

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TLD-600 (LiF-6:Mg,Ti) VE TLD-700 (LiF-7:Mg,Ti) DOZİMETRELERİNİN
NÖTRON DOZUNA DUYARLILIĞININ İNCELENMESİ VE
RADYOTERAPİDE KULLANILAN LİNEER HIZLANDIRICI
CİHAZLARINDA DOZİMETRİ AMACI İLE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Sanaz HENDİ

**MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI
SAĞLIK FİZİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

ANKARA

2015

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Sanaz HENDİ tarafından hazırlanan "TLD-600 (Lif-6:Mg,Ti) ve TLD-700 (Lif-7:Mg,Ti) Dozimetrelerinin Nötron Dozuna Duyarlılığının İncelenmesi ve Radyoterapide Kullanılan Lineer Hızlandırıcı Cihazlarında Dozimetri Amacı ile Kullanılabilirliğinin Araştırılması " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı / Sağlık Fiziği Programında **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç.Dr.Niyazi MERİÇ

Jüri Üyeleri:

Doç.Dr.Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR

(Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü)

Prof.Dr.Ali Ulvi YILMAZER

(Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü)

Doç.Dr.Niyazi MERİÇ

(Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü)

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç.Dr.Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TLD-600 (LiF-6:Mg,Ti) VE TLD-700 (LiF-7:Mg,Ti) DOZİMETRELERİNİN NÖTRON DOZUNA DUYARLILIĞININ İNCELENMESİ VE RADYOTERAPİDE KULLANILAN LİNEER HIZLANDIRICI CİHAZLARINDA DOZİMETRİ AMACI İLE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Sanaz HENDİ

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

Medikal Fizik Anabilim Dalı

Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç. Dr. Niyazi MERİÇ

Nükleer bilimi zamanla gelişme kaydettikçe medikal, sanayi ve teknoloji gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte radyasyon dozunun ölçülmesi ve kişisel dozimetrelerin önemi artmıştır. Gamalarla karşılaştırıldığında nötronların biyolojik etkinlikleri daha yüksek olduğundan nötron dozimetresi radyasyondan korunmada büyük önem taşır. *LiF:Mg,Ti* dozimetreler gama dozuna olan yüksek hassasiyetleri, dokuya eşdeğer olmaları, ısıya karşı olan dayanıklılıkları ve göz ardı edilebilir sönümlenme zamanları nedeniyle uzun zamandan beri radyasyon dozimetresi olarak kullanılırlar. Nötron dozunun ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri TLD-600 ve TLD-700 dozimetrelerinin bir arada kullanılmasıdır. Nötron dozuna duyarlı olan TLD-600 ve nötron dozuna karşı duyarlı olmayan TLD-700 olmak üzere iki çeşit dozimetri kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın hedefi nötron-gama karışımı olan radyasyon alanlarında termal nötronlarının dedeksiyonu için TLD-600(LiF-6:Mg,Ti) ve TLD-700(LiF-7:Mg,Ti)

dozimetrelerinin nötron dozuna duyarlılığının incelenmesi ve radyoterapide kullanılan lineer hızlandırıcı cihazlarında dozimetri amacı ile kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

Bu çalışmada TLD-600 ve TLD-700'ler 100 mGy gama dozuna maruz bırakıldı ve tekrarlanabilirlikleri birbirine en yakın TLD'ler seçildi. Seçilen TLD'ler 10 mGy nötron dozunda ışınlandı ve ışıma eğrileri ayrıştırıcı programı kullanılarak piklerine ayrıştırıldı ve dördüncü pikleri birbirine en yakın şiddeti veren altı TLD (üç TLD-600 ve üç TLD-700) seçildi. TLD'ler lineer hızlandırıcı cihazında on farklı dozda ışınlandı (0,5Gy, 0,75Gy, 1Gy, 1,5Gy, 2Gy, 2,5Gy, 3Gy, 5Gy, 7,5Gy, 10 Gy). Elde edilen ışıma eğrileri piklerine ayrıştırıldı ve her bir pike ait doz-cevap eğrisi çizildi. Nötron dozuna duyarlı olan dördüncü pik için doz-cevap eğrisi ve X-ışını dozu-nötron dozu grafikleri çizildi. Elde edilen verilere göre nötronun tedavi dozuna olan katkısı yaklaşık olarak %0,113'tür. 10 rad (0.1Gy) ve altı radyasyon dozlarında biyolojik etkinin göz ardı edilecek kadar az olduğu (HPS 1996) göz önünde bulundurulursa bu değerler uygulanan tedavi dozunu etkilemeyecektir ve ikincil kanser riski oluşmayacaktır.

2015, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Lüminesans, Termolüminesans, Nötron, Dozimetre, LiF, TLD-600, TLD-700, Radyoterapi.

ABSTRACT

Masters Thesis

INVESTIGATION OF TLD-600 (LiF-6:Mg,Ti) AND TLD-700 (LiF-7:Mg,Ti) DOSEMETERS SENSITIVITY TO NEUTRON DOSE AND INVESTIGATION OF USABILITY OF TLD-600 AND TLD-700 FOR THE PURPOSE OF DOSIMETRY IN LINEAR ACCELERATOR DEVICES USED IN RADIOTHERAPY.

Sanaz HENDİ

Ankara University Institute of Nuclear Sciences

Department of Medical Physics

Supervisor: Assoc. Dr. Niyazi MERİÇ

During the last years due to the development and establishment of the nuclear science, dosimetry has become a mandatory task. In addition to this, the measurements of radiation dose using personal dosimeters have become significant. especially when it comes Gamma rays due to higher biological effects of neutron dose, have an important role in order to protect from radiation. LiF:Mg dosimeters have been used for long time ago because of high sensitivity, being tissue equivalent, resistance to heat and negligible decay time. One common method for measuring the neutron dose is to use TLD-600 and TLD-700 together. These kinds of Dosimeters were used, namely TLD-600 which is sensitive to neutron dose, and TLD-700, the latter is not. The aim of this study is to investigate the sensitivity of the TLD-600 and TLD-700 dosimeters for detection of the thermal neutrons in the fields of radiation which include mixed neutron particles and gamma rays, as well as to research being used as a dosimeter for linear accelerators in radiation therapy.

In this study, TLD-600 and TLD-700 were exposed to 100 mGy gamma dose and the TLD's which yielded good reproducibility were chosen. Selected TLD's were exposed to 10mGy neutron dose and the glow curves were de-convoluted into individual peaks, using the general order kinetics model. TLDs having the fourth peak with identical

intensity were selected (three TLD-600 and three TLD-700). TLD's were irradiated at ten different doses in linear accelerator device (0,5Gy, 0,75Gy, 1Gy, 1,5Gy, 2Gy, 2,5Gy, 3Gy, 5Gy, 7,5Gy, 10 Gy). The obtained glow curves were separated into peaks and the dose-response curve was derived for each peak. Dose-response curve and X-ray-neutron graphic plotted for fourth peak which is sensitive to the neutron dose. According to the results obtained the contribution of neutrons to the total therapy dose is approximately 0.113%. considerably, below 10 rad (0.1Gy) the risks of health effects are either too low to be observed or even non-existent (HPS 1996), these values will not affect the treatment dose and there will be no risk of secondary cancer.

2015, 62 pages

KeyWords: Luminescence, Thermoluminescence, Neutron, Dosimeter, LiF, TLD-600, TLD-700, Radiotherapy.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, bana bilimsel araştırma yapabilme olanağı sunan ve özgün değeri yüksek bir çalışma konusu önererek bana yardımcı olan danışman hocam Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Müdürü Sayın **Doç. Dr. Niyazi MERİÇ'e**,

gerekli materyalleri temin eden ve bu süreçte benden desteklerini ve bilgilerini esirgemeyen **Dr.George.S POLYMERIS'e**,

bilgi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan **Uzm.Şule KAYA KELEŞ, Prof.Dr.Haluk YÜCEL, Aytaç BARIŞ, Arş.Gör.Engin AŞLAR, Arş.Gör.Merve ÖZKAN, Ferhat CENGİZ, Nafiye KAPLAN, Yasin ERGİN, Pelin SELAĞZI , Uzm.Eren ŞAHİNER, Emine IŞIK, Şaban SEZER'e**,

Manevi destekleriyle hep yanımda olan **Fetiye ÇALIŞKAN, Buket DEĞİRMENCİ ve ÖZKAN** ailesine,

Ankara Numune Eğitim ve Araştırma Hastanesi ve Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsünün bütün akademik ve idari personeline,

Hayatımdaki en değerli varlıklar olan ve maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan annem **Hamideh KESHVARI HENDİ**, babam **Masum HENDİ**, kardeşlerim **Elnaz, Ainaz ve Ali HENDİ**'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sanaz HENDİ

Mart 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Nötronlar.....	3
2.1.1 Nötronların oluşumu.....	5
2.1.2 Lineer hızlandırıcılarda nötron oluşumu	5
2.1.3 ²⁴¹ Am-Be Nötron kaynağı.....	7
2.1.4 TL dozimetre	8
2.2 Lüminesans	9
2.2.1 Band modeli	11
2.3.1 Termolüminesans	12
2.3 Birinci, İkinci ve Genel Mertebeden TL Kinetiği	16
2.3.1 Birinci mertebeden TL kinetiği.....	16
2.3.2 İkinci mertebeden kinetik	17
2.3.3 Genel mertebeden kinetik.....	18
2.4 Kinetik Parametrelerin Analiz Yöntemleri	19
2.4.1 Başlangıç artış yöntemi.....	19
2.4.2 Farklı ısıtma hızları yöntemi.....	20
2.4.3 Pik şekli yöntemi	21
2.4.4 İzotermal sönüm yöntemi	23
2.4.5 Ayırıştırma yöntemi	24
2.5 Doz Cevabı	26
2.6 Fırınlama.....	26
2.7 TLD Okuyucu Sistemler	27
2.8 Lineer Hızlandırıcı	28
2.8.1 Lineer hızlandırıcıların çalışma prensipi.....	29
2.8.2 Kolimatör	31

3. MATERYAL VE YÖNTEM	34
3.1. TLD-600 ve TLD-700 Dozimetreleri	34
3.2 Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar	35
3.2.1 PTW-TLDO fırınlama ünitesi	35
3.2.2 Harshaw TLD3500 okuyucu	36
3.2.3 ²⁴¹Am-Be Nötron ışınlama ünitesi	36
3.2.4 ¹³⁷Cs Kaynağı	37
3.2.5 Varian trilogy rapidarc lineer hızlandırıcı	38
3.2.6 Katı su fantomu	38
4. BULGULAR	40
4.1 TLD'lerin Kalibrasyonu	40
4.2. Ayrıştırma	45
4.3. Doz cevabı	50
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	57
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER DİZİNİ

β	Isıtma hızı
E	Aktivasyon enerjisi
eV	Elektronvolt
T	Mutlak sıcaklık
T_e	Elektron tuzağı
OSL	Optik uyarımlı lüminesans
TLD	Termolüminesans dozimetre
E_f	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji seviyesini gösterir
τ_c	Lüminesans ışığının yayılması için geçen süre
n_c	İletim bandındaki elektronların konsantrasyonu
m	Deşiklerin konsantrasyonu
A_m	Birim saniyedeki rekombinasyon olasılığı
I(t)	Termolüminesans ışığının şiddeti
s	Frekans faktörü
LET	Lineer enerji transferi
CGCD	Bilgisayarlı ışıma eğrisi ayrıştırma yöntemi (Computerized Glow Curve Deconvolution)
PMT	Fotoçoğaltıcı tüp

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. 1 Nötronlarda elastik saçılma	4
Şekil 2.1.2. 1 Farklı foton enerjileri için fotonötronun tesir kesiti.....	6
Şekil 2.6.1 ²⁴¹ Am-Be nötron kaynağının nötron enerjisine göre rölatif şiddet spektrumu.....	8
Şekil 2.2. 1 Lüminesans olayı soy ağacı	10
Şekil 2.2.1.1 TL ve OSL yöntemlerinin şematik gösterimi	12
Şekil 2.3.1.1 TL materyalinde basit iki band modeline göre elektron geçişi.....	13
Şekil 2.4.1.1 Başlangıçtaki artış yöntemi.....	20
Şekil 2.4.2.1 Farklı ısıtma hızları yöntemi ile elde edilen ışınma eğrileri.	21
Şekil 2.4.3.1 TL ışınma eğrisinde geometrik şeklin parametreleri (τ , δ , ω)	22
Şekil 2.7.1 TLD okuyucu sisteminin basit şeması	28
Şekil 2.8.1 Lineer hızlandırıcıların şematik görünümü.....	29
Şekil 2.8.2.1 Varian marka lineer hızlandırıcıya ait kolimatör yapısı	34
Şekil 3.1.1 Deneyler esnasında kullanılmak üzere seçilen TLD-700 ve TLD-600'ler..	34
Şekil 3.2.1.1. PTW-TLDO fırınlama ünitesi.....	35
Şekil 3.2.2.1 Harshaw 3500 TLD okuyucu.....	36
Şekil 3.2.3.1 37 GBq ²⁴¹ Am-Be nötron ışınlama ünitesi	37
Şekil 3.2.4.1 Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde bulunan ¹³⁷ Cs gama kaynağı ışınlama sistemi	37
Şekil 3.2.5.1 Ankara Numune Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Onkoloji Kliniğinde bulunan Varian trilogy lineer hızlandırıcı	38
Şekil 3.2.6.1 RW-3 katı su fantomu.....	39
Şekil 4.1.1 400 °C'de 1 saat ve 100°C'de 2 saat fırınlanan ve 100 mGy gama dozunda ışınlanan 36 adet TLD-700'ün toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği.....	40
Şekil 4.1.2 400 °C'de 1 saat ve 100°C'de 2 saat fırınlanan ve 100 mGy gama dozunda ışınlanan 27 adet TLD-700'ün toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği.....	41
Şekil 4.1.3 100 mGy gama dozunda ışınlanan TLD'lerin arasından seçilen TLD-600'lere ait toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği.....	41
Şekil 4.1.4 100 mGy gama dozunda ışınlanan TLD'lerin arasından seçilen TLD-700'lere ait toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği.....	42
Şekil 4.1.5 Seçilen TLD-600 lerin yeni fırınlama parametreleriyle tavlانیp Cs-137 kaynağında 100mGy dozda ışınılandıktan sonra elde edilen ışınma eğrileri.	43
Şekil 4.1.6 Seçilen TLD-700 lerin yeni fırınlama parametreleriyle tavlانیp Cs-137 kaynağında 100mGy dozda ışınılandıktan sonra elde edilen ışınma eğrileri.....	43

Şekil 4.1.7 15 dakika 400 °C ve 2 kere 350 °C tavlanan ve nötron kaynağında 10 mGy doza maruz bırakılan TLD-600'lerin ışımaya eğrileri	44
Şekil 4.1.8 15 dakika 400 °C ve 2 kere 350 °C tavlanan ve nötron kaynağında 10 mGy doza maruz bırakılan TLD-700'lerin ışımaya eğrileri	44
Şekil 4.2.1 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 27 numaralı TLD-600 (⁶ LiF: Mg, Ti)'ün ışımaya eğrilerinin ayrıştırılmış pikleri.....	45
Şekil 4.2.2 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 28 numaralı TLD-600 (⁶ LiF: Mg, Ti)'ün ışımaya eğrilerinin ayrıştırılmış pikleri.....	45
Şekil 4.2.3 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 29 numaralı TLD-600 (⁶ LiF: Mg, Ti)'ün ışımaya eğrilerinin ayrıştırılmış pikleri.....	46
Şekil 4.2.4 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 3 numaralı TLD-700 (⁷ LiF: Mg, Ti)'ün ışımaya eğrilerinin ayrıştırılmış pikleri.....	46
Şekil 4.2.5 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 16 numaralı TLD-700 (⁷ LiF: Mg, Ti)'ün ışımaya eğrilerinin ayrıştırılmış pikleri.....	46
Şekil 4.2.6 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 25 numaralı TLD-700 (⁷ LiF: Mg, Ti)'ün ışımaya eğrilerinin ayrıştırılmış pikleri.....	47
Şekil 4.2.7 Nötron, gama ve nötron-gama karışımı radyasyon alanlarında ışınlanan TLD-600'lere ait ışımaya eğrileri.	49
Şekil 4.2.8 Nötron, gama ve nötron-gama karışımı radyasyon alanlarında ışınlanan TLD-700'lere ait ışımaya eğrileri.	49
Şekil 4.3.1 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin birinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri	51
Şekil 4.3.2 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin ikinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri.....	51
Şekil 4.3.3 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin üçüncü piklerine ait Doz-Cevap eğrileri	52
Şekil 4.3.4 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin dördüncü piklerine ait Doz-Cevap eğrileri.....	52
Şekil 4.3.5 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin beşinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri	53
Şekil 4.3.6 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin altıncı piklerine ait Doz-Cevap eğrileri.....	53
Şekil 4.3.7 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin yedinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri	54
Şekil 4.3.8 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin nötron dozuna ait Doz-Cevap eğrileri	54
Şekil 4.3.9 Lineer hızlandırıcıda 18 MV X-ışını enerjisinde farklı dozlarda ışınlanan TLD-600 ve TLD-700'lerden elde edilen nötron dozları.	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.1 Nötronların kinetik enerjilerine göre sınıflandırılması.	3
Çizelge 3.2.2.1 Harshaw 3500 TLD okuyucu cihazında kullanılan okuma parametreleri.	36
Çizelge 4.2.1 Nötron kaynağında ışınlanan TLD'lerin 4 numaralı piklerinin integrali.	47
Çizelge 4.3.1 Lineer hızlandırıcıda farklı dozlarda ışınlanan TLD-600 ve TLD-700'lerden elde edilen nötron dozları ve ona karşı gelen TL ışınma şiddetleri.	56

1.GİRİŞ

Radyoterapi alanında lineer hızlandırıcılar (linak) tarafından üretilen yüksek enerjili X-ışını demetleri kanserli hücrelerin tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretilen X-ışınlarının enerjisi 8 MV'un üzerinde olduğu durumda elde edilen fotonların yanı sıra istenmeyen termal nötronlar da üretilir, bu termal nötronlar fotonötron olarak adlandırılır. Lineer hızlandırıcıda elde edilen termal nötronlar yüksek enerjili fotonların cihazda veya odada bulunan zırhlama malzemelerinin atom çekirdeği ile etkileşmesi sonucu meydana gelir. Çekirdeğin içine nüfuz eden foton enerjisini çekirdeğe aktarır ve çekirdeğin enerjisi artar. Çekirdek aldığı ekstra enerjiyi telafi edebilmek için bir nötron salar, ve nötron kararsız olduğundan β^+ ve γ yayarak denge durumuna geçer. Üretilen fotonların oranı nötronlara göre çok daha fazla olduğu için nötronların dedeksiyonu oldukça zordur. Termal nötronların enerjileri düşüktür ve yaklaşık 0,025eV civarındadır. Termal nötronlar yüksek menzil ve yüksek LET'e (lineer enerji transfer) sahip oldukları için biyolojik etkileri gamalara göre 10 kat daha fazladır (Sunden 2010).

Radyasyon alanında çalışanların aldıkları dozu ölçmek için kişisel dozimetreler büyük önem taşır, bunun için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri termolüminesans dozimetri (TLD) yöntemidir. Günümüzde medikal alanda TLD materyalleri arasında LiF:Mg,Ti kullanılmaktadır. Fotonötron dozunun ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri TLD-600 ve TLD-700 dozimetrelerinin bir arada kullanılmasıdır. TLD-600'ler nötron ve gama dozuna duyarlıyken TLD-700'ler sadece gama dozuna duyarlıdır (Revol 1999).

Bu tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde nötronların oluşumu, madde ile etkileşmesi, lüminesans olayının mekanizması, TL hakkında bilgiler verilmektedir. Ayrıca termilüminesans ölçümlerinde ve tez aşamasında kullanılan sistemler hakkında temel bilgiler verilmektedir. Tezin ikinci bölümü TLD, kalibrasyon için kullanılan gama ve nötron kaynakları, TL okuyucu cihazı, fırınlama ünitesi ve ölçümlerde kullanılan lineer hızlandırıcı hakkında bilgiler içerir. Çalışmanın üçüncü bölümünde TLD'lerin kalibrasyonu, ayrıştırıcı programı kullanılarak ışınma eğrisinde bulunan piklerin birbirinden ayrıştırılması ve lineer hızlandırıcı cihazından elde edilen doz-cevap eğrileri verilmektedir. Bu bölümde X-ışını

dozlarına karşılık gelen nötron dozları elde edilmiştir. Tezin son bölümünde ise kullanılan ölçüm yöntemi ve elde edilen bulgular kullanılarak lineer hızlandırıcılardan saçılan nötronların tedavi dozlarındaki etkileri hakkında yorumlar yapılmıştır.

Çalışmanın amacı X-ışını üreten lineer hızlandırıcılardan çıkan fotonötron dozunun ölçülmesi, nötronların hastaların aldığı planlanan doza olan katkı payının belirlenmesi, TLD-600 (LiF-6:Mg,Ti) ve TLD-700 (LiF-7:Mg,Ti) dozimetrelerinin nötron dozuna duyarlılığının incelenmesi ve radyoterapide kullanılan lineer hızlandırıcı cihazlarında dozimetri amacı ile kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

2.KURAMSAL TEMELLER

2.1 Nötronlar

Nötron, 1911 yılında Rutherford tarafından çekirdeğin keşfinin ardından 1932 yılında J.Chadwick tarafından keşfedilmiştir. Nötronlar yüksüz parçacıklar oldukları için yüklü parçacıklar gibi çekirdeğin etrafındaki elektronlarla etkileşmezler ve çekirdeğin içine nüfuz edip nükleer kuvvetlerle etkileşirler. Yüksek enerjili nötronların farklı maddelerin atomlarıyla yaptıkları çarpışmalar sonucunda hızları azaltılabilir. Buna nötronun yavaşlatılması denir. Sonuç olarak, nötronlar çok düşük enerjilere ulaşabilirler. Nötronlar kinetik enerjilerine göre sınıflandırılırlar:

Çizelge 2.1.1 Nötronların kinetik enerjilerine göre sınıflandırılması

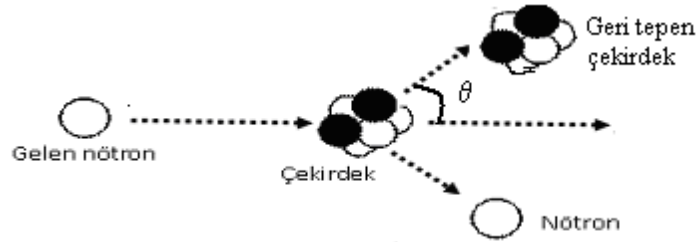
Nötronlar	Enerji Aralığı
Ultra Soğuk	$< 3 \times 10^{-4}$ meV
Çok Soğuk	$3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-2}$ meV
Soğuk	$5 \times 10^{-2} - 25$ meV
Termal	~ 25 meV
Sıcak	~ 200 meV
Epitermal	$\sim 250 - 10^3$ meV

Nötronların madde ile etkileşmeleri enerjilerine bağlıdır. Bu etkileşmelere yol açan nükleer kuvvet çok kısa menzillidir. Yani, bir etkileşme meydana gelebilmesi için nötronların çekirdeğe yakın bir noktadan geçmesi gerekir. Bu nedenle nötronların nükleer kuvvetlerle etkileşme olasılıkları (tesir kesit) diğer parçacıklara göre daha fazladır. Yukarıdaki nedenlerden dolayı nötronlar en girici radyasyon türüdür. Nötronlar madde ile *saçılma* ve *soğurulma* olarak iki şekilde etkileşebilirler.

Saçılma

Saçılma iki şekilde gerçekleşir:

- i. *Elastik saçılma (n,n)*: Elastik saçılma nötronların yavaşlatılmasında önemli bir süreçtir. Bu olayda nötron bir atomun çekirdeği ile esnek çarpışma yapar. Nötronun kinetik enerjisi nötron ile hedef çekirdek arasında paylaşılır. Bunun sonucunda nötron farklı bir yönde saçılır. Nötronun kaybettiği enerji hedef çekirdek tarafından kazanılır eğer nötron ağır bir çekirdekle çarpışırsa, neredeyse aynı hızla saçılır ve çok küçük bir miktarda enerji kaybeder. Hedef hafif bir çekirdek ise böyle bir çarpışmada çok fazla enerji kazanır, bu durumda nötronların yavaşlatılmasında hafif çekirdeklerin önemli olduğu söylenebilir. Bu çarpışmada enerji ve momentum korunur, çekirdeğin fiziksel yapısında bir değişiklik olmaz.



Şekil 2.1. 1 Nötronlarda elastik saçılma

- ii. *İnelastik saçılma (n,n')*: İnelastik saçılmada, gelen nötron hedef çekirdek tarafından soğurulur ve bir birleşik çekirdek oluşturur. Birleşik çekirdek orijinal çekirdeğin uyarılmış halidir ve daha düşük kinetik enerjili bir nötron yayımlar. Çekirdek genellikle bir ya da daha fazla gama yayımlamasıyla taban durumuna geçer. Bu çarpışmada, momentum korunur ve enerjinin bir kısmı çekirdeğin uyarma enerjisi olarak harcanır ve çekirdeğin fiziksel yapısı değişir (Chaplin 2009).

Soğurulma

Nötronlar saçılırken yeterli enerji kaybettiğinde, soğuran maddenin çekirdeği ile doğrudan etkileşebilir. Nötron yine çekirdek tarafından yakalanır, çekirdeğin yeni bir izotopunu oluşturur ve çekirdek sadece bir gama ışını yayımlar. Bu olaya nötron yutulması denir.

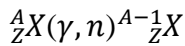
2.1.1 Nötronların oluşumu

Kararlı bir çekirdeğin içinde bulunan nükleer bileşenler sıkı bir şekilde birbirine bağlıdırlar ve nötronun çekirdekten çıkabilmesi için milyonlarca elektron volt enerji gereklidir. Çok kısa yarı ömürlü (yaklaşık 10,3 dakika) olduklarından dolayı nötronlar doğada serbest halde bulunamazlar. Yapay olarak elde edilmeleri gerekir. Bunun için çeşitli reaksiyonlar kullanılır. Bu reaksiyonlarda hedef çekirdek alfa, proton, döteron, gama ışınları ile bombardıman edilerek uyarılmış birleşik çekirdek elde edilir. Eğer uyarılma enerjisi birleşik çekirdek içindeki valans nötronun bağlanma enerjisinden daha büyükse, bu durumda nötronun yayılması olasıdır (Sunden 2010).

Nötron kaynaklarını incelemek için önce valans nötronun bağlanma enerjisini düşünmek gerekir. Alfa parçacıklarının birleşerek oluşturduğu düşünülen çekirdeklerin ayrılma enerjileri büyüktür ve bu çekirdekler çok karardır (^8Be hariç; ^{12}C , ^4He , ^{16}O vb.).

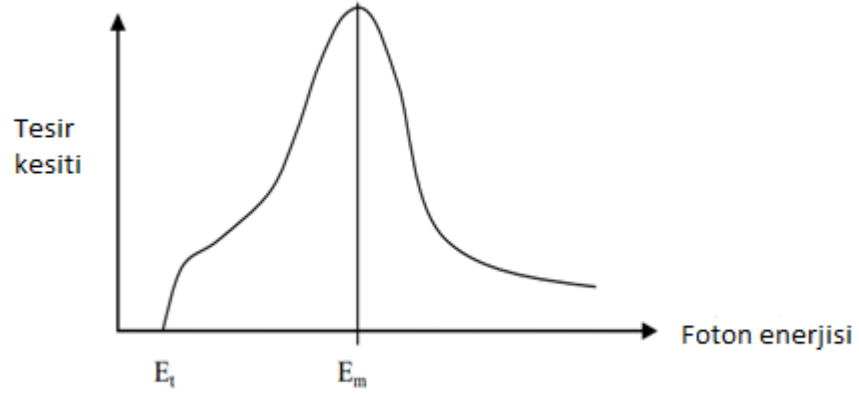
2.1.2 Lineer hızlandırıcılarda nötron oluşumu

Lineer hızlandırıcı 8 MV ve üstü enerjilerde çalıştığı zaman üretilen X-ışınının yanı sıra bir miktar nötron üretilir. Bu nötronlara fotonötron denir, fotonötronlar üretilen X-ışınlarının lineer hızlandırıcının kafa kısmında veya tedavi odasında kullanılan yüksek atom numaralı malzemenin çekirdeği ile etkileşmesi sonucu ortaya çıkarlar. Çekirdek fotondan aldığı ekstra enerjiyi telafi edebilmek için bir nötron salar ve çekirdek eğer halen radyoaktif durumda ise β^+ ve γ yayarak denge durumuna geçer. Bu reaksiyon aşağıdaki gibi gösterilir (Sunden 2010).



Bu etkileşme foton yerine elektronla da olabilir ama nötron verimi fotonlara göre birkaç kat daha azdır ve ihmal edilebilir. Nötronlar $(\gamma, 2n)$ ve (γ, pn) reaksiyonları sırasında da üretilebilir ama nötron verimi daha azdır.

Çıkan nötronun verimi fotonun etkileştiği materyalin atom numarasına ve fotonun enerjisine bağlıdır. Yüksek atom numaralı maddelerde fotonların madde ile etkileşme ve fotonötron üretme olasılığı daha fazladır. Fotonötronun tesir kesiti veya fotonötron üretilme olasılığı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak orta ve yüksek atom numaralı malzemeler için aşağıdaki gibi verilir (şekil 2.1.2.1)



Şekil 2.1.2. 1 Farklı foton enerjileri için fotonötronun tesir kesiti

Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken foton enerjisi bir eşik değere sahiptir (E_t). Bu enerji değerinin altında foton enerjisi nötron bağlilik değerinin altında, bu değer yaklaşık 8 MV'tur, ve bu değer altında fotonlar nötron üretemeyecektir. nötronlar 10MV'un üzerinde çalışan lineer hızlandırıcıların zırlamasında sorun yaratırlar. Tesir kesiti E_m eşik enerjisinin üzerine çıktığı zaman maksimum değere ulaşır.

İki çeşit fotonötron üretilir, buharlaşma ve direk nötronlar. Buharlaşma nötronları maxwellian enerji dağılımına sahipler ve üretilen nötronların büyük kısmını kapsarlar. Fotonların ve çekirdekdeki nötronların doğrudan etkileşmesinden oluşan direk nötronlar, buharlaşma nötronlarına göre daha yüksek enerjiye sahipler (Sunden 2010).

2.1.3 ²⁴¹Am-Be Nötron kaynağı

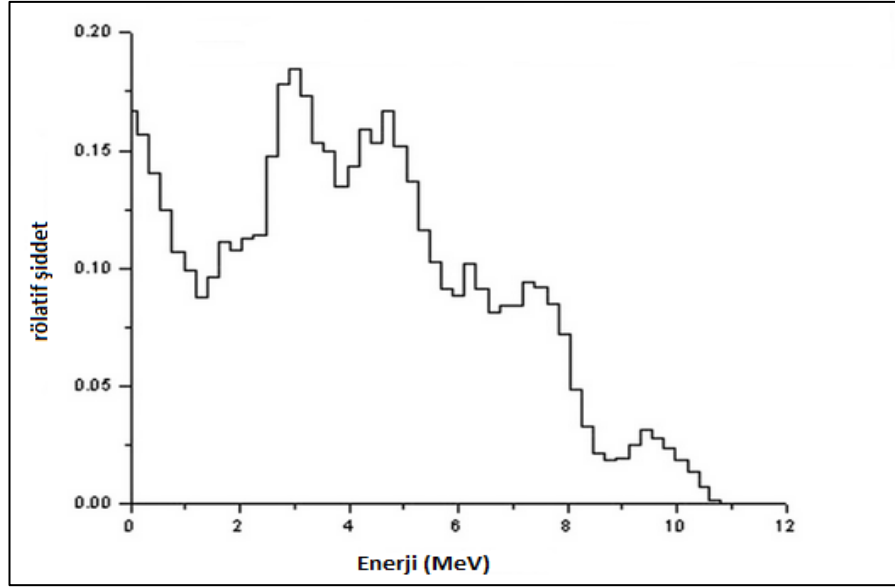
Lityum (Li), Berilyum (Be), Bor (B) gibi hafif çekirdeklerin gama fotonları veya alfa parçacıklarıyla bombardıman edilmesi sonucu veya ²⁵²Cf, ²⁵⁴Cf gibi radyoaktif çekirdeklerin kendiliğinden fisyonu ile nötron üreten kaynaklara genel olarak izotopik nötron kaynakları adı verilir.

²⁴¹Am, ²²⁸Ra, ²³⁸Pu gibi çekirdeklerden yayınlanan alfa parçacıkları ile berilyum hedef bombardıman edildiğinde etkileşmesi gereği nötron üretilir.



Böyle bir (α,n) izotopik nötron kaynağı, alfa yayınlayan çekirdek ile bombardıman edilen hedef çekirdeğin isimleri birlikte söylenerek adlandırılır. Örneğin eşitlik 2.1 ile verilen reaksiyon gereği berilyum çekirdeklerini bombardıman eden alfa parçacıkları ²⁴¹Am çekirdeğinden yayınlanıyorsa, bu kaynak ²⁴¹Am-Be nötron kaynağı olarak adlandırılır.

(α,n) izotopik nötron kaynaklarında yayınlanan nötronlar tek enerjili olmayıp enerjilerine göre nötron şiddeti farklılık gösteren bir enerji spektrumuna sahiptir. ²⁴¹Am-Be izotopik nötron kaynağının enerji spektrumu Şekil 2.1.3.1'de verilmiştir (Karadağ 1998).



Şekil 2.1.3.1 $^{241}\text{Am-Be}$ nötron kaynağının nötron enerjisine göre rölatif şiddet spektrumu

2.1.4 TL dozimetre

Canlıların ya da malzemelerin maruz kaldığı radyasyon dozunun, doğrudan ya da dolaylı olarak ölçülmesi işlemine "dozimetrik ölçüm" denir. Maruz kalınan radyasyon dozunu ölçmeye yarayan ölçü aletlerine ise "dozimetre" adı verilir. Termoluminesans dozimetre materyalleri, son elli yıldır çevresel ve kişisel dozimetride radyasyon doz ölçümleri için kullanılmaktadır (McKeever et al. 1995). Termoluminesans dozimetri sistemleri, sürekli olarak geliştirilmekte ve ilerlemektedir. Bir malzemenin dozimetre olarak kullanılabilmesi için istenilen bazı özelliklere sahip olması gerekir. İyi bir dozimetrik malzemenin, 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 olması, lineer bir doz cevap eğrisine sahip olması, pahalı olmaması ve çevre koşullarına dayanıklı olması beklenir (Soliman and Salama 2009). TL ışımaya tepeleri iyi belirlenmiş doğal mineraller ve sentetik kristaller radyasyon dozu ölçümü için elverişlidir. Bu nedenle birçok kristal dozimetrik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile bilimsel çalışmalara konu olmuştur. Termoluminesans merkezleri içeren bu kristallere termoluminesans fosforlar denir. Termoluminesans madde ısıtıldıkça

tuzaklardaki elektronlar serbest kalır. Tuzaklardan çıkan elektronlar enerji kaybederler ve kaybettikleri enerjiyi bir ışık olarak salırlar. Çıkan ışığın şiddeti sıcaklığın fonksiyonu olarak çizildiği zaman TL ışımaya eğrisi elde edilir. Bu işlem TL okuma işlemi olarak adlandırılır. TL ışımaya eğrisi birden fazla pikten oluşur. Genellikle en yüksek pik doz hesaplarında kullanılır. Işıma eğrisinin altında kalan alan maddenin içerisinde depolanan doz miktarı ile orantılıdır. Okuma işlemi tamamlandıktan sonra TLD (Termolüminesans Dozimetre) tavlama tabi tutulur. Bu işlem TLD maddesinin sıfırlanmasını sağlar ve TLD tekrar kullanım için hazır olur. 200 °C'den daha düşük sıcaklıklarda kristallerdeki tuzaklarda tuzaklanmış elektronlar, çevre sıcaklık koşullarında uzun süre kalmaları durumunda bu tuzaklardan çıkabilmelerinden dolayı, dozimetrik amaç için uygun değildir (Aitken 1985). Dozimetrik ölçüm için 200 °C ya da daha yüksek sıcaklıklarda oluşan kararlı pikler tercih edilir (Wintle 1993).

2.2 Lüminesans

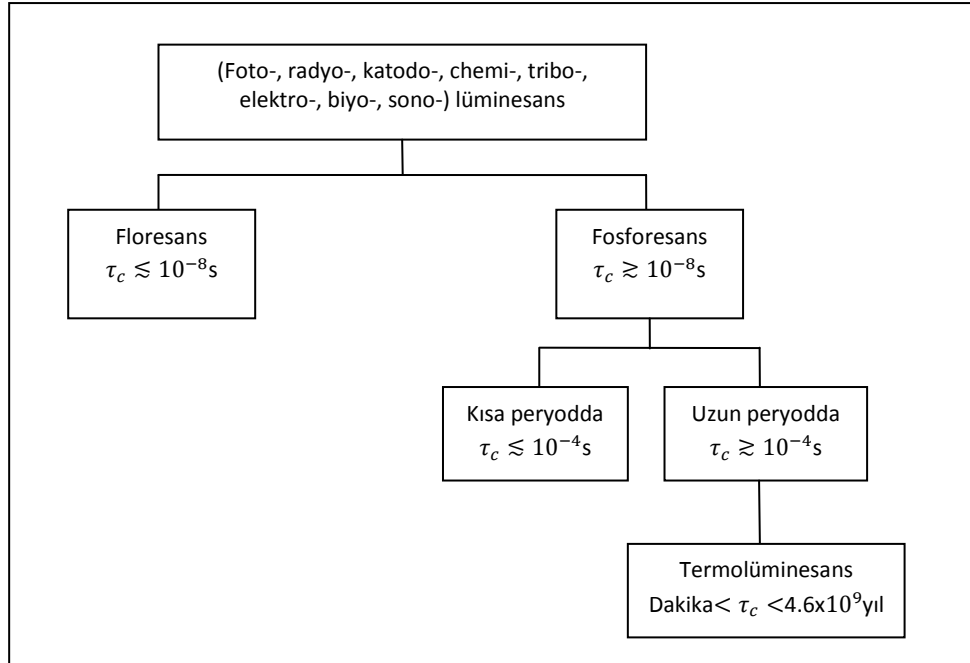
Lüminesans, ısı ile uyarılmaksızın atom veya molekülden yayınlanan elektromanyetik radyasyon için kullanılan bir terimdir. Yayınlanan ışık genellikle görünür ışık bölgesindeki dalga boylarını kapsar fakat kızılötesi ve ultraviyole gibi diğer dalga boyları da yayınlanabilir. Bir materyal termal olarak uyarıldığı zaman meydana gelen ışık yayılımı ile lüminesansı ayırmak için lüminesans soğuk ışık olarak da adlandırılır. Yayılan ışığın dalgaboyu lüminesans maddesinin karakteristiğini gösterir ve gelen radyasyondan bağımsızdır (McKeever 1985).

Lüminesans uyarma şekline bağlı olarak adlandırılır:

- Isı ile uyarılma, Termolüminesans (TL),
- Işık ile uyarılma, Optik Uyarımlı Lüminesans (OSL),
- Radyasyonla uyarılma, Radyolüminesans (γ -ışınları, β -ışınları, X-ışınları, v.s),
- Kimyasal reaksiyon sonucu oluşuyorsa, Kimilüminesans,
- Elektrik alan uygulaması ile meydana geliyorsa, Elektrolüminesans,
- Biyokimyasal etkileşimlerden meydana geliyorsa, Biyolüminesans,

- Yüksek frekanslı ses dalgaları ile meydana geliyorsa, Sonolüminesans,
- Katot ışınları ile uyarılma, Katodalüminesans,
- Kristallerin kırılma ve parçalanması ile oluyorsa, Tribolüminesans,
- Basınç ($10 \text{ ton} \cdot \text{m}^{-2}$) ile oluyorsa, Piezolüminesans,
- U.V, görünür ve kızıl ötesi ışık ile oluyorsa, Fotolüminesans (Barış 2013)

Radyasyon soğurulmasının ardından ışık yayılımı karakteristik bir τ_c süresinden sonra meydana gelir ve bu parametre lüminesans olayının sınıflandırılmasını sağlar. Lüminesans olayı eğer $\tau_c < 10^{-8} \text{ s}$ ise floresans ve $\tau_c > 10^{-8} \text{ s}$ ise fosforesans şeklinde ikiye ayrılır (Şekil 2.2.1) (McKeever 1985).



Şekil 2.2. 1 Lüminesans olayı soy ağacı

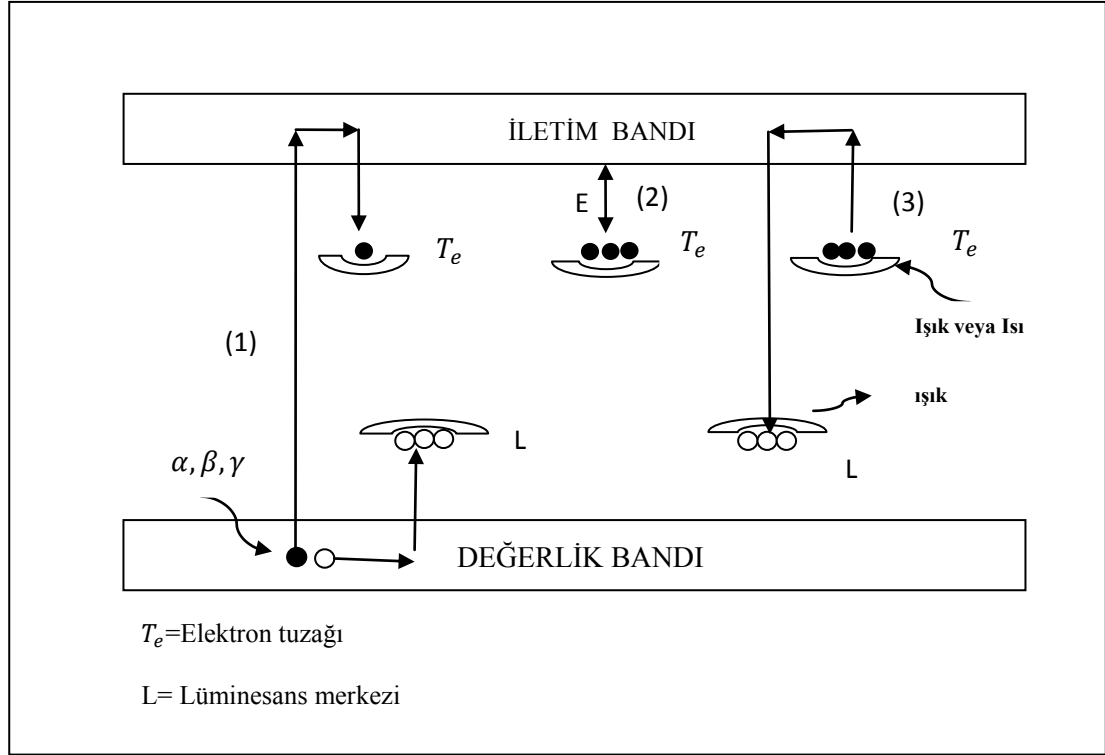
Floresans olayı kesinlikle sıcaklıktan bağımsızdır, fakat fosforesans olayı güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlıdır.

2.2.1 Band modeli

Lüminesans mekanizması enerji band modeline göre açıklanabilir. Bilindiği gibi Bohr atom modeline göre elektron sadece belirli enerji seviyesinde var olabilir. Elektronların bulunduğu bu seviyeler arasındaki enerji değerleri, atomda serbest bir elektron için yasaktır. Atomlardan oluşan katılar göz önüne alındığında bu bölgeler enerji aralığı veya band aralığı olarak adlandırılır. En düşük boş banda iletim bandı ve elektron seviyeleriyle doldurulmuş en yüksek banda değerlik bandı denir (Şekil 2.2.1.1). Değerlik bandının doldurulması ve değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki enerji aralığının büyüklüğü, bir kristalin iletkenlik, yarıiletkenlik veya yalıtkanlık karakterini tanımlar. Eğer band aralığının genişliği $\sim 3-10$ eV arasında ise materyal yalıtkan (çok zayıf iletken) olarak, eğer genişlik ihmal edilecek kadar küçük veya yoksa (değerlik ve iletim bandı üst üste ise) materyal iletken olarak adlandırılır. Yarıiletken materyaller ise iletken ve yalıtkan arasında bulunurlar.

Kusursuz bir kristalde bu yasak bantta hiç elektron bulunmaz. Ancak doğada bir takım kristaller (kuvars ve feldspat gibi) bu ideal durumu her zaman sağlamazlar ve kristal yapılarının içinde bir takım kusurlar barındırabilirler (Vandenberghe 2004). Gözlenen kusurlardan en yaygını nokta kusurlardır. Noktasal kusur tipleri, yapısal (intrinsic) ve yapısal olmayan (extrinsic) kusur tipleri olarak ikiye ayrılır. Yapısal kusurlar, herhangi bir atomun olması gereken yerde olmaması sonucu oluşan boşluklar veya herhangi bir atomun olması gereken yerden başka bir yerde olması sonucu yani yanlış dizilim sonucu oluşan kusurlardır. Yapısal olmayan kusurlar ise dışarıdan kristal yapıya gelen katkılar veya yabancı bir atomun kristal yapı içerisine yerleşmesi sonucu oluşan kusurlardır. Bir kristal kusuru eğer elektron veya onun geride bıraktığı boşluk olan deşik yakalama özelliğine sahip ise yük taşıyıcı bir kusur merkezi (tuzak) olarak davranır ve karşıt yükü çeker. Bu tür kusurlar yasak bölgede yarı kararlı enerji seviyelerinin oluşmasına neden olurlar. İyonize radyasyona maruz kalan kristalde radyasyon kaynağı yüzünden soğurulan enerji öncelikle değerlik bandındaki elektronların iyonize olmasına ve ardında deşiklerin oluşmasına ve sonra materyal içindeki tuzaklarda hapsolmesine sebep olur. Daha sonra bu tuzaklar uyarılırsa (ısı ya da ışık ile), tuzaklarda bulunan elektronların değerlik bandına dönerken yeniden birleşme merkezlerinde deşiklerle

birleşmesi sonucu lüminesans olayı gerçekleşir. TL ve OSL yöntemi (Şekil 2.2.1.1)'de gösterilmiştir.



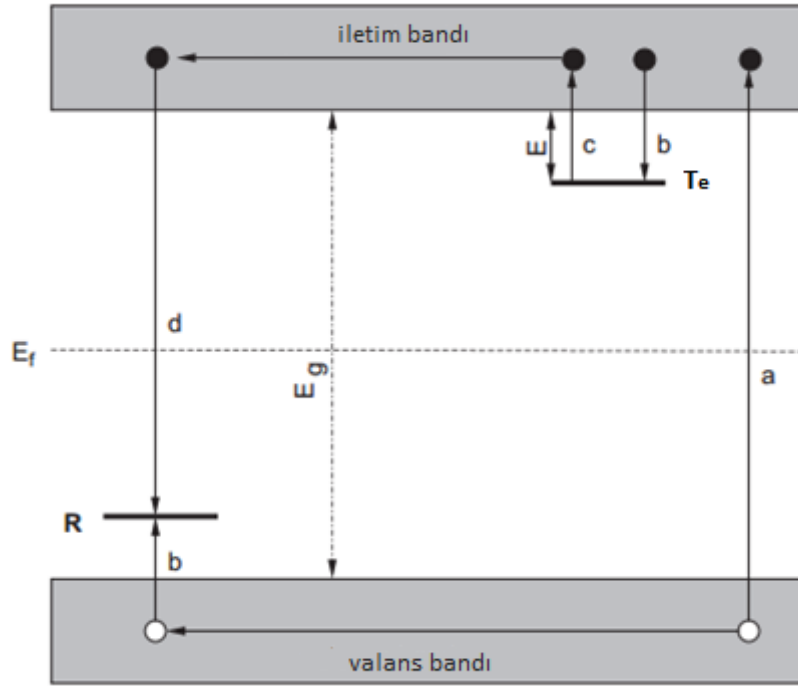
Şekil 2.2.1.1 TL ve OSL yöntemlerinin şematik gösterimi . 1) Elektron ve deşiklerin radyasyona maruz kalmalarıyla, sırayla T_e ve L kusurlarına yükselmeleri. 2) Radyasyon enerjisinin zamanın fonksiyonu olarak depolanması. (Elektronların tuzaklarda kalma süreleri, tuzakların iletim bandına uzaklığına bağlı derinliği E 'ye bağlıdır.) 3) Isı veya ışık yolu ile uyarıldığında, elektronlar tuzaklardan çıkmaya başlarlar ve lüminesans merkezlerine ulaşırlar (L). Bu geçiş sonucunda lüminesans oluşur : (1 kristalin radyasyona maruz kalması ile iyonizasyon (2) radyasyon enerjisinin depolanması (3) ısı ve ışık ile uyarılması

2.3.1 Termolüminesans

Termolüminesans olayı (TL), yarı iletken veya yalıtkanın malzemenin ısıtıldığı zaman ortaya çıkan lüminesans özelliğinin bir olgusudur. TL ışıması bir cismin ısıtıldığı zaman yayılan ışıkla (siyah cisim ışıması) karıştırılmamalıdır. Katı maddeler yüksek sıcaklıklarda (örneğin 200°C ın üzerinde) sıcaklık arttıkça şiddeti artan kızılötesi radyasyonu yayarlar. Bu ışıyı kara cisim ışıması olarak bilir. Fakat TL olayı, bir enerji soğurulması sonrasında maddenin termal olarak uyarılıp ışık yaymasıdır. Termolüminesans malzeme radyasyon enerjisine maruz bırakıldığında o enerjiyi

depolayabilen malzemedir ve ısıtıldığında depolanan enerji görünür ışık olarak açığa çıkar (Bos2007).

Termoluminesans özelliğini anlatabilmek için katılardaki enerji band teorisi kullanılır. TL modelinde en basit olarak iki seviye varsayılır, bunlardan T_e ile gösterilen seviye Fermi seviyesinin üstünde bulunur (radyasyona maruz kalmadan önce denge durumunda boştur), R ile gösterilen ikinci seviye ise değerlik bandının üstünde yer alır. (Şekil 2.3.1.1) T_e , bir elektron tuzağıdır ve Fermi enerji seviyesi (E_f) nin üstünde yer alır. Diğer bölge (R ile gösterilen) bir deşik tuzağıdır ve bir tekrar birleşme merkezi olarak işlev görür. Gelen radyasyon enerjisi $h\nu > E_g$ ise değerlik bandında bulunan elektronlar iyonize olurlar ve bunun sonucunda üretilen elektronlar iletim bandına geçerler. İletim bandından değerlik bandına dönmek isteyen elektronlar yasak bantta bulunan tuzaklarda tuzaklanırlar (Bos 2007).



Şekil 2.3.1.1 TL materyalinde basit iki band modeline göre elektron geçişini gösterir: (a) elektron ve deşiklerin üretimi; (b) elektron ve deşiklerin tuzaklanması; (c) termal uyarma sonucu elektronların serbest kalması; (d) tekrar birleşme; siyah yuvarlaklar elektronları ve beyazlar deşikleri gösterir. T_e seviyesi elektron tuzağı ve R seviyesi tekrar birleşme merkezidir. E_f Fermi enerjisini ve E_g yasak enerji seviyesini gösterir

Birim zamanda tuzaklanan elektronların serbest bırakılma olasılıkları aşağıdaki gibi verilir (Bos 2007):

$$p = s e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2.2)$$

p: Birim zamandaki olasılık

s: Frekans faktörü veya kurtulma faktörü

E: Aktivasyon enerjisi (elektronun bulunduğu tuzaktan çıkıp iletim bandına geçmesi için gerekli olan enerji)

k: Boltzmann sabiti = $8.617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$

T: Mutlak sıcaklık

Eğer tuzak derinliği $E \gg kT_0$ (T_0 , ışınlama zamanındaki sıcaklık) ise tuzaklanan elektronlar uzun süre tuzaklarda kalacaktır. TL materyalinin sıcaklığı arttırılırsa elektronların tuzaklardan çıkıp iletim bandına gelme olasılıkları artar. İletim bandına geçen elektronlar ya yeniden birleşme merkezi (R) ile birleşebilir ya da tekrar tuzaklanabilirler, (Şekil 2.3.1.1). R seviyesine dönüş esnasında bir miktar ışık yayılır, bu durumda yayılan ışığın şiddeti (I_t) aşağıdaki şekilde ifade edilir (Bos 2007).

$$I(t) = \frac{-dm}{dt} \quad (2.3)$$

$I(t)$: Termoluminesans ışığının şiddeti

m: tekrar birleşme merkezinde bulunan deşiklerin konsantrasyonu

Burada eksi işareti deşiklerin sayısının azaldığını gösterir. Eğer her tekrar birleşme bir foton ürettiğini ve çıkan her fotonu dedekte edebileceği varsayılırsa $I(t)$ aşağıdaki gibi yazılabilir (Bos 2007).

$$I(t) = \frac{-dm}{dt} = n_c m A_m \quad (2.4)$$

Burada,

n_c : İletim bandındaki elektronların konsantrasyonu

m: Deşiklerin konsantrasyonu

A_m : Birim saniyedeki tekrar birleşme olasılığı (sıcaklıktan bağımsızdır)

Tuzaklanmış olan elektronların konsantrasyonunun değişimi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

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

Burada N elektron tuzaklarının konsantrasyonu ve A_n tuzaklanma olasılığıdır (m^3/s). Benzer olarak iletim bandındaki elektronların konsantrasyonunun değişimi ise aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dn_c}{dt} = np - n_c(N - n)A_n - n_c mA_m \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.5-2.6 tek elektron tuzağı ve tek tekrar birleşme tuzağının varlığı durumunda yük alışverişi yoğunluğunu tanımlar. Bu denklemler TL olayının temel denklemlerini oluşturur ve bu denklem sisteminin analitik bir çözümü yoktur. Analitik bir ifade geliştirmek için bazı varsayımlar gerekir. Bu varsayımlar:

$$\left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dn}{dt} \right|; \quad \left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dm}{dt} \right| \quad (2.7)$$

Bu varsayım Chen ve McKeever (1997) tarafından yaklaşım yarı denge yaklaşımı olarak adlandırılır. Radyasyona maruz kalındığı zaman tuzaklanan elektronlar ve deşikler çift halinde üretilirler. Yüklerin nötralliğinden:

$$n_c + n = m \quad (2.8)$$

Burada $n_c \approx 0$ olduğu zaman $n \approx m$ olur.

$$I(t) = -\frac{dm}{dt} \approx -\frac{dn}{dt} \quad (2.9)$$

$\frac{dn_c}{dt} \approx 0$ olduğunu varsayarsak denk (2.5) ve (2.6)'i kullanarak:

$$I(t) = \frac{mA_m n_s \exp\left\{\frac{-E}{kT}\right\}}{(N-n)A_n + mA_m} \quad (2.10)$$

2.3 Birinci, İkinci ve Genel Mertebeden TL Kinetiği

Tekrar tuzaklanma olasılığı göz ardı edildiği zaman, tekrar birleşme işlemi hızlı olur ve ışımaya eğrisi geniş bir pik olarak ortaya çıkar. Bu model Randall ve Wilkins tarafından 1945 yılında açıklanmıştır. Yeniden tuzaklanabilme olasılığı da göz önünde bulundurulursa ikinci mertebeden kinetik elde edilir ve bu Garlick ve Gibson tarafından 1948 yılında açıklanmıştır. Bu iki açıklama sırasıyla birinci ve ikinci dereceden kinetikler olarak adlandırılırlar. Birinci ve ikinci mertebeden kinetiklerin özel bir analitik tekrarı genel mertebeden kinetik adlandırılıp May ve Partridge tarafından 1964 yılında açıklanmıştır (Shah Alam ve Bauk 2010).

2.3.1 Birinci mertebeden TL kinetiği

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 varsayımlar altında TL şiddeti olan $I(t)$ eşitlik 2.11'da açıklanır (Shah Alam ve Bauk 2010).

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = sn \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (2.11)$$

olarak yazılabilir. Buradan (cm^{-3}) , $t(\text{s})$ zamanında tuzaklardaki elektron konsantrasyonu, $s(\text{s}^{-1})$ elektronların tuzaklardan kurtulma olasılığına bağlı frekans faktörü, $T(\text{K})$ mutlak sıcaklık, E aktivasyon enerjisi ve k (eVK^{-1}) Boltzmann sabitini gösterir.

Isıtma hızı lineer olacak şekilde ele alınırsa ($\beta = dT/dt$ (Ks^{-1})), aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{dn}{n} = - \left(\frac{s}{\beta} \right) \exp \left(\frac{-E}{kT} \right) dt \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.12'nin integrali alındığında aşağıdaki denklem elde edilir.

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

Bu durumda sıcaklığa bağlı değişen TL şiddeti aşağıdaki gibi verilir.

$$I(t) = n_0 s \exp \left(\frac{-E}{kT} \right) \exp \left[- \frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp \left(\frac{-E}{kT'} \right) dT' \right] \quad (2.14)$$

2.3.2 İkinci mertebeden kinetik

Garlick ve Gibson teorisi elektronların tekrar tuzaklanmasında göz önünde bulundurulur ve ikinci dereceden kinetik olarak adlandırılır. Bu modele göre TL şiddeti Eşitlik 2.15 gibi yazılır (Shah Alam ve Bauk 2010):

$$I(t) = - \frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{N} s \exp \left(- \frac{E}{kT} \right) \quad (2.15)$$

burada $N \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ tuzak konsantrasyonudur. Isıtma hızı lineer olacak şekilde ele alındığı durumda ($\beta = dT/dt \text{ (Ks}^{-1}\text{)}$) sıcaklığa bağlı değişen TL şiddeti ikinci mertebeden kinetiğe göre aşağıdaki gibi verilir:

$$I(t) = \frac{n_0^2 s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)}{N \left[1 + \left(\frac{n_0 s}{N\beta}\right) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{KT'}\right) dT'\right]^2} \quad (2.16)$$

2.3.3 Genel mertebeden kinetik

TL ışıma eğrisini ifade etmek için May ve Partridge tarafından bir ampirik ifade tanımlanmıştır. Bu ifade genel mertebeden kinetik olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi yazılır (Shah Alam ve Bauk 2010):

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (2.17)$$

Burada b kinetik mertebedir ve değeri genelde 1 ve 2 arasındadır fakat bazı durumlarda bu değeri aşabilir. Isıtma hızı lineer olacak şekilde ele alındığı durumda ($\beta = dT/dt$ (Ks^{-1})) sıcaklığa bağlı değişen TL şiddeti genel mertebeden kinetiğe göre aşağıdaki gibi verilir:

$$I(T) = \frac{n_0 s'' \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)}{\left[1 + \left\{\frac{(b-1)s''}{\beta}\right\} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{KT'}\right) dT'\right]^{\frac{b}{b-1}}} \quad (2.18)$$

Burada, $s'' = s \left(\frac{n_0}{N}\right)^{b-1}$ ve n_0 (m^{-3}), $t=0$ olduğunda tuzaklanan elektronların sayısını gösterir.

2.4 Kinetik Parametrelerin Analiz Yöntemleri

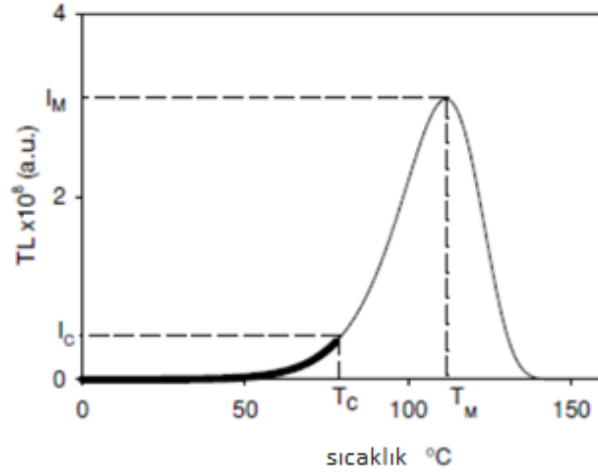
Termoluminesans ışıma eğrisi birden fazla pikten oluşur ve yasak bantta bulunan tuzakların karakteristiğini gösterir. Tuzaklar tuzak derinliği (E) ve frekans faktörü (s) gibi belli fiziksel parametrelerle sınıflandırılırlar. Burada tuzak derinliği, elektronun tuzaktan çıkıp iletim bandına geçmesi için gereken enerjidir ve frekans faktörü elektronların tuzaklardan kaçış faktörüdür. TL materyalinin tuzak parametrelerini belirlemek için çeşitli yöntemler vardır, bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a) Başlangıçtaki artış yöntemi
- b) Farklı Isıtma Hızlarına Dayanan Yöntem
- c) Tepe Şekli Yöntemi
- d) İzotermal Azalım Yöntemi
- e) CGCD Yöntemi

2.4.1 Başlangıç artış yöntemi

Bu yöntem düşük sıcaklıklarda ışıma eğrisinin analizine dayanmaktadır. Başlangıçtaki artış yöntemi ilk defa Garlick ve Gibson tarafından önerilmiştir. Düşük sıcaklıklarda ve TL ışıma eğrisinin kuyruk kısmında tuzaklanan elektronların miktarı yaklaşık olarak sabittir. Bu bölgede $n(T)$ nin sıcaklığa bağımlılığı göz ardı edilebilir. Sıcaklık arttıkça Eşitlik 2.14'ün ilk kısmındaki eksponansiyel de artar oysaki ikinci kısım sabit kalır. Bu durum kesim sıcaklığı yani T_c ye kadar geçerlidir, bu da maksimum TL şiddetinin (I_M) %15'inden daha küçük bir TL şiddetine (I_C) denk gelir. Sıcaklıktaki daha fazla artış ($T > T_c$) Eşitlik 2.14'teki ikinci kısmını düşürür. Burada, $n(T)$ 'nin sabit olduğu varsayılırsa termoluminesans yayımı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$I(T) \propto \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (2.19)$$



Şekil 2.4.1. 1 Başlangıç artış yöntemi

Başlangıçtaki artış yöntemi kullandığımızda $\ln(I)$ grafiği düz bir çizgi olarak elde edilir. Bu çizginin eğimi $-E$ 'yi verir ve aktivasyon enerjisi frekans faktörü bilgisi olmadan da değerlendirilir (Şekil 2.4.1.1).

2.4.2 Farklı ısıtma hızları yöntemi

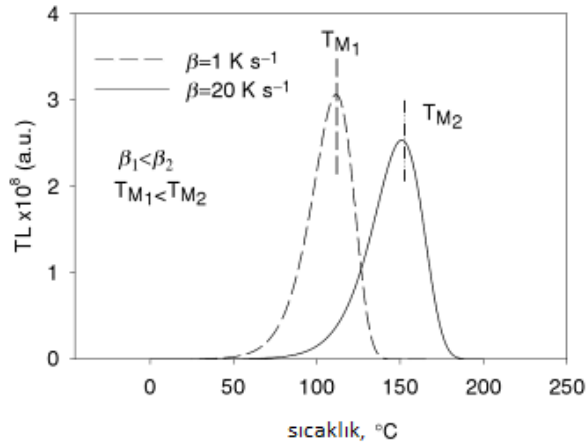
Aktivasyon enerjisinin hesaplanmasında kullanılan önemli yöntemlerden biri farklı ısıtma hızları yöntemidir. Bu yöntemde tuzak derinliklerini belirlemek için aynı örneğin iki farklı ısıtma hızında (β) okunmuş iki ışımaya eğrisi incelenir. Isıtma hızının artmasıyla maksimum şiddete sahip olan pikin tepe noktası yüksek sıcaklıklara doğru kayar ve TL şiddetinde bir azalış olur. TL şiddetindeki bu azalış ısısal sönümden kaynaklanır. Aşağıdaki eşitlik (2.20) ısıtma hızı β , aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) E , frekans faktörü s ve maksimum şiddete karşılık gelen sıcaklık T_m arasındaki bağıntıyı vermektedir (Nur 2010).

$$\frac{\beta E}{KT_m} = s \exp\left(-\frac{E}{KT_m}\right) \quad (2.20)$$

Eğer bir örnek β_1 ve β_2 gibi iki farklı ısıtma hızları ile ısıtılırsa E'nin hesaplanabilmesi için aşağıdaki basitleştirilmiş eşitlik elde edilebilir.

$$E = K \frac{T_{m1} T_{m2}}{T_{m1} - T_{m2}} \ln \left[\left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \left(\frac{T_{m2}}{T_{m1}} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

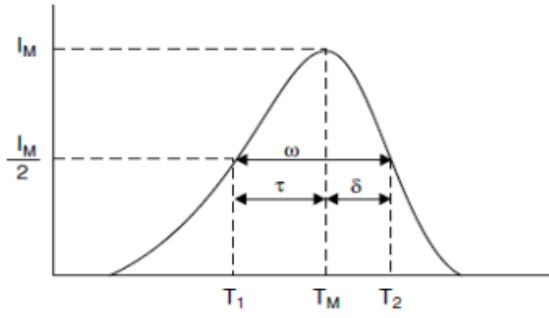
T_{m1} ve T_{m2} , β_1 ve β_2 ısıtma hızlarına ait ışıma eğrilerindeki tepe sıcaklıklarıdır. Aktivasyon enerjisi E, Eşitlik 2.20'de yerine yazılarak frekans faktörü hesaplanır.



Şekil 2.4.2. 1 Farklı ısıtma hızları yöntemi ile elde edilen ışıma eğrileri

2.4.3 Pik şekli yöntemi

Kinetik parametrelerinin belirlenmesinde en doğru sonucu veren yöntem pik şekli yöntemidir. Bu yöntem Chen (1969) yöntemi olarak da adlandırılır. Bu yöntemde T_m , T_1 ve T_2 değerleri kullanılır, burada T_m pikin tepe noktasındaki sıcaklık değeri, T_1 ve T_2 sırayla pikin yükselen ve inen kısmındaki şiddeti yarıya bölen noktadaki sıcaklık değerleridir. Bu yöntemde E'nin hesaplanmasında tanımlanması gereken bazı parametreler vardır: şiddetin yarı değerindeki genişlik $\omega = T_2 - T_1$, yüksek sıcaklık tarafındaki yarı genişlik değeri $\delta = T_2 - T_m$, düşük sıcaklık tarafındaki yarı genişlik değeri $\tau = T_m - T_1$ (Jose, vd. 2011).



Şekil 2.4.3. 1 TL ışıma eğrisinde geometrik şeklin parametreleri (τ , δ , ω)

TL ışıma eğrisinin kinetik mertebeye (b) değeri tepenin şeklinden tahmin edilebilir. Bunun için simetri faktörü (μ_g)'nin hesaplanması gerekir. μ_g aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$\mu_g = \frac{\delta}{\omega} = \frac{T_2 - T_m}{T_2 - T_1} \quad (2.22)$$

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. Birinci ve ikinci mertebeden kinetik için μ_g değerleri sırayla 0.42 ve 0.52'dir (Jose, vd. 2011).

Kinetik mertebesinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer parametre Balarin (1975) tarafından önerilmiştir.

$$\gamma = \frac{\delta}{\tau} = \frac{T_2 - T_m}{T_m - T_1} \quad (2.23)$$

Balarin parametresi (γ) birinci mertebeden kinetik için 0.7 ve 0.8 arasında ve ikinci mertebeden kinetik için 1.05 ve 1.20 arasındadır (Balarin 1975).

Aktivasyon enerjisi Chen (1984) tarafından belirlenen genel bir ifadeyle verilir:

$$E = C_\alpha \frac{KT_m^2}{\alpha} b_\alpha 2KT_m \quad (2.24)$$

C_α ve b_α aşağıdaki ifadelerden δ , ω ve τ için elde edilir.

$$C_\tau = 1.51 + 3.0 (\mu_g - 0.42), \quad b_\tau = 1.58 + 4.2 (\mu_g - 0.42)$$

$$C_\delta = 0.976 + 7.3 (\mu_g - 0.42), \quad b_\delta = 0$$

$$C_\omega = 2.52 + 10.2 (\mu_g - 0.42), \quad b_\omega = 1$$

Burada E_τ , E_δ ve E_ω sırayla τ , δ ve ω için elde edilen aktivasyon enerjileridir. Tepenin ortalama enerjisi E_τ , E_δ ve E_ω değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Pik Şekli Yöntemiyle aktivasyon enerjisi ve kinetik merteye değeri hesaplanırsa frekans faktörü s 'nin değeri hesaplanabilir.

$$s = \frac{\beta E}{KT_m^2} \left[\exp\left(-\frac{E}{KT_m}\right) \left(1 + (b-1) \frac{2KT_m}{E}\right) \right]^{\frac{b}{b-1}} \quad (2.25)$$

bu denklemde tepe şekli yöntemi ile bulunan E ve b değerleri yerine konulduğu zaman frekans faktörü bulunur.

2.4.4 İzotermal sönüm yöntemi

Tuzak parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan bir başka yöntem izotermal sönüm yöntemidir. Bu yöntemde TL okuma sırasında sıcaklık bir noktada sabit tutulur ve ışık yayılımı zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilir. Bu yöntem kullanılarak TL şiddeti ve tuzakların azalım hızını ölçmek mümkündür.

$$I = I_0 \exp\left[-s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) t\right] \quad (2.26)$$

I_0 , $t=0$ zamanındaki başlangıç şiddetidir.

Yukarıdaki denklem kullanılarak TL şiddetine (I) - zaman (t) grafiği çizilir.

Grafiğin eğimi (m_i) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$m_i = -s \exp\left(-\frac{E}{kT_i}\right) \quad (2.27)$$

Farklı sıcaklıklar (T_i) için elde edilen eğim (m_i) değerleri kullanılarak çizilen $\ln(m_i)$ - $1/kT$ grafiğinde ise eğim $-E$ 'ye eşittir (Eşitlik 2.25). Elde edilen aktivasyon enerjisi (E) Eşitlik 2.17'de yerine koyularak frekans faktörü hesaplanır.

2.4.5 Ayırıştırma yöntemi

Bu yöntem 1980 yılından beri karmaşık ışıma eğrilerini oluşturan piklere ayırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Tuzak parametrelerini belirlemek için kullanılan önemli yöntemlerden biri ayırıştırma (Termolüminesans ışıma eğrilerinin bilgisayarda modellenmesi) yöntemidir. Ayırıştırma yöntemine kullanılarak aktivasyon enerjisi (tuzak derinliği) E , frekans faktörü s , kinetik mertebeye b vd. belirlenir. Yarıiletken veya yalıtkan malzemelere ait ışıma eğrileri birden fazla pikten oluşmaktadır. Işıma eğrisinde gözlenen bu pikler materyalin çeşitli enerjiye sahip tuzaklardan dolayı ortaya çıkar. Bu yöntem TL ışıma eğrilerine ait piklerin ayırıştırılmasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemin diğer yöntemlere olan avantajı, ön ısıtmaya ihtiyaç duymadan üst üste binmiş pikleri ayırıştırmasıdır. Bu yöntem için CIEMAT, IRI, TL/OSL Glow Curve Analyser gibi çeşitli bilgisayar programları kullanılır (Barış 2013).

Bu çalışmada ışıma eğrisinde bulunan pikleri ayırştırmak için GOK ayırıştırma programı kullanıldı. Bu programda Eşitlik 2.28'de verilen denklem Microsoft Excel üzerinde yazılmıştır (Afouxenidis 2011). Programı kullanmak için gerçekte elde ettiğimiz ışıma eğrisi ile programda bulunan ışıma eğrisini üst üste uydurmamız gerekiyor. Bunun için her pike ait I_m , T_m , E ve b değerleri ile rastgele oynanmalıdır. İki ışıma eğrisi üst üste uydurulduktan sonra I_m , T_m , E ve b için net değerler elde edilir.

LiF:Mg,Ti materyalinin ışıma eğrisindeki dördüncü pike ana pik diye adlandırılır ve doz hesaplarında genellikle bu pik kullanılır (Revol 1999). Ancak her zaman daha düşük sıcaklıkta ortaya çıkan bir pik ana pikin içerisinde bir omuz olarak ortaya çıkar. Bu iki pikin kısmen üst üste binmiş olduğu için üçüncü piki ön ısıtma kullanarak dördüncü pikten ayırmamız mümkün değildir. İki pikin (3+4) integrali alınıp incelendiği zaman istenmeyen sonuçlar elde edebiliriz. Yukarıdaki sorunları dikkate alarak, bir ışıma eğrisi ayrıştırıcı programı elde edilmiştir.

ışıma eğrisinin şiddeti aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir (Afouxenidis 2011).

$$I(T) = I_m \cdot b^{b/b-1} \exp\left\{\frac{E}{kT} \times \frac{T-T_m}{T_m}\right\} \times [(b-1) \cdot (1-\Delta) \cdot \frac{T^2}{T_m^2} \times \exp\left(\frac{E}{kT} \times \frac{T-T_m}{T_m}\right) + Z_m]^{-b/b-1} \quad (2.28)$$

Burada $\Delta = 2 kT/E$, $\Delta_m = 2 kT_m/E$, $Z_m = 1 + (b-1) \cdot \Delta_m$, I pikin şiddeti, E (eV) aktivasyon enerjisi, k (eV/K) boltzmann sabiti, T (K) mutlak sıcaklık değeri, I_m maksimum şiddet ve T_m maksimum sıcaklığı gösterir.

Bu yöntemde bilinmesi gereken diğer matematiksel değer FOM değeridir ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$FOM (\%) = 100 \times \frac{\sum_p |TL_{exp} - TL_{fit}|}{\sum_p TL_{fit}} \quad (2.29)$$

FOM değeri iki ışıma eğrisinin ne kadar iyi uyduğunu gösteren bir değerdir. FOM değeri ne kadar düşük olursa uyumun o kadar iyi olduğu anlamına gelir. Bu değeri düşürmek için I_m , T_m , E ve b değerlerinin değiştirilmesi gerekir (Afouxenidis 2011).

2.5 Doz Cevabı

Dozimetrik malzemelerin özelliğini belirleyen parametrelerden biri doz-cevap eğrisidir. İyi bir dozimetre farklı dozlara aynı hassasiyette cevap vermelidir. Doğrusal bir doz-cevap eğrisi kolay bir kalibrasyon sağlar. Doz-cevap fonksiyonu aşağıdaki gibi verilir:

$$f(D) = \frac{(Q(D)/D)}{(Q(D_1)/D_1)} \quad (2.29)$$

burada $Q(D)$ dozun (D) fonksiyonu olarak ölçülen TL şiddetidir ve $Q(D_1)$ TL'in düşük dozda (D_1) ölçülen TL şiddetidir. İdeal bir TL dozimetre $f(D)=1$ kriterini sağlamalıdır, ancak bir çok dozimetrede $f(D)=1$ şartı sadece dar bir aralıkta geçerlidir (Bauk., vd, 2011). Doz- cevap eğrisinin davranışı $f(D)>1$ olduğu durumda supralineer ve $f(D)>1$ olduğu durumda supralineerdir. İdeal bir dozimetrik malzeme lineer doz-cevap eğriye ve geniş bir doz-cevap aralığına sahip olmalıdır. Fiziksel, kimyasal ve hatta statik elektrik gibi dış etkenler bile düşük doz okumalarına etki edebilir. Bu bahsedilen faktörlerin hepsi düşük dozlarda alınan ölçümlerde TL dozimetrelerin hassasiyetinin düşmesine sebep olur.

2.6 Fırınlama

Bütün TL dozimetreler, sıcaklığa bağlı olarak TL özelliklerinde bazı değişiklikler gösterirler. Fırınlama (Tavlama) sıcaklığı TL ışımaya eğrisinin şekli ve şiddetini büyük ölçüde etkiler. Bu işlem maddenin tuzaklarında depolanan elektronları boşaltır ve dozimetreyi tekrar kullanılabilir hale getirir. Bütün tuzakları boşaltmak, radyasyona karşı duyarlılıklarını arttırmak ve tekrar kullanılabilirliklerini sağlamak amacıyla TLD'lerin fırınlanması önemlidir. TLD fırınlandığı zaman elektronlar yüksek enerjili tuzaklardan çıkıp valans bandına geçerler. Bütün tuzakların boşaltılması ve elektronların tuzaklardan çıkacak kadar enerji kazanması için fırınlama sıcaklığı derin tuzakların enerjisinden yüksek olmalı. TLD'ler, ışınlanmadan önce ve ışınlanmadan sonra iki kere tavlanylabilir (McKeever 1985). Doz ölçümlerinde, TLD ışınlandıktan sonra okuma işlemi yapılmadan düşük sıcaklık piklerini ortadan kaldırmak için, ışınlanmadan önce ise

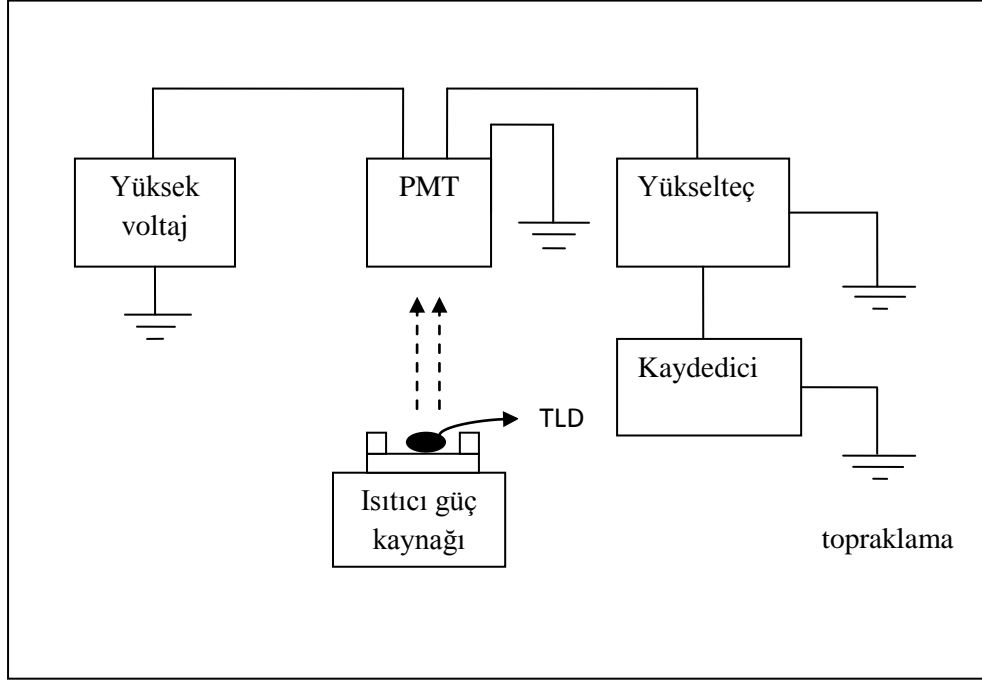
radasyona karşı duyarlılığını artırmak ve artık TL sinyallerini ortadan kaldırmak için fırınlanırlar.

LİF materyalinin ilk kez veya tekrar kullanmadan önce en uygun fırınlama sıcaklığın 400°C’de 1 saat, 80°C’de 16 saat (McKeever 1985) veya 400°C’de 1 saat, 100 C’de 2 saat (Revol 1999) olduğu tespit edilmiştir.

2.7 TLD Okuyucu Sistemler

TLD okuyucu sistemler, ışınlanmış TLD örneklerinin ısıtılması ve yasak bandında tuzaklanmış elektronların tuzaklardan çıkararak yaydığı termolüminesans ışığın ölçülmesi şeklinde çalışır. Bir TLD sisteminde olması gereken temel parçalar ısıtıcı, fotoçoğaltıcı tüp (PMT) ve elektrometredir (şekil 2.7.1). ışınlanmış TLD örneği tepsiye yerleştirilir ve ısıtılması için yüksek voltaj kullanılır. Örneğ ısıtıldıktan sonra çıkan TL ışıkları,

frekanslarının görünür ışık bölgesinde olması için bir filtreye odaklanır. Filtreden geçen ışıklar fotoçoğaltıcı tüpte (PMT) fotokatoda çarparak enerjilerini fotokatoda verir (Fotokatod, üzerine ışık düştüğünde elektron salan ışığa duyarlı bir madde ile kaplıdır) ve elektrona dönüşür. Oluşan elektronların sayısı az olduğundan bu pulsun elektronik devrede kullanılması mümkün değildir. Bu nedenle tüpün içinde dynot olarak isimlendirilen kısımlar vardır. Dynotlara pozitif gerilim uygulanır ve fotokatoddan yayınlanan elektronlar fotokatodda muhafaza edilen pozitif gerilim alanına doğru hızlandırılır. Yeterli hıza ulaşan elektronlar dynotların yüzeyinden elektron koparıp çoğalır ve bir elektrik sinyali elde edilir. Oluşan akım sayıldıktan sonra kaydedici tarafından kaydedilir (Khan 1994). Böylelikle sıcaklığa bağlı olarak kaydedilen verilerden TL ışıma eğrisi elde edilir.

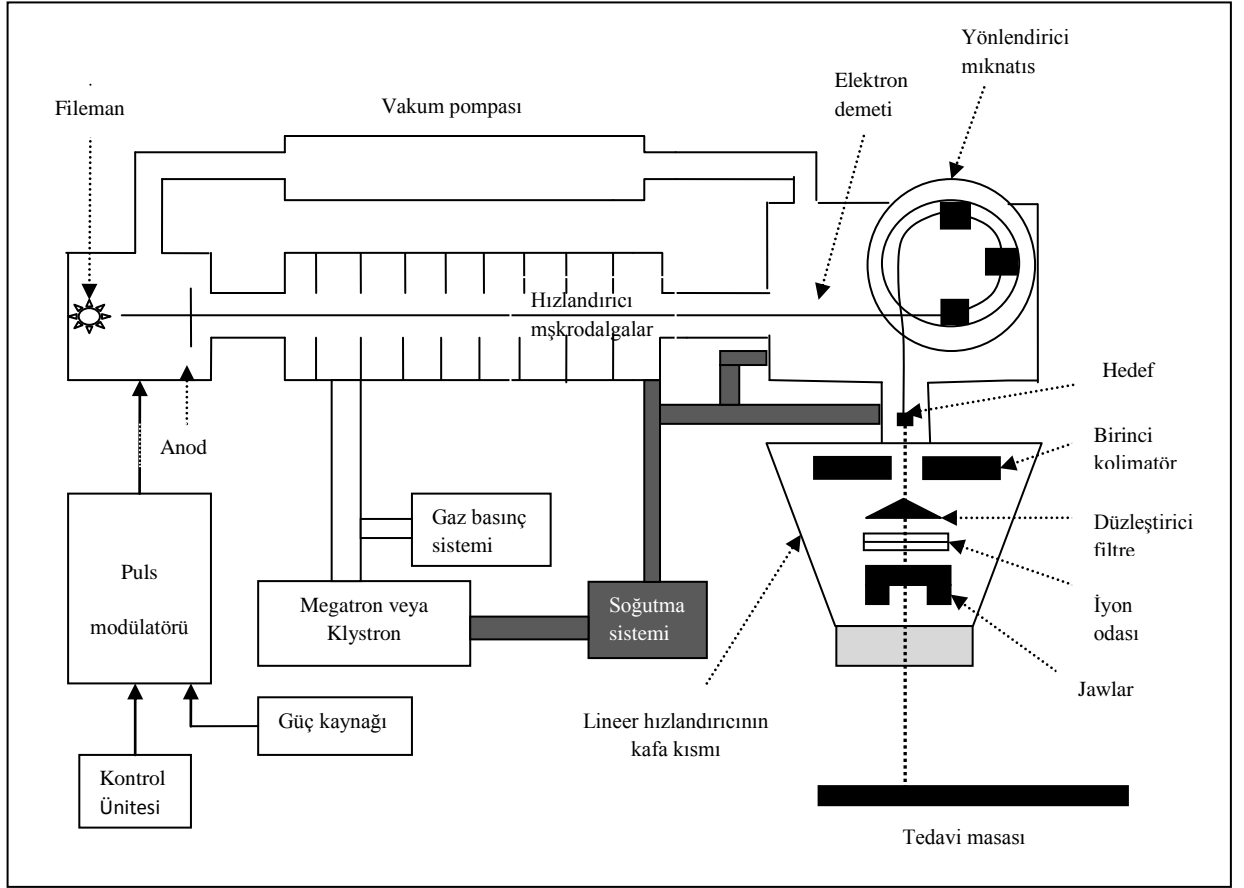


Şekil 2.7. 1 TLD okuyucu sisteminin basit şeması

2.8 Lineer Hızlandırıcı

Yüksek enerjili X-ışını ve elektronları üreten ve kanserli hücrelerin tedavisi için kullanılan bilgisayar kontrollü cihazlardır. Lineer hızlandırıcılar röntgen tüplerinin çalışma prensipi ile çalışırlar, ancak normal X-ışını tüplerinde elektronlar 400 KV'un altında hızlandırılırlar. Lineer hızlandırıcılarda anot ile katot arasındaki mesafe daha uzundur. Katottan fırlatılan ve Mega voltaj mertebesinde olan elektronun hızı mikrodalgalar sayesinde ışık hızına yakındır (Çakır ve Bilge 2012).

Modern bir medikal lineer hızlandırıcının şematik görünümü, Şekil 2.8.1'de verilmiştir.



Şekil 2.8. 1 Lineer hızlandırıcıların şematik görünümü

2.8.1 Lineer hızlandırıcıların çalışma prensibi

Lineer hızlandırıcıların çalışma prensipleri basitçe şöyledir: Güç kaynağı, merkezinde katot, çevresinde anot bulunan silindirik yapı, impuls oluşturan şebeke ağı ve hidrojen thyratron lambalarını içeren modülatöre doğru akım verir. Elektrik akımı modülatörde depolanır ve bir kontrol sistemi, bu akımla belli aralıklarla titreşim oluşturur (mikrodalga). Modülatörden çıkan yüksek voltajlı atımlar magnetron veya klystron tüplerine ve aynı zamanda elektron tabancasına iletilir. Magnetron, elektromanyetik mikro dalgalar üreten, klystron ise elektromanyetik dalgayı güçlendiren düzeneklerdir.

MeV mertebesinde daha büyük enerjili elektronlar elde etmek için klystron kullanılır. Hızlandırıcı silindirik tüpten oluşmuş yaklaşık 10 cm çapındadır. $\frac{1}{4}$ dalga boyu aralıklarla metalik disk veya diyaframdan oluşan seri bakır odacıklardan ibarettir.

Elektron tabancasından elde edilen elektronlar 50 keV'lik enerji ile (ışık hızının beşte ikisi kadar) hızlandırıcı bakır tütününe gönderilir. Magnetron veya klystrondan çıkan elektromanyetik dalgalar hızlandırıcı tüpe gelir. Böylece, yaklaşık 10 cm çaplı odacıklarda 3000 MHz frekansında titreşimler oluşturulur. Odacıkta oluşan bu yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar, odacığın ortasındaki kanala iletilir. Bu arada elektron tabancasından elde edilen elektronlar, 50 keV ile hızlandırıcı bakır tüpe girer, elektromanyetik dalgalara bindirilir ve odacıktan odacığa bu kanal boyunca doğrusal olarak hızlanarak ilerler. Bir elektrodun (odacık) içine girmekte olan bir parçacık, AC geriliminin periyodunun yarısına eşit bir zaman için, alan olmayan bir bölgeye sürüklenir. Bu yolla gerilim kutuplanması, parçacığın sürüklenme tüpü içinde geçirdiği süre için de tersine çevrilir ve daha sonra parçacık, bir sonraki boşluğu geçerken hızlandırılır. Son odacıktan çıktığında elektronların hızları her odacıkta aldıkları hızların toplamına eşit olur. Bu işleme lineer hızlandırma denir.

Yüksek enerjiler ve yüksek akımlar için bir ilerleyen dalga kullanmak daha verimlidir. Bu ilerleyen dalganın tepe noktasında, parçacıkların hızlandırıcının boyunu, sanki bir sörf tahtası ile okyanus dalgasının tepesinde gezinirmiş gibi kat ettiklerini hayal edebiliriz. Dirençsel kayıplar yüksek olduğundan, bu ilerleyen dalgayı sürdürmek için, hızlandırıcı boyunca düzenli aralıklarla güç verilmelidir. Bu nedenden ötürü hızlandırıcılar, sürekli bir demet yerine pulslu bir modla çalıştırılırlar. Pulslu moda güç, sadece zamanın küçük bir kesri içinde sağlanmalıdır.

Lineer hızlandırma odalarına iletilen titreşimlerin hepsinin aynı frekansta olmasını sağlamak, frekans düzenleyicisi ve lineer hızlandırıcı tütününde oluşabilecek iyonları tutarak daha önce oluşturulan vakumu sağlamak için vakum pompası kullanılır. Elektronları bir demet halinde toplamak ve bu halde hedefe göndermek için manyetik odaklayıcılar kullanılır. Yüksek enerjili elektronlar, hızlandırıcının çıkış penceresinden, en yüksek enerjilerini kazanarak, 3mm çapında ince demet olarak çıkarlar. Enerjileri yaklaşık 5 MV/metre'dir. Daha yüksek enerjili ışınlar elde etmek için, bu demet, tüp ile hedef arasındaki yönlendirici mıknatıs ile %9 veya %27 sapıtılarak elektron demetinin çıkacağı kafa kısmına yönlendirilir. Buradan da hedefe (target) veya yapının dışına verilir.

Yüksek enerjili fotonlar ancak yüksek enerjili elektronların atomik ortamda ivmeli hareketleri sonucu elde edilebilir, üretilen radyasyon bremsstrahlung X-ışını olarak bilinir. Elektron bir çekirdeğe doğru yaklaştığında coulomb kuvvetinin etkisiyle ivmeli hareket yaparak (yavaşlar) saçılır ve gelen ve saçılan elektronun enerji farkı kadar enerjiye sahip foton elde edilir ($E_{\gamma} = E_e - E_{saçılan}$) (Kaplan ve Akkurt 2006). İkinci tür x-ışını oluşumu ise hedefe çarpan hızlı elektronların anod maddesinin yörünge elektronları ile etkileşmesi sonucu oluşan karakteristik x-ışınlarıdır.

Elektron demetleri enerjilerine göre yüzeysel, orta ve derin tedavide kullanılırken, X-ışını demetleri ise derine yerleşmiş tümörlerin tedavisinde kullanılmaktadır. Lineer hızlandırıcılarda çıkan ışınların odak noktası çok küçüktür (2-3mm). Bu nedenle radyasyon demetinin sınırları keskindir.

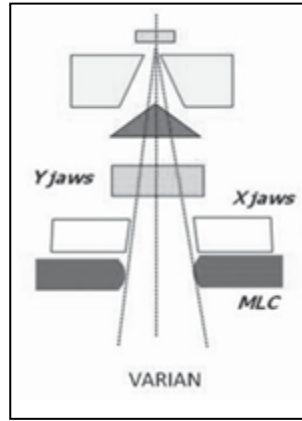
Elektronlar, tungsten gibi yüksek atomik sayılı bir metalden oluşmuş hedef çarptırılarak frenleme X-ışını elde edilir. Bu fotonun yayılım yönü gelen elektronun enerjisine bağlıdır. Gelen elektronun kinetik enerjisi 100 keV'den az ise, X-ışının yayılımı tüm doğrultularda az veya çok eşittir. Elektronun enerjisi arttıkça, ileri doğrultuda X-ışını yayılımı artar. MV mertebesindeki X-ışını tüplerinde kullanılan geçirgen tip yüksek atom numaralı hedeflerin bir yüzüne elektronlar gelirken, diğer yüzünde X-ışınları oluşur. Gelen elektronun soğurulması için hedef yeterli kalınlıkta olmalıdır. Lineer hızlandırıcılarda X-ışınları demeti heterojen dağılıma sahiptir (Çakır ve Bilge 2012).

2.8.2 Kolimatör

Bir lineer hızlandırıcının kafa kısmı şu bölümlerden oluşur:

- X-ışın üretimi halinde, elektron demetinin çarptırıldığı tungsten hedef; bütün elektronlar hedefte durdurularak frenlenme X ışınlarını oluştururlar.
- Işın demetinin çapını tayin eden dairesel ilk kolimatör.

- X-ışınlarını homojen hale getiren koni şeklindeki filtre.
- Elektron demetini homojen hale getiren (elektron ışınlaması halinde, yani tungsten hedefin kullanılmadığı durumlarda devreye girer)manyetik alan oluşturan difüzör veya “elektron süpürgesi”; bu, elektronların homojen şekilde dağılmasını sağlar.
- Verilen dozun iki ayrı iyon odasında ölçülerek ışın demetinin şiddetini ve simetrik olup olmadığını kontrolünü sağlamak için iki ayrı iyonizasyon odası.
- Tedavi sahalarının tayini için hareketli çenelerden yapılmış olan ikincil kolimatör bulunmaktadır.



Şekil 2.8.2.1 Varian marka lineer hızlandırıcıya ait kolimatör yapısı

Lineer hızlandırıcılar, radyasyon kaynağının yatay eksen üzerinde döndürebilecek şekilde tasarlanır. Gantry yatay bir eksen etrafında dönerken kolimatörde alanın merkezinden geçen dik eksen etrafında döner. Gantry'nin dönme eksenini ile kolimatörün dönme eksenlerinin kesiştiği noktaya izomerkez (isocenter) denir.

Lineer hızlandırıcıda hedef malzemesi suyla soğutulur. X-ışınlarının en yüksek enerjisi gelen elektronun enerjisine eşittir. Elektron modunda, kalem genişliğindeki elektron ışını, tedavi alanı boyunca aynı (uniform) elektron akısı sağlamak için saçıcı tabaka (scatteringfoil) düzenleyici filtre ile genişletilir. Saçıcı tabaka ince bir metalden yapılmıştır ve genelde bu metal kurşundur. Bu tabaka kalınlığı önemlidir. Saçılma sırasında frenlenme ışınları çıkar. Elektron demetinde bu ışınlardan kaynaklanan X-ışını bulaşıklığı %5'den azdır. Bulaşmayı azaltmak amacıyla tabaka yeterince ince olmalıdır.

Yine bu moda elektronların hava da saçılmasından dolayı ikinci kez bir kolimasyona gereksinim duyulur. X-ışını modunda yüksek enerjili elektronlar sırası ile önce hedefe, saçıcı tabakaya, düzeltici filtreye (flattening filter) iyon odalarına, gerektiğinde wedge filtreden (Doz dağılımlarını değiştirmek ve daha homojen hale getirmek için kullanılan filtreler) ve hareketli kollimatör sisteminden geçerler.

Gantry, kurşun tungsten veya kurşun tungsten alaşımı olan yüksek yoğunluklu koruyucu materyal içerir. Radyasyon sızıntısına karşı yeterli derecede kalkan görevi görür. X-ışınları hedefi, saçıcı foil, düzleştirici filtre, iyon odası, sabit ve hareketli kolimatör ve ışık sistemini kapsar. Elektronların hedefe çarpması sonucu bir kısım enerjileri X-ışınına dönüşürken geri kalanı ısı olarak açığa çıkar. Demeti homojen hale getiren düzenleyici filtre; kurşun, tungsten, uranyum, çelik, alüminyum veya bunların birleşiminden oluşur. Hareketli kolimatör kurşun veya tungstenden yapılmış olup kaynaktan 100 cm uzaklıkta 40 x 40cm² kadar (simetrik ve asimetrik) açılarak tedavi alanını belirler. Işık lokalize sistemi ışık kaynağı tedavi alanının boyutunu saptamak için kullanılır. Işık alanı ile radyasyonun hedef alanı birbiri üzerine düşürülür. Elektronlar için değişebilir kolimatör veya aplikatörler kullanılır.

Düzeltilici filtre simetrik alanlar için yapılmış olup, asimetrik alanlarda kullanıldığında, temel dozimetrik parametrelerde değişiklikler olabilir.

Işın, birincil kolimatör ile şekillendirilip, doz ölçüm birimine (ion chamber) gelir. İyon odası ile doz, doz hızı, düzgünlük ve simetri gibi fiziksel parametreler ölçülür. İkincil kolimatörde bulunan hareketli X ve Y çeneleri ile de tedavi alanları oluşturulur. Şekil 2'de varian cihazına ait kolimatör yapısı verilmiştir (Çakır ve Bilge 2012).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. TLD-600 ve TLD-700 Dozimetreleri

LiF: Mg,Ti dozimetrelerinde bulunan Li'ün ${}^6\text{Li}$ ve ${}^7\text{Li}$ olmak üzere iki doğal kararlı izotopu vardır. TLD-600 ve TLD-700 dozimetreleri fotonötron dozunun ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan TL dozimetrelerdir, bunun nedeni:

- her iki dozimetrede gama dozunuyla ışınladığında, ışımaya eğrileri birbirine yakındır,
- TLD-700'ler sadece fotonlara duyarlı iken TLD-600 dozimetrelerinin fotonlara ve termal nötronlara duyarlıdır,
- TLD-600'lerin termal nötronlara olan cevabı 20Gye kadar lineer davranış sergiler,
- Her iki dozimetre gama ışınıyla ışınladıklarında yaklaşık 3 Gy'e kadar lineer davranış sergilerler (Revol 1999).

Bu çalışmada 27 TLD-700 (LiF-7:Mg,Ti) ve 36 TLD-600 (LiF-6:Mg,Ti) kullanıldı. Kullanılan TLD'lerin içinden tekrarlanabilirlikleri birbirine yakın 13 TLD-700 ve 12 TLD-600 seçildi, bunun için TLD'ler fırınlama ünitesinde 1 saat süre ile 400°C ve 2 saat süre ile 100°C tavlandı, daha sonra gama kaynağı kullanılarak 100 mGy doz alacak şekilde ışınladı ve TLD okuyucu cihazında $\beta=2^\circ\text{C}/\text{saniye}$ ısıtma hızında 350 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak 150 saniye sürede okundu.



Şekil 3.1.1 Deneyler esnasında kullanılmak üzere seçilen TLD-700 ve TLD-600'ler

3.2 Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar

3.2.1 PTW-TLDO fırınlama ünitesi

Yapılan çalışmalarda TLD'lerin ışınlanmadan önce tavlama ve tuzaklarının boşaltılması için PTW-TLDO marka fırın kullanıldı (Şekil 3.2.1.1.). PTW-TLDO fırının 2 programı vardır, birinci program 400°C'de 1saat ve 100 °C'de 2 saat tavlama işlemi yapar, ikinci program 100°C'de 1 saat fırınlama yapar, aynı zamanda bilgisayara bağlanarak RS232 programı yardımıyla kullanılabilir. RS 232 programında 7 farklı tavlama programı vardır. TLD çipleri özel bakır tepsilerde fırının içine yerleştirilir. TLD'lerin kalibrasyonu için fırınlama ünitesinde bulunan 1.program (400°C'de 1saat ve 100°C'de 2saat) kullanıldı.



Şekil 3.2.1.1. PTW-TLDO fırınlama ünitesi

3.2.2 Harshaw TLD3500 okuyucu

TLD'lerin okuma işlemi Harshaw 3500TLD okuyucu cihazı kullanılarak yapıldı. Harshaw 3500TLD okuyucu cihazının tek bir TLD elementi yerleştirilebilecek şekilde tasarlanmış çekmecesini bulunur. Planlanabilir ısıtma sistemi ve fotoçoğaltıcı tüp içerir ve bu sayede TLD çiplerinden çıkan ışığı ölçer. WinREMS yazılım programı ile çalışır ve 400 °C ye kadar ısıtma kabiliyeti vardır. Tez çalışmasında kullanılan okuma parametreleri Çizelge 3.2.2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2.2.1 Harshaw 3500 TLD okuyucu cihazında kullanılan okuma parametreleri

Okuma parametreleri	Isıtma hızı	Maksimum sıcaklık	Isıtma zamanı
	2 °C/saniye	350 °C	150 saniye



Şekil 3.2.2.1 Harshaw 3500 TLD okuyucu

3.2.3 ²⁴¹Am-Be Nötron ışınlama ünitesi

TLD'lerin ışınlanması için Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsünde bulunan 37 GBq (1 Ci) aktiviteli ²⁴¹Am-Be nötron kaynağı kullanıldı (Şekil 3.2.3.1).



Şekil 3.2.3.1 37 GBq ²⁴¹Am-Be nötron ışınlama ünitesi

3.2.4 ¹³⁷Cs Kaynağı

Tezde kullanılan TLD'lerin ışınlaması için 47mCi ve 8,58 Ci nominal Aktivitede iki kaynağı olan ¹³⁷Cs gama ışınlama ünitesi kullanıldı (Şekil 3.2.4.1.). TLD'lerin ışınlanması için 1.kaynak (8,58 Ci) kullanıldı ve TLD'ler kaynaktan 100cm mesafede yerleştirildi. Kaynağın 100cm'de verdiği doz hızı $33 \frac{\mu Gy}{dakika}$, 100mGy doz için ışınlamalar 18018 saniyede yapıldı.



Şekil 3.2.4.1 Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde bulunan ¹³⁷Cs gama kaynağı ışınlama sistemi

3.2.5 Varian Trilogy Rapidarc Lineer Hızlandırıcı

Bu çalışmada Ankara Numune Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Onkoloji kliniğinde bulunan foton enerjileri 6 MV ve 18 MV seviyesinde, elektron enerjileri ise 6, 9, 12, 16, 20 MeV olan ve alan açıklığı $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 'den $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 'ye kadar açılabilen 120 adet MLC (Multi Leaf Collimator)'e sahip VARIAN CLINAC marka lineer hızlandırıcı kullanıldı. Cihazın kalibrasyonu $100\text{MU}=1\text{Gy}$ olacak şekilde ayarlandı.



Şekil 3.2.5.1 Ankara Numune Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Onkoloji Kliniğinde bulunan Varian Trilogy lineer hızlandırıcı

3.2.6 Katı su fantomu

Lineer hızlandırıcı cihazından çıkan X-ışını demetinin maksimum doz noktasını bulmak için RW-3 katı su fantomu kullanıldı (Şekil 3.2.6.1).

RW-3 katı su fantomunun özellikleri:

- yüksek enerjili radyasyon dozimetrisinde kullanılır,

- beyaz polystyrene'den yapılmıştır ve %2 TiO içerir,
- yoğunluğu $1,045 \text{ g/cm}^3$,
- elektron yoğunluğu $3,43 \times 10^{23} \text{ e/cm}^3$,
- 20 MV foton ile 4 MeV'den 25 MeV elektron ışın enerjisi aralığında ölçüm yapılacak şekilde dizayn edilmiştir,
- Boyutları 40x40 cm'dir ve 1, 2, 5 ve 10 mm kalınlıklarındaki levhaları bulunmaktadır (Göksel vd. 2008).



Şekil 3.2.6.1 RW-3 katı su fantomu

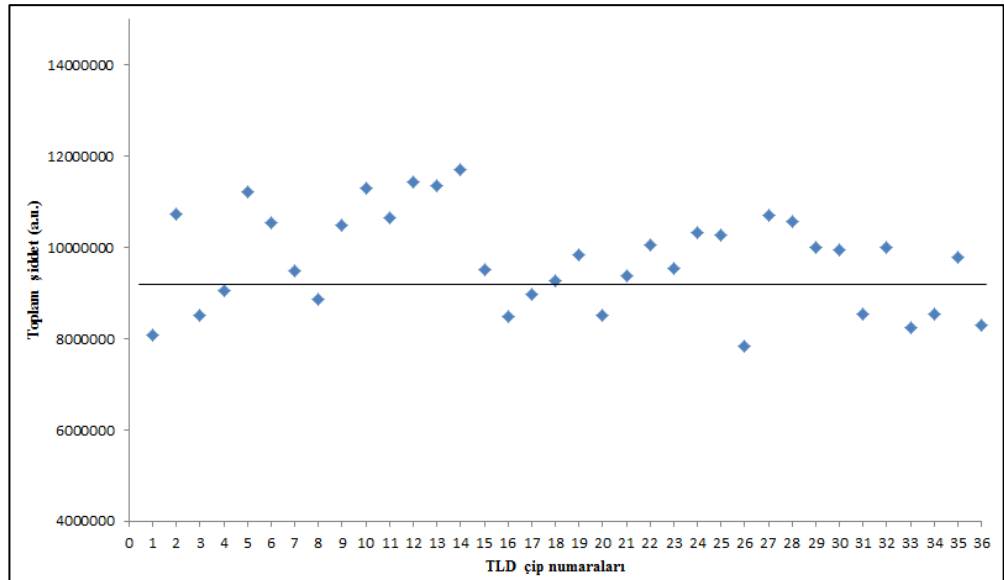
4. BULGULAR

4.1 TLD'lerin Kalibrasyonu

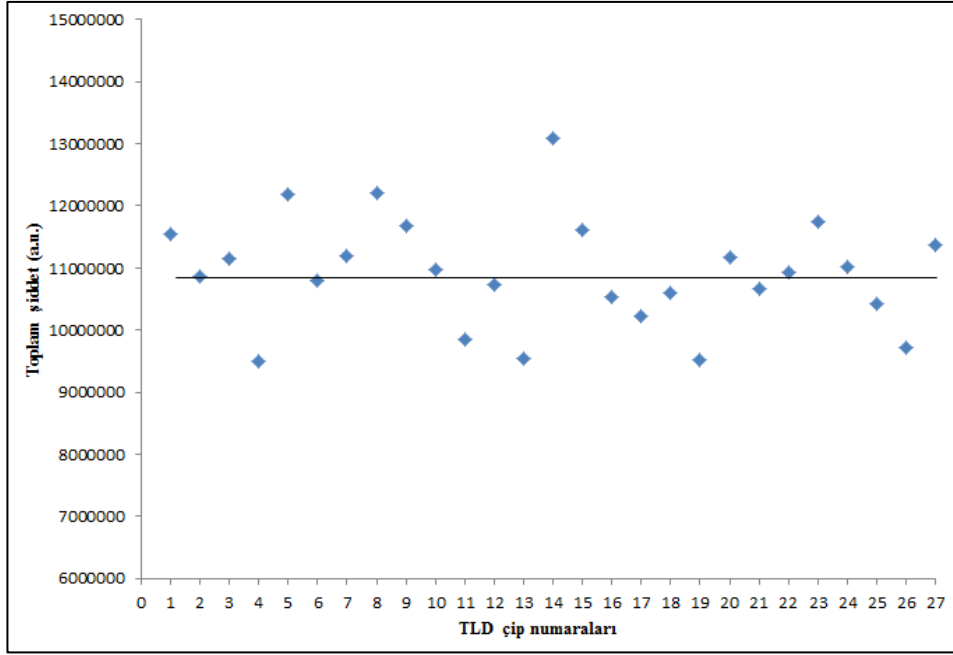
Ölçümlerdeki hata payını minimuma düşürmek için her bir ölçümün birden fazla dozimetre ile yapılması gerekir, seçilen dozimetrelerin aynı miktarda radyasyon dozuna verdikleri cevap birbirine çok yakın olmalıdır.

Bu tez çalışmasında başlangıçta 27 TLD-700 ve 36 TLD-600 kullanıldı ve bu dozimetrelerin arasından tekrarlanabilirlikleri birbirine en yakın 13 TLD-700 ve 12 TLD-600 seçildi. İlk olarak TLD'lerin tuzaklarında bulunan elektronları boşaltmak için fırının birinci programı (400 °C 'de 1saat ve 100 °C 'de 2 saat) ayarlandı ve tavlama işlemi gerçekleştirildi. Fırınlanan TLD'ler Cs-137 kaynağı kullanılarak 100 mGy gama dozuyla ışınlandı. Işınlama işlemi tamamlandıktan sonra TLD'ler okuyucu cihazında (Çizelge 3.2.2.1) okundu.

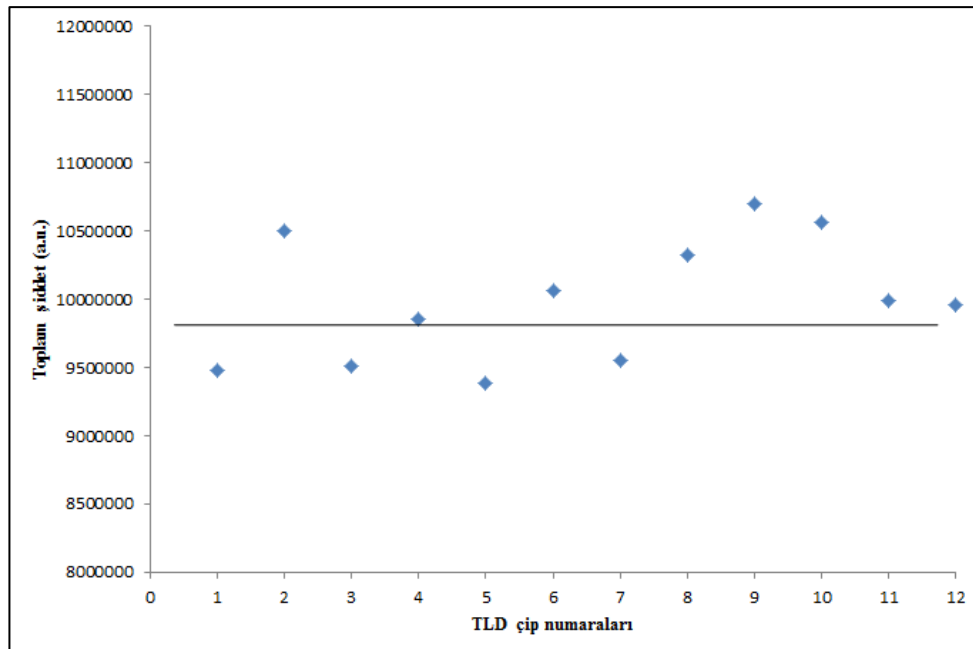
Her TLD'den elde edilen şiddetler toplanarak toplam şiddet-TLD çip numarası grafiği çizildi. Bu noktalara fit edilen çizgiye en yakın TLD'ler seçildi. Bunu yapmamızın amacı ışıma eğrileri birbirine en yakın şiddeti veren TLD'leri seçmektir.



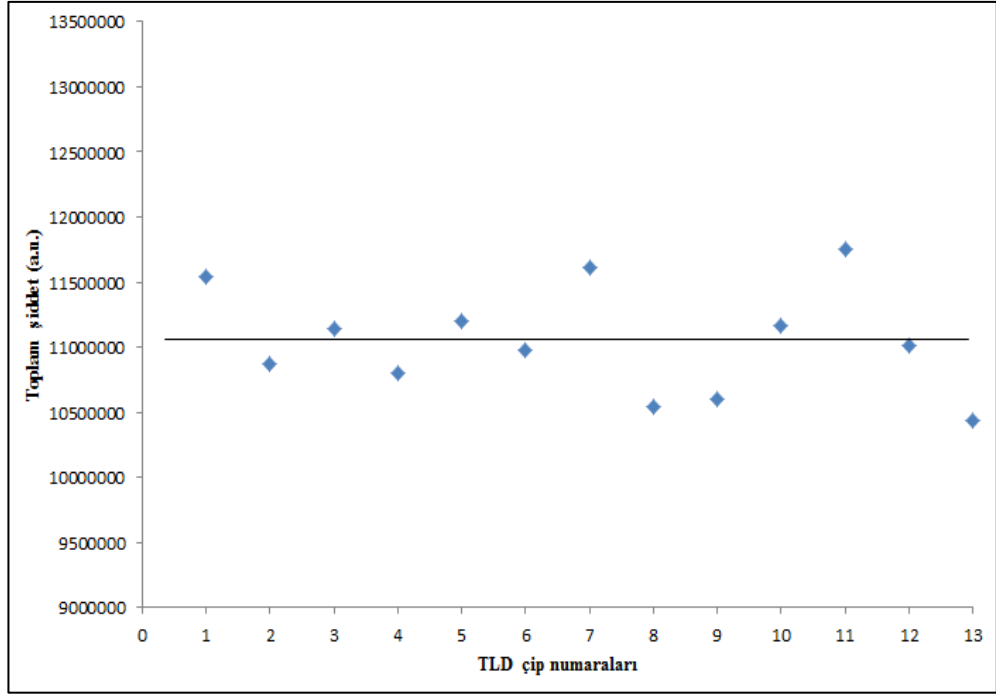
Şekil 4.1.1 400 °C'de 1 saat ve 100°C'de 2 saat fırınlanan ve 100 mGy gama dozunda ışınlanan 36 adet TLD-600'ün toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği



Şekil 4.1.2 400 °C’de 1 saat ve 100°C’de 2 saat fırınlanan ve 100 mGy gama dozunda ışınlanan 27 adet TLD-700’ün toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği

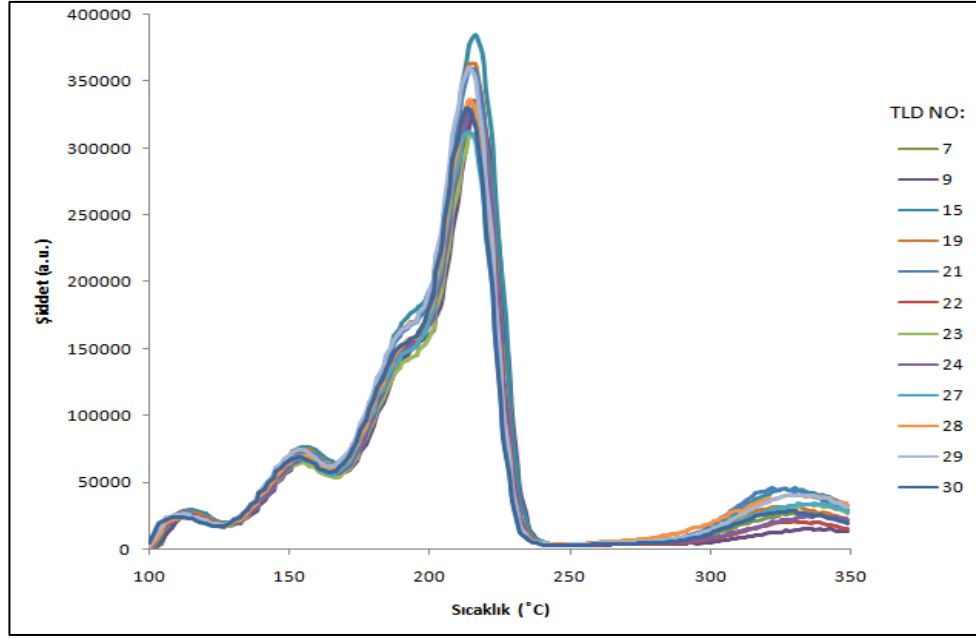


Şekil 4.1.3 100 mGy gama dozunda ışınlanan TLD’lerin arasından seçilen TLD-600’lere ait toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği

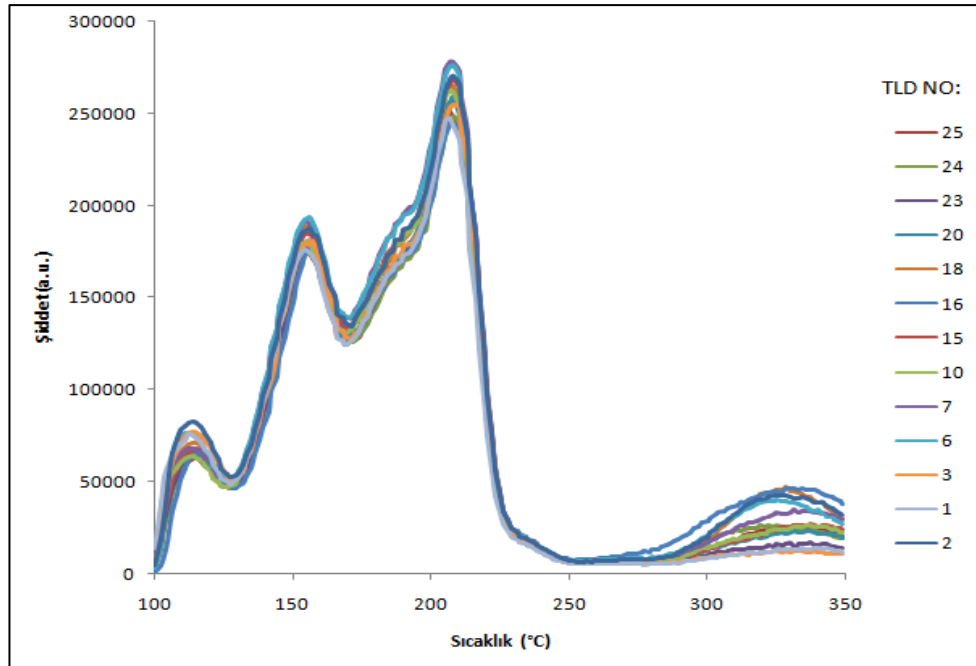


Şekil 4. 1.4 100 mGy gama dozunda ışınlanan TLD'lerin arasından seçilen TLD-700'lere ait toplam şiddetlerinin tekrarlanabilirlik grafiği

Çalışmanın devamında tüm TLD'lerin homojen olarak tavllanması için seçilen TLD'ler ilk olarak fırında 15 dakika 400°C fırınladı ve ardından Harshaw TLD 3500 okuyucu cihazında tavlama amacıyla 2 kere 350°C kadar ısıtıldı. Tavlanan TLD'lere 100 mGy gama dozu verildi. 100 mGy gama dozu ile ışınlanan TLD'ler okuyucu cihazında okundu ve sıcaklık(°C)-şiddet(a.u) grafikleri elde edildi (Şekil 4.1.5).

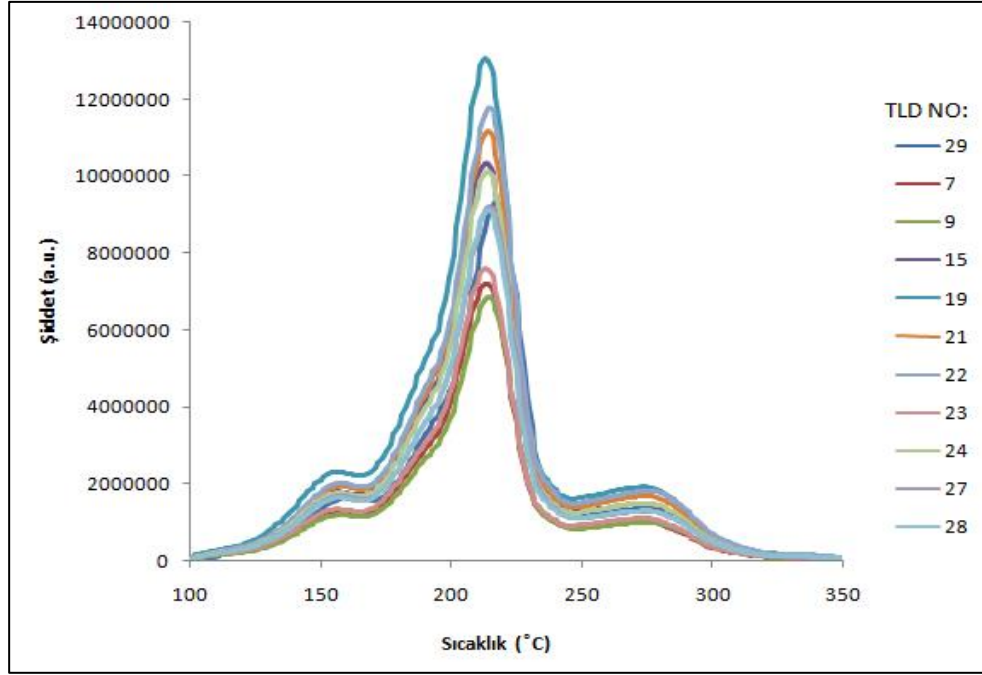


Şekil 4.1.5 Seçilen TLD-600'lerin yeni fırınlama parametreleriyle tavlانیp Cs-137 kaynağında 100mGy dozda ışılandıktan sonra elde edilen ışıma eğrileri

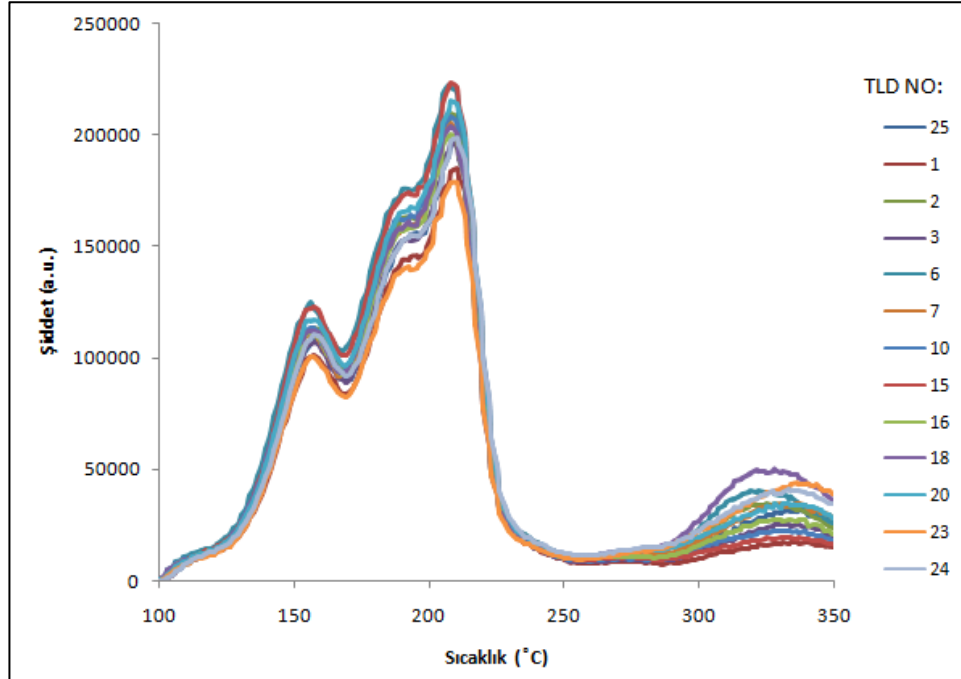


Şekil 4.1.6 Seçilen TLD-700'lerin yeni fırınlama parametreleriyle tavlانیp Cs-137 kaynağında 100mGy dozda ışılandıktan sonra elde edilen ışıma eğrileri

Seçilen TLD'ler nötron kaynağı ile 6mGy doz alacak şekilde ışılandı ve sıcaklık(°C)-şiddet(a.u.) grafikleri çizildi (şekil 4.1.7 ve şekil 4.1.8).



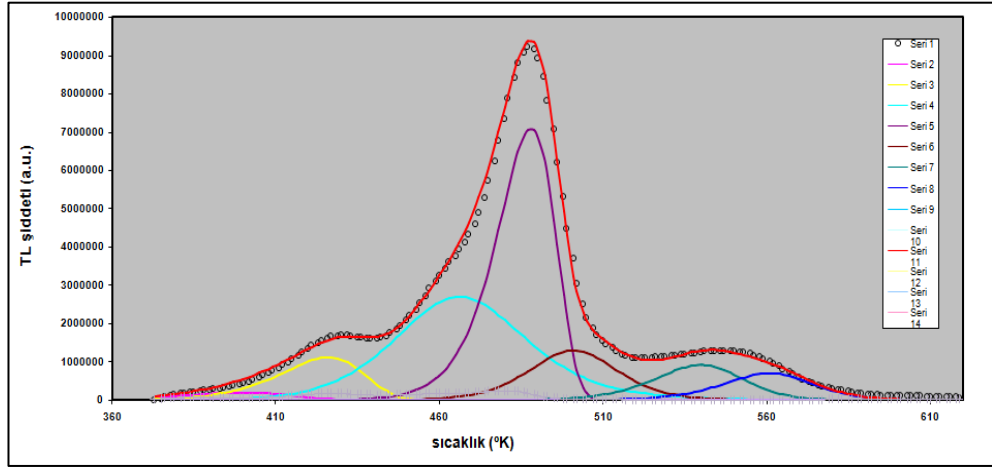
Şekil 4.1.7 15 dakika 400°C ve 2 kere 350°C tavlanan ve nötron kaynağında 10 mGy doza maruz bırakılan TLD-600'lerin ışımaya eğrileri



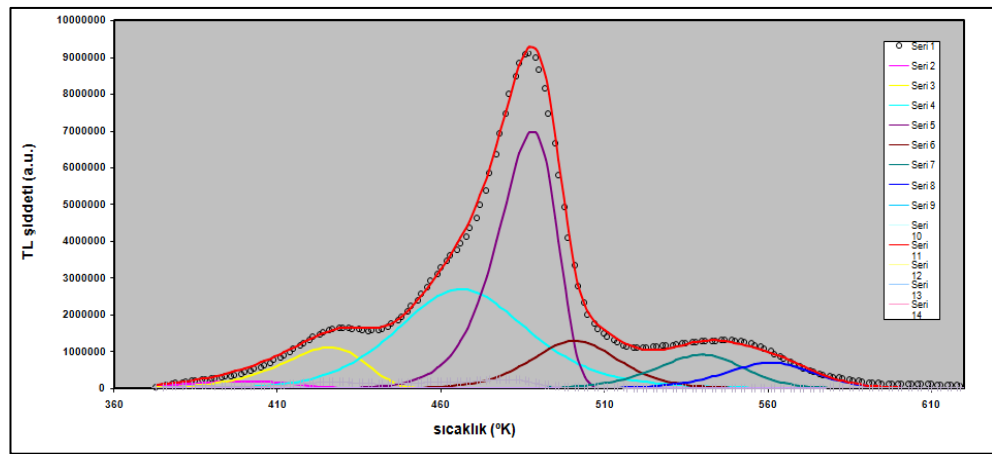
Şekil 4.1.8 15 dakika 400°C ve 2 kere 350°C tavlanan ve nötron kaynağında 10 mGy doza maruz bırakılan TLD-700'lerin ışımaya eğrileri

4.2. Ayırıştırma

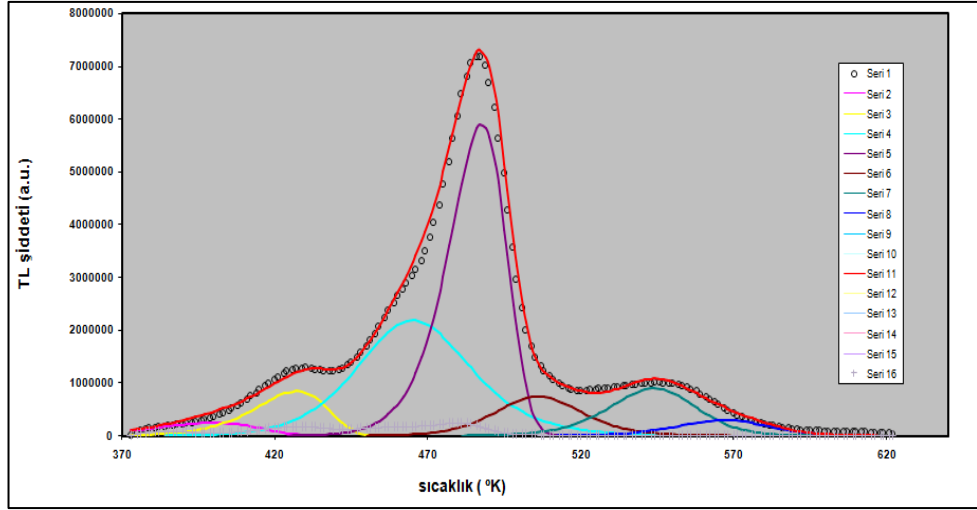
Termoluminesans yöntemi ile elde edilen ışınım eğrileri üst üste binmiş piklerden oluşurlar. Üst üste binmiş pikler birbirinin şiddet değerinde etki edebilir, bu nedenle her bir pikin altında kalan alanı belirlemek için pikleri birbirinden ayırmak gerekir. 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan TLD'ler ayırıştırma programı kullanılarak ayırıştırıldı (Revol 1999). Şekil 4.2.1 ve Şekil 4.2.2'de görüldüğü gibi 4 numaralı pik ana piktir ve nötron dozunun hesaplanmasında kullanılır. Düşük sıcaklıkta ortaya çıkan 3 numaralı pik her zaman 4 numaralı pikin üzerinde etki eder ve pikin sol tarafında bir çıkıntı olarak görünür. Bu iki pikin birbirinin üstüne binmesi nedeni ile üçüncü pik ön ısıtma yöntemi ile ortadan kaldırılamaz. Bunun için ayırıştırma yöntemi kullanılır.



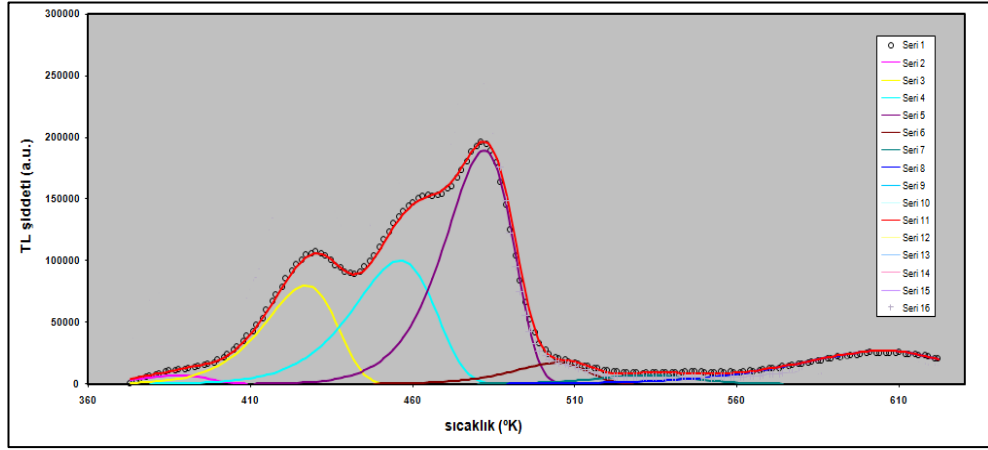
Şekil 4.2.1 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 27 numaralı TLD-600 (${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$)'ün ışınım eğrisinin ayırıştırılmış pikleri



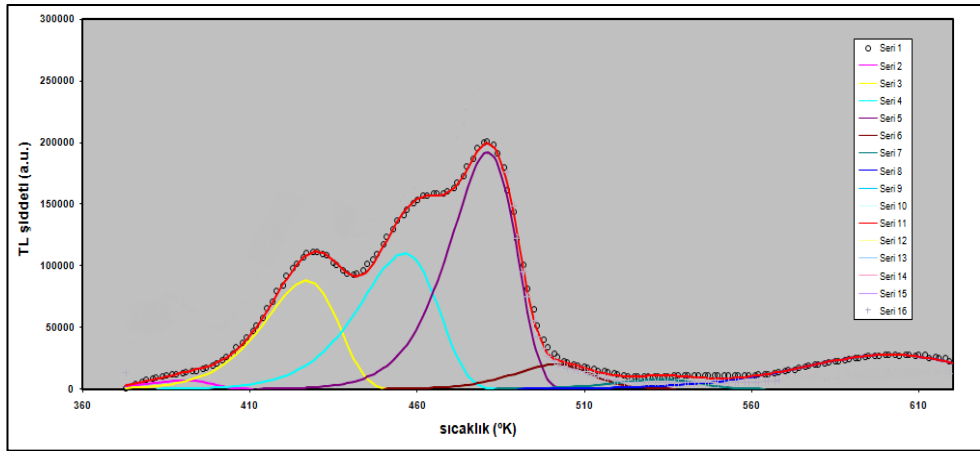
Şekil 4.2.2 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 28 numaralı TLD-600 (${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$)'ün ışınım eğrisinin ayırıştırılmış pikleri



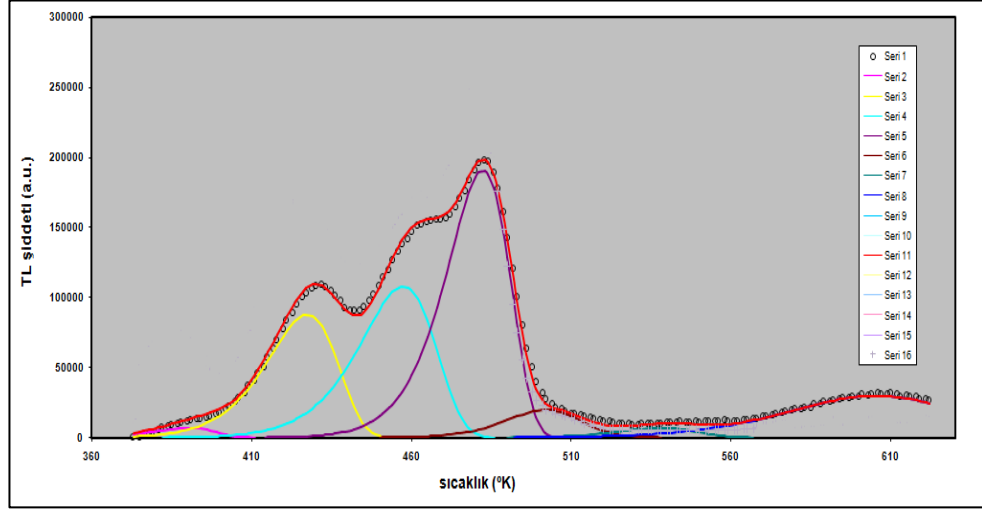
Şekil 4.2.3 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 29 numaralı TLD-600 ($^6\text{LiF:Mg,Ti}$)'ün ışıma eğrisinin ayrıştırılmış pikleri



Şekil 4.2.4 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 3 numaralı TLD-700 ($^7\text{LiF:Mg,Ti}$)'ün ışıma eğrisinin ayrıştırılmış pikleri



Şekil 4.2.5 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 16 numaralı TLD-700 ($^7\text{LiF:Mg,Ti}$)'ün ışıma eğrisinin ayrıştırılmış pikleri



Şekil 4.2.6 10 mGy nötron dozu ile ışınlanan 25 numaralı TLD-700 ($^7\text{LiF:Mg,Ti}$)'ün ışıma eğrisinin ayrıştırılmış pikleri

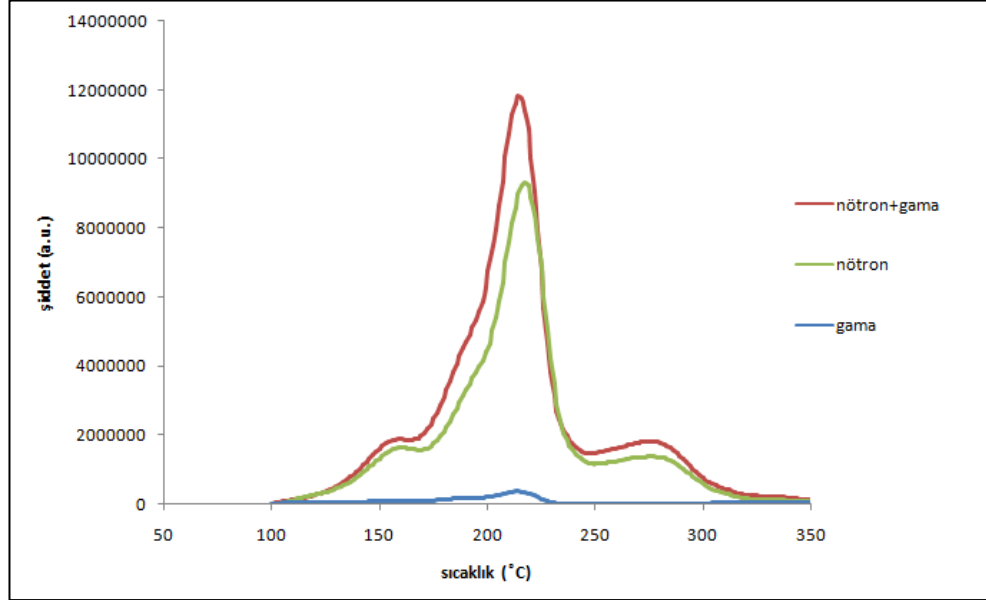
Tüm TLD'lerin arasından 4üncü pikleri (450°K - 500°K aralığında görünen mor renkli pik) birbirine en yakın şiddet değerini veren 3 TLD-600 ve 3 TLD-700 seçildi ve çalışmanın devamı bu TLD'lerle yapıldı. Çizelge 4.2.1 de görüldüğü gibi TLD-600'lerin arasından 27-28-29 numaralı TLD çipleri ve TLD-700'lerin arasından 3-16-25 numaralı piklerin altında kalan alan birbirine çok yakın, bu nedenle çalışmanın devamı için bu çipler kullanıldı.

Çizelge 4.2.1 Nötron kaynağında ışınlanan TLD' lerin 4 numaralı piklerinin integrali

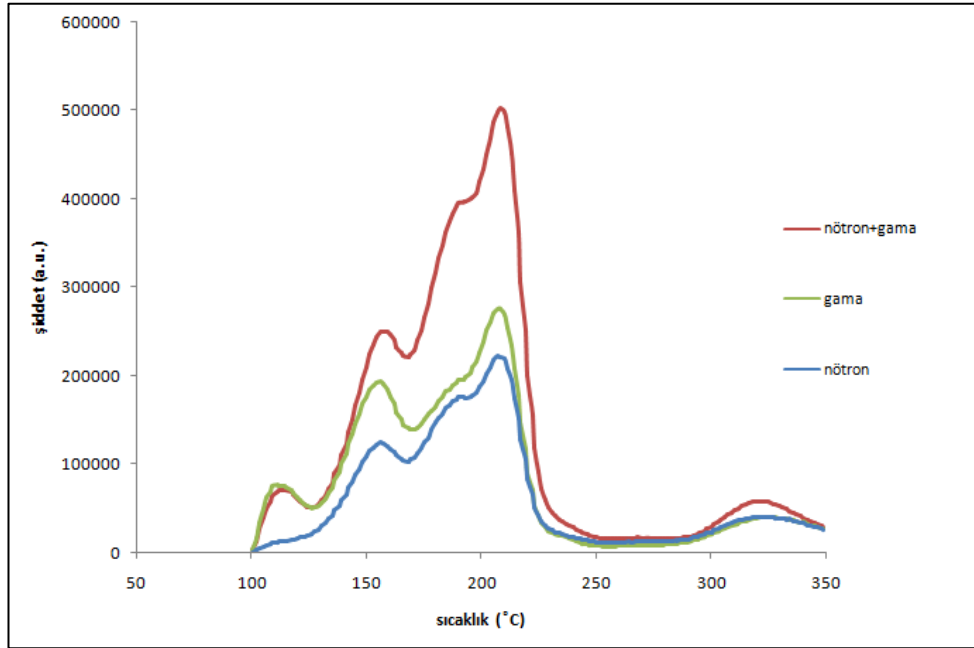
TLD-600		TLD-700	
TLD çip numarası	4.pikin altında kalan alan	TLD çip numarası	4.pikin altında kalan alan
7	96533766,31	1	4066406,962
9	82779593,17	2	3436806,549
15	125224889,1	3	3382472,8
19	152447684,3	6	3735564,577
21	124950329,3	7	3474943,793
22	129114892,4	10	3474943,793
23	87289011,58	15	3898779,879
24	108224734,8	16	3335946,041
27	114893417,3	18	3422819,636
28	119331538,1	20	3835317,662
29	116005385,9	23	2994556,109
30	150848445,9	24	3482260,142
		25	3336205,635

Seçilen 6 TLD tavlama amacı ile fırınlama ünitesinde 15 dakika 400°C fırınlandı ve ardından Harshaw TLD 3500 okuyucu cihazında 2 kere 350°C kadar ısıtıldı ve daha sonra gama kaynağında 100 mGy gama doz alacak şekilde ışınlandı ve sıcaklık(°C)-şiddet(a.u) grafikleri çizildi. Daha sonra aynı TLD'ler yukarıda belirtilen tavlama yöntemi ile fırınlandı ve nötron kaynağında 10 mGy nötron dozu verilerek sıcaklık(°C)-şiddet(a.u) grafikleri çizildi. Son olarak TLD'lere tavlama işlemi uygulanarak 100 mGy gama dozu aldıktan sonra 10 mGy nötron dozuna maruz bırakıldı ve sıcaklık(°C)-şiddet(a.u) grafikleri çizildi. Elde edilen grafikler üst üste çizildi (Şekil 4.2.7) (Şekil

4.2.8). TLD'lerin okuma işlemleri TLD okuyucu cihazı kullanılarak Çizelge 3.2.2'de belirtilen parametrelerde yapıldı.



Şekil 4.2.7 Nötron, gama ve nötron-gama karışımı radyasyon alanlarında ışınlanan TLD-600'lere ait ışımaya eğrileri



Şekil 4.2.8 Nötron, gama ve nötron-gama karışımı radyasyon alanlarında ışınlanan TLD-700'lere ait ışımaya eğrileri

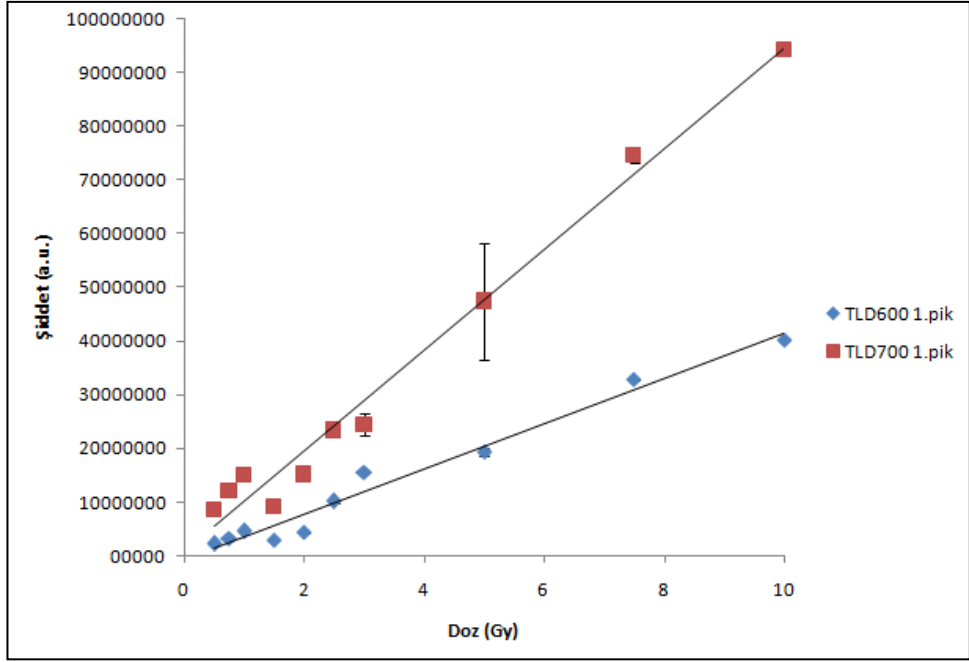
Garfiklerden de görüldüğü gibi TLD-600'ler TLD-700'lere göre nötron dozuna karşı yüksek derecede hassasiyet gösteriyor. Her iki TLD'nin yaklaşık 200-250 °C aralığında bulunan pikleri nötron dozunun ölçümünde kullanılır.

4.3. Doz Cevabı

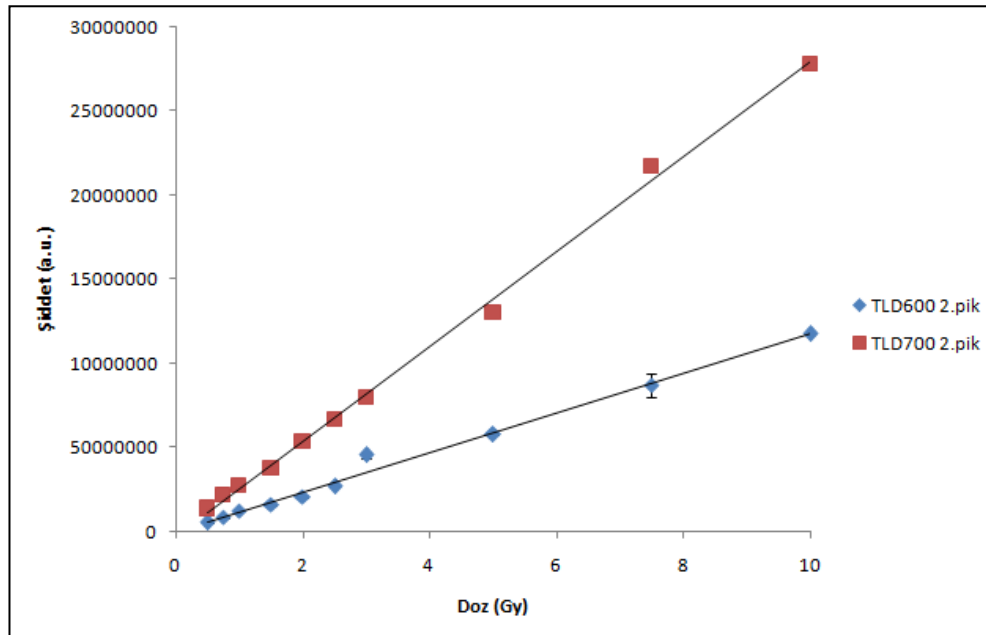
$$f(D) = \frac{(Q(D)/D)}{(Q(D_1)/D_1)}$$

Doz cevap eğrisini çizmek için seçilen 3 TLD-600 ve 3 TLD-700 kullanıldı. TLD'ler fırınlama ünitesinde 15 dakika 400°C fırımlandı ve ardından Harshaw TLD 3500 okuyucu cihazında 2 kere 350°C kadar ısıtıldı, daha sonra lineer hızlandırıcı cihazında 18 MV'luk X-ışınları ile 0,5Gy, 0,75Gy, 1Gy, 1,5Gy, 2Gy, 2,5Gy, 3Gy, 5Gy, 7,5Gy, 10 Gy olmak üzere 10 farklı dozda ışınladı. Bu ölçümleri almak için TLD'lerin altına 5cm katı su fantomu yerleştirildi (Bu durumda fantomdan saçılan radyasyon hastadan saçılan radyasyonla eşdeğer olacaktır) TLD'ler birer birer plastik kapın orta kısmındaki boşluğa yerleştirildi ve ışın merkezine denk gelecek şekilde konuldu, plastik kapın üzerine 3,5 cm (Hastanede bulunan cihazın doz maksimum derinliği) kalınlığında katı su fantomu yerleştirildi.

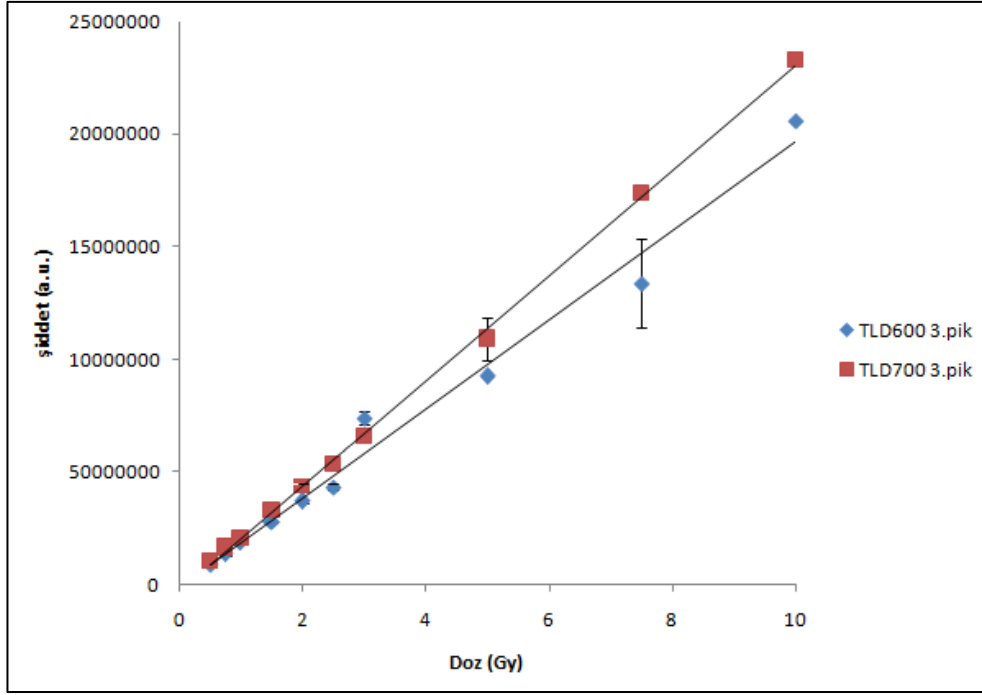
Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD'ler TLD okuma cihazında okundu ve elde edilen ışımaya eğrileri çizildi. Üç TLD çipinden elde edilen ışımaya eğrileri ortalaması alındıktan sonra ayrıştırma programı kullanılarak ayrıştırıldı. TLD'lere ait ışımaya eğrileri yedi farklı pikin üst üste binmesinden oluştu. Her pike ait doz-cevap eğrisi ayrı ayrı grafiklerde çizildi ve standart sapmaları hesaplanarak uygulandı (Şekil 4.3.1-4.3.7). Grafiklerdeki hatalar her çipe ait ışımaya eğrilerinin ayrıştırma programı ile ayrıştırılıp üç çipin standart sapması bulunarak elde edildi.



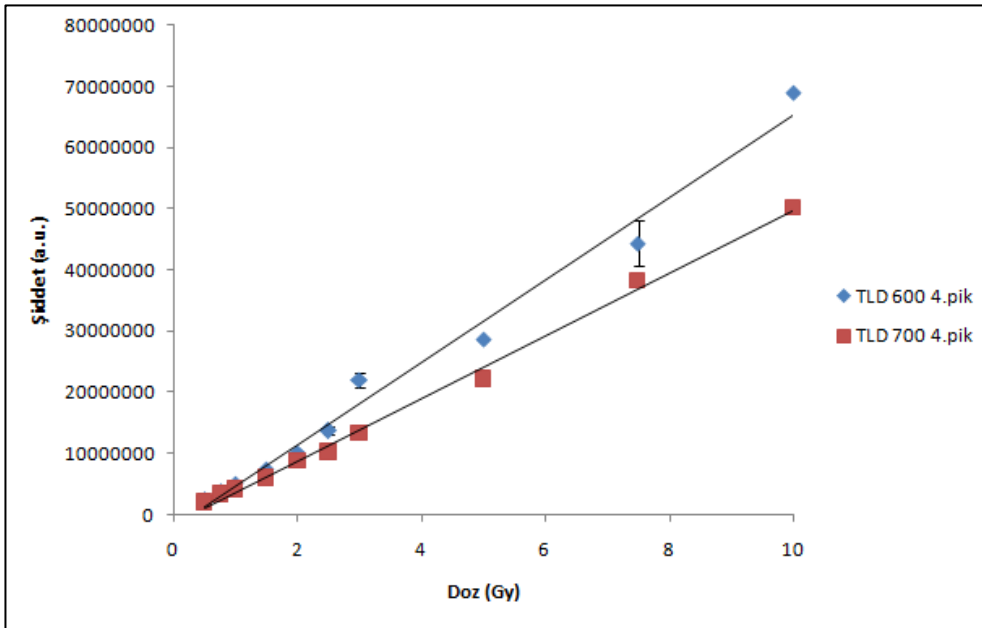
Şekil 4.3.1 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin birinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri



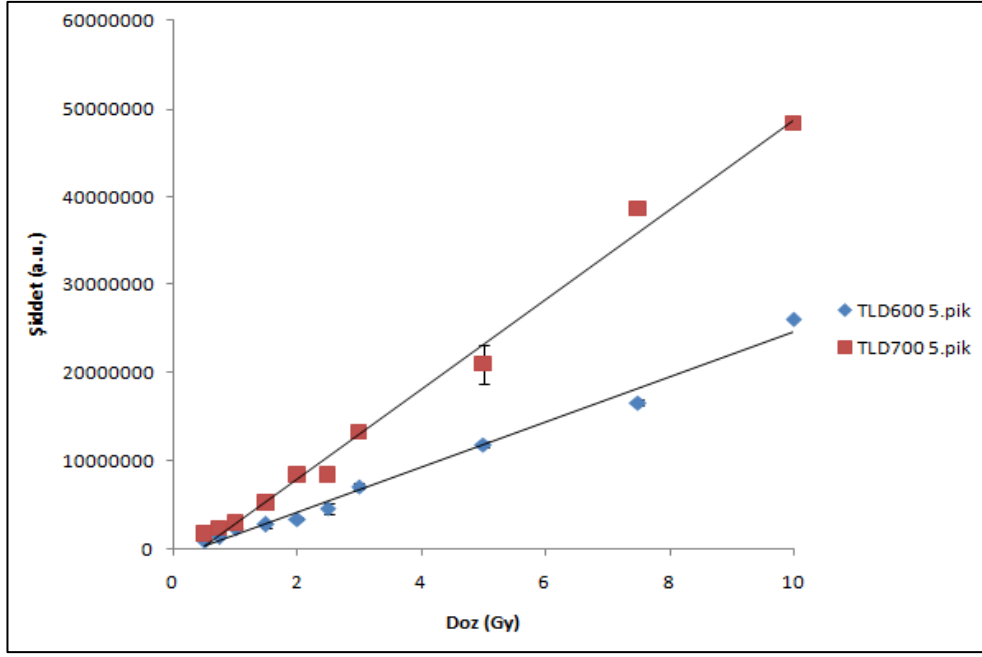
Şekil 4.3.2 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin ikinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri



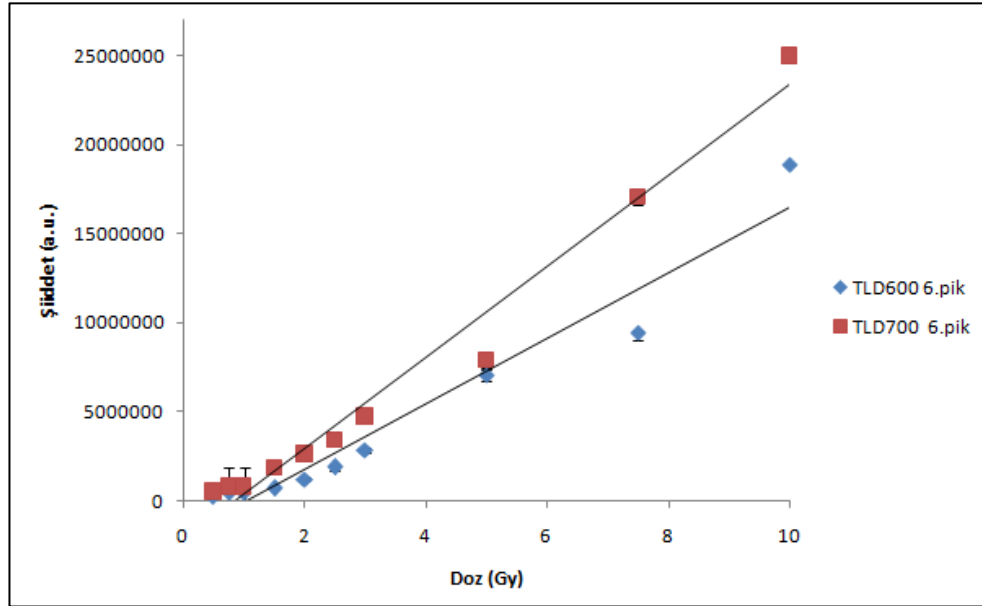
Şekil 4.3.3 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin üçüncü piklerine ait Doz-Cevap eğrileri



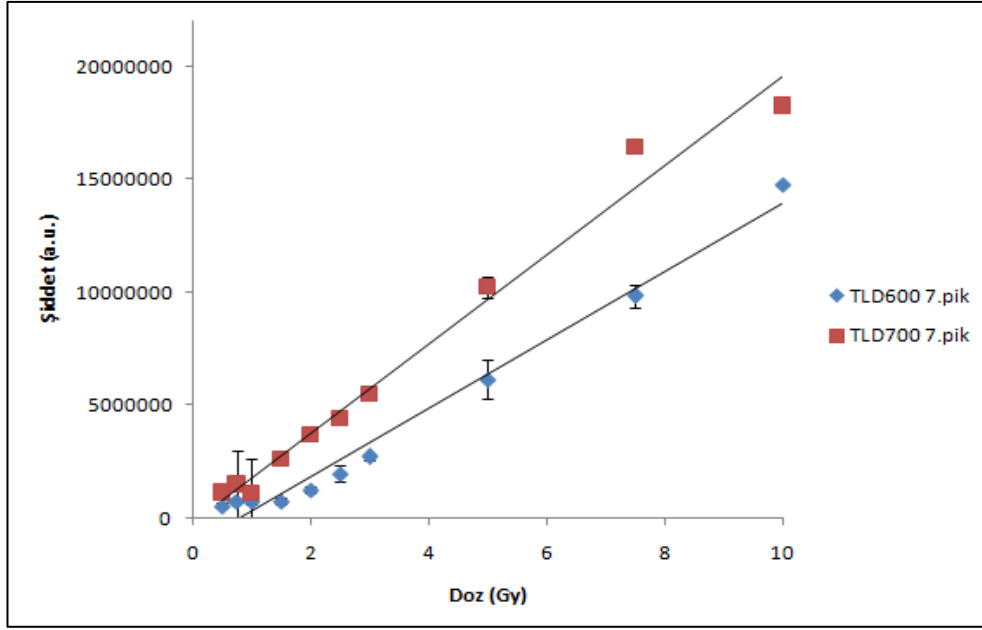
Şekil 4.3.4 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin dördüncü piklerine ait Doz-Cevap eğrileri



Şekil 4.3.5 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin beşinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri

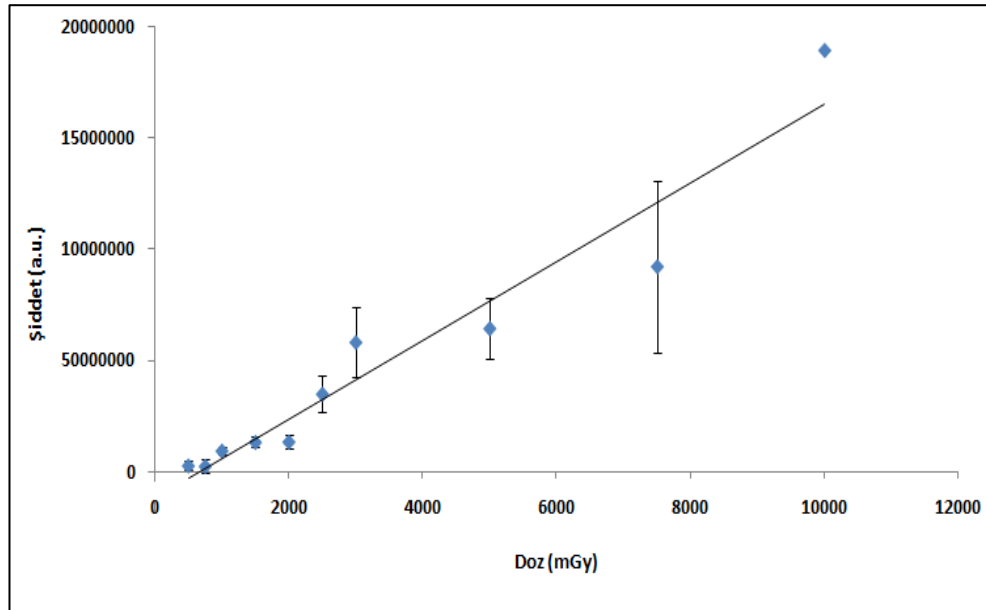


Şekil 4.3.6 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin altıncı piklerine ait Doz-Cevap eğrileri



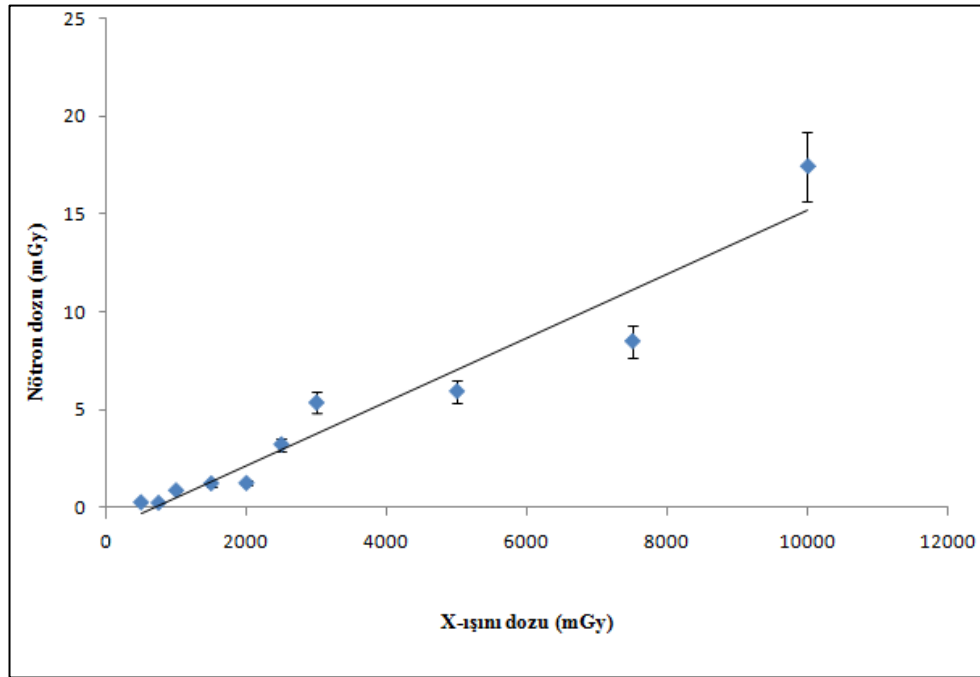
Şekil 4.3.7 Lineer hızlandırıcıda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin yedinci piklerine ait Doz-Cevap eğrileri

Grafiklerden de görüldüğü gibi TLD-600'lerin dördüncü pikine ait Doz-Cevap eğrisinin eğimi TLD-700'lere göre daha fazladır ve bu da TLD-600 dozimetrelerinde dördüncü pikin nötrona daha fazla duyarlı olduğunu gösterir. TLD-600 ve TLD-700 dozimetrelerinin dördüncü piklerine ait şiddetleri birbirinden çıkardığımız zaman TLD'lerin nötronlara karşı verdiği Doz-cevap eğrileri elde edilir.



Şekil 4.3.8 Lineer hızlandırıcıda 18 MV X-ışını enerjisinde farklı dozlarda ışınlanan TLD-700 ve TLD-600 dozimetrelerinin nötron dozuna ait Doz-Cevap eğrileri

Lineer hızlandırıcıdan elde edilen doz cevap eğrisinde X-ışınlarına karşılık gelen nötron dozunu belirlemek için nötronla ışınlanan TLD'lerden elde edilen sonuçlar kullanıldı. Nötron kaynağında 36 gün ışınlanan TLD-600 ve TLD-700'lerden elde edilen ışınma eğrileri ayrıştırma yöntemi ile ayrıştırıldı. Lineer hızlandırıcıdan ölçüm almak üzere seçilen üç TLD-600 ve üç TLD-700'e ait dördüncü pikinin şiddetleri birbirinden çıkarıldı. Böylelikle elde edilen şiddet değeri 10 mGy nötron dozuna (36 gün) denk gelmektedir. Daha sonra farklı X-ışını dozlarında (0,5Gy, 0,75Gy, 1Gy, 1,5Gy, 2Gy, 2,5Gy, 3Gy, 5Gy, 7,5Gy, 10 Gy) ışınlanan altı TLD den elde edilen ve 4üncü pike denk gelen şiddet değerleri birbirinden çıkarıldı ve nötrona ait şiddet değerleri elde edildi. Her X-ışını dozuna karşılık gelen nötron dozu elde edildi ve X ışını-Nötron dozu grafiği çizildi.



Şekil 4.3.9 Lineer hızlandırıcıda 18 MV X-ışını enerjisinde farklı dozlarda ışınlanan TLD-600 ve TLD-700'lerden elde edilen nötron dozları

Çizelge 4.3.1 Lineer hızlandırıcıda farklı dozlarda ışınlanan TLD-600 ve TLD-700 lerden elde edilen nötron dozları ve ona karşılık gelen TL ışımaya şiddetleri

X-ışını dozu (mGy)	Nötron dozu (mGy)	Nötronlardan elde edilen sayım (a.u.)
500	0,257	2791067
750	0,235	2547463
1000	0,868	9432491
1500	1,226	13329339
2000	1,242	13502199
2500	3,22	35009791
3000	0,5358	58233266
5000	0,593	64458746
7500	0,8488	92260519
10000	17,42	189378172

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Lineer hızlandırıcılarda tedavi edilen hastalarda ikincil radyasyon, özellikle yüksüz parçacıklar tedavi alanının dışındaki organlarda soğurularak gelecekte ikincil kanser riski yaratırlar. İkincil iyonlaştırıcı radyasyonun dedeksiyonu ve tedavi dozundaki katkı payını belirlemek çok zor ve karışıktır. Özellikle YART (yoğunluk ayarlı radyoterapi) uygulamalarında ışınlama süresinin artmasından dolayı 18MV foton enerjisinin kullanılması durumunda nötron saçılmalarından kaynaklı etkin doz değerleri ve ikincil kanser riski ihmal edilemez düzeydedir. Bu nedenle YART uygulamalarında 18 MV foton enerjisinin kullanılması durumunda bu değerlerin göz önüne alınması gerekir.

Bu tez çalışmasında ışınma eğrileri birbirine yakın olan TLD-700 (LiF-7:Mg,Ti) ve TLD-600 (LiF-6:Mg,Ti) kullanıldı. Ölçümler yüzeyde doz maksimum noktasında (3,5 cm katı su fantomu kullanılarak) ve SSD 100 cm'de alındı. Şekil 4.3.1-4.3.7, ışınma eğrilerinde bulunan her pike ait doz-cevap eğrilerini gösterir. Bu grafikler karşılaştırıldığı zaman Şekil 4.3.4 grafiğinde TLD-600'lere ait doz-cevap eğrisinin eğimi TLD-700'lere göre daha yüksektir, bu da ışınma eğrisini oluşturan dördüncü pikin nötron dozuna daha hassas olduğunu ve bu pikin nötron dozunun ölçülmesinde neden kullanıldığını gösterir. Lineer hızlandırıcıda 18 MV'luk enerjili X-ışınlarından elde edilen Doz-cevap eğrisi Şekil 4.3.8'de gösterilmiştir. Doz-cevap eğrisi düşük dozlarda lineer bir davranış sergilemektedir, 3Gy'in üzerindeki bölgelerde lineerlikten sapmalar gözlenmektedir.

Şekil 4.3.9 ve Çizelge 4.3.1 ışınlanan farklı X-ışını dozlarına karşılık bulunan nötron dozlarını vermektedir. Bu verilere göre, nötronun tedavi dozuna olan katkısı tedavi dozu arttıkça artmaktadır. Nötronun tedavi dozuna olan katkısı yaklaşık olarak %0,113'tür. 10 rad (0,1Gy) ve altı radyasyon dozlarında biyolojik etkinin göz ardı edilecek kadar az olduğu veya olmadığını (HPS 1996) göz önünde bulundurursak bu değer uygulanan tedavi dozunu etkilemeyecektir ve ikincil kanser riski olmayacaktır.

Nötron saçılmalarından kaynaklı dozun bilinmesi tedavinin doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, radyoterapi alanında kullanılan Varian marka lineer hızlandırıcılarda oluşan nötron dozu ve bu dozun hastaların tedavi dozuna etkisini değerlendirmekte yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Afouxenidis, D., Polymeris, G. S., Tsirliganis, N. C., Kitis, G., Computerised Curve Deconvolution of TL/OSL Curves Using a Popular Spreadsheet Program, *Radiation Protection Dosimetry* (2012), Vol. 149, No. 4, pp. 363–370 Advance Access publication 15 July 2011
- Aitken, M.J. 1985. *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, London.
- Anderson, S. E., 2010. *Neutron Spectrometry Techniques for Fusion Plasmas Instrumentation and Performance*. Doktora Tezi, Uppsala University, Sweden.
- Anderson, S. E., 2010. *Evaluation of the Radiation Protection at the New Radiotherapy Treatment Department at the University Hospital of Umeå*. Master thesis. University of UMEA
- Aşlar, E., Şahiner, E., Meriç, N., Polymeris, G.S., George Kitis, “Deconvolution analysis of natural thermally assisted OSL signal from quartz” , *International Conference on Luminescence and ESR Dosimetry (LumiDoz 8)* , Ankara, August 27 – 29, 2014.
- Balarin, M., 1975. Direct Evaluation of Activation Energy From Half Width of Glow Peaks and a Special Nomogram. *Phys. Stat. Sol. (a)* 31, K111-K114
- Barış, A. 2013. *Grafit Kaynaklı Kurşun Kalemlerin Geriye Dönük Dozimetre Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü. Sayfalar: 7,16.
- Bauk, S., Shah Alam, Md. And Alzoubi, A. 2011. Low-dose Response of LiF:Mg;Ti Dosimeters Exposed to 80 kVp X-rays. *Journal of Physical Science*. Vol. 22(1), 37–42, 2011.
- Bos, A. J. J. 2007. *Theory of thermoluminescence*, *Radiation Measurements* 41 (2007). S45 – S56.
- Chaplin, R.A. 2009. *Nuclear Energy Materials and Reactors-Vol.I- Nuclear interactions*. Eolss publishers, Oxford United Kingdom, Pages: 120-122.
- Çakır, A. Ve Bilge, H. 2012. Çok Yapraklı Lineer Hızlandırıcılarda Kolimatör Tasarımlarının Klinik Önemi, *Türk Onkoloji Dergisi* 27(1), Sayfalar: 46-54.
- Göksel, E.O. Okutan, M. Çakır, A. Bilge, H., Kolimatör Dizaynlarının Elektron Demetlerinin Derin Doz Dağılımlarına Etkisinin Araştırılması, *Türk Onkoloji Dergisi*, Cilt 23, Sayı 4, Sayfalar: 182-188
- Health Physics Society (HPS). *Radiation Risk in Perspective: Position Statement of the Health Physics Society (adopted January 1996)* Health Physics Society Directory and Handbook, 1998-1999: p 238.

- Josea, M.T., Anishia, S.R., Annalakshmi, O. And Ramasamy, V. 2011. Determination of Thermoluminescence Kinetic Parameters of Thulium Doped Lithium Calcium Borate, *Radiation Measurements* Vol.46, 1026-1032.
- Kaplan, A, Akkurt, I, Foton Radyoterapide Medikal LINAC’da Oluşan Fotonötronların Ölçümü. *S.D.Ü. Fen Bil. Enstitüsü Dergisi*, 2006, Sayafa: 10-1.
- Karadağ, M. 1998. 3x16 Ci Am-Be İzotopik Nötron Kaynağı Kullanılarak Nötron Aktivasyon Analizi ile Elementel Dedeksiyon Limiti Tayini, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Sayfalar: 9-11.
- Khan, F.M. 2003. *The Physics of Radiation Therapy* Third Edition, Sayfalar: 144-146.
- Khan, F. M., 1994. *The Physics of Radiation Therapy*, Second Edition. Williams & Wilkins, Maryland, USA.
- Kolesnikov, N. 2012. *Modern Aspects of Bulk Crystal and Thin Film Preparation*. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia.
- McKeever, S.W.S. 1985. *Thermoluminescence of Solids*, Cambridge Solide State Science Series, New York, USA, Pages: 1-8.
- McKeever, S.W.S. and Moscovitch, M. And Townsend, P.D. 1995. *Thermoluminescence dosimetry materials. Properties and uses*, Nuclear Technology Publishing; Ashford (United Kingdom).
- Nur, N. 2010. *Ametistlerin Termolüminesans Yöntemiyle Dozimetrik Karakteristiğinin Analiz Edilmesi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Revol, j.p. 1999. Neutron-Driven Nuclear Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing. *The Tarc Experiment (PS 211)*, Pages: 118-125
- Shah Alam, M. And Bauk, S. 2010. The Effect of the Activation Energy, Frequency Factor and the Initial Concentration of Filled Traps on the TL Glow Curves of Thermoluminescence, *Adv. Studies Theor. Phys.*, Vol. 4(14), 665 – 678.
- Soliman, C. And 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.
- Vandenbergh, D. 2004. *Investigation of the Optically Stimulated Luminescence Dating Method for Application to Young Geological Sediments*, PhD thesis, University of Ghent.
- Wintle, A.G. 1997. *Luminescence Dating: Laboratory Procedures and Protocols*, *Radiat. Meas*, 27, 769-817.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sanaz HENDİ

Doğum Yeri : İran, Oroumıyeh

Doğum Tarihi : 16.04.1983

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu:

Lise : Alzahra Koleji, Oroumıyeh, İRAN (2001)

Lisans : Islamic Azad University of Urmia, Fizik bölümü (2009)

E-posta : sanaz.hendi@gmail.com