı kullanılarak elde edilen eğrilerinin diğer deneysel parametrelerden etkilenmemesi ve T_{max} değerinin deneysel hata sınırları içerisinde sabit kalması beklenmektedir. Buna karşın $b \neq 1$ için ve sabit ısıtma oranı kullanılarak elde edilen TL ışına eğrilerinin T_{max} değerlerinin

verilen radyasyon dozunun arttırılması ile birlikte düşük sıcaklık tarafına doğru kayması söz konusudur. Böylece, elde edilen TL eğrilerinin tepe sıcaklıklarının dozun artışına bağlı olarak değişip değişmediği incelenmiştir. Elde edilen TL eğrileri incelendiğinde tepe sıcaklıklarında gözlenen kaymanın \pm %5'lik hata sınırları içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Sonuçta TL tepelerinin birinci derece kinetiğe sahip olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.5'te verilmektedir.

Ametist kristallerinin kinetik mertebesine karar verildikten sonra analiz için örnekler iki gruba ayrılmışlardır. Birinci grupta herhangi bir tavlama işlemine tutulmamış doğal ametist örneklerinden elde edilen TL ışım eğrileri kullanılmıştır. İkinci grupta ise tavlama sonrası 200 Gy ile 2 kGy beta dozu verilmiş örnekler kullanılmıştır. TL okuması sırasında ısıtma oranı olarak 2 °C/s kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Bölüm 5.5'te verilmiştir.

4.2.7. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması

Tuzak parametrelerinin hesaplanmasında iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi CGCD yöntemi, ikincisi ise farklı ısıtma oranları yöntemi ile E ve s değerlerinin hesaplanmasıdır.

4.2.7.1. CGCD Yöntemi ile E ve s Değerlerinin Hesaplanması

CGCD yöntemi kullanılarak TL eğrilerinden E ve s 'nin bulunmasında Bölüm 2.6.3'te anlatılan programlar kullanılmıştır. Ametist örneklerinin E ve s değerlerinin CGCD yöntemi ile hesaplanması amacıyla 90-140 μ arası elenmiş ve 30 mg olarak tartılarak kenarlıklı disklerle yerleştirilmiş toz ametist kristalleri kullanılmıştır. Bu örneklere 200 Gy beta dozu verilmiş ve 2 °C/s ısıtma oranı kullanılarak TL ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen TL ışım eğrileri CGCD yöntemi ile ayrıştırılarak E ve s değerleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.6.1'de verilmektedir.

4.2.7.2. Farklı Isıtma Hızları Yönteminin Kullanımı İle E ve s Değerlerinin Hesaplanması

Farklı ısıtma oranları metodu ile E ve s değerlerinin hesaplanması ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 2.6.5'te verilmiştir. Bu metot ile E ve s değerlerinin hesaplanması amacıyla 90-140 μ arası elenmiş ve 30 mg olarak tartılarak kenarlıklı disklerle yerleştirilmiş toz ametist kristalleri kullanılmıştır. Örnekler deneyden önce tavlansak tuzaklarda bulunan doğal radyasyon dozunun silinmesi sağlanmıştır. Ardından örneklere 200 Gy'lik beta dozu verilerek her biri sırasıyla 1, 2, 4, 6 ve 10 °C/s'lik ısıtma oranları kullanılarak TL ışınma eğrileri kaydedilmiştir. Deneyde kullanılan doz miktarı Şekil 5.33'te verilen lineer doz aralığı içerisinde seçilmiştir. Sonuçta elde edilen E ve s değerleri Bölüm 5.6.2'de verilmektedir.

4.2.8. Doz Cevabı

Bölüm 2.7'de belirtildiği gibi iyi bir dozimetrik malzemenin geniş bir doz aralığında lineer bir doz cevap eğrisine sahip olması beklenir. Bu yüzden ametist kristallerinin hangi doz aralığında lineer bir doz cevap eğrisine sahip olduğunu bulmak, ametistin dozimetrik malzeme olarak kullanımında çok önemli bir yer tutmaktadır.

Doğal ametist kristalinin hangi bölgede lineer doz cevap eğrisine sahip olduğunu belirlenmesi amacıyla 90–140 μ arası elenmiş ve ~30 mg olacak şekilde tartılarak hazırlanmış örnekler kullanılmıştır. Bu örnekler kenarlıklı disklerin içerisine homojen bir şekilde yayılarak, ışınlama sırasında diskin her noktasındaki kristallerin aynı dozu almaları sağlanmıştır. Örneklerin homojen şekilde disklerle yayılması aynı zamanda, TL okuması sırasında örneğin tamamının aynı miktarda ısınmasını sağlayarak daha hassas bir ölçüm alınmasını sağlamaktadır.

Örnekler tavlama işleminden sonra kararlı tuzak dengesine ulaşmaları için 1 gün bekletilmişlerdir. Bu şekilde hazırlanan örneklere bölüm 4.1.2.1'de bahsedilen Risø TL/OSL cihazındaki standart beta kaynağı kullanılarak sırasıyla 1, 2, 6, 10, 20, 40, 60, 100, 200, 400 ve 600 Gy ile 1, 2, 4, 6, 10, 15 ve 25 kGy'lik dozlar verilmiştir.

Işınlama işleminden sonra örnekler 24 saat bekletilmiş ve ardından TL ve fon sinyalleri kaydedilmiştir.

4.2.9. Enerji Cevabı

Bölüm 4.2.8’de bahsedilen işlemler aynı zamanda örneklerin gama ışınlarına karşı tepkilerinin incelenmesi amacıyla tekrarlanmıştır. Gama kaynağı olarak Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Balcalı Hastanesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı’nda bulunan ve Bölüm 4.1.2.1’de anlatılan ⁶⁰Co kaynağı kullanılmıştır. Gama kaynağının kullanılmasıyla ametist örneklerine sırasıyla 10, 100, 300, 600 Gy ile 1 kGy’lik dozlar verilmiştir. Gama dozu verildikten sonra her örnek için 24 saat’lik sabit bir beklemenin ardından TL ve fon sinyalleri okunmuştur. Bu her iki deneyde de ısıtma oranı olarak 2 °C/s değeri kullanılmıştır. İlgili sonuçlar Bölüm 5.7’de verilmektedir.

4.2.10. Tekrar Kullanılabilirlik

Doğal ametist örneklerinin verilen radyasyon dozuna karşı her seferinde aynı hassasiyetle cevap vermesi önemlidir. Çünkü dozimetre uygulamalarında aynı dozimetrenin tekrar tekrar kullanılabilirliği aranılan bir özelliktir.

Doğal ametist örneklerinin tekrarlanabilirlik testi için 90-140 µ arası elenmiş ve ~30 mg olacak şekilde tartılmış toz ametist örneklerinden 3 adet hazırlanmıştır. Bu örnekler deneyden önce tavlanaarak barındırdıkları doğal radyasyon dozunun silinmesi sağlanmıştır. Ardından bu örnekler 100 Gy’lik beta dozu verilmiş ve TL ışınma eğrileri ile fon sinyalleri okunmuştur. Her TL okumasından sonra örnekler yeniden standart tavlama prosedürü kullanılarak tavlanamıştır. Bu işlem aynı örnekler için 10 defa uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.9’da verilmektedir.

4.2.11. Yüksek Dozun Ametistin TL Hassasiyetine Etkisi

Dozimetrik çalışmalarda incelenmesi gereken bir diğer konu da yüksek dozun TL hassasiyetine etkisidir. Bölüm 2.2’de anlatıldığı gibi örneğin maruz kaldığı yüksek orandaki radyasyon dozu malzeme içerisinde yeni kusurların oluşmasına ve bu sebeple tuzak sayısında artışa yol açmaktadır. Dolayısıyla örneklerin yüksek dozlara maruz kalmaları genellikle TL hassasiyetinde artışa neden olmaktadır.

Ametist kristallerinin yüksek bir doz ile ışınlanmalarının ardından TL hassasiyetinde nasıl bir değişim meydana geleceğini incelemek amacıyla üç adet ametist örneği hazırlanmıştır. Bu örneklerle öncelikle tavlama sonrası 20 Gy’lik düşük bir beta dozu verilmiş ve TL ışınma eğrisi kaydedilmiştir. Daha sonra örneklerle tavlamanın ardından yüksek doz değeri olarak seçilen 5 kGy’lik beta dozu verilmiştir. Son olarak yine tavlamanın ardından ikinci düşük doz değeri olan 20 Gy’lik beta dozu verilerek TL ışınma eğrileri kaydedilmiştir. Sonuçta ilk elde edilen tepe yüksekliği ile son elde edilen tepe yüksekliği oranlanarak TL hassasiyetindeki değişim miktarı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.10’da verilmektedir.

4.2.12. Anormal Sönüm

Anormal sönüm (başka bir deyişle ısısal olmayan sönüm), düşük sıcaklıklardaki saklama koşullarında bile TL sinyalinin görünür bir şekilde azalması ile kendini belli eden bir olaydır. Anormal sönümün sebebi olarak iki önemli faktör gösterilebilir. Bunlardan birincisi kuantum mekaniksel tünelleme yolu ile tuzaklanmış elektronların yeniden birleşme merkezlerine doğrudan geçmeleri olayıdır (Visocekas ve ark., 1976). İkincisi ise tuzakları oluşturan bazı iyonların kristalden difüzyon yolu ile uzaklaşmalarıdır (Templer, 1986).

Tuzaklanmış bir elektronun normal şartlarda, bulunduğu tuzaktan oda sıcaklığında kurtulma olasılığı çok düşüktür. Örgü titreşiminin ortalama enerjisi düşük sıcaklıklarda çok küçüktür fakat bazen bu örgü titreşiminde normalin üstünde rastlantısal bir artış meydana gelir ve bu durum elektronun tuzaktan kurtulmasıyla

sonuçlanır (Aitken, 1985). Sabit bir sıcaklıkta saklanan bir örnekte bulunan tuzaklanmış bir elektronun bulunduğu tuzaktaki yaşam süresi;

$$t = s^{-1} \exp(E/kT) \quad (4.1)$$

denklemini ile verilebilmektedir. Burada s frekans faktörü, E aktivasyon enerjisi, k Boltzmann sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Bir elektronun yaşam süresinin frekans faktörüyle ters, aktivasyon enerjisiyle de doğru orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca saklama sıcaklığı da yaşam süresini oldukça fazla etkilemektedir. (Aitken, 1985).

Doğal ametist örneklerinin almış oldukları radyasyon dozundan ileri gelen TL sinyallerinin, düşük sıcaklıklardaki saklama koşullarında zaman geçtikçe azalıp azalmayacağını anlamak için 90-140 μ arası elenerek hazırlanmış ve 30 mg olarak tartılmış toz örnekler kullanılmıştır. Öncelikle örnekler aynı koşullarda belirlenen standart tavlama sıcaklığında tavlansak doğal radyasyon dozunun silinmesi sağlanmıştır. Daha sonra tüm örneklere lineer doz cevap aralığında bulunan 100 Gy'lik beta dozu verilmiştir. İlk örneğin TL okuması doz verilmesinin hemen ardından gerçekleştirilmiştir. Diğer örneklerin TL okumaları ise sırasıyla 1, 6, 24, 48 saat ile 7 ve 25 günlük beklemenin arkasından yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.11'de verilmektedir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. X-Işını Floresans Yöntemiyle Analizler (XRF)

Ametist örneklerinin, kimyasal yapısının anlaşılması ve örnek içerisinde farklı minerallerin bulunup bulunmadığının belirlenmesi amacıyla, XRF analizleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde yaptırılmıştır. Örnekler Bölüm 4.2.2'de anlatıldığı şekilde hazırlanmıştır. Böylece farklı sıcaklıklara maruz kalan ametistlerin kimyasal yapısının sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış ametist örneklerine ait XRF sonuçları

	1. örnek	2. örnek	3. örnek
	Tavlınmamış	450 °C 90 dakika + 80 °C 24 h tavlama	450 °C 90 dakika + 80 °C 24 h + 700 °C 4 dakika tavlama
İsim	(%) Miktar	(%) Miktar	(%) Miktar
SiO ₂	97.814 ± 0.100	98.870 ± 0.100	99.311 ± 0.100
Fe ₂ O ₃	0.296 ± 0.004	0.328 ± 0.004	0.287 ± 0.003
SO ₃	0.846 ± 0.009	0.303 ± 0.005	0.137 ± 0.003
Al ₂ O ₃	0.158 ± 0.004	0.108 ± 0.003	0.061 ± 0.002
MgO	0.273 ± 0.003	0.106 ± 0.002	0.049 ± 0.001
Cr ₂ O ₃	0.072 ± 0.002	0.065 ± 0.002	0.063 ± 0.002
CaO	0.060 ± 0.002	0.034 ± 0.002	0.022 ± 0.001
Sb ₂ O ₃	0.011 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.016 ± 0.001
Ga ₂ O ₃	0.005 ± 0.001	0.004 ± 0.001	0.004 ± 0.001
PbO	0.005 ± 0.001	0.006 ± 0.001	-

Tablo 5.1'de görüldüğü gibi ametist kristalinin kimyasal yapısının tavlama sıcaklığına bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir. Özellikle SiO₂ bileşiğinin kristal içerisindeki yüzde oranı tavlama sıcaklığının artmasıyla artmaktadır. Kristal içerisindeki SiO₂ bileşiğinin yüzdesindeki bu artış, kristalin içerisindeki diğer

bileşiklerin miktarının yüzdece azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu azalma ametist kristalinde bulunan ve içerisinde oksijen barındıran safsızlık bileşiklerinin yüksek sıcaklıklarda buharlaşarak difüzyon yoluyla kristalden uzaklaşmalarıyla gerçekleşmektedir.

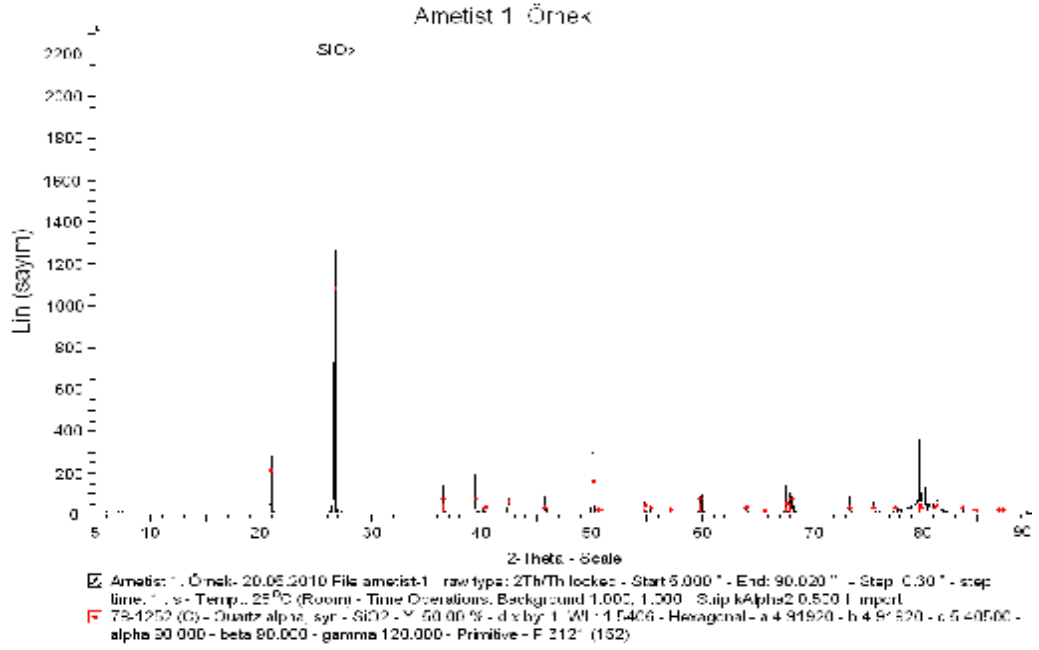
Sonuç olarak ametist kristalinin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla daha kusursuz bir kristal yapıya büründüğü söylenebilir. Bu da kristal içerisindeki safsızlıkların ve dolayısıyla tuzak sayısının azalmasına yol açar. Tuzak sayısındaki azalma da TL hassasiyetinin düşmesine neden olacaktır. Bölüm 5.4'te elde edilen sonuçlar tavlama sıcaklığının artmasıyla TL hassasiyetinin düştüğünü deneysel olarak göstermektedir.

5.2. X-Işını Toz Kırınım Yöntemiyle Analizler (XRD)

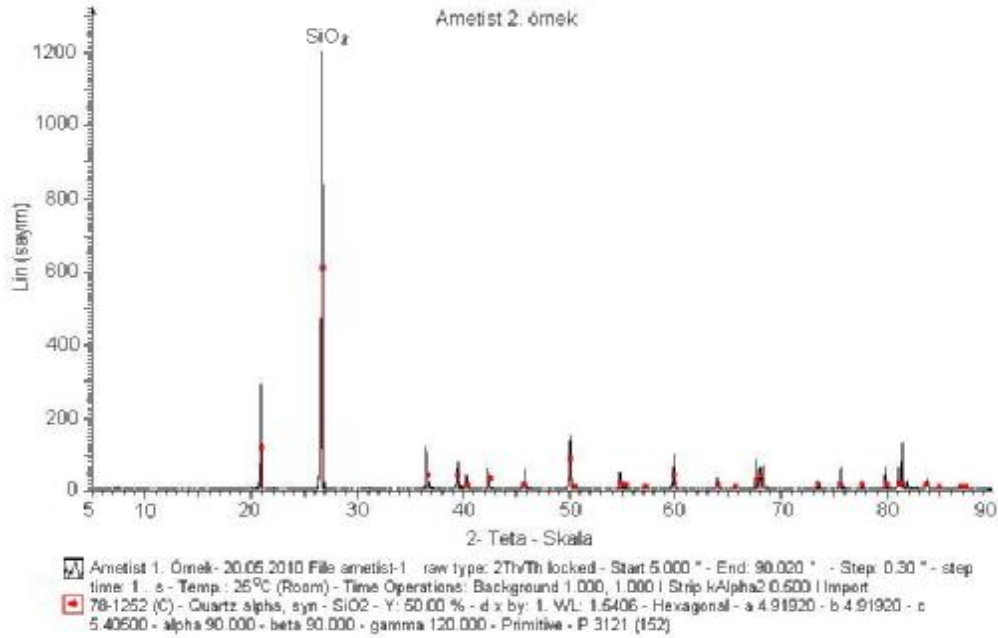
Ametist kristallerinin fiziksel yapısının incelenmesi amacıyla Bölüm 4.2.3'te bahsedildiği şekilde hazırlanan 3 grup örneğin Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde XRD analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmektedir.

Grafikler incelendiğinde SiO₂ bileşiğinden elde edilen sayımın 450 °C'de 90 dakika tavllanmış örnek için (Şekil 5.2.) belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum 2. örneğin 450 °C'ye maruz kalmasına bağlı olarak kristal yapısının bozulduğunu göstermektedir. 3. Örneğin 2. örneğe ek olarak 700 °C'ye kadar ısıtılması sonucu kristal yapısının yeniden düzenlenerek daha mükemmel bir yapıya dönüştüğü görülmektedir (Şekil 5.3).

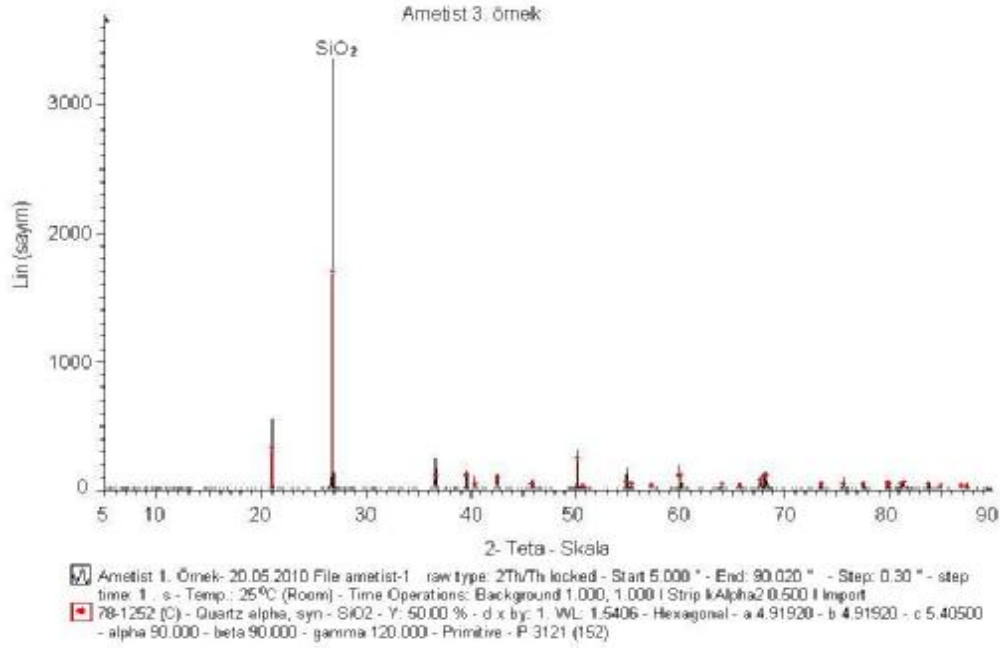
Sonuç olarak, ametist örneklerinin maruz kaldığı yüksek sıcaklık değeri örneğin mükemmel bir kristal yapısına doğru değişim göstermesine yol açmıştır. Bölüm 5.1'de elde edilen sonuca paralel olarak XRD analizi sonucunda kristalin içerisindeki safsızlıkların ve dolayısıyla tuzakların azaldığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak da yüksek sıcaklığa maruz kalmış örneklerin hiç tavlannamış örneklere kıyasla TL hassasiyetinin düşmesi beklenmektedir. Bunlara ek olarak elde edilen XRD sonuçları ametist kristallerinin hekzagonal yapıda oluşunu göstermiştir. Kristalin birim hücre parametreleri ile ilgili bilgi Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tavlanmamış ametist örneği kullanılarak elde edilen XRD analiz sonucu



Şekil 5.2. 450 °C'de 90 dakika tavlanmış örneğine ait XRD analiz sonucu



Şekil 5.3. 450 °C’de 90 dakika ve 700 °C’de 4 dakika tavllanmış ametist örneğine ait XRD analiz sonucu

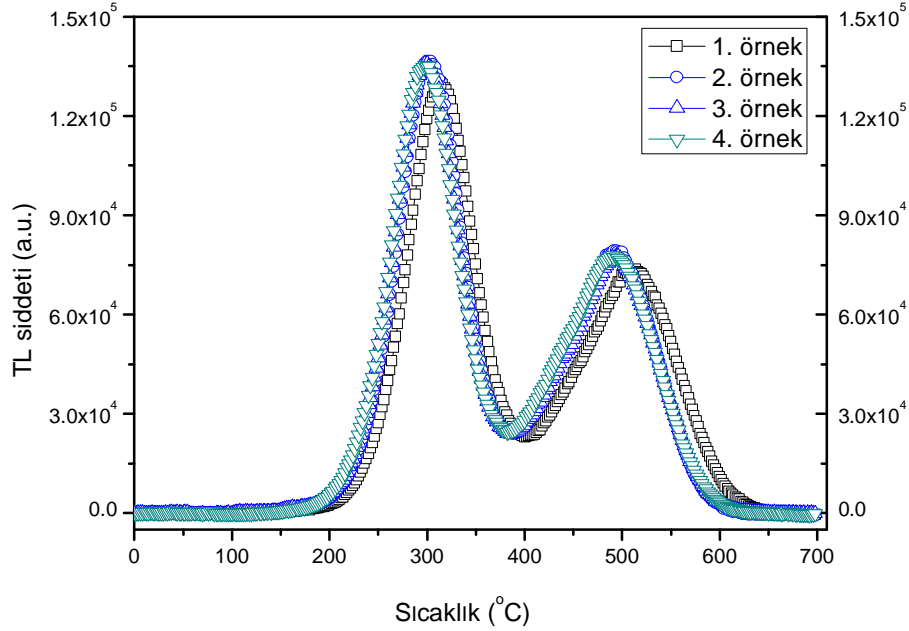
Tablo 5.2. Ametist örneklerinin kristal birim hücre parametreleri ile ilgili XRD analizi sonuçları

Bileşiğin Numarası	PDF No	Cu Tüp / Dalgaboyu	Bileşiğin İsmi	Bileşiğin Kapalı Formülü	Kristal Sistemi	Z*	Bravais Örgüsü
1	78-1252	1.5406 Angstrom	Kuars alfa, syn	SiO ₂	Hekzagonal	3	Primitive
Birim Hücre Parametreleri							
a	b	c	Alfa	beta	gama		
4.91920	4.91920	5.40500	90.000	90.000	120.000		

5.3. Tavlama Sıcaklığının ve Süresinin Belirlenmesi Deneyi Sonuçları

Doğal ametist örnekleri birçok kristal parçasının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Şekil 4.18). Bu kristal parçaları hem kendi içerisinde hem de diğer parçalar arasında renk dağılımı açısından farklılıklar göstermektedir. Ametist örneklerinde renklenmeye sebep olan az miktardaki demirin yanısıra manganez ve antumuan varlığı ile maruz kalınan radyasyonun da etkili olduğu birçok araştırmacı tarafından belirtilmektedir (Gürbüz, 2007). Bu kristal parçalarının kendi içerisinde ve diğer parçalar arasında gösterdiği bu renk çeşitliliğinden dolayı, farklı renklenmeye sebep olan safsızlık iyonu konsantrasyonunun kristal içerisinde homojen olarak dağılmadığı söylenebilir. Böylece ametist örneklerinin içerisinde bulunan tuzakların kristal örgü içerisindeki dağılımının da homojen olmadığı sonucuna varılmıştır. İşte tuzak yapısındaki bu homojen olmayan dağılımın deney sonuçlarını mümkün olan en az seviyede etkilemesini sağlamak amacıyla, ametist kristalleri agat havanda ezilerek toz haline getirilmiş ve elde edilen karışımın daha homojen bir dağılıma sahip olması sağlanmıştır. Fakat bu homojenliğin yüzde yüz oranda başarısız olduğu yapılan deneylerden görülmüştür. Dolayısıyla tuzak dağılımındaki farklılıklardan dolayı ölçümlerde az da olsa sapmalar gözlenmiştir.

Şekil 5.4'te herhangi bir tavlama işlemi uygulanmadan 90-140 µ arası elenmiş ve ~30 mg civarında tartılarak kenarlıklı disklere düzgünce yerleştirilmiş toz ametist kristalleri kullanılarak elde edilen doğal TL ışımaya eğrileri yer almaktadır. Şekildeki grafik incelendiğinde doğal TL eğrilerinin ilk bakışta 300 °C ve 500 °C civarında iki tepeden oluştuğu görülmektedir. Fakat aynı şartlarda hazırlanmış bu dört örnekten elde edilen TL tepelerinin sıcaklıkları incelendiğinde aralarında %5 civarında sapma olduğu gözlenmiştir. Tepe sıcaklıkları arasındaki bu sapmanın sebeplerinden birinin, yukarıda bahsedildiği gibi her bir disk içerisinde bulunan kristal taneciklerinin tuzak dağılımının tamamen aynı olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



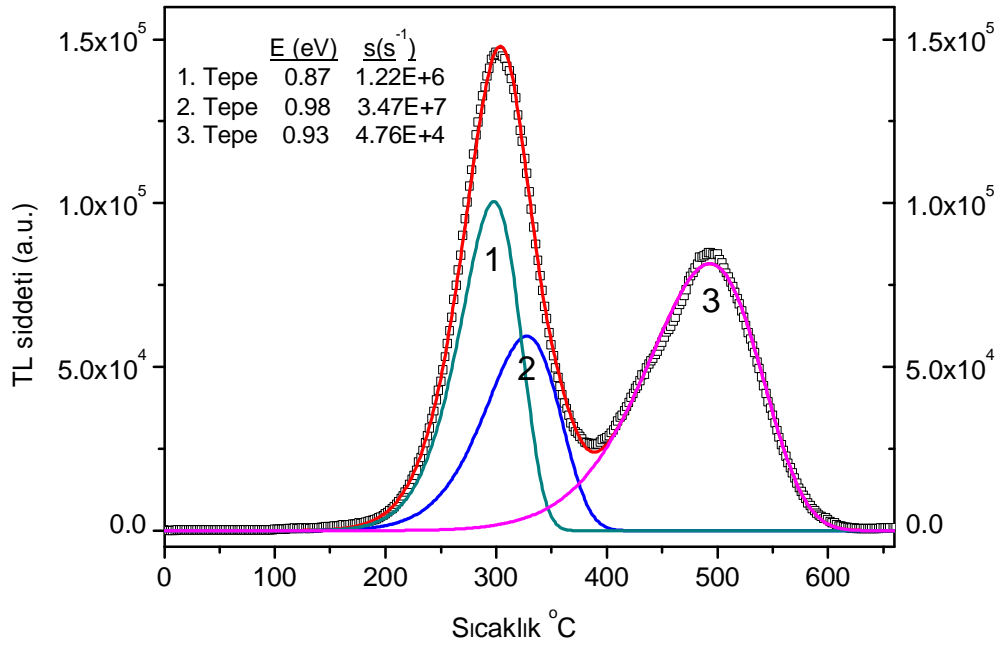
Şekil 5.4. Tavlanmamış ametist örneklerine ait doğal TL ışımaya eğrileri

Tepe sıcaklıkları arasındaki sapmanın bir diğer sebebi de Bölüm 2.6.5'te bahsedildiği gibi TL okuması sırasında örneğin ısıtılması sürecinde, örneğin sahip olması gereken sıcaklık değeri ile gerçekte sahip olduğu değer arasındaki fark olabilir. Başka bir deyişle, deneyler sırasında ölçülen sıcaklık ile örnek sıcaklığı, örnek ile ısıtıcı çubuk arasındaki temasın kalitesine göre değişkenlik gösteren termal gecikmeye bağlı olarak, birbirinden farklı olabilmektedir (Gorbics ve ark., 1968). Bu yüzden örnekte termal gecikmeyle beraber sıcaklıkta lineer bir artış meydana gelir ve böylece ışımaya eğrisinden okunan T_m değeri gerçek değerinden sistematik olarak düşük olur. Literatürde, özellikle yüksek ısıtma hızları için, örnek kalınlığının ve örnek ile ısıtıcı arasındaki temasın kalitesinin olası termal gecikme üzerinde önemli etkileri olduğu bildirilmiştir (Kıyak ve ark., 2002). Dolayısıyla ametist örneklerinden elde edilen doğal TL tepelerinin sıcaklıkları arasındaki sapma, örneğin yerleştirildiği kenarlıklı disk ile ısıtıcı çubuk arasındaki temasın kalitesinden ve toz ametist kristallerinin kenarlıklı disk tabanındaki homojen olmayan dağılımından kaynaklanıyor olabilir. Her ne kadar toz kristal örneklerinin kenarlıklı disk tabanına

homojen bir şekilde yayılmasına dikkat edilmiş olsa da örneklerin tartılması, taşınması ve TL cihazı içerisindeki hareketi sırasında bu homojenliğin az da olsa bozulması olasıdır.

Ametist örneklerinde elde edilen Şekil 5.4'te verilen TL ışıma eğrileri CGCD yöntemi (Bölüm 2.6.3) ile analiz edilerek TL tepelerinin tek bir tepeden mi yoksa üst üste binmiş birkaç tepeden mi oluştuğu incelenmiştir. Elde edilen analiz sonucu Şekil 5.5'te verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi doğal TL ışıma eğrisi 300, 330 ve 500 °C civarında tepe sıcaklığına sahip üç tepeden oluşmaktadır. Şekilde ayrıca bu tepelere ait E ve s değerleri de yer almaktadır. CGCD yöntemi ile ışıma eğrilerinin analizi sırasında eğrilerin kinetik mertebelerinin programa girilmesi gerekmektedir. Şekilde elde edilen tepeler, kinetik mertebe değeri $b=1$ seçilerek elde edilmiştir. Başka bir ifadeyle, doğal TL tepelerin analizi sonucu elde edilen tepeler birinci dereceden kinetik mertebeye sahiptir. Bu sonucun doğruluğu ileriki bölümlerde deneysel olarak da gösterilmiştir (Bölüm 5.5).

Bilgisayar programı tarafından elde edilen eğriler ile deneysel sonuçların iyi bir şekilde yaklaştırıldığı ölçütü olan değer katsayısı (Figure of Merit (FOM)) değeri bize analiz sonucunun kalitesi ile ilgili bilgi vermektedir. FOM değeri %0.0 ile %2.5 arasında ise eğri iyi fit edilmiştir, %2.5 ile %3.5 arasında ise fit doğrudur ve >3.5 ise fit kötüdür denilebilir (Mahesh ve ark., 1989; Hsu ve ark., 1986). Fakat bu değerler doğru sayıda tepe kullanılarak yapılan analizler için geçerlidir. Çünkü kullanılan tepe sayısı arttıkça FOM değeri düşmektedir. Bu sebeple TL eğrisinin altında kalan tepelerin sayısının doğru bir şekilde belirlenmesi de çok önemlidir. Bu çalışmada doğal TL ışıma eğrilerinin analizi sonucunun elde edilen FOM (Figure of Merit) değeri %2.34'tür. Bu değer analizin sonucunun doğru bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

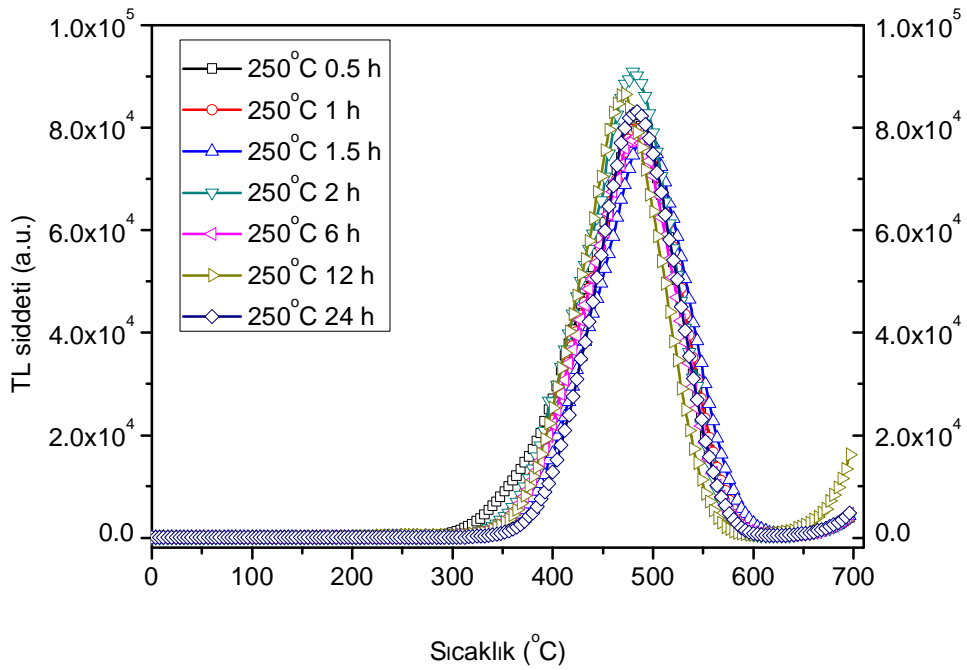


Şekil 5.5. Tavlanmamış ametist örneklerinden elde edilen doğal TL ışımaya eğrilerinin CGCD yöntemi ile analiz sonuçları

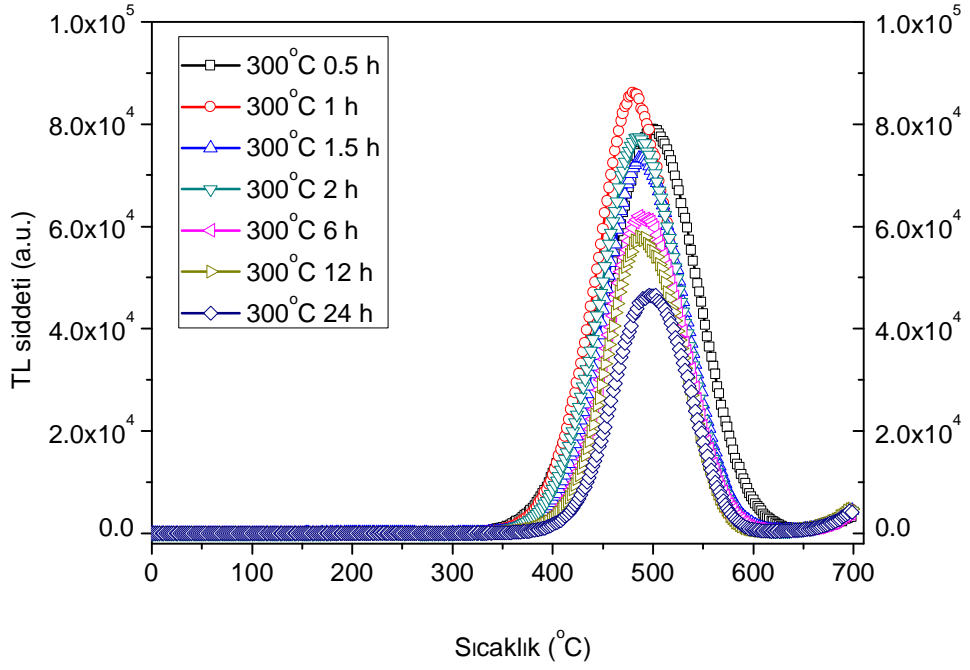
Doğal dozimetrik malzemeler oluştuğları andan itibaren, doğada bulunan Toryum ve Uranyum gibi iyonize radyasyon kaynaklarından dolayı, sürekli olarak belli bir radyasyon dozuna maruz kalırlar. Bu radyasyon dozundan dolayı valans bandındaki elektronlar uyarılarak kristalin örgüsü içerisindeki tuzaklarda tuzaklanmaya başlarlar. Böylece tuzaklanmış elektron popülasyonu gün geçtikçe artmaya başlar. Eğer materyal oluştuğu andan günümüze kadar geçen süre zarfında yüksek bir sıcaklığa maruz kalmamışsa, tuzaklanmış elektron miktarı cinsinden depolanan radyasyon enerjisi günümüze kadar artan bir oranda saklanabilmektedir (Aitken, 1985). Bu sebeple, ametistlerin dozimetrik özelliklerinin incelenmesi çalışmalarında sağlıklı sonuç elde edilebilmesi bu istenmeyen dozun tamamen silinmesine bağlıdır. Aksi halde laboratuvar koşullarında verilen yapay radyasyon dozu geçmişten kalan radyasyon dozu ile birleşerek hatalı sonuçlar elde etmemize yol açmaktadır.

Doğal ametist örneklerinde bulunan ve geçmişten kalan birikmiş radyasyon dozu sebebiyle gözlenen TL şiddetinin hangi sıcaklık ve sürede tamamen

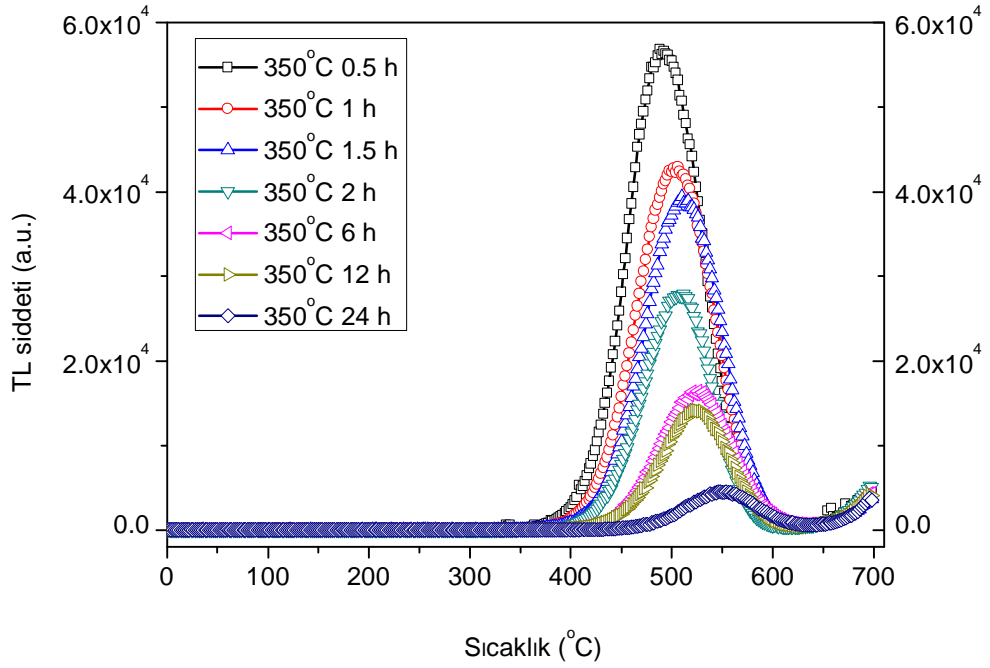
silinebildiğini anlamak amacıyla Bölüm 4.2.4'te anlatıldığı şekilde örnekler hazırlanmış ve tavlama protokolü uygulanmıştır. Tavlama protokolü hem yüksek sıcaklık tavlamasını hem de düşük sıcaklık tavlamasını içermektedir. Yüksek sıcaklık tavlamasının değeri farklı süreler için değiştirilirken düşük sıcaklık tavlamasının değeri 80 °C'de 24 saat olacak şekilde sabit tutulmuştur. Böylece 90-140 µ arası elenmiş ve ~30 mg olacak şekilde tartılmış toz ametist kristallerinin farklı sıcaklık ve süreler için tavlama ile aşağıdaki ışımaya eğrileri elde edilmiştir.



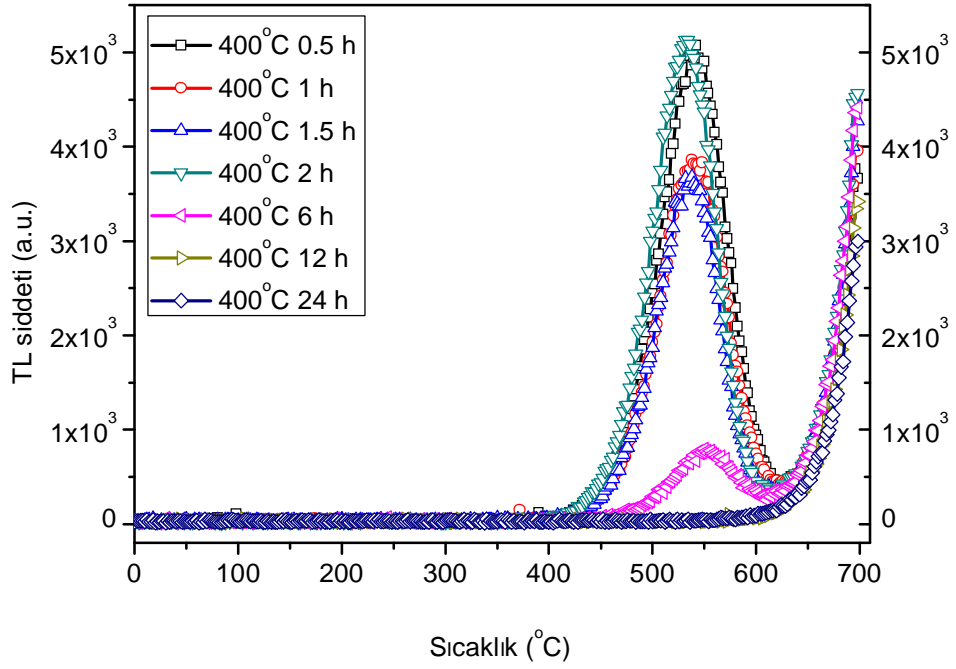
Şekil 5.6. Farklı sürelerde 250 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışıma eğrileri



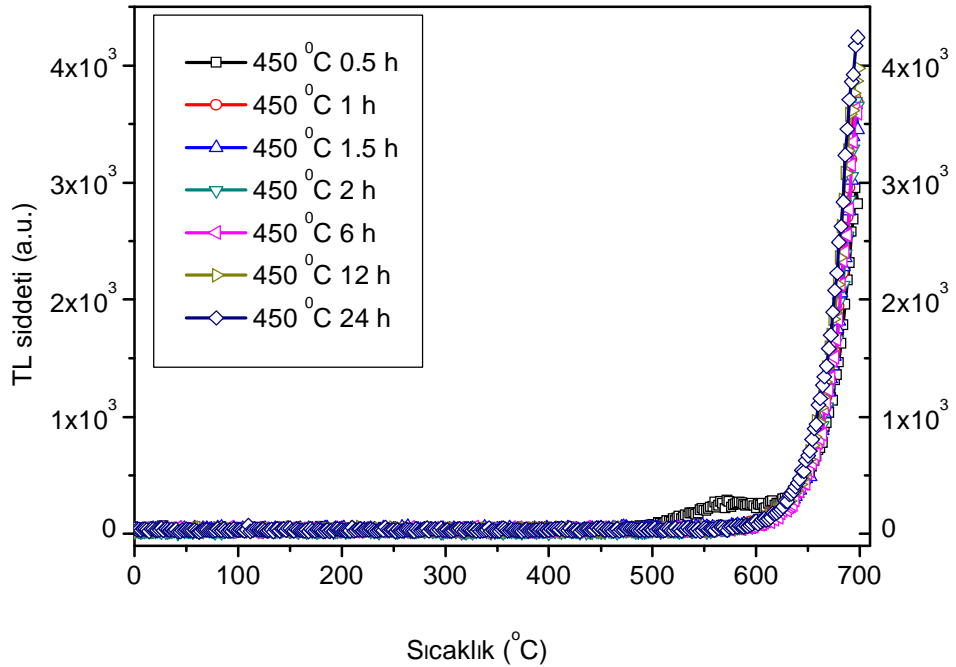
Şekil 5.7. Farklı sürelerde 300 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri



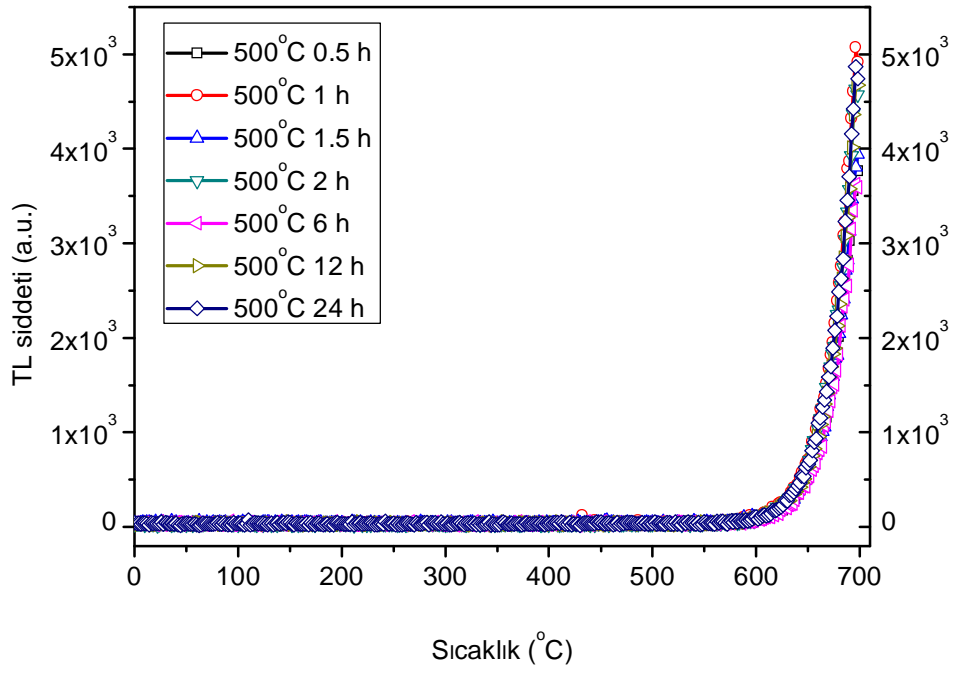
Şekil 5.8. Farklı sürelerde 350 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışımaya eğrileri



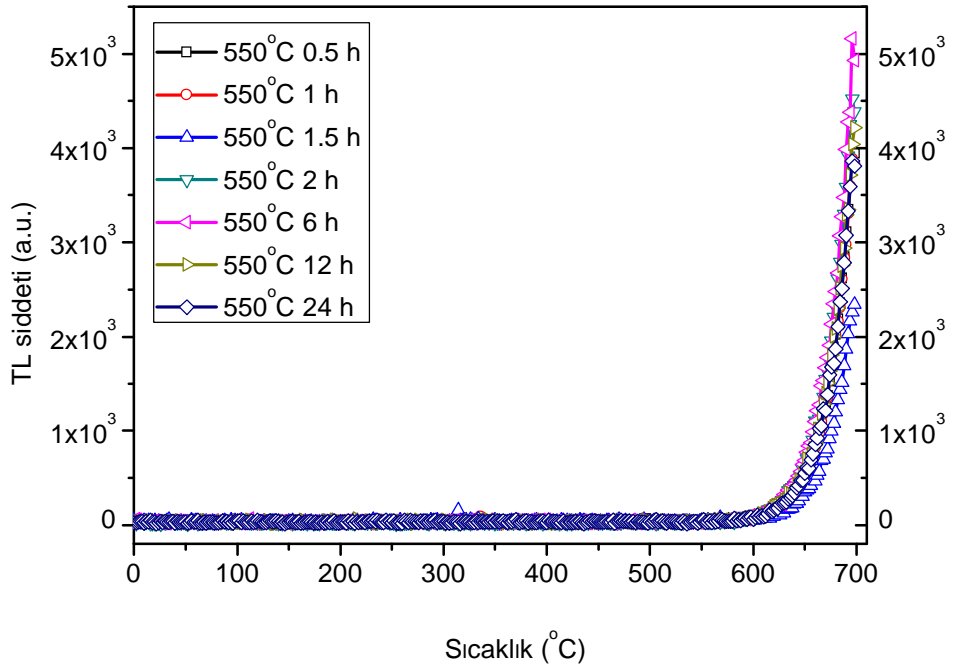
Şekil 5.9. Farklı sürelerde 400 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışıma eğrileri



Şekil 5.10. Farklı sürelerde 450 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışıma eğrileri



Şekil 5.11. Farklı sürelerde 500 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışıma eğrileri



Şekil 5.12. Farklı sürelerde 550 °C tavllanmış ametist örneklerine ait TL ışıma eğrileri

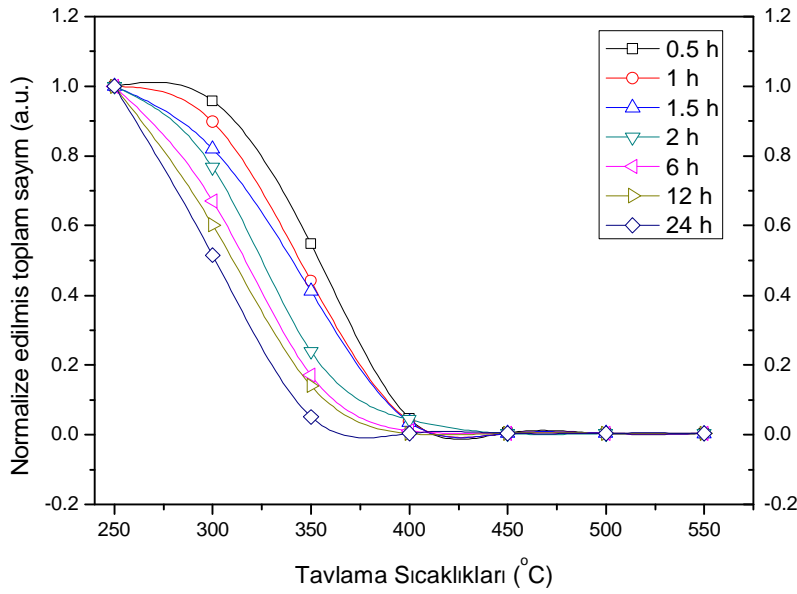
Şekil 5.6'dan Şekil 5.12'ye kadar elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi tavlama sıcaklığı ve süresi arttıkça ametist örneklerinden elde edilen doğal TL ışımaya eğrilerinin şiddetinde azalma meydana gelmektedir. Şekil 5.5'te verilen TL ışımaya eğrisindeki 1. ve 2. tepenin, Şekil 5.6'da gösterildiği gibi, 250 °C'de 1 saat tavlama sonrasında tamamen silindiği gözlenmiştir. Fakat 3. tepenin tamamen silinebilmesi için ametist örneklerinin en az 450 °C'de 90 dakika tavlama gerekmektedir (Şekil 5.10). Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de de görüldüğü farklı sürelerde 500 ve 550 °C tavlama örneklerinde de fon sinyalleri dışında bir sinyale rastlanmamıştır. Böylece, ametist örneklerinin geçmişte maruz kaldığı radyasyon enerjisi sebebiyle tuzaklanmış elektronlardan ileri gelen doğal TL ışımaya eğrilerinin tamamen silinebilmesi için gereken en düşük tavlama sıcaklığı ve süresinin 450 °C 90 dakika olduğu belirlenmiştir. Bölüm 4.2.4'te de bahsedildiği gibi kristal içerisindeki tuzakların daha kararlı hale gelmesini ve yeniden düzenlenmesini sağlamak amacıyla uygulanan düşük tavlama sıcaklığı ise 80 °C 24 saattir.

Ametist kristallerinin farklı sıcaklık ve süreler için tavlama ile elde edilen TL ışımaya eğrileri kullanılarak Şekil 5.13'te gösterilen grafik elde edilmiştir. Grafikte farklı tavlama sıcaklıklarına karşılık TL şiddetindeki değişim açıkça görülebilmektedir. Dikey eksenlerdeki veriler, farklı tavlama sıcaklıkları ve süreleri için elde edilen TL ışımaya eğrilerinin altında kalan toplam alanın normalize edilmesiyle hesaplanmıştır. Sonuç olarak ametist örneklerinde bulunan ve örneklerin daha önce uğurdukları radyasyon nedeniyle tuzaklanan elektronlar 450 °C'de 90 dakika ve 80 °C'de 24 saat tavlama sonucunda tuzaklardan tamamen boşalmaktadır.

5.4. Işınlama Öncesi Tavlama Sıcaklığının TL Hassasiyetine Etkisi Sonuçları

Örneklerin ışınlama öncesi uygun tavlama sıcaklığında tavlama ile TL hassasiyetini etkilediği çeşitli yayınlarda bildirilmiştir (Yang ve ark., 1990; Chen ve ark., 1997). Bölüm 4.2.1'de de bahsedildiği gibi uygun sıcaklık ve sürede gerçekleştirilen tavlama işlemi tuzak yapısının daha kararlı hale gelmesini sağlamaktadır. Bir dozimetrik malzemedeki beklenen TL hassasiyetinin maksimum verimlilikte ve minimum standart sapmaya sahip olmasıdır. Bu da uygun tavlama

sıcaklığının ve süresinin seçilmesiyle mümkündür. Fakat bazen örnek için bulunan uygun tavlama sıcaklığı TL hassasiyetinin maksimum seviyede olmasını sağlayacak değerde olmayabilir. Dolayısıyla maksimum TL hassasiyeti, minimum standart sapma ve istenmeyen dozların tuzaklardan silinmesi şartlarının üçünü de en iyi şekilde sağlayacak tavlama sıcaklığı seçilmelidir (Furetta, 2003).



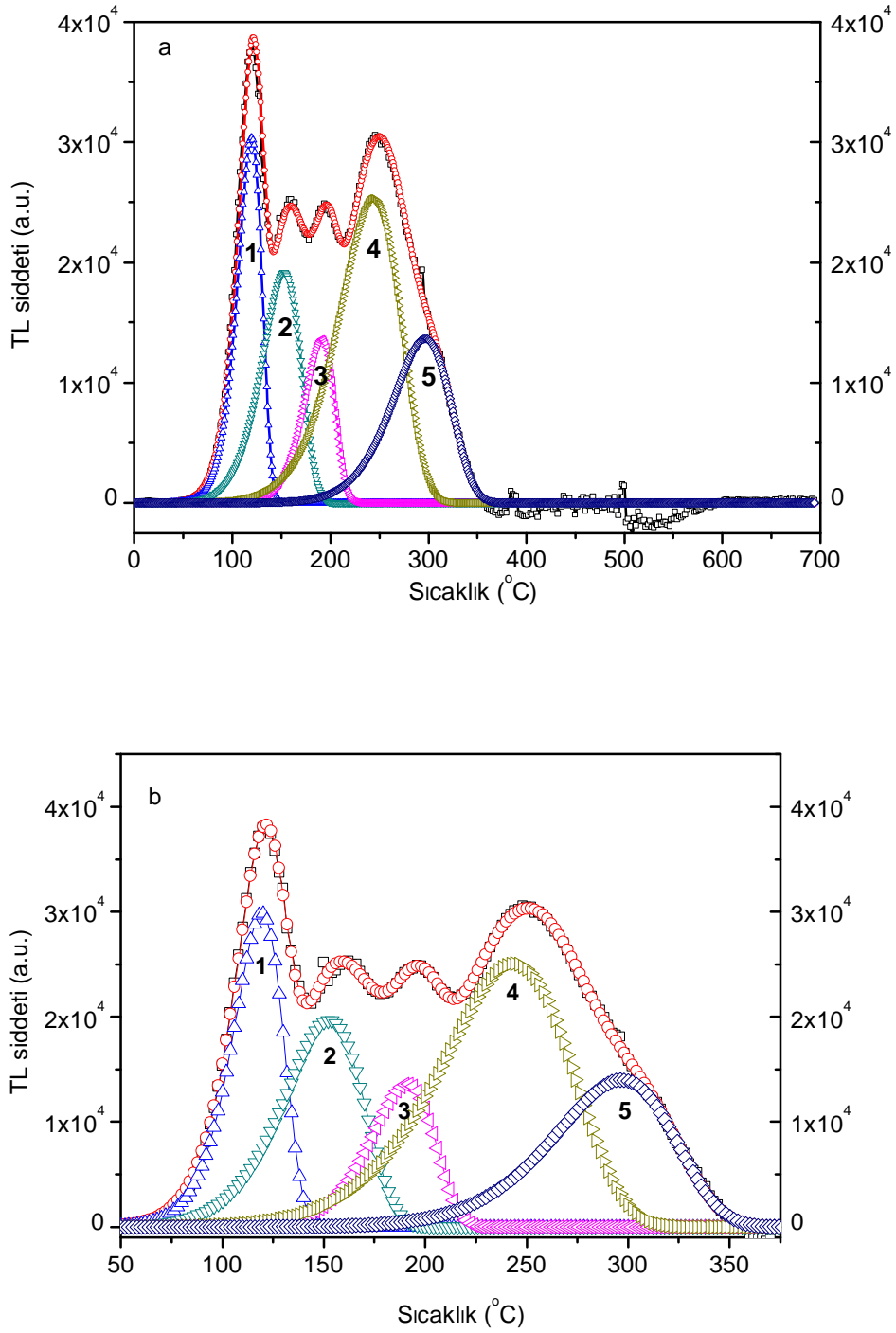
Şekil 5.13. Farklı sürelerde ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış ametist örneklerine ait tavlama sıcaklığına karşı normalize edilmiş toplam sayım grafiği

Tavlama sıcaklığının TL hassasiyetine etkisi her TL tepesi için (başka bir ifadeyle farklı tuzak yapıları için) farklı olabilmektedir. Bu sebeple tavlamanın aynı TL eğrisindeki farklı tepeler üzerindeki hassasiyet değişimine etkisini inceleyebilmek için elde edilen eğriler Bölüm 2.6.3'te detaylı olarak anlatılan CGCD yöntemi ile alt tepelerine ayrıştırılmışlardır. Şekil 5.14'te 250 °C'de 0.5 saat tavllanmış ve 200 Gy beta dozu verilmiş ametist örneğine ait TL ışımaya eğrilerinin CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış grafiği görülmektedir. Şekil 5.14 (a)'da TL okuması 700 °C'ye kadar kaydedilerek elde edilen TL ışımaya eğrisinin CGCD yöntemi ile analizi sonucunda elde edilen tepeler yer almaktadır. Bu analiz sonucunda elde edilen FOM değeri % 6.2'dir. Bu değer Bölüm 2.6.3'te bahsedildiği iyi bir analiz için çok yüksektir. Fakat FOM değerinin yüksek çıkması TL ışımaya eğrisinde ~375 °C'nin

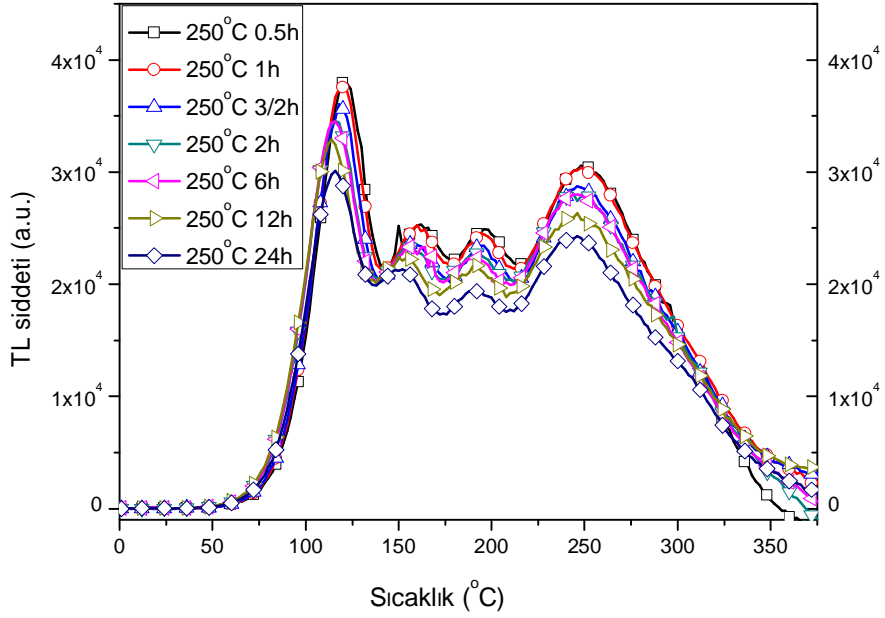
üzerindeki verilerin düzensizliğinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla iyi bir analiz yapabilmek için, içerisinde belirgin tepelerin bulunmadığı ve gürültü olarak nitelendirilebileceğimiz bölümler TL eğrisinden çıkartılmalıdır. Bu şekilde daha sağlıklı bir analiz yapılmış olur. Gerçekten de Şekil 5.14 (b)'de verilen ve 50 °C ile 375 °C arasındaki veriler kullanılarak elde edilen analiz sonucunda FOM değeri %1.19 olarak bulunmuştur. Bu değer bize analizin çok iyi bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Bu sebeple bu deneyde elde edilen grafiklerdeki x ekseninin skala aralığı 50 °C ile 375 °C arasında seçilmiştir.

Şekil 5.14 (a) ve (b)'de verilen CGCD analizi sonucunda TL ışıma eğrisinin sırasıyla 120, 150, 180, 240 ve 300 °C civarında maksimum sıcaklıklarına sahip 5 farklı tepeden oluştuğu görülmüştür. Bu tepelerden ilk üçü düşük sıcaklık tepeleri, son ikisi de yüksek sıcaklık tepeleri olarak adlandırılabilirler. Düşük sıcaklık tepeleri genellikle sığ tuzaklarda tuzaklanan elektronlardan ileri gelirler. Bu sebeple bu tepelerin TL şiddetinde, anormal sönüm ve ışımasız geçişler gibi süreçler sonucunda, azalma meydana gelebilmektedir. (Aitken, 1985). Dolayısıyla bu tepelerin ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılması uygun değildir. 4. ve 5. tepeler ise yüksek sıcaklık bölgesinde bulduklarından dozimetrik tepe olarak kullanımları daha uygundur. Bu tepeler derin tuzaklarda bulunan tuzaklanmış elektronlardan ileri gelmektedir ve bu tepelerin düşük sıcaklık tepelerine oranla daha kararlı bir yapıya sahiptir. Sonuç olarak tavlama sıcaklığının TL hassasiyeti üzerine etkisinin incelenmesi sırasında dozimetrik tepeler oldukları düşünülen 4. ve 5. tepe üzerinde çalışılmıştır.

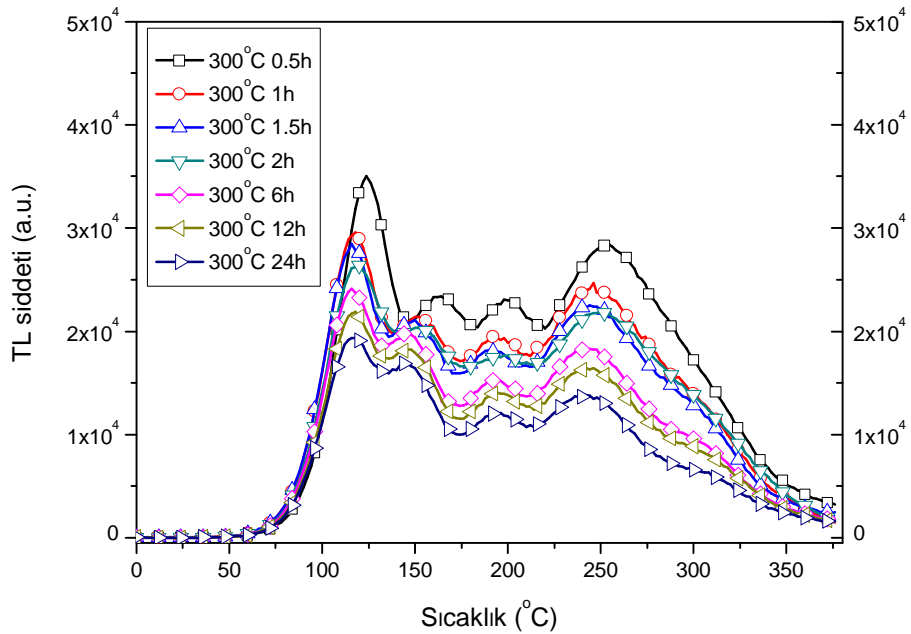
Ametistin TL hassasiyetinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek amacıyla Bölüm 4.2.5'te bahsedildiği gibi örnekler hazırlanmış ve tavlama protokolü uygulanmıştır. Elde edilen TL ışıma eğrilerinden fon sinyalleri çıkartılarak net sayımlar elde edilmiş ve bu net sayımlar kullanılarak her örneğin sıcaklığa karşı ışıma şiddetinin grafiği yeniden çizilmiştir. Şekil 5.15'ten Şekil 5.21'e kadar verilen grafiklerde farklı sıcaklık ve süreler için tavllanmış ~30 mg'lık toz ametist örneklerine 200 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilen TL ışıma eğrileri yer almaktadır.



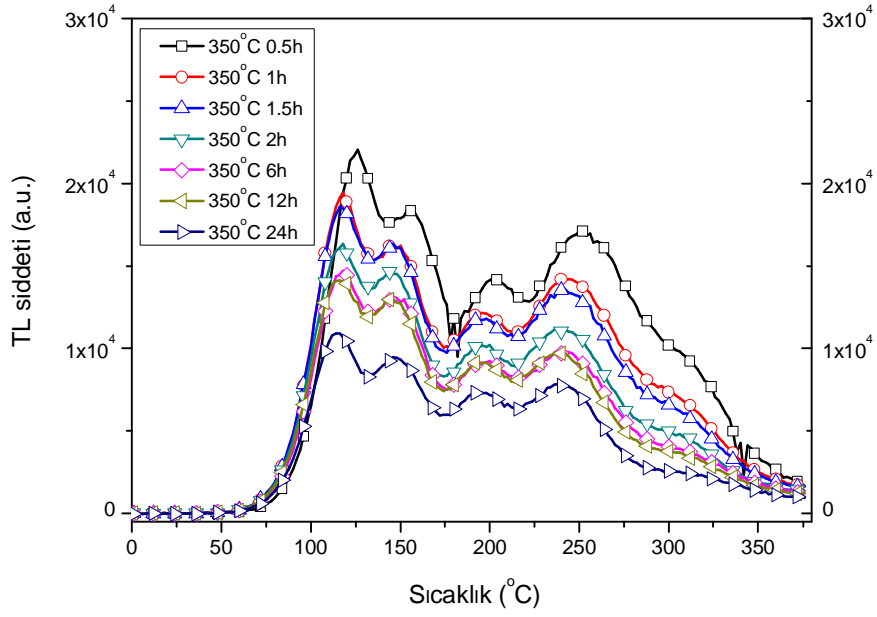
Şekil 5.14. a) 250 °C’de 0.5 h tavllanmış ve 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş ve TL ışınma eğrisinin CGCD yöntemi ile alt tepelerine ayrılması, TL okuması 700 °C’ye kadar gerçekleştirilmiştir (FOM=%6.2) b) aynı TL eğrisinin 50 °C ile 375 °C arasındaki bölümü kullanılarak gerçekleştirilen CGCD analiz sonucu (FOM=%1.19)



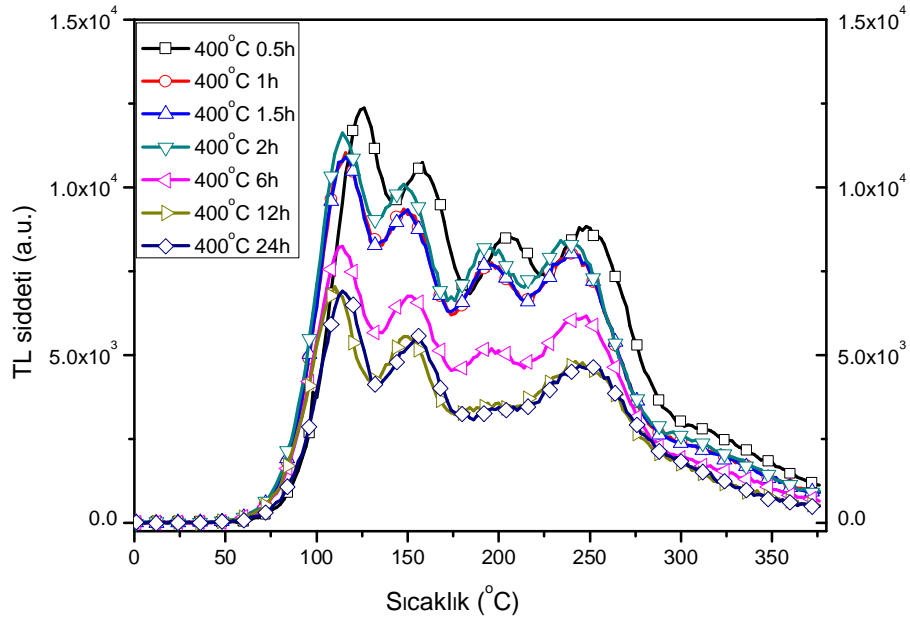
Şekil 5.15. 250 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri



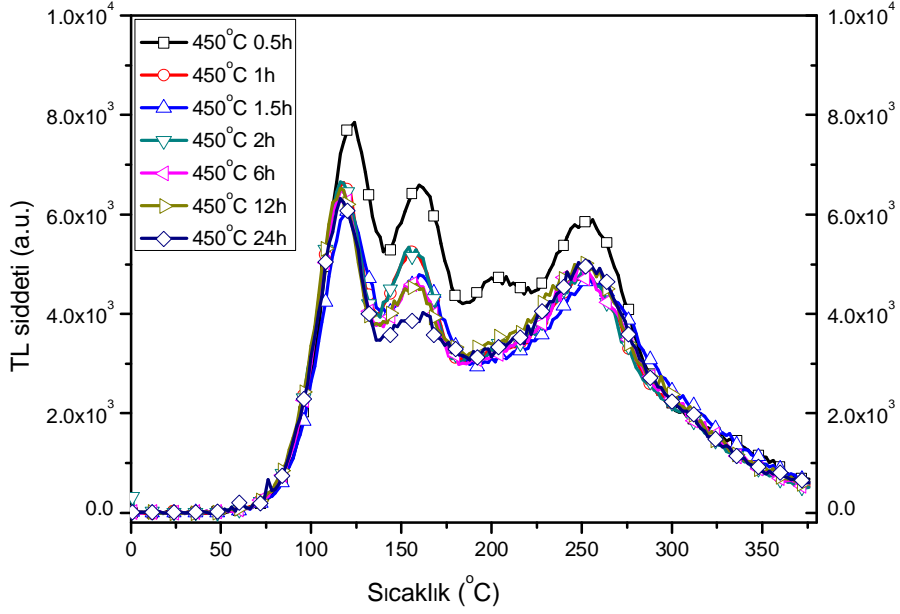
Şekil 5.16. 300 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri



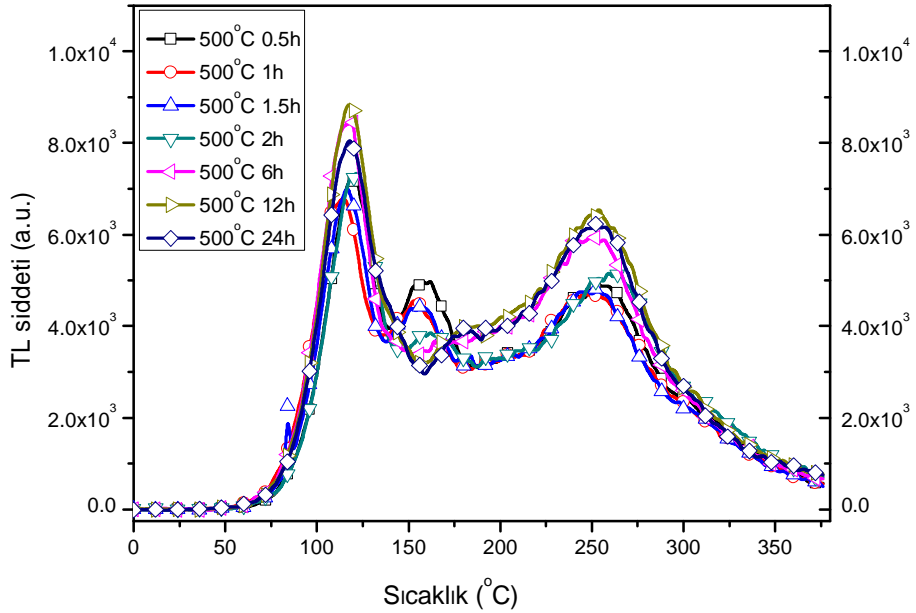
Şekil 5.17. 350 °C’de farklı sürelerde tavlanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri



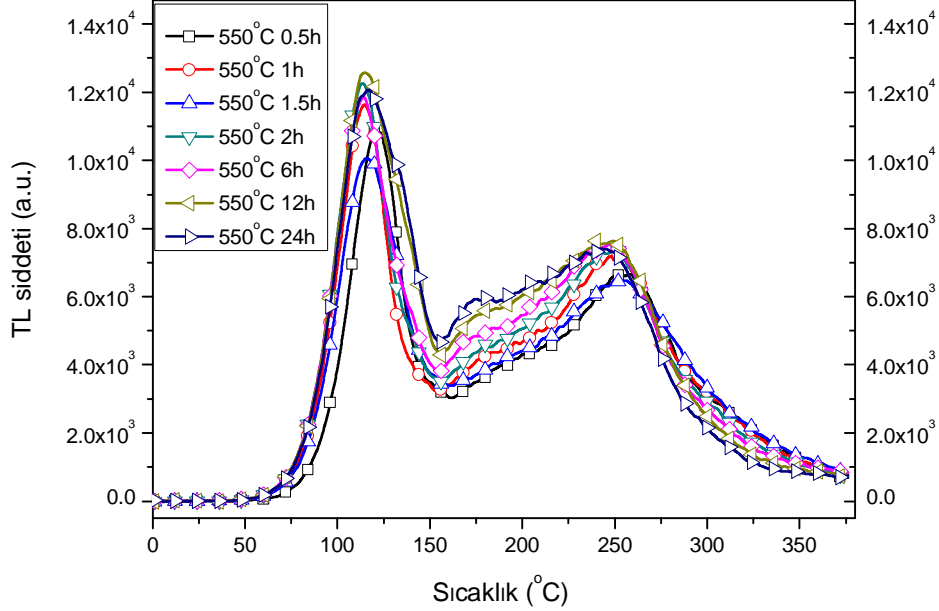
Şekil 5.18. 400 °C’de farklı sürelerde tavlanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri



Şekil 5.19. 450 °C’de farklı sürelerde tavlanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışınma eğrileri



Şekil 5.20. 500 °C’de farklı sürelerde tavlanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışınma eğrileri

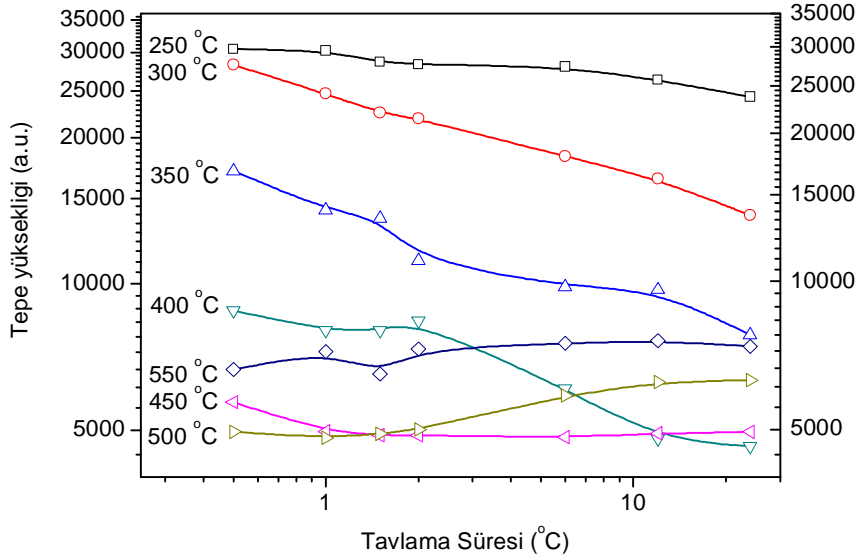


Şekil 5.21. 550 °C’de farklı sürelerde tavllanmış ve arkasından 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışınma eğrileri

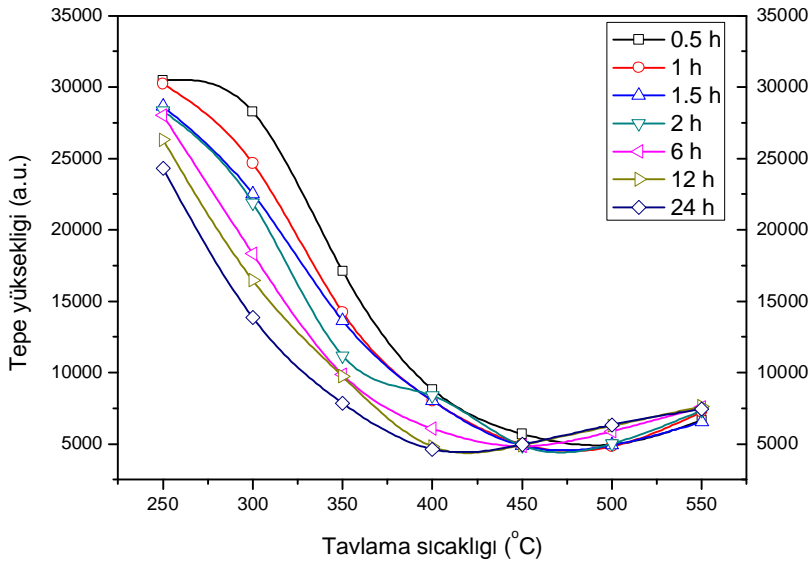
Şekil 5.15’ten Şekil 5.21’e kadar verilen sonuçlar incelendiğinde tavlama sıcaklığının süresinin artmasıyla TL tepelerinin şiddetinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu azalma 450 °C’ye kadar devam etmekte fakat daha yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça TL şiddetinin tekrar artmaya başladığı görülmektedir. Aynı zamanda tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte elde edilen TL eğrilerinin şekilsel olarak da birbirinden farklı olduğu gözlenmektedir. 250, 300 ve 350 °C tavlama sürelerinin arkasından beta dozu verilerek elde edilen grafiklerde ayırt edilebilir tepe sayısı 4’tür. 0.5 h 450 °C tavlama süresinde 4 tepenin varlığı gözlenirken aynı sıcaklıkta daha uzun sürelerde tavlama örneklerinde ayırt edilebilir tepe sayısı üçe inmiştir. 500 ve 550 °C tavlama sürelerinde ise bu ayırt edilebilir tepe sayısı giderek 2’ye düşmektedir. Bu sonuç bize ametistin tuzak yapısının, maruz kaldığı sıcaklık ve süreye bağlı olarak büyük ölçüde değişikliğe uğradığını göstermektedir. Bu durum Bölüm 5.1 ve 5.2’de belirtilen XRF ve XRD sonuçlarıyla paralel olarak açıklanabilir. XRD ve XRF sonuçları ametistin maruz kaldığı sıcaklığın artmasıyla beraber hem kimyasal hem de fiziksel yapısında değişimlerin meydana geldiğini

göstermiştir. Böylece farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen tavlama sonucunda ametistin tuzak yapısının değişeceği ve dolayısıyla TL eğrisinde bulunan tepelerin de şekil ve hassasiyet açısından farklılıklar göstereceği beklenen bir durumdur. Ametistin dozimetrik malzeme olarak kullanımı amaçlandığında önemli olan bu değişimlerin en düşük olduğu tavlama sıcaklığını ve süresini elde etmektir.

Yukarıda elde edilen TL ışımaya eğrileri kullanılarak, 4 ve 5 numaralı tepelerin toplamından oluşan ve 250 °C civarında tepe sıcaklığına sahip tepe için, tavlama süresine karşı tepe yüksekliğinin değişim grafiği çizilmiş ve elde edilen grafik Şekil 5.22’de verilmiştir. Şekilde tavlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak söz konusu tepe için TL hassasiyetinde belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Fakat TL hassasiyetindeki bu azalma yukarıda da bahsedildiği gibi 450 °C’de minimum değere ulaşmakta ve daha yüksek sıcaklıklar için tekrar artmaya başlamaktadır. Bu durum tepe yüksekliğinin tavlama sıcaklığına karşı değişimini veren Şekil 5.23’te daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi farklı sürelerde 500 ve 550 °C’deki tavlama sonucunda TL hassasiyetinin artmaya başlaması, ışımaya merkezlerinin yüksek sıcaklıklarda yeniden yapılanmalarına bağlı olabilir. McKeever ve arkadaşları (1983) çalışmalarında kuvarsin yüksek sıcaklık tavlama sonucu ışımaya merkezlerinin konsantrasyonlarının değişebildiğini bildirmişlerdir. Bu konsantrasyon değişimi yeni ışımaya merkezlerinin oluşmasıyla ya da kristal içerisinde pasif durumda bulunan ve “ışımaya yeniden birleşme merkezleri” olarak da adlandırılan lüminesans merkezlerinin yeniden yapılandırılmalarıyla gerçekleşmektedir (McKeever ve ark., 1983). Böylece daha önce TL sinyaline katkıda bulunmayan ışımaya merkezleri tavlama sonucu aktif hale gelerek TL hassasiyetinin artmasına yol açmaktadır. Bunların yanısıra dozimetrik malzemelerin yüksek sıcaklıklarda tavlama sonucunda kristal yapısı içerisinde yeni tuzakların oluşması da mümkündür (Furetta, 2003). Bu sebeple ametist örneklerinin TL hassasiyetinin yüksek sıcaklıklarda artması ışımaya merkezlerinin konsantrasyonundaki değişime ve yeni tuzakların oluşmaya başlamasına bağlı olarak açıklanabilir.

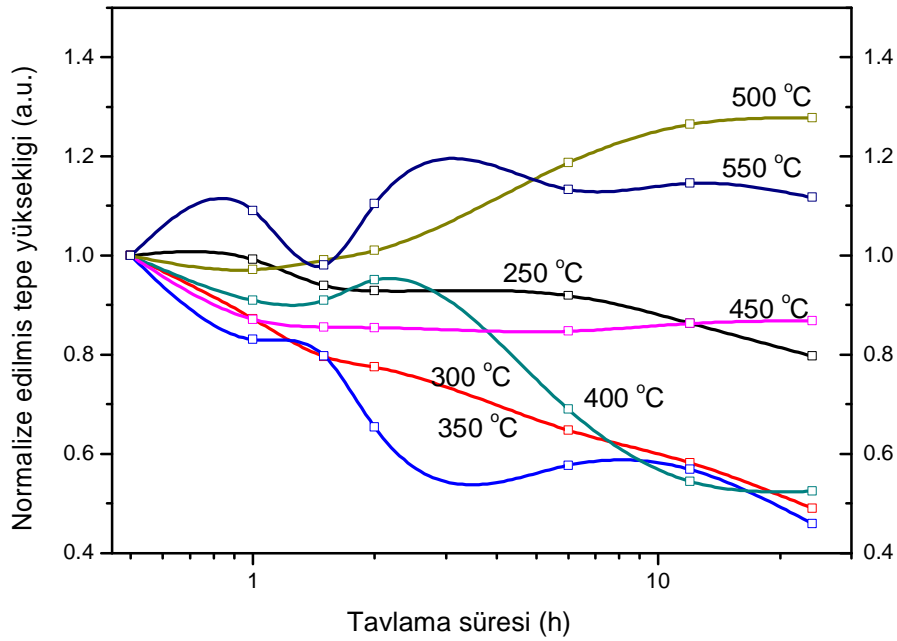


Şekil 5.22. Farklı sıcaklık ve sürelerde tavllanmış ametist örneklerine 200 Gy beta dozu verilmiş ametist örneklerine ait TL ışınma eğrileri kullanılarak 4.+5. tepe için elde edilmiş tavlama sıcaklığına bağlı hassasiyet değişim grafiği.

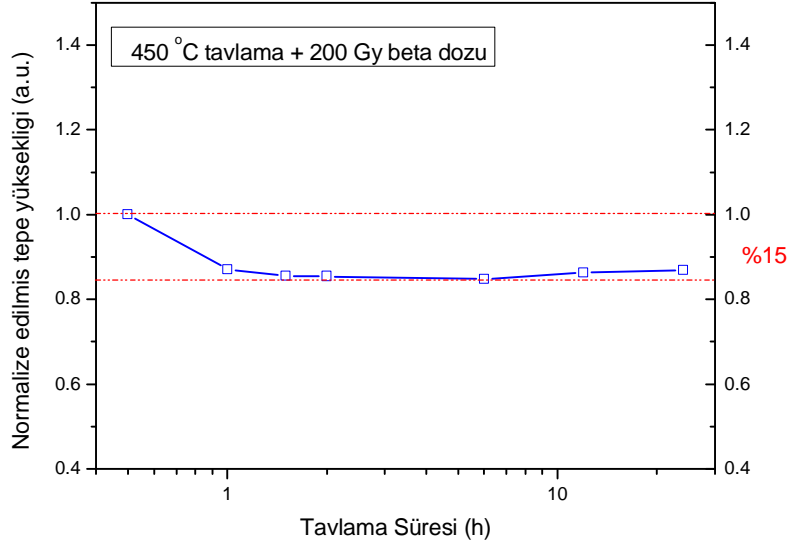


Şekil 5.23. Farklı sürelerde ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış ametist örneklerine 200 Gy beta dozu verilerek, 4.+5. tepe için elde edilmiş tavlama sıcaklığına karşı tepe yüksekliğinin grafiği

Şekil 5.24'te 4. ve 5. tepenin toplamından oluşan tepe için tavlama sıcaklığına ve süresine karşı normalize edilmiş tepe yüksekliklerinin grafiği yer almaktadır. Grafikte 250, 300, 350, 400, 500 ve 550 °C tavlama sıcaklıklarında TL hassasiyetinde tavlama süresine bağlı olarak yüksek oranda değişiklikler meydana geldiği görülmektedir. Fakat grafikte, 450 °C'de farklı süreler için gerçekleştirilen tavlama işleminin arkasından elde edilen TL eğrilerinin hassasiyet değişiminin ise minimum olduğu gözlenmiştir. 450 °C'de tavlanan örneklerin TL hassasiyetinde meydana gelen bu azalma sadece %15 civarındadır. Şekil 5.25'te 450 °C'de farklı sürelerde tavlansarak elde edilmiş TL hassasiyet değişimi ayrıca gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi TL hassasiyeti 0.5 saatlik tavlamanın ardından bir miktar azalmıştır. Fakat 450 °C'deki daha uzun süreli tavlama sonucunda TL hassasiyetindeki azalma miktarı %15'in üstüne çıkmamıştır.



Şekil 5.24. 4. tepe + 5. tepe için elde edilen farklı tavlama sıcaklığı ve süresine bağlı hassasiyet değişim grafiği



Şekil 5.25. Farklı sürelerde 450 °C tavllanmış ve arkasından 200 Gy’lik beta dozu verilmiş ametist örnekleri için, 4. ve 5. tepenin toplamından oluşan tepeye ait tavlama süresine karşılık TL hassasiyetinin değişim grafiği, burada TL hassasiyetindeki değişim maksimum %15’tir

Sonuç olarak, Şekil 5.22’de de açıkça görüldüğü gibi 450 °C’de farklı sürelerde gerçekleştirilen tavlama sonucunda elde edilen TL tepelerinin yükseklikleri, diğer tavlama sıcaklıklarının uygulanmasıyla elde edilen tepelerin yüksekliklerinden düşüktür. Buna karşın, 450 °C’deki tavlama sürelerine bağlı olarak TL hassasiyetindeki değişimin minimum olması deneysel çalışmalarda daha sağlıklı sonuç elde edilebilmesini sağlamaktadır. Bu sebeple Bölüm 5.3’teki sonuçlar da göz önünde bulundurulduğunda 450 °C’de 90 dakikalık tavlamanın yüksek sıcaklık tavlama olarak kullanılabilir en uygun sıcaklık değeri olduğu sonucuna varılmıştır.

Bölüm 4.2.4’te bahsedildiği gibi yüksek tavlamanın arkasından yapılan düşük sıcaklıklardaki tavlama da TL hassasiyeti üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır. Yüksek tavlama sıcaklığı tuzaklarda bulunan tuzaklanmış elektronların tamamen boşaltılmasını sağlarken düşük sıcaklıklardaki tavlama sığ tuzakların daha kararlı hale gelmesini ve bütünlük içerisinde olmalarını sağlamaktadır. Böylece düşük tavlama sıcaklığı hem ana dozimetrik tuzakların

hassasiyetinin artmasına yol açmakta hem de termal ve optiksel sönüm yoluyla radyasyon kaynaklı sinyallerin azalmasının kısmen önüne geçmektedir. Bu her iki tavlama sıcaklığının bir arada kullanılması standart tavlama prosedürü olarak adlandırılır. Literatürde lityum florid için uygulanan düşük tavlama sıcaklığı 80 °C'de 20 saattir iken bazı laboratuvarlarda 100 °C'de 2 saat olarak uygulanmaktadır (Furetta, 2003). Düşük tavlama sıcaklığının dozimetrik malzemeler üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı, ametist örnekleri yüksek tavlama sıcaklığının arkasından düşük tavlama sıcaklığında da tavllanmışlardır. Ametistlere uygulanan düşük tavlama sıcaklığı ve süresi 80 °C'de 24 saat olacak şekilde seçilmiştir.

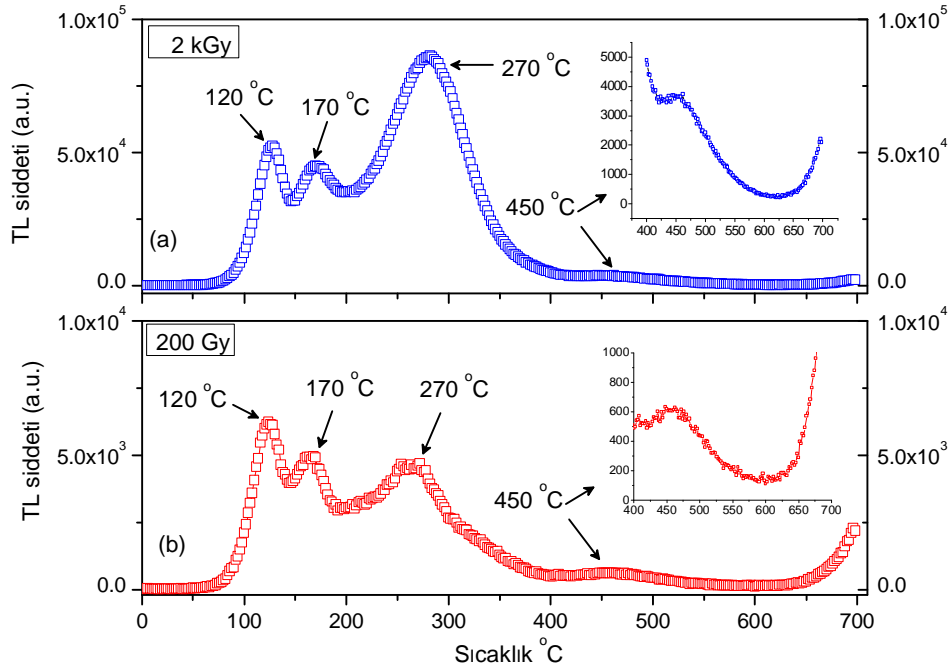
Dozimetrik malzemelerin TL hassasiyetini etkileyen bir diğer önemli nokta ise soğutma hızıdır. Standart tavlama protokolünün arkasından örneğin hızlı bir şekilde soğutulması, tavlamanın etkisini olumlu yönde artırması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Düşük sıcaklıkta kristal içerisindeki kusurlar bir küme halinde veya çökelti şeklinde bulunabilirler. Yüksek sıcaklıklarda ise kusurlar birbirlerinden ayrılırlar ve kristal içerisinde çözünürler. Hızlı soğutma, yüksek sıcaklıkta izole halde bulunan bu kusurların dengesini korurken yavaş soğutma kusurların değişik oranlarda kümeleşmesine yol açmaktadır (McKeever ve ark., 1995). Farklı soğutma oranlarının bazı TL materyalleri için, TL hassasiyeti (Bradbury ve ark., 1976) ve elde edilen tuzak parametreleri (Bos ve ark., 1992) üzerinde etkileri olduğu bildirilmiştir. Sonuç olarak bahsedilen bu etkilerden dolayı, ametist örnekleri hem yüksek hem de düşük sıcaklık değerlerinde tavlanelarının arkasından bir alüminyum blok üzerine yerleştirilerek hızlı bir şekilde soğumaları sağlanmıştır.

Yukarıda verilen sonuçlar özetlenecek olursa, ametistler için uygulanabilecek en uygun standart tavlama protokolü şu şekilde belirlenmiştir: 450 °C'de 90 dakika tavlama, alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma, 80 °C'de 24 saat tavlama ve alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma. Bundan sonraki tüm deneylerde örnekler bu tavlama protokolüne göre tavllanmışlardır.

5.5. TL Işıma Eğrilerinin İncelenmesi ve CGCD Yöntemi ile Ayırıştırılması

Dozimetrik malzeme ile ilgili çalışmalardaki en önemli konulardan birisi de elde edilen TL eğrilerinin iyi bir şekilde analiz edilmesidir. Daha önce Bölüm 5.3'te de bahsedildiği gibi TL okuması sonucu elde edilen ışımaya eğrilerindeki tepe sayısını ve bu tepelerin tek tepeden mi yoksa farklı tepelerin toplamından mı oluştuğunu anlayabilmek için analiz edilmeleri gerekmektedir. Bu sebeple bölüm 4.2.6'da anlatıldığı şekilde örnekler hazırlanmış ve deney protokolü uygulanmıştır. Elde edilen TL eğrilerinin CGCD yöntemi ile ayırıştırılmasında Bölüm 2.6.3'te anlatılan bilgisayar programları kullanılmıştır.

Herhangi bir tavlama işlemi uygulanmamış doğal ametist örneklerinden elde edilen TL ışımaya eğrileri daha önce Şekil 5.4'te verilmiştir. Doğal TL eğrilerinin CGCD ile analizleri sonucu 300, 330 ve 500 °C civarında tepe sıcaklığına sahip üç tepeden oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 5.5). Bu bölümde ise 90-140 µ arası elenmiş ve ~30 mg olacak şekilde tartılmış toz ametist örneklerine Bölüm 5.3 ve 5.4'te elde edilen standart tavlama prosedürü uygulanmış ve örneklerin geçmişte biriktirdikleri doğal radyasyon dozunun tamamen silinmesi sağlanmıştır. Daha sonra örneklere 200 Gy ile 2 kGy'lik beta dozu verilerek Şekil 5.26'da verilen TL ışımaya eğrileri elde edilmiştir.

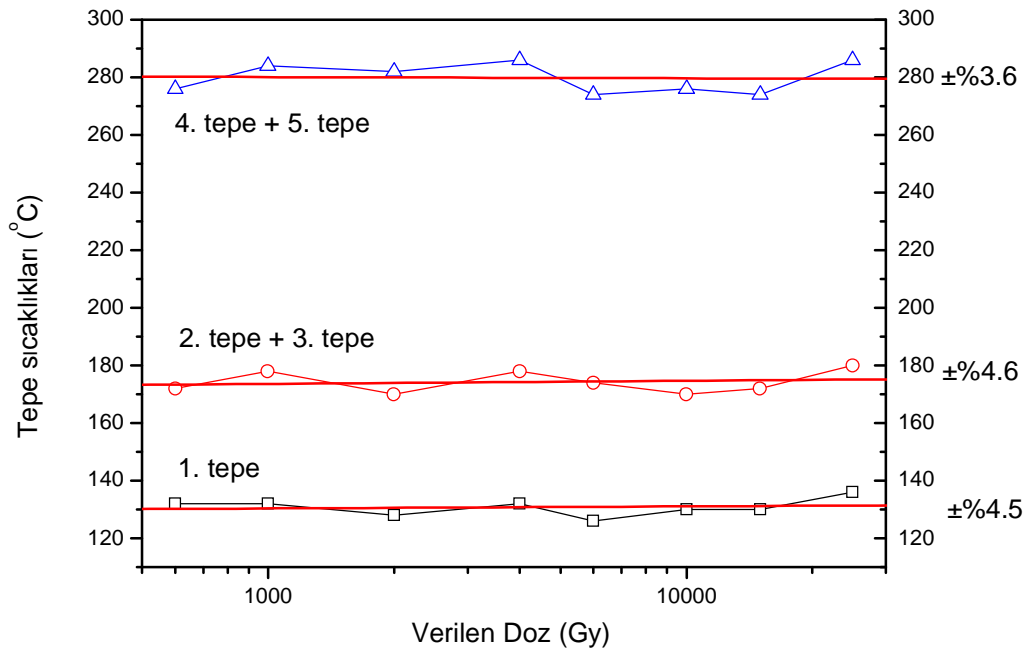


Şekil 5.26. Tavlama sonrası (a) 2 kGy ve (b) 200 Gy’lik beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışınma eğrileri

Şekil 5.26 incelendiğinde 200 Gy ve 2 kGy beta dozu verilerek elde edilen TL eğrilerinin ayırt edilebilir tepe sayısı aynıdır. Bu tepeler sırasıyla 120, 170, 270 ve 450 civarında tepe sıcaklıklarına sahiptirler. Fakat aynı doz oranlarıyla ışınlanmış, aynı özelliklerdeki farklı örneklerden elde edilen TL eğrileri incelendiğinde, örneklerin tepe sıcaklıkları arasında %5 civarında sapmaların meydana gelebildiği gözlenmiştir. Aynı durum Bölüm 5.3’te verilen doğal TL ışınma eğrilerinde gözlenmiştir. Tepe sıcaklığı arasındaki bu farkın olası sebepleri Bölüm 5.3’te detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

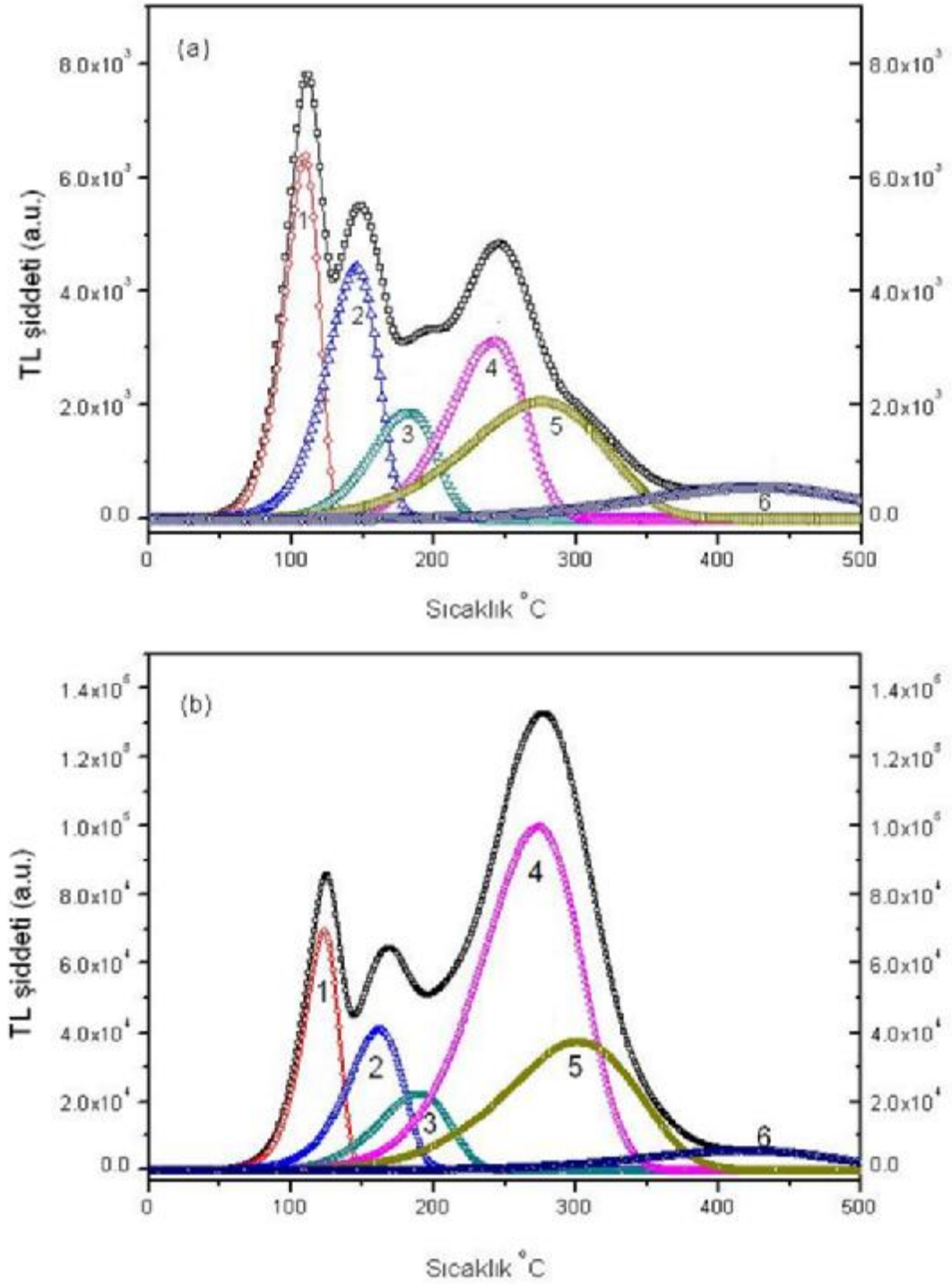
CGCD yöntemi ile TL eğrilerinin analizine başlamadan önce ışınma eğrisinde bulunan her bir tepenin kinetik mertebesinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple örneklere tavlama sonrası 600 Gy ile 25 kGy arasında değişen beta dozları verilmiştir. Uygulanan yöntem birinci dereceden kinetik ile ilgili uygulanan basit bir testtir. Teoriye göre birinci dereceden kinetik mertebesine sahip eğriler ($b=1$) için

tepe sıcaklığı sadece ısıtma hızının artması ile değişmektedir (McKeever, 1985). Böylece sabit 2 °C/s ısıtma hızı kullanılarak elde edilen eğrilerinin diğer deneysel parametrelerden etkilenmemesi ve T_{max} değerinin deneysel hata sınırları içerisinde sabit kalması beklenmektedir. Buna karşın $b \neq 1$ için ve sabit ısıtma hızı kullanılarak elde edilen TL ışıma eğrilerinin T_{max} değerlerinin verilen radyasyon dozunun artırılması ile birlikte düşük sıcaklık tarafına doğru kayması söz konusudur. Yapılan çalışmada, elde edilen TL eğrilerinin tepe sıcaklıklarının dozun artışına bağlı olarak değişip değişmediği incelenmiştir. Şekil 5.27’de 600 Gy ile 25 kGy arasında farklı beta dozları verilerek elde edilen soğurulan doza karşılık tepe sıcaklıklarının değişim grafiği yer almaktadır. Grafik incelendiğinde tepe sıcaklıklarında gözlenen kaymanın $\pm \%5$ ’lik hata sınırları içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Buradan ametist örneklerinden elde edilen TL tepelerinin birinci derece kinetiğe sahip olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 5.27. 600 Gy ile 25 kGy aralığında beta dozu verilmiş ametist örneklerine ait tepe sıcaklığının verilen doza karşılık değişim grafiği. Elde edilen tepe sıcaklıkları arasındaki değişim en fazla % 5’lik sapma içerisinde

TL eğrilerinin kinetik mertebeleri belirlendikten sonra Bölüm 2.6.3'te bahsedilen bilgisayar programları kullanılarak 2 kGy ve 200 Gy beta dozu verilerek elde edilen TL ışınma eğrileri CGCD yöntemi ile ayrıştırılmışlardır. Analiz sonucu elde edilen eğriler Şekil 5.28'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tavllanmış ve arkasından beta dozu verilmiş ametist örneklerinden elde edilen TL eğrileri 120, 160, 190, 260, 310 ve 450 °C civarında tepe sıcaklıklarına sahip 6 tepeden oluşmaktadır. Bu TL tepeleri birbirine çok yakın ve iç içe girmiş 6 tepenin bileşimidir. Bölüm 5.4'te de bahsedildiği gibi bu tepelerden ilk üçü düşük sıcaklık tepesi olarak adlandırılabilirler. 260, 310 ve 450 °C'deki yüksek sıcaklık tepeleri düşük sıcaklık tepelerine kıyasla daha kararlı bir yapıya sahiptirler. Bu sebeple ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde bu tepelerin kullanılması daha uygundur. Fakat 450 °C'de tepe sıcaklığına sahip olan 6. tepenin verilen dozlara karşılık elde edilen TL şiddeti oldukça düşüktür. Bu tepe sadece yüksek dozlarda belirgin bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada ametist örneklerinin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde 4. ve 5. tepeler dozimetrik tepeler olarak seçilmiştir.



Şekil 5.28. Tavlama sonrası (a) 200 Gy ve (b) 2 kGy beta dozu verilmiş 30 mg'lık toz ametist örneğinin CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış grafiği

5.6. Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması

Dozimetrik çalışmalarda üzerinde durulan bir diğer önemli konu ise TL tepelerine ait tuzak parametrelerinin başarılı bir şekilde hesaplanmasıdır. Herhangi bir Işıma eğrisinde yer alan bir tepe diğer tepelerden belirgin bir şekilde ayrıştırılabiliyorsa Tepe Şekli Metodu (PS), İzotermal Sönüm Metodu (ID), İlk Yükselme Metodu (IR) ve Farklı Isıtma Hızları Yöntemi (VHR) ve gibi deneysel metotlar tuzak parametrelerinin hesabında kullanılabilir (Bölüm 2.6). Şekil 5.28’de görüldüğü gibi ametist örneklerinden elde edilen TL ışımaya eğrileri 6 tepenin toplamından oluşmaktadır ve bu tepeler yüksek oranda iç içe geçmiş bir şekildedir. Böyle bir durumda, tuzak parametrelerin elde edilmesinde temel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi ısısal yolla kısmi temizleme yöntemi ve ikincisi de bilgisayarla ışımaya eğrisi ayrıştırma (CGCD) yöntemidir. Fakat çoğu zaman ısısal yolla kısmi temizleme yönteminin kullanımıyla diğer tepelerin katkısını yok ederek, ilgilenilen tepenin tamamen izole hale getirilmesi oldukça zordur. Bu yüzden bilgisayarlı ışımaya eğrisi ayrıştırma yöntemi (CGCD), TL ışımaya eğrilerinin tuzak parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan ve son zamanlarda oldukça popüler olan bir yöntem haline gelmiştir (Bunghkhardt ve ark., 1977). CGCD yöntemi ile TL tepelerinin ayrıştırılması sonucunda üst üste binmiş tepeler başarılı bir şekilde ayrıştırılarak her tepenin enerji seviyesi (E) ve frekans faktörü (s) değerlerinin belirlenebilmesi mümkün olmaktadır.

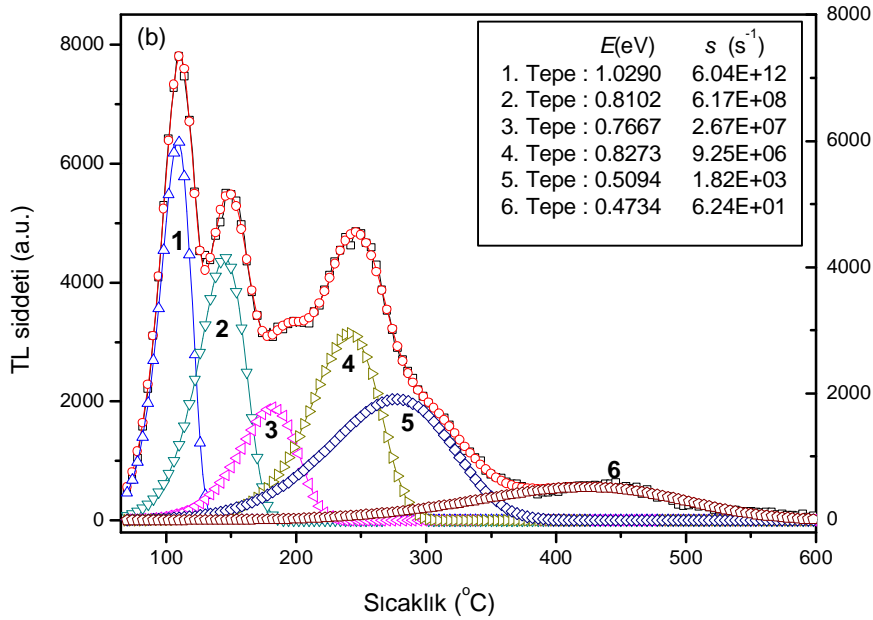
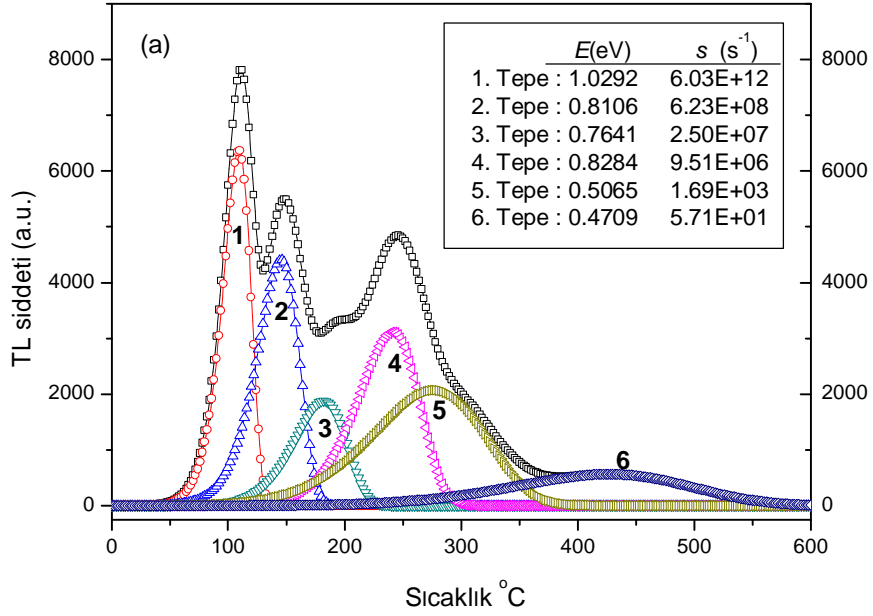
Yüksek oranda iç içe geçmiş tepeler söz konusu olduğunda CGCD yönteminin yanısıra Farklı Isıtma Hızları Yöntemi de tuzak parametrelerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Fakat bu yöntemle Şekil 5.8’de gösterilen 6 tepenin her biri için E ve s değerlerinin hesaplanması mümkün değildir. Çünkü bu yöntemin kullanılabilmesi için ışımaya eğrisindeki tepelerin belirgin bir şekilde gözlenebiliyor olmaları gerekir. Bu sebeple Farklı Isıtma Hızları Yöntemi sadece alt tepelerin toplamından oluşan belirgin tepeler için (başka bir ifadeyle 120, 160 ve 260 °C civarındaki tepeler için) uygulanmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada ametist örneklerinin tuzak parametrelerinin hesaplanması amacıyla iki farklı yöntem

uygulanmıştır: bu yöntemler, CGCD yöntemi ve Farklı Isıtma Hızları Yöntemidir. Bu yöntemler ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.6.3 ve Bölüm 2.6.5'te verilmektedir.

5.6.1. CGCD Yöntemi ile Tuzak Parametrelerinin Hesaplanması

Ametist örneklerinin CGCD yöntemi ile tuzak parametrelerinin analizinde iki farklı bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu programlar ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.6.3'te verilmiştir. Bu programlar Glowfit (Puchalska ve ark., 2006) ve Tamtam (Bos ve ark, 1993) adı verilen iki bilgisayar programıdır. Karşılaştırmak amacıyla her iki programın kullanımıyla tavlama sonrası 200 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilen TL ışıma eğrisi alt tepelerine ayrıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.29'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her iki programın kullanılmasıyla elde edilen tepe sayısı ve tepe sıcaklıkları aynıdır. Ayrıca, şekilde yer alan E ve s değerleri incelendiğinde, her iki programın da ihmal edilebilecek kadar küçük farklarla aynı sonuçları verdiği görülmüştür.

CGCD yöntemi ile elde edilen E ve s değerleri ele alındığında düşük sıcaklık tepelerinden elde edilen değerlerin yüksek sıcaklık tepelerinden elde edilen değerlere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Genellikle, bunun tersi yani, yüksek sıcaklık tepelerinin düşük sıcaklık tepelerine oranla daha yüksek enerji seviyelerine sahip olmaları beklenir. Fakat bu konuda kesin bir kural yoktur. Literatürde doğal malzemeler için yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde yüksek sıcaklık tepelerinin ilk tepelere oranla daha düşük E ve s değerlerine sahip olabileceği görülmektedir (YAZICI ve ark., 2003; YAZICI ve ark., 2001). Bir TL ışıma eğrisinin şiddeti ve şekli hem E hem de s değere bağlı olarak değişmektedir. E ve s değeri yükseldiğinde elde edilen tepenin şekli taban alanı dar ve tepe kısmı daha sivri olacak şekilde elde edilir. Tam tersi durumda ise elde edilecek olan tepe daha geniş tabanlı ve tepe kısmı daha yayvan bir şekle sahip olmaktadır. Şekil 5.29'daki tepeler incelendiğinde bu durum net bir şekilde görülmektedir. Dolayısıyla daha geniş tabanlı ve düşük tepe yüksekliğine sahip 5. ve 6. tepenin enerji seviyesinin de düşük olması beklenen bir durumdur.



Şekil 5.29. 200 Gy beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışınma eğrisinin (a) GlowFit programı (M. Puchalska ve P. Bilski, 2006) ile ve (b) Tamtam programı (Bos ve ark, 1993) ile analizi. Grafikte her iki programın kullanımı ile elde edilen de E ve s değerinin oldukça yakın oldukları görülmektedir

Bölüm 2.4.1’de verilen 1. derece kinetik denklemi (2.7) üzerinde gerekli işlemler yapıldığında $\ln(sk/E)=A$ şeklinde bir ifade karşımıza çıkmaktadır. Burada A , $\ln(Tm^2/\beta)$ ’nın $1/Tm$ ’ye karşı grafiği çizildiğinde elde edilen eğrinin y eksenini kestiği noktadır (β ise ısıtma hızı, Tm tepe sıcaklığıdır). Böylece frekans faktörü $s = (E/k)\exp(A)$ şeklinde tanımlanabilmektedir. Buradan aktivasyon enerjisi E ile frekans faktörü s arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Şekil 5.29’da verilen E ve s değerleri incelendiğinde E değerinin azalmasıyla s değerinin de azaldığı görülmektedir. CGCD analizi sonucu 6 tepe için elde edilen bu E değerleri sırasıyla 1.0292, 0.8106, 0.7641, 0.8284, 0.5065 ve 0.4709 eV’tur. S değerleri ise sırasıyla $6.03E+12$, $6.23E+8$, $2.5E+7$, $9.51E+6$, $1.69E+3$ ve $5.71E+1$ s^{-1} değerlerine sahiptir. Burada görüldüğü gibi E değerleri azaldıkça s değerleri de azalmaktadır.

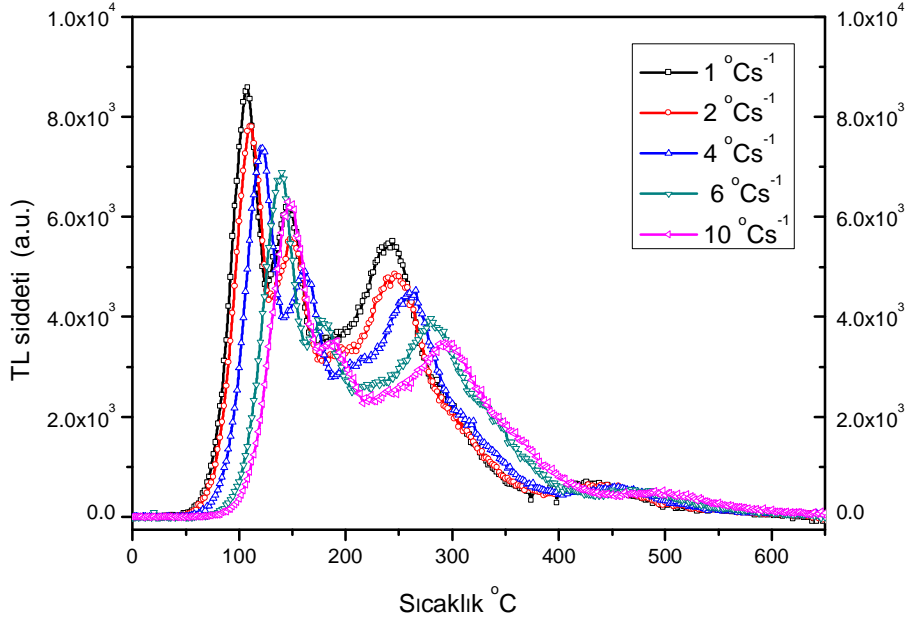
5. ve 6. tepenin aktivasyon enerjisinin küçük bir değere sahip olması kabul edilebilir bir durumdur. Fakat frekans faktörü, normal şartlarda tuzak tipine bağlı olarak değişmekle beraber, 10^9 ile 10^{16} s^{-1} arasında değişmektedir (Aitken, 1985). Mott ve Gurney çalışmalarında, kristalin titreşim frekansıyla da ilişkili olan frekans faktörü değerinin herhangi bir tuzak seviyesi için 10^7 ile 10^{13} s^{-1} arasında değişebileceğini yayınlamışlardır. Buna karşın literatürde frekans faktörü değerinin daha düşük olabileceği bildirilmiş ve bu sebeple, frekans faktörünün “normal” değerinin 10^6 ile 10^{13} s^{-1} arasında değişik değerler alabileceği yayınlanmıştır (Chen ve ark., 1997). 5. ve 6. tepe için bulunan s değerleri sırasıyla $1.69E+3$ s^{-1} ve $5.71E+1$ s^{-1} olarak elde edilmiştir (Şekil 5.29). Bu değer Chen ve arkadaşları (1997) tarafından belirtilen standart değerlerin çok altındadır. Özellikle 6. tepenin sahip olduğu s değeri (57.1 s^{-1}) fiziksel olarak mümkün değildir çünkü bu değer bir kristalin titreşim frekansıyla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Bu durum 300 °C ile 500 °C arasında Şekil 5.29’da belirtilenden daha fazla sayıda tepenin varlığıyla açıklanabilir. Başka bir ifadeyle 5. ve 6. tepenin bulunduğu bölgede daha fazla sayıda tepenin bulunması muhtemeldir. Bunların yanısıra elde edilen sonuçlar, 4., 5. ve 6. tepelere karşılık gelen tuzakların tek bir enerji değerine sahip olmadıkları, bunun yerine sürekli bir enerji seviyesine sahip oldukları şeklinde de yorumlanabilir. Yapılan bazı çalışmalarda tuzakların enerji seviyelerinin her zaman tek bir değere sahip olmadığı, bazı tuzakların limitli bir enerji aralığında, farklı formlarda bulunan, enerji

dağılımlarına sahip olabileceği gösterilmiştir (Furetta, 1999). Hornyak ve Chen (1989) çalışmalarında birinci dereceden kinetiğe ve sürekli tuzak dağılımına sahip tuzak seviyeleri tanımlamışlardır. Bu tuzaklar $\Delta E = E_2 - E_1$ şeklinde ifade edilebilen sınırlı bir enerji aralığında düzgün bir dağılıma sahiptirler. Dolayısıyla bu tarz bir tuzak yapısından elde edilecek olan TL tepesinin şekli ΔE 'ye bağlı olarak biçimlenmektedir. Bu bilgilerin ışığında ametist örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrilerindeki 4., 5.ve özellikle 6. tepenin tek ve kesin bir E değerinden ziyade, sürekli bir tuzak dağılımına ve ΔE şeklinde ifade edilen bir aktivasyon enerjisine sahip olmaları muhtemeldir. Fakat CGCD yönteminde kullanılan bilgisayar programı her tepenin enerji seviyesini tek bir değere sahip olacak şekilde hesaplamaktadır. Bu sebeple, CGCD yöntemi ile 5. ve 6. tepeler için elde E ve s değerleri beklenenden düşük değer vermiştir.

5.6.2. Farklı Isıtma Hızları Yöntemi ile E ve s Değerlerinin Hesaplanması

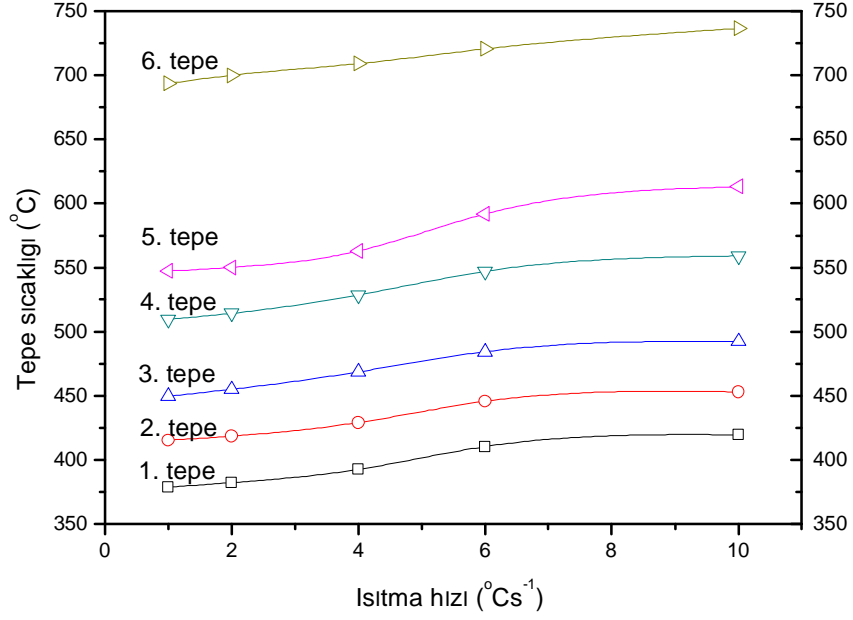
Tuzak parametrelerinin hesaplanması ile ilgili bir diğer yöntem de farklı ısıtma hızları yöntemidir. Bu yöntem ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.6.5'te yer almaktadır. Ametistin tuzak parametrelerinin hesaplanması amacıyla örnekler Bölüm 4.2.7.2'de anlatıldığı gibi hazırlanmış ve deney protokolü uygulanmıştır. 30 mg'lık toz ametist örneklerine 200 Gy'lik beta dozu verilmesinin arkasından 1, 2, 4, 6 ve 10 °C/s'lik ısıtma hızları kullanılarak elde edilen ışıma eğrileri Şekil 5.30'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ısıtma hızları arttıkça tepe sıcaklıkları yüksek sıcaklık tarafına doğru kaymakta ve maksimum tepe yüksekliği azalmaktadır. Bu durum Bölüm 2.6.5'te detaylı bir şekilde bahsedilen termal sönüm olayından kaynaklanmaktadır. Termal sönüm olayı lüminesans etkinliğinin sıcaklığın artmasına bağlı olarak azalması olayıdır. Bu azalma ısıtma hızının artmasıyla daha belirgin bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Böylece gözlenen lüminesans şiddeti ısıtma hızının artmasıyla azalmaktadır. Termal sönüm olayındaki temel mantık yüksek ısıtma hızlarıyla ısıtılan bir malzemede, birim zamanda tuzaklardan kurtulan elektron sayısının çok fazla olmasıdır. Bu durum elektronların birbirleriyle rekabet etmelerine

yol açmakta ve böylece ışıma merkezlerindeki ışımalı yeniden birleşme verimi azalmaktadır. Bu da tepe yüksekliğinin azalmasına yol açmaktadır.

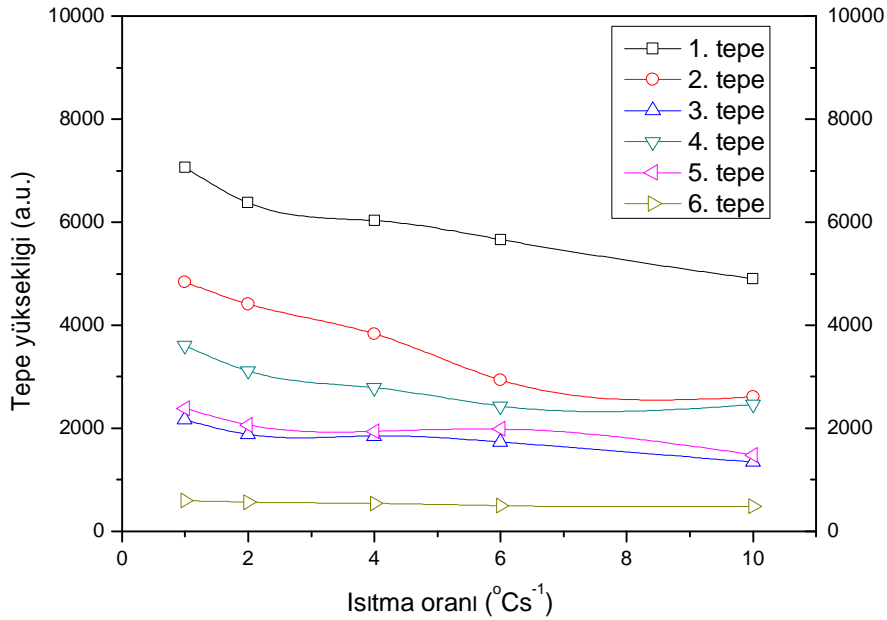


Şekil 5.30. Tavlama sonrası 200 Gy'lik beta dozu verildikten sonra farklı ısıtma hızları kullanılarak elde edilen TL ışıma eğrileri

Şekil 5.30'da gösterilen TL ışıma eğrileri CGCD yöntemi ile ayrıştırılarak, bir önceki bölümde detaylı bir şekilde gösterilen 6 tepenin tepe sıcaklıkları ve yüksekliği kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak ısıtma hızının tepe sıcaklığına ve tepe yüksekliğine karşı grafikleri çizilmiştir. Sonuçlar sırasıyla Şekil 5.31'de ve Şekil 5.32'de verilmektedir. Bölüm 2.4.1'de de anlatıldığı gibi teorik olarak, ısıtma hızının artırılması ile tepe yüksekliğinin azalması ve tepe sıcaklığının da yüksek sıcaklık tarafına doğru kayması beklenir. Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar bu teori ile uyum içerisindedir. Ayrıca Şekil 5.32'de 4. ve 5. tepenin, ısıtma hızlarının artırılmasına karşın tepe yüksekliğinin diğer tepelere oranla daha az değiştiği görülmektedir. Özellikle 2, 4 ve 6 °C/s'lik ısıtma hızları kullanıldığında 4. ve 5. tepenin yüksekliğindeki değişim minimum olmaktadır. Böylece 4. ve 5. tepenin diğer tepelere oranla daha kararlı bir yapıya sahip olduklarını söyleyebiliriz.



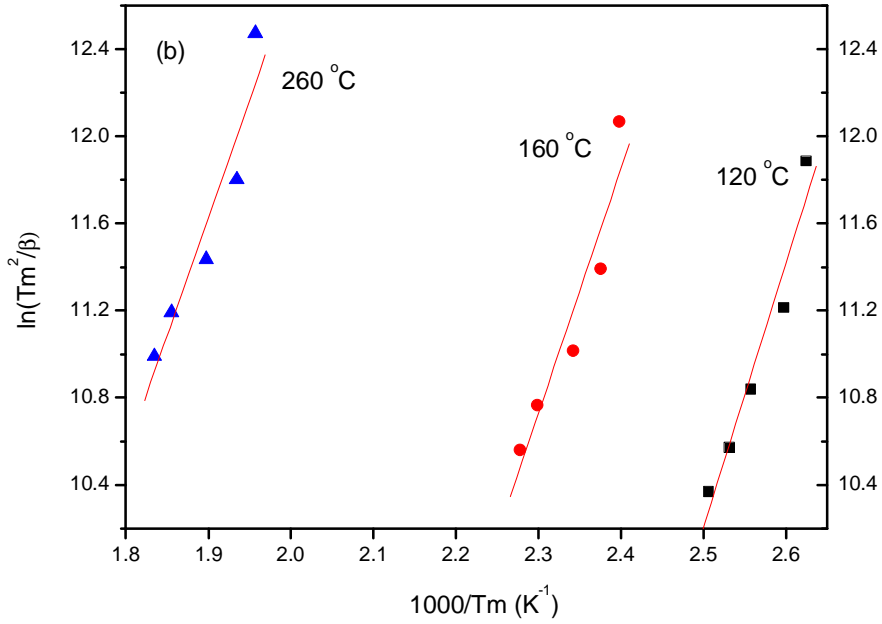
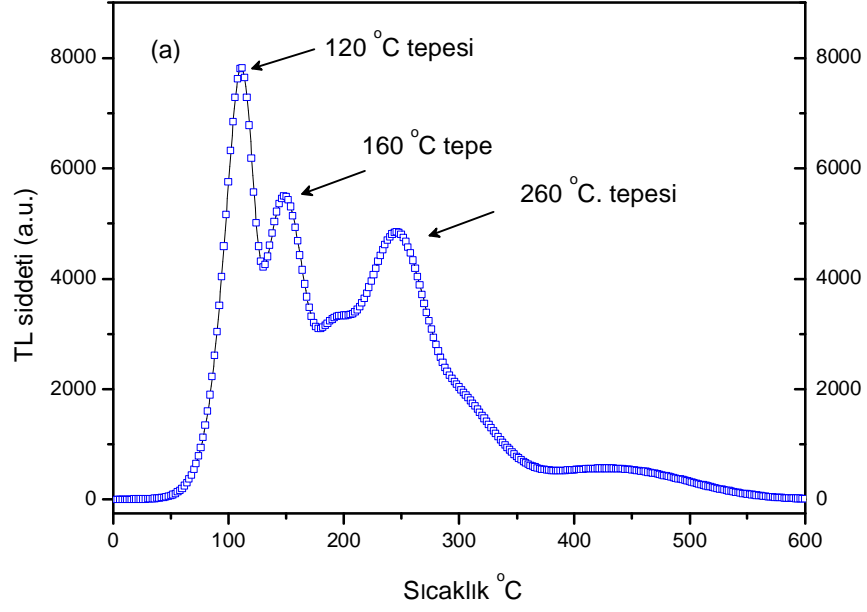
Şekil 5.31. CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış tepelerin farklı ısıtma hızına karşılık tepe sıcaklıklarının grafiği



Şekil 5.32. CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış tepelerin farklı ısıtma hızına karşılık tepe yüksekliğinin grafiği

Farklı ısıtma hızları kullanılarak ametist örneklerinin E ve s değerlerinin hesaplanması, tepe sıcaklıklarının ısıtma hızının artışına bağlı olarak yüksek sıcaklık bölgesine doğru kayması temeline dayanmaktadır. Bu yöntemin en iyi avantajlarından biri tuzak parametrelerinin hesaplanmasında sadece tepe maksimumlarının (I_m, T_m) bilinmesinin yeterli olmasıdır. Böylece bir TL eğrisinde belirgin bir şekilde gözlenebilen bir tepenin tuzak parametreleri ışına eğrisinden yararlanılarak rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Fakat bu yöntemin kullanımı yoğun bir şekilde üst üste binmiş tepelerden oluşan ışına eğrileri için oldukça zordur. Bazen bir tepenin gözlenen maksimum değerleri iki yakın tepenin üst üste gelmesinden dolayı gerçeği yansıtmayabilir. Bu durumda elde edilen E ve s değerleri gerçekte olması gerekenden farklı bir değerde bulunabilmektedir. Dolayısıyla bu yöntemde sadece ışına eğrisinde rahatlıkla ayırt edilebilecek tepeler kullanılabilir. Bu sebeple Şekil 5.29'da gösterilen 6 tepenin her biri için tuzak parametreleri hesaplanması bu yöntem için mümkün olmamaktadır. Bunun yerine Şekil 5.33 (a)'da gösterilen 120, 160 ve 260 °C civarındaki 3 tepe için hesaplama yapılabilmektedir.

Farklı ısıtma hızları kullanılarak elde edilen her bir tepenin sıcaklık değeri kullanılarak $\ln(T_m^2/\beta)$ 'nin $1/T_m$ 'ye karşı grafiği çizildiğinde elde edilecek eğrinin eğimi bize E/k 'yi verecektir. Bu eğrinin y eksenini kestiği ($1/T_m = 0$ noktası) nokta ise $\ln(sk/E)$ değerine karşılık gelmektedir (Bölüm 2.6.5). Böylece bu eşitlikler kullanılarak E ve s değerleri deneysel verilere bağlı olarak hesaplanmış olur. Şekil 5.33 (b)'de $\ln(T_m^2/\beta)$ 'nin $1/T_m$ 'ye karşı grafiği verilmektedir.



Şekil 5.33. (a) Farklı ısıtma hızları yönteminde kullanılan tepeler (b) her tepe için elde edilen $\ln(T_m^2/\beta)$ 'nin $1/T_m$ 'ye karşı grafiği

Şekil 5.33 (b)'de gösterilen eğrilerin eğiminden faydalanılarak E değeri, eğrilerin dikey eksenini kestiği nokta kullanılarak da s değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.3'te verilmiştir. Farklı Isıtma Hızları Yöntemi ile elde edilen E değerleri 120, 160 ve 260 °C tepeleri için sırasıyla; 1.05 ± 0.08 , 0.97 ± 0.18 , 0.93 ± 0.17 eV iken s değerleri de $6.46E+11$, $4.07E+10$, $8.19E+07$ s⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Tabloda aynı zamanda karşılaştırmak amacıyla CGCD analizinden elde edilen E ve s değerleri birlikte yer almaktadır. Buradaki karşılaştırma, Farklı Isıtma Hızları Yönteminde kullanılan TL tepelerine karşılık gelen ve daha önce Şekil 5.29'da verilen 1., 2. ve 4. tepeler arasında yapılmıştır. Bu tepelerin CGCD analizi sonucu elde edilen E değerleri ise sırasıyla 1.03, 0.81 ve 0.83 eV iken s değerleri de sırasıyla $6.03E+12$, $6.23E+08$ ve $2.50E+07$ s⁻¹'dir (Şekil 5.29). Farklı Isıtma Hızları Yöntemi kullanılarak hesaplanan E değerlerinin hata sınırları da dikkate alındığında her iki yöntemin kullanılmasıyla elde edilen değerlerin çok yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen frekans faktörleri arasındaki fark ise daha büyüktür. Bunun sebebi frekans faktörünün enerji seviyesindeki ve TL eğrisinin şeklindeki küçük değişikliklerden oldukça fazla etkilenmesidir. Daha önce verilmiş olan (2.7) denklemi $bE/kT_M^2 = s \exp(-E/kT_M)$ incelendiğinde s değerinin gerçekten de E değerindeki değişimlerden oldukça yüksek oranda etkileneceği görülmektedir. Tablo 5.3'te iki farklı yöntemin kullanılmasıyla elde edilen E ve s değerleri arasındaki sapma verilmektedir. E değerleri arasındaki en büyük sapma 2 tepe için %16 civarındadır. Frekans faktörleri arasındaki en büyük sapma ise sapma ise 1. tepe için gözlenmiş olup değeri %834'tür. Bu sapmanın çok yüksek çıkmasının nedeni yukarıda bahsedildiği gibi s değerlerinin T_m ve E değerindeki farklılıklardan oldukça fazla etkilenmesidir.

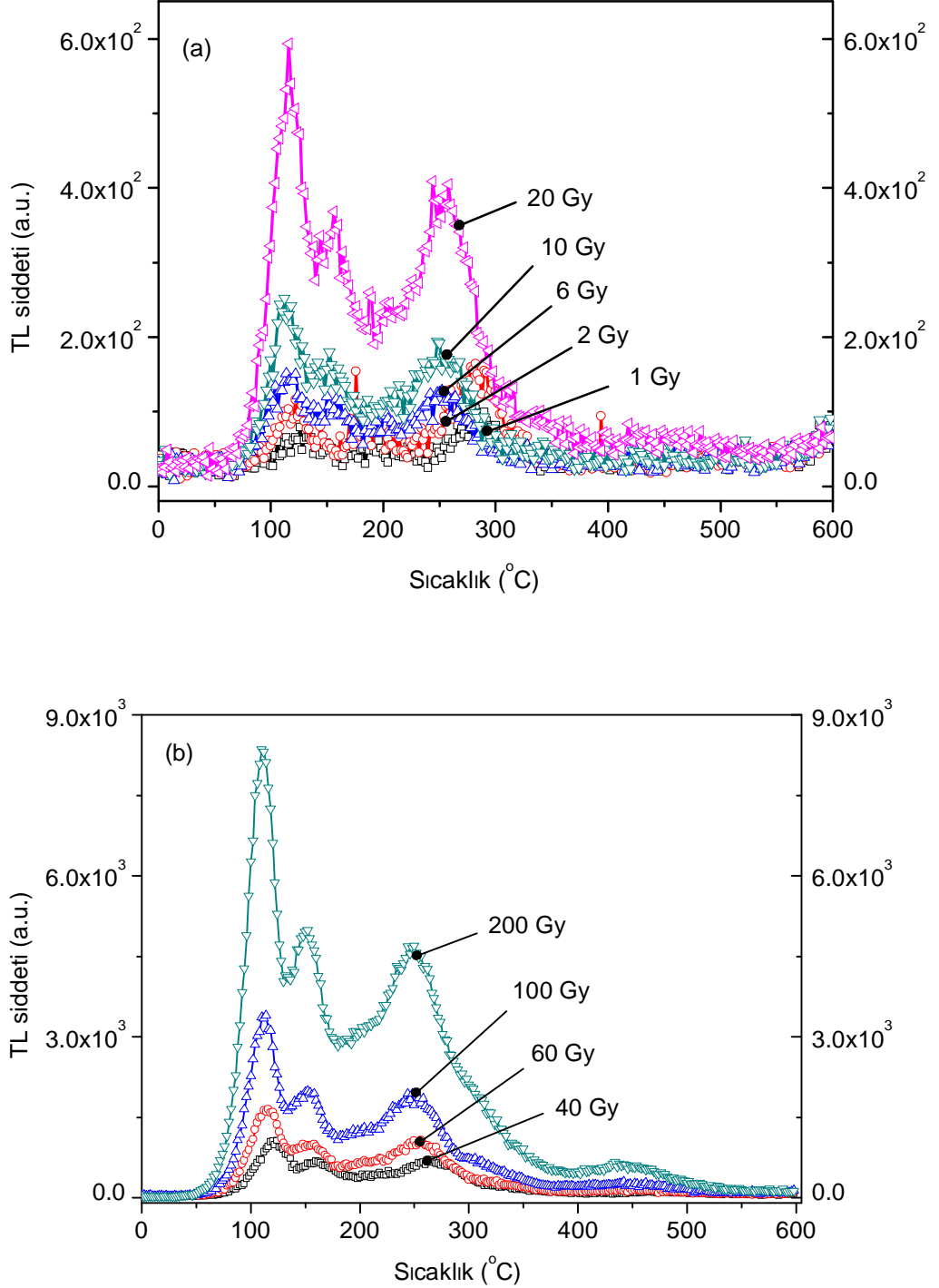
Tablo 5.3. Farklı ısıtma hızları yöntemi ve CGCD analizi sonucu elde edilen E ve s değerlerinin karşılaştırılması

Farklı Isıtma Hızları Yöntemi İle		CGCD Yöntemi İle		İki Yöntem Arasındaki Sapma
Tepe	E (ev)	Tepe	E (ev)	(%)
120 °C	1.05± 0.08	1	1.03	-1.85
160 °C	0.97± 0.18	2	0.81	-16.25
260 °C	0.93± 0.17	4	0.83	-11.15
Farklı Isıtma Hızları Yöntemi İle		CGCD Yöntemi İle		İki Yöntem Arasındaki Sapma
Tepe	s (s ⁻¹)	Tepe	s (s ⁻¹)	(%)
120 °C	6.46E+11	1	6.03E+12	834.36
160 °C	4.07E+10	2	6.23E+08	-98.47
260 °C	8.19E+07	4	2.50E+07	-69.47

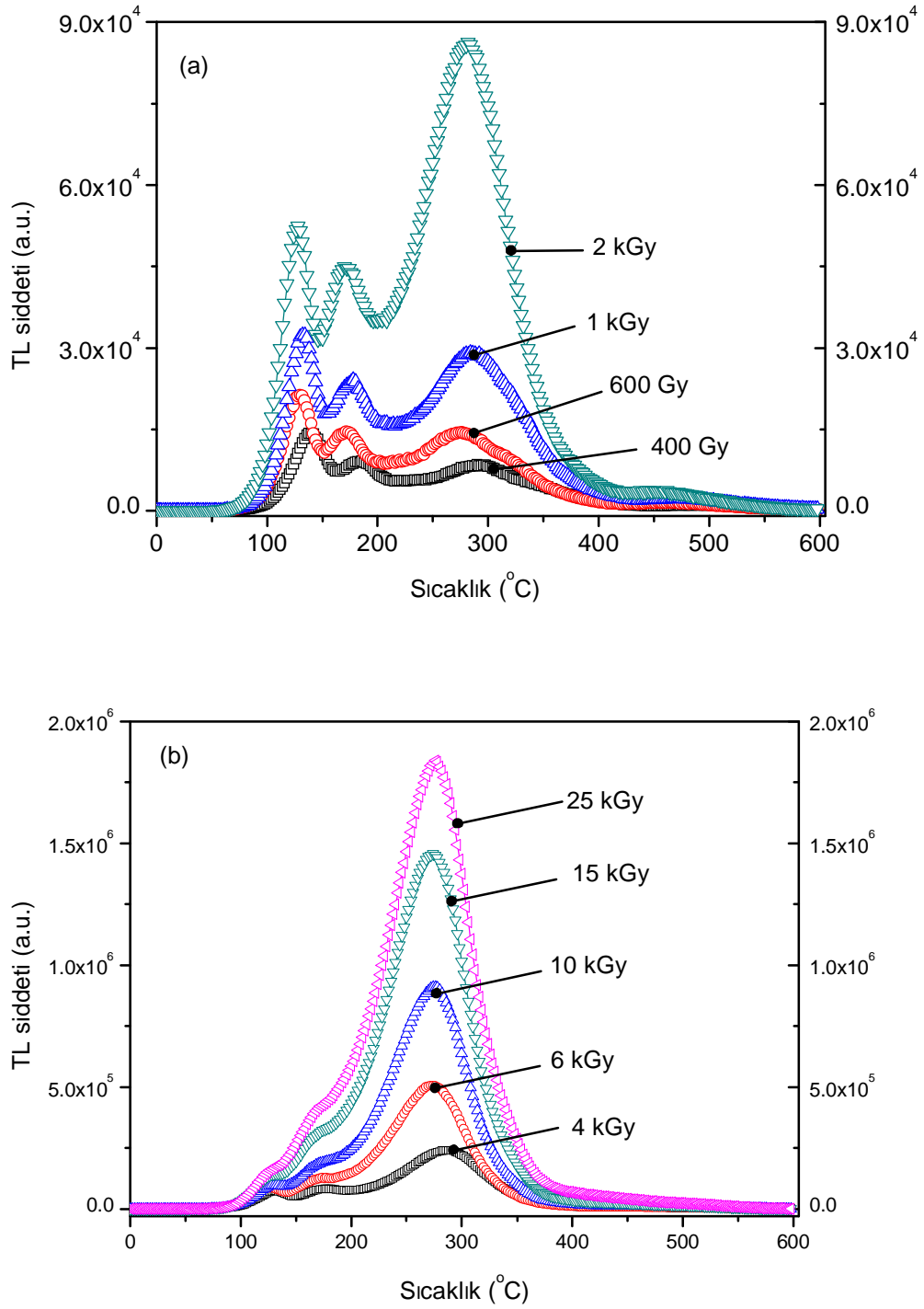
5.7. Doz Cevap

Dozimetrik çalışmalarda üzerinde durulması gereken en önemli konulardan birisi de dozimetrik materyalin doz cevap özelliklerinin belirlenmesidir. Doz cevabı, verilen doz oranının arttırılmasıyla birlikte TL şiddetinde gözlenen artıştır. TL şiddetindeki bu artışın verilen doz oranının artış miktarıyla doğru orantılı olarak artması ideal bir durumdur. Bu nedenle dozimetrik malzemedan beklenen lineer bir doz cevap eğrisine sahip olmasıdır. Fakat kullanılan çoğu dozimetrik malzeme sadece belli doz aralıklarında lineer bir doz cevap eğrisine sahiptirler. Dozimetrik malzemelere verilen dozun arttırılması durumunda doz cevap eğrisinin genellikle önce lineer sonra supralineer ve sublineer (doygunluk) bölgelerine sahip olduğu gözlenmektedir (McKeever ve ark., 1995). Doz cevap eğrisinin doğru bir şekilde belirlenmesi dozimetrik malzemenin kullanım alanının belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bölüm 2.5'te termoluminesans dozimetrelerinin kullanım alanları ve bu alanlarda genellikle hangi doz oranlarının ölçülmesi gerektiği verilmiştir. Böylece ametist örneklerinin lineer bir doz cevap eğrisine sahip olup olmadığı ve eğer sahipse bölgenin hangi doz aralıklarına karşılık geldiğinin araştırılması ametistlerin kullanım alanının belirlenmesini sağlayacaktır.

Ametist kristallerinin değişik doz oranlarına karşı tepkisinin belirlenmesi amacıyla örnekler Bölüm 4.2.8’de bahsedildiği şekilde hazırlanmış ve deney protokolü uygulanmıştır. Burada öncelikle ametistlerin beta parçacıklarına gösterdikleri tepkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple ~30 mg’lık toz ametist örneklerine 1 Gy ile 25 kGy arasında farklı beta dozları verilmiştir. Sonuçta elde edilen TL ışına eğrileri Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’te verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi ametist kristalleri düşük dozlara karşı çok hassas değildirler. Bu sebeple 1 ile 10 Gy arasında doz verilerek elde edilen TL eğrilerinin tepeleri çok belirgin değildir. Fakat yüksek dozlara çıkıldıkça TL tepelerinin belirginleştiği görülmektedir. Burada verilen dozun artırılmasıyla orantılı olarak TL şiddetlerinin de arttığı gözlenmektedir.

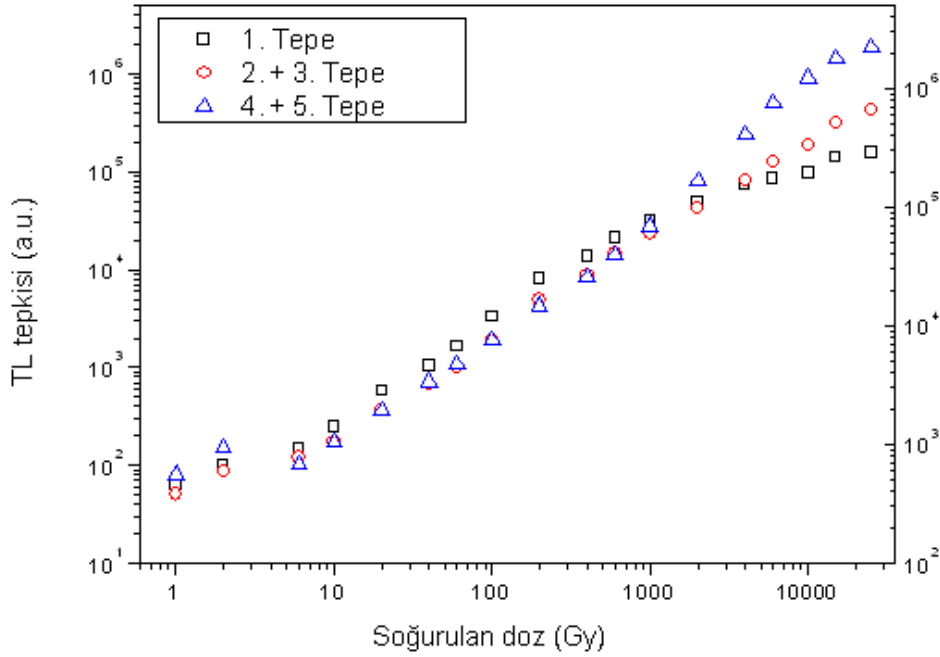


Şekil 5.34. Ametist örneklerine tavlama sonrası (a) 1 Gy ile 20 Gy arası, (b) 40 Gy ile 200 Gy arası beta dozu verilerek elde edilen TL eğrileri



Şekil 5.35. Ametist örneklerine tavlama sonrası (a) 400 Gy ile 2 kGy arası, (b) 4 kGy ile 25 kGy arası beta dozu verilerek elde edilen TL ışımaya eğrileri

Farklı beta dozları verilerek elde edilen verilen TL ışıma eğrileri kullanılarak 1. tepe, 2.+3. tepe ile 4.+5. tepeler için doz cevap eğrisi çizilmiş ve elde edilen sonuç Şekil 5. 36'da verilmiştir.



Şekil 5.36. 30 mg'lık toz ametist örneklerine 1 Gy ile 25 kGy arası beta dozu verilerek elde edilen 1. tepe, 2.+3. tepe ve 4.+5. tepe için elde edilen doz cevap eğrileri

Bu sonuçlar kullanılarak ametist örneklerinin hangi doz aralığında lineer bir doz cevap eğrisine sahip olduğunu anlamak amacıyla Bölüm 2.7'de verilen

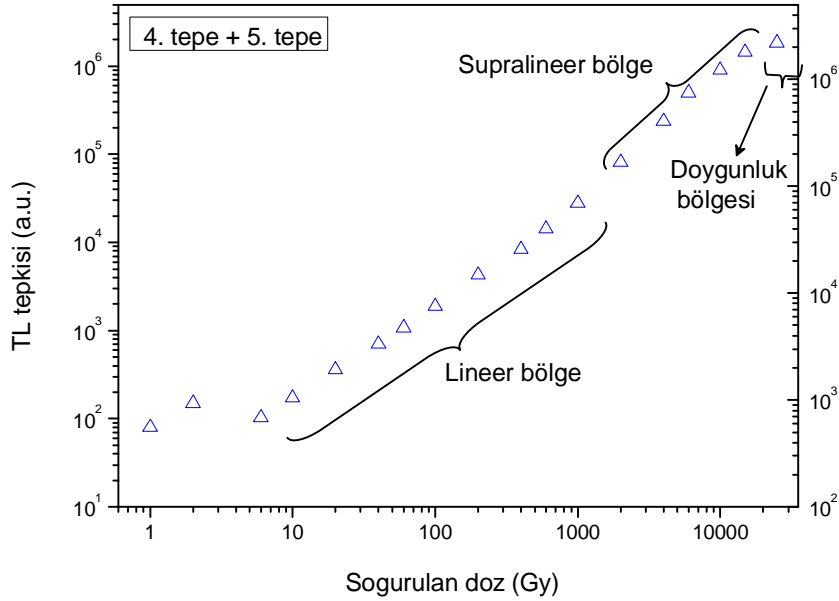
$$f(D) = \frac{F(D)/D}{F(D_1)/D_1}$$

denklemini kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.4'te verilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi, ametist örnekleri 4.+5. tepe için 10 Gy ile 1 kGy arasında lineer bir doz cevap bölgesine ($f(D)=1$) sahiptir. Hesaplanan bu lineer bölge içerisindeki veriler arasında en büyük sapma %16'dır. Bu sapmanın toz ametist örnekleri arasındaki yapısal farklılıklardan ve bazı deneysel koşullardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Supralineer bölge ise ($f(D)>1$) 2 kGy ile 15 kGy arasındaki

bölgedir. 25 kGy’de ise örnekler doyumluk bölgesine ($f(D) < 1$) girmektedirler. 4.+5. tepe için lineer, supralineer ve doyumluk bölgeleri Şekil 5.37’de gösterilmektedir.

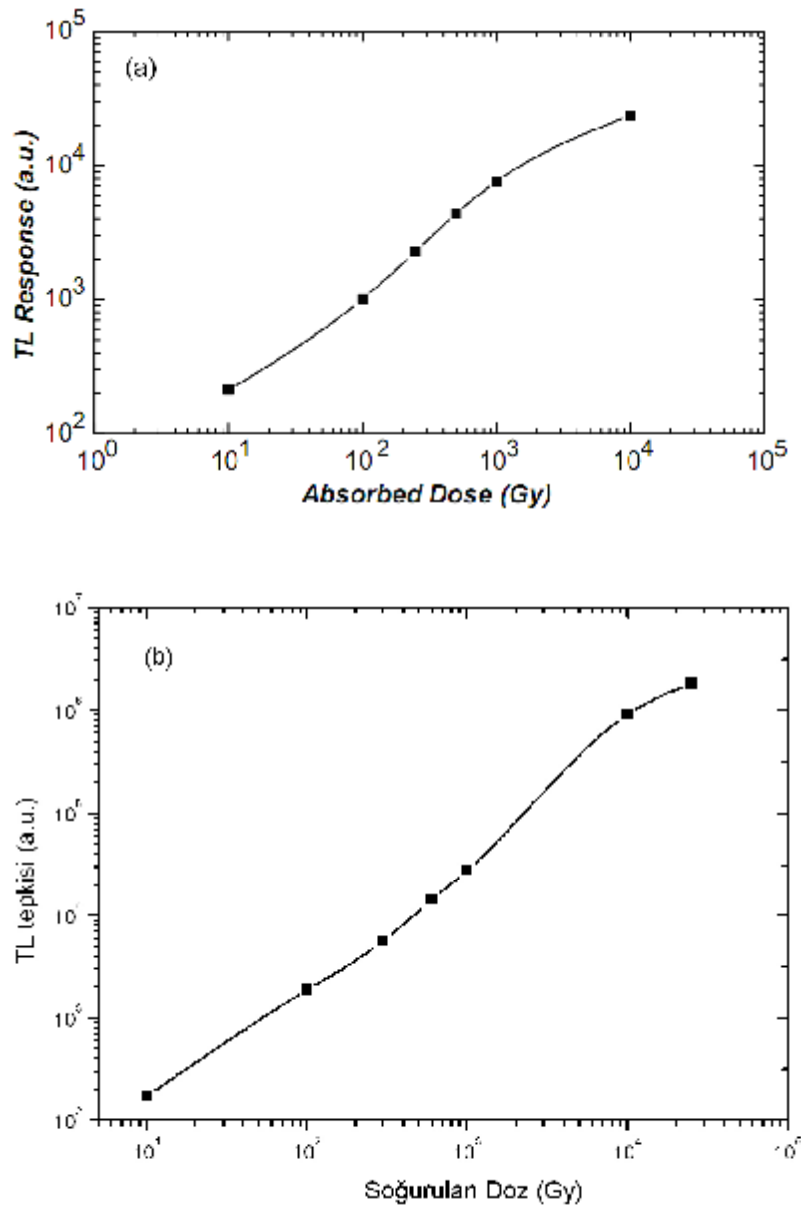
Tablo 5.4. 1 Gy ile 25 kGy arası beta dozu verilen ametist örneklerinin doz tepki oranları ($f(D)$)

Doz (kGy)	1. tepe ($f(D)$)	2.+3. tepe ($f(D)$)	4.+5. tepe ($f(D)$)
0.002	0.8	0.9	0.9
0.006	0.5	0.5	0.2
0.01	1.0	0.9	1.0
0.02	1.2	1.0	1.0
0.04	0.9	0.9	1.0
0.06	1.1	1.0	1.0
0.1	1.2	1.2	1.0
0.2	1.2	1.3	1.1
0.4	0.9	0.9	1.0
0.6	1.0	1.1	1.1
1	0.9	1.0	1.2
2	0.8	0.9	1.5
4	0.7	1.0	1.5
6	0.8	1.0	1.4
10	0.7	0.9	1.1
15	1.0	1.1	1.1
25	0.7	0.8	0.8



Şekil 5.37. 30 mg'lık toz ametist örneklerine 1 Gy ile 25 kGy arası beta dozu verilerek elde edilen 4.+5. tepelere ait doz cevap eğrisi üzerinde lineer, supralineer ve doyumluk bölgeleri görülmektedir

Rocha ve ark. (2003) çalışmalarında Brezilya doğal ametistlerinin doz cevap eğrisinin elde edilmesi amacıyla örneklerine sırasıyla 10, 100, 300 ve 600 Gy ile 1, 10 kGy'lik gama dozu vermişlerdir. Elde ettikleri doz cevap eğrisinde Brezilya ametistlerinin 100 Gy ile 1 kGy arasında lineer bir doz cevap eğrisine sahip olduğunu yayınlamışlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Rocha ve ark. (2003) tarafından elde edilen sonuçlar ile uyum içerisindedir (Şekil 5.38).



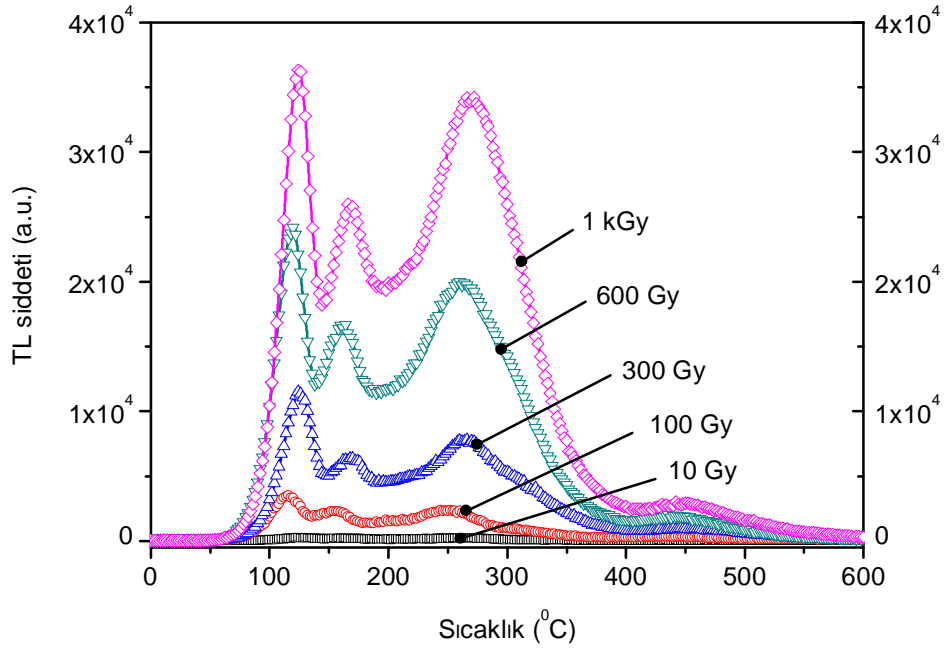
Şekil 5.38. (a) Rocha ve arkadaşları (2003) tarafından elde edilen doz cevap eğrisi ile (b) bu çalışmada elde edilen doz cevap eğrisinin karşılaştırılması

Ametist örneklerinin lineer olduğu doz cevap aralığının 10 Gy ile 1 kGy arasında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç ametist örneklerinin yüksek doz uygulamaları için kullanılabilceğini göstermiştir. Yüksek doz uygulamalarında kullanılan doz miktarları 10^2 Gy ile 10^6 Gy arasındadır. Bu doz miktarlarına nükleer santrallerin içerisinde, gıdaların sterilizasyonunda veya malzeme testlerinde rastlamamız mümkündür.

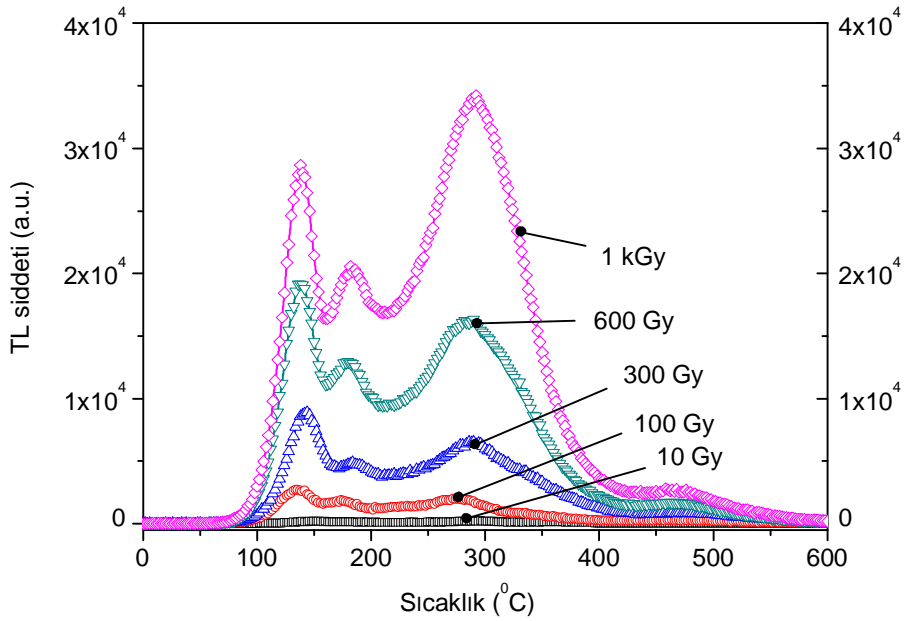
5.8. Enerji Cevabı

Dozimetrik çalışmalarda üzerinde durulması gereken bir diğer önemli konu da dozimetrik materyalin farklı radyasyon kaynaklarına göstereceği tepkinin belirlenmesidir. İyi bir dozimetrik malzemedeki beklenen farklı radyasyon kaynaklarından verilen aynı doz oranına materyalin aynı hassasiyetle cevap vermesidir. Ayrıca farklı kaynaklar kullanılarak, verilen doz oranının artırılmasıyla birlikte elde edilen TL ışınma eğrilerinin şiddetinin de aynı oranda artması beklenir.

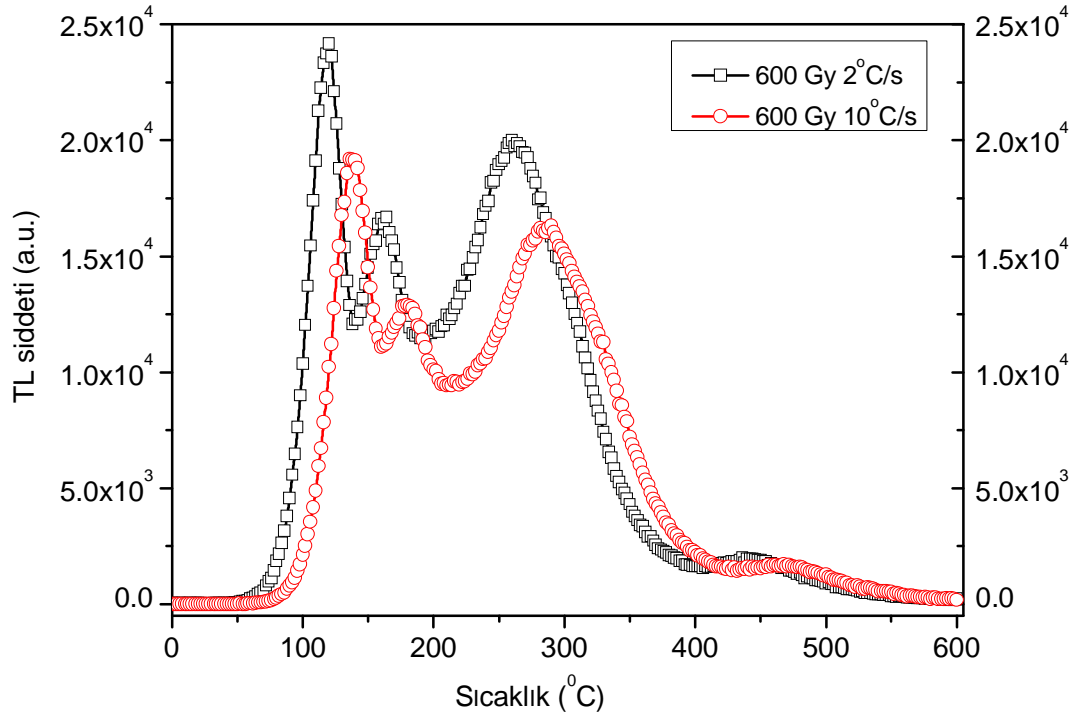
^{60}Co Gama kaynağı kullanılarak yapılan çalışmalarda ametist örneklerinin TL okumaları, karşılaştırmak amacıyla $2\text{ }^\circ\text{C/s}$ ve $10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 'lik ısıtma hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. $2\text{ }^\circ\text{C/s}$ 'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilen TL ışınma eğrileri Şekil 5.39'da, $10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilen TL ışınma eğrileri ise Şekil 5.40'ta verilmektedir. Şekil 5.41'de ise 600 Gy'lik gama dozu verilmiş ametist örneklerinden $2\text{ }^\circ\text{C/s}$ ve $10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilmiş TL ışınma eğrileri aynı grafikte verilmiştir. Grafikte ısıtma hızının artması ile tepe yüksekliklerinin azaldığı ve tepe sıcaklıklarının da yüksek sıcaklık tarafına doğru kaydığı gözlenmektedir. Bu durum deneysel sonuçların Bölüm 2.4.1'de bahsedilen teori ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.39. Gama kaynağı (^{60}Co) kullanılarak tavlama sonrası 10 Gy ile 1 kGy arasında ışınlanmış ametist örneklerinden $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilen TL ışıma eğrileri

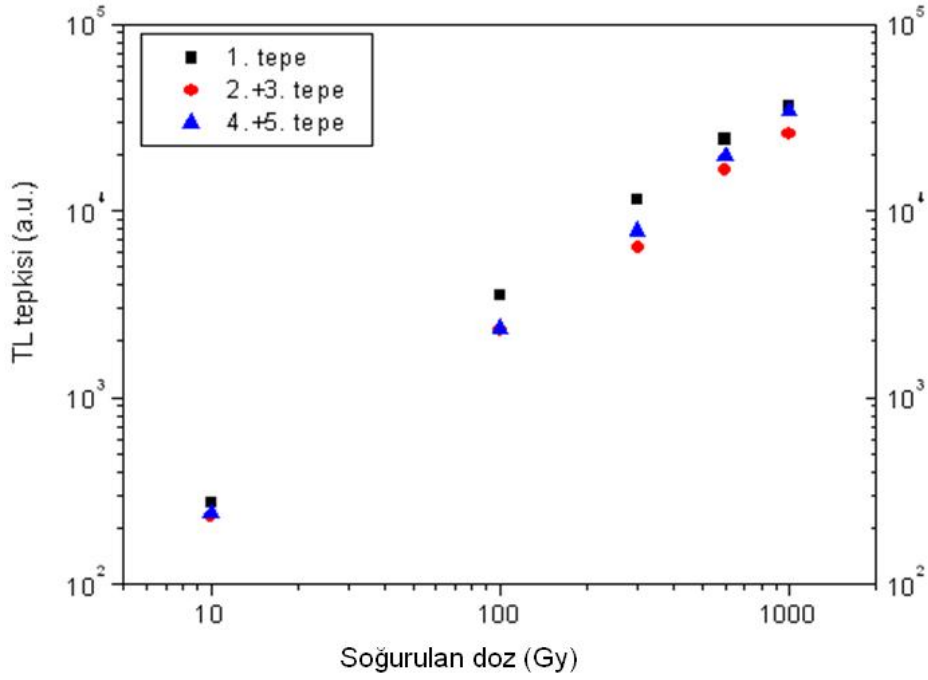


Şekil 5.40. Gama kaynağı (^{60}Co) kullanılarak tavlama sonrası 10 Gy ile 1 kGy arasında doz verilmiş ametist örneklerinden $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilmiş TL ışıma eğrileri



Şekil 5.41. Tavlama sonrası ^{60}Co kaynağıyla 600 Gy'lik gama dozu verilmiş ametist örneklerinden 2 °C/s ve 10 °C/s'lik ısıtma hızı kullanılarak elde edilmiş TL ışınma eğrileri

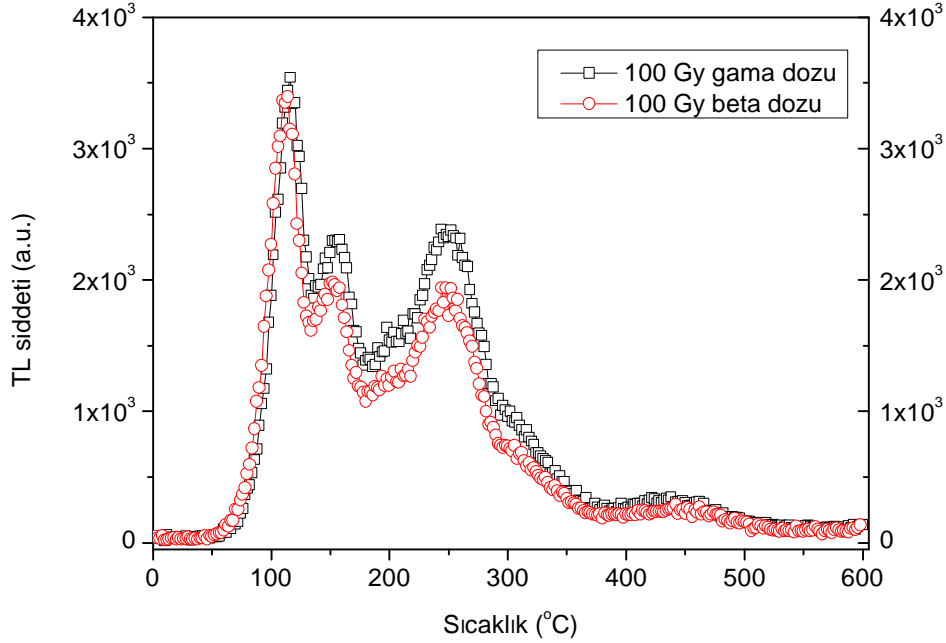
Gama kaynağı kullanılarak elde edilen doz cevap eğrisi Şekil 5.42'de verilmektedir. Bu grafik ametistlerin gama dozları için sahip oldukları lineer bölgeyi bulmamız için yeterli olmamıştır. Gama kaynağının öncelikle tedavi amaçlı olarak kullanılması ve daha yüksek dozlarla ametist örneklerinin ışınlanması çok zaman alacağından, Ç.Ü. Balcılı Hastanesinde bulunan ^{60}Co kaynağının kullanımı doz cevap eğrisinin lineer bölgesini bulmada yeterli olmamıştır. Buna karşın beta parçacıkları ve gama ışınları için elde edilen TL ışınma eğrilerinin benzer oldukları görülmektedir. Başka bir ifadeyle her iki radyasyon kaynağı kullanılarak elde edilen TL ışınma eğrilerindeki tepe sayısı ve tepe sıcaklıkları aynıdır.



Şekil 5.42. ⁶⁰Co gama kaynağı kullanılarak elde edilen doz cevap eğrisi

Bölüm 2.8'de bahsedildiği gibi farklı radyasyon kaynakları ile aynı doz oranları kullanılarak ışınlanan dozimetrik malzemelerden elde edilecek olan TL ışımaya şiddetleri farklılıklar gösterebilmektedir. Sabit bir doz için ölçülen TL şiddetinin, soğurulan enerjinin yayınlandığı kaynağın cinsine bağlı olarak değişmesi enerji cevabı diye tanımlanmaktadır.

Ametistin gama ışını ve beta parçacıklarına karşı gösterdikleri enerji cevabının karşılaştırılması amacıyla, örneklere Bölüm 4.1.2.1'de bahsedilen beta ve gama kaynaklarının kullanımıyla 100 Gy doz verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.43'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi farklı enerjilere sahip her iki radyasyon türü için elde edilen TL ışımaya eğrileri benzerdir. Fakat beta dozu verilerek elde edilen TL şiddeti aynı oranda gama dozu verilerek elde edilen TL şiddetinden daha düşüktür. Bu fark 4. ve 5. tepenin toplamından oluşan tepenin maksimum yüksekliği için %20 civarındadır.



Şekil 5.43. Tavlama sonrası 100 Gy’lik beta ve gama dozları verilmiş ametist örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrilerinin karşılaştırılması

Ametistlerin beta parçacıkları ve gama ışınları ile aynı dozla ışınlanmaları sonucu TL şiddetlerinde gözlenen fark ametistlerin enerji bağımlı olduklarını göstermektedir. Beta kaynağı olarak kullanılan ve Bölüm 4.1.2.1’de bahsedilen $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ kaynağı maksimum 2.25 MeV’luk enerjili beta parçacıkları yaymaktadır. Fakat bu parçacıkların tamamı bu enerji seviyesinde değildir. Bilindiği gibi beta kaynakları geniş bir enerji aralığına sahiptirler. Beta parçacıklarının ortalama enerjisi 0.93 MeV olmasına rağmen enerji kaybı söz konusu olduğunda sıfırdan maksimum E_{max} ’a kadar enerjinin değiştiği söylenebilir. ^{60}Co kaynağından yayımlanan gama ışınları (fotonlar) ise ortalama 1.25 MeV’luk enerjiye sahiptir. Beta parçacıkları ve gama ışınlarının (fotonların) madde ile etkileşimleri ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.8’de verilmiştir. Gama ışınları 1.25 MeV’luk enerjilere sahip olduklarından madde ile etkileşimleri sırasında çift oluşumu, Compton olayı ve fotoelektrik olayı gözlenmektedir. Gama ışınları madde içerisine girdiğinde enerjisini kaybetmemiş olan birincil foton demetleri madde içerisinde aldıkları her bir milimetrelik yol

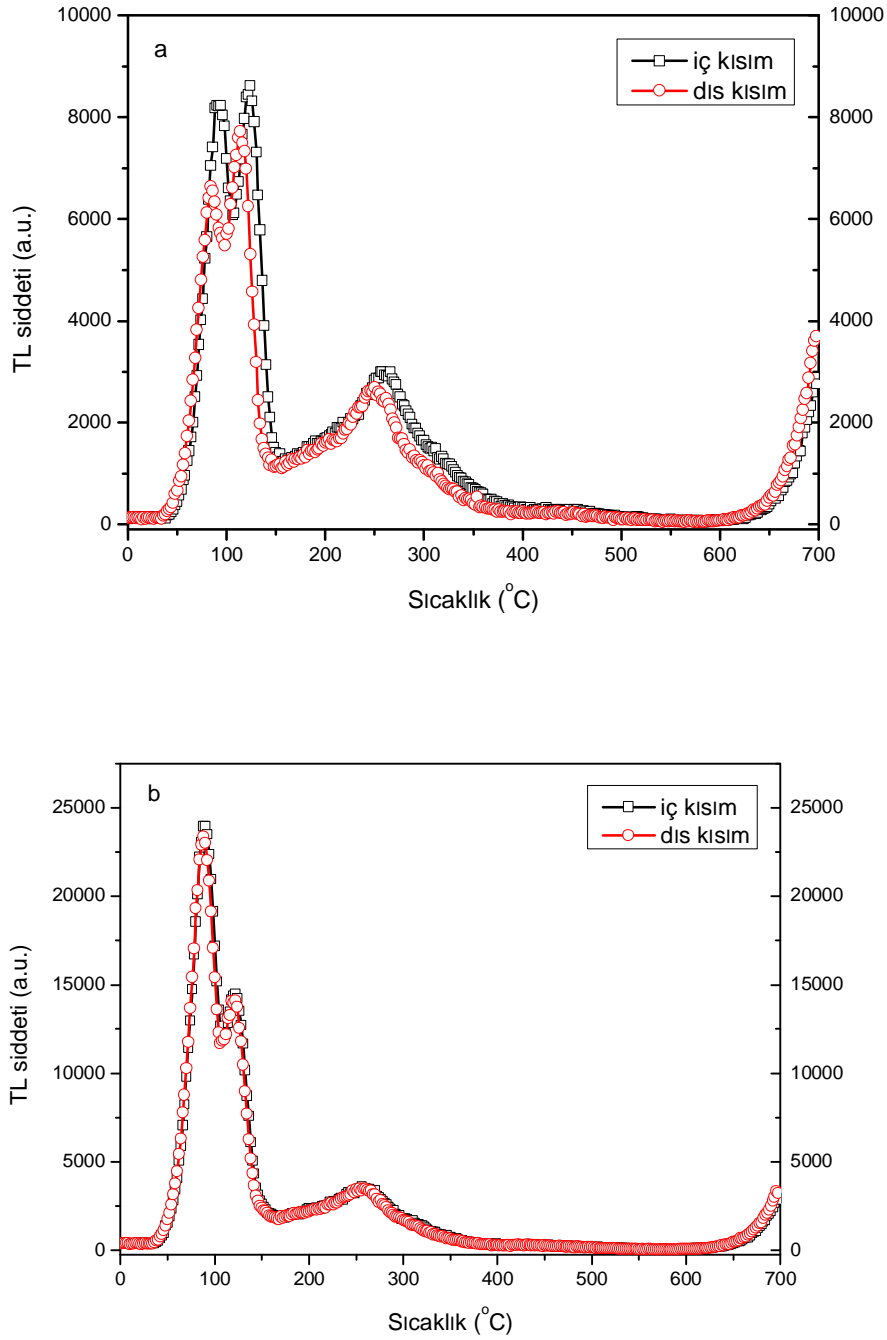
başına enerjilerinin belli bir yüzdesini kaybederler. Bu enerji kaybıyla ikincil elektronlar oluşmaya başlarlar (Compton saçılması ve çift oluşumu). Belli bir derinliğe ulaşıldığında (0.66 MeV'luk enerjiye sahip gama ışınları için yaklaşık 1mm) oluşan bu ikincil elektronların enerjileri maksimum olur ve oluşan elektronların akısı sabit kalır (yükü parçacık dengesi) (Aitken, 1985). Bu sebeple örneklerin gama kaynağı ile ışınlanmaları sırasında yük dengesinin sağlanması amacıyla örnek ile yüzey arasında en az 2 mm civarında kalınlığa sahip bir malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada ametist örneklerinin ^{60}Co kaynağı ile ışınlanmaları sırasında örnekler akrilik bir örnek haznesinin içerisine yerleştirilmişlerdir. Akrilik örnek haznesinin duvar kalınlığı 5 mm'dir. Bu kalınlık elektronik dengenin sağlanması için yeterlidir.

Yukarıda bahsedildiği gibi gama ışınları enerjilerini hem fotoelektrik olay ile doğrudan hem de Compton saçılması ve çift oluşumu sonucunda oluşan ikincil elektronlar aracılığıyla maddeye verirler. Düşük etkin atom numarasına sahip bir materyalin 1.25 MeV'luk enerji ile gelen gama ışınlarıyla etkileşimleri sırasında gözlenen baskın olay Compton saçılmasıdır. TLD materyalinin β parçacıkları için göstermiş oldukları enerji cevabı ise daha karmaşıktır. Yüklü parçacıklar enerjilerini, birçok çarpışma ve ışımayla sonuçlanan etkileşimler sonucunda, küçük basamaklarla kaybederler. Buradaki en önemli parametre durdurma gücüdür, yani $dE/dx|_{E,Z_{etkin}}$ (x , materyal içerisindeki mesafedir). Görüldüğü gibi fotonlar için olduğu gibi beta parçacıklarının etkileşiminde de materyalin etkin atom numarası önemli bir rol oynamaktadır. Ametist örneklerinin etkin atom numarasının hesaplanması için Denklem 2.37 kullanılmış ve sonuç 11.5 olarak hesaplanmıştır. Literatürde ametistin etkin atom numarası ile ilgili bir bilgiye rastlanmamış olmasına rağmen LiF 'in Z_{etkin} değeri 8.14, CaF_2 'in Z_{etkin} değeri 16.3 olarak verilmektedir (McKeever ve ark., 1995).

Sonuç olarak ametist örneklerinin farklı enerjilerdeki gama ve beta kaynaklarına karşı gösterdiği enerji cevabının farklı olduğu Şekil 5.43'teki TL şiddetindeki farka dayanarak söyleyebiliriz. Fakat ametist örneklerinin enerji cevabının tam olarak nitelendirilebilmesi için radyasyon kaynağının enerjisinin değiştirilerek enerji cevap grafiğinin elde edilmesi gerekmektedir. Buna karşın, bu çalışmada kullanılan beta ve gama kaynakları belli bir enerji spektrumuna sahiptirler.

Bu sebeple örneklerin daha yüksek ve daha düşük enerjilerle ışınlanmaları mümkün olmamıştır.

Şekil 5.43'te beta ve gama kaynakları kullanılarak elde edilen TL eğrilerindeki 4. ve 5. tepenin toplamından oluşan tepenin yükseklikleri arasındaki farkın % 20 civarında olduğundan yukarıda bahsedilmiştir. Bu çalışmada ayrıca bu %20'lik farkın oluşmasında yukarıda bahsedilen sebeplerin dışında farklı etkilerin de söz konusu olup olmadığı incelenmiştir. Literatürde beta kaynağının kullanılmasıyla örneklerin ışınlanması sırasında örneklerin soğurduğu doz oranının örnek çapına göre değiştiği belirtilmektedir. Başka bir deyişle soğurulan doz oranı örnek çapı boyunca sabit değildir. Örnek diskinin merkezinde bulunan taneciklerin dış bölgede bulunan taneciklere oranla %10 civarında daha fazla doz soğurduğu belirtilmiştir (Aitken, 1985). Bu etkinin Bölüm 4.1.2.1'de bahsedilen beta kaynağı içinde söz konusu olup olmadığı incelenmesi amacıyla 10 mm çapındaki kenarlıklı disklerle ~30 mg'lık toz ametist örnekleri yerleştirilmiştir. Daha sonra beta kaynağının kullanımıyla örneklerin 200 Gy'lik doz soğurmaları sağlanmıştır. Arkasından diskin merkezinde yer alan tanecikler ile diskin dış kısmında yer alan tanecikler dikkatlice ayrılmışlardır. Bu tanecikler yeniden tartılarak her biri 12 mg olacak şekilde farklı disklerle yerleştirilmiş ve TL ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen TL ışınma eğrisi Şekil 5.44'te yer almaktadır. Şekilde görüldüğü gibi diskin merkezinden alınan tanecikler ile dış kısımdan alınan taneciklerin TL şiddetinde 4.+5. tepe için %10 civarında farklılık gözlenmiştir. Bu farkın bu her iki diskteki taneciklerin olası yapısal değişikliklerinden kaynaklanıp kaynaklanmadığını anlamak için aynı disklerle yine 200 Gy'lik beta dozu verilmiş ve TL ışınma eğrileri kaydedilmiştir (Şekil 5.45). Şekilde görüldüğü gibi her iki örnek de tamamen aynı TL şiddetine sahiptir. Böylece bu %10'luk farkın kaynağın geometrisinden ileri geldiği ileri sürülebilir. Görüldüğü gibi gama ve beta kaynaklarının kullanımı sırasında gözlenen TL şiddetindeki fark burada bahsedilen ve örneklerin ışınlanması sırasında örnek muhafazasının yapısındaki ve geometrisindeki farklılıklardan da kaynaklanmaktadır.



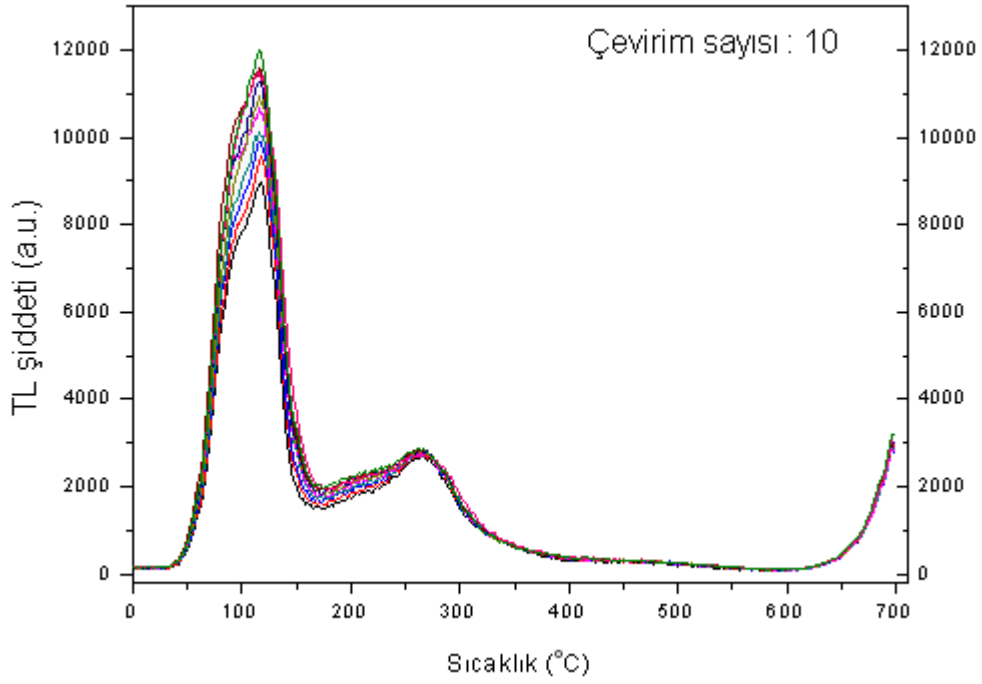
Şekil 5.44. Beta kaynağından soğurulan dozun örnek diskinin çapına bağlı olarak değişimi a) 200 Gy beta dozu verilmiş 10mm çapındaki örneğin iç kısmı ile dış kısmına ait TL ışıma eğrilerinin karşılaştırılması b) elde edilen bu iki örneğe 200 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilen TL eğrileri

5.9. Tekrar Kullanılabilirlik Deneyi Sonuçları

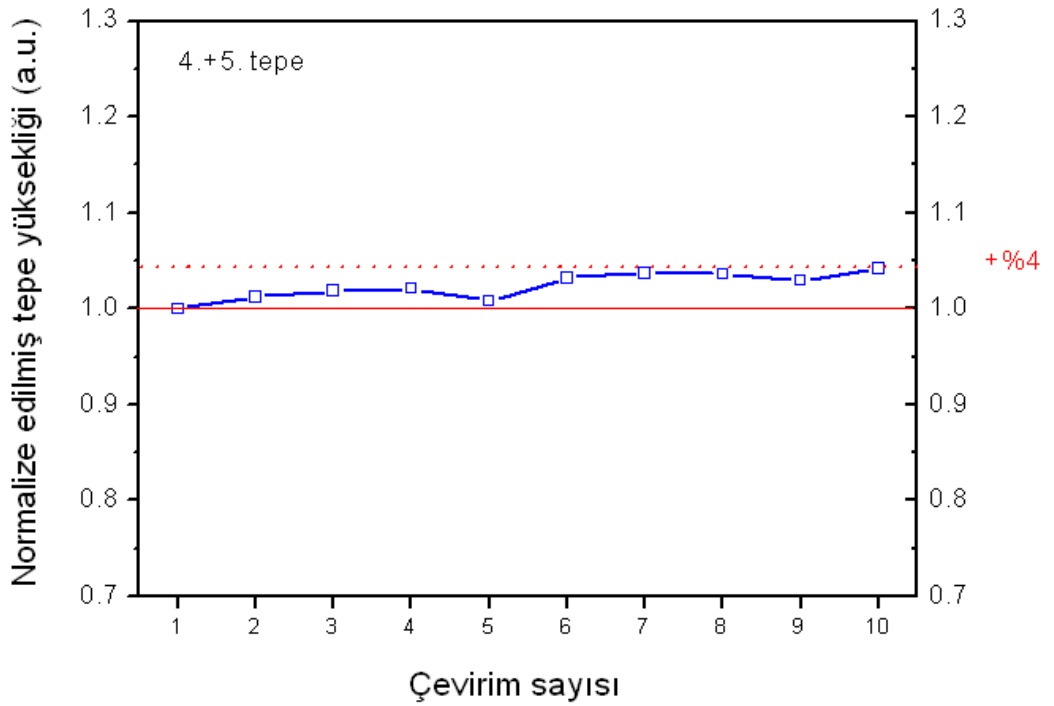
Birçok dozimetrik malzemenin ilk TL okumasından sonra TL hassasiyetinde azalma meydana gelir. Bölüm 5.3 ve 5.4'te de bahsedildiği gibi örneğin maruz kaldığı sıcaklık, bazı durumlarda tuzak yapısını bozarak TL hassasiyetinin azalmasına yol açmaktadır. Bu sorunun giderilmesi malzemenin uygun bir tavlama sıcaklığı ve tavlama süresinde ısıtılmasıyla mümkündür. Böylece dozimetrik malzemenin tekrar tekrar aynı hassasiyetle kullanılması beklenmektedir.

Ametist örneklerinin verilen bir doza her defasında aynı hassasiyetle cevap verip veremeyeceğini incelemek amacıyla Bölüm 4.2.9'da anlatıldığı gibi örnekler hazırlanmış ve belirlenen deney protokolü uygulanmıştır. Burada örneklerin her tavlama + doz + TL okuması işlemleri kısaca "çevirim" olarak adlandırılmıştır.

Deneyde kullanılan üç örnekten elde edilen TL sinyallerinin ortalaması alınmış ve her bir veri 30 mg için normalize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.45'te verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi çevirim sayısı arttıkça düşük sıcaklık tepelerinin TL hassasiyetlerinde gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Buna karşın dozimetrik tepe olan 4.+5. tepe için bu değişim daha azdır. Şekil 5.46'da 4.+5. tepe için çevirim sayısına karşı normalize edilmiş TL hassasiyetinin grafiği yer almaktadır. Bu grafikte dozimetrik tepenin TL hassasiyetindeki değişimin 10 çevirim sonunda ilk değere göre maksimum + %4'lük sapmaya sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç ametist örneklerinin tekrar kullanılabilirlik oranının düşük denebilecek hata sınırları içerisinde olduğunu göstermiştir. Bu sonuç aynı zamanda Bölüm 5.4'te belirlenen en uygun standart tavlama sıcaklığı ve süresi ile ilgili bulunan sonucun (450 °C'de 90 dakika tavlama, alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma, 80 °C'de 24 saat tavlama ve alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma) doğruluğunu bir kez daha göstermiştir. Bunların yanısıra bu deneyden çıkarılacak bir diğer önemli sonuç da 4.+5. tepenin ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak en uygun tepe olduğunun tekrar gösterilmesidir.



Şekil 5.45. Aynı ametist kristallerine tavlama sonrası 100 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışıma eğrileri



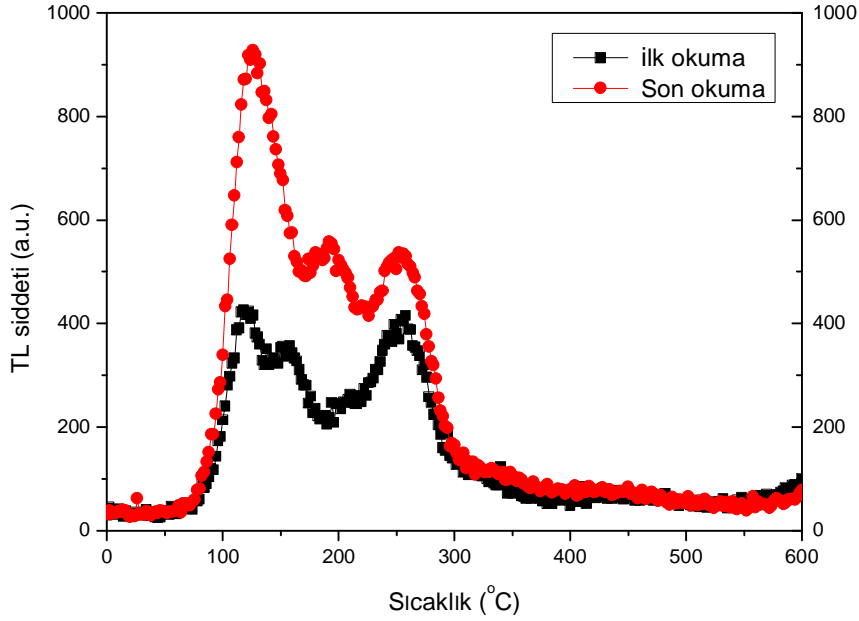
Şekil 5.46. 4.+5. tepe için elde edilen çevirim başına TL hassasiyetinin değişim grafiği

5.10. Yüksek Dozun Ametistin Hassasiyetine Etkisi

Kuvars gibi kristaller yüksek dozlara maruz kaldıklarında TL hassasiyetinde değişim meydana gelmektedir. Bu değişim çoğu dozimetrik malzeme için hassasiyetin artması yönündedir. Çoğu zaman yüksek dozun ardından bir tavlama işleminin de gerçekleştirilmesi gerekir (Furetta, 2003). Yüksek dozun ardından tavlama işleminin uygulanmasıyla TL hassasiyetinin artması olayı birçok kaynakta “ön-doç etkisi” olarak adlandırılmaktadır. Zimmerman (1971) ön-doç etkisini yüklerin bir ışına merkezinden diğerine geçmesiyle gerçekleşen bir modele dayandırarak açıklamaktadır. Bu yük transferi, ışına merkezlerinde tuzaklanan deşiklerin popülasyonunda bir artışa yol açmakta ve çeşitli ışına merkezlerinde tuzaklanmış deşiklerin birbirleri arasındaki rekabeti azaltarak ışımali yeniden birleşme oranının artmasını sağlamaktadır.

Ametist örneklerinin yüksek doza bağılı olarak TL hassasiyetinde değişim olup olmadığını incelemek amacıyla Bölüm 4.2.10’da anlatıldığı şekilde örnekler hazırlanmış ve belirlenen deney protokolü uygulanmıştır.

Elde edilen TL eğrileri Şekil 5.47’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi verilen ilk 20 Gy’lik beta dozundan elde edilen TL şiddeti, yüksek dozun ve tavlamanın arkasından verilen ikinci 20 Gy’lik beta dozundan elde edilen TL şiddetinden daha düşüktür. Başka bir ifadeyle aynı şartlarda hazırlanmış ve aynı ağırlığa sahip toz ametist örneklerinin, aynı doz miktarına maruz kalmalarına rağmen, yüksek radyasyon sonrası ölçülen TL şiddeti belirgin şekilde artmıştır. Sonuç olarak yüksek dozun etkisi ile 4.+5. tepe için TL hassasiyetindeki artışın % 31 civarında olduğu hesaplanmıştır. Böylece ametist örneklerinin bir ön-doç işlemine tabi tutularak hassasiyetinin arttırılabileceği ve daha düşük dozlarla çalışılan alanlarda da kullanılabileceği söylenebilir. Fakat bunun doğruluğunu göstermek için bu konuda daha kapsamlı bir çalışma yapılması gereklidir.

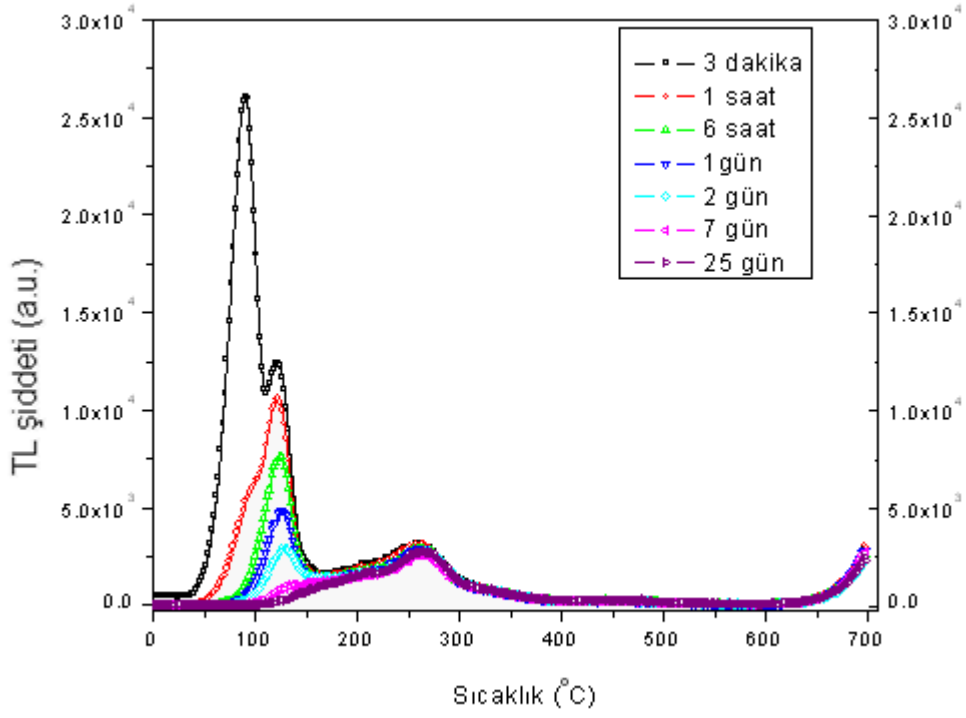


Şekil 5.47. 5 kGy'lik yüksek beta dozundan önce (ilk okuma) ve sonra (son okuma) 20 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışımaya eğrileri. Şekilde yüksek dozun etkisiyle TL hassasiyetindeki artış görülmektedir

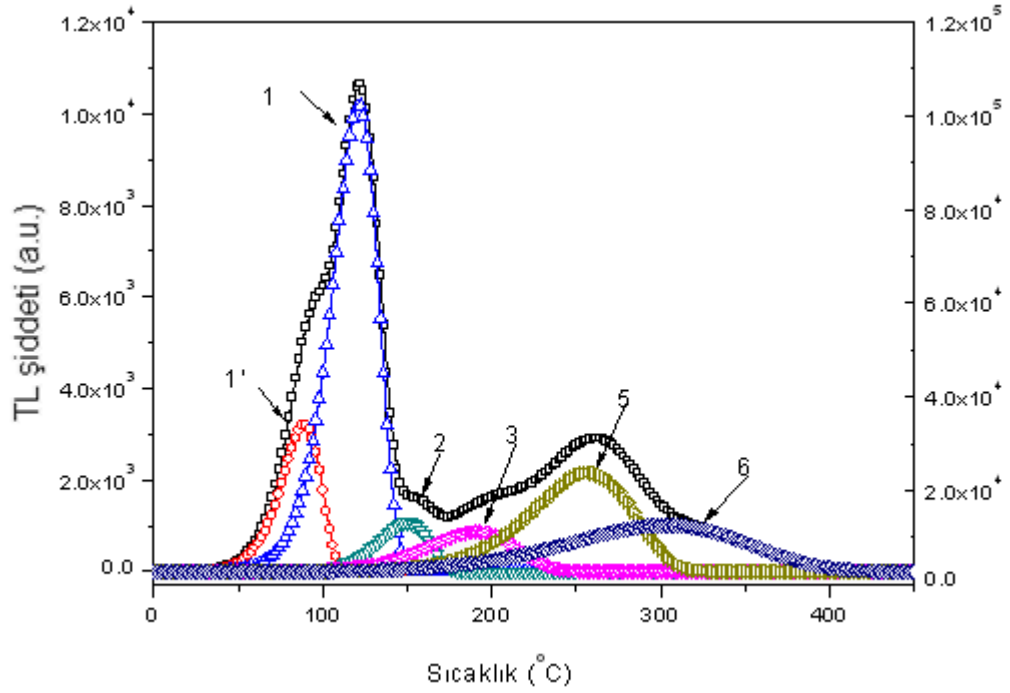
5.11. Anormal Sönüm Sonuçları

Ametist örneklerinin anormal sönüm özelliklerinin incelenmesi amacıyla Bölüm 4.2.10'da anlatıldığı şekilde örnekler hazırlanmış ve belirlenen deney protokolü uygulanmıştır. Elde edilen TL ışımaya eğrileri Şekil 5.48'de verilmektedir. Şekilde düşük sıcaklık tepelerinin TL şiddetlerinde bekleme zamanına bağlı olarak ciddi bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.49'da ise ışınlamanın arkasından 1 saat bekletilerek elde edilen TL ışımaya eğrilerinin CGCD yöntemi ile ayrıştırılmış grafiği yer almaktadır. Şekilde görüldüğü gibi ametist örneklerine doz verilmesinin hemen arkasından gözlenebilen fakat kısa sürede sönüme uğrayan ve (1') olarak adlandırılan yeni bir düşük sıcaklık tepesinin varlığı fark edilmiştir. Bu tepe ile beraber 1. ve 2. tepenin de doz verilmesinden 48 saat sonra TL şiddetinin iyice azaldığı ve 1 hafta sonra da neredeyse tamamen sönüme uğradığı

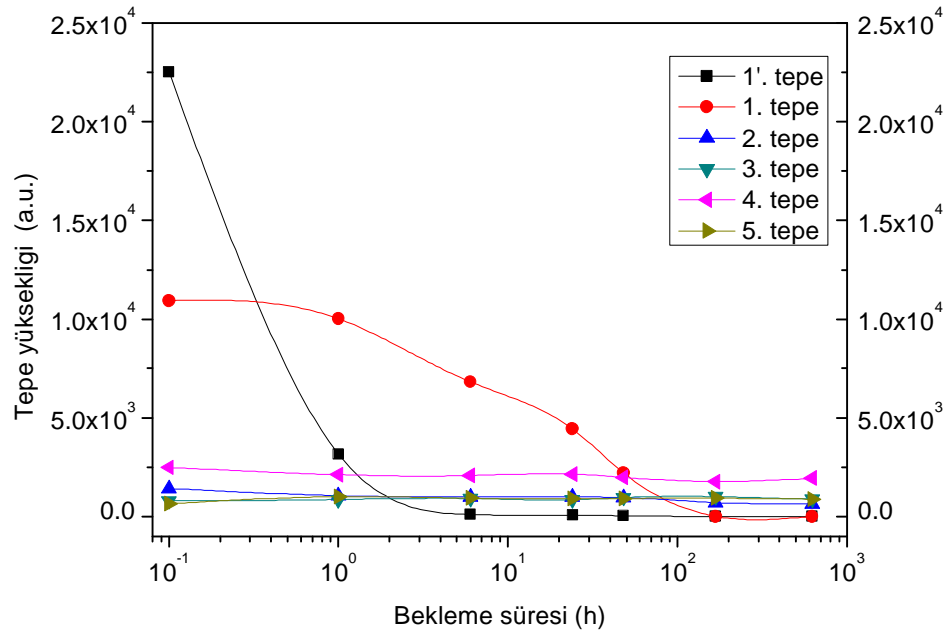
görülmektedir. 4. ve 5. tepelerin ise sönüm miktarları ilk üç tepeye oranla çok daha düşüktür.



Şekil 5.48. 30 mg'lık toz ametist örneklerine 100 Gy'lik beta dozu verilmesinin arkasından farklı bekleme süreleri sonrasında elde edilen TL ışıma eğrileri

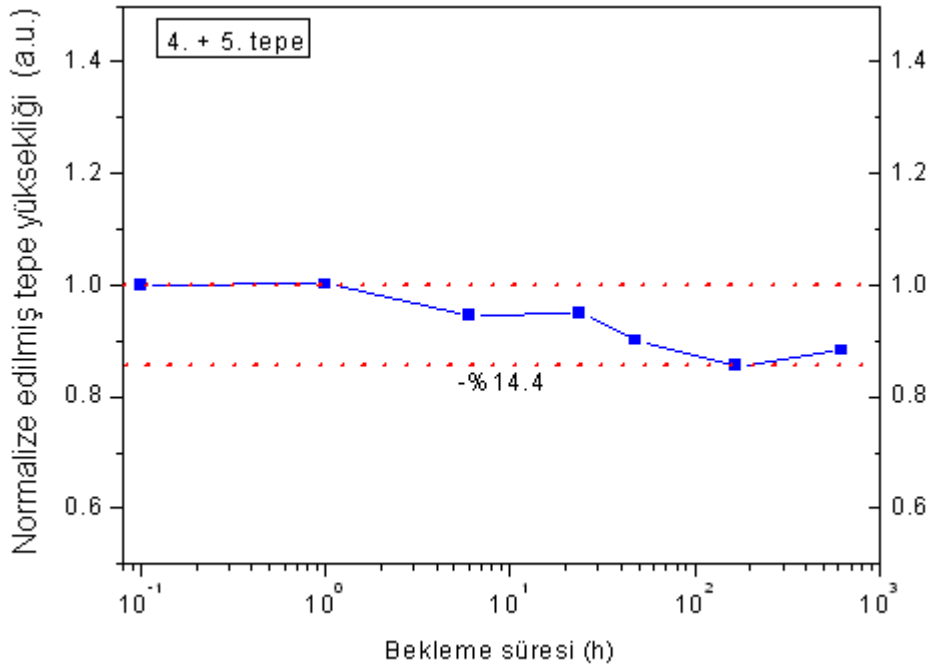


Şekil 5.49. 30 mg'lık toz ametist örneğine 100 Gy'lik beta dozu verilmesini takiben 1 saat beklemenin arkasından elde edilen TL ışıma eğrisinin CGCD yöntemi ile ayrıştırılması



Şekil 5.50. Bekleme süresine bağlı olarak tepelerin TL şiddetinin değişim grafiği

Şekil 5.50’de her bir tepenin bekleme zamanına bağlı olarak TL şiddetindeki azalma oranları görülmektedir. Dozimetrik tepe olan 4.+5. tepe için, normalize edilmiş tepe yüksekliğinin bekleme süresine bağlı olarak değişim grafiği ise Şekil 5.52’de verilmektedir. Şekilde 4.+5. tepenin yüksekliğinin 7 gün sonra %14 civarında azaldığı fakat yaklaşık 25 gün beklenmesine rağmen bu azalmanın artmadığı gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ametist örneklerinin dozimetrik amaçla kullanımı sırasında ilk 3 tepenin kısa ömürlü olduğunu göstermektedir. Buna karşın 4. ve 5. tepenin toplamının oluşturduğu tepenin şiddetinde belirgin bir azalma olmasına rağmen bu azalmanın 7 günden sonra artmaya devam etmemesi, 4. ve 5. tepelerin dozimetrik tepeler olarak oldukça kararlı olduklarını göstermektedir. Ayrıca bu sonuç ametistin dozimetrik malzeme olarak kullanımının uygun olabileceğini de göstermektedir.



Şekil 5.51. 4. + 5. tepe için normalize edilmiş tepe yüksekliğinin bekleme süresine bağlı olarak değişim grafiği

Bölüm 4.2.11’de bahsedildiği gibi elektronların tuzak içerisindeki yaşam süreleri s , E ve saklama sıcaklığı değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Daha önce denklem 4.1 aşağıdaki $t = s^{-1} \exp(E/kT)$ olacak şekilde verilmişti. Bölüm 5.6.1’de

CGCD analizi sonucunda elde edilen s ve E değerleri bu denklemde yerlerine konarak 25 °C'deki yaşam süreleri hesaplanmıştır. Fakat Şekil 5.29 gösterilen 4., 5., ve 6. tepelerin E ve s değerlerinin beklenilenden düşük çıktığı ve bunun olası sebeplerinden Bölüm 5.6.1'de bahsedilmiştir. Dolayısıyla hesaplanan yaşam süreleri de gerçeği yansıtmayacağından burada sadece Şekil 5.49'da gösterilen ilk dört tepenin yaşam süreleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ilk üç tepe için sırasıyla 0.93, 11.6, 22.6 ve 96.2 saat olarak bulunmuştur. Buna karşın Şekil 5.48'de verilen deneysel sonuçlar kullanılarak ilk tepenin 6 saat, ikinci tepenin 7 gün, üçüncü tepenin ise 25 gün sonra sadece %56 oranında azaldığı, dördüncü tepesinde yine aynı sürede %9 azaldığı gözlenmiştir. Görüldüğü gibi bu tepeleri için teorik olarak elde edilen yaşam süreleri ile deneysel olarak elde edilenden farklı olduğu görülmektedir. Örneklerin saklanma sıcaklığı sürekli olarak takip edilmediğinden olası ısı değişimleri bu farkın sebeplerinden biri olabilir. Bu farkın bir başka sebebi de CGCD yöntemi ile elde edilen E değerlerinin eğrinin şeklinden oldukça fazla etkilenebilmesidir. Aynı miktarda doz verilmiş ametist örneklerinin tepe sıcaklıklarının da %5 civarında farklılıklar gözlemlendiği Bölüm 5.3'te bahsedilmiştir. İşte tepe sıcaklığındaki olası kaymalar, TL eğrisinin şeklindeki küçük değişiklikler ve TL tepelerinin yoğun bir şekilde üst üste binmiş olması CGCD yöntemi sonucu elde edilen aktivasyon enerjisinin olması gerekenden daha küçük veya daha büyük bir değerde hesaplanmasına yol açabilmektedir. Aktivasyon enerjisinde meydana gelen ufak bir değişiklik bile s değerinin 10^1 - 10^2 mertebesinde değişmesine neden olmaktadır. Bu hata payından dolayı da hesaplanan yaşam süreleri deneysel sonuçlardan farklı bulunabilmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Balıkesir-Dursunbey Göğü Köyü civarından alınmış doğal ametist örneklerinin dozimetrik malzeme olarak kullanımının araştırılması amacıyla termoluminesans özellikleri incelenmiştir. Literatürde ametistin yapısıyla ilgili bazı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen (Zhang ve ark., 1994; Gürbüz, 2007; Schlesinger ve ark., 1966; Cohen 1974), ametistin dozimetrik özellikleriyle ilgili çalışmaların sayısının fazla olmadığı görülmüştür (Rocha ve ark., 2003).

Yapılan çalışmada ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli ölçümler yapılmıştır. Bunlar kısaca; XRF ile kimyasal analiz, XRD ile fiziksel analiz, uygun tavlama sıcaklığının ve süresinin belirlenmesi, ışınlama öncesi tavlama sıcaklığının TL hassasiyetine etkisi, TL ışınma eğrilerinin incelenmesi ve CGCD yöntemi ile analizleri, CGCD ve farklı ısıtma hızları yöntemi ile tuzak parametrelerinin hesaplanması, ametistin beta ve gama dozlarına tepkisinin belirlenmesi ve enerji cevabı, tekrarlanabilirlik, yüksek dozun ametistin hassasiyetine etkisi ve anormal sönüm deneyleridir. Bu çalışmaların her birisi çok daha derin ve üzerinde uzun süre araştırma yapılabilecek konulardır. Yapılan bu çalışmanın ana amacı ametistlerin dozimetrik özelliklerin genel hatlarıyla belirlenmesi ve böylece dozimetrik amaçla kullanımının uygun olup olmadığının anlaşılmasıdır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular ayrıntılı olarak Bölüm 5.'te verilmektedir.

Öncelikle Ametist örneklerinin kimyasal yapısının anlaşılması amacıyla XRF analizi yapılmıştır. Elde edilen bulgular ametist kristalinde bulunan safsızlık bileşiklerin miktarında (Fe_2O_3 bileşiği hariç), örneklerin maruz kaldıkları sıcaklığın artmasıyla belirgin bir şekilde azalma meydana geldiğini göstermiştir (Tablo 5.1). Bunun sebebi oksijen içerikli bileşiklerin, yüksek sıcaklık sebebiyle buharlaşarak, difüzyon yoluyla kristalden uzaklaşmalarıdır. Bu bileşiklerin miktarının azalması kristal içerisinde bulunan kusur sayısında azalmaya neden olmaktadır. Bu da sıcaklığın artmasıyla TL hassasiyetinin azalacağını göstermektedir.

Ametist örneklerinin fiziksel yapısının incelenmesi amacıyla örneklerin XRD analizi yapılmıştır. XRD analizi ile ilgili bulgular ayrıntılı olarak Bölüm 5.2'de yer

almaktadır. Elde edilen bulgular XRF sonuçlarına paralel olarak, kristal içerisinde bulunan bileşiklerin miktarında sıcaklığın artmasına bağlı olarak bir azalma olduğunu göstermektedir. Ayrıca XRD analiz bulguları ametist kristalinin 450 °C’de kristal yapısının bozulduğunu fakat 700 °C’de yeniden kristalleştiğini göstermiştir. Sonuç olarak, ametist örneklerinin yüksek sıcaklığa maruz kalması, kristal yapısının tek ve mükemmel bir kristal yapısına doğru değişim göstermesine yol açmaktadır. XRD analizi ayrıca ametist kristallerinin hekzagonal yapıda olduğunu ve kuvarsın (SiO₂) bir türevidir olduğunu da göstermiştir.

Yapılan bu ön çalışmalardan sonra öncelikle ametist örneklerinin TL yöntemiyle doğal ışığa eğrileri incelenmiş ve 300 °C ile 500 °C civarında iki tepeden oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.4). Değişik toz ametist örnekleriyle yapılan ölçüm sonucunda bu tepelerin tepe sıcaklıkları arasında %5’lik sapma olduğu gözlenmiştir. Tepe sıcaklığındaki bu kaymanın toz ametist örneklerinin taneciklerinin karışımından, örnek ile ısıtıcı çubuk arasındaki temasın kalitesinden (termal gecikme) ve tüm örneklerin örnek diski üzerine aynı homojenlikte yayılmamış olma ihtimalinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ametist örneklerinden elde edilen doğal TL ışığa eğrileri CGCD yöntemi (Bölüm 2.6.3) ile analiz edilerek TL tepelerini oluşturan alt tepeler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğal TL ışığa eğrisinin görülen iki ışığa tepesinin altında 300, 330 ve 500 °C civarında tepe sıcaklığına sahip üç alt tepeden oluştuğunu göstermektedir (Şekil 5.5). Ayrıca şekilde doğal TL tepelerinin CGCD analizi sonucu elde edilen enerji seviyesi (E) ve frekans faktörü (s) değerleri de verilmiştir. Bu E değerleri üç tepe için sırasıyla; 0.98, 0.87 ve 0.93 eV ve s değerleri aynı tepeler için sırasıyla; 3.47E+7, 1.22E+6 ve 4.76E+4 s⁻¹ şeklinde bulunmuştur.

Ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarında örneklerin ışınlanması çalışmaları sırasında kristal örgü içerisindeki tuzakların tamamen boşaltılmış olması gerekmektedir. Doğal radyasyon dozunun silinebilmesi için ametist örneklerinin uygun bir tavlama sıcaklığı ve süresiyle tavlamları gerekmektedir. Bu sebeple doğal ametist örnekleri 250 °C ile 550 °C arasındaki farklı sıcaklıklarda ve yarım saat ile bir gün arasında değişen sürelerde tavlansın TL okumaları gerçekleştirilmiştir. Tavlama protokolü hem yüksek sıcaklık tavlamasını

hem de düşük sıcaklık tavlamasını içermektedir. Elde edilen bulgular Bölüm 5.3'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 5.11'de görüldüğü gibi, doğal ametist örneklerinin oluşumundan bu yana biriktirdiği radyasyon dozunun tamamen silinmesinde kullanılabilecek en uygun tavlama sıcaklığı 450 °C'de 90 dakika ve arkasından 80 °C 24 saat olarak belirlenmiştir.

Tavlama sıcaklığının TL hassasiyeti üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere, farklı sıcaklık ve sürelerde tavlandıktan sonra 200 Gy'lik beta dozu verilmiş ve TL ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Bölüm 5.4). Şekil 5.12'de 250 °C'de yarım saat tavlandıktan sonra 200 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilen TL eğrisinin CGCD analizi sonuçları verilmiştir. Bu grafikte yer alan ve yüksek sıcaklık bölgesinde bulunan 4. ve 5. tepenin, ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabileceği düşünülmüştür. Bunun sebebi bu sıcaklıklardaki tepelerin daha kararlı bir yapıya sahip olmalarıdır. Gerçekten de yapılan diğer çalışmaların sonucunda (doz cevabı, tekrarlanabilirlik, anormal sönüm deneyleri) bu tepelerin dozimetrik özelliklerinin diğer tepelere oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sebeple tavlama sıcaklığının TL hassasiyetine etkisi, sadece 4. ve 5. tepelerin bileşiminden oluşan tepe için incelenmiştir. Elde edilen bulgular tavlama süresinin artmasıyla TL hassasiyetinde önemli bir ölçüde azalma meydana geldiğini göstermiştir. TL hassasiyetindeki bu azalma 450 °C'de minimum seviyeye gelmiş fakat daha yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça (500 ve 550 °C tavlama için) TL hassasiyetinin tekrar artmaya başladığı görülmüştür (Şekil 5.22 ve Şekil 5.23). Farklı sürelerde 500 ve 550 °C'deki tavlama sonucunda TL hassasiyetinin artmaya başlaması, ışınım merkezlerinin yüksek sıcaklıklarda yeniden yapılanmalarına bağlı olarak açıklanabilir. Kuvars kristallerinde yüksek sıcaklık tavlama sonucu ışınım merkezlerinin konsantrasyonu değişebilmektedir. Bu konsantrasyon değişimi yeni ışınım merkezlerinin oluşmasıyla ya da kristal içerisinde pasif durumda bulunan ve "ışınmasız yeniden birleşme merkezleri" olarak da adlandırılan lüminesans merkezlerinin yeniden yapılandırılmalarıyla gerçekleşmektedir (McKeeve ve ark., 1983). Böylece daha önce TL sinyali katkıda bulunmayan ışınım merkezleri tavlama sonucu aktif hale gelerek TL hassasiyetinin artmasına yol açmaktadır. Bunların yanısıra dozimetrik malzemelerin yüksek sıcaklıklarda tavlama

sonucunda kristal yapısı içerisinde yeni tuzakların oluşması da mümkündür (Furetta, 2003). Bu sebeple ametist örneklerinin TL hassasiyetinin yüksek sıcaklıklarda artması ışıma merkezlerinin konsantrasyonundaki değişime ve yeni tuzakların oluşmaya başlamasına bağlı olarak açıklanabilir.

Şekil 5.24'te 250, 300, 350, 400, 500 ve 550 °C tavlamaları sonrasında, 4.+5. tepenin (4. ve 5. tepe noktalarının toplamı olan tek bir tepe) TL hassasiyetinde tavlama süresine bağlı olarak yüksek oranda değişiklikler meydana geldiği görülmüştür. Fakat 450 °C'de farklı süreler için gerçekleştirilen tavlama işleminin arkasından elde edilen TL eğrilerinin hassasiyet değişiminin diğerlerine göre en az olduğu gözlenmiştir. 450 °C'de tavlanan örneklerin TL hassasiyetinde meydana gelen değişim %15 civarındadır. 450 °C'deki tavlamalarda, tavlama süresine bağlı olarak TL hassasiyetindeki değişimin minimum olduğu 90 dakikalık tavlamanın, yüksek sıcaklık tavlama süresi olarak kullanılabilir en uygun değer olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece yüksek sıcaklık tavlaması 450 °C'de 90 dakika olarak gerçekleştirilmiştir.

Literatürde dozimetrik materyallerin yüksek sıcaklıklarda tavlamanın ardından düşük sıcaklıklarda tavlamanın TL hassasiyeti üzerinde olumlu etkileri olduğu bildirilmiştir (Furetta, 2003). Ayrıca hem yüksek hem de düşük sıcaklıklardaki tavlamaların ardından örneğin maruz kaldığı soğuma hızı TL hassasiyetini önemli ölçüde etkilemektedir (McKeever ve ark., 1995). Bu sebeple ametist örneklerine uygulanması gereken en uygun tavlama protokolü şu şekilde belirlenmiştir: 450 °C'de 90 dakika tavlama, alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma, 80 °C'de 24 saat tavlama ve alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma.

Tavlama süresi ve sıcaklığı belirlendikten sonra ametist örneklerinden elde edilen TL ışıma eğrilerinin özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Bölüm 5.5). Öncelikle standart tavlama protokolü uygulanarak hazırlanmış ve ardından 200 Gy ve 2 kGy'lik beta dozları verilmiş ametist örneklerinde elde edilen TL ışıma eğrileri incelenmiştir (Şekil 5.26). Bu TL ışıma eğrilerinin ilk bakışta 120, 170, 270 ve 450 °C civarında tepe sıcaklıklarına sahip oldukları gözlenmiştir. Daha sonra bu tepelerin yapısını daha iyi inceleyebilmek ve tepelerin altındaki diğer tepeleri anlayabilmek amacıyla CGCD yöntemi ile analizleri yapılmıştır. CGCD

yöntemi ile TL eğrilerinin analizlerinin yapılabilmesi için tepelerin kinetik mertebelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle ametist örneklerine tavlama sonrası 600 Gy ile 25 kGy arasında değişen beta dozları verilmiştir. Böylece elde edilen TL eğrilerinin tepe sıcaklıklarının dozun artışına bağlı olarak değişip değişmediği incelenmiştir. 600 Gy ile 25 kGy arasında farklı beta dozları verilerek elde edilen TL ışına eğrileri kullanılarak soğurulan doza karşılık tepe sıcaklıklarının değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 5.27). Grafik incelendiğinde tepe sıcaklıklarında gözlenen kaymanın \pm %5'lik hata sınırları içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Buradan ametist örneklerinden elde edilen TL tepelerinin birinci derece kinetiğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Yukarıda bahsedilen ve 200 Gy ile 2 kGy beta dozu verilerek elde edilen TL ışına eğrileri CGCD yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçta bu TL eğrilerinin 120, 160, 190, 260, 310 ve 450 °C civarında tepe sıcaklıklarına sahip altı tepeden oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 5.28). Bu TL tepeleri birbirine çok yakın ve iç içe girmiş 6 tepenin bileşimidir. Bu tepelerden yüksek sıcaklık bölgesinde bulunan ve 260, 310 ve 450 °C'de tepe sıcaklığına sahip tepeler, düşük sıcaklık bölgesinde bulunan tepelere kıyasla daha kararlı bir yapıya sahiptirler. Bu sebeple ametistin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde yüksek sıcaklık tepelerinin kullanılması daha uygundur. Fakat 450 °C'de tepe sıcaklığına sahip olan 6. tepenin verilen çeşitli doz oranlarına karşılık elde edilen TL şiddeti oldukça düşüktür. Bu tepe sadece yüksek dozlarda belirgin bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada ametist örneklerinin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde 4. ve 5. tepeler dozimetrik tepeler olarak seçilmiştir.

Elde edilen bu TL tepelerinin tuzak parametrelerinin hesaplanması amacıyla iki farklı yöntem uygulanmıştır. Bunlar CGCD yöntemi ve Farklı Isıtma Hızları Yöntemidir. Yapılan çalışmada öncelikle CGCD yöntemi kullanılarak tuzak parametreleri hesaplanmıştır (Bölüm 5.6.1). Karşılaştırmak amacıyla CGCD yönteminde iki farklı bilgisayar programı kullanılmış ve 200 Gy'lik beta dozu verilerek elde edilmiş TL ışına eğrisi her iki program aracılığıyla analiz edilmiştir. Sonuçta elde edilen E ve s değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.29). CGCD analizi sonucunda elde edilen E değerleri sırasıyla 1.03, 0.81,

0.76, 0.83, 0.51 ve 0.47 eV'tur. s değerleri ise sırasıyla $6.03E+12$, $6.23E+8$, $2.5E+7$, $9.51E+6$, $1.69E+3$ ve $5.71E+1$ s⁻¹ değerlerine sahiptir. Burada görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklardaki tepelerin E ve s değerleri düşük sıcaklıklardakine kıyasla daha düşüktür. Özellikle 5. ve 6. tepenin sahip olduğu s değerleri yani $1.69E+3$ ve $5.71E+1$ s⁻¹ değerleri fiziksel olarak mümkün olan değerler değildir. Elde edilen bu sonuç ametist örneklerinin yüksek sıcaklık tepelerinin tek ve kesin bir enerji seviyesine sahip bir tuzak yapısından çok $\Delta E = E_2 - E_1$ şeklinde tanımlanabilen ve E_1 ile E_2 arasında sınırlandırılmış sürekli bir tuzak dağılımına sahip olabileceğini göstermiştir. CGCD yöntemi tamamen ışımaya eğrisinin şeklinden yola çıkarak tuzak parametrelerini hesaplamakta ve her tuzak derinliğinin tek ve kesin bir enerji seviyesine sahip olduğunu varsaymaktadır. Bu programlar, ΔE şeklinde tanımlanan bir enerji seviyesi dağılımına sahip bir tuzakın tuzak parametrelerinin hesaplanmasında başarılı değildirler. Bu sebeple yüksek sıcaklık tepeleri için elde edilen E ve s değerleri tuzakların sahip oldukları gerçek değerlerinden düşük çıkmış olabilir.

Farklı Isıtma Hızları Yöntemi çok fazla iç içe geçmiş tepelerinden oluşan bir TL ışımaya eğrisi söz konusu olduğunda sağlıklı sonuçlar elde edilememektedir. Bu sebeple bu yöntemin sadece TL eğrisinden belirgin bir şekilde seçilebilen tepeler için kullanımı uygundur. Bundan dolayı bu yöntem kullanılarak sadece 5.33 (a)'da gösterilen 120, 160 ve 260 °C civarındaki 3 tepe için E ve s değerleri hesaplanabilmiştir. Farklı Isıtma Hızları Yönteminin uygulanması sonucunda bu 3 tepe için elde edilen E değerleri sırasıyla 1.05 ± 0.08 , 0.97 ± 0.18 , 0.93 ± 0.17 eV iken s değerleri de $6.46E+11$, $4.07E+10$, $8.19E+07$ s⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.3). 120, 160 ve 260 °C tepeleri CGCD yöntemi ile ayrıştırma sonucu elde edilen 1., 2. ve 4. tepeye karşılık gelmektedir. Her iki yöntemin kullanılmasıyla elde edilen E ve s değerleriyle kıyaslandığında sonuçların benzer oldukları görülmüştür. İki yöntemin kullanılmasıyla elde edilen E değerleri arasındaki maksimum sapma %16 civarındayken s değerleri arasındaki maksimum sapma %834'tür. s değerleri arasındaki sapmanın bu kadar büyük çıkmasının sebebi s değerlerinin E değerlerindeki en küçük değişimlerden bile oldukça fazla etkileniyor olmalarıdır.

Tuzak parametrelerin hesaplanmasından sonra ametist örneklerinin doz cevabı incelenmiştir (Bölüm 5.7). Bu amaçla ametist örneklerine 1 Gy ile 25 kGy arasında değişen çeşitli beta dozları verilmiştir. Sonuçta elde edilen TL ışımaya eğrileri (Şekil 5.34 ve 5.35) kullanılarak ametist örneklerinin doz cevap grafiği çizilmiştir (Şekil 5.36 ve 5.37). 4.+5. tepe için lineer bölgenin belirlenmesi amacıyla yapılan hesaplamalar sonucunda (Tablo 5.4) ametist örneklerinin 10 Gy ile 1 kGy arasında lineer ve 2 kGy ile 15 kGy arasında supralineer bölgeye sahip oldukları gözlenmiştir. 25 kGy'de ise ametist örnekleri doyuma ulaşmaya başlamaktadırlar. Bu sonuç ametist örneklerinin yüksek doz uygulamaları için dozimetrik malzeme olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Yüksek doz uygulamalarında kullanılan doz miktarları 10^2 Gy ile 10^6 Gy arasındadır. Bu doz miktarlarına nükleer santrallerin içerisinde, gıdaların sterilizasyonunda veya malzeme testlerinde rastlamamız mümkündür.

Rocha ve ark. (2003) çalışmalarında Brezilya doğal ametistlerinin doz cevap eğrisinin elde edilmesi amacıyla örneklerine sırasıyla 10, 100, 300 ve 600 Gy ile 1 kGy ve 10 kGy'lik gama dozu vermişlerdir. Elde ettikleri doz cevap eğrisinde Brezilya ametistlerinin 100 Gy ile 1 kGy arasında lineer bir doz cevap eğrisine sahip olduğunu yayınlamışlardır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ile literatürdeki sonuçlar uyum içerisinde (Şekil 5.38).

Enerji cevap çalışmaları amacıyla ametist örneklerine ^{60}Co gama kaynağı kullanılarak 10 Gy ile 1 kGy arasında çeşitli dozlar verilmiştir (Bölüm 5.8). Elde edilen TL eğrileri incelendiğinde, beta kaynağı kullanılarak elde edilen TL eğrileriyle aynı tepe sayısına ve tepe sıcaklığına sahip oldukları gözlenmiştir (Şekil 5.39 ve 5.40). Fakat gama kaynağıyla aynı oranda doz miktarı ile ışımlanmış örnekte elde edilen TL şiddetinin beta kaynağından elde edilen TL şiddetine oranla daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.43). TL şiddetleri arasındaki bu fark 4.+5. tepe için %20 civarındadır. Verilen bir doz için belirlenen TL sinyali, soğurulan radyasyonun enerjisinin bir fonksiyonu olarak değişir. TL şiddetindeki bu farkın bir sebebinin, ametist örneklerinin farklı radyasyon kaynaklarından çıkan fotonların ve parçacıkların sahip oldukları farklı enerjilerden ve kristal örgü içerisinde neden oldukları farklı etkileşimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta

kaynağının enerjisi 0'dan 2.25 MeV arasında değişirken (ortalama 0.93 MeV) ^{60}Co kaynağının enerjisi ortalama 1.25 MeV'tur. Görüldüğü gibi gama ışınlarının enerjisi beta parçacıklarından fazladır. Bilindiği gibi gama ışınları ve beta parçacıklarının madde ile etkileşim süreçleri birbirinden oldukça farklıdır. Sonuç olarak ametist örneklerinin farklı enerjilerdeki gama ve beta kaynaklarına karşı gösterdiği enerji cevabının farklı olduğunu söyleyebiliriz. Fakat ametist örneklerinin enerji cevabının tam olarak belirlenebilmesi için radyasyon kaynağının enerjisinin değiştirilerek, farklı enerjili radyasyon kaynakları için enerji cevap grafiğinin elde edilmesi gerekmektedir. Buna karşın, bu çalışmada kullanılan beta ve gama kaynakları belli bir enerji spektrumuna sahiptirler. Bu sebeple örneklerin farklı enerji değerleriyle ışınlanmaları mümkün olmamıştır.

TL şiddetleri arasındaki fark ile ilgili yapılan bir diğer deney ise şöyledir: deneyde beta kaynağı kullanılarak 10 mm'lik bir disk içerisinde ışınlanan bir örneğin merkezindeki taneciklerin diskin dış kısmına yakın taneciklere oranla %10 civarında daha fazla doz soğurdukları görülmüştür (Şekil 5.44). Bunun sebebi beta kaynağının bulunduğu haznenin geometrisinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla diskin tamamındaki taneciklerin soğurdukları doz oranlarının aynı olmadığı görülmektedir. Oysa ^{60}Co gama kaynağı ile ışınlama sırasında böyle bir sorun yoktur. ^{60}Co gama kaynağı maksimum $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 'lik bölgeyi ışınlayabilmektedir. Örneklerin kapladığı alan ise en fazla 1 cm^2 'dir Bu sebeple ametist örneklerinin taneciklerinin aynı miktarda gama dozunu soğurduklarını söyleyebiliriz. Böylece ^{60}Co gama kaynağı ve beta kaynağından aynı doz oranları verilerek elde edilen TL şiddetindeki %20'lik farkın bir diğer sebebinin beta kaynağının bulunduğu koruyucu haznenin geometrisinden kaynaklandığı söylenebilir (Bölüm 5.8).

Ametist örneklerinin tekrar kullanımlarının uygun olup olmadığının incelenmesi amacıyla örnekler tavlandıktan sonra 200 Gy'lik beta dozu verilmiş ve TL okuması kaydedilerek aynı işlem 10 defa tekrarlanmıştır (Bölüm 5.9). Sonuçta elde edilen TL ışınma eğrileri (Şekil 5.45) kullanılarak 4.+5. için TL şiddetindeki değişim 10 çevirim sonunda bile %4'lük sapmaya sahiptir. Fakat diğer tepeler için tekrarlanabilirlik oranlarındaki sapma oldukça yüksektir. Burada 4.+5. tepenin dozimetrik tepe olarak kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği bir kez daha

görülmüştür. Ayrıca bu deney uygulanan standart tavlama sürecinin iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tekrarlanabilirlik özelliğinden sonra ametist örneklerinin yüksek doza bağlı olarak TL hassasiyetinde değişim olup olmadığı incelenmiştir (Bölüm 5.10). Bu amaçla standart tavlama süreci kullanılarak tavllanmış ametist örneğine önce düşük bir doz değeri, tavlama, yüksek doz değeri, tavlama ve ikinci düşük doz değeri koşulları uygulanmıştır. Elde edilen TL eğrileri (Şekil 5.47) incelendiğinde yüksek dozun etkisi ile 4.+5. tepe için TL hassasiyetindeki artışın % 31 civarında olduğu hesaplanmıştır. Böylece ametist örneklerinin bir ön-doz işlemine tabi tutularak hassasiyetinin artırılabilceği ve daha düşük dozlarla çalışılan alanlarda da kullanılabilceği söylenebilir. Fakat bunun doğruluğunu göstermek için bu konuda daha kapsamlı bir çalışma yapılması gereklidir.

Son olarak ametist örneklerin anormal sönüm özellikleri incelenmiştir. 100 Gy'lik beta dozu verilmiş ametist örnekleri farklı süreler için bekletilerek TL okumaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen TL eğrileri incelendiğinde ametist örneklerinin 80 °C civarında bir tepeye daha sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.49). Fakat bu tepe çok hızlı bir şekilde sönüme uğramaktadır. TL şiddetindeki azalmanın bekleme zamanına göre grafiği incelendiğinde (Şekil 5.50) düşük sıcaklık tepelerinin hızlı bir şekilde sönüme uğradıkları gözlenmiştir. 4. ve 5. tepenin toplamından oluşan tepe ise 7 gün sonra %14 civarında azalmış fakat yaklaşık 25 gün beklenmesine rağmen bu azalmanın sürekli olmadığı gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ametist örneklerinin dozimetrik amaçla kullanımı sırasında ilk 3 tepenin kısa ömürlü olduğunu göstermektedir. Buna karşın 4. ve 5. tepenin toplamının oluşturduğu tepenin şiddetinde belirgin bir azalma olmasına rağmen bu azalmanın 7 gün sonunda sürmemesi ve azalmanın durması, 4. ve 5. tepelerin dozimetrik tepeler olarak oldukça kararlı olduklarını göstermektedir. Ayrıca bu sonuç ametistin dozimetrik malzeme olarak kullanımının uygun olabileceğini de göstermektedir.

Elde edilen sonuçları şu şekilde özetlememiz mümkündür;

- Ametist örnekleri maruz kaldıkları sıcaklık değerine göre hem fiziksel hem de kimyasal değişikliklere uğramaktadırlar

- Ametist örnekleri yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında içerisinde barındırdıkları safsızlık bileşiklerinin miktarında ciddi bir azalma meydana gelmektedir.
- Herhangi bir tavlama işlemi uygulanmamış ametist örneklerinden elde edilen doğal TL eğrileri 300 °C ve 500 °C civarında tepe sıcaklığına sahip iki tepeden oluşmaktadır.
- Doğal TL ışımaya eğrileri CGCD yöntemi ile analiz edildiğinde 300, 330 ve 500 °C civarında tepe sıcaklığına sahip üç tepeye sahip oldukları gözlenmiştir.
- Ametist örneklerinin geçmişte maruz kaldığı doğal radyasyon sebebiyle sahip olduğu TL sinyallerinin silinebilmesi için gerekli olan minimum tavlama sıcaklığı ve süresi 450 °C'de 90 dakikadır.
- Ametist örneklerinin TL hassasiyetindeki değişimin minimum olduğu tavlama sıcaklığı ve süresi 450 °C'de 90 dakikadır.
- Ametistler için uygulanması gereken en uygun standart tavlama süreci şu şekildedir: 450 °C'de 90 dakika tavlama, alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma, 80 °C'de 24 saat tavlama ve alüminyum blok üzerinde 30 dakika soğutma.
- Standart tavlama süreci uygulanmış bir ametist örneğine beta dozu verilerek elde edilen TL ışımaya eğrileri ilk bakışta 120, 170, 270 ve 450 °C civarında tepe sıcaklıklarına sahip 4 tepe gözlenebilmektedir.
- Tavlama sonrası beta dozu verilerek elde edilen TL eğrilerinin CGCD yöntemi ile analizi sonucunda ise TL tepelerinin 120, 160, 190, 260, 310 ve 450 °C civarında tepe sıcaklıklarına sahip 6 tepeden meydana geldiği gözlenmiştir.
- Ametistlerin dozimetrik özelliklerinin belirlenmesinde dozimetrik tepe olarak kullanılacak tepelerin 4. ve 5. tepeler oldukları belirlenmiştir.
- Ametist örneklerinin 10 Gy ile 1 kGy arasında lineer bir doz cevap bölgesine sahip oldukları gözlenmiştir. Böylece ametist örneklerinin yüksek doz uygulamalarında kullanılacakları düşünülmektedir.

Yüksek doz uygulamalarına nükleer santrallerin içerisinde, gıdaların sterilizasyonunda veya malzeme testlerinde rastlamamız mümkündür.

- Ametist örneklerinin enerji cevabı radyasyonun cinsine ve enerjisine göre değişkenlik göstermektedir.
- Ametist örneklerinin tekrarlanabilirlik oranı 10 çevirim sonunda %4'lük sapmaya sahiptir. Bu sonuç ametistlerin standart tavlama sürecinin kullanılması şartıyla defalarca kullanılabileceğini göstermiştir.
- Ametist örneklerinin anormal sönüm özellikleri incelendiğinde 4. ve 5. tepenin toplamından oluşan tepenin 7 gün sonra %14 civarında azaldığı, fakat 25 gün beklenmesine rağmen bu azalmanın sürmediği gözlenmiştir. Buradan dozimetrik tepeler olan 4. ve 5. tepenin kararlı bir yapıya sahip oldukları sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmalara dayanarak doğal ametist örneklerinin yüksek doz uygulamalarında dozimetrik malzeme olarak kullanımının uygun olduğunu söyleyebiliriz. Ametistlerin özellikle yüksek doz uygulamalarında gereksinim duyulan doz oranlarının içerisinde yer alan bir lineer doz cevap bölgesine sahip olması oldukça umut vericidir. Çünkü birçok doğal malzeme 10-20 Gy civarında doyuma ulaşırken ametist örnekleri 10 Gy ile 1 kGy arasında lineer bir doz cevap eğrisine sahiptir ve ancak 25 kGy'de doyuma ulaşmaya başlamaktadır. Bu sebeple ametistler diğer birçok doğal malzemenin cevap veremeyeceği dozlarda kullanılabilmesi için avantajlı bir konumdadır. Ayrıca ametist örneklerinin hem beta parçacıkları hem de gama ışınları için rahatlıkla kullanılacakları bu çalışmada görülmüştür.

Burada belirtilmesi gereken önemli bir nokta, ametist örneklerinin oldukça değişken bir yapıya sahip olmasıdır. Özellikle ametistlerin maruz kaldığı sıcaklık değerinin artmasıyla tuzak yapısının nasıl değiştiği ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gereken bir konudur. Ayrıca yüksek oranda radyasyona maruz kalan ametist örneklerinin tuzak yapısının nasıl değiştiği de incelenebilecek bir diğer önemli konudur. Ametist ile ilgili önerilebilecek bir diğer çalışma ise 250 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklık tepelerinin sahip oldukları tuzak yapısının incelenmesidir. Tüm bu

konular uzun ve detaylı çalışmalar gerektiren konulardır. Bu soruların cevaplanması durumunda ametist örneklerinin termoluminesans özellikleri daha da netleşmiş olacaktır. Böyle bir durumda da ametist kristallerinin kullanılarak, özellikle yüksek doz uygulamaları için iyi bir dozimetrenin üretilebilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- ADIROVITCH, E.I., 1956. Journal de Physics Review 117, 451.
- AITKEN, M.J., FLEMING S.J., REID J., TITE, M.S., 1968. In Thermoluminescence of Geological Materials, (ed. Mc Dougall, D.J.), Acad. Pres. London, s. 133.
- AITKEN, M.J., D.W., ZIMMERMAN S.F., FLEMING S.F., HUXTABLE, J., 1970. Thermoluminescence dating of pottery, Radiocarbon variations and absolute chronology, edited by I.U. Olsson, New York:Wiley.
- AITKEN, M.J., ALLDRED, J.C., 1972. The assessment of error limits in thermoluminescent dating, Archaeometry 14, 257-267.
- AITKEN, M.J., 1976. Thermoluminescent age evaluation and assessment of error limits: revised system, Archaeometry 18, 233-238.
- AITKEN, M.J., BUSSEL, G., 1980. Thermoluminescence Dosimetry at 250 C Using Natural Fluorite, Nuclear Instruments and Methods, Volume 175, Issue 1, September 1980, pp. 211-212.
- AITKEN, M.J., 1985. Thermoluminescence dating, Academic Press, London.
- AITKEN, M.J., 1990. Science-based dating in archaeology, Longman Archaeology Series, London and New York.
- AITKEN, M.J., 1998. An Introduction to Optical Dating Oxford University Press, London. P.37-50, 61-69, 87-102.
- AKSELROD, M., KORTOV, V.S., KARAVETSKY, D.J., GOTLIB, V.I., 1990. Radiat. Prot. Dosim. 32, 15.
- AUSIN, V., ALVAREZ-RIVAS, J.A., 1972. J. Phys. C: Solid State Phys., 5, 82.
- AZORIN, J., SALVI, R.P.C., GUTIERREZ, A., 1982. Some minerals as TL dosimeters. Health Phys. 43, 590-595.
- AZORIN, J., GUTIERREZ, A., NIEWIADOMSKI, 1986. Performance Tests of a CaSO₄:Dy Based Thermoluminescence Personal Dosemeter, Radiation Protection Dosimetry, 17 1-4, pp. 53-56.
- BALITSKY, V.S., MACHINA, I.B., MAR'IN, A.A., SHIGLEY, J.E., ROSSMAN, G.R., LU, T., 2000. Industrial growth, morphology and some properties of

- Bi-colored amethyst-citrine quartz (ametrine). *J. Crystal Growth* 212, 255–260.
- BARKANI-KRACHI, A., IACCONI, P., BINDI, R., VINCELLER, S., 2002. Analysis with a multilayer model of heating rate effect on TL. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 35, 1895-1902.
- BECKER, K., 1973. *Solid State Dosimetry*, CRC Press, 1973.
- BEISER, A., 1995. *Modern Fiziğin Kavramları*, McGraw-Hill, Inc., pp. 334-336.
- BETTS, D.S., COUTURIER, L., KHAYRAT, A.H., LUFF, B.J., TOWNSEND, P.D., 1993. Temperature distribution in thermoluminescence experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 26, 843.
- BINDER, W., DISTERHOFT, S., CAMERON, J.R., 1968. In: *Proc. 2nd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*, Gatlinburg. CONF 680920 (NTIS, Springfield, VA) p. 43.
- BINDER, W., CAMERON, J.R., 1969. Dosimetric Properties of CaF₂:Dy, *Health Physics*. 17 4, 613-618.
- BİRSOY, R., 1987. Doğal ametistin kirlilik içeriği ve renklenmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 30, 63-66.
- BOS, A.J.J., VIJVERBERG, R.N.M., PITERS, T.M., McKEEVER, S.W.S., 1992. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 25, 1249.
- BOS, A.J.J., PITERS, J.M., GOMEZ, R.J.M., DELGADO, A., 1993. *GLACANIN, and Intercomparison of Glow Curve Analysis Computer Programs IRI-CIEMAT Report*, 131-93-005 IRI Delft.
- BOYLE R., 1663 *Register of the Roy. Soc.*, 213.
- BRADBURY, M.H., NWOSU, B.C.E., LİLLEY, E., 1976. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 9, 1009.
- BUNGHKBARDT, B., SINGH, D., PIESCH, E., 1977. *Nuclear Instrumentations and Methods*, 141, 363.
- CAMERON, J.R., SUNTHARALINGHAM, N., KENNEY, G.N., 1968. *Thermoluminescent Dosimetry*. University of Wisconsin Press, Madison.
- CAMERON, J.R., KENNEY, G.N., 1963. *Radiat. Res.* 19, 199.

- CHEN, R., 1969. Glow Curves with General Order Kinetics. *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 116, Issue 9, pp. 1254-1257, September.
- CHEN, R., WINER, A.A., 1970. Effects of Various Heating Rates on Glow Curves. *J. Appl. Phys.* 41, 5227.
- CHEN, R., KIRSH, Y., 1981. *Analysis of Thermally Stimulated Processes*, Pergamon Press, Oxford.
- CHEN, R., MCKEEVER, S.W.S., 1997. *Theory of thermoluminescence and related phenomena*. World Scientific Publishing, Singapore, 559p., ISBN: 9810222955.
- COHEN, A.J., HASSAN F., 1974. Ferrous and Ferric Ions in Synthetic α -Quartz and Natural Amethyst. *The American Mineralogist*, Vol 59, Pages 719-728.
- CORTEZAO, S.U., BLAK, A.R., 1998. Optical absorption (OA) and thermally stimulated depolarization currents (TSDC) in Brazilian amethyst. *Radiat. Eff. Def. Sol.* 147, 1–10.
- CURIE, M., 1961. *Radioactive Substances* English translation of doctoral thesis, (Faculty of Science, Paris). Greenwood Press, Westpoint.
- DANIELS, F., BOYD, C.A., SAUNDERS, D.F., 1953. *Science*, 117, 343.
- DANIELS, J.M., 1953. The Effect of Interactions in a Paramagnetic on the Entropy and Susceptibility, *proc. phys. Soc.* LXVI, 8-A.
- DANIELS, J.M., SCHOLE, G., WEISS, J., 1953. *Nature* 171, 1153.
- DEDUSHENKO, S.K., MAKHINA, I.B., MAR'IN, A.A., MUKHANOV, V.A., PERFILIEV, YU.D., 2004. What oxidation state of iron determines the amethyst colour? *Hyperfine Interactions*, 2004 Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 156/157: 417-422.
- FARRAR, H., 2000. Twenty new ISO standards on dosimetry for radiation processing. *Radiat. Phys. Chem.* 57, 717-720.
- FURETTA, C., WENG, P.S., 1998. *Operational Thermoluminescence Dosimetry*, World Scientific, Singapore.
- FURETTA, C., KITIS, G., KUO, C.H., 1999. Kinetics Parameters of Diamond by Computerized Glow-Curve Deconvolution (CGCD), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B 160, 65-72.

- FURETTA, C., 2003. Handbook of Thermoluminescence. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.450 p.
- GARLIC, G.F.J., GIBSON, A.F., 1948. Proc. Phys. Soc. A, 184, 366.
- GINTHER, R.J., KIRK, R.D., 1957. J. Electrochem. Soc. 104, 365.
- GORBICS, S.G., ATTIX, F.H., 1968. Int. J. Appl. Rad. Isot., 19, 81.
- GROSSWEINER, L.I., 1953. A Note on the Analysis of First-Order Glow Curves. J. Appl. Physics, 24, 1306.
- GÜRBÜZ, M., 2007. Güğü (Dursunbey-Balıkesir) Civarındaki Ametistlerin Oluşumunun İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Anabilim Dalı, Doktora Tezi, s. 1-30, 2007.
- HALPERIN, A., BRANER, A.A., 1960. Evaluation of Thermal Activation Energies from Glow Curves. Phys. Rev., 117, 408.
- HASHIMOTO, T., YASUDA, K., SAKAUE, H., KATAYAMA, H., 1998. Radiation-induced luminescence images and TL-property changes with thermal annealing treatment on Japanese twin quartz. Radiat. Meas. 29, 493–502.
- HORNYAK, W.F., CHEN, R., 1989. J. Lumin. 44 - 73.
- HORNYAK, W.F., CHEN, R., FRANKLIN, A., 1992. Thermoluminescence characteristics of the 375 °C electron trap in quartz. Physical Review, B, 46, 8036-8049.
- HSU, P.C., Wang, T.K., 1986. On the Annealing Procedure for CaF₂:Dy Radiat. Protect. Dosim., 16, 253.
- HUNTLEY, D.J., GODFREY-SMITH, D.I., THEWALT, M.L.W., 1988. Some quartz thermoluminescence spectra relevant to thermoluminescence dating. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 14, 27–33.
- HUNTLEY, D.J., GODFREY-SMITH, D.I., HASKELL, E.H., 1991. Light-induced emission spectra from some quartz and feldspars. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 18, 127-131.
- JANAS, R., HÜBNER, K., 1976. Isotopenpraxis, 12, 342. Derleme; OSVAY, M., BIRO, T., 1993. Thermoluminescence Materials, ed. D.R. Vij (Prentice Hall, Englewood Cliffs).

- de LIMA, J.F., NAVARRO, M.S., VALERIO, M.E.G., 2002. Effects of thermal treatment on the TL emission of natural quartz. *Radiat. Meas.* 35, 155–159.
- KATHURIA, S.P., SUNTA, C.M., 1979. Kinetics and Trapping Parameters TL in LiF TLD-100. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 12, 1573.
- KIYAK, N.G., BULUŞ, E., 2002. Effect of annealing temperature on determining trap depths of quartz by various heating rates method. *Radiation Measurement*, 33, 879-882
- KRAYSNAYA, A.R., NOSENKO, G.M., REZVIN, L.S., YASOLKO, V., 1961. *At. Energ.*, 10, 630.
- LIND, S.C., BARDWELL, D.C., 1923. *J. Franklin Inst.*, 196, 357.
- LUCAS, A.C., KASPAR, B., 1977. In: *Proc. 5th Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*, São Paulo. (I Phys. Inst., Univ. Giessen) p. 131.
- LYMAN, T., 1935. *Phys. Rev.*, 48, 149.
- MAHESH, K., WENG, P.S., FURETTA, C., 1989. *Thermoluminescence in Solids and its Applications*. Nuclear Technology Publishing, Ashford.
- MARKEY, B.G., BØTTER-JENSEN, L., DULLER, G.A.T., 1997. A new flexible system for measuring thermally and optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements* 27, 83-89.
- MAY, C.E., PADRIDGE, J.A., 1964. *J. Chem. Phys.* 40, 1401.
- MCKEEVER, S.W.S., STRAIN, J.A., TOWNSEND, P.D., WOOD, R.A., 1983. *Eur. PACT J.*, 9, 123.
- MCKEEVER, S.W.S., 1985 *Thermoluminescence of solids*, Cambridge University press, London.
- MCKEEVER, S.W.S., 1991. Mechanisms of thermoluminescence production: some problems and a few answers. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 18, 5–12.
- MCKEEVER, S.W.S., MOSCOVITCH, M., TOWNSEND, P. D., 1993. *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses*. Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent, England.
- MCKEEVER, S.W.S., MOSCOVITCH, M. TOWNSEND, P.D., 1995. *Dosimetry Materials : Properties and Uses*. Ashford: Nuclear Technology Publishing, England.

- MCKEEVER, S.W.S., CHEN, R., 1997. Luminescence models. *Radiation Measurements*, vol. 27, no. 5/6, pp. 625-661.
- MCLAUGHLIN, W.L., BOYD, A.W., CHADWICK, K.H., MCDONALD, J.C., MILLER, A., 1989. *Dosimetry for radiation processing*. Taylor & Francis, London, pp.1-26.
- MEJDAHL, V., 1969. Thermoluminescence dating of ancient Danish ceramics. *Archaeometry* 11, 99-104.
- MEJDAHL, V., 1983. Feldspar inclusion dating of ceramics and burnt stones, *Pact* 9, s. 351-364.
- METHA, S.K., SENGUPTA, S., 1976. *Healt Phys.* 31, 176.
- MOORE, L.E., 1957. *J. Pyhs. Chem.* 61, 636.
- MOORHEAD, F.F., DANIELS, F., 1952. *J. Phys. Chem.* 57, 546.
- NANJUNDASWAMY, R., LEPPER, K., MCKEEVER, S.W.S., 2002. Thermal quenching of TL in natural quartz. *Radiat. Protect. Dosimetry.*, 100, 305-308.
- NAKAJIMA, T., MURAYAMA, Y., MATSUZAWA, T., KOYANO, 1978. *Nucl. Instrum. Methods*, 157, 155.
- OGUNDARE, F.O., BALOGUN, F.A., HUSSAIN, L.A., 2005. Heating rate effects on the thermoluminescence of fluorite. *Radiat. Meas.*, 40, 60-64.
- PROKIC, M., 1980. *Nucl. Instrum. Methods* 175, 83.
- PROKIC, M., 1993. *Radiat. Prot. Dosim.* 47, 191.
- PUCHALSKA, M., BILSKI, P., 2006. GlowFit—a new tool for thermoluminescence glow-curve deconvolution. *Radiation Measurements*, 41, 659 – 664.
- RANDAL, J.T., WILKINS, M.H.F., 1945 *Proc. Roy. Soc. A*, 184, 366.
- RANOGAJEC, M., 2002. Thermoluminescence Dosimetry-Application in Environmental Monitoring. *Radiation Safety Management*, Vol. 2, No. 1, pp. 2-12.
- RENDELL, H., WORSLEY P., GREEN F., PARKS, D., 1991 Thermoluminescence dating of the Chelford Interstadial, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 103, Issues 1-4, Pages 182-189.
- RIEKE, J.F., DANIELS, F., 1957. *J. Phys. Chem.* 61, 629.

- ROCHA, F.D.G., MERCIA, L.O., SONIA G.P.C., LINDA V.E.C., 2003 Properties of Sintered Amethyst Pellets as Thermoluminescent Dosimeters, *Applied Radiation and Isotopes*, 58, 2003, 85–88.
- RUTHERFORD, E., 1913. *Radioactive Substance and Their Radiations*. Cambridge University Press.
- SANTOS, A.J.J., de LIMA, J.F., VALERIO, M.E.G., 2001. Photo- transferred thermoluminescence of quartz. *Radiat. Meas.* 33, 427–430.
- SCHAYES, R., BROOKE, C., KOZLOWITZ, I., L'HEREUX, M., 1965. In: *Proc. 1st Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*, Stanford. CONF 650637 (NTIS, Springfield, VA) p. 138.
- SCHLESINGER, M., COHEN, A.J., 1966. Postulated structures causing the optical color center bands in amethyst quartz. *J. Chem. Phys.* 44, 3146-3147.
- SCHULMAN, J.H., KIRK, R.D., WEST, E.J., 1965. In: *Proc. 1st Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*, Stanford. p. 113.
- SOLIMAN, C., SALAMA E., 2009 Investigation on the suitability of natural sandstone as a gamma dosimeter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B 267, 3323–3327.
- SPOONER, N.A., FRANKLIN, A.D., 2002. Effect of the heating rate on the red TL of quartz. *Radiat. Meas.*, 35, 59- 66.
- STOKES, S., 1998. *Luminescence Dating Applications in Geomorphological Research*, *Geomorphology* 29, 1999, pp. 153-171.
- TAKENAGA, M., YAMAMOTO, O., YAMASHITA, T., 1980. *Nucl. Instrum. Methods* 175, 77.
- TAYLOR, G.C., LILLEY, E., 1982. Rapid readout rate studies of thermoluminescence in LiF (TLD-100) crystals. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 15, 2053-2065.
- TEMPLER, R., 1986. *Radiat. Prot. Dosim.*, 17, 493.
- THOMAS, B., HOUSTON, E., 1964. *Br. J. Appl. Phys.* 15, 953.
- THOMSEN, K.J., BØTTER-JENSEN, L., DENBY, P.M., MURRAY, A.S., 2006. Luminescence response to irradiation using mini X-ray generators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 252:267–275.

- TOPAKSU, M., YAZICI, A.N., 2007. The Thermoluminescence Properties of Natural CaF₂ after β -Irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 264, 2007, pp. 293-301.
- TOPAKSU, M., Kubad Abad'a (Konya) Ait Selçuklu Seramik ve Çinilerinin Termoluminesans (TL) Tarihlendirilmesi, Yapısının Belirlenmesi ve Teknolojisinin Açıklanması, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi, s. 5-36, 2004.
- TUGAY, H., YEGINGİL, Z., DOĞAN, T., NUR, N., YAZICI, A.N., 2009. The thermoluminescence properties of natural calcium fluoride for radiation dosimetry. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B, 267, 3640-3651.
- TROWBRIDGE, J., BURBANK, J.E., 1898. Am J. Sci. Ser. 4, 5, 55.
- VISOCEKAS, R., CEVA, T., MARTI, C., LEFAUCHEUX, F., ROBERT, M.C., 1976. Phys. Status Solidi (a), 35, 315.
- WATANABE, S., 1951. Phys. Rev. 83, 785.
- WARD, R.W., WHIPPEY, P.W., 1972. Canad. J. Phys., 50, 1409.
- WEIDMAN, E., SCHMIDT, G.C., 1895. Ann. Phys. Chem. Neue Folge 54, 604.
- WICK, F.G., GLEASON, J.M., 1924. J. Opt. Soc. Am. 9, 639.
- WICK, F.G., 1924. Phys. Rev. 24), 272.
- WICK, F.G., SLATTERY, M.K., 1928. J. Opt. Soc. Am. 14, 125; 16, 398.
- WINTLE, A.G., 1973. Anomalous Fading of Thermoluminescence in Mineral Samples. Nature 21, 143-144.
- WINTLE, A.G., 1980, Thermoluminescence dating: a review of recent applications to non-pottery materials, Archaeometry, 22, 113-22.
- WINTLE, A.G., 1993. Luminescence dating of aeolian sands: an overview, *Geological Society, London, Special Publications*; 1993; v. 72; p. 49-58.
- YAMASHITA, T., NADA, N., ONISHI, H., KITAMURA, S., 1968. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry, Gatlinburg. p. 4.
- YANG, X.H., MCKEEVER, S.W.S., 1990. The predose effect in crystalline quartz. J. Phys. D, 23, 237-244.

- YAZICI, A.N., HACIİBRAHİMOĞLU, M.Y., 2001. Determination of the Trapping Parameters of Glow Peaks of CaF₂:Dy (TLD-200) by Using Computer Glow Curve Deconvolution Method. *Turk. J. Phys.* 25, 249-255.
- YAZICI, A.N., TOPAKSU, M., 2003. The analysis of Thermoluminescence glow peaks of unannealed synthetic quartz. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36, 620-627.
- ZHANG, Q., YANG, B., WOOD, R.A., WHITE, D.R.R., TOWNSEND, P.D., LUFF, B.J., 1994. Thermoluminescence spectra of amethyst. *Radiat. Meas.* 23, 423-431.
- ZIMMERMAN, D.W., 1967 TL from fine grains from ancient pottery, *Archaeometry* 10, s. 26-28.
- ZIMMERMAN, D.W., 1971a. Thermoluminescent dating using fine grains from pottery, *Archaeometry* 13, 29-52.
- ZIMMERMAN, D.W., J., 1971. The radiation-induced increase of 110 °C thermoluminescence sensitivity of fired quartz. *J. Phys. C Solid State Phys.* 4, 3265-3276.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Antakya'nın Serinyol kasabasında doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Serinyol'da tamamladı. 1996 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ne başladı. Bu bölümden 2001 yılında mezun oldu. 2001 yılında Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu Yüksek Lisans'ını 2004 yılında tamamladı. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimime başladı. 5 yıldır evlidir.